



PROVINCIA DI PISA

DIPARTIMENTO DEL TERRITORIO
SEVIZIO DIFESA DEL SUOLO E PROTEZIONE CIVILE
U.O.O. IDRAULICA
UFFICIO DIFESA DELLA COSTA

PROGRAMMA DI INTERVENTI PRIORITARI DI RECUPERO E RIEQUILIBRIO DEL LITORALE D.C.R. n.47 del 11.03.2003

LAVORI URGENTI PER LA STABILIZZAZIONE DELLA LINEA DI RIVA IN LOC. GOMBO

TITOLO DEL DOCUMENTO

**INQUADRAMENTO
GEOLOGICO**

TAV. N°

B

CODICE PROGETTO

DATA

SCALA

Indice

1.	<i>Premessa.....</i>	2
2.	<i>Inquadramento geografico, geologico, geomorfologico ed idrogeologico.....</i>	4
2.1	<i>inquadramento geografico e geologico</i>	4
2.2	<i>geomorfologia.....</i>	5
2.3	<i>idrografia ed idrogeologia.....</i>	8
3.	<i>La costa toscana e la dinamica costiera del litorale pisano</i>	11
4.	<i>Evoluzione storica del delta dell'arno e del litorale pisano.....</i>	14
5.	<i>Sintesi dei principali studi relativi all'evoluzione del delta dell'arno e del litorale pisano</i>	17
6.	<i>I sedimenti del litorale: caratteristiche granulometriche.....</i>	20
7.	<i>Precedenti interventi di difesa del litorale</i>	22
8.	<i>Considerazioni sull'intervento in progetto.....</i>	24
9.	<i>Conclusioni.....</i>	26
10.	<i>Riferimenti bibliografici</i>	27

Allegati

Tav.1	<i>Inquadramento Generale (scala 1:50.000)</i>
Tav.2	<i>Inquadramento Geologico e Geomorfologico Generale (scala 1:50.000) tratto dalla "Carta degli elementi naturalistici e storici della Pianura di Pisa" di Mazzanti R. ed altri</i>
Tav.3	<i>Ubicazione Sezioni Topografiche e Batimetriche (scala 1:64.500) tratte dallo "Studio morfologico e sedimentologico del litorale pisano" dell'Università degli Studi di Firenze</i>
Tavv.41, 42, 43, 44	<i>Sezioni topografiche e batimetriche tratte dallo "Studio morfologico e sedimentologico del litorale pisano" dell'Università degli Studi di Firenze (scala orizzontale 1:5.000; scala verticale 1:500)</i>

1. PREMESSA

In relazione all'urgente necessità di eseguire un intervento di difesa in loc. "Gombo", nel rispetto delle previsioni del *Programma regionale di interventi prioritari di recupero e riequilibrio del litorale* approvato con il D.C.R. 47 del 11 marzo 2003 e della previsione progettuale preliminare già approvata per gli interventi di difesa costiera da realizzare tra il Fiume Arno ed il Fiume Serchio, la Provincia di Pisa ha redatto il presente progetto definitivo per l'attuazione di un primo lotto delle opere.

L'intervento in oggetto che riguarda in modo particolare il tratto di costa antistante la Villa Presidenziale del Gombo, dove durante le recenti mareggiate del mese di ottobre e novembre 2005 si sono verificati gravi fenomeni di erosione che hanno provocato l'arretramento della linea di riva ed il danneggiamento delle opere di recinzione presenti (*Tav. 1 Inquadramento Generale*).

Il progetto si propone di contrastare tali processi erosivi al fine di salvaguardare la vicina Villa del Gombo, che in breve tempo potrebbe essere interessata dal rapido arretramento della linea di riva.

Le problematiche del litorale riscontrate si inquadrano in un contesto più ampio che interessa tutta la costa della Toscana dove risultano da tempo in atto profonde modificazioni morfologiche conseguenti ai fenomeni erosivi che determinano la progressiva riduzione della spiaggia emersa, l'arretramento della linea di riva e l'abbassamento dei fondali antistanti il litorale. Tali processi sono imputabili sia a fattori di scala globale, quale l'innalzamento generalizzato del livello del mare, sia alla riduzione degli apporti sedimentari immessi presso le foci dei maggiori corsi d'acqua, sia alla subsidenza della pianura legata alla compattazione dei sedimenti recenti, sia ad interventi antropici di varia natura (opere marittime o opere di difesa costiera).

Tutto ciò induce rilevanti conseguenze dal punto di vista ambientale ed economico in quanto l'arretramento della linea di riva comporta la riduzione della spiaggia emersa e la concomitante scomparsa di *habitat* naturali di rilevante pregio ambientale quali la fascia delle dune costiere o gli specchi d'acqua dolce presenti presso il litorale, oltre al danneggiamento o la distruzione di opere e manufatti sia pubblici che privati.

Appare pertanto necessario individuare ed attuare idonee soluzioni a scala generale capaci di contrastare questa tendenza evolutiva che, se per alcuni aspetti è espressione di una dinamica a più ampia scala, non certamente modificabile, a livello locale può essere controllata con interventi

mirati che consentano di contrastare e rallentare gli effetti più rilevanti.

L'intervento urgente in progetto si colloca in tale quadro e si propone, in attesa che vengano attuate soluzioni più generali, l'obiettivo di stabilizzare la linea di riva, favorendo inoltre la costituzione di un nuovo assetto del litorale maggiormente compatibile con le locali condizioni meteo-marine mediante sperimentazione di tecnologie innovative per la realizzazione delle opere strutturali e la ricostruzione e protezione delle dune.

Il presente studio è stato sviluppato a supporto della fase di indagine definitiva ed ha la finalità di precisare l'inquadramento geologico-geomorfologico ed idrogeologico dell'ambito in cui l'intervento si verrà a collocare. Il quadro conoscitivo verrà inoltre completato ed approfondito con dell'interpretazione dai risultati delle indagini già predisposte e recentemente concluse, nel quale verranno coinvolte le competenze sia dell'ARPAT che dei Dipartimenti di Scienze della Terra dell'Università di Firenze e Pisa.

Le considerazioni contenute nella presente nota sono state sviluppate in accordo al livello di dettaglio richiesto per la progettazione definitiva dalla Legge 109/1994 "*Legge quadro in materia di lavori pubblici*" e dal relativo Regolamento di attuazione DPR 554/1999, agli artt. 25 e 27 del *Capo II - Titolo III*.

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO, GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO ED IDROGEOLOGICO

Per la caratterizzazione dell'area di intervento di seguito sono descritti i principali caratteri geologici, geomorfologici ed idrogeologici desumibili dalla letteratura storica e scientifica disponibile ad oggi.

In questa fase è stato predisposto un quadro complessivo sufficientemente completo ed esauriente delle caratteristiche fisiche dell'area d'intervento in rapporto allo specifico livello progettuale.

2.1 Inquadramento geografico e geologico

La piana dell'Arno si prolunga verso NordOvest nella piana Versiliese a costituire quello che viene indicato come *Bacino Pisano-Versiliese*, impostatosi all'interno di una depressione tettonica subsidente sviluppata a partire dalla fine del *Miocene superiore (Tortoniano Sup. – Messiniano Inf.)* per l'attivazione di faglie dirette a geometria *listrica*, le quali si mantennero attive finì almeno a tutto il *Pleistocene inferiore (DELLA ROCCA et alii, 1987)*

La piana attuale e i depositi più superficiali che la colmano, di età Olocenica, si sono venuti formando a seguito del progressivo accumulo dei sedimenti trasportati verso il mare dal fiume Arno e dal fiume Serchio. Il forte spessore dei depositi recenti è il prodotto del *sovralluvionamento* indotto dallo sbarramento a mare del sistema deltizio dell'Arno, dei lidi e delle dune litorali che risultavano rialzati rispetto alla piana retrostante, sia per l'effetto della subsidenza della piana sia per il progressivo innalzamento del livello del mare iniziato a partire dalla fine dell'ultima glaciazione del *Würm III (Trasgressione Flandriana o Versiliana)*.

Da un punto di vista geomorfologico la fascia più esterna della piana dell'Arno costituisce una estesa area di *transizione* tra l'*ambiente marino* dominato dai processi e dalle dinamiche del moto ondoso e l'*ambiente continentale alluvionale* caratterizzato da processi morfogenetici completamente diversi.

Infatti, mentre l'assetto geomorfologico della pianura alluvionale retrostante e le relative caratteristiche sedimentologiche dei depositi presenti sono il prodotto della dinamica fluviale che

determina la creazione di ambienti di esondazione prossimale, caratterizzati da depositi sabbiosi, e distali, caratterizzati da depositi limoso-palustri, la fascia costiera rappresenta il prodotto della interazione sia di processi tipicamente continentali sia di processi marini. Le forme riconoscibili dalle foto aeree o dall'esame della cartografia di dettaglio a grande scala ed i caratteri tessiturali e granulometrici depositi relativi sono l'espressione dei processi e dei complessi equilibri propri di questo particolare ambiente dove hanno operato ed operano tutt'ora dinamiche marine e continentali interagenti in maniera sinergica od antagonista.

Il MAZZANTI R. (1994) definisce tale settore posto tra la linea di riva e le alluvioni continentali retrostanti di *transizione*, attribuendo i depositi a composizione prevalentemente sabbioso-limosa ad un *sistema deposizionale* sviluppatosi a partire dal *Pleistocene sup.* e caratterizzato dalla presenza di sistemi *lido-duna* e di sistemi *laguna-padule*.

L'ampiezza media di questa fascia di transizione risulta essere di circa 4 Km e raggiunge la massima estensione in corrispondenza dell'apparato deltizio del Fiume Arno dove si protende verso l'interno fino ad una distanza di 7 km dalla costa.

I sedimenti sono caratterizzati, come detto, da una composizione variabile da *sabbioso-limosa*, in corrispondenza degli ambienti di spiaggia attuale, dei lidi e delle dune, a *limoso-argillosa e torbosa*, presso le lagune e i paduli antichi e recenti dove sono presenti depositi di origine alluvionale-palustre od eolici e di colmata, con frequenti alternanze o passaggi laterali dall'uno all'altro, spesso per *eteropia*.

Verso l'interno i depositi costieri passano a sedimenti esclusivamente *continentali* tipici di un ambiente francamente *alluvionale* della piana pisana.

2.2 Geomorfologia

Da un punto di vista geomorfologico l'elemento caratterizzante questo tratto di costa è rappresentato dall'apparato deltizio dell'Arno formatosi per progressivo accumulo dei sedimenti trasportati dal fiume al mare.

Il delta e la fascia costiera del litorale sono caratterizzati da una notevole variabilità di ambienti, pur se profondamente modificati nel corso delle varie epoche storiche dagli interventi antropici connessi all'utilizzo del territorio. E' comunque ancora possibile riconoscere, laddove l'espansione

urbanistica non ha mascherato il paesaggio naturale, gli originari elementi morfologici caratteristici del particolare contesto ambientale e morfodinamico cui sono legati e di cui sono espressione.

Tali elementi sono stati indicati nella *Carta degli elementi naturalistici e storici della Pianura Pisana e dei rilievi contermini* redatta da MAZZANTI R. *et alii* (1994) (Tav. 2) in cui gli Autori hanno indicato i principali elementi di *duna*, *tombolo* e *laguna* e la posizione della linea di costa in corrispondenza del lobo settentrionale dell'Arno al momento della sua posizione più avanzata raggiunta alla fine dell'800. Dall'analisi della carta risulta evidente la troncatura erosiva dei lidi e degli apparati dunali situati in corrispondenza del lobo settentrionale della foce del fiume alla data del 1994, a conferma del forte arretramento subito dalla linea di riva in questo tratto.

