

## L'erosione del litorale di Punta Ala: un caso di naturale riequilibrio morfologico

Enzo Pranzini e Susanna Rossi

Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze  
Via Jacopo Nardi, 2 - 50132 Firenze

### Riassunto

Lo studio dell'evoluzione della linea di riva del litorale di Punta Ala ha messo in evidenza che il settore meridionale di questa unità fisiografica è caratterizzato da un processo erosivo che ha determinato un arretramento medio della linea di riva di circa 16 metri fra il 1954 e il 1996, e che nella parte centrale e settentrionale del litorale si è avuta stabilità o un avanzamento che ha superato, in un tratto, gli 11 metri.

Le caratteristiche tessiturali dei sedimenti presenti sulla spiaggia emersa e sommersa mostrano una notevole omogeneità dei materiali, eccetto che nel settore in erosione, dove sulla battigia e sui fondali immediatamente antistanti vi sono materiali più grossolani e meno classati. Lo studio dei vettori di trasporto dei sedimenti, ottenuti tramite il confronto fra i parametri tessiturali, dimostra l'esistenza di un drift prevalente diretto verso nord nel settore meridionale ed in quello centrale, mentre più a nord, in prossimità della foce del F. Alma, il suo senso risulta invertito. Nella zona di convergenza esiste un flusso sedimentario diretto verso l'esterno.

Non è stato possibile identificare alcuna causa antropica diretta per l'erosione della spiaggia nel settore meridionale, e si ritiene che l'evoluzione a cui è soggetta la linea di riva stia facendo assumere al litorale una configurazione a spirale logaritmica, stabile quando le mareggiate provengono prevalentemente da una ben determinata direzione, nel caso specifico il Canale di Piombino.

### Abstract

*A geomorphological and sedimentological study of Punta Ala beach (Grosseto, Italy) was carried out through the acquisition of shoreline positions from aerial photographs taken in 1938, 1954, 1973 and 1979 and with a topographic survey performed in 1996, during which the beach was surveyed from the backshore down to the depth of 10 meters. Upper berm and beach-face sediments were collected in Spring and Summer 1993 as well as in Winter 1996, whereas 25 profiles were sampled at 0, -1.5, -3, -5 and -7 meters during the bathymetric survey.*

*Shoreline evolution shows that the southern sector of this beach experienced a mean erosion of 16 meters during the period going from 1954 to 1996, whereas the central and northern sectors were approximately stable or even prograding up to 11 meters in that same period. Berm, beach face and nearshore sediments exhibit a great homogeneity, except for the material present in the eroded sector, where inner sediments are coarser and poorly sorted. Net sediment transport patterns inferred from textural parameters are directed northward in the southern and central parts of the beach and in the opposite way in the northern sector, where the Alma River outflows. In the prograding sector, where the drift convergence occurs, an offshore sediment direction was retrieved. As far as the causes for beach erosion are concerned, no anthropogenic factor was found and the present evolution is probably driving the shoreline to assume a log-spiral configuration, which is stable when storm waves come always from the same direction, and that is, in this case, from the Canale di Piombino.*

### Premessa

Il litorale di Punta Ala (Figg. 1 e 2) fa parte di quel 49 % delle spiagge toscane soggette ad erosione (Cipriani e Pranzini, 1999), anche se qui il fenomeno è limitato al solo settore meridionale e il tasso di arretramento della linea di riva è decisamente modesto. Ciò comporta comunque notevoli problemi sia di carattere ambientale che economico, in considerazione della forte pressione turistica a cui questo tratto di costa è stato soggetto negli ultimi venti anni, da quando sono stati costruiti il porto, gli stabilimenti balneari e tutto il complesso residenziale limitrofo.

Data la "giovane età" turistica della zona e l'esiguità del processo erosivo, essa non è stata ancora oggetto di uno studio geomorfologico e sedimentologico specifico. Pur senza studi di base a supporto, negli anni passati era stato fatto ugualmente qualche tentativo per frenare l'arretramento della linea di riva, principalmente da parte dei gestori degli stabilimenti balneari toccati dall'erosione, senza ottenere nessun risultato positivo di lungo termine. In particolare, sono stati effettuati due ripascimenti artificiali: il primo nella seconda metà degli anni '70, subito dopo la fine della costruzione del porto, quando furono utilizzati circa 80.000 m<sup>3</sup> di materiale di varia origine e dimensioni, anche materiali di discarica, come testimoniano i ritrovamenti di mattoni e pezzi di cemento; il secondo, nel 1995, quando furono usati circa 13.000 m<sup>3</sup> di sabbia prelevata a sud del porto. Durante il primo ripascimento furono costruiti anche alcuni piccoli pennelli in massi, mai più risistemati e attualmente quasi completamente distrutti.



