

Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale

Luigi E. Cipriani¹, Serena Ferri², Pierluigi Iannotta², Francesca Paolieri² ed Enzo Pranzini²

¹ Regione Toscana - Dip. Politiche territoriali ed ambientali - Via di Novoli, 26 - 50127 Firenze

² Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze

Via Jacopo Nardi, 2 - 50132 Firenze

Riassunto

Sul litorale della Toscana settentrionale, che si estende per circa 63 km da Bocca di Magra a Livorno, sono stati effettuati rilievi batimetrici lungo 393 profili estesi fino all'isobata dei 10 m, per complessivi 630 km di navigazione, e raccolti ed analizzati 703 campioni di spiaggia emersa e sommersa. Si è quindi prodotto una carta batimetrica in scala 1:5.000 e carte sedimentologiche per i parametri Media (Mz), Classazione (σ_1), Dimensioni del primo percentile e Percentuale di Frazione fine alla stessa scala. E' stata inoltre realizzata, sempre in scala 1:5.000, una carta dell'evoluzione della linea di riva digitalizzando una cartografia precedentemente prodotta per la Regione Toscana tramite fotorestituzione dei voli del 1938, '54, '67, '78 e '85, aggiornandola con un rilievo topografico diretto appositamente eseguito fra il 1997 e il 1998.

Il quadro sinottico ad alta risoluzione spaziale che si è ottenuto ha permesso di mettere in evidenza i processi morfologici e sedimentologici in atto, riconoscendo cause naturali ed antropiche che operano sia a scala regionale che a scala locale.

L'intera unità fisiografica è oggi interessata da un modesto deficit sedimentario che determina un arretramento medio della linea di riva di circa 0,23 metri all'anno (per il periodo 1985 - 1997/98), con fortissime variazioni locali. L'erosione del litorale posto a nord di Bocca d'Arno, con un tasso attuale che localmente raggiunge i 20 metri all'anno (dati 1985 - 1997), dimostra l'importanza dei fattori regionali, quali i processi naturali ed antropici nei bacini idrografici, sul bilancio sedimentario dei litorali, mentre l'accrescimento della spiaggia posta a nord del porto di Marina di Carrara (+44,6 metri fra il 1938 e il 1998) e l'erosione di quella meridionale (-106 metri nello stesso periodo di tempo) costituiscono un caso emblematico dell'influenza dei fattori locali.

La pendenza dei fondali e l'esistenza o meno di un sistema di barre mostrano una stretta relazione con le tendenze evolutive della linea di riva e con la presenza delle varie strutture costiere. I dati, nel loro complesso, mostrano anche situazioni geografiche a scala regionale, determinate dall'energia del moto ondoso incidente e dalla presenza di flussi sedimentari convergenti o divergenti.

Le caratteristiche granulometriche dei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa consentono di identificare vettori di trasporto *cross- e long-shore* e di meglio definire il sistema di celle già identificato dagli studi precedenti.

I risultati di questo studio consentono una nuova visione dei processi in atto in questa unità fisiografica e permettono di impostare nuove strategie di gestione integrata della fascia costiera.

Parole chiave: spiagge, sedimentologia, trasporto litoraneo, difese costiere, impatto antropico.

Abstract

The northern Tuscany coast, stretching for approximately 63 km from the Magra River outlet to Livorno, has been studied through 393 cross-shore profiles extending from the backshore to the 10 m isobath, for 630 km of surveys as a whole; a bathymetric map at the scale 1:5.000 was thereafter produced. In the same area 703 sediment samples were collected to draw sedimentological maps at the same scale for Mean size (Mz), Sorting (σ_1), 1st percentile size and Percentage of fines ($< 4 \phi$). A shoreline evolution map for the years 1938, 1954, 1967, 1978, 1985 and 1997/98 was also produced. The synoptic and high resolution picture obtained from these data allows us to highlight the morphological and sedimentological processes acting on this coast and to recognise both natural and human causes working on a local and regional scale.

A moderate sedimentary deficit is presently affecting this stretch of coast and is responsible of a mean annual shoreline retreat of 0,23 m (data 1985 ÷ 1997/98), with strong local variations. The severe erosion on the northern side of the Arno River mouth (even 20 m/yr from 1985 to 1997) shows the importance of regional factors, both human and natural, present inside the catchments of the rivers feeding the coast, whereas the accretion of the beach updrift the Marina di Carrara harbour (44,6 m from 1938 to 1998) and the erosion of the downdrift beach (106 m in the same period) is a measure of the importance of local factors.

The nearshore slope and the presence and shape of longshore bars are strictly related to the shoreline evolution and to the presence of coastal structures. Data, as a whole, show both the influence of the geographical exposition of the coast in respect to the incoming waves and the presence of a cellular nature of the littoral drift.

Beach sediment parameters allow the identification of cross- and long-shore fluxes and a better definition of the cell system previously described by other authors.

The results of this study give a new sight of the processes reshaping this coast and allow a set up of new strategies of integrated coastal zone management.

Key-words: beaches, sedimentology, sediment transport, shore protection, human impact.

Inquadramento geografico

Il litorale che si estende da Punta Bianca ai Monti Livornesi (Fig. 1) costituisce un'unità fisiografica (Aiello et al., 1976) lunga circa 63,5 km e divisa amministrativamente fra la Regione Toscana, nel cui territorio ricadono ben 60,9 km di costa, e la Regione Liguria, ove ricadono solo i 2,6 km più settentrionali. La costa varia la propria esposizione passando da una direzione NE-SW, all'estremità settentrionale, ad una N-S, nel tratto meridionale e, se non fosse per l'aggetto naturale del delta dell'Arno e per quelli artificiali dei porti di Marina di Carrara e di Viareggio, costituirebbe una falcatura con raggio di curvatura progressivamente crescente tale da farla assimilare alle spiagge a forma di spirale logaritmica (Silvester e Hsu, 1993).

Il retroterra è costituito dall'ampia pianura di Pisa, costruita dai sedimenti del Fiume Arno e, subordinatamente, da quelli del Fiume Serchio, e dalla fascia costiera pedemontana Apuo-versiliense, caratterizzata prevalentemente dai sedimenti portati dal Fiume Magra ma anche, in particolare nel settore centrale e settentrionale, da quelli che provengono dai numerosi corsi d'acqua minori che scendono dalle Alpi Apuane, tra i quali il Fiume Frigido è certamente il più importante.

La parte più settentrionale di questo tratto di litorale, compresa tra la foce del Magra ed il porto di Viareggio, è caratterizzata da un elevato grado di antropizzazione, dovuto inizialmente alle attività portuali di Carrara e di Viareggio e, successivamente, allo sviluppo dell'attività turistica che vede in Marina di Massa, Forte dei Marmi e nella stessa Viareggio i centri principali. Il tratto più settentrionale è inoltre interessato da numerosissime opere di difesa che, come vedremo, modificano la costa sia dal punto di vista paesaggistico che della dinamica sedimentaria.

Il tratto di costa compreso fra il porto di Viareggio e la foce del Fiume Arno presenta caratteristiche molto naturali, con pochissimi insediamenti turistici e con opere marittime limitate alle 5 scogliere poste a difesa della villa presidenziale di S. Rossore e ai pennelli di foce del Fiume Morto Nuovo e dell'Arno. Questo territorio ricade interamente all'interno del Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli.

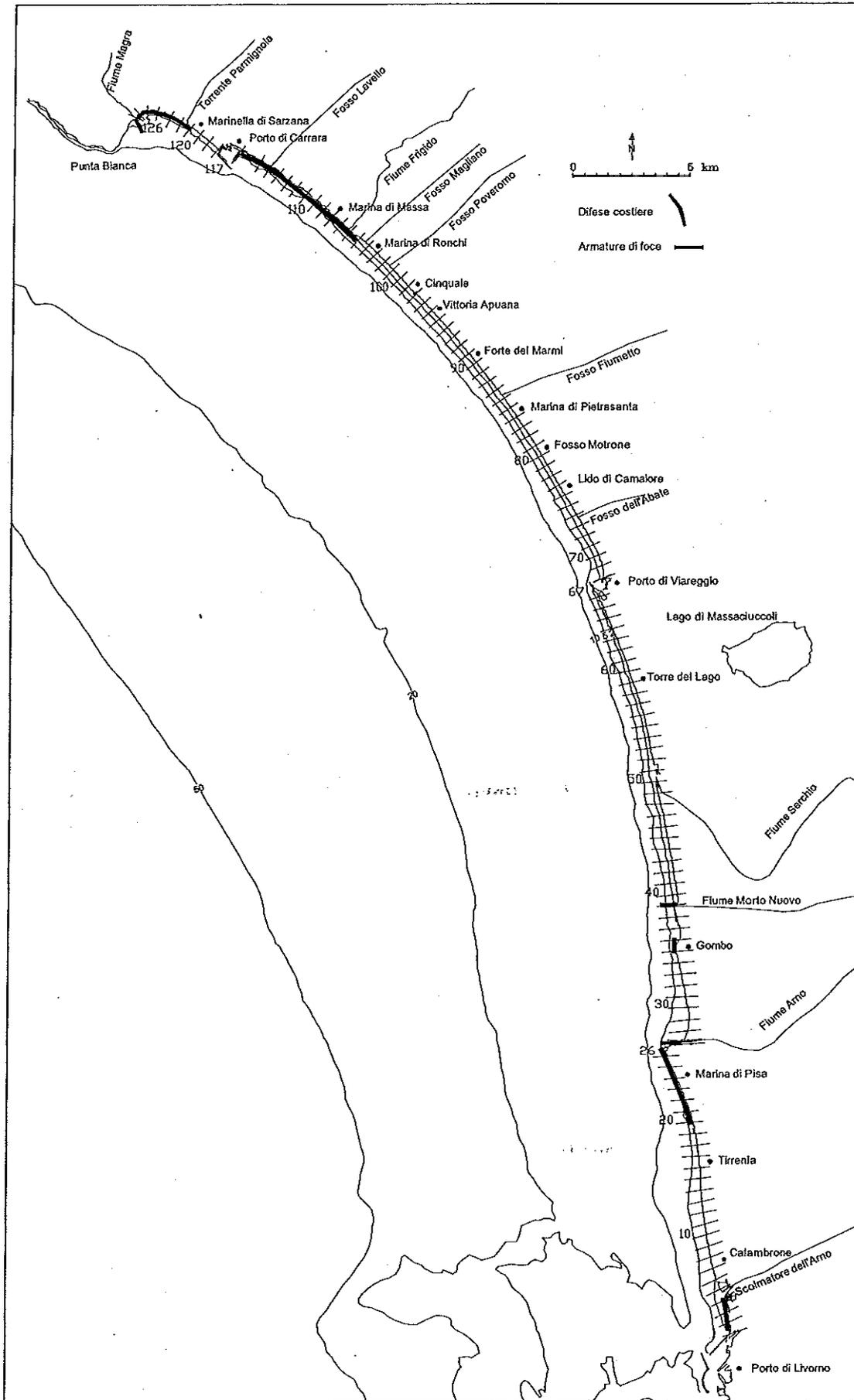


Figura 1 - Il litorale compreso fra Bocca di Magra e Livorno: posizione delle principali opere a mare e delimitazione dei settori di 500 m nei quali è stato suddiviso per lo studio dell'evoluzione della linea di riva.

La parte più meridionale dell'unità fisiografica, quella compresa tra la foce dell'Arno ed il porto di Livorno, presenta un grado di antropizzazione intermedio e concentrato nell'abitato di Marina di Pisa, difeso da una doppia serie di scogliere, e dall'insediamento a prevalente vocazione turistica di Tirrenia. Il porto di Livorno, con la sua recente espansione settentrionale, ha conquistato parte della spiaggia trasformandola in piazzali difesi da scogliere aderenti. La dinamica di questo tratto di costa, oltre che dai moli foranei del porto, è fortemente influenzato dalla presenza delle Secche della Meloria, che costituiscono una barriera naturale alle violente mareggiate provenienti da SW.

Apporto sedimentario

Come precedentemente detto, i principali fiumi che sfociano in questo tratto di litorale sono il Magra, il Serchio e l'Arno.

Il Fiume Magra sfocia all'estremità settentrionale e per lunghezza (62 km) e per estensione del suo bacino idrografico (1693 km²) è il terzo fiume dell'unità fisiografica; esso fornisce alla costa un notevole apporto sedimentario (portata solida media annua di 632×10^3 t/anno, secondo Cavazza, 1984) ed è quindi la principale fonte di alimentazione per il tratto settentrionale.

Il Fiume Serchio, lungo 89 km, scorre in un bacino imbrifero di 1408 km² ed ha una portata solida media annua di 23×10^3 t/anno (Cavazza, 1984); lo scarso apporto solido di questo fiume, dovuto alle caratteristiche litologiche del bacino e ai numerosi sbarramenti artificiali presenti lungo il suo corso e su quello dei suoi affluenti, fa sì che il suo contributo al bilancio sedimentario dell'unità fisiografica sia marginale.

L'Arno, con i suoi 241 km di lunghezza e gli 8228 km² di estensione del bacino idrografico è il corso d'acqua principale dell'unità fisiografica al cui bilancio sedimentario contribuisce con 1524×10^3 t/anno (Cavazza, 1984).

Caratteristiche meteomarine

La determinazione del clima meteomarinico a largo del tratto di litorale compreso tra Livorno e Bocca di Magra si basa sui dati KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) relativi al periodo 1961-1990 con le osservazioni di vento ed altezza d'onda effettuate nel settore compreso fra 42,8° e 45,0° N e fra 8,0° - 11,0° E.

Dall'osservazione dei diagrammi polari della distribuzione direzionale dei venti (Fig. 2) si evidenzia come fra i venti foranei quelli provenienti dal terzo quadrante abbiano la maggiore frequenza in tutte le classi di velocità e si nota inoltre che i venti di velocità maggiore provengono tutti da un ristretto settore centrato sui 250° N.

In Figura 3 sono rappresentati i diagrammi polari relativi alla distribuzione delle altezze d'onda. Da questi si rileva che le mareggiate principali arrivano prevalentemente dal settore 240° ÷ 270°, mentre gli eventi estremi ($H > 6$ m) provengono da un limitatissimo settore centrato sui 225° N. La loro ridotta frequenza è probabilmente da correlare con il fatto che, in occasione di forti burrasche, difficilmente vengono eseguite le osservazioni, sia perché le navi cercano di evitare tali condizioni del mare, sia perché, quando le navi vi si trovano, il personale di bordo non sempre ha la possibilità di effettuare le osservazioni e trasmetterle al KNMI.

Il trasporto litoraneo

Il flusso dei sedimenti lungo costa è stato studiato su base morfologica e granulometrica (Aiello et al., 1976) e su base petrografica (Gandolfi e Paganelli, 1975) nell'ambito del Progetto Finalizzato Conservazione del Suolo - Sottoprogetto Regime e dinamica dei litorali. Il trasporto potenziale è stato derivato dall'energia del moto ondoso per diversi tratti: Aminti et al. (1998), per il tratto compreso fra Bocca di Magra e Viareggio, da Noli e Franco (1989) e De Filippi (1998) per il litorale pisano. Tutti gli studi concordano sull'esistenza di un *drift* prevalente diretto verso sud da Bocca di Magra a Forte dei Marmi e di uno diretto verso nord da Bocca d'Arno a Marina di Pietrasanta.

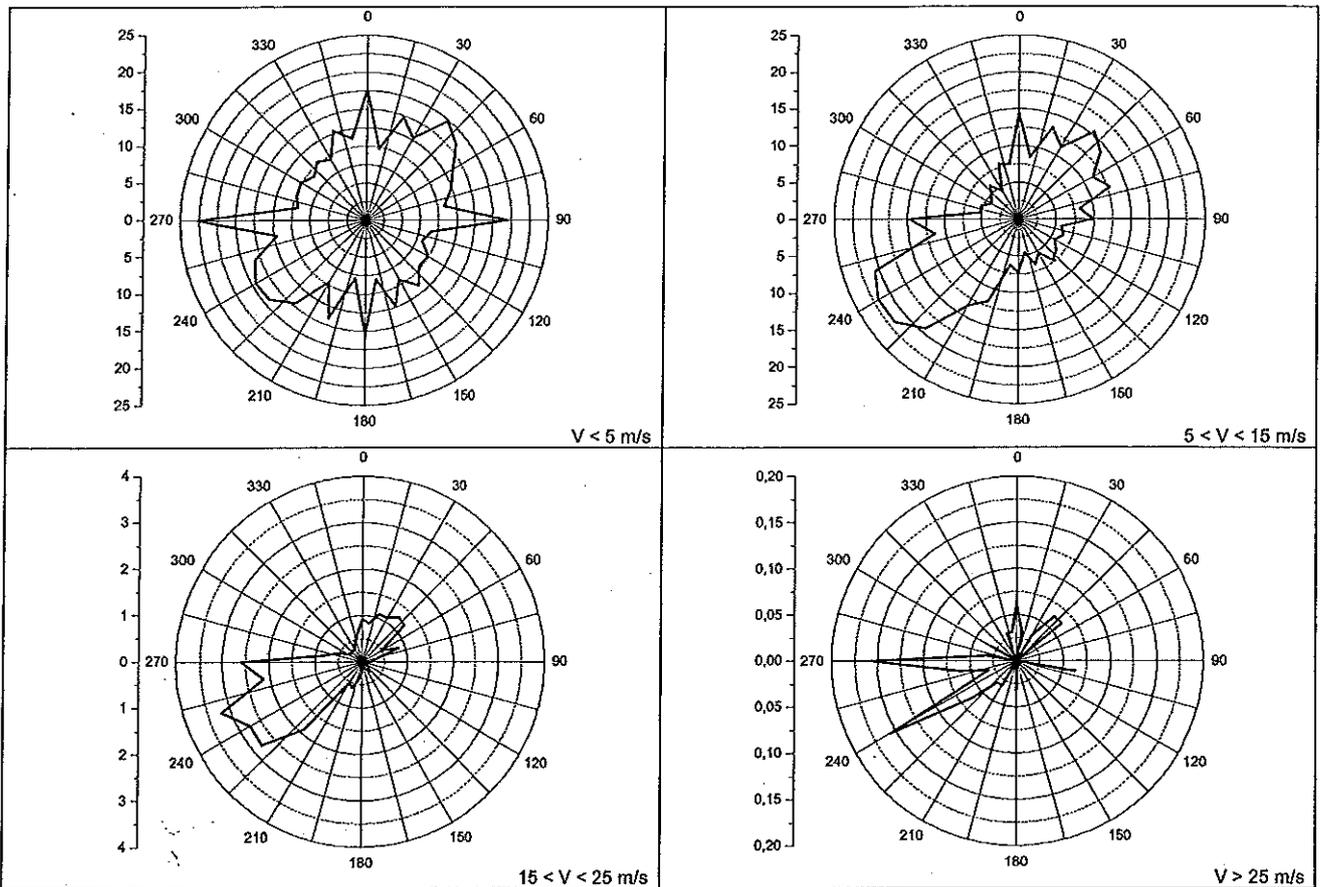


Figura 2 - Distribuzione direzionale percentuale media annua dei venti (dati KNMI, settore 8,0° - 11,0° E e 42,8° - 45,0° N; periodo 1961 ÷ 1990). Calme 10,60%.

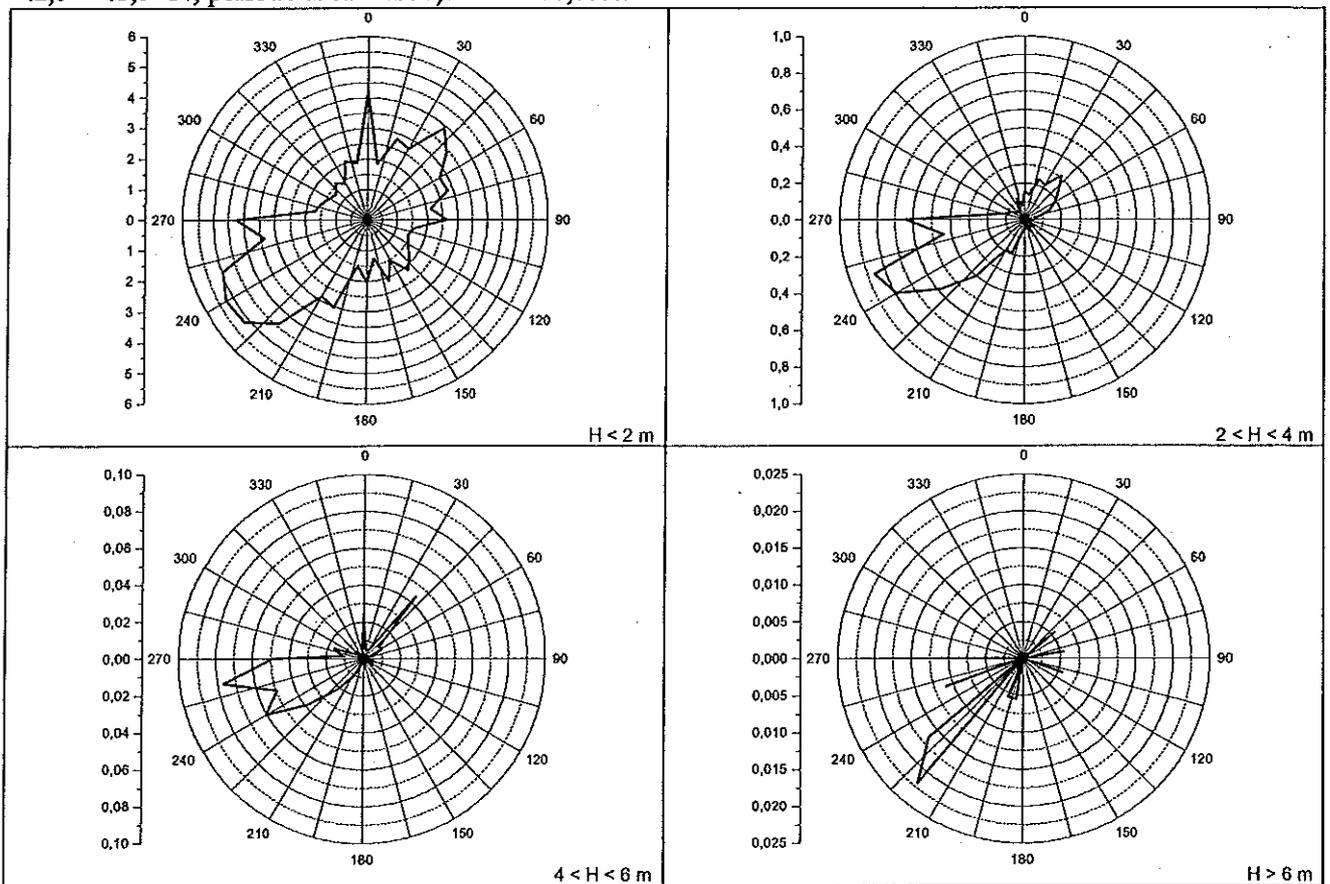


Figura 3 - Distribuzione direzionale percentuale media annua delle altezze d'onda (dati KNMI, settore 8,0° - 11,0° E e 42,8° - 45,0° N; periodo 1961 ÷ 1990). Calme 39,55%.

