

Caratteristiche morfologiche e sedimentologiche di una zona di convergenza del trasporto litoraneo (Versilia, Toscana)

Enzo Pranzini

Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze
Borgo Albizi 28, 50122 Firenze - epranzini@unifi.it

Riassunto

Le spiagge della Versilia costituiscono, nel quadro regionale e nazionale, un raro esempio di litorale sabbioso in continua progradazione senza che questo processo sia dovuto allo sbarramento del trasporto litoraneo o alla costruzione di difese costiere. Questa condizione è garantita dalla posizione del tratto in esame rispetto al sistema di cellule litoranee responsabili del flusso sedimentario lungo la costa della Toscana settentrionale. In Versilia si colloca infatti la convergenza fra un flusso proveniente da nord, che trasporta i sedimenti immessi nel sistema costiero dal F. Magra, ed uno proveniente da sud, che porta in quest'area i sedimenti dell'Arno e del Serchio. Con la riduzione dell'apporto sedimentario di questi fiumi, l'alimentazione delle spiagge della Versilia avviene di fatto, oggi, grazie all'erosione dei litorali adiacenti alle foci fluviali.

Nel presente lavoro si analizzano gli studi che in passato hanno portato all'identificazione di questa zona di convergenza e si definisce con maggiore precisione la sua posizione attraverso lo studio dell'evoluzione della linea di riva dal 1938 al 1998 e delle caratteristiche tessiturali dei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa. La zona di convergenza risulta essere quella in cui massima è stata la progradazione della linea di riva; qui si ritrovano anche le sabbie più fini e meglio classate di tutto il litorale. I vettori di trasporto tracciati con il metodo di Gao e Collins (1992) mettono in evidenza una circolazione assai più complessa dove, comunque, appare un flusso *offshore* che è possibile mettere in relazione con la zona di convergenza.

Parole chiave: trasporto litoraneo, cellule litoranee, granulometria, Toscana.

Abstract

The beaches in Versilia represent, at regional and national levels, an uncommon case of shoreline accretion without artificial interception of littoral transport or construction of shore protection structures. Such favourable condition is produced by the location of this coastal sector within the system of littoral cells in Northern Tuscany. In Versilia, we have the convergence of a flux from the north, transporting sediments from the Magra River, and another one from the south, carrying to this area inputs from Arno and Serchio rivers. Due to the reduction in sediment input from the Tuscan rivers, these beaches are now actually fed by sand eroded from the sectors adjacent to the river mouths.

Previous papers in which this converge is discussed are here analysed, and a more accurate location is provided for the boundary of the littoral cells, through shoreline evolution analysis from 1938 to 1998, as well as studies on nearshore sediments. The cell boundary is located where shoreline accretion reaches its maximum; this is also where the finest and best sorted sands from this littoral system are found. Gao and Collins (1992) transport vectors map highlights a more complex cell pattern with an offshore flux possibly related to the convergence area.

Keywords: longshore transport, littoral cell, grain-size, Tuscany.

Introduzione

L'identificazione del sistema di cellule secondo le quali si svolge il trasporto litoraneo in ciascuna unità fisiografica costituisce un momento fondamentale nell'analisi di un ambiente costiero, in particolare quando essa è finalizzata alla stima del suo bilancio sedimentario (Bowen e Inman, 1966) o alla impostazione di strategie di difesa costiera (Cooper et al., 2001).

Le cellule litoranee possono essere delimitate sia da margini fissi, elementi morfologici naturali o artificiali, che da margini liberi, associati a variazioni di direzione o di intensità del trasporto litoraneo (Lowry e Carter, 1982).

I margini fissi sono facilmente identificabili, anche se non sempre è possibile stabilire se essi siano completamente impermeabili al flusso sedimentario, o non consentano invece uno scambio limitato con le cellule adiacenti (*subcells*; in Tanner, 1982); al contrario, i margini liberi sono di difficile individuazione, dato che in genere non hanno chiare evidenze morfologiche ed anche perché la loro posizione lungo costa può subire spostamenti in entrambi i sensi (Carter, 1988).

L'individuazione delle cellule libere e dei loro margini può essere perseguita in più modi: analizzando la morfologia della linea di riva e dei fondali (Kunte, 1994), calcolando il tasso di variazione della linea di riva nei vari settori (King, 1972), studiando la composizione petrografica delle sabbie (Trask, 1952), confrontando le caratteristiche granulometriche dei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa (Pettijhon, 1972; Mc Laren, 1981; Gao e Collins, 1991), con traccianti artificiali (Schwartz, 1966; Bartolini e Pranzini, 1977) e, infine, calcolando l'energia del moto ondoso nelle sue componenti lungo riva (Carter, 1988).

Nel presente lavoro vengono messi a confronto i risultati ottenuti utilizzando tutte queste metodologie, sia facendo riferimento a studi precedenti che le hanno adottate, sia sviluppando una ricerca originale sull'evoluzione della linea di riva e sulle caratteristiche tessiturali dei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa.

L'area di studio è costituita dal litorale della Versilia, che si colloca nella parte centro-settentrionale dell'unità fisiografica che si estende dalla foce del Fiume Magra, a nord, al porto di Livorno, a sud (Fig. 1). E' questo uno dei pochi tratti della costa toscana non colpiti dall'erosione delle spiagge (Cipriani e Pranzini, 1998) proprio per la presenza di una zona di convergenza nella quale confluiscono i sedimenti provenienti dalle foci dei fiumi che sfociano in questa unità fisiografica. Questo tratto di litorale potrà risentire in un prossimo futuro degli interventi di difesa che verranno realizzati lungo la costa della Toscana settentrionale e una migliore conoscenza del sistema di cellule litoranee che lo caratterizza costituisce un punto essenziale sul quale impostare la progettazione degli interventi di riequilibrio dei tratti in erosione ad esso limitrofi, poiché la stabilizzazione di questi implicherà la riduzione dell'input sedimentario sulle spiagge poste sottoflutto. Inoltre, una delle possibili strategie di difesa si basa sul refluento artificiale di sedimenti da una cellula all'altra, indipendentemente dalla loro adiacenza, alterando l'attuale bilancio sedimentario dei vari tratti costieri, nella speranza di ottimizzare l'utilizzazione della sabbia disponibile.

Inquadramento geografico

Il litorale della Versilia, compreso fra Cinquale, a nord, e Viareggio, a sud, si pone nel tratto centro-settentrionale dell'unità fisiografica compresa fra Livorno e Bocca di Magra, e, avendo una disposizione SE - NW è esposto direttamente ai mari di Libeccio.

In questo tratto di costa non sono presenti opere a mare di nessun tipo, e, fatta eccezione per quelli presenti alla foce del Cinquale, i corsi d'acqua hanno uno sbocco al mare libero non confinato da moli guardiani. L'arenile ha un'ampiezza di circa 200 metri (calcolata fra la linea di riva e la strada litoranea), spazio occupato quasi per metà dagli stabilimenti balneari. Il sistema dunare è stato quasi completamente smantellato per fare spazio alla viabilità costiera e al tessuto urbano, che conserva al suo interno sporadiche tracce di questa antica morfologia.

I fondali antistanti hanno una debole pendenza, con valori di circa 1.2% fra la battigia e l'isobata dei 10 metri, ed un profilo caratterizzato da un sistema multiplo di barre e truogoli (Chiabrera et al., 1980).

La spiaggia emersa è costituita da *sabbia fine* (secondo la classificazione di Krumbein, 1934), che passa gradualmente a *sabbia molto fine* procedendo dalla battigia verso i fondali antistanti.

Il moto ondoso al largo è stato ricostruito sulla base dei dati KNMI relativi al periodo 1961 ÷ 1990 ed è caratterizzato da una direzione di provenienza delle mareggiate maggiori da 240° ÷ 270°, mentre gli eventi estremi ($H_s > 6$ m) provengono da un settore limitato centrato sui 245° (Cipriani et al., 2001).