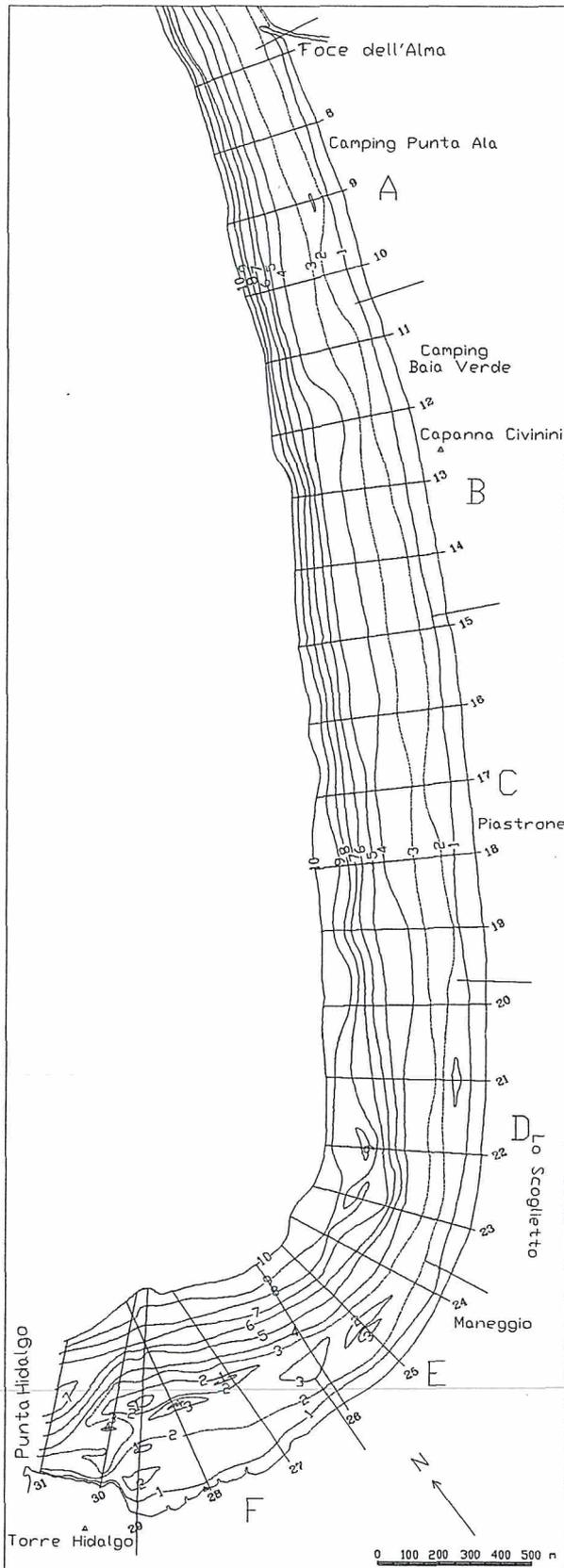
Figura 1 - Posizione dell'area di studio.

Il presente studio, effettuato nell'ambito di una convenzione di ricerca fra la Provincia di Grosseto e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, si propone di analizzare l'evoluzione recente di questo tratto di costa e la morfologia della spiaggia sommersa, nonché le caratteristiche granulometriche dei sedimenti e la loro dinamica. Tutto ciò per dare una caratterizzazione al litorale necessaria sia per la comprensione dei processi in atto che per l'eventuale impostazione di progetti tesi alla difesa del settore meridionale.

### Inquadramento geografico

Il litorale di Punta Ala è posto a nord dell'omonimo promontorio e si estende per circa 6 chilometri da Punta Hidalgo alla Foce del Fiume Alma<sup>1</sup>. Nella sua parte più meridionale guarda verso N-NW, ma una falcatura progressivamente più ampia lo porta ad una disposizione N-S e ad un andamento pressoché rettilineo (Fig. 2).

<sup>1</sup> Anche se la linea di riva del litorale di Punta Ala si interrompe con il piccolo promontorio di Torre Civette, a cui è appoggiata la foce dell'Alma, questa unità fisiografica si estende fino a Punta le Canne, comprendendo anche la spiaggia di Cala le Donne. Questo studio non prende però in considerazione questa spiaggia che è completamente inaccessibile da terra. Il rilievo batimetrico è stato comunque esteso anche a questa zona i cui fondali risultano in continuità morfologica con quelli del tratto studiato.



Il Fiume Alma, lungo 14 km e con un bacino idrografico di circa 55 km<sup>2</sup>, sembrerebbe l'unica fonte di alimentazione del litorale, ma le caratteristiche petrografiche delle sabbie di spiaggia fanno considerare irrilevante il suo contributo all'alimentazione di questa unità fisiografica (Gandolfi e Paganelli, 1975). Gli stessi Autori escludono anche ogni apporto sedimentario da sud, dalla provincia petrografica dell'Ombrone, e da nord, da quella del Golfo di Follonica, mentre ipotizzano la presenza di *secondarie fonti di alimentazione, compatibili con litorali a regime scarsamente dinamico, come questi*. Certamente un contributo deriva dall'erosione sia del promontorio di Punta Ala (Macigno), data la notevole frequenza di ciottoli arenacei sulla spiaggia del settore meridionale, che di *un livello alluvionale quaternario la cui provenienza non è ancora chiarita* (Gandolfi e Paganelli, 1977) in affioramento al livello del mare all'estremità meridionale dell'unità fisiografica e coperto dal materiale versato negli anni '70.

