



Comune di Livorno



Autorità Portuale Livorno

## VARIANTE ANTICIPATRICE AL PIANO STRUTTURALE E REGOLAMENTO URBANISTICO PER L'APPROVAZIONE DEL PIANO REGOLATORE DEL PORTO DI LIVORNO



### RELAZIONE GEOLOGICA ai sensi del D.P.G.R. Toscana n. 53/R/2011

Coordinamento Studi geologici  
Responsabile del Procedimento  
Dott. Geol. Leonardo Gonnelli

Incaricato da Autorità Portuale  
Dott. Geol. Antonio Rafanelli

Equipe di Lavoro:  
Dott. Michele Danzi  
Dott. Geol. Alessio Tanda  
Ing. Lorenzo Lazzerni  
Dott. Alessandro Ursi

*Maggio 2013*



Comune di Livorno  
Ufficio Strategie Ambientali - Piazza del Municipio, 1  
Tel. 0586 820144 – e.mail [lgonnelli@comune.livorno.it](mailto:lgonnelli@comune.livorno.it)

## INDICE

---



## RELAZIONE GEOLOGICA

### Introduzione

La natura della variante anticipatrice del PRG Porto di Livorno  
Gli obiettivi specifici del Piano Regolatore del Porto di Livorno  
Limiti geografici dell'area di studio

## CAPITOLO 1

### Reperimento, classificazione e sistematizzazione dei dati, Attività di ricerca

- 1.1 La ricognizione dei dati e le fonti bibliografiche di ricerca
- 1.2 La metodologia di studio

## CAPITOLO 2

### Geologia, geomorfologia, elementi stratigrafici

- 2.1 Uno sguardo alla geologia regionale
- 2.2 *Gli affioramenti geologici nell'area in studio*
- 2.3 Geomorfologia dell'area emersa e forme delle aree subacquee
- 2.4 Ricostruzione lito-stratigrafica dell'areale
  - 2.4.1 Gli elementi lito-stratigrafici della Piana di Pisa
  - 2.4.2 Elementi lito-stratigrafici generali della Piana di Livorno
- 2.5 Gli elementi stratigrafici ed i relativi ambienti deposizionali
- 2.6 Descrizione delle correlazioni lito-stratigrafiche eseguite
- 2.7 Conclusioni sintetiche sulle caratteristiche stratigrafiche dell'areale

## CAPITOLO 3

### Inquadramento paleogeografico ed evoluzione storica dell'areale

- 3.1 Evoluzione paleogeografica dell'areale in studio
- 3.2 Evoluzione dell'area negli ultimi 6.000 anni
- 3.3 Esiti della ricerca storiografica condotta nell'area in esame
- 3.4 Cronogramma sintetico dell'evoluzione storica
- 3.5 Conclusioni agli studi storici in relazione alle informazioni stratigrafiche

## CAPITOLO 4

### Caratteri geotecnici degli spessori

## **CAPITOLO 5**

### **Caratterizzazione idrogeologica dell'area**

- 5.1 Definizione dell'area di studio sotto il profilo idrogeologico ed in base alle alimentazioni e/o ricariche idrauliche potenziali
- 5.2 Quadro conoscitivo idrogeologico generale dell'area
- 5.3 Caratteristiche di permeabilità degli spessori e i terreni acquiferi nell'areale in esame
- 5.4 I contesti idrogeologici contigui all'area in esame – elementi di interesse
  - 5.4.1 Studio idrogeologico della Piana di Livorno
  - 5.4.2 Studio idrogeologico campo pozzi in Località Grecciano
  - 5.4.3 Studio idrogeologico dell'area di Mortaiolo
  - 5.4.4 Studio per la richiesta di deroga ai valori limite dei requisiti chimici delle acque destinate al consumo umano – Zona di Tombolo (PI)
- 5.5 Analisi degli scorrimenti superficiali
- 5.6 La campagna di rilevamento idrogeologico
  - 5.6.1 Livelli degli acquiferi
- 5.7 Il chimismo delle acque sotterranee
- 5.8 Le componenti idrogeologiche del sistema
- 5.9 Le aree di alimentazione e/o ricarica
- 5.10 La lettura sintetica del territorio in chiave idrogeologica
- 5.11 Conclusioni della parte idrogeologica

## **CAPITOLO 6**

### **Pericolosità geomorfologica, idrogeologica, idraulica, sismica**

- 6.1 Aree a pericolosità geomorfologica
- 6.2 Aree a pericolosità idraulica
- 6.3 Aree a pericolosità sismica locale
- 6.4 Aree con problematiche idrogeologiche
- 6.5 Aree con problematicità di dinamica costiera

## **CAPITOLO 7**

### **Fattibilità geomorfologica, idraulica, sismica**

- 7.1 Fattibilità geomorfologica
- 7.2 Fattibilità idraulica
- 7.3 Fattibilità sismica
- 7.4 Sintesi delle fattibilità geologico-tecniche
- 7.5 Definizione della tipologia degli approfondimenti di indagine

### **Bibliografia e lavori consultati**



COMUNE DI LIVORNO  
AUTORITA' PORTUALE DI LIVORNO

VARIANTE ANTICIPATRICE AL PIANO STRUTTURALE  
E REGOLAMENTO URBANISTICO  
PER L'APPROVAZIONE DEL PIANO REGOLATORE DEL  
PORTO DI LIVORNO

RELAZIONE GEOLOGICA



*Il numero delle navi ed altri bastimenti, che si trovano in questa darsena per accomodarsi, e quelli del molo e rada è così eccedente, che non vi è memoria d'uomo che si ricordi di cosa simile, poiché sorpassa il numero di ottocento legni e giornalmente ne giungono da ogni parte*

**da: Cronaca di Bernardo Prato, 1767**

*La naturale costruzione idrografica della carta, l'esposizione del porto coll'apertura volta a ponente, hanno continuato a far difficile l'entroterra delle navi, specialmente quando il gran numero di esse, che da ogni parte si affluiva, lo ha reso angusto, e lo accrescersi continuo della portata e del pescaggio delle navi andava di pari passo coll'interramento... Così il mantenimento del porto è stato sempre un problema difficile; ed ha tenuto in tutti i tempi vive tante questioni tecniche sulle costruzioni più adatte, che anche oggi sono ben lungi dall'essere risolte.*

**da: Angiolo Funaro, Le sorgenti e il mare, 1890**

*Nel marzo 1617 venne da Pisa nel nostro Porto Galileo Galilei a fare, sopra una nave, l'esperienza con un suo cannocchiale, il quale, anche in tempo di mare agitato, potesse servire a scoprire da lungi le navi nemiche, prima che esse se ne accorgessero, in servizio della marina toscana.*

**da: Giuseppe Piombanti, 1903**

## Introduzione

Così come previsto dalla L.R. 3 gennaio 2005, n. 1 “Norme per il governo del territorio” e dal Decreto del Presidente della Giunta Regionale Toscana n. 53/R del 25 ottobre 2011 con il quale è stato approvato il Regolamento di attuazione dell'art. 62 della L.R. 3 gennaio 2005, n. 1 (Norme per il governo del territorio) in materia di indagini geologiche, la Variante anticipatrice al Piano Strutturale per

L'approvazione del PRG del Porto di Livorno necessita di indagini geologico-tecniche dirette a verificare la pericolosità del territorio sotto il profilo geologico, idraulico e sismico. Con Disposizione del Segretario Generale del Comune di Livorno n. 236 del 21 gennaio 2010 il Dott. Geol. Leonardo Gonnelli è stato nominato Responsabile del Procedimento delle Indagini geologico-tecniche.

L'Autorità Portuale di Livorno con propria motivata Disposizione ha affidato l'incarico allo Studio Geologico A.Rafanelli di Livorno per la predisposizione di tutta la cartografia tematica geologico-tecnica a supporto della Variante in argomento e per l'affiancamento al Responsabile del Procedimento.

Secondo quanto espresso nell'Allegato 1 del D.P.G.R.Toscana n. 26/R/2007 la presente relazione geologico-tecnica in accompagnamento ed a supporto della cartografia tematica è stata predisposta sulla base di:

1. Inquadramento del territorio attraverso la documentazione relativa al quadro conoscitivo esistente che costituisce il riferimento di base per la predisposizione delle successive analisi e elaborazioni;
2. Illustrazione degli elementi connessi agli aspetti geologici e strutturali, litologici, geomorfologici, idraulici, idrogeologici, sismici;
3. Descrizione dei passaggi analitici che hanno portato alla delimitazione cartografica delle aree di pericolosità e all'individuazione delle criticità riferite agli specifici fenomeni che le generano;
4. Indicazioni, sulla base delle situazioni di pericolosità e delle criticità riscontrate, sugli eventuali condizionamenti alla trasformabilità del territorio in termini di necessità di approfondimenti da effettuarsi in fase di formazione di atti di governo del territorio.

### **La natura della Variante Anticipatrice al Piano Strutturale per l'approvazione del Piano Regolatore Generale del Porto di Livorno e dei progetti che si considerano connessi**

Il Porto di Livorno è uno dei principali motori economici della città ed è in grado di proiettare anche verso territori lontani la sua influenza benefica di redditività, di mercato e di attrazione finanziaria.

Un Porto nato in simbiosi con la città e che progressivamente si è allontanato da essa, deve oggi programmare la propria crescita di creare e mantenere un

equilibrio stabile tra lo sviluppo economico e l'evoluzione della città. Riuscire a conciliare questo significa indirizzare il territorio verso una crescita vera nella quale i condizionamenti nell'ambito sociale sono comparati con il benessere di un'economia in crescita.

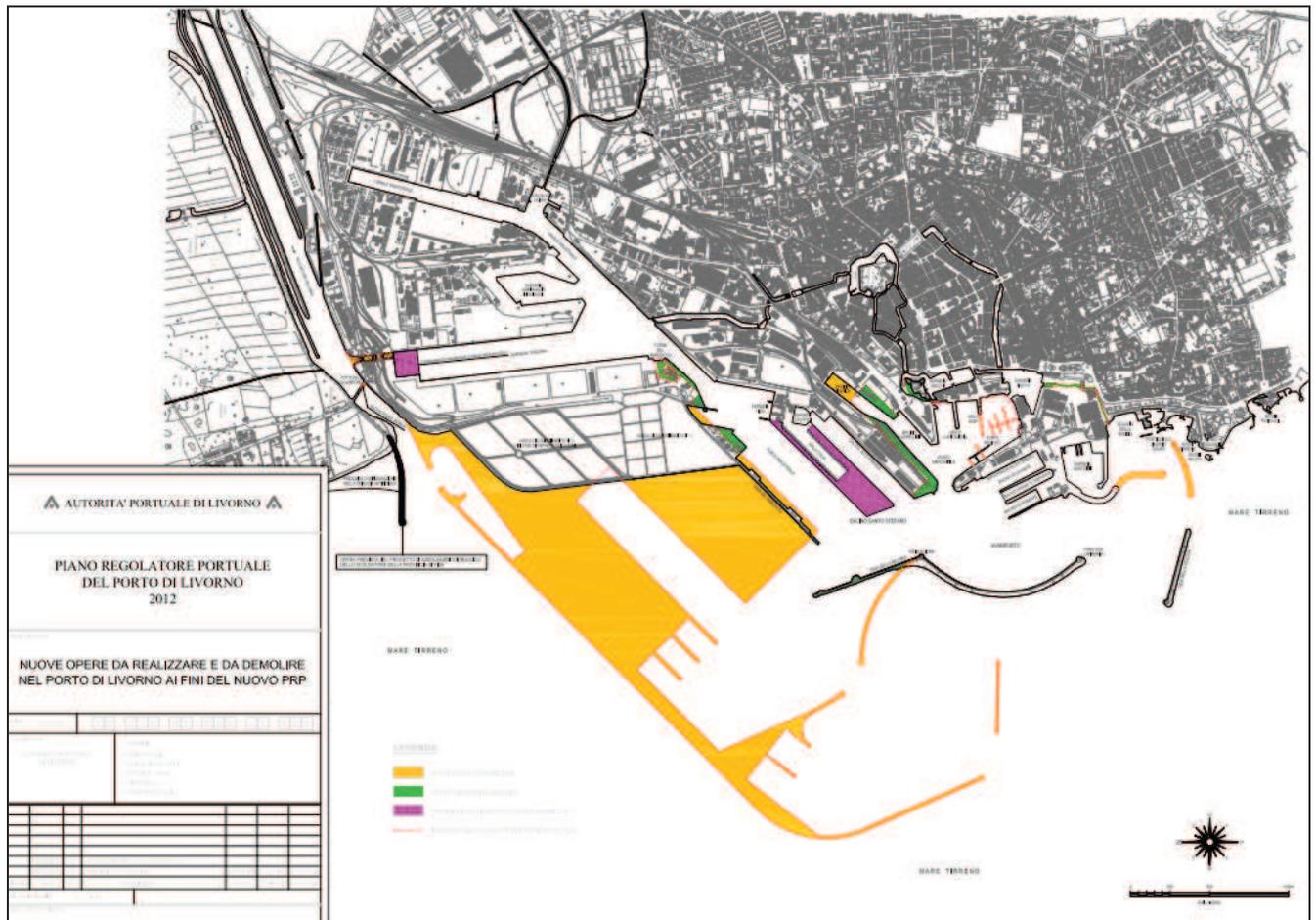
Questa filosofia di fondo ha ispirato ai primi orientamenti del Piano Regolatore Portuale che per gli anni a venire disegnerà il volto del Porto, una pianificazione che pone come elemento cardine una maggiore integrazione tra i sistemi Porto e Città da centrare sulla valorizzazione della zona adiacente al porto, che permetta di restituire parte del porto alla città e di favorire l'ingresso di una zona importante della città che confina con la parte storica del Porto.

Nel Documento Tecnico *“Nuovo Piano Regolatore Portuale del Porto di Livorno – Opere di grande infrastrutturazione: La Piattaforma Europa – Analisi delle alternative di assetto e definizione della configurazione di Piano”*, si afferma:

*“L'assetto futuro del Porto di Livorno è stato oggetto negli anni passati di ampio dibattito, che ha condotto a varie proposte, fondamentalmente basate su un ampliamento del porto ottenuto con la creazione di un nuovo ampio bacino esterno (la cosiddetta Piattaforma Europa), a Nord della Diga del Marzocco, fino alla foce del Calambrone. (...).*

*La soluzione dell'espansione verso Nord è praticamente obbligata, in quanto un'espansione del Porto all'interno della terraferma viene esclusa per i numerosi vincoli che gravano sulle aree teoricamente disponibili, un'espansione verso Sud è d'altronde del tutto irrealizzabile. Peraltro la prospettata realizzazione del nuovo bacino settentrionale si scontra con una serie di ostacoli di natura ambientale, navigazionale e operativa (...).*”

L'ultima e definitiva stesura, delle molte elaborate, del Piano Regolatore Generale del Porto di Livorno in relazione all'operatività del porto futuro definisce un quadro di opere da realizzare e da demolire che vengono schematizzate nella Figura proposta di seguito (si rimanda ad una più completa lettura nella Tavola PRP Livorno: “Nuove opere da realizzare e da demolire”) ed un nuovo quadro delle aree funzionali e delle destinazioni d'uso delle aree portuali.



Riguardo alle opere previste dal Piano di seguito viene proposta per punti sintetici la seguente check-list; partendo da Nord e procedendo verso Sud:

- Realizzazione del nuovo ponte mobile sullo Scolmatore d'Arno;
- Realizzazione della nuova foce armata dello Scolmatore d'Arno;
- Tombamento del Canale dei navicelli tratto dalla Darsena Toscana allo Scolmatore d'Arno;
- Realizzazione di una Darsena in sinistra idraulica della foce armata sullo Scolmatore d'Arno;
- Avanzamento verso mare con la realizzazione della cosiddetta Darsena Europa;
- Realizzazione delle protezioni marittime di ingresso al porto lato Nord che prevedono la demolizione del braccio rettilineo del Molo Novo (Diga della Meloria);
- Realizzazione Darsene petroli e gasiere;

- Resezioni di banchine nei pressi della Torre del Marzocco e in ingresso al porto Industriale;
- Realizzazione dell'ampliamento del cosiddetto Molo Italia;
- Interrimento parziale in testa del Bacino Firenze;
- Resezioni di banchine del Bacino Cappellini;
- Resezioni nei pressi della Fortezza Vecchia;
- Realizzazione fosso di collegamento tra la Darsena Nuova e la Bellana;
- Realizzazione opere foranee e approdo area Bellana.

### **Gli obiettivi specifici di programmazione territoriale ed urbanistica**

Sulla base degli scenari di sviluppo generali che caratterizzano le aree portuali e considerando che gli obiettivi di un Piano Regolatore di un Porto non possono essere scissi dagli obiettivi della Variante al Piano Strutturale ed al Regolamento Urbanistico vengono di seguito declinati nella loro strutturazione generale:

- a) L'ampliamento dell'area portuale e la riorganizzazione delle funzioni e del lay-out generale delle attività;
- b) Il potenziamento delle infrastrutture e delle connessioni tra area portuale e territorio circostante;
- c) La ricerca di una sostenibilità energetica dell'area di studio;
- d) La riprogettazione delle aree di contatto e sovrapposizione tra porto e città per la riqualificazione del waterfront;
- e) La diminuzione delle interferenze ambientali, di sicurezza e funzionali tra porto e città.

#### **a. Ampliamento dell'area portuale e la riorganizzazione del lay-out delle funzioni**

*“L'assetto futuro del Porto di Livorno è stato oggetto negli anni passati di ampio dibattito, che ha condotto a varie proposte, fondamentalmente basate su un ampliamento del porto ottenuto con la creazione di un nuovo ampio bacino esterno (la cosiddetta Piattaforma Europa), a Nord della Diga del Marzocco, fino alla foce del Calambrone. (...) La soluzione dell'espansione verso Nord è praticamente obbligata, in quanto un'espansione del Porto all'interno della terraferma viene esclusa per i numerosi vincoli che gravano sulle aree teoricamente disponibili, un'espansione verso Sud è d'altronde del tutto irrealizzabile. Peraltro la prospettata realizzazione del nuovo bacino*

*settentrionale si scontra con una serie di ostacoli di natura ambientale, di navigabilità e operativa (...)*<sup>1</sup>.

Per la realizzazione della Piattaforma Europa si dovranno rispettare le seguenti invariati:

- I condizionamenti dovuti alle casse di colmata inglobate nella piattaforma;
- La diga di protezione a nord;
- La delocalizzazione del terminal olii e derivati;
- Una nuova imboccatura portuale;
- Una modularità funzionale nella sua realizzazione;
- La minimizzazione dell'impatto dei sedimenti inquinati;
- Lo sbocco a mare del Canale Navicelli e la chiusura del suo ingresso in Darsena Toscana.

L'assetto della Piattaforma deve essere orientato secondo i venti dominanti nord-est/sud-ovest; mentre le dimensioni e l'orientamento dell'imboccatura devono essere supportate dagli opportuni studi specialistici.

E' indispensabile ottenere, attraverso un razionale dimensionamento della darsena operativa e dei terrapieni di servizio, un miglior bilancio fra volumi di escavazione e di deposito.

Le accessibilità lato terra sono altrettanto strategiche in quanto devono consentire lo smaltimento della quantità di TEU considerata necessaria per raggiungere un equilibrio economico nel terminal contenitori.

La dimensione dei bacini di evoluzione, dei canali, delle darsene e la loro profondità deve essere dimensionata per accogliere le navi di progetto. I fondali da predisporre dovranno soddisfare la possibilità di accosto delle navi e il materiale dragato sarà utilizzato per realizzare i terrapieni dei nuovi moli.

La nuova infrastruttura dovrebbe prevedere quantomeno la possibilità di realizzare due nuovi grandi terminal nei settori di maggiore interesse e prospettiva per il porto di Livorno (contenitori, ro-ro e ro-pax) e realizzabile in fasi funzionali.

---

<sup>1</sup> Documento Tecnico "Nuovo Piano Regolatore Portuale del Porto di Livorno – Opere di grande infrastrutturazione: La Piattaforma Europa – Analisi delle alternative di assetto e definizione della configurazione di Piano", settembre 2009

Riassumendo con parametri quantitativi, la soluzione prescelta si identifica in circa 8 Km di nuove banchine di accosto, considerando anche lo sviluppo dei pontili del terminal autostrade del Mare (1.440 m. circa), del pontile e della banchina del terminal Prodotti Pericolosi (1.220 m. circa) e della banchina della darsena fluviale (circa 800 m.).

Gli spazi a mare occorrenti per realizzare la Piattaforma Europa, ad ovest della Darsena Toscana, con le opere foranee, il canale di accesso, il bacino di evoluzione, la darsena, le banchine e i piazzali adeguati all'obiettivo di un'infrastruttura in grado di accogliere le navi di progetto e di movimentare una quantità di merci che permettano la realizzazione di terminal competitivi, ammontano a circa 5÷6 km<sup>2</sup>, orientati sull'asse nord-est/sud-ovest, secondo i venti dominanti.

In relazione all'ampliamento a mare del porto a ovest della Darsena Toscana, tra la Darsena Petroli e la foce dello Scolmatore, sarà necessario predisporre un nuovo accesso al porto con relativo "cono di atterraggio" in grado di permettere l'avvicinamento al porto delle navi di progetto.

Per accedere alle diverse banchine del porto infine bisogna garantire canali di accesso e bacini di evoluzione adeguatamente dimensionati.

Il Canale Industriale ha da tempo evidenziato la sua inadeguatezza per l'accesso delle portacontainer in Darsena Toscana, per questo è stato progettato un suo allargamento tra la sponda del Marzocco e quella del Magnale; ma anche l'accesso al porto Vecchio, tra Molo Mediceo e Calata Carrara dovrà essere ampliato per permettere l'accesso alle nuove navi da crociera di progetto.

Le aree a terra utili per lo sviluppo del porto, oltre al porto insediato, sono quelle già individuate a nord ovest di via Firenze, dall'incrocio con via F. Filzi sino al confine con il Comune di Collesalveti. Sono naturalmente strategiche per lo sviluppo del porto le aree dell'Interporto Vespucci e dell'autoporto del Faldo e quelle a loro contermini.

Riguardo alla riorganizzazione del lay-out delle funzioni, allo stato attuale l'utilizzazione degli spazi portuali appare promiscua e disordinata, con rilevanti conseguenze sull'efficienza del ciclo produttivo e sulla produttività delle banchine e dei piazzali (*random development*).

Il Piano Regolatore Portuale individua le aree e le infrastrutture portuali ed assegna loro da subito una specifica funzione logistica, che dovrà poi essere sviluppata ed organizzata nel tempo. Sarà così possibile specializzare le aree in funzione delle tipologie merceologiche e di traffico e rafforzare così il carattere polivalente del porto.

Questa zonizzazione vale sia per le aree esistenti che per quelle di nuova realizzazione (ad esempio la cosiddetta Piattaforma Europa), per le quali viene definita fin da subito la destinazione d'uso. L'obiettivo più generale da cogliere quindi è quello di una utilizzazione degli spazi portuali più efficiente ed efficace dal punto di vista economico – produttivo e di conseguenza anche sociale con più elevate ricadute occupazionali.

In questa prospettiva il punto di riferimento è il Piano Operativo Triennale 2013-2015 che in prosecuzione con i precedenti si è posto il traguardo della completa terminalizzazione del porto, chiamato anche “*il porto dei porti*”, cioè la completa specializzazione, per settori, del porto.

La razionalizzazione della destinazione d'uso del territorio portuale, con la conseguente creazione di vere e proprie aree specializzate, partendo da sud, può essere così articolata:

- Il **Porto passeggeri** per navi traghetto e per la crocieristica nella parte del porto più antica e vicina al centro storico della città destinandovi gli accosti e le aree connesse attuali, dalla sponda nord del Molo Elba alla Calata Carrara, e aggiungendovi tutto il Molo dalla Calata Pisa e Orlando all'Alto Fondale, per concentrare qui gli accosti per le navi da crociera che attualmente attraccano in diverse zone del porto. Gli accosti 43, 44 e 45 dell'Alto Fondale con le retrostanti aree, pur con destinazione a porto passeggeri, rimarranno in uso ai traffici forestali fintantoché non sarà resa operativa la sponda nord del Molo Italia;
- Il **Porto per i prodotti forestali e la cellulosa e delle merci varie**, specializzando un'area già fortemente dedicata. L'obbiettivo deve essere quello di una più marcata terminalizzazione che consenta una maggiore aggressività nei confronti del mercato e una minore conflittualità e/o competitività interna. Gli accosti da dedicare a questa area specializzata vanno dalla radice dell'Alto Fondale alla sponda sud della Darsena Ugione, comprendendo tutto il Molo Italia e la Calata del Magnale. Allo scopo di migliorare la funzionalità del Molo Italia e di garantire un adeguato

collegamento tra le aree di imbarco/sbarco e le aree di deposito/manipolazione poste a tergo, alla radice del Molo Italia è stata prevista la realizzazione di un corridoio infrastrutturale largo circa 60 m mediante il tombamento dello scalo di alaggio presente lungo la sponda nord della Darsena Calafati e la modifica di destinazione d'uso delle aree poste a tergo della sponda nord della Darsena Calafati;

- Il **Porto delle autostrade del mare** per incrementare il segmento dei traffici ro-ro che ha visto la crescita più consistente in questi ultimi anni, fino a divenirne il principale nel porto di Livorno. Viene proposto di concentrare questo (ro-ro, trailers, auto nuove) nelle aree del porto industriale della Darsena Inghirami, della Calata Bengasi e della prima metà della sponda ovest del Canale Industriale fino al limite delle aree in concessione alla Sintermar. In prospettiva se ne prevede lo spostamento alla Piattaforma Europa Molo Nord e/o su parte della sponda ovest della Darsena Toscana solo dopo la realizzazione del Molo Sud della Piattaforma Europa destinato a terminal contenitori;
- Il **Porto agroalimentare**, con la realizzazione di un reefer terminal al Terminal L. Da Vinci, per porsi l'obiettivo di sfruttare le forti potenzialità del commercio internazionale nel settore agroalimentare/ortofrutta. Le maggiori opportunità sono concentrate sul corridoio tirrenico, dove, tra l'altro, sono presenti i principali reefer terminal destinati all'ortofrutta: Vado Ligure, Genova e Salerno.
- Il **Porto dei contenitori** con l'attuale sponda ovest della Darsena Toscana e in prospettiva alla Piattaforma Europa Molo Sud.
- Il **Porto multipurpose** con la terminalizzazione della sponda est della Darsena Toscana, collegandovi le aree di proprietà F.S., il Terminal Paduletta e la parte terminale della sponda ovest della Darsena Toscana a partire dal dente di attracco poppiero.
- Il **Terminal delle rinfuse solide** da spostare dall'attuale collocazione su Calata Orlando alla parte più interna della Sponda Est della Darsena Toscana,
- Il **Porto della cantieristica** con il Cantiere Benetti per i grandi yachts ed il consolidamento dei piccoli cantieri in Darsena Pisa e Calafati in attesa di una soluzione alternativa, da collocare eventualmente lungo Calata del Magnale nelle aree ENEL, che permetta di potenziare il terminal prodotti forestali;
- L'**Approdo turistico** con la definitiva trasformazione del Porto Mediceo e della Darsena Nuova ormai non più idonei a funzioni di porto commerciale e la previsione di un piccolo punto di ormeggio nello specchio acqueo della Bellana;

- Il **Porto della riparazione navale**: una grande opportunità di lavoro e sviluppo del porto e della città con le sue attività di riparazione, refitting ed allestimento. Le attività che vi si potranno svolgere, come prevede il P.O.T. 2013-2015, sono quelle della riparazione delle navi da diporto, per il bacino fisso, e, per quello mobile, oltre alle navi da diporto, le navi commerciali di media dimensione;
- Il **Porto delle rinfuse liquide** con i depositi costieri sul Canale industriale e con la Darsena petroli di cui è previsto la delocalizzazione sulla diga foranea della Piattaforma Europa.

Questa riorganizzazione delle funzioni, unita ad un miglioramento dei collegamenti interni e con l'esterno, sia stradali che ferroviari, delle varie aree portuali specializzate, potrà permettere lo sviluppo nelle aree a banchina, oltre che delle funzioni di carico e scarico, dei servizi logistici che necessariamente dovranno essere qui sviluppati.

L'attività logistica più complessa e di maggiore durata potrà essere invece sviluppata nelle aree retro portuali individuate e nelle piattaforme logistiche alle spalle del porto. Conseguenza del riordino delle funzioni portuali è anche la riduzione del rischio di incidente rilevante, come approfondito nei paragrafi relativi dei Capitoli 4 e 5 del presente Rapporto.

#### **b. Potenziamiento delle infrastrutture e delle connessioni**

Le infrastrutture di trasporto a servizio del porto rientrano fra gli "spazi di connessione infrastrutturale" nei quali si articolano le relazioni tra porto e territorio, che rappresentano i corridoi associati alla mobilità (ferroviaria, autostradale, stradale, ecc.) i quali, ancorati ai grandi assi di collegamento extra-locale, penetrano nello spazio del porto per garantire le sue connessioni con gli altri nodi infrastrutturali. Nel caso di Livorno le infrastrutture esterne al porto (connessione infrastrutturale) hanno tre funzioni principali:

- il collegamento con la rete infrastrutturale regionale e nazionale (autostrada A12 Genova – Livorno, strada di grande comunicazione Firenze – Pisa – Livorno, strada di grande comunicazione Livorno – Civitavecchia, strada statale Aurelia in direzione La Spezia e in direzione Civitavecchia, rete ferroviaria nazionale);
- il collegamento con strutture puntuali per interscambio modale (interporto Amerigo Vespucci e aeroporto Galileo Galilei);

- il collegamento con le aree funzionali esterne al porto (area Faldo, area Erg, area Ilmet, ecc.).

Questo sistema presenta delle criticità che sono da superare per raggiungere l'efficienza necessaria.

Per quanto riguarda la **rete stradale** sono necessari i seguenti interventi:

- completamento autostradale del corridoio plurimodale tirrenico con la realizzazione del tratto di autostrada tra Rosignano e Civitavecchia e la realizzazione del lotto zero Maroccone-Chioma della Variante Aurelia,
- collegamento delle aree portuali con le aree retro portuali,
- superamento dei limiti di collegamento tra le aree interne: tra porto storico e porto commerciale e tra le varie parti del porto industriale,
- separazione tra i flussi di traffico commerciale, turistico e cittadino specializzando via S. Orlando (commerciale per i varchi Valessini e Zara), via delle Cateratte (turistico/cittadino) e realizzando un nuovo asse stradale,
- raddoppio di via L. da Vinci per separare il traffico commerciale da quello leggero.

Per quanto riguarda la **rete ferroviaria**, premesso il buon livello tecnologico su tutta la rete principale ed il suo potenziamento con la realizzazione della linea Alta Capacità (A.C.) Firenze-Bologna, sono da superare diversi punti critici:

- la connessione ferroviaria verso Nord e Nord Ovest ha un limite nella linea Pontremolese,
- una criticità si potrebbe evidenziare in prospettiva nel nodo di Pisa, inteso come stazione di Pisa e connessione Pisa-Livorno,
- una ulteriore possibile futura criticità nella linea trasversale Pisa-Firenze, nel tratto Empoli-Bivio Olmatello,
- Si segnala come inadeguata la linea Prato-Pistoia-Lucca-Pisa-Viareggio, nel tratto Pistoia-Viareggio (a binario unico e non elettrificato).

Le criticità direttamente legate all'infrastruttura ferroviaria all'interno del porto possono essere così sintetizzate:

- mancanza di fasci ferroviari interni all'area portuale per la raccolta dei carri e per la successiva formazione delle tradotte,
- elevato numero di raccordi utilizzabili solo con manovre a spinta,
- mancanza di tronchini di manovra alla terminazione dei fasci per la manovra dei locomotori (svincolo) e/o per l'accantonamento dei carri guasti,
- la dislocazione dei fasci ferroviari nei terminal non è sempre funzionale alle attività di movimentazione delle merci,
- elevato numero di binari dismessi o inutilizzabili (all'incirca per un'estensione di 20 km.),
- presenza di "colli di bottiglia" legati alla ridotta disponibilità di binari nel parco di Calambrone dove si effettua la composizione e la scomposizione dei treni in arrivo ed in partenza dallo scalo portuale, la produttività di carico e scarico penalizzata dalla presenza di torri faro e dalla presenza dell'oleodotto che limita notevolmente la funzionalità delle operazioni terminalisti che, la difficoltà di comporre i treni blocco in partenza dal terminal TDT.

Al fine di cogliere l'opportunità della linea ad Alta Capacità Firenze-Bologna è urgente procedere al superamento del collo di bottiglia rappresentato dalla composizione dei treni blocco in Darsena Toscana con l'elettrificazione della linea ed il suo collegamento diretto con la linea tirrenica verso Pisa; di seguito sarà necessario collegare direttamente la stessa Darsena Toscana con l'Interporto Vespucci con opera di scavalco della linea tirrenica.

La realizzazione delle suddette infrastrutture diviene indispensabile per incrementare la potenzialità del terminal contenitori, in particolare della TDT, che necessita di instradare su ferrovia una quota almeno del 30-40% dei contenitori movimentati.

Il prolungamento, con scavalco della linea ferroviaria, della via F. Enriques con immissione diretta sullo svincolo della S.G.C. FI-PI-LI è la prima ipotesi. Una seconda ipotesi, già avanzata, è quella della realizzazione dello scavalco della ferrovia per collegare via L. da Vinci con le aree cosiddette "Cagliata" nei pressi del torrente Ugione ed infine come terza ipotesi si prevede il collegamento delle aree retro-portuali con la strada di grande comunicazione FI-PI-LI creando un nuovo innesto ad est di quello attuale con via L. Da Vinci.

L'Interporto A. Vespucci è collegato con lo scalo ferroviario di Calambrone; rimane da realizzare il collegamento ferroviario con la Darsena Toscana, Sponda Ovest e Sponda Est, e con la futura Piattaforma Europa tramite la realizzazione di uno scavalco della linea tirrenica.

Da lato di terra gli accessi esistenti al porto sono buoni quelli stradali con la S.G.C. FI-PI-LI, che dovrà essere prolungata per la Piattaforma Europa; i problemi risiedono negli innesti, nella promiscuità dei traffici negli innesti e nei collegamenti tra aree portuali e aree retro portuali di cui sopra abbiamo indicato le soluzioni.

Infine non debbono essere trascurate le **vie d'acqua**. Con l'obiettivo di sviluppare la Piattaforma Logistica Costiera, gli enti locali dell'area Pisana – Livornese e la Regione Toscana, hanno deciso di definire un progetto di navigabilità dello Scolmatore d'Arno nel tratto tra la Foce e il Faldo, per collegare via acqua il sistema infrastrutturale dell'area, realizzando al contempo un volano di sviluppo economico dell'Area Vasta.

Il Canale dei Navicelli, attraversando lo Scolmatore e immettendosi nella Darsena Toscana, collega il porto di Livorno con la Darsena Pisa, per la quale è stato previsto recentemente un nuovo collegamento con l'Arno a ovest di Pisa. Lo sbocco del Canale dei Navicelli in Darsena Toscana rappresenta ormai da tempo un problema, in quanto provoca l'immissione nel porto di una notevole quantità di sedimenti di provenienza sia dal Canale Scolmatore, sia dalla vicina foce dello stesso Scolmatore al manifestarsi delle mareggiate. Il tratto di canale che collega lo Scolmatore con la Darsena Toscana va perciò chiuso per porre termine al fenomeno di interrimento e deve essere realizzato un diverso collegamento dello stesso canale dei Navicelli con il porto compatibile con il suo ampliamento a mare.

Recentemente ( il 20 aprile 2013) Autorità Portuale ha avviato il processo che permette di trasformare “la normalità delle *porte vinciane aperte* a quello delle *porte vinciane chiuse*”. Si è lavorato con ditte specializzate per risistemare i meccanismi di apertura e chiusura e tra breve le porte rimarranno “normalmente chiuse” e verranno aperte solo ogni tanto per far passare chiatte e pontoni destinati a Camp Darby, sia ai cantieri delle darsene pisane o da quei cantieri verso il mare. La chiusura delle porte vinciane – attraverso le quali si depositano circa 30.000 mc. di fanghi ogni anno – potrà segnare definitivamente il rilancio della Darsena Toscana e quindi dei traffici portuali.

### **c. Le risorse e l'autonomia energetica**

Il porto di Livorno è caratterizzato da una molteplice rete di attività produttive, servizi e traffici la cui dipendenza energetica è particolarmente importante per il suo futuro sviluppo. Dalle analisi effettuate negli anni passati, la componente predominante di consumi energetici è costituita dalla movimentazione e dal banchinaggio di navi che corrispondono ad oltre il 92% dei consumi totali. Invece, la movimentazione delle merci sia internamente (mezzi speciali e mezzi pesanti) che esternamente (mezzi pesanti) all'area portuale contribuisce al consumo per poco più del 5% dell'energia complessivamente impiegata.

E' importante notare che i consumi energetici dovuti al banchinaggio sono superiori a quelli relativi alla movimentazione dal momento che rappresentano il 77% dei consumi energetici totali del porto. I consumi energetici derivanti dalle attività di condizionamento dei volumi edificati sono ridotti, essendo circa poco più dell'1% dei consumi totali. L'Audit energetico effettuato per le aree portuali di Livorno<sup>2</sup> ha messo in evidenza che il porto necessita di più di 1326 TJ (Tera Joule) ogni anno per il suo funzionamento, ma si tratta di un valore relativo all'anno 2003, per cui è prudente almeno stimare ad oggi un fabbisogno energetico di 1500 TJ. Un aggiornamento di tali dati dovrà essere previsto.

L'estensione e la razionalizzazione del porto rende necessario prevedere anche un suo parallelo sviluppo energetico che dovrà basarsi su un cambiamento radicale delle scelte che lo porteranno da consumatore a produttore di energia. Tale cambiamento diventa essenziale:

- in termini di sostenibilità ambientale,
- alla luce degli attuali e futuri equilibri geopolitici che fortemente influenzeranno la disponibilità dell'energia,
- in relazione al costo dell'energia che nel medio /lungo termine non potrà più essere considerata come una risorsa a basso costo e facilmente reperibile.

Accanto agli aspetti legati alla produzione è prioritario considerare tutti gli aspetti relativi all'efficienza energetica che potrà essere declinata nelle specifiche scelte infrastrutturali e dei servizi, nonché, attraverso un sistema di monitoraggio dei bilanci energetici.

---

<sup>2</sup> *Analisi energetica e gestione energetico-ambientale di siti portuali*, Analisi metodologica e applicazione sperimentale al sistema portuale livornese, Rapporto Finale, 2003

Le strategie e le decisioni a livello Europeo, nazionale e regionale chiaramente giustificano la visione futura del porto in qualità di produttore di energia; infatti l'orientamento in questo senso è coerente anche con i più recenti documenti internazionali e nazionali.

Si citano ad esempio le Politiche integrate per la Toscana del Mare 2008-2010 della Regione che permettono lo sviluppo di energie rinnovabili nell'ambito della piattaforma costiera con tutela del paesaggio ed ecosistemi e lo sviluppo eolico nei porti e zone industriali.

Tale quadro normativo pone le basi per uno sviluppo coerente negli ambiti portuali della produzione di una vera energia pulita che non potrà che avere come uniche fonti complementari: vento, sole, rifiuti, mare. Tale scelta assicura la realizzazione di una politica di produzione dell'energia vicino al punto di consumo (Energia decentralizzata), come raccomandato anche dall'EREC (European Renewable Energy Council) e da altre comunicazioni della Commissione Europea e GNO (es. Greenpeace).

In relazione agli elementi precedentemente analizzati, lo sviluppo futuro del porto dovrà tener conto dei seguenti elementi:

- future scelte energetiche relative all'assetto macro funzionale ed infrastrutturale del porto;
- efficienza energetica delle attuali e nuove strutture fisse del sistema portuale;
- valutazione e stima dell'intensità energetica ed impatti ambientali di diversi scenari di sviluppo del trasporto marittimo con il conseguente impatto sul traffico urbano e portuale nonché regionale;
- creazione di un sistema di governance per lo sviluppo, realizzazione ed operatività delle risorse energetiche da fonti rinnovabili in porto;
- aggiornamento periodico dell'audit energetico del porto di Livorno;
- integrazione di tale approccio nella programmazione economica e territoriale locale, dal momento che, le scelte in campo energetico del sistema portuale avranno un impatto nelle scelte di governo dell'area urbana e del territorio.

#### **d. Mitigazione delle criticità ambientali**

L'Autorità Portuale di Livorno è dotata di certificazione ambientale ISO 14001:2004, ha adottato un sistema di gestione ambientale e provvede alla sua

revisione periodica, impegnandosi anche a sviluppare una comunicazione al pubblico relativa alle prestazioni ambientali.

Anche le scelte del Piano Regolatore Portuale sono coerenti con gli obiettivi di protezione ambientale internazionali, nazionali e regionali e quelli previsti dal SGA.

***e. Il rapporto tra porto e città***

L'Autorità Portuale di Livorno d'intesa con il Comune di Livorno, si sono posti l'obiettivo di riqualificare le aree di waterfront, ridefinendo l'assetto complessivo di questi spazi, recuperando efficienza alle funzioni portuali qui ancora presenti e compatibili, integrandole con quelle della città e svincolando le aree urbane - dalla Dogana d'Acqua ai quartieri nord - dalle interferenze con le attività portuali di trasporto e movimentazione di merci.

Il passaggio del Cantiere Orlando da cantiere operante nel settore della navalmeccanica a cantiere operante nel settore della diportistica, seppure di grandi dimensioni, ha posto innanzitutto il problema della riconversione delle professionalità, in secondo luogo la riorganizzazione del lay-out industriale ed in terzo luogo la necessità della riqualificazione del comparto dei bacini di carenaggio.

Per quanto riguarda il Cantiere, la riconversione in cantiere per mega yachts è ormai un dato di fatto; la Azimut-Benetti S.p.A. ha completato il processo di riconversione industriale e l'Autorità Portuale per parte sua ha completato la ristrutturazione della Darsena Morosini adattandola alle funzioni del cantiere. La riconversione della produzione cantieristica ha prodotto ricadute sul settore delle riparazioni navali per due ordini di problemi: innanzitutto la scomparsa del soggetto economico in grado di svolgere il ruolo di capo commessa; in secondo luogo l'emergere di un problema di compatibilità tra le attività di riparazione, in gran parte concentrate nel Grande Bacino, e le destinazioni urbanistiche delle aree contermini nel frattempo approvate sia per le nuove funzioni urbane che per le attività di produzione del cantiere Benetti.

Al fine di valutare queste nuove problematiche e per ottemperare a quanto previsto dall'Accordo di Programma del 1.8.2007 sottoscritto presso la Presidenza del Consiglio dei Ministri, nell'agosto 2011 l'Autorità Portuale ha conferito al Registro Navale Italiano (Ri.Na S.p.A.) un incarico di studio delle potenzialità di

mercato dell'intero compendio dei bacini in riferimento al settore delle riparazioni navali mercantili. Il risultato dello studio, rimesso da Ri.Na. nell'ottobre 2011, individua un mercato potenziale annuale di circa 70 navi nel settore commerciale per le riparazioni a più alto valore aggiunto (cruise & ferry, portacontaineri e gas carrier ), previsione subordinata alla riattivazione del grande bacino fisso.

Lo studio del Ri.Na. si è poi orientato ad un vero e proprio piano industriale mettendo a confronto l'ipotesi del settore delle riparazioni navali con quello della costruzione e refitting di navi da diporto, considerando in conclusione che quest'ultimo risulta meno impattante sotto il profilo ambientale, maggiormente redditizio in termini di ricadute economiche sul territorio e di ritorno sociale per manodopera impiegata, oltre che più facilmente integrabile con le previsioni urbanistiche che nel frattempo il Comune di Livorno aveva assunto sul comparto "Porta a mare".

Lo studio, in aggiunta, evidenziava che il costo presunto per ripristinare la piena funzionalità del grande bacino di carenaggio in muratura per la ripresa delle riparazioni navali mercantili è stimabile in circa 25 milioni di euro, mentre la carenza di sufficienti aree operative a terra destinate alla attività di riparazione comporterebbe, rispetto alla capacità teorica massima, una riduzione di operatività degli scali destinati alle riparazioni navali stimabile attorno al 50%.

In conclusione la destinazione funzionale rimane comunque quella della riparazione e costruzione navale mentre per la tipologia d'uso, navi da diporto piuttosto che navi mercantili. Al termine dell'iter di valutazione dello studio Ri.Na. l'Autorità Portuale attiverà la procedura di affidamento in concessione del comparto bacini per svolgervi le attività ritenute socialmente più convenienti e ambientalmente compatibili.

Lo sviluppo del progetto di riqualificazione e riconversione del *waterfront* relativo alle aree del Cantiere Navale F.lli Orlando che si affacciano sulla Darsena Nuova e sul Porto Mediceo è funzionale alla realizzazione del Porto Turistico a cura della S.T.U. "Porta a Mare".

Lo specchio acqueo della Bellana dovrà essere posto in sicurezza nautica - con la realizzazione di due opere foranee di altezza massima di 2,00 m. s.l.m.m.: la prima in prosecuzione verso sud del molo sopraflutto della Darsena Morosini e la seconda collocata tra lo specchio acqueo antistante il Moletto Nazario Sauro e lo

specchio acqueo antistante il termine est della diga della Vegliaia - per soddisfare le seguenti esigenze:

- Migliorare l'accesso delle grandi imbarcazioni da diporto nella Darsena Morosini,
- Proteggere lo sbocco del nuovo canale che collegherà la Darsena Nuova con lo specchio acqueo della Bellana,
- Eliminare il fenomeno d'interrimento dello Scoglio della Regina,
- Mettere in sicurezza lo specchio acqueo per potervi collocare un approdo nautico, ridossato al molo sottoflutto della Darsena Morosini, per delocalizzarvi le imbarcazioni dei circoli nautici attualmente collocate nel Porto Mediceo e nella Darsena Nuova, al fine di poter realizzare il nuovo Porto turistico qui previsto dal Piano Regolatore Portuale.

A nord, il braccio della Darsena Morosini, recentemente riconfigurato con una scogliera in massi, un muro a retta in c.a. e la nuova banchina, non accessibile alla cittadinanza, limita la visuale verso il porto. Pur avendo, quindi, un'ubicazione che potenzialmente gode di eccellenti caratteristiche storico-artistiche e paesaggistiche, con scorci da terra verso il mare sulle sue affascinanti ed importanti infrastrutture portuali e, dal mare verso terra, con un *waterfront* ricco di elementi caratterizzanti che si fondono con il verde della passeggiata lungomare, per cui l'area risulta possedere standard urbanistici e paesaggistici elevati, non sono ormai più rinviabili la valorizzazione e riqualificazione dell'area Bellana in contemporanea alla riorganizzazione dello specchio acqueo come sopra illustrato.

Per le aree urbano-portuali che vanno dalla Fortezza Vecchia alla Dogana d'Acqua, che hanno al proprio interno le aree del Porto passeggeri, il PRP prevede di procedere ad una riqualificazione e ad una ristrutturazione della Stazione Marittima per far fronte ai crescenti traffici crocieristici e dei traghetti (+534% dal 1998 al 2012).

Una tale prestazione fa ritenere necessario un ampliamento delle aree da dedicare al terminal passeggeri: a questo proposito si ritengono idonee le aree della Calata Orlando, dove è collocato il terminal per le rinfuse solide e le aree dell'Alto Fondale, attualmente usate per i prodotti forestali e merce varia da CILP; le attività presenti in questi terminal saranno delocalizzate: quelle delle rinfuse per incompatibilità ambientale con il terminal passeggeri e perché troppo vicine alla

città, nella parte terminale della Sponda Est della Darsena Toscana, quelle relative ai prodotti forestali e merce varia al Molo Italia.

Il progetto dovrà definire soluzioni adeguate per integrare le funzioni urbane, penetrate in questa area portuale, con le funzioni portuali del porto passeggeri, individuando gli edifici da demolire, quelli da ristrutturare e la nuova edificazione per assicurare un efficiente layout del terminal, individuando le aree free e quelle ad accesso controllato nel rispetto delle normative relative alla security stabilite internazionalmente dall'ISPS Code.

In particolare per l'area della Stazione Marittima quale porto passeggeri, sarà necessario procedere ad una riprogettazione che miri all'integrazione con la città attraverso:

- la ristrutturazione e l'ampliamento del terminal passeggeri per far fronte al crescente traffico delle crociere e dei traghetti per le isole;
- l'inserimento e lo sviluppo di funzioni tipicamente urbane come quelle commerciali, di servizio, direzionali e residenziali, creando così le condizioni per il recupero e la valorizzazione di patrimoni storici e culturali come la Fortezza Vecchia, il Forte S. Pietro, la Dogana d'Acqua, la Stazione S. Marco, il circuito delle Mura Lorenese e dei canali della Venezia, la Piazza del Logo Pio (centro e fulcro del Quartiere della Venezia, "quartiere cerniera" con il porto operativo) a loro volta fattori di valorizzazione del traffico crociere.
- la delocalizzazione delle funzioni portuali incompatibili,
- la riorganizzazione della viabilità che in questo tratto è fortemente promiscua: cittadina, turistica e commerciale.

Nel recente passato sono stati svolti studi in collaborazione tra Comune di Livorno ed Autorità Portuale che hanno fornito prime importanti indicazioni, in particolare per la viabilità e per la ristrutturazione urbanistica dell'area in discussione.

Sono stati ipotizzati due scenari, uno "scenario obiettivo" da realizzarsi a lungo termine con la disponibilità delle superfici della Stazione S. Marco, ed uno "scenario provvisorio" che contempla interventi previsti al di fuori dell'area di S. Marco su aree già oggi disponibili e che si presenta come fase transitoria di attuazione del primo.

Le ipotesi di riorganizzazione e potenziamento della viabilità rispondono a due esigenze:

- migliorare l'accessibilità e lo scorrimento
- creare un disegno più generale di riorganizzazione urbanistica delle aree e di tutela e valorizzazione dei resti dell'antico sistema di fortificazioni.

Si prefigura la soppressione del ponte Orlando sostituito da un sistema articolato di percorsi, fra i quali è contemplata anche la riqualificazione della Cinta Esterna (per la valorizzazione delle mura lorenese). Nell'ipotesi a regime la separazione dei flussi di traffico si compie nello snodo di viale Genova. Da qui sono previsti tre canali di traffico:

- il primo a est della ferrovia con la realizzazione di un viale urbano alberato che raccoglie il traffico diretto nella città, correndo su aree ferroviarie fino ad una nuova piazza che si affianca alla porta S. Marco, da cui si distacca un secondo breve viale che conduce alla prevista fermata ferroviaria. Dalla stessa piazza si distacca anche via della Cinta Esterna che dopo un breve tratto devia, per non tagliare i resti della Dogana d'Acqua, oltrepassa il canale dei Navicelli e, superata la stessa Dogana d'Acqua si riavvicina alle mura lorenese tenendosene discosta per valorizzarle e si conclude nello svincolo ai piedi del ponte S. Trinita.
- Il secondo canale di traffico è rappresentato da via delle Cateratte che raccoglie il traffico diretto alla Stazione Marittima.
- Il terzo canale, sempre a ovest della ferrovia, è la via S. Orlando che viene dedicata al traffico pesante diretto al porto da varco Valessini.

In relazione alla previsione di un approdo per "la piccola nautica" o per la "nautica sociale", occorre rilevare che essa costituisce una risposta ad un'esigenza che si evidenziò in sede di valutazione d'impatto ambientale dell'approdo turistico nel porto mediceo e darsena nuova, allorché il progetto avrebbe comportato l'allontanamento di un numero consistente di imbarcazioni, la cui presenza non risultata più compatibile con gli obiettivi e le destinazioni d'uso di quella porzione di porto.

Difatti il Decreto del Ministero dell'Ambiente di concerto con Ministero dei Beni Culturali n. 430 del 7.5.2009 che sanziona il giudizio di compatibilità ambientale dell'approdo turistico nel Porto Mediceo e Darsena Nuova di Livorno, al proposito esprime la seguente condizioni:

*“Punto 5. L'autorità portuale in sede di progetto esecutivo dovrà effettuare un approfondimento sulle tipologie di imbarcazioni attualmente presenti nell'approdo al fine di ottimizzare in funzione anche del parco nautico esistente, le dimensioni degli ormeggi di progetto”.*

In seguito il Consiglio regionale della Toscana, con proprio atto DCRT n. 85 del 23/11/2010, ha approvato la “Variante al vigente Piano Regolatore portuale finalizzata alla realizzazione di infrastrutture per l'approdo turistico all'interno del porto commerciale del porto di Livorno”, prevedendo,:

*“Punto 3. Di prescrivere che siano adottate da proponente soluzioni ed iniziative per garantire, anche d'intesa con il Comune di Livorno, contestualmente alle successive fasi procedurali, spazi per la piccola nautica attualmente presente”*

Per rispondere efficacemente e coerentemente alle indicazioni sopra richiamate, l'Autorità Portuale di Livorno ha inserito nel PRP la previsione di un approdo per ospitare la cosiddetta “nautica minore”, supportandola con un insieme di opere con obiettivi non esclusivi.

Le funzioni e l'utilità delle nuove opere di difesa previste a sud del porto di Livorno ai fini della creazione di uno specchio acqueo protetto dove ubicare delle strutture di ormeggio per le imbarcazioni della nautica sociale sono infatti molteplici, in quanto oltre a garantire la protezione dal moto ondoso alle imbarcazioni della nautica sociale che utilizzeranno le suddette infrastrutture, migliorano le condizioni di protezione dal moto ondoso al tratto di lungomare compreso tra il molo di sottoflutto della Darsena Morosini e lo Scoglio della Regina.

In questo modo le manovre di ingresso e di uscita delle imbarcazioni da diporto che utilizzeranno il canale navigabile che secondo le previsioni di P.R.P. metterà in collegamento la Darsena Nova con il mare aperto si potranno svolgere in condizioni di sicurezza, ed inoltre verrà eliminato il fenomeno dello spiaggiamento della posidonia morta, che nel tempo ha provocato il forte interrimento delle luci del ponte di accesso allo Scoglio della Regina, in modo da garantire l'efficacia del programmato intervento di ripristino dell'acquaticità del suddetto Scoglio.

Infine per effetto della realizzazione delle suddette opere di difesa anche le condizioni di accessibilità alla Darsena Morosini risulteranno notevolmente

migliorate. Infatti nell'attuale configurazione le imbarcazioni per entrare nella Darsena suddetta devono fare un brusca virata che in condizioni meteomarine avverse è praticamente impossibile eseguire in quanto ne espone la fiancata all'azione delle onde; mentre a seguito della realizzazione delle nuove opere di difesa tale manovra di ingresso si svolgerà all'interno di uno specchio acqueo completamente riparato permettendone l'esecuzione in sicurezza anche in condizioni meteomarine avverse.

Pur considerando che si tratta di uno spostamento di poche centinaia di metri di imbarcazioni (dall'attuale stazionamento nel Porto Mediceo e in Darsena Nuova, allo specchio d'acqua della Bellana), la nuova infrastruttura e le opere connesse, saranno oggetto di specifica procedura di Valutazione d'impatto ambientale.

L'intera area urbana contigua allo zoning portuale sopra descritto non è stata oggetto di previsioni del Piano Regolatore Portuale; durante l'imminente Revisione del Piano Strutturale e del Regolamento Urbanistico, il Comune di Livorno provvederà ad identificare e normare le aree di cerniera tra la città ed il porto, superando la classificazione attuale, che vede la presenza di quattro UTOE: la Stazione Marittima, Cantiere Orlando, Porto Mediceo e Porta a Mare che dovranno essere riconsiderate in una chiave di maggiore integrazione con la città.

### **Limiti geografici dell'area di studio**

L'intera area in studio sotto il profilo urbanistico è destinata ad attività portuali. Si estende complessivamente intorno ai 7 Km<sup>2</sup> e si ubica amministrativamente nel Comune di Livorno nella Provincia di Livorno.

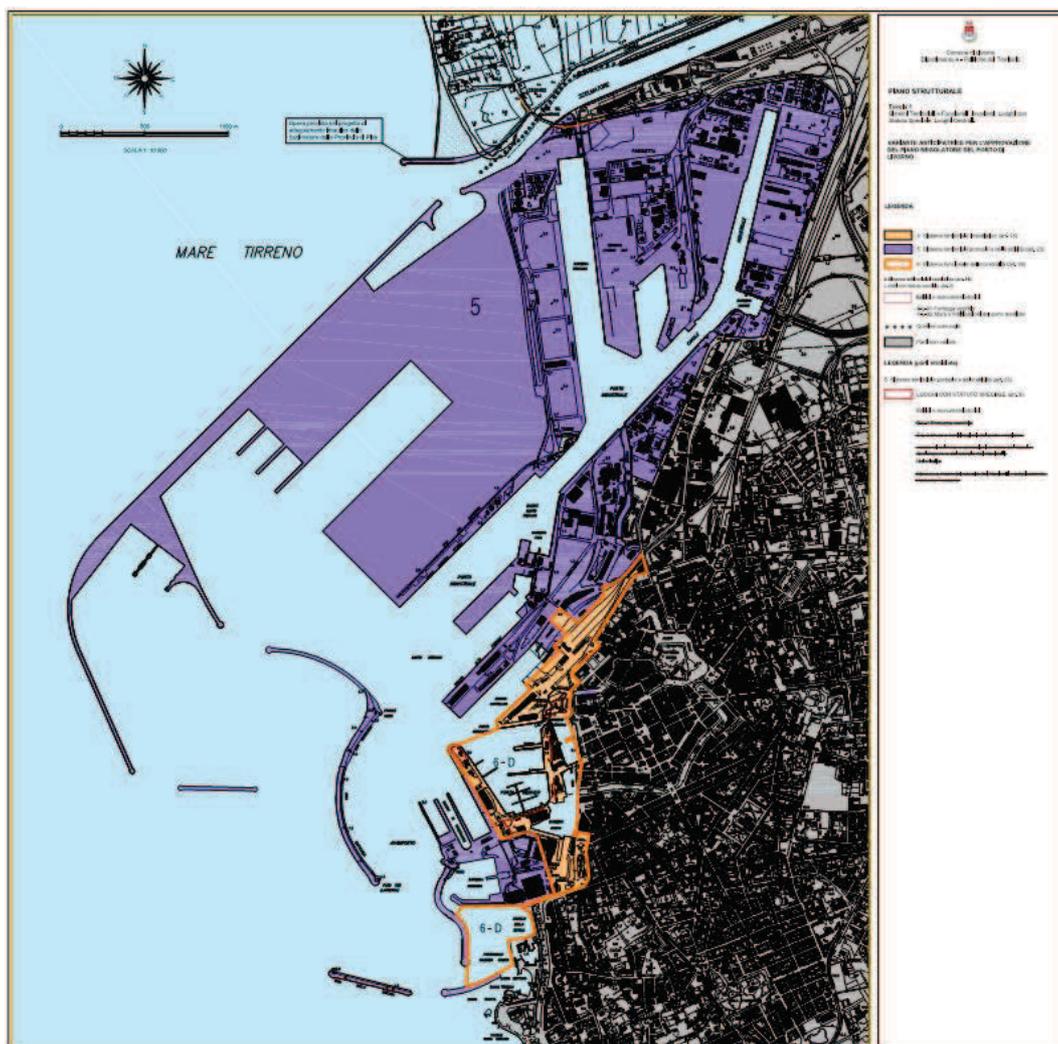
Geograficamente l'area oggetto della Variante anticipatrice è limitata:

- Verso Ovest dal mare che rientra in maniera decisamente significativa anche all'interno dell'area in esame per mezzo dei numerosi canali portuali già realizzati (Canale Industriale, Canale Ammiraglio Inghirami e Darsena Toscana);
- Verso Nord con il tratto terminale dello Scolmatore d'Arno ed oltre del Comune di Pisa;
- Verso Est con l'abitato di Stagno (Comune di Collesalveti) posto sul lato orientale della Strada Provinciale n. 39 Vecchia Aurelia;
- Verso Sud con il Torrente Ugione e con il limite storico doganale della città di Livorno.

Ai fini dell'elaborazione di uno studio completo, l'effettiva area di ricerca e di studio è stata estesa:

- Verso Ovest fino almeno alla “*Gabbia delle Melorie*” di interesse per i risvolti in ordine ai movimenti eustatici marini;
- Verso Nord fino almeno al sistema dunale, di retro-duna e di piana costiera verso il Calambrone, Tirrenia fino alla foce dell'Arno;
- Verso Nord-Est fino alla Piana di Pisa ed alle sue ricariche idrogeologiche provenienti dai Monti e dalle Colline Pisane;
- Verso Est e verso Sud all'intera Piana di Livorno ed alle sue ricariche idrogeologiche provenienti dai Monti e dalle Colline Livornesi.

Di seguito viene proposta la cartografia della Variante anticipatrice al Piano Strutturale ed in particolare la carta dei sistemi.





# **CAPITOLO 1**

## **ATTIVITÀ DI RICERCA: REPERIMENTO, CLASSIFICAZIONE E SISTEMATIZZAZIONE DEI DATI**

### **1.1 La ricognizione dei dati e le fonti bibliografiche di ricerca**

Ai fini della redazione degli Studi geologico-tecnici a supporto della Variante anticipatrice al Piano Strutturale del PRG del Porto oltre ad una notevole quantità di dati già disponibili presso l'Autorità Portuale di Livorno sono stati acquisiti altri dati significativi da lavori presentati e depositati presso l'Amministrazione Comunale di Livorno.

Altri Enti che hanno gentilmente fornito a vario livello i dati o che sono stati contattati sono: Comune di Collesalveti, Provincia di Livorno, Uffici del Genio Civile, Consorzi di Bonifica, Registri Storici ed Archivi, Autorità Portuale, Autorità di Bacino dell'Arno, Autorità di Bacino Toscana Costa, Compagnia dei Lavoratori Portuali. Inoltre sono tornati utili alcuni dati acquisiti dalle molte entità produttive operanti all'interno dell'area in studio che sono state contattate per la caratterizzazione idrogeologica generale del Sito di Interesse Nazionale di Livorno presentata al Ministero dell'Ambiente nell'agosto 2006.

A questo già interessante e cospicuo numero di studi, approfondimenti, lavori e progetti si sono aggiunti moltissimi altri lavori eseguiti dallo Studio Geologico A. Rafanelli incaricato dall'Autorità Portuale di Livorno che, a partire dal 1973 ha lavorato ininterrottamente sul territorio. Alcuni dei più interessanti lavori consultati sono:

- Lo studio idrogeologico dell'intera Piana di Livorno;
- Lo studio per lo sfruttamento dei pozzi del campo di Mortaiolo;
- Le domande di ricerca idrica nelle località Grecciano e Valtriano;
- Lo studio sulle acque destinate al consumo umano della città di Livorno per conto dell'Azienda Municipalizzata Acqua e gas (ora ASA Livorno);
- Lo studio condotto per le aree di emungimento dei campi pozzi di Filettole (Comune di Vecchiano –PI), Paduletto (Comune di Vecchiano –PI), Tombolo (Comune di Pisa), Mortaiolo (Comune di Collesalveti – LI), Collesalveti e Colognole (Comune di Livorno).

- Indagini geologico-tecniche a supporto del progetto esecutivo per la realizzazione della Vasca n. 1 di contenimento per sedimenti di dragaggio del Porto di Livorno (Autorità Portuale di Livorno)
- Lo stesso già citato studio idrogeologico del Sito di Interesse Nazionale di Livorno (Autorità Portuale, Comune di Livorno, Associazione fra gli industriali);
- Indagini geologico-tecniche a supporto del progetto esecutivo per la realizzazione della Vasca n. 2 di contenimento per sedimenti di dragaggio del Porto di Livorno (Autorità Portuale di Livorno)

## **1.2 La metodologia dello Studio**

Lo Studio geologico-tecnico è stato condotto attraverso successive fasi operative e sistematiche che possono essere di seguito sintetizzate in:

### **FASE 1 *Analisi e sistematizzazione dei dati***

I dati acquisiti dai diversi lavori di solito si sono presentati disaggregati e chiaramente non direttamente funzionali al presente Studio; quindi è stata effettuata una discretizzazione delle informazioni ed è stato svolto un lavoro di omogeneizzazione funzionale alla ricerca. Ciò ha significato “riportare alla medesima scala informativa il dato secondo una attribuzione di classe e tipologia rispondente agli standards relativi alla tematica geologico-tecnica presa in considerazione”.

La discretizzazione compiuta sull'ingente quantità di dati è stata eseguita senza esprimere alcun tipo di giudizio sul lavoro consultato, ma cercando di valutare obiettivamente la rispondenza e l'utilità del dato per i vari temi che abbiamo sviluppato nell'ambito dello Studio, ottenendo le seguenti informazioni:

- ⌘ Ubicazione dei sondaggi a carotaggio continuo, relativa colonna stratigrafica, dati granulometrici;
- ⌘ Ubicazione indagini di tipo indiretto (geosismica);
- ⌘ Ubicazione dei punti d'acqua censiti (pozzi preesistenti, vecchi piezometri, nuovi piezometri) comprensiva delle caratteristiche tecniche di realizzazione;
- ⌘ Misure di soggiacenza e/o livelli in eventuali diverse campagne;
- ⌘ Altri dati idrogeologici caratteristici ottenuti ad esempio con prove di

permeabilità in sito, prove di pompaggio, sezioni idrogeologiche;

- ✎ Misure di conducibilità o altre chimico-fisiche condotte per determinare la qualità delle acque sotterranee e superficiali.

Questo ha permesso di ottenere una Check-list con tutte le informazioni significative reperite che ha le peculiarità di un archivio-dati continuamente aggiornabile.

L'affinamento dei dati ed il loro allineamento sono stati eseguiti mediante lo studio sistematico di tutti gli atti ed il loro confronto, ciò ha permesso di collimare le informazioni e di ricostruire i modelli più realistici da confrontare con il dato ottenuto in campo. Questa fase si è soffermata sulla conoscenza dei rapporti stratigrafici tra gli spessori, ma non ha escluso l'esame dei vari dati tecnici più pertinenti alle altre tematiche geologico-tecniche.

### ***FASE 2 Archiviazione dati su supporto informatico***

Tutti i dati raccolti sono stati ordinati in un banca dati gestionale interattiva con riferimento ad un sistema di gestione territoriale (GIS) idonea a supportare tutta la quantità di dati ambientali in via di ricollezione e rielaborazione secondo i criteri esposti.

Contemporaneamente alle prime due fasi di lavoro, mediante l'utilizzo della strumentazione informatica è stata realizzata la "Carta dei dati di base" con l'indicazione delle aree che sono state indagate, la georeferenziazione dei punti, etc..

### ***FASE 3 Inquadramento geologico, stratigrafico paleogeografico e storico***

Sulla base dei dati raccolti e discretizzati, nonchè in seguito alla consultazione di numerose fonti bibliografiche e scientifiche è stato trattato l'argomento del "mezzo", ovvero la qualità stratigrafica degli Orizzonti incontrati sia su base regionale sia, mediante focus di dettaglio, su scala più locale.

Riconoscendo l'importanza delle tematiche trattate in questa Fase sono stati descritti in dettaglio gli Orizzonti stratigrafici incontrati, ma si è cercato di definire al meglio le trasformazioni paleogeografiche e le interessanti evoluzioni protostoriche e storiche dell'areale che hanno indotto vere e proprie trasformazioni delle aree. Per questo sono state predisposte alcune Carte tematiche

di correlazione stratigrafica e di evoluzione del sistema della linea di costa.

#### ***FASE 4 Parametrizzazione geologico-tecnica dei terreni***

Sulla base dei numerosi dati di base a disposizione (in particolare ai recenti dati geotecnici derivanti dalle operazioni di campagna propedeutiche al progetto della nuova Vasca di colmata, 2008), riferendosi alle varie ricostruzioni lito-stratigrafiche degli Orizzonti, sono stati proposti una serie di parametri geotecnici al fine di orientare anche i futuri livelli di approfondimento geologico che si renderanno necessari.

#### ***FASE 5 Modellizzazione idrogeologica***

Sostanzialmente è stata suddivisa in due momenti:

- Step 1) in cui è stato abbozzato un modello generale di “ossatura-appoggio”;
- Step 2) in cui si è proceduto all'individuazione di un modello di pertinenza stretta “*micro-modello*” per ciascuna zona omogenea.

Per giungere alla definizione dello *Step 1* non sono stati adottati solo gli ambiti territoriali strettamente pertinenti all'area in esame, ma sono stati estesi ad un più vasto areale. Sono entrati in gioco tutti i sistemi idraulici superficiali e sotterranei prossimi alla superficie come i più interessanti ma anche gli scorrimenti più profondi sino alle zone di possibile ricarica /relazione con gli episodi paleo-alluvionali delle principali aste idriche superficiali.

Il modello di “ossatura – appoggio” è stato costruito mediante la predisposizione di uno schema idrogeologico con la suddivisione in macro-aree a comportamento idrogeologico uniforme con la identificazione delle aree di ricarica e/o alimentazione esterne.

Lo *Step 2* è stato definito invece da “un insieme” di più “micro-modelli” caratteristici delle varie zone idrogeologicamente omogenee.

***FASE 6 Individuazione degli stati di pericolosità e fattibilità geomorfologica, idrogeologica, idraulica e sismica***

Seguendo gli indirizzi e gli orientamenti delle normative vigenti in materia di governo del territorio a livello geologico e sulla base di specifiche riunioni tecniche che hanno portato a condividere un cospicuo numero di idee, sono stati definiti gli stati di pericolosità e fattibilità geomorfologica, idraulica e sismica.

***FASE 7 Predisposizione della Cartografia tematica***

Al fine di adeguarsi agli obiettivi espressi per ogni tematica geologico-tecnica si è ritenuto indispensabile procedere alla redazione di una cartografia tematica di elevato dettaglio composta da:

<b>TAV. 1</b>	Inquadramento regionale dell'area in esame
<b>TAV. 2</b>	Geologia, geomorfologia e Forme naturali e antropiche locali
<b>TAV. 3A</b>	Carta dati di base sondaggi stratigrafici e punti d'acqua
<b>TAV. 3B</b>	Carta dati di base dati geognostici indiretti
<b>TAV. 4</b>	Correlazioni lito-stratigrafiche
<b>TAV. 5</b>	Evoluzione della linea di costa negli ultimi 2000 anni
<b>TAV. 6</b>	Dati di base idrogeologici
<b>TAV. 7</b>	Sezioni idrogeologiche
<b>TAV. 8</b>	Livelli degli acquiferi, 2007
<b>TAV. 9</b>	Schema delle principali componenti del sistema idrogeologico
<b>TAV. 10</b>	Pericolosità geomorfologica, idraulica e sismica
<b>TAV. 11A</b>	Fattibilità geomorfologica
<b>TAV. 11B</b>	Fattibilità idraulica
<b>TAV. 11C</b>	Fattibilità sismica

## CAPITOLO 2

### GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA, ELEMENTI STRATIGRAFICI

#### 2.1 Uno sguardo alla geologia regionale

L'area in esame si colloca nella parte terminale del bacino dell'Arno che nel suo corso, attraversa una successione di bacini sprofondati e di dorsali tettoniche relativamente più alte, tutti allungati in direzione appenninica NW-SE – si veda **Fig. 1** e **TAV. 1** “*Inquadramento regionale dell'area in esame*”-.

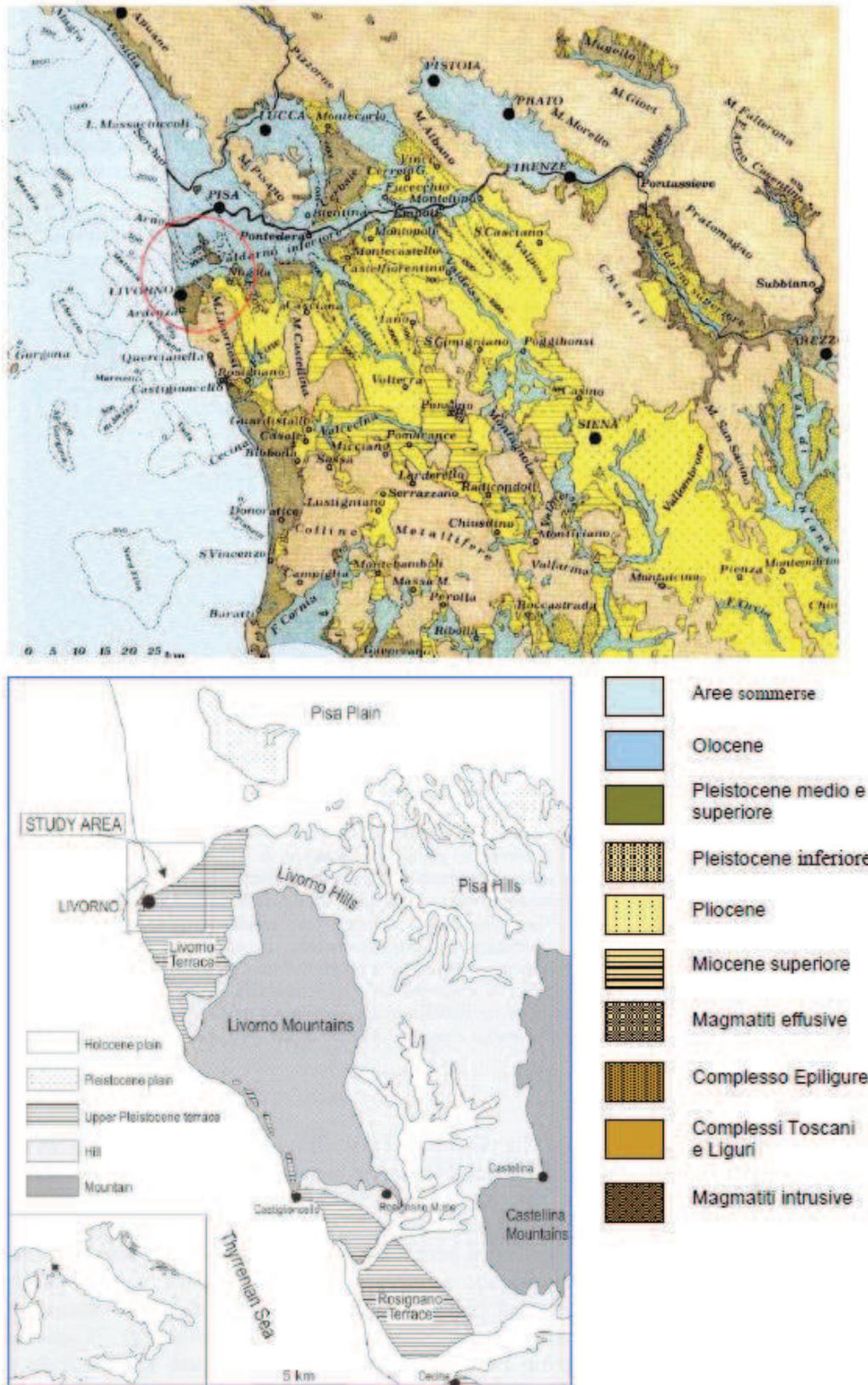
Infatti questo percorso prende origine dalle falde del crinale appenninico il cui sollevamento maggiore risale a non prima del Pliocene superiore (periodo di tempo compreso tra 3 e 1,7 MYA = milioni di anni fa), discende nel bacino del Casentino, che ha iniziato a formarsi a partire dal Pleistocene inferiore (compreso tra 1,7 e 0,7 MYA), incide, presso la gola di Subbiano, la dorsale del Pratomagno e penetra nel bacino del Valdarno Superiore, che percorre fino a raggiungere il bacino di Firenze attraverso la gola di Pontassieve.

Di questi ultimi due bacini, il primo ha iniziato a sprofondare durante il Pliocene inferiore (compreso tra 5 e 3 MYA) il secondo in corrispondenza del Pleistocene inferiore.

Dal bacino di Firenze l'Arno, superata la dorsale del Monte Albano attraverso la gola della Gonfolina, raggiunge il bacino del Pesa-Elsa, sprofondato a partire dal Miocene superiore (compreso tra 7,5 e 5 MYA) e, lambito il Monte Pisano (parte della antica e semi-demolita “Dorsale Medio-Toscana”) in corrispondenza della soglia sepolta di Pontedera, entra nel bacino versiliese-pisano, che ha anch'esso iniziato a sprofondare nel Miocene superiore.

Quanto appena sintetizzato ammette che lo sviluppo dei bacini di sprofondamento tettonico sui quali - a partire dalla grande regressione del Pliocene superiore - ha iniziato ad impostarsi il Bacino fluviale dell'Arno, sia avvenuto da SW verso NE per aggiunta progressiva di sempre nuovi bacini di sprofondamento tettonico che si sono formati dal Miocene superiore al Pleistocene inferiore sul retro del movimento orogenetico appenninico. Questo si è spostato portando sempre più ad Oriente il crinale principale e lo spartiacque, cioè nello stesso senso dell'accrescimento del bacino fluviale dell'Arno, ma in senso contrario allo scorrimento delle acque di questo fiume.

**Fig. 1: Inquadramento regionale dell'area in esame - Complessi del substrato e Neoautoctono**  
 Fonte bibliografica: Quaderno n. 3 Autorità di Bacino del Fiume Arno – Mazzanti, 1984



Quest'ultima circostanza è di per sé favorevole alla formazione di ristagni d'acqua palustri e lacustri. Tuttavia più importante fu, per l'Arno, la coincidenza del suo bacino fluviale con un'alternanza in successione di bacini e di dorsali tettoniche. Così i bacini del Casentino, del Valdarno Superiore e di Firenze, racchiusi rispettivamente tra le dorsali del Crinale Appenninico e del Pratomagno, di quest'ultimo e del Chianti, di Monte Morello e di Monte Albano, per buona parte del Quaternario furono occupati da laghi mentre il secondo di questi bacini ha risentito anche di un precedente episodio lacustre pliocenico.

L'evoluzione dei bacini tettonici che l'Arno incontra a valle della Gola della Gonfolina è stata più complessa di quella dei bacini a monte, sia perché i primi hanno iniziato a sprofondare precedentemente (con formazione di depositi lacustri del Miocene superiore), sia perché sono stati raggiunti da diversi cicli sedimentari marini ("Neoautoctono"):

- del Miocene superiore, quelli situati a Occidente della "Dorsale Medio-Toscana";
- del Pliocene inferiore-medio, che si è esteso anche a Oriente della "Dorsale Medio-Toscana" ormai parzialmente demolita proprio in corrispondenza dell'area nella quale in seguito si svilupperà il Valdarno inferiore;
- del Pleistocene inferiore, che ha interessato il bacino versiliese-pisano, debordandolo un poco verso SE fino nel bacino della Valdera (area delle Colline Pisane).

Lo sprofondamento tettonico dei bacini ha richiamato la deposizione di successioni sedimentarie maggiori (fino a oltre 2.000 m di spessore) in quelli più occidentali, maggiormente vicini all'area di ampia distensione del Mare Tirreno e attivi fin dal Miocene superiore, e minori (nell'ordine di alcune centinaia di metri) in quelli man mano più orientali, cioè nel bacino di Firenze, nel Valdarno superiore e nel Casentino. Le più recenti successioni stratigrafiche sicuramente documentanti sprofondamenti di natura tettonica risalgono al Pleistocene inferiore. Nell'ambito del bacino fluviale dell'Arno la deposizione di tutti i sedimenti posteriori è stata fortemente influenzata dalle importanti variazioni climatiche degli ultimi 0,7 MYA e, anche quando questi sedimenti sono stati interessati da dislocazioni tettoniche, per ora non è stato possibile stabilire se furono soggetti a sprofondamenti oltre che a sollevamenti.

Proprio questi innalzamenti sono invece documentati nei dintorni di Livorno<sup>3</sup> con sicurezza dalle quote raggiunte da alcuni terrazzi di eustatismo marino del Pleistocene medio (compreso tra 0,7 e 0,125 MA), quote alle quali non è possibile sia giunto il mare neppure negli episodi interglaciali di stazionamento più alto. Rimane comunque l'incertezza che nel sottosuolo della Pianura versiliese-pisana si trovino sedimenti del Pleistocene medio sprofondati a quote più basse di quelle di deposizione<sup>4</sup>.

L'apporto fluviale differenziato ha sicuramente determinato la formazione di una pianura a Sud del Serchio (Pianura di Pisa) più ampia di quella a Nord (Pianura della Versilia). Ma altri fattori sono entrati in gioco nel favorire il maggior accumulo di sedimenti nell'angolo SE del bacino di sprofondamento versiliese-pisano.

Molto importante è stata la presenza della dorsale della Meloria, sul tratto SW del bacino investito dal moto ondoso predominante dai quadranti di Libeccio. Questa dorsale oggi è sommersa dal mare ma ha corrisposto a un'area emersa nelle fasi di stazionamento basso del livello marino nei periodi glaciali. D'altra parte nei periodi di stazionamento alto del livello marino, corrispondenti agli interglaciali, come bassofondo sommerso deve avere influito sulla deriva litoranea diminuendo la dispersione dei sedimenti verso il largo e indirizzandone parzialmente il rientro verso costa e rompendo l'energia delle onde con la fitta prateria di Posidonia che l'ammantava.

## 2.2 Gli affioramenti geologici nell'area in studio

Dall'analisi della Carta geologica dei comuni di Livorno e Collesalveti (Mazzanti et alii, 1990) e dall'estratto di cartografia geologica del CA.R.G. (ancora in fase di elaborazione) – si veda **TAV. 2** “*Geologia, geomorfologia e Forme naturali e antropiche locali*” nell'area in studio si rintracciano i seguenti affioramenti:

- a. Depositi di *spiaggia attuale* (s)<sup>5</sup>, regolata dai moti ondosi del mare, dalle correnti e dalle maree insieme alle dinamiche di trasporto del Canale dello Scolmatore d'Arno; si tratta di sabbie molto fini tendenzialmente ancora in accumulo;
- b. Depositi di *alluvioni* (a), affiorante in destra idraulica dello Scolmatore e che

---

<sup>3</sup> Barsotti et al., 1974.

<sup>4</sup> Della Rocca et al., 1987.

<sup>5</sup> Per spiaggia attuale si intende la fascia continentale a contatto con il mare di recente evoluzione.

- corrisponde con la fase di risalita del livello di base dei fiumi conseguente a quella trasgressione versiliana<sup>6</sup> del livello del mare;
- c. Depositi dei *sedimenti palustri, alluvionali e di colmata* (t), spesso non facilmente riconoscibili l'uno dall'altro. Attualmente l'unica area palustre ancora non prosciugata rimane il Prato della Contessa a oriente della Fattoria di Suese in Collesalveti;
  - d. Depositi delle *Sabbie d'Ardenza* (q<sub>9</sub>) che sormontano le Calcareniti Sabbiose di Castiglioncello; sono sostanzialmente sabbie molto fini sempre di origine continentale e di accumulo eolico e di tipico colore arancio-rosso. Rappresentano per la zona una formazione tipica nell'ambito del cosiddetto Terrazzo di Livorno (nella nuova cartografia geologica del CAR.G. la formazione è stata rinominata QSD – Sabbie di Donoratico).

### 2.3 Geomorfologia dell'area emersa e forme delle aree subacquee

Il profilo geomorfologico dell'area in esame è caratterizzato da un'intensa antropizzazione che ha determinato la quasi totale elisione di segni geomorfici naturali. Si riscontrano infatti alcune lievi forme relitte, comunque intensamente trasformate dall'azione dell'uomo, come ad esempio un tratto del Canale dei Navicelli, il tratto finale dello Scolmatore d'Arno compresa la sua foce e la linea di riva attuale dove si trova una piccola striscia d'arenile continuamente modificato dai moti ondosi – si veda **TAV. 2** “*Geologia, geomorfologia e Forme naturali e antropiche locali*”-.

Più interessanti risultano i segni morfologici presenti in prossimità all'area in esame:

#### **I sistemi dunali, i cordoni litoranei ed i tomboli costieri**

Verso Settentrione già a partire dall'argine in destra idraulica dello Scolmatore d'Arno in Loc. Calambrone e verso Tirrenia sono ancora evidenti sistemi dunali e di retroduna, ovvero parte del sistema formato da cordoni litoranei<sup>7</sup> paralleli alla

<sup>6</sup> Trend trasgressivo marino in epoca Olocenica.

<sup>7</sup> Un *cordone litoraneo* (o lido) può presentarsi come un'isola allungata oppure come una penisola, congiunta cioè alla terraferma ad un'estremità e in tal caso vien detta *freccia litoranea*, oppure può essere congiunto alla terraferma alle due estremità. I cordoni litoranei possono formarsi per accrescimento di scanni subacquei quando v'è abbondante rifornimento di detrito le onde stesse elaborano questi dossi sabbiosi fino a farli emergere. I cordoni si formano di regola in posizione laterale, o meglio sotto vento, rispetto ai punti di rifornimento di sabbia: in pratica dove si fa sentire una diminuzione dell'energia di trasporto.

linea di costa che si sono succeduti nel tempo e che sono stati formati dal trasporto e deposito delle correnti di drift litoraneo.

Interessante rilevare la presenza di tomboli<sup>8</sup> in arretramento dalla linea di costa attuale in parte sormontati da dune in cui si rileva una importante ceduzione di pinete che in epoche passate sono state sfruttate per il legno. Altre volte il taglio selettivo delle pinete ha costituito un habitat agrario ottimale per la possibilità di impiantare colture estensive a graminacee con la formazione di nuclei sia pure isolati di Case coloniche attive.

E' logico supporre che questi sistemi geomorfologici si sviluppassero anche nelle parti di territorio poste in sinistra idraulica dello Scolmatore d'Arno ed in fregio alla città di Livorno, ma nell'area in studio, queste forme sono state completamente rielaborate ed eliminate in superficie.

I cordoni litoranei si andavano a raccordare verso Meridione e verso occidente con il bordo geomorfologico del terrazzo più recente di Livorno; queste forme che oltre ad essere formate dalle dinamiche di trasporto e deposito marino, erano anche continuamente rielaborate dal vento, per cui verso Meridione la protezione eolica dovuta alla presenza di una parete di falesia ed in successione della "quinta" costruita della città, ha sicuramente contribuito ad appiattare la morfologia.

Non è casuale che i luoghi degli antichi Porti fossero prossimi ad una protezione naturale, ciò li preservava anche dalle veloci dinamiche di interrimento che come vedremo hanno condizionato per secoli (e continuano a farlo anche oggi) lo sviluppo degli specchi acquei portuali.

### **La spianata di abrasione marina tirreniana del Terrazzo di Livorno**

Dicevamo prima che un altro importante segno che limita la parte più Meridionale e quella verso occidente dell'area in studio è rappresentato dal bordo del Terrazzo di Livorno e quindi verso l'entroterra dalla superficie di abrasione marina.

---

In molti casi si osservano cordoni che chiudono le insenature, separando del tutto o in parte dal mare aperto gli specchi d'acqua che diventano *lagune*, *stagni* o *laghi costieri*; perché ciò accada occorre che non sia grande la profondità nelle insenature stesse.

<sup>8</sup> Si dicono *tomboli* i cordoni litoranei sormontati da dune; i testi stranieri riportano invece il termine *tombolo* solo per quei cordoni litoranei che i processi costieri hanno costruito dietro un'isola, in modo tale da congiungerla alla costa più vicina creando una penisola.

Si tratta di formazioni del Pleistocene superiore che si trovano sul Terrazzo basso (*Terrazzo di Livorno*) – si veda **Fig. 2**: Terrazzo II - molto ben conservato e disposto base contro base rispetto a quello alto e sono costituite dalle Calcareniti Sabbiose di Castiglioncello (q<sub>8</sub>)<sup>9</sup>, dai Conglomerati di Santo Stefano e dalle Sabbie di Ardenza (q<sub>9</sub>) con i coevi Conglomerati, calcareniti sabbiose e sabbie di Rio Maggiore, che esprimono talora la fase trasgressiva del ciclo eustatico dell'interglaciale Tirreniano ma, principalmente, episodi regressivi continentali da attribuirsi a diverse fasi del Wurm.

L'inizio del Pleistocene superiore è molto ben caratterizzato, al piede occidentale dei Monti Livornesi dai sedimenti dell'Eutirreniano a *Strombus bubonius* e dal Terrazzo di Livorno. Questa trasgressione glacioeustatica ha riportato nuovamente il litorale in una posizione più a Est di quella attuale con le piane di Livorno e di Rosignano sommerse dalle acque.

Nella **TAV. 2** è stato riportato il bordo superiore del Terrazzo di Livorno che, almeno nel tratto prospiciente l'area cimiteriale, ha assunto in letteratura il termine di "Gronda dei Lupi", ovvero una specie di falesia medio-bassa che in certi periodi, (post-tirreniani) ha costituito anche il limite tra le terre salde e le parti sommerse dal mare o le aree di tipo palustre (ed in alcuni casi, localmente lagunari).

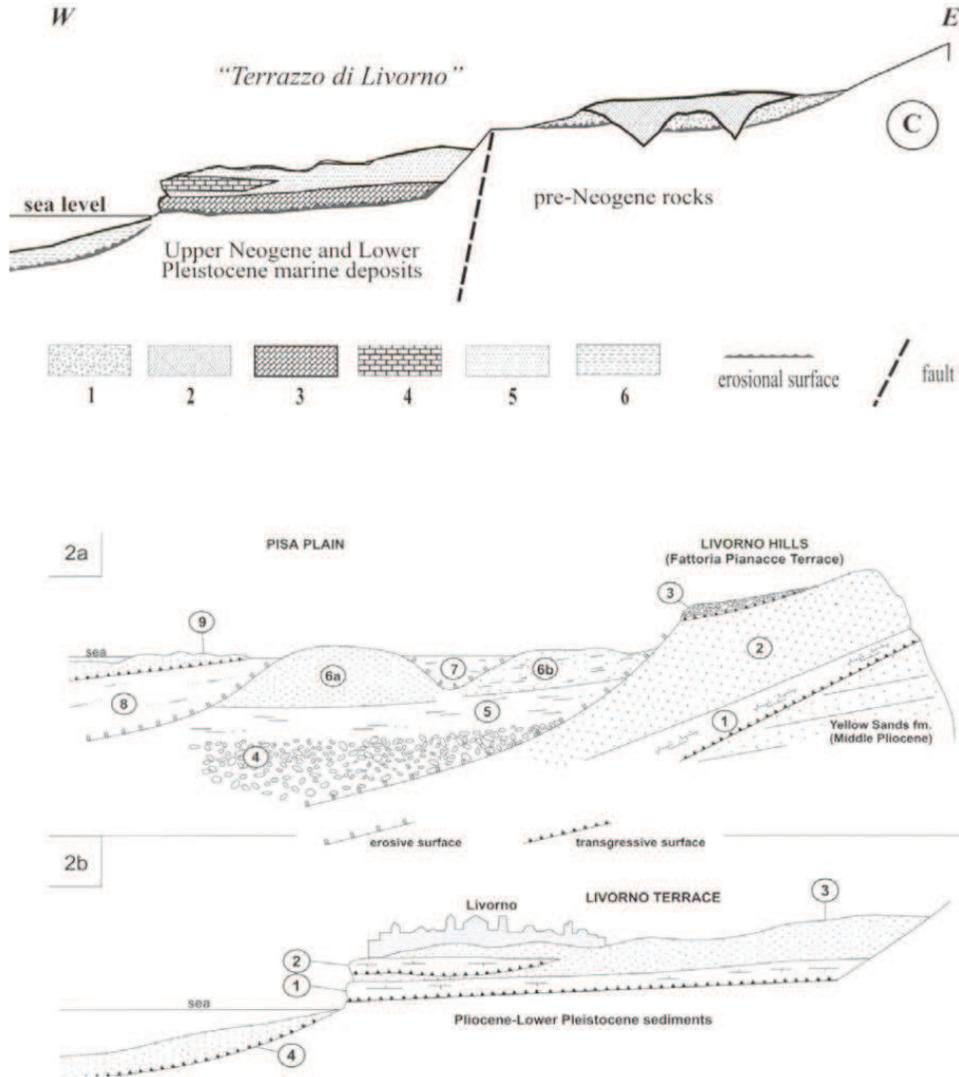
In realtà questa linea ben definibile rappresenta la sommità, il bordo superiore di una falesia che non poteva affacciarsi nel complesso a picco sulla superficie marina, ma era costituita da un piede più o meno sommerso nei vari periodi evolutivi paleogeografici post formazionali.

Inoltre – interessante per lo scopo del presente Studio – questo specchio di scarpata più o meno ripido è stato continuamente elaborato dagli agenti esterni e ha subito arricchimenti di materiali a granulometria compresa tra una ghiaia fine ed una sabbia grossolana per l'apporto locale dei vari corsi d'acqua che, oltre ad incidere ed alluvionare il piano del terrazzo hanno formato sistemi di piccoli conoidi oltre la Gronda. Considerato la complessa evoluzione dell'area con continue rielaborazioni del materiale eroso, trasportato e sedimentato, è legittimo pensare ad una discontinuità di questi "*scarichi alluvionali*".