Fra Forte dei Marmi e Marina di Pietrasanta esisterebbe una zona di convergenza dei due *drift* (uno proveniente da sud e l'altro da nord) che certamente non deve essere vista come un elemento statico, ma come il risultato di convergenze diverse in funzione dei diversi stati del mare. A sud di Bocca d'Arno si osserva un'inversione della direzione del flusso dei sedimenti, che in questo tratto di costa è diretto verso Livorno. Tale inversione è dovuta, oltre che alla naturale distribuzione di una parte dei sedimenti dell'Arno, anche alla presenza delle Secche della Meloria, che danno luogo a fenomeni di rifrazione del moto ondoso. In prossimità del porto di Livorno è stato riconosciuto un flusso di senso opposto, che impedisce la sedimentazione a ridosso delle opere foranee.

Recentemente, Petti (1999) ha ricalcolato il trasporto solido potenziale in alcuni punti significativi della zona in esame basandosi sui dati KNMI precedentemente citati. Da questi dati si può vedere come il massimo trasporto solido sia di 351000 m³/anno, diretto verso sud, e si verifichi a Marina di Pietrasanta, mentre la zona di convergenza si collocherebbe tra Viareggio e Marina di Pietrasanta.

Materiali ¹ e metodi

Nei 63,5 km di costa compresi fra Bocca di Magra e Livorno sono stati eseguiti 393 profili topografici estesi dalla spiaggia alta all'isobata dei 10 metri. I profili sono stati spazati di 250 metri, con raffittimenti ogni 50 m in prossimità di opere di marittime. Complessivamente sono stati effettuati 630 km di rilievi in quattro campagne: Gennaio 1997 (dalla foce del Cinquale al porto di Marina di Carrara), Maggio 1997 (dal porto di Livorno al porto di Viareggio), Gennaio 1998 (dal porto di Viareggio alla foce del Cinquale) e Ottobre 1998 (dal porto di Marina di Carrara a Bocca di Magra).

Lungo 161 profili distanziati circa 500 metri sono stati raccolti 703 campioni di sedimenti, di cui 142 di battigia e 561 di fondo con una benna Van Veen. Tali campioni sono stati raccolti alle profondità di 0 metri (campioni di battigia), 2 metri, 4 metri, 6 metri, 8 metri, 10 metri (questi ultimi sono stati prelevati soltanto nel tratto di costa compreso fra Viareggio e il Cinquale).

Tutti i campioni sono stati sottoposti ad analisi granulometrica mediante setacciatura automatica a secco per 10 minuti, con intervallo tra i setacci di mezzo phi, dopo l'asportazione per via umida della frazione fine (< 4 phi).

Sono state poi calcolate in modo automatico le percentuali relative ad ogni frazione granulometrica e le percentuali cumulative, tracciati gli istogrammi di frequenza e le curve cumulative in scala probabilistica e da queste sono stati calcolati, sempre in modo automatico, le dimensioni del primo percentile ed i parametri di Folk e Ward (1957), Media (Mz), Classazione (σ_r) e Asimmetria (Sk_r). Sono stati costruiti i diagrammi dei rapporti fra i vari parametri e, tramite interpolazione, sono state disegnate le carte della distribuzione areale della Media, Classazione, Primo Percentile e percentuale di Frazione fine (< 4 phi).

Per lo studio dell'evoluzione delle linee di riva, sono state digitalizzate le linee degli anni 1938, 1954, 1967, 1978, 1985 presenti sulla cartografia "Coste toscane" in scala 1:5.000 realizzata dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze per la Regione Toscana (Bartolini et al., 1989), alle quali è stata aggiunta la linea di riva ottenuta per rilievo topografico diretto con stazione totale nel 1997 (per il tratto di litorale compreso fra il porto di Livorno e il porto di Viareggio, e per il tratto tra il Cinquale e il porto di Marina di Carrara), nel 1998 (per il tratto di litorale tra il porto di Viareggio e il Cinquale, e per il tratto tra il porto di Carrara e Bocca di Magra).

¹ In particolare, i dati relativi al tratto di litorale compreso tra il porto di Livorno ed il porto di Viareggio sono stati raccolti nell'ambito di una ricerca stipulata con i Comuni di Pisa, San Giuliano Terme e Vecchiano, la Provincia di Pisa, il Parco Migliarino San Rossore Massaciuccoli e la Regione Toscana; quelli relativi al tratto di costa compreso tra Cinquale ed il porto di Marina di Carrara sono stati raccolti ed analizzati dal Dott. Pierluigi Iannotta nell'ambito dello svolgimento della sua tesi di laurea; quelli relativi al litorale compreso tra il porto di Marina di Carrara e Bocca di Magra sono stati raccolti nell'ambito di un progetto patrocinato dall'Autorità di Bacino del Fiume Magra. I dati relativi al tratto di costa compreso fra Viareggio e Cinquale sono stati raccolti nell'ambito di una convenzione tra il Dipartimento e l'ARPAT-Regione Toscana.

Le variazioni delle linee di riva sono state ottenute calcolando le aree comprese fra le coppie di linee negli intervalli di tempo 1938-1954, 1954-1967, 1967-1978, 1978-1985, 1985-1997/1998. A tale scopo il litorale in esame è stato suddiviso in 127 settori della lunghezza di circa 500 metri ciascuno (Fig. 1); solo in alcuni casi la lunghezza dei settori è diversa in considerazione dei limiti morfologici o della presenza di infrastrutture. Per ogni settore e per ciascun intervallo di tempo è stata calcolata la variazione areale (m^2), la variazione lineare media (m), e il tasso di variazione annuale (m/anno). Sono state inoltre analizzate le foto aeree a bassa quota riprese nei giorni 29/11/1999 e 13/3/2000 dal Comando Base Aeromobili del Corpo delle Capitanerie di porto (Sarzan-Luni) alla scala approssimativa di 1: 2500.

Morfologia dei fondali

Pendenza dei fondali

I fondali della zona di studio hanno un profilo trasversale concavo, con una pendenza media dell'1,61% fra la battigia e l'isobata dei 5 metri e dello 0,71% fra i 5 e i 10 metri; fra la battigia e l'isobata dei 10 metri la pendenza media è pari allo 0,94% (Fig. 4).

Questi valori, ed in particolare quelli relativi al profilo interno (Fig. 4a), trovano comunque una forte variabilità lungo costa, per la diversa esposizione al moto ondoso, per le differenze granulometriche dei sedimenti di spiaggia e per la presenza di opere antropiche di vario genere, il cui effetto si risente notevolmente nel primo tratto del profilo, mentre si sfuma nella parte più distale. Ciò è particolarmente evidente nei profili posti in corrispondenza di Marina di Pisa, dove l'isobata dei 5 metri corre in genere al piede delle difese parallele, dove anzi, molto spesso si trovano anche 7 metri di fondale. Una simile situazione si rileva anche in corrispondenza delle scogliere poste a sud del Porto di Marina di Carrara: l'erosione dei fondali antistanti e l'impossibilità di arretramento della riva per la presenza delle difese comporta una maggiore pendenza della spiaggia. In questi tratti, inoltre, manca un sistema di barre ben sviluppato e il profilo si presenta rettilineo con al massimo una leggera convessità con la sommità posta ad alcune decine di metri di distanza dal piede della scogliera (Fig. 5b).

L'elevata pendenza che caratterizza il profilo prossimale a sud della Foce del Magra può essere imputata, oltre che alla presenza di opere di difesa, anche alle caratteristiche granulometriche dei sedimenti che costituiscono la spiaggia: ghiaie e sabbie grossolane.

I valori di pendenza minori si hanno sulla spiaggia di Tirrenia, riparata dal porto di Livorno e delle Secche della Meloria nei confronti dei mari di Scirocco, e dove, nonostante ciò, si sviluppa un profilo dissipativo con barre rettilinee (Fig. 6) (Short e Aagaard, 1993). Significativo è il fatto che questo è l'unico tratto di costa in avanzamento del litorale posto a sud di Bocca d'Arno.

Nella fascia batimetrica non direttamente interessata dalle strutture costiere, sui fondali compresi fra i 5 ed i 10 metri, le differenze di pendenza della spiaggia nei vari segmenti litoranei si riducono e talvolta si invertono.

Al superamento del Porto di Viareggio la pendenza entro l'isobata dei 5 metri non mostra i significative variazioni (Fig. 4a), mentre quella compresa fra i 5 ed i 10 metri subisce una drastica riduzione (Fig. 4b). Ciò può essere spiegato con una riduzione dell'alimentazione dovuta alla presenza del porto, cosa di cui non si risente nei fondali più prossimi a riva per l'apporto sedimentario dovuto all'impianto di *bypass* in esercizio, seppur discontinuo, fin dagli anni '70.

Fondali molto ripidi, fra l'isobata dei 5 e quella dei 10 metri, si hanno anche fra Marina di Pietrasanta e il Cinquale, ossia in corrispondenza della zona di convergenza (Aiello et al., 1976; Gandolfi e Paganelli, 1975). Dato che il profilo attivo non si estende all'isobata dei 10 metri, l'input sedimentario dovuto alla convergenza del *drift* determina l'avanzamento della linea di riva e delle isobate solo fino alla profondità di chiusura, posta a circa 7 metri, con conseguente aumento della pendenza media oltre questo punto. La zona di convergenza è l'unica che presenta un profilo caratterizzato da più di due barre (Fig. 5d), è costituita da sedimenti molto fini ed è esposta direttamente ai mari dominanti, elementi che ne fanno un caso classico di spiaggia dissipativa (Short, 1999). Chiabrera et al. (1980) avevano già messo in relazione la presenza di più barre nella zona di convergenza con l'abbondanza di sedimenti.

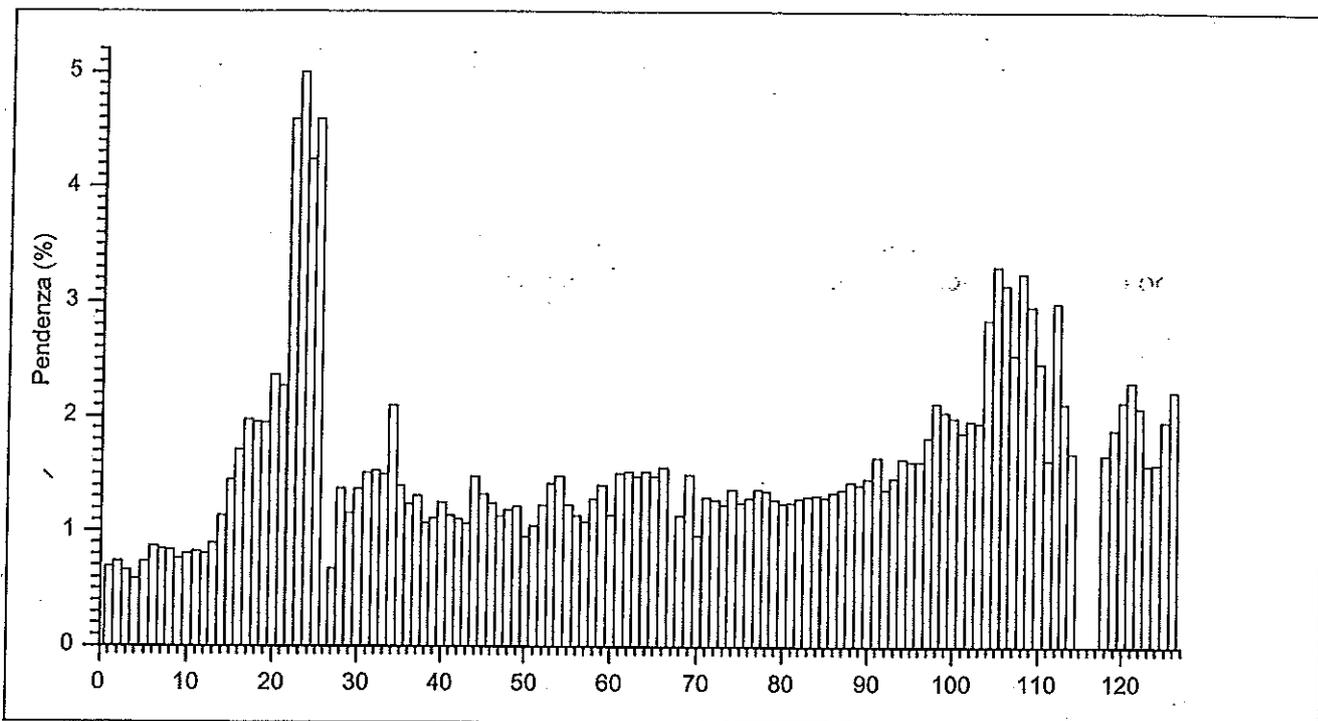


Figura 4a - Pendenza media dei fondali fra la battigia e l'isobata dei 5 metri.

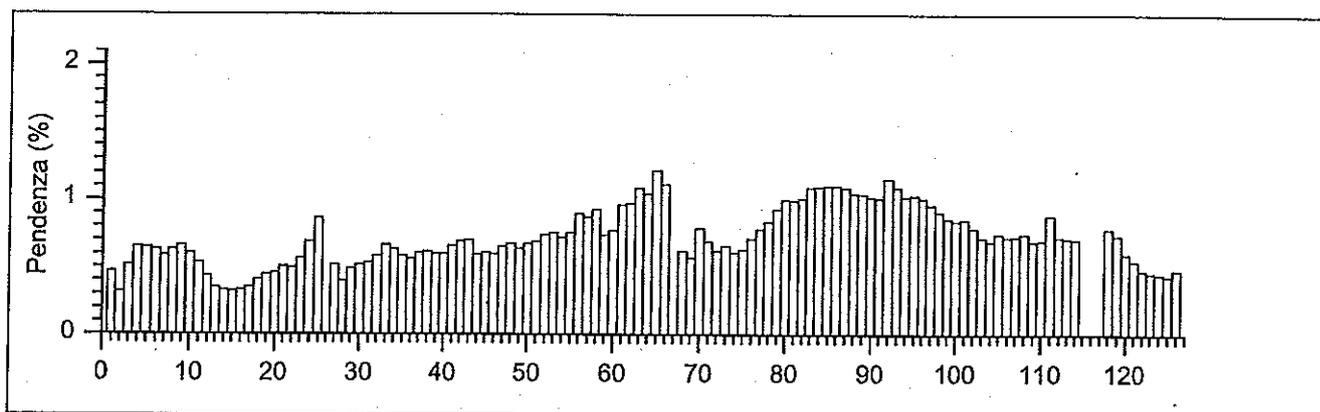


Figura 4b - Pendenza media dei fondali fra le isobate dei 5 e 10 metri.

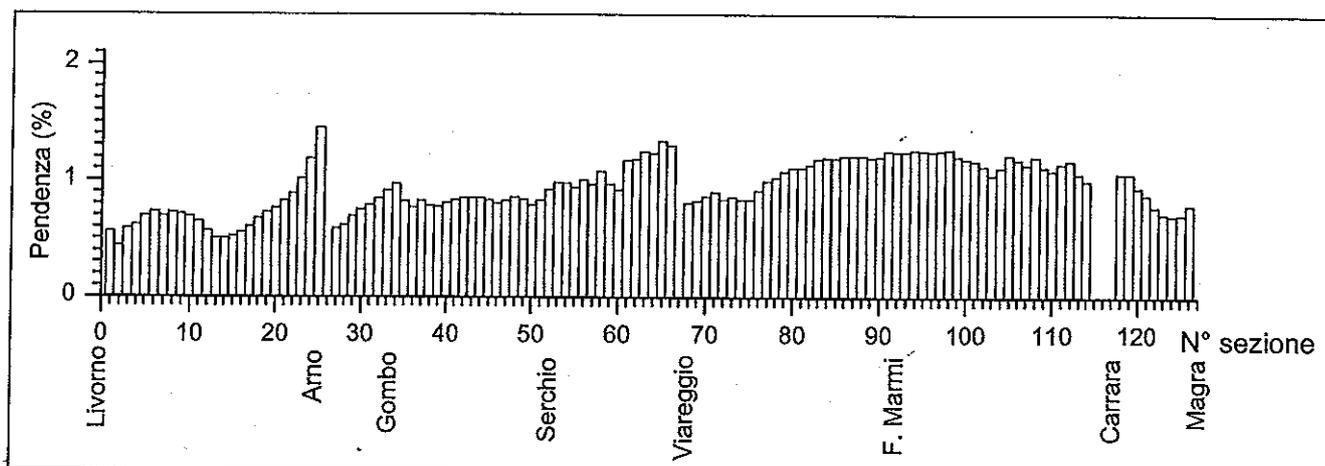


Figura 4c - Pendenza media dei fondali fra la battigia e l'isobata dei 10 metri.

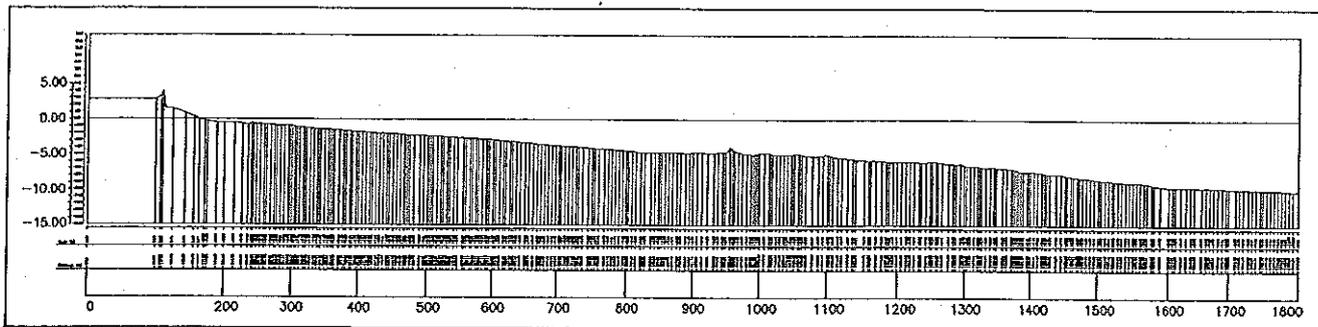


Figura 5a - Profilo batimetrico senza barre, nella spiaggia posta immediatamente a sud delle difese di Marina di Pisa (Esagerazione verticale 1:10).

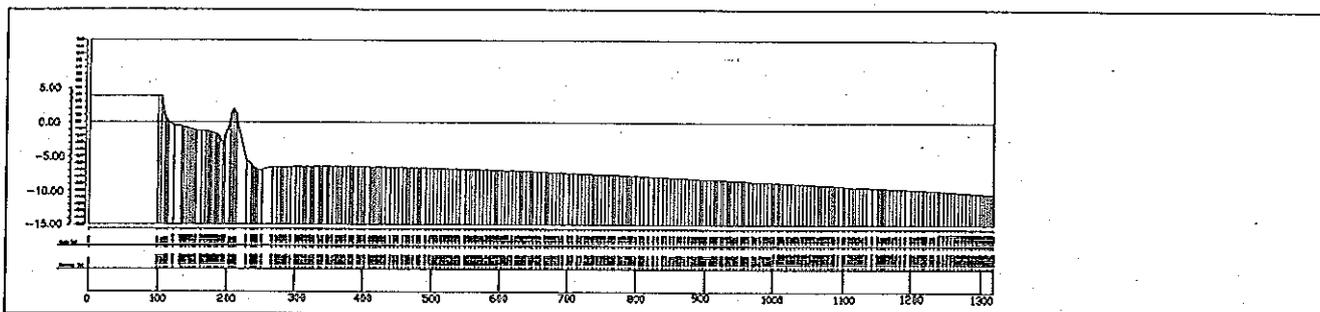


Figura 5b - Profilo batimetrico convesso in corrispondenza delle scogliere di Marina di Pisa (Esagerazione verticale 1:10).