La posizione della foce dell'Alma all'estremità settentrionale del litorale e la sua direzione verso nord hanno consentito di identificare un drift prevalente diretto in questo senso (Bartolini et al., 1976; Aiello et al., 1976). L'attuale asta terminale di questo corso d'acqua è comunque artificiale e racchiusa fra un molo guardiano a sud ed il piccolo rilievo di Torre Civette a nord. Il confronto fra le foto aeree del 1940 e del 1954 mostra che in questo intervallo di tempo la sua foce è stata spostata artificialmente di circa 250 metri verso nord, ma non si hanno informazioni sull'esatta data dei lavori. Mancano inoltre studi sulla bonifica di Pian d'Alma, che ha portato alla scomparsa delle ampie paludi qui ancora presenti nella prima metà di questo secolo. E' comunque poco probabile che esse abbiano influito in modo significativo sull'evoluzione di questo litorale, dato che il settore in erosione è dalla parte opposta e sopraflutto rispetto alla foce del fiume.

Figura 2 - Carta batimetrica del litorale di Punta Ala (rilievo 1996). Viene riportata anche la posizione dei profili rilevati. Le lettere indicano i settori nei quali è stato suddiviso il litorale per il calcolo degli spostamenti medi della linea di riva.

## Acquisizione dei dati

Lo studio della morfologia e della dinamica dei sedimenti del litorale di Punta Ala è stato effettuato attraverso quattro campagne, realizzate fra l'aprile 1993 e il giugno 1996, che hanno interessato il tratto di costa compreso fra Punta Hidalgo e la foce del Fiume Alma:

- Aprile 1993: prelievo di campioni di battigia e di "spiaggia alta";
- Settembre 1993: prelievo di campioni di battigia e di "spiaggia alta";
- Febbraio 1996: prelievo di campioni di battigia;
- Giugno 1996: rilievo della linea di riva, campagna batimetrica, prelievo di campioni di battigia, prelievo di campioni sulla spiaggia sommersa fino all'isobata dei 7 metri.

Durante la campagna del giugno 1996 sono stati rilevati 25 (più 6 a Cala le Donne) profili batimetrici perpendicolari alla costa con equidistanza di circa 250 metri nel settore meridionale, quello colpito dall'erosione e morfologicamente meno omogeneo, e di 500 in quello settentrionale. Lungo ciascun profilo sono stati raccolti campioni di sedimenti di fondo con una benna Van Veen alla profondità di 0, 1.5, 3, 5 e 7 metri.

Il rilievo batimetrico è stato effettuato utilizzando un sistema di acquisizione e gestione dei dati automatico-digitale, con un ecoscandaglio di precisione (Ecomar mod. SWS 200 Khz) con emissione e ricezione separate e con posizionamento del natante in tempo reale (MDL mod. Lasertrack) tramite trasmissione via radio delle coordinate (sistema di riferimento Gauss-Boaga). I dati di profondità sono stati corretti in funzione dei valori di marea presenti al momento del rilievo di ogni profilo tramite le tavole di marea dell'Istituto Idrografico della Marina (Istituto Idrografico della Marina, 1995). Sono state apportate anche le correzioni in funzione della pressione atmosferica misurata per tutti i giorni della durata dei rilievi batimetrici. Si è quindi proceduto all'integrazione con i dati relativi alla posizione della linea di riva rilevata nello stesso periodo con metodi topografici tradizionali per mezzo di una stazione totale (teodolite e geodimetro) Pentax Pts II.

## Evoluzione della linea di riva

### *Metodologia di analisi*

Per lo studio della evoluzione recente del litorale è stata utilizzata la Carta in scala 1:5000 realizzata dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze (1989) in cui è riportata la posizione delle linee di riva ottenute per fotorestituzione dei rilievi aereofotogrammetrici degli anni 1954, 1973, 1979 e 1983<sup>2</sup>. Esse sono state digitalizzate per mezzo di una tavoletta grafica Calcomp e georeferenziate nel sistema di riferimento Gauss-Boaga (coordinate Nord-Est). Successivamente è stata aggiunta la linea di riva del giugno 1996, rilevata con metodi topografici tradizionali contemporaneamente al rilievo batimetrico. Le linee del 1954, 1973, 1979 e 1996 sono quindi state utilizzate per la redazione di una carta delle linee di riva in scala 1:5.000 (qui riprodotta in scala circa 1:20.000 in Figg. 3 e 4). Infine sono state calcolate le aree sottese dalle coppie di linee di riva relative ai periodi 1954-1973, 1973-1979, 1979-1996 e 1954-1996. A tal fine la spiaggia in esame è stata suddivisa in 6 settori a partire dalla foce del Fiume Alma fino al lembo più meridionale del litorale (vedi Fig. 2). Per ogni settore e per ogni intervallo di tempo sono state calcolate le variazioni areali della spiaggia emersa (Tabella 1), gli spostamenti lineari medi (Tabella 2) e i tassi di spostamento annuale (Tabella 3) della linea di riva. Da questi dati sono stati ricavati quattro grafici, ognuno relativo ad uno dei quattro intervalli di tempo, in cui viene mostrata la variazione lineare media in ogni settore (Figg. 5, 7, 8 e 9).