---

<sup>9</sup> Nella simbologia utilizzata da Renzo Mazzanti nella carta geologica dei Comuni di Livorno e Collesalveti, 1990.

**Fig. 2:** I Terrazzi morfologici di Livorno ed i rapporti con la Piana di Pisa  
Fonte bibliografica: Pubblicazione su Memorie della Società Paleontologica Italiana, 1994



#### SCHEMA 2a

1 - Sands and Clays, 2 - Nugola Vecchia Sands, 3 - Fattoria delle Pianacce continental deposits, 4 - Arno and Serchio gravels, 5 - Fluvial and marshy silts, 6a - Aeolian sand of Coltano, 6b - Sands and Muds of Vicarello, 7 - Holocene fluvial sediments, 8 - Holocene silts, clays and peat, 9 - Sediments of the Versilian trasgression

#### SCHEMA 2b

1 - Calcarenitic layer "Panchina I", 2 - Calcarenitic layer "Panchina II", 3 - Ardenza sands and Rio Maggiore Conglomerates, 4 - Sediments of the Versilian trasgression

### **Apparato idrografico di superficie**

In sostanza si rilevano tre differenti macro-elementi informativi geomorfologici:

- corsi d'acqua naturali che talvolta hanno subito rettifiche, modifiche di tracciato o lavori di rivestimento;
- canali realizzati su antiche tracce di corsi d'acqua naturali mediante l'escavazione, il dragaggio o la formazione di banche fluviali con funzioni di regolamentazione e scolmature delle piene del Fiume Arno o con caratteristiche di navigabilità interna in collegamento con il mare;
- tracce di canali tendenzialmente antropici con tipiche forme a "scacchiera" o a "rastrello" con evidenti funzioni di drenaggio delle aree acquitrinose per l'imbonimento dei terreni mal saldi<sup>10</sup>.

#### **1.**

Appartengono al primo gruppo i torrenti ed i vari rii che provengono dalle spalle collinari della città di Livorno, che non attraversano l'area in studio e che al più corrono parallelamente ai suoi limiti; tra questi elenchiamo il Torrente Ugione, il Rio dell'Acqua Puzzolente (affluente in sinistra idraulica del T. Ugione) ed il Rio Cigna.

Sotto il profilo geomorfologico il Torrente Ugione deve aver subito alcune modificazioni di tracciato anche in relazione agli sviluppi di espansione settentrionale della città, mentre è utile ricordare che in anni recenti (1980-1985) il tratto finale del Rio Cigna è stato completamente rivestito e la sua parte terminale è divenuta in pratica un canale trapezoidale rivestito in cemento.

#### **2.**

Sono ricompresi nel secondo gruppo quei corpi idraulici che hanno una direzione più perpendicolare all'attuale linea di costa con andamento pressapoco E-NE/W-SW, come ad esempio lo Scolmatore d'Arno che è stato realizzato per proteggere l'abitato di Pontedera e Pisa dalle piene del Fiume Arno.

Proprio per la sua funzionalità idraulica, lo Scolmatore, che nel tratto finale, più di stretto interesse è protetto in sinistra idraulica da una banca trapezoidale con una palancolata, non può essere definito un corso naturale ad ogni effetto anche perchè

---

<sup>10</sup> Un'antica terminologia rintracciata su varie fonti bibliografiche storiche ben evidenzia la caratteristica di vacanti quanto mai mutabili terreferme, dei terreni prospicienti le linee di costa.

manca l'affioramento di evidenti coltri di alluvionamento al suo intorno. Ciò avviene poichè siamo prossimi al suo estuario e perchè lo Scolmatore è stato dimensionato per contenere precise quantità d'acqua che provengono dall'Arno.

Proprio per le sue caratteristiche intrinseche, storicamente si sono verificati rari casi in cui lo Scolmatore d'Arno ha tracimato le acque e, casomai, questo è accaduto per il grave problema, ad oggi ancora irrisolto, del suo costante interrimento, specialmente nel tratto terminale<sup>11</sup>.

Nato con una profondità variabile tra i 3,50 ed i 4,00 m. in certe zone oggi lo Scolmatore ha profondità assai inferiori al metro tanto che con le continue riduzioni delle portate in periodi siccitosi affiorano isole di sabbia e limo, specialmente nel tratto compreso tra l'Aurelia e la foce.

Lo Scolmatore, specialmente nel tratto terminale ha un gradiente piuttosto basso e la presenza di una foce non protetta ai marosi più intensi è la causa diretta degli ingenti disagi alla sua navigabilità interna.

Con un Accordo Interistituzionale promosso dalla Regione Toscana è in corso di elaborazione un progetto di "Adeguamento idraulico e navigabilità del Canale Scolmatore Arno".

Oltre allo Scolmatore d'Arno, si rintracciano altri corpi idraulici che hanno caratteristiche di costruito, come ad esempio lo storico Canale dei Navicelli, ma anche il Canale Emissario di Bientina e la Fossa Chiara, il Fosso della Tora e l'Antifosso delle Acque Chiare.

### 3.

Appartengono al terzo gruppo i segni delle bonifiche o degli imbonimenti che durante oltre 4 secoli sono stati condotti nell'area in esame. Si tratta talvolta di tracce piuttosto flebili che ancora si possono rintracciare sul territorio, magari linee di viabilità che si sono giustapposte ad apparati di bonifica talvolta molto complessi o altre tracce marcate dalla presenza di fosse di varia gerarchia che hanno mantenuto la loro funzionalità idraulica nei diversi anni.

---

<sup>11</sup> E' stato recentemente sottoscritto un importante Accordo di programma con la Regione Toscana e numerosi altri Enti per "L'adeguamento idraulico e navigabilità del Canale Scolmatore".

Certamente occorre attribuire una certa importanza a queste vere e proprie reti di drenaggio superficiale proprio in ordine alla organizzazione dei deflussi sub-coticali che possono aver mantenuto una “memoria idrogeologica” e possono costituire assi drenanti preferenziali nei primi spessori di terreno.

Di seguito elenchiamo alcuni altri segni geomorfologici che è ancora possibile rilevare nell'area in studio:

- ✓ Le superfici rese impermeabili dall'azione antropica (asfaltate, cementate, utilizzate per i sedimi dei capannoni o altri impianti industriali compreso la viabilità primaria e secondaria);
- ✓ Le superfici più infiltranti e sempre realizzate dall'azione antropica costituite dai piazzali formati da stabilizzati, mediante ossature di pezzatura a varia granulometria e qualità di materiali vari;
- ✓ Le superfici naturali senza alcun tipo di vegetazione, con corpi denudati correnti, incolti sterili, abbandoni colturali;
- ✓ Le superfici naturali con vegetazione ripariale, di fragmiteto o canneto, senza continuità colturale, ma con presenza di manto erboso diffuso e non stagionale;
- ✓ Le superfici degli alvei naturali, dei canali o delle fosse a diversa gerarchia con vari gradi di artificialità;
- ✓ La rete di fognatura bianca e nera presente nell'area, così come quella di adduzione dell'acqua civile ed industriale;
- ✓ I principali assi drenanti resi dalle sovrapposizioni storiche del tessuto dell'area

### **Le forme subacquee nelle aree antistanti all'area portuale in studio**

Nell'Indagine geologico-tecnica a supporto della progettazione esecutiva della seconda vasca di contenimento per sedimenti di dragaggio del Porto di Livorno (giugno 2008) sono stati eseguiti e interpretati dei profili sismo-stratigrafici – si rimanda alla consultazione della successiva **TAV. 3B** - .

I profili sismo stratigrafici (SBP) sono, come è evidenziato nelle carte della navigazione, pressoché coincidenti con quelli della tomografia (ERT), anche se più corti causa ridotta operatività in acque basse del mezzo usato. L'interpretazione dei profili non fornisce indicazioni sulla composizione degli strati in termini di “natura esatta del sedimento”, ma piuttosto consente di trarre

alcune considerazioni sull'evoluzione morfologica del substrato.

La maggior parte dei profili mostrano un primo "strato" superficiale, di scarso spessore (qualche decina di centimetri), acusticamente trasparente e che può essere associato ad un deposito recente indifferenziato probabilmente di natura sabbioso-limoso.

Il livello sottostante appare in molti profili debolmente stratificato e potrebbe far pensare ad una evoluzione più complessa, confermata nella parte più distale (offshore) dei profili, da una laminazione inclinata (cunei) tipica di strutture di progradazione.

Infine è possibile rilevare un ultimo livello in discordanza con i precedenti, talvolta affiorante nella zona più lontana dalla costa, caratterizzato da una morfologia superficiale frastagliata, causata probabilmente dalla composizione stessa del sedimento.

## **2.4 Ricostruzione lito-stratigrafica dell'areale**

Per meglio caratterizzare le sequenze degli spessori lito-stratigrafici e vista la posizione geografica in cui si colloca il sito in esame (ovvero nella parte terminale della Piana di Pisa e Livorno) è stato avviato uno specifico approfondimento tematico basato su tre ordini di livello:

- ⌘ Ricostruzione degli elementi lito-stratigrafici della Piana di Pisa;
- ⌘ Rappresentazione dei principali elementi lito-stratigrafici della Piana di Livorno;
- ⌘ Approfondimento stratigrafico e focus sull'areale in esame sulla base dei sondaggi geognostici già eseguiti, esaminati e raccolti per lo Studio.

### **2.4.1 Gli elementi lito-stratigrafici della Piana di Pisa**

L'estesa Piana di Pisa è stata studiata fino a profondità considerevoli anche per la possibilità che si potessero sfruttare i giacimenti di gas fossili che sono stati scoperti. Allo stato attuale delle conoscenze sembra che sia stata evidenziata una scarsa produttività dei giacimenti per cui il progetto è stato pian piano accantonato.

Dall'analisi degli Studi consultati sono state evidenziate tre tipologie di substrato: il profondo, l'intermedio ed il superiore.

### **Il substrato profondo della Pianura di Pisa e delle Colline Pisane**

Affiora verso Nord nei Monti Pisani e verso Sud nei Monti Livornesi e nei Monti di Cascina. A queste ultime aree corrispondono degli alti tettonici, scampati agli sprofondamenti delle "fosse" nelle quali, a partire dall'inizio della formazione (Miocene superiore), si sono depositati i sedimenti.

I tre sondaggi profondi eseguiti lungo l'asse Ovest-Est della Pianura di Pisa (Poggio, Zannone e Pontedera) avendo raggiunto la superficie del substrato in questione rispettivamente a -690 m., -387 m. e -706 m. riescono a dare un'idea del tetto della superficie. Per la Pianura di Pisa e le Colline Pisane è stata pubblicata<sup>12</sup>, sulla base di un rilievo sismico a riflessione a profilo continuo effettuato dall'Agip Mineraria, la ricostruzione in profondità di un orizzonte interpretato come tetto del substrato profondo che appare estremamente mosso con aree relativamente poco sprofondate (Zannone) ed altre che raggiungono invece i -1.500/-2.000 m. – si veda **Fig. 3** e si riconsulti la **TAV. 1** -.

Molto diverso è il modo con cui queste profondità vengono raggiunte: il ravvicinarsi delle isobate in alcuni tratti indica la presenza di vere e proprie pareti sub-verticali sepolte del tetto del substrato profondo. Con ogni probabilità queste superfici molto ripide corrispondono a faglie (bordo occidentale del Monte Pisano, allineamento delle isobate a occidente del Poggio) che poi sono responsabili dell'apertura e dello sprofondamento delle "fosse". Questa informazione potrà tornare utile per la valutazione degli aspetti sismici.

### **Il substrato intermedio**

E' definito come il pacco di sedimenti che si è deposto dal Miocene superiore alla fine del Pleistocene inferiore. Tutto l'insieme di questi sedimenti affiora in monoclinale dai bordi settentrionali dei Monti Livornesi.

La successione stratigrafica del substrato intermedio a partire dal termine di base è formata da:

---

<sup>12</sup> Ghelardoni et al. 1968.

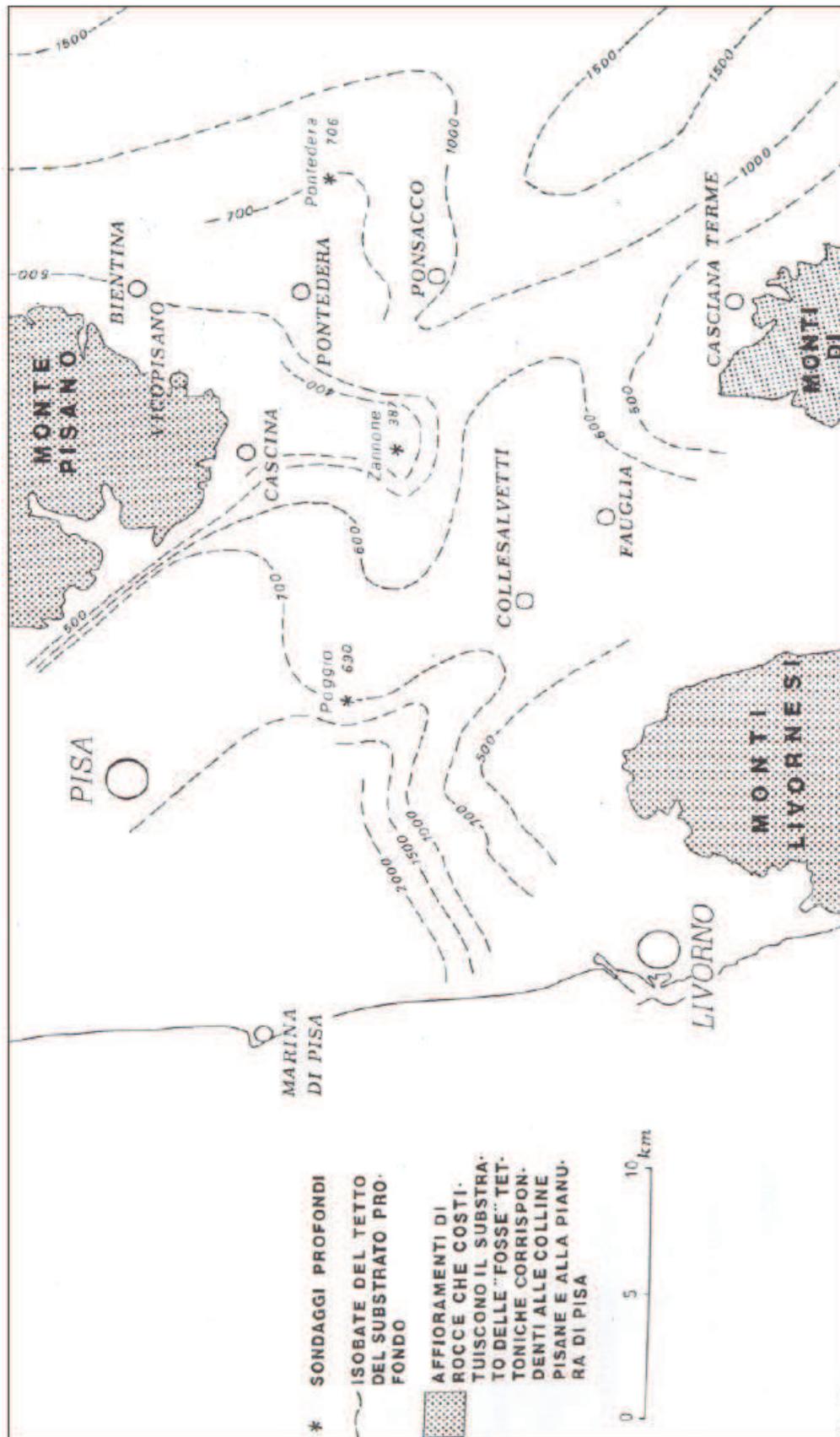


Fig. 3 Ricostruzione del tetto del substrato profondo della Piana di Pisa  
L'evoluzione del litorale livornese-pisano fino alla metà del XIX secolo

Fonte bibliografica: R. MAZZANTI, M. PASQUINUCCI.

1. Conglomerati e sabbie di base: hanno spessori modesti di poche decine di metri;
2. Argille lagunari: in alcuni lavori sono state eseguite misure di spessore solo per 39 metri, ma l'insieme del sedimento raggiunge spessori senza dubbio maggiori;
3. Gessi, presenti in sottilissimi strati alternati ad argille: rappresentano il livello evaporitico del Miocene superiore;
4. Sabbie, argille e conglomerati del tetto del Miocene superiore: rappresentano la sedimentazione di un bacino senza comunicazione con i mari aperti, con acque poco profonde ed a debole salinità. Dalla presenza di fossili si ritiene il loro riferimento al livello del "lagomare" per uno spessore fino a 150 metri;
5. Argille azzurre (I° banco di circa 50 m. di spessore) corrispondono ad un ambiente caratterizzato da un veloce innalzamento del livello delle acque del Bacino del Mediterraneo;
6. Sabbie gialle (I° banco di poco più di 50 m. di spessore), è stato considerato come tipico di un mare profondo e dovuto alla risedimentazione di depositi più litorali;
7. Argille azzurre (II° banco di circa 30 m. di spessore);
8. Sabbie gialle (II° banco di circa 50 m. di spessore);
9. Argille azzurre (III° banco di circa 150 m. di spessore) del Pliocene inferiore questo livello insieme ai precedenti 7 ed 8 sono considerati depositi in ambiente francamente marino;
10. Sabbie gialle (III° banco di spessore originario non valutabile perchè sormontato dagli strati di base della trasgressione del Pleistocene inferiore), questo sedimento rappresenta la chiusura di un ciclo di sedimentazione marina con una forte regressione;
11. Sabbie ed argille ad *Arctica*, sedimento di mare poco profondo, la base di questo livello viene considerato trasgressivo e appartenente al Pleistocene inferiore;
12. Sabbie di Nugola Vecchia, rappresentano il ritorno ad una sedimentazione di mare assai basso dopo l'acme dell'episodio trasgressivo, indicano quindi la regressione del ciclo sedimentario marino del Pleistocene inferiore.

### **Il substrato superiore**

Volendo focalizzare la nostra attenzione sulla Piana di Livorno e negli immediati dintorni il substrato superiore è caratterizzato dalla presenza della *Formazione di*

*Casa Poggio ai Lecci* che giace su un Terrazzo risalente fin oltre a 100 m. di quota e passante verso Sud al Terrazzo della Fattoria delle Pianacce. E' inoltre presente il Terrazzo di Livorno che giunge con depositi marini fino quasi a 15,00 m. di quota e che sostiene successioni stratigrafiche di esiguo spessore, denotanti almeno due cicli trasgressivi-regressivi.

Tra queste successioni di notevole interesse per le informazioni sulle ricariche idrogeologiche è quella ricostruita da Barsotti *et al.* (1974) sulla base del lavoro del Bacci *et al.* (1939) lungo la Gronda dei Lupi prima che gli affioramenti fossero coperti dall'attività antropica. Partendo dal basso troviamo:

- a) Argilla ad *Arctica*
- b) Conglomerato
- c) Sabbia grigia
- d) Argilla continentale di clima freddo
- e) Panchina calcarenitica con fossili marini
- f) Sabbia con fauna salmastra
- g) Ghiaia (ghiaia mista a sabbia grossolana)
- h) Sabbia grossolana di duna arrossata
- i) Sabbia eolica finissima, arrossata finemente stratificata
- j) Suolo contenente industria musteriana

Lo studio della successione stratigrafica ha permesso agli studi di conferire:

- ↯ un'età tirreniana (cioè corrispondente all'interglaciale Riss-Wurm) al conglomerato (b) della successione dei Lupi,
- ↯ un'età Wurm I all'argilla continentale a pollini del piano montano (d),
- ↯ un'età intertirreniana alla "Panchina" con fossili marini (e).

La presenza di industria musteriana (j) al tetto della successione dei Lupi garantisce poi che quest'ultima è completamente compresa nei limiti del Pleistocene superiore e più precisamente che è anteriore all'episodio Wurm III di circa 30.000 anni fa.

L'importanza della successione stratigrafica dei Lupi consiste principalmente nel fatto che appariva lungo una parete d'erosione che, in affioramento solo per i circa 20,00 m. superiori corrispondenti alla scarpata del Terrazzo di Livorno, continua al di sotto dei sedimenti della Pianura di Pisa presenti con alcuni dei livelli più caratteristici del "substrato superiore":

- ↖ Limi fluvio-palustri di superficie
- ↖ Limi fluvio-palustri del sottosuolo
- ↖ Conglomerati dell'Arno e del Serchio da Bientina, posto tra i 30,00-35,00 m. fino ai 50,00 m. di profondità

Il livello più ampiamente diffuso del substrato superiore è rappresentato proprio da questi Conglomerati da Calcinaia fino al mare. Di questo sedimento la cui posizione nel sottosuolo è ampiamente nota perchè raggiunto da un'infinità di pozzi per emungere la falda d'acqua che contiene viene rappresentata in **Fig. 4** attraverso isobate.

La notevole profondità a cui giace questo conglomerato (dai -40,00 ai -60,00 m., anche in corrispondenza dell'orlo più meridionale della Pianura di Pisa nel quale non sembra abbia subito apprezzabili approfondimenti tettonici), malgrado vada considerato di formazione relativamente recente, post-tirreniana, dipende dalla sua deposizione in corrispondenza di una fase climatica glaciale (evidentemente wurmiana) di grande abbassamento del livello del mare.

Al di sopra del Conglomerato dell'Arno e del Serchio da Bientina si trova il livello dei Limi fluvio-palustri del sottosuolo, espressione sedimentaria della diminuita attività fluviale, non più marcata da ciottoli, talora anche grossolani, del livello precedente.

E' verosimile che, secondo quanto rintracciato in bibliografia, questo cambiamento delle caratteristiche sedimentarie sia la conseguenza di una mutazione delle condizioni climatiche che, da una fase "oceanica" di grande umidità e trasporto fluviale, mutarono verso una fase più "continentale", assai arida, che sarebbe culminata con la formazione delle dune delle sabbie eoliche dell'Isola di Coltano (posta ben ad Oriente dell'area in studio).

Nella parte di queste dune che emerge dai sedimenti fluvio-palustri olocenici, sono stati rintracciati abbondanti resti di industria musteriana che ne limitano l'età superiore intorno ai 40.000 anni fa, attribuendola ad una fase temporale non più recente del Wurm II.

Le dune delle Sabbie eoliche dell'Isola di Coltano sono spesso affogate o emergono di poco con le loro sommità dai Limi fluvio-lacustri di superficie. Questi ultimi depositi rappresentano la sedimentazione dell'Arno o dei corsi minori della Piana di Pisa che spesso si impaludavano allo sbocco della pianura.

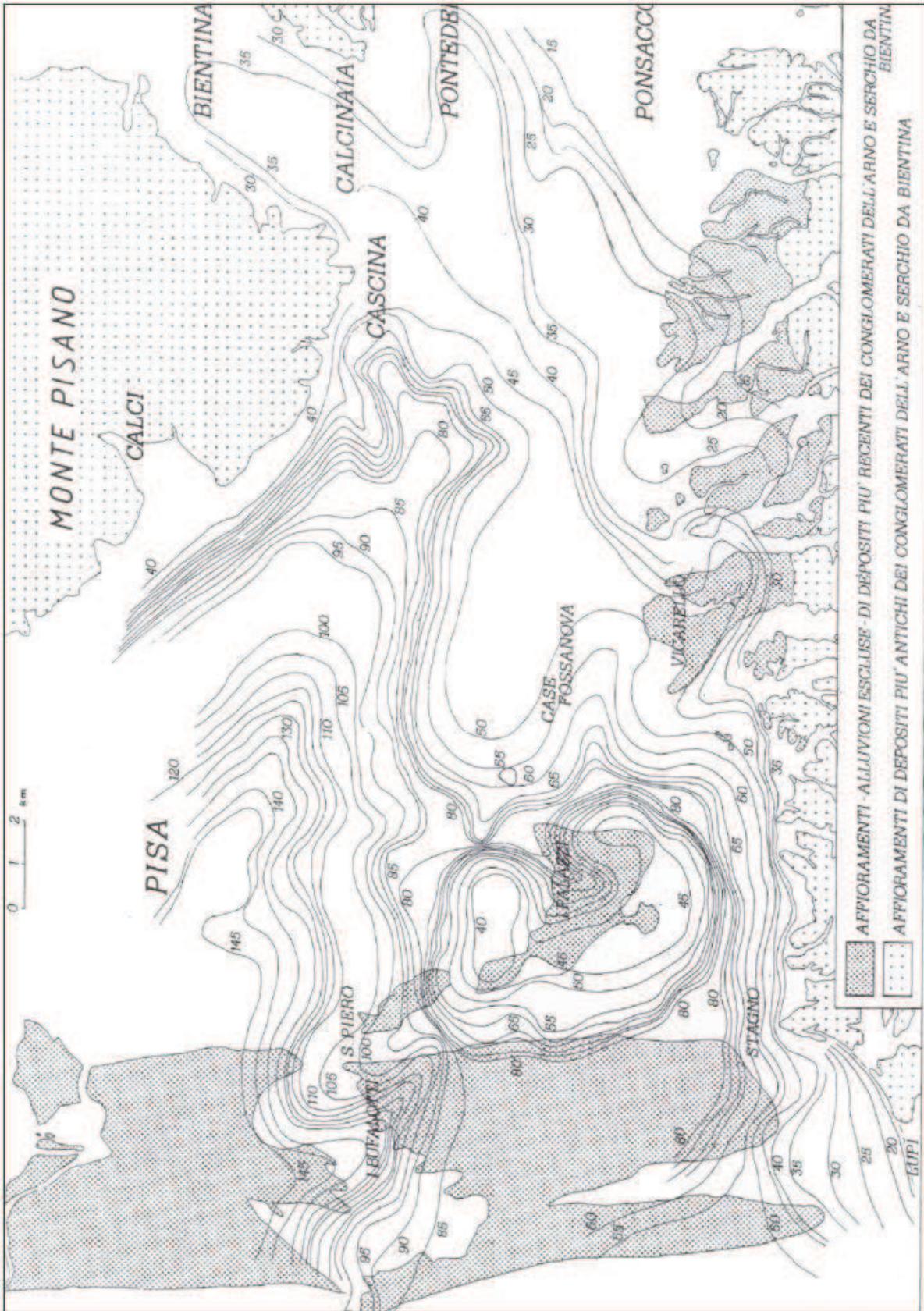


Fig. 4 Carta delle isobate del letto del Conglomerato dell'Arno e Serchio da Bientina  
 Fonte bibliografica: R. MAZZANTI, M. PASQUINUCCI, L'evoluzione del litorale limense-pisano fino alla metà del XIX secolo

Questa situazione si è verificata specialmente con l'Olocene (a partire da circa 10.000 anni fa), quando superato l'ultimo acme glaciale, il clima si è notevolmente temperato ed il livello del mare, sia pure con oscillazioni minori, è andato progressivamente innalzandosi ed ha provocato il sovralluvionamento rapido della pianura. L'innalzamento del mare che si fa risalire intorno ai 2.500 anni a.C. rappresenta la cosiddetta trasgressione "versiliana", la successiva regressione, che ha portato all'emersione della parte più occidentale della Pianura di Pisa, è il risultato dell'enorme aumento del trasporto solido specialmente dell'Arno, avvenuto ormai in epoca storica e verosimilmente in gran parte provocato da azioni umane che hanno accelerato l'erosione montana e collinare con azioni tese al disboscamento per l'estensione dei coltivi.

#### **2.4.2 Elementi lito-stratigrafici generali della Piana di Livorno**

Dai vari studi consultati<sup>13</sup> riguardanti l'areale in esame viene ritenuto estremamente interessante il recente lavoro pubblicato sul Bollettino della Società Paleontologica Italiana da Dall'Antonia, Ciampalini, Michelucci, Zanchetta, Bossio e Bonadonna (2004) che illustra i principali risultati emersi da uno studio multidisciplinare condotto su 15 sondaggi guida effettuati nell'area di Livorno.

Questo studio interessa un'area situata sul terrazzo eustatico di Livorno ed il settore più meridionale della Pianura di Pisa, che sono separati da una scarpata di origine erosiva nota nella letteratura come "Gronda dei Lupi" perciò risulta molto interessante per il nostro lavoro poiché sulla base di tests paleontologici, di datazioni <sup>14</sup>C e di approfondimenti paleogeografici definisce, il succedersi di diverse Unità stratigrafiche con una certa precisione.

L'interpretazione stratigrafica dei 15 sondaggi studiati nel lavoro scientifico -si veda la **TAV. 3A** "*Carta dati di base*" *sondaggi stratigrafici e punti d'acqua*, identificati dal Sondaggio n. 274 al n. 293) - ha permesso di riconoscere 7 principali unità litostratigrafiche, alcune delle quali possono essere correlate con formazioni affioranti nella Toscana Nord-Occidentale.

Nel dominio del Terrazzo di Livorno è stato possibile confermare la presenza al di sotto della panchina Eutirreniana di sedimenti marini del ciclo Santerniano-Emiliano. Tuttavia la successione pleistocenica risulta caratterizzata da due unità riconosciute per la prima volta. In un sondaggio effettuato in prossimità della

---

<sup>13</sup> In particolare gli Studi condotti durante gli scavi del Bacino di Carenaggio in ambito portuale.

scarpata “Gronda dei Lupi” sono stati incontrati sedimenti da costieri a transizionali; gli Autori affermano che questi sedimenti – che indubbiamente necessitano di ulteriori approfondimenti – potrebbero essere l'espressione di un ciclo di probabile età pleistocenica superiore e posteriore alla deposizione della “panchina” Eutirreniana.

Nella Pianura di Pisa sono stati individuati sedimenti continentali e di ambiente salmastro, con livelli inferiori presumibilmente riferibili al Pleistocene superiore, che sono stati interrotti da sabbie ascrivibili alla trasgressione Versiliana. La successione termina con depositi costieri di età storica.

Qui di seguito vengono descritte sinteticamente le Unità stratigrafiche riconosciute nello studio:

### UNIT 1

Questa Unità stratigrafica che compare in prossimità del bordo della Gronda dei Lupi e, naturalmente verso l'interno della città di Livorno, comprende due sub-Unit: la 1A caratterizzata da sabbie limose e argille azzurre-grigie con limi argillosi e la 1B in cui sono incluse alternanze di limi-sabbiosi, sabbie medie-fini ed argille con sabbie grossolane. Dalle associazioni di Ostracodi rilevati alla Sub-Unit 1A è stata conferita l'età del Pleistocene Inferiore, mentre le faune rintracciate nella Sub-Unit 1B suggeriscono il Pleistocene Inferiore.

Le microfaune presenti indicano che i sedimenti della Sub-Unit 1A si sono depositi in un ambiente a normale salinità con locali influenze di *fresh-brackish waters*, mentre la Sub-Unit 1B è caratteristica di una non favorevole condizione paleo-ambientale riferibile probabilmente ad *brackish water setting*.

L' Unità 1 ha una certa corrispondenza – seppure non precisa - con quella studiata dal Mazzanti, Barsotti nel 1974 per lo Studio del bacino di carenaggio in cui si rilevava che a questo primo orizzonte appartengono i sedimenti del Calabriano<sup>14</sup> costituiti in prevalenza da argille con sabbie e da conglomerati minuti. Facendo particolare riferimento alla stratigrafia descritta durante i lavori di scavo del Bacino di Carenaggio della Torre del Fanale (Livorno, 1971), a questa Unità appartengono n. 6 livelli così descrivibili dal più livello antico<sup>15</sup>:

---

<sup>14</sup> Pleistocene antico tra 1,8 ed 1 m.y.a.

<sup>15</sup> Tra parentesi sono indicati i massimi spessori rintracciati.

LIVELLO 1- Argilla un po' sabbiosa, azzurra pressochè priva di macrofossili (max. 4.00 m.) – riteniamo che questo spessore possa essere più propriamente classificato come un limo fine con intercalazioni di sabbia fine -;

LIVELLO 2 - Limo ed argilla grigio blu con minuti ciottoli sparsi e ricchezza di macrofossili (max. 2.00 m.);

LIVELLO 3 - Limo e sabbia argillosa grigio-blu in strati di circa 10 cm. con abbondante malacofauna e frammenti di tronchi lignitizzati (max. 2.00 m.);

LIVELLO 4 - Argilla azzurra con sottili letti di argilla sabbiosa. Macrofossili frequenti nelle intercalazioni sabbiose (max. 7,00 m.);

LIVELLO 5 - Sabbia talora cementata di colore grigio con zone giallo oca. Diffusi ciottoli da costituire un vero e proprio conglomerato. Estremamente fossilifero. (max. 1.00-1.50 m.);

LIVELLO 6 -Argilla leggermente siltosa azzurra, macrofossili quasi del tutto assenti (max. 4.00 m.)

### UNIT 2

Anche questa Unità stratigrafica che compare dalla prossimità del bordo della Gronda in direzione della linea di costa, mentre non si rintraccia nella parte superiore del terrazzo, è caratterizzata da sabbie grossolane e ghiaie sparse con passaggi a sabbie più fini fino alle argille, questa Unità è normalmente sovrapposta ai depositi calcarenitici dell'Unità 3.

Il rintracciamento delle faune ad Ostacodi indicano una deposizione nel Pleistocene Inferiore; nel particolare sembrerebbero essere attribuibili al Siciliano. La paleogeografia di questo spessore evidenzia un caratteristico ambiente marino con caratteristiche di vicinanza della linea di costa con condizioni *euhaline*.

### UNIT 3

Questa Unità è ben evidente e posta alla base del Terrazzo di Livorno ed è costituita da una sabbia spesso cementata in forma di calcarenite (panchina) con abbondanti conchiglie marine (molluschi).

L'Unità viene ritenuta appartenere ad un deposito trasgressivo del Pleistocene superiore ben riconosciuto nella fascia costiera di Livorno. Questo spessore di calcarenite si correla con il primo orizzonte di panchina rintracciato negli scavi della Torre del Fanale (datato circa 125.000 yr BP).

#### UNIT 4

Consiste in un'alternanza di limi-argillosi grigi-azzurri e sabbie. Il Radiocarbonio data alcuni frammenti di legno presenti nello spessore, intorno ai 40.700 yr BP, ma non viene escluso un rimaneggiamento di questi materiali. Questa Unità sembra essere posizionata tra il Terrazzo di Livorno e la Pianura di Pisa. Dall'analisi paleontologica emerge che è più recente dell'Unità 6 e comunque sempre attribuibile al Pleistocene superiore.

#### UNIT 5

Questa Unità viene suddivisa in due Sub-Unit: la 5A, posta in basso comprende spessori di limo ed argilla sabbiosa con sparsi granuli di carbonati e spessori di ghiaie o sabbie grossolane. La Sub-Unit 5B posta in alto, è composta da sabbie e da sabbie limose con noduli di manganese millimetrici con vari livelli di sabbie più grossolane. La Sub-Unit 5A è stata accumulata in un ambiente di piano alluvionale caratterizzato da paleo-canali con caratteristiche di trasporto di materiale anche grossolano. La Sub-Unit 5B mostra più una caratteristica di deposito in corrente.

#### UNIT 6

Questa Unità comprende limi sabbiosi e limi argillosi con sabbie. In alcuni sondaggi questa Unità è usualmente caratterizzata da molluschi di acqua fresca (e.g. *Bithynia*, *Ancylus* e *Pisidium*) e da forme di terra (e.g. *Carychium*, *Vertigo*, *Vallonia*, *Punctum*, *Limax* e *Testacella*).

Sono rappresentati anche in parte Ostracodi di acqua fresca come *Ilyocypris* e *Candona*, *Pseudocandona compressa* (Koch) e subordinatamente *Cyclocypris laevis* (Muller) e *Pseudocandona* spp. Nei livelli superiori sono ancora presenti forme terrestri rappresentate da *Carychium*, *Vallonia*, *Discus* e *Monacha*. Il solo mollusco di acqua fresca è rappresentato da *Lymnea*.

In alcuni sondaggi si rintracciano anche gasteropodi di acqua fresca (*Bithynia* e *Valvata*) e land snails (*Carychium* e *Limax*). Il radiocarbonio data frammenti di legno presenti nello spessore intorno ai 50.300 yr BP; i caratteri stratigrafici indicano che l'Unità è più vecchia dei depositi olocenici, più recente dell'Unità 2 di età Siciana e probabilmente più giovane dell'Unità 3 e 4.

UNIT 7

Questa Unità include due Sub-Unit: la 7A consiste in una sabbia grossolana con locali concentrazioni di ghiaia, mentre la più superficiale (Sub-Unit 7B) comprende alternanze di limi sabbiosi e sabbie limose ricche in *Posidonia oceanica* con locali frammenti di conchiglie marine. Il contenuto faunistico nella Sub-Unit superiore è piuttosto variabile, vi si rintracciano livelli con *Posidonia oceanica* ricchi anche in gasteropodi marini (e.g. *Alvania*, *Calliostoma*, *Cerithium*, *Cerithiopsis*, *Crytospira*, *Cythara*, *Gibbula*, *Hinia*, *Jujubinus*, *Tricolia*, *Rissoa*, *Bittium*, *Turritella*) e subordinatamente a bivalvi (e.g. *Acanthocardia*, *Chlamys*, *Dosinia*, *Leda*, *Pectunculus*, *Venus*, *Venerupis*, *Nucula*, *Tellina*).

La datazione al radiocarbonio eseguito nella Sub-Unit 7A evidenzia un'età di  $4.530 \pm 60$  yr BP ed è stata attribuita alla trasgressione versiliana, mentre la datazione della Sub-Unit 7B eseguita sui resti della *Posidonia oceanica* stabilisce un range tra  $930 \pm 45$  yr BP e  $1.100 \pm 100$  yr BP che indicherebbe una deposizione di tipo storico.

oooo

Nella **TAV. 4** “*Correlazioni lito-stratigrafiche*”, nella Sezione S-S’ abbiamo riproposto la correlazione che è stata presentata nel lavoro pubblicato dalla Società Paleontologica Italiana e che ben rappresenta la situazione a livello di Unit stratigrafica nell’area in esame ed al suo limite più meridionale. Come è possibile rilevare la correlazione stratigrafica mette in evidenza dal Sondaggio n. 274 al n. 280 (si consulti la **TAV. 3A**), la presenza di spessori antropici e delle Unit 7B, 7A e 6 tipiche dell’Olocene e comunque ben successive agli episodi di impostazione del Terrazzo di Livorno.

Mentre nei sondaggi dal n. 281 al n. 285 e dal 285 al 293 sono più evidenti le formazioni Pleistoceniche con una migliore rappresentazione del Terrazzo che del resto affiora nitidamente presso lo Scoglio della Regina e negli Scavi che furono effettuati per il Bacino di Carenaggio presso la Torre del Fanale.

Tra i due *ambient* di sedimentazione pur esistendo una netta differenziazione stratigrafica sia su scala cronologica, sia per variazioni litologiche mostra comunque una gradualità territoriale poiché, come abbiamo già avuto modo di sostenere nei paragrafi precedenti quello della Gronda dei Lupi più di un limite netto costituisce una fascia di transizione stratigrafica.

Nell'ambito dello Studio sul Quaternario livornese dobbiamo rilevare che per stessa ammissione degli Autori pur essendo stata elaborata una raffinata sequenza stratigrafica dell'area livornese-pisana di pianura, la "storia" sembrerebbe essere più complessa di quanto finora noto.

## **2.5 Gli elementi stratigrafici ed i relativi ambienti deposizionali**

Dopo aver reperito numerosi dati stratigrafici dai vari lavori di caratterizzazione ambientale condotti nell'areale in esame ed aver discretizzato circa 300 dati stratigrafici – si veda **TAV. 3A** "Carta dei dati di base (sondaggi stratigrafici e punti d'acqua)"- è stato possibile tracciare alcune sezioni geograficamente significative e procedere alla definizione dei vari Orizzonti lito-stratigrafici più importanti presenti nel sottosuolo.

L'*ambient* stratigrafico per la sua evoluzione paleogeografia e le modificazioni intervenute grazie all'opera dell'uomo in epoche storiche anche recenti risulta estremamente variabile. In particolare si riscontrano numerose variazioni in termini laterali con raccordi eteropici ricorrenti a testimonianza di un ambiente deposizionale estremamente modificabile in virtù di variazioni climatiche e micro-climatiche piuttosto veloci.

La sovrapposizione di spessori stratigrafici anche molto differenti è comune ed estremamente ricorrente ai depositi di origine tipicamente marina con entropie maggiori in parte innescate dalle elevate energie in gioco e dense energie. A questi spessori talvolta si connettono impianti stratigrafici decisamente più "*light*" formati nei bacini semi-chiusi, lagunari e palustri con un'entropia inferiore ed energie più basse in gioco.

Da non trascurare i mezzi di deposizione e gli agenti esogeni che variano dai moti ondosi, il sistema delle correnti di drift litoraneo, fino alle maree, ma che contemplano anche trasporti e sedimentazioni da corsi d'acqua naturali o dalle reti artificiali di bonifica.

Rintracciare un denominatore comune a fronte di tutte le varie azioni suddette diventa oggettivamente complicato perché stessi *ambient* deposizionali possono aver dato luogo a diversi episodi di sedimentazione con variazioni anche litologiche e conseguenti ed importanti modificazioni stratigrafiche.

Per riuscire a sintetizzare il contesto stratigrafico dell'area in esame abbiamo proteso per raggruppare spessori che per dimensione e per ambiente deposizionale, nonché per evidenti caratteristiche di contenuto sono sicuramente rapportabili.

Dall'analisi della documentazione geologica generale di bibliografia, nonché delle numerose stratigrafie consultate, seppure occorra sottolineare che l'area in studio appare quanto mai variabile sotto il profilo stratigrafico è possibile descrivere in maniera esauriente e con una certa continuità i seguenti Orizzonti<sup>16</sup> - si veda **Tabella 1** fuori testo -partendo dal più superficiale:

### ***ORIZZONTE 0 (ZERO)***

#### **Recente attività umana (ultimi 100 anni)**

Questo Orizzonte comprende spessori di terreno che derivano direttamente dall'attività umana o da rielaborazioni antropiche; in generale quegli spessori che discendono direttamente da azioni antropiche sono più superficiali e sono rappresentati da riempimenti con materiali vari costituiti da materiali antropici (laterizi, elementi da costruzione, etc.) o da terreni di lavorazione, depositati dall'uomo durante gli ultimi 100 anni. Questi spessori sono diversi da quelli che tipicizzano le colmatature e le bonifiche dei terreni acquitrinosi, dei marazzi o delle aree palustri, ovvero tutte quelle azioni tese al recupero delle terreferme o terre salde.

Riguardo alla questione delle antropizzazioni la modificazione della destinazione d'uso e della vocazione naturale del territorio, avvenuta progressivamente a partire dagli anni '30-35 del secolo scorso con un iper-sviluppo a partire dagli anni '50 che ha totalmente riconfigurato l'area in esame, è avvenuta su due livelli:

- ✓ Mediante l'utilizzo di materiali "usati" ed umani che sono stati posati in opera per costituire spessori superficiali;
- ✓ Mediante affermazione di azioni propedeutiche alle bonifiche, le compensazioni terrestri e gli imbonimenti.

Questo orizzonte più superficiale, in riferimento ai numerosi sondaggi consultati è costituito da uno spessore variabile tra 0,80-1,00 m. ed i 6.00 m.; non sono state riscontrate ossature particolarmente classate e lo spessore non risulta uniforme né

---

<sup>16</sup> Per orizzonte si intende uno spessore omogeneo caratterizzato da eventi deposizionali simili.

Tabella 1. Quadro sinottico delle informazioni stratigrafiche principali

ORIZZONTE	Litologia dello spessore	Presenza di materiale organico	Ambiente deposizionale	Unità stratigrafica di riferimento	Età
<b>ZERO</b>	R Materiali vari derivanti da azioni umane (laterizi, cementi, asfalti, processi produttivi, etc...)	Talvolta mescolato	esclusivamente antropico	---	Ultimi 100 anni
<b>1</b> - Intercalazioni variamente distribuite di limo-sabbiosi, sabbie fini, sabbie argillose con materiale organico. Sedimenti di spiaggia recente.	Mo Materiale Organico in scheletro sabbioso-limoso	Feltro molle di fanerogame in matrice limoso-argillosa con livelletti ghiaiosi a spigoli vivi e frammenti di conchiglie	marino near-shore con qualche evidenza antropica indiretta	7b	Datazioni <sup>14</sup> C 930 ± 45 yr BP 1.100 ± 100 yr BP Età: HOLOCENE Historical age
	Lsg Limo sabbiosi grigi	Posidonia oceanica e frammenti di conchiglie	marino transizione palustre	7b	
	Sf Sabbie fini	Posidonia oceanica e frammenti di conchiglie	marino transizione palustre	7b	
	Slm Sabbie limose medie	Posidonia oceanica e frammenti di conchiglie	marino transizione palustre	7b	
	Sgv Sabbie argilloso-limose grigio verdi	Posidonia oceanica e frammenti di conchiglie	marino transizione palustre	7b	
Spessore di transizione	Sgl Sabbie con presenza di ghiaia	Assenza di materiale organico	Componente di trasporto fluviale	7a	Datazioni <sup>14</sup> C 4.530 ± 60 yr BP
<b>2</b> - Argille limose e limo-sabbiose con conchiglie	Alg Argille limose grigie	Con frammenti di conchiglie, assenza di feltro molle di fanerogame	Manno	7a	Età: HOLOCENE Tardo Versiliano Fase Post-glaciale
Spessore di transizione	Lsa Limo sabbioso argilloso	Con frammenti di conchiglie, assenza di feltro molle di fanerogame, ma talora resti vegetali	Manno	7a	
	SgG Sabbie con passaggi di ghiaie	Assenza di materiale organico	Manno	7a	
<b>3</b> - Intercalazioni sabbio-limose con argille tendenzialmente di colore nocciola, ocra chiaro	Slmf Sabbie limose medio-fini	Con frammenti di conchiglie, assenza di feltro molle di fanerogame, ma talora resti vegetali		6	Datazioni <sup>14</sup> C 50.300 yr BP
	Las Limo sabbioso talora argilloso	Con frammenti di conchiglie, assenza di feltro molle di fanerogame, ma talora resti vegetali		6	Età: PLEISTOCENE SUPERIORE Post Inurenano Fase Glaciale Wharm
	Aln Argilla limosa color nocciola	Con frammenti di conchiglie, assenza di feltro molle di fanerogame, ma talora resti vegetali		6	II° Oscillazione interstadiale (pulsazione fredda)
<b>4</b> - Conglomerati dell'Arno e del Serchio da Bientina	CAS Ghiaie eterometriche poligeniche con vario grado di arrotondamento in matrice sabbiosa grossolana ed eterotopie con spessori limosi	Assenza di materiale macro-organico	Depositi fluviali più o meno classati.		Età: PLEISTOCENE SUPERIORE Post Inurenano Fase Glaciale Wharm I° Oscillazione interstadiale (pulsazione fredda) - circa -70.000/75.000 yr

per distribuzione planimetrica, né per profondità.

La presenza di elementi di riporto è indubbiamente collegata con la storia e l'evoluzione della zona portuale di Livorno. In sostanza è possibile rintracciare *terreni di riporto provenienti da lavorazioni passate o da attività esercitate all'interno di porzioni d'area in tempi più recenti* (dopo la seconda guerra mondiale).

L'Orizzonte di riporto per sua genesi può essere soltanto descritto nelle sue linee generali in: *spessori provenienti da azioni antropiche più locali, da demolizioni in area e/o materiali di risulta di attività trascorse più recenti; sono materiali più complessi e generalmente di positura più superficiale e di potenza inferiore ai 2,00 m. (anche se è possibile rintracciare vere e proprie sacche più profonde).*

*In questo caso vi sono forti eterogeneità e colorazioni innaturali (talvolta descritte con tipiche fiammature di antiche lavorazioni) con granulometrie che possono avere un range molto aperto: dalla massicciata in stabilizzato granulare, fino alle terre esauste di antiche lavorazioni tendenzialmente più sabbiose. In questo caso i terreni conservano una loro attitudine all'umidità naturale con qualche raro livello evoluto pedogeneticamente.*

Occorre rilevare che questo primo Orizzonte ben si riferisce anche alle vicissitudini che hanno interessato l'intera area portuale nell'ultima Guerra Mondiale; l'area portuale infatti è stata oggetto di intensi bombardamenti che oltre a causare crolli delle attività produttive presenti nella zona, hanno modificato le superfici creando vere e proprie depressioni dovute alle marmitte delle bombe che in alcune testimonianze dell'epoca sembrano aver formato buche profonde fino ai 4,00 m. dal piano campagna. Queste depressioni sono state oggetto di riempimenti ed allivellamenti, spesso con le stesse demolizioni e/o con materiali di risulta. Inoltre non è trascurabile pensare che a causa delle scarse capacità portanti dei terreni naturali (con frequente presenza di materiale organico), alcune aree siano state oggetto di scavo e sostituzione di terreni con altre dotati di caratteristiche geotecniche migliori.

### **ORIZZONTE 1** (UNITA' STRATIGRAFICA 7 – SUB-UNIT 7B)

**Epoch: OLOCENE Stage Europe: Historical age**

Occorre premettere che una parte di questo orizzonte risulta di difficile

individuazione poiché in alcune aree può essere definito non completamente naturale, deriva infatti anche da attività antropiche, azioni umane, quali le colmatazioni, le azioni di bonifiche, gli imbonimenti per l'ottenimento di terre salde.

L'Orizzonte rappresenta in maniera piuttosto precisa un *marker* geomorfologico importante dell'evoluzione moderna del fondo marino e del conseguente trend della linea di spiaggia. La presenza di quantità ingenti di spessori ricchi di fanerogame consente di definire un *ambient* deposizionale transizionale tipico delle linee di riva attive con piane piuttosto largo e poco inclinato. A questo Orizzonte appartengono anche le formazioni e le rielaborazioni dei cordoni litoranei, delle dune che come abbiamo già detto più a Nord sono ancora percepibili in maniera evidente.

La tipologia dei materiali di cui è composto l'Orizzonte 1 è sicuramente naturale, tuttavia non è da escludere che alcuni spessori non superiori ai 2,00-3,00 m. derivino dai processi di sedimentazione accelerati dall'azione umana a seguito della bonifica dei terreni e deposito in linea mediante taglio dei canali, aumento delle pendenze d'alveo, rettifiche e scacchiere idrauliche o addirittura siano il frutto di ricollocazione di materiali dragati dai bassifondi marini o di acque semi-chiuse in prossimità delle bocche del Porto.

Questi depositi sono difficilmente distinguibili da quelli completamente naturali poiché sono identici ai materiali sedimentati naturalmente. C'è da rilevare che l'evidenza di forti stati di saturazione marina in questo Orizzonte contribuisce a definirlo un ambito distinto, così abbiamo proteso ad attribuire a queste materie un orizzonte differente da quello antropico.

In questo orizzonte è possibile ricomprendere terreni provenienti da vari imbonimenti con riempimenti terrigeni di diversa origine eseguiti anche in tempi protostorici. In questo caso si ricorda che nel 1769 Gaspare Piccioni disegnava la planimetria del cosiddetto Porto Pisano e di Livorno in cui sono evidenti zone paludose, stagni rinchiusi in tomboli costieri, vere e proprie aree lagunari in stretto collegamento con il mare ed alimentate (talvolta interrate) da rari canali e torrenti (si veda l'analisi storica proposta nel Capitolo seguente).

Questi terreni in realtà non debbono classificarsi propriamente di riporto, nel senso che ad esempio i vari depositi sub-orizzontali di sabbie e limi misti a fanerogame hanno subito semplicemente una delocalizzazione spaziale dai bacini

di formazione ad altri ambienti di deposizione.

Dalle analisi stratigrafiche condotte si è rilevato che i terreni utilizzati per le operazioni di imbonimento e bonifica idraulica non sono in genere alloctoni all'area in esame anche se non è escluso che alcuni spessori siano costituiti anche da operazioni di scavo condotte all'interno dell'urbe durante le varie fasi storiche di ricostruzione.

Alcuni spessori possono inoltre provenire da operazioni di bonifica agricola ad esempio dalle varie escavazioni di canali idraulici, scolmatori, canali navigabili oppure marittimi. I livelli di rinvenimento di questi terreni sono generalmente intorno ai -1,50/-2,00 m. da piano campagna attuale, raramente si riscontrano a partire già dalla superficie ed in quel caso si evidenzia che l'area non ha subito grandi modifiche successive. Pur essendo eterogenei e quindi non essendo francamente possibile una loro caratterizzazione, in generale possiamo affermare che questi spessori sono saturi o pseudo-saturi, costituiti da impasti eterometrici e sprovvisti di strati evoluti a livello pedogenetico.

Nelle analisi stratigrafiche che sono state condotte l'Orizzonte 1 è sempre presente al di sotto del primo Orizzonte antropico, ed è composto da intercalazioni variamente distribuite di limi sabbiosi, sabbie fini e sabbie con livelli anche decimetrici di natura limo-argillosa; l'elemento comune di questi spessori che compongono l'orizzonte è data dalla presenza pressoché costante di materiale organico costituito da ammassi di rizomi e talli di *Posidonia oceanica*<sup>17</sup> (ed altre

---

<sup>17</sup> La *posidonia* è una pianta che vive al disotto della superficie del mare, preferibilmente su fondali di sabbia o fango (non è rara incontrarla anche su detrito grossolano o roccia) e, a differenza delle alghe, è suddivisa in radici, fusto (rizoma), foglie, fiori e ovviamente frutti. Il rizoma la cui parte più esterna va incontro ad una graduale lignificazione può accrescersi sia in senso orizzontale (plagiotropo), sia in senso verticale (ortotropo); questa caratteristica di avere un rizoma con due tipi di crescita determina un innalzamento del fondo originando una struttura "a terrazza" (in francese "*matte*") che può raggiungere i 6 metri di altezza; essa è costituita da un fitto intreccio di rizomi e radici ormai morte che imbriglia i sedimenti fortemente compattati e solo la sommità è costituita da fasci viventi. Dalla parte superiore di questa terrazza si eleva una distesa di foglie lunghe anche fino al metro che ondeggiano sospinte dalle correnti. Le praterie si estendono, in acque particolarmente limpide, oltre i 40 metri di profondità (limite inferiore), a partire da zone prossime alla riva (limite superiore). L'innalzamento della prateria dipende principalmente dall'accrescimento della pianta e da alcuni fattori ambientali, come l'idrodinamismo: in zone riparate, dove la sedimentazione è maggiore, la prateria può innalzarsi fino a provocare l'emersione delle foglie, costituendo così una specie di barriera naturale (*receive barriere*) importantissima nel ruolo di contenere e di proteggere le coste dall'azione erosiva del moto ondoso. Alcuni ricercatori hanno calcolato che la distruzione di 1 metro di "matte" ad una distanza di circa 100 metri dalla riva può provocare l'arretramento della costa di almeno 20 metri. Tra i molti

fanerogame), in parte ancora ben esposti e con una scarsa propensione alla fossilizzazione con frammenti di conchiglie (soprattutto lammellibranchi) lavorati dai moti ondosi.

In particolare nella sequenza più frequente si rintracciano i seguenti spessori:

- Mo** Feltro molle di materiale organico in matrice limo-argillosa e livelletti ghiaiosi a spigoli vivi con presenza di frammenti conchigliiferi;
- Ls<sub>g</sub>** Limi sabbiosi grigi talvolta con presenza di rizomi e talli di fanerogame e frammenti conchigliiferi;
- Slf<sub>g</sub>** Sabbie limose fini sempre di colore grigio cenere con presenza di rizomi e talli di fanerogame e frammenti conchigliiferi;
- SIm<sub>g</sub>** Sabbie limose medie di colore grigio cenere con presenza di rizomi e talli di fanerogame e frammenti conchigliiferi;
- Sgv** Sabbie limo-argillose grigio verdi con presenza di rizomi e talli di fanerogame e frammenti conchigliiferi.

Questi spessori per la presenza di frammenti di conchiglie e materiale organico in uno stato di deposizione recente testimonierebbero un ambiente ad elevato grado di energia con flussi direzionali di trasporto e sedimentazioni prossimi alla linea di riva.

Allo stato attuale lo spessore Mo costituito da un feltro molle di materiale organico di fanerogame è rintracciabile in varie località della costa livornese; ad esempio alla fine delle stagioni balneari è possibile segnalare l'elevato deposito di questo materiale spiaggiato presso l'arenile dei Tre Ponti in Loc. Ardenza prossimo anche alla foce dell'omonimo rio. Durante i marosi più intensi questi

---

fattori limitanti la crescita della pianta, il più rilevante è sicuramente la luce; infatti è necessaria una forte illuminazione per compiere la fotosintesi e di conseguenza la trasparenza dell'acqua diviene di vitale importanza. Come tutte le piante, al termine del suo ciclo vegetativo anche *Posidonia oceanica* perde le foglie che, sospinte dalle correnti e dal moto ondoso, formano enormi ammassi (in francese "*banquette*") sulla riva, anche insieme alle piccole sfere di colore marrone (*egagropili*) che si ritrovano abbondanti sulla battigia e che sono composte da frammenti della pianta modellati dai movimenti del mare.

Una delle cause che può alterare l'equilibrio di questo importante ecosistema è dunque la diminuzione della trasparenza dell'acqua ad esempio per motivi legati all'aumento dei sedimenti in sospensione. Anche in tempi passati in un ambiente costiero dinamico possono essersi succeduti periodi in cui l'aumento delle capacità erosive dei fiumi ha fatto "scaricare" in foce contingenti quantitativi di sedimenti, che hanno concorso ad un aumento della sospensione ed a una diminuzione della trasparenza.

letti organici mescolati a materiale di varia granulometria, anche sabbia grossolana mista a ghiaia fine, possono formarsi e disfarsi nuovamente in mare, al bordo della linea di riva ed arrivare tanto più verso l'entroterra tanto più è elevata l'energia di trasporto e tanto più è favorevole geomorfologicamente il piano dell'arenile.

Il rinvenimento di questo materiale, che comunque non può essere depositato per molti chilometri all'interno di una linea di riva sia pure bassa, testimonia la fluttuazione ed il consolidarsi di variazioni della linea di riva che hanno trasformato il bordo continentale dall'interno verso l'esterno.

Oltre a questo carattere tipicamente marino nell'Orizzonte 1 si rinvengono talvolta fluttuazioni di deposito transizionale palustre formato da costruzioni e continue demolizioni di impalcati organici che tendono a colmare aree depresse rinchiuse da cordoni filtranti dove è comunque sempre presente un'azione marina dominante. Anche le sabbie limo-argillose grigio-verdi sono la prova di ambienti che si stanno chiudendo con cromaticità che tendono ad indicare ambienti in riduzione chimica con scarsa ossigenazione della materia.

Interessante segnalare al tetto del prossimo Orizzonte 2 la presenza non continua di un elemento stratigrafico di transizione costituito da:

**Sgl** Sabbie con la presenza di ghiaia, che è definibile come uno spessore pulito con assenza di faune marine e materiale organico in genere.

Rintracciato in prossimità di alcuni punti chiave testimonia l'azione di alcuni corsi d'acqua che variamente hanno depositato e digitato verso il mare o verso ambienti semi-chiusi materiali più o meno grossolani. La deposizione di queste materie è estremamente varia poiché non è infrequente imbattersi nelle continue alternanze dovute ai rimaneggiamenti causati dalle azioni marine e da quelle fluviali.

Nel complessivo questo Orizzonte 1 è lo spessore dove si sono succedute anche azioni legate alla presenza dell'uomo ed alla sua caparbia volontà di recuperare le basse terre delle aree comprese tra l'attuale linea individuata dalle Mura Lorenese fino all'entroterra della Piana dell'Arno. La chiusura di aree al mare con l'apporto di materiali provenienti dalle reti fluviali anche artificiali ha prodotto depositi digitati anche con tessiture trasversali alla linea di costa del momento e dipendenti dalla posizione degli estuari. Abbiamo proposto per accogliere in questo orizzonte gli ammassi di fanerogame insieme alle sabbie e le sabbie limose grigio verdi per

le modalità recenti di formazione che li legano; va tuttavia evidenziato che la matrice sabbiosa grossolana intercalata nel feltro di fanerogame ha caratteristiche litologiche decisamente diverse dalle sabbie e/o dalle sabbie limose grigio verdi. Infatti, mentre le prime deriverebbero dalla base deposizionale della Posidonia (che corrisponde ad una sabbia evoluta, sgretolata insieme allo smantellamento delle fanerogame e trasportata insieme fino al nuovo ambiente di deposizione), le seconde risultano nettamente più fini e ricordano un ambiente di sedimentazione più protetto. Anche in questo caso per una migliore comprensione dell'evoluzione dell'orizzonte rimandiamo alle ricostruzioni paleogeografiche proposte di seguito. L'Orizzonte 1 è stato evidenziato in molti dei sondaggi consultati ed è perciò da ritenere estremamente indicativo soprattutto perché rappresenta lo spessore d'appoggio dell'Orizzonte Zero (Antropico) o se vogliamo l'antico fondo marino nelle sue più varie evoluzioni.

*Si può perciò sottolineare che questo Orizzonte sempre rintracciabile con varie potenze sia verso l'entroterra, sia verso il largo mare rappresenta un "unicum" stratigrafico che risulta avere una grande importanza anche sotto il profilo idrogeologico poiché, le conducibilità idrauliche ridotte permettono di poter rilevare in generale uno spessore di buona protezione idrogeologica.*

Dal confronto dei numerosi dati tecnici a disposizione l'Orizzonte 1 in relazione all'Orizzonte antropico ed all'Orizzonte 2 mostra le seguenti sequenze:

### **Sequenza A**

(le fanerogame si ritrovano confinate al tetto e alla base da spessori di sabbie limose):

Orizzonte 0 - Antropico o fondo marino	}	Orizzonte 1
Sabbia e sabbia limosa grigio verde		
Ammassi di fanerogame		
Sabbia e sabbia limosa grigio verde		
Orizzonte 2 – Sabbie ocracee		

### **Sequenza B**

(le sabbie e/o sabbie limose sono poste solo al tetto delle fanerogame):

Orizzonte 0 -Antropico o fondo marino	}	Orizzonte 1
Sabbia e sabbia limosa grigio verde		
Ammassi di fanerogame		
Orizzonte 2 – Sabbie ocracee		

### **Sequenza C**

(costituita solo da fanerogame):

Orizzonte 0 -Antropico o fondo marino

Orizzonte 1 - Ammassi di fanerogame

Orizzonte 2 – Sabbie ocracee

Sono da segnalare alcuni casi particolari in cui nell'Orizzonte 1 si rileva un'alternanza di sabbia marrone oca di potenza esigua tra due spessori di fanerogame, dovuto probabilmente ad un rimaneggiamento del materiale su cui poggia lo spessore di Fanerogame.

Sotto il profilo deposizionale immaginiamo l'impostazione di una barriera sommersa composta da posidonie e da cordoni sottomarini di sabbia, probabilmente in vicinanza o poco distante dalle depressioni originate nel plateau (che a volte hanno messo in comunicazione direttamente le formazioni pre-irreniane con spessori più recenti).

L'esistenza di praterie di *Posidonia* è anche indicata dalla fauna fitocola talvolta presente; probabilmente l'azione dei moti ondosi cominciò a strappare dal fondo le piante che furono deposte all'interno di zone "privilegiate" di sedimentazione: i catini, il cui fondo fu comunque colonizzato dalle stesse fanerogame. All'inizio doveva esistere un substrato costituito da materiale sabbioso a bassissima acclività che in pratica rappresenta un ambiente di riva con spiaggia degradante dolcemente. Ci troviamo di fronte con ogni probabilità ad un ambiente di deposizione recente e tranquillo, già protetto da sia pur modeste strutture o comunque influenzato da limitrofi lavori di colmata e di bonifica storica.

Il substrato di questa ricostruzione è costituito da una sabbia grigio verde in cui si rintracciano numerosissimi minuti frammenti di materiale conchigliare con ogni probabilità rimasto nel passato in continua sospensione e la cui rottura e frammentazione deriva dall'azione dei moti ondosi.

I moti ondosi e le correnti rompono e strappano dal fondo marino le foglie di *Posidonia* che con la stessa attuale modalità (si vedano gli episodi in zone come: Tre Ponti, Antignano, Rogiolo) cominciano a depositarsi sia in ambiente subaereo, sia verso il largo al di sotto della superficie medio mare. In relazione agli scambi e alla movimentazione di fondo, nonché ad eventuali apporti esterni, insieme alle foglie morte di *Posidonia* si intercalano materiali sabbiosi con

frazioni più o meno limose e naturalmente i gusci dei bivalvi trascinati ed inglobati nel “feltro di fanerogame”.

Il deposito di fanerogame in ambiente subaereo è continuamente costruito e distrutto a causa delle maree e soprattutto dei moti ondosi. Consideriamo che i più intensi giungono quasi ortogonali alla linea di riva dai quadranti di ponente. Più tranquilla la deposizione in ambiente marino in cui sono ipotizzabili flussi più o meno densi di materiale organico sul fondo e/o in sospensione.

Durante l'acme deposizionale si assiste ad un aumento degli spessori in ambiente marino in acque tendenzialmente basse in cui il moto ondoso è un fattore meno influenzante ed alla continua evoluzione dei depositi subaerei che vengono continuamente formati e smantellati dalle dinamiche costiere del mare.

Ad un certo momento assistiamo ad una stasi dei rifornimenti dei materiali organici in decomposizione - per esaurimento della barriera? – con la ripresa di una deposizione delle sabbie grigio-verdi. Naturalmente questo tipo di sedimentazione non può essere proposto tout court su l'intero sviluppo costiero, ne sono una prova le diverse sequenze dei materiali rintracciate nell'Orizzonte 1, questo infatti va ricondotto alle specificità geomorfiche delle linee di riva e dei fondali marini antistanti.

## **ORIZZONTE 2 (UNITA' STRATIGRAFICA 7 – SUB-UNIT 7A)**

**Epoch: OLOCENE Stage Europe: Late Versilian transgression**

**Fase glaciale: Post glaciale Wurm**

Molto più omogeneo del precedente anche se non distribuito continuamente, l'Orizzonte 2 si compone di spessori di argille limose e limoso-sabbiose con presenza di frammenti di conchiglie, ma con assenza di fanerogame. E' costituito in genere dai seguenti spessori:

**Sgl** Sabbie con presenza di ghiaie

**Al<sub>g</sub>** Argille limose grigie

**Lsa** Limi sabbiosi con intercalazioni più fini di argille

**SgG** Sabbie con passaggi di ghiaie

Abbiamo già accennato che al tetto di questo Orizzonte ed appartenente ad esso a livello di Unità stratigrafica si rintraccia uno spessore non continuo che può essere definito quasi di transizione con delle sabbie grossolanne e con presenza di

intercalazioni di livelli di ghiaia (Sgl).

In questo spessore non vengono rintracciati macro-fossili (conchiglie e/o fanerogame) ed appare più legato allo “scarico” dei corsi d'acqua anche di modesta portata. Anche alla base di questo Orizzonte si rintraccia in maniera non continua un livello di Sabbie grossolane con passaggi di ghiaie (SgG) che può essere considerato di passaggio evolutivo stratigrafico tra l'Orizzonte 3 ed il soprastante.

Le argille limose grigie ed i limi sabbiosi con intercalazioni più fini di argilla denotano una diminuzione delle energie deposizionali con la netta prevalenza di ambienti fermi o semi-fermi. L'Orizzonte 2 definirebbe un ambiente marino di mare più largo, più lontano dalle energie di riva e che non risente (o ne risente lontanamente) degli effetti diretti dei moti ondosi. Un ambiente più tranquillo in cui i materiali più fini derivanti dal trasporto dei corsi d'acqua in foce, dal rimaneggiamento e classamento colloidale, hanno la possibilità di depositarsi anche lontano.

Per questo Orizzonte ci troviamo di fronte ad un ambiente deposizionale fondamentalmente marino in trasformazione, ma con bassa esposizione di energia (ad eccezione forse dei trasporti in corrente), quindi più distante dalle linee di riva con la possibilità di instaurazione di una vita gregaria al fondo con malacofaune attive perfettamente adattate.

Con buona probabilità al tetto dell'Orizzonte 3 è evidenziato un episodio più freddo, regressivo in cui il clima doveva essersi “continentalizzato” e raffreddato. Livelli di resti vegetali non marini (frammenti di tronchi, talvolta in ottimo stato di conservazione ed in parte antropici) presuppongono la formazione di una vegetazione che arrivò a coprire le zone prospicienti le linee di riva.

Ci sembra che questo corrisponda all'episodio più vicino all'instaurazione di un regime ambientale pseudo-palustre e/o lagunare, in cui si trovano perfettamente inseriti i limnicoli gasteropodi di acqua dolce e/o salmastra. Tuttavia il restante spessore dell'Orizzonte più in profondità con i suoi limi grigi con presenza di frequenti depositi di gasteropodi e lamellibranchi ben conservati, meglio rappresentano un'energia formativa quasi sempre per gravità e raramente per movimento traslativo.

E' altresì interessante ricordare quanto ebbero importanza le modeste variazioni dovute a periodi interglaciali con fiumi che alluvionarono le piane antistanti le

coste basse e ridistribuirono quantità di sedimenti fino a costituire veri e propri livelli di ghiaie subarrotondate e poligeniche (rintracciate con spessori importanti all'interno dell'Orizzonte) questi rappresenterebbero testimonianze di paleoalvei di antichi torrenti provenienti anche dal retroterra collinare livornese.

### **ORIZZONTE 3 (UNITA' STRATIGRAFICA 6)**

**Epoch: PLEISTOCENE SUPERIORE Stage Europe: Post Tyrrhenian**

**Fase glaciale – WURM (Pulsazione fredda II)**

Costituito da sabbia talvolta grossolana con livelli limosi ed intercalazioni ghiaiose color marrone oca-beige chiaro questo Orizzonte rappresenta con grande evidenza un prodotto *Post Tirreniano*. Dall'analisi dei Sondaggi si rintracciano quasi sempre sequenze stratigrafiche dal tipico colore nocciola ed in particolare:

<b>Slmf</b>	Sabbie limose medio-fini
<b>Lsa</b>	Limi sabbiosi talora argilosi
<b>Aln</b>	Argille limose color nocciola

Anche per questo Orizzonte si hanno ragionevoli dati a disposizione per considerarlo rappresentativo di tutto l'areale, anche se con zone in cui – per un'azione di rimaneggiamento e consumo generata dall'episodio versiliano sugli spessori di calcarenite - vi sono delle lacune deposizionali<sup>18</sup>. In questo Orizzonte l'eterogeneità della fauna rintracciata in questo spessore si mette in relazione ad un ambiente alquanto diversificato ed in particolare alle caratteristiche di un fondo costituito in parte da un substrato mobile di natura detritica ed in parte da un substrato solido formato da costruzioni organogene. Le associazioni faunistiche farebbero pensare ad acque costiere pochissimo profonde.

Il conglomerato è costituito da ciottoli con diametro massimo di 5 cm. che provengono sia dall'alloctono ligure (ofioliti, diaspri, calcari grigio-scuro del tipo dei "palombini"<sup>19</sup>), sia dalla serie toscana (quarziti, anageniti, calcari cristallini, calcari a liste di selce nera).

Nei vari sondaggi consultati raramente questo livello è ben composto; ciò a nostro avviso è collegato al fatto che dopo una fase regressiva che ha condotto alla litificazione del sedimento e alla formazione di un plateau calcareo con

<sup>18</sup> Qui nel testo si usa il termine lacuna, non per indicare una lacuna stratigrafica, ma una mancanza di uno spessore.

<sup>19</sup> Le Argille e calcari a *palombini* affiorano nell'entroterra di Livorno con la sigla c<sub>2</sub>.

caratteristiche simili a quelle che si riscontrano attualmente alle Secche della Meloria e alle Secche di Vada, in alcune zone dove l'azione dinamica delle acque era più forte questo plateau non uniforme si è in pratica "cariato" e scavato dando origine a depressioni subcircolari note in letteratura con il nome di "catini" che hanno costituito zone di più facile deposizione dei sedimenti.

Quindi la trasgressione versiliana di fatto ha operato una erosione dei depositi tirreniani nella zona del Ponte Ugione risparmiando solo alcuni piccoli lembi di panchina ben diagenizzata<sup>20</sup>, probabilmente già isolati da una erosione lineare di tipo fluviale che avrebbe scavato profondi solchi vallivi durante le fasi wurmiane. Questi lembi residui di "Panchina" sono stati sepolti in parte in tempi recenti dai sedimenti di spiaggia recente, di padule e più che altro dalle colmate e dai ripianamenti artificiali. Si pensi ai depositi di sabbia grigio-verde e fanerogame che si sovrappongono in gran parte dell'areale in studio.

L'effettiva esistenza di scogli o di bassifondi di "Panchina" è documentabile sulla base di numerose notizie storiche: G.Targioni Tozzetti (1778) riferisce che la Torre del Marzocco fu eretta su scogli di "*panchina*" (evidentemente consumata e rielaborata dagli episodi post-tirreniani fino a quello versiliano).

E' probabile che anche le altre Torri del Porto Pisano fossero costituite su un bassofondo di "Panchina" sul quale gli scanni tra le barre sarebbero rimasti privi di interrimento.

Questa potrebbe essere una valida ragione per la scelta della localizzazione della Bocca del Porto Pisano nei secoli XI° e XII° in una zona così distante da Pisa e giustificerebbe l'indicazione di questo porto come "di catena" che si trovava appunto tra le torri<sup>21</sup>. Tutto ciò non avrebbe avuto senso se queste non fossero state poste in corrispondenza di un sistema di barre invalicabili o pericolose anche al naviglio del tempo.

**ORIZZONTE 4** (UNITA' STRATIGRAFICA: Conglomerato dell'Arno e del Serchio)

**Epoch: PLEISTOCENE SUPERIORE Stage Europe: Post Tyrrhenian**

**Fase glaciale – WURM (Pulsazione fredda I)**

---

<sup>20</sup> Qui viene utilizzato questo termine per indicare un processo che agisce su un sedimento quando è ancora vicino alla superficie, ossia a bassa pressione e temperatura.

<sup>21</sup> La catena è conservata come cimelio nel Campo Santo Monumentale di Pisa.

E' costituito da uno spessore piuttosto variabile di ghiaie eterometriche poligeniche spesso "pulite" e vario grado di arrotondamento con diametro efficace tra i 1 e 4 cm. talvolta in matrice sabbiosa con dimensioni grossolane.

Questo orizzonte individua la formazione dei "Conglomerati dell'Arno e Serchio da Bientina<sup>22</sup>". Il livello fluviale della Pianura Pisana è ben riconoscibile per la presenza di numerosi ciottoli, anche grossolani, provenienti da diversi membri del Verrucano ed è stato seguito attraverso sondaggi dal sottosuolo di Calcinaia (-23,00 m.) fino a quello di Stagno (-57,00 m.)<sup>23</sup>.

I Conglomerati dell'Arno e Serchio da Bientina del sottosuolo della Pianura di Pisa corrispondono alla fase più umida, anaglaciale, di grande trasporto fluviale e di maggiore abbassamento eustatico del livello del mare. Questo abbassamento ha provocato l'approfondimento del sistema fluviale Arno-Serchio, che scorreva più a Sud dell'attuale corso dell'Arno fino agli affioramenti più meridionali delle sabbie di Vicarello. Queste infatti si attestano lateralmente sulle formazioni più antiche attraverso una scarpata che corrisponde all'antica erosione fluviale operata durante l'anaglaciale Wurm II e che continua in profondità fino al livello dei ciottoli dell'Arno e Serchio da Bientina.

Costituito da spessori di sabbia grossolana pulita e/o intercalazioni e passaggi di spessori ghiaiosi in matrice tendenzialmente grigio chiara talvolta si riscontrano alternanze di sabbie fini debolmente limose color grigio chiaro con sparse ghiaie poligeniche sub-arrotondate con diametro massimo intorno ai 4 cm. con spessori di transizione composti da sabbie fini debolmente limose sempre color grigio ed intercalazioni di argille limose grigie piuttosto consistenti.

Queste ghiaie poligeniche derivano dai domini ligure e toscano come risultato dei trasporti fluviali dei paleoalvei dell'Arno e dei vari torrenti dell'entroterra livornese.

Sotto il profilo deposizionale l'ampia regressione marina durante l'interstadiale del Wurm II porta alla deposizione del materiale alluvionale costituito soprattutto dai Conglomerati dell'Arno e del Serchio da Bientina. Pur essendo in parte rimaneggiati dalle azioni successive l'*ambient* deposizionale è di alveo o di golena anche se non è da escludere una rielaborazione del materiale da parte degli

---

<sup>22</sup> Secondo la terminologia formazionale adottata in Fancelli et al., 1986.

<sup>23</sup> Gioli, 1894.

agenti marini specialmente in prossimità della foce.

## **2.6 Descrizione delle correlazioni lito-stratigrafiche eseguite**

Dall'analisi dei numerosi sondaggi stratigrafici raccolti ed esaminati sono state predisposte 8 sezioni stratigrafiche nelle due principali direzioni di riferimento: perpendicolari e parallele alla linea di costa – si veda **TAV. 4** “*Correlazioni stratigrafiche*”- :

Sezione A-A' Perpendicolare alla linea di costa e parallela allo Scolmatore;  
Sezione B- B' Parallela alla linea di costa all'altezza dei Lupi;  
Sezione C- C' Parallela alla linea di costa passante per lo Stabilimento ENI;  
Sezione D-D' Perpendicolare alla linea di costa tra Vasca di colmata e Fiat;  
Sezione E- E' Perpendicolare alla linea di costa all'altezza dell'ENEL;  
Sezione F- F' Parallela alla linea di costa tra vasca di Colmata e bacino Firenze;  
Sezione G-G' Parallela alla linea di costa tra foce Scolmatore ed ENEL;  
Sezione H-H' Perpendicolare alla linea di costa e parallela allo Scolmatore.

Nelle brevi descrizioni che seguiranno, per una migliore lettura della correlazione sono stati accorpati alcuni spessori; riferendo le quote al livello medio marino attuale. Inoltre giova ricordare che l'Orizzonte 4 talvolta non viene evidenziato o viene descritto saltuariamente poiché la maggior parte dei dati provengono da sondaggi spinti fino ai -20,00/25,00 m. di profondità.

A nostro avviso risulta estremamente interessante sia a livello stratigrafico sia per la conformazione paleogeografica incrociare la lettura della **TAV. 4** con la **TAV. 5** “*Evoluzione della linea di costa negli ultimi 2000 anni*”.

### **SEZIONE STRATIGRAFICA A-A'**

Si rintraccia un continuo spessore di riporto (Orizzonte Zero) con un Orizzonte 1 che si attesta intorno alla profondità di -10,00 m. verso NE per approfondirsi fino circa ai -16,00 m. di profondità verso la Darsena Toscana. Fino al fondo foro di numerosi sondaggi si rinviene l'Orizzonte 2 che si attesta fino ai -24/26,00 m. di profondità, mentre verso NE sondaggi più spinti evidenziano l'Orizzonte 4 tra i -30/34,00 m. di profondità.

### **SEZIONE STRATIGRAFICA B-B'**

Tra lo Scolmatore d'Arno ed il Torrente Ugione si rintraccia in maniera piuttosto

continua l'Orizzonte Zero compreso tra gli 0,60 ed i 2,50 m. di spessore; in questa sezione il riporto antropico viene evidenziato al di sopra dell'attuale s.l.m.m.. Anche in questa Sezione l'Orizzonte 1 si trova fino alla profondità di -10,00 m. che tuttavia tende ad essere minore (-5,00 m.) verso SSE; oltre il Torrente Ugione cominciano ad apprezzarsi materiali propri del terrazzo. Con una certa continuità al di sotto dell'Orizzonte 1, l'Orizzonte 2 si rinviene fino alla profondità di circa -20,00 m.; mentre l'Orizzonte 3 si ritrova fino al fondo foro di ogni sondaggio preso come riferimento ovvero fino ai -34,00 m. di profondità.

### **SEZIONE STRATIGRAFICA C-C'**

Buona corrispondenza anche in questo allineamento di sezione con l'Orizzonte 1 posto al di sotto del riporto antropico rintracciato in ogni sondaggio (Orizzonte Zero) fino ai -10,00 m.. L'Orizzonte 2 è ben rappresentato anche con gli spessori più transizionali alla sommità ed alla base fino intorno ai -24/26,00 m. , mentre l'Orizzonte 3 si rintraccia fino circa ai -30,00 m. oltre i quali affiora l'Orizzonte 4 fino almeno ai -36,00 m..

### **SEZIONE STRATIGRAFICA D-D'**

Si nota l'Orizzonte Zero talvolta disposto anche al di sotto del livello medio mare attuale e talvolta con spessori importanti (fino a 6,00 m. in prossimità della Darsena Toscana). L'Orizzonte 1 risulta in costante approfondimento da NE verso SW con la sua base posta intorno ai -4,00 m. verso Tombolello e rintracciabile fino al fondo foro dei sondaggi eseguiti per la realizzazione della Vasca di Colmata fino ai -26,00 m.. Questo approfondimento talvolta a scalino denoterebbe in maniera piuttosto precisa il parallelismo con i movimenti traslativi regressivi della linea di riva in epoche storiche o protostoriche. L'Orizzonte 2 si attesta fino ai -20/22,00 m. di profondità, mentre l'Orizzonte 3 rintracciato soltanto verso NE raggiunge i -26/28,00 m.. Oltre i -32,00 m. di profondità verso Tombolello si rintraccia l'Orizzonte 4.

### **SEZIONE STRATIGRAFICA E-E'**

Anche in questo caso l'Orizzonte 1 posto sempre al di sotto di uno spessore antropico si rintraccia in approfondimento costante da NE verso SW dove al massimo non si superano i -10,00 m. di profondità. Interessante e molto ben dettagliata la presenza di spessori di ghiaie piuttosto alte che appartengono all'Orizzonte 2 e che sembrano indicare attività di sedimentazione di corsi

d'acqua non più presenti; anche questo orizzonte 2 non supera i -10,00 m., mentre l'Orizzonte 3 si rinviene fino ai - 30,00 m. di profondità.

#### **SEZIONE STRATIGRAFICA F-F'**

In questa sezione si riscontra la sequenza di Orizzonti da Zero a 2 con approfondimento costante dell'Orizzonte 1 dal Fosso della Venezia verso il mare. Anche in questo caso la base dell'Orizzonte 1 verso l'attuale linea di costa si attesta intorno ai -14/16,00 m. di profondità. Tra i -28,00 m. ed i -34,00 m. di profondità si riscontra l'Orizzonte 4, posto in approssimazione sulla verticale della Vasca di colmata attualmente in fase di completamento e tendenzialmente in un intorno stratigrafico sabbioso-limoso.

#### **SEZIONE STRATIGRAFICA G-G'**

Verso gli alti ed i medi morfologici affiora il Terrazzo con la sua caratteristica scarpata che separa la deposizione dei terreni olocenici. Buon livello di omogeneità d'informazione per l'Orizzonte 1 che si approfondisce costantemente simulando l'antico fondo del mare e giungendo almeno fino ai -14,00 m. di profondità sulla verticale dell'attuale linea di costa. Interessante constatare la continuità dell'Orizzonte Zero anche sopra la superficie del terrazzo e che la scarpata non risulta in contatto con il solo Orizzonte 1, ma anche intorno agli 8,00 m. di profondità anche con l'Orizzonte 2.

#### **SEZIONE STRATIGRAFICA H-H'**

La traccia H-H' è la più settentrionale ed è stata ubicata perpendicolare alla linea di costa e parallela circa alla sponda dello Scolmatore d'Arno. Contrariamente al sistema stratigrafico riconosciuto, verso Nord si rintraccia ancora piuttosto evidentemente la memoria di un ambiente dunale e/o di retroduna. Verso mare la duna appare in forte arretramento con un plane di spiaggia ancora piuttosto attivo; le profonde modificazioni antropiche lungo la costa hanno mutato i caratteri iniziali delle forme eoliche ed il loro equilibrio naturale. Interessante anche la retroduna, ovvero la duna ormai relitta che è posta verso l'entroterra e che ha subito nel tempo una mutagenesi antropica di tipo agricolo. In questi sistemi, che dovevano estendersi anche verso Meridione, fino quasi a lambire la linea di sottovento dell'abitato storico di Livorno, si sono impiantate fitte pinete costiere le cui tracce (frammenti lignei) sono spesso rinvenute negli Orizzonti superficiali dell'area in esame.

## 2.7 Conclusioni sintetiche sulle caratteristiche stratigrafiche dell'area in studio

Dall'analisi delle correlazioni – si veda **TAV. 4** “*Correlazioni lito-stratigrafiche*” - è possibile trarre in sintesi le seguenti osservazioni:

1. L'Orizzonte 1, costituito da alternanze di sabbia limoso grigio-verde e sabbia limosa grigio scura, entrambe ricche di materia organica recente, risulta ben rappresentato in ogni sondaggio e marca una base (*marker litotecnico*) su una profondità compresa tra i -9,40 m. ed i -15,50 m. da s.l.m.m. con un accenno di aumento di profondità della base da Sud verso Nord. Nelle due Sezioni trasversali verso mare la base di questo Orizzonte si presenta piuttosto “piatta” tra i -10,00 m. ed i -13,00 m. s.l.m.m.;
2. L'Orizzonte 2 costituito da sabbia marrone oca con ciottoli e ghiaia di varia natura si rintraccia soltanto nelle colonne stratigrafiche dei sondaggi posti più a meridione. La sporadicità di queste litologie lascerebbe supporre che siamo in prossimità di antiche linee di scarico e di “sciacquature” della Panchina;
3. L'Orizzonte 3 costituito da alternanze di sabbie fini e medie ricche in resti conchigliari con livelli di argilla limosa con resti lignei e spessori di ghiaie e ciottoli in matrice sabbiosa grigio piombo è ben rappresentato in ogni sezione stratigrafica in quasi tutti i sondaggi fino al fondo foro;
4. L'Orizzonte 4 rappresentato da spessori di limi sabbiosi con ghiaie e resti conchigliari si rintraccia solamente in una sezione; il suo tetto si pone al minimo intorno ai -14,00 m. di profondità s.l.m.m. e nel Sondaggio S4 si ritrova fino al fondo foro -40,00 m. di profondità s.l.m.m..

Dalle considerazioni sin qui trattate è possibile sintetizzare la seguente situazione stratigrafica:

- Il substrato non rintracciato dalle analisi geognostiche dirette ed indirette e conosciuto solo sulla base di studi bibliografici ed in seguito all'esecuzione di sondaggi profondi è mio-pliocenico ed ha una natura prevalentemente argillosa o limo-argillosa;
- Ai piedi del Terrazzo morfologico si rinvencono delle alluvioni di conoide depositate dai torrenti livornesi costituite da ghiaie e sabbie grossolane che si rintracciano tra i -15.00 ed i -18.00 m. da piano campagna; più in profondità invece si rinvencono orizzonti di ghiaie intorno ai 30.00 – 35.00 m. da piano campagna riconducibili alla deposizione durante le modificazioni “in meandro” del paleo-Arno e Serchio -.

- Al di sopra del substrato e verso l'entroterra si imposta il Terrazzo eustatico marino di Livorno del Pleistocene superiore costituito prevalentemente da sabbie, sabbie variamente cementate con intercalazioni e passaggi di sabbie limose. Il Terrazzo morfologico risulta delimitato verso ovest da una scarpata nota con il nome di "Gronda dei Lupi";
- In parte in contatto diretto con il substrato, in parte in lieve sormonto sul Terrazzo pleistocenico di Livorno, si trovano le formazioni post-tirreniane ed oloceniche costituite da sabbie limose e limi argillosi organici tipiche delle zone di transizione palude-mare; verso la superficie si rintracciano i cordoni dunali e le caratteristiche formazioni retrodunali di sabbie fini con elongazione Nord-Sud e disposizione sub-parallela verso la linea di costa;
- L'ambiente stratigrafico dell'areale in esame che si è evoluto secondo episodi sedimentari in ambiente fluvio-deltizio e marino ha subito una ulteriore e consistente trasformazione antropica relativa all'utilizzo del territorio prima ai fini agricoli e quindi industriali in relazione allo sviluppo dell'area portuale.

Visto nell'insieme il profilo geo-stratigrafico, considerata una ipotetica sezione di tutte le stratificazioni susseguitesesi nell'arco temporale post-pleistocenico, presenta un "unicum" diverso-omogeneo e perennemente saturo formato da materia granulometrica da fine a molto fine; tuttavia segnata in orizzonti ben precisi e più profondi da "inghiaiate" riferibili agli episodi alluvionali delle aste idriche (Arno e altri torrenti livornesi minori).

La cosa che non deve in alcun modo sfuggire è che a questa pseudo-omogeneità litologica e stratigrafica non possiamo associare un'altrettanta omogeneità deposizionale, infatti le coltri terrigene non si sono sovrapposte secondo precise regole sedimentarie di classazione delle componenti granulometriche e litologiche, ma attraverso complesse relazioni eteropiche.

Gli equilibri geomorfologici e la distribuzione litologica, nell'ambito dei trends evolutivi, sono da considerarsi temporanei poichè risulta determinante la transitorietà e la variabilità dell'ambiente in relazione ai fattori naturali di modificazione (flusso e riflusso di marea, apporto variabile dei sedimenti in virtù delle precipitazioni, chiusura e riapertura delle barre costiere dunali con avvicendamento di un ambiente più lagunare).

A questi fattori deposizionali naturali si sono interposte e sovrapposte in qualche misura tutte quelle modificazioni antropiche attuate allo scopo di rendere

utilizzabili e produttivi - in virtù della trasformazione e dello sviluppo economico dei luoghi (dapprima con peculiarità agricole durante le grandi opere di bonifica del primo novecento e successivamente per l'espansione delle aree di porto e di retro porto), la parte di suolo emerso con il recupero delle parti sommerse o delle zone malsane e malariche.

Proprio il recupero dei terreni malsani fu attuato mediante interventi di organizzazione di un reticolo idrografico gerarchizzato dei drenaggi ed una conseguente deposizione di materiale terrigeno di provenienza alloctona. Peraltro questo recupero di terreni nella zona in questione va senza dubbio considerato "residuale" rispetto alle grandi bonifiche eseguite nella pianura pisana e nel livornese in genere.

oooo

L'analisi dei numerosi documenti raccolti e la conoscenza approfondita dell'ambiente, fa propendere per una sua evoluzione complessa e stratificata con continue costruzioni e analoghe demolizioni degli impalcati del sottosuolo.

Innanzitutto è possibile determinare dei punti cardinali fermi che riguardano la formazione dei vari spessori che possiamo sintetizzare in:

- ⌘ Terreni olocenici recenti che si sono formati in maniera naturale da processi di sedimentazione dalle foci dei vari torrenti e dal rimaneggiamento dei principali vettori del mare (moti ondosi, correnti e maree);
- ⌘ Terreni che si sono formati mediante l'affluenza in bacini palustri o lagunari di canali scolmatori, anche mediante aumento delle pendenze di fondo e realizzazione di cateratte. Sono terreni pseudo-naturali in cui l'azione umana pur essendo stata determinante nel processo non ha comportato un elevato rimaneggiamento, tanto è vero che questi terreni provenienti da attività di bonifica si presentano con un elevato grado di naturalità;
- ⌘ Terreni che derivano da un'azione meccanica di dragaggio dei fondi o di materiali naturali in sospensione sugli specchi acquei antistanti la linea di costa che sono stati oggetto di profondi rimaneggiamenti da parte dell'uomo e che sono stati depositi in depressioni palustri e/o lagunari;
- ⌘ Terreni che sono stati depositi dall'uomo nei primi spessori degli orizzonti e dei piani che derivano dai bombardamenti bellici; si tratta di

terreni costituiti da materiali vari (presenza di percentuali litiche con mattoni, ferri, etc.).

In sostanza l'attività di bonifica è sicuramente umana tuttavia c'è una gradualità del prodotto finale soprattutto in termini di selezione delle granulometrie poiché quando i canali di bonifica depositano i materiali all'interno di bacini pseudo-chiusi al mare classano i materiali naturalmente a seconda della gravità, della forma dei grani e delle particelle in sospensione.

Importante sottolineare che le azioni di bonifica condotte con la rettifica dei canali ed il versamento dei materiali in ambienti semi-chiusi, palustri o lagunari contengono poca frazione organica, poiché le fanerogame sono piante marine che, nel caso di tomboli protetti non riescono ad entrare, mentre invece le azioni di bonifica condotte con l'escavo del materiale depositato sul lido ed il riporto in aree depresse ha una frazione organica molto più importante.

Un'altra cosa da evidenziare è la ritmicità dei processi di sedimentazione: in una ideale sezione ortogonale alla linea di costa bassa i processi di deposizione granulare, partendo dalla terraferma verso il largo mare sono in generale dal materiale più grossolano fino a quello più fine; in ambiente pelagico lontano dalle turbolenze dei moti ondosi i sedimenti sono nettamente più fini poiché sono stati trasportati da correnti, moti ondosi e maree che hanno vinto la gravità delle particelle; più in vicinanza alla linea di costa è possibile invece trovare spiaggiati materiali anche più grossolani spesso oggetto di rimaneggiamenti e trasporti al pelo d'acqua.