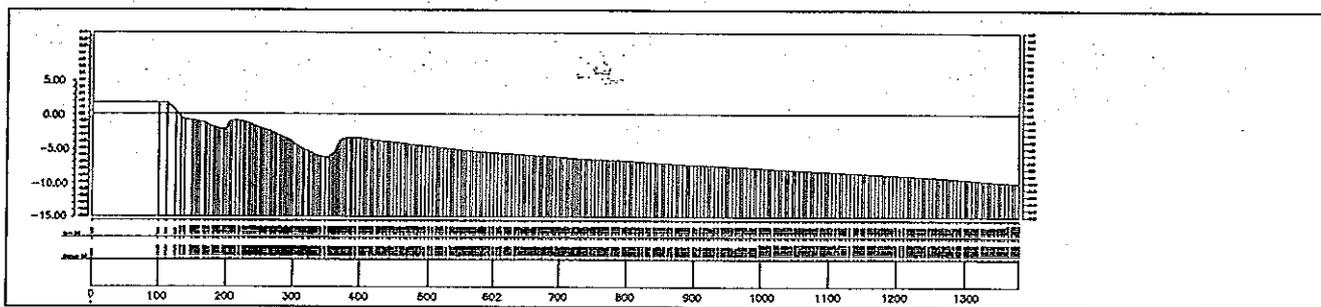


Figura 5c - Profilo con barre asimmetriche, nella spiaggia a sud della foce del F. Serchio (Esagerazione verticale 1:10).

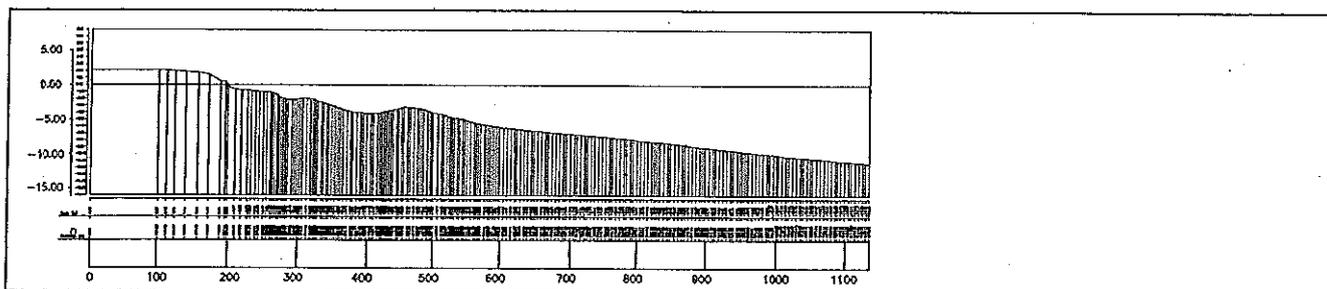


Figura 5d - Profilo batimetrico con più barre, nella zona di convergenza fra Marina di Pietrasanta ed il Cinquale (Esagerazione verticale 1:10).

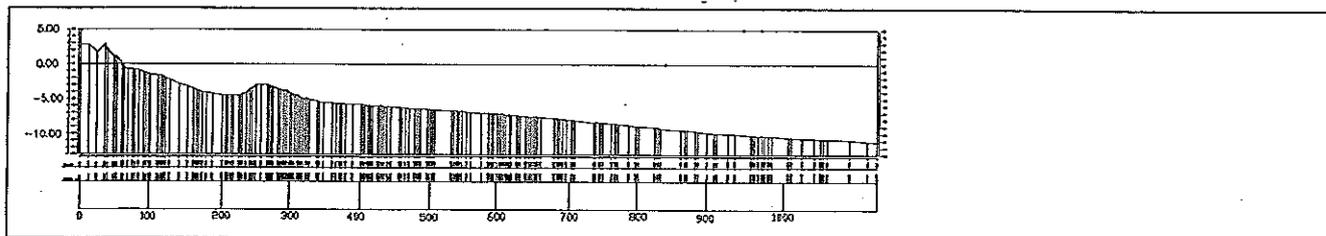


Figura 5e - Profilo batimetrico con una barra, nella spiaggia tra il Cinquale e Marina di Ronchi (Esagerazione verticale 1:10).

L'analisi del grafico che mostra l'andamento della pendenza fra la battigia e l'isobata dei 10 metri (Fig. 4c) indica una minore variabilità fra profili adiacenti, cosa che consente una più agevole lettura dei dati a scala regionale. Nel settore meridionale e centrale la pendenza aumenta andando *updrift* verso le opere di difesa: da Tirrenia a Bocca d'Arno, da qui verso il Gombo, dal Gombo alla foce del Fiume Morto Nuovo e poi verso il porto di Viareggio. A nord di ogni difesa si ha una brusca caduta di pendenza dovuta all'arretramento della linea di riva, più forte di quello che può aver subito l'isobata dei 10 metri, posta oltre la profondità di chiusura per mareggiate con tempi di ritorno decennali (Pranzini e Rossi, 1995). Un trend simile, ma con senso opposto (e quindi nuovamente *downdrift*), si ha anche nel settore settentrionale, dove però l'effetto del porto di Marina di Carrara è mascherato dalle opere di difesa parallele ed aderenti poste sottoflutto, che conferiscono al profilo di spiaggia una pendenza maggiore.

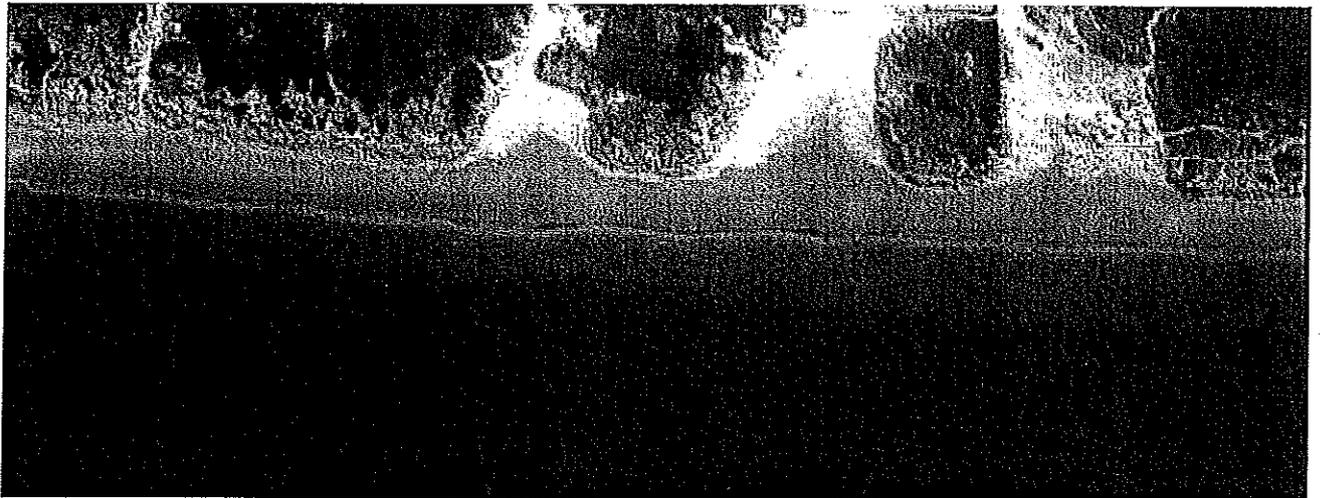


Figura 6 - Due barre rettilinee sulla spiaggia del Calambrone (Foto: Comando base aeromobili del Corpo delle Capitanerie di Porto, Luni-Sarzana; Concessione R.G.S. N. 134 del 17/5/2000).

Evoluzione della linea di riva

In epoca storica la costa compresa fra Bocca di Magra e Livorno è stata interessata da una forte progradazione, iniziata nel VI° sec. A.C. e proseguita, pur con ritmi diversi e forse con brevi fasi erosive, fino alla metà dell'800 (Mazzanti e Pasquinucci, 1983; Pranzini, 2001). Questa espansione delle spiagge fu determinata dall'intenso disboscamento avvenuto nei bacini idrografici dei fiumi che alimentano il litorale e segue in modo lineare lo sviluppo demografico e socio-economico della popolazione toscana (Pranzini, 1994). Il successivo abbandono delle campagne, l'estrazione di inerti dagli alvei fluviali e la costruzione di invasi artificiali ha innescato un processo erosivo sulle spiagge adiacenti alle foci dei due fiumi che più contribuiscono all'alimentazione della costa, l'Arno e il Magra, che si è poi gradualmente propagato ai litorali vicini (Pranzini, 1989). Il confronto fra la cartografia I.G.M.I. del 1878 e quella del 1928 mostra arretramenti della linea di riva di circa 600 metri sul lato settentrionale del delta dell'Arno, non protetto da opere di difesa, e di circa 500 metri sulla spiaggia posta a sud di Bocca di Magra. Lo studio di questa evoluzione su lungo periodo è di grande interesse, ma non può raggiungere l'accuratezza richiesta dalla nostra indagine per problemi di scala della cartografia disponibile, che è al 25.000, ma deriva, per il 1878, dall'ingrandimento delle carte al 50.000. Si è quindi preferito concentrarci sullo studio dell'evoluzione subita dal litorale dal 1938, ossia dal momento nel quale sono disponibili riprese aeree idonee ad un posizionamento della linea di riva sufficientemente accurato da consentire anche una valutazione dell'impatto delle opere marittime sui litorali adiacenti. Nonostante la qualità dei documenti analizzati, riteniamo che la nostra analisi possa essere affetta da alcuni errori dovuti alla iniziale fotorestituzione (Bartolini et al., 1989) ed alla successiva digitalizzazione.

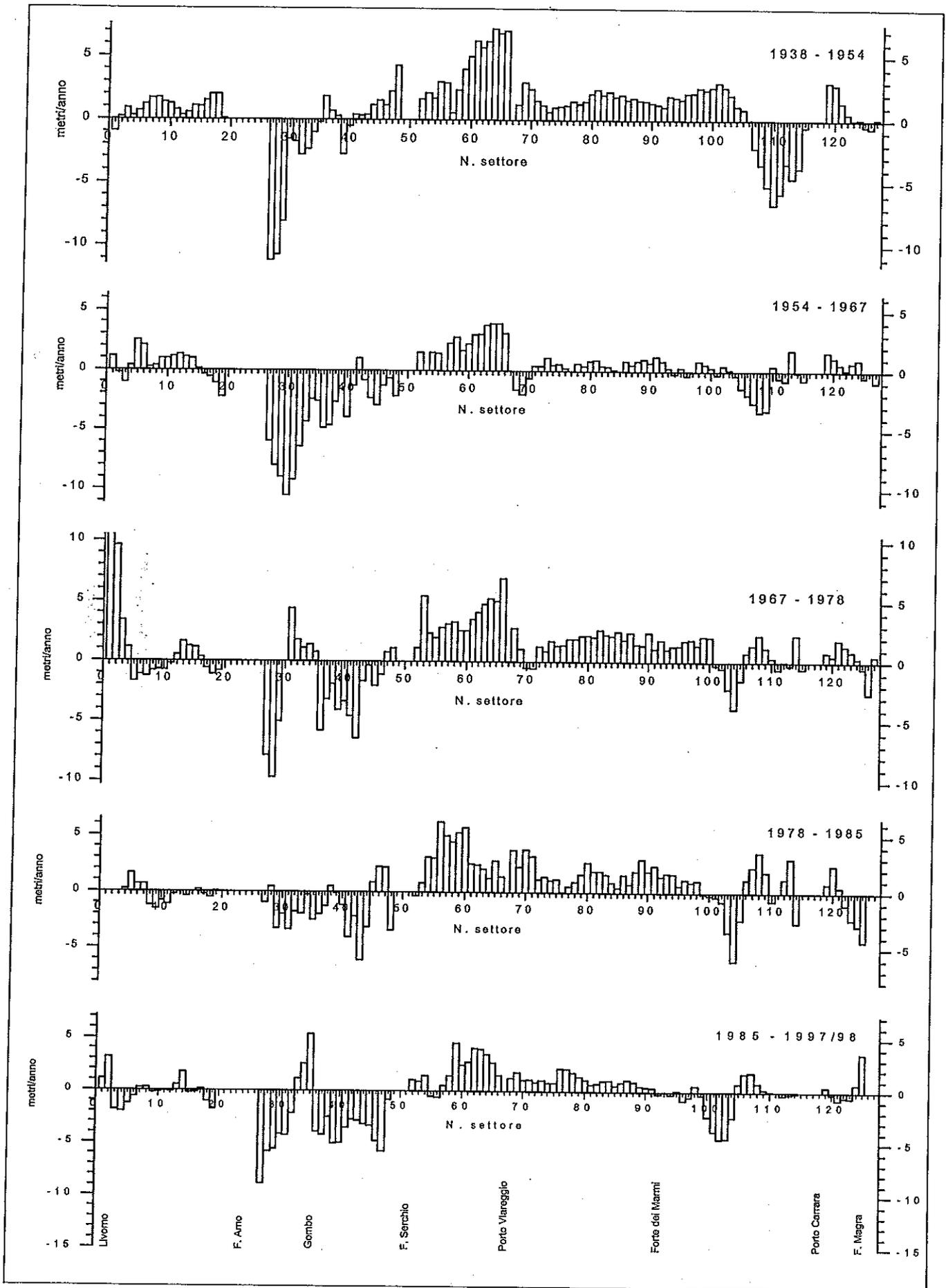


Figura 7 - Tasso di spostamento medio della linea di riva nei vari intervalli di tempo considerati.

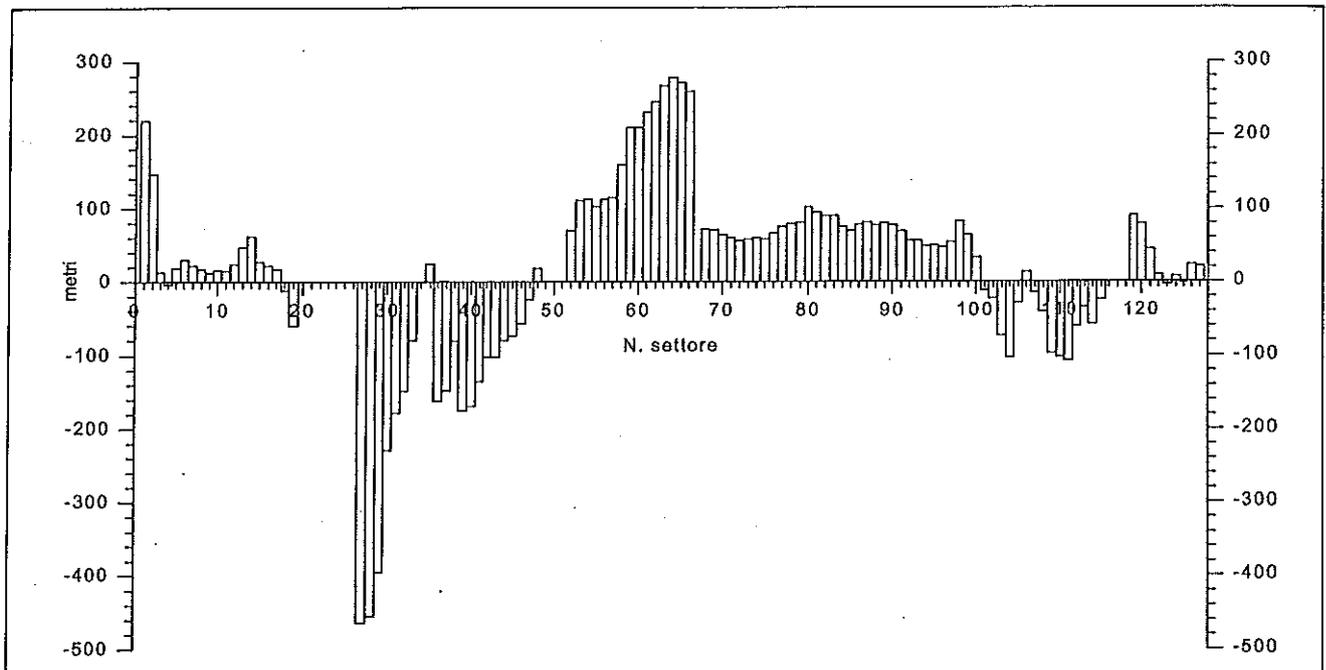


Figure 8 - Spostamento medio della linea di riva fra il 1938 e il 1997/98.

Si deve inoltre tenere presente che la posizione di ciascuna linea di riva dipende, oltre che dal trend generale che vogliamo studiare, anche dalle condizioni metreomarine, sia favorevoli che sfavorevoli, verificatesi poco prima del rilievo. Emblematico è il caso della linea di riva del 1967, che è stata tratta da un volo commissionato dal Genio Civile OO. MM. di Genova per valutare lo stato della costa dopo le intense mareggiate dell'autunno 1966, e che quindi presenta il litorale in uno dei suoi momenti più critici.

Complessivamente però, l'elevato numero di rilievi e le forti variazioni subite dalla gran parte delle spiagge rendono accettabile l'errore intrinseco in questi dati, certamente inferiore agli spostamenti effettivi della linea di riva in molte parti del litorale.

Da Livorno a Bocca d'Arno

Il litorale posto immediatamente a sud della foce dell'Arno è caratterizzato dalle imponenti scogliere aderenti e parallele di Marina di Pisa (Fig. 9), cui fanno seguito opere minori e di varia tipologia (Fig. 10), il più delle volte costruite dagli operatori locali senza uno schema organico, per giungere poi sulla spiaggia di Tirrenia, completamente libera da opere marittime. All'estremità meridionale, oltre la foce del Calambrone, la costa è difesa da una scogliera aderente che protegge i piazzali della zona industriale limitrofa all'area portuale e che termina proprio contro la diga della nuova vasca di colmata realizzata a nord del porto.

Nella Figura 7, che mostra lo spostamento della linea di riva nei vari intervalli di tempo considerati, il tratto corrispondente al litorale di Marina di Pisa (settori 20 ÷ 25) presenta valori uguali a zero in tutti i periodi analizzati dato che la costa è stata stabilizzata dalle scogliere aderenti e parallele. Queste hanno efficacemente protetto l'abitato, pur al costo di ingenti spese di manutenzione per il frequente rifiorimento delle parallele scalzate alla base in un fondale che si è approfondito fino oltre i 7 metri e a quello, ancor più elevato, della perdita di una spiaggia e di un ambiente naturale sui quali si era basato il successo del nuovo insediamento turistico dell'800.

Il processo di espansione dell'erosione dall'apice deltizio verso le spiagge laterali (Pranzini, 1989) viene incentivato dall'allontanamento da costa del flusso detritico dovuto alla riflessione delle onde sulle scogliere parallele, come è dimostrato dal profilo della spiaggia sommersa precedentemente analizzato (Fig. 5b).

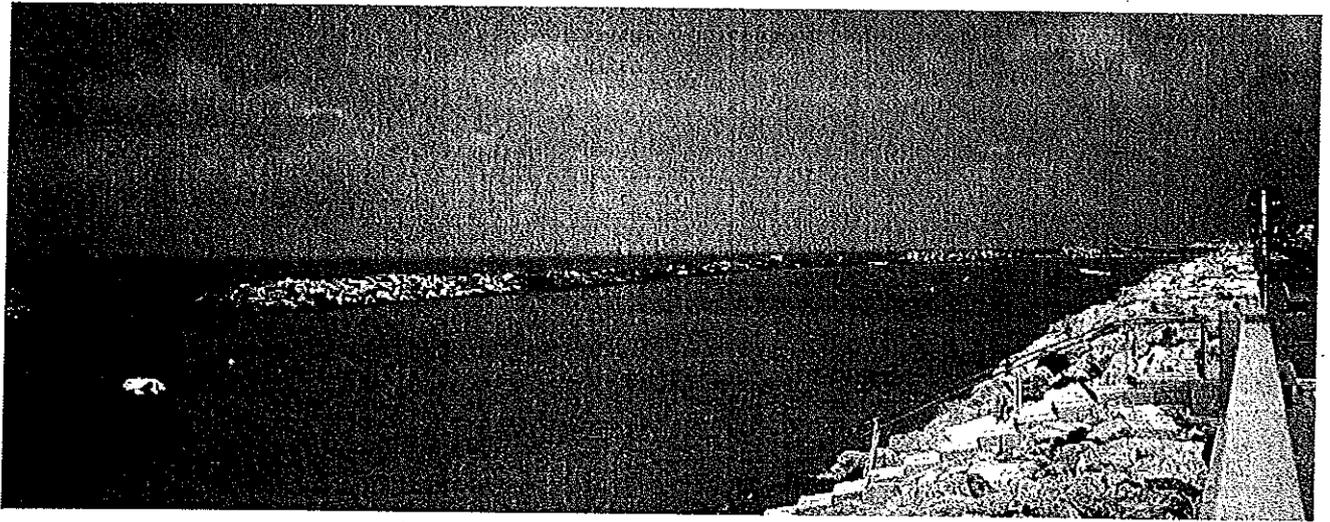
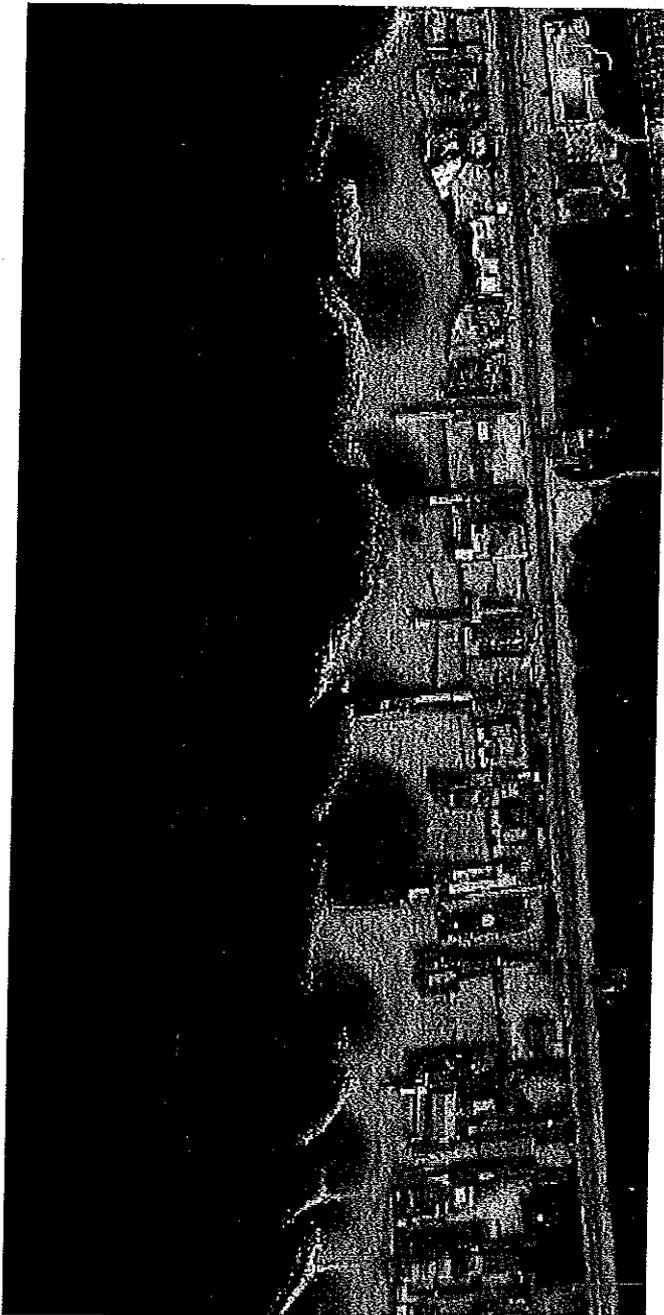


Figura 9 - Difese aderenti e parallele di Marina di Pisa.