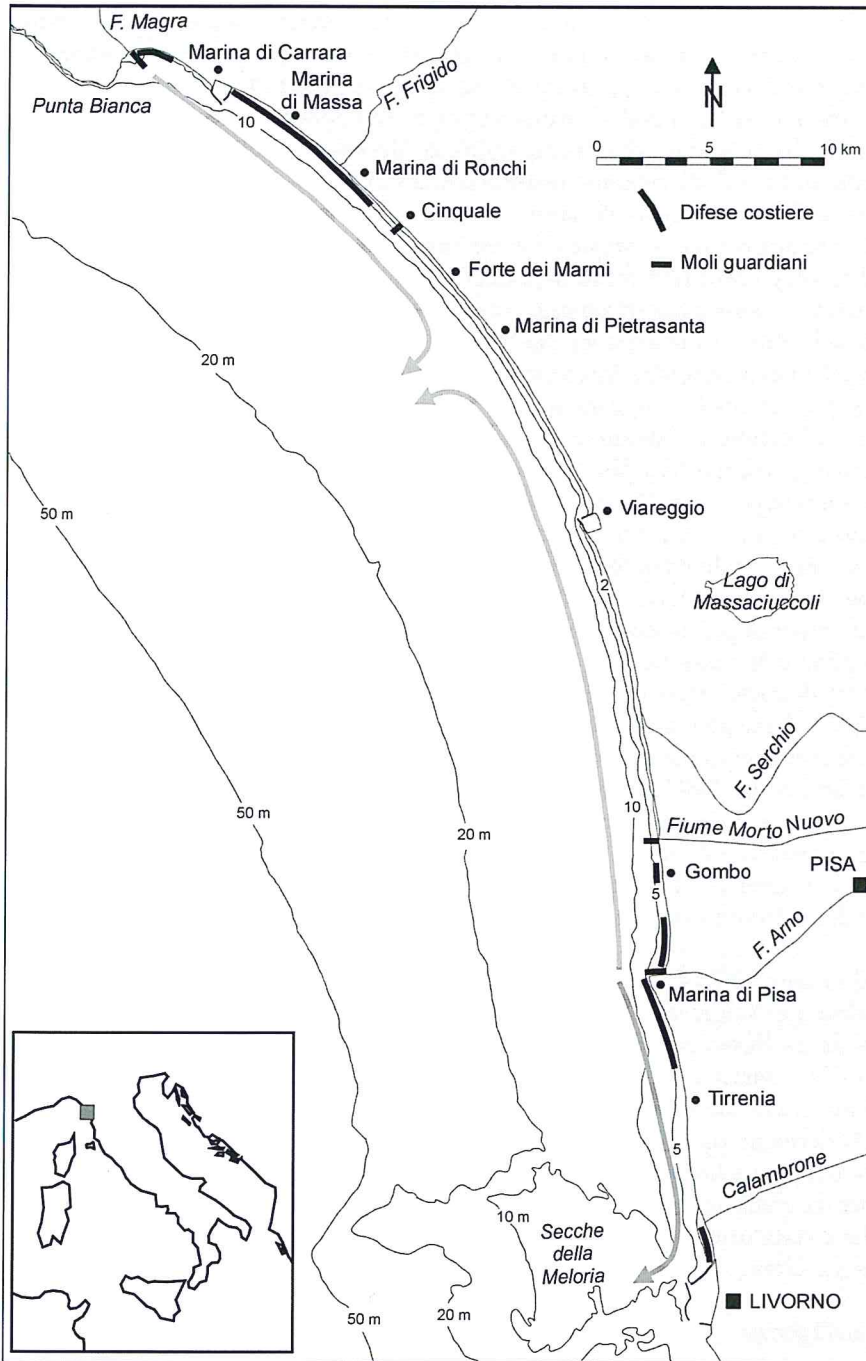


Figura 1 - L'unità fisiografica della costa toscana settentrionale, con indicate le direzioni di trasporto dei sedimenti associate alle cellule di primo ordine. L'area oggetto di studio si colloca fra Marina di Ronchi e Viareggio.

Studi precedenti

Le spiagge della Versilia non sono mai state oggetto di uno studio specifico e ciò dipende certamente dal fatto che qui non si presentano quei problemi di erosione che interessano gran parte del litorale toscano, ma anzi questo tratto è stato interessato da un avanzamento della linea di riva che, pur con tassi diversi, prosegue da circa 2500 anni (Mazzanti e Pasquinucci, 1983).

Le prime informazioni sulle tendenze evolutive recenti di questo tratto di costa si trovano in Toniolo (1927) ed in Albani (1940), ma è Saggini (1967) che per primo dà una spiegazione dei processi dinamici che ne giustificano la costante progradazione, riconoscendo proprio su questo litorale una con-

vergenza dei flussi sedimentari, uno proveniente da sud, che trasporta i materiali immessi in mare dall'Arno e dal Serchio, ed uno proveniente da nord, che ridistribuisce i materiali portati alla foce dal Magra e, subordinatamente, dagli altri corsi d'acqua minori che scendono dalle Alpi Apuane. Questa convergenza, che Saggini identificò sulla base dell'insabbiamento delle opere a mare (porti ed armature di foce) e sulla direzione delle barre di foce dei fiumi, venne confermata da Fanucci et al. (1976) sempre su base morfologica, nell'ambito delle ricerche promosse dal CNR con il Programma Speciale Conservazione del Suolo - Settore Regime e conservazione dei Litorali.

Questo aspetto fu successivamente approfondito dagli stessi Autori in Aiello et al. (1976) che estesero la "zona neutra" al tratto di litorale compreso fra la foce del Cinquale e Lido di Camaiore (Fig. 1), che si caratterizza per una *morfologia subacquea irregolare, interpretabile come zona di attenuazione del drift*. In quel lavoro si identifica inoltre la presenza di due diversi *drift*, uno prossimale, che interessa la *surf zone* e la *swash zone*, ed uno distale che interessa la *breaker zone* e i fondali esterni ad essa. Nel tratto qui considerato il *drift* prossimale, identificato sulla base della vergenza delle foci dei piccoli corsi d'acqua, avrebbe una direzione nord-sud e sarebbe responsabile della ridistribuzione dei sedimenti accumulati dalla convergenza del ben più efficace *drift* distale.

Gandolfi e Paganelli (1975), analizzando la composizione delle sabbie di spiaggia e dei fiumi che insistono in questo tratto di costa, hanno fornito elementi oggettivi per la definizione delle province petrografiche del litorale della Toscana settentrionale e confermato l'esistenza, in questo tratto, della convergenza del *drift* litoraneo. I campioni prelevati a Forte dei Marmi ed alla foce del Fosso Motrone mostrano differenze composizionali significative, il primo con elementi caratteristici del bacino del Fiume Magra, il secondo con quelli dei fiumi Arno e Serchio. Le differenze sono particolarmente evidenti se si prendono in considerazione i frammenti di rocce (serpentiniti in primo luogo) ed i minerali pesanti (enstatite ed augite in particolare). L'analisi si basa però su campioni prelevati a circa 5 km di distanza l'uno dall'altro e non consente di definire con precisione l'ubicazione della *zona neutra*.

Recentemente altri Autori (Garzanti et al., 2001) hanno affrontato nuovamente il problema della dispersione dei sedimenti lungo riva in quest'area, sebbene nell'ambito di una più vasta problematica di tipo petrografico. Lo studio, che ha interessato il fronte appenninico dell'arco ligure-tirrenico, ha avuto un dettaglio inferiore a quello che caratterizzava il lavoro di Gandolfi e Paganelli (1975), ma ha portato ad una conferma della dispersione dei sedimenti del Magra, del Frigido e del Versilia verso sud, almeno fino a Forte dei Marmi.