Non è raro pertanto rintracciare ambienti stratigrafici in parte sovrapposti con sequenze grossolane-medie e fini che possono avere anche una positura rovesciata, semplicemente perchè ciò che ha giocato un ruolo determinante è il rapporto tra le azioni del mare (energia attiva) ed i processi di avanzamento o arretramento della terraferma.

## **CAPITOLO 3**

### **INQUADRAMENTO PALEOGEOGRAFICO ED EVOLUZIONE STORICA DELL'AREALE**

#### **3.1 Evoluzione paleogeografica dell'areale in studio**

Tralasciando l'evoluzione paleogeografica nelle ere più remote gli studi hanno messo in luce che nel Miocene Superiore (10-5 MYA), l'area dei Monti Livornesi era circondata dal mare e nel Pliocene Inferiore il dominio marino raggiungeva la sua massima estensione, con le cime più elevate che dovevano costituire un arcipelago di piccole isole – si veda **Fig. 5** -.

A partire dal Pliocene Medio, con il graduale ritiro del mare, è andata sviluppandosi nel tempo una diffusa rete idrografica con spiccata tendenza erosiva. Per questo motivo, nella zona più collinare non ci sono residui di strutture geomorfologiche superficiali più antiche di queste ere.

Attualmente, la fascia costiera del territorio livornese, dal Calambrone (sbocco dello Scolmatore dell'Arno) alla foce del Chioma, conserva lineamenti morfologici molto variabili in cui si distinguono: un'ampia pianura prospiciente la costa dove è sviluppata la città, una zona collinare-montana rappresentata dai rilievi occidentali dei Monti Livornesi, ed una zona pedecollinare, caratterizzata da una serie di spianate morfologiche, che raccordano la piana con i rilievi più alti.

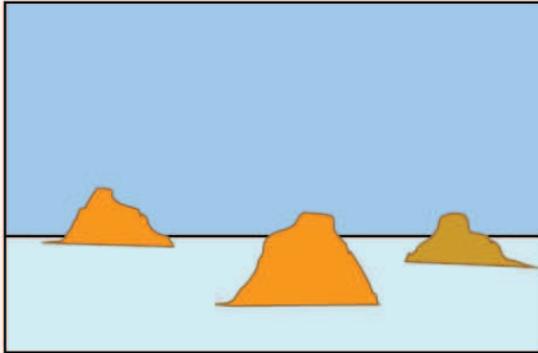
Proprio dal Miocene Superiore, circa 10 MYA, cominciano a manifestarsi nella Toscana marittima fasi distensive con bacini in sprofondamento (la Piana di Livorno, la Piana di Pisa, il bacino del Tora-Fine), separati da aree più elevate (i Monti Livornesi).

Questa tettonica continua a fasi alterne per tutto il Pliocene (nel Pliocene Medio si ha una fase di lento sollevamento generale) ed è attiva fino al Pleistocene Inferiore, intorno a 1,5 MYA.

Fino ad allora la piana litoranea continua a fare parte di un bacino in subsidenza interessato da repentini ma limitati sprofondamenti. Con la fine del Pleistocene Inferiore, il modellamento geomorfologico non è più orientato dai movimenti lungo le faglie, mentre assumono una grande importanza le

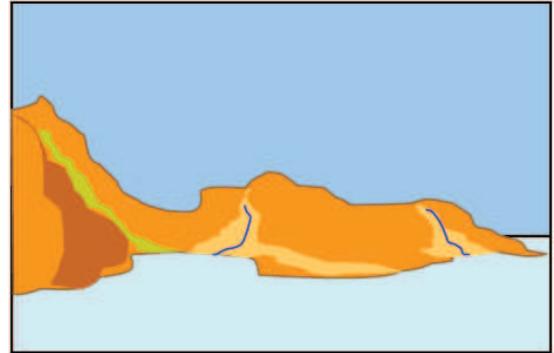
**Fig. 5:** Ricostruzione paleogeografica recente del territorio livornese  
Fonte bibliografica: Elaborazione Studio Geologico A. Rafanelli, 2003

#### Miocene medio-inferiore



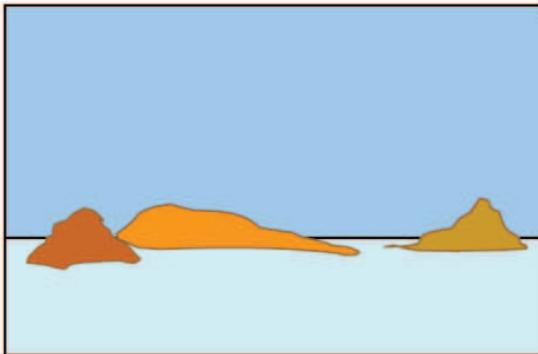
I Monti Livornesi sono ridotti ad una serie di piccole isole, frammentati in un arcipelago, con un mare piuttosto profondo che comincia a dare vistosi segni di abbassamento del livello.

#### Miocene superiore



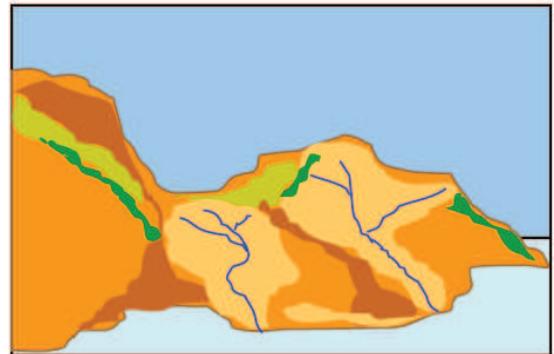
Il clima gioca un ruolo fondamentale, assistiamo infatti ad un aumento delle temperature (si parlava qualche anno fa dell'essiccamento del Bacino del Mediterraneo). Le nostre isole si saldano, aumentano le terre emerse.

#### Inizio Pliocene



Il mare riconquista le terre emerse, i Monti Livornesi si trasformano ancora una volta in una manciata di isole. A questo contribuisce l'aumento del livello delle acque post-Messiniano

#### Fine Pliocene



Con fasi tettoniche alterne in cui si susseguono momenti distensivi e per l'azione di deposito dei corsi d'acqua organizzati sulle terre emerse, si assiste ad un nuovo e più consistente rinsaldamento delle terre sparse.

oscillazioni del livello del mare legate all'eustatismo glaciale; ciò almeno lungo la fascia costiera interessata dai terrazzi.

Durante il Pleistocene Medio, a partire da circa 0,7 MYA anni fa con una durata di circa 0,6 MA, si registra un lentissimo sollevamento che si esaurisce intorno ai 100.000 anni fa.

In questo periodo vengono modellati i terrazzi che orlano verso mare i Monti Livornesi. Il Terrazzo di Fattoria delle Pianacce, si è formato nell'interglaciale Mindel-Riss (0,25-0,4 MYA), questo risulta più interno ed elevato (si trova tra le quote 60 e 120 m. s.l.m.m.) ed occupa una fascia larga al massimo un paio di chilometri, orlando in direzione NNE-SSW i Monti Livornesi, dalle colline di Guasticce, a Nord, a Calafuria.

Per la Piana di Livorno non possono essersi conservate naturalmente morfologie più antiche dell'età dei vari terrazzi eustatici che la compongono. Qui la conformazione idrografica è certamente posteriore al Tirreniano (0,1 MYA), poiché le aste fluviali incidono il terrazzo riferibile a questo piano. La rete idrografica assume la conformazione attuale durante le glaciazioni del Wurm.

Si può ritenere comunque che, anche prima delle trasgressioni tirreniane, non esistesse un sistema di valli ben incise, che la morfologia fosse pianeggiante e che i fenomeni di deposizione successivi abbiano sepolto queste lievi ondulazioni, formando una piana in debolissima pendenza sulla quale i corsi d'acqua devono avere dilavato in superficie, con un potere erosivo piuttosto limitato.

Migliori sono le attuali conoscenze sul Pleistocene superiore al limite meridionale del bacino versiliese-pisano, cioè sul cosiddetto Terrazzo di Livorno. Quest'ultimo indicato anche come Terrazzo II è stato ben definito dai lavori di Mazzanti e Federici come "poli-ciclico". Infatti è formato da un ciclo sedimentario marino inferiore con fauna calda a *Strombus bubonius* (Tirreniano I), sormontato da un ciclo continentale Intratirreniano (con livelli ad associazioni polliniche e malacologiche, denotanti un clima freddo-umido), sormontato a sua volta da un secondo ciclo sedimentario marino (Tirreniano II), cui infine si sovrappongono depositi continentali con industrie del Paleolitico medio e quindi ancora rientranti nell'ambito del Pleistocene superiore.

Facendo riferimento ad una situazione stratigrafica più generale<sup>24</sup> Federici e Mazzanti hanno ritenuto di identificare il primo episodio trasgressivo del livornese (Tirreniano I) ed il secondo (Tirreniano II), i cui acmi vengono indicati a circa 125.000 e 110.000 anni or sono - si riconsulti la **Fig. 2** -.

Questo Terrazzo morfologico si è modellato successivamente alla sua formazione sia per l'azione dei corsi d'acqua, sia per l'oscillazione del livello marino che è sempre stata discontinua e legata alle fasi glaciali ed interglaciali, e quindi all'interno di questi periodi, alle fasi interstadiali.

La scarpata del Terrazzo di Livorno nota come *Gronda dei Lupi*, attualmente ormai riconoscibile sia pur debolmente (per le ricoperture e le modificazioni antropiche), si trova al margine e ben arretrata rispetto all'areale in studio. E' quindi interessante constatare la presenza di un contatto di bordo morfologico tra il Terrazzo di Livorno e gli orizzonti stratigrafici affioranti nell'area.

Questo può tornare utile per delineare anche i rapporti in termini di ricarica degli acquiferi dal Terrazzo verso l'areale in studio. Va da sé che il Terrazzo di Livorno si caratterizza all'inizio del Pleistocene superiore attraverso una trasgressione glacio-eustatica, che ha riportato nuovamente il litorale in una posizione più ad Est di quella attuale, mentre la Piana di Livorno era sommersa dalle acque.

Il trascorrere degli eventi paleogeografici è qui rappresentato temporalmente, almeno per gli spessori che abbiamo preso in considerazione, al più ai 100.000 anni fa. Rimane ormai testimoniato in numerose fonti bibliografiche che in un periodo, compreso tra gli eventi post-calabrianici e quelli tirreniani, legato alle fasi di riavvio e stasi glaciale, si dovettero susseguire fasi regressive alternate da fasi trasgressive. Ancora nel Pleistocene superiore dovettero svilupparsi più episodi trasgressivo-regressivi collegati al glacioeustatismo. E' ben rintracciabile la fase sedimentaria e morfologica che nel Wurm II ha portato ad un'ampia regressione marina con deposizione dei Conglomerati dell'Arno e Serchio da Bientina, quando la Piana di Livorno doveva aver assunto l'aspetto di una collina, accentuato da una vegetazione oggi propria del piano montano, come conseguenza della fase glaciale del clima.

Dai rapporti di giacitura presenti nel Livornese essa risulta necessariamente

---

<sup>24</sup> Da Shackleton, 1969

posteriore al Tirreniano II, ma, per quanto presumibile in generale, molti Autori ritengono sia verosimilmente posteriore anche al Tirreniano III e corrispondente al grande approfondimento del livello del mare, il quale denuncia il sopraggiungere dell'ultimo glaciale corrispondente a circa 75.000 anni fa.

L'ultima glaciazione (Wurm) che attualmente viene collocata in un arco cronologico compreso tra due stadi molto bassi di livello del mare di circa 75.000 e di circa 18.000 anni or sono, si è sviluppata in più fasi verosimilmente dipendenti da oscillazioni climatiche minori (periodi interstadiali o pulsazioni climatiche).

La fase Wurm II è caratterizzata dalla maggiore regressione glacioeustatica marina con tracce di alvei fluviali fino alle attuali isobate di 100-110 m. ben oltre le Secche della Meloria sulle quali è testimoniata la presenza di forme continentali (Cervidi ed Elefanti).

E' in questa fase che l'Arno incide definitivamente la "Gronda dei Lupi", scarpata che delimita il Terrazzo di Livorno dalla Pianura di Pisa<sup>25</sup>.

L'attuale assetto del paesaggio è conseguenza delle mutazioni climatiche che segue la fine della glaciazione del Wurm e che si mantiene costante pur con vicende alterne durante tutto l'Olocene. Il ristabilirsi di condizioni climatiche interglaciali ha comportato lo sviluppo della trasgressione versiliana con l'attestarsi della costa alla base del Terrazzo di Livorno. Nella Pianura di Pisa a queste variazioni trasgressive devono essere sommate le azioni derivate dall'apporto sedimentario specialmente dell'Arno e del Serchio.

Dalla trasgressione versiliana fino ai tempi protostorici e storici, assistiamo ad una regressione non marcata, ma soprattutto all'avanzamento della linea di costa dovuta in tempi protostorici alla formazione di "aree medie" tra il continentale ed il marino con transizioni graduate mare-lagune-paludi; mentre in tempi storici più recenti (dal tempo dei Romani), oltre alla parte evolutiva naturale cominciano ad essere determinanti le modifiche apportate dall'uomo, prima passivamente (realizzazione di porti ed opere marittime), fino all'esecuzione di veri e propri progetti di bonifica (si vedano i prossimi paragrafi).

---

<sup>25</sup> Già riconosciuta dal Targioni Tozzetti nel 1768.

Dall'esame pollinico<sup>26</sup> la successione fluvio-palustre olocenica formata in prevalenza da limi, rivela un trend evolutivo completo di una fase Atlantica del Querceto considerata compresa tra i 5.000 e 2.500 anni a.C. in numerosi sondaggi tra i -30,00 ed i -20,00 m. di profondità. Nei sondaggi a partire dai -13,00/-10,00 m. di quota verso la superficie sono rappresentati invece depositi marini dell'ultima trasgressione eustatica detta *versiliana*.

### 3.2 Evoluzione dell'area negli ultimi 6.000 anni

Nel contesto più generale della paleoclimatologia europea l'intervallo compreso tra circa 6000 e circa 4500 anni or sono viene indicato come l' "optimum" climatico, seguito alla deglaciazione, già sensibile nel Mediterraneo intorno a 15000 anni fa<sup>27</sup>, responsabile della trasgressione marina nota come "versiliana"<sup>28</sup>, o come posteriore all'ultimo "picco" glaciale di circa 18000 anni or sono. Pinna (1984) riferisce sulle conoscenze dello sviluppo paleoclimatico più recente che, per l'area europea e gli ultimi circa 3000 anni, indica in un'oscillazione "fredda" fra 900 e 300 a.C., in una "calda" fra 800 e 1150-1200 d.C. e nella "piccola età glaciale" fra il 1590 e 1850 alla quale è seguita un'ultima fase "calda" da alcuni studiosi ritenuta terminare nel 1950.

Tutte le precedenti indicazioni confermano un andamento generale del livello marino in innalzamento negli ultimi 3000 anni. Certo nei valori medi, può essere avvenuto con pause o lievi inversioni tuttavia non ancora registrate con sicurezza esatta da studi riferiti a situazioni locali.

La **Fig. 6** indica l'andamento del lido con elaborazione dei documenti tra VIII° e V° sec. a.C. (siti nn. 15, 18, 19, 20 e 24) la formazione avviene durante la fase della trasgressione versiliana e si sviluppa dopo lo stazionamento "basso" del livello marino (- 2,00 m.) culminato circa 3.500 anni or sono. Nella linea di riva impostata sul lato a mare di questo lido è significativa la mancanza di ogni accenno di protuberanze deltizie dell'Arno.

D'altra parte è noto, secondo quanto testimoniato da Strabone, che il ramo principale del Serchio si riuniva in Arno nel sito dove sorse il centro abitato di Pisa, per cui, non aveva una bocca propria in mare. Vaste zone umide dovettero rimanere racchiuse all'interno di questo lido, come è documentato dallo strato di

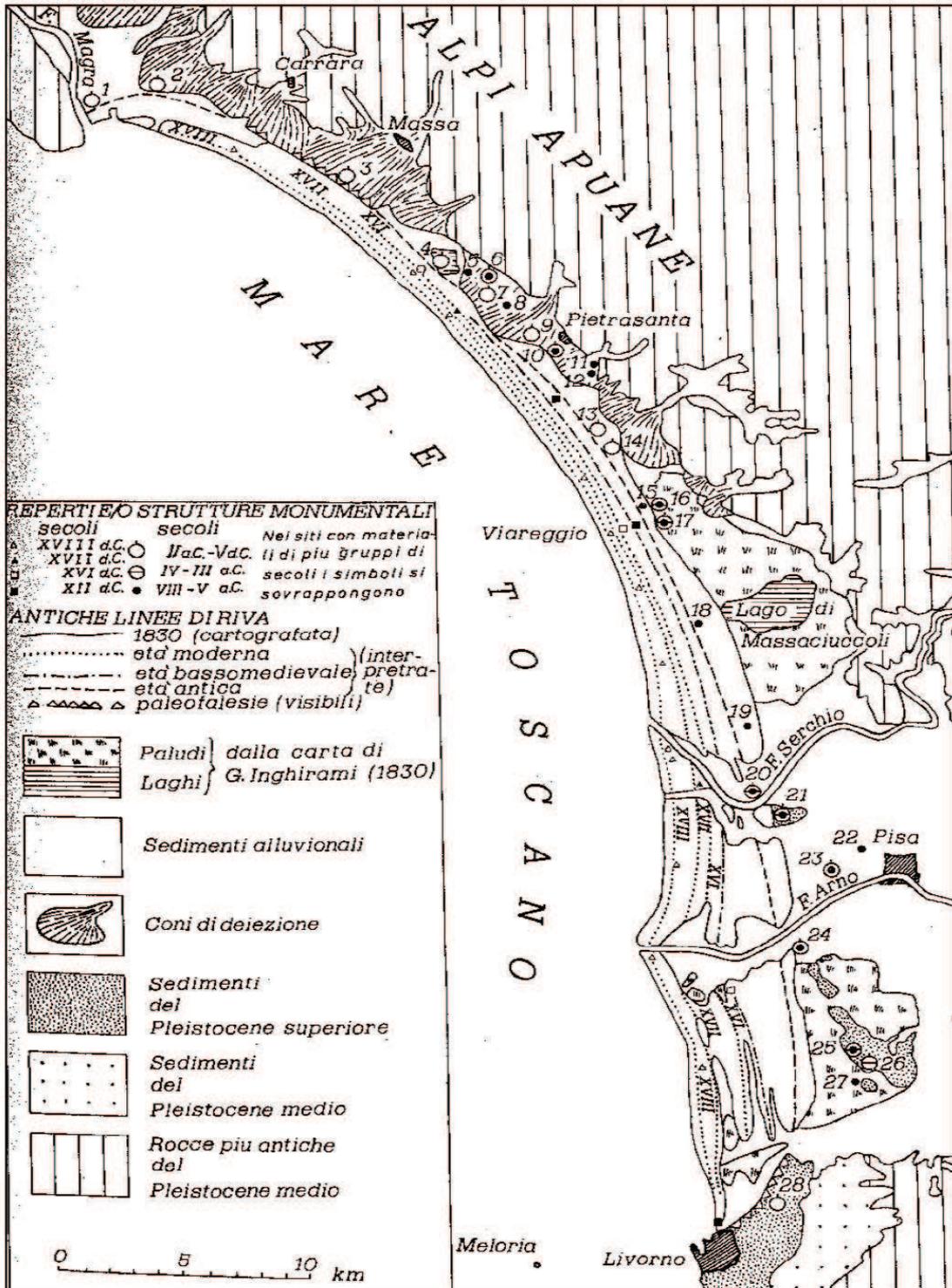
---

<sup>26</sup> Galletti, 1978.

<sup>27</sup> Vergnaud Grazzini et al., 1989

<sup>28</sup> Blanc, 1934

Fig. 6: Le antiche linee di riva tra Livorno e Bocca di Magra in relazione ai siti archeologici più significativi  
 Fonte bibliografica: R.MAZZANTI, *L'influenza della tettonica, delle oscillazioni climatiche e dell'impatto antropico nella costruzione del litorale versiliese - pisano*, Quaderno n. 3 dell'Autorità di Bacino del Fiume Arno, 1994



torba con materiali archeologici databili tra il tardo VII° e il VI° sec. a.C. a Rocchino (sito n.16)<sup>29</sup> e dalle stratigrafie delle perforazioni della zona del Massaciuccoli.

La **Fig. 6** presenta anche la ricostruzione delle linee di riva del litorale versiliese-pisano di età basso-medievale e moderne (secoli XVI°, XVII°, XVIII°), ricostruite sulla base della posizione di manufatti, tuttora esistenti o di sicura localizzazione, nei pressi delle rispettive linee di riva, e riporta inoltre la linea di riva del 1830 tracciata nella carta di Giò Inghirami, la prima “geometricamente” esatta che rappresenti la Toscana.

E' evidente la notevole progradazione del litorale versiliese-pisano in un periodo nel quale il livello del mare è risalito, mediamente, almeno di 2,00 m. Quest'ultimo fatto e la chiara conformazione a delta della Bocca d'Arno fin da età basso-medievale rivelano che la progradazione del litorale è stata determinata dal forte incremento di materiali detritici trasportati dal fiume, malgrado quest'ultimo abbia perduto nel frattempo l'apporto delle acque del Serchio.

Il forte incremento del trasporto solido dell'Arno non è spiegabile con le variazioni climatiche che si sono succedute negli ultimi 3.000 anni e che non hanno comunque provocato forti oscillazioni del livello del mare. Di conseguenza la spiegazione del fenomeno va ricercata, in netta prevalenza, nelle attività antropiche.

I bacini imbriferi dell'Arno, Serchio e Magra, i corsi d'acqua principali influenti sul litorale versiliese-pisano, sono stati oggetto di frequentazione antropica fin dal Paleolitico inferiore. Anche se non possiamo escludere un primo, debole, impatto sugli equilibri naturali dei cacciatori paleolitici dal momento che furono in grado di usare il fuoco a loro piacimento, è con le “scoperte” neolitiche dell'allevamento del bestiame e dell'agricoltura che le attività umane assumono una rilevanza del tutto particolare in questi equilibri.

Infatti nell'agricoltura primitiva fu diffusa la pratica del “debbio”, o incendio degli appezzamenti da deforestare, con lo scopo non solo di eliminare gli alberi ma di fornire ceneri capaci di rendere i terreni fertili per alcuni anni.

E malgrado sembri che le popolazioni neolitiche non abbiano superato una densità

---

<sup>29</sup> Vaggioli, 1990

di un abitante per kmq.<sup>30</sup> e abbiano dissodato i terreni con il solo uso di zappe, le loro attività agricole si sono protratte per circa 4000 anni, ovviamente senza prevedere alcuna reintegrazione di fertilità e rigenerazione dei terreni sfruttati (abbandonati del tutto o lasciati a magri pascoli dopo il ciclo produttivo agricolo) per cui è impensabile non abbiano influito negli assetti dei territori. Gli studi più recenti hanno rivelato che il popolamento neolitico in Toscana<sup>31</sup> è stato piuttosto intenso soprattutto nelle valli alluvionali, con terreni più adatti alle attività agricole e conseguentemente deforestati per primi, e lungo la costa, in relazione all'inizio dei rapporti marittimi tra la regione e le isole del Tirreno.

### **3.3 Esiti della ricerca storiografica condotta nell'area in esame**

L'evoluzione storica di un'area come questa ubicata ai margini del confine amministrativo settentrionale del Comune di Livorno riveste un indubbio interesse, poiché le trasformazioni che sono avvenute e si sono susseguite nei tempi protostorici e storici, per la presenza dell'uomo e per le sue volontà di sviluppo territoriale, sono in stretto collegamento con l'obiettivo finale che si prefigura il presente studio, ovvero quello di determinare un modello idrogeologico attendibile e con buon margine di confidenza.

La diffusione degli uomini, con la loro capacità operativa crescente, costituisce un fatto nuovo della massima importanza nella storia della superficie terrestre. L'occupazione umana appare come un evento molto recente nel quadro dei tempi geologici, ma è ormai da ritenere importante se si considera la complessità e l'incisività degli eventi.

Queste modificazioni umane e naturali sono tanto più importanti e determinanti negli studi idrogeologici tanto più ci troviamo di fronte ad aree costiere e di retrocosta con un legame stretto con il mare (e quindi con le sue variazioni anche in termini di livello) che hanno mutato il loro *status* geomorfologico passando in continue situazioni di transizione da paludi più o meno boschive, a lagune sbarrate da complessi sistemi di barre costiere, fino ad essere state trasformate in terraferma o essere state annesse al sistema marino – si veda **TAV. 5** “*Evoluzione della linea di costa negli ultimi 2000 anni*” - .

---

<sup>30</sup> Deevey, 1960

<sup>31</sup> Grifoni, Cremonesi e Tozzi, 1994

### *Epoca romana*

Il Porto Pisano si ubicava nella pianura di Pisa a Sud dell'Arno che era caratterizzata da ampie superfici lagunari e palustri; tutte le superfici del delta dell'Arno erano ricoperte dal mare; la costa formava una vasta insenatura poco profonda – si veda **Fig. 7** -. Il Sinus Pisanus andò mano mano insabbiandosi con i detriti trascinati in mare dai vari rami dell'Arno; ciò comporterà nei secoli uno spostamento degli attracchi portuali dall'attuale San Piero a Grado sino a Livorno.

La primitiva linea di costa del *sinus* iniziava a Nord-Est nel minuscolo insediamento di *Liburnia* vicino a dove sorgerà la Fortezza Nuova, per poi lambire la Torretta. La linea di costa in corrispondenza del Sinus proseguiva toccando la foce del torrentello Riseccoli (da *Rivu secco*, torrente secco), poco oltre la costa, aggirato il lieve promontorio dove si trova attualmente il Cimitero comunale, passava presso quella che era la foce originaria del Rio Cigna (da etrusco *Cinna* e dal latino *Cinnius*) dove poi sorgerà il borghetto di Santo Stefano ai Lupi località posta sul fronte dell'antica falesia marina (la già richiamata "Gronda dei Lupi").

Superata la Gronda la costa giungeva alla foce del Torrente Ugione (forse dall'etrusco *Ausina*) e poi nelle vicinanze di una cittadella ubicata presso la moderna Località del Casone posta all'originaria foce del ramo meridionale del delta dell'Arno (forse coincidente con l'antica foce del Paleo-Serchio).

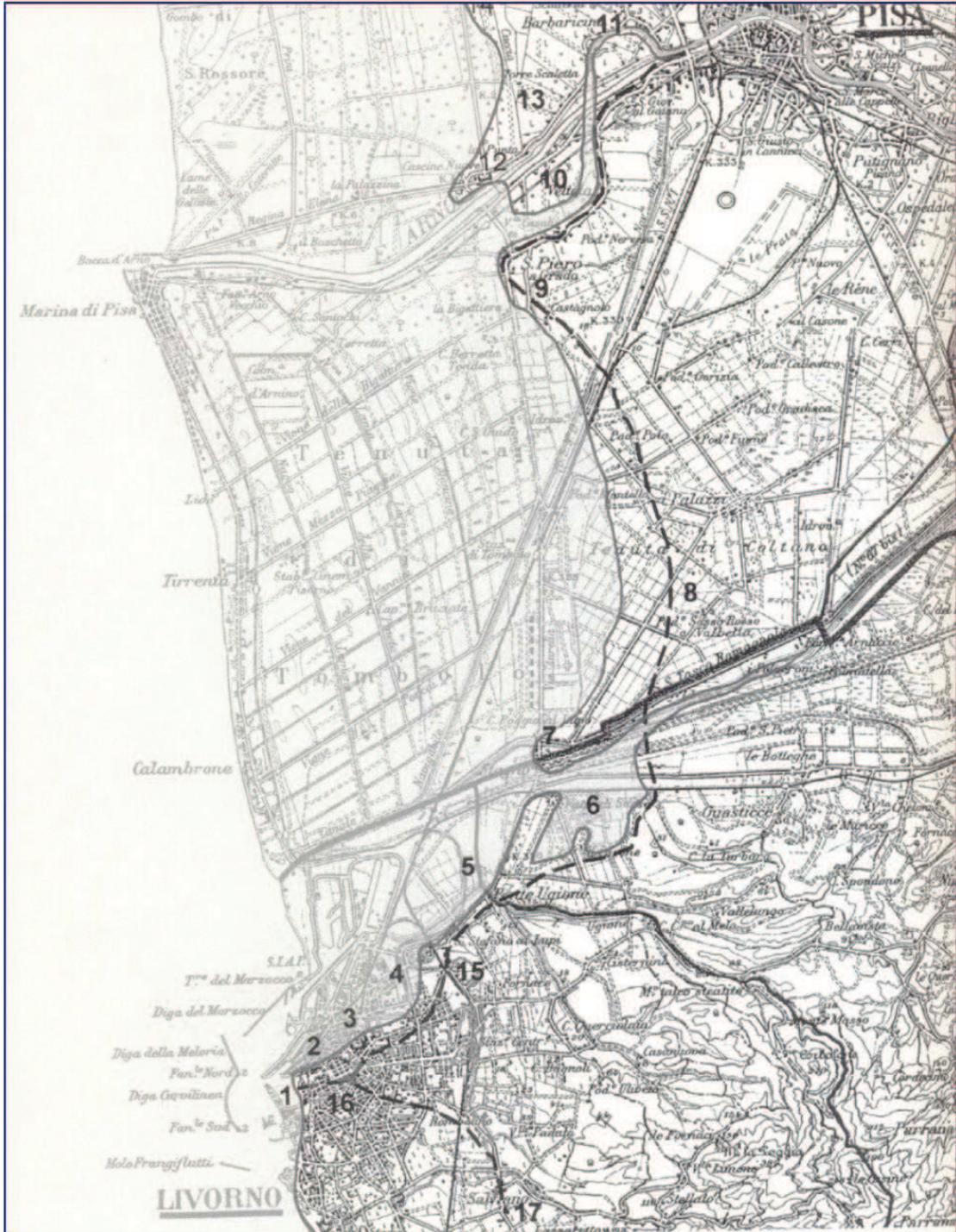
Qui si trovava un altro porto non protetto da moli, ma da lunghe e fitte alghe<sup>32</sup> che nascevano sui bassi fondali lagunosi. Quello contiguo alla località il Casone potrebbe rappresentare in età imperiale e tardo-antica, uno dei principali approdi del famosissimo Portus Pisanus. La minuscola cittadella portuale denominata Triturrita era posta su una penisola artificiale che si protraeva verso la laguna e divenne sempre più importante inversamente all'insabbiamento inesorabile del porto di Grado.

Il collegamento tra il sistema lagunare ed il mare aperto (sempre separato da barre sabbiose costiere) doveva avvenire mediante un canale navigabile coincidente con l'alveo originario del Calambrone (da *Calanbro*, connesso a "calanca", "cala", fenditura nella roccia, avvallamento scosceso e franoso tra alture, ma anche corso d'acqua in una fenditura di terreno, e Ambra, derivante dall'etrusco *Amries*).

---

<sup>32</sup> In realtà dai rialzamenti di fondale stesso sui quali si insediavano le posidonie.

**Fig. 7** Evoluzione della costa – Epoca romana  
Fonte Bibliografica: L'Antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno" G. Trotta, 2005



L'insenatura proseguiva verso Nord nei pressi di Stagno (che nel Medioevo diverrà la vasta laguna posta sul retro ed a Nord-Est del Porto Pisano e toccherà le località di Coltano (dall'etrusco *Cultana*), di Castagnolo e di San Piero a Grado. Il Porto di Grado (ovvero a *gradus arnenses*, le gradora o "gradini" che erano presenti sul terreno in lieve altura e verso il mare, oppure nell'accezione di accesso, imbocco all'Arno dal mare, cioè la foce del fiume) rimase con ogni probabilità il principale attracco almeno fino a I° secolo d.C. (ma forse anche fino al III-IV) per poi essere insabbiato e cedendo maggior importanza al Porto di Triturrita, detto in seguito Portus Pisanus.

Per riuscire a quantificare l'estensione di territorio che nei secoli successivi prograderà verso l'attuale linea di costa è interessante quello che riferisce Strabone tra il I° secolo a.C. ed il I° secolo d.C. ovvero che *C. Pisae* distava dalla foce dell'Arno, ed anche dagli attracchi portuali di Grado, circa 20 stadi (3 chilometri e mezzo circa) e quindi rispetto alla linea di costa attuale Grado e la foce dell'Arno distavano circa 800 metri.

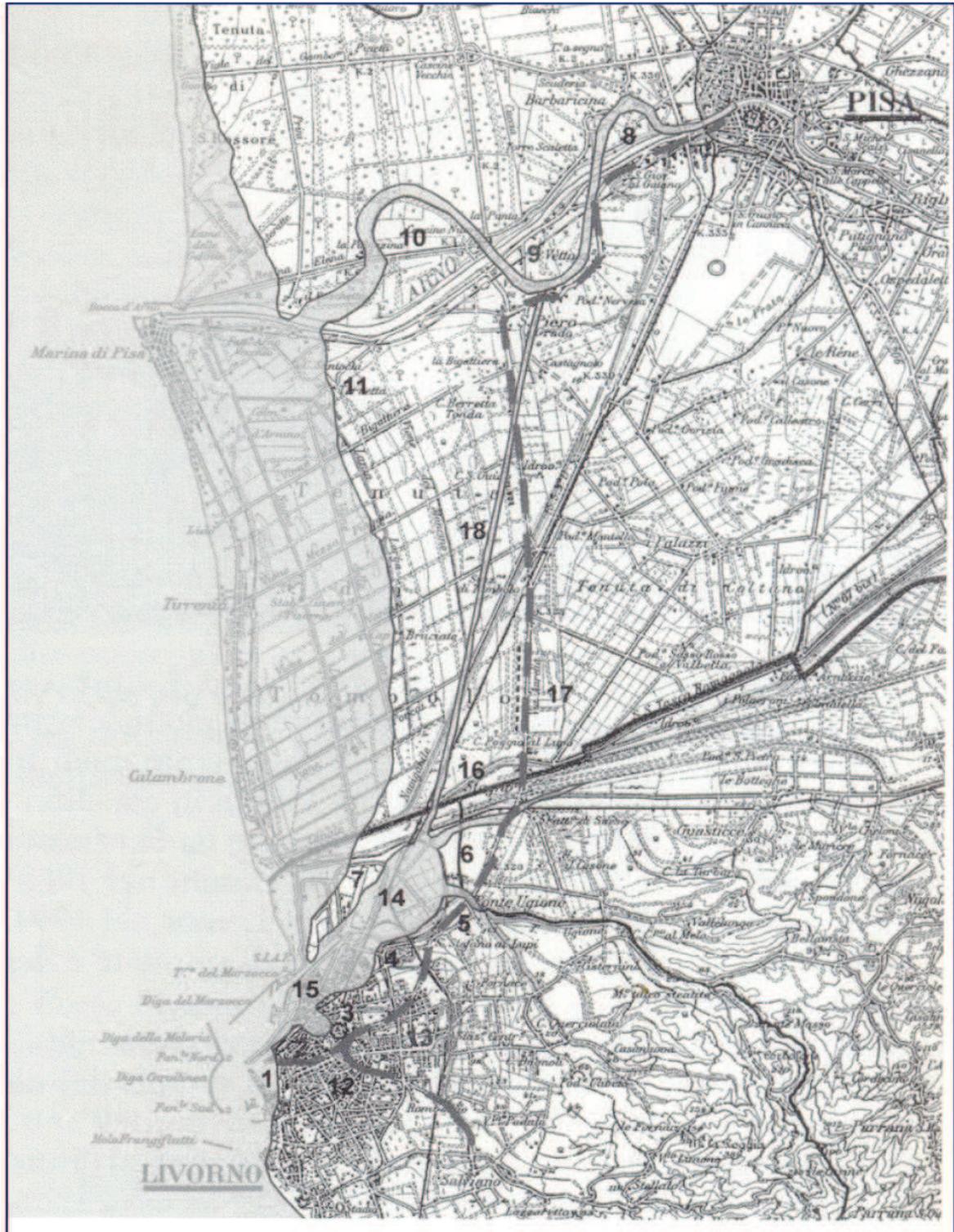
### **Epoca Medioevale**

L'approdo di Porto Pisano in età medioevale era rappresentato da un settore più contenuto dell'antico porto d'età tardo-romana, all'interno del settore meridionale del vecchio *Sinus*, che si era ristretto per l'avanzamento della linea di costa. Tale porto è noto nelle documentazioni e nell'iconografia dal giugno dell'891 ed aveva come confini il mare ad occidente, il Torrente Cigna a Sud, le Colline Livornesi ad oriente ed il Torrente Ugione a Nord – si veda **Fig. 8** -.

Dal 904, invece, com'è ampiamente noto si ha la prima notizia documentaria di *Liburnia* in quel secolo dominata dalla solitaria torre d'avvistamento a base quadrata presso l'omonima cala: da questo piccolo insediamento fortificato, la sponda del ridimensionato *Sinus* toccava ancora le località di Torretta, la foce del Torrentello Riseccoli e la località di Bastia da cui passava la via perimetrale del Porto Pisano.

La viabilità formatasi su terreni bassi emersi con il ritiro delle acque marine, iniziava con probabilità all'interno del moderno incrocio tra Via Giuseppe Garibaldi e Via della Bastia, proseguiva all'incirca dove si svilupperanno le attuali strade intitolate a Francesco Pera ed a Fabio Filzi per poi dirigersi a Nord-Est risalendo la Gronda fino a ricongiungersi con la strada per Pisa (l'attuale Via Provinciale Pisana) all'altezza della Fonte di Santo Stefano a Mare (ai Lupi).

**Fig. 8** Evoluzione della costa – Epoca medioevale  
Fonte Bibliografica: L'Antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno" G. Trotta, 2005



Vicino a tale punto di raccordo tra la Via Nuova del Porto Pisano (strada che transitava tagliando in diagonale l'attuale cimitero comunale) e la Via Vecchia Carraia, a monte di Bastia, sulla Gronda si trovava la Fonte di Santo Stefano a Mare anch'essa fortificata e dalla quale scendevano le acque che alimentavano forse un molino verosimilmente attraverso un condotto artificiale.

La polla di Santo Stefano sgorgava copiosa proprio all'incrocio delle due strade (non a caso la strada di Porto Pisano fu ricollegata alla precedente via per Pisa proprio in sua corrispondenza), mentre altre "bocche" minori della sorgente si ubicavano nel suo immediato intorno, come pure alcuni pozzi scavati, sia a valle (verso Nord-Est in località poi detta La Fonte) sia a monte.

La sponda litoranea lambiva quindi le località di Stagno e di Isola (toponimi che documentano l'ormai avvenuto impaludamento di tale aree dell'insenatura originaria all'estuario del Paleo-Serchio, costituendo ampie lagune litoranee) toccava la località di Stagnolo a valle dell'Ugione (Lugione), rasentava ad occidente la località di Struffolo (toponimo derivante da "stuffo", brandello, lacerto di terreno, isola ancora coltivabile) a confine con le paludi dell'Altura, la foce vecchia del Calambrone ed il Tombolo litoraneo settentrionale. Assai più a Nord l'Arno si gettava in mare dopo aver descritto ampie anse (di Barbacina, di Vettola e di San Rossore); il porto vecchio di Grado risultava oramai completamente interrato.

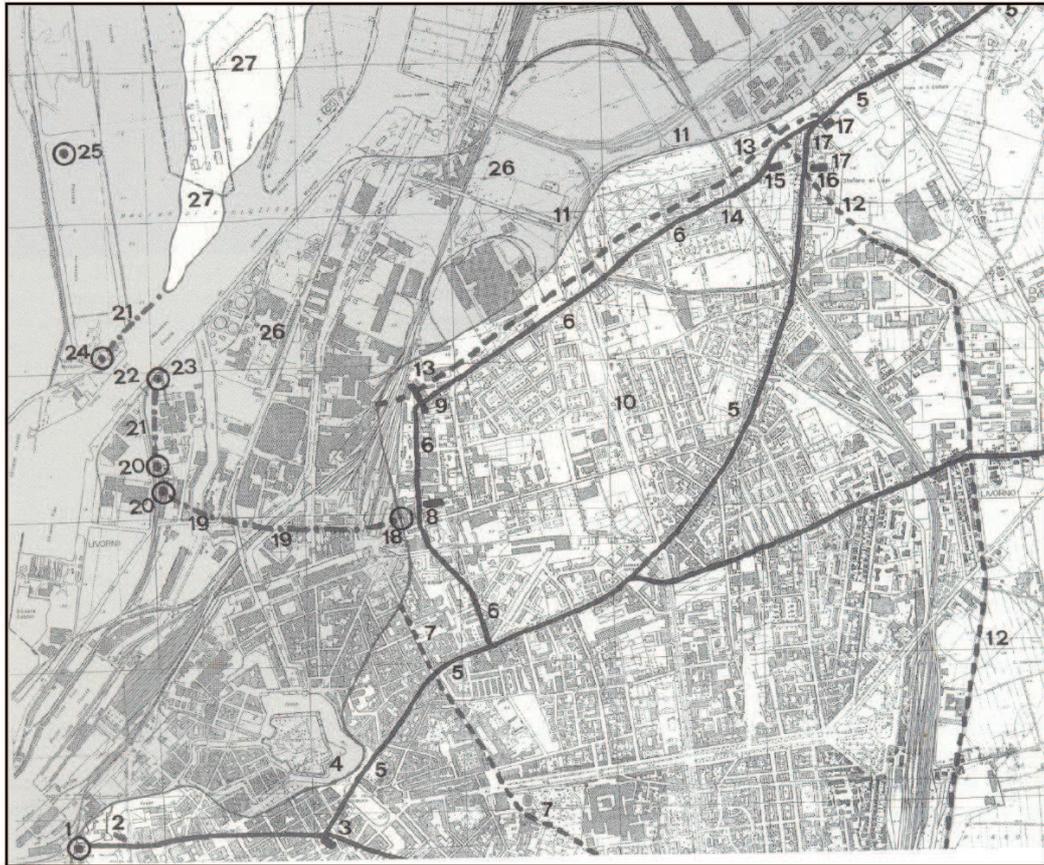
### **Il Duecento: l'epoca delle grandi torri**

I sedimenti portati dall'Arno e l'avanzamento progressivo della costa lunense-pisana avevano fatto sì che nel XII-XIII secolo anche il tratto fra l'Arno ed il Calambrone si fosse notevolmente spostato verso Occidente, nel contempo il porto interno più prossimo a Liburnum non sembrò più sufficiente – si veda **Fig. 9** -.

Il nuovo ed ampio porto, che verrà denominato il Magnale, costituì la nuova parte più esterna degli attracchi precedenti del *Portus Pisanus*, in conseguenza del ritiro delle acque marine. Il nuovo porto (ricavato anche sfruttando in piccola parte il Sinus a Nord-Est della caletta vicino a Santa Giulia) fu dotato di importanti infrastrutture di difesa e fu oggetto di un vero e proprio piano urbanistico la cui realizzazione si protrasse per anni.

Tra il 1156 ed il 1157 fu eretta la Torre della Meloria presso le omonime secche, all'imbocco del porto erano state costruite almeno quattro o cinque torri dai

**Fig. 9** Evoluzione della costa – Periodo Duecento  
Fonte Bibliografica: L'Antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno" G. Trotta, 2005



Bassorilievo del secolo XIII che evidenzia il sistema delle Tre Torri costiere nell'area Nord di Livorno

Pisani che controllavano l'accesso, protetto da palizzate: un vero e proprio porto artificiale, come appariva duecento anni dopo al Petrarca.

Inizialmente furono erette quasi di fronte alla località Bastia le Torrette o Torri della Fornice, vale a dire le torri poste presso il varco di accesso al porto: due, gemelle, che in seguito, una volta cadute in rovina vennero dette le Torrace.

Nell'agosto del 1165 venne costruito un grande edificio ad uso dei marinai, fu scavato un pozzo vicino ad esso e furono poste le catene tra le due torri del Magnale (le cosiddette Catene di Bocca di Porto). Fu quindi edificata a Nord-Ovest delle precedenti la policroma Torre Rossa (*Turris Rubra*, in mattoni) con probabili funzioni di faro del porto.

Infine non distante dalle precedenti, venne innalzata la più grande ed imponente Torre Magna o Magnana o di Magnale (*Turris Magnalis*). Inoltre vi erano altri due piccoli scogli con fortificazioni secondarie, quelle della Formica e della Fraschetta (quest'ultima in corrispondenza dell'attuale Darsena Toscana). Dal 1160 Pisa aveva iniziato a scavare un fosso navigabile dalla laguna palustre di Stagno fino all'Arno che avrebbe consentito di trasportare anche via acqua le merci giunte a Porto Pisano fino alla città marinara.

### **Tra il Duecento ed il Trecento**

Assistiamo ad un momento storico piuttosto lungo in cui la potenza pisana aveva attirato inevitabilmente le ire della Repubblica marinara di Genova, che coinvolse l'area in esame in vari atti bellici. Ciò porterà alla distruzione talvolta reiteratamente delle costruzioni erette nel tempo. L'insenatura portuale (dove attraccavano ancora numerose imbarcazioni) si insabbiò sempre di più, determinando il suo sostanziale abbandono alla fine del trecento mentre veniva potenziato lo scalo di *Liburnia* dove era stata già eretta la torre del Fanale dal 1303.

Proprio presso Livorno (borghetto allora protetto da un modesto steccato ligneo) restavano alla fonda le navi più grandi, poi parzialmente scaricate delle merci mediante barche più piccole per poter entrare nelle acque più basse del porto passando "tra le due torri".

Sul finire del Medioevo la linea di costa a monte di Livorno passava a circa tre chilometri più ad oriente rispetto a quella odierna, essendo avanzata la terraferma

di circa altrettanti chilometri rispetto all'età tardo-antica; Pisa allora distava allora dal Porto circa sette chilometri e mezzo.

Il limite settentrionale del seno del Porto si trovava ad Ovest della Località Stagno (il "Padule", ovvero laguna interna) coincidendo con la foce del Calambrone stesso dove a Nord si era formato un lungo tombolo.

### **L'epoca dell'Umanesimo**

Fin dal 1439, è documentato un interesse crescente per il Porto Pisano da parte dei Fiorentini, che pare acquistarono, nel 1421, lo specchio d'acqua poco profondo posto immediatamente a Nord del piccolo abitato di Livorno.

Al di sopra dei ruderi della Torre Rossa decisero di ricostruire una nuova torre, l'attuale Torre del Marzocco il cui progetto dovrebbe risalire agli ultimissimi anni del sesto decennio del Quattrocento (1457-1458) e la sua realizzazione si protrasse lentamente tra il 1466 ed il 1879.

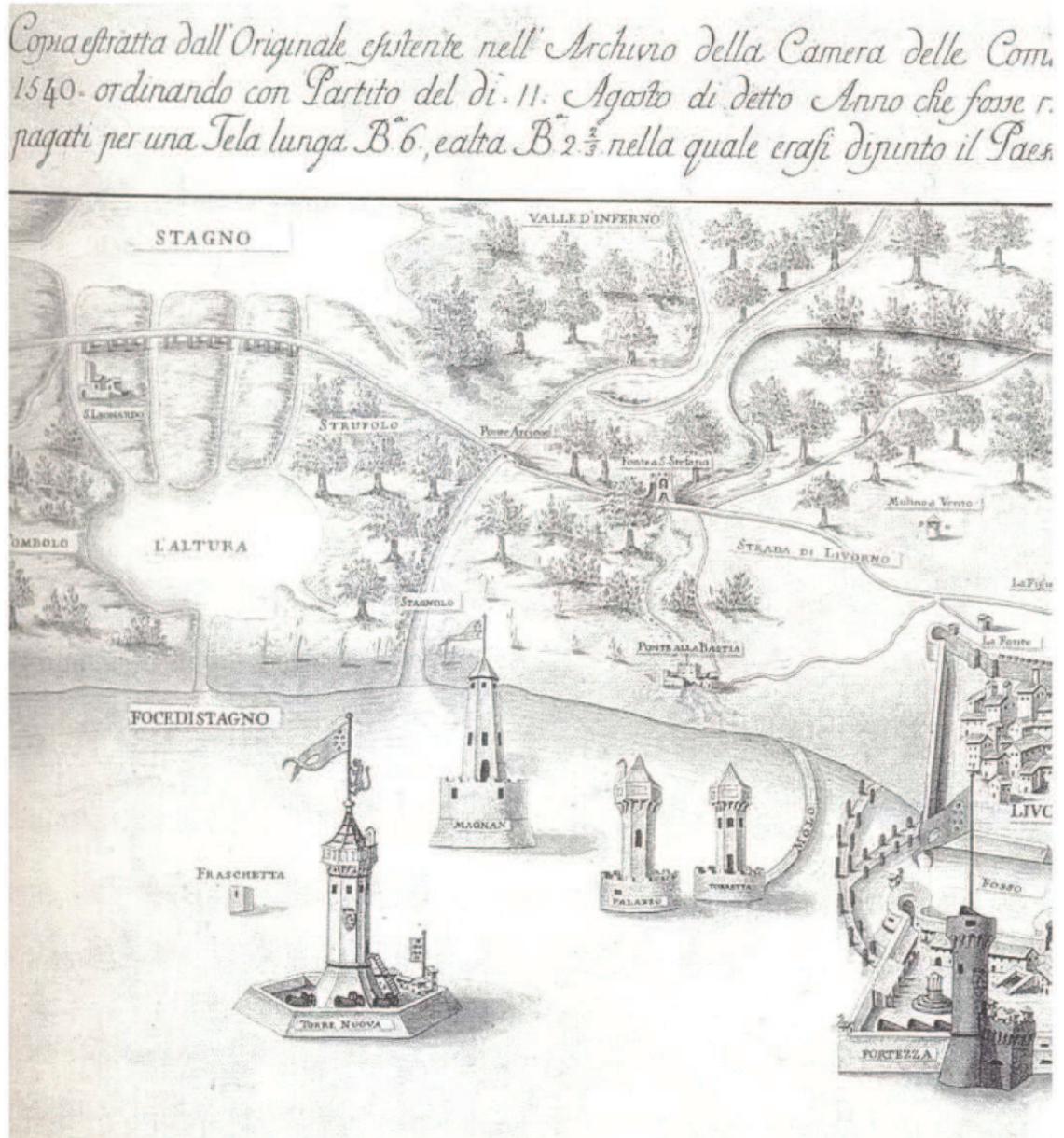
Sempre nel Quattrocento è riferibile un bassorilievo marmoreo nel quale è delineata la linea di costa definente il porto, ad iniziare dalla Gronda dei Lupi; quello che pare più reale sono la linea di costa ed una serie di tomboli in direzione di mare aperto che disegnano la superficie del porto.

### **L'epoca del Cinquecento e del Seicento**

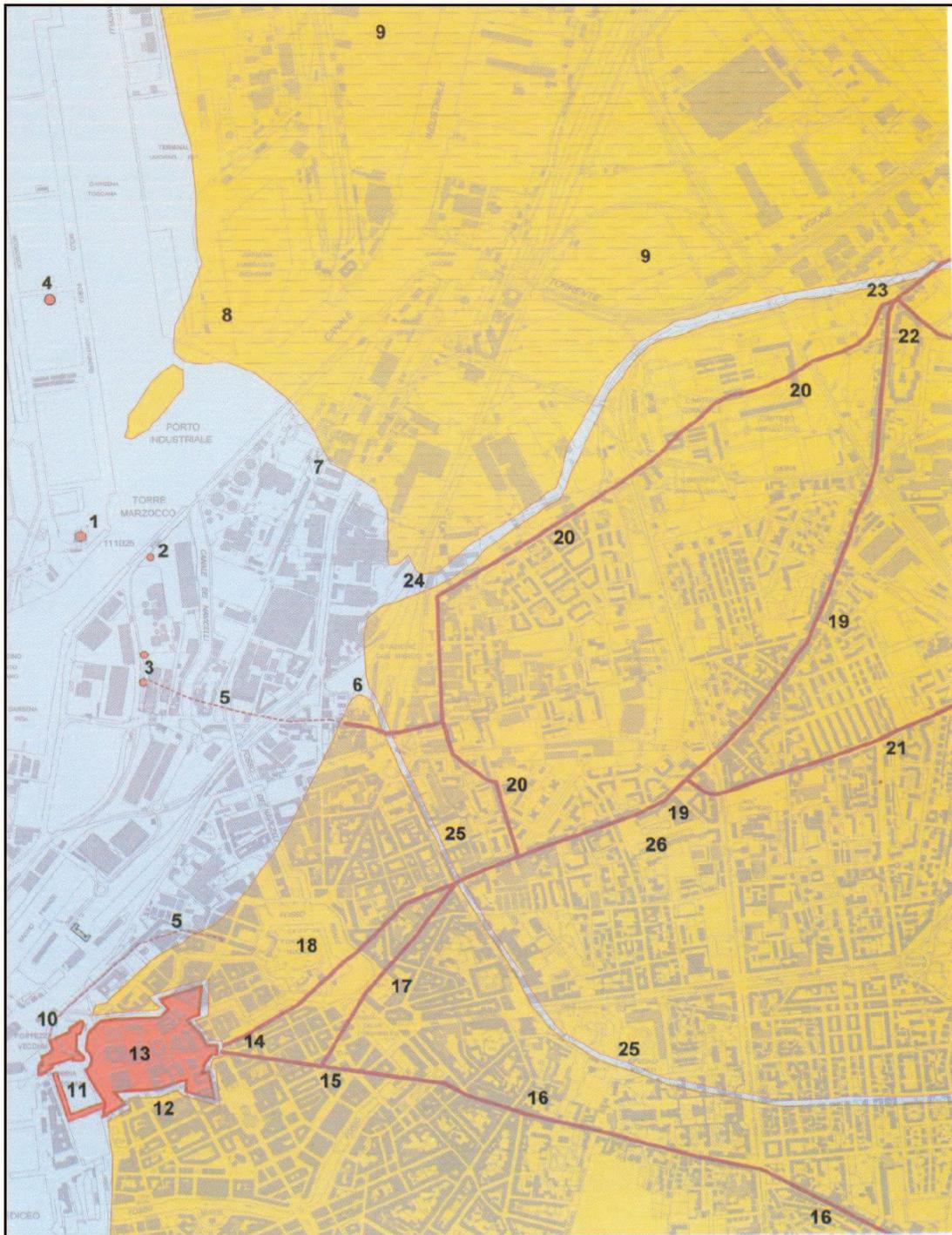
In una raffigurazione risalente intorno agli anni trenta del cinquecento – si vedano **Figg. 10 e 11-**, la Torre del Marzocco è circondata da una fortificazione a pianta esagonale; lungo la costa, in corrispondenza del vecchio Porto Pisano, si nota ancora l'ampio specchio lacustre suddiviso in due principali bacini acquitrinosi uniti da vari canali detti Lo Stagno (toponimo ancora esistente lungo l'attuale corso del Calambrone – Scolmatore d'Arno) e l'Altura. Quest'ultima, in corrispondenza dell'attuale Canale Industriale, era allora collegata al mare aperto mediante la foce o Bocche di Stagno (ubicate all'incirca nel tratto compreso tra l'attuale Canale Industriale e l'odierna Darsena Ammiraglio Inghirami).

Immediatamente a Nord dell'Altura e della vecchia foce o Bocca del Calambrone si estendevano i tomboli (da *tumulus*, duna) litoranei, mentre a Sud di essa, aldilà della vecchia foce del torrente Ugione, presso la Bocca dello Stagnolo (torrentello che originariamente, dopo aver lambito i costoni di Santo Stefano ai Lupi,

**Fig. 10** Evoluzione della costa – Stampa dei dintorni dell'area in studio anno 1540  
Fonte Bibliografica: L'Antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno" G. Trotta, 2005



**Fig. 11** Evoluzione della costa – Epoca cinquecento  
Fonte Bibliografica: L'Antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno" G. Trotta, 2005



proseguiva con percorso rettilineo verso il mare), si incontravano i Mulini della Bastia nei pressi del Fosso dei Riseccoli (che ricalcava l'attuale Via Palestro).

Nella pianta del Morozzi è ricostruita anche la linea di costa del 1694, tutte le Torri si trovano ancora in mare aperto – si veda **Fig. 12** -. Non si registrano modificazioni sostanziali fino alla fine del cinquecento, escluso il costante impaludamento del vecchio Porto Pisano e l'avanzamento inesorabile della linea di costa, parallelamente alla quale (almeno nel tratto prossimo alla città labronica) per volontà di Cosimo I, tra il 1570 ed il 1580 fu aperto il Canale dei Navicelli da Livorno a Pisa (lungo 22 chilometri), canale già previsto nel 1543, riprendendo il vecchio progetto risalente alla prima metà del Quattrocento.

Oltre che a favorire gli scambi commerciali ed il transito delle merci, il canale con le sue cateratte, doveva contribuire alla bonifica di quelle paludi prossime alla città. Alla fine del Seicento la crisi del modello urbanistico di Livorno aveva ormai condotto al suo ampliamento e ad una generale ristrutturazione delle fortificazioni poste a Nord-Ovest della città. Il Canale dei Navicelli spostato verso Est, fu incanalato il nuovo Fosso delle Chiatte collegato al canale dei Navicelli nei pressi del Rivellino di San Marco e uscente nei Portacci (ciò che rimaneva del vecchio Porto Pisano) tuttavia queste non sono le uniche opere di architettura militare e di bonifica delle paludi poste a settentrione più prossime alla città.

### **L'epoca del Settecento e dell'Ottocento**

In una veduta a volo d'uccello di Livorno eseguita nel 1708 è visibile per la prima volta in primo piano l'isola con il piccolo forte che circondava la Torre del Marzocco completata. Planimetricamente è documentato invece, nella pianta della città labronica di Alberto Carlo Seutter del 1720 e nella "Pianta della città di Livorno con le sue vicinanze e nomi dei padroni delle case di campagna" del 1740 circa una precisa descrizione delle campagne subito a Nord della città a cui seguì un dettagliato rilevamento del forte eseguito da Odoardo Warren nel 1748 – si veda **Fig. 13** -.

Interessante riferire che dall'analisi della documentazione storica all'interno della Torre del Marzocco, ancora completamente ubicata in mare, si trovavano la vecchia cisterna ed un pozzo; al piano successivo, collegato mediante il ponte levatoio, vi erano il "*pozzetto dove si prende l'acqua dalla cisterna*".

**Fig. 12** Evoluzione della costa – Epoca Seicento  
Fonte Bibliografica: L'Antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno” G. Trotta, 2005



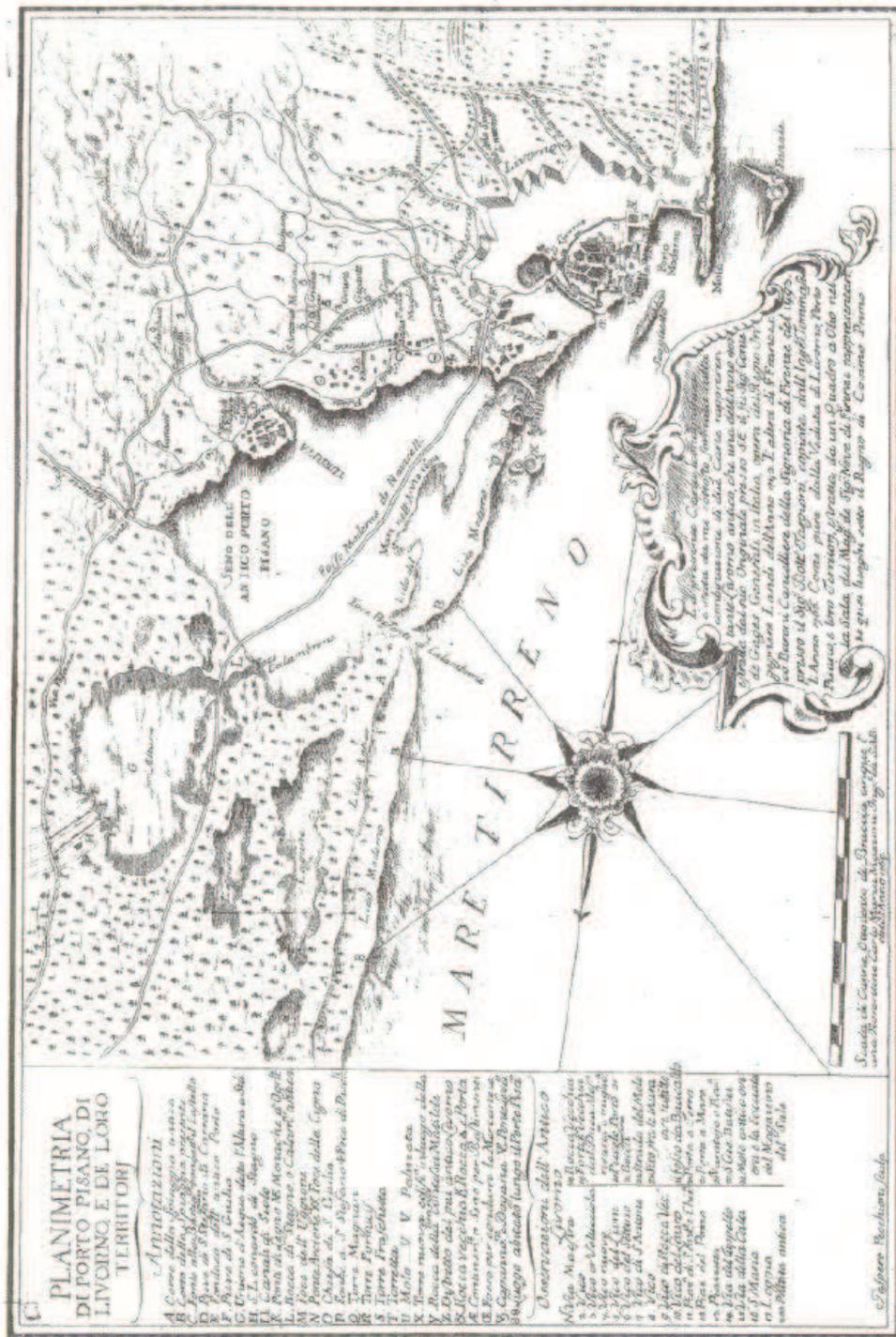


Fig. 13 Evoluzione della costa – Epoca romana  
Fonte Bibliografica: L'Antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno” G. Trotta, 2005

La Torre del Marzocco, come ci ricorda il Warren in quegli anni “*non è lontano che un colpo di fucile, il mare ritiratosi sensibilmente, non essendo gran tempo che essa era discosta un tiro di cannone*”. A partire dal terzo quarto del Cinquecento fino allora, infatti, l'avanzamento della costa era stato di circa 400 metri; da non molto tempo si era formata una stretta penisola o tombolo e la costa (riunendo alcuni precedenti isolotti), che lambiva la vecchia Torre Magnan e inglobava le Torracce.

Tale penisola creava una sorta di golfo stretto o tipo fiordo che aveva preso il nome di Portacci sin dal secolo precedente, in quanto tale specchio d'acqua, costituiva un settore del vecchio Porto Pisano, corrispondente in parte al quattrocentesco acquitrino (marazzo) dell'Altura.

Parallelamente alla costa si sviluppavano – *fra terreni bassi, sabbiosi e paludosi con alcune dune boschive, dove si aggiravano alcuni bufali al pascolo* – il Fosso delle Chiatte (passante più in prossimità della spiaggia, attraverso le località dette Monte del Bersaglio e Testaja) ed il Canale dei Navicelli – si veda **Fig. 14** -.

Quest'ultimo lambiva le località Le Torrette e Mandria: ad Ovest del nucleo della Bastia, nei pressi del Fosso dei Riseccoli; a Nord-Est dei Portacci continuava tramite il Fosso Nuovo de' Navicelli (passando per l'area parzialmente bonificata del Galachio o Galanchio ovvero Calanchio, presso la Bocca del Calambrone), mentre il torrentello dei Riseccoli proseguiva utilizzando l'alveo del Fosso vecchio dei Navicelli (attraverso la Padulella o Paduletta).

Entrambi i corsi d'acqua confluivano nel Fosso Novo del Calambrone (che era stato realizzato per bonificare l'area della foce) e coincidevano rispettivamente con l'odierna Via Leonardo Da Vinci e con una porzione del moderno Canale Industriale.

Nel 1747 il governo austriaco, con un dispaccio del 2 dicembre, decideva l'ampliamento della città di Livorno, per avere un'opportunità in relazione alle mire espansionistiche di Vienna sul Mediterraneo. Sono stati tramandati alcuni progetti, alcuni dei quali davvero grandiosi come quello del Warren e di De Baillou, quello del Trezzini e quello del Ginori.

Fu l'idea di quest'ultima figura, Governatore di Livorno e Comandante del “Litorale Toscano”: nella zona settentrionale si procedette ad ulteriori azioni di prosciugamento di alcuni tratti delle paludi. A Nord-Est si ebbero così oltre il

**Fig. 14** Evoluzione della costa – Epoca Settecento-Ottocento  
Fonte Bibliografica: L'Antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno" G. Trotta, 2005



Fosso delle Chiatte ed il Canale dei Navicelli, il prosciugamento della Paduletta (1749-1763), le importanti colmate intorno ai Riseccoli e Cigna contraddistinte da una imponente scacchiera di canali ben documentata in una pianta – si veda **Fig. 15** -.

Per effettuare le colmate il Governatore stabilì che si formasse una “Compagnia Impresaria” preposta alle bonifiche, costituita dai proprietari (una specie di consorzio). I grandi lavori vennero coordinati e seguiti in loco dal Sottoprovveditore alle Fortificazioni di Livorno, il Tenente Giovanni Masini, che nell'aprile 1751 sovrintendeva al *“travaglio che v'è facendosi a queste Torracce (del vecchio Porto Pisano) per l'escavazione delle alighe (= alghe, in realtà posidonie) putrefatte”* - si veda **Fig. 16** - .

Infatti vennero eseguiti alcuni lavori per l'escavazione (veri e propri dragaggi) delle posidonie putrefatte per il prolungamento del Fosso delle Chiatte e per il prosciugamento e la ricolmatura del terreno dello Stagnetto. Nella relativa pianta - si veda **Fig. 16** - si notano assai bene i Portacci e, tra il Fosso delle Chiatte ed il Canale de' Navicelli, i terreni acquistati con le ricolmature. Nel 1754 fu disegnata anche una pianta che riportava la porzione della Paduletta e del Padule nella quale si osserva il nuovo scolo da attribuire ai due rii Cigna e Riseccoli, affinché le loro acque vadano a cadere nella Palude detta Galanchio, passando per il Fosso abbandonato dei Navicelli e per la Fossa dell'Argine Verde.

Ad avvenuta bonifica, nel rilievo del Piano di Livorno del Morozzi pubblicato dal Targioni Tozzetti, la linea di costa passava allora a ridosso della Torre del Magnan; uno stretto canale la separava dall'isolotto delle Torracce, mentre l'isola del Marzocco era ancora sensibilmente distante in mare.

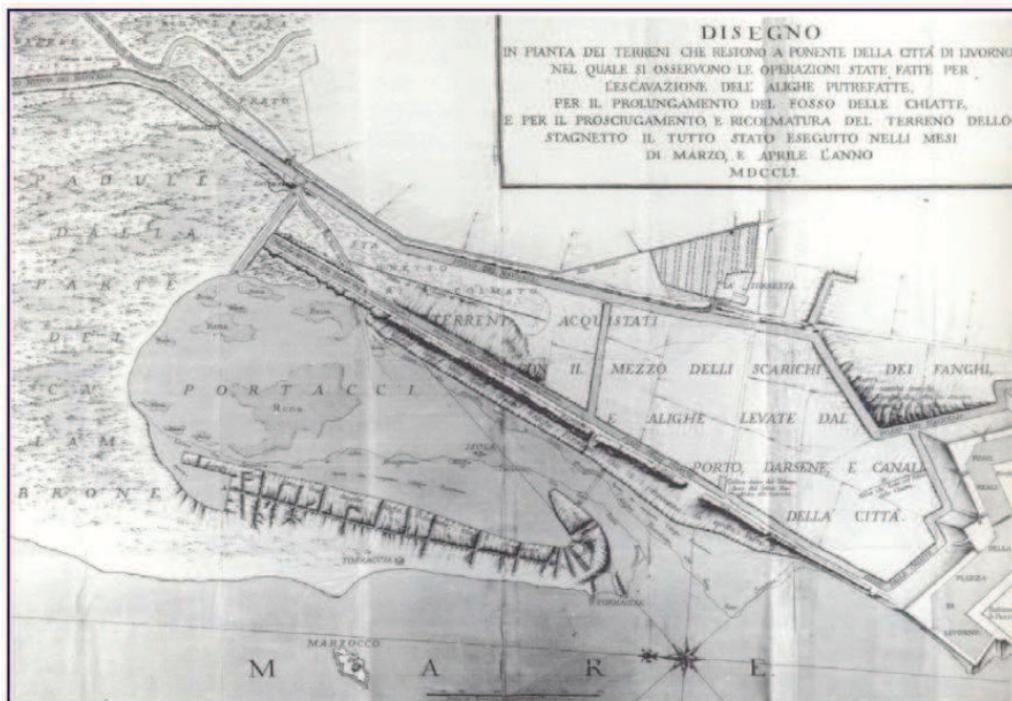
Intorno al 1802, la laguna interna dei Portacci era ridotta ad uno specchio palustre contrattosi sensibilmente rispetto alla metà del Settecento. La penisola si era avvicinata alla linea di costa cosicché l'imboccatura alla laguna era divenuto uno stretto canale, superato da un ponte in corrispondenza della strada detta del Marzocco che lambiva le Torrette e la Torre del Magnan. La Torre del Marzocco era ancora isolata nel mare, seppure a breve distanza dalla costa

Nel 1823 tutta la zona compresa tra la Strada Regia Pisana e la Via Vecchia del Porto Pisano (allora detta Via del Campo Santo Nuovo) risulta completamente bonificata (segno che le attività di colmatatura proseguirono negli anni ed in

**Fig. 15** Evoluzione della costa – Stampa 1751  
Fonte Bibliografica: L'Antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno" G. Trotta, 2005



**Fig. 16** Evoluzione della costa – Stampa 1754  
Fonte Bibliografica: L'Antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno" G. Trotta, 2005



maniera sistematica) mediante una trama fitta di canali attraversata da Sud-Ovest a Nord-Est, dalla Via detta Erbosa (attuale Via Marco Mastacchi).

Nel 1830 viene pubblicata la prima vera e propria Carta Geometrica della Toscana da parte di Giovanni Inghirami – si veda carta riprodotta in **Fig. 17** -. Dalla sua analisi si riesce a percepire con una buona precisione la linea di costa. Verso mare sono rappresentate delle quote di profondità (isobate): davanti alla Torre del Marzocco che si ritrova ancora circondata dal mare si trovano profondità comprese tra i 3,50 ed i 5,50 m.; tra la sinistra idraulica del Calambrone e la destra idraulica del Torrente Lugione (Ugione) si rintraccia una scacchiera di reticoli drenanti tipici delle azioni di bonifica dei terreni acquitrinosi (più o meno simili a quelli rappresentati nella stampa storica del 1751 in **Fig. 15**).

Intorno al 1840 – si veda **Fig. 18** - si hanno testimonianze di un processo momentaneamente inverso delle dinamiche del mare che aveva eroso nuovamente la porzione di costa corrispondente alla penisola formata nel Settecento. A Nord ed a Est, il terreno compreso tra i residui dei marazzi lungocosta, dell'Altura, dello Stagnolo ed il Fosso delle Chiatte, risultava ormai bonificato mediante un canale longitudinale (in parte ricalcato dall'odierno Canale dei Navicelli) e da una serie di sette canali trasversali (in corrispondenza dell'attuale Bacino di evoluzione del Porto Industriale e la darsena Ammiraglio Inghirami).

Nel 1849 in una veduta dal Fanale di Livorno eseguita dal Guesdon il Forte del Marzocco e la Torre risultano ormai collegati alla terraferma mediante una lingua di terra che va a saldarsi alla spiaggia in corrispondenza della Torre del Magnan. Questo sottile arenile è visibile anche in varie raffigurazioni datate 1850 e nel rilievo eseguito in periodo post unitario dal Corpo dei Bersaglieri (1867-1869). Dopo vari progetti dell'uomo, la Natura aveva realizzato da sé l'unione dell'isoletta alla terraferma. – si veda **Fig. 19** -.

La Torre del Marzocco fu muta testimone anche degli eventi più significativi che coinvolsero Livorno nelle guerre risorgimentali divenendo avamposto privilegiato per lo sbarco dei Francesi guidati da Napoleone Girolamo durante la Seconda Guerra d'Indipendenza nel maggio 1859.

Già intorno al 1866 i trasporti fluviali cominciarono a diminuire a favore dei trasporti su ferrovia, la costruzione delle Stazioni di San Marco e di quella Marittima con varie diramazioni e una serie di importanti industrie tra le quali la Metallurgica Italiana e la Cementeria Italiana, sancirono ormai definitivamente

**Fig. 17** Evoluzione della costa – Carta dell'Inghirami 1830  
Fonte Bibliografica: R. MAZZANTI, M. PASQUINUCCI,  
*L'evoluzione del litorale lunense-pisano fino alla metà del XIX secolo*, 1983



**Fig. 18** Evoluzione della costa – Epoca 1850  
Fonte Bibliografica: L'Antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno" G. Trotta, 2005



**Fig. 19** Evoluzione della costa – Stampa 1859  
Fonte Bibliografica: Rilievo eseguito dal Corpo dei Bersaglieri (1867-1869)



L'evoluzione industriale di quell'area a Nord del centro storico e fino alla Torre del Marzocco: portuale ed industriale.

Dalla nuova mappa catastale redatta negli anni 1887-1889 risulta che l'insenatura a Sud della penisola del Marzocco si era dilatata mediante un momentaneo arretramento della linea di costa, che si attestava nei pressi del perimetro della Torre del Magno.

### **L'epoca del Novecento**

In un cartoncino di variazione catastale del 1906 risulta che la costa era allora avanzata ulteriormente riducendo sensibilmente la lunghezza della penisola che collegava il Marzocco, in un ulteriore cartoncino di variazione datato 1909 la linea di costa sembra aver subito un altro sia pur modesto cambiamento, significativo se viene commisurato in soli tre anni.

L'ambiente in studio conservava ancora una sua naturalità, con attività dedicate alla pesca ed al mare, in un ovattato silenzio ed in una solitudine fatta ancora di quelle fragranze marine e mediterranee. Proprio a Nord del Marzocco furono impiantati alcuni bagni estivi su palafitte (come il bagno Olimpia o i Bagni Arenosi), sorti appunto sui depositi arenosi che si erano formati nell'ultimo mezzo secolo.

Agli inizi del Novecento, per adeguarsi alle nuove esigenze nazionali fu ipotizzato un ampliamento del Porto di Livorno e furono elaborati cinque progetti. Ci furono grandi discussioni, violenti dibattiti e la cosa naufragò nel nulla perché la Grande Guerra congelò momentaneamente qualsiasi iniziativa.

Con Decreto Luogotenenziale del 26 gennaio 1919, n. 85 fu costituito l'Ente Autonomo Porto preposto alla risistemazione ed all'ampliamento del porto sulla scia euforica della vittoria bellica – si veda **Fig. 20** -.

Con un Regio Decreto Legge n. 2395 del 22 dicembre 1927 venivano stabilite le norme per il ripristino dei porti franchi compreso Livorno. Il progetto del grande porto prevedeva la creazione di un ampio bacino (Bacino Santo Stefano) con una darsena Sud-orientale (Darsena Pisa) da realizzarsi nei pressi di un'area strappata al mare, a ridosso degli edifici ferroviari dove si trovavano le antiche Torracce, e di una seconda e più piccola darsena Nord-occidentale (Darsena Petroli), vicino ad una diga che iniziava nei pressi del Forte del Marzocco.

**Fig. 20** Evoluzione della costa – Epoca 1919  
Fonte Bibliografica: L'Antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno" G. Trotta, 2005



Da qui il nuovo canale di accesso al porto interno, scavando il terreno tra il Marzocco e i ruderi della Torre Magnan e tagliando, di conseguenza, la via del Marzocco, immetteva nel bacino di evoluzione, che veniva a spezzare la continuità del Canale dei Navicelli.

Da tale bacino si aveva accesso alla Darsena n. 1 (attuale Darsena Ammiraglio Inghirami), mentre il Canale Industriale proseguiva al di là del bacino, verso Nord-Est, secondo il canale delle Chiatte ed innestandosi nel suo percorso. Anche la vecchia Via per Collesalvetti veniva ad essere recisa in due monconi dal nuovo canale (odierne Vie Salvatore Orlando e Via Leonardo Da Vinci). Il torrentello Ugione infine, doveva essere deviato per sboccare nella piccola omonima darsena che si apriva lungo il canale.

Tutto ciò verrà realizzato entro la fine degli anni Trenta e questi lavori ingenti altereranno profondamente l'ecosistema palustre delle aree attorno al vecchio Porto Pisano, ma soprattutto snatureranno il sedimentato contesto ambientale del Forte del Marzocco che si trovò ad essere inglobato lungo la banchina Nord-occidentale del Canale Industriale – si veda **Fig. 21** -.

La situazione cartografica intorno al 1890 restituita nel 1939 – si veda **Fig. 22** – restituisce una situazione con la Torre del Marzocco ormai definitivamente posta in terraferma con la presenza del canale dei Navicelli nella posizione attuale della Darsena Toscana, mentre appare già tracciato il Canale industriale e la Darsena Inghirami .

In pochi anni di ricostruzione il Porto di Livorno diviene il maggior porto dell'Italia centrale. Nell'ottobre del 1939 il regime fascista, con una solenne ed altrettanto retorica manifestazione, inaugurava il Porto Nuovo insieme al quartiere generale della Genepesca. Lo scoppio della guerra nel 1940 fermò i lavori di completamento delle attrezzature meccaniche e l'ulteriore espansione prevista dell'area portuale verso la foce del Calambrone.

Nel 1940 nell'area portuale-industriale si trovavano numerosi stabilimenti – si veda **Fig. 23** -, ma la Seconda Guerra Mondiale porterà alla quasi totale distruzione del Porto di Livorno.

Nella comunicazione al Congresso Nazionale dei Porti in Livorno nel giugno 1950, nella memoria dal titolo “Origine e sviluppo, distruzione ricostruzione del Porto di Livorno” l'Ing. Primavera ed il Geom. Martigli riferivano in maniera lucida ed appassionata:

**Fig. 21** Evoluzione della costa – Epoca 1935  
Fonte Bibliografica: L'Antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno" G. Trotta, 2005

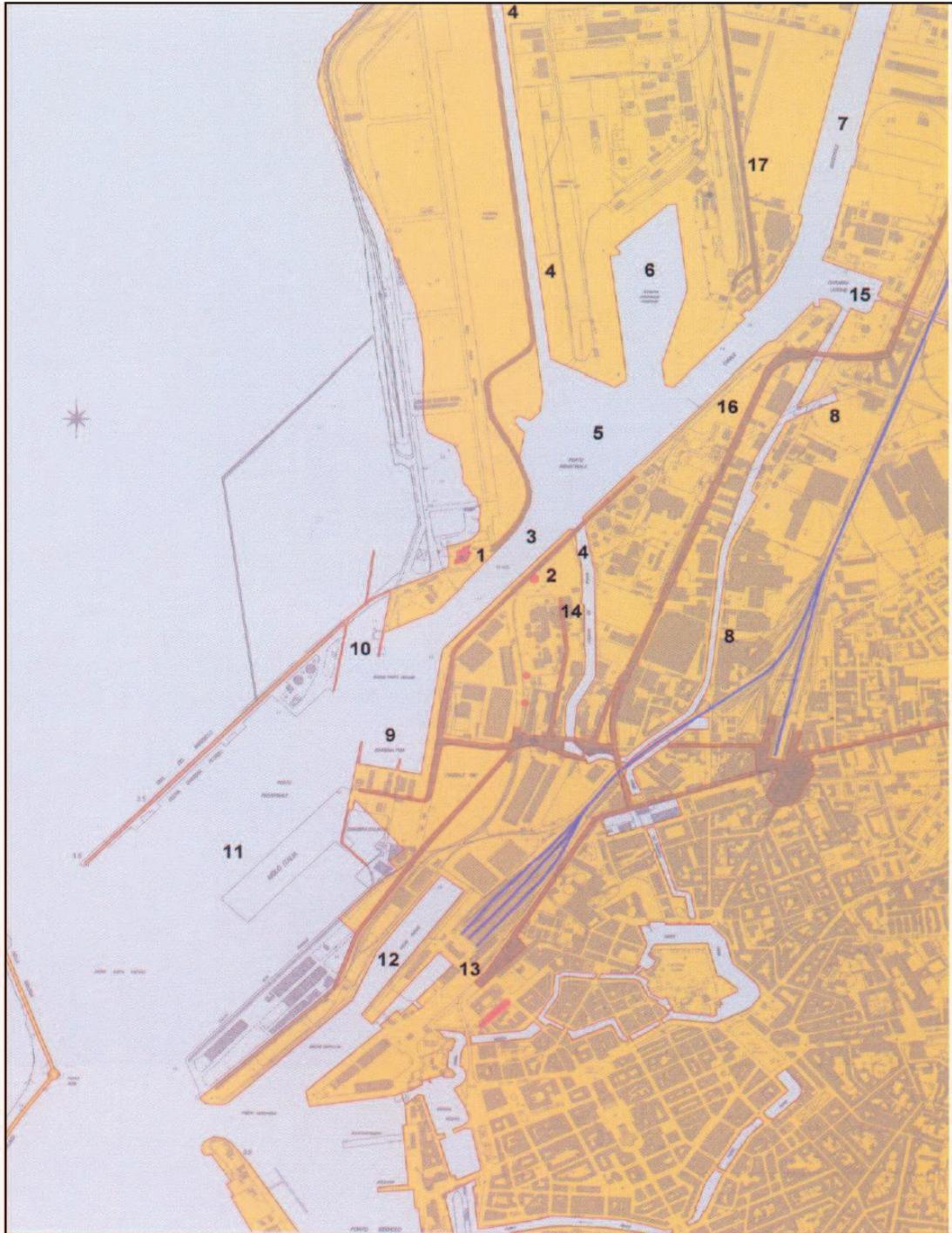
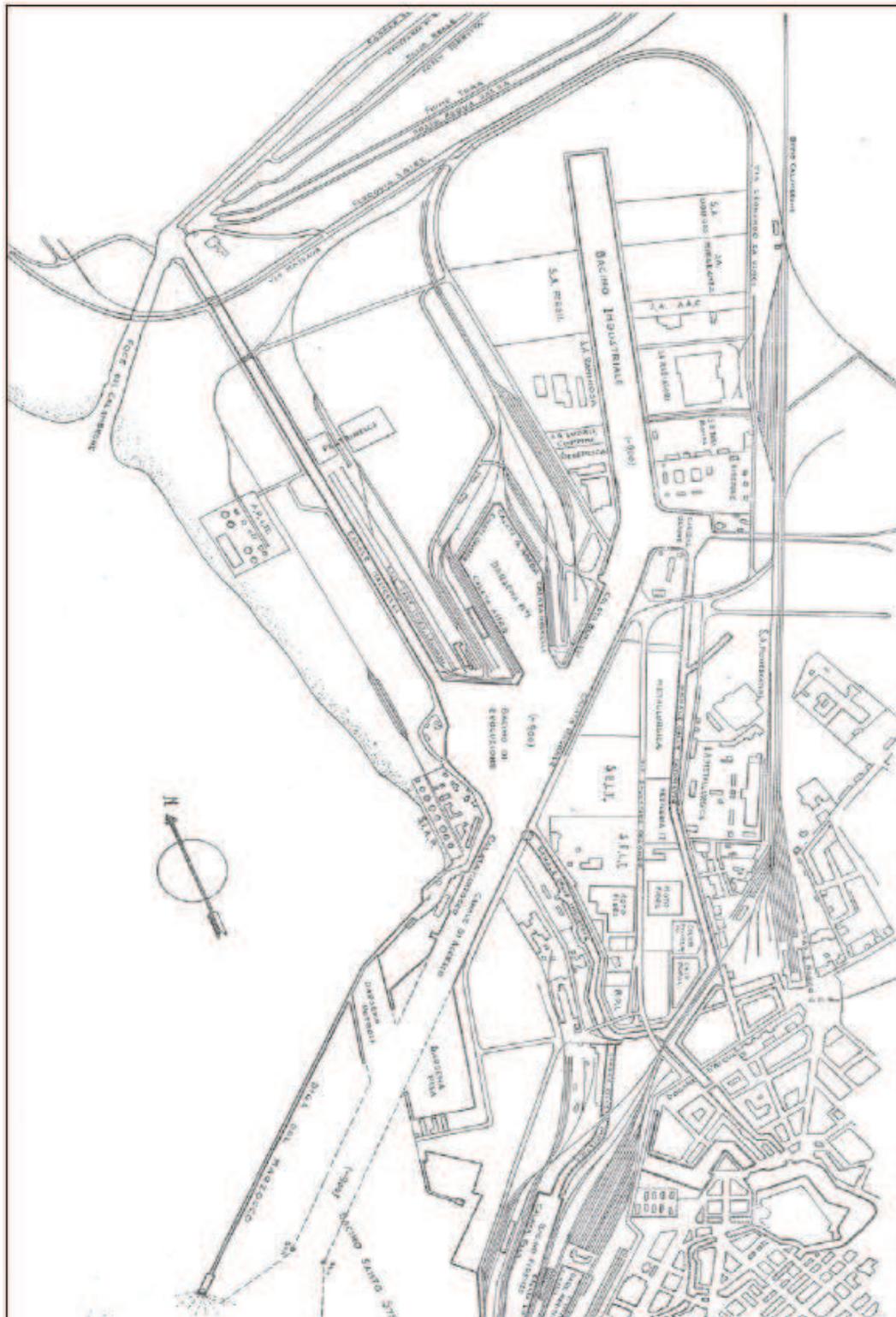


Fig. 22 Evoluzione della costa – Aerofotogrammetria anno 1939, scala 1:25.000  
Fonte Bibliografica: Tavoleta IGM LIVORNO – Studio A.Rafanelli



**Fig. 23** Evoluzione della costa – Epoca 1940  
Fonte Bibliografica: "Origine e sviluppo, distruzione e ricostruzione del Porto di Livorno", Martigli 1950



**Fig. 24** Evoluzione della costa – Epoca 1950, scala 1:25.000  
Fonte Bibliografica: Comune di Livorno – Ufficio Tutela degli Ecosistemi



*Sino al maggio 1943 nessun danno era stato inferto al Porto di Livorno. I bombardamenti aerei del 28 maggio, 28 giugno e 24 luglio 1943 provocarono alle opere portuali danni non rilevanti. Nel periodo dell'occupazione tedesca fino all'arrivo degli alleati Anglo-americani, il Porto subì numerosi bombardamenti che provocarono ulteriori danni, seppure contenuti in limiti non molto gravi.*

*Ma spetta invece alla metodica opera delle truppe tedesche di occupazione la distruzione sistematica di tutte le banchine, di tutte le apparecchiature e di tutti gli impianti portuali. Livorno purtroppo ha goduto tra i porti italiani il doloroso privilegio di una radicale e scientifica distruzione; ed infatti non un metro di banchina è stato risparmiato, non un apparecchio, non una gru, non un metro di binario, non un magazzino si è salvato dalla furia dei tedeschi.*

*I muri di sponda e grande parte delle stesse fondazioni sono state sconvolte dal brillamento di mine potenti, che hanno ridotto banchine e calate ad un cumulo di rottami precipitati spesso in profondi crateri, conferendo ai luoghi un aspetto del tutto apocalittico. E' da segnalare che la rabbia distruttrice non ha risparmiato neanche i tre porticcioli per piccole imbarcazioni da pesca e diporto di "Nazario Sauro", dell'Ardenza e di Antignano.*

Dopo la conclusione della guerra gli Alleati avevano già previsto ed eseguito solamente i lavori di riattamento in funzione al traffico bellico; solo nel 1946 il Porto fu gradualmente reso all'Amministrazione Italiana in condizioni disastrose.

Il Piano Regolatore del Porto di Livorno fu elaborato dal Genio Civile nel 1949 ed approvato il 21 gennaio 1953, da allora si sono succeduti numerosi interventi di ricostruzione e di ampliamento. In un periodo compreso tra il 1950 ed il 1955 la situazione dell'area in esame si presentava come ben rappresentato nella cartografia alla scala 1.25.000 in **Fig. 24** in cui si evidenzia, specialmente nella parte più occidentale dell'area in esame ancora una partitura da coltivo (anche specializzato con il segno della vite) con buonissime gerarchie di canali, fossi scolatori e capi-fossi alla maniera delle centuriazioni.

Solo nel 1973 fu approvata una variante al Piano concernente l'ampliamento del Canale dei Navicelli a monte del Marzocco per realizzare la Darsena Toscana. I lavori alla sponda occidentale, prossima al forte, iniziarono nel 1976, in seguito furono costruiti la strada ed i nuovi piazzali immediatamente confinanti (a Nord) con il forte stesso, cancellando così l'ultimo settore sopravvissuto della linea di costa nell'intorno del Marzocco, come si era andata configurando nel corso dell'Ottocento.

Dall'osservazione della situazione planimetrica dell'anno 1968 e del 1994 bisogna evidenziare una linea di riva 1968 che dallo Scolmatore d'Arno chiudeva alla Torre del Marzocco, in vicinanza dei moli per le gasiere; attraverso i lavori di ampliamento del Canale Industriale, si è iniziato un avanzamento della linea di riva che di fatto, facendo punto circa 500 m. più a Sud della foce dello Scolmatore d'Arno ha spostato di circa 25° verso Ovest la linea di riva precedente fino a raccordarsi con i moli delle gasiere.

Difatti in aree come questa in studio che sono state sempre oggetto di intense attività industriali ed in cui si sono succeduti nel tempo imponenti lavori per l'espansione delle aree a terra verso mare, ci sembra interessante dettagliare per quanto possibile, anche in virtù della costruzione di un modello idrogeologico, livelli che in genere nella geologia rivestono un'importanza relativa (livelli antropici), soprattutto se, come ci è stato richiesto, questo assume importanza per una caratterizzazione litostratigrafia e di permeabilità dei livelli.

Nella Cartografia Regionale Tecnica alla scala 1:25.000 del 1990 - si veda **Fig. 25** - l'area in esame appare intensamente utilizzata sia a livello industriale che portuale<sup>33</sup>.

Gli ultimi lavori che hanno interessato l'area sono la realizzazione di una vasca di contenimento dei materiali provenienti dall'escavo del bacino portuale, approvata dal Ministero nel 1999 e posta a Nord-Est della Torre del Marzocco<sup>34</sup>.

### **3.4 Cronogramma sintetico dell'evoluzione storica**

L'evoluzione delle linee di costa in ordine alle trasformazioni paleogeografiche ha un'incidenza importante per l'approfondimento geologico-tecnico, obiettivo primario del presente Studio.