Tra gli elementi morfologici peculiari si possono distinguere corpi sabbiosi allungati, detti *lidi* o "*cotoni*", dotati di una limitata elevazione rispetto alla piana circostante, che corrispondono ad originarie *barre di spiaggia sottomarine*, emerse per l'alimentazione ricevuta dalle correnti di deriva litoranea e dal moto ondoso; le *dune* o "*tomboli*" sempre a composizione sabbiosa, caratterizzate da quote nettamente più elevate rispetto ai lidi potendo raggiungere fino a 6-8 m di altezza e che presentano una forma più irregolare con un andamento indipendente da quello della linea di riva in quanto vengono originate dall'azione del vento che le alimenta, modellandole incessantemente.

L'emersione delle barre comporta la delimitazione di un tratto di mare retrostante, che progressivamente tende a colmarsi per la deposizione del materiale proveniente dal fiume vicino o trasportato dal vento dalla barra antistante. In tali zone si venivano così creando delle aree palustri (*lame*) che tendevano progressivamente ad interrarsi: alcune di queste aree si sono conservate e costituiscono degli importanti specchi d'acqua in prossimità della costa che rivestono un rilevante carattere di pregio ambientale.

I *lidi* e le *lame* si presentano con un andamento allungato, tra loro parallelo, e sono disposti secondo quella che era la direzione della linea di riva al momento della relativa formazione. Tale *trend* ben evidente nelle riprese aeree risulta marcato dalla disposizione della vegetazione che ne evidenzia l'assetto. In alcuni casi però lo sviluppo delle dune eoliche ha saldato mascherandoli i gruppi di lidi e barre contigui che ora non sono più riconoscibili.

I principali apparati dunali presenti (*foredune*), pur risultando stabilizzati da una copertura vegetale arbustiva ed erbacea che li protegge dall'azione erosiva del vento (*deflazione*), appaiono in evidente fase erosiva. L'arretramento della linea di riva li sta infatti esponendo all'attacco del moto ondoso

che erode al piede le scarpate a mare e determina il progressivo smantellamento delle dune.

Da un punto di vista altimetrico l'area risulta complessivamente pianeggiante o caratterizzata da blande ondulazioni legate alla presenza dei lidi e delle dune antiche e recenti.

Le quote medie risultano prossime al livello marino (0,4/0,6 m s.l.m.m.) nel tratto compreso tra la località del Gombo e l'Arno, dove sono presenti alcune depressioni palustri e di colmata denominate Lame delle Gelosie e Lame di Fuori, mentre nel tratto a Nord della residenza del Gombo fino al Fiume Serchio risultano mediamente più elevate risultando comprese tra 1,0/2,5 m.

Le quote maggiori si osservano in corrispondenza di alcuni estesi e ben conservati apparati dunali presenti in prossimità della foce del Fiume Morto Vecchio, a Sud di questo, la cui sommità raggiunge i 7,0/8,0 m s.l.m.m.. Altri apparati dunali sono presenti presso la foce del Fiume Morto Nuovo, sia in destra idrografica (8,2 m s.l.m.m.), di limitata estensione, sia in sinistra idrografica (4,0 m s.l.m.m.) maggiormente sviluppati ed estesi.

Per quanto riguarda le caratteristiche topografiche e batimetriche della spiaggia sommersa i dati disponibili dedotti dai rilievi eseguiti negli anni passati. In particolare vengono qui ripresi i lavori di PRANZINI (*Studio morfologico e sedimentologico del litorale pisano*”, Università degli Studi di Firenze 1998), di SAGLIOCCO (*Attuali tendenze evolutive e caratteristiche sedimentologiche del delta dell'Arno*”, 1994) e di PRANZINI (*Studio dell'evoluzione morfologica e della dinamica dei sedimenti*, 1998) a cui si rimanda per un esame più approfondito.

I profili topografici e batimetrici della spiaggia emersa e sommersa evidenziano un passaggio abbastanza rapido dalle quote delle parti emerse, poste in media a 0,6-2,6 m s.l.m.m., alla profondità di 4,0/5,0 m che viene raggiunta ad una distanza di 100/200 m dalla linea di riva. Il fondale risale in corrispondenza della barra sommersa per poi riapprofondirsi gradualmente fino a raggiungere i 10,0 m s.l.m.m., ad una distanza di 1,0/1,5 Km dalla riva.

A seguito della diminuzione dei quantitativi di materiale solido trasportati dal fiume alla bocca, il mare ha iniziato, a partire dalla fine della metà dell'800, il progressivo smantellamento dell'apparato deltizio dell'Arno del delta che ha registrato un più forte arretramento del lobo settentrionale (1200 m nel periodo 1878/1983) rispetto a quello meridionale dove lo spostamento della linea di riva è stato contenuto fin dal 1898 per la realizzazione delle prime scogliere di difesa (300 m nel periodo 1878/1983).

Tra le cause che stanno determinando l'erosione del litorale pisano il PRANZINI (2004) indica anche

la graduale subsidenza delle aree di pianura e l'innalzamento del livello del mare, due fattori che provocano l'accentuazione dei processi erosivi. I depositi della pianura pisana che come detto sono costituiti da forti spessori di sedimenti molto compressibili limoso-argillosi ed anche torbosi, i quali sono soggetti a progressiva compattazione per effetto della consolidazione indotta dai carichi litostatici, dalle variazioni dei livelli piezometrici per effetto degli emungimenti o dai carichi antropici. Ciò determina il graduale abbassamento (*subsidenza*) delle terre emerse e dei fondali rispetto al livello medio del mare in quanto i dislivelli non vengono più compensati da nuovi apporti di materiale sedimentario. Ciò favorisce un incremento della intensità dei fenomeni erosivi lungo la fascia litorale anche a causa della perdita verso mare, oltre la profondità di base del moto ondoso, dei sedimenti movimentati nel processo di deriva litoranea, che vengono reintegrati da nuovi materiali mobilizzati dalla costa (PRANZINI, 2004), e quindi nelle zone costiere l'avanzamento del mare verso l'interno.

2.3 Idrografia ed idrogeologia

La situazione idrografica dell'area è caratterizzata dalla presenza di tre corpi idrici principali che da Nord a Sud sono: il Fiume Serchio, il Fiume Morto Nuovo ed il Fiume Arno. Ad essi si associa una fitta rete minore di canali e fossi che drenano le acque meteoriche superficiali convogliandole verso i collettori principali o direttamente in mare: tra essi si può comprendere il Fiume Morto Vecchio dotato attualmente di un ruolo secondario nel deflusso superficiale dell'area dopo la realizzazione del Fiume Morto Nuovo.

Il deflusso superficiale in questo settore marginale della piana è estremamente difficoltoso in conseguenza dei bassi gradienti topografici che la caratterizzano ($<1\%$) e per la vicinanza al mare che ostacola, soprattutto durante le mareggiate, lo sbocco finale delle acque.

Tutto ciò contribuisce alla creazione di zone di ristagno e di impaludamento, anche per l'effetto di sbarramento a mare prodotto dalle dune e dai depositi di spiaggia che risultano sopraelevati rispetto alla piana circostante, ed alla formazione di zone paludose nelle aree retrostanti la spiaggia emersa o di lame d'acqua a carattere temporaneo o stagionale, alimentate dagli apporti meteorici e dall'emergenza in superficie della falda freatica.

La falda si trova infatti a piccola profondità dal piano campagna, la cui quota media è posta in molti

tratti a 0,5 m dal livello medio mare, cosicché soprattutto nel periodo invernale a seguito di eventi meteorici prolungati ed intensi la piezometrica subisce delle oscillazioni indotte dall'alimentazione e l'innalzamento conseguente può essere tale da raggiungere la superficie topografica, dando luogo alla creazione di specchi d'acqua di emergenza.

Tali corpi idrici sono alimentati dalle acque meteoriche e superficiali che ristagnano accumulandosi nelle depressioni topografiche prive di uscita superficiale, dove l'infiltrazione in profondità è impedita oltre che dalla vicinanza della superficie piezometrica anche dalla presenza di sedimenti a bassa permeabilità, che divengono praticamente impermeabili per saturazione.

Da un punto di vista idrogeologico la potente successione sedimentaria della pianura alluvionale dell'Arno viene considerata come un *Acquifero Multistrato Confinato (AMC)* caratterizzato dalla presenza nei livelli più superficiali di depositi dotati di una *permeabilità per porosità* con grado variabile da *basso-molto basso*, in corrispondenza dei livelli più fini limoso argillosi, a cui sono sottoposti dei livelli a granulometria sabbioso-ghiaiosa a permeabilità *medio ed elevata*, dove si intestano i numerosi pozzi per consumo umano ed irriguo presenti nella piana.

I depositi più superficiali hanno uno spessore variabile da 20-50 m da p.c. e sono sede falde freatiche o leggermente in pressione scarsamente produttive per la bassa permeabilità e trasmissività che caratterizza questi livelli, i quali pertanto non rivestono nessun interesse pratico. Le falde sono caratterizzate da una elevata vulnerabilità per l'assenza di adeguata protezione nei confronti di potenziali agenti inquinanti.

L'*AMC* presenta una notevole complessità idrogeologica con corpi acquiferi a continuità laterale variabile ed andamenti spesso lenticolari. Tipiche sono le frequenti alternanze ed interdigitazioni verticali che determinano la creazione di una struttura idrogeologica difficilmente ben definibile, anche a causa del limitato numero di verticali indagate. I dati provengono generalmente da stratigrafie di pozzo e da un limitato numero di sondaggi peraltro superficiali.

Sono comunque presenti livelli caratterizzati da una notevole continuità laterale ai quali si associa una maggiore permeabilità assoluta. Tali livelli sono generalmente indicati come *Primo acquifero artesiano in sabbia* e *Primo acquifero artesiano in ghiaia* i quali sono sede di falde in pressione che alimentano i numerosi pozzi presenti nella piana.

La ricarica di tale acquifero è rappresentata essenzialmente dalle acque meteoriche che si infiltrano nei rilievi dei Monti Pisani e nei coni di deiezione in parte sepolti, con il quale sono idraulicamente in continuità, e da quelle che si infiltrano nella zona degli *apparati dunari costieri* presso la fascia

del litorale, dove sono presenti sabbie a permeabilità primaria medio-alta in connessione idraulica con gli acquiferi sottostanti.

Un problema che appare importante sottolineare e che risulta connesso con il fenomeno dell'erosione costiera, l'arretramento della linea di riva e la demolizione degli apparati dunari, è rappresentato dall'ingressione salina nelle acque libere superficiali (lame e paduli) ed in quelle della falda freatica. Il fenomeno è favorito dalla mancanza di adeguate difese costiere naturali (dune), che sono state completamente asportate in diversi tratti del litorale: ciò consente alle acque del mare di penetrare in profondità verso l'entroterra durante le mareggiate e di ristagnarvi senza possibilità di rifluire. La presenza in superficie di depositi sabbiosi permeabili consente poi la successiva infiltrazione in profondità, venendo meno in tal modo il naturale effetto barriera creato per effetto della ricarica meteorica che determina un alto piezometrico con funzione di spartiacque sotterraneo che ostacola la penetrazione delle acque verso l'interno.

3. LA COSTA TOSCANA E LA DINAMICA COSTIERA DEL LITORALE PISANO

La Toscana presenta uno sviluppo costiero di lunghezza complessiva pari a 630 km.

Il litorale può essere suddiviso da un punto di vista morfologico in due distinte tipologie così descrivibili:

- ❖ *Coste basse e sabbiose con fondali a debole pendenza*
- ❖ *Coste alte e con fondali che raggiungono elevate profondità a breve distanza dalla riva (ad alta energia)*

Il litorale della provincia di Pisa ed in particolare il tratto compreso tra la foce dell'Arno e la foce del Serchio appartiene alla prima tipologia, trattandosi di una *costa bassa e sabbiosa con fondali che digradano verso il mare aperto in maniera graduale*.