<sup>2</sup> Un successivo controllo delle foto aeree del 1983 ha messo in evidenza che la restituzione di questo volo è affetta da un errore maggiore di quello calcolato per tutte le altre linee di riva della Carta regionale. In ciò può aver influito anche il fatto che in questo settore le linee di riva vennero tracciate inizialmente sulla carta catastale e poi trasferite sulla Carta Tecnica Regionale. In considerazione di ciò, nel presente studio si è preferito non utilizzare questi dati.

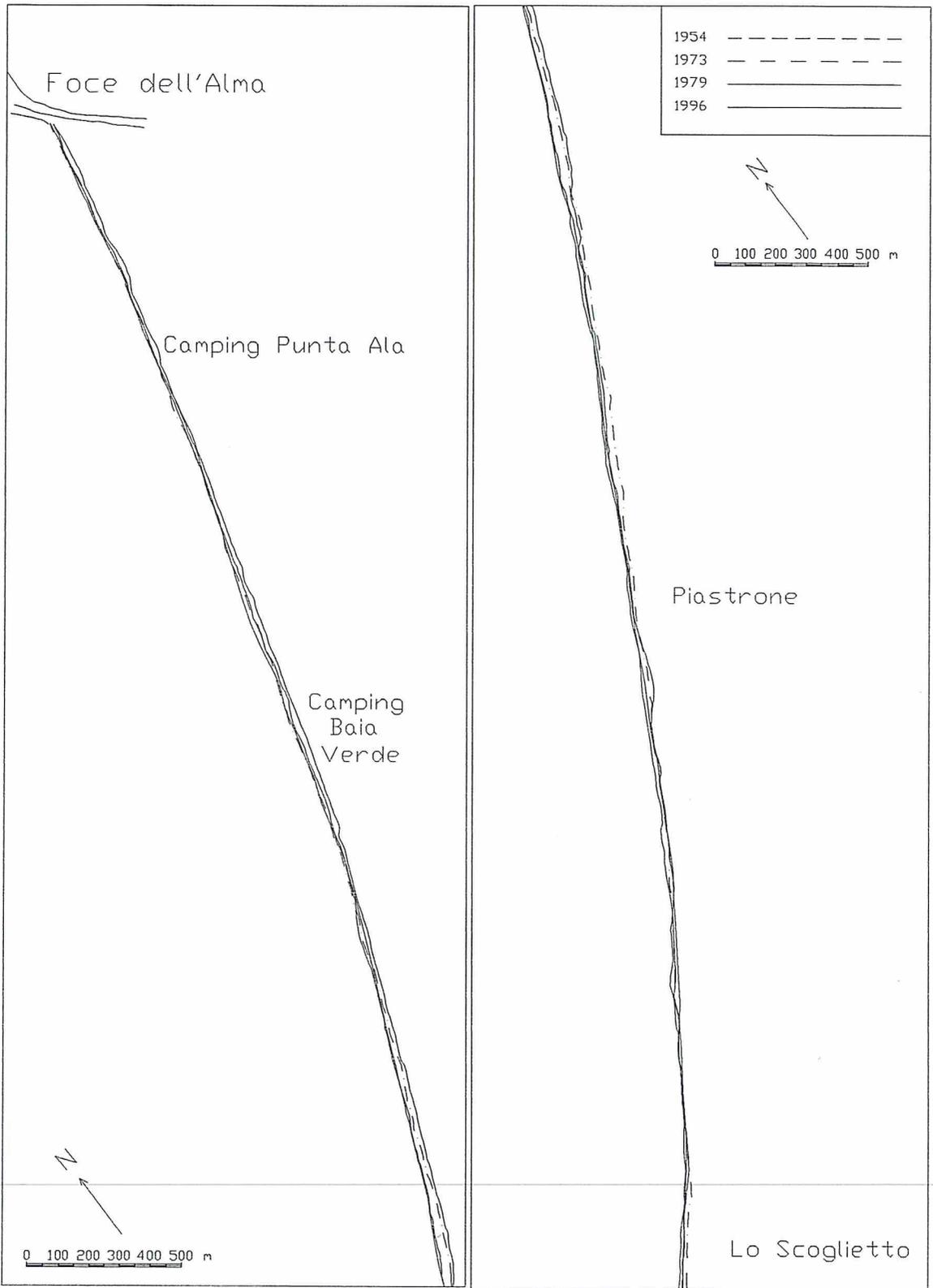


Figura 3 - Evoluzione della linea di riva nel tratto settentrionale (a sinistra) ed in quello centrale (a destra) dal 1954 al 1996 (Scala 1:20.000).