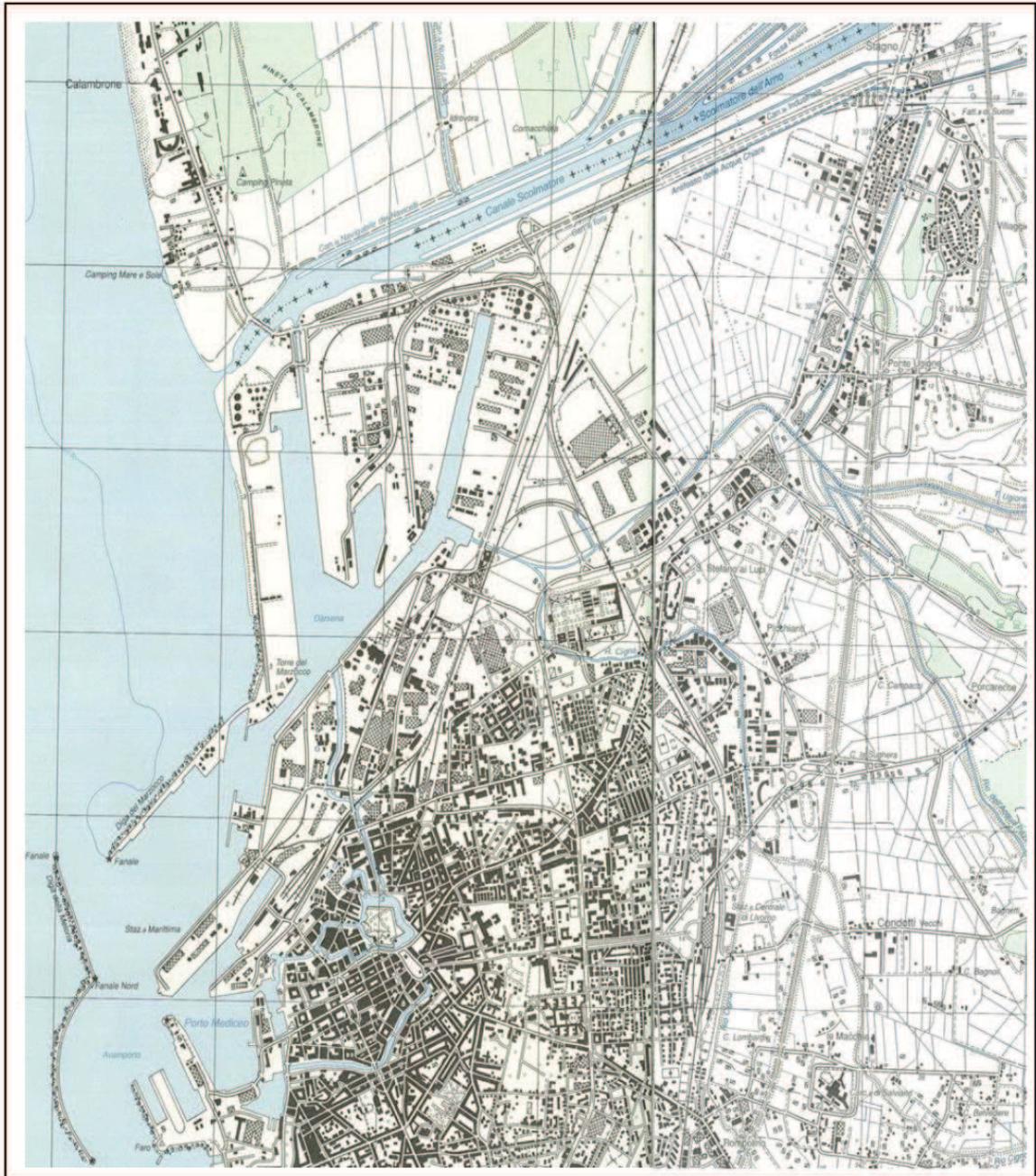
Innanzitutto la storia ci restituisce un'evoluzione rapida e recente sia sotto il profilo testimoniale degli eventi degli uomini, sia in funzione delle trasformazioni imposte dalla natura. Altro elemento di relativa certezza è che l'uomo pur avendo riconosciuto un interesse sostanziale per l'area in esame per gli sviluppi territoriali, ha cominciato ad insediare stabilmente le sue attività (industriali e portuali) solo a partire dagli anni '40 del secolo scorso.

---

<sup>33</sup> L'area occupata dalla ENI sembra ancora agricola, ma ciò è dovuto alla protezione apposta all'area per ragioni di sicurezza.

<sup>34</sup> La Vasca di colmata n. 1 ad oggi ormai in fase di completamento.

**Fig. 25** Evoluzione della costa – Epoca 1990, scala 1:25.000  
Fonte Bibliografica: Volo aerofotogrammetrico 1980, Comune di Livorno – Ufficio Tutela degli Ecosistemi



In sintesi possiamo descrivere che l'evoluzione storica dei luoghi dall'epoca protoromana ci restituisce i seguenti passaggi significativi – si veda **TAV. 5** “*Evoluzione della linea di costa negli ultimi 2000 anni*”-:.

- Verosimilmente in epoca protostorica o etrusco-romana, si riscontra la massima estensione marina. Già nel Medio Evo dovevano essersi formati dei lidi che delimitarono le lagune sfruttate come riparo dalla flotta Pisana fin dall'inizio del secolo XI° ;
- I depositi palustri sono il risultato della sedimentazione avvenuta in tempi storici all'interno dei lidi che si sono formati per gli ingenti apporti dell'Arno e che sono stati chiusi con le importanti colmate artificiali operate specialmente a partire dal 1830;
- Vi è la possibilità di ricostruire con buona approssimazione una sequenza di situazioni paleogeografiche recenti, già a partire dalla metà del secolo XVI°. Nelle varie cartografie consultate vari autori hanno tenuto conto come punti fissi le Torri del Porto Pisano e l'antico tracciato dei Navicelli che anticamente fu tagliato immediatamente all'interno del lido costiero (B. Poccetti, 1610) secondo un tracciato progettato nel 1541 (G. Guarnirei, 1967). Dunque le Torri del Porto Pisano rimasero isolate nel mare fino agli inizi del XIX° secolo;
- Intorno alla metà del XVIII° secolo il Canale dei Navicelli comincia ad essere raffigurato nelle stampe;
- La rapida formazione dei lidi nel litorale tra Pisa e Livorno è legata all'ingente quantità di sedimenti che furono sottratti alla loro naturale destinazione verso l'area dell'antico delta dell'Arno e scaricati direttamente in mare da quando la foce fu ridotta artificialmente ad una sola bocca. Non è noto con precisione quando sia avvenuto questo fatto, ma è verosimile che questi lavori destinati ad un miglioramento della salubrità dell'aria dell'agro pisano siano iniziati fin dalla remota fondazione di Pisa;
- Con la formazione di questi lidi, grandi aree furono sottratte al mare e ridotte a lagune e paduli. Si concretizzò un rapido avanzamento della linea di riva in un periodo caratterizzato invece da un lieve movimento eustatico positivo;
- Il progredire verso Ovest della linea di riva è continuato in tempi recentissimi, anche in seguito a grandi opere marittime, tanto è vero che ad esempio la spiaggia nel 1974 si trovava circa 200-250 m. verso mare rispetto alla linea di riva precedente.

Riuscire ad avere un quadro completo sull'evoluzione delle linee di costa in riferimento alle notizie ed alle testimonianze storiche ha condotto lo Studio verso

direzioni di approfondimento idrogeologico interessanti ed è per questo che in **TAV. 5** " *Evoluzione della linea di costa negli ultimi 2000 anni*" abbiamo rappresentato quello che sommariamente è stato riportato nella seguente **Tabella 2**.

**Tabella 2:** Sintesi dell'evoluzione storica dell'area portuale di Livorno

<b>Epoca</b>	<b>Situazione dell'area portuale di Livorno</b>
Romana	L'area è interamente ricoperta dal mare, il Calambrone sfocia in una specie di baia chiusa con un pennello di terraferma a Nord di Ponte Ugione, verso Sud si profila una specie di falesia non eccessivamente alta conosciuta con il termine di "Gronda dei Lupi".
Medioevale	Il limite meridionale rimane pressoché costantemente rappresentato dalla falesia della Gronda dei Lupi, verso l'attuale ENI si riscontrano più terre emerse con una profonda baia racchiusa da una lingua di terra in continuo con la Diga del Marzocco.
Duecento-Trecento	La situazione è molto simile all'epoca medioevale, verso Sud il mare è in leggero avanzamento e si trova situato fino all'attuale Fortezza Nuova. L'attuale Fortezza Vecchia è emersa.
Cinquecento	La situazione è profondamente mutata: la linea di costa si trova appena ad Est dell'attuale Darsena Toscana, il pennello di terraferma è in pratica sparito, rimane una piccola isoletta emersa all'attuale imboccatura del Porto Industriale; gran parte dell'area SIN appare emersa, l'attuale Fortezza Vecchia appare isolata dal mare, mentre l'antico bordo di falesia appare ben avanzato verso il mare. Ancora un largo specchio di mare posto tra la Torre del Marzocco e la Stazione San Marco.
Seicento	Leggero avanzamento verso la Darsena Toscana, la costa tende ad essere più diritta, sono presenti alcune piccole isolette sintomo della presenza di lande acquitrinose.
Settecento	Ulteriore modifica della linea di costa, ben avanzata verso l'attuale linea (oltre la Darsena Toscana); si riscontra una curiosa forma di barra parallela alla costa che racchiude un seno di acque basse, in questo tratto la costa si sfrangia, sintomo di giochi di correnti.
Ottocento	Rinsaldo molto netto delle terre addezzate ed interrotte dallo stretto istmo della Torre del Marzocco, medio avanzamento verso Nord.
Novecento (1919)	Modestissimo avanzamento uniforme della linea di costa con la formazione in erosione di un golfo a Nord dell'istmo della Torre del Marzocco che viene restituito al mare.
Novecento (1935)	In meno di venti anni assistiamo ad un avanzamento deciso del fronte delle terre emerse, appaiono scavati il Canale Industriale e la Darsena Inghirami, la Torre del Marzocco è ormai in terraferma.
Novecento (1950-attuale)	Le trasformazioni alla linea di costa sono dovute essenzialmente all'opera umana che tende a far avanzare le terreferme anche mediante la realizzazione di vasche di colmata.

### **3.5 Conclusioni agli studi storici correlate alle informazioni stratigrafiche**

La parte evolutiva storica del paesaggio negli ultimi 2000 anni rende possibile una serie di interessanti conclusioni che possiamo di seguito sintetizzare:

- a. All'esterno dell'area in studio, circa 2000 anni fa si trovava una sicura terraferma costituita dalla Piana di Livorno e quindi dal Terrazzo più recente il cui bordo settentrionale ed occidentale determinava con buon grado di approssimazione il limite della costa. Questa linea morbida e sinuosa era in realtà una fascia, un'area costituita da una sommità ed un piede che si è trovato storicamente più o meno sommerso. Questo bordo, noto in letteratura come "Gronda dei Lupi" è un segno importante poiché, almeno negli ultimi 2000 anni, rimane un elemento che muta le sue forme solo per l'incisione incessante che i corsi d'acqua provenienti dall'entroterra livornese continuano ad operare con alterne fasi di intensità. Questo limite, al di sopra del quale la città si svilupperà ampiamente, rappresenta, come meglio vedremo in seguito, una netta separazione tra l'impalcato costituito da cicli esclusivamente naturali regressivo-trasgressivi che hanno formato il Terrazzo di Livorno e la "produzione" di terreferme più moderne e governate spesso dall'azione dell'uomo.
- b. Nella massima espressione marina recente, come abbiamo già detto l'area si trovava quasi del tutto sommersa: se verso meridione la Gronda era piuttosto netta ed aveva una forma di media falesia, verso occidente il bordo del Terrazzo era piuttosto basso. Sotto il profilo storico, il tratto di litorale in esame viene frequentemente interessato da spiaggiamento di grandi quantità di *alghe*<sup>35</sup>, una testimonianza importante che permette di stabilire la presenza di abbondanti praterie di *Posidonia oceanica* prospicienti il sito e comunque un importante gioco di correnti in grado di ridistribuire e classare il materiale in trasporto gravitanti nel nostro tratto di costa significativo.
- c. Considerato che la base dell'Orizzonte 1<sup>36</sup> rappresenta, con le dovute approssimazioni, il fondo del mare in evoluzione recente, è interessante constatare che nel momento di "massima acqua" nell'area (Epoca Romana) sull'attuale linea di costa doveva trovarsi una colonna d'acqua di oltre 10,00 m. come è possibile rilevare nelle Sezioni lito-stratigrafiche proposte.
- d. Dall'epoca Romana, l'area di studio si è andata progressivamente interrando avanzando quindi verso il mare. Questa conquista è continuata fino a giungere alla conformazione geomorfologica attuale con una combinazione di varie azioni:
- ♦ Una di tipo naturale dovuta al trasporto e deposizione di materiali provenienti dai corsi d'acqua (Arno ed altri fiumi e torrenti minori) attraverso le correnti longitudinali di costa e quindi al drift litoraneo che

---

<sup>35</sup> In realtà si tratta di fanerogame ed in particolare di *Posidonia oceanica*.

<sup>36</sup> Si veda paragrafo dedicato nella parte geologica e stratigrafica del presente lavoro.

ha ridistribuito i vari materiali assortiti organizzando l'avanzamento in barre parallele alla linea di costa del momento e creando i presupposti di imprigionamenti di acque saline che poi via via sono divenute salmastre e si sono dolcificate per l'apporto di acque dalle colline retrostanti;

- ◆ Una di tipo antropico dovuta alle varie azioni di bonifica per recuperare terreferme da coltivo o da pascolo palustre.

Il naturale avanzamento, anche se con qualche episodio di stasi, si è manifestato soprattutto dall'Epoca Romana fino al tardo Trecento, mentre l'azione di bonifica tentata dall'uomo ha cominciato ad essere importante dal Quattrocento fino all'Ottocento.

e. Le azioni di bonifica riconosciute storicamente possono essere sintetizzate nelle seguenti modalità:

- ◆ Rettifiche, deviazioni e anastomizzazioni di corsi d'acqua per poterli far sfociare in aree umide (marazzi, paludi, acquitrini) per favorire il deposito di materiali trasportati in un ambiente semi-protetto e far alzare il livello dei fondali (già comunque piuttosto bassi);
- ◆ Realizzazione di vere e proprie scacchiere di canali per drenare le acque di zone palustri anche mediante combinazione di effetti. In tempi più recenti sono stati utilizzati anche sistemi meccanici per sollevare ed eliminare le acque ferme (Idrovore, Stazioni di pompaggio);
- ◆ Specialmente nel corso del Settecento si ricorre anche alla bonifica delle aree palustri mediante colmatazione con le fanerogame che interrano le bocche del Porto, sono quindi previsti dei veri e propri dragaggi al di sotto del livello del mare ed all'interno delle aree più protette con il trasferimento di questi materiali in aree da riempire.

## CAPITOLO 4

### CARATTERI GEOTECNICI DEGLI SPESSORI

Nel giugno 2008 è stato presentato il progetto per la realizzazione della seconda Vasca di contenimento per sedimenti di dragaggio del Porto di Livorno posta in continuo subito a Nord della precedente già in fase di completamento. Oltre ad essere stata eseguita una campagna di indagini indiretta, è stata anche predisposta una campagna geognostica diretta con un consistente numero di analisi geotecniche che ci consentono di definire un quadro aggiornato dei principali caratteri geotecnici dei terreni.

Sulla base delle prove eseguite durante la campagna (2001) a supporto della realizzazione della Vasca di colmata n. 1 e durante la recente campagna (2008) a supporto della Vasca di colmata n. 2 sono state elaborate le **Tablelle 3 e 4** che raccolgono e classificano tutti i dati significativi.

Dall'analisi di questi primi risultati esposti è possibile fare le seguenti considerazioni:

- ◆ Le sabbie grigio-verdi (Orizzonte 1) sono dotate di un  $D_r$  medio intorno al valore 0.4 ed un angolo di attrito  $\omega$  intorno ai  $35^\circ$  - spessore mediamente sciolto -. Si riscontra un NSPT medio intorno a 13; nei primi metri di spessore (entro i 5,00 m. di profondità) i valori di infissione ai 30 cm. solo in tre casi superano i 10 colpi, mentre alle maggiori profondità (da -5,00 a -9,00 m.) si rileva un aumento di colpi fino a 22.
- ◆ Gli ammassi di fanerogame (Orizzonte 1) sono spesso dotate di un  $D_r$  ' 0.2 anche se in media si rintracciano valori compresi tra 0.2 e 0.4 con un  $\omega$  ' ai  $30^\circ$  - spessore che può essere classificato come molle -. Il valore di NSPT mediamente è intorno a 6. Fino ai 6,00 m. di profondità il valore di infissione ai 30 cm. è davvero scadente (presenza di tre valori = 0); a profondità maggiori il valore pare migliorare anche se si riscontrano due valori di 4 a -8,00 e -9,00 m..
- ◆ Gli spessori di sabbie limose con fanerogame (Orizzonte 1) sono dotate di un  $D_r$  medio intorno al valore 0.4 ed un angolo di attrito  $\omega$  intorno ai  $30^\circ$ - $35^\circ$  - spessore mediamente sciolto -. Si riscontra un più elevato valore di colpi di infissione ai 30 cm. rispetto agli spessori con prevalenza di fanerogame anche se in media non si supera il valore di 12. Interessante constatare che il valore di colpi di infissione qui tende a decrescere con l'aumento della profondità.

**Tabella 3** : Dati generali dei campioni avviati ad analisi.

Sondaggio e Campione SuCn	Profondità Campione (m)	Descrizione Litotipo	Orizzonte Litologico di riferimento	Laboratorio terre
S1C1	12,00	Sabbia fine debolmente argillosa, grigia, con inclusi ghiaiosi. Presenza di gusci di molluschi e alghe	Orizzonte 1	ELLE TI (Firenze)
S1C2	21,00	Argilla limosa grigio piombo con inclusi torbosi	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S1C3	42,50	Sabbia fine limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S3C1	15,00	Sabbia limosa grigio-verde	Orizzonte 1	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S3C2	18,00	Sabbia limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S4C1	9,00	Limo argilloso grigio. Presenza di alghe	Orizzonte 1	ELLE TI (Firenze)
S4C2	15,00	Limo argilloso grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S4C3	21,00	Argilla limosa grigia piombo con inclusi torbosi	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S4C4	43,00	Sabbia limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S5C1	9,00	Limo argilloso grigio	Orizzonte 1	ELLE TI (Firenze)
S5C2	15,00	Limo argilloso grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S5C3	24,00	Argilla limosa grigio piombo con inclusi torbosi	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S5C4	43,00	Sabbia limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S6C1	12,00	Limo argilloso grigio	Orizzonte 1	ELLE TI (Firenze)
S6C2	15,00	Ghiaia in matrice sabbio-limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S6C3	24,00	Argilla limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S7C1	10,50	Limo argilloso grigio	Orizzonte 1	ELLE TI (Firenze)
S7C2	15,00	Sabbia limosa grigio scura con inclusi torbosi	Orizzonte 1	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S7C3	27,00	Argilla limosa grigio piombo	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S8C1	6,00	Sabbia limosa grigio-verde	Orizzonte 1	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)
S8C2	12,00	Limo argilloso grigio	Orizzonte 1	ELLE TI (Firenze)
S8C3	15,00	Limo sabbioso grigio piombo con inclusi torbosi	Orizzonte 3	ICHNOGEO (S.Miniato -Pisa)

**Tabella 4** : NSPT, Infissione 30 cm., Nspmedio, Dr,  $\phi$   
 $S_n1$  = Sondaggi eseguiti per vasca di contenimento già realizzata (2001)  
 $S1$  = Sondaggi eseguiti per vasca di contenimento in progetto (2008)

Litotipo indagato	Profondità	N. S.P.T.	Infissione 30 cm	Dr	$\phi$	Riferimento Sondaggio
ORIZZONTE ZERO Massciata scogliera	-5.50 m	4/7/12	19	--	--	$S_n$ 1
ORIZZONTE ZERO Riempimento darsena	-3.00 m	-/8/14	22	--	--	$S_n$ 5
	-3.50 m	5/5/5	10	--	--	$S_n$ 8
	-5.00 m	3/3/4	7	--	--	$S_n$ 13
	-5.00 m	10/13/6	19	--	--	$S_n$ 9
ORIZZONTE 1 Sabbie grigio verdi	-1.50 m	4/4/5	9	0.2-0.4	30°-35°	$S_n$ 20
	-2.00 m	1/4/10	14	0.4-0.6	35°-40°	$S_n$ 19
	-3.00 m	1/2/4	6	0.15-0.35	30-32°	S5
	-3.50 m	5/8/9	17	0.4-0.6	35°-40°	$S_n$ 6
	-4.00 m	4/4/4	8	0.2-0.4	30°-35°	$S_n$ 3
	-4.50 m	7/5/0	5	0.2-0.4	30°-35°	$S_n$ 15
	-4.50 m	7/10/8	18	0.35-0.65	32-35°	S7
	-4.50 m	2/3/5	8	0.2-0.4	30°-35°	$S_n$ 21
	-5.00 m	10/4/6	10	0.2-0.4	30°-35°	$S_n$ 7
	-5.50 m	5/7/10	17	0.4-0.6	35°-40°	$S_n$ 12
	-6.00 m	7/7/8	15	0.35-0.65	32-35°	S4
	-6.00 m	2/1/4	5	0.15-0.35	30-32°	S5
	-6.00 m	4/7/9	16	0.35-0.65	32-35°	S6
	-7.00 m	5/7/8	15	0.4-0.6	35°-40°	$S_n$ 5
	-7.50 m	2/4/7	11	0.4-0.6	35°-40°	$S_n$ 15
-7.50 m	6/6/12	18	0.35-0.65	32-35°	S7	
-9.00 m	4/10/12	22	0.35-0.65	32-35°	S3	
ORIZZONTE 1 Prevalenza di Fanerogame	-1.50 m	0/2/1	3	< 0.2	< 30°	$S_n$ 22
	-3.00 m	3/3/2	5	0.2-0.4	30°-35°	$S_n$ 21
	-3.00 m	0/0/0	0	< 0.2	< 30°	$S_n$ 17
	-3.00 m	0/1/2	3	< 0.2	< 30°	$S_n$ 20
	-3.00 m	2/3/2	5	0.2-0.4	30°-35°	$S_n$ 18
	-4.20 m	0/0/0	0	< 0.2	< 30°	$S_n$ 14
	-4.50 m	0/1/0.5	1.5	< 0.2	< 30°	$S_n$ 6
	-4.50 m	4/5/6	11	0.4-0.6	35°-40°	$S_n$ 17
	-4.50 m	1/2/2	4	0.2-0.4	30°-35°	$S_n$ 22
	-6.00 m	0/0/0	0	< 0.2	< 30°	$S_n$ 19
	-6.00 m	3/3/3	6	0.2-0.4	30°-35°	$S_n$ 6
	-6.20 m	3/3/5	8	0.2-0.4	30°-35°	$S_n$ 14
	-6.50 m	2/4/7	11	0.4-0.6	35°-40°	$S_n$ 2
	-7.40 m	0/1/2	3	< 0.2	< 30°	$S_n$ 3
	-7.50 m	4/6/9	15	0.4-0.6	35°-40°	$S_n$ 7
	-7.50 m	2/3/4	7	0.2-0.4	30°-35°	$S_n$ 9
	-7.50 m	5/7/7	14	0.4-0.6	35°-40°	$S_n$ 17
	-8.00 m	3/2/2	4	0.2-0.4	30°-35°	$S_n$ 1
-9.00 m	1/2/2	4	0.2-0.4	30°-35°	$S_n$ 5	
-12.00 m	7/9/12	21	0.4-0.6	35°-40°	$S_n$ 4	
ORIZZONTE 1 Sabbie limose con fanerogame	-4.00 m	11/15/14	29	0.35-0.65	32-35°	S8
	-12.00 m	4/8/8	16	0.35-0.65	32-35°	S2
	-12.00 m	3/4/5	9	0.15-0.35	30-32°	S3
	-12.00 m	3/4/5	9	0.15-0.35	30-32°	S4

ORIZZONTE 2 Sabbie marroni ocra	-5.00 m	8/12/24	36	0.6-0.8	40°-45°	S <sub>n</sub> 18
	-6.00 m	4/4/5	9	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 16
	-7.50 m	3/1/6	7	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 16
	-7.50 m	7/9/15	24	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 22
	-8.50 m	20/14/20	34	0.6-0.8	40°-45°	S <sub>n</sub> 18
	-8.50 m	11/9/8	17	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 8
	-9.00 m	4/7/12	19	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 9
	-9.00 m	13/14/18	32	0.6-0.8	40°-45°	S <sub>n</sub> 20
	-9.80 m	4/5/6	11	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 14
	-11.00 m	11/11/RIF	--	--	--	S <sub>n</sub> 1
	-12.00 m	9/12/14	26	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 1
	-13.50 m	23/12/13	25	0.35-0.65	32-35°	S1
ORIZZONTE 2 Ghiaie grigio piombo	-15.50 m	11/49/29	78	0.85-1	>38°	S6
	-16.50 m	9/16/16	32	0.35-0.65	35-38°	S3
	-17.50 m	39/49/46	95	0.85-1	>38°	S1
	-18.00 m	13/33/33	66	0.85-1	>38°	S7
	-22.50 m	16/26/32	58	0.85-1	>38°	S2
	-24.00 m	20/36/41	77	0.85-1	>38°	S2
	-25.50 m	44/50/Rif	> 100	0.85-1	>38°	S1
ORIZZONTE 3 Sabbie/limi argillosi grigio piombo	-7.50 m	9/12/15	27	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 21
	-9.00 m	1/2/2	4	0.15-0.35	30-32°	S8
	-9.50 m	6/23/24	47	0.6-0.8	40°-45°	S <sub>n</sub> 19
	-9.80 m	5/7/9	16	0.4-0.6	35°-40°	S <sub>n</sub> 15
	-10.50 m	4/5/5	10	0.2-0.4	30°-35°	S <sub>n</sub> 16
	-16.50 m	9/16/16	32	0.65-0.85	35-38°	S4
	-18.00 m	4/6/6	12	0.35-0.65	32-35°	S2
	-18.00 m	10/12/14	26	0.35-0.65	32-35°	S8
	-19.50 m	7/6/11	17	0.35-0.65	32-35°	S5
-21.00 m	4/5/8	13	0.35-0.65	32-35°	S6	
ORIZZONTE 4 Sabbie con ghiaia marroni grigie	-28.50 m	4/4/4	8	0.15-0.35	30-32°	S4

- ◆ Le sabbie ocre (Orizzonte 2) sono dotate di un Dr intorno agli 0.6 con un  $\omega$  intorno ai 40° - spessore mediamente compatto-. Si riscontra un NSPT medio intorno a 22 con un aumento di colpi alle maggiori profondità.
- ◆ Le ghiaie grigio piombo (Orizzonte 2) sono dotate di un Dr intorno agli 0.85 con un  $\omega$  maggiore di 38° - spessore mediamente compatto -. Si riscontrano valori di infissione ai 30 cm. molto buoni in media intorno ai 72-75 colpi.
- ◆ Le sabbie grigie e limi argillosi (Orizzonte 3) sono dotate Dr medio intorno al valore 0.4 ed un angolo di attrito  $\omega$  intorno ai 35° - spessore mediamente sciolto -. Buoni i valori di infissione ai 30 cm. in media intorno ai 20 colpi.
- ◆ Per le sabbie con ghiaie marroni grigie (Orizzonte 4), visto la sporadica presenza in un solo sondaggio e ad una profondità considerevole abbiamo un solo valore che orienta verso un Dr tra i 0,15 ed i 0,35 con un  $\omega$  intorno ai 30-32° ed un valore di 8 colpi per infissione ai 30 cm.

Da quanto sinteticamente esposto si sottolinea la presenza dell'Orizzonte 1 che per sua natura litologica, risulta estremamente compressibile (specialmente negli spessori a prevalente scheletro organico). Sotto il profilo geotecnico è quindi prevedibile un cedimento di una certa rilevanza in virtù degli spessori dello strato ed in funzione dei carichi e della loro tipologia.

Inoltre bisogna evidenziare che la diversità delle sequenze stratigrafiche dello strato, delle diverse composizioni granulometriche e dello spessore poggiate su un orizzonte tendenzialmente più compatto (sabbia ocre con assetti lenticolari di panchina pseudo-diagenizzati) può creare i presupposti di cedimento differenziale dovuto alla diversa risposta dello strato in termini di compressibilità.

### **Grandezze fisiche calcolate dagli esiti analisi routine**

Dai vari dati in ingresso pervenuti dalle analisi di laboratorio ed in particolare da: Contenuto di acqua (%), Peso in Volume (KN/mc) e Peso specifico dei granuli, secondo le formule riconosciute dall'AGI sono state ricavate – si veda **Tabella 5**:

Indice dei vuoti (e)

Porosità (n)

Grado di saturazione (%)

Densità secca (KN/mc)

**Tabella 5** : Grandezze fisiche calcolate

Dati in ingresso: Contenuto di acqua (%), Peso di Volume (KN/mc), Peso specifico dei granuli

Sondaggio e Campione SnCn	Profondità Campione (m)	Descrizione Litotipo	Indice dei vuoti (e)	Porosità (n)	Grado di saturazione (%)	Densità secca (KN/m <sup>3</sup> )
S1C1	12.00	Sabbia fine debolmente argillosa, grigia, con inclusi ghiaiosi. Presenza di gusci di molluschi e alghe	0,910	0,476	100	13,7
S1C2	21.00	Argilla limosa grigio piombo con inclusi torbosi	1,174	0,540	97,6	12,00
S1C3	42.50	Sabbia fine limosa grigio piombo	-	-	-	-
S3C1	15.00	Sabbia limosa grigio-verde	0,834	0,455	99,8	14,00
S3C2	18.00	Sabbia limosa grigio piombo	0,845	0,458	96,9	14,1
S4C1	9.00	Limo argilloso grigio. Presenza di alghe	0,871	0,466	100	14,1
S4C2	15.00	Limo argilloso grigio piombo	1,057	0,514	100	13,1
S4C3	21.00	Argilla limosa grigia piombo con inclusi torbosi	1,564	0,61	99,5	10,4
S4C4	43.00	Sabbia limosa grigio piombo	-	-	-	-
S5C1	9.00	Limo argilloso grigio	0,967	0,492	97,3	13,6
S5C2	15.00	Limo argilloso grigio piombo	0,923	0,480	100	13,96
S5C3	24.00	Argilla limosa grigio piombo con inclusi torbosi	1,469	0,595	100	10,86
S5C4	43.00	Sabbia limosa grigio piombo	-	-	-	-
S6C1	12.00	Limo argilloso grigio	0,949	0,487	93,8	13,7
S6C2	15.00	Ghiaia in matrice sabbio-limosa grigio piombo	-	-	-	-
S6C3	24.00	Argilla limosa grigio piombo	1,137	0,532	100	12,6
S7C1	10.50	Limo argilloso grigio	0,883	0,469	98,2	14,1
S7C2	15.00	Sabbia limosa grigio scura con inclusi torbosi	1,638	0,621	92,3	9,4
S7C3	27.00	Argilla limosa grigio piombo	0,852	0,46	100	14,6
S8C1	6.00	Sabbia limosa grigio-verde	0,855	0,461	99,3	14,4
S8C2	12.00	Limo argilloso grigio	1,005	0,501	100	13,3
S8C3	15.00	Limo sabbioso grigio piombo con inclusi torbosi	1,02	0,505	94,8	12,5

### **Analisi granulometriche**

I dati sono stati sistematizzati in **Tabella 6**; qui di seguito vengono sintetizzati i risultati per ciascuno Orizzonte litologico:

#### ORIZZONTE ZERO

Lo spessore di riempimento della darsena, laddove compare risulta eterogeneo con elevata componente sabbiosa e ghiaiosa, ma anche con percentuali di limo.

#### ORIZZONTE 1

Nello spessore con prevalenza di organico si rintracciano maggiori percentuali di sabbia e ghiaia, che mettono in evidenza un ambiente deposizionale in vicinanza di linee di riva ancora attive. In generale andando verso il basso (oltre i 7,00 m. di profondità) lo spessore con prevalenza di scheletro organico si intercala sempre più ad impasti sabbio-limosi, evidenza di un ambiente deposizionale in allontanamento dalla linea di riva (near-shore)<sup>37</sup>. Il marker stratigrafico dello spessore composto dalle sabbie grigio-verdi rimane più o meno uniforme in ogni livello di profondità con elevate percentuali di sabbia e limi

#### ORIZZONTE 2

Le sabbie ocracee si presentano in realtà composte granulometricamente da un 75% di ghiaia e sabbia e per il 25% di limo ed argilla. La presenza di campioni con significativa percentuale di ghiaia costituisce un'evidenza sul fatto che questo spessore è definito dallo sgretolamento di livelli di Panchina. Le ghiaie che si intercalano alle sabbie ocracee risultano non completamente "pulite", ma impastate in matrici sabbio-limose

#### ORIZZONTE 3

Gli spessori sabbioso fini non contengono scheletro ghiaioso, mentre si rintracciano percentuali significative di limo. Gli spessori limo-argillosi sono ovviamente composti di elevate percentuali di limo ed argilla, con percentuali di limo doppie di quelle delle argille.

---

<sup>37</sup> Le percentuali granulometriche di limo-argilla maggiori si riscontrano tra le fanerogame, ciò rientra nella natura generale della lito-genesi dello spessore con un impasto di materiale organico dovuto al succedersi dei moti ondosi. Con ogni probabilità in fase di stasi e forse più a largo, come parrebbe desumersi dalle analisi, vi era la possibilità maggiore di deposizione oltre che della componente organica di frazioni litologiche più piccole, mentre più vicino alla costa in posizione di risentimento dei moti ondosi poteva mescolarsi all'organico una frazione più grossolana composta da sabbia e ghiaia.

**Tabella 6:** Analisi granulometriche

Legenda: S<sub>n</sub>1 = Sondaggi eseguiti per vasca di contenimento già realizzata (2001)  
S1 = Sondaggi eseguiti per vasca di contenimento in progetto (2008)

Orizzonte litologico	Sondaggio	Profondità campione (m.)	GHIAIA %	SABBIA%	LIMO %	ARGILLA%
Riempimento darsena (ORIZZONTE ZERO)	S <sub>n</sub> 8	3.50	12,57	52,43	28,87	6,13
	S <sub>n</sub> 9	5.00	71,31		28,69	
Spessori con prevalenza di organico (ORIZZONTE 1)	S <sub>n</sub> 20	3.50	82,19		17,81	
	S <sub>n</sub> 8	5.00	75,59		24,41	
	S <sub>n</sub> 14	5.50	85,15		14,85	
	S <sub>n</sub> 6	6.50	5,62	55,38	38,57	0,43
	S <sub>n</sub> 19	6.50	67,68		32,32	
Limo argilloso con fanerogame (ORIZZONTE 1)	S <sub>n</sub> 7	7.50	0,24	17,76	58,70	23,30
	S <sub>n</sub> 9	7.50	6,18	45,82	36,87	11,13
	S <sub>n</sub> 4	10.00	3,63	48,37	39,79	8,21
	S7	10.50	0,00	5,00	63,00	32,00
Sabbie grigio verdi (ORIZZONTE 1)	S <sub>n</sub> 6	3.00	11,17	25,83	48,70	14,30
	S <sub>n</sub> 6	3.50	48,14	17,87	26,30	7,70
	S <sub>n</sub> 6	4.50	0,00	67,00	29,12	3,88
	S <sub>n</sub> 7	5.00	0,00	59,00	35,94	5,06
	S8	6.00	0,00	97,00	2,40	0,60
	S3	15.00	0,40	77,60	17,50	4,50
Sabbie ocre (ORIZZONTE 2)	S <sub>n</sub> 22	7.50	35,16	32,84	29,70	2,30
	S <sub>n</sub> 18	8.50	8,03	62,97	22,21	6,79
	S <sub>n</sub> 17	8.50	87,51		12,49	
	S <sub>n</sub> 15	9.00	7,67	62,33	29,66	0,34
	S <sub>n</sub> 16	9.50	75,14		24,86	
Ghiaie grigie in matrice sabbiosa (ORIZZONTE 2)	S6	15.00	52,40	22,60	18,00	7,00
Sabbia fine debolmente argillosa con inclusi ghiaiosi (ORIZZONTE 3)	S1	12.00	25	60	7	8
	S4	15.00	0,20	1,80	57,30	40,70
	S1	42.00	0,00	76	19,6	4,4
	S4	43.00	0,00	76,00	24,00	0,00
	S5	43.00	0,00	70,00	30,00	0,00
Limo argilloso grigio piombo (ORIZZONTE 3)	S4	9.00	0,00	6,00	66,00	28,00
	S5	9.00	0,00	7,00	62,00	31,00
	S6	12.00	0,00	3,00	60,00	37,00
	S8	12.00	0,00	3,00	64,00	33,00
	S5	15.00	0,10	0,90	67,10	31,90

### **Prove edometriche**

In **Tabella 7** sono riportati i risultati derivanti dalle prove edometriche eseguite sui campioni prelevati durante la campagna geognostica di Gennaio-Febbraio 2008. Per ciascun campione sono indicati: la profondità di prelievo, una breve descrizione del litotipo in esame, l'Orizzonte litologico di appartenenza (secondo la suddivisione finora riportata), in valore dell'indice dei vuoti all'inizio della prova, il valore dell'indice di compressione e dell'indice di rigonfiamento e tre coppie di coefficienti di compressibilità con il relativo modulo edometrico ricavati per incrementi di pressione di 50,100 e 200 KPa.

### **Prove triassiali consolidate drenate**

In **Tabella 8** sono stati riportati i risultati delle prove triassiali consolidate drenate eseguite su campioni prelevati nell'Orizzonte 1. In questo caso per ciascun campione è stata riportata la profondità e l'appartenenza all'Orizzonte di riferimento, le pressioni efficaci orizzontali (di confinamento) relative ai tre provini sui quali è stata eseguita la prova, le pressioni efficaci verticali a rottura, la deformazione percentuale a rottura ed i moduli elastici relativi ai tre gradini di prova ricavati per ciascun provino in relazione alla deformazione percentuale a rottura. Nella stessa **Tabella 8** per i 6 campioni sottoposti a prove triassiali consolidate drenate, sono stati ricavati i cosiddetti "cerchi di Mohr" costruendo – come da bibliografia – il diagramma Tensione tangenziale-Tensione normale e ricavando la coesione drenata  $c'$  e l'angolo di attrito  $\varphi'$ .

Al fine di favorire la migliore lettura dei dati di laboratorio in **Tabella 9** viene proposto un Quadro sinottico riepilogativo dei principali parametri geotecnici.

Tabella 7: Dati derivanti dalle prove edometriche

N° Campione	Profondità* (m)	Descrizione litotipo	Orizzonte Litologico di riferimento	$e_0$	$m_v$ (50 kPa)	$E_d$ (50 kPa)	$e$ (50 kPa)	$m_v$ (100 kPa)	$E_d$ (100 kPa)	$e$ (100 kPa)	$m_v$ (200 kPa)	$E_d$ (200 kPa)	$e$ (200 kPa)	$C_c$	$C_s$
S1C1	12,0-12,5	Sabbia fine debolmente argillosa, grigia, con inclusi ghiaiosi. Presenza di gusci di molluschi e alghe.	Orizzonte 1	0,820	$1,29 \cdot 10^{-4}$	7756	0,807	$9,86 \cdot 10^{-5}$	10143	0,798	$6,46 \cdot 10^{-5}$	15488	0,787	0,115	0,011
S1C2	21,0- 21,5	Argilla limosa grigia piombo con inclusi torbosi.	Orizzonte 3	1,224	$9,74 \cdot 10^{-4}$	1027	1,134	$6,65 \cdot 10^{-4}$	1504	1,063	$4,53 \cdot 10^{-4}$	2206	0,969	0,363	0,12
S3C2	18,0-18,5	Sabbia limosa grigio piombo.	Orizzonte 3	1,037	$4,37 \cdot 10^{-4}$	2290	0,993	$2,95 \cdot 10^{-4}$	3386	0,964	$1,94 \cdot 10^{-4}$	5155	0,926	0,214	0,05
S4C1	9,0-9,5	Limo argilloso grigio. Presenza di alghe.	Orizzonte 1	0,888	$4,68 \cdot 10^{-4}$	2136	0,812	$2,66 \cdot 10^{-4}$	3766	0,789	$1,43 \cdot 10^{-4}$	7013	0,764	0,212	0,026
S4C2	15,0-15,5	Limo argilloso grigio piombo.	Orizzonte 3	1,185	$4,67 \cdot 10^{-4}$	2142	1,146	$3,52 \cdot 10^{-4}$	2838	1,108	$2,78 \cdot 10^{-4}$	3593	1,050	0,373	0,14
S4C3	21,0-21,5	Argilla limosa grigia piombo con inclusi torbosi.	Orizzonte 3	1,235	$7,25 \cdot 10^{-4}$	1380	1,168	$5,58 \cdot 10^{-4}$	1793	1,107	$3,75 \cdot 10^{-4}$	2664	1,028	0,362	0,141
S5C1	9,0-9,5	Limo argilloso grigio.	Orizzonte 1	0,94	$5,65 \cdot 10^{-4}$	1769	0,822	$3,84 \cdot 10^{-4}$	2601	0,788	$2,47 \cdot 10^{-4}$	4043	0,744	0,233	0,037
S5C2	15,0-15,5	Limo argilloso grigio piombo.	Orizzonte 3	0,906	$4,11 \cdot 10^{-4}$	2434	0,874	$2,84 \cdot 10^{-4}$	3522	0,847	$2,15 \cdot 10^{-4}$	4658	0,807	0,227	0,07
S5C3	24,0-24,5	Argilla limosa grigia piombo con inclusi torbosi.	Orizzonte 3	1,294	$7,26 \cdot 10^{-4}$	1378	1,228	$5,16 \cdot 10^{-4}$	1939	1,171	$3,42 \cdot 10^{-4}$	2921	1,096	0,321	0,15
S6C1	12,0-12,5	Limo argilloso grigio.	Orizzonte 1	0,971	$6,44 \cdot 10^{-4}$	1554	0,876	$3,75 \cdot 10^{-4}$	2667	0,839	$2,33 \cdot 10^{-4}$	4299	0,792	0,246	0,053
S6C3	24,0-24,5	Argilla limosa grigia piombo.	Orizzonte 3	1,230	$1,09 \cdot 10^{-3}$	917	1,118	$7,69 \cdot 10^{-4}$	1300	1,036	$5,17 \cdot 10^{-4}$	1933	0,931	0,376	0,13
S7C1	10,5-11,0	Limo argilloso grigio.	Orizzonte 1	0,797	$5,6 \cdot 10^{-4}$	1784	0,692	$3,85 \cdot 10^{-4}$	2598	0,657	$2,42 \cdot 10^{-4}$	4127	0,614	0,233	0,035
S7C2	15,0-15,5	Sabbia limosa grigia scura con inclusi torbosi.	Orizzonte 1	1,854	$1,14 \cdot 10^{-3}$	873	1,726	$8,27 \cdot 10^{-4}$	1209	1,613	$5,78 \cdot 10^{-4}$	1731	1,462	0,623	0,2
S7C3	27,0-27,5	Argilla limosa grigia piombo.	Orizzonte 3	0,900	$2,25 \cdot 10^{-4}$	4450	0,884	$1,93 \cdot 10^{-4}$	5165	0,866	$1,22 \cdot 10^{-4}$	8183	0,843	0,186	0,09
S8C2	12,0-12,5	Limo argilloso grigio.	Orizzonte 1	0,974	$7,92 \cdot 10^{-4}$	1263	0,869	$5,36 \cdot 10^{-4}$	1865	0,82	$3,64 \cdot 10^{-4}$	2749	0,755	0,298	0,069
S8C3	15,0-15,5	Limo sabbioso grigio piombo con inclusi torbosi.	Orizzonte 3	1,185	$5,22 \cdot 10^{-4}$	1916	1,123	$3,71 \cdot 10^{-4}$	2692	1,084	$2,78 \cdot 10^{-4}$	3600	1,026	0,264	0,035

(\*) = la profondità deve intendersi riferita al piano campagna nel punto di sondaggio.

$e_0$  = indice dei vuoti all'inizio della prova edometrica.

$m_v$  = coefficiente di compressibilità volumetrica (il valore è da riferirsi al campo di pressione compreso tra il valore indicato tra parentesi e quello precedente).

$E_d$  = modulo edometrico (il valore è da riferirsi al campo di pressione compreso tra il valore indicato tra parentesi e quello precedente).

$e$  (50 kPa);  $e$  (100kPa);  $e$  (200kPa) = indice dei vuoti corrispondente al campo di pressione compreso tra il valore indicato tra parentesi e quello precedente.

$C_c$  = indice di compressione calcolato come la variazione dell'indice dei vuoti in un ciclo logaritmico di incrementi di pressione durante la fase di carico.

$C_s$  = indice di rigonfiamento calcolato come la variazione dell'indice dei vuoti in un ciclo logaritmico di decrementi di pressione durante la fase di scarico.

**Tabella 8:** Dati derivanti dalle prove  
triassiali consolidate drenate.

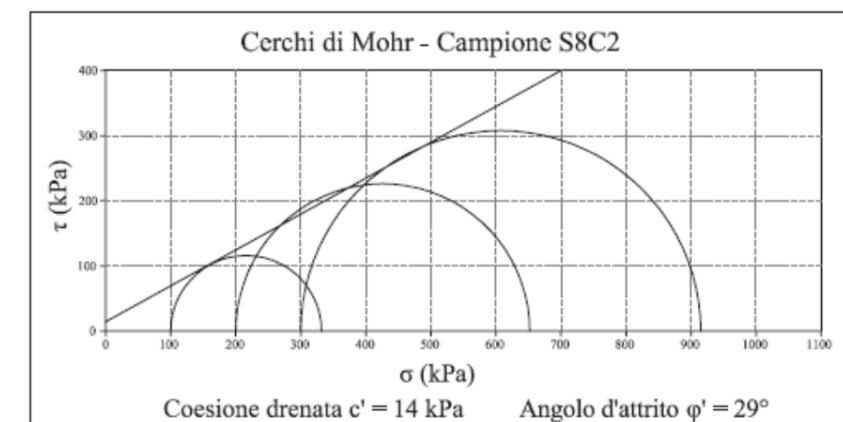
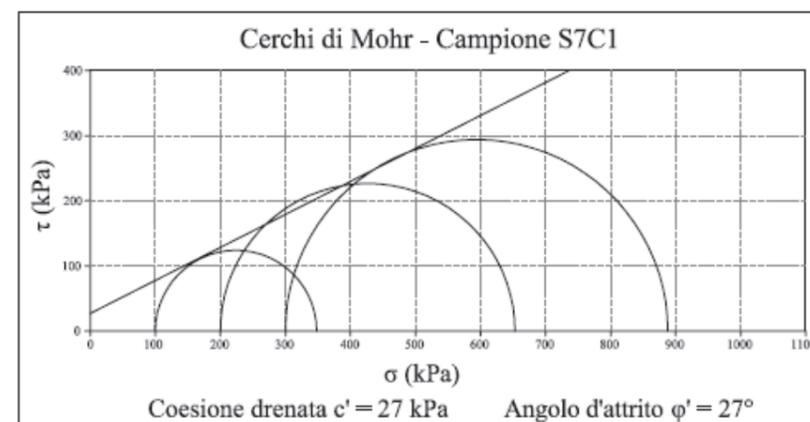
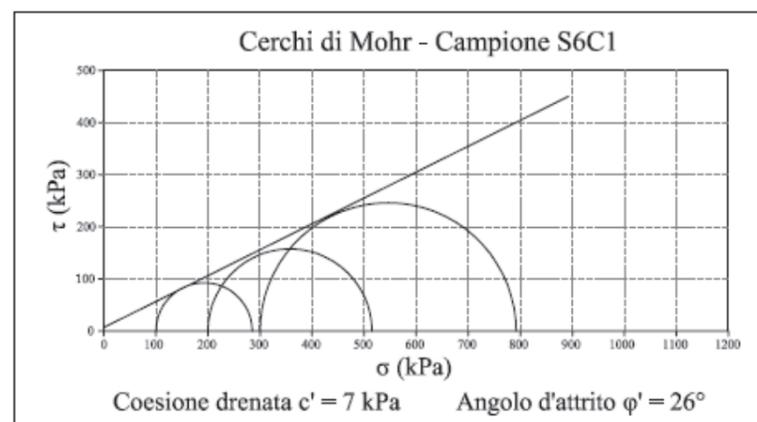
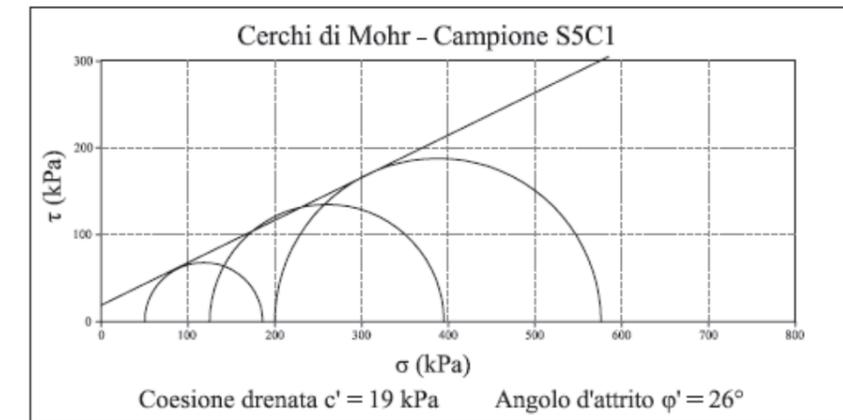
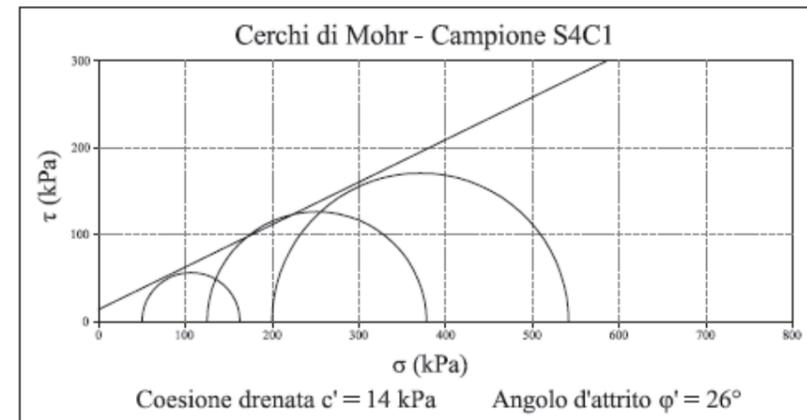
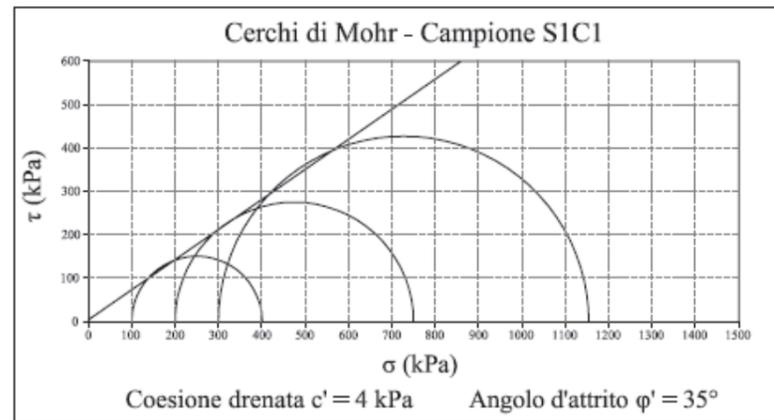
Sondaggio e Campione Sn Cn	Profondità* (m)	Descrizione litotipo	Orizzonte litologico di riferimento	Ph1 (kPa)	Pv1 (kPa)	$\varepsilon_1$ (%)	E1 (kPa)	Ph2 (kPa)	Pv2 (kPa)	$\varepsilon_2$ (%)	E2 (kPa)	Ph3 (kPa)	Pv3 (kPa)	$\varepsilon_3$ (%)	E3 (kPa)
S1C1	12,0-12,5	Sabbia fine debolmente argillosa, grigia, con inclusi ghiaiosi. Presenza di gusci di molluschi e alghe.	Orizzonte 1	100	401	9,0	3337	200	750	8,5	6440	300	1154	10,7	8011
S4C1	9,0-9,5	Limo argilloso grigio. Presenza di alghe.	Orizzonte 1	50	163	20,3	557	125	378	17,0	1488	200	542	19,5	1748
S5C1	9,0-9,5	Limo argilloso grigio.	Orizzonte 1	50	186	9,2	1484	125	395	17,6	1535	200	576	19,4	1935
S6C1	12,0-12,5	Limo argilloso grigio.	Orizzonte 1	100	285	16,4	1127	200	515	18,4	1715	300	792	16,1	3054
S7C1	10,5-11,0	Limo argilloso grigio.	Orizzonte 1	100	348	13,7	1808	200	653	16,0	2837	300	888	10,7	5525
S8C2	12,0-12,5	Limo argilloso grigio.	Orizzonte 1	100	332	15,1	1536	200	652	12,0	3770	300	915	16,0	3859

Ph1, Ph2, Ph3 = pressioni efficaci orizzontali (di confinamento) relative ai tre provini sui quali è stata eseguita la prova.

Pv1, Pv2, Pv3 = pressioni efficaci verticali a rottura relative ai tre provini sui quali è stata eseguita la prova.

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  = deformazione percentuale a rottura.

E1, E2, E3 = moduli elastici relativi ai tre gradini di prova ricavati per ciascun provino in relazione alla deformazione percentuale a rottura



$\tau$  = Tensione tangenziale     $\sigma$  = Tensione normale

Tabella 9: Quadro sinottico  
riepilogativo dei principali  
parametri.

N° campione	Profondità* (m)	Litologia	Orizzonte litologico	$\gamma$ (KN/mc)	W (%)	% ghiaia	% sabbia	% limo	% argilla	LL (%)	LP(%)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	$e_0$	Kv <sub>1</sub> (cm/s)	Kv <sub>2</sub> (cm/s)
S1C1	12,0-12,5	Sabbia fine debolmente argillosa, grigia, con inclusi ghiaiosi	Orizzonte 1	18,4	34	25	60	7	8	22	21	4 (a)	35 (a)	0,82	$1,1 * 10^{-7}$	$3,3 * 10^{-6}$
S1C2	21,0-21,5	Argilla limosa grigio piombo con inclusi torbosi	Orizzonte 3	17,27	43,87	-	-	-	-	60	34	3,3 (b)	22 (b)	1,224	$1,34 * 10^{-8}$	-
S1C3	42,5-43,0	Sabbia fine limosa grigio piombo	Orizzonte 3	-	-	0	76	19,6	4,4	-	-	-	-	-	-	-
S3C1	15,0-15,5	Sabbia limosa grigio verde	Orizzonte 1	18,54	32,51	0,4	77,6	17,5	4,5	-	-	-	-	-	-	$2,62 * 10^{-7}$
S3C2	18,0-18,5	Sabbia limosa grigio piombo	Orizzonte 3	18,54	31,62	-	-	-	-	34	26	10,8 (b)	26,3 (b)	1,037	$6,97 * 10^{-7}$	-
S4C1	9,0-9,5	Limo argilloso grigio piombo con inclusi torbosi	Orizzonte 1	18,6	32,5	0	6	66	28	33	25	14 (a)	26 (a)	0,888	$1,1 * 10^{-7}$	$1,5 * 10^{-7}$
S4C2	15,0-15,5	Limo argilloso grigio piombo	Orizzonte 3	18,24	39,46	0,2	1,8	57,3	40,7	57	31	12,2 (b)	20,4 (b)	1,185	$7,29 * 10^{-9}$	-
S4C3	21,0-21,5	Argilla limosa grigio piombo con inclusi torbosi	Orizzonte 3	16,47	58,37	-	-	-	-	57	31	3,7 (b)	21,8 (b)	1,235	$1,19 * 10^{-5}$	-
S4C4	43,0-43,5	Sabbia limosa grigio piombo	Orizzonte 3	-	-	0	76	24	0	-	-	-	-	-	-	-
S5C1	9,0-9,5	Limo argilloso grigio piombo	Orizzonte 1	18,3	34,6	0	7	62	31	33	23	19 (a)	26 (a)	0,940	$6,2 * 10^{-8}$	$1,8 * 10^{-7}$
S5C2	15,0-15,5	Limo argilloso grigio piombo	Orizzonte 3	18,78	34,53	0,1	0,9	67,1	31,9	45	24	3 (b)	21,6 (b)	0,906	$1,85 * 10^{-8}$	-
S5C3	24,0-24,5	Argilla limosa grigio piombo con inclusi torbosi	Orizzonte 3	16,82	54,81	-	-	-	-	56	35	-	-	1,294	$1,55 * 10^{-8}$	-
S5C4	43,0-43,5	Sabbia limosa grigio piombo	Orizzonte 3	-	-	0	70	30	0	-	-	-	-	-	-	-
S6C1	12,0-12,5	Limo argilloso grigio piombo	Orizzonte 1	18,2	32,7	0	3	60	37	38	21	7 (a)	26 (a)	0,971	$1,3 * 10^{-7}$	$5,6 * 10^{-8}$
S6C2	15,0-15,5	Ghiaia in matrice sabbio-limosa grigio piombo	Orizzonte 3	-	-	52,4	22,6	18	7	30	NP	-	-	-	-	-
S6C3	24,0-24,5	Argilla limosa grigio piombo	Orizzonte 3	17,92	42,45	-	-	-	-	57	30	0 (b)	22,1 (b)	1,230	$9,12 * 10^{-8}$	-
S7C1	10,5-11,0	Limo argilloso con fanerogame	Orizzonte 1	18,6	32,0	0	5	63	32	32	21	27 (a)	27 (a)	0,797	$6,4 * 10^{-8}$	$3,3 * 10^{-7}$
S7C2	15,0-15,5	Sabbia limosa grigio scura con inclusi torbosi	Orizzonte 1	15,13	61,18	-	-	-	-	58	37	21,1 (b)	29,8 (b)	1,854	$3,62 * 10^{-8}$	-
S7C3	27,0-27,5	Argilla limosa grigio piombo	Orizzonte 3	19,21	31,86	-	-	-	-	43	29	20,5 (b)	21,8 (b)	0,900	$1,44 * 10^{-8}$	-
S8C1	6,00-6,5	Sabbia limosa grigio verde	Orizzonte 1	18,98	31,96	0	97	2,4	0,6	26	NP	12,3 (b)	39,3 (b)	-	-	$4,4 * 10^{-7}$
S8C2	12,0-12,5	Limo argilloso grigio piombo	Orizzonte 1	18,2	36,9	0	3	64	33	34	19	14 (a)	29 (a)	0,974	$6,2 * 10^{-8}$	$2,2 * 10^{-7}$
S8C3	15,0-15,5	Limo sabbioso grigio piombo con inclusi torbosi	Orizzonte 3	17,29	38,11	-	-	-	-	25	NP	17,9 (b)	30,2 (b)	1,185	$4,84 * 10^{-7}$	-

(\*) = la profondità deve intendersi riferita al piano campagna nel punto di sondaggio.

 $\gamma$  = peso di volume del terreno.

W = contenuto in acqua

LL = limite liquido

LP = limite plastico

(a) = parametri calcolati per mezzo di prove triassiali consolidate drenate

(b) = parametri calcolati per mezzo di prove di taglio consolidate drenate

 $e_0$  = indice dei vuotiKv<sub>1</sub> = coefficiente di permeabilità calcolato per mezzo di prove a carico variabile in cella edometricaKv<sub>2</sub> = coefficiente di permeabilità calcolato per mezzo di prove a carico costante in cella triassiale

## **CAPITOLO 5**

### **CARATTERI IDROGEOLOGICI DELL'AREA**

Si attribuisce a Leonardo Da Vinci la frase: “ *Se t'addivieni di trattare delle acque, considera prima l'esperienza e poi la ragione*” che può tradursi nel fatto che l'applicazione dell'idrologia richiede una considerevole dose di esperienza e di senso pratico.

Tanto più quanto l'areale (come nel nostro caso) risulta piuttosto complesso sia dal punto di vista strutturale, per la sua evoluzione paleogeografica, e per la storia recente. Il modello idrogeologico di riferimento pertanto non può essere univoco, sia per le variazioni in orizzontale che in verticale.

Ai fini degli approfondimenti idrogeologici sono state prese in considerazione le serie significative dei dati termo-pluviometrici e sono stati condotti focus sul moto ondoso e sul sistema di marea poiché, visto la prossimità dell'area con il mare, è possibile ipotizzare una connessione più o meno diretta tra il sistema marino e gli scorrimenti idrici in sotterraneo.

Per inquadrare correttamente la problematica in esame è stato ampliato il territorio di riferimento comprendendo gli ambiti idrogeologici circostanti per definirne le relazioni di ricarica e/o alimentazione con la coltre di sedimento (per sua estensione areale e per spessore) effettivamente interessato.

#### **5.1 Definizione dell'area di studio sotto il profilo idrogeologico ed in base alle alimentazioni e/o ricariche idrauliche potenziali**

Per meglio definire l'area di studio da un punto di vista idrogeologico è possibile stabilire potenziali trasferimenti idrici ed interconnessioni con i bacini dello Scolmatore d'Arno e di tutti i sistemi di canali più o meno naturali che corrono in parallelo a questa importante opera idraulica; ma non dobbiamo trascurare i rapporti di scambio con i vari torrenti che provengono dall'entroterra livornese (Monti e Colline livornesi) come ad esempio l'Ugione ed il Cigna e, dovendo citare tutti i settori collegati alla nostra area anche le formazioni lontane che alimentano il paleoalveo dell'Arno e del Serchio entro lo spessore dei Conglomerati.

Nel complessivo l'area significativa è interessata da un'alimentazione talvolta lontana, tuttavia cercando di semplificare è possibile fare le seguenti considerazioni di carattere generale:

- a) Dalla conformazione lito-stratigrafica assunta con un dettagliato lavoro di ricollezione e di reinterpretazione generale, è possibile stabilire l'assenza del collegamento idraulico tra l'acquifero confinato nell'Orizzonte 4 costituito dai Conglomerati dell'Arno e del Serchio da Bientina e gli acquiferi potenzialmente presenti posti al di sopra. Quindi per la peculiarità dello Studio in oggetto, almeno in questa fase, si ritiene di non dover prendere in considerazione l'alimentazione lontana di questo acquifero e di svolgere una semplice descrizione qualitativa sulla base di studi già effettuati.
- b) Differente è il rapporto con i subalvei dei corsi d'acqua che provengono dall'entroterra livornese e la cui sezione di chiusura è individuata ai confini dell'area in studio. Dobbiamo rilevare che per la loro conformazione e strutturazione idraulica questi corpi idrici si riversano al limite del *Terrazzo di Livorno* (Gronda dei Lupi) dando origine ad un'alimentazione di subalveo che ricarica l'acquifero confinato/semiconfinato posto al di sotto dello spessore entro il quale è organizzato un acquifero freatico.
- c) Altresì importante è lo Scolmatore d'Arno per i suoi rapporti di scambio laterale soprattutto nella parte terminale del suo sviluppo.
- d) Non trascurabile è infine l'effetto di ricarica proveniente da Est presso la Località Stagno posta su un vecchio cordone litoraneo ormai relitto, anche se consolidato, dove può originarsi un interscambio dovuto al sia pur modestissimo gradiente idraulico tendenzialmente in direttrice Est-Ovest.

## 5.2 Quadro conoscitivo idrogeologico generale dell'area

Dai dettagli geologici, geomorfologici, e paleogeografici è possibile delineare una multiforme situazione stratigrafica in un ambiente deposizionale naturale che è possibile definire di alta transizione continentale-marina con diversi influssi fluvio-deltizi e con memorie lagunari e palustri.

Altro elemento non trascurabile è determinato dall'elevata motilità evolutiva sia dei termini naturali, sia per le varie azioni condotte dall'uomo specialmente negli ultimi 1.000-1.200 anni.

Questi tre fattori sinteticamente costituiti da:

- eterogeneità ed elevata anisotropia lito-stratigrafica;
- ambiente di elevata transizione continentale marina;
- luogo con complesse stratificazioni storiche evolutive

determinano una situazione idrogeologica proporzionalmente complessa per l'elevato numero di variabili e fattori che compongono il sistema nel suo insieme.

A livello di inquadramento idrogeologico regionale l'area in esame, ubicandosi tra l'abitato di Livorno a Sud e verso Nord ai terreni della Pianura pisana, risulta una tipica area costiera delimitata dal Terrazzo geomorfologico di Livorno che ha una conosciuta e precisa configurazione idrogeologica e dalla parte sud della Provincia di Pisa, che è strutturata da spessori consistenti e conosciuti di alluvioni fluviali. Questa zona portuale industriale di Livorno, peraltro oggetto di profonde modificazioni umane è tuttavia peculiare e sembra mostrare una discontinuità spaziale e geologica con le zone contermini.

L'evoluzione paleogeografia ci consegna infatti un'area con linee di spiaggia in avanzamento, tomboli e/o alture retrodunali in continua trasformazione. Le fasi di imbonimento, le bonifiche agrarie ed i banchinamenti realizzati complicano ancora di più la situazione con una lama di mare ed una linea di transizione salata-salmastra-dolce in avanzamento, ma mai uniforme.

In sostanza si riconosce una falda freatica piuttosto limitata come spessore all'Orizzonte Zero di riporto ed in una parte all'Orizzonte 1, tendenzialmente nella frazione sabbiosa o sabbiosa fine. Al di sotto dello spessore a frazione più limosa ed argillosa, che in un certo senso sigilla idraulicamente l'acquifero freatico e ne costituisce la sua base, si trovano degli spessori che potenzialmente possono costituire un acquifero di tipo confinato/semiconfinato.

### **5.3 Caratteristiche di permeabilità degli spessori ed i terreni acquiferi nell'areale in esame**

Prendendo come riferimento il lavoro eseguito su campioni prelevati per la realizzazione della Vasca di colmata e comparandoli con gli spessori riconosciuti nello studio geo-stratigrafico, è possibile caratterizzare gli spessori che compongono gli Orizzonti sotto il punto di vista dell'assortimento granulometrico.

In generale dalla lettura della **Tabella 6** già proposta osserviamo la presenza di frazioni di limo importanti in quasi tutti gli spessori investigati che in una qualche misura influiscono sul grado di permeabilità.

Nei vari campioni prelevati dai vari orizzonti stratigrafici sono state eseguite delle prove di permeabilità in laboratorio Nella **Tabella 10a** sono stati elencati i dati derivati dalle prove 2008 che sono state condotte in cella triassiale o in cella edometrica e dalle prove delle precedenti campagne 2001-2003 condotte al permeatro a carico costante o variabile.

In generale dal raffronto delle analisi in laboratorio sulle permeabilità, rispetto alle prove eseguite in sito svolte per la cassa di colmata già realizzata – si veda **Tabella 10b** - rileviamo una differenza piuttosto marcata per il fatto che tendenzialmente tutti i valori di conducibilità idraulica in laboratorio risultano più alti (almeno di un fattore 10) in virtù del rimaneggiamento del campione e quindi dell'apertura delle tessiture litologiche.

Occorre specificare che la prova a carico variabile di tipo “Lefranc”, se correttamente eseguita è piuttosto significativa fino all'ordine di K intorno al  $10^{-6}$  cm./sec., mentre perde di significato per ordini di conducibilità idraulica inferiori. E' in questa circostanza che assume un significato più conforme alla realtà la prova su permeametro eseguita in laboratorio.

Dall'analisi dei risultati ottenuti, considerando che la maggior parte dei dati si dispone su trend sempre superiori alla soglia dei  $10^{-6}$  cm./sec. , si rileva una buona corrispondenza tra le analisi di laboratorio e le prove svolte in sito.

Nella **Tabella 11** sono stati rappresentati in un quadro riepilogativo gli intervalli di conducibilità idraulica espressi in cm/sec. e quindi si è ottenuto il grado di permeabilità medio per ciascun spessore partendo dalla seguente scala comunemente riconosciuta dalla letteratura scientifica:

Molto elevato	ME	$1 < K < 10^2$
Elevato	E	$10^{-1} < K < 1$
Medio Elevato	MeE	$10^{-2} < K < 10^{-1}$
Medio Basso	MeB	$10^{-3} < K < 10^{-2}$
Basso	B	$10^{-5} < K < 10^{-3}$
Molto Basso	MB	$10^{-7} < K < 10^{-5}$
Impermeabile	I	$K < 10^{-7}$

**Tabella 10a:** Prove di permeabilità in laboratorio

Legenda: S<sub>n</sub>1 = Sondaggi eseguiti per vasca di contenimento già realizzata (2001)  
 S1 = Sondaggi eseguiti per vasca di contenimento in progetto (2008)  
 (cost.) = prove di laboratorio eseguite a carico variabile  
 (var.) = prove di laboratorio eseguite a carico costante

Litotipo indagato	Sondaggio in cui è stato prelevato il campione per la prova di permeabilità in laboratorio	Profondità della prova in m.	Coefficienti di conducibilità idraulica in m/s
Riempimento antropico darsena	S <sub>n</sub> 8	3.50	1.1x10 <sup>-2</sup> (cost.)
	S <sub>n</sub> 9	5.00	1.5x10 <sup>-2</sup> (cost.)
Sabbie limose grigio-verdi	S <sub>n</sub> 6	4.50	3x10 <sup>-3</sup> (var.)
	S <sub>n</sub> 6	3.00	3.5x10 <sup>-6</sup> (var.)
	S <sub>n</sub> 6	3.50	7x10 <sup>-2</sup> (var.)
	S5	9.0	6.2x10 <sup>-10</sup> (cost.) in cella edometrica
			1.8x10 <sup>-9</sup> (cost.) in cella triassiale
	S7	10.5	6.4x10 <sup>-10</sup> (cost.) in cella edometrica
			3.3x10 <sup>-9</sup> (cost.) in cella triassiale
	S8	12.0	6.2x10 <sup>-10</sup> (cost.) in cella edometrica
			2.2x10 <sup>-9</sup> (cost.) in cella triassiale
	S3	15.0	2.62x10 <sup>-9</sup> (cost.)
S8	6.0	4.4x10 <sup>-9</sup> (cost.)	
Ammassi di fanerogame	S <sub>n</sub> 4	10.00	3x10 <sup>-2</sup> (cost.)
	S <sub>n</sub> 6	4.50	2.5x10 <sup>-5</sup> (cost.)
	S <sub>n</sub> 7	7.50	4x10 <sup>-5</sup> (var.)
	S <sub>n</sub> 8	5.00	1.3x10 <sup>-2</sup> (cost.)
	S <sub>n</sub> 9	7.50	1.4x10 <sup>-3</sup> (cost.)
	S <sub>n</sub> 14	5.50	2.4x10 <sup>-2</sup> (cost.)
	S <sub>n</sub> 19	3.50	2.3x10 <sup>-2</sup> (cost.)
	S <sub>n</sub> 20	3.50	2.8x10 <sup>-4</sup> (var.)
	S1	12.0	1.1x10 <sup>-9</sup> (cost.) in cella edometrica
			3.3x10 <sup>-8</sup> (cost.) in cella triassiale
	S4	9.0	1.1x10 <sup>-9</sup> (cost.) in cella edometrica
			1.5x10 <sup>-9</sup> (cost.) in cella triassiale
	S6	12.0	1.3x10 <sup>-9</sup> (cost.) in cella edometrica
5.6x10 <sup>-10</sup> (cost.) in cella triassiale			

Ammassi di fanerogame	S5	15.0	$1.85 \times 10^{-10}$ (var.)
	S7	15.0	$3.62 \times 10^{-10}$ (var.)
Sabbie ocracee	S <sub>n</sub> 15	9.00	$6.7 \times 10^{-3}$ (cost.)
	S <sub>n</sub> 16	9.50	$1.3 \times 10^{-2}$ (cost.)
	S <sub>n</sub> 17	8.50	$1.1 \times 10^{-2}$ (cost.)
	S <sub>n</sub> 18	8.50	$1.4 \times 10^{-2}$ (cost.)
	S <sub>n</sub> 19	6.50	$2.3 \times 10^{-2}$ (cost.)
	S <sub>n</sub> 22	7.50	$3.7 \times 10^{-4}$ (var.)
Sabbie/Limi argillosi grigio piombo	S1	21.0	$1.34 \times 10^{-10}$ (var.)
	S4	15.0	$7.29 \times 10^{-11}$ (var.)
	S4*	21.0	$1.19 \times 10^{-5}$ (var.)
	S5	24.0	$1.55 \times 10^{-10}$ (var.)
	S6	24.0	$9.12 \times 10^{-10}$ (var.)
	S7	27.0	$1.44 \times 10^{-10}$ (var.)
	S8	15.0	$4.84 \times 10^{-9}$ (var.)
Sabbie con ghiaia marroni grigie	S3	18.0	$6.97 \times 10^{-9}$ (var.)

(\*) valore non rappresentativo del litotipo indagato

**Tabella 10b:** Prove di permeabilità condotte in foro (da lavoro 2001)Legenda: S<sub>n</sub>1 = Sondaggi eseguiti per vasca di contenimento già realizzata (2001)

Litotipo indagato	Sondaggi in cui è stata eseguita la prova di permeabilità	Profondità della prova in m.	Coefficienti di conducibilità idraulica in m/s
Massicciata della scogliera	S <sub>n</sub> 1	2.00	$2 \times 10^{-3} < K < 8 \times 10^{-3}$
	S <sub>n</sub> 2	2.00	$4 \times 10^{-4} < K < 8 \times 10^{-4}$
Riempimento antropico darsena	S <sub>n</sub> 5	4.50	$7 \times 10^{-6} < K < 1 \times 10^{-5}$
	S <sub>n</sub> 8	3.50	$7 \times 10^{-6} < K < 1 \times 10^{-5}$
	S <sub>n</sub> 9	5.00	$2 \times 10^{-4} < K < 8 \times 10^{-4}$
Sabbie limose grigio-verdi	S <sub>n</sub> 3	6.00	$8 \times 10^{-6} < K < 5 \times 10^{-5}$
	S <sub>n</sub> 6	3.50	$2 \times 10^{-5} < K < 7 \times 10^{-5}$
	S <sub>n</sub> 7	7.50	$4 \times 10^{-6} < K < 1 \times 10^{-5}$
	S <sub>n</sub> 12	4.00	$1 \times 10^{-5}$
Ammassi di fanerogame	S <sub>n</sub> 4	10.00	$3 \times 10^{-7} < K < 7 \times 10^{-7}$
	S <sub>n</sub> 6	6.50	$8 \times 10^{-7} < K < 2 \times 10^{-6}$
	S <sub>n</sub> 7	7.50	$1 \times 10^{-6} < K < 6 \times 10^{-6}$
	S <sub>n</sub> 8	5.00	$3 \times 10^{-6} < K < 1 \times 10^{-5}$
	S <sub>n</sub> 9	7.50	$6 \times 10^{-7} < K < 1 \times 10^{-6}$
	S <sub>n</sub> 10	10.00	$2 \times 10^{-6} < K < 1 \times 10^{-5}$
	S <sub>n</sub> 14	5.50	$1 \times 10^{-6} < K < 6 \times 10^{-6}$
	S <sub>n</sub> 19	6.50	$1 \times 10^{-6} < K < 2 \times 10^{-6}$
Sabbie ocracee	S <sub>n</sub> 15	9.00	$1 \times 10^{-6} < K < 2 \times 10^{-6}$
	S <sub>n</sub> 16	9.50	$9 \times 10^{-7} < K < 3 \times 10^{-6}$
	S <sub>n</sub> 17	8.50	$2 \times 10^{-5} < K < 3 \times 10^{-5}$
	S <sub>n</sub> 18	8.50	$4 \times 10^{-6} < K < 9 \times 10^{-6}$
	S <sub>n</sub> 22	7.50	$7 \times 10^{-6} < K < 3 \times 10^{-5}$

Tabella 11: Quadro sinottico dei trend delle conducibilità idrauliche degli spessori

K (cm/sec)	10 <sup>2</sup>	10	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	
Drenaggio	Buono												
Grado	Molto Elevato			Elevato	Medio Elevato	Medio Basso	Basso			Molto Basso	Praticamente impermeabile		
MeB					10 <sup>-2</sup>		6x10 <sup>-4</sup>						
B								7x10 <sup>-3</sup>					
B							2x10 <sup>-4</sup>	8x10 <sup>-5</sup>					
B						10 <sup>-3</sup>							
B						10 <sup>-2</sup>		6x10 <sup>-5</sup>					
B						10 <sup>-3</sup>		10 <sup>-3</sup>					
MeB						3x10 <sup>-3</sup>		6x10 <sup>-4</sup>					
MB									10 <sup>-5</sup>				
B								10 <sup>-4</sup>					
MeE					10 <sup>-1</sup>	5x10 <sup>-3</sup>							
B						3x10 <sup>-3</sup>		10 <sup>-2</sup>					
B							8x10 <sup>-4</sup>	4x10 <sup>-4</sup>					
MB									10 <sup>-5</sup>				
E				1	10 <sup>-1</sup>								

Dall'esame della **TAV. 6** “*Dati di base idrogeologici*” e della **TAV. 7** “*Sezioni idrogeologiche*” e riprendendo le suddivisioni lito-stratigrafiche degli Orizzonti<sup>38</sup> proposte nel Capitolo 2 si osserva che:

- a) L'Orizzonte Zero costituito da materiale di riporto antropico è dotato di una Permeabilità Media con un campo di valori piuttosto ampio per la forte eterogeneità del mezzo poroso.
- b) L'Orizzonte 1, nel suo complesso può essere considerato a Permeabilità Bassa; tutti gli spessori di cui è composto infatti si trovano in un range di conducibilità idraulica compreso tra  $10^{-5}$  e  $10^{-3}$  cm/sec. Questo basso valore di permeabilità è dovuto al fatto che gli spessori tendenzialmente a scheletro sabbioso sono completati da frazioni limose, limose organiche e talvolta argillose di un certo livello percentuale.
- c) L'Orizzonte 2 composto in testa ed alla base da spessori di transizione tipici di ambiente fluviale con rimaneggiamenti, fa registrare una Permeabilità Medio-Bassa per lo spessore Sgl dove si giustappone l'Orizzonte 1, una Permeabilità da Molto Bassa a Bassa per gli spessori di natura Argillo-limosa ed una Permeabilità Media per lo spessore di base costituito da sabbie con passaggi di ghiaie. Questo è l'Orizzonte più vario a livello di distribuzione della conducibilità idraulica.
- d) L'Orizzonte 3 ha una Permeabilità Bassa per i primi due spessori e Molto Bassa per lo spessore limo-argilloso che si rileva alla sua base.
- e) Infine l'Orizzonte 4 composto dai Conglomerati dell'Arno e del Serchio è dotato di una Permeabilità Elevata.

Le rocce permeabili da prendere in considerazione come acquiferi potenziali hanno affioramenti molto limitati e non sono organizzate in strutture idrogeologiche capaci di trattenere grandi quantità di acqua.

La ricarica delle falde costiere avviene con le piogge locali e per l'inalveamento delle acque dei vari Torrenti e Rii che si riversano nella parte finale dell'area in esame.

Prima di soffermarci sulle principali caratteristiche degli acquiferi più superficiali si definisce di seguito lo spessore dei Conglomerati dell'Arno e Serchio da Bientina che costituisce un corpo acquifero (a falda imprigionata) caratterizzato

---

<sup>38</sup> Anche se appare superfluo sottolineare che non esiste una funzione che lega un Orizzonte composto da vari spessori con un valore distinto e determinato di conducibilità idraulica.

da una elevata permeabilità. I numerosi pozzi realizzati proprio in funzione dello sfruttamento del livello sono tutti caratterizzati da elevati valori delle portate di esercizio (generalmente comprese tra i 1.000 e i 2.000 l/m) e utilizzati per fini acquedottistici ed industriali.

La formazione si approfondisce da Est verso Ovest-Nord Ovest in direzione della costa, cosicché il tetto del conglomerato si ritrova intorno ai -40 m in prossimità di Vicarello, mentre in prossimità di Stagno (tratto terminale area Interporto) è intercettato a profondità superiori a -80 m.

Le acque emunte sono caratterizzate da una elevata concentrazione in Fe e Mn che non le rendono direttamente utilizzabili per il consumo umano; infatti da determinazioni analitiche eseguite le principali caratteristiche delle acque risultano le seguenti:

Ferro	da 0,3 a 3,0 mg/l
Manganese	da 0,3 a 0,8 mg/l
Durezza totale	da 34 a 37 F°
pH	da 6,96 a 7,33

L'elevata concentrazione in Fe e Mn è presumibilmente da mettere in relazione con il modesto spessore dello strato ciottoloso (3-7 mt.) che tra l'altro risulta incluso in terreni argilloso palustri, ricchi del noto "Ferro delle paludi" facilmente solubile nelle acque sotterranee.

Ancora in una visione generale e macro è possibile delineare i seguenti comportamenti idrogeologici:

- Al substrato prevalentemente argilloso mio-pliocenico, profondo e mai riscontrato nei vari sondaggi anche effettuati oltre i 50,00 m. da piano campagna possono essere attribuite caratteristiche di impermeabilità con un K inferiore  $10^{-7}$  cm./sec.;
- Agli spessori di ghiaie riconducibili al Paleo Arno e Serchio da Bientina (Orizzonte 4) possono essere attribuite delle caratteristiche di ottima conducibilità idraulica con un K compreso tra i  $5 \times 10^{-2}$  e  $1 \times 10^{-3}$  cm./sec.
- Agli spessori di ghiaie riconducibili ai paleo alvei dei torrenti livornesi minori possono essere attribuite delle caratteristiche di ottima conducibilità idraulica con un K compreso tra i  $1 \times 10^{-2}$  e  $5 \times 10^{-3}$  cm./sec.;

- Per le sabbie meno addensate piuttosto superficiali possono essere attribuite delle caratteristiche di media conducibilità idraulica con un K compreso tra i  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$  cm./sec.;
- Per le sabbie più addensate riferibili ai terreni delle paleodune possono essere attribuite delle caratteristiche di medio-bassa conducibilità idraulica con un K compreso tra i  $5 \times 10^{-4}$  e  $10^{-5}$  cm./sec.;
- Per le sabbie limose ed i limi organici con fanerogame (Orizzonte 1) possono essere attribuite delle caratteristiche di scarsa conducibilità idraulica con un K intorno ai  $10^{-5}$ .

Da questa analisi è possibile individuare un modello teorico semplificato di una situazione idrogeologica invece piuttosto complessa che può essere sintetizzata come segue:

- *Per le sabbie poco addensate superficiali, sia dunali che di riempimento, è possibile individuare uno scorrimento "libero" freatico in rapporto ad una ricarica superficiale diretta o di occasionale sub-alveo dal reticolo idrico superficiale attuale;*
- *Per le sabbie limose ed i limi organici con fanerogame è possibile individuare uno scorrimento semiconfinato. Di per sé, per le caratteristiche di permeabilità, queste costituiscono un relativo impermeabile (acquitardo/acquicludo) e quindi potenzialmente imprigionano un probabile scorrimento sottostante. Inoltre il tetto di questo spessore rappresenta la base dello scorrimento più superficiale freatico.*
- *Per le ghiaie del Paleo-Arno è possibile individuare uno scorrimento del tutto confinato ai corridoi di alimentazione riferibili sempre ad alluvioni in relazione a ricariche lontane.*

## **5.4 I contesti idrogeologici contigui all'area in esame – elementi di interesse**

### **5.4.1 Studio idrogeologico della Piana di Livorno**

Sulla base di uno Studio idrogeologico condotto sulla Piana di Livorno e che in particolare prende in considerazione una vasta area confinata a Nord dal Torrente Ugione-Rio dell'Acqua Puzzolente ed a Sud dal Torrente Chioma, si rileva da subito come i tecnici non abbiano rilevato Punti d'Acqua significativi nell'area in studio e che anzi, i rilievi siano stati effettuati al più sul bordo dell'area. Ciò

confermerebbe che l'area in studio non è stata mai sfruttata per la limitata produttività degli acquiferi, e per la scarsa qualità chimica delle acque.

Lo *Studio idrogeologico della Piana di Livorno* ha il grande pregio di caratterizzare in maniera piuttosto precisa quelle che per la nostra area possono essere considerate le maggiori aree di ricariche per gli acquiferi, ovvero quelle che fanno parte del Terrazzo geomorfologico di Livorno e che bordano i lati meridionale ed orientale– si veda Punto 1 **Fig. 26**.

Nella seguente **Tabella 12** sono state rappresentate le determinazioni eseguite sulle acque sotterranee ed in particolare abbiamo raccolto quelle più di stretto interesse con l'area oggetto dell'indagine.

Secondo lo Studio condotto sull'intera Piana di Livorno è caratterizzata in sostanza da tre zone – si veda **Fig. 27** -:

#### ZONA I

Questa zona presenta due rami leggermente differenziati. Le acque più a valle sembrano essere influenzate di più dal contributo del primo essendo di qualità pressoché identica. L'andamento monte-valle sembra propendere per l'aumento delle diluizioni; verso la parte finale viene raccolto un contributo proveniente anche dalla contigua zona II.

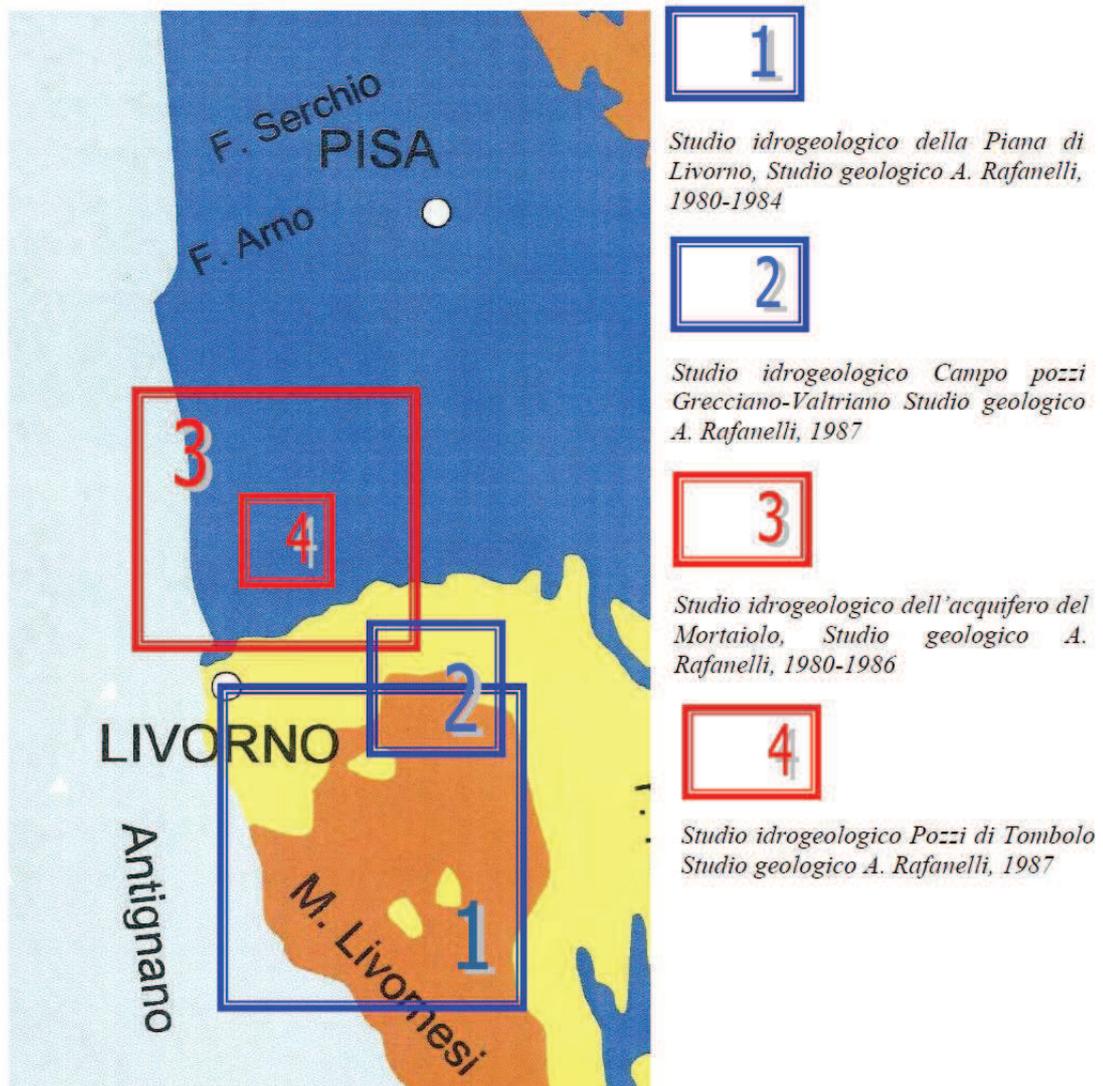
#### ZONA II

In questa zona sono presenti un gruppo di acque molto affini; tra loro si riscontrano solo lievi anomalie con impoverimento di magnesio fissato forse dai fosfati, singolare è il caso del punto 284 riconducibile ai tipi della stessa zona solo mediante aggiunta di magnesio e solfati, forse epsomite ( $MgSO_4$ ) derivato dall'ossidazione dei solfuri in presenza di detriti ofiolitici o comunque ricchi in magnesio. Non è definibile in maniera chiara una diluizione o meno nella direzione monte-valle.

#### ZONA III

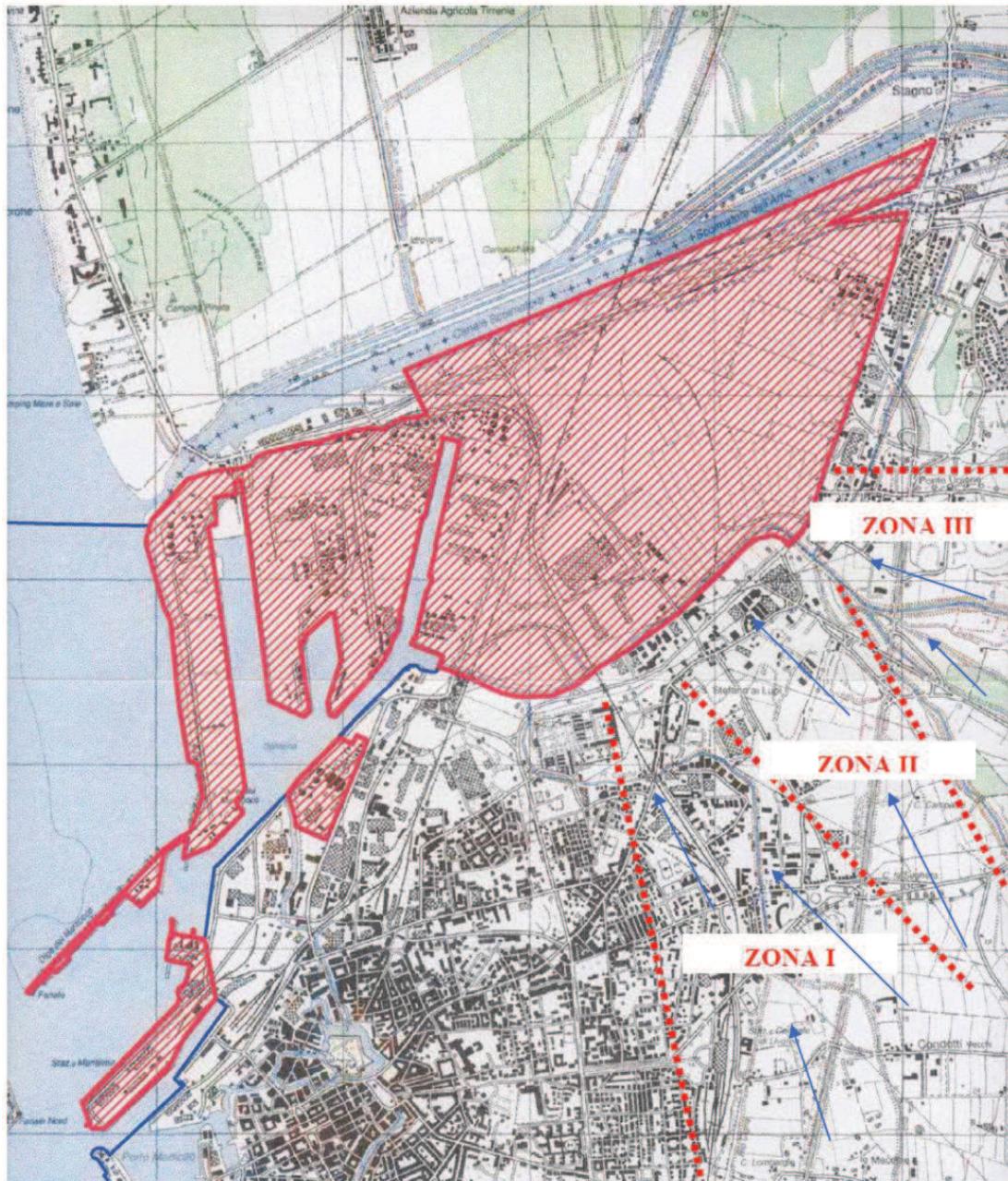
In questa zona la minore velocità di scorrimento del corpo idrico permette una maggiore influenza del mezzo di scorrimento. E' possibile distinguere due tipi di acque: quelle individuate nei punti 268-266 e quelle individuate nei punti 255-

**Fig. 26** Studi a valenza idrogeologica svolti nell'area contigua al SIN  
Fonte Bibliografica: Studio A. Rafanelli 1980-2000





**Fig. 27** Zone di circolazione idrica preferenziale Piana di Livorno  
Fonte Bibliografica: Studio Idrogeologico della Piana di Livorno, 1980-1986, Studio A. Rafanelli



**N.B.:** Le zone di circolazione preferenziale schematizzate in questa Tavola derivano dal lavoro che lo Studio A. Rafanelli ha condotto sulla Piana di Livorno e che è stato sintetizzato nella Relazione

265-282; le prime sono molto dure, alcaline e ferruginose, nettamente influenzate dalla Tora, le seconde sono ancora analoghe a quelle provenienti dalle ofioliti. Entrambe queste acque presentano un netto aumento di concentrazione da monte verso valle. Un gruppo di pozzi situato in questa zona tra Stagno ed il Torrente Ugione (Punti d'acqua: 257, 264, 266, 267, 268, 275) presentano concentrazioni in ferro e manganese medio-alte, fino a 2,5 mg/l, il tutto accompagnato da un'ossidabilità relativamente alta. La spiegazione è piuttosto difficoltosa per la mancanza di ulteriori analisi, tuttavia una spiegazione plausibile potrebbe essere la presenza nella falda di livelli torbosi e ghiaie contenenti manganese che conferirebbero a queste acque una qualità pessima sotto il profilo naturale.