Aminti et al. (1998), utilizzando i dati KNMI relativi al periodo 1961 – 1990, hanno calcolato il flusso di energia associata al moto ondoso per valutare il trasporto potenziale di sabbia lungo questa costa, mettendo in evidenza come si passi da un flusso potenziale netto di 300.000 m³/anno verso sud a Marina di Carrara ad un valore di 0 m³/anno a Marina di Pietrasanta, per assistere poi ad un incremento del trasporto in senso opposto, verso nord, che arriva a 100.000 m³/anno all'altezza del porto di Viareggio.

Pur ricordando che i dati KNMI derivano da *stime* del moto ondoso al largo e che la lunghezza del periodo di tempo considerato, 30 anni, ha una limitata rilevanza statistica per definire un processo in atto da lungo tempo, questa identificazione della zona neutra con il litorale di Marina di Pietrasanta acquisisce un particolare significato perché è stata ottenuta con metodi completamente indipendenti da quelli utilizzati negli studi precedentemente citati.

Indicatori morfologici della convergenza

Evoluzione della linea di riva

Una zona di convergenza è costituita da un margine di tipo *e/e* del modello di Lowry e Carter (1982) e l'incontro dei due flussi può determinare la formazione di una protuberanza nella linea di riva, fino allo sviluppo di una *cusped foreland* (Gulliver, 1896), morfologia non certo presente lungo la costa della Versilia, dove la linea di riva disegna una falcatura regolare fra il porto di Viareggio e quello di Marina di Carrara. Ciò può dimostrare che la convergenza non è data dalla permanenza di due drift opposti che agiscono nello stesso tempo (Jennings, 1955), ma dalla risultante uguale a zero di due flussi che agiscono in tempi diversi e che hanno valori assoluti elevati; inoltre, questo punto neutro deve oscillare lungo costa.

Per la sua identificazione si è quindi fatto ricorso all'analisi dell'evoluzione della linea di riva, nell'ipotesi che essa sia associata ad una zona di continua progredazione.

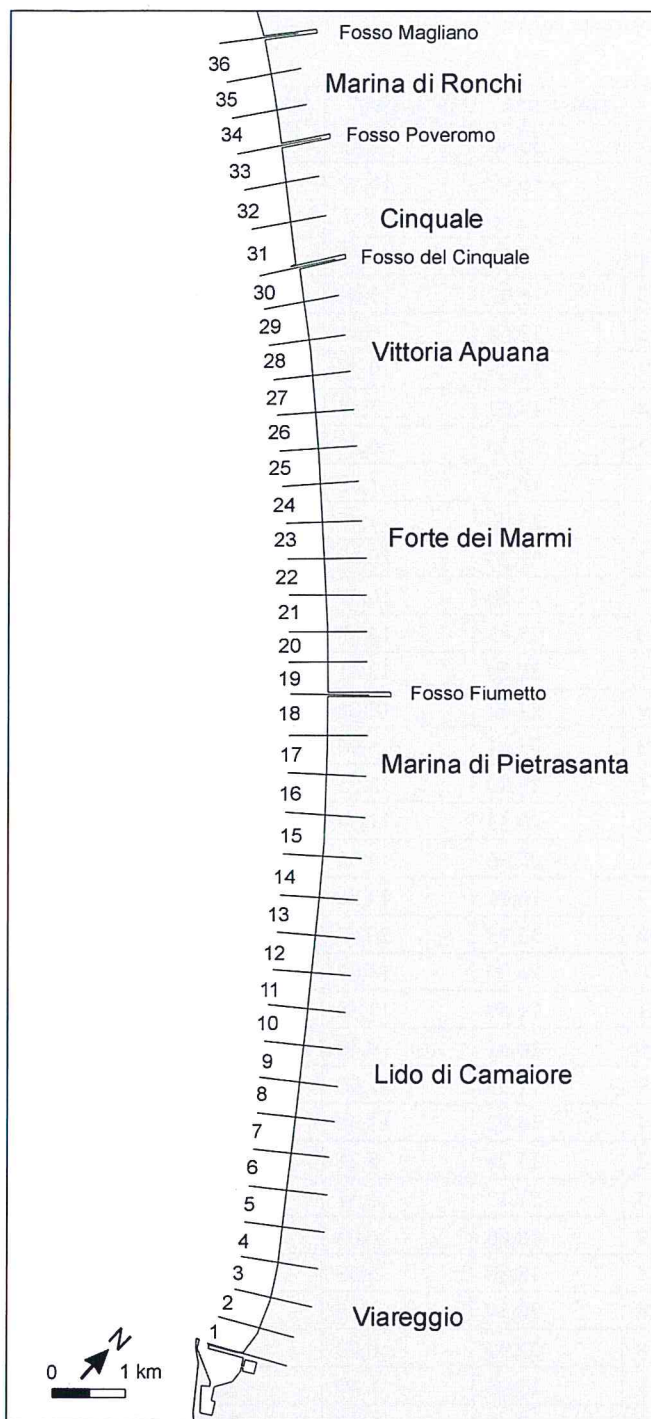


Figura 2 - Delimitazione dei 36 settori nei quali è stato diviso il litorale per lo studio dell'evoluzione della linea di riva.

cessivo (1978 - 1985) per diventare drammatico negli ultimi anni, quando fra il 1985 e il 1998 si perdono quasi 60 metri di spiaggia.

La spiaggia nei settori centrali continua ad accrescersi in tutti gli intervalli di tempo considerati, anche se non sempre si registrano qui i massimi avanzamenti.

Lo studio si basa sulle linee di riva degli anni 1938, 1954, 1967, 1978, 1985 e 1998 disponibili in scala 1:5.000 grazie a precedenti studi effettuati presso il Dipartimento di Scienza della Terra dell'Università di Firenze.

Il tratto di litorale compreso fra la foce del Fosso Magliano e il Porto di Viareggio è stato suddiviso in 36 settori (Fig. 2) lunghi approssimativamente 500 metri, e delimitati, ove presenti, da opere a mare o da foci fluviali. Per questi settori sono state calcolate le variazioni lineari (Tab. 1) ed i tassi di variazione annuale (Tab. 2) per ciascun intervallo di tempo considerato. In Figura 3 sono riportati graficamente gli spostamenti medi della linea di riva dei vari anni per il tratto di costa analizzato.

Fra il 1938 ed il 1954, questo tratto di costa è stato interessato da un consistente avanzamento della linea di riva, che ha superato localmente anche i 40 metri, come ad esempio nel settore n. 16 che corrisponde alla spiaggia di Marina di Pietrasanta.

Avanzamenti simili si sono registrati anche all'estremità settentrionale, dal Cinquale a Marina di Ronchi, e a nord del porto di Viareggio, in un tratto sul quale vennero refluiti i materiali dragati per l'ampliamento dell'area portuale (Milano e Di Martino, 1981).

Il rilievo del 1967 venne eseguito dal Genio Civile OO.MM. di Genova per valutare i danni delle mareggiate del Novembre 1966 e registra tassi di avanzamento assai minori e, addirittura, fenomeni erosivi in aree che erano sempre state in progradazione. I settori centrali del tratto considerato non subiscono processi erosivi, ma il tasso di avanzamento si riduce sensibilmente.

Nel periodo successivo, fra il 1967 e il 1978, il litorale riprende la propria tendenza all'avanzamento, fatta eccezione per i settori settentrionali, in cui inizia a farsi sentire l'erosione che procede da nord, originata dalla riduzione dell'input sedimentario del Magra ed incentivata, prima dalla costruzione del porto di Marina di Carrara, e successivamente dalle opere di difesa del litorale di Massa (Aminti et al., 1999; Cipriani et al., 2001).

Questo processo si aggrava nel periodo successivo, quando fra il 1985 e il 1998 si

Tabella 1 - Variazione lineare media della ampiezza della spiaggia emersa (m) nei vari intervalli di tempo per i 36 settori considerati.