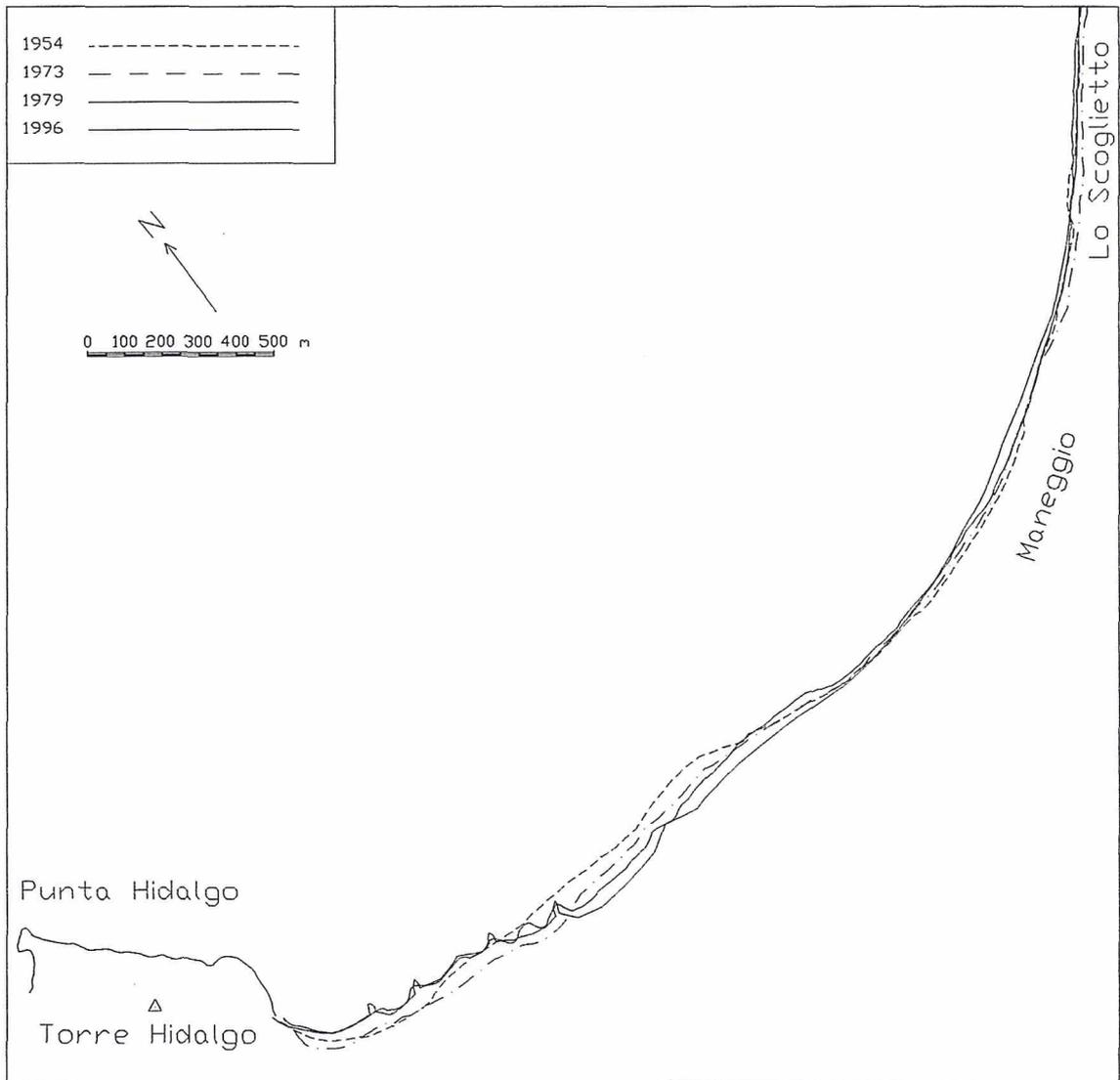


Figura 4 - Evoluzione della linea di riva nel tratto meridionale dal 1954 al 1996 (Scala 1:20.000).

Tabella 1 - Variazione areale ( $m^2$ ) della spiaggia emersa nei periodi 1954-1973, 1973-1979, 1979-1996 e per l'intero periodo 1954-1996 nei 6 settori considerati.

Settori	1954 / 1973	1973 / 1979	1979 / 1996	1954 / 1996
A	+ 6683.12	- 889.32	+1012.09	+6805.89
B	+ 8841.66	+ 2848.74	+599.23	+12289.63
C	- 4088.52	+ 12623.62	-5328.98	+3206.12
D	- 4866.75	+ 5977.08	-1242.33	-132.00
E	+ 2143.34	+ 2925.26	-833.45	+4235.15
F	- 11644.11	+ 5461.92	-5665.90	-11848.09

Tabella 2 - Spostamento medio (m) della linea di riva nei periodi 1954-1973, 1973-1979, 1979-1996 e per l'intero periodo 1954-1996 nei 6 settori considerati.

Settori	1954 / 1973	1973 / 1979	1979/1996	1954 / 1996
A	+ 7.27	- 0.97	+1.10	+7.4
B	+ 8.22	+ 2.65	+0.56	+11.43
C	- 3.34	+ 10.32	-4.36	+2.62
D	- 4.98	+ 6.12	-1.27	-0.13
E	+ 3.68	+ 5.02	-1.44	+7.26
F	- 15.78	+ 7.40	-7.68	-16.05

Tabella 3 - Tasso di spostamento medio (metri/anno) della linea di riva nei periodi 1954-1973, 1973-1979, 1979-1996 e per l'intero periodo 1954-1996 nei 6 settori considerati.