#### **5.4 Studio idrogeologico campo pozzi in Località Grecciano**

Nel lavoro eseguito dallo Studio Geologico A. Rafanelli a supporto della domanda di ricerca idrica ad uso potabile in Località Grecciano, Collesalveti – LI si veda Punto 2 nella **Fig. 26** – si mette in evidenza la sequenza stratigrafica di una serie di perforazioni spinte mediamente sino alle profondità di circa 200 m. da piano campagna ed indicano al di sotto di spessori decametrici di argille e limi argillosi fluvio-lacustri rinvenuti sino alle profondità di circa 30-40,00 m. la presenza di due orizzonti acquiferi.

Il primo orizzonte acquifero, localizzato mediamente tra i 30,00 ed i 40,00 m. da p.c. con potenza media intorno ai 10-15,00 m. è rappresentato dal già conosciuto deposito fluviale ghiaioso del Paleo-Arno e Serchio allorquando questo fiume sfociava nella Pianura dell'Arno in corrispondenza dell'area occupata dal Padule del Bientina durante la fase glaciale Wurm II.

Il secondo orizzonte che si rinviene in genere al di sotto dei 50,00 m. da p.c. sino alle profondità di 150-160,00 m., risulta costituito da alternanze di depositi prevalentemente sabbiosi e argillosi a stratificazione lentiforme (falda multistrato). Al di sotto di tali profondità si rinvencono sedimenti prevalentemente argillosi.

L'esatta collocazione cronologica dei depositi sede di scorrimento idrico è alquanto incerta, infatti dall'analisi paleontologica eseguita sulle frazioni più fini di detti depositi (A.Bossio, 1987) a profondità comprese tra i 77,00 ed i 103,00 m. dal p.c., a causa della presenza di faune poco indicative, ha fornito solo informazioni per la ricostruzione dell'ambiente di deposizione di questi sedimenti:

trattasi di un ambiente marino costiero poco profondo soggetto a rapida regressione che ha portato ad istaurarsi di un ambiente di acqua dolce.

L'area potrebbe quindi corrispondere alle paleo-rive del bacino continentale lacustre del Quaternario le cui modalità di sedimentazione nelle zone hanno determinato la deposizione "lentiforme" caratteristica delle alternanze sabbio-argillose rinvenute.

Sotto il profilo squisitamente idrogeologico la conoscenza geologica induce quindi ad affermare che sino alla profondità di 150-200,00 m. dal p.c. si rintraccia la presenza di due orizzonti acquiferi già descritti sinteticamente tra i quali risulta sempre interposto un "setto" argilloso-argillolimoso scarsamente permeabile (acquicludo).

La continuità di questo livello, per l'estensione dell'area studiata è certa e validata dai sondaggi tuttavia anche nel caso di "contatti locali" tra i due acquiferi, la possibilità di una loro interferenza idraulica risulta piuttosto dubbia a causa della notevole differenza di granulometria e quindi di permeabilità (per le ghiaie  $10^{-2}$  cm/sec., per le sabbie da  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$  cm/sec.).

Infatti i risultati delle prove di portata eseguite sui nuovi pozzi e le prolungate osservazioni dei livelli dinamici nei pozzi relativamente ai due orizzonti acquiferi hanno comunque rivelato che i due sistemi risultano essere idraulicamente ben distinti, sia per il diverso bacino di alimentazione che, a causa della notevole differenza di permeabilità, per le modalità con cui avviene la loro ricarica.

### **5.4.3 Studio idrogeologico dell'area di Mortaiolo**

Lo "*Studio idrogeologico per la definizione della potenzialità idrica della zona di Mortaiolo*" (1981-1984) che prendeva in considerazione un'area che si estendeva come margine ovest verso Marina di Pisa, a Nord verso Pisa con un margine più orientale verso Cascina e Ponsacco, e con margine meridionale posto alle propaggini delle Colline Livornesi ed al Torrente Ugione è possibile constatare che nell'area in studio non furono censiti pozzi ritenuti troppo superficiali riferibili alla falda "schiettamente freatica", sia per il loro scarsissimo interesse sotto il profilo idropotabile e di uso agricolo sia per la non definibilità geometrica degli acquiferi in quanto in chiara area di transizione con complicazioni estreme dovute all'interdigitazione dei numerosi conoidi riferiti alle aste e all'intensissima attività umana di bonifica storica.

In particolare nei tre pozzi – si veda Punto 3 **Fig. 26** – viene posto in produzione l'acquifero che si ubica in corrispondenza dell'orizzonte ghiaioso esistente a circa 30-33,00 m. da p.c. per uno spessore di circa 5,00 m.. Tale livello è attribuibile al cono di deiezione deposto dal Torrente Tora in età wurmiana. I pozzi sono profondi mediamente 40,00 m., l'acquifero in produzione si collega tramite le paleoalluvioni del Tora al sistema di Mortaiolo; in questa zona la potenzialità idrica è molto limitata poiché la ricarica è legata quasi esclusivamente all'apporto del bacino del Torrente Tora.

In **Tabella 13** sono stati riassunti alcuni dati provenienti dalle analisi di laboratorio effettuati su campioni d'acqua provenienti dal campo pozzi di Mortaiolo.

#### **5.4.4 Studio per la richiesta di deroga ai valori limite dei requisiti chimici delle acque destinate al consumo umano – Zona di Tombolo (PI)**

Nella cartografia in **Fig. 26** al Punto 4 e nel lavoro di sintesi si evidenzia che sono in produzione due tipi di acquifero entrambi in condizioni di artesianità (scorrimento confinato): uno posto in corrispondenza di una coltre di ghiaie che si ubica mediamente intorno ai 45,00 m. di profondità con spessore di circa 10,00 m. e l'altro separato stratigraficamente dalle ghiaie mediante un setto argilloso pressoché continuo ricollegabile a lenti sabbiose in numero di 2 o 3 orizzonti che si ubicano tra i 60,00 m. ed i 130,00 m. da p.c..

I pozzi in ghiaia sono mediamente profondi 50,00 m., i pozzi nelle sabbie raggiungono mediamente i 140,00 m. da p.c.. I due acquiferi in produzione sono tra loro indipendenti sia stratigraficamente che idraulicamente a causa della notevole differenza di permeabilità. Ciò determina una diversità tra i due sistemi in ordine ai tempi di ricarica ed anche di sfruttamento conferendo alla Centrale ex EAT una disponibilità idrica articolata. Le acque nei pozzi sulle ghiaie di primo livello presentano tuttavia valori molto elevati di solfati > 400 mg/l. e di Sodio > 110 mg/l. -.

#### **5.4.5 Sintesi sugli aspetti idrogeologici dei contesti contigui all'area**

Dall'analisi dei contesti contigui si possono trarre le seguenti conclusioni:

- a) Dal Terrazzo di Livorno le acque sotterranee che interferiscono con l'area in studio ed in particolare con una ricarica individuabile da Sud verso Nord, nelle

**Tabella 13:** Analisi delle acque di pozzo in Località Tombolo e Mortaiolo  
da: Studio idrogeologico per la disponibilità idrica di Mortaiolo, Studio A.Rafanelli, 1984-1986

Determinazioni	Acqua di Pozzo Tombolo 1	Acqua di Pozzo Tombolo 2	Acqua di Pozzo Mortaiolo
Colore	assente	nd	assente
Odore	Leggero di idrogeno solforato	nd	assente
Sapore	metallico	nd	Legg. metallico
Torbidità	assente	nd	assente
Temperatura	18°C	nd	21°C
PH	6,8	6,9	6,6
Conducibilità elettrica	1.980	2.110	1.110
Durezza totale F	104	nd	58
Residuo fisso	1.678	nd	715
Ossigeno disciolto	55	nd	80
Ossidabilità	0,5	nd	0,4
Alluminio mg/l	n.d.	nd	nd
Calcio Ca mg/l	128	nd	184
Cloruri Cl mg/l	163	202	78
Magnesio Mg mg/l	96	nd	66
Potassio K mg/l	8,60	nd	2,40
Sodio Na mg/l	111	nd	62
Solfati SO <sub>4</sub> mg/l	440	nd	40
Silice SiO <sub>2</sub> mg/l	35	nd	25
Azoto ammoniacale NO <sub>4</sub> mg/l	0,35	0,40	tracce
Azoto nitrico NO <sub>3</sub> mg/l	1,90	nd	3
Azoto nitroso NO <sub>2</sub> mg/l	assente	tracce minime	assente
Boro B mg/l	assente	nd	assente
Cloro residuo mg/l Cl <sub>2</sub>	assente	nd	assente
Fenoli C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH mg/l	assente	nd	assente
Ferro Fe mg/l	0,95	2,30	0,10
Fluoro F mg/l	0,05	nd	0,12
Fosforo totale P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	assente	nd	assente
Idrogeno solforato	tracce	nd	assente
Idrocarburi disciolti	assente	nd	assente
Manganese Mn mg/l	0,89	0,80	0,94
Rame Cu mg/l	assente	nd	assente
Zinco Zn mg/l	tracce	nd	tracce
Arsenico As mg/l	assente	nd	assente
Cadmio Cd mg/l	assente	nd	assente
Cianuri CN mg/l	assente	nd	assente
Cobalto Co mg/l	assente	nd	assente
Cromo Cr mg/l	assente	nd	assente
Mercurio Hg mg/l	assente	nd	assente
Nichel Ni mg/l	assente	nd	assente
Piombo Pb mg/l	assente	nd	assente
Durezza Totale mg/l	416	104	232

zone del bacino del Rio Cigna e del Cignolo sono in generale calcico-carbonatiche con apporti cloro alcalini; verso Nord il sistema idraulico composto dal Torrente Ugione e *dall'Acqua Puzzolente* apporta acque di qualità cloro alcaline verso l'Ugione, ma acque calcio carbonatiche a prevalenza solfatica verso *l'Acqua Puzzolente*.

- b) Il gradiente dell'acquifero superficiale presente nel terrazzo e che in genere è posto ad una quota superiore della Piana di studio, verso l'entroterra è piuttosto debole, ma tende ad aumentare in vicinanza del bordo geomorfologico.
- c) I contesti studiati al di fuori del Terrazzo di Livorno ed ubicati nel corridoio paleogeografico dell'Arno indicano la presenza di un acquifero produttivo posto nei Conglomerati dell'Arno e del Serchio (il nostro Orizzonte 4 talvolta rintracciato nei sondaggi più profondi) tendenzialmente rintracciato più in profondità (50-60,00 m.).
- d) L'acquifero rintracciato entro i livelli meno profondi dei Conglomerati dell'Arno e del Serchio mostra livelli di qualità mediamente scarsi con presenza di solfati, manganese e ferro a livelli decisamente importanti.
- e) Anche l'acquifero posto in genere al di sopra delle "inghiaiate" dell'Arno e del Serchio non sono particolarmente produttivi ed in genere anche in questo caso si mostrano in maniera disordinata e molto variabile da zona a zona, segno evidente della trasformazione paleogeografica piuttosto dinamica che ha segnato la sovrapposizione di stili stratigrafici diversi tra loro.

## 5.5 Analisi degli scorrimenti superficiali

### Lo Scolmatore d'Arno

Lo Scolmatore che si stacca dall'Arno in corrispondenza di Pontedera e sfocia in mare immediatamente a Nord del Porto di Livorno, può derivare fino a 1.400 mc./sec., contribuendo in maniera determinante alla riduzione del rischio idraulico dovuto alle piene dell'Arno di tutta la zona a valle di Pontedera fino alla foce ed in particolare alla riduzione del rischio idraulico della città di Pisa.

Il tratto di litorale compreso tra Tirrenia ed il Porto di Livorno è in forte continuo avanzamento almeno dal 1823; questo avanzamento della linea di riva è stato mediamente di oltre 400 metri (fino a 450-460 m.) in corrispondenza dell'attuale foce dello Scolmatore che oggi si trova in una zona soggetta a insabbiamento.

A Nord dell'area in studio scorre il Canale Scolmatore d'Arno, i cui argini sono posti a quota +4.88 m. con una piena massima prevista di 1450 mc/s e quota

massima del pelo libero di 3.88 m.m, in corrispondenza della linea mediana centrale del bacino.

A sud, scorre il Fosso dell'Acqua Salsa che nasce dalle colline a nord di Nugola e che dopo aver ricevuto in sinistra l'apporto di piccoli corsi collinari tra Nugola Vecchia e Suese confluisce nello Scolmatore vicino alla foce, dopo l'abitato di Stagno. Il corso d'acqua è dotato di quote arginali intorno ai 2,00 metri, una portata massima defluente nelle condizioni attuali di 9,00 mc/s e franco di sicurezza molto basso; è stato però alleggerito della portata del tributario Fosso delle Chiaviche, che viene avviato all'impianto idrovoro.

La gran parte della piana è stata soggetta fino a tempi recenti a frequenti allagamenti e ristagni a motivo della bassa giacitura dei terreni; si verificava infatti che il livello del pelo libero dei ricettori finali fosse a quote comparabili con quelle del bacino di Guasticce ed anche superiori in caso di piena. A ciò si aggiungeva il fenomeno della tracimazione dei canali provenienti da monte, l'Antifosso di Fattoria ed il Tora Vecchia.

### **Il Torrente Ugione**<sup>39</sup>

Il corso d'acqua delimita il confine tra i comuni di Collesalveti e di Livorno, ed il bacino imbrifero si sviluppa a Nord e ad Est di Livorno, confinando a Nord con il bacino dell'Acqua Salsa, che sfocia nello Scolmatore d'Arno, e quindi ad Est con il bacino del Rio Morra e del Rio Tanna, affluenti del Torrente Tora. A Sud è delimitato dal bacino del Rio Maggiore, mentre ad Ovest confina con l'area urbana della città di Livorno.

La linea spartiacque ha una lunghezza complessiva di circa 239.5 km.. Prendendo il via dalla foce e procedendo in senso orario, la linea spartiacque tocca la zona industriale, dove è insediata la ENI Petroli, ed attraversa Ponte Ugione; quindi seguendo un andamento verso est, passa per Colle dei Ghiacci (55 m), Poggio al Tesoro (78 m), Poggio ai Fichi (86 m).

Quindi, seguendo un andamento in direzione Ovest, coincide con la linea spartiacque del Rio Maggiore, fino alla ferrovia Pisa-Roma. Qui, la linea spartiacque si dirige verso nord seguendo la ferrovia stessa e si chiude presso il

---

<sup>39</sup> Studi del Consorzio di Bonifica Fiumi e Fossi di Pisa e note di altri tecnici specialisti

porto industriale. L'intero bacino, rivestito di boschi cedui nella parte montana e con carattere prevalentemente agricolo nell'ampia zona valliva, si trova in buone condizioni e con limitati movimenti franosi e smottamenti.

L'area totale dell'intero bacino è pari a  $S=34.70$  kmq.. A partire dall'origine, sotto il Poggio delle Vaccaie, una volta aggirato il Poggio Corbolone (q. 270 m s.l.m.) si presenta dopo circa 8,00 Km al ponte alla Via Ajaccia, dove inizia il tratto arginato vero e proprio. Un tratto di 2.16 Km che riceve in sinistra il contributo del Rio Puzzolente (il cui sviluppo è di circa 6 km). a breve distanza, 237 m, verso valle in destra, è presente lo scarico dei tubi di mandata dell'idrovora del Cateratto. Dopo ancora 1.91 Km, si immette, sempre in sinistra, il Rio Cigna (sviluppo 8.75 Km). Non rimangono che 400 per arrivare allo sbocco nella Darsena. Complessivamente quindi l'Ugione ha un corso di circa 12.7 Km..

Il Torrente Ugione corre parallelo a strade provinciali solamente lungo brevi tratti di pianura; nel tratto montano è difficilmente raggiungibile e solamente in alcuni punti vi sono strade carreggiate e campestri che offrono la possibilità di arrivare fino all'alveo.

Tra gli affluenti di destra, che peraltro hanno un'importanza limitata sui deflussi del torrente Ugione, il primo è costituito dal Rio Vallelunga di Suese, con un bacino di area  $S = 2.40$  kmq. e con un alveo lungo 3.80 km, il quale raccoglie le acque relative alle pendici di Poggio ai Fichi.

Proseguendo verso monte, non vi sono più affluenti lungo la sponda destra, e l'alveo principale del torrente Ugione corre assai vicino alla linea spartiacque che da monte Masso va in direzione sud fino al Poggio ai Tre Molini. Gli affluenti di sinistra sono molto più importanti; partendo da mare, ad appena 500 m circa dalla foce, in corrispondenza della località dove si trova il Cimitero di S.Stefano ai Lupi, vi è la confluenza con il Rio Cigna, che a sua volta riceve il contributo del Rio Cignolo. Il sottobacino del Cigna (vedere di seguito) ha un'area di circa  $9$  km<sup>2</sup>, mentre l'alveo ha una lunghezza pari a circa 8,00 km. Quindi, subito prima del ponte sull'Aurelia, vi è la confluenza di un secondo importante affluente, il Rio dell'Acqua Puzzolente, che a sua volta ha un reticolo idrografico molto articolato, ricevendo in destra il contributo del Rio Vallelunga, del Rio Paganello e del Rio del Lupo. L'intero sottobacino

dell'Acqua Puzzolente si sviluppa sopra un'area complessiva di 11.60 km<sup>2</sup>, con un alveo di lunghezza  $L = 5.90$  km.

Infine, a monte il torrente Ugione riceve il contributo del Botro dell'Arme, con un bacino di 1.1 km<sup>2</sup> ed una lunghezza dell'alveo di 2.2 km. La "densità di drenaggio" dell'intero bacino, pari al rapporto tra la somma complessiva delle lunghezze di tutti i corsi d'acqua che compongono il reticolo idrografico e l'area del bacino stesso, è più bassa rispetto a corsi d'acqua limitrofi.

Il bacino del torrente Ugione si sviluppa infatti sopra un'area che ha bassi rilievi e che si presenta con un'ampia zona di valle di natura relativamente più permeabile degli altri bacini del livornese. I terreni di collina si presentano con una buona copertura vegetale, ma la capacità d'immagazzinamento è bassa.

La pendenza del torrente Ugione, eccettuato un breve tratto montano, è contenuta entro limiti relativamente ristretti, con una pendenza media pari a 0.015. Il coefficiente di uniformità  $F$  è uguale a 1.40. Tale valore basso di  $F$  testimonia la notevole uniformità del bacino del torrente Ugione, che infatti si presenta abbastanza vicino alla forma ideale circolare, con coefficiente di uniformità unitario.

L'altezza media  $H_m$  del bacino del torrente Ugione è di 73.90 m.. L'Ugione scorre in gran parte in zone di basse colline ed in zone pianeggianti. Più dei 3/4 del bacino dell'Ugione si trova al di sotto dei 100 m s.l.m.. Il tronco arginato terminale passa con la sponda destra l'abitato di Ponte Ugione, per attraversare poi la vasta area industriale fino allo sbocco in mare che avviene alla Darsena Ugione, all'interno del Porto Industriale.

Il valore del tempo di corrivazione alla foce, in conseguenza del basso valore di  $H_m$ , risulta abbastanza elevato e pari a  $T_c=6.26$  ore. L'Ugione presenta un carattere tipicamente torrentizio ed è molto sensibile a piogge di breve durata ed intense (da 1 a 3 ore).

Dal punto di vista idraulico il bacino è suddivisibile in tre sottobacini principali: dell'alto Ugione, con sezione di riferimento alla Via Ajaccia, superficie di 12 Km<sup>2</sup>; del Rio Puzzolente, con sezione di chiusura allo sbocco dell'omonimo torrente, superficie di 13.1 Km<sup>2</sup> (la cima più alta è il monte La Poggia a quota di 384 m s.l.m); del Rio Cigna, con sezione di chiusura all'ingresso della zona urbana, superficie di 3.8 Km<sup>2</sup> (la cima più alta è a quota

295 m s.l.m). A questi, che compongono il bacino idrografico naturale dell'Ugione, deve essere aggiunto il bacini del fosso Cateratto, in passato tributario del bacino dell' Acqua Salsa. Il collegamento avviene in via artificiale, attraverso il funzionamento di un impianto idrovoro.

#### **4.6.3 Rio Cigna**<sup>40</sup>

Il Rio Cigna, ultimo tributario di sinistra del Torrente Ugione, presenta un bacino imbrifero di forma allungata, ubicato ad est della città di Livorno. Il bacino è delimitato ad ovest dalla linea ferroviaria Pisa-Roma ed è compreso tra i bacini del Rio Maggiore a sud ed il bacino del Rio dell'Acqua della Puzzolente, tributario dell'Ugione, a nord-est.

La topografia del bacino è caratterizzata da due zone ben distinte. Infatti si hanno aree a sensibile pendenza e quindi limitati tempi di corrivazione nella parte collinare fino alla isoipsa di 50 m ed aree a debole pendenza e tempi di corrivazione più elevati nella zona a mare.

La parte del bacino collinare si trova in buone condizioni, rivestito in parte di boschi cedui a rotazione regolare. Tale zona non presenta problemi di disordine idraulico, ne fenomeni di smottamenti e franamenti. Anche i fenomeni di erosione delle pendici sono di entità limitata, per cui l'alveo presenta un trasporto solido di scarsa consistenza.

La utilizzazione dei terreni di gran parte del bacino, ha carattere di natura prevalentemente agricola con scarsa copertura vegetale. Peraltro, negli ultimi anni, una sempre più consistente zona di valle è stata urbanizzata ed è stata interessata da infrastrutture insediative di vario genere, le quali hanno alterato sensibilmente la originaria fisionomia del Rio Cigna, che nell'asta di valle, da corso d'acqua naturale, è divenuto un canale di drenaggio delle acque meteoriche. Il reticolo idrografico del bacino, in verità non molto articolato, è fondamentalmente caratterizzato da due sole aste: Rio Cigna e Rio Cignolo. Il Rio Cignolo confluisce nel Rio Cigna a valle della Via della Padula, all'altezza del cavalcavia ferroviario posto subito a nord della stazione.

---

<sup>40</sup> Studi di tecnici specialisti eseguiti per il Comune di Livorno e per la Regione Toscana-Genio Civile di Livorno.

L'area del bacino è di  $S=8.844 \text{ km}^2$ , la lunghezza dell'asta è  $L=7.00 \text{ km}$  e l'altezza media  $H_m=38.0 \text{ m}$ . Il coefficiente di deflusso, stimato secondo le tabelle di Beinard, risulta  $C=0.70$ .

## 5.6 La campagna di rilevamento idrogeologico

Partendo dalla carta dei dati di base - si veda **TAV. 6** "*Dati di base idrogeologia*" e dopo aver condotto una campagna rivolta alla conoscenza ed alla validazione dei Punti d'Acqua dislocati nell'area è stata condotta una nuova discretizzazione per il conseguente rilevamento idrogeologico. Questa nuova fase ha comportato una selezione dei 165 Punti d'Acqua: sono stati scelti e preferiti quelli ubicati in una migliore posizione strategica, mentre sono stati scartati dalla maglia virtuale i Punti d'Acqua vicini tra di loro, ritenuti non significativi o superflui.

I Punti d'Acqua utilizzati per la campagna di rilevamento idrogeologica sono stati rappresentati in **TAV. 6** "*Dati di base idrogeologia*". Dal lavoro di discretizzazione condotto sui punti disponibili sono stati ottenuti complessivamente 74 postazioni ubicate su piezometri e 6 postazioni posizionate su acque superficiali le cui profondità sono state riassunte nella **Tabella 14**:

**Tabella 14:** Profondità dei Punti d'Acqua selezionati

	Superficiale	Profondità < 10 m.	Profondità 11-20 m.	Profondità >20 m.
Punti d'acqua	6	51	16	7

Questo ha permesso di eseguire le seguenti operazioni di rilevamento durante la campagna che è iniziata in data 27 giugno 2006 e si è conclusa in data 14 luglio 2006<sup>41</sup>.

- a) Misurazione tramite sistema GPS di alta precisione (Tolleranza strumentale 2 cm.) con strumento TOPCON ( due GPS con ricezione simultanea di n.18/24 satelliti) delle quote assolute del bocca pozzo dei singoli Punti d'Acqua;
- b) Misurazione del livello delle acque sotterranee mediante freatimetro sonico di precisione (Tolleranza strumentale 2,5 cm.);

<sup>41</sup> La campagna di misurazione è stata eseguita per completare lo Studio Idrogeologico dell'area perimetrata come Sito di Interesse Nazionale dal Ministero dell'Ambiente (D.M. 24.02.2003).

- c) Misurazione di conducibilità elettrica, pH e Temperatura con Sonda multiparametrica HI 991300 e HI 991301 della Hanna Instruments
- d) Prelievo campioni d'acqua in contenitori sterili ed avvio al laboratorio per le determinazioni fisico-chimiche Anioni-Cationi.

### 5.6.1 Livelli degli acquiferi

Dall'esame dei dati ricavati durante la campagna di rilevamento dei livelli è stata predisposta la **TAV. 8** "*Carta dei livelli degli acquiferi*" dalla quale si evidenziano:

- a) Una zona appartenente all'AREA 1 nel Dominio occidentale [(si veda successiva **TAV. 9** "*Schema delle principali componenti del sistema idrogeologico (aree di ricarica, domini idrogeologici, settori idrogeochimici)*", di seguito illustrata) e caratterizzata dalla presenza di numerose opere marittime (banchinamenti, palancolate, etc.)] che delimitano i canali portuali e nella quale non viene riconosciuta di fatto una falda con caratteristiche idrogeologiche compiute. Per questo motivo in ogni Punto d'Acqua è stata restituita la quota s.l.m.m. del livello dell'acquifero senza costruire linee di isolivello;
- b) Una parte del Dominio Orientale, costituita dalle tre aree (1, 2 e 3) dove per natura stratigrafica, evoluzione delle forme e dei fatti storici si riconosce invece un acquifero multi-sistema composto da:
  - Un acquifero freatico entro i primi 10-12,00 m. di spessore;
  - Un acquifero medio entro i 18-20,00 m. talvolta confinato dall'acquifero superficiale talvolta con caratteristiche di semi-confinamento e con rari collegamenti con quello più superficiale. (Nella fattispecie occorre evidenziare che la sezione idrogeologica tipo mostra una generale condizione di bassa permeabilità);
  - Un acquifero più profondo, oltre i 28-30,00 m. confinato allo spessore dei Conglomerati dell'Arno e del Serchio e non collegato idraulicamente ai precedenti due.

Per l'acquifero superficiale si evidenzia un comportamento idrogeologico tipicamente freatico, libero; esso risente in maniera consistente della ricarica gravifica ed è limitato verso il basso dalla presenza di spessori a conducibilità idraulica bassa o molto bassa. Dall'analisi della Planimetria dell'acquifero

superficiale si individuano isolinee con l'intervallo massimo tra livelli posti a +1,00 m. s.l.m.m. e livelli posti a -0,80 m. s.l.m.m.

In riferimento alla falda superficiale nella parte contigua al Canale Industriale si riscontra un appiattimento delle isofreatiche con andamento parallelo alla banchina con un *bulbo* di massimo posto in pratica sulla testa del Canale lato Nord; l'effetto prodotto da questa opera marittima (tipo effetto barriera) è chiaro e conclamato dalle rilevazioni dei livelli che inducono ad ammettere un interscambio più diretto con le acque marine e comunque un effetto di rialzo idraulico.

Verso la parte Nord-Orientale si rintracciano dei bassi relativi con modesti gradienti, mentre sulla base del Terrazzo e nello specifico sulla curva del Torrente Ugione si ritrova un aumento dei livelli presumibilmente dal Terrazzo o dal subalveo del sistema Ugione-*Acqua Puzzolente*.

Dall'incrocio delle informazioni stratigrafiche, degli orizzonti lito-stratigrafici omogenei e dalle sezioni idrogeologiche (si vedano le **TAVV. 3A, 4, 6 e 7**) per il primo acquifero superficiale si ricava uno spessore non continuo variabile dai 4-5,00 m. fino agli oltre 12,00 m.. Considerando che le permeabilità in gioco sono piuttosto modeste (Grado Basso) con un trend generale posto tra valori  $3 \times 10^{-3}$  e  $3 \times 10^{-5}$  cm/sec si riesce a determinare una forbice di trasmissività dell'acquifero libero variabile tra 1,5 ed 15 cmq/sec. con un sensibile aumento dei valori sugli spessori più importanti fino ai 3,6-36 cmq./sec.

In relazione all'acquifero *medio* in effetti questo non mostra particolari differenze di comportamento idraulico rispetto al precedente acquifero libero; spesso si trova semi-confinato fino quasi ad un confinamento completo rispetto alla falda sovrastante, rispetto alla quale mostra sempre un livello piezometrico più alto; questa evenienza suggerisce l'ipotesi che lo scorrimento "mesoprofondo" possa avere una relativamente più cospicua energia di ricarica che, comunque, ove si abbia un passaggio stratigrafico fra i sistemi *meso* verso il più superficiale, idraulicamente è tendenzialmente questo che alimenta il sovrastante.

In riferimento all'acquifero profondo, ( quello di pertinenza dei conglomerati PaleoArno-Serchio) si nota un relativo aumento di livello subito ad Ovest dell'abitato di Stagno ed un gradiente estremamente basso verso l'argine in destra idraulica dello Scolmatore d'Arno.

Analizzando le stratigrafie l'aumento dei livelli è causato ad un incremento dello spessore dei Conglomerati dell'Arno e del Serchio che può generare una maggiore pressione verso l'alto in risalita.

## **5.7 Il chimismo delle acque sotterranee**

Nel corso di questo studio si è ritenuto opportuno integrare le conoscenze acquisite, attraverso l'utilizzo di indagini di tipo geochimico. Questi tipi di prospezione presentano molteplici vantaggi. Anzitutto risultano essere applicabili in qualunque momento, sono poco onerose e permettono di affrontare una ricerca con differenti gradi di approfondimento. L'approccio geochimico consente di ricostruire i differenti circuiti idrodinamici sotterranei, di individuarne le aree di alimentazione, i drenaggi preferenziali e gli eventuali mescolamenti fra acque di origini differenti.

### **5.7.1 Esiti delle elaborazioni analitico-chimiche**

Lo studio è stato condotto predisponendo in una prima fase un *Censimento* iniziale dei punti d'acqua dell'area di Livorno a cui è seguita la misura di tre parametri fisici: temperatura, pH e conducibilità elettrica.

Ciò ha consentito di effettuare una cernita dei punti significativi per la *Campagna*, avvenuta nell'ambito della seconda fase, durante la quale sono stati raccolti dei campioni d'acqua su cui sono state effettuate analisi chimiche (determinazione degli ioni principali ed elementi in traccia).

Anzitutto è sembrato opportuno conoscere la qualità delle acque superficiali in relazione ai parametri chimico-fisici da noi ricercati nelle acque sotterranee al fine di valutare le eventuali interazioni tra i circuiti superficiali e quelli sotterranei.

Dei sei campioni analizzati, tre sono stati raccolti lungo il Canale Scolmatore dell'Arno e tre all'interno dell'area portuale - si rimanda alla **TAV. 6** -. I risultati hanno reso evidente il fenomeno di ingressione marina all'interno del Canale Scolmatore, la cui intensità decresce con l'allontanarsi dalla costa.

Per quanto concerne il Dominio occidentale dell'area in esame, sono state effettuate analisi in piezometri (sia isolati che in batterie), di profondità differenti, anche superiori ai 15 metri dalle quali emerge una fondamentale anisotropia ed

assenza di un corpo che possa essere definito un acquifero strutturato. Le acque rinvenute in tale ambito presentano caratteristiche eterogenee, variando da acque di probabile origine marina ad acque di infiltrazione e quindi di tipo meteorico.

L'acquifero superficiale è stato suddiviso in sette aree, denominate *Settori di Flusso* – si veda **TAV.9** “*Schema delle principali componenti del sistema idrogeologico (aree di ricarica, domini idrogeologici, settori idrogeochimici)*” - Tali ipotetici settori sono stati individuati alla luce delle sezioni idrogeologiche elaborate e secondo le perpendicolari alle isolinee di soggiacenza ottenute durante il *Censimento*.

A livello di famiglie di acque, le analisi hanno rivelato un'eterogeneità - si vedano fig. da 5 a 8 - *Allegato 1* -; il *range* qualitativo oscilla da: acque di natura bicarbonato-calcica, a solfato calcica, fino a clorurato sodica quest'ultima di origine evidentemente marina; tutte le famiglie sono comunque accomunate da un elevato grado di mineralizzazione come emerge dalla lettura dei *Diagrammi di Schoeller-Berkaloff* - si vedano fig. da 9 a 13 – *Allegato 1* - e dai parametri fisici - si veda fig14 – *Allegato 1* -.

Dalla distribuzione degli ioni principali, rispetto alle distanze dalle aree di ricarica, *non appaiono segni di particolari evoluzioni geochimiche*, probabilmente in ragione del fatto che questo primo corpo idrico sotterraneo non risulta essere un sistema chiuso (si veda fig 19 – *Allegato 1*-. La correlazione tra salinità totale e concentrazioni parziali di Ca-HCO<sub>3</sub> e Na-Cl, avvalorata la tesi delle differenti ricariche o dei successivi mescolamenti delle acque di questo acquifero (si veda fig. 18 *Allegato 1* -.

L'acquifero più profondo, ossia quello che si rinviene entro l'Orizzonte 4 (Conglomerati dell'Arno e del Serchio), è stato suddiviso in un numero di settori inferiore a quelli dell'acquifero superficiale in funzione dell'esiguo numero di punti d'acqua a disposizione.

Le famiglie di acque di questo sistema di acquiferi, appartengono ad un'unica *facies* clorurato-sodica - si veda fig. 22 – *Allegato 1* -, ad eccezione del punto 294 e del 251.

Il 294 può essere classificata come un'acqua bicarbonato sodica, la cui natura può essere ricondotta alla posizione del piezometro, situato nella *zona dunale* di Stagno ad una profondità di 27,00 m., dove quindi non è ancora avvenuto il *mélange* con l'acqua marina.

Il 251, che intercetta il sistema acquifero del *Terrazzo* a circa 12,00 metri di profondità, invece ha una natura bicarbonato calcica (concordando con gli esiti dei vari studi tematici e specialistici condotti nelle aree limitrofe). Tali deduzioni risultano anche in accordo con i differenti gradi di mineralizzazione di questo gruppo di acque - si vedano fig. 23 a 26 – *Allegato 1* -.

La caratterizzazione ionica di questo *reservoir* associa una variazione in relazione al progressivo allontanarsi dall'area di alimentazione. A livello cationico, si riscontra un continuo aumento di concentrazioni, che risulta coerente tra i vari settori, mentre per quanto concerne gli anioni, la situazione si presenta più articolata - si vedano fig. 27 e 28 – *Allegato 1* -.

Per questo gruppo di acque sono state inoltre determinate le concentrazioni dello ione bromo (si veda fig. 29 – *Allegato 1* - che divengono sempre più elevate mano a mano che avanziamo verso Nord-Est in sinistra idraulica dello Scolmatore d'Arno dove si riscontrano elevati valori di concentrazione di cloro e solfati e dove si incrementano rapidamente i valori di conducibilità elettrica.

Il confronto Na/Cl -si veda fig. 31 – *Allegato 1* - evidenzia un equilibrio tra i due elementi in accordo con la *sproporzione* Na/Ca e SO<sub>4</sub>/Cl -si vedano fig. 30 e 32 – *Allegato 4* - a suggerire l'origine marina di tali acque.

Tale supposizione è suffragata dai rapporti Br/Cl inferiori a  $3.0 \times 10^{-3}$  uniti ad elevati tenori in cloro - si veda fig. 33 – *Allegato 1* -. I rapporti tra salinità totale e concentrazioni parziali di Ca-HCO<sub>3</sub> e Na-Cl ne confermano ulteriormente la natura marina - si veda fig. 34 – *Allegato 1* -; inoltre durante la ricostruzione delle sezioni idrogeologiche, sono state avanzate ipotesi in merito alla natura confinata o freatica dei sistemi acquiferi, le quali sono state avvalorate dal confronto HCO<sub>3</sub>/pH.

## 5.8 Le componenti idrogeologiche del sistema

Abbiamo già più volte sottolineato che il limite individuato dalla delimitazione dell'area in studio non può avere corrispondenza con dei limiti fisici “finiti” e ben determinati che individuano un *unicum* ambientale di scorrimento/contenimento della risorsa idrica sia in senso longitudinale che verticale, sia per piccole che per grandi profondità.

L'area in esame è infatti ubicata marginalmente rispetto alla grande Piana dell'Arno, infatti risulta posta nella parte più estrema e riguarda soltanto 3-4 Km<sup>2</sup> di estensione per la parte più vicina alla terraferma (Loc. Stagno, etc.). L'altra parte risulta invece di pertinenza esclusiva della zona portuale praticamente immersa in acqua salata ed in cui si rinviene una genesi tipicamente antropica e di recente sviluppo.

Per quanto riguarda l'esistenza storica di sistemi di circolazione idrica sotterranea organizzata nell'area si riconoscono:

- una falda in condizione di confinamento attribuibile allo scorrimento di acqua proveniente da lontano nell'acquifero formato dalle ghiaie poligeniche post-tirreniane che formano uno strato variamente potente ubicato alle profondità superiori ai 30 metri ed oltre. Per dati storici e bibliografici, nonché per misure effettuate già nella zona di Camp Darby – Canale dei Navicelli, Acquedotto ex EAT, analisi eseguite individuavano arricchimenti in Manganese, Ferro e Solfati e perciò fu abbandonata l'idea di realizzare una rete di adduzione. La stessa ASA (Azienda Servizi Ambientali) di Livorno (che era proprietaria dell'ex EAT di Tirrenia) per la fornitura di acqua industriale, preferì ricorrere alle risorse di acque superficiali invece di rendere produttivi questi emungimenti più profondi.
- una falda di superficie di acqua dolce con minima soggiacenza che è alimentata dal sistema dunale, da ricariche provenienti dalla base del Terrazzo morfologico di Livorno, dai sub-alvei, alvei e dai paleo-scorrimenti o dagli scorrimenti attuali dell'Ugione, Cigna e Paleo-Riseccoli, oltre che da ricariche per precipitazioni atmosferiche.

L'area in studio può in generale essere suddivisa in due ampi domini:

1. quello ubicato ad occidente, che è totalmente saturo ed immerso in acqua di mare e che deve le sue origini a successivi episodi prevalentemente antropici di riempimento per la costruzione delle varie opere portuali che a tutt'oggi si continuano ad eseguire come ad esempio i lavori in corso per il completamento della Vasca di colmata;
2. quello posto più ad oriente ubicato dal Canale Industriale fino alla località di Stagno dove le trasformazioni antropiche non sono state così recenti e comunque non hanno alterato – ad esclusione delle parti più superficiali – la struttura sedimentaria alluvionale del dominio.

### **Il Dominio occidentale**

Nella zona dominata dall'ambiente marino - si veda **TAV. 9** "*Schema delle principali componenti del sistema idrogeologico -Aree di ricarica, domini idrogeologici, settori idro-geochimici*" - gli spessori dei sedimenti emersi sono piuttosto eterogenei, geotecnicamente di scarsa qualità in relazione alla varietà del materiale utilizzato e conservano inoltre una persistente memoria salina.

I terreni posti al di sotto del livello medio mare sono saturi d'acqua salata mentre la parte emersa è caratterizzata da stati di saturazione in relazione alle varie tipologie di ricarica identificabili: negli eventi meteorici, negli episodi di eccezionale ondosità, nelle infiltrazioni per perdite dalle linee di urbanizzazione e dai drenaggi sepolti.

La natura della coltre dei terreni che costituiscono la parte emersa recente è eterogenea per natura litologica, assortimento granulometrico e stato di aggregazione costituendo quindi un ammasso assolutamente anisotropo, (disomogeneo) tra zona e zona ( a macchia di leopardo).

Il sistema di circolazione idrica sotterranea per i primi 6,00/8,00 m.da p.c, (ovvero dalla quota banchina sino alla quota assoluta dei -5,00/6,00 m.s.l.m.m.) risente del mezzo variamente poroso che attraversa, non possiede un gradiente determinato e strutturato, non è alimentato da acqua dolce se non per ricarica verticale (pioggia) o per infiltrazione da perdite di linee tecnologiche d'acqua (ove esistono).

Praticamente è confinato dal mare secondo l'allineamento del banchinaggio mediante un sistema di palancole che a seconda della tipologia e materiale utilizzato (tipo Larsen in ferro, in c.a. etc...) svolgono una discreta funzione di separazione idraulica-meccanica tra i due sistemi.

In questa zona non si riconoscono le caratteristiche di una falda strutturata, difatti i livelli di acqua che si rinvencono nei piezometri eseguiti non sono confrontabili e rappresentativi di un sistema organizzato secondo regole di scorrimento e relazione, di contro appaiono scollegati gli uni agli altri come se appartenenti a diverse zone di saturazione.

Per i motivi esposti in questo strato di materiale fortemente per lo più totalmente antropico non si rinviene una falda idrica in scorrimento quanto piuttosto un

insieme di zone di saturazione e ristagno idrico tra loro non comunicanti o poco e, se comunicanti, in maniera discontinua ed irregolare.

### **Il Dominio orientale**

Nella zona ubicata tra il Canale Industriale e Stagno si riconoscono i seguenti sub-ambiti di alimentazione e ricarica:

- una zona di cerniera: Area 1 (sub-ambito 1 in **TAV. 9**) posta tra i due Domini Occidentale ed Orientale, fortemente influenzata dalle lame d'acqua dello Scolmatore e del Canale Industriale.
- una zona più settentrionale: Area 2 (sub-ambito 2 in **TAV. 9**) legata al sistema dei cordoni litoranei e dei tomboli e ad un'alimentazione proveniente dal Terrazzo e dal Paleo-Ugione;
- una zona più meridionale: Area 3 (sub-ambito 3 in **TAV. 9**) legata ad una ricarica proveniente dall'Ugione e dalle acque della Gronda dei Lupi (bordo del Terrazzo);

Il sedimento nell'area è direttamente legato ad una genesi di deposizione naturale che ha conservato la struttura secondo sequenze di ricoprimento successivo con geometrie identificabili secondo l'evoluzione dei vari episodi. Nella parte più superficiale si possono riconoscere delle linee preferenziali di scorrimento idrico sub-corticale (nella transizione zonale saturo-insaturo) indirizzate dalle precedenti trame delle scacchiere di bonifica all'uso dei coltivi sino agli anni immediatamente precedenti allo sviluppo industriale dell'area in esame. Nonostante che le granulometrie naturali e/o artificiali di bonifica ai fini agronomici siano tendenzialmente fini (limi sabbiosi con intercalazioni sporadiche di argille) si riesce a riconoscere un acquifero con un'identità idrogeologica strutturata anche per la zona freatica. Anche in questo Dominio si rileva l'esistenza di intrusioni d'acqua salmastra-salata, provenienti dallo Scolmatore e dal Canale Industriale.

### **5.9 Le aree di alimentazione e/o ricarica**

L'elaborazione dei dati resi disponibili induce a proporre uno schema di sintesi molto realistico sulle zone di alimentazione/ricarica degli acquiferi – si veda **TAV. 9** -:

- Per le ghiaie dei paleo-alvei dei torrenti livornesi la ricarica è individuata nei corsi d'acqua che in parte intagliano il Terrazzo di Livorno e dalla falda instaurata nel Terrazzo medesimo;
- Per le ghiaie del Paleo-Arno si individua una ricarica proveniente dalle interdigitazioni di deposizione ghiaiosa riferibili alle sedimentazioni del Fiume Arno con alimentazione molto orientale ed interna rispetto alla zona in esame;
- Per le sabbie poco addensate con spessori di non oltre 3.00-4.00 m. da piano campagna la ricarica è relazionabile all'evento di piovosità diretta e all'apporto di alveo e di sub-alveo dei fossi e dei canali presenti. Inoltre è necessario considerare che sono ipotizzabili dei deflussi sotterranei occulti, che fanno riferimento ai vecchi sistemi di bonifica ora modificati e/o abbandonati.
- Per le sabbie limose ed i limi organici con fanerogame è possibile individuare uno scorrimento semiconfinato dal loro spessore a copertura dei sedimenti sottostanti più permeabili. Il tetto di questo strato confina inferiormente con lo scorrimento freatico sovrastante delle sabbie poco addensate.

Non trascurabile, infine, è l'azione delle potenziali vie di veicolazione idrauliche sotterranee e/o sepolte che possono essere riassunte in:

- Corpi idraulici superficiali a bassa pendenza e con sbocco diretto a mare (affluenti e/o tributari di torrenti a gerarchia più elevata);
- Canali superficiali con deflussi a cielo aperto, tendenzialmente ricavati dall'azione antropica;
- Canali di deflusso (vecchie fosse camperecce, capo-fossi o fossi di gerarchia minore) sepolti da imbonimenti successivi e bonifiche che hanno ridisegnato i luoghi e che comunque possono permanere come traccia fossile e quindi costituire una preferenzialità di scorrimento sub-superficiale;
- Opere di urbanizzazione di fognatura di acque bianche e nere che rappresentano linee preferenziali di scorrimento indirizzato.

Si rileva che soltanto negli ultimi 50 anni nell'area in esame si sono addensate attività produttive ed industriali, mentre precedentemente la vocazione generale dei luoghi si è trasformata lentamente da incolto sterile e pratica agricola abbandonata fino ad una vocazione zootecnica ed agricola di basso livello in virtù delle operazioni di bonifica effettuate per acquistare suoli emersi.

Di fatto i primi metri di spessore sono quasi sempre costituiti da materiali antropici (Orizzonte Zero) mai caratterizzati da scheletri evoluti riconducibili idraulicamente ad una permeabilità per porosità locale o medio locale.

Questi primi metri hanno tendenzialmente una ricarica idraulica proveniente direttamente dagli apporti meteorici di pioggia (apporto gravifico) che si infiltra verticalmente e si distribuisce secondo le varie geometrie dei riempimenti. Non sono escludibili a priori dei rifornimenti laterali, ma provenienti soprattutto dalle reti idrauliche soffolte o sepolte che sono state riempite o tombate e che contribuiscono in maniera spiccata ad una alimentazione preferenziale che spesso interessa anche i primi metri dell'Orizzonte 1.

Risulta importante ricordare la situazione cartografica intorno agli anni '50 in cui sono ancora ben visibili, specialmente ad oriente della ferrovia le partiture dei campi nella Tenuta di Santo Stefano con orditure estremamente diffuse dei fossi intorno all'asse NW-SE e dei capofossi con allineamento NE-SW, anche se a Nord di Ponte Ugione si rilevano appezzamenti in coltura di vite con partiture più allineate con assi N-S ed W-E.

E' naturale ipotizzare che all'abbandono di queste attività colturali, con i seguenti riempimenti che sono stati effettuati siano rimaste le tracce dell'antico reticolo drenante che può costituire un potenziale asse preferenziale di veicolazione dei fluidi. Si tratta comunque di ricariche eccezionalmente superficiali che escludono un qualsiasi rapporto idrogeologico profondo con gli elementi geomorfologici contigui (rapporti geomorfologici con il Terrazzo di Livorno).

Dicevamo che queste ricariche verticali o laterali derivanti dai vecchi assi drenanti dei corpi idraulici investono anche l'Orizzonte 1 che in pratica rappresenta l'evoluzione del fondo del mare ed una facies di *near-shore* piuttosto recente – se pensiamo alle datazioni effettuate che lo confinano tra i 900 ed i 1.200 anni fa -.

Dall'Orizzonte Zero tendenzialmente permeabile (anche se è chiaro pensare alle numerose superfici rese impermeabili dalle pavimentazioni industriali ) le acque si dispongono per gravità all'attraversamento dei terreni dell'Orizzonte 1 in cui si rilevano anche ricariche di agenti fluviali più importanti sia su mediocri livelli alluvionali laterali, sia sulle paleo-superfici di scorrimento idraulico (Varie rettifiche dei Navicelli, Riseccoli, Paleo-Ugione) che sono poste su superfici di base inferiori rispetto ai precedenti assi drenanti di pratica agricola. Non è escludibile almeno dall'analisi dei dati resi disponibili una ricarica proveniente da

canali paralleli allo Scolmatore verso l'entroterra che tuttavia, almeno dall'analisi dei primi dati disponibili in termini di soggiacenza delle acque, sembrano interessare una frangia non eccezionalmente estesa.

In questa prima disamina dobbiamo rilevare che le zone più tipicamente portuali interessate dai tre bacini artificiali in serie (Toscana, Inghirami e Industriale) pur godendo di questo comportamento idrogeologico risultano fortemente antropizzate e soprattutto oggetto di numerose lavorazioni che hanno variato le caratteristiche idrogeologiche dei terreni in partenza. E' pertanto estremamente difficoltoso parlare di un acquifero determinato e con proprie caratteristiche idrauliche omogenee, ma piuttosto di un'area vasta in cui "comanda" in maniera determinante il livello medio mare marino con i suoi moti e la sua intrusione verso l'entroterra.

Nelle zone poste subito ad Ovest della linea ferroviaria diventa infatti estremamente difficoltoso parlare di proprietà idrogeologiche ben marcate e caratteristiche, piuttosto di un'area in cui verso occidente tendenzialmente l'Orizzonte 1 si approfondisce ben al di sotto dell'attuale livello medio mare ed in cui si può apprezzare un "mezzo" saturo con bassi gradienti riferibili ai moti ed ai livelli marini.

Con ogni probabilità qui la componente di ricarica del sistema idrogeologico è costituita da aree di infiltrazione meteorica diretta e di infiltrazione delle acque semi-irrigue o provenienti dai vari canali oggetto di successive trasformazioni idrauliche.

E' invece più interessante la situazione idrogeologica nella parte più interna ed orientale dell'area in esame poiché in genere l'Orizzonte 1 si assottiglia e comincia ad essere più importante la deposizione dei due Orizzonti il 2 ed il 3, tendenzialmente più isotropi sotto il profilo idrogeologico rispetto al primo.

Infatti per la configurazione stratigrafica la ricarica in questi due orizzonti proviene sia dal Terrazzo di Livorno, o meglio dal suo bordo o lembo estremo (definito da molti Autori Paleofalesia) dove lungo la scarpata storicamente sono esistite e continuano a pulsare – sebbene in maniera estremamente ridotta per le superfetazioni antropiche – piccole ma copiose sorgentelle di contatto e dove è possibile senza dubbio una ricarica di tipo geometrico e gravitativo con un aumento tipico di zone di bordo di gradienti idraulici.

Ma d'altra parte, per questi due Orizzonti non dobbiamo escludere un'alimentazione proveniente anche dagli arretramenti dunali di Stagno, dalle parti relitte di Terrazzo presente a Nord di Ponte Ugione e naturalmente dai vari spessori più profondi dei paleo-alvei dei diversi torrenti (Cigna, Ugione, etc.).

Merita un discorso a parte l'Orizzonte 4, generalmente mediamente profondo (sempre al di sotto dei 32,00 m. da piano campagna) che gode di una ricarica nettamente distinta e ben più lontana e che trova le sue origini dai Monti Pisani e dalle antiche valli del Paleo Arno e Serchio. Per cui sintetizzando i concetti abbiamo una ricarica estremamente locale per i primi Orizzonti, mentre solo per i Conglomerati ci troviamo di fronte ad una ricarica più estesa e remota. Anche questa informazione ci consente di dare la giusta identità alla situazione idrogeologica dell'area in esame, infatti negli Orizzonti Zero ed 1 è insediata una falda di tipo freatico o a comportamento freatico talvolta multi-stratiforme con semiconfinamenti locali, sacche in leggera pressione (laddove affiorano degli spessori lenticolari di sabbie limose).

Negli Orizzonti 2 e 3 si rintraccia una falda più costruita in leggera pressione e qualche volta con possibili collegamenti con l'Orizzonte superiore, mai con quello inferiore.

Dall'analisi dei primi dati di conducibilità rilevata durante la campagna di rilevamento emerge che questi primi trenta metri indagati sono interessati dall'acqua di mare che impone un cuneo salino verso l'entroterra; con una fascia di transizione salata-salmastro-dolce piuttosto ampia poiché in generale assistiamo ad un' entropia stratigrafica con repentini cambi laterali che condizionano le dinamiche di intrusione.

Gli studi ed i dati sperimentali di campagna al momento non orientano verso una struttura idrogeologica dell'area con un'unica identità, omogenea e produttiva degli acquiferi. L'assenza di pozzi per uso idro-potabile e la sporadica presenza di pozzi per uso industriale secondario (qualche esempio è stato evidenziato per l'alimentazione di reti anti-incendio) dà il verso ad acquiferi scarsamente produttivi e di pessima-mediocre *etichetta chimica*.

Le misure di soggiacenza ricavate dai vari punti d'acqua censiti - si veda **TAV. 8** "*Carta dei livelli degli acquiferi, anno 2007*"- e di cui siamo in grado di conoscerne le caratteristiche costruttive (diametro, profondità, fenestrature, filtri e pre-filtri, presenza di pompe, etc.) ed il dettaglio stratigrafico denotano:

- ◆ Una variabilità piuttosto spiccata dell'acquifero più superficiale e tendenzialmente a comportamento freatico con soggiacenze spesso rchiuse in isole limitate con evidenze frequenti di alti e bassi idraulici;
- ◆ Una migliore uniformità spaziale dell'acquifero posto negli Orizzonti 2 e 3, spesso in leggera pressione e semi-confinato.

## **5.10 La lettura sintetica del territorio in chiave idrogeologica**

In relazione a tutti gli elementi conoscitivi acquisiti possiamo sintetizzare quanto segue:

1. Innanzi tutto l'areale in esame si trova ad avere un unicum stratigrafico "incastonato" tra il sistema dunale e retrodunale del Calambrone-Tirrenia, quello dunale relitto di Stagno e quello del Terrazzo geomorfologico di Livorno. Vista questa peculiarità, l'area si trova a possedere una serie di requisiti ereditati da questi ambienti "puri" posti al suo esterno con la presenza di spessori pertinenti al disfacimento della antica falesia del Terrazzo (Gronda dei Lupi), ma anche con orizzonti pertinenti all'impalcato dunale e retrodunale o comunque all'avanzamento dei cordoni litoranei.
2. L'area in questione ha subito una serie di trasformazioni importanti con una evoluzione almeno degli ultimi 2.000 anni estremamente veloce: la memoria idraulica dell'area in esame è piuttosto variabile e francamente di difficile schematizzazione: le bonifiche intervenute per mano dell'uomo hanno trasformato il territorio in maniera spesso determinante contribuendo ad ordire vere e proprie trame soffolte su cui si sono poi andate a sovrapporre altri interventi dell'uomo.
3. La conformazione geologica e l'alto grado dell'evoluzione storica antropica ha restituito un'area in cui domina un'entropia stratigrafica significativa; seppure posto nella parte più bassa di una piana, non si rintracciano chiare regole di sovrapposizione proprie di una pianura alluvionale, molte, come abbiamo visto sono le variabili deposizionali in ordine alla posizione territoriale (prossima alla linea di costa ed alle sue molteplici evoluzioni), agli avvenimenti naturali ed artificiali.
4. Sebbene sia stato possibile riconoscere gli ambienti deposizionali (pur con le note difficoltà degli eventi legate agli imbonimenti ed alle bonifiche dei quali abbiamo testimonianze copiose, ma poco documentate sotto il profilo geografico di precisione) e quindi si sia potuto ricondurre a stessi Orizzonti lito-stratigrafici i vari spessori rinvenuti, bisogna evidenziare che il "mezzo

stratigrafico” è estremamente variegato con passaggi e continui scarti laterali talvolta repentini ed oggettivamente inaspettati e poco prevedibili. Probabilmente neanche con indagini estensive di un certo livello si riuscirebbe ad avere un quadro esatto delle sovrapposizioni stratigrafiche, tuttavia con l'elevato numero di indagini e di informazioni raccolte è stato possibile ricostruire un quadro realistico.

5. A questa entropia stratigrafica corrisponde direttamente una situazione idrogeologica estremamente variegata; sebbene a livello di grado di permeabilità l'ambiente idrogeologico indagato entro i 30,00 m. circa di profondità, sia in genere da basso a medio-basso, gli spessori mostrano un'evidente diversità di comportamento di permeabilità e spesso nella sovrapposizione si possono rilevare scarti fino a 2 ordini di grandezza della conducibilità idraulica. Questo restituisce un ambiente idrogeologico estremamente instabile con frequenti possibilità di apertura e chiusure dei sistemi acquiferi.
6. I rilevamenti idrogeologici e gli approfondimenti inducono ad evidenziare, di fatto, una “non zona” idrogeologicamente parlando e corrispondente ad un Dominio occidentale che è limitato tra il Canale Industriale ed il mare; in questa area di circa 2,300 Km<sup>2</sup>. non è instaurato un acquifero con proprie caratteristiche idrodinamiche e fisico-chimiche; in considerazione della contiguità con il mare, gli spessori al di sotto dei primi 3,00-4,50 m. da p.c. si ritrovano in uno stato saturo pressoché costante. A questo dominio in cui non si riconosce un acquifero vero e proprio, ma un sistema estremamente vario e regolato sostanzialmente dagli ingressi delle acque marine, si aggiunge un Dominio orientale oltre il canale Industriale (ad est di questo) in cui invece si organizza in maniera più precisa un sistema idrogeologico nell'ambito di spessori ed orizzonti consolidati da tempi più lontano.

I terreni sottogiacenti l'area in studio risultano totalmente e costantemente in condizioni di saturazione idrica:

1. ad opera esclusiva del mare, quelli posti in corrispondenza della zona più occidentale (ad Ovest del Canale Industriale), dai m.- 3 circa sino ai - 30/40 ed oltre dal piano banchina;
2. ad opera prevalente del mare, ad oriente del canale industriale, per una profondità dai m.-7/9 nelle zone più orientali e 5/7 in quelle più occidentali sino ai - 30/40 m. dal piano campagna;

3. ad opera di acqua dolce come ricarica da est (bordo dei terrazzi, sbocchi dei deflussi superficiali, infiltrazione dunale) sempre per la zona posta ad est del canale industriale ed in relazione alla stagione di osservazione.

### **5.11 Conclusioni delle parte idrogeologica**

Nell'ambito dell'area in esame, costituisce elemento fisico di determinante importanza idrogeologica la linea di ingressione di acqua marina che, dal Canale Industriale, si sviluppa rettilinea secondo un andamento grosso modo Nord-Est-/Sud-Ovest (come rappresentata nella **TAV. 9**).

Tale linea separa due Domini: uno posto a occidente ed uno ad oriente, che presentano caratteristiche idrogeologiche nettamente distinte per quanto attiene alle condizioni di saturazione dei terreni da parte dell'acqua marina.

Il Dominio occidentale è completamente caratterizzato dalla presenza di acqua marina o fortemente salmastra, talché i terreni sotto il livello medio mare sono da considerarsi totalmente saturi di acqua salata-salmastra, con assenza di circolazione idrica sotterranea strutturata di acqua dolce.

Pertanto in questo Dominio non si può parlare di falda idrica; ciò fino alla profondità di almeno 30-35 metri (da piano campagna). Infatti l'unica falda idrica strutturata in condizioni di "completo sconfinamento" si trova al di sotto di tale profondità, non presentando alcuna connessione idraulica con il "sistema" a lei sovraciante. Peraltro, è da evidenziare che l'acqua di tale falda profonda è di fatto inutilizzata per consumi umani, zootecnici, irrigui o industriali, considerate le naturali pessime caratteristiche qualitative che possiede.

Il Dominio orientale è sicuramente interessato dal fenomeno di ingressione di acqua marina, che si sviluppa a partire dalla sponda Est del Canale Industriale e dalla sponda Sud del Canale Scolmatore d'Arno, ma è altresì interessato da fenomeni di ricarica di acqua dolce, talché tra le zone di infiltrazione e quelle di ingressione marina si rinvencono coltri di sedimento, a varia granulometria, dove si instaura una certa circolazione idrica sotterranea strutturata, anche se di limitate dimensioni e di scarsa importanza.

Inoltre, una caratteristica comune alle diverse organizzazioni degli scorrimenti sotterranei è che, comunque, la velocità delle eventuali circolazioni risulta

modesta, sia per le permeabilità molto basse del sedimento, sia per la sua eterogeneità, sia per le forme dei piani di sedimentazione che spesso presentano memorie di contropendenza in relazione a “forme di paesaggio retrodunale”.

Per quanto riguarda le velocità di scorrimento di acqua nel sottosuolo, entro i primi tre/quattro metri di orizzonte dal piano campagna, queste sono da ricondursi ad un sistema di pressioni nel mezzo saturo in cui la componente per ricarica è sempre molto modesta e la componente per ingressione marina è sempre elevata, con effetto che, tendenzialmente, diminuisce procedendo verso oriente.

Il risultato è che il sistema di flusso si manifesta come molto poco dinamico: si riscontrano infatti zone di stagnamento, con incrementi o decrementi delle velocità, che possono dipendere dagli equilibri (relativi ai vari periodi idrologici) tra le pressioni delle ricariche e le pressioni dovute alla ingressione marina.

Come variabili principali del sistema, evidenziamo, per la parte di ricarica, la piovosità stagionale (per gli effetti termo-pluviometrici ad essa collegati) e, per la parte di ingressione marina, le varie componenti del moto ondoso, di marea e di ventosità.

Incrementi di velocità si possano riscontrare in corrispondenza di vere e proprie linee preferenziali di scorrimento, a memoria di vecchie canalizzazioni, scavi in linea, operazioni di bonifica, su direttrici che risultano sotterranee e sub-superficiali (entro i primi 2-3 m. da piano campagna).

## CAPITOLO 6

### PERICOLOSITA' GEOMORFOLOGICA, IDROGEOLOGICA, IDRAULICA E SISMICA

#### 6.1 Aree a pericolosità geomorfologica

Come abbiamo già espresso nei paragrafi precedenti la vasta area in esame almeno negli ultimi 500 anni è stata oggetto di importanti lavori di bonifica con interrimenti antropici che hanno modificato il territorio attraverso il “guadagno” di terre emerse a sfavore degli acquitrini e degli ambienti lagunari-palustri che si erano instaurati nella zona.

Dall'analisi dei luoghi l'area in studio risulta completamente antropizzata con vasti piazzali, banchine, canali industriali e portuali e di angioporto, attività produttive che obliterano qualsiasi forma superficiale.

Uniche memorie geomorfologiche naturali sono alcuni tratti in prossimità della foce dello Scolmatore d'Arno (in sinistra idraulica) in cui si rilevano forme di accumulo ed erosione di materiale fluttuante.

Le forme retrodunali (verso Stagno – poste all'esterno dell'area in esame), le dinamiche eolico e/o marine sono raramente percepite, tuttavia la formazione di questo ambiente per la sua genesi ha favorito il deposito di materiali compressibili e ad alto contenuto organico, con elevata potenzialità al cedimento. Non è casuale che tutte le infrastrutture portuali e le volumetrie che sono presenti nell'area in studio poggino su fondazioni profonde.

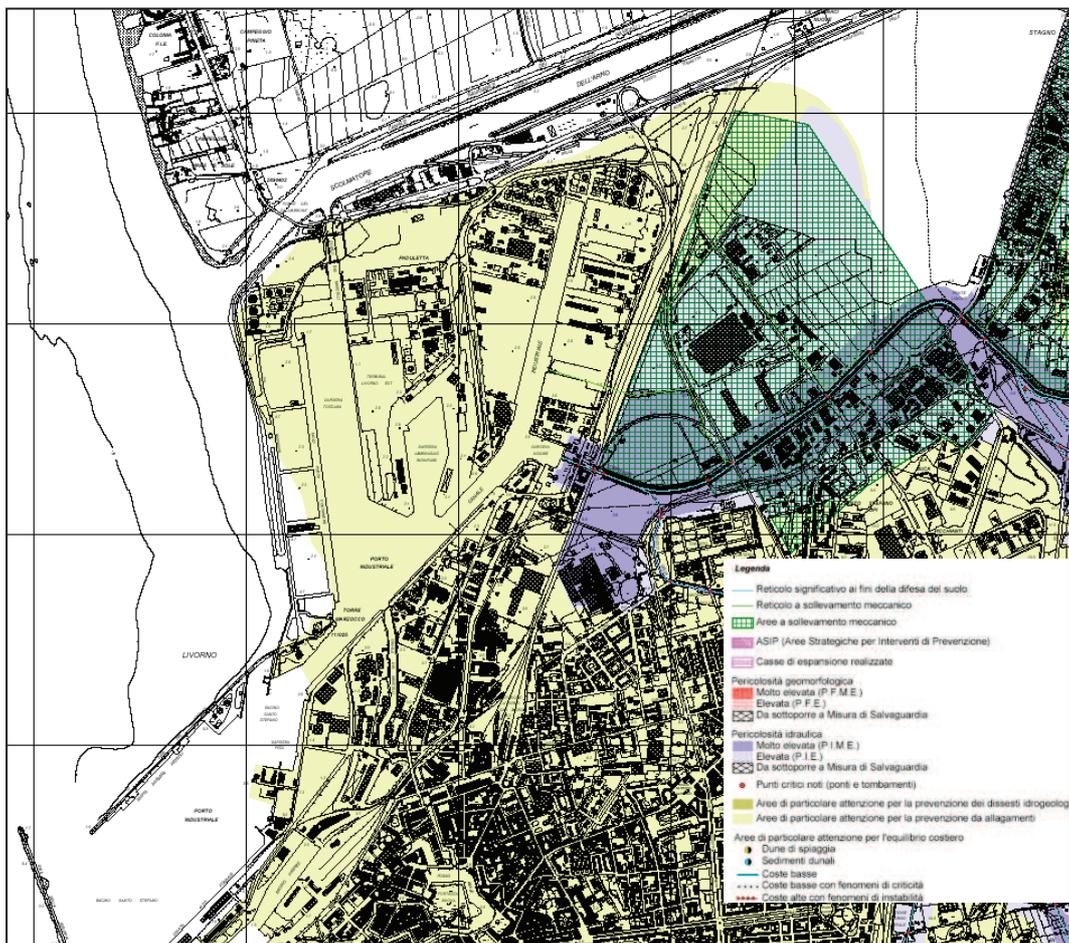
In considerazione di quanto sinteticamente descritto si è propeso per classificare l'area per intero in Classe di pericolosità geomorfologica G.3 “Elevata” – si veda **TAV. 10** “Pericolosità geomorfologica” -.

#### 6.2 Aree a pericolosità idraulica

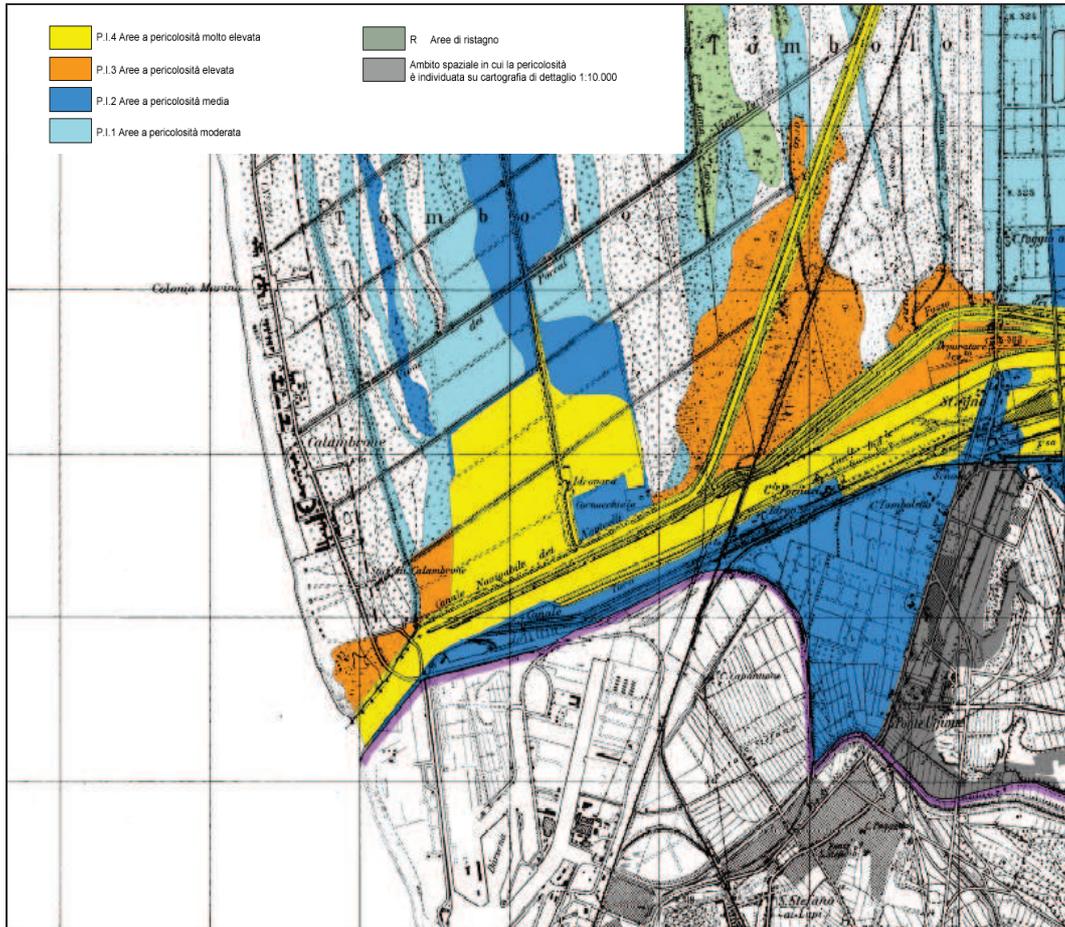
Sulla base della cartografia tematica a supporto del Piano Strutturale del Comune di Livorno e delle cartografie predisposte successivamente per il *Piano di Assetto Idrogeologico del Bacino Toscana Costa* (per quanto concerne il Torrente Ugione) – si veda **Fig. 28** - e del *Bacino del Fiume Arno* (per quanto attiene allo Scolmatore d'Arno) – si veda **Fig. 29** - l'area nel suo complesso è stata

classificata in Pericolosità idraulica I.2 “Media”, interessata da allagamenti per eventi compresi tra  $200 < Tr < 500$  anni – si veda **TAV. 10** “Pericolosità idraulica”-. Nell’area in studio in prossimità dello sbocco del Torrente Ugione nella Darsena Ugione sono state identificate aree in Pericolosità idraulica I.4 “Molto Elevata” aree interessate da allagamenti per eventi con  $Tr < 30$  anni, corrispondenti alla Pericolosità Idraulica Molto Elevata (PIME) ed Elevata (PIE) del Piano di Assetto Idrogeologico del Bacino Toscana Costa dovuti alla presenza di punti di attraversamento infrastrutturali critici.

**Fig. 28:** Stralcio del Piano di Assetto Idrogeologico Bacino Toscana Costa, 2005



Verso Nord in sinistra idraulica dello Scolmatore d'Arno, dal Bacino del Fiume Arno sono state invece rilevate aree in Pericolosità idraulica media P.I.2, che nella nostra carta abbiamo classificato in Pericolosità Idraulica I.2 “Media”. L’intera sezione dello Scolmatore è stata classificata in P.I.4; nella nostra carta si è proceduto a classificarla in Pericolosità Idraulica I.4 “Molto Elevata”.

**Fig. 29:** Stralcio della Carta di pericolosità Autorità di Bacino del Fiume Arno

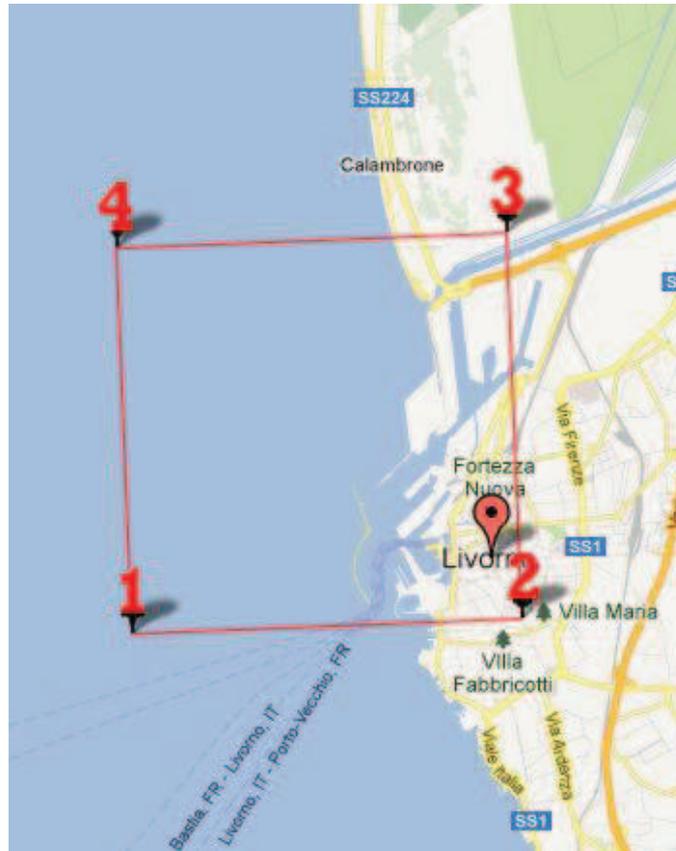
### 6.3 Aree a pericolosità sismica locale

In riferimento alla Deliberazione di Giunta Regionale n. 878 del 2012 “Aggiornamento della classificazione sismica Regionale in attuazione dell’O.P.C.M. 3519/2006 ed ai sensi del D.M. 14 gennaio 2008 – Revoca della DGRT 431/2006” il Comune di Livorno è stato inserito in Zona sismica 3.

Il DPGR 58/R 2012 definisce che le Zone a bassa sismicità 3 risultano suddivise in fasce di pericolosità che tengono conto del “valore di accelerazione sismica su suolo rigido e pianeggiante, allo stato limite di Salvaguardia della Vita (SLV), riferito al periodo di TR=475 anni, corrispondente in termini progettuali ad una vita nominale  $V_n=50$  anni e categoria d’uso  $C_u$  pari a 1 (classe d’uso II)”, di seguito indicato “ag” come segue:

- fascia A, contraddistinta da valori di  $a_g > 0.15g$
- fascia B, contraddistinta da valori di  $0.125 < a_g \leq 0.15g$
- fascia C, contraddistinta da valori di  $a_g < 0.125g$

A livello del tutto preliminare, da approfondire da parte dei tecnici incaricati della progettazione delle singole opere previste, proponiamo qui di seguito il calcolo dei parametri sismici del sito, eseguito con Geostru PS, grazie ai quali è possibile attribuire la zona di intervento alla fascia C. Resta inteso che i progettisti delle opere previste dal P.R.P. dovranno dettagliare quanto sopra.



Coordinate geografiche sono in ED50

Tipo di elaborazione: Stabilità dei pendii e fondazioni

Sito in esame:

- latitudine: 43,549444 [°]
- longitudine: 10,311568 [°]

Classe d'uso: II.

Vita nominale: 50 [anni]

Tipo di interpolazione: Superficie rigata

### ✚ Siti di riferimento

	ID	Latitudine [°]	Longitudine [°]	Distanza [m]
Sito 1	20932	43,539920	10,248100	5223,9
Sito 2	20933	43,541810	10,317020	955,9
Sito 3	20711	43,591770	10,314460	4712,2
Sito 4	20710	43,589890	10,245430	6972,7

### ✚ Parametri sismici

Categoria sottosuolo: D

Categoria topografica: T1

Periodo di riferimento: 50 anni

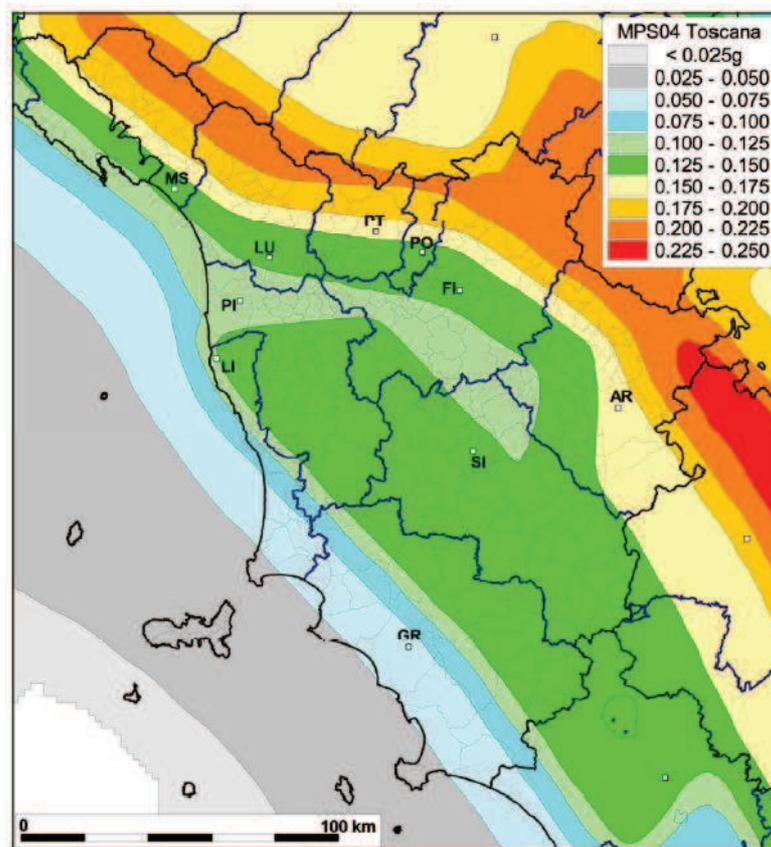
Coefficiente  $c_u$ : 1

	Prob. superament o [%]	Tr [anni]	ag [g]	Fo [-]	Tc* [s]
Operatività (SLO)	81	30	0,034	2,577	0,209
Danno (SLD)	63	50	0,043	2,559	0,240
Salvaguardia della vita (SLV)	10	475	0,119	2,426	0,269
Prevenzione e dal collasso (SLC)	5	975	0,154	2,452	0,274

### ✚ Coefficienti sismici

	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	Kh [-]	Kv [-]	Amax [m/s <sup>2</sup> ]	Beta [-]
SLO	1,800	2,740	1,000	0,012	0,006	0,599	0,200
SLD	1,800	2,550	1,000	0,015	0,008	0,754	0,200
SLV	1,800	2,410	1,000	0,052	0,026	2,108	0,240
SLC	1,800	2,390	1,000	0,067	0,033	2,724	0,240

**Fig. 30:** Mappa della Pericolosità sismica (MPS) della Toscana. I valori di accelerazione sono riferiti ad un  $T_r=475$  anni (INGV 2004).



Lo strumento urbanistico attualmente valido nel Comune di Livorno è stato realizzato sulla base della Del. C.R. n. 94/85 e della ex Del. C.R. n. 12/00 che normavano la classificazione del territorio rispettivamente per gli aspetti geomorfologici/geotecnici ed idraulici trattando marginalmente quelli sismici. Il nuovo DPGR n. 53/R/2011 apporta nuove specifiche in materia di indagini geologiche dando maggiore spessore agli aspetti sismici con l'inserimento della pericolosità sismica locale e le ZMPSL.

Per la definizione dell'azione sismica il D.M. 14/01/08 prevede un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento. L'identificazione della categoria di sottosuolo di riferimento viene effettuata in base alla velocità di propagazione delle onde di taglio (onde S) nel terreno per i primi 30 m di profondità ( $V_{s,30}$ ).

Le categorie di sottosuolo, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, sono di seguito riportate:

**Classe A:**

Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi caratterizzati da valori di  $vs_{30}$  superiori a 800 m/sec comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo di 5 m;

**Classe B:**

Rocce tenere o depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti con spessori di decine di metri caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $vs_{30}$  compresi tra 360 e 800 m/sec ovvero resistenza penetrometrica  $N_{spt} > 50$  e  $cu > 250$  kPa;

**Classe C:**

Depositi di sabbie o ghiaie mediamente addensate o argille di media consistenza con spessori variabili da diverse decine di metri, caratterizzati da valori di  $vs_{30}$  compresi tra 180 e 360 m/sec ( $15 < N_{spt} < 50$  e  $70 < cu < 250$  kPa);

**Classe D:**

Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure da coesivi a mediamente consistenti, caratterizzati da valori  $vs_{30} < 180$  m/sec ( $N_{spt} < 15$ ,  $cu < 70$  kPa);

**Classe E:**

Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali, con valori di  $vs_{30}$  simili a quelli di tipo C o D e spessore fra 5 e 20 m giacenti su substrato di materiale più rigido con  $vs_{30} > 800$  m/sec;

**Classe S1:**

Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ( $PI > 40$ ) e contenuto d'acqua caratterizzati da  $vs_{30} < 100$  m/sec e  $10 < cu < 20$  kPa;

**Classe S2:**

Depositi di terreno soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabili nei tipi precedenti.

La campagna di indagini finalizzata alla caratterizzazione dei terreni interessati dall'inserimento della seconda vasca di colmata – si rimanda la lettura della **TAV. 3B** “*Focus sui dati di base*” - è stata articolata sia in indagini dirette (sondaggi a carotaggio continuo sia sulla terraferma che a mare) che indirette (indagini

geoelettriche, indagini sismiche a rifrazione, sismica passiva, MASW, subbottom profile).

L'attribuzione della categoria di sottosuolo in funzione della risposta sismica dei primi 30,00 m. di terreno, viene in primo luogo assegnata attraverso i risultati derivanti dalle indagini MASW condotte sugli allineamenti geoelettrici eseguiti in corrispondenza della scogliera che delimita a Nord la vasca di colmata attualmente in esercizio. I valori di  $V_{s30}$  che derivano da questo tipo di indagini corrispondono ad un range compreso tra **160 e 176 m/s**; sulla base di questi valori, secondo la classificazione indicata dal DM 14.01.2008, **i terreni oggetto di studio ricadono in classe D.**

A conferma e verifica di quanto ricavato dalla campagna di indagini geofisiche, l'attribuzione della categoria di sottosuolo è stata inoltre accertata sulla base dei numerosi dati disponibili ricavati tramite prove in sito (SPT) e prove in laboratorio condotte a supporto della realizzazione sia della vasca di colmata attualmente in esercizio che di quella in progetto.

Applicando le formule empiriche che permettono di ricavare valori di  $N_{SPT,30}$  e  $c_{u,30}$ , **viene confermata la classe D.**

Nei numerosi lavori che abbiamo potuto esaminare e sempre riferendosi alla Relazione geologico-tecnica a supporto della realizzazione della nuova vasca di colmata sono state considerate anche le caratteristiche di liquefacibilità dei terreni.

Come è noto i tipi di depositi maggiormente suscettibili al fenomeno della liquefazione sono rappresentati da terreni monogranulari (o comunque con un scarso assortimento granulometrico) incoerenti o con bassa percentuale di materiale fine, con densità relativa inferiore al 75%: bassa resistenza alla penetrazione valutabile tramite prove SPT.

Secondo la metodologia già proposta dal CNR e consigliata dal Gruppo Nazionale di Difesa dai Terremoti (GNDT) la liquefazione di un deposito sabbioso sotto falda è assente se:

- a) il valore di  $N_{SPT}$  normalizzato è  $>25$  con contenuto di materiale fine assente;
- b) il valore di  $N_{SPT}$  normalizzato è  $>20$  con contenuto di fine  $>10\%$ ;
- c) lo strato saturo si trova ad una profondità  $>15$  m dal p.c. (secondo Kishida  $>12$  m);

- d) il contenuto di fine argilloso (CF) è >20%;
- e) l'indice di plasticità (IP) è >10;
- f) l'accelerazione massima al suolo è <0,15g;
- g) gli strati sabbiosi non sono estesi e spessi.

Dall'esame delle sezioni stratigrafiche e per le prove ed analisi eseguite sui campioni di sedimento dei vari orizzonti che costituiscono il sottosuolo dell'area indagata l'Orizzonte uno per quanto attiene alla sola tipologia di deposito "sabbie medie e fini in variabile matrice limosa di colore grigio-verde scarsamente addensate" *risulterebbe potenzialmente liquefacibile*. Tale livello sedimentologico si rinviene in tutta l'area in studio con spessori variabili da uno a dieci metri.

Per la verifica alla liquefazione del sub-orizzonte costituito dalle sabbie limose grigio verdi sono stati dunque visionati i risultati delle prove di laboratorio condotte sui campioni prelevati in corrispondenza di questo litotipo. Consultando i certificati di laboratorio relativi ai campioni, emerge dall'analisi granulometrica che due campioni su tre possiedono un contenuto di fine argilloso (CF) superiore al 20% (31% nel caso S5C1, 32% per S7C1) per cui, secondo il punto *d*) della metodologia sopra proposta, il deposito risulta non suscettibile alla liquefazione. Nonostante tali esiti, riteniamo necessario un approfondimento delle tematiche legate alla liquefazione dei terreni che, sulla base degli esiti emersi dall'analisi delle VsH=30, ricadono in *classe D* (DM 14.01.2008 Norme Tecniche per le Costruzioni).

In riferimento agli esiti degli studi condotti, ai sensi del Decreto del presidente della Giunta Regionale Toscana n. 53/R/2011, l'area nel suo complesso viene classificata in Pericolosità sismica elevata S.3 – si veda **TAV. 10** "Pericolosità sismica"–.

#### **6.4 Aree con problematiche idrogeologiche**

Riguardo alle questioni idrogeologiche più che formulare una associazione ad una determinata classe di pericolosità come suggerito dal D.P.G.R. Toscana n. 53/R/2011 (Allegato A cap.C.4) riteniamo dover evidenziare di porre particolare attenzione per la presenza di una falda libera in materiali permeabili e posta entro i primi 2,00-2,50 m. da p.c..

La trasformazione urbanistica prevista certamente andrà ad interferire con gli equilibri idrogeologici generali soprattutto per i volumi interrati e per la prevedibile riduzione delle superfici infiltranti e/o permeabili.

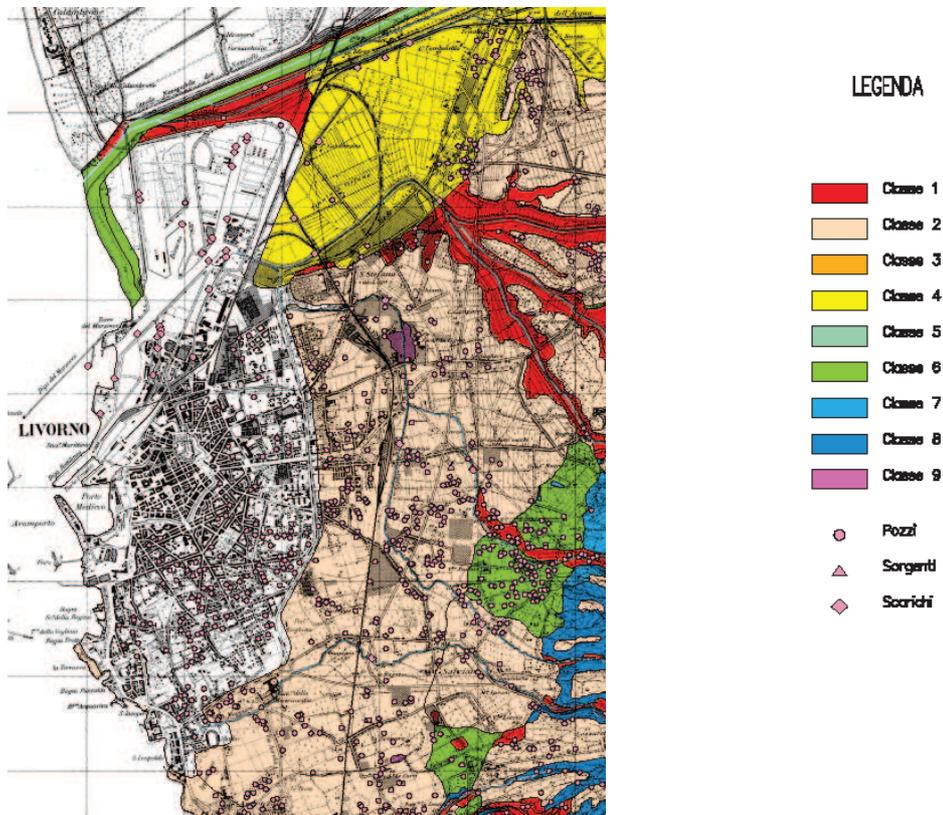
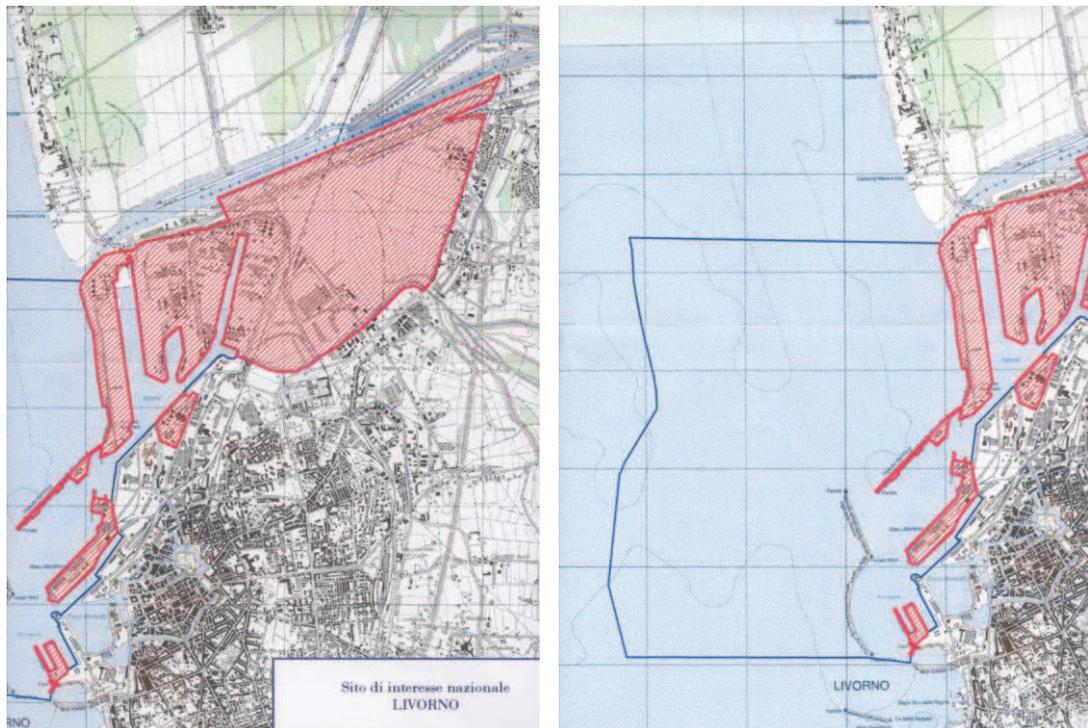
Si fa presente comunque che l'acqua destinata al consumo umano per la città di Livorno (compreso questo futuro sviluppo urbanistico) proviene dall'esterno del comune e dell'area in indagine e precisamente in larga parte dal campo pozzi di *Filettole* (LU) ed in minima parte dai pozzi di *Mortaiolo* (Collesalveti) e che la falda locale non appare sfruttabile se non per usi estremamente secondari (antincendio, impiantistica, etc.). Giova ricordare che il territorio in questione, comprese aree estese al suo contorno non hanno mai avuto una vocazione agricola neanche di residuali seminativi poveri e/o modeste attività orticole). Sempre riguardo alla tematica della tutela della risorsa, l'area in esame, come del resto un intorno territoriale piuttosto grande non sono inseriti nel Piano regionale di Tutela tra le zone critiche.

Interessante rilevare che la Provincia di Livorno nella sua carta di vulnerabilità intrinseca della falda<sup>42</sup> - si veda **Fig. 31** -esclude gran parte dell'area in questione, alla stessa stregua dell'abitato urbano nelle varie classi di vulnerabilità definendo in Classe 6 solo la parte più prossima all'attuale linea di costa (che allo stato attuale risulta già modificata per la presenza ormai consolidata della vasca di colmata in appoggio alla Diga del Marzocco).

Ricordiamo infine che l'area in esame ricade quasi per intero nella perimetrazione del Sito di Interesse Nazionale con una parte continentale di circa 7 Km<sup>2</sup>. E con un'area marina di circa 14 Km<sup>2</sup>. - si vedano **Fig. 32** e **33** -. Ciò pone all'attenzione il fatto che per realizzare le opere in previsione nel PRG del Porto di Livorno occorrerà prioritariamente identificare tutte le necessarie attività e/o azioni per la bonifica dei terreni e delle acque sotterranee, anche nel caso in cui il Sito di Interesse Nazionale di Livorno venga trasformato in Sito di Interesse Regionale.

---

<sup>42</sup> Di supporto al Piano Territoriale di Coordinamento (1998-2008).