N.Settore	Lunghezza	1938-1954	1954-1967	1967-1978	1978-1985	1985-1998	1938-1998
1	403	16,03	-23,07	35,90	28,42	18,63	75,90
2	422	45,50	-26,06	16,45	16,47	18,66	71,02
3	502	41,68	-13,92	-2,60	22,90	17,55	65,61
4	500	27,83	0,74	-7,93	27,66	13,66	61,97
5	501	22,06	5,35	6,03	11,00	12,27	56,72
6	539	10,01	12,68	12,64	6,61	14,00	55,93
7	440	18,64	9,09	16,39	9,29	14,14	67,55
8	503	13,46	9,48	14,62	7,87	8,44	53,87
9	493	18,33	4,92	14,30	6,26	18,23	62,05
10	511	19,78	3,41	18,53	-1,82	31,74	71,64
11	506	23,72	-1,53	25,93	4,45	24,06	76,61
12	500	23,44	8,53	21,20	10,70	21,03	84,90
13	503	28,35	8,77	23,50	16,37	16,13	93,12
14	585	39,88	11,20	23,87	14,88	9,57	99,40
15	572	31,30	6,81	28,20	13,81	9,11	89,23
16	500	40,64	4,09	27,32	12,08	15,10	99,23
17	540	28,21	0,83	25,41	5,95	13,04	73,45
18	565	34,51	1,61	26,00	3,85	6,71	72,68
19	434	20,86	13,84	20,35	11,79	12,28	79,12
20	420	28,94	5,92	27,56	4,53	14,42	81,37
21	497	24,69	10,97	16,41	13,56	11,25	76,88
22	505	23,76	13,08	15,73	20,53	6,57	79,66
23	500	22,35	9,10	26,90	13,07	5,59	77,01
24	508	18,40	16,31	11,59	17,38	4,26	67,94
25	497	17,38	10,30	20,41	9,40	-3,76	53,73
26	503	31,13	1,49	11,59	11,90	0,10	56,21
27	506	27,77	-0,71	14,02	11,40	-3,77	48,71
28	500	27,18	2,32	15,78	5,31	-0,45	50,14
29	514	33,96	-4,23	21,17	6,51	-10,67	46,75
30	500	35,37	-0,79	18,66	6,05	-2,70	56,58
31	603	40,13	11,77	18,80	5,53	3,65	79,89
32	550	38,26	7,86	20,39	-1,89	-9,39	55,24
33	504	43,69	-0,98	22,99	-0,73	-45,03	19,93
34	495	47,84	-2,78	13,03	-5,40	-52,43	0,27
35	500	37,54	6,90	-8,49	-9,90	-59,40	-33,36
36	497	21,63	1,24	-1,60	-34,05	-53,32	-66,10

Il confronto fra la linea di riva del 1938 e quella del 1998 (Fig. 4) mostra come il tratto compreso nei settori 13 ÷ 16 si sia accresciuto di circa 100 metri, il valore massimo registrato in tutto l'arco costiero analizzato. Effettuando un'interpolazione secondo una funzione di secondo grado si vede che essa raggiunge il valore massimo nel settore n. 15, ossia sulla spiaggia di Marina di Pietrasanta.

L'evoluzione degli altri settori ben si inquadra nella dinamica costiera che si va delineando: quelli più meri-

Tabella 2 - Variazione lineare media annua della ampiezza della spiaggia emersa (m) nei vari intervalli di tempo per i 36 settori considerati.

N.Settori	Lunghezza	1938-1954	1954-1967	1967-1978	1978-1985	1985-1998	1938-1998
1	403	1,00	-1,77	3,26	4,06	1,43	1,27
2	422	2,84	-2,00	1,50	2,35	1,44	1,18
3	502	2,61	-1,07	-0,24	3,27	1,35	1,09
4	500	1,74	0,06	-0,72	3,95	1,05	1,03
5	501	1,38	0,41	0,55	1,57	0,94	0,95
6	539	0,63	0,98	1,15	0,94	1,08	0,93
7	440	1,16	0,70	1,49	1,33	1,09	1,13
8	503	0,84	0,73	1,33	1,12	0,65	0,90
9	493	1,15	0,38	1,30	0,89	1,40	1,03
10	511	1,24	0,26	1,68	-0,26	2,44	1,19
11	506	1,48	-0,12	2,36	0,64	1,85	1,28
12	500	1,47	0,66	1,93	1,53	1,62	1,42
13	503	1,77	0,67	2,14	2,34	1,24	1,55
14	585	2,49	0,86	2,17	2,13	0,74	1,66
15	572	1,96	0,52	2,56	1,97	0,70	1,49
16	500	2,54	0,31	2,48	1,73	1,16	1,65
17	540	1,76	0,06	2,31	0,85	1,00	1,22
18	565	2,16	0,12	2,36	0,55	0,52	1,21
19	434	1,30	1,06	1,85	1,68	0,94	1,32
20	420	1,81	0,46	2,51	0,65	1,11	1,36
21	497	1,54	0,84	1,49	1,94	0,87	1,28
22	505	1,48	1,01	1,43	2,93	0,51	1,33
23	500	1,40	0,70	2,45	1,87	0,43	1,28
24	508	1,15	1,25	1,05	2,48	0,33	1,13
25	497	1,09	0,79	1,86	1,34	-0,29	0,90
26	503	1,95	0,11	1,05	1,70	0,01	0,94
27	506	1,74	-0,05	1,27	1,63	-0,29	0,81
28	500	1,70	0,18	1,43	0,76	-0,03	0,84
29	514	2,12	-0,33	1,92	0,93	-0,82	0,78
30	500	2,21	-0,06	1,70	0,86	-0,21	0,94
31	603	2,51	0,91	1,71	0,79	0,28	1,33
32	550	2,39	0,60	1,85	-0,27	-0,72	0,92
33	504	2,73	-0,08	2,09	-0,10	-3,75	0,34
34	495	2,99	-0,21	1,18	-0,77	-4,37	0,00
35	500	2,35	0,53	-0,77	-1,41	-4,95	-0,57
36	497	1,35	0,10	-0,15	-4,86	-4,44	-1,12

dionali mostrano una forte tendenza all'avanzamento per la messa in opera di un sistema di *by-pass* che refluisce la sabbia dalla spiaggia sopraflutto a quella sottoflutto del porto e per la protezione fornita dalla diga foranea che ora si presenta aggettante, tanto che la diffrazione delle onde induce un flusso opposto che penalizza i settori posti immediatamente più a nord.

Oltre Marina di Pietrasanta la progradazione della spiaggia si riduce gradualmente, salvo un picco in