Si tratta di un tipico esempio di *costa protetta a bassa energia*, secondo la *Classificazione Dinamica delle Coste* proposta da DAVIS (1980), posta in un mare, il Mar Mediterraneo, riparato dall'azione dei forti venti. Questo tipo di coste, presenti al margine di mari interni, vengono modellate da onde meno violente di quelle che si possono formare nei mari aperti in quanto il vento può soffiare su una superficie del mare limitata e per piccole distanze (*fetch*). Il *fetch* è pertanto limitato e non consente la formazione di onde di tempesta paragonabili a quelle che si originano negli oceani (*La forma delle coste* di PRANZINI, 2004).

L'assetto morfologico e la dinamica costiera dipendono dal clima meteo-marino locale da cui dipende l'intensità dei processi morfodinamici indotti e che regolano in particolare il bilancio sedimentario del sistema, il rapporto erosione/sedimentazione e quindi la progradazione o l'arretramento della linea di riva.

A parità di energia dei processi in gioco l'evoluzione delle coste sabbiose risulta più rapida rispetto a quella che si osserva in una costa costituita da litologie coerenti, anche se scarsamente cementate: la velocità e l'intensità delle trasformazioni indotte possono essere elevate ed il profilo della spiaggia può cambiare completamente anche durante una sola mareggiata.

Sulla base delle modalità di propagazione delle complesse dinamiche costiere si possono individuare dei limiti, materializzabili o meno con elementi del paesaggio naturale, che consentono di suddividere il litorale in settori denominati *Unità fisiografiche* le quali costituiscono dei *sistemi chiusi* e indipendenti per quanto riguarda i processi di erosione-trasporto-sedimentazione che hanno luogo al loro interno. Tali processi infatti non si sviluppano in maniera interdependente lungo tutto il litorale in quanto la presenza di limiti morfologici, naturali o artificiali, impediscono la propagazione tra i settori contigui delle perturbazioni negli equilibri dinamici che regolano l'evoluzione costiera.

La presenza di promontori, foci di fiumi, o di ostacoli artificiali, quali opere portuali o di difesa costiera, inibiscono la possibilità di interscambio sedimentario e di interazione con i domini adiacenti: le variazioni nei complessi equilibri che regolano l'apporto sedimentario e determinano la variazione nella morfologia del litorale si ripercuotono solamente all'interno della singola unità.

La costa della Toscana continentale viene generalmente suddivisa in 6 *Unità Fisiografiche*.

In particolare il tratto compreso tra le foci dei Fiumi Arno e Serchio appartiene a quella che viene indicata come *Unità fisiografica Foce del Magra – Livorno* (AIELLO *et alii*, 1976) che rappresenta la più settentrionale delle 6 Unità.

Questa può essere ulteriormente suddivisa in due *sub-unità fisiografiche*, una posta a Nord di Marina di Pietrasanta ed una posta a Sud, caratterizzate da opposte direzioni del trasporto sedimentario litoraneo (*drift*).

I principali fiumi che sfociano nel tratto di litorale compreso tra la località di Bocca di Magra e Livorno e che alimentano la deriva litoranea sono:

- il Fiume Magra che presenta una lunghezza di 62 Km, ha un bacino con una superficie di 1693 Km² e presenta un apporto solido pari a 632×10^3 T/anno (CAVAZZA, 1984)
- il Fiume Serchio che presenta una lunghezza di 89 Km, ha un bacino con una superficie di 1408 Km² e presenta un apporto solido pari a 23×10^3 T/anno (CAVAZZA, 1984)
- il Fiume Arno che ne rappresenta il principale corpo idrico, ha una lunghezza di 241 Km, ha un bacino con una superficie di 8228 Km² e presenta un apporto solido pari a 1524×10^3 T/anno (CAVAZZA, 1984).

Il flusso sedimentario è stato studiato su base morfologica e granulometrica (AIELLO *et alii*, 1976) e su base petrografia (GANDOLFI E PAGANELLI, 1975) o sulla base dell'energia del moto ondoso

(AMINTI *et alii* (1998) per il tratto tra Bocca di Magra e Viareggio e da NOLIE FRANCO (1989) e DE FILIPPI (1998) per il litorale pisano).

Gli studi effettuati hanno stabilito che il senso di trasporto dei materiali immessi alle foci dei fiumi è rivolto verso SudEst nel tratto compreso tra Bocca di Magra e Marina di Pietrasanta, mentre nel tratto compreso tra Marina di Pietrasanta e Bocca d'Arno (orientato circa NordSud) la direzione di trasporto dei sedimenti provenienti dai fiumi Arno e Serchio, e a Sud di questo del solo Arno, è rivolta verso NordOvest.

Nel tratto di litorale compreso tra Forte dei Marmi e Marina di Pietrasanta esisterebbe poi una zona di convergenza dei due *drift* litoranei la cui posizione non si mantiene stabile ma varia in relazione alle condizioni meteo-marine (CIPRIANI *et alii*, 2001).

A Sud della foce del Fiume Arno infine la direzione della deriva litoranea cambia nuovamente orientandosi verso Sud, verso Livorno, a causa degli effetti combinati indotti dalla rotazione della costa presso Marina di Pisa (NordNordOvest-SudSudest 340-160°N), dal maggiore effetto prodotto sul moto ondoso dal vento di *Maestrale* e per la presenza delle Secche della Meloria che determinano la rifrazione del moto ondoso incidente sul litorale.

Secondo quanto emerso da uno studio statistico del regime anemometrico eseguito alcuni anni fa, basato sui dati registrati alla Stazione della Gorgona, le maggiori frequenze ed intensità dei venti che interessano il litorale pisano provengono dai settori NordOvest e SudEst (orientamento N240°), con prevalenza dal settore Ovest.

La variazione relativa della orientazione del litorale rispetto alla principale direzione da cui spirano i venti principali determina un diverso angolo di incidenza del moto ondoso prodotto, cui consegue una diversa direzione della deriva litoranea dei sedimenti.

I fronti d'onda si muovono verso la costa formando un certo angolo con essa, e quando il battente idrico si riduce subiscono progressivamente la *rifrazione* per effetto dell'attrito prodotto dal fondale che tende a parallelizzare le onde alla riva. Normalmente però i fronti d'onda mantengono un certo angolo con la linea di riva anche al momento del frangimento.

La turbolenza prodotta determina così uno spostamento di energia e di materia (acqua e sedimento messo in sospensione) nella direzione della costa. Ogni frangimento, soprattutto durante le mareggiate, determina uno spostamento dei sedimenti della battigia con una componente risultante che produce lo spostamento lungo costa detto *drift litoraneo*. Si produce così una progressiva

migrazione dei sedimenti della spiaggia o immessi alla foce dei fiumi, verso Nord, a Nord della foce dell'Arno, e verso Sud a Sud di Marina di Pisa, la quale determina l'erosione/arretramento o la sedimentazione/progradazione a seconda che il bilancio complessivo per il tratto considerato risulti negativo o positivo.

4. EVOLUZIONE STORICA DEL DELTA DELL'ARNO E DEL LITORALE PISANO

Il delta dell'Arno ha raggiunto il suo massimo sviluppo al termine di una prolungata e intensa fase di progradazione durata circa 2000 anni, pur con ritmi diversi e brevi fasi erosive, e culminata alla fine metà del 1800 (MAZZANTI E PASQUINUCCI, 1983; PRANZINI, 2001; CIPRIANI *et alii*, 2001). Gli effetti positivi indotti da questa tendenza generale alimentata dalla dinamica fluviale ha determinato il concomitante avanzamento della linea di riva dei litorali adiacenti che alla fine del periodo hanno raggiunto la posizione più avanzata. L'inizio di questa fase, caratterizzata da un fortissimo apporto sedimentario, viene collocata nel VI° sec A.C. quando prende avvio l'intenso sfruttamento del territorio da parte dell'uomo che opera il graduale disboscamento dei territori del bacino idrografico (PRANZINI, 1994).

Gli Autori attribuiscono alla sola pressione antropica sul territorio la causa di questa fase evolutiva che si colloca in un periodo di generale risalita del livello del mare, iniziato dopo il culmine dell'ultima glaciazione *Würmiana* datata 22.000/18.000 anni B.P. e che perdurò fino alla metà del 1800 (TONIOLO, 1927). In questo lungo periodo di tempo pari a circa 2000 anni, infatti, non si sono registrate significative variazioni climatiche tali da giustificare una intensificazione dei fenomeni erosivi capace di determinare un incremento nel trasporto fluviale pari a quello effettivamente riscontrato.

Il generale trend progradante presenta comunque continue oscillazioni, con avanzamenti e arretramenti dell'unghia del delta che riflettono la variazione dei quantitativi di materiale detritico trasportato alla foce. Tali oscillazioni sono direttamente conseguenti a variazioni nelle varie epoche storiche dello sviluppo delle attività economiche e delle forme di governo del territorio che hanno da sempre prodotto importanti cambiamenti nell'assetto del bacino idrografico ed in particolare

nella estensione delle superfici boscate da cui dipende l'intensità dei fenomeni erosivi.

L'apparato deltizio dell'Arno ha iniziato a svilupparsi e ad avanzare in modo significativo a partire dal 1406 da quando cioè si è verificato un marcato incremento dell'apporto sedimentario riscontrabile nella progressiva rotazione degli apparati dunali che si sono formati da quel momento in poi. Fino a quel momento infatti la crescita delle dune e della pianura procedeva in modo graduale ed uniforme, come si può verificare esaminandone la relativa disposizione nella fascia compresa tra San Piero a Grado, dove secondo DE STEFANI (1876) passava la linea di riva all'epoca romana, e la linea posta a 2 Km all'interno della costa. Le dune presentano un andamento rettilineo e parallelo al litorale. In seguito inizia un periodo di forte accrescimento del delta dell'Arno che determina la forte convergenza delle dune (DE STEFANI, 1876), con un tasso stimato di 8,65 m/anno indicato da PRANZINI (1983) come il più alto tasso mai registrato nell'era volgare. E' proprio tale variazione che determina la rotazione delle dune e la marcata convergenza indotta dal rapido avanzamento del lobo deltizio.

Alla fine della prima metà del 1800 il delta costituiva una cuspide pronunciata, molto avanzata verso il mare che non riusciva a rielaborare tutto il materiale immesso alla foce e che veniva così depositato presso la bocca (TONIOLO, 1927).

Nella seconda metà del 1800, conclusosi il trend progradante, inizia a delinearsi con chiarezza il processo opposto che determinerà l'arretramento del delta dell'Arno e del litorale pisano nel suo complesso e darà l'avvio al grave problema della erosione che ha visto catalizzare l'attenzione e gli studi di un numero sempre crescente di ricercatori (TONIOLO, 1910 e 1927; SAGGINI, 1966; Rapetti e Vittorini, 1974; FANUCCHI *et alii*, 1976; GANDOLFI E PAGANELLI, 1976; VITTORINI, 1977).

Gli Autori sono concordi nel ritenere che l'inversione di tendenza verificatasi nella seconda metà del 1800 e la conseguente modificazione del bilancio apporti/erosione, divenuto negativo, deve essere attribuito essenzialmente ad una diversa utilizzazione del suolo. A ciò hanno certamente contribuito anche le opere idrauliche che sono state progressivamente realizzate nei vari tratti dell'asta principale del fiume o dei suoi maggiori affluenti, così come le escavazioni in alveo i cui effetti si fanno sentire ancora oggi. Le sistemazioni idrauliche in particolare hanno determinato secondo TONGIORGI (1978) la rottura dell'equilibrio tra la subsidenza geologica e l'apporto di sedimenti da parte dei fiumi i quali non più in grado di divagare liberamente nella pianura, non sono più riusciti a compensare gli abbassamenti del suolo con i materiali depositati durante gli episodi di esondazione. A tutto ciò si deve infine aggiungere l'innalzamento del livello medio del mare

valutato al mareografo di Genova pari a 1,2 mm/anno (SALVIONI, 1957).

Il problema si manifesta in maniera evidente nella fascia costiera della pianura, dove il moto ondoso produce effetti sempre più intensi a causa della progressiva diminuzione dei dislivelli tra il piano campagna ed il livello medio mare.