**Fig. 31:** Stralcio della carta di vulnerabilità intrinseca della falda (Provincia di Livorno)**Fig. 32 e 33 :** Aree continentali e marine soggette a Sito di Interesse Nazionale

## **6.5 Aree con problematiche di dinamica costiera**

Quando si tratta di “disegnare” una previsione di un nuovo Porto come quella proposta, considerato che molte opere andranno a realizzarsi in ambiente marino in pro gradazione rispetto all'attuale linea di costa risulta chiaro che dovranno essere condotti studi di dettaglio sulle problematiche di dinamica costiera.

Molte delle opere proposte dovranno essere adeguatamente supportate da un'analisi ambientale nell'ambito delle procedure di Valutazione di Impatto Ambientale; riteniamo che sia quella la sede più adeguata per proporre una modellizzazione analitica sulla dinamica costiera che si riferisca almeno ad un progetto dimensionato allo stato definitivo. In *Allegato 2* viene accluso al presente lavoro geologico-tecnico, uno Studio sulla dinamica del litorale eseguito nel settembre 2008 a supporto del progetto definitivo della seconda vasca di contenimento per sedimenti di dragaggio del Porto di Livorno.

## CAPITOLO 7

### FATTIBILITA' GEOMORFOLOGICA, IDRAULICA E SISMICA

#### 7.1 Fattibilità Geomorfologica

Nell'ambito della valutazione sulla fattibilità geomorfologica sono stati contemperati aspetti legati alla lito-stratigrafia dei luoghi, all'idrogeologia ed alla giacitura alla pericolosità delle aree e naturalmente alle opere previste dal PRG del Porto di Livorno.

Per la realizzazione di tutti gli interventi infrastrutturali, le nuove opere portuali e marittime in considerazione che siamo in presenza di problematiche di dissesto diretto riferite ai potenziali cedimenti e tenuto conto dell'importante previsione edificatoria e/o infrastrutturale di un'area rilevante, siamo ad attribuire una classe di Fattibilità geomorfologica F.3 "Condizionata" – si veda **TAV. 11A Fattibilità geomorfologica** -.

Tale fattibilità (che è stata attribuita anche all'area della vasca di colmata ormai completata) – così come individuato dai recenti disposti regolamentari regionali – si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali ai fini dell'individuazione delle condizioni di compatibilità degli interventi con le situazioni di pericolosità riscontrate, è necessario definire la tipologia degli approfondimenti di indagine da svolgersi in sede di predisposizione dei progetti edilizi e/o infrastrutturali.

Nello specifico – anche considerando che le grandi opere previste dovranno essere soggette a Studi di Impatto Ambientale - a supporto di qualsiasi livello di progettazione, si rileva la necessità di organizzare una serie di rilievi geognostici, geofisici, prove ed analisi di laboratorio da raccogliere ed interpretare.

La questione riveste un'importanza soprattutto perché l'incremento di carico urbanistico si prevede sia piuttosto rilevante ed è pertanto fondamentale avvicinarsi ad una chiara trasformazione territoriale mediante la predisposizione di studi geologici-tecnici di dettaglio che, utilizzando i risultati di sondaggi dedicati, definisca i canoni geo-stratigrafici dell'area e rilevi eventuali criticità in merito ad un livello di approfondimento più spinto.

Riguardo a tutti quei lavori che riguardano la resecazione di strutture già esistenti, - ad eccezione delle azioni rivolte alla restituzione dell'acquaticità della Torre del Marzocco e della Fortezza Vecchia e l'ampliamento del Canale Industriale dove si è optato per una Fattibilità geomorfologica F.3 "Condizionata" - pur dovendo procedere comunque ad approfondimenti di indagini da svolgersi in sede di predisposizione dei relativi progetti siamo ad attribuire una classe di Fattibilità geomorfologica F.2 "con normali vincoli" - si veda **TAV. 11A** *Fattibilità geomorfologica* -

## **7.2 Fattibilità Idraulica**

Le opere previste in aree classificate in Pericolosità I.2 "Media" vengono classificate in Classe di Fattibilità F.2 "con normali vincoli" - si veda **TAV. 11B** *Fattibilità idraulica* -. In questo caso non si ritiene necessario indicare specifiche condizioni dovute a limitazioni di carattere idraulico si fa comunque presente che secondo quanto espresso nell'art. 19 delle NN.TT.A. del Piano di Assetto Idrogeologico: (...) *le reti fognarie dovranno prevedere per le nuove urbanizzazioni adeguati volumi di invaso al fine di garantire opportune condizioni di sicurezza, in relazione alla natura della previsione urbanistica ed al contesto territoriale, tenuto conto della necessità di mitigare gli effetti prodotti da eventi pluviometrici critici con Tempo di Ritorno di 200 anni (...).*

La predisposizione dello sbocco a mare dello Scolmatore d'Arno – Foce del Torrente Calambrone per la navigazione diretta da Canale dei Navicelli a mare e viceversa – senza transito attraverso la Darsena Toscana come avviene attualmente, mediante la realizzazione di una foce armata, è stata invece classificata in Classe di Fattibilità F.3 "condizionata".

## **7.3 Fattibilità Sismica**

In relazione alla tematica sismica considerando che l'intero areale è stato posto in pericolosità sismica locale S.3 "Elevata" si ritiene di dover proporre una classe di Fattibilità F.3 "Condizionata" – si veda **TAV. 10C** *Fattibilità sismica locale* - ovvero legata agli approfondimenti di indagine geofisici da prevedersi nell'ambito della presentazione dei progetti.

## 7.4 Sintesi delle fattibilità geologico-tecniche

Per una migliore lettura di seguito vengono sintetizzate le fattibilità per le opere previste:

### *Realizzazione del nuovo ponte mobile sullo Scolmatore d'Arno;*

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
		FG3			FI3			FS3

### *Realizzazione della nuova foce armata dello Scolmatore d'Arno;*

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
		FG3			FI3			FS3

### *Tombamento del Canale dei Navicelli tratto dalla Darsena Toscana allo Scolmatore d'Arno;*

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
		FG3			FI2			FS3

### *Realizzazione di una Darsena in sinistra idraulica della foce armata sullo Scolmatore d'Arno*

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
		FG3			FI2			FS3

### *Avanzamento verso mare con la realizzazione della cosiddetta Darsena Europa*

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
		FG3			FI2			FS3

### *Realizzazione delle protezioni marittime di ingresso al porto lato Nord*

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
		FG3			FI2			FS3

***Demolizione del braccio rettilineo del Molo Novo (Diga della Meloria)***

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
	FG2			FI2				FS3

***Realizzazione Darsene petroli e gasiere***

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
		FG3		FI2				FS3

***Resezioni di banchine nei pressi della Torre del Marzocco***

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
		FG3		FI2				FS3

***Interrimento parziale in testa del Bacino Firenze***

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
		FG3		FI2				FS3

***Resezioni di banchine del Bacino Cappellini***

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
	FG2			FI2				FS3

***Resezioni nei pressi della Fortezza Vecchia***

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
		FG3		FI2				FS3

***Realizzazione fosso di collegamento tra la Darsena Nuova e la Bellana***

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
		FG3		FI2				FS3

***Realizzazione opere foranee e approdo area Bellana***

Fattibilità geomorfologica			Fattibilità idraulica			Fattibilità sismica		
		FG3		FI2				FS3

## **7.5 Definizione della tipologia degli approfondimenti di indagine da svolgersi in sede di predisposizione dei vari livelli di progettazione**

Tutti i progetti delle opere marittime, infrastrutturali e civili dovranno contenere un dettagliato Report geologico e geotecnico che dovrà essere predisposto sulla base dei risultati di specifiche campagne di indagini che dovranno confermare e/o approfondire eventuali analisi già eseguite in particolare:

### *A. Per opere estensive come la Piattaforma Europa*

- Predisposizione di almeno 1 sondaggio a carotaggio continuo ogni 2.000 mq. di superficie topografica da eseguirsi sulla terraferma o a mare e con profondità variabile mai inferiore ai 20,00 m.; la metà dei sondaggi andrà spinta almeno fino alla profondità di 35,00 m.. Nel caso in cui si riscontrino anomalie stratigrafiche che non possono essere oggettivamente correlate dovranno essere infittite le maglie di campagna. Realizzazione di Down-hole su parte dei sondaggi a carotaggio continuo;
- In ogni sondaggio a carotaggio continuo eseguito dovrà essere prelevato un campione indisturbato rappresentativo di ogni Orizzonte descritto nel Capitolo 3 del presente Studio. Ogni campione dovrà essere avviato al laboratorio geotecnico per la determinazione di: indice dei vuoti; porosità, grado di saturazione, densità secca, analisi granulometriche, prove edometriche, prove triassiali consolidate drenate, permeabilità in laboratorio;
- Predisposizione di almeno una penetrometria statica ogni 500 mq. di superficie topografica spinto fino alla profondità mai inferiore ai 20,00 m. ad eccezione di eventuale rifiuto;
- Realizzazione di stendimenti geofisici (con le metodologie ritenute più adeguate secondo i contesti stratigrafici) almeno di profili lunghi distanziati tra loro non più di 150 m. in maniera da formare una maglia sub-quadrata in senso longitudinale e trasversale. Gli stendimenti dovranno essere interpretati e interpolati con i sondaggi geognostici a carotaggio continuo. Nella metà dei sondaggi a carotaggio continuo previsti dovrà inoltre essere condotta una prova down-hole.

### *B. Per opere infrastrutturali in linea ad esempio moli, dighe, etc.*

- Predisposizione di almeno 1 sondaggio a carotaggio continuo ogni 200 ml. da eseguirsi sulla mezzera della testa dell'opera sulla terraferma o a mare e con

profondità variabile mai inferiore ai 35,00 m. Nel caso in cui si riscontrino anomalie stratigrafiche che non possono essere oggettivamente correlate dovranno essere infittite le maglie di campagna. Realizzazione di Down-hole su parte dei sondaggi a carotaggio continuo;

- In ogni sondaggio a carotaggio continuo eseguito dovrà essere prelevato un campione indisturbato rappresentativo di ogni Orizzonte descritto nel Capitolo 3. Ogni campione dovrà essere avviato al laboratorio geotecnico per la determinazione di: indice dei vuoti; porosità, Grado di saturazione, densità secca, analisi granulometriche, prove edometriche, prove triassiali consolidate drenate, permeabilità in laboratorio
- Predisposizione di almeno una penetrometria statica ogni 200 ml. da eseguirsi sulla mezzera della testa dell'opera sulla terraferma o a mare e con profondità variabile mai inferiore ai 20,00 m. ad eccezione di eventuale rifiuto;
- Realizzazione di stendimenti geofisici (con le metodologie ritenute più adeguate a secondo dei contesti stratigrafici) almeno di profili lunghi distanziati tra loro non più di 10,00 m. in senso longitudinale e almeno 25,00 m. in senso trasversale, in maniera da formare una maglia sub-quadrata e trasversale. Gli stendimenti dovranno essere interpretati e interpolati con i sondaggi geognostici a carotaggio continuo. Nella metà dei sondaggi a carotaggio continuo previsti dovrà inoltre essere condotta una prova down-hole.

#### C. Per operazioni di resecazione banchine

- Realizzazione di stendimenti geofisici (con le metodologie ritenute più adeguate a secondo dei contesti stratigrafici) almeno di profili lunghi distanziati tra loro non più di 10,00 m. in senso longitudinale e almeno 25,00 m. in senso trasversale, in maniera da formare una maglia sub-quadrata e trasversale. Gli stendimenti dovranno appurare in dettaglio la presenza di servizi e sottoservizi.

#### D. Per restituire acquaticità a Torre del Marzocco, Fortezza Vecchia

- Predisposizione di almeno 1 sondaggio a carotaggio continuo ogni 250 mq. di specchio acqueo da eseguirsi nell'area in cui si prevede la restituzione dell'acquaticità con profondità variabile mai inferiore ai 25,00 m.. Nel caso in cui si riscontrano anomalie stratigrafiche che non possono essere

oggettivamente correlate dovranno essere infittite le maglie di campagna. Realizzazione di Down-hole su parte dei sondaggi a carotaggio continuo;

- In ogni sondaggio a carotaggio continuo eseguito dovrà essere prelevato un campione indisturbato rappresentativo di ogni Orizzonte descritto nel Capitolo 3. Ogni campione dovrà essere avviato al laboratorio geotecnico per la determinazione di: indice dei vuoti; porosità, grado di saturazione, densità secca, analisi granulometriche, prove edometriche, prove triassiali consolidate drenate, permeabilità in laboratorio
- Realizzazione di stendimenti geofisici (con le metodologie ritenute più adeguate a secondo dei contesti stratigrafici) almeno di profili lunghi distanziati tra loro non più di 50,00 m. in senso longitudinale e in senso trasversale, in maniera da formare una maglia sub-quadrata. Gli stendimenti dovranno appurare la presenza di servizi e sottoservizi.

#### Contenuti delle relazioni tematiche

La Relazione geologico-tecnica dovrà essere predisposta sulla base di una campagna geognostica mediante l'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo, penetrometrie ed analisi di laboratorio. Tutti i dati stratigrafici e geotecnici dovranno essere documentati in opportuni allegati (stratigrafie, penetrometrie, analisi di laboratorio) mentre dalla loro analisi dovranno essere eseguite correlazioni stratigrafiche significative su tutte le direzioni di interesse.

In una planimetria alla scala non inferiore ad 1:1.000 dovranno essere individuati eventuali Ambiti geo-stratigrafici omogenei sia per il ritmo degli spessori e delle litologie incontrate durante le perforazioni, sia per questioni attinenti alle risultanze delle analisi di laboratorio su campioni opportunamente raccolti.

Le Relazioni geotecniche delle opere dovranno porre particolare attenzione sulla:

1. Valutazione del coefficiente di sicurezza relativo alla liquefazione dei terreni;
2. Definizione in termini geometrici delle morfologie sepolte del bedrock sismico e contrasti di rigidità sismica (o impedenza);
3. Definizione delle VSh30;
4. Valutazione dei cedimenti - anche sulla base di sollecitazioni sismiche applicate - con modelli matematici riconosciuti dalla letteratura scientifica.

**BIBLIOGRAFIA PUBBLICAZIONI CONSULTATE**

E. AIELLO, C.BARTOLINI, C.CONEDERA, E.PRANZINI, *L'erosione del litorale livornese e le sue cause*, Provincia di Livorno, 1979

M.S. ANDERSEN, V.N.R. JAKOBSEN, D. POSTMA., *Geochemical processes an solute transport at the seawater/freshwater interface of a sandy aquifer* Geochimica et Cosmochimica acta, 2005

G. BARSOTTI, P.FEDERICI, L.GIANNELLI, R.MAZZANTI, G.SALVATORINI, *Studio del Quaternario livornese, con particolare riferimento alla stratigrafia ed alle faune delle formazioni del Bacino di carenaggio della Torre del Fanale*, Memoria della Società Geologica Italiana, Roma, 1974

C.BARTOLINI, C.CONEDERA, E.PRANZINI, *Studi di geomorfologia costiera V: Le variazioni della linea di riva fra Rosignano e Marina di Castagneto*, Atti del 69° Congresso della Soc. Geol. It.; Memorie Soc. Geol. It., 1978

A.BOSSIO, B. DELL'ANTONIA, L. MICHELUCCI, G. ZANCHETTA, F.P.BONADONNA, *New insights on the Quaternary stratigraphy of the Livorno area as deduced by borehole investigations*, Bollettino della Società Paleontologica Italiana, Modena 2004

L.CAROBENE, A.BRAMBATI, *Metodo per l'analisi morfologica quantitativa delle spiagge*, Boll. Soc. Geol. It. 94, 1975

G.B. CASTIGLIONI, *Geomorfologia*, UTET, Torino 1986

P. CELICO, *Prospezioni idrogeologiche (volume 1 e 2)*, Liguori editore, Napoli, 1986

L.CHERUBINI, A.DEL RIO & R. MAZZANTI, *Sviluppo e prosciugamento dei paduli nella Provincia di Livorno*, in "La gestione delle risorse idriche", Roma, 1967

G. CHI, M. SAVARD , *Sources of basinal and Mississipi Valley-type mineralizing brines: mixing of evaporated seawater and halite dissolution brine* Geological Survey of Canada-Quebec geoscience Centre, 1997

E.CUSTODIO, M.R.LLAMAS, *Idrologia sotterranea Vol. 1* (Traduzione a cura di R. Spandre), Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2005

L. FEDRIGONI, M. KRIMISSA, K. ZOUARI, A. MALIKI, G.M. ZUPPI, *Origine de la mineralisation et comportement hydrogéochimique d'une nappe phréatique soumise à des contraintes naturelles et antropiques sévères: exemple de la nappe de Djebeniana (Tunisie)*, Earth and Planetary Sciences - Academie des Sciences, 2001

G.G.GUARNIERI, *Il porto di Livorno e la sua funzione economica dalle origini ai tempi nostri*, Pisa, 1931

R.GHELARDONI, E.GIANNINI, & R. NARDI, *Ricostruzione paleogeografica dei bacini neogenici e quaternari nella bassa Valle dell'Arno sulla base dei sondaggi e dei rilievi sismici*, Mem.Soc.Geol.It.,7, 1968

S.GRASSI , G. CORTECCI, *Hydrogeology and geochemistry of the multilayered confined aquifer of the Pisa Plai (Tuscany - Central Italy)*, Applied Geochemistry, 2004

L.GIANNELLI, R. MAZZANTI, R.MAZZEI, G.SALVATORINI & G.SANESI, *Nuove osservazioni sul Quaternario di Livorno*, in Studi sul territorio livornese, Livorno, 1982b.

G.GIOLI, *Il sottosuolo delle pianure di Pisa e Livorno*, Boll.Soc.Geol.It., 1894

N.MAFFEI, *Relazione in "Notizie degli Scavi di Antichità"*, Atti della Regia Accademia dei Lincei, 1877-1878

A. MALATESTA, *Le formazioni pleistoceniche del Livornese*, Atti Soc. Tosc.Sc.Nat.Mem., 51, 1942

R. MAZZANTI, M. PASQUINUCCI, *L'evoluzione del litorale lunense-pisano fino alla metà del XIX secolo*, Società geografica italiana 1983.

R. MAZZANTI, E. PRANZINI, S. TACCINI, *Studi di geomorfologia costiera: VII – Variazioni della linea di riva dal Pleistocene medio-superiore ad oggi, Caratteristiche sedimentologiche e stato delle associazioni vegetali del litorale di San Vincenzo (Toscana)*, Bollettino della Società geologica italiana 1980.

R. MAZZANTI, *Terre e paduli: reperti, documenti, immagini per la storia di Coltano*, Pisa 1986.

R. MAZZANTI et alii, *Carta geologica dei comuni di Livorno e Collesalveti*, Quaderni del Museo Provinciale di Livorno, 1990

R. MAZZANTI, *L'influenza della tettonica, delle oscillazioni climatiche e dell'impatto antropico nella costruzione del litorale versiliese – pisano*, Quaderno n. 3 dell'Autorità di Bacino del Fiume Arno, Firenze, 1994

R. MAZZANTI, M. PASQUINUCCI & U. SALGHETTI DRIOLI, *Il sistema Secche della Meloria-Porto Pisano: geomorfologia e biologia marina in relazione ai reperti archeologici*, in 1284 l'anno della Meloria, Pisa, 1984

B. MAZZANTINI, *Sull'equilibrio del litorale tra Vada e Cecina*, Comune di Cecina, 1979

S. MENCHELLI, *Contributo allo studio del Territorio Pisano: Coltano e l'area ex Padule di Stagno*, Studi classici e orientali, 34, 1984

MINISTERO LL.PP., *I porti marittimi*, monografia illustrata, Roma 1905

R. NARDI, G. NOLLEDI, F. ROSSI, *Geologia e Idrogeologia della Pianura di Lucca*, Quaderno Geografia Fisica Dinamica n. 10, Lucca, 1987

G. NUDI, *Storia urbanistica di Livorno, dalle origini al secolo XVI*, Venezia, 1959

G. PIOMBANTI, *Guida storica ed artistica della città e dei dintorni di Livorno*, Livorno 1903.

G. RAZZAGUTA, *Livorno nostra*, Livorno, 1948

F. SAGGINI, *Morfologia costiera e trasporto detritico marino sul litorale della Provincia di Livorno*, Atti del Convegno per la difesa del litorale toscano, 1966

M.A. SCHIAVO, S. HAUSER, G. CUSIMANO, L. GATTO, *Geochemical characterisation, of groundwater and submarine discharge in the south-eastern Sicily Continental Shelf Research*, 2005

B.S. SUCHIJA, V.N. VARMA, P. NAGABHSHANAM, D.V. REDDY, *Differentiation of paleomarine and modern seawater intruded salinities in coastal groundwaters (of Karaikal and Tanjavur, India) based on organic chemistry, organic biomarker fingerprints and radiocarbon dating*, Journal of Hydrology, 1995

J. THIERRIN, P. STEFFEN, S. CORNAZ, F.D. VUATAZ, W. BALDERER, M. LOOSER *Guide pratique de l'échantillonnage des eaux souterraines* OFEFP - Société Suisse d'Hydrogéologie, 2001

G. TROTTA, *L'antico Porto Pisano e la Torre del Marzocco a Livorno*, Livorno 2005.

#### **STUDI SPECIALISTICI ESEGUITI IN AREE SIGNIFICATIVE**

- Studio idrogeologico per la definizione della potenzialità idrica nel comprensorio livornese e atlante ambientale, Livorno, 1978
- Progetto esecutivo per la realizzazione del cavalcavia in sostituzione del Ponte di Santa Trinità Loc. Palazzo Guardia della Finanza Comune di Livorno, 1982;
- Studio idrogeologico per la definizione della potenzialità idrica della zona di Mortaiolo, Livorno, 1981-1984
- Le domande di ricerca idrica nelle località Grecciano e Valtriano, 1984;
- Indagine geognostica eseguita in area ITALOIL, Ponteggi Dalmine Milano S.p.a., 1985
- Relazione geologica per l'ampliamento di un capannone presso la centrale Lodolo ENEL, Livorno, 1985
- Lo Studio idrogeologico dell'intera Piana di Livorno, 1982-1986
- Lo Studio sulle acque destinate al consumo umano della città di Livorno per conto dell'Azienda Municipalizzata Acqua e gas (ora ASA Livorno), 1987;
- Lo Studio condotto per le aree di emungimento dei campi pozzi di Filettole (Comune di Vecchiano, PI), Paduletto (Comune di Vecchiano, PI), Tombolo (Comune di Pisa), Mortaiolo (Comune di Collesalveti, LI), Collesalveti e Colognole (Comune di Livorno), 1987.
- Relazione geologica e geotecnica Serbatoi e palazzine uso ufficio per Carbochimica, Livorno, 1987
- Progetto esecutivo per la realizzazione di un impianto di trattamento acque reflue in Loc. Paduletta Comune di Livorno- AAMPS, 1990;

- Perizia geologica e geotecnica per la valutazione delle pressioni indotte sui terreni del cantiere Darsena Toscana, Livorno da grandi manfatti in carpenteria metallica per FBM Hudson Italiana Gruppo Fochi Bologna, Livorno, 1992
- Relazione geologica ambientale per la piattaforma di stoccaggio di RTN sponda Est Darsena Toscana, nell'area portuale di Livorno, Livorno, 1993
- Campagna geognostica per la costruzione di un grande capannone ad uso industriale area Terminal container "Marchi Terminal", Livorno, 1994
- Riqualificazione urbanistica area Torre del Marzocco Comune di Livorno, 1995;
- Relazione geologica e geotecnica sulla compatibilità dei terreni di fondazione per il potenziamento dell'impianto di trattamento rifiuti liquidi di Paduletta, loc. Stagno, Livorno, 1996
- Studi geologici e geotecnici di grandi capannoni industriali nell'area ex Bertolli, Livorno, 1996
- Studi sulla pericolosità e fattibilità geologico-tecnica a supporto del Piano Strutturale e del Regolamento Urbanistico del comune di Livorno, Livorno, 1996-1998
- Progetto di restauro per le mura della Fortezza Vecchia Comune di Livorno, 1999;
- Progetto esecutivo per la realizzazione della Stazione Marittima Autorità Portuale, 1999;
- Relazione geognostica per la realizzazione delle paratoie sul Canale dei Navicelli, Comune di Livorno, 2001
- Campagna di controllo dei cedimenti in area Agip-Gas a copertura di serbatoi di gas, Livorno, 2001
- Caratterizzazione del sottosuolo in area ITALOIL, 2001
- Rapporto di caratterizzazione ambientale area ex deposito Erg petroli, Soc.Seal s.r.l., 2001
- Relazione sulle azioni di monitoraggio e controllo per la Vasca di colmata in ambito portuale, Livorno, 2002
- Recupero urbanistico dei cosiddetti "Cantierini" Comune di Livorno, 1998;
- Progetto esecutivo per ampliamenti di banchinamento in zone retro del Porto Mediceo Autorità Portuale, 2002;
- Progetto esecutivo per la riapertura del fosso lungo Via Caprera (Loc. Quartiere Venezia) - Comune di Livorno, 2002;
- Progetto esecutivo per la realizzazione di una cassa d'espansione per la difesa idraulica in destra idraulica del Torrente Ugione Loc. Pian di Rota

Provincia di Livorno, 2003;

- Piano attuativo “Porta a Mare” delle aree ex Cantiere Orlando e Porto Mediceo Comune di Livorno, 2004;
- Piano di Caratterizzazione per la Restituzione agli usi legittimi area L.T.M., 2005;
- Piano di Caratterizzazione per la Restituzione agli usi legittimi area DOLE (per SEAL), 2005.

Coordinamento Studi geologici  
Responsabile del Procedimento

Dott. Geol. Leonardo Gonnelli



# ALLEGATO 1

## Idrogeologia Analitica



POZZO	pH	Cond. (µS/cm) @ 20°C	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Br (mg/l)	Laboratorio
4a sup	7.69	7040	1374.9	72.9	64.0	145.8	2410.6	337.2	237.9	-	A.A.M.I.P.S.
4a prof	7.27	>20000	9578.5	400.0	280.0	1166.4	17795.9	2032.1	640.5	-	A.A.M.I.P.S.
4c	7.20	610	43.7	2.61	48.0	9.72	74.4	22.7	170.8	-	A.A.M.I.P.S.
5	7.06	19600	2554.6	88.9	72.0	277.02	4360.3	158.5	1043.1	-	A.A.M.I.P.S.
43	8.21	4815	1049.4	47.0	96.0	175.0	1861.1	93.7	982.1	-	A.A.M.I.P.S.
44	7.81	5015	938.4	50.2	20	109.3	1077.7	202.9	1305.4	-	A.A.M.I.P.S.
45 sup	10.01	2900	386.9	142.3	8	24.3	531.7	59.7	115.9	-	A.A.M.I.P.S.
45 prof	7.19	6140	957.2	51.4	120.0	150.7	1559.8	159.8	774.7	-	A.A.M.I.P.S.
47	6.83	1600	100.05	23.06	112.0	63.2	141.8	<20	750.3	-	A.A.M.I.P.S.
50	7.03	3240	453.8	29.0	152.0	58.3	797.6	260.5	475.8	-	A.A.M.I.P.S.
70	7.35	18100	4759.6	169.9	80.0	388.8	8579.0	<20	872.3	-	A.A.M.I.P.S.
72	7.93	4190	806.8	30.2	40.0	24.3	531.7	<20	1830	-	A.A.M.I.P.S.
39	7.07	14940	1374.9	72.9	64.0	145.8	2410.6	337.2	237.9	-	A.A.M.I.P.S.
19	7.15	7850	1384.0	72.0	419.0	223.0	1865.0	1545.0	1000.0	-	A.A.M.I.P.S.
21	7.50	4470	778.0	18.0	208.0	64.6	1251.0	338.0	415.0	4.6	A.A.M.I.P.S.
24	7.25	10660	1850.0	45.0	407.0	241.0	3420.0	565.0	512.0	14.6	A.A.M.I.P.S.
26	7.70	4470	2718.0	103.0	211.0	283.0	3390.0	499.0	1757.0	-	A.A.M.I.P.S.
78	7.30	7180	1394.0	58.0	162.0	155.0	2216.0	62.9	1074.0	-	Studio Dr. Freschi
94	8.80	2780	616.0	54.0	6.7	33.4	657.0	68.8	671.0	3.0	Studio Dr. Freschi
96	7.45	8830	1863.0	60.0	97.0	130.0	2844.0	111.0	707.0	13.5	Studio Dr. Freschi
111	7.60	1760	263.0	17.0	103.0	29.7	376.0	131.0	366.0	-	Studio Dr. Freschi
112	7.50	29400	7487.0	221.0	322.0	714.0	12601.0	619.0	1098.0	-	Studio Dr. Freschi
115	6.90	40500	10152.0	202.0	844.0	1258.0	18340.0	1524.0	854.0	-	Studio Dr. Freschi
117	7.80	32700	8966.0	281.0	166.0	788.0	15006.0	35.6	1464.0	61.0	Studio Dr. Freschi
121	7.60	1760	40.0	4.7	46.4	17.1	19.9	20.6	293.0	-	Studio Dr. Freschi
125	7.80	10480	2266.0	62.0	86.8	142.0	3438.0	28.9	586.0	15.7	Studio Dr. Freschi
127	7.75	6210	1231.0	97.0	36.8	135.0	1779.0	14.7	915.0	8.2	Studio Dr. Freschi
137	7.65	8800	1932.0	34.0	100.0	101.0	28.09	265.0	586.0	12.3	Studio Dr. Freschi
138	7.90	1514	256.0	15.0	79.5	20.9	273.0	106.0	464.0	-	Studio Dr. Freschi
152	7.05	5790	594.0	158.0	485.0	149.0	1009.0	23.5	2379.0	-	Studio Dr. Freschi
153	7.90	631	18.0	36.0	91.2	13.9	27.9	77.8	305.0	-	Studio Dr. Freschi
154	7.50	522	12.6	49.0	65.9	9.9	17.9	32.5	293.0	-	Studio Dr. Freschi
251	7.10	762	54.0	5.0	98.6	20.3	51.1	72.1	378.0	-	Studio Dr. Freschi
252	7.55	1355	74.0	7.5	212.0	36.5	74.7	468.0	366.0	-	Studio Dr. Freschi
253	7.65	3130	572.0	34.0	123.0	74.0	605.0	338.0	854.0	-	Studio Dr. Freschi
294	7.80	3950	903.0	37.0	23.6	24.6	1098.0	19.1	659.0	4.5	Studio Dr. Freschi

Punto d'acqua	pH	Cond. ( $\mu\text{S/cm}$ ) @ 20°C	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Br (mg/l)	Laboratorio
CS1	8.20	34700	8070.0	266.0	408.0	878.0	13673.0	1829.0	317.0	-	Studio Dr. Freschi
CS2	8.40	41500	9670.0	329.0	477.0	1092.0	16650.0	2303.0	268.0	-	Studio Dr. Freschi
CS3	8.10	44800	10920.0	371.0	401.0	1288.0	18650.0	2607.0	220.0	-	Studio Dr. Freschi
CS4	perso	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Studio Dr. Freschi
CS5	7.70	48300	11346.0	390.0	412.0	1350.0	19340.0	2740.0	220.0	-	Studio Dr. Freschi
CS6	perso	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Studio Dr. Freschi

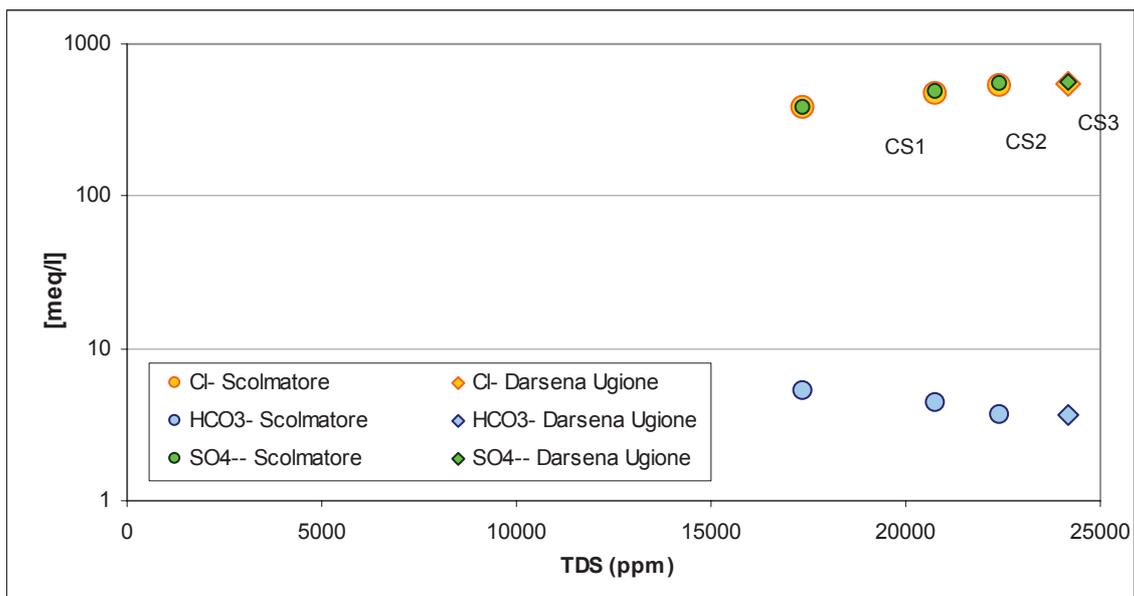


Figura 1 – Diagramma di correlazione anioni principali/salinità totale. Il campione CS3, situato alla Foce dello Scolmatore dell'Arno ha caratteristiche simili a quelle del campione CS5 prelevato nella Darsena Ugione (acqua marina): salinità elevata ed elevate concentrazioni anioniche. Mentre è riscontrabile un progressivo decremento nei campioni CS2 e CS1, posti più a monte.

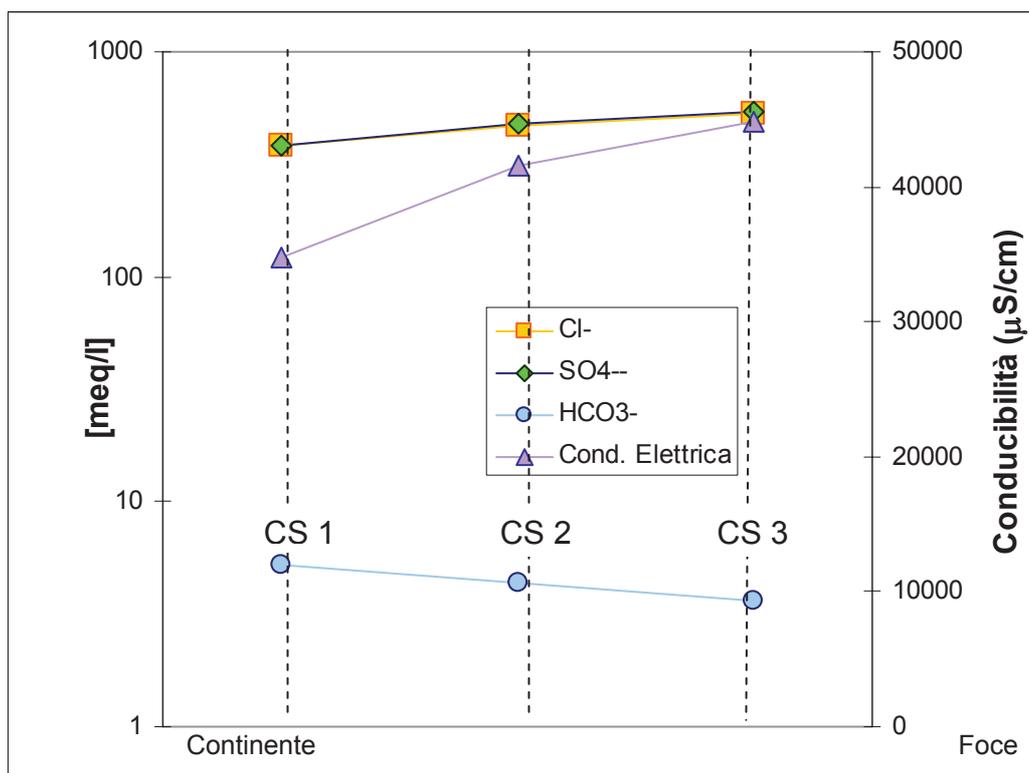


Figura 2 – Evoluzione, in funzione della distanza dalla foce, dei marker di ingressione marina nelle acque dello Scolmatore. Per le acque più continentali si riscontra un grado di mineralizzazione inferiore rispetto a quelle prelevate nei pressi della foce.

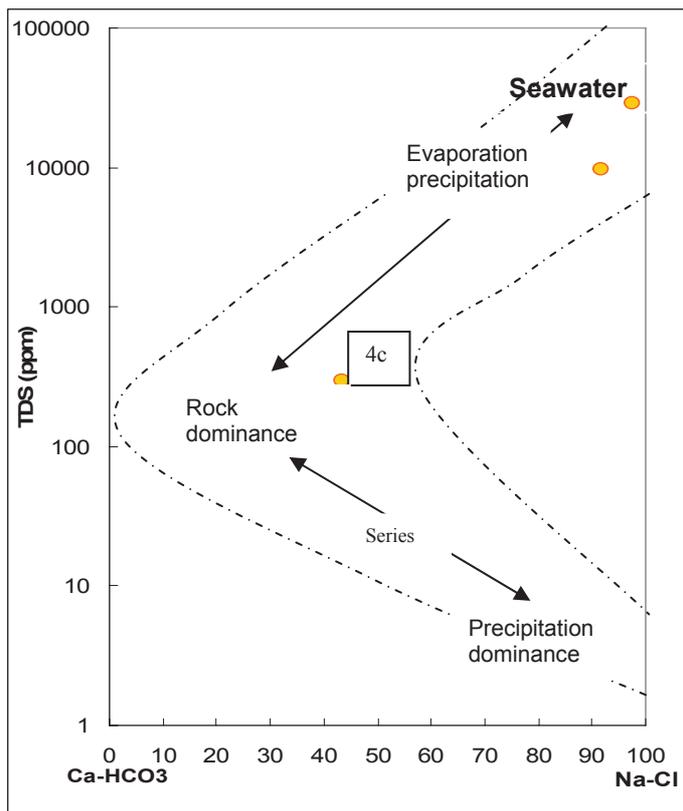


Figura 3 – Diagramma di correlazione salinità totale e concentrazioni parziali di  $\text{Ca-HCO}_3$  ed  $\text{Na-Cl}$ . Il confronto consente di individuare la matrice di un'acqua: il campione 4c è un'acqua di infiltrazione che subisce l'influenza del materiale che attraversa, mentre gli altri due sono

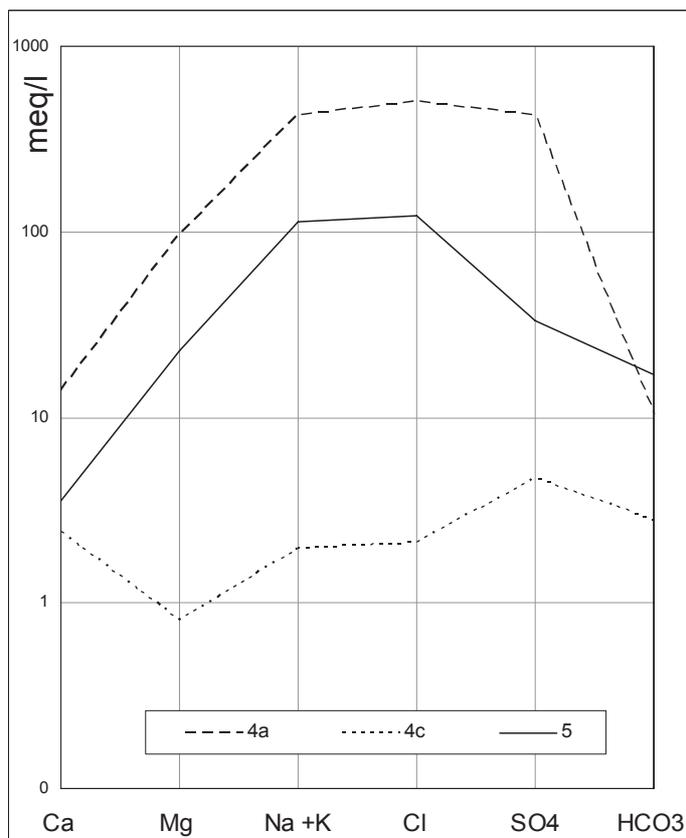


Figura 4 – Diagramma di Schoeller- Berkaloff. È evidente l'elevata mineralizzazione delle acque campionate. Si riscontrano inoltre rapporti caratteristici analoghi tra il campione 4a ed il 5 (profondità relativi piezometri 15 metri circa)

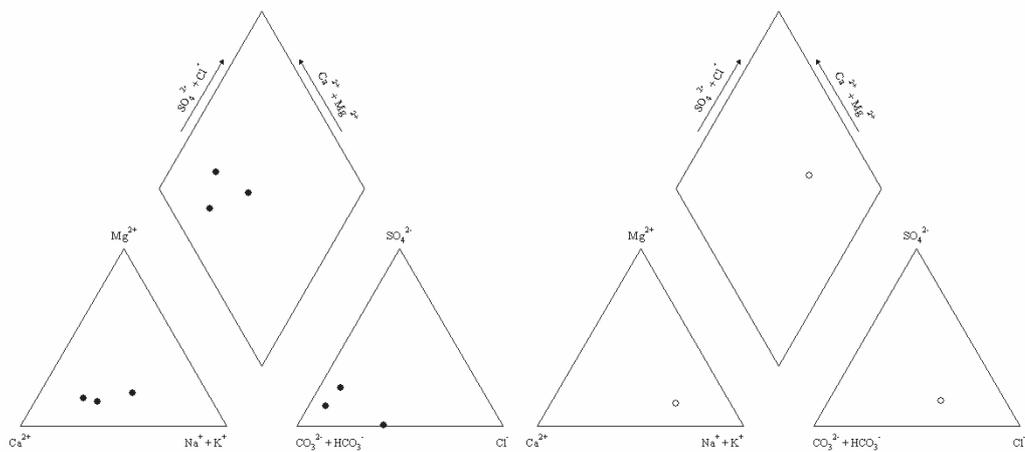


Figura 5 – Diagramma di Piper a diamante rispettivamente per i settori Af e Bf. Nel primo si individua una famiglia di acque Bicarbonato calcica, mentre nel seguente, vi è un unico punto rappresentativo di un'acqua solfato clorurato alcalina.

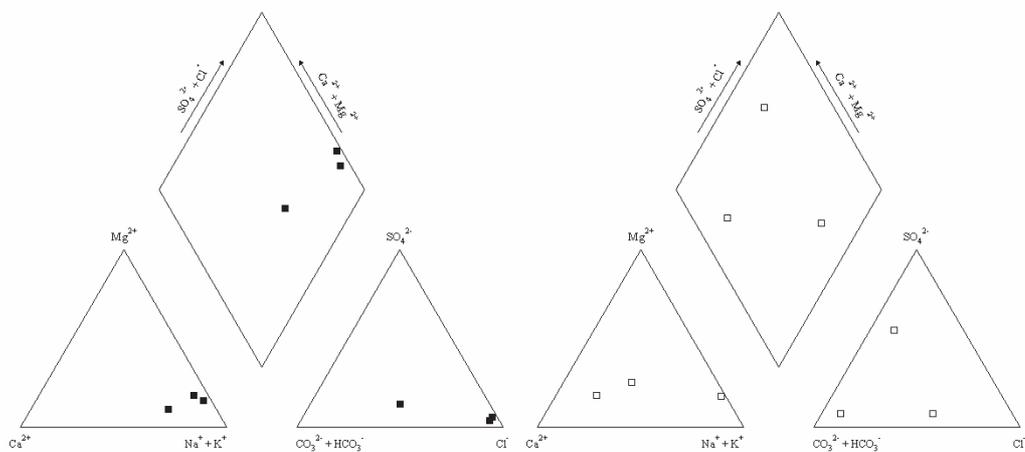


Figura 6 – Diagramma di Piper a diamante rispettivamente per i settori Cf e Df. Per il settore Cf, è evidente che si è in presenza clorurato-sodica, riconducibile ad un'origine marina, mentre Df risulta essere un settore maggiormente eterogeneo.

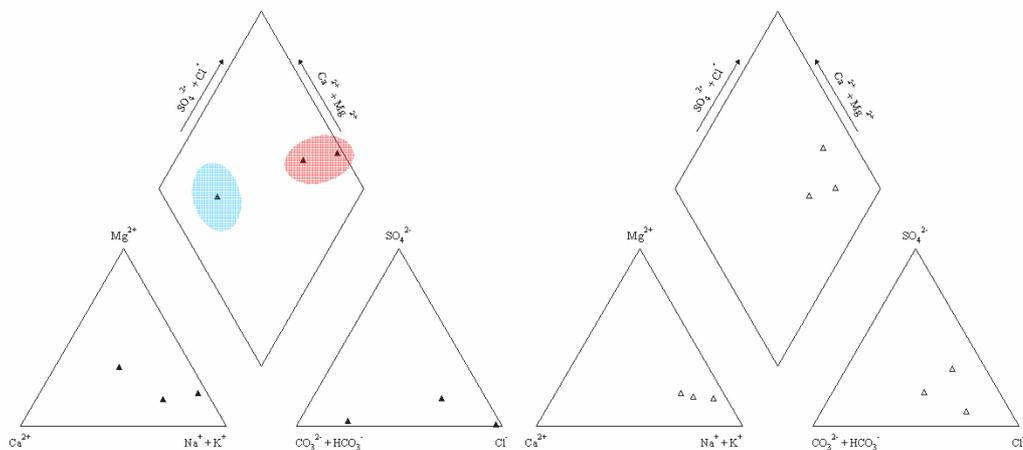


Figura 7 – Diagramma di Piper a diamante rispettivamente per i settori Ef e Ff. Ef descrive il probabile mescolamento tra acque continentali (area blu) e marine (area rossa), mentre per il settore Ff è evidente la matrice clorurato sodica e quindi, decisamente marina.

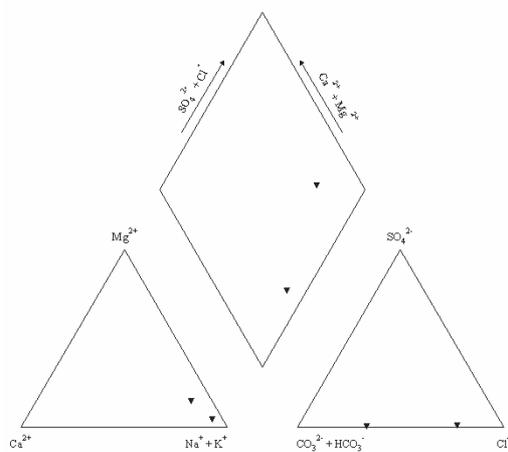


Figura 8 – Diagramma di Piper a diamante relativo al settore Gf. Come per il settore Ff, pure le acque del Gf, in cui cloro e sodio sono prevalenti, hanno un'evidente origine marina.

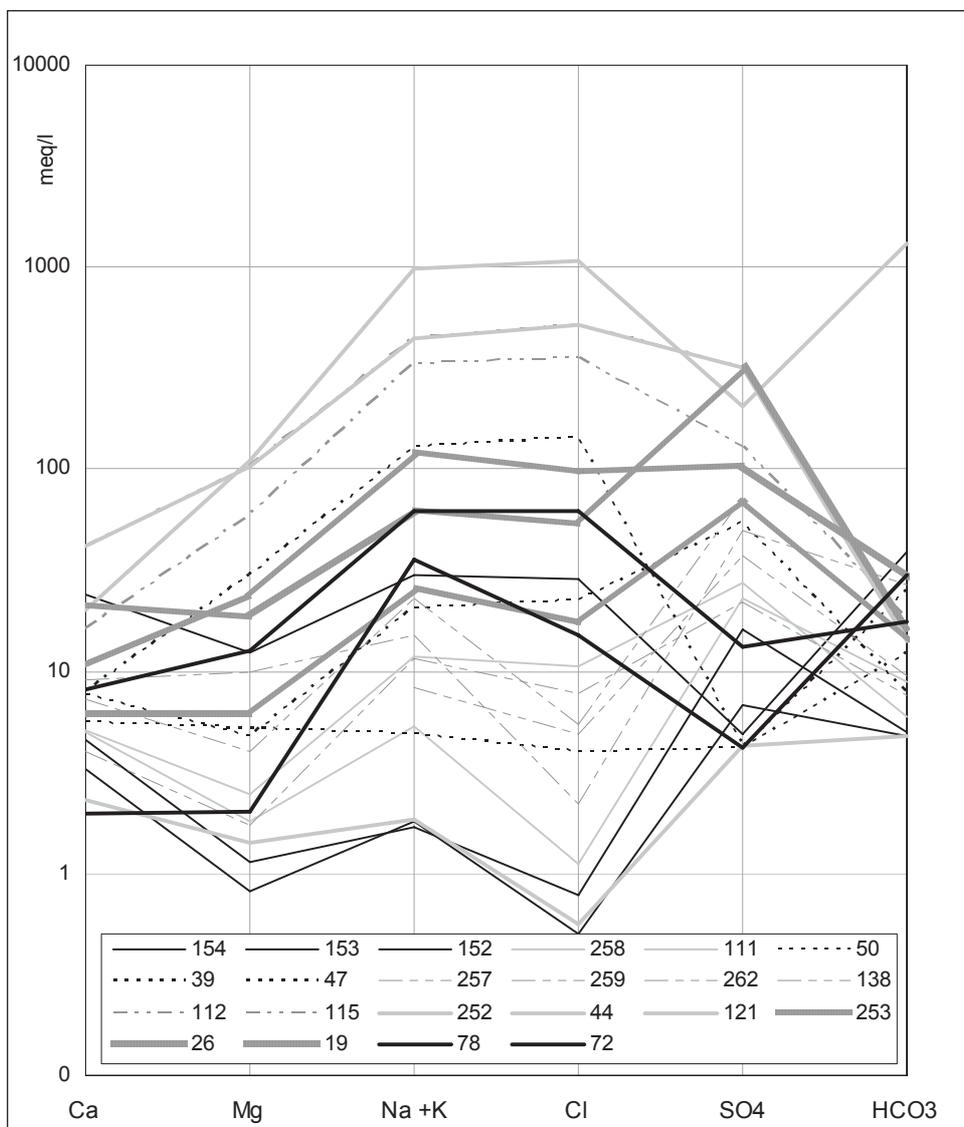


Figura 9 – Diagramma di Schoeller- Berkaloff. Le acque dell'acquifero superficiale presentano un grado di mineralizzazione evidentemente eterogeneo.

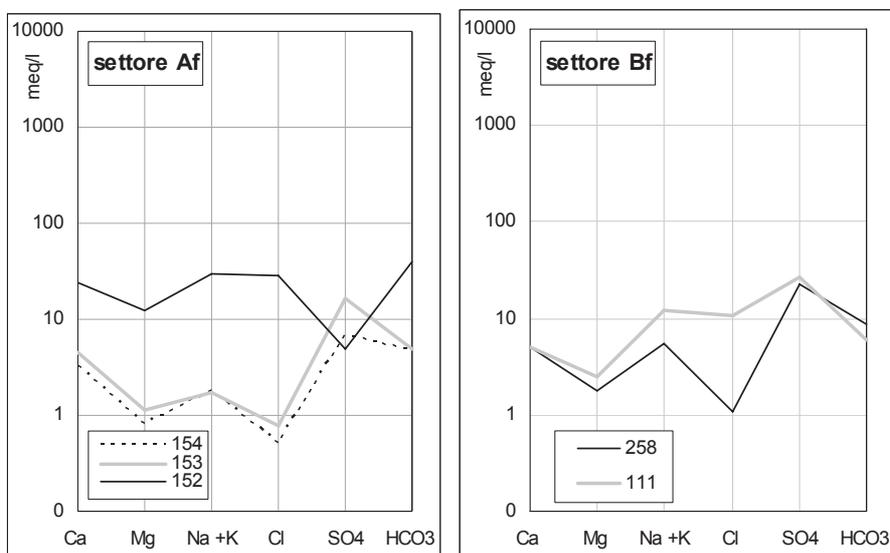


Figura 10 - Diagramma di *Schoeller- Berkaloff*. Nel settore Af, i campioni 153 e 154 si possono definire chimicamente simili, come pure quelle del settore Bf, benché si differenzino per il tenore in cloro.

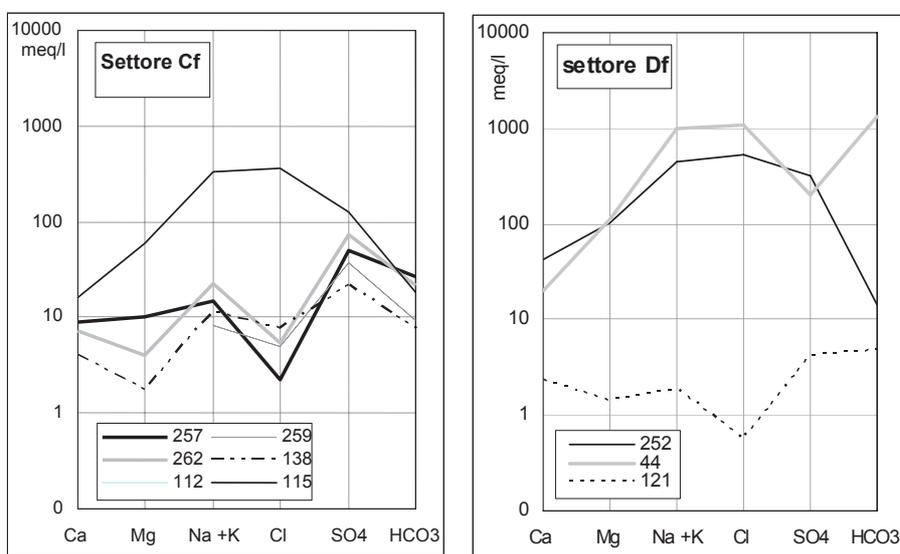


Figura 11 - Diagramma di *Schoeller- Berkaloff*. La comune matrice mineralogica delle acque del settore Cf è palese, fatto salvo per il campione 115. Non è altrettanto evidente per il settore Df, accomunata semplicemente dall'alto grado di salinità

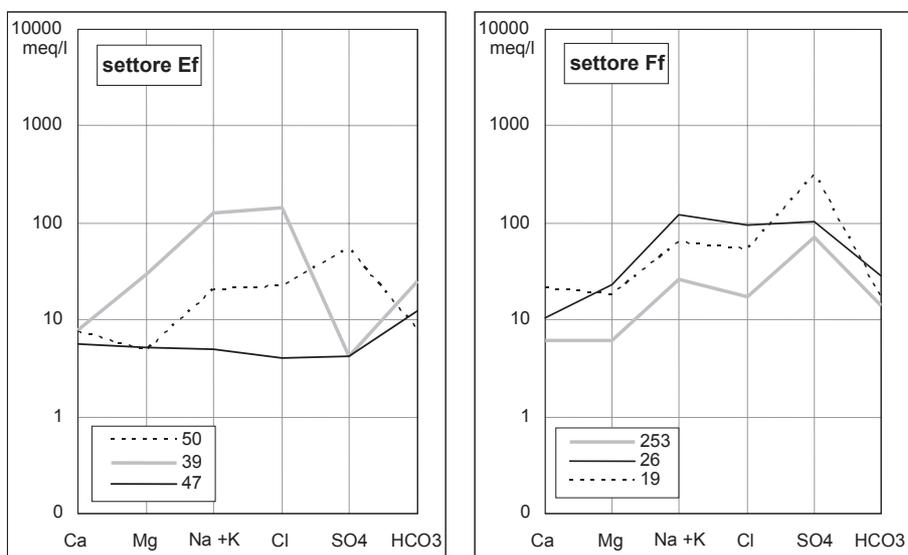


Figura 12 - Diagramma di Schoeller- Berkaloff. Un differente grado di mineralizzazione emerge nel settore Ef, mentre in Ff risulta simile, anzi si percepisce un arricchimento tra il 253 (situato sul Terrazzo di Livorno) ed il 19 (zona di banchina).

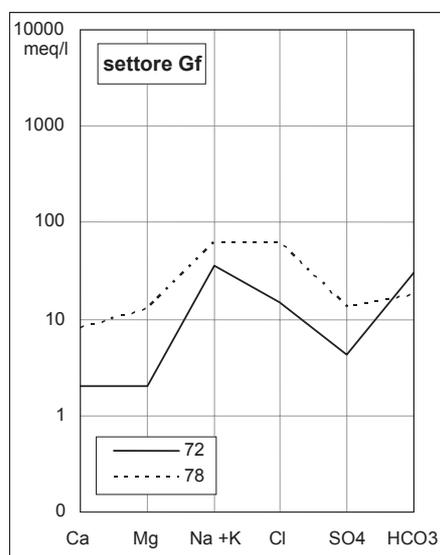


Figura 13- Diagramma di Schoeller- Berkaloff. Un elevato tenore salino, correlato agli alti valori in sodio e cloro, evidenziano l'origine marina delle acque sotterranee di questo settore.

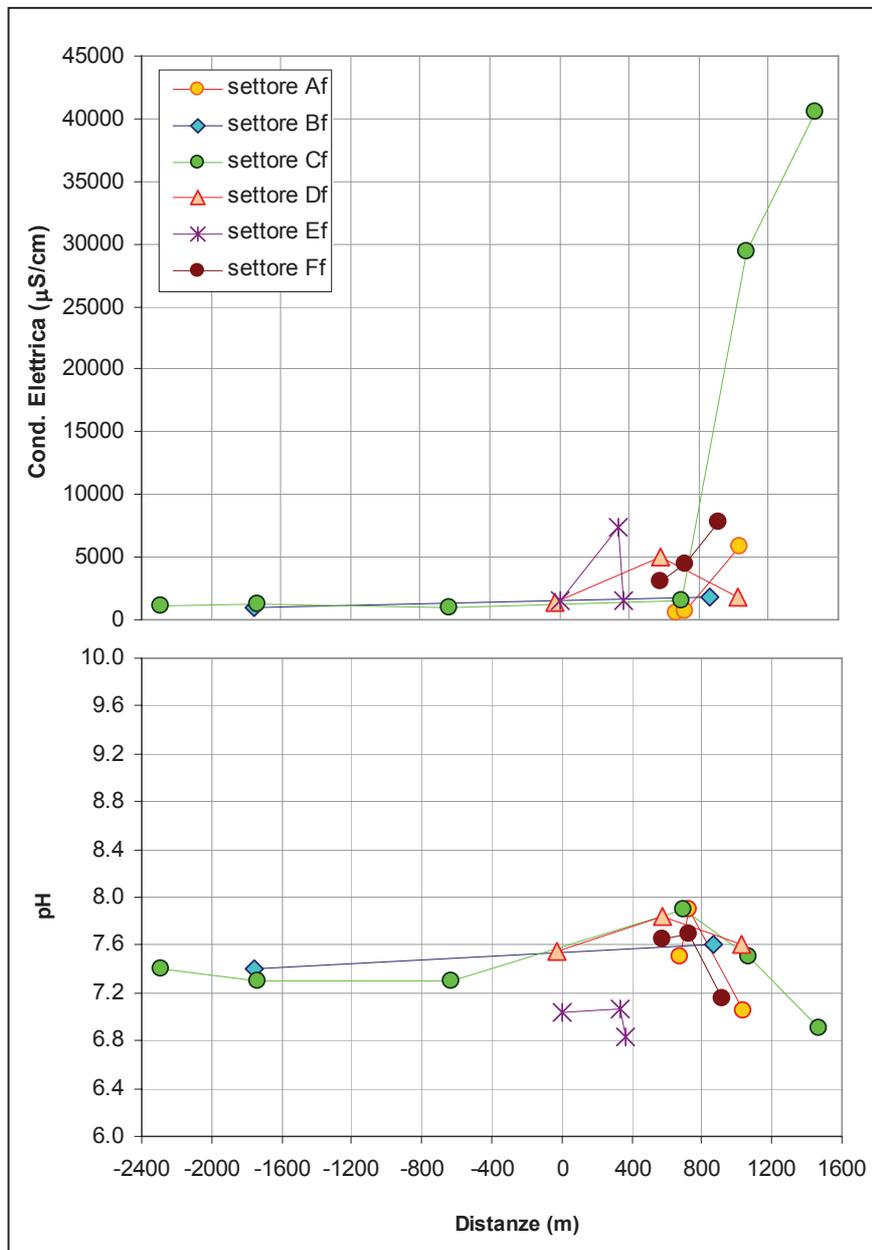


Figura 14 – Diagramma dell'andamento della conducibilità elettrica e del pH rispetto alle distanze misurate da un punto arbitrario situato sul Terrazzo di Livorno (limite geomorfologico battezzato come punto zero). È evidente come la conducibilità elettrica aumenti all'aumentare delle distanze, rispecchiando l'evoluzione mineralogica delle acque (*water rock interaction*), mentre il pH si mantiene compreso tra 6.8 e 8.0, in accordo con i valori rilevati in studi di aree contigue.

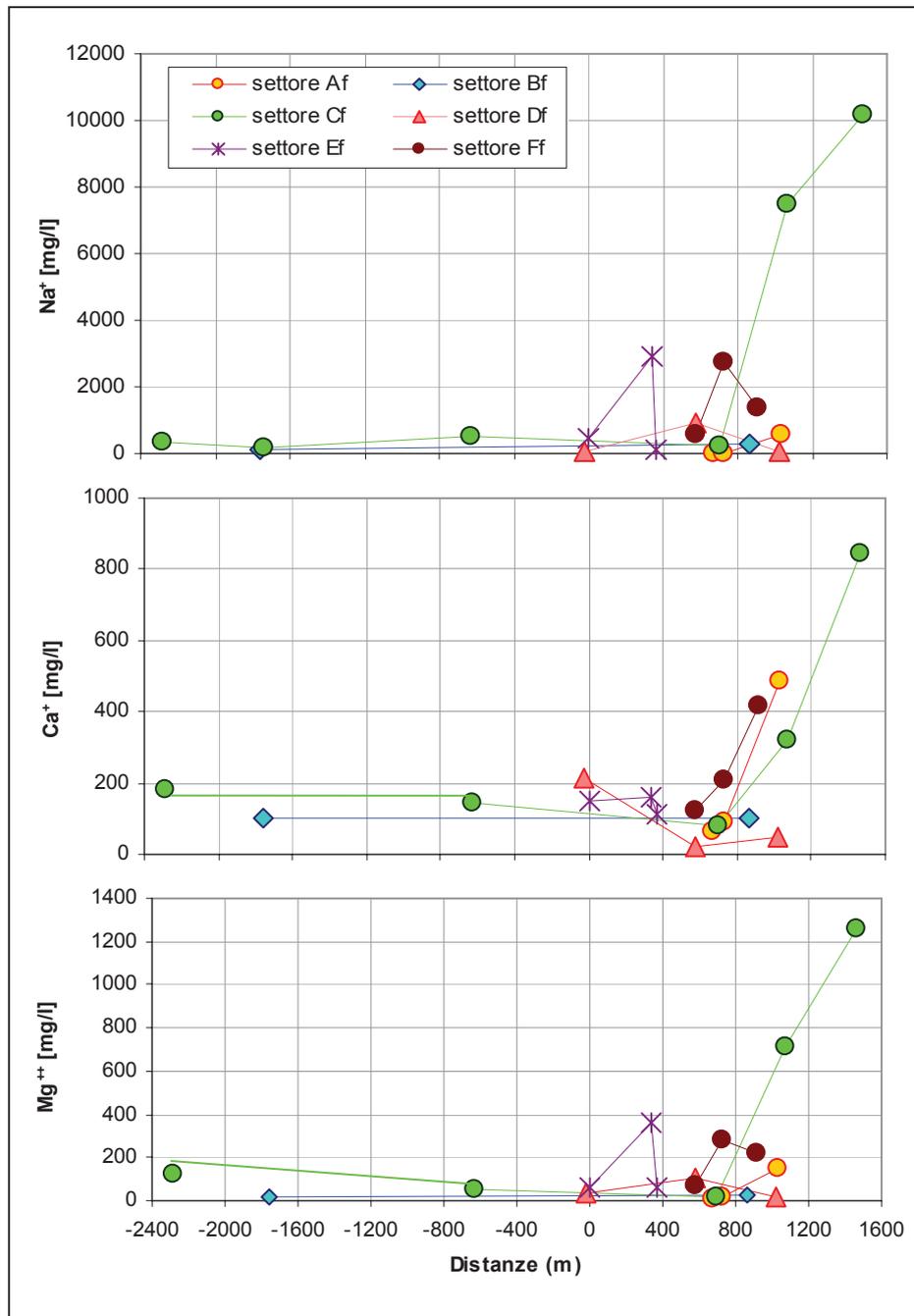


Figura 15 e 16 – Andamento anioni-cationi rispetto alle distanze relative calcolate rispetto al limite geomorfologico del *Terrazzo di Livorno*. Le concentrazioni cationiche aumentano all'allontanarsi dall'area di ricarica, mentre per gli anioni l'andamento è più eterogeneo.

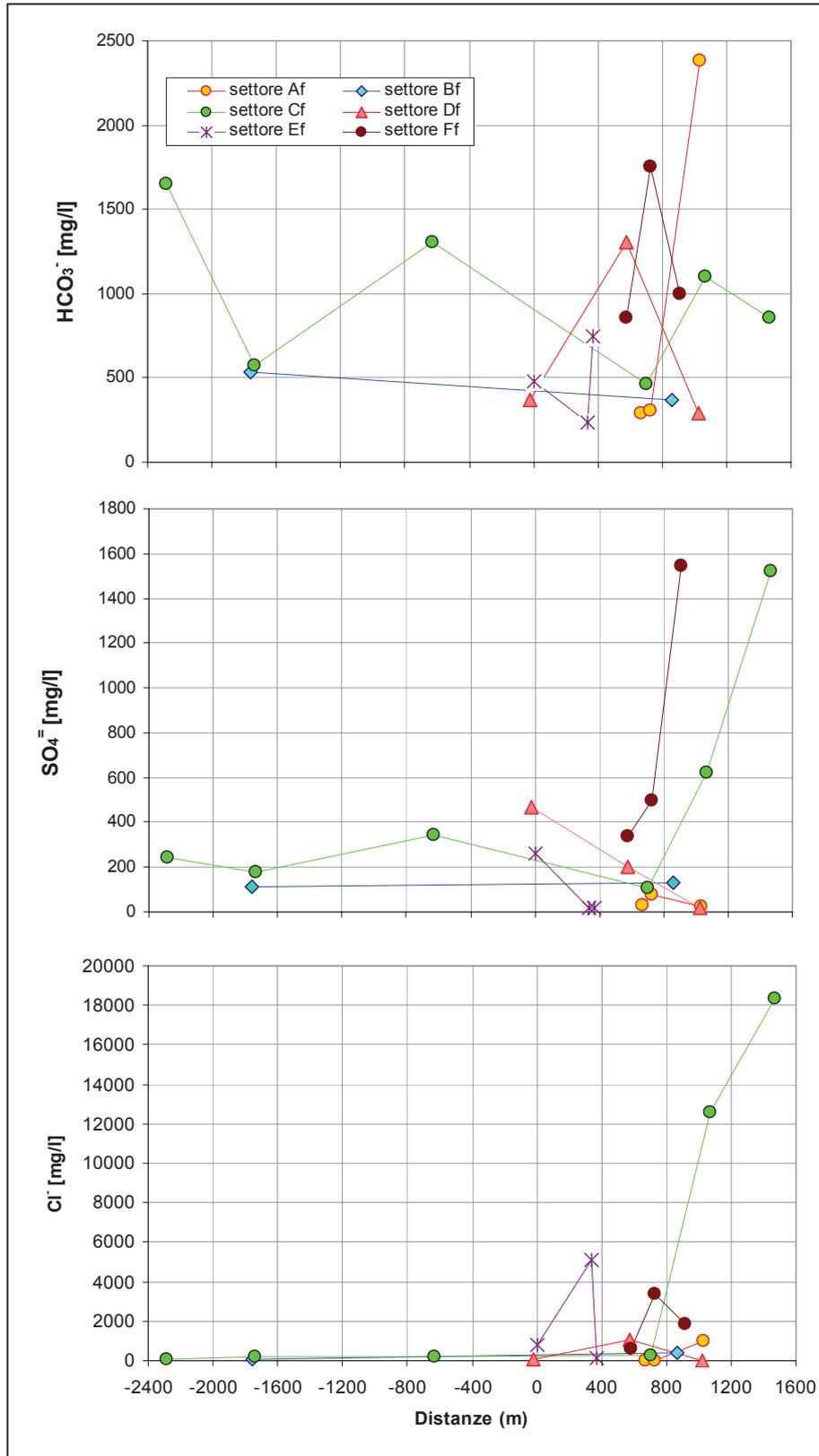


Figura 16 – Andamento anioni rispetto alle distanze relative calcolate rispetto al limite geomorfologico del *Terrazzo di Livorno*.

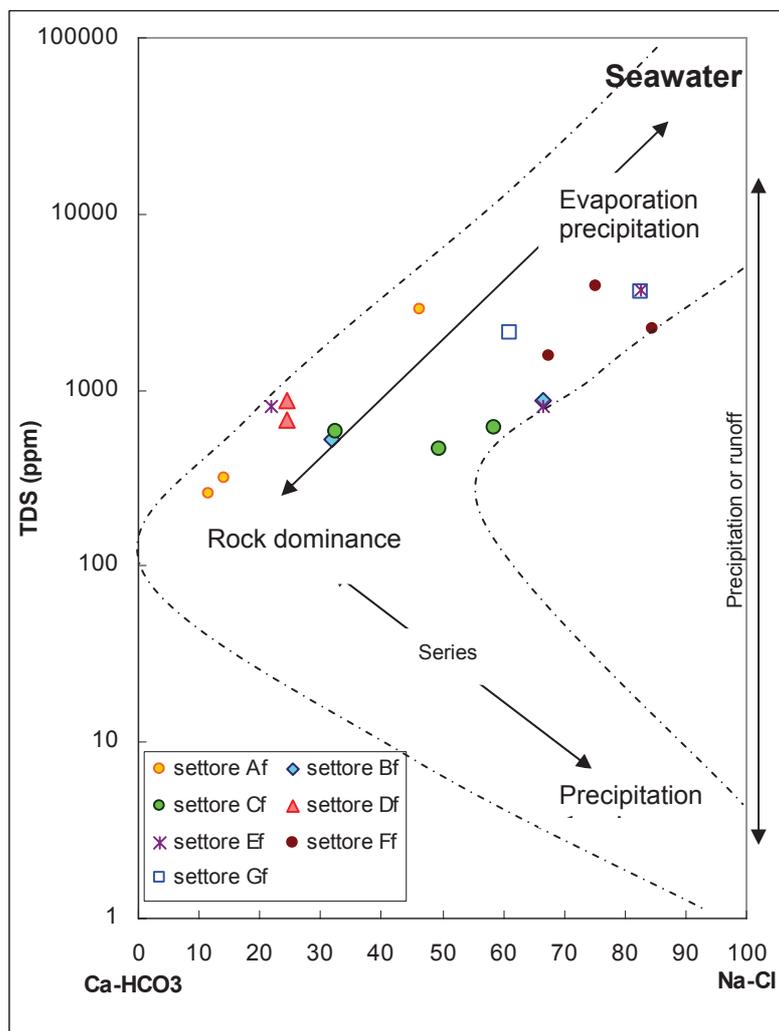


Figura 17 – Diagramma di correlazione salinità totale e concentrazioni parziali di Ca-HCO<sub>3</sub> ed Na-Cl. Il confronto consente di individuare la matrice di un'acqua: il settore Af, come pure il Bf, il Cf, il Df e l'Ef, presenta un chimismo influenzato principalmente dall'interazione che l'acqua ha avuto con la litologia che ha attraversato. Per ciò che concerne i settori Ff e Gf, appare evidente il dominio prevalente marino.

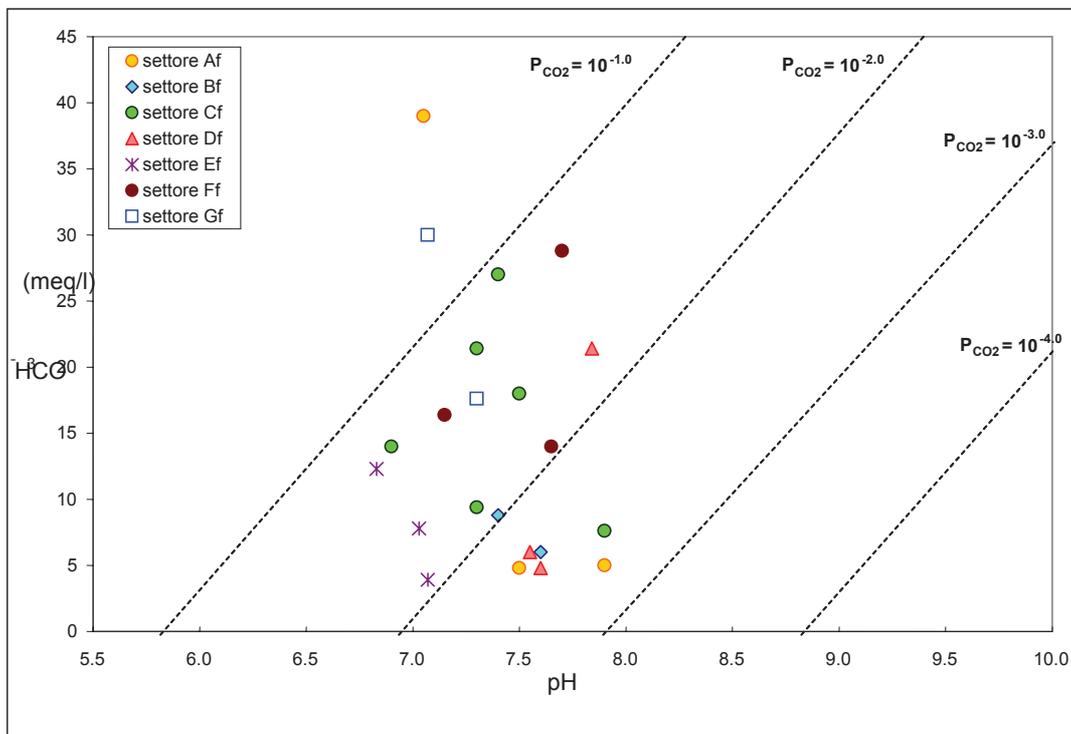


Figura 18 – Diagramma di correlazione pH e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Tale confronto permette di descrivere il comportamento del sistema rispetto alla CO<sub>2</sub> proveniente prevalentemente dall'atmosfera. Nel nostro caso, con buona approssimazione si può affermare che l'acquifero presenta tenori elevati di pCO<sub>2</sub> e che quindi possa essere definito freatico. Tali processi, sono molto sensibili alle variazioni di temperatura, è necessario pertanto tenere presente che l'ambiente in cui si è operato si muoveva in range di temperatura che oscillano tra i 20° C ed i 25°C, ed inoltre sicuramente estranea alle escursioni termiche giornaliere.

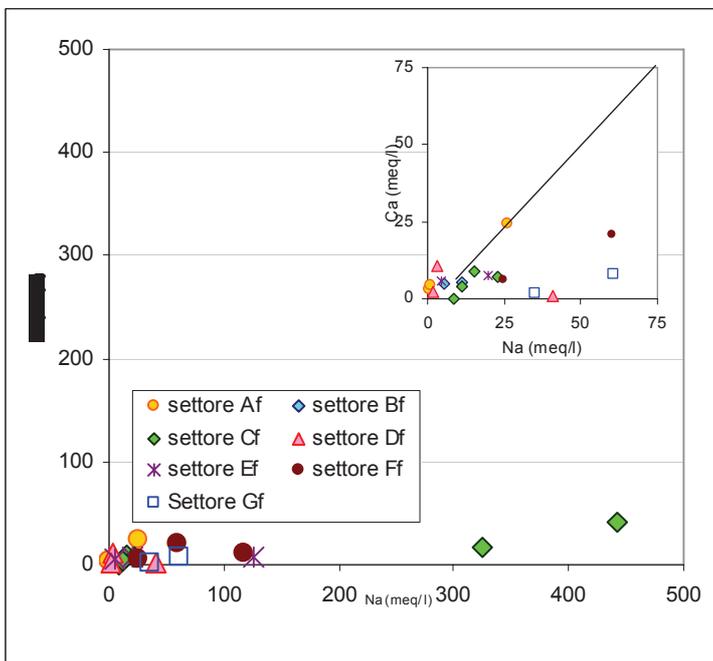
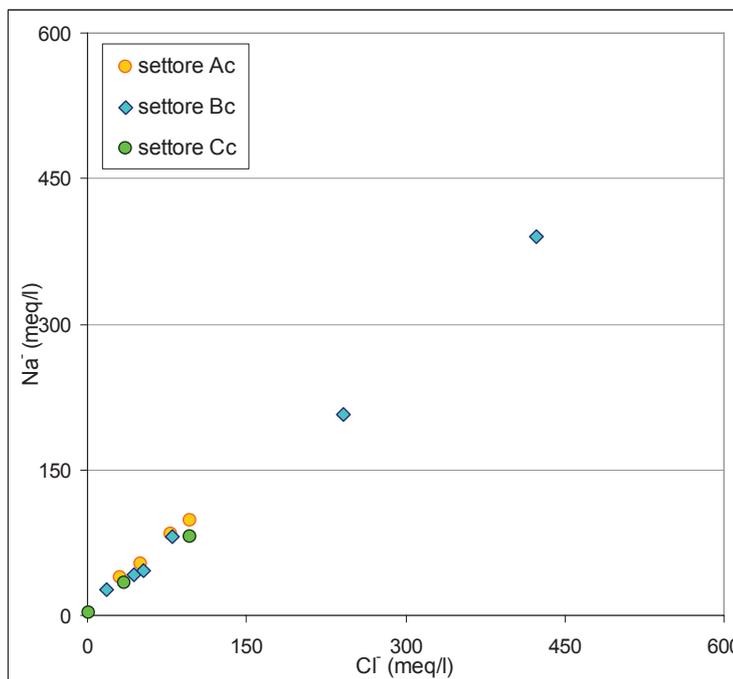


Figura 19 – Diagramma di correlazione Ca – Na. L'elevata concentrazione dello ione sodio è caratteristica di acque di origine marina.

Figura 20 – Diagramma di correlazione Na – Cl. Le concentrazioni dei due elementi sono in equilibrio tra loro. Tale rapporto può indicare la presenza di acqua salmastra



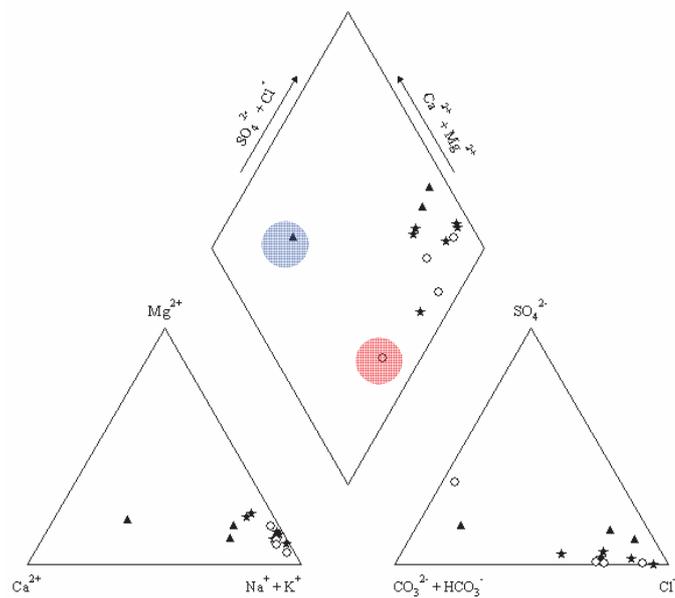


Figura 21 – Diagramma di Piper a diamante. Eccezion fatta per due campioni, il 251 ed 294 , il diagramma individua un'unica famiglia di acque in cui cloro e sodio sono prevalenti, riconducendo ad una probabile origine marina.

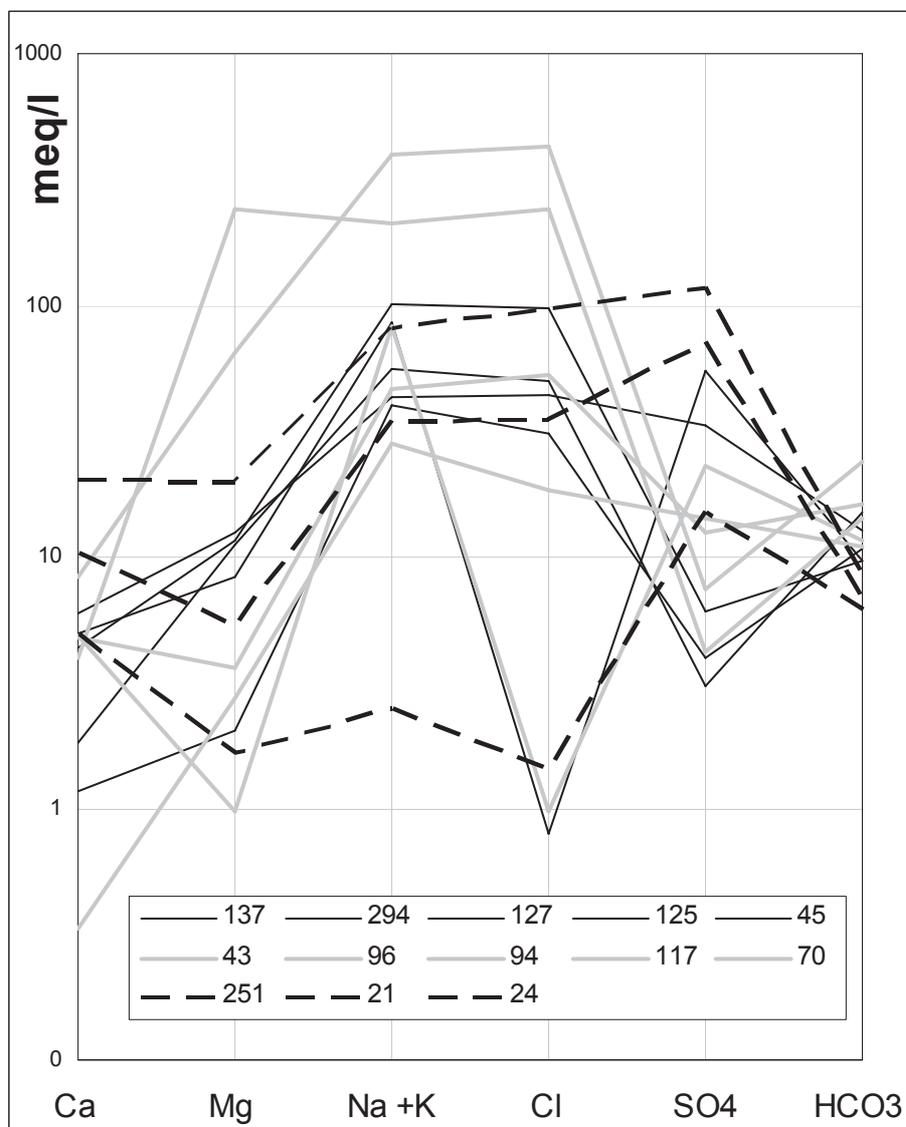


Figura 22 – Diagramma di Schoeller- Berkaloff. Le acque dell'acquifero profondo presentano un grado di mineralizzazione elevato.

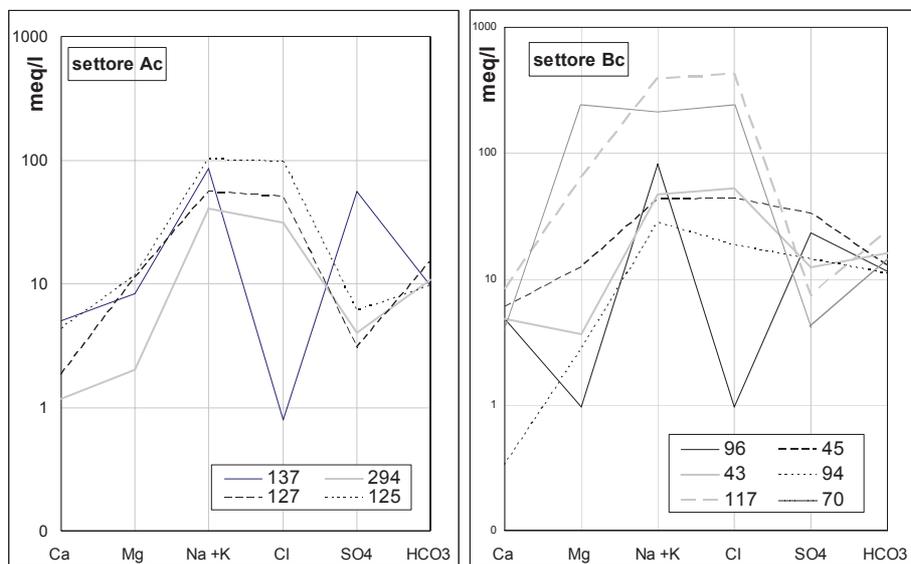


Figura 23 – Diagramma di Schoeller- Berkaloff. Nel settore Ac, le acque hanno caratteristiche geochimiche simili, tranne per il campione 137, che differisce per le concentrazioni anioniche. I campioni del settore Bc sono poco omogenee, salvo presentare simili tenori in sodio e cloro.

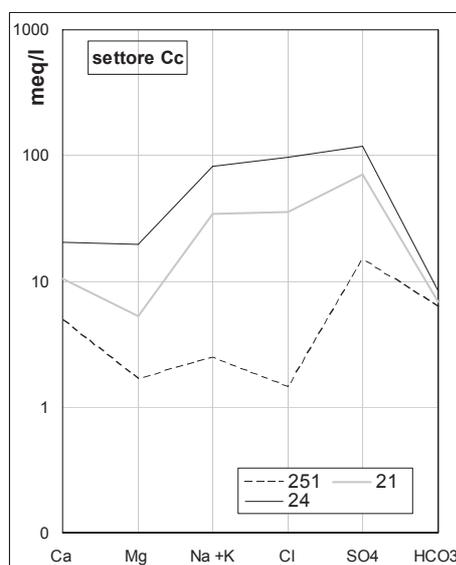


Figura 24 – Diagramma di Schoeller- Berkaloff. Le proporzioni delle concentrazioni ioniche sono apparentemente simili, testimoniando una possibile evoluzione geochimica, dal 251 più a monte sino al 24 in zona di banchina.

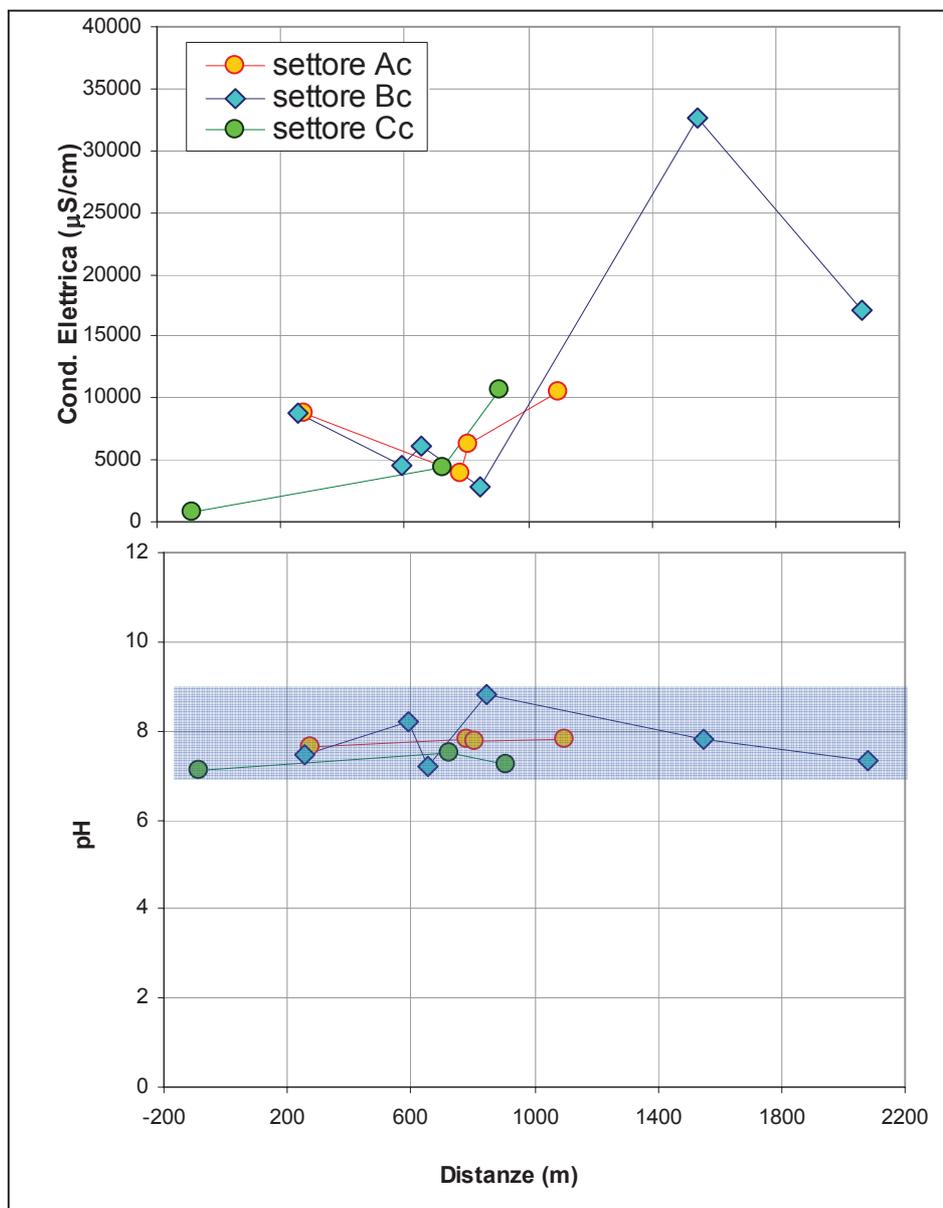


Figura 25 – Diagramma dell'andamento della conducibilità elettrica e del pH rispetto alle distanze misurate da un punto arbitrario situato sul Terrazzo di Livorno (limite geomorfologico battezzato come punto zero). La conducibilità elettrica aumenta in funzione delle distanze dall'area di ricarica, rispecchiando l'evoluzione geochemica imputabile all'interazione acqua-roccia. Il pH oscilla tra 7.3 e 8.8.

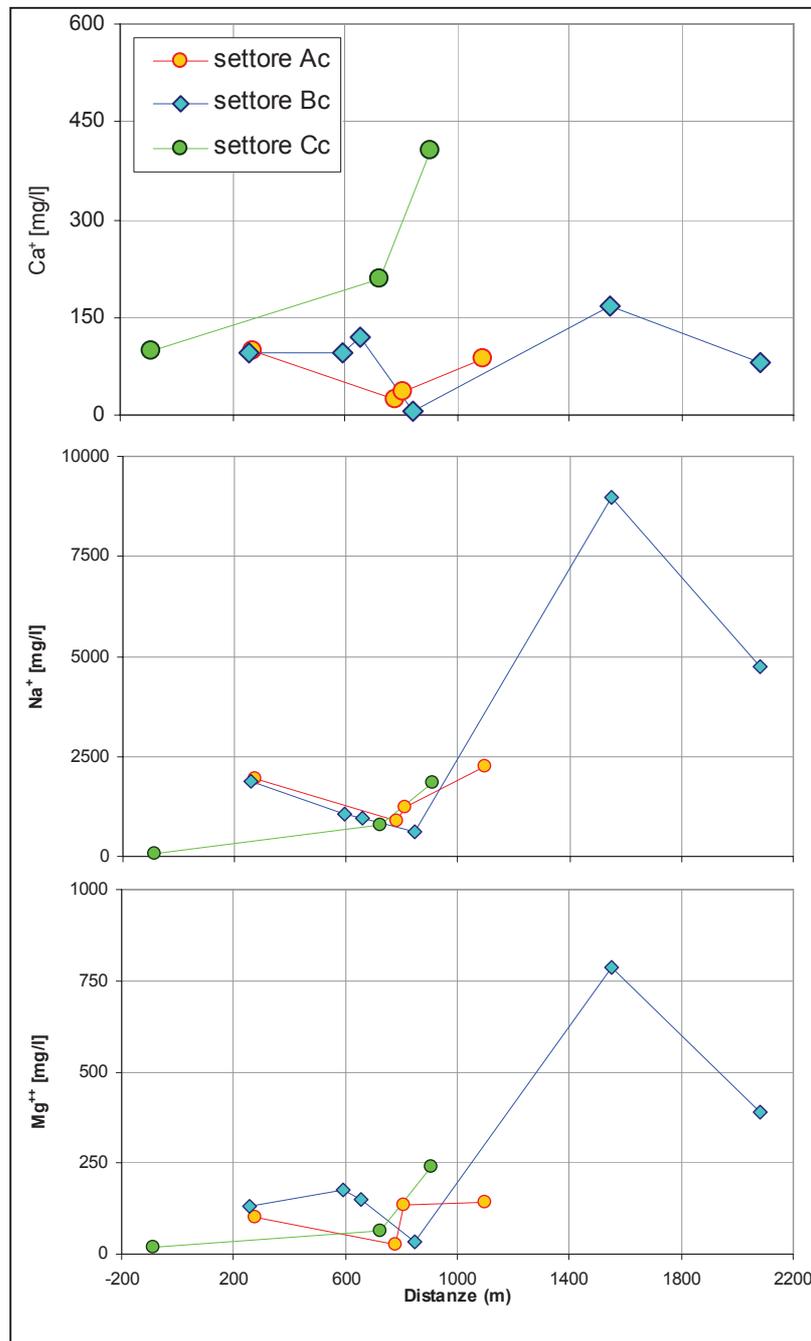


Figura 26 e 27 – Andamento anioni e cationi rispetto alle distanze relative calcolate rispetto al limite geomorfologico del Terrazzo di Livorno. Le concentrazioni cationiche aumentano all'allontanarsi dall'area di ricarica, in modo coerente tra i vari settori, mentre per gli anioni l'andamento è più eterogeneo. I solfati del settore Cc, subiscono evidentemente l'influenza delle acque del Rio *Puzzolente*. Il cloro presenta un evidente aumento verso l'ambiente marino.