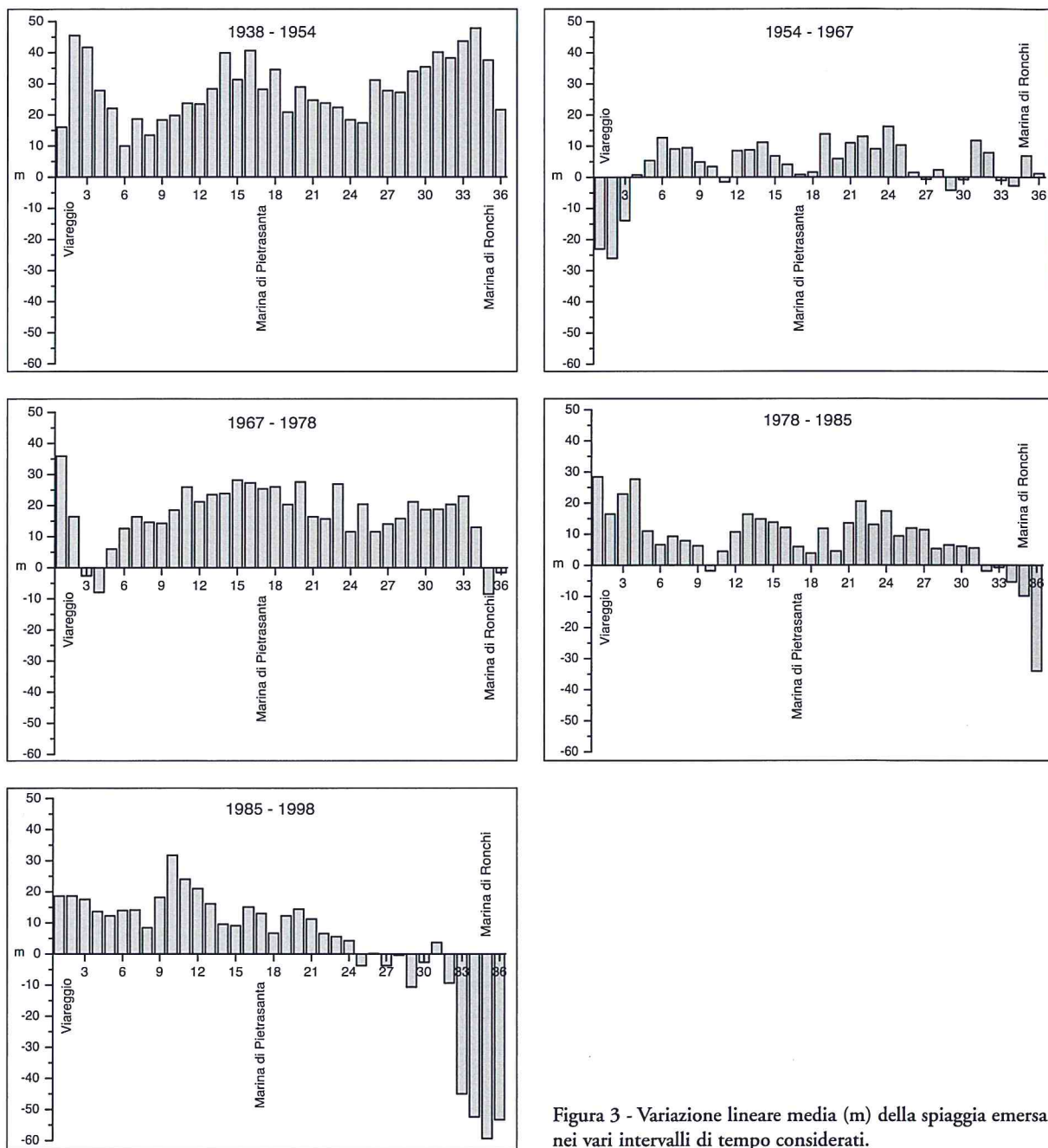


Figura 3 - Variazione lineare media (m) della spiaggia emersa nei vari intervalli di tempo considerati.

corrispondenza della spiaggia posta a nord della foce del Cinquale (settorio 31), che si avvantaggia della presenza dell'armatura di foce. Avvicinandosi al limite settentrionale della zona qui analizzata, si vede come gli ultimi processi erosivi abbiano annullato gli avanzamenti dei periodi precedenti tanto che il bilancio complessivo degli ultimi due settori risulta negativo per 33 e 66 metri.

L'analisi dell'evoluzione della linea di riva consente di avvalorare l'ipotesi che proprio in corrispondenza della spiaggia di Marina di Pietrasanta si collochi preferenzialmente la convergenza dei due drift opposti. Qui non si ha la formazione di un saliente, e tanto meno di un *cusate foreland*, ma l'analisi dello sviluppo costiero consente di evidenziare che in questo tratto la costa ha il suo raggio di curvatura maggiore.

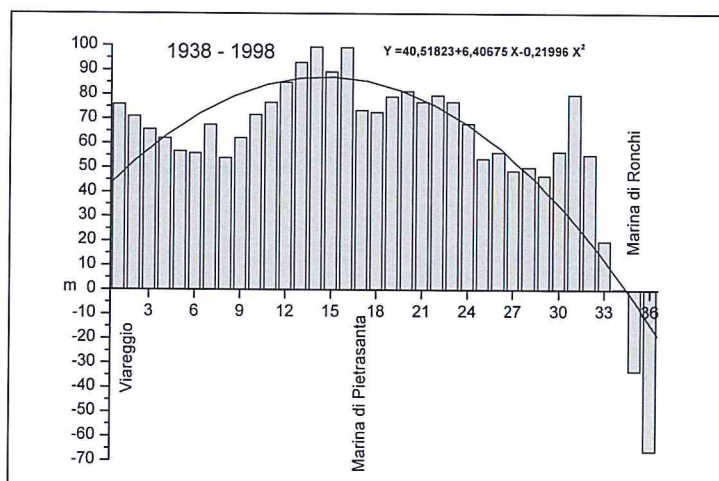


Figura 4 - Variazione lineare media (m) della spiaggia emersa fra il 1938 e il 1998 con funzione interpolante di 2°. In ascissa sono indicati i 36 settori la cui lunghezza è compresa tra i 403 ed i 603 m.

Morfologia dei fondali

Lo studio della morfologia della *nearshore* si basa sui dati ottenuti con un rilievo batimetrico effettuato nel gennaio del 1998 su profili eseguiti ogni 250 metri di litorale ed estesi dalla spiaggia alta (base della duna o limite di manufatti) fino alla batimetrica dei 10 metri.

Il grafico che mostra la pendenza media dei fondali entro l'isobata dei 10 m (Fig. 5) indica che nella parte centrale del tratto studiato il profilo di spiaggia è più ripido, con valori che sfiorano l'1,3%.

Questa può essere la conseguenza della rapida espansione della spiaggia emersa dovuta al forte afflusso di sedimenti, espansione che non sarebbe bilanciata da una identica migrazione verso il largo delle isobate maggiori, dato che in questa fascia il flusso sedimentario è modesto, essendo la profondità di chiusura con tempo di ritorno di un anno pari a circa 7,5 m (D'Eliso, com. pers.). L'espansione della spiaggia emersa e della *nearshore* si tradurrebbe quindi in un profilo più ripido, come avviene in

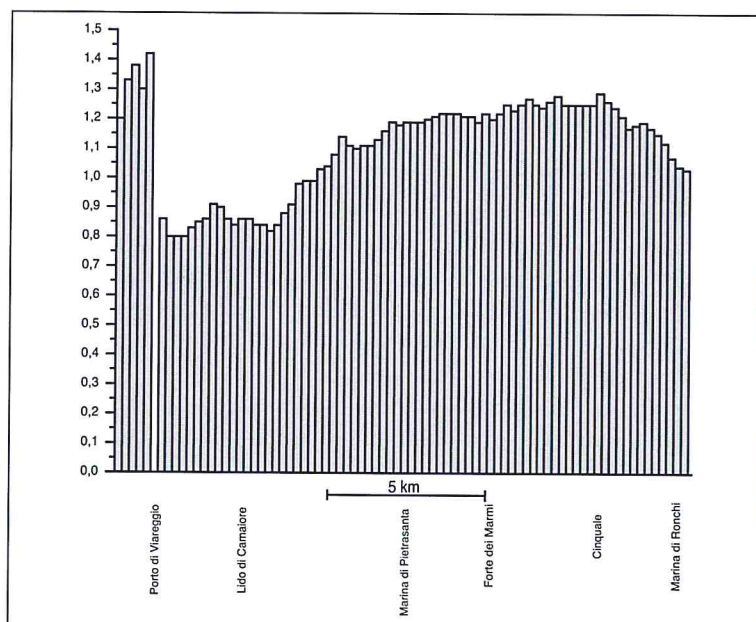


Figura 5 - Pendenza media dei fondali entro l'isobata dei 10 metri nel tratto di costa compreso fra Viareggio e Marina dei Ronchi secondo le 80 sezioni batimetriche rilevate.