Tutto ciò trova una riprova nell'evoluzione delle spiagge meridionali, che si espandono per più di 30 metri (2 m/anno) fra il 1938 e il 1954, ma che vengono interessate, già nel periodo successivo, da un arretramento della linea di riva che sfiora quasi i 15 metri (1,1 m/anno). Successivamente, anche dopo la costruzione delle varie opere di difesa, la tendenza evolutiva non si inverte, e l'erosione prosegue con un tasso analogo, che nel primo settore posto a sud delle parallele (n. 19) raggiunge il valore di 1,77 m/anno fra il 1985 e il 1997.

Le spiagge poste ancora più a sud vengono raggiunte dall'erosione con un certo ritardo, anche se il processo non è così lineare come i modelli potrebbero fare pensare (Pranzini, 1989), in particolare a causa della costruzione delle difese, del verificarsi di eventi meteomarini eccezionali, quale quello dell'autunno 1966 che lascia segni evidenti nel rilievo del 1967, con la spiaggia di Tirrenia (settore 5) erosa per 18,7 metri dopo che aveva goduto di un accrescimento di ben 32,6 m nel periodo precedente (1954-1967) e prima di una espansione di 11,2 metri (1967-1985), e degli effetti *updrift* delle opere del porto di Livorno.

Figura 10 - Le difese presenti sul litorale fra Marina di Pisa e Tirrenia (Foto: Comando base aeromobili del Corpo delle Capitanerie di Porto, Luni-Sarzana; Concessione R.G.S. N. 134 del 17/5/2000).

Comunque, solo nei primi due settori posti a sud di Marina di Pisa (n. 18 e n. 19) l'erosione degli ultimi anni si rimangia più di quanto i precedenti periodi di deposizione avevano lasciato. Su questi la spiaggia arretra, fra il 1938 e il 1997, di 59,5 e di 11,5 metri rispettivamente, mentre la spiaggia di Tirrenia arriva ad una espansione, nello stesso intervallo di tempo, di ben 62,6 metri nel settore 14. Un processo particolarmente interessante si manifesta sulla spiaggia compresa fra Tirrenia e il porto di Livorno, dove Gandolfi e Paganelli (1975) pongono una zona di convergenza fra gli apporti sedimentari dell'Arno, diretti verso sud, e quelli del Calambrone, diretti verso nord. In questa zona la costa ha sempre mostrato una evidente convessità, che però si è progressivamente spostata verso nord via via che si accresceva il porto di Livorno. Si ritiene che ciò sia dovuto all'effetto della riflessione delle onde di Maestrale e, più che altro, di Ponente sulle dighe foranee inclinate, che indurrebbero una controcorrente che impedisce la crescita della spiaggia a ridosso del porto. La costruzione di una nuova scogliera posta in direzione 315° N sul lato settentrionale del porto per la creazione di nuovi piazzali - in corso al momento dell'esecuzione dei rilievi - ha determinato un'ulteriore spostamento verso nord della convessità e l'erosione della spiaggia posta a nord della foce del Calambrone, con il conseguente crollo di alcuni stabilimenti balneari.

Da Bocca d'Arno al porto di Viareggio

Questo tratto di litorale è quello che ha registrato le più intense modificazioni sia fra la metà dell'800 e il 1938, periodo di tempo qui non analizzato, che negli ultimi 60 anni. Ciò è stato messo in evidenza in numerosissimi studi, da quelli pionieristici di Toniolo (1910 e 1927) e di Albani (1940) a quelli via via più recenti di Mori (1956 e 1966), Rapetti e Vittorini (1974), Vittorini (1979) e Pranzini (1983), fino a giungere a quelli basati su modellistica numerica di Milano (1994), Noli e Franco (1989) e De Filippi (1998).

Prima del 1938 l'apice deltizio dell'Arno, sul lobo settentrionale non urbanizzato, aveva già subito un intenso processo erosivo che aveva comportato un arretramento massimo della linea di riva di quasi 800 metri in prossimità della foce, valore che andava gradualmente riducendosi procedendo verso nord, fino a che, dopo circa 2,5 km si entrava in un tratto di litorale in progradazione che terminava in corrispondenza del molo meridionale del porto di Viareggio.

Il processo erosivo sulle spiagge in lato destro della foce dell'Arno si è comunque mantenuto intenso fino ad oggi, con tassi di arretramento che hanno anche superato i 10 metri all'anno (11,1 e 10,7 fra il 1938 e il 1954 nei settori 27 e 28; 10,5 m/anno fra il 1954 e il 1967 nel settore 30) per un arretramento complessivo della linea di riva di altri 464,1 metri nel settore 27 e di 454,4 metri nel settore 28 fra il 1938 e il 1997.

Anche in questo caso, come per quanto avviene a nord del porto di Livorno, l'erosione viene incentivata dalla riflessione delle onde di Maestrale-Ponente sul pennello che, nel 1926, è stato costruito in sponda destra d'Arno allo scopo di impedire la chiusura della foce, favorita dalla nuova configurazione costiera con l'aggetto del lato sinistro protetto dalle opere di difesa di Marina di Pisa.

Il propagarsi dell'erosione verso nord aveva minacciato la spiaggia del Gombo, antistante la Villa presidenziale, che venne difesa con 5 scogliere parallele (Fig. 11) costruite da sud verso nord fra il 1962 e il 1968. Il loro effetto fu inizialmente assai limitato, come si può osservare dalla cartografia di dettaglio pubblicata da Tongiorgi e Vittorini (1983) e dai diagrammi di sintesi di Figura 9.

Nel 1984 le quattro scogliere meridionali vennero allungate determinando una riduzione dell'ampiezza dei varchi, cosa che comportò una rapida evoluzione della spiaggia protetta con la formazione di quattro tomboli che le unirono a costa (Bowman e Pranzini, 2001). Ciò innescò un effetto pennello (Axe et al., 1996) che favorì l'espansione della spiaggia *updrift* incentivando però l'erosione di quella *downdrift*. I settori n. 33 e n. 34, posti a sud delle scogliere, si accrebbero in media di 15,0 e di 33,1 metri fra il 1985 e il 1998, dopo che nel periodo precedente (1978-1985) avevano perso rispettivamente 13,7 e 1,8 metri di spiaggia. La spiaggia del Gombo (settore n. 35) si accrebbe di ben 70 metri fra il 1985 e il 1997, recuperando ampiamente i 17,6 metri persi nel periodo precedente.

L'effetto pennello si fece però sentire sul tratto più settentrionale, che risultava già in forte erosione nel periodo 1954-1978, con arretramenti superiori ai 60 metri nel settore 36, ma che in precedenza aveva risentito positivamente della costruzione dell'armatura di foce del Fiume Morto Nuovo (Fig. 11), tanto che lo stesso settore 36 aveva perso solo 14,1 metri e quello a sud delle difese (n. 38) aveva addirittura visto l'espansione della spiaggia per 3,4 metri. Ebbene, fra il 1985 e il 1997 a nord delle scogliere del Gombo si hanno arretramenti compresi fra i 54,8 metri del settore 37 ed i 32,8 metri del settore 38. La spiaggia assume la forma di una spirale logaritmica (Silvester e Hsu, 1993), con un arretramento fortissimo subito a nord della scogliera n. 5, non rinforzata nei lavori del 1984, (Fig. 11) che induce un processo di *updrift erosion* che determina la scomparsa del tombolo che si era formato a ridosso della quarta scogliera.

Questa spirale ha come *downdrift point* i pennelli di foce del Fiume Morto Nuovo (Fig. 11), da dove parte un'altra spirale che vede un accentuarsi di processi erosivi, prima sul solo settore immediatamente sottoflutto (n. 39; -44,2 metri fra il 1938 e il 1954), poi sempre più a nord e con un'accelerazione dell'erosione dovuta anche all'estensione dei moli, tanto che lo stesso settore 39, dopo arretramenti minori, vede la scomparsa di ben 65,4 metri di spiaggia fra il 1985 e il 1997.

Questa erosione, che localmente vede una incentivazione per la presenza delle scogliere del Gombo e delle protezioni di foce del Fiume Morto Nuovo, deve in realtà essere associata ai processi generali dell'unità fisiografica correlati alla riduzione dell'input sedimentario dell'Arno e con la conseguente migrazione dell'erosione ai due lati della foce. Osservando i grafici di Figura 7 si nota come l'erosione si espande ai settori sempre più set-

tentrionali, fino a raggiungere, nell'ultimo periodo di tempo analizzato, la foce del Fiume Serchio. Al di là di essa vi sono già alcuni settori in erosione (n. 55 e n. 56; -6,8 m e -8,1 m rispettivamente), prima di entrare in quel tratto di litorale, a ridosso del porto di Viareggio, sul quale, proprio grazie all'ostacolo fornito dal molo di sopraflutto, si accumula la gran parte dei sedimenti provenienti da sud, prima dall'Arno ed ora prevalentemente dall'erosione del suo delta. L'espansione della spiaggia è qui estremamente rapida, superando nel primo periodo di tempo considerato i 7 metri all'anno (settore n. 66), per raggiungere un avanzamento complessivo che per ben 4 chilometri supera i 200 metri e per altri 3 km i 100 metri fra il 1938 e il 1997.

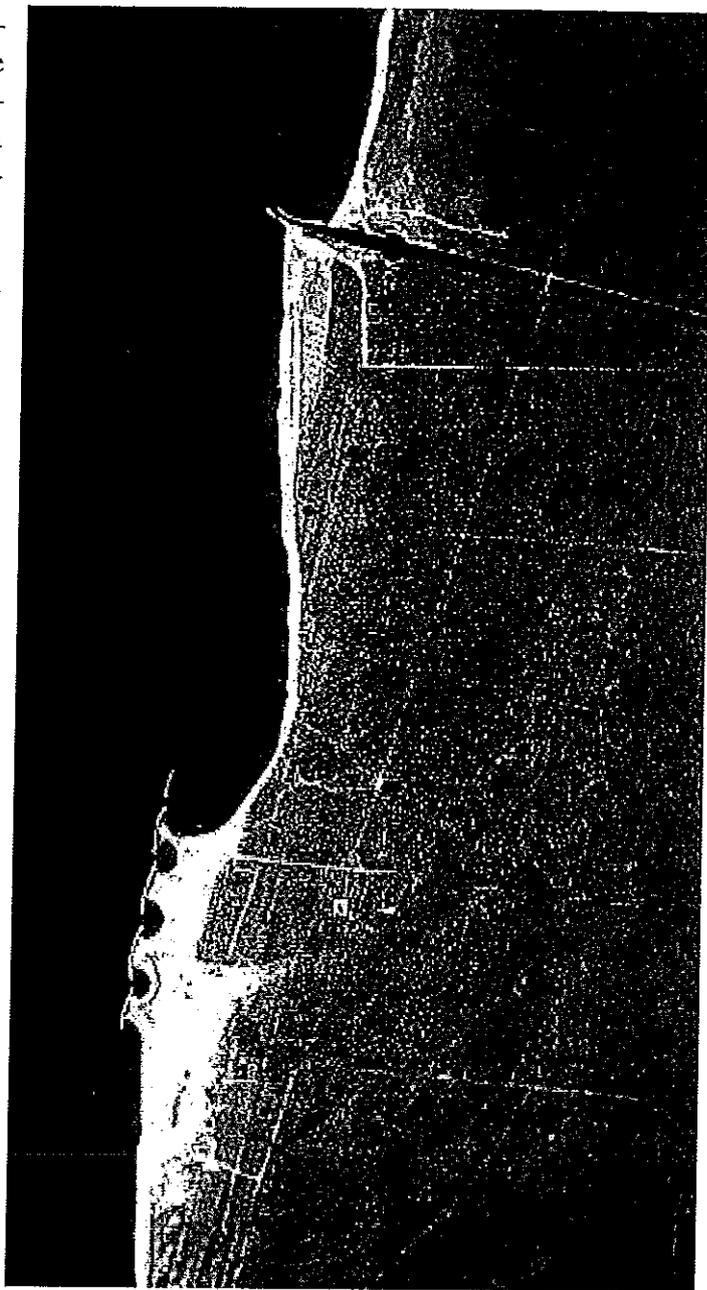


Figura 11 - Le scogliere del Gombo e la foce del Fiume Morto nuovo. La foto del Maggio 1993 mostra i quattro tomboli che collegano a riva le scogliere meridionali. Successivamente, l'approfondimento della *spiral bay* formatasi sottoflutto alle opere ha innescato un'erosione regressiva che ha già demolito il quarto tombolo e ridotto il terzo. Autorizzazione alla divulgazione: S.M.A. n. 42 del 4/2/95.

Dal porto di Viareggio al porto di Marina di Carrara

L'espansione della spiaggia posta a sud del porto, dovuta all'intercettazione del flusso sedimentario operata dal molo di sopraflutto, avrebbe dovuto comportare l'erosione del litorale posto più a nord, ossia della famosissima spiaggia di Viareggio. L'analisi dei grafici relativi all'evoluzione della linea di riva nei vari intervalli di tempo analizzati mette in evidenza che questo fenomeno si è effettivamente verificato, ma non con quella intensità che l'espansione della spiaggia meridionale avrebbe fatto supporre. L'erosione ha di fatto interessato alcuni tratti del litorale settentrionale fra il 1954 e il 1985. I primi due settori (n. 68 e 69) perdono rispettivamente 20,6 e 25,9 metri fra il 1954 e il 1967 e i settori 70 e 71 perdono 5,6 e 5,9 metri fra il 1967 e il 1978, proprio quando i primi due riguadagnano 30,9 e 11,5 metri.

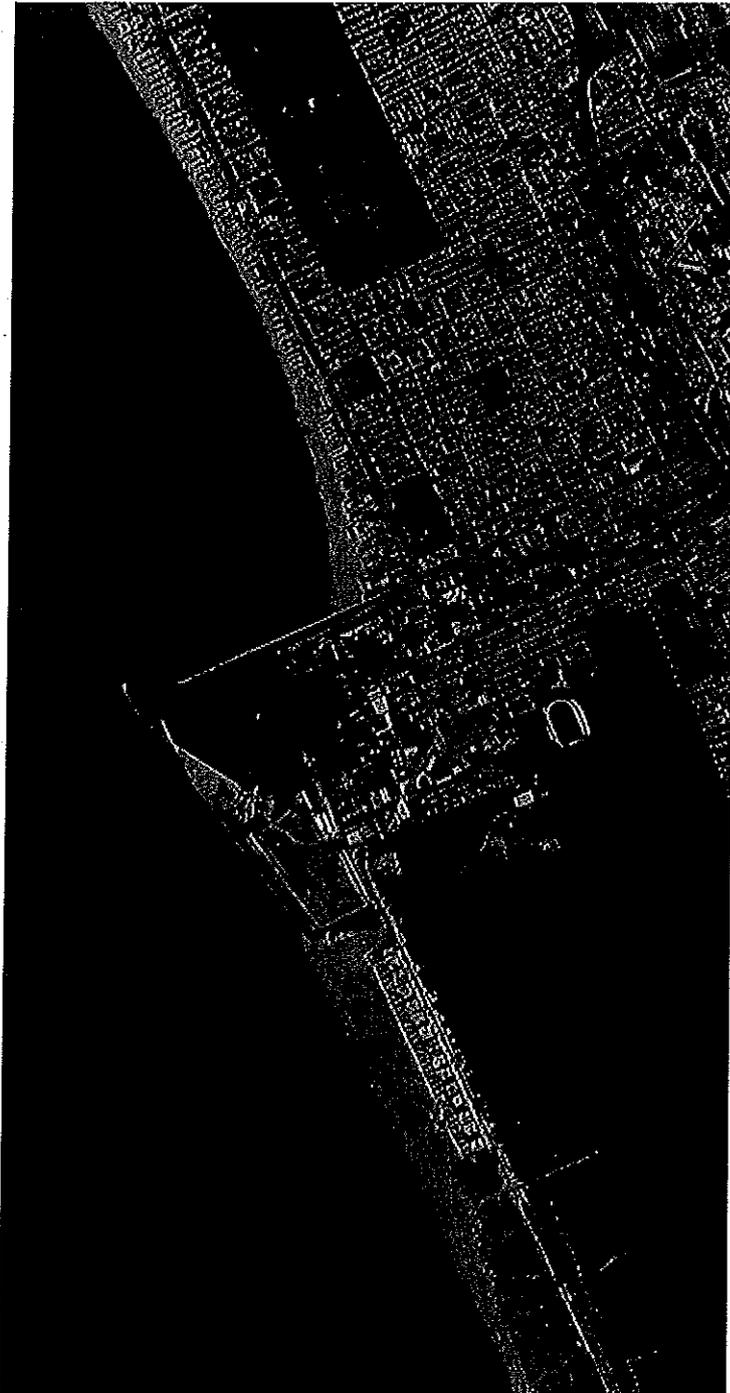


Figura 13 - Porto di Viareggio nel 1978. Autorizzazione alla divulgazione n. 123 dell'11/5/79.

Successivamente tutto il litorale risulta in progradazione, tanto che la linea di riva del 1998 è più avanti di oltre 70 metri nei primi due settori e di circa 60 metri nei due successivi rispetto alla posizione del 1938. I motivi di ciò sono da ricercarsi in più fattori: in primo luogo la forma della diga meridionale non ostruisce completamente il flusso sedimentario avendo una disposizione angolata e non raggiungendo fondali consistenti, tanto che l'imboccatura del porto richiede frequenti interventi di dragaggio; in secondo luogo all'inizio degli anni '70 fu installato un sistema di *by-pass* che prelevava sabbia dalla spiaggia meridionale per refluirlo su quella settentrionale; per ultimo, il molo di sopraflutto è aggettante sulla spiaggia settentrionale e costituisce un riparo per il primo tratto, quello che avrebbe risentito maggiormente dell'intercettazione del flusso sedimentario. E' il suo prolungamento, avvenuto fra il 1969 e il 1973 (Milano, 1994), che determina la forte espansione dei primi due settori fra il 1967 e il 1978 e l'erosione dei due successivi.

Proseguendo verso nord, ed avvicinandoci quindi alla zona di convergenza (Aiello et al., 1976; Gandolfi e Paganelli, 1975), il litorale risulta tutto in progradazione in ogni intervallo di tempo considerato, se non per modesti episodi di arretramento (in realtà di stabilità) con valori di $-0,23$ m e di $-0,34$ m nei settori 77 e 85 fra il 1954 e il 1967.

Entrando nella zona di convergenza si assiste ad una costante e significativa espansione della spiaggia, che supera i 100 metri nel settore 80 (101,5 m; 1,69

m/anno), in corrispondenza della foce del Fosso Motrone, che deve essere considerata come il punto medio di incontro fra i due *drift* per l'intero arco di tempo considerato. Analizzando i valori relativi a ciascun intervallo di tempo, la crescita più forte si sposta dal settore 81 (2,41 m/anno nel 1938-54 e 0,89 m/anno nel 1954-67) al settore 80 (2,19 m/anno nel 1967-78; e 2,65 m/anno nel 1978- 85) per raggiungere infine in modo netto il settore 76 (2,17 m/anno nel 1985-98), come se il flusso da nord del trasporto sedimentario divenisse via via più intenso.