Sono queste dunque le principali cause del fenomeno poiché gli Autori sono concordi nel ritenere che non si siano verificate variazioni climatiche tali da giustificare le modificazioni osservate da 2000 anni fa ad oggi (RAPETTI E VITTORINI, 1974; MEINI, MEUCCI E VITTORINI, 1979) né all'epoca in cui la nuova tendenza ha iniziato a manifestarsi sono state realizzate opere marittime in grado di determinare significative alterazioni nel trasporto litoraneo tali da innescare i processi erosivi osservati.

Il progressivo attacco al delta da parte del moto ondoso si manifesta subito nei settori più avanzati verso mare e quindi maggiormente esposti della cuspide. Il materiale rimosso dalle zone in erosione va ad alimentare le parti laterali del delta, più arretrate e quindi meglio protette, che continuano a rimanere in avanzamento, così come i litorali adiacenti dove si accumulano i sedimenti mobilizzati. Il modello evolutivo è in accordo con quanto proposto da PRANZINI (1989) per spiegare lo sviluppo regressivo degli apparati deltizi in fase di arretramento erosivo.

Tale fenomeno è caratterizzato fin da subito da una rapida evoluzione, tanto che già nel 1878 la cartografia IGM mostra una posizione più arretrata della linea di riva del delta rispetto a quella assunta nel periodo precedente, anche se a quell'epoca il cambiamento di tendenza non è ancora chiaramente delineato. Nella successiva edizione del 1920 la parte più avanzata del lobo destro risulta completamente asportata e la linea di riva risulta arretrata di ben 600 m (PRANZINI, 1998).

Il tasso di arretramento della linea di riva presso Bocca d'Arno è stimato in 15 m/anno nel periodo 1878/1920 e tende ad aumentare nel corso del 1900 (PRANZINI E SAGLIOCCO, 1994) con un arretramento di 100 m nel periodo 1920/1928 e di 170 m nel decennio successivo.

Esiste quindi un certo ritardo temporale tra il momento in cui inizia l'erosione nella parte frontale e più avanzata del delta e quello in cui tale fenomeno si manifesta nelle sue parti laterali che permangono in avanzamento (PRANZINI, 1983).

Inizialmente sono infatti le parti del delta più prossime alla foce a risentire dell'erosione, i cui materiali mobilizzati vanno ad alimentare i settori posti lateralmente sia a Nord che a Sud, che permangono in avanzamento. Con il proseguire del fenomeno si assiste al progressivo spostamento

laterale, verso Nord e verso Sud, del *punto di equilibrio* tra i settori del litorale in erosione/arretramento e quelli in sedimentazione/avanzamento. Contemporaneamente si estende gradualmente il tratto del litorale in erosione che per il settore a Nord della foce dell'Arno era circa 1,5 Km nel 1920 (PRANZINI, 1998), passa a 2 Km nel 1928 ed a 4 Km nel 1939. Dal 1954 in poi tutto il tratto di litorale dalla foce dell'Arno fino alla foce del Fiume Morto Vecchio risulta in erosione (PRANZINI, 1983).

Attualmente a Nord dell'Arno la fascia di litorale in erosione si estende per 12 Km, dalla foce fino al Fiume Serchio che ha raggiunto nel 1985, in quanto questo tratto è privo di opere di difesa del litorale analoghe a quelle realizzate di fronte a Marina di Pisa (PRANZINI E SAGLIOCCO, 1994).

L'arretramento complessivo della spiaggia tra la foce dell'Arno ed il Gombo nel periodo 1938/1997 è pari a 455/465 m con un tasso medio di 10 m/anno (CIPRIANI *et alii*, 2001).

5. SINTESI DEI PRINCIPALI STUDI RELATIVI ALL'EVOLUZIONE DEL DELTA DELL'ARNO E DEL LITORALE PISANO

A partire dalla fine del '800, da quando hanno iniziato a delinearsi con chiarezza i primi segnali della fase di arretramento del litorale, sempre più numerosi sono stati gli Autori che hanno affrontato la problematica nel tentativo di comprendere le cause del processo (TONIOLO, 1910 e 1927; ALBANI, 1940; RAPETTI E VITTORINI, 1974; PRANZINI E SAGLIOCCO, 1994, ecc.). Le ricerche effettuate hanno ricostruito la posizione della linea di riva nelle varie epoche, ne hanno definito i tassi di spostamento medi indicandone inoltre le tendenze evolutive.

I dati di riferimento per il primo periodo (1880/1960), in assenza di misurazioni dirette, sono stati dedotti dalla documentazione storica disponibile e dalla cartografia prodotta a partire dal 1878 dall'Istituto Geografico ed Idrografico Militare.

Le ricerche si limitavano esclusivamente alla parte emersa della spiaggia, tralasciando i fondali antistanti il litorale. La stretta connessione esistente tra l'evoluzione della linea di riva e quella dei fondali è stata evidenziata in uno studio di RAPETTI E VITTORINI (1974) che hanno correlato gli

spostamenti della linea di riva nel periodo 1881/1966 con l'arretramento delle isobate di -5 m e -10 m.

Lo studio del problema dell'erosione del delta dell'Arno e del litorale pisano è stato successivamente ripreso e sviluppato da PRANZINI (1983) in un lavoro in cui l'Autore ha provveduto ad integrare i dati fino a quel momento raccolti per la parte emersa della costa con i dati batimetrici del fondale disponibili fin dal 1881 con i primi rilievi effettuati dall'Istituto Idrografico della Marina Militare, in modo da correlare gli spostamenti subiti dalla linea di riva con le modificazioni batimetriche del fondale.

In molti casi si tratta di indicazioni puramente qualitative del trend evolutivo del fenomeno in quanto i dati sono disponibili solo su base cartacea e la sovrapposizione tra i vari dati temporali è resa incerta dalla mancanza di riferimenti univoci. L'entità dei tassi di spostamento però è tale da poter ricavare comunque importanti indicazioni qualitative, in quanto gli errori di indeterminazione sono ben inferiori alle grandezze in gioco.

Lo studio della evoluzione della linea di riva e dei fondali e la loro stretta correlazione evolutiva è stato successivamente ripreso da PRANZINI E SAGLIOCCO (1994) mediante l'esecuzione di rilievi batimetrici e della linea di riva. L'analisi dei profili ottenuti conferma l'osservazione fatta dagli Autori secondo i quali l'erosione della spiaggia emersa determina l'arretramento della linea di riva e procede di pari passo con lo spostamento dei fondali antistanti. Gli Autori hanno riscontrato inoltre riscontrato che i maggiori spostamenti del fondale si concentrano nella zona compresa entro l'isobata dei 5 m e che anche le barre sommerse subiscono un analogo arretramento.

Il bilancio sedimentario del tratto di litorale a Nord di Bocca d'Arno presenta una perdita complessiva di sedimenti, mobilizzato dalla deriva litoranea e non compensato da nuovi apporti dall'Arno, che viene stimata pari 1.800.000 mc nel periodo 1983/1993 (PRANZINI E SAGLIOCCO, 1994).

I più recenti profili batimetrici e topografici al momento disponibili sono quelli relativi ai rilievi eseguiti negli anni 1993 e 1997 nell'ambito dello *Studio morfologico e sedimentologico del litorale pisano* (1998) redatto dal Prof. Pranzini del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze per il tratto di litorale compreso tra il Fiume Morto Nuovo e Tirrenia. Il tratto di litorale indagato è quello compreso tra il Fiume Morto Nuovo e la foce dell'Arno.

A supporto del progetto in corso di elaborazione è prevista l'esecuzione di una nuova campagna di rilievi topo-batimetrici per tutto il tratto del litorale in oggetto, che consentirà la definizione di un

quadro aggiornato del litorale. L'incarico è al momento in fase di affidamento.

I profili relativi alle due epoche 1993 e 1997 mostrano per i vari tratti del litorale la morfologia dalla spiaggia emersa fino alla profondità di 10 m dal livello del mare. Il confronto relativo (sovrapposto) consente inoltre di precisare il trend evolutivo di arretramento o progradazione dei vari transetti (Tavv 3 e 4₁, 4₂, 4₃, 4₄).

Per il periodo 1993/1997 la linea di riva si presenta relativamente stabile nel tratto compreso tra la Foce del Fiume Morto e la residenza del Gombo, con arretramenti variabili da +3,14 m nel tratto a Sud a -6,45 m a Nord, mentre nella parte tra il Gombo e la foce dell'Arno è riscontrabile uno spostamento della linea di riva variabile da -62,94 m a Sud presso Bocca d'Arno, a +5,59 m presso le scogliere del Gombo.

Il profilo topografico appare maggiormente articolato nel tratto compreso tra la linea di riva e la barra sommersa, posta a distanza variabile da 200 a 300 m dalla battigia, dove maggiore è l'azione del moto ondoso per effetto della turbolenza indotta dal frangimento delle onde. In questo tratto sono presenti generalmente 1, talvolta 2, depressioni allungate parallelamente alla costa, dove il fondale si approfondisce rapidamente fino a raggiungere i 4/5 m.

In corrispondenza della barra il fondale risale nuovamente fino alla profondità di -1,8/3,0 m s.l.m.m. per poi riabbassarsi, prima rapidamente, fino al piede esterno della barra (-3,6/5,0 m s.l.m.m.) e poi gradualmente fino a raggiungere la batimetrica di -10,0 m s.l.m.m. ad oltre 1 Km dalla linea di riva.

Dal confronto dei profili eseguiti nelle due epoche successive (Tavv 4₁ 4₂ 4₃ 4₄) appare evidente l'arretramento della barra che risulta più vicina alla linea di riva in quasi tutte le trasversali alla data del rilievo (1997). Gli spostamenti misurati possono variare da alcune decine di metri fino a quasi 150 m in corrispondenza delle sezioni mediane nel tratto di litorale compreso tra la località del Gombo e Bocca d'Arno e potrebbero essere dovuti ad un diverso periodo di esecuzione dei rilievi nel corso dell'anno. La barra mostra infatti una certa mobilità connessa alle variazioni stagionali dell'intensità del moto ondoso che determinano un diverso assetto del profilo di spiaggia nei vari periodi dell'anno. La barra si trova a maggiore distanza dalla linea di riva durante la stagione invernale e si avvicina ad essa, fino talvolta a saldarsi alla spiaggia emersa, durante la stagione estiva.

6. I SEDIMENTI DEL LITORALE: CARATTERISTICHE GRANULOMETRICHE

Il moto ondoso determina un'incessante rielaborazione dei depositi della spiaggia emersa e sommersa, fino alla profondità interessata dall'azione morfodinamica delle onde (*profondità di chiusura del profilo batimetrico*), e dei sedimenti immessi alla foce dei fiumi. Le frazioni più fini vengono prese in sospensione e sono allontanate verso il largo mentre quelle più grossolane subiscono un trasporto lungo costa secondo la direzione del *drift* litoraneo. I depositi che ne derivano si presentano pertanto puliti, privi della frazione più fine, e risultano caratterizzati da una marcata selezione granulometrica sia in senso longitudinale che trasversale alla linea di riva.

La composizione mineralogico-petrografica dei granuli dipende poi dalle litologie affioranti nel bacino idrografico da cui riceve alimentazione il litorale. La granulometria dei depositi di spiaggia emersa e sommersa e la distribuzione percentuale delle varie frazioni dimensionali dipende dal grado di elaborazione subito dal deposito fino al momento in cui arriva alla foce del fiume o per effetto del moto ondoso.

La conoscenza di questi parametri riferiti inoltre alla posizione planimetrica della linea di riva ed alla batimetria del punto di prelievo fornisce una chiave di interpretazione utile per poter comprendere le dinamiche del litorale e dei processi che vi operano.

Tali parametri sono infatti strettamente connessi ai valori energetici dei processi morfodinamici che caratterizzano il litorale, con particolare riferimento alle caratteristiche ed al clima del moto ondoso che controlla il bilancio sedimentario di ciascun settore della costa e la direzione del trasporto litoraneo.