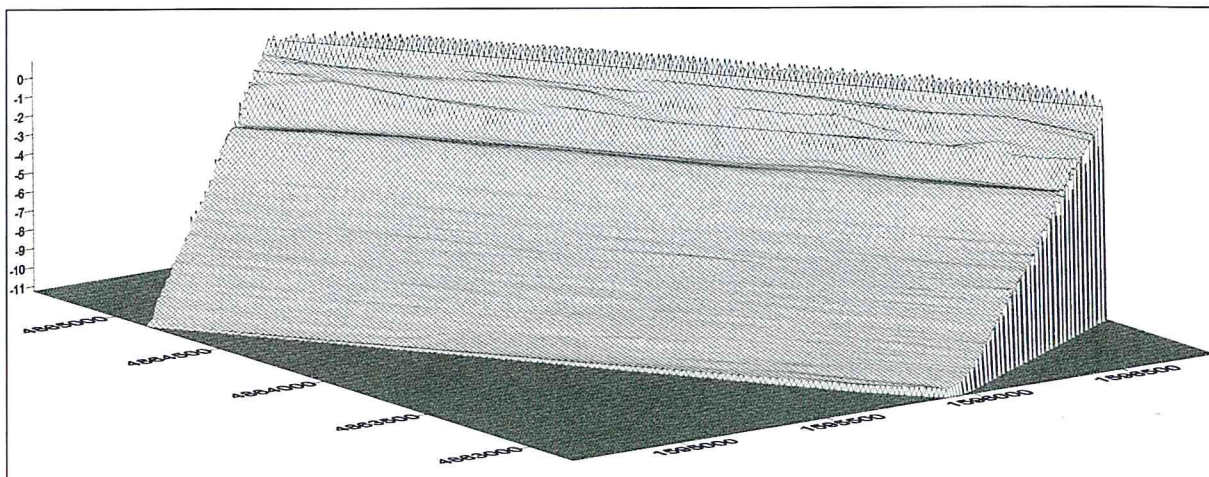


Figura 6 - Modello digitale del fondale del tratto di mare antistante Marina di Pietrasanta.

modo parossistico a sud del porto di Viareggio, dove la linea di riva è avanzata di ben 300 m dal 1938 ad oggi e dove i fondali maggiori non hanno potuto evolversi in modo analogo: qui la pendenza dei fondali supera l'1,4%.

D'altra parte, l'erosione di un litorale, con l'arretramento della linea di riva e la stabilità dei fondali oltre la profondità di chiusura, determina una riduzione della pendenza media del profilo di spiaggia, come si verifica procedendo verso il limite settentrionale della zona studiata.

La modesta pendenza dei fondali del tratto posto sottoflutto al porto di Viareggio (0,8%) è dovuta all'arretramento subito dalla linea di riva dopo la costruzione della diga foranea ed al fatto che oggi i sedimenti la superano contribuendo all'innalzamento dei fondali al largo.

Tutto il settore è caratterizzato da un sistema di barre, già descritto da Chiabrera et al. (1980), che occupa la fascia delimitata dall'isobata dei 5 m, indicando che questa è la zona dinamicamente più attiva del litorale.

In Figura 6 è rappresentato un modello digitale del terreno relativo alla spiaggia di Marina di Pietrasanta, nel quale si può osservare una barra esterna, longitudinale, parallela e continua, e due barre interne assai più discontinue. La prima è formata dal frangimento delle onde generate dalle mareggiate più intense provenienti da Libeccio, mentre quelle più interne sono da riferire ad eventi meteomarini più deboli e con componente obliqua rispetto alla costa.

Caratteristiche granulometriche delle sabbie

Le caratteristiche granulometriche dei sedimenti che costituiscono la spiaggia emersa e sommersa possono dare indicazioni sulle direzioni di trasporto e descrivere la dinamica dei sistemi di cellule.

Per il presente studio sono stati analizzati 200 campioni prelevati nel corso della campagna di rilievi del gennaio 1998 su profili distanziati 500 l'uno dall'altro ed alle profondità di 0, 2, 4, 6 e 8 metri. Per essi, sono state analizzate prima le variazioni lungo riva delle caratteristiche granulometriche poi quelle di tutti i materiali costituenti la spiaggia sommersa.

In Figura 7 sono riportati i valori delle dimensioni medie (Media di Folk e Ward, 1957) di tutti i campioni di battigia. Si vede chiaramente che muovendosi da nord verso sud si ha una diminuzione delle dimensioni medie (valori di Mz maggiori) fino a circa 6 km dal porto di Viareggio, quando le sabbie iniziano ad assumere dimensioni maggiori. Interpolando i valori con una funzione di secondo grado si ha una migliore descrizione di questo fenomeno e si può calcolare che il valore massimo della funzione viene raggiunto a 6044 m dal porto.

Si può pensare che in questo settore di costa prevalga un processo di *downdrift fining* (McCave, 1978), ossia di una riduzione delle dimensioni dei sedimenti nel senso del trasporto litoraneo per progressivo abbandono delle frazioni più grossolane delle distribuzioni granulometriche. Ciò avverrebbe sia nel tratto settentrionale, dove prevale un flusso diretto verso sud, che in quello meridiona-

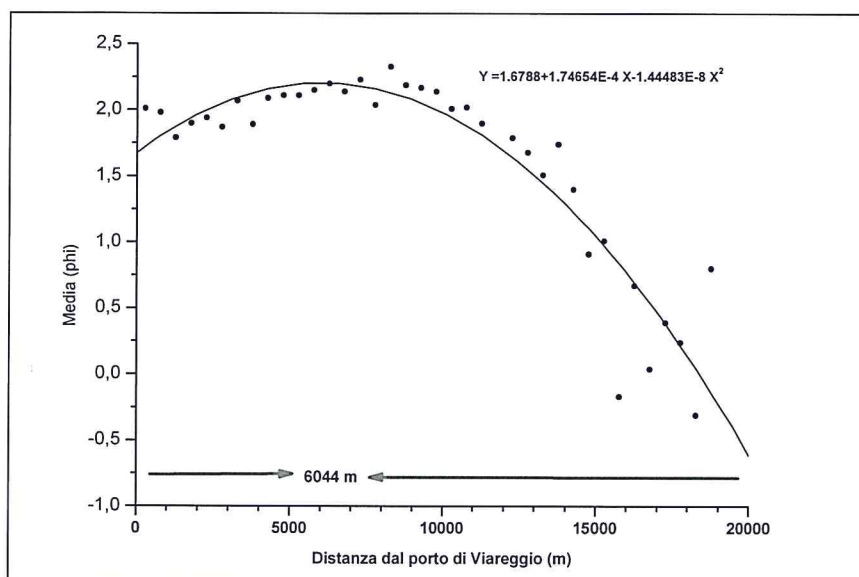


Figura 7 - Variazione del valore delle dimensioni medie dei sedimenti lungo riva. Il valore massimo della funzione interpolante si ha a 6044 m dal porto di Viareggio.

le in cui è ancora attivo il flusso diretto verso nord. La zona di convergenza dei due flussi viene quindi ad essere definita dal punto in cui si ritrovano le dimensioni minori dei materiali.

Analizzando i dati relativi alle dimensioni del 1° percentile, ossia degli elementi più grossolani presenti nella distribuzione granulometrica, ed interpolando i punti sempre con una curva di secondo ordine (Fig. 8) si osserva, pur nella maggiore dispersione dei punti, una concordanza di risultati, con le dimensioni maggiori raggiunte a 5774 m dal porto di Viareggio.