Superata la zona di convergenza si entra in quel tratto di costa in cui il flusso sedimentario è diretto verso sud e crescente, almeno come trasporto potenziale (Aminti et al., 1998) fino a raggiungere un massimo di 351000 m³/anno a Marina di Pietrasanta (Petti, 1998), per poi ridursi gradualmente procedendo verso Bocca di Magra.

Analizzando l'intero intervallo di tempo 1938 ÷ 1997 (Fig. 9) si nota come la spiaggia rimanga caratterizzata da un processo di accumulo con valori compresi in genere fra i 50 e gli 80 metri, fino al settore n. 100, posto circa un kilometro a nord della foce del Cinquale. In questo tratto il processo di accumulo è costante se non per una momentanea inversione di tendenza mostrata dal rilievo del 1967 e certamente dovuta alle già citate mareggiate dell'autunno 1966.

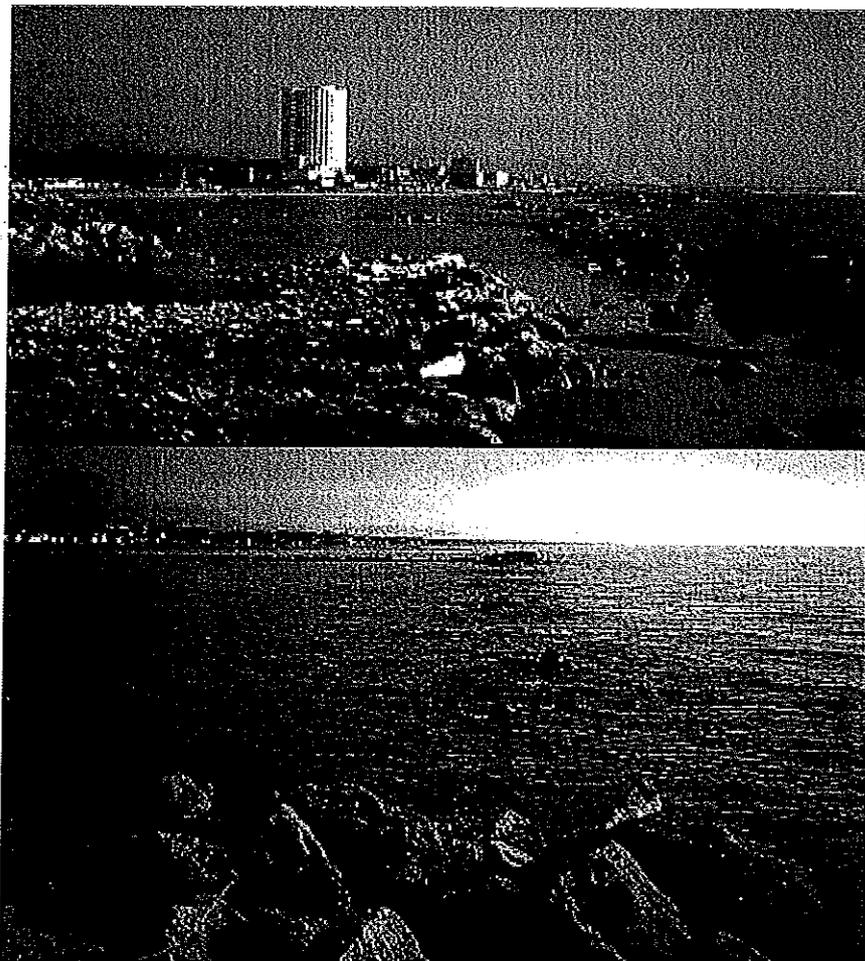
Nell'ultimo intervallo di tempo analizzato (1985 ÷ 1998) già il settore 92 e quelli posti più a nord registrano un processo di arretramento della linea di riva che diventerà via via più importante procedendo verso nord. Sono le propaggini meridionali degli effetti innescati dal porto di Marina di Carrara sulla dinamica sedimentaria della costa apuo-versiliese, effetti che si vanno a sommare, o meglio ad anticipare, a quelli a più ampia scala dovuti alla riduzione dell'apporto solido del Fiume Magra.

La spiaggia di Marina di Ronchi (settori n. 99 ÷ 104), che si era accresciuta fra il 1938 e il 1954 per alcune decine di metri (fra 31,7 m del settore 103 e 47,3 m del settore 101), entra progressivamente in erosione, in particolare quando diventano più efficaci gli interventi di difesa e di ricostituzione della spiaggia di Marina di Massa (Aminti et al., 1998), la cui erosione costituiva la principale fonte di alimentazione delle spiagge poste più a sud, dopo che il porto di Marina di Carrara ostacolava il flusso dei sedimenti provenienti dal Magra che, comunque, si era notevolmente ridotto.

Fra il 1954 e il 1998 la spiaggia di Ronchi perde anche più di 120 metri (121,8 nel settore 104), con notevoli danni all'economia turistica. Qui, nell'ambito di un progetto finanziato dalla Regione Toscana, è stato costruito, nel 1998, un setto sommerso in sacchi di geotessile riempiti con sabbia che è tutt'ora oggetto di monitoraggio. I primi risultati (Aminti et al., 2001) sembrano indicare che su simili strutture possa basarsi una riqualificazione ambientale delle spiagge di Marina di Massa, pesantemente difese con opere che vedono 9,3 km di scogliere su 6,7 km di costa (Rapporto di protezione 1,4). Le prime difese vi vennero costruite nel 1930, ossia poco dopo la costruzione del porto, quando si fecero sentire i primi segni di erosione che imposero rapidamente la chiusura di un tratto della strada litoranea. Seguendo, ed amplificando, il processo erosivo verso sud, vennero costruite difese in scogli di diversa tipologia. L'attuale configurazione (Fig. 13) vede opere aderenti nel primo tratto a sud del porto, seguite da un'alternanza e sovrapposizione di aderenti a parallele, per giungere poi ad un sistema di "vasche" costituite da pennelli chiuse alla testa da una scogliera soffolta a cui, in un paio di casi, se ne aggiunge un'altra in posizione intermedia.

L'evoluzione della linea di riva nel tratto ove una spiaggia è ancora presente vede la migrazione della zona in erosione dal tratto posto subito a sud del porto fino a Marina di Ronchi, con valori che in alcuni settori superano i 100 metri fra il 1938 e il 1998 (102,7 e 106,8 nei settori 110 e 111), ma che sono dovuti a processi rapidi nel primo periodo (1938 ÷ 1954) e progressivamente più lenti con il passare degli anni, quando venivano costruite le difese costiere. Queste hanno localmente portato a dei benefici, come è il caso del sistema di "vasche" che, pur con un forte impatto paesaggistico ed un degrado qualitativo dell'arenile stesso, ha determinato un avanzamento della linea di riva di più di 50 metri in alcuni settori (n. 107 e n. 108 con 55,2 m e 61,7 m rispettivamente fra il 1967 e il 1998), tanto che forti sono le richieste degli operatori turistici per una loro espansione verso sud.

Figura 13 - Difese costiere poste immediatamente a sud del porto di Marina di Carrara (in alto) e davanti all'abitato di Marina di Massa (in basso).



Dal porto di Marina di Carrara a Bocca di Magra

La costruzione del porto di Marina di Carrara (Fig. 14) si inserisce in un momento particolarmente critico per le spiagge settentrionali della nostra unità fisiografica. Abbiamo detto che dal 1881 al 1928 la spiaggia di Fiumaretta, posta immediatamente a sud della foce del Magra, aveva visto arretrare la linea di riva di più di 500 metri a causa della riduzione degli apporti sedimentari del Magra. Prima della costruzione del porto di Marina di Carrara il materiale eroso a Fiumaretta fluiva verso sud e non determinava una consistente crescita della spiaggia di Marina di Carrara che, anzi, dava i primi segni di erosione. Ad una perdita di 634.759 m² di spiaggia emersa nei 2,8 chilometri di costa posti a nord della foce del Parmignola fece riscontro una espansione di soli 20.226 m² sugli 1,5 chilometri meridionali, che terminano dove era in corso la costruzione del porto, i cui effetti si stavano già facendo sentire anche se solo alla radice della diga foranea. La costruzione del porto, iniziata nel 1920, determinò il blocco del flusso sedimentario, almeno nella sua componente grossolana, e l'espansione della spiaggia di Marina di Carrara. La costa iniziò un processo di rotazione che aveva nella foce del Torrente Parmignola il fulcro, ma che non comportò un equilibrio fra aree in erosione ed aree in sedimentazione; infatti, fra il 1928 e il 1938 furono persi ben 291.587 m² di spiaggia nel tratto settentrionale, con un aumento di 172.156 m² su quella meridionale. Non si innescò comunque un consistente flusso sedimentario capace di superare il porto, ma la costa assume una disposizione frontale nei confronti dei mari dominanti, con una perdita delle componenti *longshore* ed un incremento di quelle *offshore* del flusso sedimentario.

Il confronto fra le linee di riva del 1938 e del 1954 mette in evidenza che il processo di erosione nella spiaggia di Fiumaretta si era attenuato (arretramento massimo di 9,8 m; 0,62 m/anno nel settore 125), a seguito dell'assunzione di una configurazione prossima ad una spirale logaritmica (Silvester e Hsu, 1993), mentre l'espansione della spiaggia posta a nord del porto era ancora cospicua, con un avanzamento della linea di riva di 47,9 m (2,99 m/anno) nel settore 118.



Figura 14 - Il porto di Marina di Carrara nel 1978. Autorizzazione alla divulgazione n. 123 dell'11/5/79.

Il processo di accumulo procede rapido anche nel successivo periodo (1954 ÷ 1967), con un avanzamento della linea di riva di 21,1 m (1,62 m/anno), ma quando la spiaggia arriva ad essere disposta parallelamente alle onde dominanti la crescita si fa meno rapida, anche perché l'erosione delle spiagge settentrionali si riduce, anche grazie alla costruzione di opere di difesa. Il settore più prossimo al porto cresce ancora di 8,8, 5,6 e di 6,2 metri nei successivi intervalli di tempo, ma il settore adiacente (n. 119) registra una fase erosiva fra il 1985 e il 1998 (-2,6 metri; 0,2 m/anno) che interessa in modo ancor più consistente i settori posti ancora più a nord.

La spiaggia di Marinella di Sarzana, che ricade in territorio ligure, mostra di aver subito un intenso processo erosivo, con tassi che hanno raggiunto i 4,29 m/anno (-30,1 m) fra il 1978 e il 1985. La costruzione di alcune opere di difesa, pennelli ed una scogliera distaccata obliqua, ha comunque determinato una significativa ricrescita della spiaggia settentrionale, mentre su quella posta immediatamente a sud delle opere (settori 121 ÷ 123) il tasso erosivo è stato nell'ultimo periodo compreso fra 0,54 e 0,74 m/anno. Nel 1999 stati costruiti 4 pennelli ed è stato effettuato un ripascimento con materiale grossolano, intervento tutt'ora oggetto di monitoraggio ma che sembra, per il momento, non aver avuto l'effetto di stabilizzare il litorale.

L'ultimo tratto di questa unità fisiografica (settori 125 ÷ 127) corrisponde con la spiaggia di Fiumaretta, posta sulla sinistra idrografica della foce del Magra (Fig. 15) e colpita, come abbiamo visto, da un fortissimo arretramento fra la fine del secolo XIX e l'inizio del secolo XX. Per questi settori non è disponibile la linea di riva del 1985, ma la costruzione di piattaforme-isola all'inizio degli anni '80 e la loro successiva integrazione con opere parallele soffolte e con collegamenti emersi a terra hanno determinato una sostanziale riduzione dei processi erosivi. Il recente prolungamento del pennello di foce del Fiume Magra ha innescato la rotazione della linea di riva, con forte sedimentazione alla sua radice ed erosione nel tratto posto immediatamente a sud.

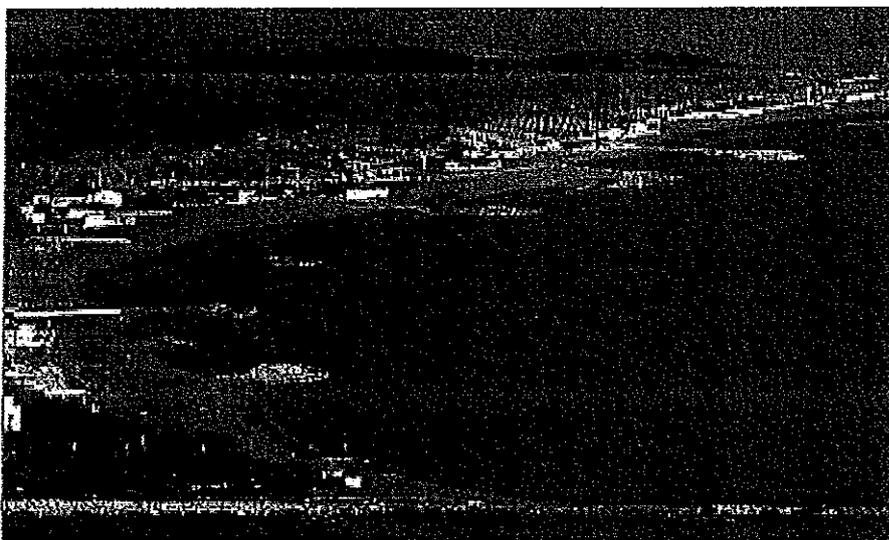


Figura 15 - Le piattaforme-isola costruite negli anni '80 sulla spiaggia di Fiumaretta, con in primo piano il pennello di foce del Magra.

Bilancio sedimentario dell'intero tratto costiero

Data la non disponibilità di rilievi batimetrici di dettaglio ripetuti su tutta l'unità fisiografica, non è possibile giungere ad una valutazione del suo bilancio sedimentario, ma già un'analisi delle superfici di spiaggia emersa guadagnate e perse nei vari settori può consentire di evidenziare i grandi flussi sedimentari in atto su questo litorale.

In Tabella 2 sono riportati i dati relativi alle variazioni areali di spiaggia emersa avvenute nei vari intervalli di tempo considerati in tratti omogenei di litorale e su tutta l'unità fisiografica.

Nel tratto di costa compreso tra Livorno e Bocca d'Arno il bilancio sedimentario risulta positivo tra il 1938 ed il 1978, e negativo tra il 1978 ed il 1998, a conferma del fatto che l'erosione, negli ultimi anni, sta andando ad interessare anche la spiaggia posta a sud di Marina di Pisa, con un'effettiva perdita di materiale. Infatti, la presenza delle scogliere poste a protezione dell'abitato di Marina di Pisa, non solo fa aumentare la turbolenza delle acque antistanti, a causa della riflessione del moto ondoso, e quindi diminuire la capacità di trasporto lungo riva, ma determina anche lo spostamento verso il largo dei flussi sedimentari e, di conseguenza, la dispersione dei materiali sui fondali maggiori (Pranzini, 1995). Il bilancio complessivo tra il 1938 ed il 1997/98 di questo tratto di costa, comunque, è positivo, con un valore della variazione areale pari a 293007 m².

Tra Marina di Pisa ed il porto di Viareggio il bilancio sedimentario è positivo tra il 1938 ed il 1954, è negativo tra il 1954 ed il 1967 (questo valore, comunque, potrebbe non essere significativo in quanto, come detto prima, il rilievo del 1967 fu fatto dopo una forte mareggiata), ritorna poi ad essere positivo sia tra il 1967 ed il 1978 che tra il 1978 ed il 1985, anche se con valori progressivamente minori, fino ad arrivare ad una variazione areale di -244467 m² tra il 1985 ed il 1997/98.

Tabella 2 - Variazioni areali della spiaggia emersa nei vari intervalli di tempo considerati per vasti settori costieri.

	1938-1954	1954-1967	1967-1978	1978-1985	1985-1997/98	1938-1998
Livorno						
Bocca d'Arno	140081	46705	129755	-10907	-12626	293007
Bocca d'Arno						
Porto di Viareggio	292948	-329461	61746	43274	-244467	-175960
Porto di Viareggio						
Porto di Marina di Carrara	263164	-14620	279790	160816	73085	762236
Porto di Marina di Carrara						
Bocca di Magra	60711	28008	16375	-27171	19000	96923
Livorno - Bocca di Magra	756905	-269368	487666	166012	-165008	976207

Il bilancio complessivo tra Marina di Pisa e Viareggio, nei 60 anni considerati, mostra una variazione areale negativa per 175960 m², e questo dimostra che l'accumulo di sedimenti a ridosso del porto di Viareggio non è sufficiente a bilanciare la perdita di materiale causata dalla forte erosione che colpisce il tratto di costa a nord della foce dell'Arno.

Nel tratto di litorale compreso tra il porto di Viareggio ed il porto di Carrara, il valore della variazione areale è positivo in tutti i periodi, tranne che negli anni compresi tra il 1954 ed il 1967, bisogna però sottolineare ancora una volta che i rilievi del 1967, potrebbero risentire dei danni provocati dalla forte mareggiata del 1966. Il bilancio sedimentario complessivo tra il 1938 ed il 1997/98 risulta essere quindi positivo per 762236 m²; dunque, la spiaggia è in ripascimento, grazie anche al fatto che all'interno di questo tratto di costa è presente la zona di convergenza all'interno della quale si depositano sia i sedimenti provenienti da nord che quelli provenienti da sud.

Il tratto di costa compreso tra il porto di Carrara e Bocca di Magra presenta valori di variazione areale positivi, anche se progressivamente minori, nei periodi 1938-1954, 1954-1967, 1967-1978; tra il 1978 ed il 1985 il bilancio sedimentario risulta negativo, mentre ritorna ad essere positivo per 96923 m² tra il 1985 ed il 1997/98.

Se analizziamo la variazione areale della spiaggia emersa nell'intera unità fisiografica, si può vedere che tra il 1938 ed il 1954 la spiaggia subisce un'espansione di 756905 m², per poi perdere 269368 m² tra il 1954 ed il 1967 (leggi mareggiate dell'autunno 1966), e ritornare su valori positivi nei periodi 1967+1978 e 1978+1985, con + 487666 m² e +166012 m² rispettivamente, per chiudere con un deficit di 165008 m² nell'ultimo periodo considerato (1985 + 1997/98). Complessivamente, il bilancio sedimentario nel tratto di costa tra Livorno e Bocca di Magra tra il 1938 ed il 1997/98 risulta essere positivo per 976207 m². L'attuale deficit (periodo 1985 + 1997/98) può essere attribuito a modesti flussi sedimentari in uscita, localizzati in corrispondenza della zona di convergenza e dei porti di Viareggio e di Marina di Carrara, come emergerà dallo studio sedimentologico.

Sedimentologia

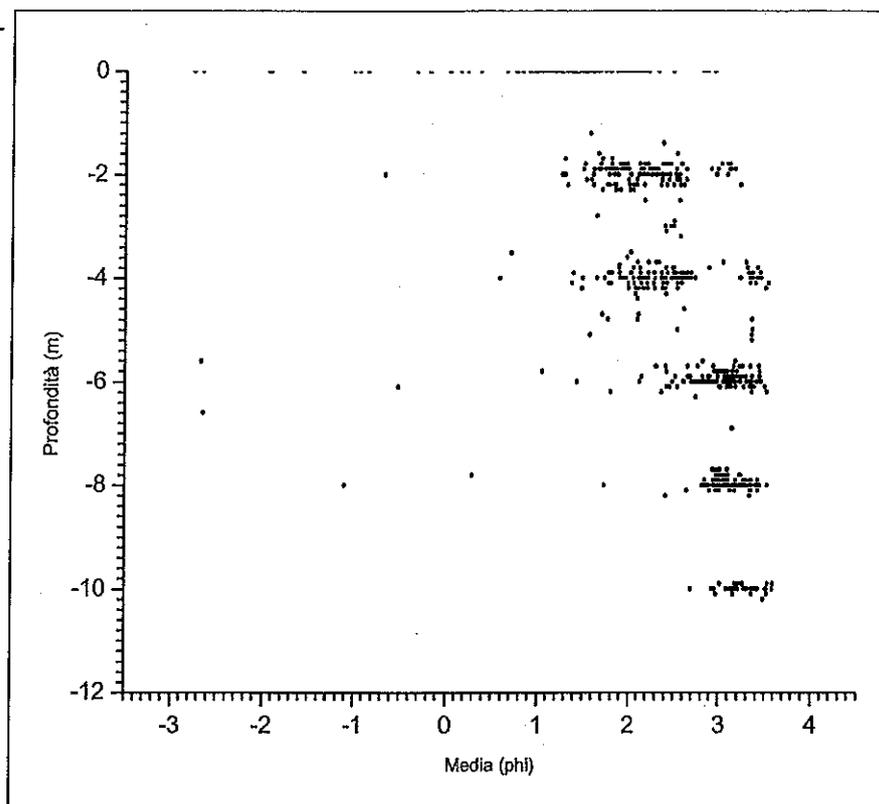
Dimensioni medie (Mz) dei sedimenti

Data la notevole estensione areale della zona studiata e i molteplici elementi sia naturali che antropici che vi si trovano, foci di fiumi di diversa portata, opere portuali e difese costiere, è evidente che il *range* dimensionale dei sedimenti presenti sia estremamente ampio: le dimensioni medie (Mz) vanno infatti da -3,09 a 3,60 phi, ossia dalle *ghiaie* alle *sabbie molto fini*, secondo la classificazione di Krumbein (1934).