Un primo inquadramento delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti presenti nel tratto di litorale compreso tra la foce del Fiume Arno e la foce del Fiume Serchio può essere ricostruito sulla base dei risultati di analisi precedenti realizzate nel corso dei vari studi pregressi ed a cui si può fare riferimento per un preliminare inquadramento e per la programmazione dei successivi approfondimenti necessari.

In particolare si farà riferimento alle indicazioni ed alle valutazioni contenute nello “*Studio morfologico e sedimentologico del litorale pisano*” redatto da PRANZINI (1998) del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze, al lavoro di PRANZINI E SAGLIOCCO

(1994) “Attuali tendenze evolutive e caratteristiche sedimentologiche del delta dell’Arno” ed allo “Studio dell’evoluzione morfologica e della dinamica dei sedimenti” di PRANZINI (1998).

Mediante l’esecuzione di campionamenti del sedimento della spiaggia emersa e sommersa effettuati in corrispondenza delle sezioni topografiche e batimetriche gli Autori hanno precisato la composizione granulometrica del sedimento del litorale, verificando inoltre la distribuzione delle varie frazioni granulometriche in relazione alla distanza dalla linea di riva, alla profondità del fondale ed alle particolari condizioni ambientali (energia e direzione prevalente del moto ondoso, energia del vento).

Da un punto di vista granulometrico i sedimenti presenti nel tratto di litorale tra la foce del Fiume Arno e la foce del Fiume Serchio ricadono nel campo delle *Sabbie grossolane/Sabbie molto fini* secondo la *Classificazione dimensionale* proposta da KRUMBEIN W.C. (1934). La dimensione dei granuli varia da $0,55 \phi$ e $3,45 \phi$ mentre le relative dimensioni medie M_z risultano comprese nell’intervallo $1,0 \phi$ e $2,0 \phi$. In vicinanza delle opere di difesa del Gombo e presso la foce del Fiume Serchio si trovano anche *Sabbie grossolane*, con dimensioni comprese tra $0,0 \phi$ e $1,0 \phi$. (PRANZINI, 1998).

Per quanto riguarda i sedimenti presenti sulla battigia le dimensioni medie M_z lungo la riva risultano comprese nell’intervallo $0,8 \phi$ e $2,0 \phi$, mentre i sedimenti fini ($2,0 \phi < M_z < 3,0 \phi$) si trovano già a partire dalla profondità di -2 m a Nord di Bocca d’Arno (CIPRIANI *et alii*, 2001).

Le dimensioni medie dei materiali immessi presso la foce dell’Arno o provenienti dalla demolizione del suo apparato deltizio hanno composizione dimensionale variabile da $0,0 \phi$ e $1,0 \phi$.

Le analisi statistiche delle determinazioni granulometriche evidenziano inoltre un progressivo incremento verso Nord delle dimensioni medie del sedimento M_z legate ad una variazione dell’energia del moto ondoso nella stessa direzione (BALDINI *et alii*, 1983; PRANZINI, 1998). Tale variazione viene imputata alla maggiore esposizione del litorale al moto ondoso generato dai mari meridionali dominanti (BALDINI *et alii*, 1983; PRANZINI, 1998).

Esiste inoltre una evidente relazione tra le dimensioni medie e la profondità di campionamento del sedimento di fondo, con i sedimenti più grossolani ubicati sulla battigia e quelli progressivamente più fini che si incontrano allontanandosi dalla linea di riva, anche se tale variazione risulta non regolare per la presenza delle barre sommerse, poste ad una profondità variabile da 2 e 6 m,

costituite da materiale grossolano. Inoltre i sedimenti con dimensioni inferiori a 3ϕ si trovano solamente a partire dalla profondità di -10 m (PRANZINI, 1998).

La frazione fine, con dimensioni inferiori a 4ϕ , è presente in scarsa quantità, spesso inferiore ad 1%. I sedimenti si presentano pertanto puliti e ben selezionati dall'azione del moto ondoso, che risulta in grado di allontanare verso il largo la frazione più fine scaricata presso le foci dai fiumi.

Infine la classazione media σ_1 secondo la scala proposta da FOLK E WARD (1957) risulta variabile da *molto ben classati* ($\sigma_1 < 0,35 \phi$) a *moderatamente ben classati* ($0,5 \phi < \sigma_1 < 0,71 \phi$), mentre la classazione media dei sedimenti di battigia è compresa tra il *molto ben classato* ed il *moderatamente ben classato* ($0,25 \phi < \sigma_1 < 0,71 \phi$), in relazione alle elevate condizioni energetiche che caratterizzano la battigia (CIPRIANI *et alii*, 2001).

Nella successiva fase di elaborazione del progetto definitivo saranno presi in considerazione i risultati delle specifiche campagne di indagine, campionamento e di analisi granulometriche e petrografiche (queste ultime in corso di affidamento al Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Pisa), che sono state già programmate ed il cui avvio è previsto prima della stagione estiva 2005.

7. PRECEDENTI INTERVENTI DI DIFESA DEL LITORALE

Al fine di contrastare il fenomeno erosivo che determina il progressivo arretramento del litorale nel tratto compreso tra Bocca d'Arno e la foce del Fiume Serchio, a partire dai primi decenni del 1900 sono stati realizzati alcuni interventi che dovevano conseguire la stabilizzazione della linea di riva. Tali interventi hanno ottenuto però risultati contraddittori limitandosi talvolta a spostare il problema nei settori posti *downdrift* rispetto alla direzione del trasporto litoraneo, ed aggravando in alcuni casi la situazione del litorale.

Il primo intervento di difesa attuato nel 1926 vede la costruzione del pennello in sponda destra della foce dell'Arno che fu previsto con lo scopo di impedire la chiusura della foce a seguito del forte

arretramento subito fino a quel momento dal lobo Nord rispetto a quello Sud, dove invece erano già state realizzate le prime opere di difesa dell'abitato Marina di Pisa. Il pennello ha però accentuato i fenomeni erosivi nel tratto di litorale immediatamente a Nord a causa della riflessione subita su di esso del moto ondoso di Maestrale-Ponente incidente (CIPRIANI *et alii*, 2001) e della deviazione verso il mare aperto dei sedimenti trasportati dall'Arno.

I fenomeni erosivi sono continuati con particolare intensità nel tratto a Sud della località del Gombo fino alla foce dell'Arno, tanto da indurre nel 1997 l'Amministrazione della Tenuta di San Rossore a predisporre un progetto per la difesa della fascia litoranea nota come "*Lame della gelosia*", che andava ad inserirsi in un più ampio piano di riassetto del litorale pisano elaborato dal Comune di Pisa. L'intervento, attuato negli anni 2000-2001, ha visto la realizzazione di nove pennelli di contenimento, di cui 4 in parte soffolti, aventi la funzione di intercettare il flusso sedimentario litoraneo e di contenere il materiale ghiaioso di ripascimento che è stato solo in parte collocato. L'intervento ha solo in parte conseguito i risultati sperati, riuscendo a stabilizzare la linea di riva, ma non ad intercettare i sedimenti provenienti dalla foce dell'Arno che vengono probabilmente deviati al largo dal pennello di destra della foce.

Presso la località del Gombo furono realizzate negli anni 1962/1968, a partire da Sud, cinque scogliere parallele a protezione del tratto di litorale prospiciente la Villa Presidenziale. L'effetto iniziale di tali opere fu limitato tanto che nel 1984 fu previsto il prolungamento delle 4 scogliere più meridionali e la concomitante riduzione dei varchi. Ciò provocò la rapida espansione della spiaggia retrostante che andò a saldarsi ad esse con la creazione di tomboli sabbiosi, i quali a loro volta produssero per un effetto "*pennello*" l'espansione della spiaggia *sopraflutto* con tassi di 1,1-2,5 m/anno e l'erosione di quella *sottoflutto* con tassi di 2,8-4,5 m/anno. Attualmente tale fenomeno risulta particolarmente accentuato, come si è potuto riscontrare anche a seguito dei recenti eventi meteo-marini che hanno determinato l'erosione e la scomparsa del tombolo a ridosso dell'ultima (in direzione Nordovest) scogliera a causa della diffrazione del moto ondoso e la formazione di una spiaggia fortemente falcata, a forma di spirale logaritmica, che si sta spostando progressivamente verso Sudest, in direzione della foce dell'Arno. I sedimenti erosi vengono trasportati, in direzione della deriva litoranea, verso la foce del Fiume Morto Nuovo dove avviene l'accumulo dei sedimenti e la progradazione della linea di riva (CIPRIANI *et alii*, 2001).

8. CONSIDERAZIONI SULL'INTERVENTO IN PROGETTO

L'intervento in oggetto interessa il tratto di litorale antistante la Villa Presidenziale del Gombo, che da tempo risulta interessato da rilevanti fenomeni erosivi nel tratto sottoflutto che hanno determinato e stanno tutt'ora causando un progressivo arretramento della linea di riva nel settore di spiaggia a Nord, dove si è formata una marcata falciatura in progressivo spostamento verso Sud.

In particolare si interverrà laddove i fenomeni di erosione si sono manifestati con particolare gravità nel corso del mese di ottobre, quando le mareggiate più violente hanno determinato l'erosione di un importante tratto della spiaggia e l'arretramento della linea di riva. I processi erosivi hanno causato inoltre danni anche alla rete di recinzione della Villa, provocando la caduta di alcuni sostegni.

Il presente progetto stralcio consiste, in sintesi, nella realizzazione di due pennelli trasversali alla linea di riva, nella ricostruzione di un breve tratto di duna fortemente eroso dagli ultimi eventi e nell'eventuale ripascimento con materiale sabbioso, la cui attuazione sarà possibile solo in relazione alla disponibilità di materiale idoneo proveniente presumibilmente da un contemporaneo intervento nella zona del Parco.

Il dettaglio riguardo le modalità di intervento ottimali per la ricostituzione e/o la stabilizzazione degli apparati dunali emergeranno da uno specifico studio predisposto in collaborazione con il Dipartimento di Scienze della Terra di Pisa. E' intenzione dell'Amministrazione provinciale procedere ad una sperimentazione di interventi di ripristino ad alta compatibilità ambientale, che prevedano il riutilizzo di materiali naturali piaggiati, particolarmente abbondanti nel tratto costiero in esame.

La progettazione esecutiva delle opere sarà basata sulla definizione aggiornata e completa delle caratteristiche del tratto di litorale in oggetto, al fine di precisare le tendenze evolutive delineate nei precedenti studi eseguiti ed in quelli in corso.

In particolare è in fase di predisposizione un modello matematico per il tratto di litorale in oggetto, che consentirà di prevedere sia l'evoluzione della linea di costa allo stato attuale, sia in riferimento ai diversi scenari progettuali possibili (ripascimenti morbidi o protetti) e sulla base del quale potranno essere definiti i dettagli esecutivi degli interventi previsti in relazione alle condizioni meteo-marine che caratterizzano il litorale.

Riguardo le opere strutturali, con il presente progetto si intende effettuare una sperimentazione in merito all'utilizzo di "geotubi" (tubi flessibili in polipropilene riempiti di sabbia ad alta resistenza sia alle sollecitazioni meccaniche che all'azione di agenti aggressivi qualisalastro, radiazioni UV) per la realizzazione delle porzioni *soffolte* dei pennelli o quale nucleo di scogliere emerse. Tali soluzioni, da sperimentare in relazione alle condizioni meteo-marine dei nostri paraggi, consentono di ridurre sensibilmente sia i tempi di realizzazione delle opere che l'utilizzo di materiale lapideo con conseguente minor impatto ambientale, oltre a consentire un significativo risparmio economico.

Per quanto riguarda il materiale necessario alla realizzazione dell'eventuale ripascimento in sabbia, al momento attuale si stima che i quantitativi occorrenti siano pari a circa 50.000 mc, la cui disponibilità è condizionata dall'attuazione di un intervento di riqualificazione ambientale in loc. Le Lame, di cui lo stesso Ente Parco è soggetto attuatore.