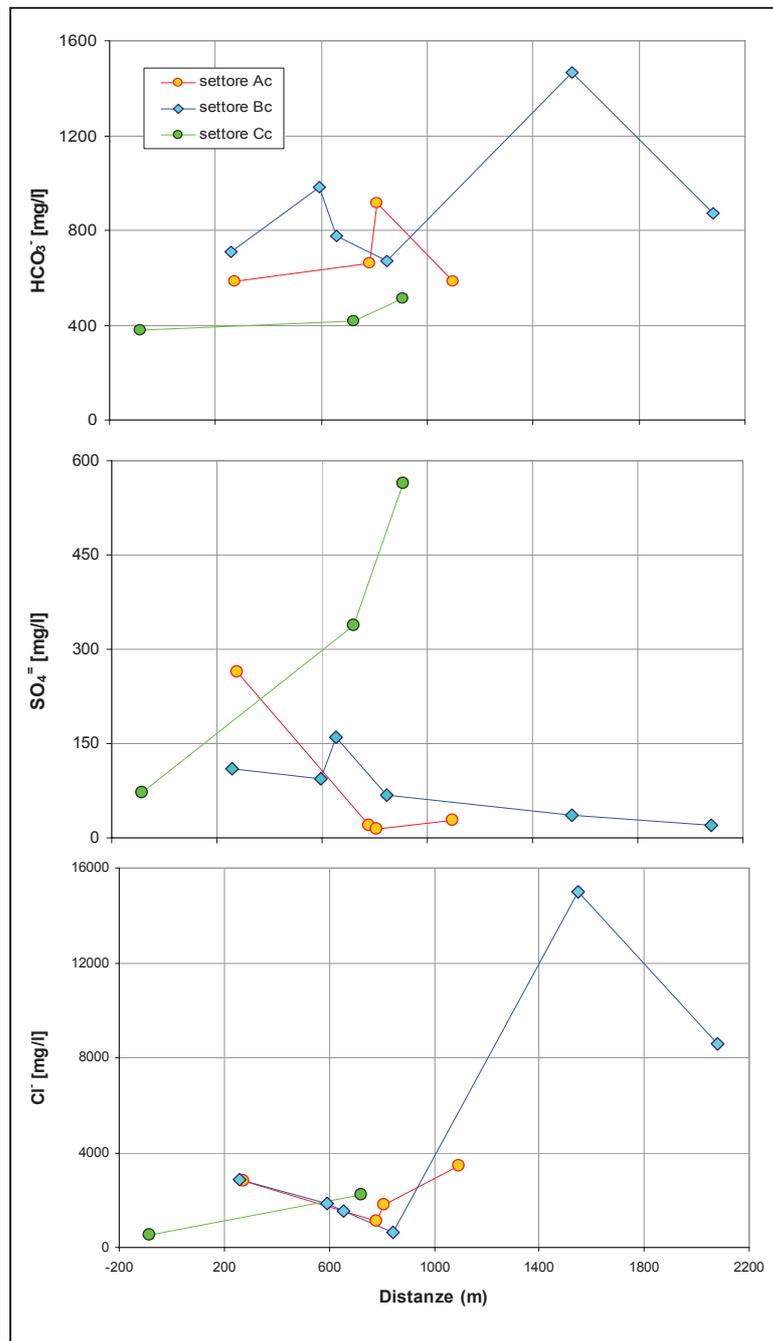
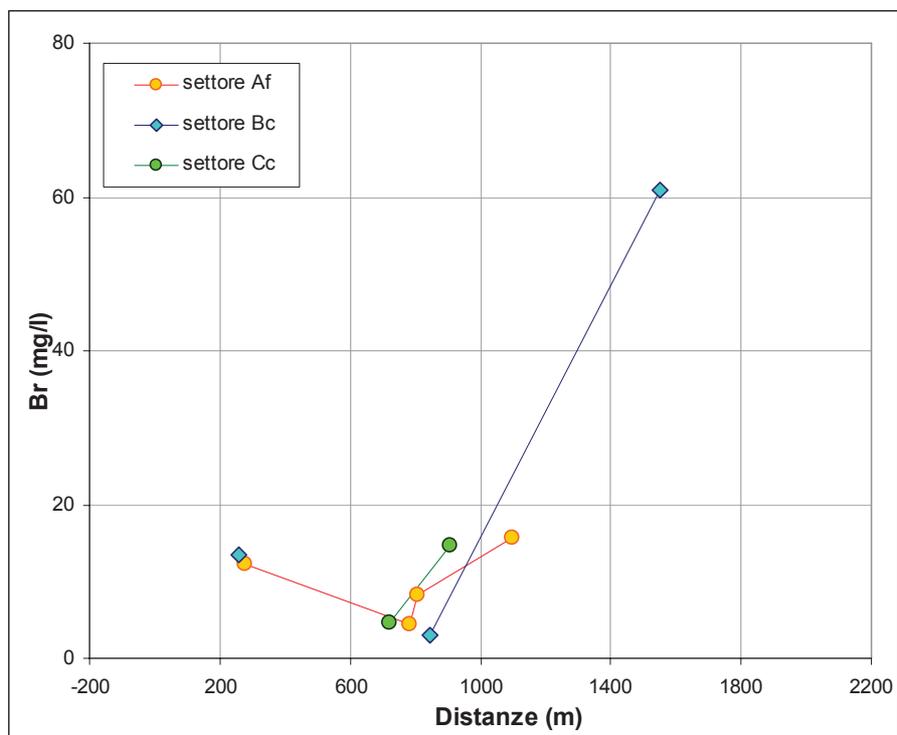


Figura 27 – Andamento anioni rispetto alle distanze relative calcolate rispetto al limite geomorfologico del Terrazzo di Livorno.



*Figura 28* – Andamento dello ione Bromo rispetto alle distanze relative calcolate rispetto al limite geomorfologico del Terrazzo di Livorno. La presenza di questo ione associato ad alti tenori in cloro è tipico di acque di origine marina.

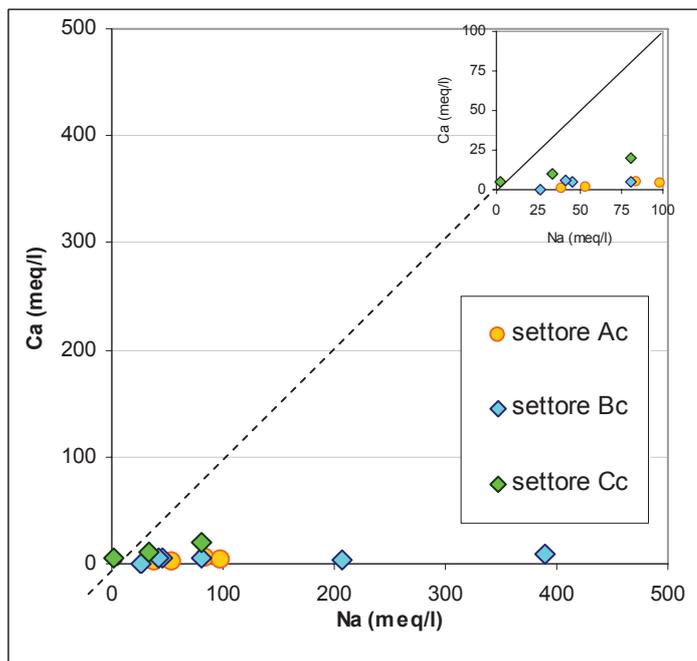
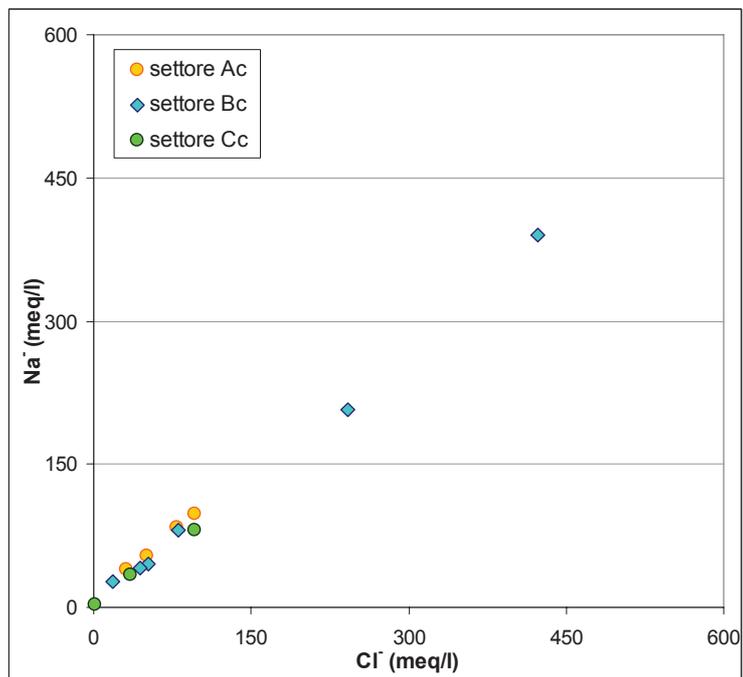


Figura 29 – Diagramma di correlazione Ca – Na. L'elevata concentrazione dello ione sodio è caratteristica di acque di origine marina.

Figura 30 – Diagramma di correlazione Na – Cl. Le concentrazioni dei due elementi sono in equilibrio tra loro. Tale rapporto può indicare la presenza di acqua salmastra



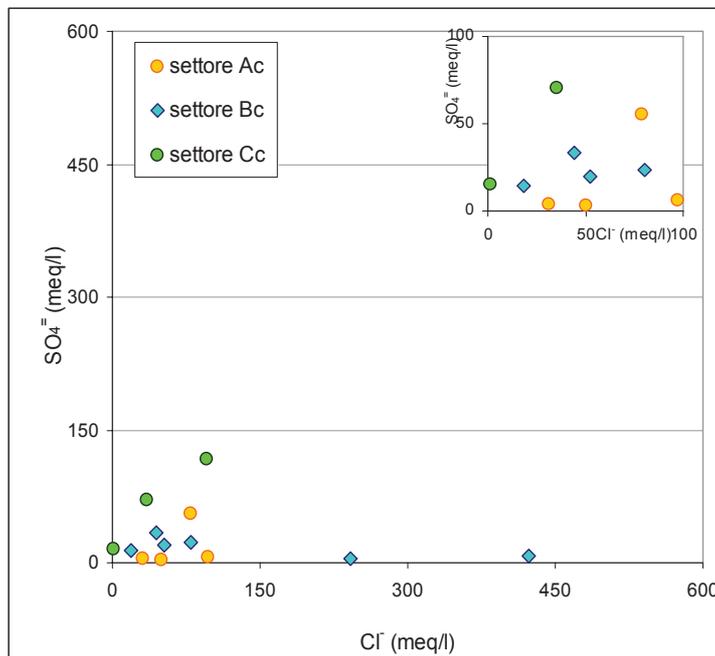
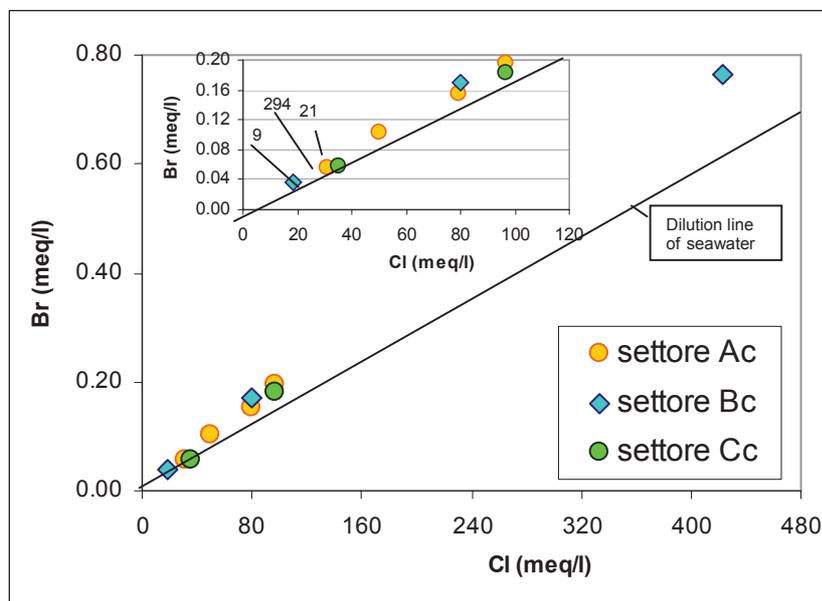


Figura 31 – Diagramma di correlazione  $\text{SO}_4^{2-}$  – Cl. Il rapporto, in accordo con i valori tipici delle regioni costiere risulta essere molto basso, testimoniando un probabile fenomeno di ingressione marina.

Figura 32 – Diagramma di correlazione Br – Cl. Rapporti inferiori a  $3.0 \cdot 10^{-3}$ , associati ad alti contenuti in cloro testimoniano possibili mescolamenti tra acque marine e di falda.



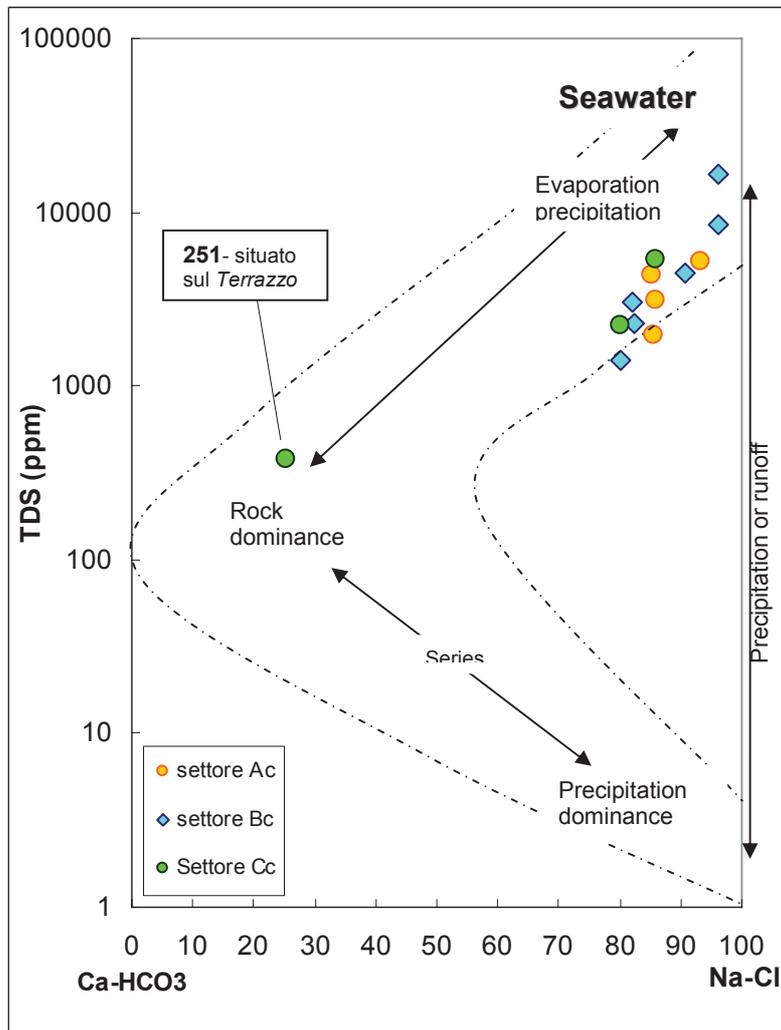


Figura 33 – Diagramma di correlazione salinità totale e concentrazioni parziali di Ca-HCO<sub>3</sub> ed Na-Cl. I valori riportati nel grafico individuano indubbiamente la matrice marina delle acque in studio, ad esclusione del punto 251 (situato sul Terrazzo, profondità 12 metri circa)

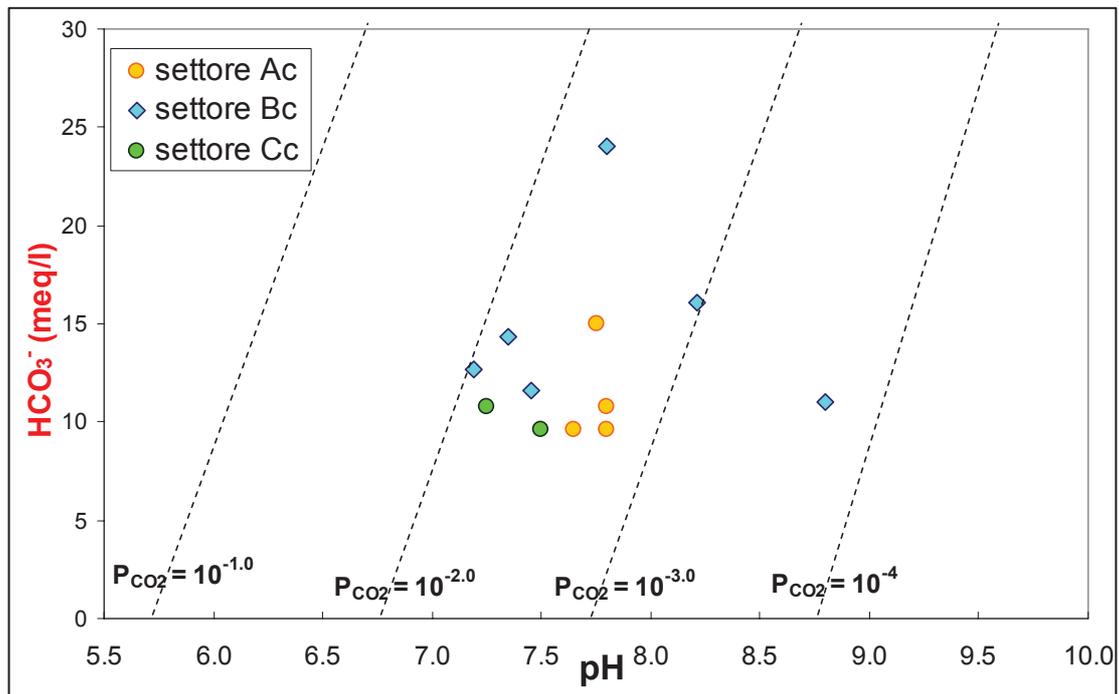


Figura 34 – Diagramma di correlazione pH e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Tale confronto permette di descrivere il comportamento del sistema rispetto alla CO<sub>2</sub> proveniente prevalentemente dall'atmosfera. Nel nostro caso, con buona approssimazione si può affermare che l'acquifero presenta moderate concentrazioni di pCO<sub>2</sub> e che pertanto, gli scambi con l'atmosfera appaiono ridotti. L'equilibrio termodinamico del sistema, sicuramente non risulta essere perturbato dalle variazioni di temperatura, la quale oscilla intorno ai 20°C a seconda dei punti di prelievo.

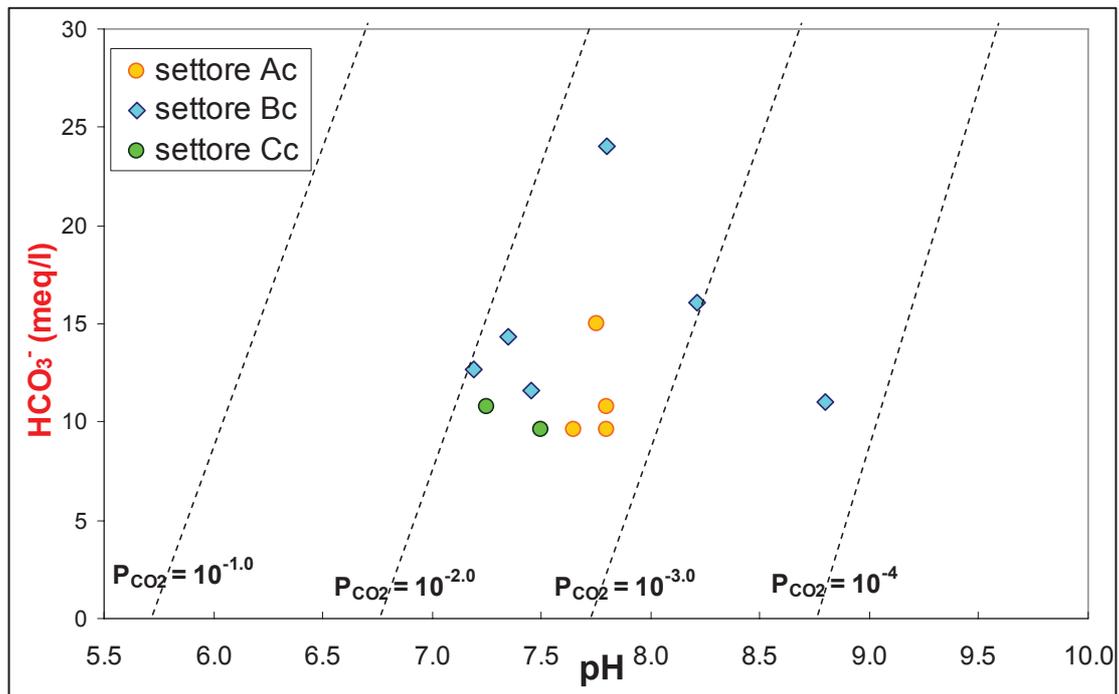


Figura 34 – Diagramma di correlazione pH e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Tale confronto permette di descrivere il comportamento del sistema rispetto alla CO<sub>2</sub> proveniente prevalentemente dall'atmosfera. Nel nostro caso, con buona approssimazione si può affermare che l'acquifero presenta moderate concentrazioni di pCO<sub>2</sub> e che pertanto, gli scambi con l'atmosfera appaiono ridotti. L'equilibrio termodinamico del sistema, sicuramente non risulta essere perturbato dalle variazioni di temperatura, la quale oscilla intorno ai 20°C a seconda dei punti di prelievo.

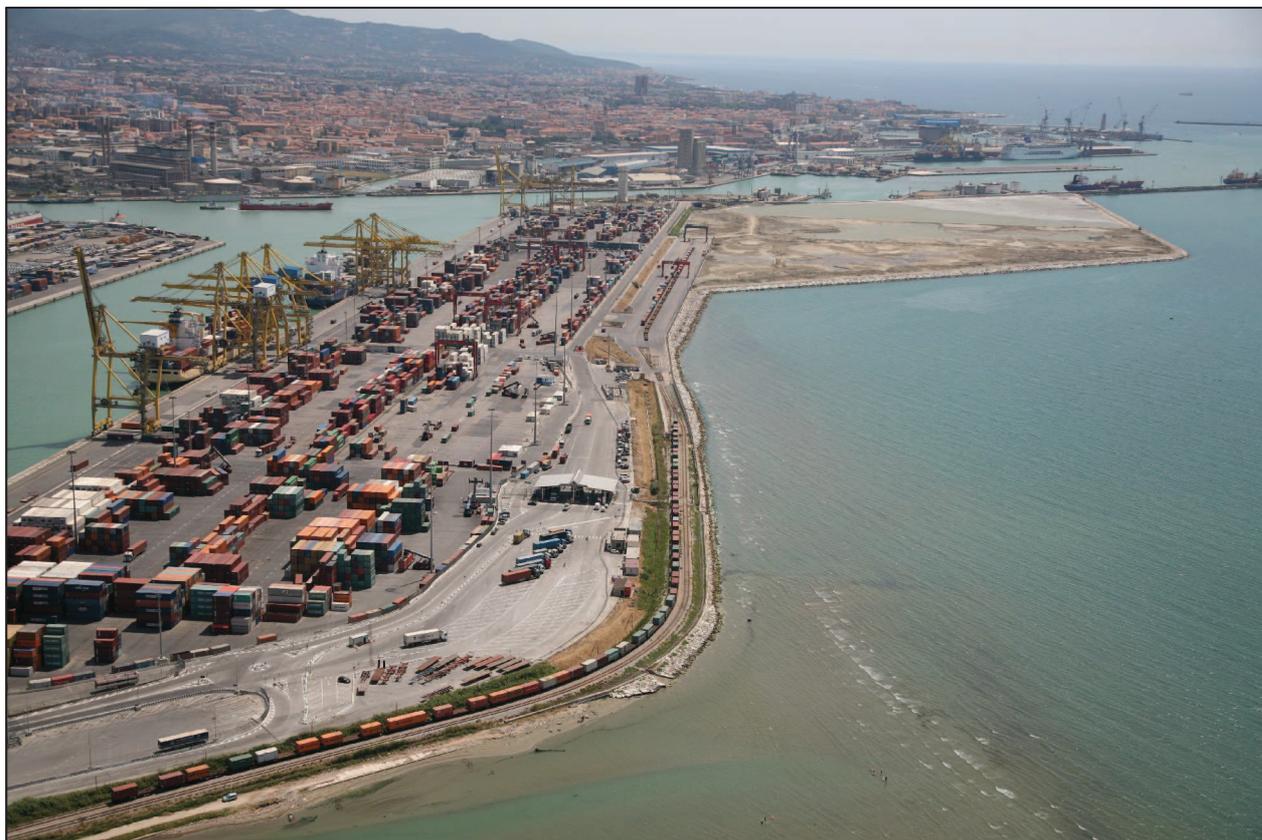


## ALLEGATO 2

Studio sulla dinamica del litorale



# "LAVORI DI COSTRUZIONE DI UNA VASCA DI CONTENIMENTO PER SEDIMENTI DI DRAGAGGIO DEL PORTO DI LIVORNO"



**PROGETTISTA:**

**Dott. Ing. Enrico PRIBAZ**

**Direzione Tecnica AUTORITA' PORTUALE DI LIVORNO**

**COLLABORATORI:**

**Dott. Ing. Andrea BALUARDI**

**Dott. Raoul RAFFALLI**

**Direzione Tecnica AUTORITA' PORTUALE DI LIVORNO**



**AUTORITA' PORTUALE DI LIVORNO**

Scali Rosciano n° 6/7 - 57123 Livorno

Tel: +390586249411

		<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		<b>R 10</b>
<b>DATA :</b> Settembre 2008		<b>STUDIO SULLA DINAMICA DEL LITORALE</b>		
<b>REV.</b>	<b>DATA</b>			<b>Responsabile del Procedimento : il Dirigente Dott. Ing. Giovanni MOTTA</b>



**Autorità Portuale di Livorno**



**Realizzazione della seconda vasca di contenimento per sedimenti di dragaggio del Porto di Livorno**

**Oggetto: Studio della dinamica locale**

Revisione	Codice Elaborato	Data	Redatto	Approvato
01	PT26-07-VC-R02-01	Gennaio 2008	G. Carosi	M. Verzoni

**I tecnici:**

Ing. Maurizio Verzoni  
Ing. Pietro Chiavaccini

**Il responsabile del procedimento:**

Ing. Giovanni Motta

**Collaboratrice:**

Ing. Giovanna Carosi



**PRIMA**

VIA GIVININI N. 8 57128 LIVORNO  
P.I.: 01530730496 TEL/FAX 0586 581272  
WWW.PRIMAINGEGNERIA.IT



# INDICE

1. PREMESSA.....	4
2.PROPOSTE PROGETTUALI.....	5
2.1. PROPOSTA PROGETTUALE N.1 ( Vasca di contenimento con molo in prolungamento).....	6
2.2. PROPOSTA PROGETTUALE N.2 (Vasca di contenimento R=100m).....	7
2.3. PROPOSTA PROGETTUALE N.3 (Vasca di contenimento R=700m).....	7
2.4. PROPOSTA PROGETTUALE N.4 (Vasca di contenimento R=250m).....	8
3.APPLICAZIONE DEI MODELLI ALLE PROPOSTE DI INTERVENTO .....	9
3.1 STUDIO METEOMARINO.....	9
3.2 COSTRUZIONE DEL MODELLO.....	11
3.3 RISULTATI.....	15
3.3.1. STATO ATTUALE.....	15
3.3.2. PROPOSTA PROGETTUALE n.1.....	18
3.3.3. PROPOSTA PROGETTUALE n.2.....	21
3.3.4. PROPOSTA PROGETTUALE n.3.....	24
3.3.5. PROPOSTA PROGETTUALE n.4.....	26
3.3.5.1. ANALISI DI DETTAGLIO DEL TRASPORTO SOLIDO .....	29
4.CONCLUSIONI.....	33
ALLEGATI .....	35
APPENDICE .....	44
CODICE DI CALCOLO DEL MODELLO STWAVE.....	44
CODICE DI CALCOLO DEL MODELLO M2D.....	46



# 1. PREMESSA

---

Nella presente relazione è illustrato lo studio delle diverse proposte progettuali per la realizzazione della Nuova Vasca di contenimento, finalizzato ad individuare la configurazione ottimale dell'opera, intesa come quella in grado di minimizzare gli effetti sulla dinamica costiera massimizzando il volume utile della vasca. Alla luce di ciò di ogni soluzione sono valutati l'attenuazione del moto ondoso, la circolazione idrodinamica ed il trasporto solido attraverso l'interpretazione dei risultati forniti dai modelli numerici.

Lo studio di ciascuna proposta progettuale è articolato in quattro parti:

- determinazione del clima meteomarinico a largo del porto di Livorno, per le cui specifiche si rimanda allo studio meteomarinico;
- costruzione dei modelli numerici a supporto dei programmi di calcolo utilizzati per analizzare la propagazione del moto ondoso da largo verso riva, il trasporto dei sedimenti e le modifiche morfologiche della linea di riva;
- analisi dei risultati forniti dai modelli numerici;
- valutazione della scelta progettuale



## 2. PROPOSTE PROGETTUALI

Come mostrato in Figura 1, la Vasca già realizzata è a ridosso della diga del Marzocco, dista dalla riva circa 580m e corre parallelamente a questa per circa 700m. La Nuova Vasca di contenimento è prevista in prolungamento a quella esistente verso nord, parallelamente alla linea di riva, nel rispetto delle previsioni del Piano Strutturale (art.24 - Sottosistema 5A).



**Figura 1 Foto di inquadramento: Vasca di contenimento esistente**

Dato che la collocazione della Nuova Vasca è fissata dagli strumenti urbanistici e la sezione della scogliera da adottare (Figura 2) è stata già dettagliatamente discussa nello studio meteomarinario al quale si rimanda; nel presente studio sono proposte ed analizzate in dettaglio quattro soluzioni progettuali che variano una dall'altra per la differente geometria perimetrale adottata. È presentata una soluzione avente un molo verso nord in prolungamento del tratto della vasca parallelo a riva, ed altre tre nelle quali è variato il raggio di curvatura del raccordo tra il tratto ortogonale e quello parallelo alla riva. Ogni proposta progettuale è analizzata e



valutata alla luce degli effetti che questa ha sulla propagazione del moto ondoso, sulla circolazione idrodinamica e sul trasporto solido.

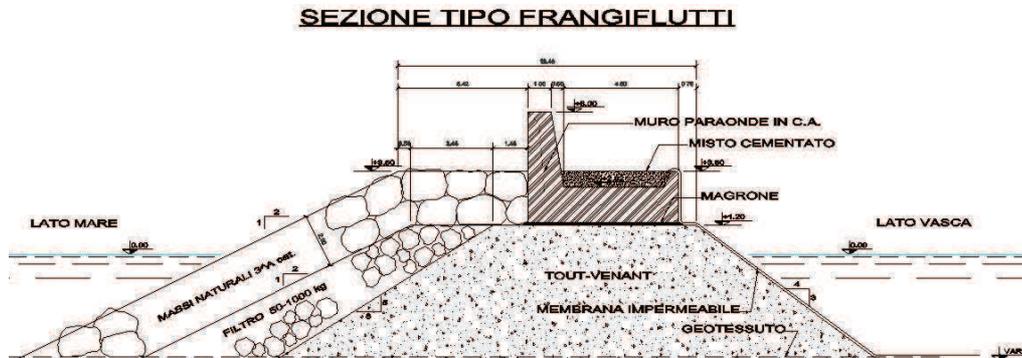


Figura 2 Sezione tipo lato parallelo a riva

## 2.1. PROPOSTA PROGETTUALE N.1 ( Vasca di contenimento con molo in prolungamento)

La soluzione proposta prevede la realizzazione della Nuova Vasca di contenimento in prolungamento all'esistente per 680m verso nord ad una distanza di circa 580m da riva. In prosecuzione del lato perimetrale parallelo alla riva, inoltre, la soluzione contempla la realizzazione di un molo di circa 200m di lunghezza (Figura 3).

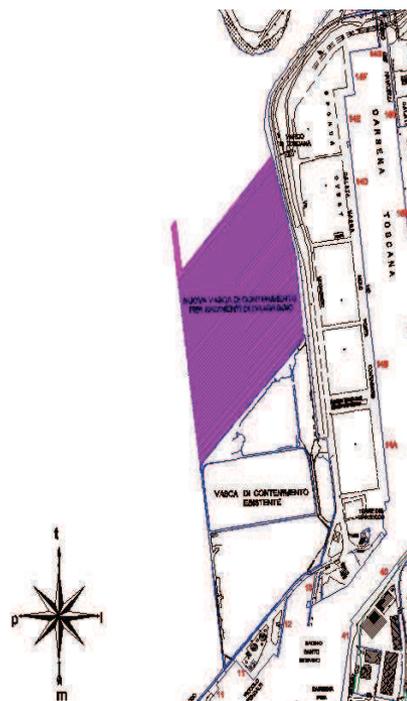


Figura 3 Proposta progettuale n.1



## 2.2. PROPOSTA PROGETTUALE N.2 (Vasca di contenimento R=100m)

La soluzione proposta prevede che la Nuova Vasca di contenimento mantenga le misure perimetrali della prima configurazione: 680m di lunghezza, parallelamente a riva, in prolungamento della vasca esistente verso nord, e 580m di larghezza. Il raccordo tra i due lati perimetrali della vasca è di circa 100m e, rispetto alla prima soluzione, è assente il molo in prosecuzione del lato parallelo a riva ( Figura 4).

## 2.3. PROPOSTA PROGETTUALE N.3 (Vasca di contenimento R=700m)

La soluzione proposta mantiene la geometria perimetrale e la configurazione della precedente fatta eccezione per il raggio di curvatura del raccordo tra i due lati, quello parallelo e quello ortogonale a riva, che in questo caso è di circa 700m (Figura 5).

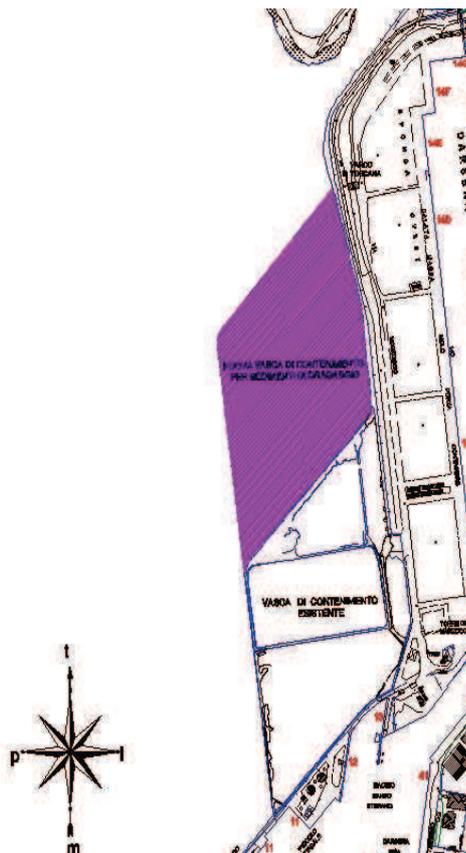


Figura 4 Proposta progettuale n.2



Figura 5 Proposta progettuale n.3



## 2.4. PROPOSTA PROGETTUALE N.4 (Vasca di contenimento R=250m)

La soluzione proposta prevede che i lati perimetrali della Vasca siano raccordati con un raggio di curvatura pari a 250m ( Figura 4). Tale valore è intermedio tra quello adottato nelle configurazioni progettuali estreme descritte nei paragrafi precedenti.

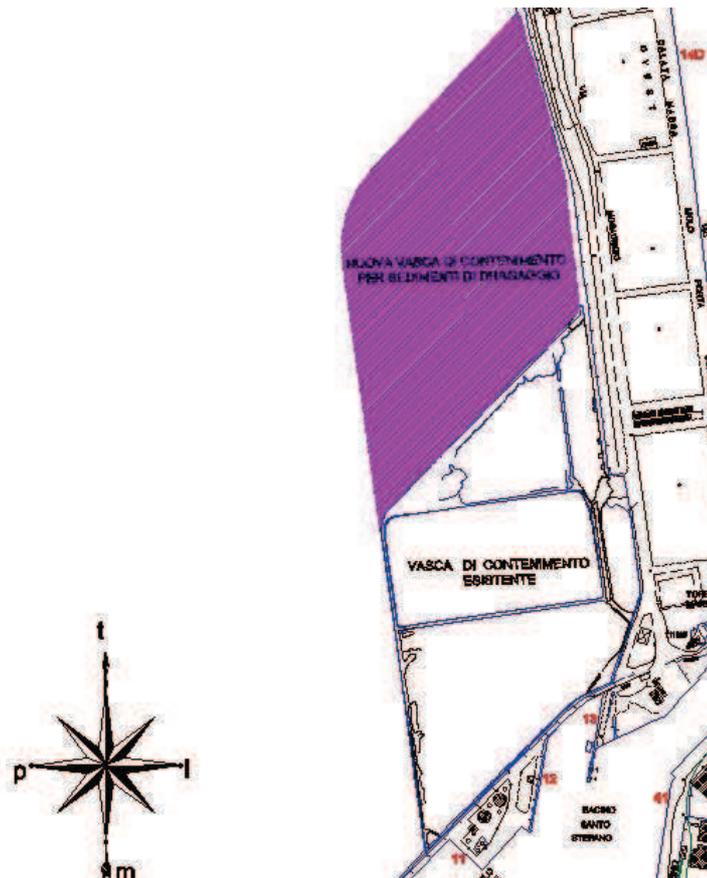


Figura 6 Proposta progettuale n.4



## 3. APPLICAZIONE DEI MODELLI ALLE PROPOSTE DI INTERVENTO

In questo capitolo sono illustrati i risultati ottenuti dall'applicazione al caso in esame dei software del pacchetto SMS. Infatti, note le caratteristiche delle onde di riferimento a largo e costruito un modello numerico per ogni proposta progettuale è possibile descrivere, con buona approssimazione, la propagazione del moto ondoso in bassi fondali, l'andamento del trasporto solido e le modifiche morfologiche della linea di riva. Nei successivi paragrafi sono descritte le fasi della costruzione dei modelli, identiche per tutte le proposte progettuali presentate, ed i risultati ottenuti dalle simulazioni.

### 3.1 STUDIO METEOMARINO

Per la determinazione del regime del moto ondoso responsabile del trasporto dei sedimenti e delle modifiche morfologiche della linea di riva si fa riferimento allo studio meteomarino redatto. Per valutare gli effetti sulla dinamica costiera dovuti alla presenza dell'opera sotto l'azione delle mareggiate nel breve e lungo termine sono considerati:

- l'evento ondoso estremo singolo avente tempo ritorno assegnato, le cui caratteristiche riportate in Tabella 1, sono determinate mediante l'analisi statistica dei dati a disposizione descritta dettagliatamente nello studio meteomarino al quale si rimanda;
- le serie di onde di fissata provenienza, altezza d'onda variabile e durata trioraria in modo da simulare l'effetto delle mareggiate. Le successioni di onde riportate in Tabella 2, sono estrapolate dalla serie dei dati d'onda disponibili e trasposti a largo del porto di Livorno, per i cui valori si rimanda allo studio meteomarino. Operando in maniera cautelativa, sono individuati i valori di altezza d'onda con direzione di provenienza dal settore  $180^{\circ}$ - $270^{\circ}$  e da  $270^{\circ}$ - $340^{\circ}$  riferiti alle mareggiate più violente e da questi ricostruita la mareggiata, ritenuta conclusa quando altezza d'onda raggiunge la soglia di 2m e di 1m rispettivamente per il settore  $180^{\circ}$ - $270^{\circ}$  e  $270^{\circ}$ - $340^{\circ}$ . Individuate le due successioni, a queste sono assegnate le direzioni di  $250^{\circ}$  e di  $315^{\circ}$ .



– il clima annuale, inteso come una serie di mareggiate consecutive di durata proporzionale alla frequenza percentuale registrata nell'anno. Nel presente studio l'anno è riportato ad una durata complessiva di 2 mesi in modo tale da ottimizzare i tempi delle simulazioni pur garantendo la rappresentatività dei risultati (Tabella 3). Gli effetti sulla dinamica costiera nell'anno sono analizzati solo per la configurazione definitiva.

Settore Dir.media	157°.5-202°.5 180°		202°.5-247°.5 225°		247°.5-292°.5 270°		292°.5-340° 315°	
Tr	H <sub>s</sub>	T	H <sub>s</sub>	T	H <sub>s</sub>	T	H <sub>s</sub>	T
2 anni	2.8 m	6.8 s	4.6 m	8.8 s	4.7 m	8.8 s	2.4 m	6.3 s
10 anni	3.4 m	7.5 s	5.5 m	9.6 s	5.8 m	9.2 s	2.9 m	6.9 s
30 anni	3.8 m	8.0 s	6.1 m	10 s	6.4 m	10.4 s	3.2 m	7.3 s
50 anni	4.0 m	8.2 s	6.3 m	10.2 s	6.7 m	10.6 s	3.4 m	7.5 s
100 anni	4.3 m	8.5 s	6.7 m	10.5 s	7.1 m	10.9 s	3.6 m	7.7 s

**Tabella 1 Altezza d'onda e periodo a largo del porto di Livorno per tempi di ritorno Tr 2,10, 30, 50 anni**

Mareggiata 250°			Mareggiata 315°		
Durata	H <sub>s</sub>	T	Durata	H <sub>s</sub>	T
0.0 h	2.0 m	8 s	0.0 h	1.0 m	7 s
3.0 h	2.0 m	8 s	3.0 h	1.0 m	7 s
6.0 h	2.0 m	8 s	6.0 h	1.0 m	7 s
9.0 h	3.0 m	8 s	9.0 h	1.0 m	7 s
12.0 h	2.0 m	8 s	12.0 h	2.0 m	7 s
15.0 h	2.0 m	8 s	15.0 h	2.8 m	7 s
18.0 h	3.0 m	8 s	18.0 h	3.8 m	7 s
21.0 h	3.0 m	8 s	21.0 h	3.4 m	7 s
24.0 h	4.0 m	9.5 s	24.0 h	2.2 m	7 s
27.0 h	5.0 m	9.5 s	27.0 h	2.0 m	7 s
30.0 h	4.0 m	9.5 s	30.0 h	1.0 m	7 s
33.0 h	6.0 m	10 s	33.0 h	1.0 m	7 s
36.0 h	5.0 m	9.5 s	36.0 h	1.0 m	7 s
39.0 h	4.0 m	9.5 s			
42.0 h	2.0 m	8 s			
45.0 h	2.0 m	8 s			
48.0 h	2.0 m	8 s			
51.0 h	2.0 m	8 s			
54.0 h	2.0 m	8 s			

**Tabella 2 Successioni di onde a simulazione delle mareggiate**



<b>H<sub>media</sub> Direzione</b>	H <sub>media</sub> =1m	H <sub>media</sub> =2m	H <sub>media</sub> =3m	H <sub>media</sub> =4m	H>4.5m
195°-225°	69	11	2	0	0
225°-255°	177	44	11	4	2
255°-285°	38	4	1	1	0
285°-315°	22	3	1	1	0

**Tabella 3 Clima Annuale utilizzato nelle simulazioni**

## 3.2 COSTRUZIONE DEL MODELLO

La costruzione del modello implica:

- la costruzione delle batimetrie;
- la generazione di griglie necessarie per il calcolo numerico alle differenze finite;
- la definizione delle condizioni al contorno;
- periodo di simulazione e passo di integrazione.

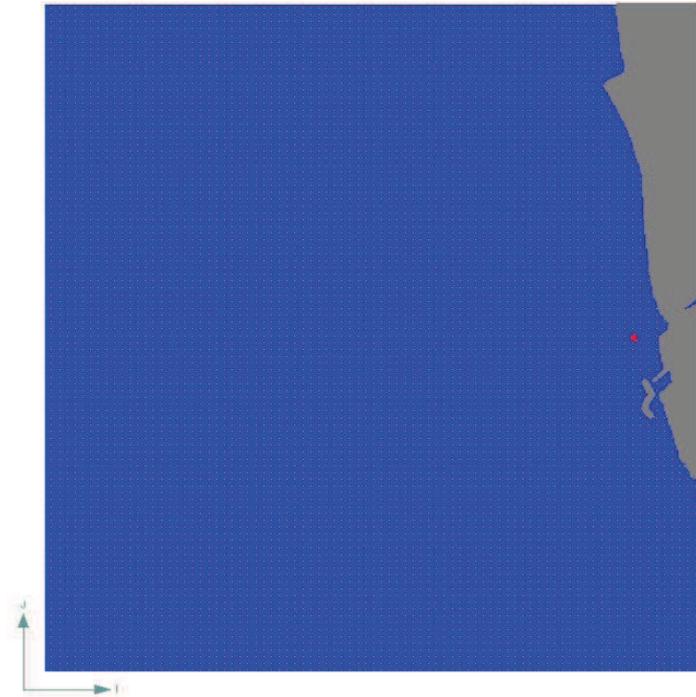
Per la costruzione delle batimetrie a largo e sottocosta sono utilizzati rispettivamente i dati forniti dalla Carta Nautica, pubblicata dall'Istituto Idrografico della Marina, e quelli forniti dai rilievi di dettaglio grazie ai quali è anche possibile inserire le sezioni delle opere presenti, come la Vasca di contenimento esistente, la diga foranea, le banchine del porto.

Con le informazioni a disposizione, sono generate cinque griglie: una a grande scala, due di dettaglio di uguali dimensioni utilizzate a supporto di modelli differenti ed altre due utilizzate per le simulazioni del clima annuale.

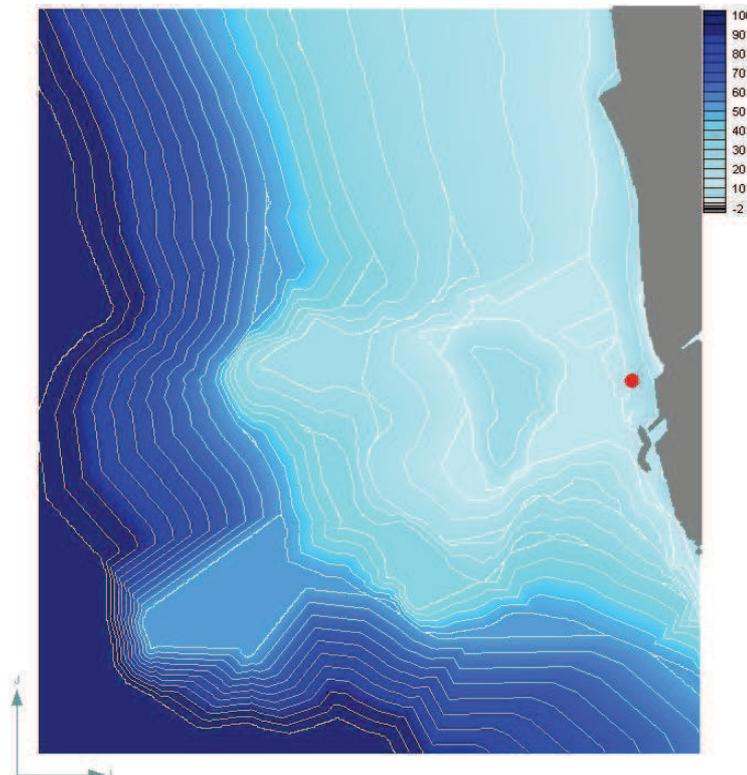
La griglia più estesa, riportata in Figura 7 ha dimensioni 25.8x30.0km orientata 0°N, ed è composta da 516x600 celle quadrate di lato 50m, raggiungendo da riva la batimetrica -100m e coprendo un'area di 774 km<sup>2</sup>. Questa è creata come supporto per il modello WABED (Wave-Action Balance Equation with Diffraction), modello bidimensionale alle differenze finite basato sulla conservazione dell'azione dell'onda utilizzato per la propagazione del moto ondoso. Le caratteristiche delle onde di riferimento assegnate ( $H_s$ ,  $T$ ,  $\theta$ ) sono quelle riportate al paragrafo



precedente, ed essendo in acque alte in presenza di fetch efficaci ristretti, per ogni onda è adottato uno spettro di tipo JONSWAP.



**Figura 7 Griglia di calcolo per il modello Wabed (600x516 celle quadrate di 50m)**



**Figura 8 Andamento batimetrico della griglia estesa**



In Figura 8 è riportata la batimetria utilizzata a supporto del calcolo e vi è indicato in rosso il punto di monitoraggio che fornisce le caratteristiche delle onde di riferimento per l'applicazione dei modelli numerici finalizzati a determinare il trasporto solido e la circolazione idrodinamica in acque basse, le cui griglie di calcolo sono riportate in Figura 9 e 10.

Nelle figure è riportata ad esempio solo la griglia di calcolo a supporto delle simulazioni effettuate per lo stato attuale sebbene le griglie di dettaglio siano generate per ogni scelta progettuale in modo tale da analizzare quale siano gli effetti delle diverse configurazioni geometriche sulla propagazione del moto ondoso e sul trasporto solido.

La scelta di mostrare nelle figure una sola griglia come esempio è motivata dal fatto che le dimensioni e l'orientamento del dominio di calcolo rimangono invariate per tutte le proposte progettuali compreso lo stato attuale: orientamento  $0^\circ\text{N}$  e  $450 \times 155$  celle quadrate di lato pari a 10m. Alle celle comprendenti la diga foranea, quella del Marzocco e la Vasca di contenimento, è assegnata, nel Wabed, l'opzione "strutture" in modo da tenere conto dei fenomeni di riflessione.

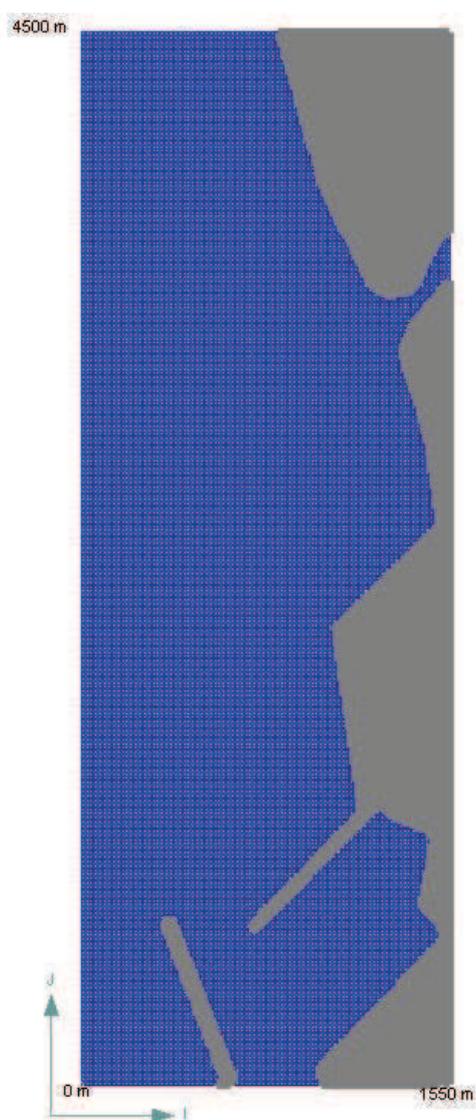
Le griglie di dettaglio appena descritte costituiscono il supporto per entrambi i modelli utilizzati, Wabed ed M2D, in questo caso associati insieme in un'unica simulazione.

L'accoppiamento del modello di circolazione M2D con Wabed (Wave-Action Balance Equation with Diffraction), infatti, rende più chiari gli aspetti strettamente legati al trasporto solido. Entrambi i modelli sono bidimensionali: uno, di circolazione, basato sull'equazione di continuità e della quantità di moto, l'altro, Wabed, fondato sulla conservazione dell'azione dell'onda. L'accoppiamento dei due modelli è un efficiente ed accurato mezzo per conoscere le interazioni moto ondoso-circolazione idrodinamica e per conoscere l'andamento del trasporto solido sia nel breve che lungo periodo. Con accoppiamento si intende il procedimento attraverso il quale le caratteristiche dell'onda ed i valori del radiation stress calcolati con il Wabed diventano dati di input per l'M2D che, a sua volta, restituisce al Wabed i valori delle correnti, della profondità d'acqua ed i cambiamenti morfologici dovuti al trasporto solido. Quest'ultimo, nel caso specifico, è stimato con la formula LUND CIRP nella quale  $d_{50}=0.16$ ,  $\rho_s=2650\text{kg/m}^3$  e  $\rho_w=1025\text{kg/m}^3$ , il valore del diametro  $d_{50}$  è pari a quanto indicato nello "Studio Specialistico per la fattibilità di interventi di sistemazione della foce del canale scolmatore d'Arno" di Prof. Ing. Milano e Prof. Ing. Pagliara. Nello studio appena citato, infatti, si evidenzia come l'interrimento della foce del canale sia dovuto all'azione del mare ed è dunque lecito ritenere che il  $d_{50}$  del modello sia paragonabile a quello indicato nello studio di Milano e Pagliara.

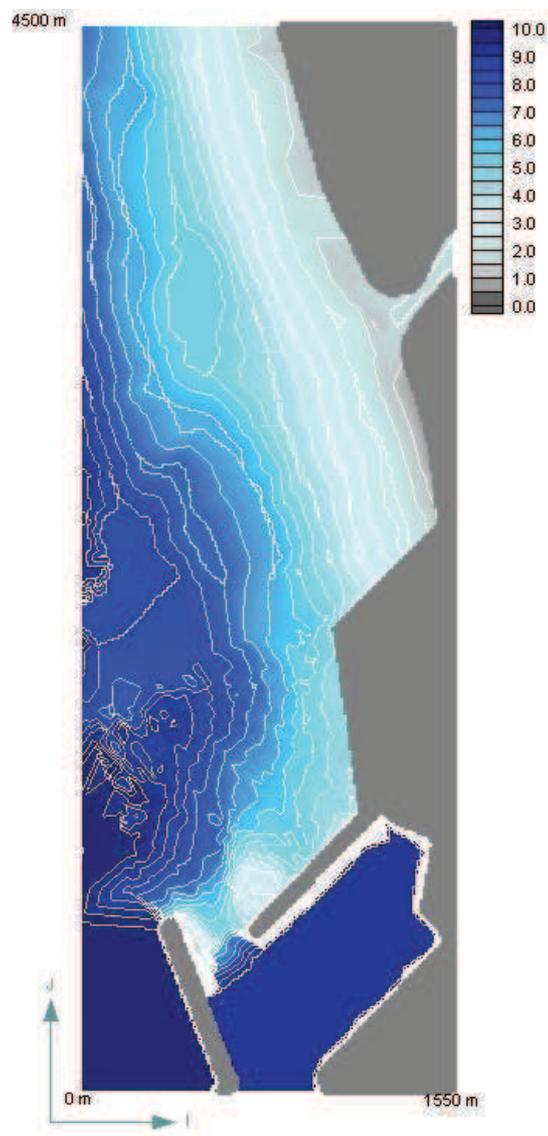


I due modelli sono accoppiati simulando l'azione delle mareggiate con direzione di provenienza a largo  $250^\circ$  e  $315^\circ$  essendo quelle più significative per frequenza ed intensità per un periodo di simulazione che varia tra 54h e 36h a seconda della direzione della mareggiata come riportato in Tabella 2. In ogni caso, comunque, il passo temporale di integrazione è di 0.5s tale da garantire la stabilità numerica delle soluzioni.

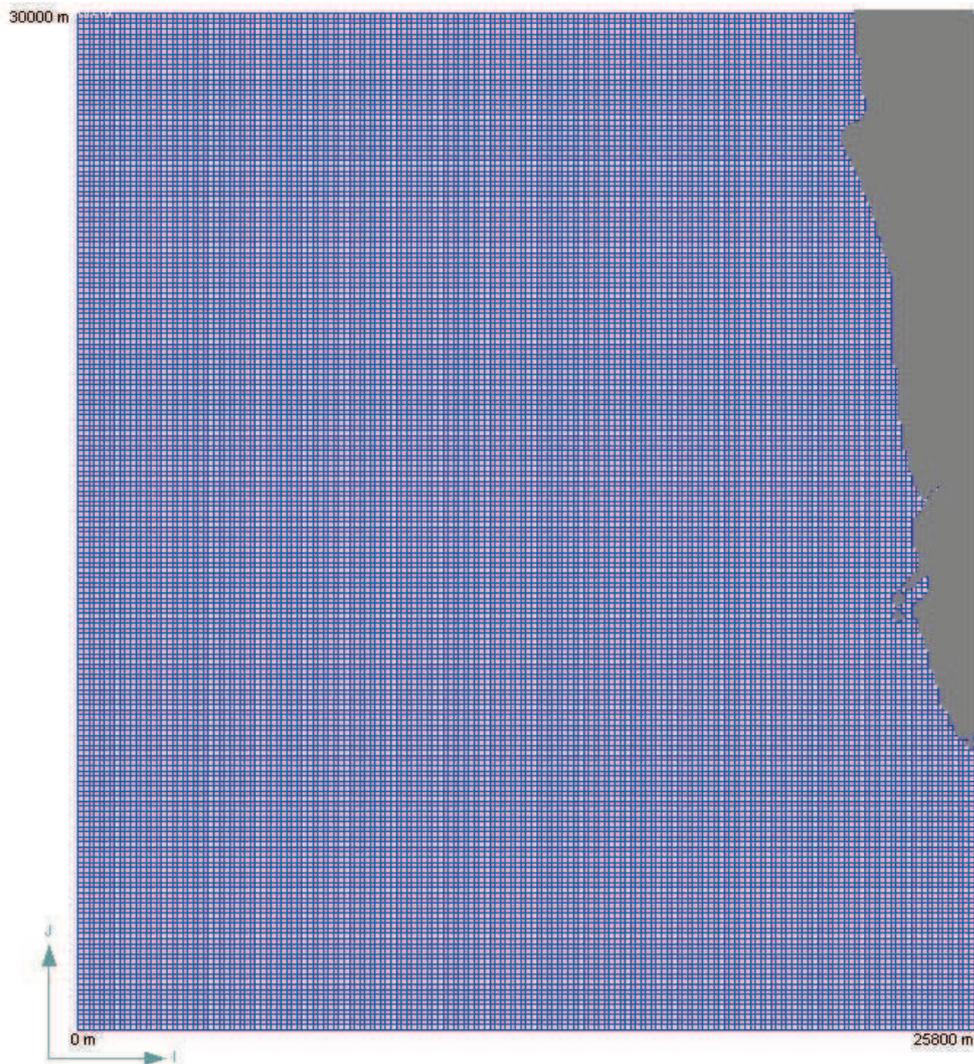
Inoltre i due modelli accoppiati sono utilizzati anche per simulare l'azione del clima annuale. In questo caso sono generate due griglie più estese di quelle utilizzate per valutare gli effetti per azione delle mareggiate. La griglia di calcolo a supporto del Wabed è di  $25.8 \times 30.0$  km composta di  $172 \times 200$  celle quadrate di lato di 150m; mentre quella per M2D ha dimensioni  $4.3 \times 30$  km ed è composta da  $600 \times 86$  celle quadrate di 50m di lato (Figura 11 e 12).



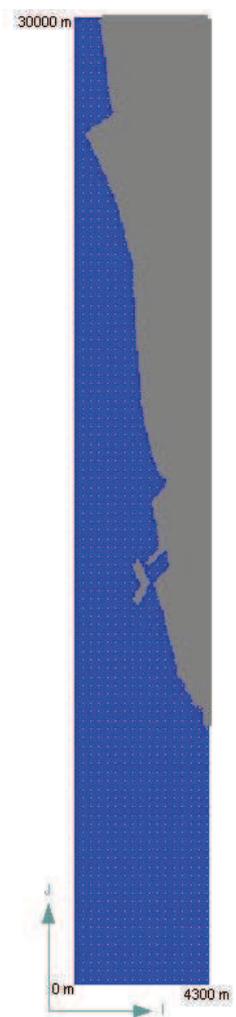
**Figura 9** Griglia di calcolo per i modelli M2D e Wabed



**Figura 10** Andamento batimetrico delle griglie di dettaglio



**Figura 11** griglia di calcolo a supporto del modello Wabed. Clima annuale



**Figura 12** Griglia di calcolo per M2D. Clima annuale

I codici di calcolo dei modelli utilizzati sono riportati in dettaglio in Appendice.



## 3.3 RISULTATI

I risultati ottenuti dall'applicazione dei modelli allo stato attuale ed ad ogni proposta progettuale sono descritti ed illustrati in forma grafica nei paragrafi successivi.

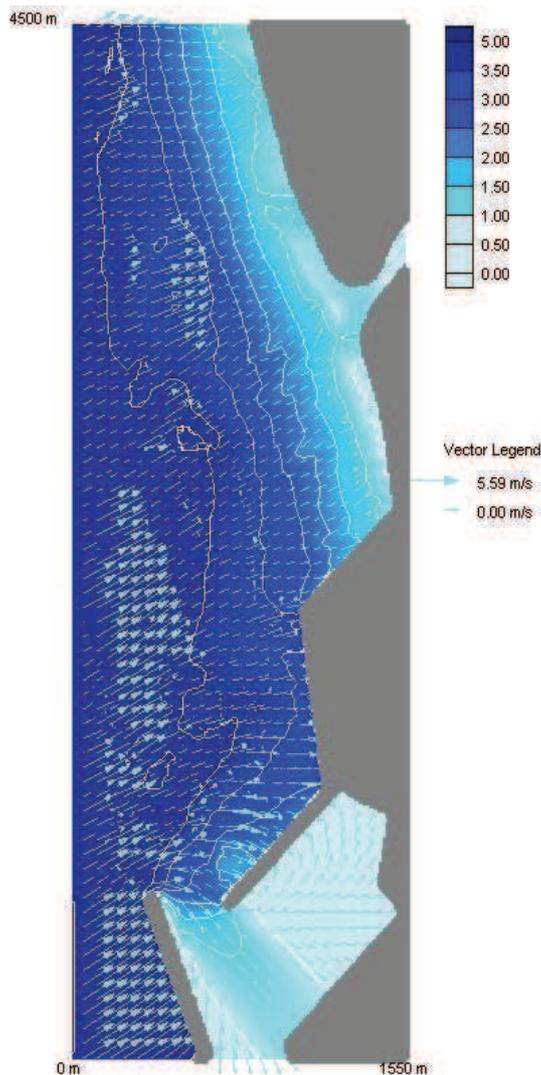
Le grandezze scalari sono rappresentate di volta in volta mediante campiture di colore all'interno del dominio di calcolo, mentre i vettori hanno dimensioni proporzionali al proprio modulo. I simboli ed i colori adottati sono specificati nelle legende riportate a fianco di ogni Figura. Le Figure inserite nel testo ed ulteriori approfondimenti sono riportati in più grande scala negli allegati in calce.

Per le immagini che presentano le zone di accumulo ed erosione create per effetto delle mareggiate, il range di valori adottato è lo stesso per ogni simulazione in modo tale che sia più chiara la rappresentazione e sia immediato il paragone tra le soluzioni. Il range è sufficientemente ampio e gran parte dei valori di deposito ed erosione vi ricadono; alle sporadiche celle in cui si riscontrano valori fuori dal range, è assegnato il colore relativo al valore del range più vicino. Per i depositi è scelta la scala del blu mentre per le erosioni quella del rosso, le zone il cui fondale rimane inalterato sono campite in grigio.

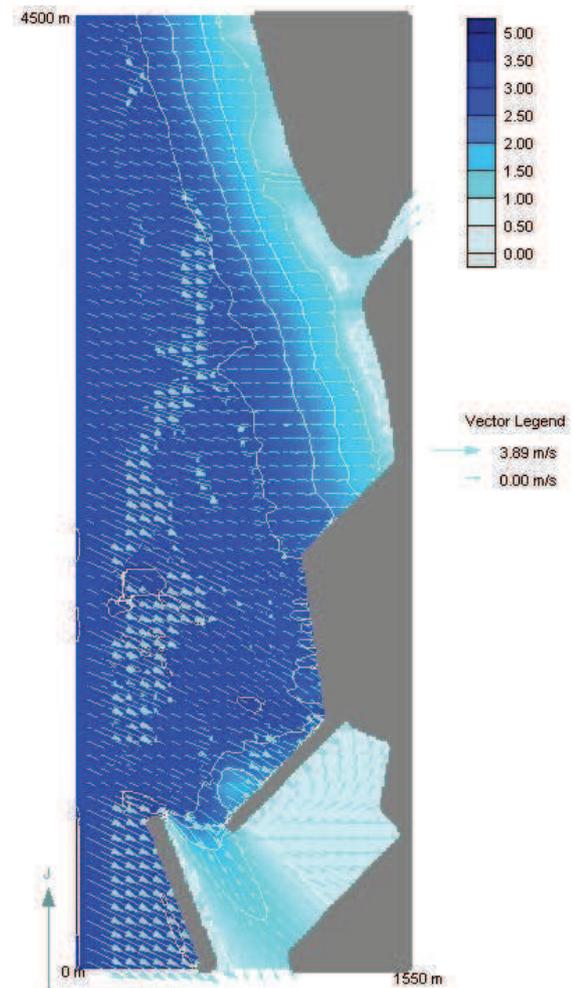
### 3.3.1. STATO ATTUALE

Nella configurazione attuale, si nota come le mareggiate provenienti dal settore meridionale,  $180^{\circ}$ - $270^{\circ}$ , risentano notevolmente della presenza delle secche della Meloria che comportano una significativa attenuazione del moto ondoso. La particolare disposizione batimetrica davanti la vasca, inoltre, determina una rotazione dell'onda che giunge in acque basse in direzione quasi ortogonale all'opera, indipendentemente dalla provenienza a largo (Figura 13).

Nel caso in cui la direzione di provenienza del moto ondoso sia compresa tra  $270^{\circ}$ - $340^{\circ}$ , la propagazione verso riva risente marginalmente della presenza delle secche della Meloria, la direzione dell'onda, a questa scala di dettaglio, non varia sensibilmente e l'attenuazione è minore rispetto a quella registrata per eventi provenienti dal settore meridionale (Figura 14).



**Figura 13** Propagazione del moto ondoso ed altezza d'onda per effetto di una mareggiata proveniente dal settore meridionale (250°)



**Figura 14** Propagazione del moto ondoso ed altezza d'onda per effetto di una mareggiata proveniente dal settore settentrionale (315°)

Le differenze messe in luce nella propagazione del moto ondoso, in funzione della provenienza dell'evento, danno luogo, lungo riva, a circolazione idrodinamiche differenti come mostrato in Figura 15 e 16.

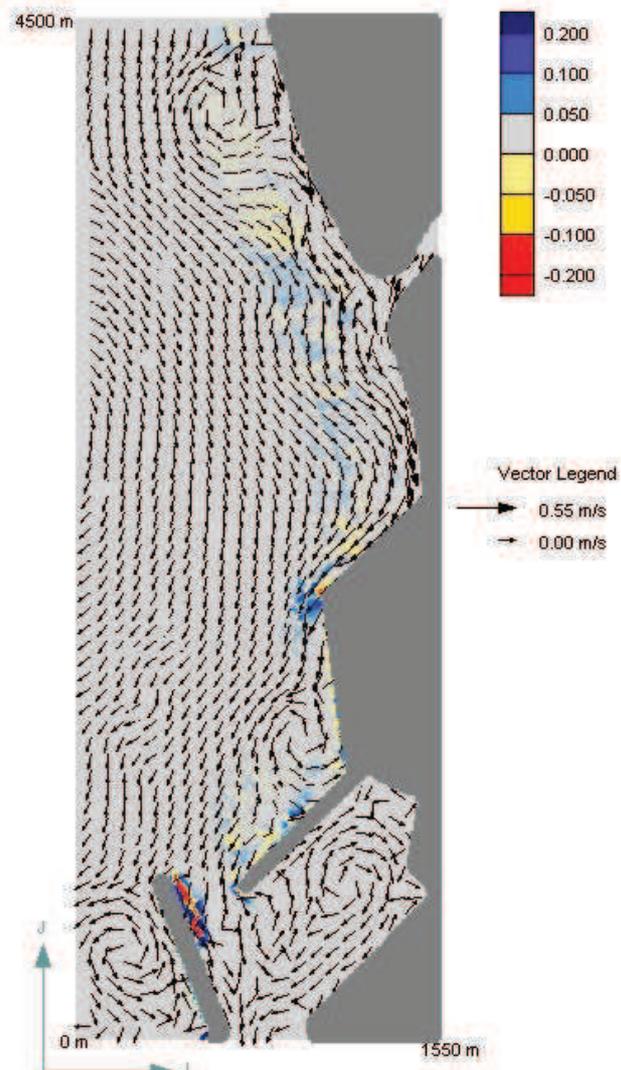
Per mareggiate provenienti dal settore meridionale, la circolazione idrodinamica è fortemente influenzata sia dalle variazioni di fondale che dalla presenza delle opere di difesa. La diga foranea, infatti, veicola una parte della corrente verso sud mentre l'altra parte è diretta da sud a nord e corre lungo la diga del Marzocco ed il lato della vasca parallelo a riva per richiudersi, poi, più a largo intorno alla batimetrica -7.0m. All'altezza della foce del canale Scolmatore, tra la -3.0m e la -8.0m, le traiettorie delle correnti sono chiuse, indice della presenza di ricircoli anche in questa zona.



All'andamento delle correnti ed alla distribuzione delle velocità che in questo caso sono mediamente modeste, a largo 0.1-0.2m/s e lungo riva 0.3-0.4m/s, è strettamente legata la formazione delle zone di deposito ed erosione. Per effetto delle mareggiate provenienti dal settore meridionale, come mostrato in Figura 15, si creano zone di deposito alternate a localizzate aree in erosione sia sul lato interno della diga foranea che lungo la diga del Marzocco. Inoltre si rilevano zone di accumulo di materiale sulla sponda sinistra della foce del canale Scolmatore mentre nel tratto a nord della foce si assiste all'alternanza aree di deposito ed erosione. Le velocità delle correnti a nord sono mediamente di 0.3-0.4m/s sebbene localmente siano registrati valori compresi tra 0.6-0.7m/s come risulta evidente dalle tavole allegate in calce.



**Figura 15** Zone di deposito ed erosione- Andamento delle correnti per mareggiate provenienti dal settore meridionale (250°)



**Figura 16** Zone di deposito ed erosione- Andamento delle correnti per mareggiata proveniente dal settore settentrionale (315°)



Per mareggiate provenienti dal settore settentrionale la circolazione idrodinamica è diretta da nord verso sud e non risente né delle opere di protezione né delle variazioni di fondale dovute alla presenza delle Secche della Meloria come già precedentemente evidenziato. I valori medi della corrente sono dell'ordine di 0.2-0.3 m/s sebbene nel tratto a sud della foce dello Scolmatore prima della Vasca le velocità raggiungano valori di 0.4m/s e vi siano zone a nord della foce, luogo di ricircolo delle correnti, dove le velocità raggiungono localmente 0.6-0.7m/s. Il tratto della Vasca ortogonale alla linea di riva veicola la corrente verso il largo e questa rimane parallela all'opera fino alla diga del Marzocco dove le traiettorie delle correnti si chiudono.

La direzione delle correnti e le velocità in gioco fanno sì che l'andamento del trasporto solido sia diretto da nord verso sud e che si accumuli lungo la diga del Marzocco ed in corrispondenza dello spigolo della Vasca di contenimento (Figura 15 e 16).

I risultati appena illustrati trovano riscontro nella realtà e piena corrispondenza con gli studi precedentemente effettuati in questa area. Le simulazioni effettuate, infatti, sia qualitativamente che quantitativamente sono in linea con quanto descritto nello "Studio su modello numerico per la valutazione degli effetti delle nuove opere" redatto dal Prof. Aminti per il Consorzio Pisa Ricerche. Inoltre, lo stato attuale, rappresentando un termine di paragone diretto e sicuro, è servito a tarare i parametri del modello in modo tale da avere risultati affidabili e significativi per le proposte progettuali considerate.

### 3.3.2. PROPOSTA PROGETTUALE n.1

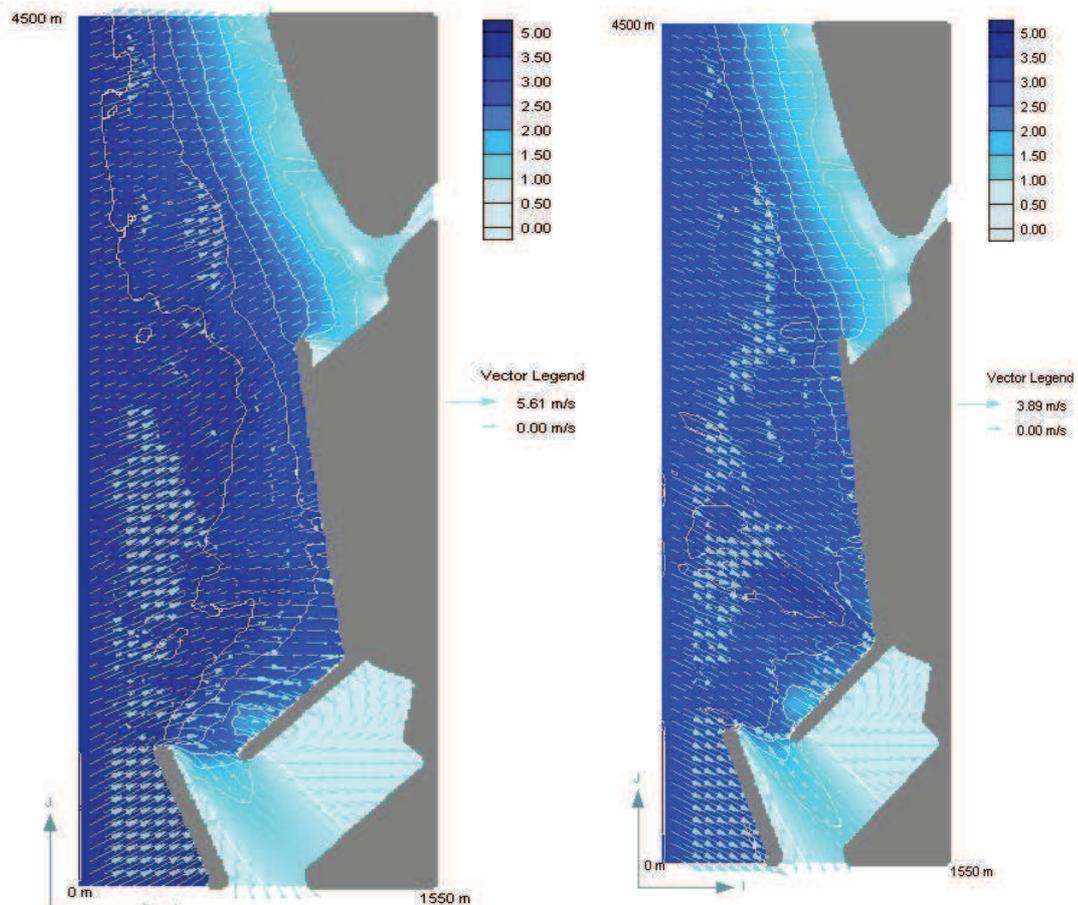
La proposta progettuale n.1 prevede la realizzazione di un molo di 200m in prolungamento al lato della Nuova Vasca di contenimento parallelo alla linea di riva.

La propagazione del moto ondoso risulta simile a quello dello stato attuale: le mareggiate di 180°-270° risentono della variazione di fondale dovuta alle secche della Meloria e si dispongono in direzione quasi ortogonale alle opere; mentre le mareggiate provenienti dal settore settentrionale non sono significativamente influenzate né dalle secche né dalle opere di protezione a questa scala di dettaglio. L'unica differenza apprezzabile è dovuta alla presenza del molo, elemento che garantisce protezione nei confronti delle mareggiate di Libeccio e Ponente e



che contribuisce a smorzare l'energia dell'onda nel caso di eventi di Maestrale come mostrato nelle Figure 17 e 18.

Se il molo costituisce un elemento di protezione nei confronti della propagazione del moto ondoso, in realtà comporta importanti cambiamenti sulla circolazione idrodinamica sotto l'effetto di qualunque mareggiata, come mostrato nelle Figure 19, 20e 21.



**Figura 17** Propagazione del moto ondoso ed altezza d'onda per effetto di una mareggiata proveniente dal settore meridionale (250°)

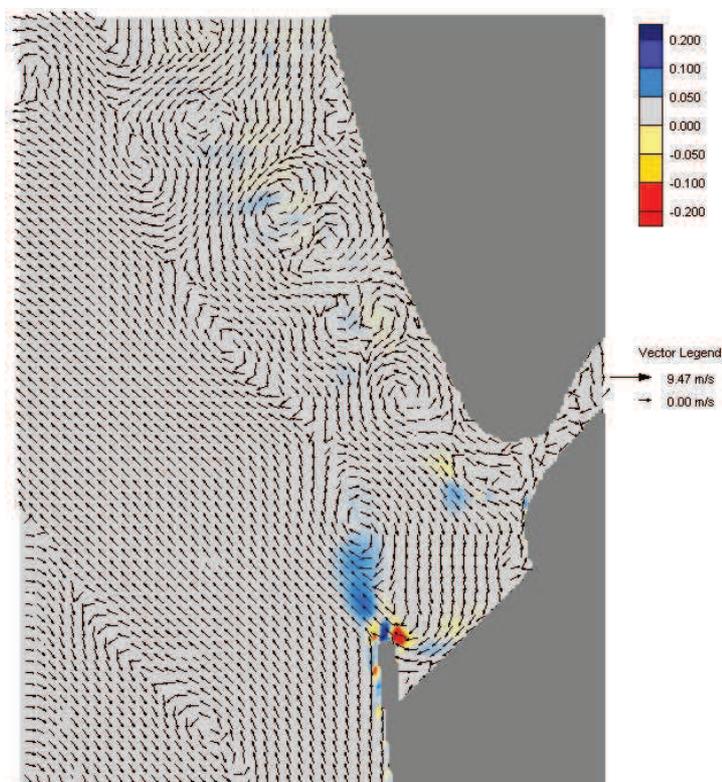
**Figura 18** Propagazione del moto ondoso ed altezza d'onda per effetto di una mareggiata proveniente dal settore settentrionale (315°)

Per le mareggiate provenienti dal settore meridionale, infatti, si assiste alla formazione di una serie di ricircoli lungo tutto il tratto a nord della foce del canale Scolmatore, in corrispondenza del quale le correnti, fortemente influenzate dalla presenza del molo, seguendo traiettorie semichiusse, si allontanano verso il largo unitamente alla corrente che corre parallelamente alla vasca da sud verso nord e che in corrispondenza del molo viene deviata. La situazione appena descritta è evidente nel dettaglio di Figura 19.

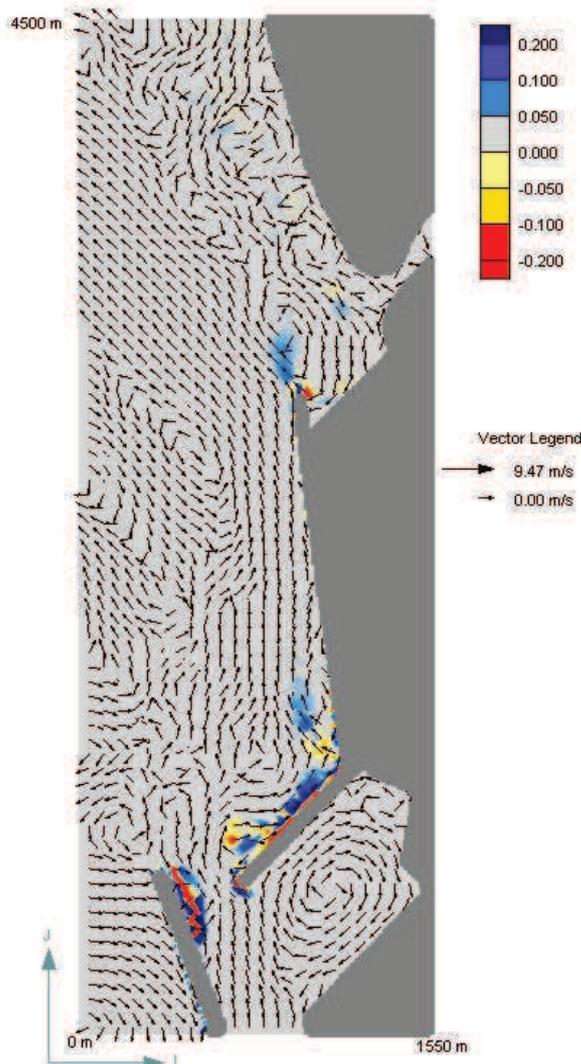


In Figura 20 si riporta l'andamento complessivo delle correnti per effetto delle mareggiate meridionali e si nota come nel tratto più a sud del dominio di calcolo e nei pressi della diga foranea si ottengano risultati molto simili a quelli dello stato attuale a dimostrazione del fatto che la presenza del molo influenza soprattutto la foce del canale Scolmatore ed il tratto a nord di questa. Anche le velocità nella zona a sud sono paragonabili a quelle dello stato attuale, mentre lungo riva e soprattutto tra la foce ed il molo diventano importanti con picchi di 0.8m/s, determinando erosioni significative nel tratto del molo verso riva. Zone di accumulo, invece, sono presenti poco più a largo rispetto alla fine del molo dove si ha un rallentamento della corrente e nei pressi delle foce del canale dello Scolmatore. Zone di deposito alternate a quelle di erosione sono presenti nel tratto a nord della foce come appare evidente in Figura 19.

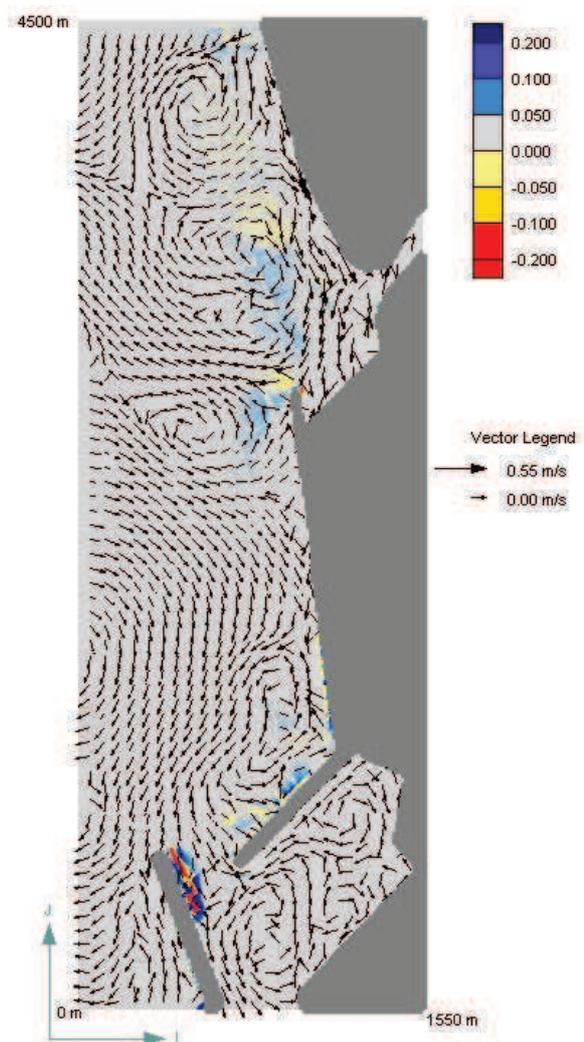
Anche per le mareggiate da settentrione, la presenza del molo non contribuisce a migliorare l'andamento della circolazione idrodinamica e del trasporto solido. Rispetto allo stato attuale, infatti, la corrente non è più diretta da nord verso sud e di conseguenza nemmeno il trasporto solido. Sono evidenti zone di erosione nei pressi del molo dal lato interno e lungo la linea di riva a nord della foce del canale Scolmatore alle quali si alternano zone di deposito come mostrato in Figura 21. La rappresentazione delle velocità è riportata negli allegati.



**Figura 19 Zone di deposito ed erosione- Dettaglio dell'andamento delle correnti per mareggiate proveniente dal settore meridionale (250°)**



**Figura 20** Zone di deposito ed erosione-  
Andamento delle correnti per mareggiate  
proveniente dal settore meridionale (250°)



**Figura 21** Zone di deposito ed erosione-  
Andamento delle correnti per mareggiate  
proveniente dal settore settentrionale (315°)

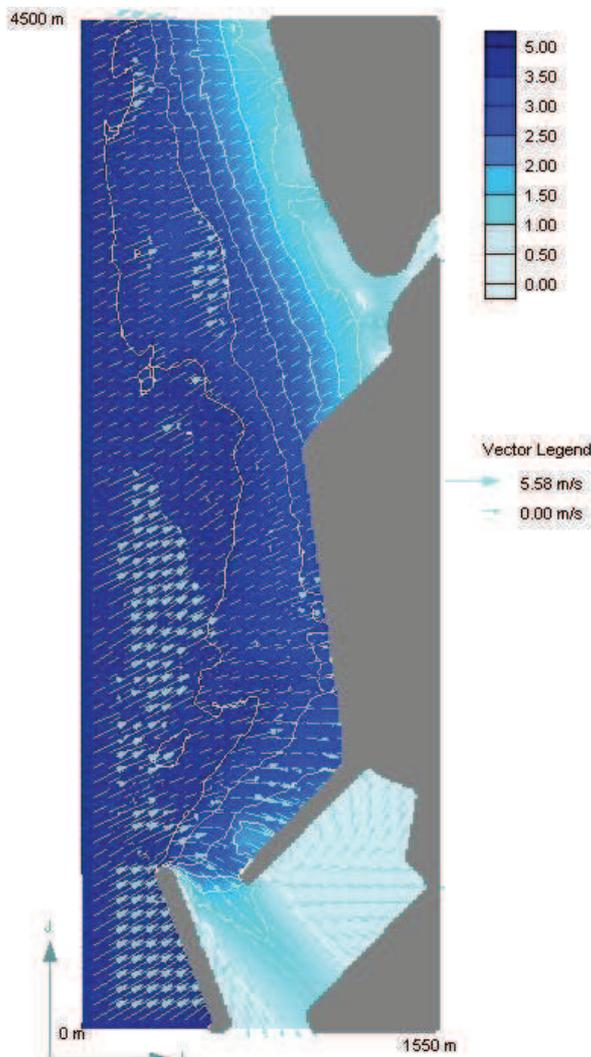
### 3.3.3. PROPOSTA PROGETTUALE n.2

La proposta progettuale n.2 mantiene la configurazione geometrica perimetrale della prima soluzione fatta eccezione per il molo che, in questo caso, non è previsto. L'assenza dell'opera in prolungamento della vasca verso nord comporta significative differenze tra le due proposte progettuali sia per quanto riguarda l'attenuazione del moto ondoso che per la circolazione idrodinamica ed il conseguente andamento del trasporto solido.

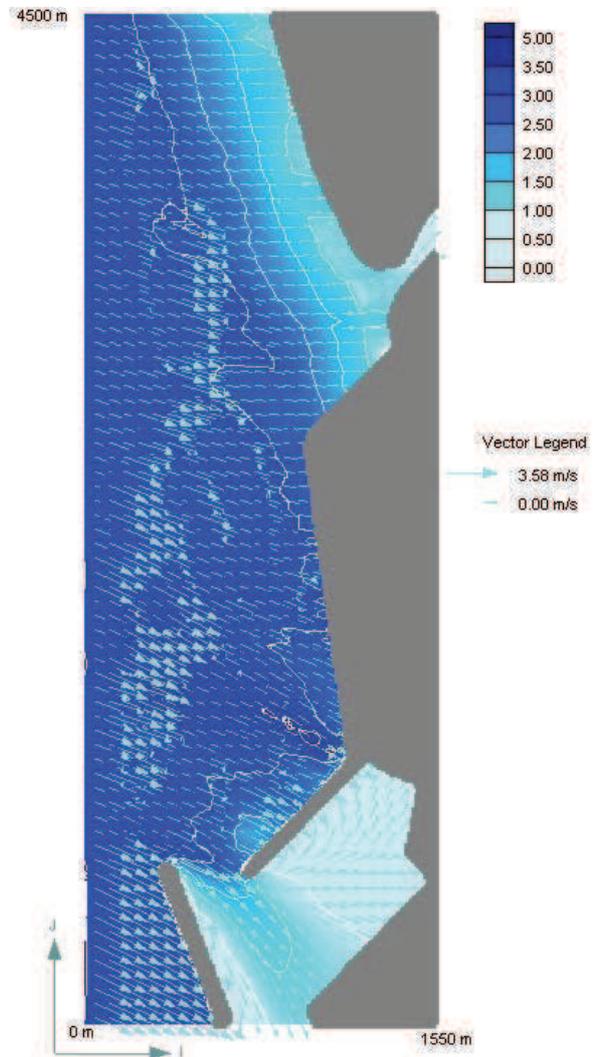
In Figura 22 e 23, si nota come la propagazione del moto ondoso da largo verso riva per tutte le mareggiate, torni ad essere paragonabile a quella dello stato attuale.



La realizzazione della Nuova Vasca secondo questa soluzione progettuale, non comporta dunque, significative differenze sulla propagazione del moto ondoso ed anche nei riguardi del trasporto solido è riconoscibile l'andamento dello stato attuale sebbene con qualche differenza.