In questo processo di trasporto, con la graduale perdita degli elementi più grossolani che si muovono a velocità minore, e quella delle frazioni più fini che vengono disperse verso il largo, si ha una riduzione del range dimensionale delle sabbie che si ripercuote sui valori della Classazione (σ_1). La distribuzione dei punti nella Figura 9, ed in particolare la funzione interpolante di secondo grado,

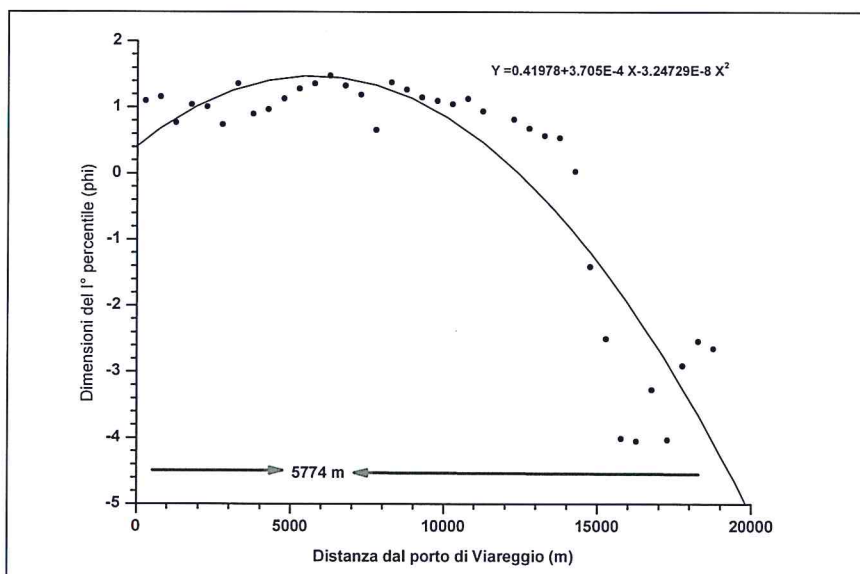


Figura 8 - Variazione delle dimensioni del 1° percentile dei sedimenti lungo riva. Il valore massimo della funzione interpolante si ha a 5774 m dal porto di Viareggio.

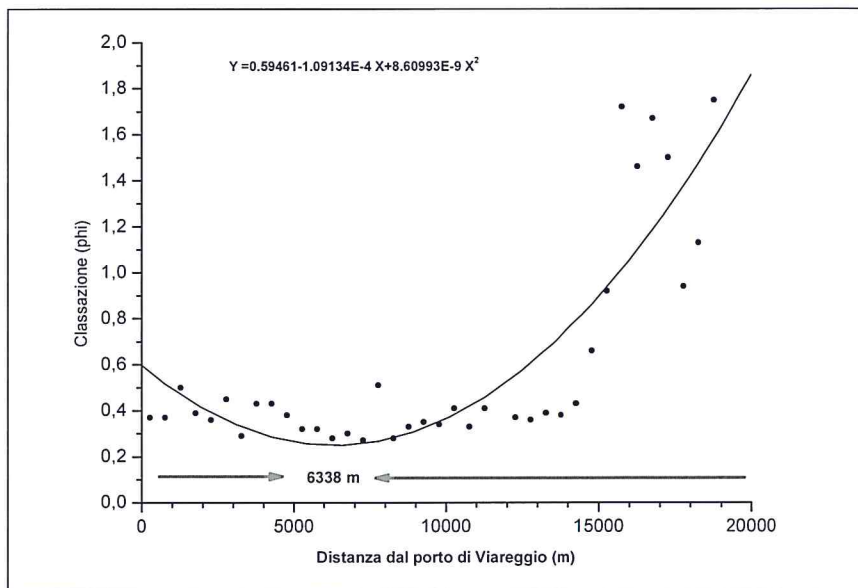


Figura 9 - Variazione del valore della Classazione (σ_1) dei sedimenti lungo riva. Il valore minimo della funzione interpolante si ha a 6338 m dal porto di Viareggio.

mostra infatti un trend inverso, con il valore minimo (Classazione massima) a 6338 metri dal porto di Viareggio.

Questi dati confermano la presenza di una zona di convergenza e la pongono fra la foce del Fosso Motrone e quella del Fosso Fiumetto, ossia in corrispondenza della spiaggia di Marina di Pietrasanta. Analizzando i dati granulometrici della spiaggia sommersa il quadro appare meno chiaro, in quanto si sovrappongono tendenze *cross-shore* indipendenti dalle direzioni di flusso, come quella che porta ad avere sedimenti più fini procedendo in profondità.

L'analisi viene qui effettuata per i singoli parametri confrontandone il valore fra campioni adiacenti per ottenere direzioni di riduzione delle dimensioni medie (M_z) e di quelle del Primo percentile, nonché di un miglioramento della Classazione (valori di σ_1 minori) ed applicando poi ai vettori risultanti un filtro "passa-basso" per eliminare il rumore ed evidenziare le tendenze a scala regionale.

La carta dei vettori relativi alle dimensioni medie (M_z) dei sedimenti mostra un prevalente flusso *cross-shore* che tende a mascherare ogni altra direzione; è comunque possibile percepire una componente meridionale da Marina di Ronchi a Forte dei Marmi ed una opposta nel tratto successivo, con una evidente convergenza fra il Lido di Camaiore e la Foce del Fosso Fiumetto.

Più complessa è la carta relativa alle dimensioni del I° percentile, anche se sono visibili simili tendenze; in questa elaborazione è evidente il flusso di sedimenti che supera il porto di Viareggio per allmentare le spiagge della Versilia.

La carta dei vettori relativa alla Classazione (σ_1) è meno condizionata dagli apparenti flussi ortogonali a riva, ma mostra condizioni estremamente differenziate, nelle quali rimane comunque visibile una tendenza dei vettori a confluire, in questo caso, fra Focette e il Fosso Fiumetto.

Le direzioni del flusso di sedimenti possono essere identificate anche attraverso il confronto contemporaneo dei parametri granulometrici Media (M_z), Classazione (σ_1) ed Asimmetria (S_{ki}) di ciascun campione con quelli dei campioni limitrofi. Il metodo qui utilizzato è quello proposto da Gao e Collins (1992), ed anche in questo caso è stato applicato un filtro passa-basso ai vettori risultanti.

I vettori di trasporto (Figura 10) mostrano un sistema di micro-cellule, alcune delle quali molto ben definite, che si succedono lungo la costa ogni 2 - 3 km. Una cellula particolarmente sviluppata è presente fra la foce del Fosso dell'Abate e Lido di Camaiore, con un flusso *offshore* assai marcato, ma la cui associazione alla zona di convergenza può non essere certa.