Nelle previsioni progettuali preliminari dell'intervento di difesa complessiva del litorale, si prevedeva di prelevare la sabbia occorrente nel tratto di litorale a Sud del porto di Viareggio (a Nord dell'intervento) dove gli arenili presentano un notevole accrescimento naturale, mediante il dragaggio e il trasporto via mare o via terra. Tale alternativa è tuttavia di ancor più incerta attuazione.

Ulteriore possibilità sarebbe quella di ricorrere a prelievi da cave sottomarine. Tale soluzione oltre ad avere un minore impatto ambientale garantirebbe costi di gestione per il prelievo ed il trasporto inferiori rispetto ad un prelievo da terra. La ricerca di cave sottomarine è in corso di predisposizione da parte della Regione Toscana, la quale ha al momento definito almeno due localizzazioni (*Massa 1 e Massa 2*) che potrebbero risultare idonee per ubicazione a coprire i fabbisogni sabbiosi dell'intervento complessivo di difesa. Prima di poter arrivare ad una fase operativa saranno però ancora necessari ulteriori approfondimenti conoscitivi. In ogni caso, in relazione ai quantitativi necessari per l'intervento in oggetto, tale modalità di reperimento della sabbia risulterebbe difficilmente attuabile se non in forma congiunta con altri ripascimenti.

Per quanto riguarda il materiale lapideo la scelta delle tipologie da impiegare dovrà essere basata sulla analisi delle relative caratteristiche fisico-meccaniche e mineralogico-petrografiche dei materiali disponibili nelle varie cave esistenti, al fine di verificarne l'idoneità all'impiego per cui verrà destinato. Una ricerca in tal senso è già stata condotta nell'ambito dei siti estrattivi presenti nelle Province di Pisa, Lucca, Livorno e Massa Carrara ed ha consentito di individuare le località idonee per qualità e quantità dei materiali presenti ad un impiego quale quello in progetto.

In relazione ai ridotti quantitativi necessari all'intervento si prevede di utilizzare il materiale disponibile nei *ravaneti* o proveniente dai quantitativi di "scarto" prodotti nel corso delle lavorazioni per l'estrazione di pietre ornamentali, previa valutazione della relativa idoneità ai requisiti tecnici che verranno stabiliti in apposito capitolato speciale. Il bacino estrattivo delle Alpi Apuane rappresenta una potenziale fonte di approvvigionamento dove sono disponibili quantitativi certamente superiori ai fabbisogni stimati per le necessità dell'intervento

9. CONCLUSIONI

Il presente elaborato è stato redatto con lo scopo di definire le caratteristiche geologico-geomorfologiche ed idrogeologiche che caratterizzano l'area di intervento, al fine della definizione delle problematiche che dovranno essere affrontate in specifico nella fase esecutiva.

Il livello di approfondimento e di dettaglio risulta conforme ai livelli di progettazione stabiliti dalla Legge 109/1994 "*Legge quadro in materia di lavori pubblici*" e dal relativo Regolamento di attuazione DPR 554/1999, agli artt. 25 e 27 del *Capo II - Titolo III*.

Alla luce del quadro conoscitivo circa le caratteristiche geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche dell'area in oggetto delineate nel presente documento, non sono stati rilevati elementi ostativi alla realizzazione dell'intervento in progetto che risulta pienamente compatibile, pur essendo necessari alcuni approfondimenti di studio conseguenti l'elaborazione dei risultati della campagna di indagine sedimentologica recentemente conclusa.

10. Riferimenti bibliografici

- Aiello E., Bartoloni C., Caputo C., D'Alessandro L., Fantucci F., Fierro G., Gnaccolini M., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Picazzo M., Pranzini E. (1976): *Il trasporto litoraneo lungo la costa toscana tra la foce del Fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina*. Boll. Soc. Geol. It. 94, 1519/1571.
- Cavazza S. (1984): *Regionalizzazione geomorfologica del trasporto solido in sospensione dei corsi d'acqua tra il Magra e l'Ombrone*. Atti Soc. Tosc. Sci Nat, Mem. Serie A 91, 119/132.
- Cipriani E., Ferri S., Iannotta P., Paolieri F., Pranzini E. (2001): *Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale*. Studi Costieri 2001-4, 119/156.
- Della Rocca B., Mazzanti R., Pranzini E. (1984): *Studio geomorfologico della Pianura di Pisa*. Geogr. Fis. Dianm. Quat. 10, 56-84.
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957): *Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters*. J. Sedim. Petrol., 27, 3/26.
- Mazzanti R. (1984): *Carta degli elementi naturalistici e storici della Pianura di Pisa e dei rilievi contermini*. Da "La Pianura di Pisa e i rilievi contermini: la natura e la storia" Memorie della Società Geografica Italiana Volume L.
- Noli A., Franco L. (1989): *L'evoluzione del litorale pisano: risultati di uno studio con impiego di modelli matematici*. Comune di Pisa.
- Pranzini E. (1983): *Studi di morfologia costiera: L'erosione del delta dell'Arno*. Quaderni del Museo di Storia Naturale di Livorno 4, 7/18.
- Pranzini E. (1989): *A model for cuspidate delta erosion*. Coastal Zone 89, 4345/4357.
- Pranzini E. e Sagliocco T. (1994): *Attuali tendenze evolutive e caratteristiche sedimentologiche del delta dell'Arno*. Da "L'evoluzione e la dinamica del litorale prospiciente i bacini dell'Arno e del Serchio e i problemi di erosione della costa" Aut. Di Bacino dell'Arno e del Serchio 3: 90/108.
- Pranzini E. (1998): *Studio morfologico e sedimentologico del litorale pisano*. Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra.

- Pranzini E. (1998): *Studio dell'evoluzione morfologica e della dinamica dei sedimenti*. Progetto definitivo per la protezione del litorale compreso fra la foce dell'Arno ed il Gombo. Regione Toscana
- Pranzini E. (2004): *La forma delle coste: geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali*. Zanichelli Editore.
- Rapetti F. e Vittorini S. (1974): *Osservazioni sulle variazioni dell'ala destra del delta dell'Arno*. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A 81, 25/88.
- Tongiorgi M. (1978): *La subsidenza nelle basse pianure dell'Arno e del Serchio: una prima valutazione quantitativa dei fenomeni osservati, in rapporto ai problemi della difesa del suolo*. Da "I problemi della subsidenza nella politica del territorio e della difesa del suolo" Comune di Pisa, Pisa 9/10 novembre 1978.
- Toniolo (1910): *Sulle variazioni di spiaggia a foce d'Arno (Marina di Pisa) dalla fine del sec. XVIII ai nostri giorni*. Tip. Municipale Pisa, pp. 94.
- Toniolo (1927): *Le variazioni storiche del litorale toscano tra l'Arno e la Magra*. Atti X Congr. Geogr. It., Milano, 314-330.

INQUADRAMENTO GENERALE

SCALA 1:50.000



INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO GENERALE

Tratto dalla *Carta degli elementi naturalistici e storici della Pianura di Pisa e dei rilievi contermini* di Mazzanti R. et alii

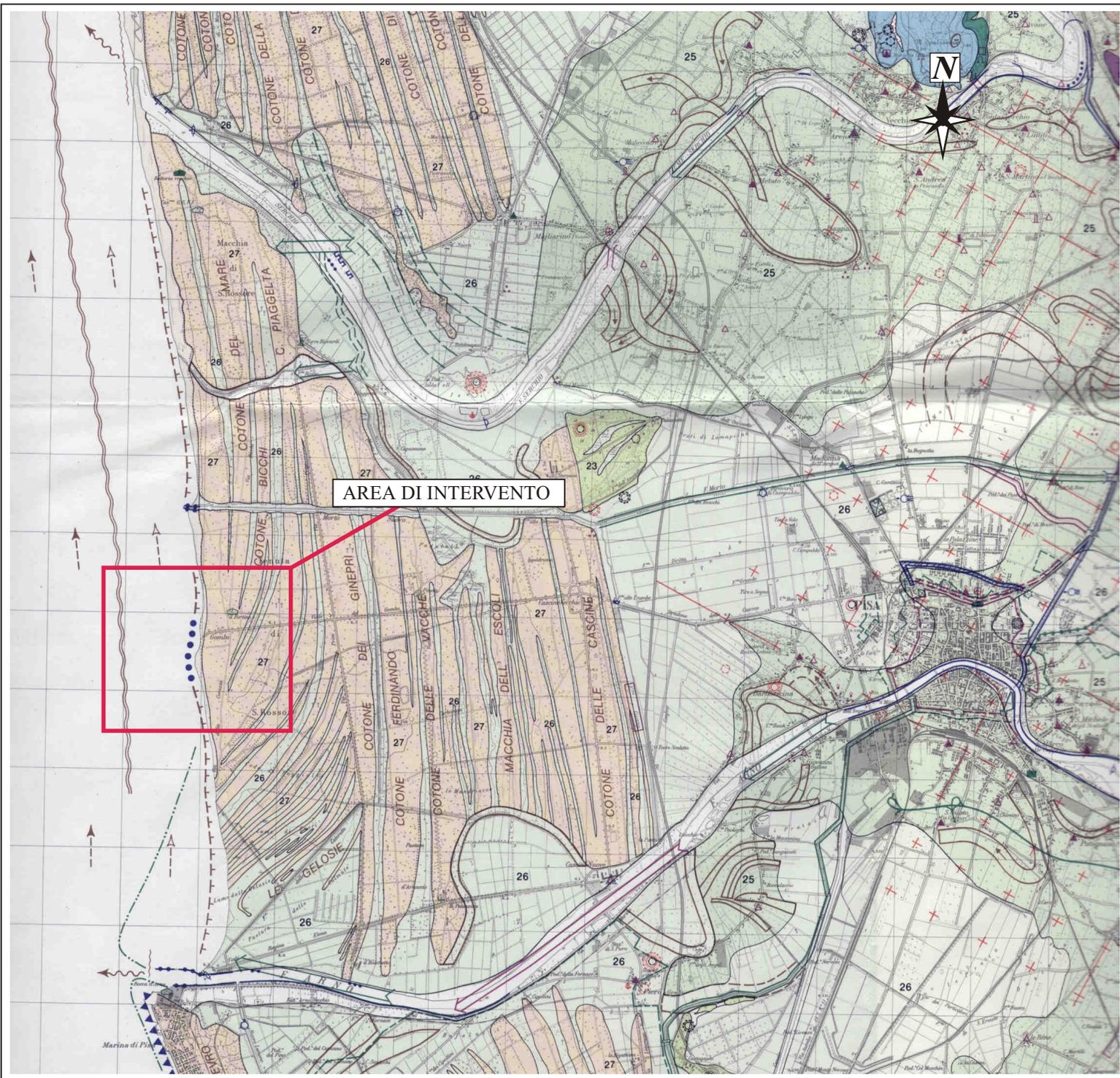
SCALA 1:50.000

MORFOLOGIA

- al largo } Verso del trasporto solido netto
lungo la riva }
- Serie di barre sottomarine
- Barra di foce fluviale
- prevalentemente grossolano (sabbia)
- prevalentemente fine (argilla) } Apporti solidi fluviali
- Spiaggia in avanzamento
- Spiaggia in arretramento
- certo } Alvei fluviali abbandonati
incerto }
- Paleovali sepolte, rilevati con immagini da satellite
- Orli di terrazzi (i dentelli sulle scarpate)
- Cava (abbandonata) in alveo
- Alveo artificiale non ancora segnalato nella base topografica
- Alveo ricoperto con volta
- Alveo armato in cemento
- Foci fluviali armate
- Litorale con opere di difesa longitudinali, emergenti, distaccate
- Litorale con opere di difesa miste, emergenti, longitudinali e trasversali
- Argine di contenimento lacustre
- Antica riva lacustre
- Antica riva lacustre
- Taglio fluviale artificiale
- Canale o fosso esistito o costruito in epoca moderna e non più esistente
- Canale o fosso costruito in epoca moderna e ancora esistente