In generale si nota una relazione inversa tra dimensioni medie e profondità (Fig. 16), con materiali più grossolani sulla battigia e sedimenti di dimensioni progressivamente minori procedendo verso profondità maggiori. I primi mostrano inoltre una variabilità assai maggiore, tanto da occupare quasi completamente il *range* dimensionale prima descritto, anche se la maggior parte di essi si colloca fra 1 e 2,5 phi.

Anche i sedimenti presenti sulla spiaggia sommersa hanno una evidente variabilità dimensionale, che deriva però da un limitato numero di campioni la cui distribuzione geografica è ben localizzata; in particolare si hanno sedimenti grossolani (da -3 a 1 phi) su fondali di 4 ÷ 8 metri in prossimità del porto di Livorno, derivanti probabilmente dall'erosione delle Secche della Meloria. I rimanenti campioni si distribuiscono, nel grafico Media/Profondità, intorno ad una linea a debole pendenza che da circa 2,2 phi ai 2 metri giunge a 3,3 phi a 10 metri di profondità (Fig. 16). Da notare la ridotta frequenza di sedimenti di Mz compresa fra 2,65 e 2,95 phi alle profondità di 2 e 4 metri, visibile sul grafico Mz/Profondità di Figura 16. Sedimenti appartenenti a questo intervallo sono d'altra parte presenti alla profondità dei 6 metri, e subordinatamente degli 8 metri, in percentuali tali da non evidenziare una lacuna dimensionale. Sembrerebbe quindi che a 2 e 4 metri di profondità non vi siano le condizioni energetiche per la sedimentazione di questi materiali, pur presenti nel paraggio.

Figura 16 - Grafico Media/ Profondità per i 703 campioni analizzati.



Il ridotto *range* dimensionale occupato dai sedimenti presenti sui 10 metri di fondale deriva dal fatto che questi sono stati campionati solo nel tratto Viareggio - Cinquale, dove ovviamente le caratteristiche morfologiche ed energetiche sono estremamente uniformi.

Analizzando l'andamento del valore di M_z lungo riva (Fig. 17) si nota una notevole dispersione dei punti nel tratto di spiaggia compreso tra Cinquale e Bocca di Magra, dove la presenza di varie e differenti opere di difesa determina condizioni di energia estremamente variabili.

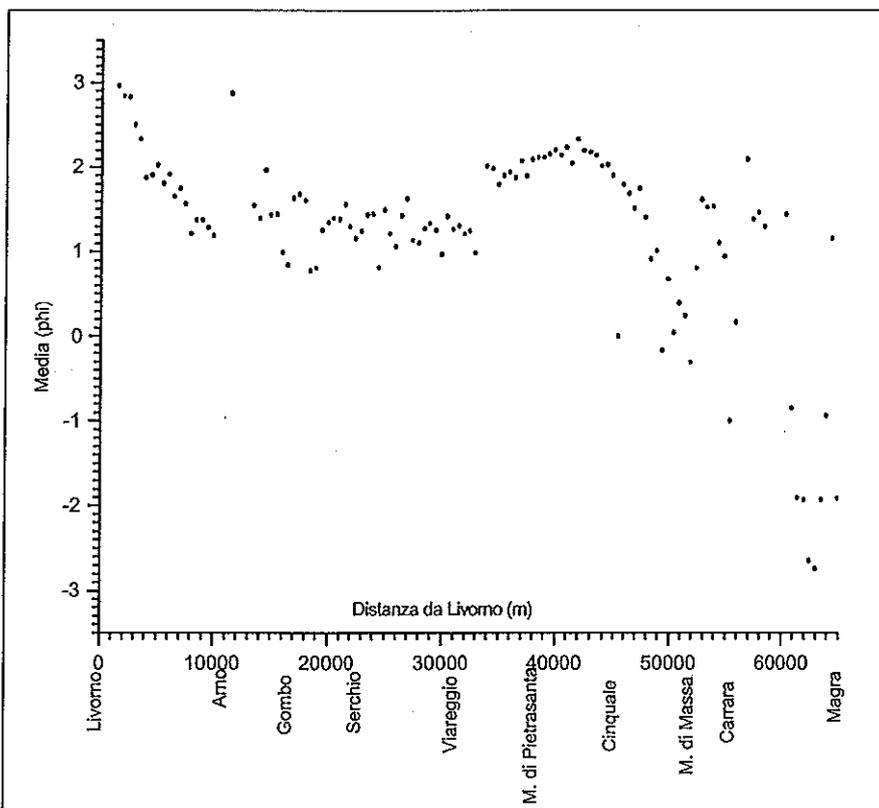


Figura 17 - Andamento delle dimensioni medie (M_z) dei sedimenti di battigia lungo il litorale.

Da questo grafico si può riconoscere la presenza di due sorgenti di materiali più grossolani, l'Arno, con valori compresi fra 0 ed 1 phi, e il Magra che immette sedimenti di dimensioni assai maggiori, fino quasi a -3 phi. Questi sembrano spingersi verso sud fino al Cinquale, verso la zona di convergenza, con un salto dimensionale in corrispondenza del porto di Marina di Carrara, che impedisce il flusso delle ghiaie lungo riva. Queste sono presenti solo in modo sporadico e sono molto probabilmente da associare a piccoli ripascimenti artificiali realizzati alcuni anni addietro in questo tratto di spiaggia, come ad esempio in prossimità della foce del Fosso Magliano.

I sedimenti immessi dall'Arno, o prodotti dall'erosione del suo delta sommerso e dalle spiagge laterali, si spingono verso sud, fino a Livorno, e verso nord, fino alla zona di convergenza, con un evidente processo di *downdrift fining*. Anche in questo caso, la presenza di una struttura foranea, il porto di Viareggio, impedisce il transito delle sabbie più grossolane, tanto che nel grafico di Figura 17 si evidenzia un salto dimensionale di circa 1 phi fra i sedimenti presenti sulla spiaggia posta sopraflutto e quelli che si trovano sottoflutto al porto.

Anche nella distribuzione areale dei valori delle dimensioni medie dei sedimenti ² si possono riscontrare le caratteristiche descritte fino ad ora attraverso i grafici.

Nella parte più meridionale le condizioni di bassa energia presenti subito a nord del porto di Livorno consentono la deposizione di sedimenti molto fini ($3 < Mz < 4$ phi) fino alle profondità di 2 metri. Sempre in questo tratto è presente, alla profondità di 8 metri, un' "isola" di materiale grossolano che, come già detto, potrebbe provenire dall'erosione delle Secche della Meloria.

Procedendo verso nord si ha sempre un'ampia distribuzione di *sabbia molto fine* ($3 < Mz < 4$ phi), fino ad arrivare alle scogliere di Marina di Pisa, dove il limite esterno delle *sabbie fini* ($2 < Mz < 3$ phi) si allontana da costa, probabilmente ad indicare la presenza della fonte di alimentazione e le condizioni di più alta energia dovute alla riflessione delle onde sulle scogliere di Marina di Pisa.

A nord di Bocca d'Arno si ritrovano nuovamente sedimenti fini ($2 < Mz < 3$ phi) alla profondità di 2 metri: qui i livelli energetici sono minori a seguito della diffrazione del moto ondoso dietro la scogliera del pennello della foce dell'Arno.

Procedendo verso il Gombo il passaggio dai sedimenti più grossolani di battigia a quelli più fini dei fondali maggiori è graduale, tranne che subito a nord delle scogliere parallele, dove si trovano sedimenti fini anche in prossimità della riva.

A nord del Fiume Morto Nuovo, fino al porto di Viareggio, la distribuzione delle dimensioni medie dei sedimenti ha un andamento molto irregolare: sedimenti più grossolani ($1 < Mz < 2$ phi) si spingono anche a profondità maggiori dei 4 metri, in particolare in corrispondenza della foce del Serchio, mentre localmente le *sabbie molto fini* ($3 < Mz < 4$ phi) risalgono fino all'isobata dei 4 metri.

L'effetto del porto di Viareggio sulla dinamica costiera, già visto analizzando l'evoluzione della linea di riva, trova un riscontro anche sedimentologico, con la presenza di materiale di dimensioni comprese tra 1 phi e 2 phi fino a profondità di 4 metri.

Subito a nord del porto si ha nuovamente la deposizione di materiali molto fini in prossimità della battigia, dovuta alla bassa energia del moto ondoso nel tratto immediatamente sopraflutto alla diga foranea. Sul suo prolungamento si ha comunque un lobo di *sabbie medie* ($1 < Mz < 2$ phi) in continuità con quelle presenti a sud, sia sulla battigia che sui fondali immediatamente antistanti, a riprova del fatto che i sedimenti di provenienza meridionale, e quindi dall'Arno, riescono ad oltrepassare il porto.

Da Marina di Pietrasanta a Forte dei Marmi, ossia in corrispondenza della zona di convergenza, si ha una distribuzione molto regolare dei valori delle dimensioni medie dei sedimenti, con *sabbia fine* ($2 < Mz < 3$ phi) anche vicino alla battigia. In particolare si può vedere come in corrispondenza della

² La cartografica sedimentologia relativamente ai parametri Media (Mz), Classazione (ϕ_1), Dimensioni del Primo percentile e Percentuale di Frazione fine (< 4 phi) è stata realizzata in scala 1:10.000, ma non è ovviamente possibile allegarla a questa pubblicazione. Si farà riferimento ad essa nella speranza che la fantasia del lettore supplisca alla carenza editoriale.

zona di convergenza sparisca la classe granulometrica più grossolana ($1 < Mz < 2$ phi) presente sia nel tratto di costa a sud che nel tratto di costa a nord di essa.

Procedendo verso nord, tra Forte dei Marmi ed il porto di Marina di Carrara, si ritrova una distribuzione molto irregolare per quanto riguarda le dimensioni medie dei sedimenti, dovuta principalmente ad una serie di opere di difesa (pennelli perpendicolari a riva e scogliere parallele), che alterano la distribuzione dei sedimenti. In questo tratto di costa sono presenti, localmente, sedimenti di dimensioni comprese tra 2 e 3 phi (*sabbia fine*) fino a profondità di 8 metri, e questo potrebbe essere dovuto alla maggiore energia presente davanti alle opere di difesa. Inoltre, in prossimità della battigia, compare anche la classe granulometrica delle *sabbia grossolana* ($0 < Mz < 1$ phi) che potrebbe rappresentare il materiale un tempo giunto dalla foce del Magra. Qui la situazione è comunque assai complessa dato che sono stati fatti, negli ultimi decenni, ripascimenti artificiali dei quali non si hanno indicazioni sia sui volumi versati che sulle caratteristiche granulometriche dei materiali utilizzati. A nord del porto, fino a Bocca di Magra, la distribuzione dei sedimenti è nuovamente influenzata da una serie di opere di difesa (principalmente pennelli perpendicolari a riva), in corrispondenza delle quali si ha un allontanamento da riva di materiale di dimensioni comprese tra 2 e 3 phi (*sabbia fine*).

Classazione (σ_1) dei sedimenti

I sedimenti presenti nel tratto di costa studiato si presentano da *molto ben classati* a *molto poco classati*, ($0,20 \text{ phi} < \sigma_1 < 2,99 \text{ phi}$), secondo la scala proposta da Folk e Ward (1957), anche se la maggior parte di essi è compresa nelle classi *molto ben classati* ($\sigma_1 < 0,35 \text{ phi}$), *ben classati* ($0,35 \text{ phi} < \sigma_1 < 0,5 \text{ phi}$) e *moderatamente ben classati* ($0,5 \text{ phi} < \sigma_1 < 0,71 \text{ phi}$).

In Figura 18 è rappresentata la relazione tra la Classazione e la Profondità dei campioni analizzati. In questo diagramma si evidenzia un'ampia dispersione dei punti rappresentanti i sedimenti di battigia e quelli prelevati alle profondità di 6 e 8 metri a nord di Livorno, dove alle condizioni di bassa energia che favoriscono una bassa Classazione, si associano alla presenza di elementi grossolani prodotti dallo smantellamento delle Secche della Meloria.

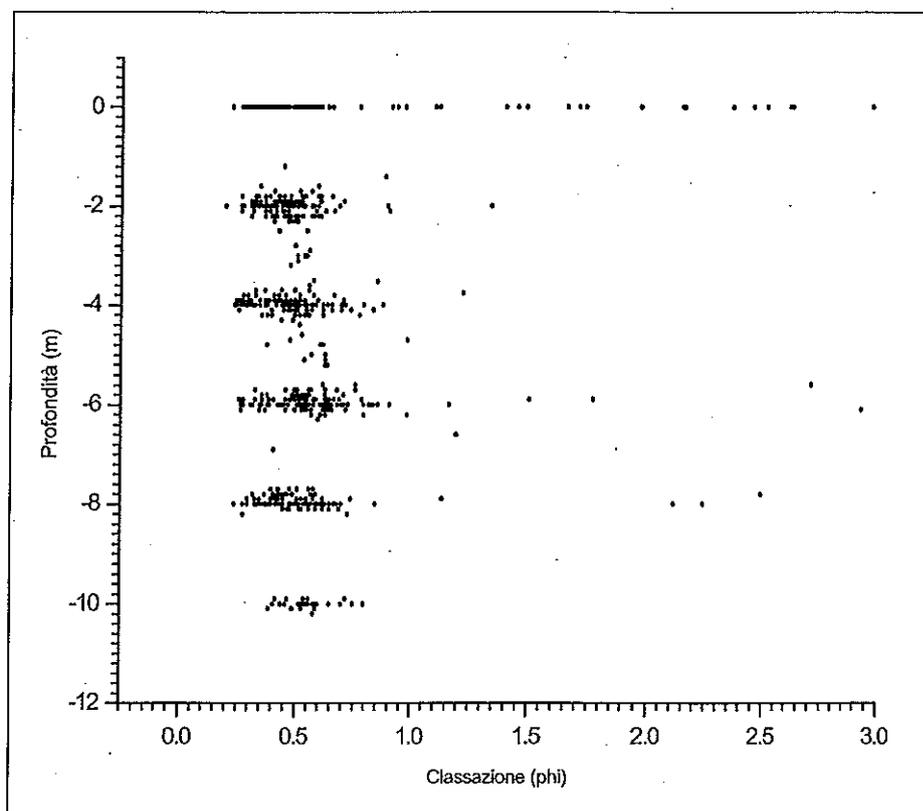


Figura 18 - Grafico Classazione / Profondità per i 703 campioni analizzati.

Il grafico di Figura 19 rappresenta l'andamento della Classazione dei campioni di battigia lungo il tratto di costa studiato. I sedimenti di battigia si presentano, da Livorno fino a Cinquale, da *molto ben classati a moderatamente ben classati* ($0,25 \text{ phi} < \sigma_1 < 0,71 \text{ phi}$) in accordo con le condizioni di alta energia presenti in ambiente di battigia. A nord di Cinquale fino a Bocca di Magra i valori di σ_1 per i sedimenti di battigia sono molto più elevati, raggiungendo il valore di 2,99 phi in corrispondenza della foce del Magra. Questo è dovuto al fatto che sia il Magra che gli altri torrenti che scendono dalle Alpi Apuane trasportano materiali grossolani; inoltre, in questo tratto di costa, sono presenti numerose opere di difesa ed il porto di Marina di Carrara che fanno sì che localmente vi siano condizioni di bassa energia e quindi sedimenti poco classati. Molto più difficile è definire il ruolo che possono giocare materiali utilizzati sporadicamente per ripascimenti artificiali e sui quali non si hanno informazioni.

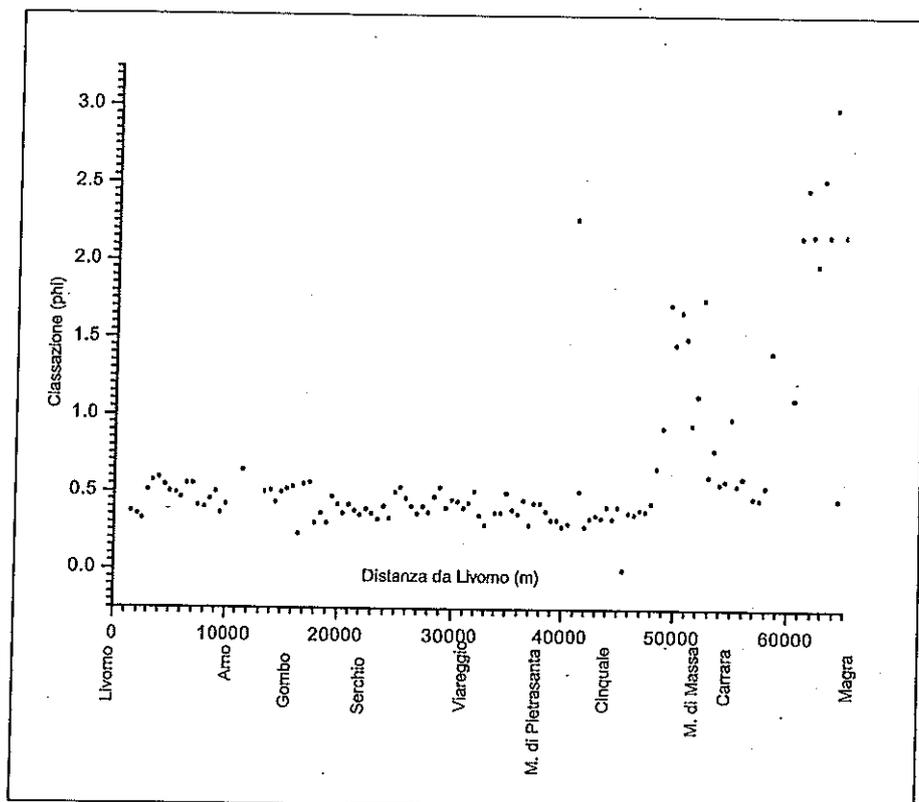


Figura 19 - Andamento della Classazione dei sedimenti di battigia lungo il litorale.

Percentuale di Frazione fine

Dall'esame della percentuale di Frazione fine dei campioni dell'area studiata, si evidenzia come essa aumenti all'aumentare della profondità (Fig. 20) ed in particolare come nei sedimenti di battigia ed in quelli posti alla profondità di 2 metri la percentuale della Frazione fine abbia valori molto bassi, non superando mai il 4%. Dalla profondità di 4 metri fino ai 10 metri la percentuale di Frazione fine aumenta, fino a valori superiori al 40% alla profondità di 10 metri.

Il grafico di Figura 21 mostra l'andamento della percentuale di Frazione fine per i sedimenti di battigia lungo il litorale in esame. Qui si vede come la più alta percentuale di Frazione fine si ha nei sedimenti posti nella spiaggia subito a nord del porto di Livorno, con valori massimi del 2%. La presenza di Frazione fine in questi sedimenti indica un basso livello di energia, infatti, in questo tratto di costa, si risente della protezione dei moli del porto di Livorno.

Tra la foce dell'Arno e la foce del Serchio la percentuale di Frazione fine è quasi totalmente assente, mentre raggiunge valori di 0,25% tra la foce del Serchio ed il porto di Viareggio, qui, la presenza della Frazione fine è dovuta al forte accumulo di sedimenti a ridosso del porto.

A nord di Viareggio, in corrispondenza della zona di convergenza, la percentuale di Frazione fine raggiunge valori dello 0,30%, mentre è praticamente assente nel tratto di costa compreso tra Cinquale e Bocca di Magra. La maggiore percentuale di Frazione fine nei sedimenti di battigia può essere messa in relazione con la loro granulometria. Qui, infatti, i sedimenti hanno dimensioni comprese tra 2 e 2,50 phi (*sabbia fine*) ed hanno maggiori capacità di trattenere le particelle più fini di quanto non lo facciano i materiali più grossolani.

Figura 20 - Grafico Percentuale di Frazione fine / Profondità per i 703 campioni analizzati.