Settori	1954 / 1973	1973 / 1979	1979 / 1996	1954 / 1996
A	+ 0.38	- 0.16	+0.06	+0.18
B	+ 0.43	+ 0.44	+0.03	+0.27
C	- 0.17	+ 1.72	- 0.26	+0.06
D	- 0.26	+ 1.02	- 0.07	0.00
E	+ 0.19	+ 0.84	- 0.08	+0.17
F	- 0.83	+ 1.23	- 0.45	- 0.38

### Dal 1954 al 1973

In questo intervallo di tempo la fascia costiera di Punta Ala non è ancora antropizzata. Ciò nonostante, la parte meridionale del litorale (settore F) è già in netta erosione con un arretramento medio di quasi 16 metri (-0.83 m/anno) (vedi Tab. 3 e Fig. 5 ).

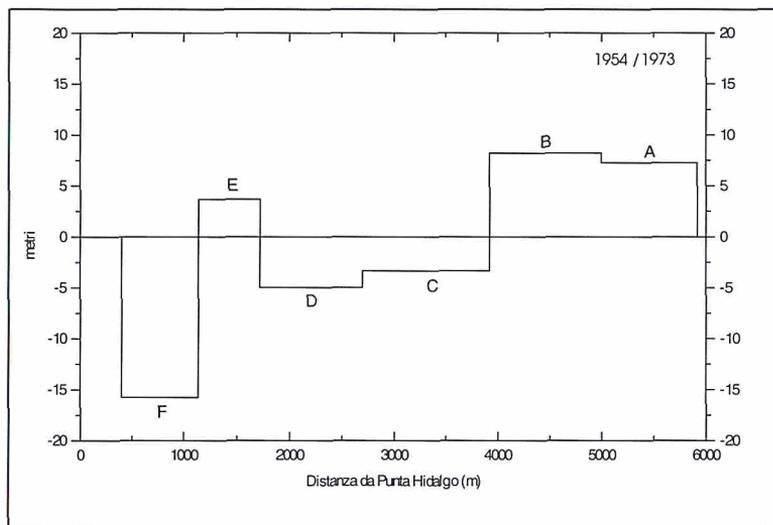


Figura 5 - Spostamento medio della linea di riva tra il 1954 ed il 1973 nei 6 settori considerati.

Questo dimostra che la spiaggia in esame era in erosione da prima che venisse effettuato qualsiasi tipo di intervento, sia sul litorale che nelle zone limitrofe (ad esempio la costruzione del porto di Punta Ala, che risale al 1976 ed alla quale si è spesso attribuita la responsabilità dei processi in atto). Una testimonianza di quanto appena detto è data anche dalla fotografia del 1947 (Fig. 6): in essa è rappresentato il tratto più meridionale della spiaggia ed è chiaramente evidente come l'erosione abbia già attaccato la duna, visibilmente scalzata alla base.

Figura 6 - La duna della spiaggia meridionale già attaccata dalla erosione in una foto del 1947. Nella foto si vedono anche i ciottoli prodotti dalla erosione del deposito continentale quaternario ancora oggi principale fonte di alimentazione di tutto il litorale. (Foto Banchi).



Come si può osservare in Figura 4, nella zona corrispondente al settore F tutte e cinque le diverse linee di riva formano una specie di convessità. Le linee del 1954 e del 1973 sono quelle che presentano questa caratteristica in modo più evidente, perché, come già detto, in quegli anni non vi era stato ancora realizzato nessun intervento di protezione. Il motivo di questa particolare morfologia può essere ricercato nella presenza, sui fondali antistanti questo tratto, di alcuni affioramenti di panchina, che costituiscono una difesa naturale della spiaggia.

L'adiacente settore E si presenta, nel periodo considerato, in accrescimento di circa 3.5 metri. I settori D e C sono invece di nuovo in erosione, rispettivamente di 5 e 3.3 metri, infine i settori B e A sono in accrescimento di 8.2 e 7.3 metri (Fig. 5). Ricordando quanto già detto a proposito della possibile imprecisione della posizione delle linee di riva, si può supporre che il loro andamento oscillante derivi in gran parte da ciò. In particolare per quanto riguarda i settori E, D e C, le loro variazioni lineari nell'intervallo di tempo 1954-1973 sono sempre al di sotto dei 5 metri, cioè minori dell'errore presunto nella determinazione della loro posizione (Bartolini et al, 1989). L'avanzamento della linea di riva nei settori A e B, rispettivamente di 7.3 metri e di 8.2 metri (0,4 metri/anno, vedi Tab. 3) è probabilmente dovuto al deposito dei sedimenti erosi nella zona meridionale del litorale.

#### *Dal 1973 al 1979*

Durante questo intervallo di tempo vengono costruiti il porto di Punta Ala, i complessi residenziali e gli stabilimenti balneari. Sul litorale, nella zona meridionale colpita dall'erosione, viene effettuato il primo grosso intervento di ripascimento (di circa 80.000 m<sup>3</sup>) utilizzando anche materiale di discarica, e contemporaneamente vengono costruiti dei piccoli pennelli in massi nel tentativo di mantenere stabile il più a lungo possibile il materiale riportato. Questo si riflette in un generale avanzamento della linea di riva (Fig. 7); infatti i settori F, E, D, C e B si presentano tutti in accrescimento, con un valore massimo di 10 metri per il settore C. Il settore più settentrionale, A, deve, al contrario, essere considerato come in equilibrio (1 metro di arretramento in quattro anni).