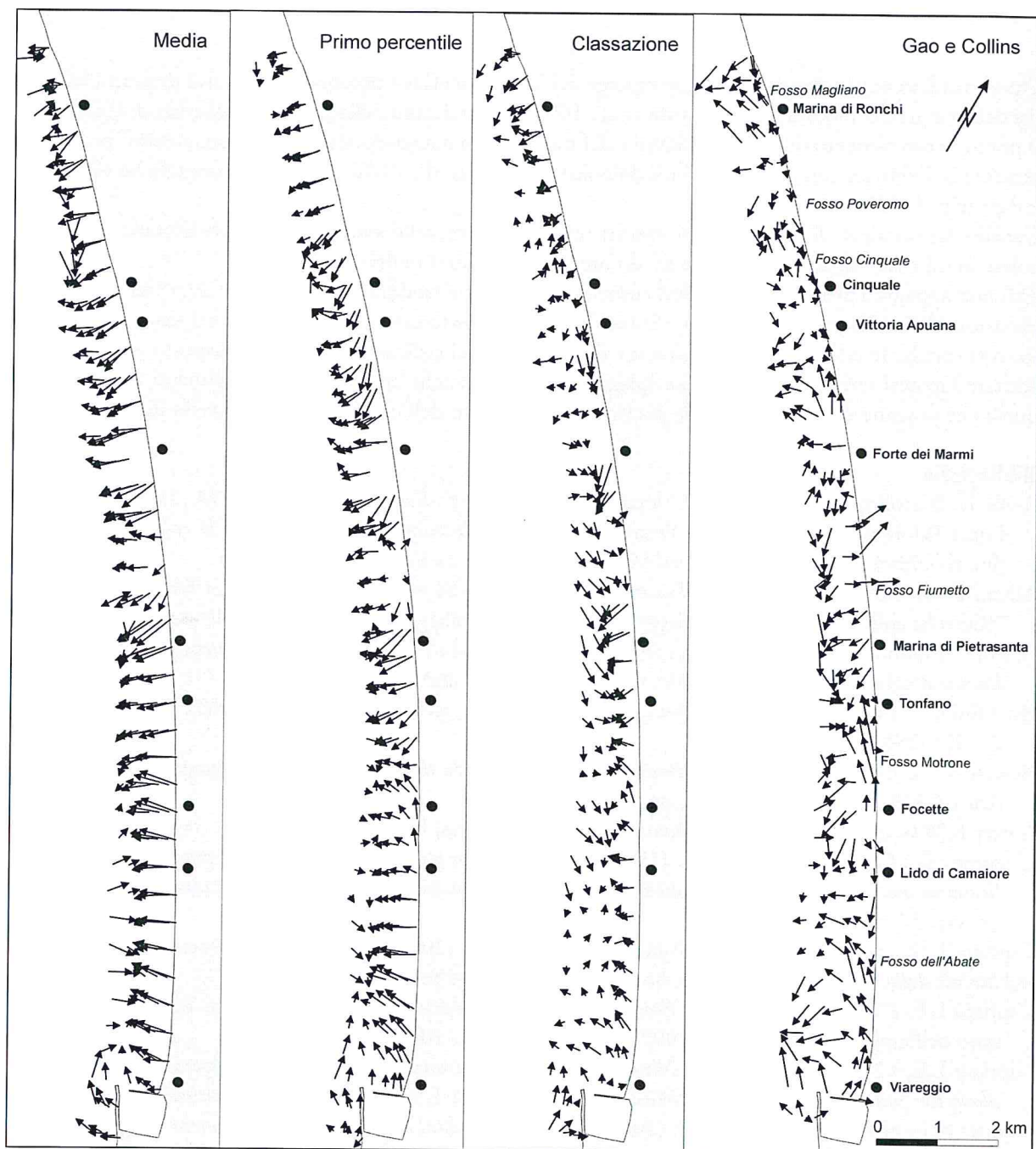


Figura 10 - Vettori di flusso tracciati sulla base del confronto fra i parametri tessuturali di campioni adiacenti e successivamente oggetto di filtraggio "passa basso" per evidenziare le tendenze regionali.

Conclusioni

Lo studio dell'evoluzione della linea di riva, della morfologia dei fondali e delle caratteristiche tessuturali dei sedimenti di spiaggia emersa e sommersa consente di identificare una convergenza dei flussi sedimentari in prossimità di Marina di Pietrasanta, dove si registra la massima progradazione della costa dal 1938 al 1998, una forte pendenza dei fondali, un minimo nelle dimensioni medie (M_z) dei sedimenti e delle dimensioni del 1° percentile ed un massimo della Classazione (valori di σ_1 minimi).

Questi risultati concordano con quanto emerge dall'analisi dei flussi potenziali lungo riva derivati dall'analisi dell'energia del moto ondoso (Aminti et al., 1999), che indicano nella spiaggia di Marina di Pietrasanta il punto di azzeramento dei flussi risultanti e definiscono con maggiore dettaglio la "zona neutra" precedentemente individuata con osservazioni morfologiche (Fanucci et al., 1976) ed analisi petrografiche (Gandolfi e Paganelli, 1975).

L'analisi tessiturale si dimostra quindi uno strumento efficace nello studio delle cellule litoranee, in particolare in un tratto di costa esposto in modo omogeneo al moto ondoso.

Qui non appaiono processi di *downdrift coarsening* che altrove rendono problematica l'interpretazione delle variazioni della Classazione (Cipriani e Stone, 2001); nel nostro caso l'aumento di σ nel senso del trasporto in entrambe le cellule litoranee è dovuto alla selezione dei sedimenti durante il trasporto e consente di scartare l'ipotesi che l'espansione della spiaggia sia dovuta anche ad un input di sedimenti esterni, quali quelli che possono essere migrati sulla piattaforma per effetto dell'innalzamento del livello del mare.

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., Iannotta P. e Pranzini E. (1999) - *Morfodinamica di un sistema costiero intensamente protetto: il litorale di Marina di Massa* - Atti dei Conv. Lincei, 154: 263-270.
- Bartolini C. e Pranzini E. (1977) - *Tracing nearshore bottom currents with sea-bed drifters*. Marine Geology, 23: 275-284.
- Bowen A.J. e Inman D.L. (1966) - *Budget of littoral sands in the vicinity of Point Arguello, California*. US Army CERC Tech. Memo, n. 19, pp 56.
- Carter R.W.G. (1988) - *Coastal environments*. Academic Press, Londra, pp.,617.
- 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.
- Cipriani L. E., Ferri S., Iannotta P., Paolieri F. e Pranzini E. (2001) - *Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale*. Studi costieri, 4: 119-156.
- Cipriani L.E. e Pranzini E. (1998) - *Erosione costiera ed evoluzione recente delle spiagge*. In "Rapporto sullo stato dell'ambiente in Toscana - 1997". Regione Toscana - ARPAT. pp. 177-183.
- Cipriani L.E. e Stone G.W. (2001) - *Net longshore sediment transport and textural changes in beach sediments along the Southwest Alabama and Mississippi Barrier Island, USA*. Journ. Coastal Research, 17: 443-458.
- Cooper N.J., Hooke J.M. e Bray M.J. (2001) - *Predicting coastal evolution using a sediment budget approach: a case study from southern England*. Ocean & Coastal Management, 44: 711-728.
- Fanucci F., Fierro G. e Piccazzo M. (1976) - *Caratteri geomorfologici e sedimentologici del litorale*. In : Programma Speciale per la Conservazione del Suolo – Ricerche sul Regime e la Conservazione dei Litorali, Rapporto 1976. A cura di L. Versino. CNR, Quaderni de La Ricerca Scientifica, 92: 80-88.
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journ. Sedim. Petrol., 27: 3-26.
- 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.

- Gao S. e Collins M. (1992) - *Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"*. Sedim. Geol., 81: 47-60.
- Garzanti E., Canclini S., Moretti Foggia F., Petrella N. (2001) - *Upraveling magmatic and orogenic provenances in modern sands: the back-arc side of the Apennine thrust-belt (Italy)*. Journ. Sedim. Petrol. 72: 2-17.
- Gulliver F.P. (1896) - *Cuspate forelands*. Geol. Soc. America Bull., 7: 399-422.
- Jennings J.N. (1955) - *The influence of wave action on coastal outline in plan*. Australian Geogr., 6: 36-44.
- King C.A.M. (1972) - *Beaches and coasts*. Edward Arnold, Londra, pp.570.
- Krumbein W.C. (1934) - *Size frequency distribution of sediments*. Journ. Sedim. Petrol., 4: 65-77.
- Kunte P.D. (1994) - *Sediment transport along the Goa-Nort Karnataka coast, Western India*. Marine Geology, 118: 207-216.
- Lowry P. e Carter R.W.G. (1982) - *Computer simulation and delimitation of littoral power cells on the barrier coast of Southern Wexford, Ireland*. Journ. Earth Sci. R. Dubl. Soc., 4: 121-132.
- 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.
- McCave I.N. (1978) - *Grain-size trends and transport along beaches: examles from Eastern England*. Marine Geology, 28: M43-M51.
- McLaren P. (1981) - *An interpretation of trends in grain size measures*. Journ. Sediment. Petrol., 51: 611-624
- Milano V. e Di Martino F. (1981) - *Erosione della spiaggia di Viareggio: proposta di intervento*. Porti Mare Territorio, 2: 57-71.
- Saggini F. (1967) - *Morfologia costiera e trasporto detritico marino sul litorale della Provincia di Livorno*. Atti Conv. Difesa del litorale toscano. Amm. Prov. Pisa. Pp. 59-69.
- Schwartz M.L. (1966) - *Fluoreshent tracers: transport in distance and depth in beach sands*. Science, 151: 701-702.
- Tanner W.F. (1982) - *Beach in plan view*. In Encyclopedia of beaches and coastal environments; a cura di M.L. Schwartz, Hutchinson Ross Publ. Co., Stroudsburg, Pennsylvania, pp. 150-153.
- Trask P.D. (1952) - *Sources of beach sand at Santa Barbara, California, as indicated by mineral grain studies*. US Army Corps of Engineers, Beach erosion Board Tech. Memo, pp. 28.

Manoscritto ricevuto il 30/4/2004, accettato il 29/7/2004.