GEOLOGIA

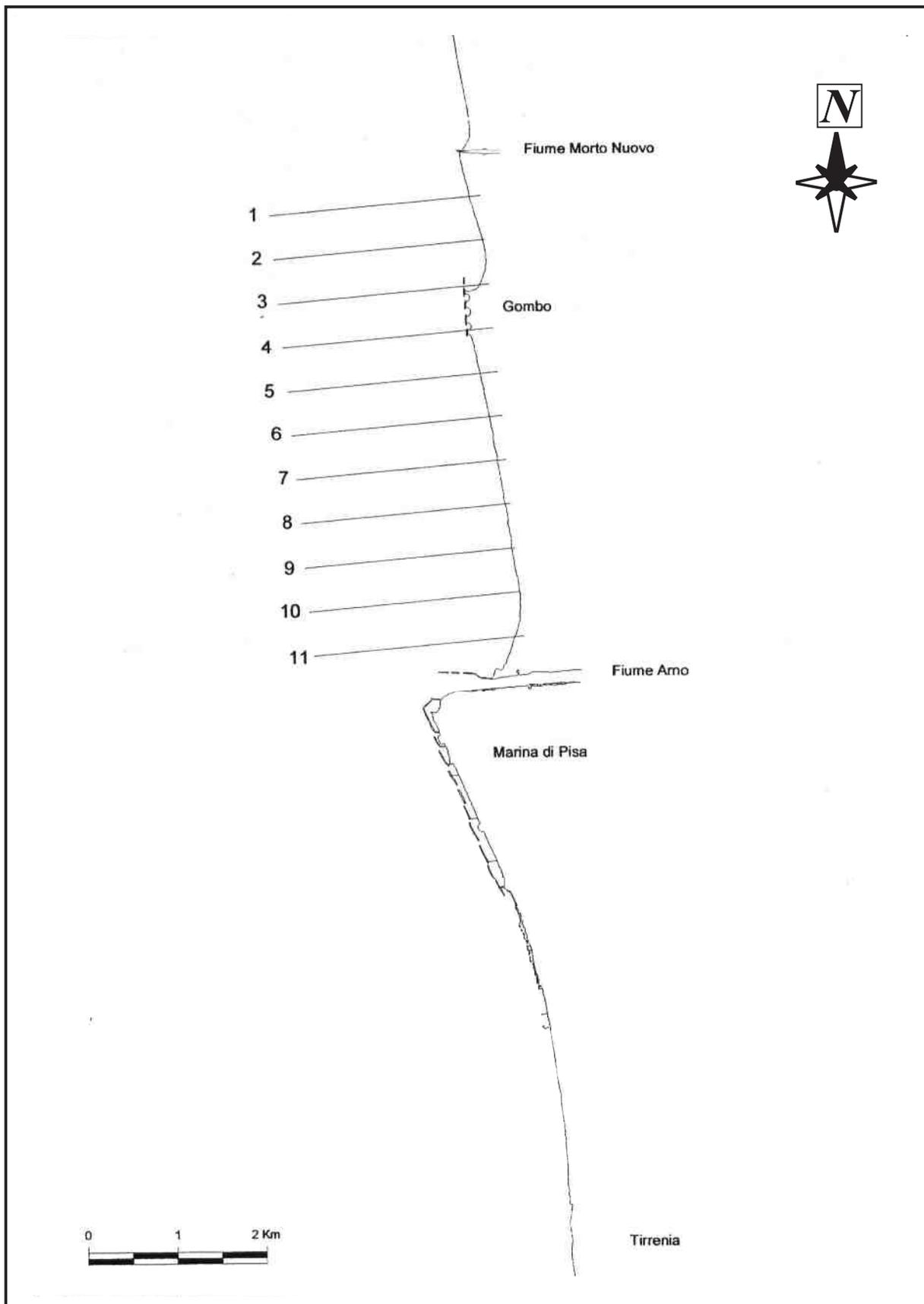
- Sedimenti delle aree gotenali dei corsi d'acqua maggiori
- 27 Depositi sabbiosi dei lidi e dune litoranee (Olocene)
- 26 Depositi alluvionali prevalentemente argillosi, torbe palustri e depositi di colmata (Olocene)
- 25 Depositi alluvionali prevalentemente sabbiosi e limosi (Olocene)
- 24 Coni di deiezione recenti (Pleistocene sup. ? - Olocene)



AREA DI INTERVENTO

UBICAZIONE SEZIONI TOPOGRAFICO-BATIMETRICHE

SCALA 1:64.500



tratto da "Studio morfologico e sedimentologico del litorale pisano" Università degli Studi di Firenze (1998)

Studio della dinamica morfologica e sedimentaria del litorale pisano

Profili batimetrici

1993 - - - - -
 1997 ————

Scala verticale 1 : 500
 Scala orizzontale 1 : 5000

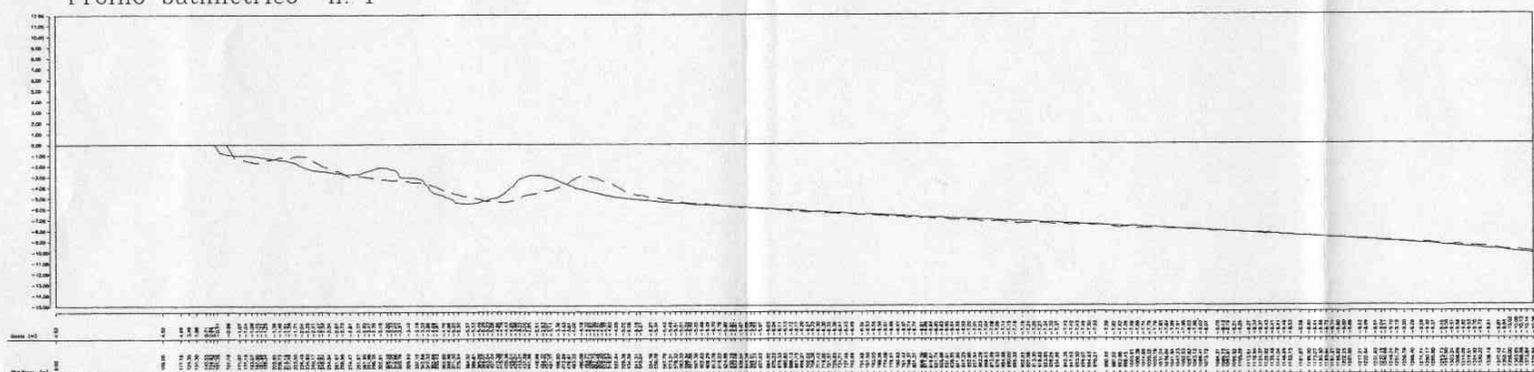
SEZIONI TOPOGRAFICHE E BATIMETRICHE

tratto da "Studio morfologico e sedimentologico del litorale pisano" Università degli Studi di Firenze (1998)

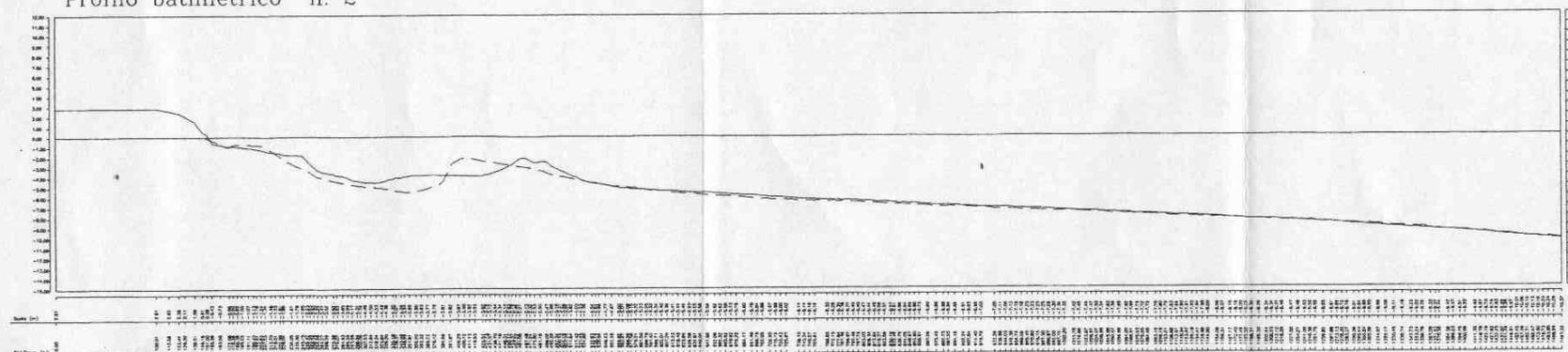
Scala orizzontale 1:5.000

scala verticale 1:500

Profilo batimetrico n. 1



Profilo batimetrico n. 2



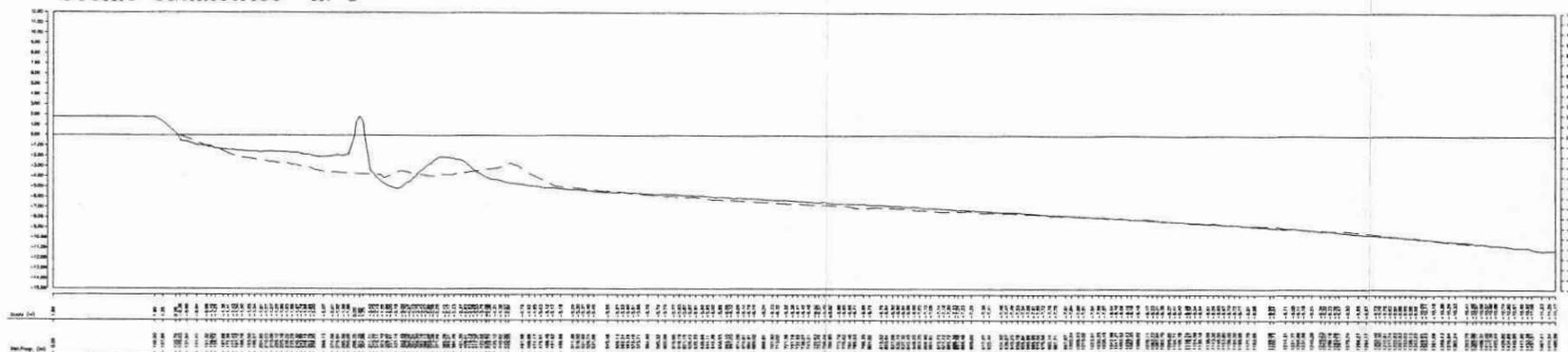
SEZIONI TOPOGRAFICHE E BATIMETRICHE

tratto da "Studio morfologico e sedimentologico del
litorale pisano" Università degli Studi di Firenze (1998)