#### *Dal 1979 al 1996*

Nell'ultimo periodo di tempo considerato il litorale di Punta Ala è caratterizzato da una relativa stabilità, fatta eccezione per il settore F, dove l'arretramento medio risulta essere pari a circa 8 metri (Fig. 8).

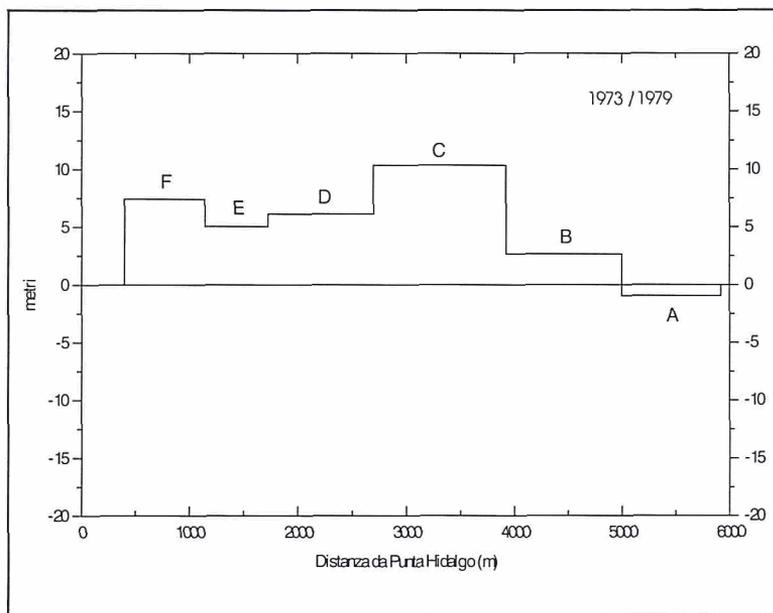


Figura 7 - Spostamento medio della linea di riva tra il 1973 ed il 1979 nei 6 settori considerati.

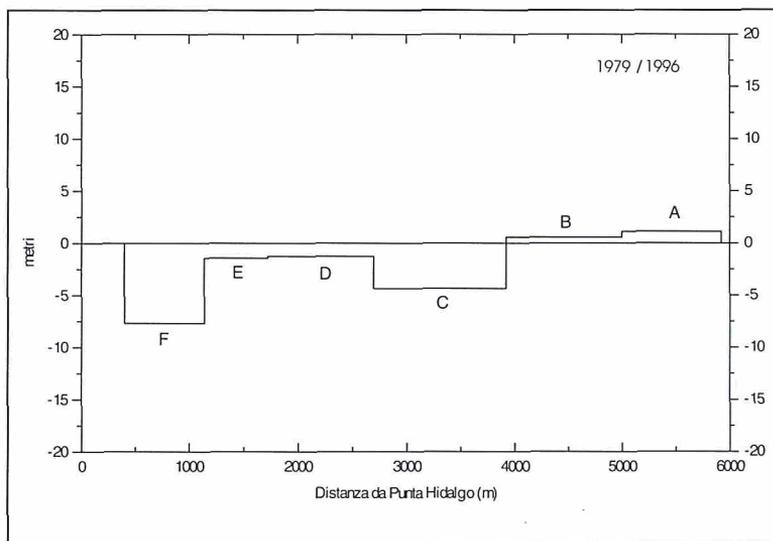


Figura 8 - Spostamento medio della linea di riva tra il 1979 ed il 1996 nei 6 settori considerati.

Gli altri settori (Fig. 8 e Tab.2) subiscono uno spostamento medio della linea di riva che rientra nell'errore previsto nel metodo di restituzione e dovrebbero quindi essere considerati come stabili, anche se i valori negativi dei settori E, D e C e positivi dei settori B ed A sono ben inquadrabili nelle tendenze evolutive generali.

In una zona compresa nel settore F, davanti ad uno stabilimento balneare che maggiormente ha risentito degli effetti dell'erosione, era stato effettuato, nella primavera del 1995, un ripascimento di circa 13 000 m<sup>3</sup> di materiale prelevato a Sud del porto.

Nonostante ciò la linea di riva del 1996 risulta arretrata rispetto a quella del 1979, a riprova del cronico deficit sedimentario di questo settore del Golfo. L'intervento del 1976 ebbe un esito migliore, sia perché interessò un volume maggiore di materiali, sia perché venne associato alla costruzione di pennelli che ne ridussero la dispersione lungo riva. Purtroppo per entrambi non esistono dati circa la granulometria utilizzata.

### Sintesi dell'evoluzione del litorale

Confrontando la posizione della più antica linea di riva disponibile (1954) con quella rilevata nel 1996 si può meglio evidenziare la tendenza evolutiva di questo tratto di litorale (Fig. 9).