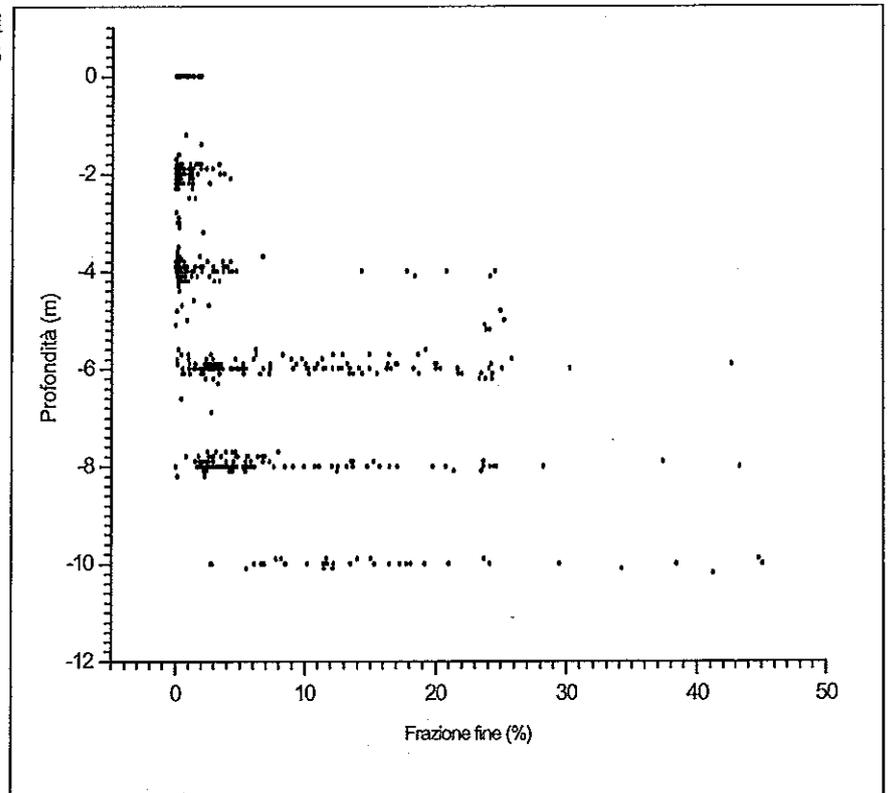
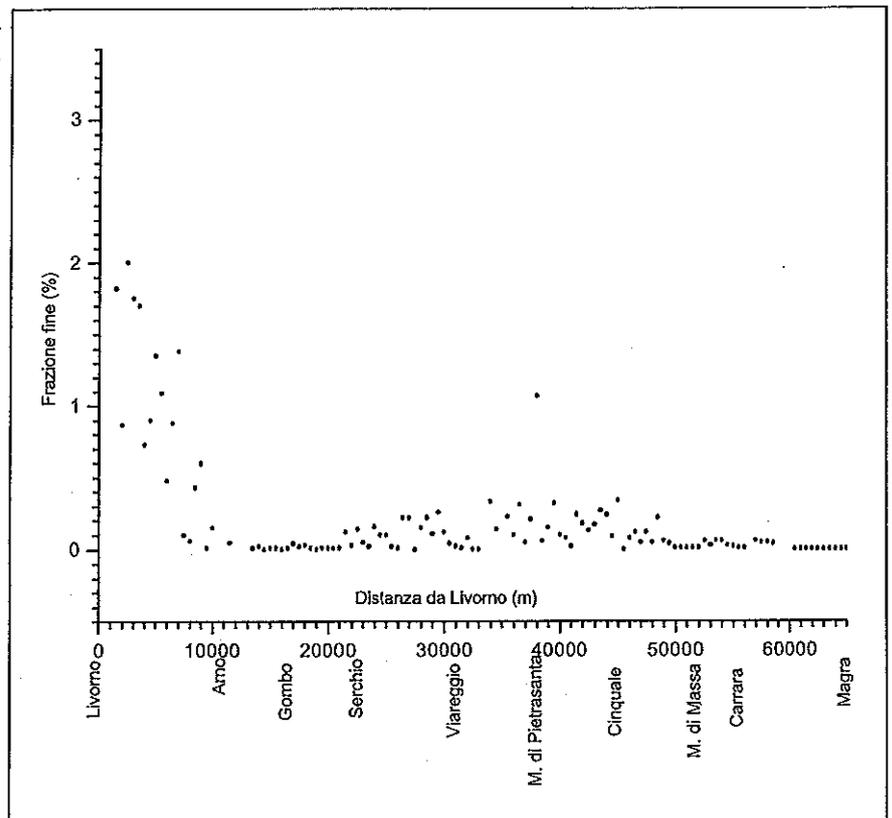


Figura 21 - Andamento della Percentuale di Frazione fine dei sedimenti di battigia lungo il litorale.



Dimensioni del Primo Percentile

Le dimensioni del Primo Percentile dei campioni analizzati variano fra -5,15 e 2,85 phi e mostrano una ovvia correlazione con la profondità di campionamento (Fig. 22), anche se una forte dispersione dei punti è presente sia per i campioni di battigia che per quelli prelevati tra Marina di Ronchi ed il Porto di Carrara (alle profondità di 2 e 4 m) ed a nord del porto di Livorno (alle profondità di 6 e 8 m).

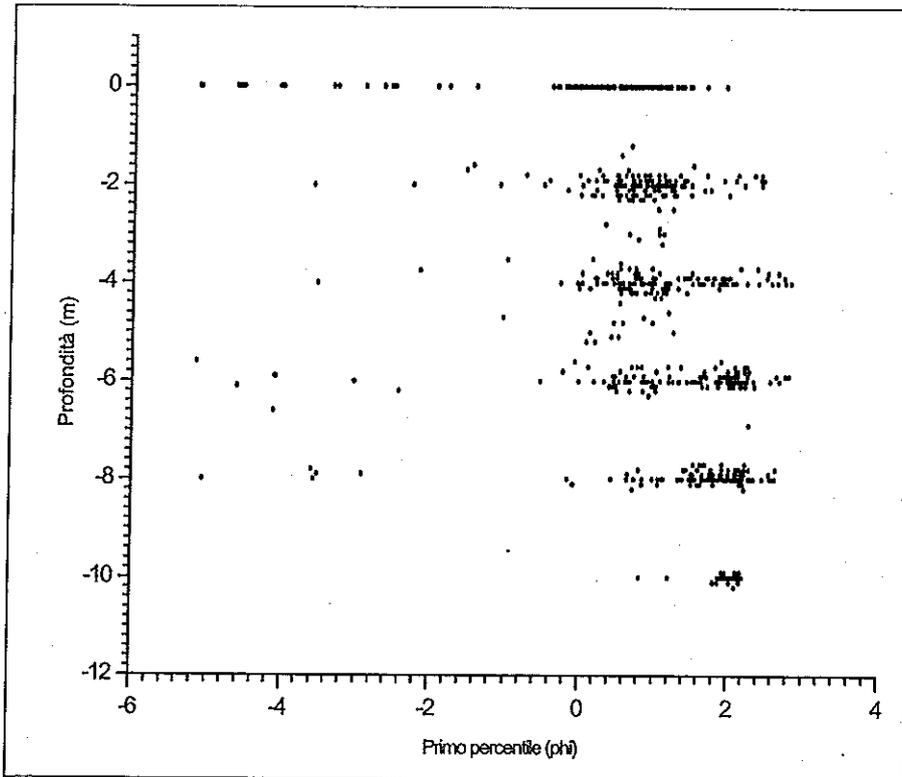


Figura 22 - Grafico Primo Percentile / Profondità per i 703 campioni analizzati.

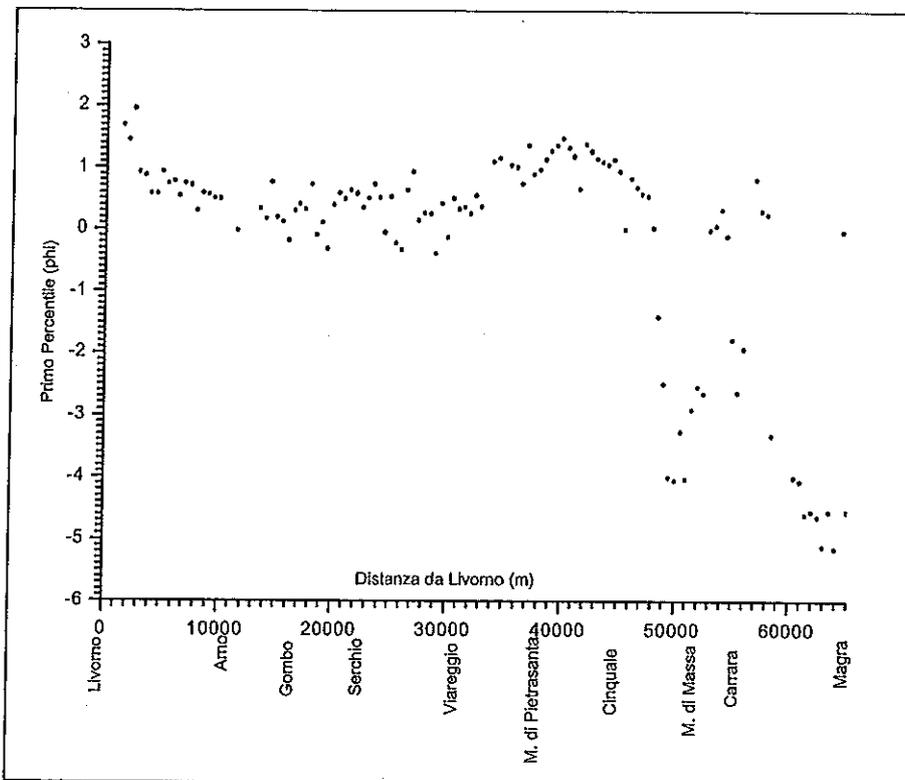


Figura 23 - Andamento delle dimensioni del Primo Percentile dei sedimenti di battigia lungo il litorale.

I campioni prelevati a sud del porto di Carrara presentano questi alti valori delle dimensioni del Primo Percentile molto probabilmente a causa del fatto che in questo tratto di spiaggia sono stati effettuati sporadici ripascimenti che hanno immesso nel sistema una quantità di materiale incompatibile (molto più grossolano) con quello originario e questo ha portato ad un mescolamento di due popolazioni differenti che ora si trovano a convivere nello stesso ambiente e che conferiscono una distribuzione bimodale ai sedimenti a queste profondità (Aminti et al., 1998). L'elevato valore delle dimensioni del Primo Percentile si potrebbe qui anche spiegare con la presenza di materiale grossolano proveniente dal Magra, depositatosi prima della costruzione del porto di Carrara, che costituirebbe oggi un deposito residuale in seguito all'arretramento della linea di riva.

Gli alti valori delle dimensioni del Primo Percentile nei sedimenti a nord del porto di Livorno derivano, come abbiamo già visto, dalla presenza in questo tratto di materiale grossolano proveniente dallo smantellamento delle Secche della Meloria.

I campioni di battigia (Fig. 23) presentano i più alti valori delle dimensioni del I° Percentile (anche -5 ϕ) a nord del porto di Marina di Carrara, che blocca il flusso delle frazioni a granulometria maggiore, mentre la zona di convergenza è caratterizzata da valori estremamente alti di questo parametro.

Asimmetria (Sk_1)

I campioni analizzati mostrano valori di Asimmetria compresi fra -0,91 e +0,78 (da *molto negativi* a *molto positivi* secondo la scala verbale di Folk e Ward, 1957) che non risentono della profondità di campionamento (Fig. 24).

Analizzando i soli campioni di battigia (Fig. 25), nei quali si dovrebbero trovare le caratteristiche rilevate da Friedman (1967) e confermate da Gnaccolini (1968) e Bartolini (1976) su alcune spiagge italiane, ossia una prevalenza di sedimenti con Asimmetria (Sk_1) negativa, si osserva in realtà che su 128 campioni, 60 presentano Asimmetria negativa, con valori compresi tra -0,66 e -0,01, 3 sono simmetrici e 65 hanno Asimmetria positiva con valori compresi tra 0,02 e 0,78. Nessuna correlazione sembra esistere con le caratteristiche morfologiche del litorale, né con la dinamica dei sedimenti evidenziata dagli altri parametri granulometrici.

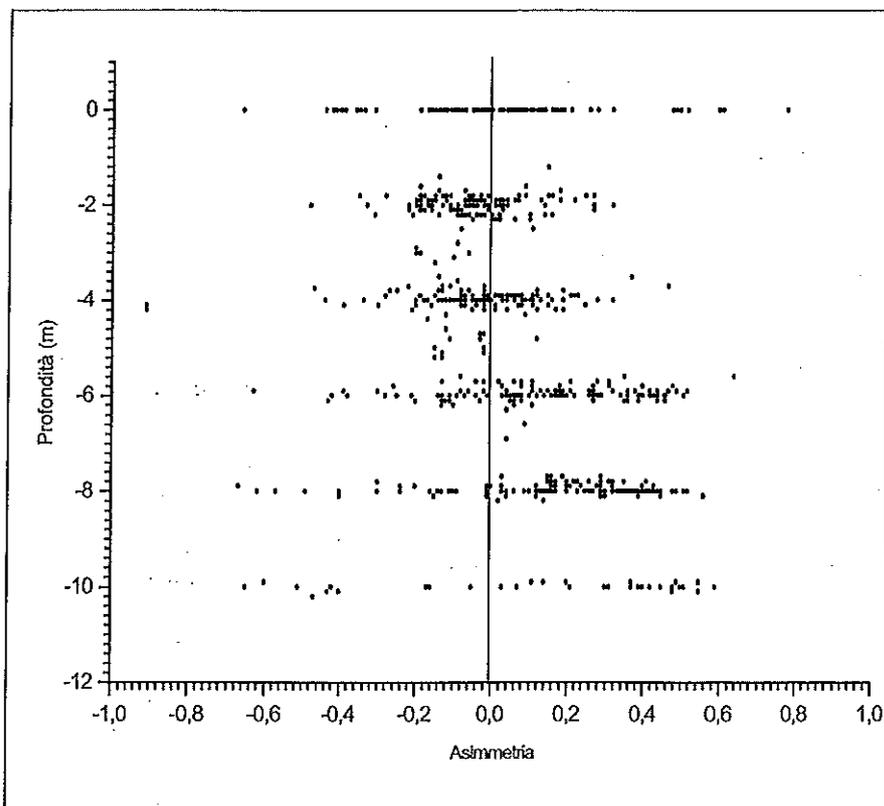


Figura 24 - Grafico Asimmetria (Sk_1)/Profondità per i 703 campioni analizzati.

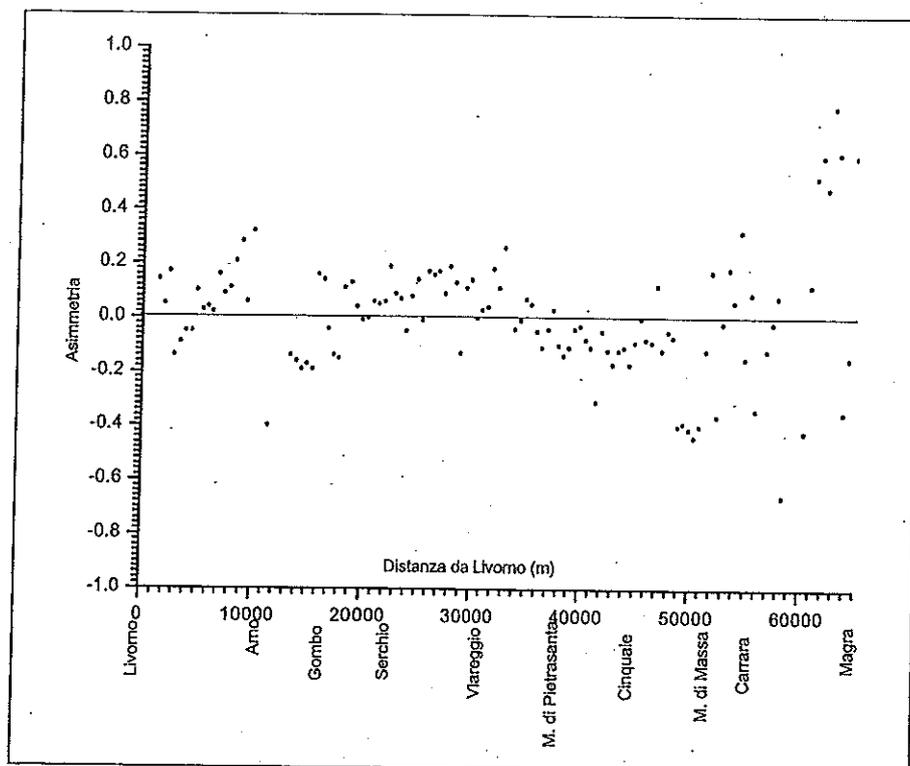


Figura 25 - Andamento della Asimmetria (S_k) dei sedimenti di battigia lungo il litorale.

Conclusioni

Lo studio dell'evoluzione della linea di riva, della morfologia dei fondali e delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa dell'unità fisiografica delimitata da Punta Bianca, a nord, e dal porto di Livorno, a sud, ha consentito di mettere in evidenza i processi morfologici e sedimentologici in atto, riconoscendo cause naturali ed antropiche che operano sia a scala regionale che a scala locale.

L'intero arco costiero è oggi interessato da un modesto deficit sedimentario che determina un arretramento medio della linea di riva di circa 0,23 metri all'anno. Questo valore può costituire una curiosità puramente giornalistica, ma non rende certo giustizia ai grandi processi in atto, che portano a consistenti erosioni in alcuni tratti e all'espansione della spiaggia in altri. Basti pensare al litorale di Marina di Carrara, accresciutosi in media di ben 44,6 metri (0,77 metri/anno) fra il 1938 e il 1998, mentre sulla vicina spiaggia di Marina di Massa si assisteva ad arretramenti che hanno raggiunto i 106 metri. Processi analoghi sono tutt'ora in atto, sia qui che in altri tratti dell'unità fisiografica, come dimostra l'erosione del litorale di San Rossore (20 metri all'anno fra il 1985 e il 1997) e l'avanzamento della spiaggia che si appoggia al molo di sopraflutto del porto di Viareggio (35,58 metri/anno fra il 1985 e il 1997).

Dei 127 settori, lunghi circa 500 metri ciascuno, in cui è stato suddiviso il litorale, ben 53 risultano in netta erosione, 54 sono in avanzamento e 20 devono essere considerati stabili, dato che lo spostamento della linea di riva rientra fra ± 5 metri, valore che può rappresentare l'errore commesso nell'acquisizione e nell'elaborazione dei dati (Bartolini et al., 1989).

Se l'erosione dei settori adiacenti alla foce dell'Arno e di quelli posti immediatamente a sud della foce del Magra, complessivamente 9 km di litorale, può essere imputata alla riduzione dell'apporto sedimentario di questi due fiumi, l'arretramento della linea di riva a nord di San Rossore e a sud del porto di Carrara, per complessivi 15 km, ha una concausa rilevante nella costruzione di opere a mare, siano esse strutture portuali che di difesa costiera.

L'analisi della morfologia dei fondali, sia per quanto riguarda la loro pendenza che la presenza o meno di un sistema di barre, mostra che essa è strettamente correlata con le tendenze evolutive della linea di riva e con la presenza delle varie strutture costiere. I dati, nel loro complesso, mostrano

anche situazioni geografiche a scala regionale, determinate dall'energia del moto ondoso incidente e dalla presenza di flussi sedimentari convergenti o divergenti.

Questi sono confermati anche dalle caratteristiche granulometriche dei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa che consentono di identificare vettori di trasporto *cross-* e *longshore* e l'impatto delle opere antropiche sul flusso sedimentario. Da essi è anche possibile vedere quanto limitati siano oggi gli apporti sedimentari dei fiumi e riconoscere nelle spiagge in erosione le principali fonti di alimentazione dei tratti in avanzamento. Lo studio sedimentologico ha anche contribuito ad una più esatta determinazione della zona di convergenza del *drift* litoraneo, nella quale le caratteristiche granulometriche dei sedimenti e quelle morfologiche dei fondali si distinguono nettamente da quelle che caratterizzano i tratti di litorale interessati da un flusso longitudinale ben determinato.

I risultati di questo studio consentono una nuova visione dell'unità fisiografica, secondo la quale è opportuno ripensare alla funzione delle opere di difesa esistenti e ristrutturarle in modo che esse non favoriscano una dispersione dei sedimenti verso il largo, ma anzi consentano un innalzamento dei fondali antistanti favorendo la dissipazione dell'energia del moto ondoso su di una ampia fascia costiera. Sarebbe anche possibile giungere ad una migliore redistribuzione della "risorsa sabbia", sia riducendo l'incremento delle spiagge in avanzamento, che utilizzando queste come "cava di prestito" per le zone che da anni sono state penalizzate dalla presenza di strutture che hanno impedito la loro naturale alimentazione. Il fatto che l'unità fisiografica nel suo complesso non sia colpita da un grave deficit sedimentario consente l'impostazione di una strategia gestionale diversa, che dovrà comunque basarsi su di una convergenza di interessi da parte dei vari soggetti che fino ad oggi hanno visto nell'erosione delle spiagge più un motivo di conflitto che un'occasione di confronto.

Bibliografia

- Aiello E., Bartolini C., Caputo C., D'Alessandro L., Fanucci F., Fierro G., Gnaccolini M., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Piccazzo M. e 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.
- Albani D. (1940) - *Le spiagge della Toscana settentrionale dalla foce del fiume Magra ai Monti Livornesi*. In "Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane. II - Le spiagge toscane", C.N.R., Roma, pp. 11-86.
- Aminti P., Cammelli C., Cipriani L.E. e Pranzini E. (2001) - *Evaluating the effectiveness of a submerged groin as soft shore protection*. In "Soft shore protection", Studium of mechanics, University of Patras, Greece. Pp. 151-158.
- Aminti P., Iannotta P. e Pranzini E. (1998) - *Morfodinamica di un sistema costiero intensamente protetto: il litorale di Marina di Massa* - Atti dei Conv. Lincei, 154: 263-270.
- Axe P.G., Ilic S. e Chadwick A.J. (1996) - *Evaluation of beach modelling techniques behind detached breakwaters*. 25th Int. Conf. On Coastal Engineering, ASCE, pp. 2036-2049.
- Bartolini C. (1976a) - *Studies of coastal geomorphology: I - Beach grain size features of the Follonica gulf (Southern Tuscany)* - Boll. Soc. Geol. It. 95: 81-88.
- Bartolini C. (1976b) - *Studies of coastal geomorphology: II - Beach changes related to wind direction and wave steepness and incidence near the town of Follonica (Southern Tuscany)* - Boll. Soc. Geol. It. 95: 89-100 -
- Bartolini C., Cipriani L.E., Pranzini E. e Sargentini M. (1989) - *Caratteristiche geomorfologiche ed evoluzione della linea di riva del litorale toscano e criteri di lettura*. In: "Coste toscane", Regione Toscana. pp. 33-56. Cartografia dell'evoluzione della linea di riva in scala 1:5.000.
- Bowman D. e Pranzini E. (2001) - *Erosion within a segmented detached breakwater. The Gombo case, Tuscany, Italy*. Medcoast 01, 23-27 October 2001, Hammamet, Tunisia. Pp. 1479-1487.
- 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
- Chiabrera G., Corradi N. e Fierro G. (1980) - *Le barre della spiaggia sottomarina del litorale toscano (classificazione morfogenetica su base aerofotografica e rilievi batimetrici)*. Atti dell'Accademia di Scienze e Lettere, 37: 3-17.