**Figura 22** Propagazione del moto ondoso ed altezza d'onda per effetto di una mareggiata proveniente dal settore meridionale (250°)



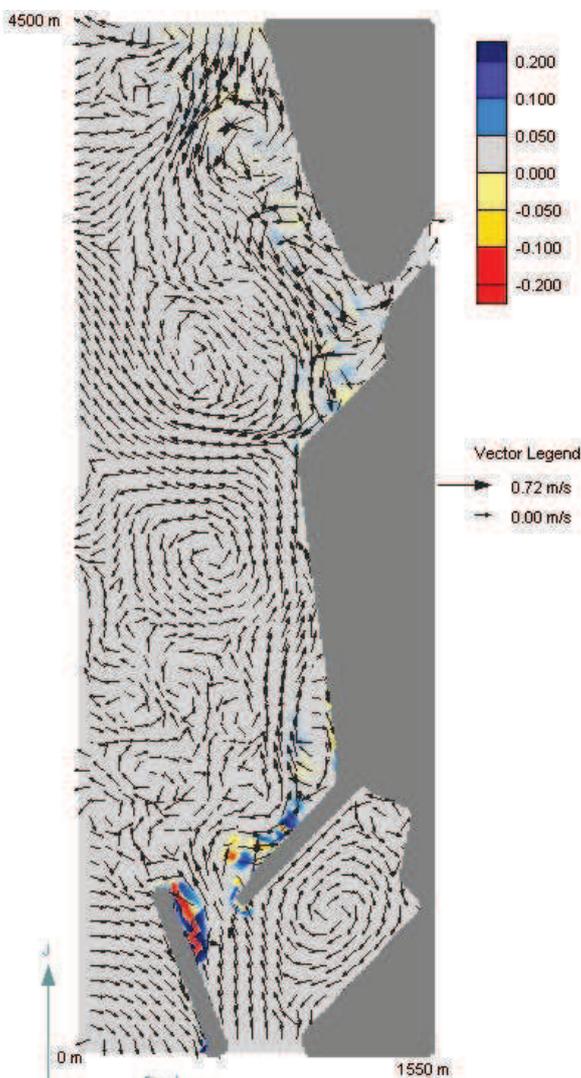
**Figura 23** Propagazione del moto ondoso ed altezza d'onda per effetto di una mareggiata proveniente dal settore settentrionale (315°)

Sotto l'azione delle mareggiate meridionali, le correnti infatti non subiscono grandi variazioni dovute al prolungamento della vasca: una parte della corrente viene deviata dalla diga foranea, un'altra parte corre lungo la diga del Marzocco e lungo il lato della vasca parallelo a riva ed in corrispondenza dello spigolo descrive traiettorie semichiusure come mostrato in Figura 24. Le velocità sono dell'ordine di 0.2-0.3m/s lungo la diga foranea ed i lati della vasca, valori paragonabili a quelli ottenuti nelle simulazioni dello stato attuale; mentre si registrano velocità più elevate, 0.5-0.7m/s, in corrispondenza dei ricircoli delle correnti localizzati nel tratto a nord

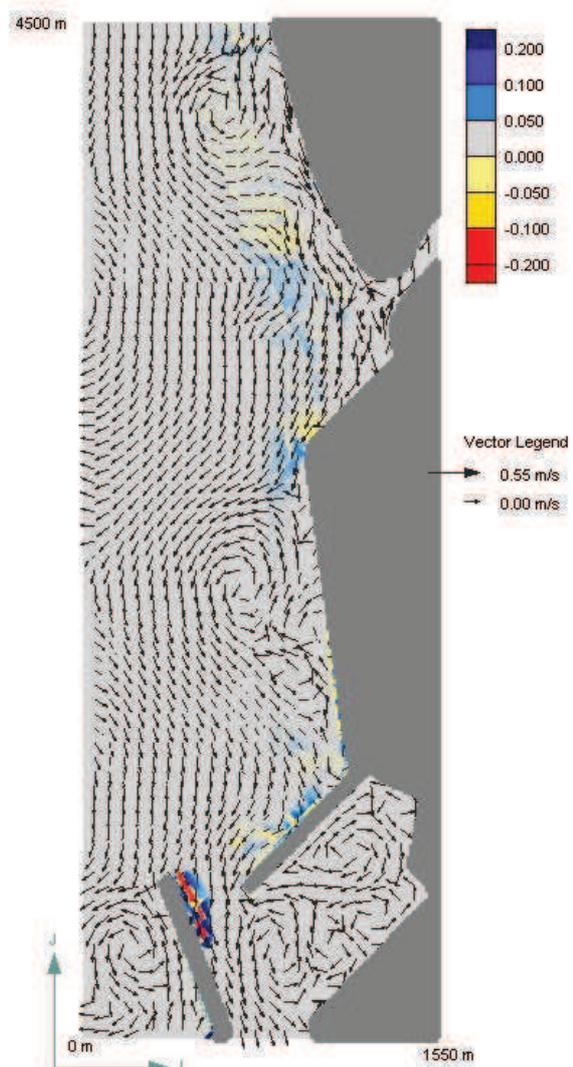


della foce del canale Scolmatore. Tali valori, rappresentati negli allegati ai quali si rimanda, cominciano ad essere significativi nei riguardi del trasporto solido.

Per mareggiate provenienti dal settore settentrionale, le differenze con lo stato attuale sono meno apprezzabili e ciò è dovuto principalmente alla localizzazione della Vasca rispetto alla direzione di provenienza dell'onda. Quanto appena affermato trova conferma nella rappresentazione di Figura 25 dove si nota che la corrente è, come nello stato attuale, diretta da nord verso sud sebbene la presenza della Nuova Vasca di contenimento, comporti che devii verso il largo immediatamente dopo la foce del canale Scolmatore in corrispondenza del lato della vasca. Le zone di deposito ed erosione sono paragonabili a quelle dello stato attuale.



**Figura 24** Zone di deposito ed erosione-  
Andamento delle correnti per mareggiate  
proveniente dal settore meridionale (250°)

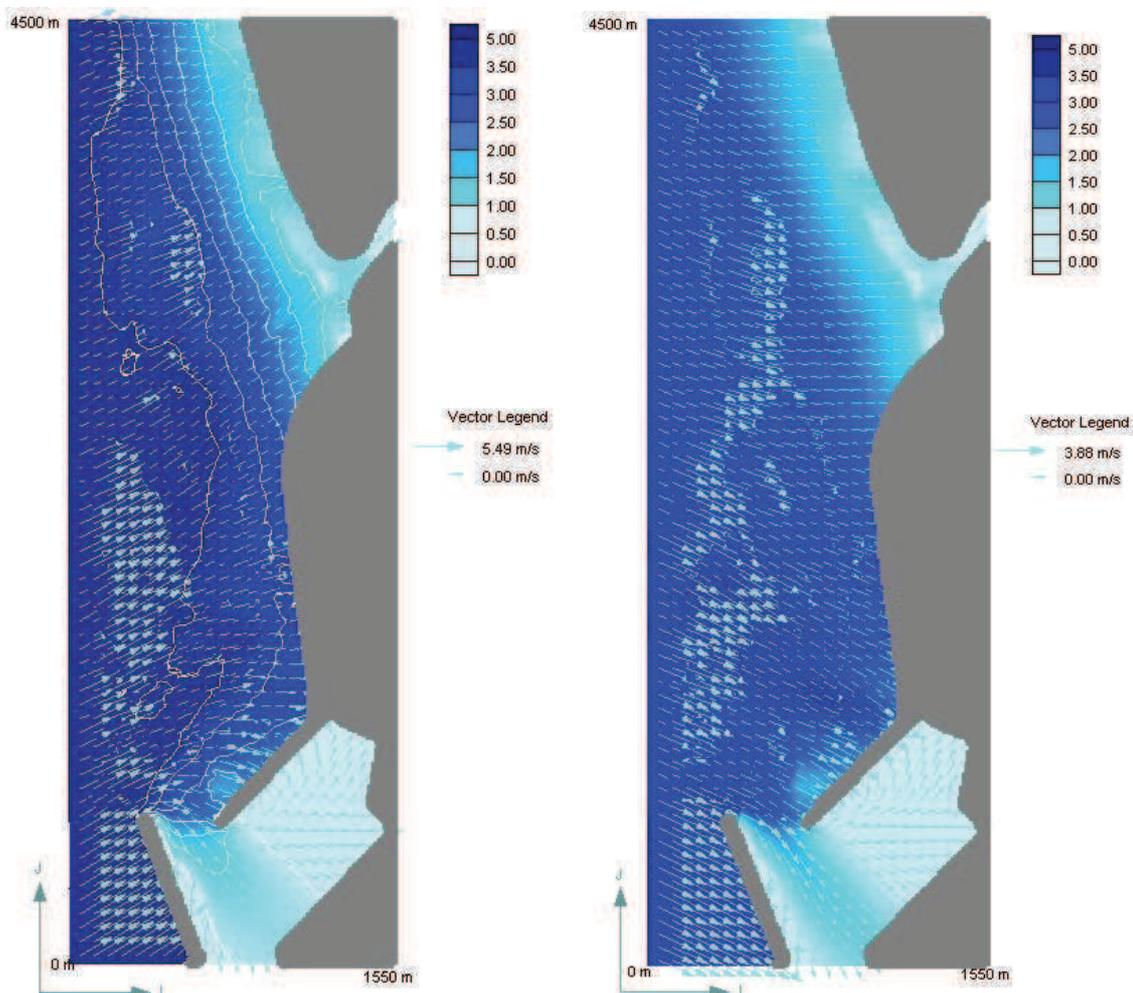


**Figura 25** Zone di deposito ed erosione-  
Andamento delle correnti per mareggiate  
proveniente dal settore settentrionale (315°)



### 3.3.4. PROPOSTA PROGETTUALE n.3

Con la proposta progettuale n.3 si vuole mettere in luce quale siano gli effetti della variazione del raggio di curvatura di raccordo tra i due lati perimetrali della Nuova Vasca di contenimento avendo appurato che la configurazione geometrica della soluzione n.2 sia quella provoca minor variazioni rispetto allo stato attuale sulla propagazione del moto ondoso e sulla circolazione idrodinamica. Alla luce di quanto appena affermato, è assunto un raggio di curvatura di 700m, valore massimo accettabile, ritenendo che valori intermedi tra 100m e 700m porteranno a risultati compresi tra i due descritti in questo paragrafo e nel precedente.



**Figura 26** Propagazione del moto ondoso ed altezza d'onda per effetto di una mareggiata proveniente dal settore meridionale (250°)

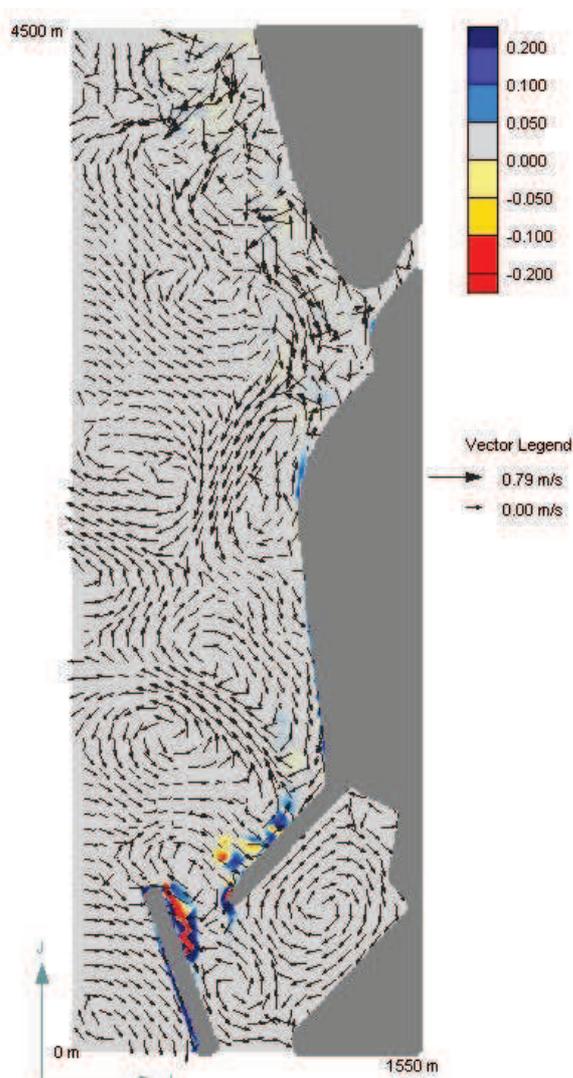
**Figura 27** Propagazione del moto ondoso ed altezza d'onda per effetto di una mareggiata proveniente dal settore settentrionale (315°)

La propagazione del moto ondoso con direzione a largo 180°-270°, illustrata in Figura 26, non è sensibilmente diversa da quella dello stato attuale e della soluzione n.2 dato che gli elementi che influenzano il moto ondoso sono le variazioni di fondale dovute alle secche della

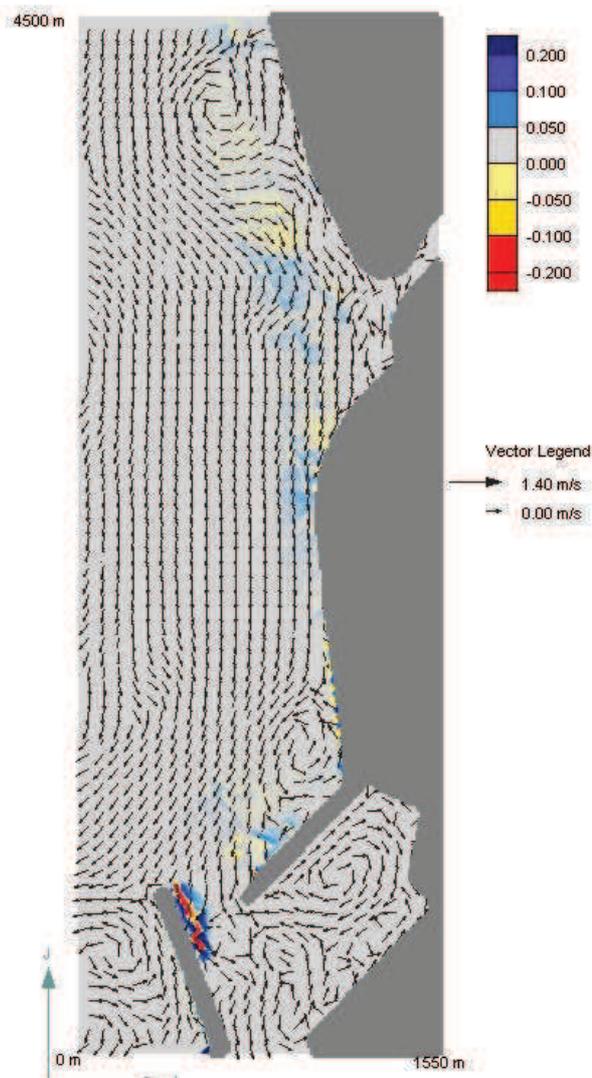


Meloria e la presenza delle opere di protezione. Per mareggiate provenienti dal settore settentrionale, la propagazione del moto ondoso non risente né della presenza delle secche né delle opere di protezione e la configurazione della vasca poco incide sull'attenuazione dell'altezza d'onda come mostrato in Figura 27.

La circolazione idrodinamica sotto l'azione di mareggiate meridionali non si discosta molto dallo stato attuale: si notano traiettorie semichiusate localizzate a largo della diga del Marzocco e lungo il tratto della Vasca parallelo alla linea di riva dove si sono localizzate zone di deposito di materiale. Depositi significativi, inoltre, sono evidenti in corrispondenza del raccordo tra i due lati della vasca sebbene le quantità di materiale in gioco siano minori rispetto alla soluzione n.2 dato che l'ampio raggio riesce a mitigare gli effetti (Figura 28).



**Figura 28** Zone di deposito ed erosione-Andamento delle correnti per mareggiate provenienti dal settore meridionale (250°)



**Figura 29** Zone di deposito ed erosione-Andamento delle correnti per mareggiate provenienti dal settore settentrionale (315°)



Le velocità delle correnti sono mediamente più basse rispetto a quelle della soluzione n.2 ed il loro andamento tende maggiormente a quello dello stato attuale rispetto a quello della soluzione n.2. Si registrano velocità dell'ordine di 0.2-0.3m/s all'imboccatura del porto, lungo la diga del Marzocco e nei pressi della foce del canale Scolmatore mentre le correnti nel tratto a nord della foce hanno valori più bassi.

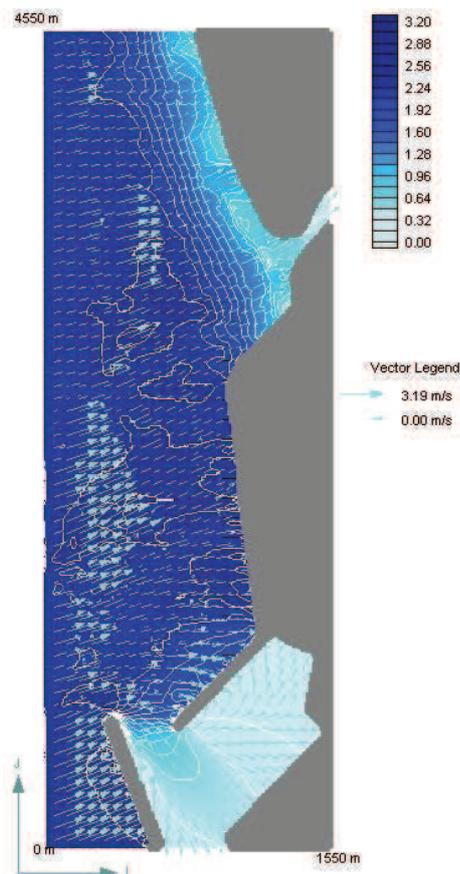
La situazione rispecchia lo stato attuale anche sotto l'azione delle mareggiate di Maestrale cui si assiste su tutto il dominio di calcolo ad un flusso di corrente diretto da nord verso sud cui è associata anche la direzione del trasporto solido(Figura 29). Le velocità registrate sono generalmente ridotte e dell'ordine di 0.1-0.2m/s. Sono evidenti zone di erosione e deposito in prossimità del lato interno della diga foranea, lungo la diga del Marzocco e nel tratto a nord della foce del canale Scolmatore. La rappresentazione delle velocità unitamente alle Figure già inserite nel testo sono riportate negli allegati.

### 3.3.5. PROPOSTA PROGETTUALE n.4

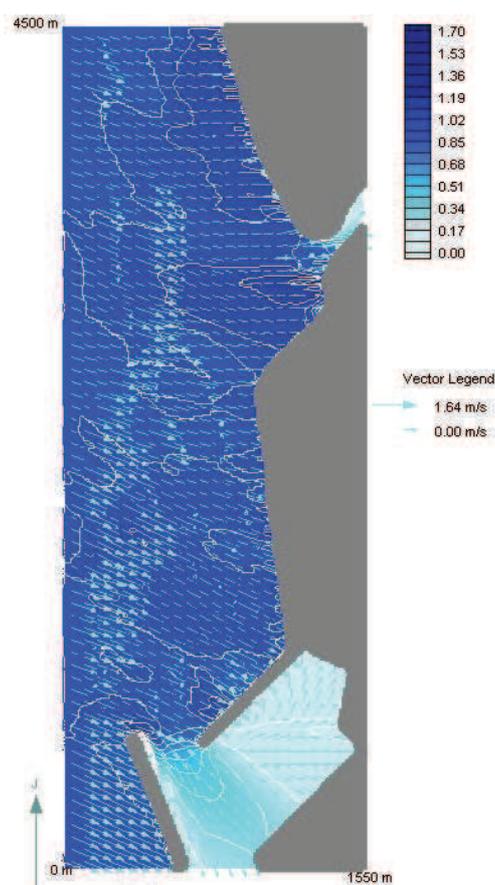
Nei paragrafi precedenti sono state analizzate configurazioni estreme in modo tale da evidenziare meglio i differenti effetti sulla propagazione dell'onda e sulla circolazione idrodinamica.

Il raggio di curvatura scelto per questa soluzione progettuale è pari a 250m, valore intermedio tra quelli già analizzati. Si ritiene, infatti, che raggi intermedi conducano a soluzioni intermedie tra le due e che tale valore riesca ad ottimizzare il rapporto tra le esigenze costruttive della vasca e gli effetti sulla dinamica costiera. È evidente, infatti, che, all'aumentare del raggio di curvatura, si ha una riduzione del volume della Vasca a fronte di migliorie sia per quanto riguarda la circolazione idrodinamica che per il trasporto solido in corrispondenza dello spigolo tra i due lati perimetrali dell'opera e nel tratto comprendente la foce del canale Scolmatore.

Per quanto riguarda l'attenuazione del moto ondoso non si discosta molto da quella dello stato attuale in quanto gli elementi che influenzano significativamente sono le variazioni di fondale dovute alle secche della Meloria e la presenza delle opere di protezione. I risultati ottenuti sono riportati in Figura 30 e 31.



**Figura 30 Propagazione del moto ondoso ed altezza d'onda per effetto di una mareggiata proveniente dal settore meridionale (250°)**



**Figura 31 Propagazione del moto ondoso ed altezza d'onda per effetto di una mareggiata proveniente dal settore settentrionale (315°)**

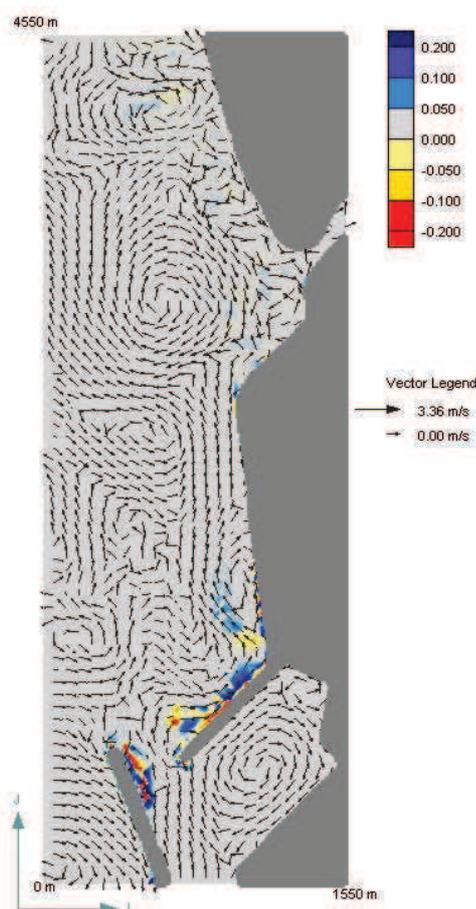
L'andamento del trasporto solido come la soluzione n.2 e n.3 non si discosta molto da quello dello stato attuale e il valore del raggio di curvatura fa sì che i risultati ottenuti dalla simulazione siano, da un punto di vista di dinamica costiera, migliori della proposta n.2.

Per mareggiate provenienti dal settore meridionale, infatti, le correnti non subiscono grandi variazioni dovute al prolungamento della vasca: una parte della corrente viene deviata dalla diga foranea, un'altra parte corre lungo la diga del Marzocco e lungo il lato della vasca parallelo a riva ed in corrispondenza dello spigolo descrive traiettorie semichiusure come mostrato in Figura 32.

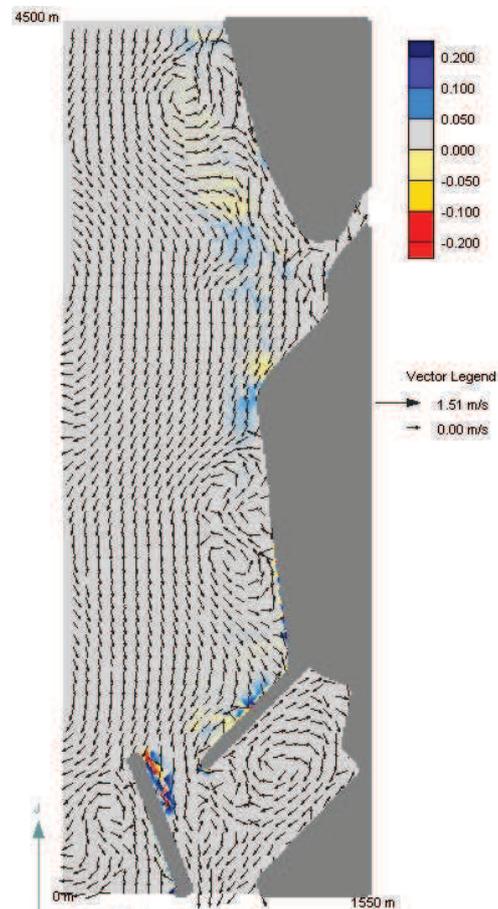
Le velocità sono più basse di quelle registrate nella proposta n.2 e sono di estensione ridotta le zone in cui i valori delle velocità sono più elevati 0.5-0.7 m/s, in corrispondenza dei ricircoli delle correnti localizzati nel tratto a nord della foce del canale Scolmatore. Tali considerazioni trovano riscontro nel confronto con lo stato attuale riportato negli allegati.



Per mareggiate provenienti dal settore settentrionale, come già descritto nelle proposte precedenti, il prolungamento della Vasca non comporta grandi variazioni rispetto allo stato attuale. Sotto l'azione di tali eventi, infatti, la corrente è infatti diretta da nord verso sud e l'unica differenza rispetto allo stato attuale è che la presenza della nuova Vasca comporta una deviazione verso il largo immediatamente dopo la foce del canale Scolmatore in corrispondenza del lato della vasca. Come mostrato in Figura 33, sono evidenti zone di deposito ed erosione nei pressi dello spigolo della Vasca sebbene siano di minor entità rispetto a quelli registrati nella proposta n.2, data la curvatura maggiore del raccordo tra i due lati. Le zone di deposito ed erosione evidenziate all'imboccatura del porto e lungo la diga del Marzocco sono paragonabili a quelle dello stato attuale.



**Figura 32 Zone di deposito ed erosione- Andamento delle correnti per mareggiate provenienti dal settore meridionale (250°)**



**Figura 33 Zone di deposito ed erosione- Andamento delle correnti per mareggiate provenienti dal settore settentrionale (315°)**

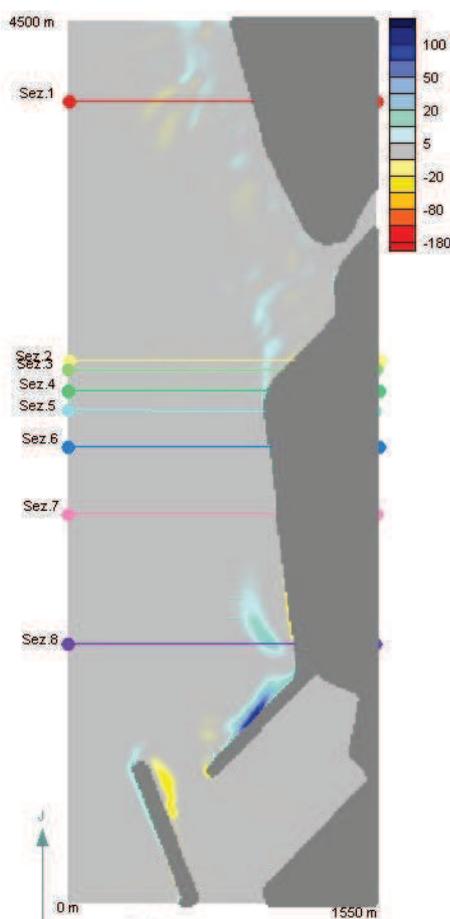
Alla luce dei risultati ottenuti si ritiene che tale proposta sia quella che riesce a garantire un volume della vasca idoneo riducendo gli effetti sulla dinamica costiera e per questo, nel paragrafo successivo, se ne riporta l'analisi di dettaglio del trasporto solido.



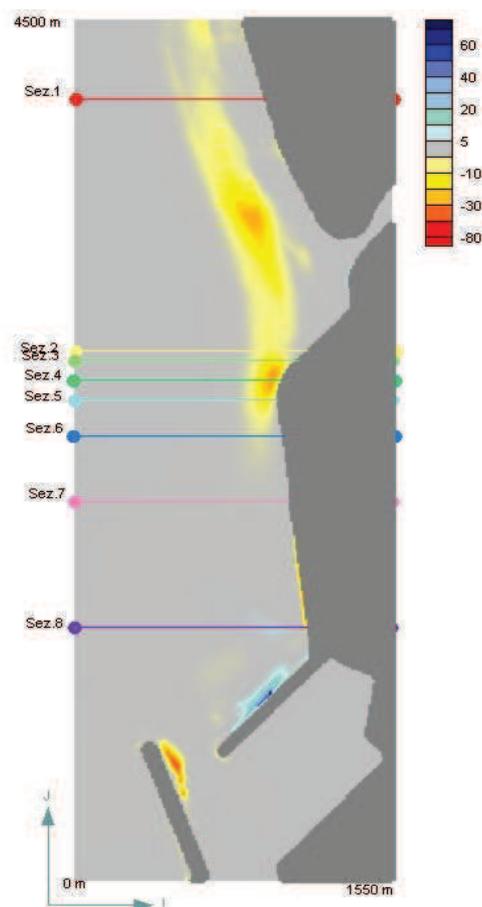
### 3.3.5.1. ANALISI DI DETTAGLIO DEL TRASPORTO SOLIDO

L'analisi di dettaglio del trasporto solido è eseguita sulla proposta n.4 valutando i risultati ottenuti sia per effetto delle singole mareggiate sia per effetto del clima annuale per i cui dettagli si rimanda al paragrafo 3.1, relativo allo studio meteomarinario.

Per ogni simulazione sono individuate otto sezioni ortogonali alla linea di riva, ritenute rappresentative per il trasporto solido; queste sono indicate nelle Figure seguenti. Il programma M2D accoppiato al WABED fornisce il trasporto solido in  $m^3/m/s$  e da questo valore è possibile stimare un valore medio giornaliero riferito alla singola mareggiata ed al clima annuale. In Figura 34 e 35, sono indicate le quantità di materiale in movimento per effetto delle singole mareggiate, tenendo presente che la direzione positiva del trasporto è da Sud verso Nord. Nelle Figure le quantità positive (dirette da Sud verso Nord) sono rappresentate nella scala del blu, mentre quelle negative (dirette da Nord verso Sud) nella scala del giallo.



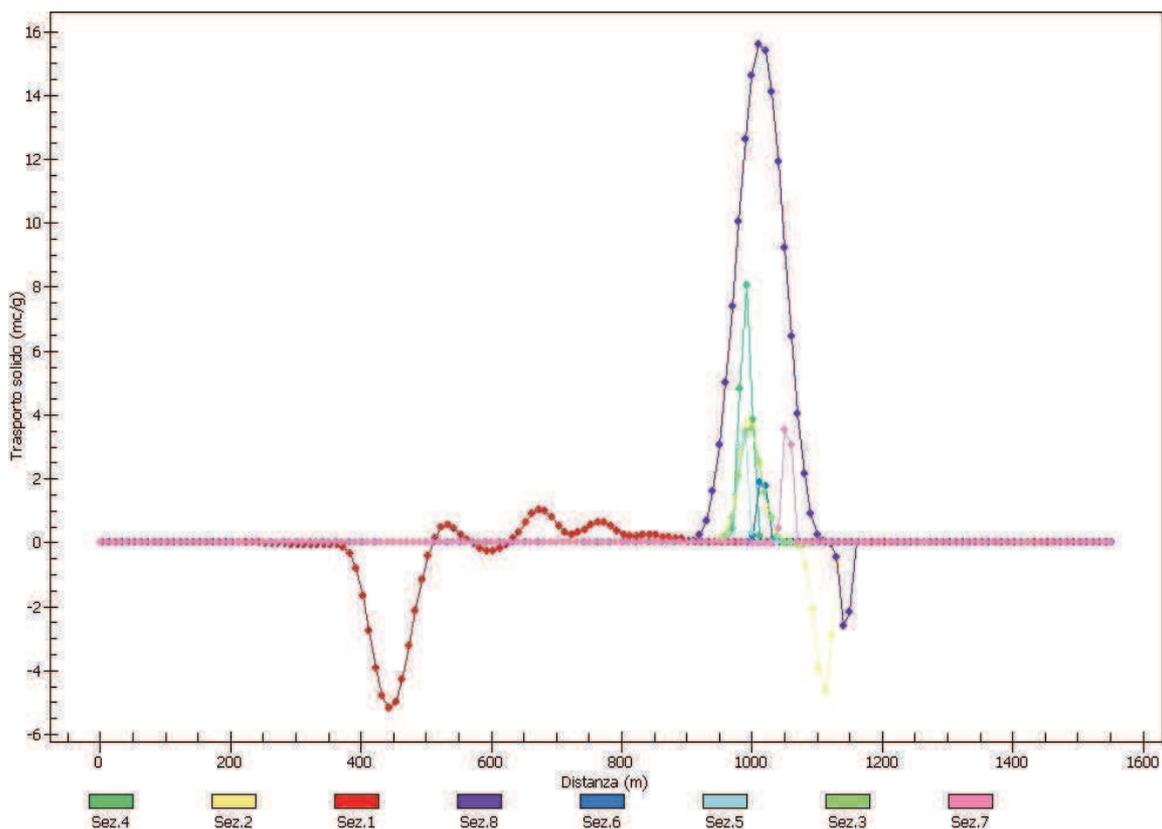
**Figura 34** Trasporto solido netto medio (mc/g) per effetto di mareggiate provenienti dal settore meridionale (250°)



**Figura 35** Trasporto solido netto medio (mc/g) per effetto di mareggiate provenienti dal settore settentrionale (315°)



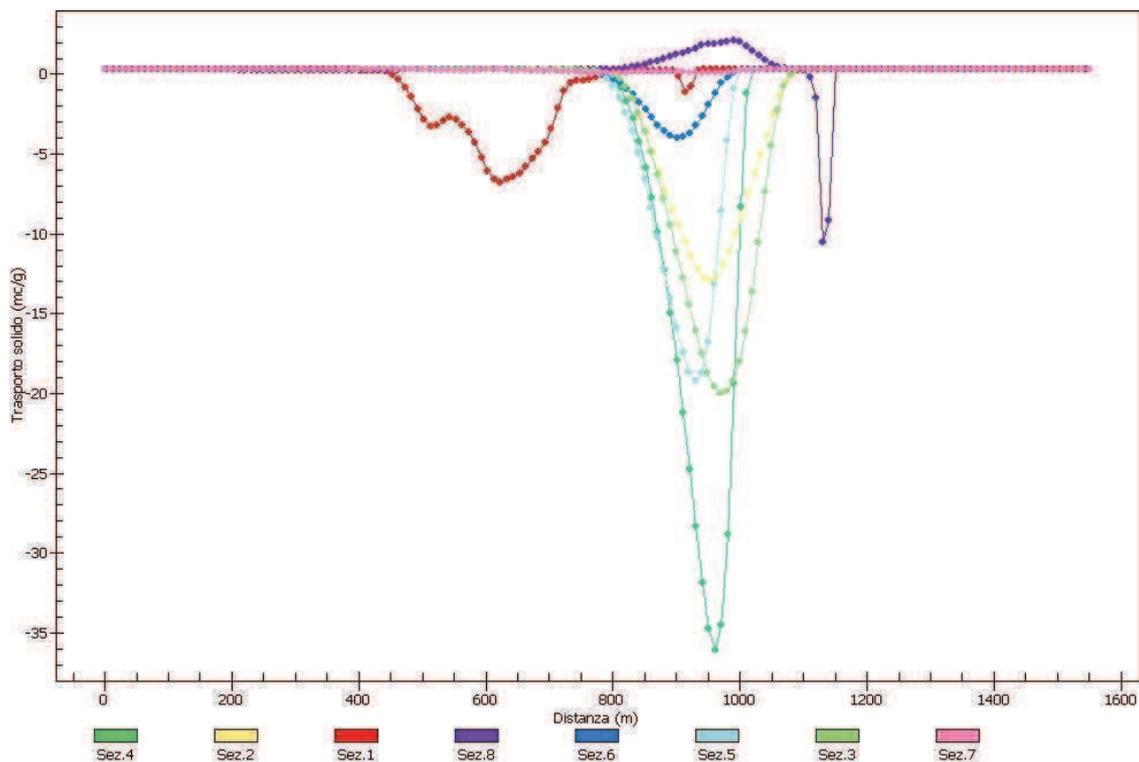
La quantità media di materiale in movimento è valutata sezione per sezione per ogni evento considerato. Nelle Figure i valori del trasporto solido medio sono espressi in  $m^3/g$  e sono in funzione della distanza in metri rispetto all'inizio della sezione cui fanno riferimento. Lo zero di ogni sezione coincide con il suo punto più a largo in corrispondenza con la batimetrica di chiusura, coerentemente con il sistema di riferimento di ogni griglia.



**Figura 36** Trasporto solido giornaliero  $m^3/g$  per effetto di mareggiate provenienti dal settore meridionale ( $250^\circ$ )

	Trasporto solido medio giornaliero
Sez.1	- 23.85 $m^3/g$ (dir. Nord-Sud)
Sez.2	1.21 $m^3/g$ (dir. Sud-Nord)
Sez.3	15.07 $m^3/g$ (dir. Sud-Nord)
Sez.4	17.41 $m^3/g$ (dir. Sud-Nord)
Sez.5	6.69 $m^3/g$ (dir. Sud-Nord)
Sez.6	4.00 $m^3/g$ (dir. Sud-Nord)
Sez.7	7.03 $m^3/g$ (dir. Sud-Nord)
Sez.8	130.24 $m^3/g$ (dir. Sud-Nord)

**Tabella 4** Trasporto solido medio giornaliero per effetto di mareggiate provenienti dal settore meridionale ( $250^\circ$ )



**Figura 37 Trasporto solido giornaliero m<sup>3</sup>/g per effetto di mareggiate provenienti dal settore settentrionale (315°)**

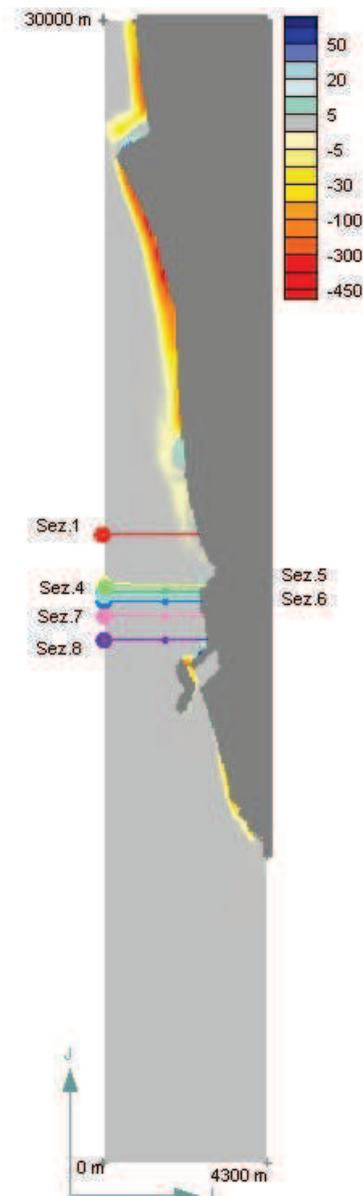
	Trasporto solido medio giornaliero
Sez.1	- 119.90 m <sup>3</sup> /g (dir. Nord-Sud)
Sez.2	-195.51 m <sup>3</sup> /g (dir. Nord-Sud)
Sez.3	-288.00 m <sup>3</sup> /g (dir. Nord-Sud)
Sez.4	-354.54 m <sup>3</sup> /g (dir. Nord-Sud)
Sez.5	-204.75 m <sup>3</sup> /g (dir. Nord-Sud)
Sez.6	-43.03 m <sup>3</sup> /g (dir. Nord-Sud)
Sez.7	-4.47 m <sup>3</sup> /g (dir. Nord-Sud)
Sez.8	1.58 m <sup>3</sup> /g (dir. Sud-Nord)

**Tabella 5 Trasporto solido medio giornaliero per effetto di mareggiate provenienti dal settore settentrionale (315°)**

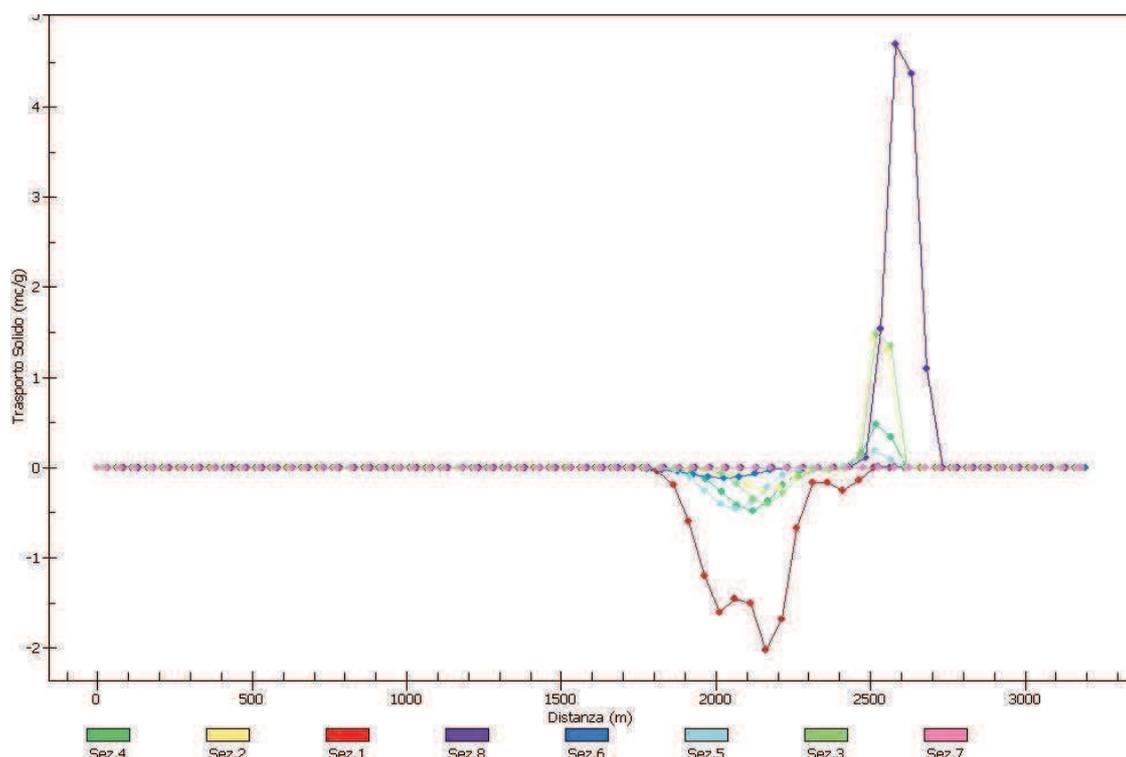
L'andamento del trasporto solido nelle singole sezioni conferma quanto scritto in precedenza a proposito della circolazione idrodinamica: le direzioni del trasporto nelle singole sezioni coincidono con quelle delle correnti evidenziate nei paragrafi precedenti così come le inversioni del trasporto all'interno di una stessa sezione sono indice della presenza di vortici e ricircoli delle correnti. Dai risultati numerici sopra riportati si può dunque dedurre che il trasporto solido per effetto delle mareggiate di libeccio è diretto da sud verso nord, mentre quella dovuta ad eventi estremi di maestrale è da nord a sud. Si stima, inoltre, che il



quantitativo di materiale medio annuo trasportato sia di circa  $4300 \text{ m}^3$ . Tale valore indicativo è dedotto dai risultati delle simulazioni le cui onde di riferimento sono quelle del clima annuale descritte al paragrafo 3.1 cui è assegnato lo spettro tipo JONSWAP. In Figura 38 è indicato l'andamento del trasporto solido medio netto per effetto del clima annuale e sono riportate le sezioni considerate, identiche a quelle utilizzate per le simulazioni relative alle mareggiate. I dati ottenuti sezione per sezione sono illustrati in Figura 39 e riassunti in Tabella 6.



**Figura 38 Trasporto solido netto medio (mc/g) per effetto del clima annuale**



**Figura 39 Trasporto solido giornaliero m<sup>3</sup>/g per effetto del clima annuale**

	Trasporto solido medio giornaliero
Sez.1	-11.71 m <sup>3</sup> /g (dir. Nord-Sud)
Sez.2	1.84m <sup>3</sup> /g (dir. Sud-Nord)
Sez.3	1.49 m <sup>3</sup> /g (dir. Sud-Nord)
Sez.4	-1.02 m <sup>3</sup> /g (dir. Nord-Sud)
Sez.5	-1.60 m <sup>3</sup> /g (dir. Nord-Sud)
Sez.6	-0.55 m <sup>3</sup> /g (dir. Nord-Sud)
Sez.7	0.00 m <sup>3</sup> /g
Sez.8	11.79 m <sup>3</sup> /g (dir. Sud-Nord)

**Tabella 6 Trasporto solido medio giornaliero per effetto del clima annuale**

I valori riscontrati sono in linea con i risultati di altri studi (Prof. Aminti 2005, Provincia di Pisa 2006), basati anch'essi su modellazioni numeriche. Al fine di ottimizzare la taratura e la calibrazione dei coefficienti impiegati nella presente analisi, si ritiene opportuno che vengano eseguiti monitoraggi continui per definire l'effettiva variazione dei fondali in seguito al clima marino. In questo modo è possibile determinare gli effettivi valori di trasporto solido da confrontare con i dati ottenuti dalla modellazione numerica. Tali monitoraggi dovrebbero avere cadenza annuale ed essere eseguiti con le medesime procedure di rilevamento.



## 4. CONCLUSIONI

---

La Nuova Vasca di contenimento è prevista in prolungamento a quella esistente verso nord, parallelamente alla linea di riva, in conformità con le previsioni del Piano Strutturale (art.24 - Sottosistema 5A). Dato che la collocazione della vasca è fissata dagli strumenti urbanistici e la sezione della scogliera è già stata oggetto di analisi dettagliata nello studio meteomarinario, sono presentate tre soluzioni progettuali, differenti l'una dall'altra per la geometria e di ognuna è valutata l'efficacia.

Le proposte di intervento sono state analizzate dettagliatamente, tenendo conto dell'attenuazione del moto ondoso, della circolazione idrodinamica e del trasporto solido. Rispetto allo stato attuale le soluzioni progettuali che determinano minor cambiamenti sono la n.2, la n.3 e la n.4 nelle quali è assente il molo di 200m in prolungamento della vasca.

Le tre soluzioni differiscono una dall'altra per il raggio di curvatura di raccordo tra i due lati perimetrali della Nuova Vasca: 100m, 700m e 250m. È evidente che, all'aumentare del raggio di curvatura, si ha una riduzione del volume della Vasca a fronte di migliorie sia per quanto riguarda la circolazione idrodinamica che per il trasporto solido in corrispondenza dello spigolo tra i due lati perimetrali dell'opera e nel tratto comprendente la foce del canale Scolmatore, come si evidenzia nelle planimetrie riportate in calce.

Dall'analisi dei risultati si ritiene che la proposta n.4 (R=250m) rappresenti un accettabile compromesso tra le esigenze tecniche della Vasca e gli effetti sulla dinamica costiera. Tale soluzione, infatti, comporta ridotti cambiamenti sulla circolazione idrodinamica e sul trasporto solido rispetto alla soluzione n.2 (R=100m) ed, allo stesso tempo, presenta un accettabile volume della vasca a differenza della proposta n.3.

Della proposta progettuale n.4, R=250m, è condotta l'analisi di dettaglio del trasporto solido alla quale si rimanda e grazie alla quale è possibile fare una stima delle quantità di materiale messe in movimento mediamente nell'anno. Attraverso la simulazione del clima annuale si valuta che il trasporto medio annuo tra le sezioni considerate sia circa 4300 m<sup>3</sup>/anno, entità calcolata da riva fino alla batimetrica di chiusura.



---

Si fa inoltre notare che, in ogni soluzione analizzata, le velocità delle correnti fornite dalle simulazioni nel tratto a nord della foce raggiungono valori di 0.6-0.8m/s che possono essere apprezzabili nei riguardi del trasporto solido. Si fa comunque presente che tali valori sono registrati sia per quanto riguarda le tre proposte progettuali che per lo stato attuale, come illustrato in dettaglio nei paragrafi dedicati alla descrizione dei risultati ottenuti.



---

## ALLEGATI

---

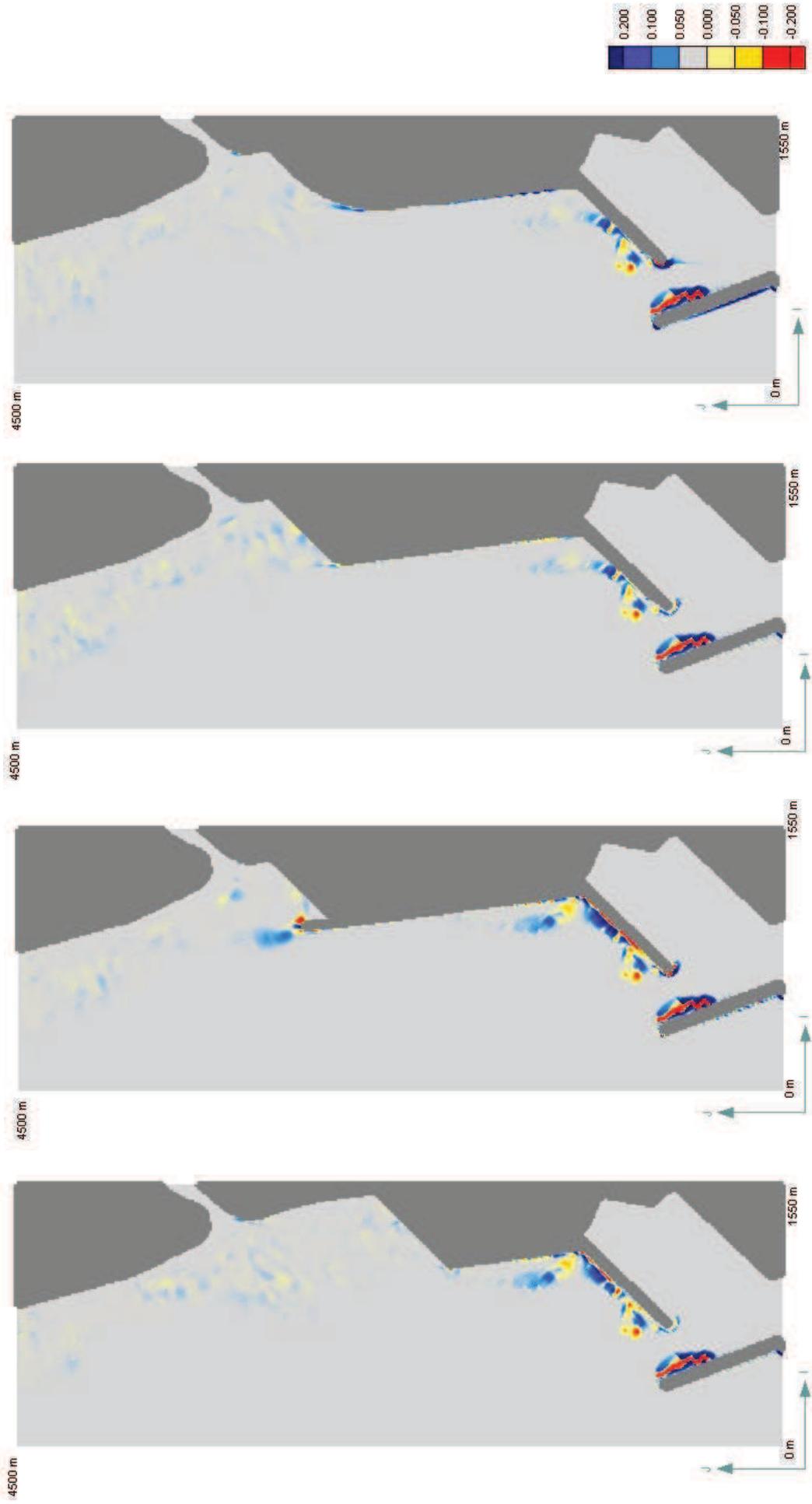
Negli allegati si riportano in scala più grande i risultati dall'applicazione dei modelli sia allo stato attuale ed alle tre proposte progettuali, in modo tale da fornire una più chiara rappresentazione di quanto emerso dall'analisi di dettaglio effettuata. Per facilitare il confronto tra le diverse soluzioni, in ogni pagina, per ogni aspetto della dinamica costiera, sono riportati i risultati dello stato attuale e delle tre proposte progettuali una accanto all'altra. Le legende sono riportate in ogni pagina in basso a sinistra.

Di seguito si riporta l'elenco degli aspetti di dinamica costiera illustrati nelle pagine seguenti.

- Zone di deposito ed erosione per effetto delle mareggiate provenienti dal settore meridionale (250°).
- Rappresentazione dei moduli delle velocità delle correnti in m/s per mareggiate provenienti dal settore meridionale (250°).
- Zone di deposito ed erosione per effetto delle mareggiate provenienti dal settore settentrionale (315°).
- Rappresentazione dei moduli delle velocità delle correnti in m/s per mareggiate provenienti dal settore settentrionale (315°).

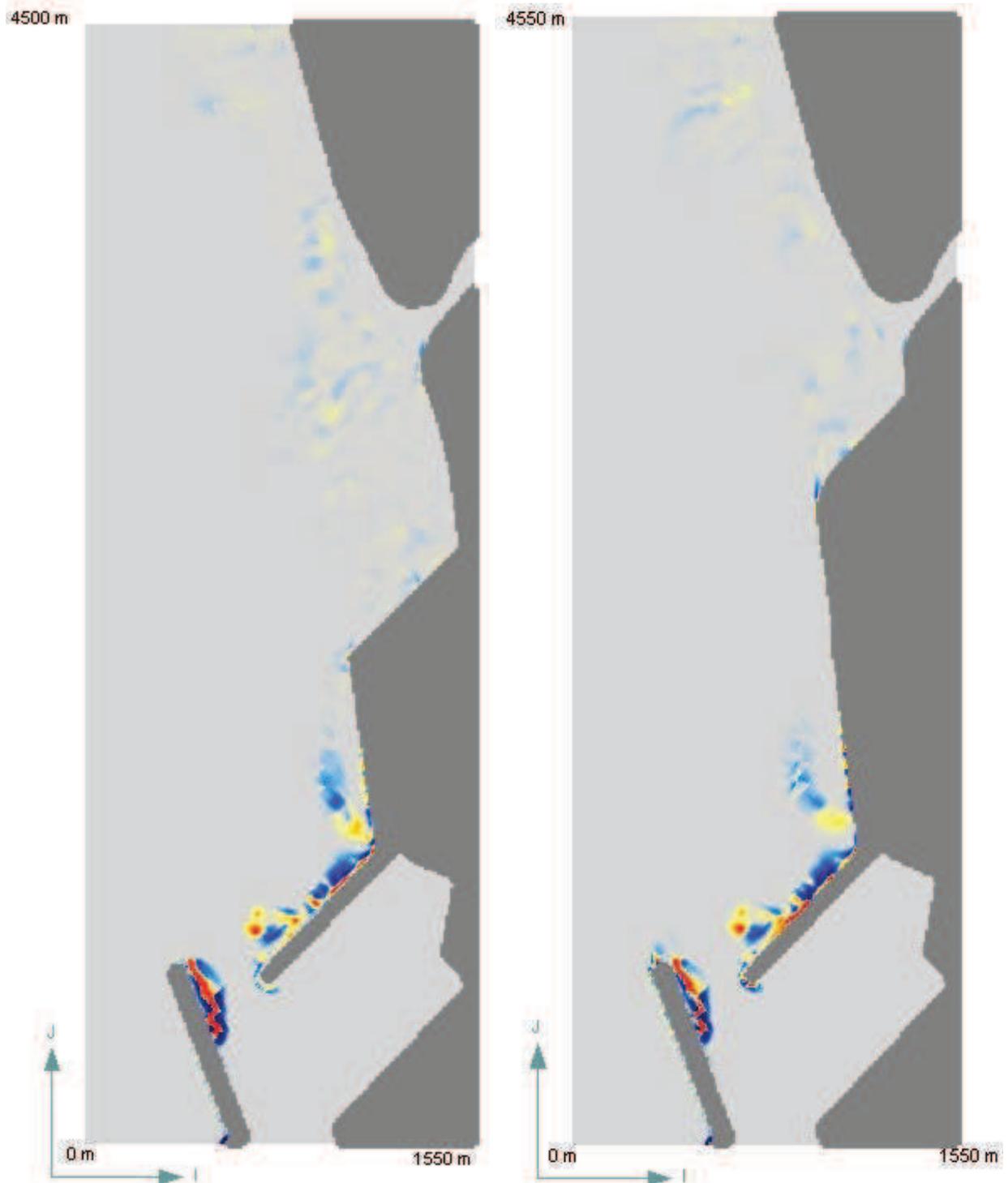


**Zone di deposito ed erosione per effetto delle mareggiate provenienti dal settore meridionale (250°). Stato attuale, Proposta n.1, Proposta n.2, Proposta n.3**



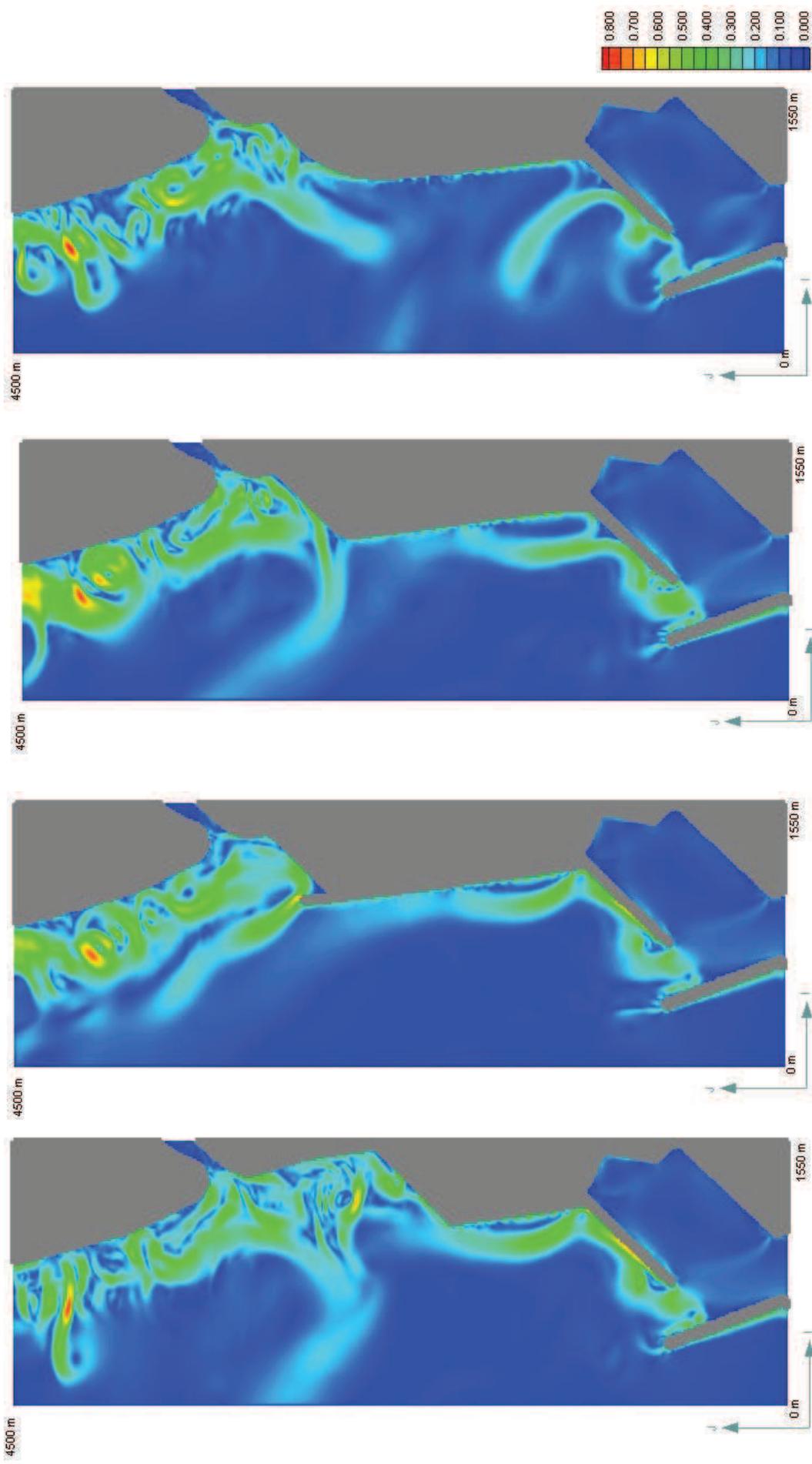


**Zone di deposito ed erosione per effetto delle mareggiate provenienti dal settore meridionale (250°). Stato attuale, Proposta n.4**



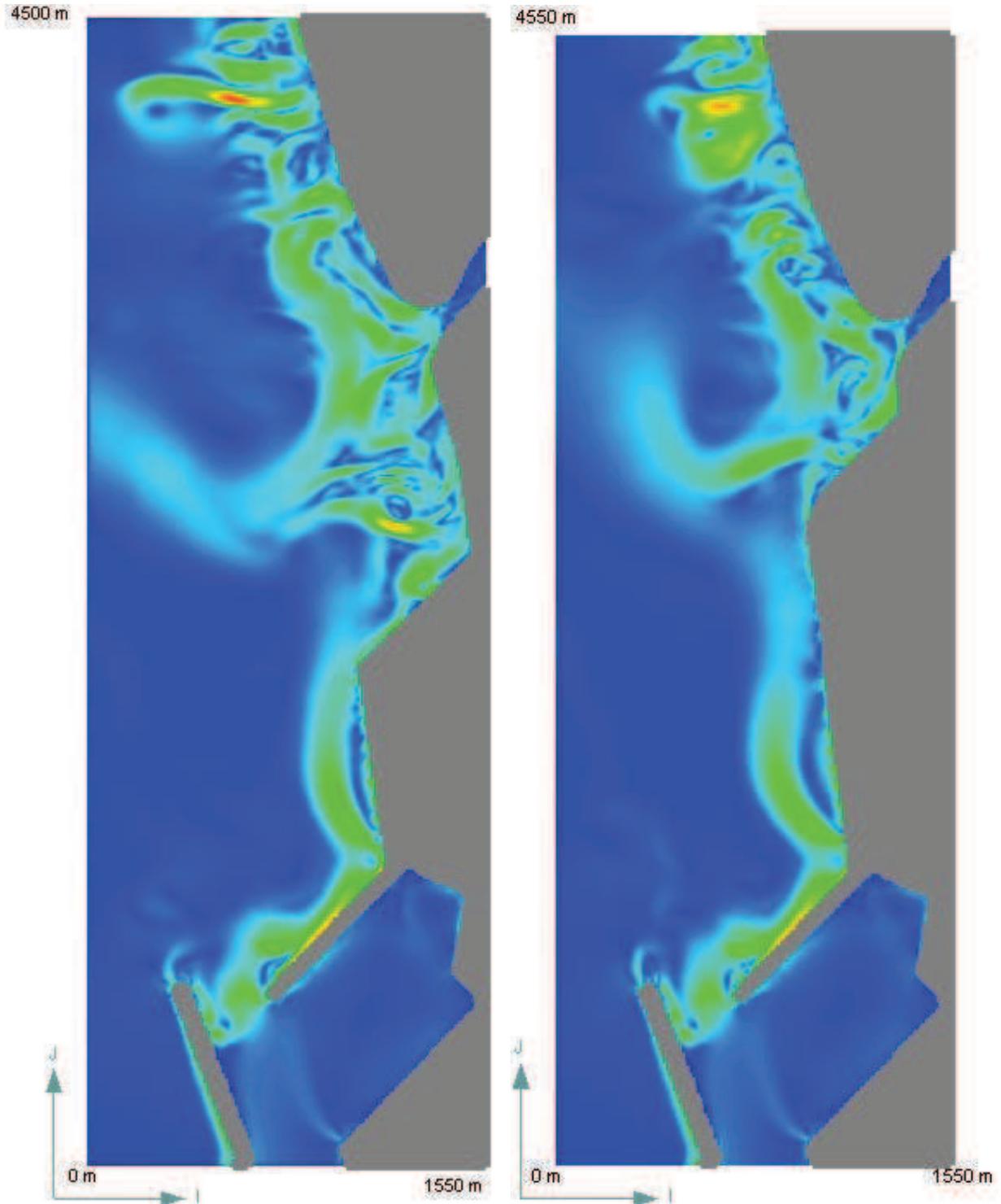


**Rappresentazione dei moduli delle velocità delle correnti in m/s per mareggiate provenienti dal settore meridionale (250°). Stato attuale, Proposta n.1, Proposta n.2, Proposta n.3**



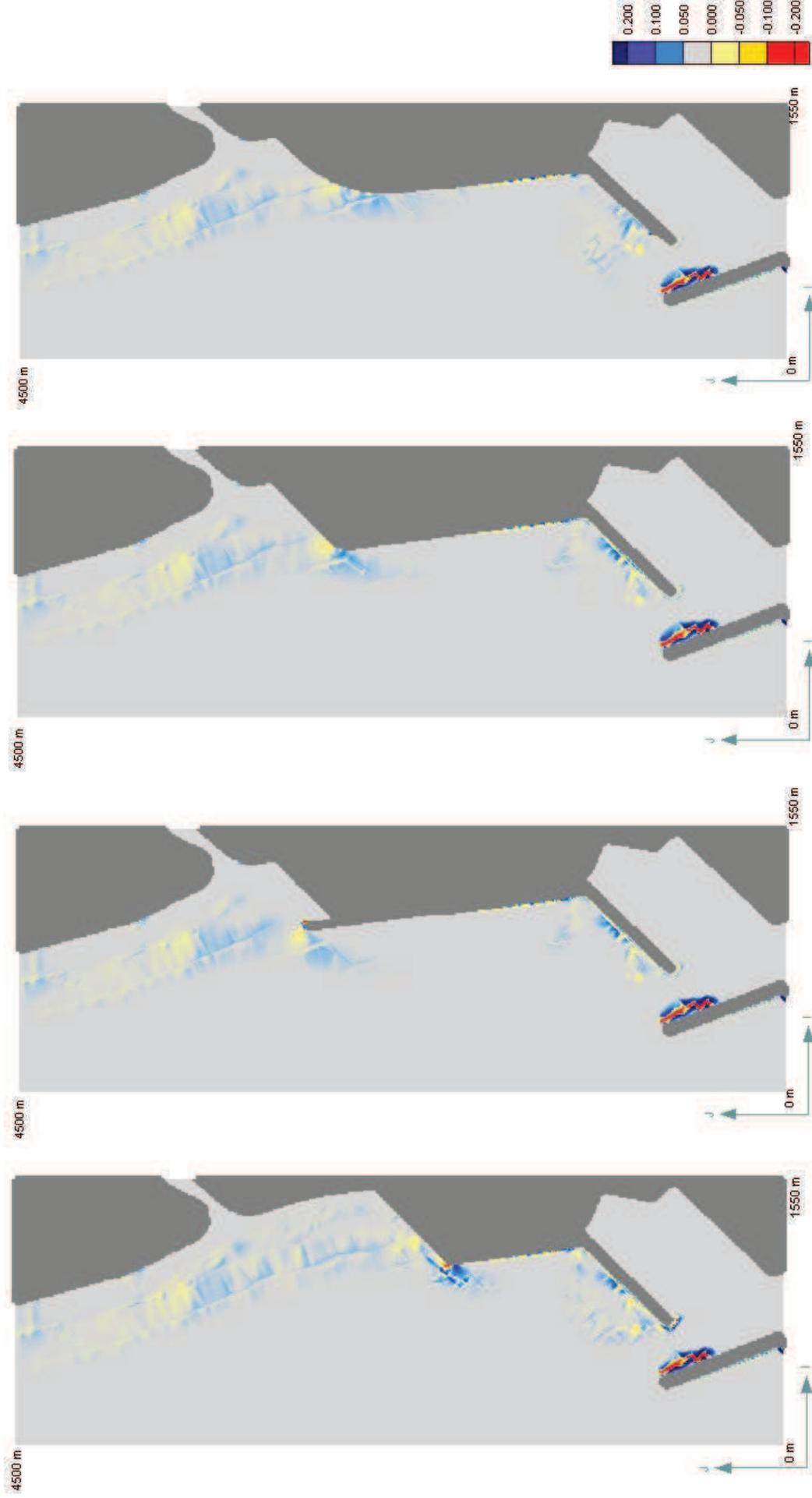


**Rappresentazione dei moduli delle velocità delle correnti in m/s per mareggiate provenienti dal settore meridionale (250°). Stato attuale, Proposta n.4**



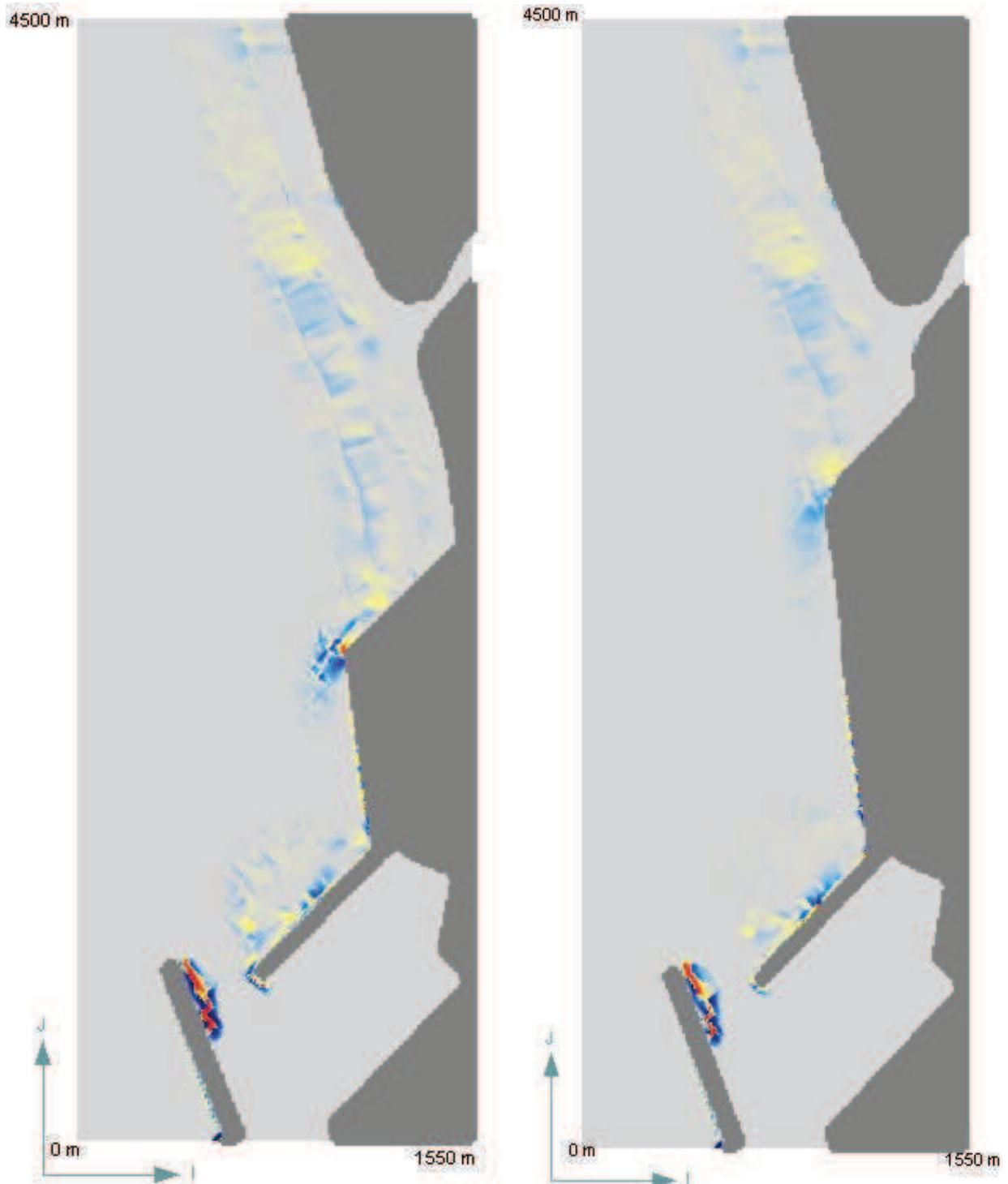


**Zone di deposito ed erosione per effetto delle mareggiate provenienti dal settore settentrionale (31.5°). Stato attuale, Proposta n.1., Proposta n.2, Proposta n.3**



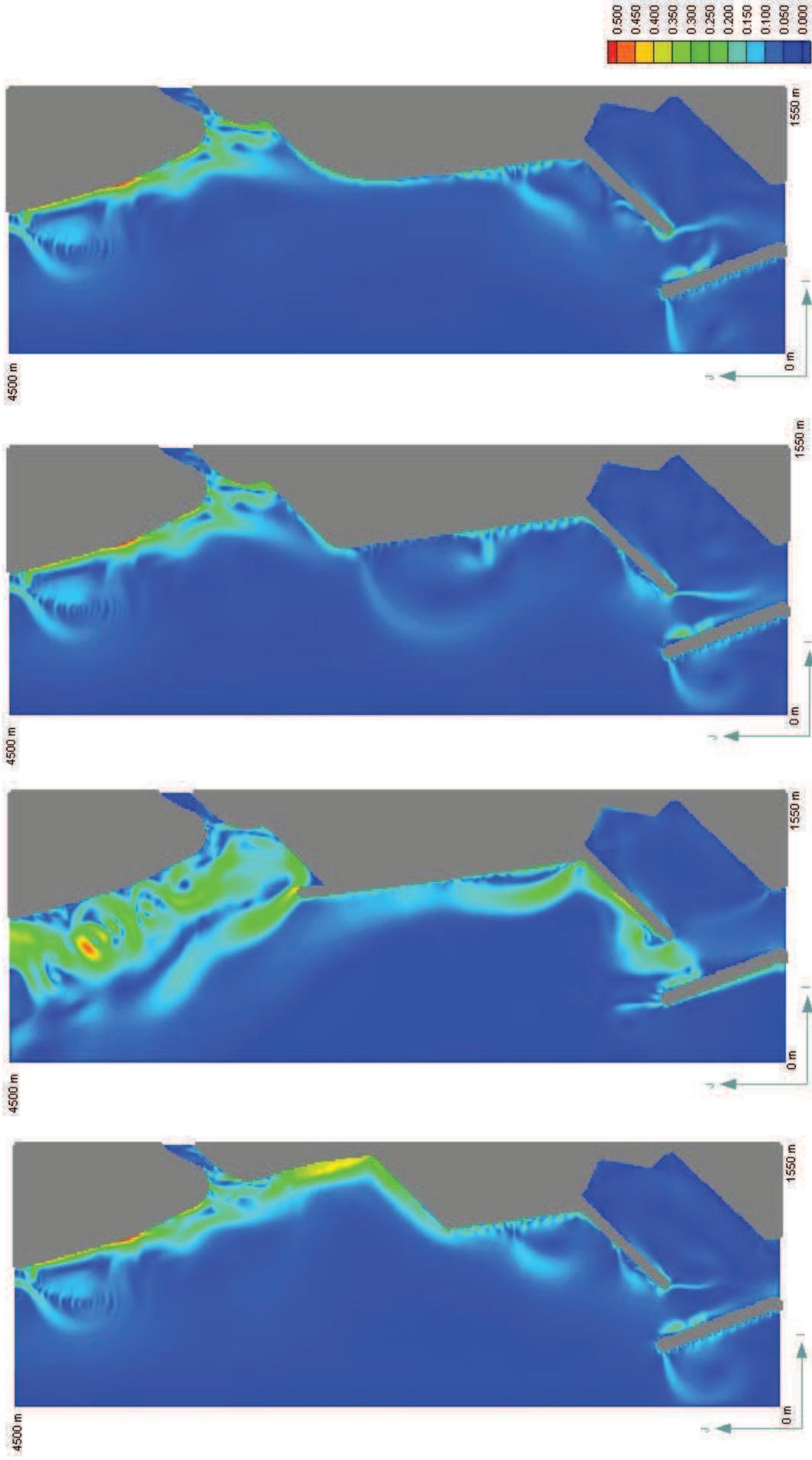


**Zone di deposito ed erosione per effetto delle mareggiate provenienti dal settore settentrionale (315°). Stato attuale, Proposta n.4**



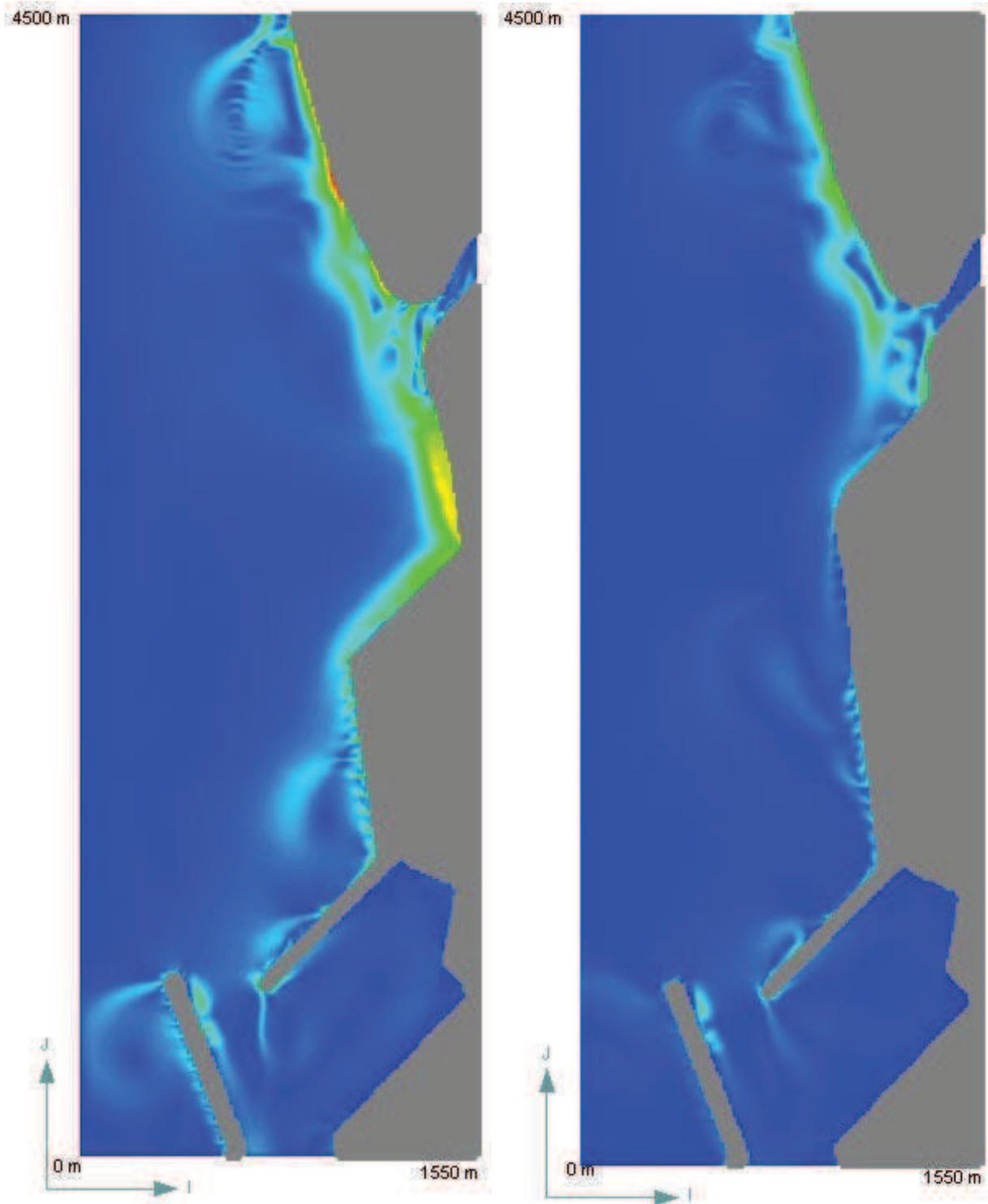


**Rappresentazione dei moduli delle velocità delle correnti in m/s per mareggiate provenienti dal settore settentrionale (315°). Stato attuale, Proposta n.1, Proposta n.2, Proposta n.3**





**Rappresentazione dei moduli delle velocità delle correnti in m/s per mareggiate provenienti dal settore settentrionale (315°). Stato attuale, Proposta n.4**





---

## APPENDICE

---

In appendice si riportano i codici di calcolo dei modelli utilizzati, tratti dai capitoli dei manuali riguardanti le equazioni che governano le simulazioni. Nell'elenco puntato che segue, accanto ad ogni modello è riportato il riferimento al manuale dal quale queste informazioni sono tratte.

- WABED (Wave-Action Balance Equation Diffraction (Wabed) Model: Tests of Wave Diffraction and Reflection at Inlets. L. Lin et al. Luglio 2006)
- STWAVE (Stwave: Steady- State Spectral Wave Model. User's Manual for Stwave, Version 3.0. J.McKee Smith et al. Febbraio 2001)
- M2D (Two-dimensional Depth-Averaged Circulation Model CMS-M2D: Version 3.0 Report 2, Sediment Transport and Morphology Change. A.K. Zundel et al. Agosto 2006).

Il modello WABED è quello che meglio si adatta allo studio del moto ondoso in acque basse ed in presenza di strutture perché tiene conto sia dei fenomeni di rifrazione che di diffrazione. Il modello è di recente elaborazione e tra il materiale bibliografico a disposizione, oltre alla pubblicazione appena citata, vi è quella dal titolo Wabed Model in the SMS: Part 2. Graphical Interface di Z. Demirbilek et al. Maggio 2007, che descrive gli aspetti del modello legati all'interfaccia grafica. Sebbene la pubblicazione riguardante il codice di calcolo e la descrizione delle equazioni che governano il modello non sia ancora disponibile, nell'articolo del luglio 2006, è riportato il confronto tra i risultati ottenuti da esperienze di laboratorio e quelli forniti dall'applicazione del codice di calcolo Wabed. Nella pubblicazione, dunque, sono comprovate l'efficienza e l'affidabilità del modello.

### CODICE DI CALCOLO DEL MODELLO STWAVE

Il modello STWAVE è un modello alle differenze finite e si basa sull'equazione di equilibrio dell'azione dell'onda. Le onde sono modellate mediante uno spettro bidimensionale



della densità di azione e l'interazione delle onde con le correnti è valutata considerando la relazione:

$$w_r^2 = gk \tanh(kd)$$

dove  $w$  è la frequenza angolare,  $r$  il pedice che indica che il sistema di riferimento è relativo alla corrente,  $k$  il numero d'onda,  $d$  la profondità di acqua.

Nel sistema di riferimento assoluto al relazione diviene:

$$w_a = w_r + kU \cos(\delta - \alpha)$$

dove  $a$  è il pedice che indica il sistema di riferimento assoluto,  $U$  è la velocità della corrente,  $\delta$  la direzione della corrente,  $\alpha$  la direzione ortogonale all'onda. Il numero d'onda  $k$  è determinato iterativamente, risolvendo le due equazioni.

Il modello STWAVE è in grado di tenere conto gli effetti di rifrazione, shoaling, diffrazione e frangimento. Per tenere conto dei fenomeni di rifrazione e di shoaling è necessario conoscere la celerità dell'onda  $C$  e quella di gruppo  $C_g$ . La direzione di entrambe le celerità è  $\alpha$ , ortogonale all'onda ed i moduli sono così calcolati:

$$C_r = w_r / k \quad C_g = 0.5 C_r \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right)$$

In termini assoluti le celerità si calcolano:

$$C_a = C_r + U \cos(\delta - \alpha) \quad (C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i$$

dove  $i$  è la notazione tensoriale per le componenti in direzione  $x$  e  $y$ . In questo caso, la direzione della celerità dell'onda è sempre quella ortogonale mentre la direzione della celerità di gruppo è data:

$$\mu = \tan^{-1} \left( \frac{C_{gr} \sin \alpha + U \sin \delta}{C_{gr} \cos \alpha + U \cos \delta} \right)$$

La direzione della celerità di gruppo è fondamentale nel caso si debbano descrivere le interazioni onde-corrente. Infatti con le correnti l'energia delle onde si muove lungo la direzione della celerità di gruppo mentre, nel caso si consideri solo l'azione delle onde le direzioni delle due celerità coincidono. Tenendo conto dell'interazione onde-correnti l'equazione che governa la conservazione dell'azione dello spettro d'onda lungo la direzione di propagazione della celerità di gruppo è data:



$$(C_{ga})_i \frac{\delta}{\delta x_j} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E(w_a, \alpha)}{w_r} = \Sigma \frac{S}{w_r}$$

dove E è la densità di energia dell'onda divisa per  $\rho_w$ , la densità dell'acqua, S l'energia sorgente.

Gli effetti dei fenomeni di diffrazione, invece, sono valutati attraverso la relazione:

$$E_j(w_a, \alpha) = 0.55 E_j(w_a, \alpha) + 0.225 [E_{j+1}(w_a, \alpha) + E_{j-1}(w_a, \alpha)]$$

dove E è la densità di energia in una data frequenza e direzione e j è il pedice che indica la colonna della griglia.

Infine, i limiti per il frangimento sono calcolati secondo la formula di Miche:

$$H_{mo_{max}} = 0.1 L \tanh(kd)$$

## CODICE DI CALCOLO DEL MODELLO M2D

Il modello di calcolo M2D risolve in due dimensioni, l'equazione di continuità e di conservazione della quantità di moto.

$$\frac{\delta(h+\eta)}{\delta t} + \frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta q_y}{\delta y} = 0$$

$$\frac{\delta q_x}{\delta t} + \frac{\delta u q_x}{\delta x} + \frac{\delta v q_x}{\delta y} + \frac{1}{2} g \frac{\delta(h+\eta)^2}{\delta x} = \frac{\delta}{\delta x} D_x \frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta y} D_y \frac{\delta q_x}{\delta y} + f q_y - \tau_{bx} + \tau_{wx} + \tau_{sx}$$

$$\frac{\delta q_y}{\delta t} + \frac{\delta u q_y}{\delta x} + \frac{\delta v q_y}{\delta y} + \frac{1}{2} g \frac{\delta(h+\eta)^2}{\delta y} = \frac{\delta}{\delta x} D_x \frac{\delta q_y}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta y} D_y \frac{\delta q_y}{\delta y} - f q_x - \tau_{by} + \tau_{wy} + \tau_{sy}$$

dove h è la profondità d'acqua,  $\eta$  la variazione del livello liquido rispetto alla profondità iniziali, t il tempo,  $q_x$  la portata per unità di lunghezza parallelo all'asse x,  $q_y$  la portata per unità di lunghezza parallelo all'asse y, u la velocità della corrente lungo le x alla profondità media, v la velocità della corrente lungo le y alla profondità media, g l'accelerazione di gravità,  $D_x$  e  $D_y$  i coefficienti di diffusione rispettivamente lungo l'asse x ed y, f il coefficiente di Coriolis,  $\tau_{bx}$  e  $\tau_{by}$  le azioni tangenziali al fondo parallele rispettivamente all'asse x ed y,  $\tau_{wx}$  e  $\tau_{wy}$  le azioni tangenziali superficiali parallele all'asse x ed y,  $\tau_{sx}$  e  $\tau_{sy}$  le azioni tangenziali dovute al moto ondoso parallele all'asse x ed y.



Per quanto riguarda le azioni tangenziali al fondo, queste sono calcolate in maniera differente a seconda che siano assegnate al modello le onde come dato di input.

In assenza di onde, le azioni tangenziali al fondo sono date:

$$\tau_{bx} = C_b u |U| \quad \tau_{by} = C_b v |U|$$

dove U è la velocità complessiva della corrente valutata come  $|U| = \sqrt{u^2 + v^2}$  e  $C_b$  è il coefficiente empirico di attrito al fondo calcolato in base alla relazione:

$$C_b = \frac{g}{C^2} \quad \text{dove } C \text{ è il coefficiente di Chezy: } C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n}$$

in cui R è il raggio idraulico e n il coefficiente di scabrezza di Manning.

In presenza di onde, le azioni tangenziali al fondo sono dovute sia al contributo delle correnti (vento, maree ed onde superficiali) sia a quello del moto orbitale delle onde. Queste sono calcolate:

$$\tau_{bx} = C_b \left[ \left( \frac{w_b^2}{U_{wc}} \cos \alpha \sin \alpha \right) v + \left( U_{wc} + \frac{w_b^2}{U_{wc}} \cos^2 \alpha \right) u \right]$$

$$\tau_{by} = C_b \left[ \left( U_{wc} + \frac{w_b^2}{U_{wc}} \sin^2 \alpha \right) v + \left( \frac{w_b^2}{U_{wc}} \cos \alpha \sin \alpha \right) u \right]$$

in cui  $\alpha$  è l'angolo delle onde rispetto all'asse x,  $U_{wc}$  e  $w_b$  sono dati:

$$U_{wc} = \frac{1}{2} \sqrt{\left[ u^2 + v^2 + w_b^2 + 2(u \cos \alpha + v \sin \alpha) w_b \right] + \left[ u^2 + v^2 + w_b^2 - 2(u \cos \alpha + v \sin \alpha) w_b \right]}$$

$$w_b = \frac{\sigma H}{\pi \sinh[k(h + \eta)]}$$

dove  $\sigma$  è la frequenza angolare delle onde, k il numero d'onda ed H l'altezza.

Le azioni tangenziali superficiali risultano:

$$\tau_{wx} = C_d \frac{\rho_a}{\rho_w} W^2 \sin \theta \quad \tau_{wy} = C_d \frac{\rho_a}{\rho_w} W^2 \cos \theta$$



essendo  $C_d$  il coefficiente di resistenza,  $\rho_a$  la densità dell'aria,  $\rho_w$  la densità dell'acqua,  $W$  la velocità del vento e  $\theta$  la direzione del vento che risulta  $0^\circ$  se proveniente da est.

Le azioni tangenziali dovuti al moto ondoso sono calcolate:

$$\tau_{sx} = \frac{-1}{\rho_w} \left[ \frac{\delta S_{xx}}{\delta x} + \frac{\delta S_{xy}}{\delta y} \right] \quad \tau_{sy} = \frac{-1}{\rho_w} \left[ \frac{\delta S_{xy}}{\delta x} + \frac{\delta S_{yy}}{\delta y} \right]$$

dove  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yy}$  sono calcolati nel Wabed secondo la teoria lineare delle onde nel caso i due modelli siano accoppiati.

Per quanto il trasporto solido le formule che possono essere scelte sono: la formula di Watanabe (1987) per il trasporto totale, la LUND-CIRP (Camenen and Larson 2005, 2006) per il trasporto totale, visto come combinazione di quello al fondo e quello in sospensione, oppure la formula AD che dà la possibilità di valutare il trasporto al fondo ed in sospensione o con la formula di van Rijn (1998) o con la LUND- CIRP.

Nel caso in esame è utilizzata la formula LUND CIRP e di questa si riportano le equazioni che la governano.

Il trasporto solido al fondo  $q_b$  combinando l'azione delle onde con quella dovuta alla corrente secondo quanto elaborato da Camenen e Larson (2005):

$$\frac{q_{bw}}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = a_w \sqrt{\theta_{net} \theta_{cw,m}} e^{-b \frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}} \quad \frac{q_{bn}}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = a_n \sqrt{\theta_{cn} \theta_{cw,m}} e^{-b \frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}}$$

dove i pedici  $w$  ed  $n$  sono riferiti rispettivamente alla direzione dell'onda ed a quella ad essa ortogonale,  $a$  e  $b$  sono coefficienti,  $\theta_{cw,m}$   $\theta_{cw}$  sono il valore medio ed massimo del parametro di Shields per onde e correnti combinate,  $a_n = 12$  per la componente del trasporto normale alla direzione dell'onda e  $b=4.5$  descrive l'inizio del moto.

Le quantità  $\theta_{net}$  e  $\theta_{cn}$  rappresentano il contributo netto alla velocità di trasporto durante i cicli delle onde rispettivamente in direzione parallela e normale alle onde, definito come:

$$\theta_{net} = \theta_{cw,on} + \theta_{cw,off} \quad \text{in cui:}$$

$$\theta_{cw,on} = \frac{1}{T_{wc}} \int_0^{T_{wc}} \frac{1}{2} \frac{f_{cw}(u_w(t) + U_c \cos \phi)^2}{(s-1)gd_{50}} dt \quad \theta_{cw,off} = \frac{1}{T_{wt}} \int_{T_{wc}}^T \frac{1}{2} \frac{f_{cw}(u_w(t) + U_c \cos \phi)^2}{(s-1)gd_{50}} dt \quad e$$



$$\theta_{cn} = \frac{1}{2} f_c \frac{(U_c \sin \phi)^2}{(s-1)gd_{50}}$$

dove  $T_{wc}$  è il periodo positivo della corrente,  $T_{wt}$  il periodo negativo,  $u_w$  la variazione temporale della velocità orbitale ( $T=T_{wc} + T_{wt}$ ),  $f_{cw}$  il coefficiente di attrito calcolato:

$$f_{cw} = X_v f_c + (1 - X_v) f_w$$

dove  $X_v = \frac{|U_c|}{|U_c| + U_w}$  e  $f_c$  e  $f_w$  sono i coefficienti di attrito rispettivamente della corrente e delle onde e non comprendono il coefficiente di attrito dovuto al fondo.

Il trasporto in sospensione  $q_s$ , invece, è basato sull'ipotesi di un profilo esponenziale e velocità costante (Camenen e Larson 2006) ed è così determinato:

$$q_s = U_c c_R \frac{\epsilon}{W_s} \left(1 - e^{-\frac{w_f d}{\epsilon}}\right)$$

dove  $w_f$  è la velocità di sedimentazione,  $c_R$  la concentrazione di riferimento e  $\epsilon$  la diffusività dei sedimenti. Per direzione del trasporto solido è assunta quella della corrente dato che si assume pari a zero il contributo dato dalle onde. I valori di  $c_R$  sono così determinati:

$$c_R = A_{cR} \theta_{cw,m} e^{-b \frac{\theta_{cR}}{\theta_{cw}}}$$

essendo  $A_{cR} = 3.510^{-3} e^{-0.3d_i}$  e  $d_i$  il diametro del grano in termini adimensionali

$$d_i = \left(\frac{(s-1)g}{V^2}\right)^{(1/3)} d_{50}$$

La diffusività dei sedimenti  $\epsilon$ , invece, è strettamente legata alla dissipazione di energia secondo quanto trattato da Battjes (1975):

$$\epsilon = \left(\frac{D_e}{\rho}\right)^{(1/3)} d \text{ dove } D_e \text{ è data: } D_e = k_c^3 D_{ec} + k_w^3 D_{ew} + k_b^3 D_{eb} \text{ nella quale } k_c, k_w, k_b, \text{ sono}$$

coefficienti,  $D_{ec}$  e  $D_{ew}$  sono dissipazioni dovute rispettivamente alle correnti ed alle onde.