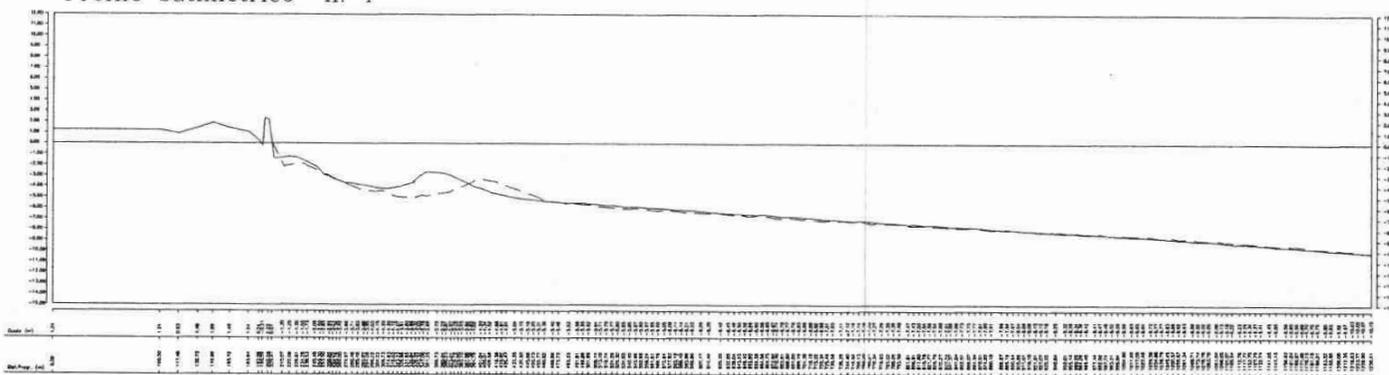
Scala orizzontale 1:5.000

scala verticale 1:500

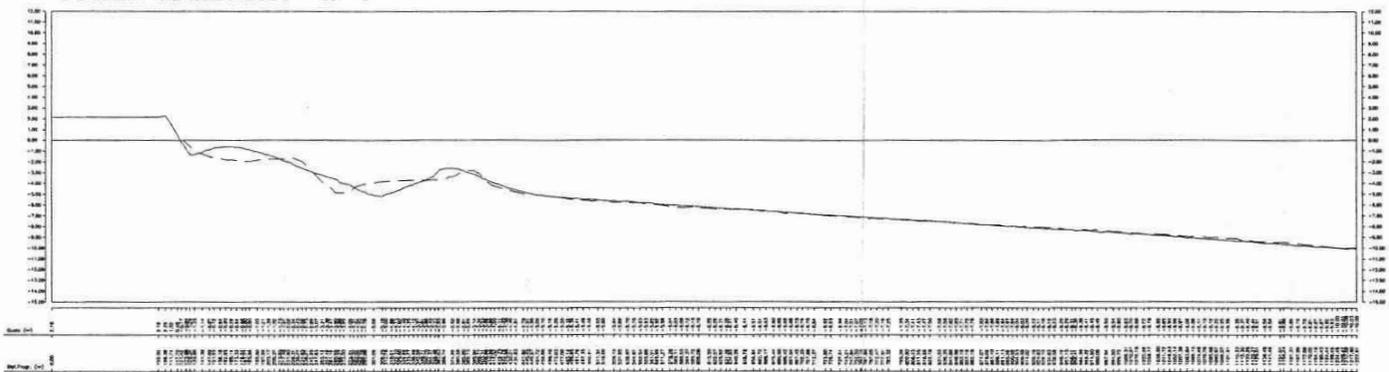
Profilo batimetrico n. 3



Profilo batimetrico n. 4



Profilo batimetrico n. 5



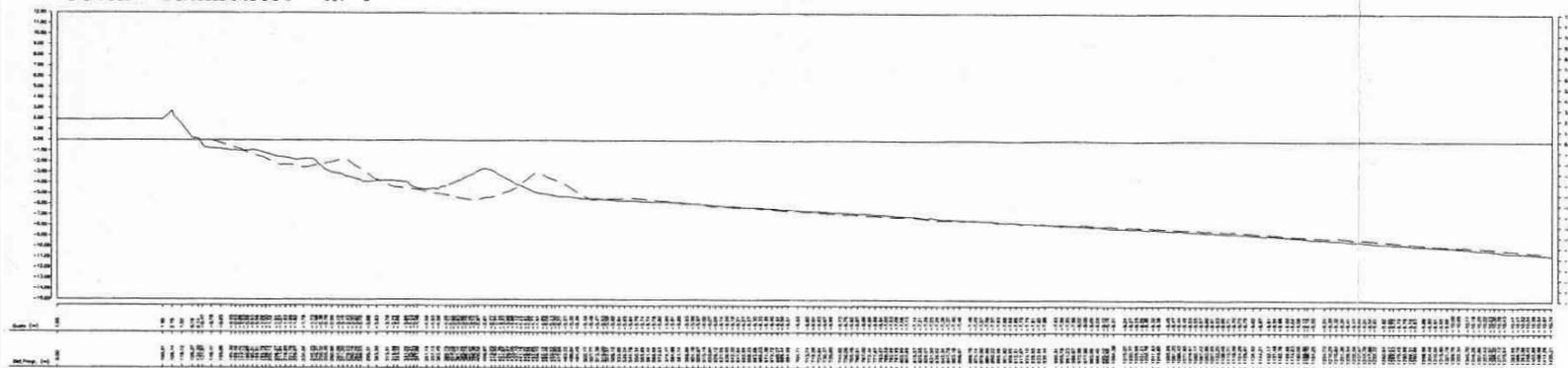
SEZIONI TOPOGRAFICHE E BATIMETRICHE

tratto da "Studio morfologico e sedimentologico del
litorale pisano" Università degli Studi di Firenze (1998)

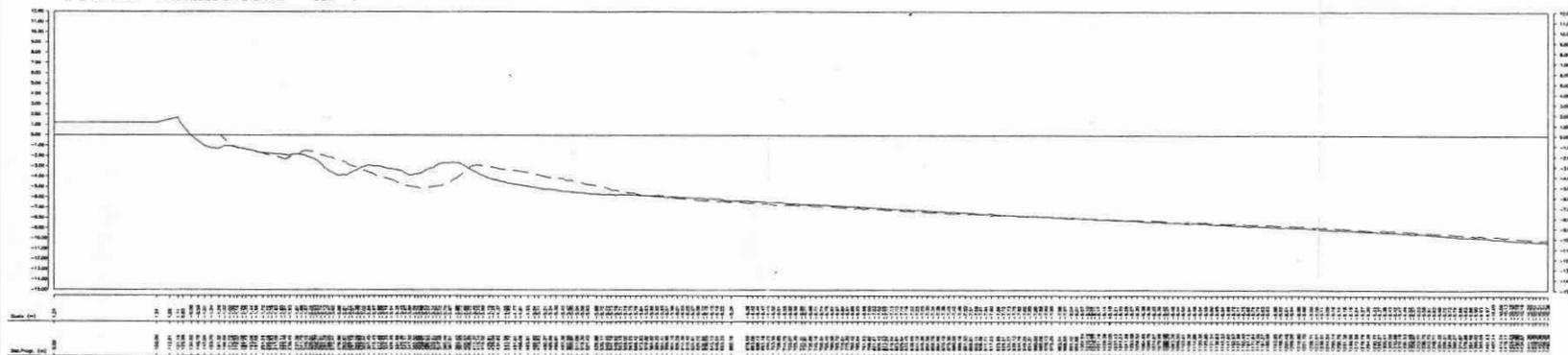
Scala orizzontale 1:5.000

scala verticale 1:500

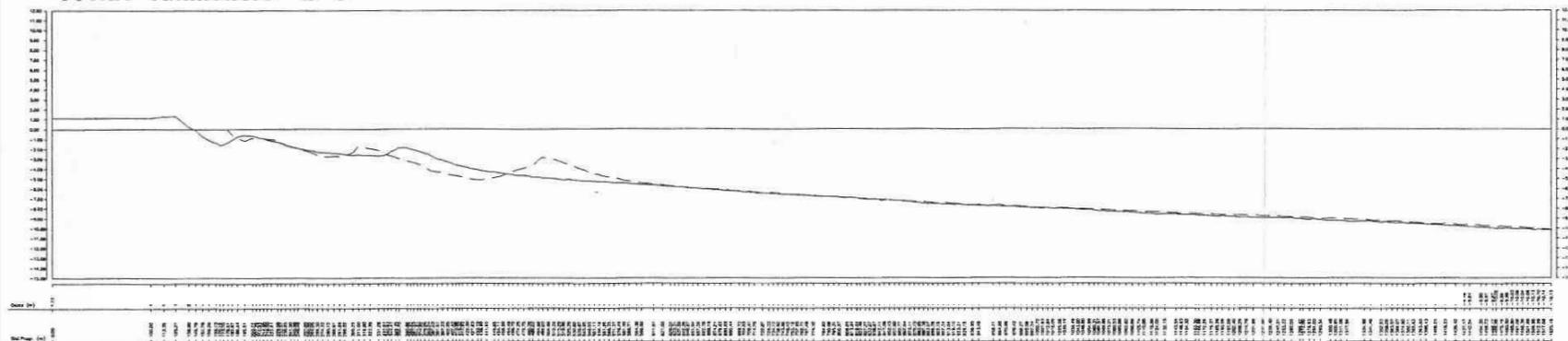
Profilo batimetrico n. 6



Profilo batimetrico n. 7



Profilo batimetrico n. 8



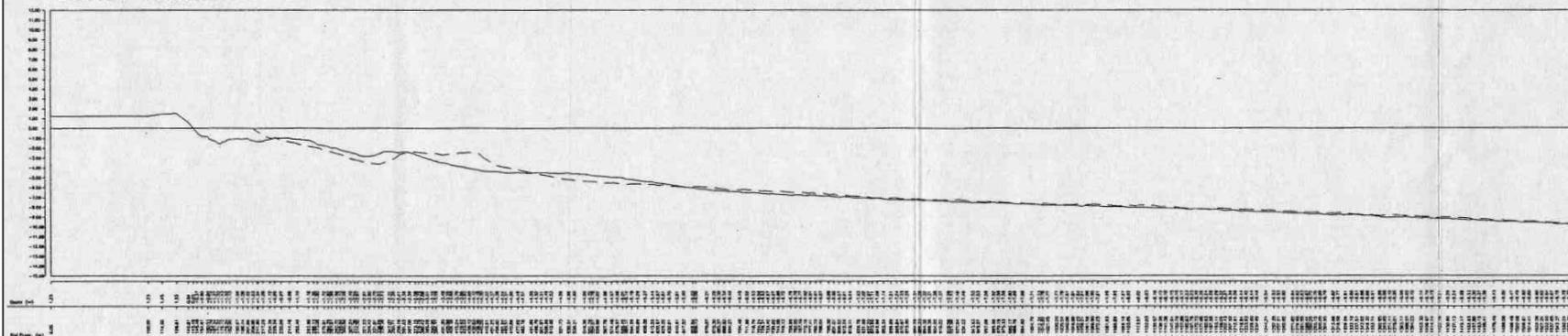
SEZIONI TOPOGRAFICHE E BATIMETRICHE

tratto da "Studio morfologico e sedimentologico del
litorale pisano" Università degli Studi di Firenze (1998)

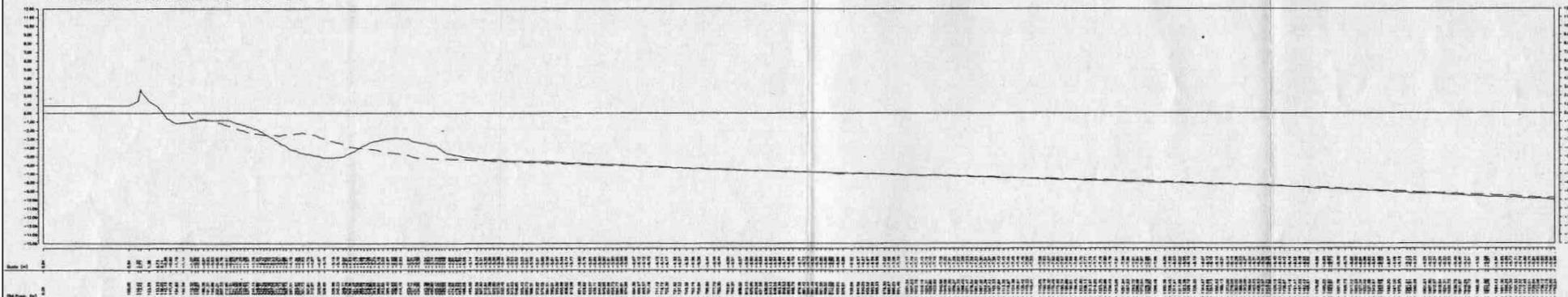
Scala orizzontale 1:5.000

scala verticale 1:500

Profilo batimetrico n. 9



Profilo batimetrico n. 10



Profilo batimetrico n. 11