- De Filippi G. (1998) - *Analisi del trasporto sedimentario e stima dell'evoluzione del litorale compreso tra Foce d'Arno ed il Gombo nella situazione attuale e nell'ipotesi di interventi di stabilizzazione*. Regione Toscana, Rapporto inedito.
- 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.
- Friedman G.M. (1967) - *Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands*. J. Sediment. Petrol. 37: 327-354.
- Gandolfi G. e Paganelli L. (1975) - *Il litorale pisano-versiliese (Area campione Alto Tirreno). Composizione, provenienza e dispersione delle sabbie*. Boll. Soc. Geol. It., 94: 1273-1295.
- Gnaccolini M. (1968) - *Caratteristiche granulometriche di alcuni campioni di sabbie di spiaggia, di dune costiere, di fiume, di ambiente marino epineritico e di arenaria presumibilmente deposte da correnti di torbiditi*. Mem. Soc. Geol. It. 7: 361-378.
- Krumbein W.C. (1934) - *Size frequency distribution of sediments*. J. Sedim. Petrol., 4: 65-77.
- Mazzanti R. e Pasquinucci M. (1983) - *The evolution of the Luni-Pisa coastline (II cent. B.C. - second half of the XIX cent.)*. In: Coastal problems in the Mediterranean Sea, E.C.F. Bird and P. Fabbri Eds, IGU, Commission on Coastal Environment, Bologna 10-14 May 1982.
- Milano V. (1994) - *L'evoluzione e le caratteristiche meteo-marine del litorale compreso tra i porti di Livorno e di Viareggio dal 1864 al 1983*. In "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: 53-90.
- Mori (1966) - *Sulle variazioni del litorale della Tenuta di San Rossore e sui lavori di difesa della linea di spiaggia e della pineta*. Atti Conv. per la difesa del litorale pisano. Amm. Prov. Pisa, pp. 110-115.
- Mori A (1956) - *Le variazioni del litorale della Toscana settentrionale* - La Regione 12, 3 pp.
- Noli A. e Franco L. (1989) - *L'evoluzione del litorale pisano: risultati di uno studio con impiego di modelli matematici* - Comune di Pisa.
- Petti M. (1999) - *Studio generale del litorale compreso fra Bocca di Magra e Tirrenia - Studio del trasporto solido potenziale longshore*. Regione Toscana - ARPAT, PIN Centro Studi Ingegneria, rel. Inedita, 42 pp.
- Pranzini E. (1983) - *Studi di morfologia costiera: IX. L'erosione del delta dell'Arno*. Quad. Museo St. Nat. di Livorno, 4: 7-18.
- Pranzini E. (1989) - *A model for cusped river delta erosion*. 6th Symp. on Coastal and Ocean Management/ASCE. Charleston, SC. Coastal Zone '89. 4345-4357.
- Pranzini E. (1994) - *Bilancio sedimentario ed evoluzione storica delle spiagge*. Il Quaternario, 7: 197-204.
- Pranzini E. (1995) - *Cause naturali ed antropiche nelle variazioni del bilancio sedimentario dei litorali*. Mem. Riv. Geogr. It., N.s. 1: 47-62.
- Pranzini E. (2001) - *Updrift river mouth migration on cusped deltas: two examples from the coast of Tuscany (Italy)*. Geomorphology, 1-2: 125-132.
- Pranzini E. e Rossi L. (1995) - *A new Bruun-Rule-based model: an application to the Tuscany coast, Italy*. MEDCOAST'95. 24-27 Ottobre 1995, Tarragona, Spagna. Pp. 1145-1159.
- Pranzini E. e Saggiocco T. (1994) - *Attuali tendenze evolutive e caratteristiche sedimentologiche del delta dell'Arno*. In "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.
- Rapetti F. e Vittorini S. (1974) - *Osservazioni sulle variazioni dell'ala destra del Delta dell'Arno*. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem., Serie A, 81:25-88.
- Short A.D. (1999) - *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. Wiley, New York. Pp. 379.
- Short A.D. e Aagaard T. (1993) - *Single and multi-bar beach change models*. J. Coastal Research, Special issue, 15: 141-157.
- Silvester R. e Hsu J.R.C. (1993) - *Coastal stabilization: Innovation concepts*. Prentice Hall, New Jersey, 578 pp.
- Tongiorgi M. e Vittorini S. (1983) - *Nuovi dati di osservazione sulla spiaggia campione di S. Rossore (Pisa)*. Atti. Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem. Serie A, 149 pp.

- 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.
- Vittorini S. (1979) - *Variazioni della linea di costa al Gombo (Litorale Pisano)*. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem. Serie A, 84: 91-103.

Manoscritto ricevuto il 14/7/2001, accettato il 12/12/2001.

Appendice 1 - Spostamento medio (m) della linea di riva nei 127 settori in cui è stato diviso il litorale per i vari intervalli di tempo considerati.

Settore	1938-1954	1954-1967	1967-1978	1978-1985	1985-1997-98	1938-1997-98
1	-14,66	14,66	204,90	/	14,51	219,41
2	3,23	-3,23	106,12	/	40,86	146,98
3	13,76	-13,76	37,13	/	-24,43	12,71
4	3,92	4,36	12,53	1,45	-26,43	-4,17
5	10,59	32,57	-18,66	11,17	-16,93	18,74
6	18,72	26,99	-12,33	4,80	-7,68	30,50
7	26,42	3,12	-14,21	4,54	2,58	22,45
8	26,91	4,64	-8,77	-8,69	3,29	17,38
9	21,35	12,61	-7,84	-10,77	-3,06	12,28
10	19,89	12,42	-8,39	-5,72	-2,19	16,01
11	12,11	14,55	-2,23	-8,03	-0,60	15,81
12	5,26	16,59	5,68	-1,82	-1,41	24,29
13	8,81	14,19	17,59	-0,47	6,93	47,05
14	16,92	12,76	13,63	-3,16	22,42	62,56
15	16,32	1,54	12,30	-0,03	-2,80	27,33
16	23,78	-4,34	3,67	0,99	-2,37	21,73
17	31,70	-7,47	-6,59	-1,81	1,52	17,36
18	32,04	-14,21	-12,08	-3,73	-13,49	-11,47
19	1,12	-29,32	-8,74	0,04	-23,05	-59,95
20	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
21	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
22	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
23	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
24	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
25	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
26	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
27	-178,30	-77,56	-86,50	-6,69	-115,05	-464,10
28	-171,18	-103,90	-106,65	2,89	-75,56	-454,39
29	-128,73	-116,56	-55,35	-22,94	-72,41	-395,99
30	-24,73	-136,41	-0,21	-13,92	-53,88	-229,14
31	-28,39	-119,13	48,27	-23,63	-55,19	-178,07
32	-44,36	-83,14	19,43	-12,34	-28,19	-148,60
33	-37,56	-56,14	12,23	-13,68	15,01	-80,13
34	-16,34	-31,11	15,58	-1,78	33,09	-0,57
35	-3,37	-33,41	8,49	-17,60	69,98	24,09
36	29,17	-62,46	-63,98	-14,08	-50,93	-162,28
37	10,80	-60,20	-34,91	-9,02	-54,83	-148,16
38	4,39	-34,61	-21,11	3,39	-32,75	-80,69
39	-44,19	-20,81	-44,54	-0,82	-65,36	-175,72
40	-8,43	-51,19	-36,70	-8,47	-64,55	-169,34
41	6,33	-17,17	-50,19	-28,38	-45,82	-135,23
42	5,27	13,20	-70,57	-15,12	-35,48	-102,70
43	6,49	-11,12	-18,43	-42,33	-36,72	-102,12
44	17,99	-30,24	-3,69	-21,79	-41,60	-79,33

45	23,94	-38,20	-22,32	5,82	-43,36	-74,11
46	18,47	-16,44	-12,19	15,74	-62,39	-56,81
47	35,50	-8,60	8,52	15,42	-74,90	-24,06
48	68,51	-27,91	12,22	-23,75	-11,10	17,96
49	Foce Serchio					
50	Foce Serchio					
51	Foce Serchio					
52	26,15	19,78	12,50	-2,40	13,90	69,92
53	33,90	-0,50	59,91	5,38	11,44	110,12
54	27,09	19,75	26,16	21,64	18,43	113,07
55	47,99	18,65	21,98	20,82	-6,76	102,68
56	46,66	-0,45	31,16	43,50	-8,11	112,76
57	8,77	29,43	34,55	34,81	6,57	114,14
58	37,53	36,14	36,30	31,06	19,00	160,02
59	63,77	21,78	28,42	36,87	59,20	210,05
60	80,19	29,21	28,47	39,97	31,98	209,82
61	100,10	39,13	38,73	17,46	35,65	231,07
62	91,43	39,38	45,03	17,02	52,54	245,39
63	99,39	49,84	52,37	14,27	51,12	266,99
64	115,13	51,30	57,50	8,57	45,39	277,88
65	109,69	51,03	55,53	19,44	34,97	270,67
66	112,96	40,65	76,20	9,58	19,43	258,81
67	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
68	18,88	-20,57	30,95	26,13	16,23	71,62
69	46,76	-25,88	11,50	15,65	23,08	71,10
70	38,70	-8,18	-5,64	26,31	13,32	64,51
71	23,95	5,17	-5,94	22,13	14,54	59,84
72	18,28	4,99	13,94	8,16	11,00	56,37
73	10,08	14,46	9,52	9,65	13,66	57,37
74	16,05	6,48	18,82	7,49	10,61	59,46
75	16,85	7,29	14,75	8,08	10,42	57,39
76	18,54	3,28	15,46	0,02	28,25	65,55
77	23,51	-0,23	20,84	3,68	27,44	75,24
78	20,22	8,11	20,92	6,35	23,05	78,65
79	23,33	5,18	23,67	11,22	17,99	81,38
80	33,08	11,16	24,11	18,58	14,56	101,49
81	38,61	11,59	22,79	13,24	8,42	94,65
82	32,09	5,40	29,19	13,10	9,78	89,57
83	36,03	4,50	24,88	11,35	13,06	89,81
84	29,54	1,26	24,00	6,12	13,43	74,34
85	31,96	-0,34	28,01	2,94	7,38	69,95
86	25,25	10,75	20,28	10,89	10,79	77,97
87	28,15	6,95	27,02	5,17	14,14	81,43
88	24,86	11,20	16,07	13,13	11,44	76,69
89	23,91	13,00	15,38	20,76	6,47	79,52
90	21,62	9,02	27,00	13,32	5,25	76,21
91	19,25	15,53	11,95	16,68	4,92	68,33

92	16,73	11,21	19,94	9,85	-2,61	55,13
93	30,18	3,28	11,63	11,81	-0,94	55,95
94	28,72	-2,75	14,32	11,47	-3,16	48,60
95	26,30	3,82	14,85	4,32	0,58	49,88
96	33,98	-4,42	19,66	8,10	-10,85	46,47
97	34,47	-0,87	20,66	6,28	-6,93	53,62
98	41,04	10,70	15,25	7,65	7,32	81,96
99	37,99	7,60	23,34	-0,84	-4,15	63,93
100	41,24	3,49	22,91	-1,94	30,55	33,15
101	47,34	-3,94	-2,82	-2,82	-49,12	-11,36
102	41,22	5,89	-5,60	-5,60	-58,34	-22,44
103	31,69	1,48	-24,42	-24,42	-57,66	-73,33
104	17,79	-4,92	-42,59	-42,59	-31,71	-104,02
105	13,74	-18,79	-16,82	-16,82	9,66	-29,05
106	0,17	-26,03	8,11	8,11	22,18	12,54
107	-35,00	-34,81	15,60	15,60	23,92	-14,69
108	-56,32	-44,32	24,63	24,63	10,43	-40,94
109	-83,45	-42,65	12,93	12,93	2,82	-97,41
110	-106,67	5,08	3,44	-5,01	0,50	-102,67
111	-92,87	-7,54	-6,38	/	/	-106,79
112	-55,14	-10,21	0,38	8,21	-4,43	-61,19
113	-73,21	22,93	-2,67	21,16	-2,78	-34,57
114	-60,64	-1,47	24,81	-18,81	-1,48	-57,59
115	-8,71	-9,83	-5,92	0,00	0,00	-24,46
116	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
117	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
118	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
119	47,91	21,09	8,83	5,62	6,20	89,64
120	44,32	14,60	5,54	16,77	-2,60	78,63
121	22,15	7,57	20,46	3,38	-9,63	43,91
122	7,88	1,01	14,85	-7,58	-7,00	9,16
123	0,74	9,03	9,57	-16,55	-7,14	-4,35
124	1,44	12,85	3,60	-20,41	9,21	6,68
125	-7,00	-6,34	-5,72	-30,06	46,95	-2,17
126	-9,85	-0,12	-28,83	Dati mancanti	Dati mancanti	23,23
127	1,98	-11,91	5,52	Dati mancanti	Dati mancanti	21,13

Appendice 2 - Tasso di spostamento medio (m/anno) della linea di riva nei 127 settori in cui è stato diviso il litorale per i vari intervalli di tempo considerati.

Settore	1938-'54	1954-'67	1967-'78	1978-'85	1985-'97/'98	1938-'97/'98
1	-14,66	14,66	204,90	/	14,51	219,41
2	3,23	-3,23	106,12	/	40,86	146,98
3	13,76	-13,76	37,13	/	-24,43	12,71
4	3,92	4,36	12,53	1,45	-26,43	-4,17
5	10,59	32,57	-18,66	11,17	-16,93	18,74
6	18,72	26,99	-12,33	4,80	-7,68	30,50
7	26,42	3,12	-14,21	4,54	2,58	22,45
8	26,91	4,64	-8,77	-8,69	3,29	17,38
9	21,35	12,61	-7,84	-10,77	-3,06	12,28
10	19,89	12,42	-8,39	-5,72	-2,19	16,01
11	12,11	14,55	-2,23	-8,03	-0,60	15,81
12	5,26	16,59	5,68	-1,82	-1,41	24,29
13	8,81	14,19	17,59	-0,47	6,93	47,05
14	16,92	12,76	13,63	-3,16	22,42	62,56
15	16,32	1,54	12,30	-0,03	-2,80	27,33
16	23,78	-4,34	3,67	0,99	-2,37	21,73
17	31,70	-7,47	-6,59	-1,81	1,52	17,36
18	32,04	-14,21	-12,08	-3,73	-13,49	-11,47
19	1,12	-29,32	-8,74	0,04	-23,05	-59,95
20	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
21	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
22	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
23	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
24	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
25	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
26	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
27	-178,30	-77,56	-86,50	-6,69	-115,05	-464,10
28	-171,18	-103,90	-106,65	2,89	-75,56	-454,39
29	-128,73	-116,56	-55,35	-22,94	-72,41	-395,99
30	-24,73	-136,41	-0,21	-13,92	-53,88	-229,14
31	-28,39	-119,13	48,27	-23,63	-55,19	-178,07
32	-44,36	-83,14	19,43	-12,34	-28,19	-148,60
33	-37,56	-56,14	12,23	-13,68	15,01	-80,13
34	-16,34	-31,11	15,58	-1,78	33,09	-0,57
35	-3,37	-33,41	8,49	-17,60	69,98	24,09
36	29,17	-62,46	-63,98	-14,08	-50,93	-162,28
37	10,80	-60,20	-34,91	-9,02	-54,83	-148,16
38	4,39	-34,61	-21,11	3,39	-32,75	-80,69
39	-44,19	-20,81	-44,54	-0,82	-65,36	-175,72
40	-8,43	-51,19	-36,70	-8,47	-64,55	-169,34
41	6,33	-17,17	-50,19	-28,38	-45,82	-135,23
42	5,27	13,20	-70,57	-15,12	-35,48	-102,70
43	6,49	-11,12	-18,43	-42,33	-36,72	-102,12
44	17,99	-30,24	-3,69	-21,79	-41,60	-79,33
45	23,94	-38,20	-22,32	5,82	-43,36	-74,11
46	18,47	-16,44	-12,19	15,74	-62,39	-56,81

47	35,50	-8,60	8,52	15,42	-74,90	-24,06
48	68,51	-27,91	12,22	-23,75	-11,10	17,96
49	Foce Serchio					
50	Foce Serchio					
51	Foce Serchio					
52	26,15	19,78	12,50	-2,40	13,90	69,92
53	33,90	-0,50	59,91	5,38	11,44	110,12
54	27,09	19,75	26,16	21,64	18,43	113,07
55	47,99	18,65	21,98	20,82	-6,76	102,68
56	46,66	-0,45	31,16	43,50	-8,11	112,76
57	8,77	29,43	34,55	34,81	6,57	114,14
58	37,53	36,14	36,30	31,06	19,00	160,02
59	63,77	21,78	28,42	36,87	59,20	210,05
60	80,19	29,21	28,47	39,97	31,98	209,82
61	100,10	39,13	38,73	17,46	35,65	231,07
62	91,43	39,38	45,03	17,02	52,54	245,39
63	99,39	49,84	52,37	14,27	51,12	266,99
64	115,13	51,30	57,50	8,57	45,39	277,88
65	109,69	51,03	55,53	19,44	34,97	270,67
66	112,96	40,65	76,20	9,58	19,43	258,81
67	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
68	18,88	-20,57	30,95	26,13	16,23	71,62
69	46,76	-25,88	11,50	15,65	23,08	71,10
70	38,70	-8,18	-5,64	26,31	13,32	64,51
71	23,95	5,17	-5,94	22,13	14,54	59,84
72	18,28	4,99	13,94	8,16	11,00	56,37
73	10,08	14,46	9,52	9,65	13,66	57,37
74	16,05	6,48	18,82	7,49	10,61	59,46
75	16,85	7,29	14,75	8,08	10,42	57,39
76	18,54	3,28	15,46	0,02	28,25	65,55
77	23,51	-0,23	20,84	3,68	27,44	75,24
78	20,22	8,11	20,92	6,35	23,05	78,65
79	23,33	5,18	23,67	11,22	17,99	81,38
80	33,08	11,16	24,11	18,58	14,56	101,49
81	38,61	11,59	22,79	13,24	8,42	94,65
82	32,09	5,40	29,19	13,10	9,78	89,57
83	36,03	4,50	24,88	11,35	13,06	89,81
84	29,54	1,26	24,00	6,12	13,43	74,34
85	31,96	-0,34	28,01	2,94	7,38	69,95
86	25,25	10,75	20,28	10,89	10,79	77,97
87	28,15	6,95	27,02	5,17	14,14	81,43
88	24,86	11,20	16,07	13,13	11,44	76,69
89	23,91	13,00	15,38	20,76	6,47	79,52
90	21,62	9,02	27,00	13,32	5,25	76,21
91	19,25	15,53	11,95	16,68	4,92	68,33
92	16,73	11,21	19,94	9,85	-2,61	55,13
93	30,18	3,28	11,63	11,81	-0,94	55,95
94	28,72	-2,75	14,32	11,47	-3,16	48,60
95	26,30	3,82	14,85	4,32	0,58	49,88

96	33,98	-4,42	19,66	8,10	-10,85	46,47
97	34,47	-0,87	20,66	6,28	-6,93	53,62
98	41,04	10,70	15,25	7,65	7,32	81,96
99	37,99	7,60	23,34	-0,84	-4,15	63,93
100	41,24	3,49	22,91	-1,94	30,55	33,15
101	47,34	-3,94	-2,82	-2,82	-49,12	-11,36
102	41,22	5,89	-5,60	-5,60	-58,34	-22,44
103	31,69	1,48	-24,42	-24,42	-57,66	-73,33
104	17,79	-4,92	-42,59	-42,59	-31,71	-104,02
105	13,74	-18,79	-16,82	-16,82	9,66	-29,05
106	0,17	-26,03	8,11	8,11	22,18	12,54
107	-35,00	-34,81	15,60	15,60	23,92	-14,69
108	-56,32	-44,32	24,63	24,63	10,43	-40,94
109	-83,45	-42,65	12,93	12,93	2,82	-97,41
110	-106,67	5,08	3,44	-5,01	0,50	-102,67
111	-92,87	-7,54	-6,38	/	/	-106,79
112	-55,14	-10,21	0,38	8,21	-4,43	-61,19
113	-73,21	22,93	-2,67	21,16	-2,78	-34,57
114	-60,64	-1,47	24,81	-18,81	-1,48	-57,59
115	-8,71	-9,83	-5,92	0,00	0,00	-24,46
116	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
117	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
118	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere	Scogliere
119	47,91	21,09	8,83	5,62	6,20	89,64
120	44,32	14,60	5,54	16,77	-2,60	78,63
121	22,15	7,57	20,46	3,38	-9,63	43,91
122	7,88	1,01	14,85	-7,58	-7,00	9,16
123	0,74	9,03	9,57	-16,55	-7,14	-4,35
124	1,44	12,85	3,60	-20,41	9,21	6,68
125	-7,00	-6,34	-5,72	-30,06	46,95	-2,17
126	-9,85	-0,12	-28,83	Dati mancanti	Dati mancanti	23,23
127	1,98	-11,91	5,52	Dati mancanti	Dati mancanti	21,13