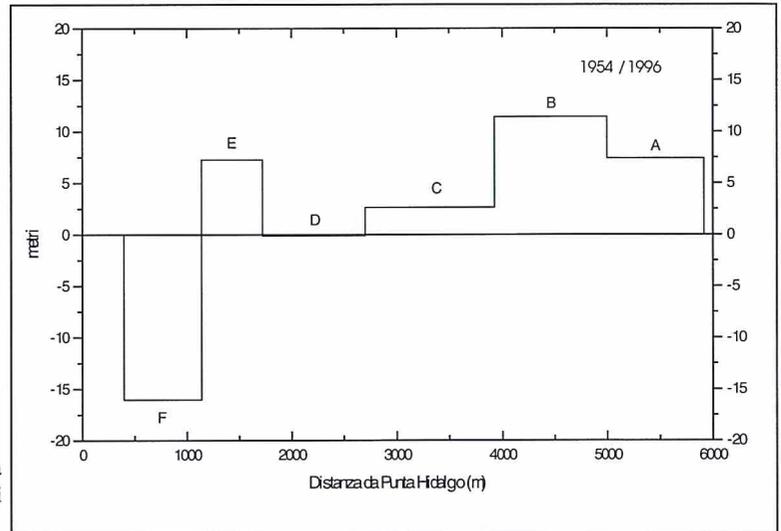


Figura 9 - Spostamento medio della linea di riva tra il 1954 ed il 1996 nei 6 settori considerati.

Come si può vedere in Figura 9 ed in Tabella 2, i settori settentrionali A, B e C si presentano in netto avanzamento, con un picco massimo di 11.4 metri nel settore B. Il settore D può essere considerato praticamente in equilibrio (arretramento di 0.1 metri; 0.03 metri/anno), mentre il settore E è in accrescimento di 7.3 metri. L'unico settore in netta erosione è quello posto all'estremità meridionale del litorale, con una perdita media di 16 metri di spiaggia.

E' evidente, anche da quanto diremo in seguito, che il materiale eroso in questa parte del litorale è andato ad alimentare i settori più settentrionali. In Figura 9 non si ha un pareggio fra le aree in erosione e quelle in progradazione, ma un bilancio paritario dell'intero litorale può essere ottenuto sia considerando che l'arretramento nel tratto meridionale implica la messa in gioco di ingenti volumi di sedimenti, per l'erosione della duna e dei depositi quaternari, sia ipotizzando un modesto apporto del Fiume Alma.

Nell'insieme questo tratto di costa più che ad un'erosione, innescata da un deficit sedimentario, è soggetto ad un riassetto della linea di riva, che porta ad una più accentuata falcatura della parte meridionale e ad una progradazione di quella settentrionale che comunque, appoggiandosi alla breve armatura di foce dell'Alma, non può avanzare indefinitamente.

### Morfologia ed evoluzione della spiaggia sommersa

Lo studio morfologico della spiaggia sommersa si basa sui rilievi batimetrici effettuati nel giugno 1996, che sono consistiti, come già detto in precedenza, in 31 profili perpendicolari a costa compresi fra la battigia e l'isobata dei 10 metri.

Sulla base di questi rilievi è stata costruita una carta batimetrica in scala 1:5.000 (riprodotta in scala 1:20.000 in Fig. 2) dalla quale emerge una notevole differenza nella morfologia della spiaggia sommersa fra la parte meridionale e quella centro-settentrionale del litorale.

Il profilo della spiaggia sommersa nel settore meridionale risulta estremamente articolato a causa della presenza di piccoli scogli, probabilmente dovuti ad affioramenti di panchina (*beach rock*). Più a nord, la morfologia del fondale diventa più regolare anche se compare una serie di barre a festoni posizionate, al momento del rilievo, intorno ai 2, 4 e 6 metri di profondità.

Per quanto riguarda la pendenza media della spiaggia sommersa (vedi Fig. 2), essa risulta minore nelle zone meridionali in erosione (circa 1.7%) e maggiore nel settore più settentrionale in equilibrio

o in progradazione (circa 2.5%). Ciò può essere messo in relazione ai processi erosivi o deposizionali in atto: considerando che l'evoluzione del profilo della spiaggia sommersa può evolversi, almeno su tempi brevi, esclusivamente entro la profondità di chiusura, è evidente che l'arretramento della linea di riva tende ad "allungare" il profilo fra questo punto e la battigia, riducendone la pendenza. Dove la spiaggia è in avanzamento la distanza fra la linea di riva e la batimetrica del punto di chiusura è inferiore.

La profondità di chiusura, che avendo a disposizione dati meteomarini certi viene calcolata in base ad essi, nel nostro caso è derivabile dall'analisi del profilo della spiaggia sommersa; in particolare, nei tratti in erosione, si ritiene possibile collocarla in corrispondenza del passaggio fra la forma concava della spiaggia superiore (attiva) a quella convessa della spiaggia inferiore (passiva) dove avvengono flussi sedimentari prevalentemente per processi gravitativi. Questo passaggio avviene alla profondità di circa 5 - 6 metri, valore che utilizzeremo, in seguito, per il calcolo del volume di sedimenti spostati sui fondali a seguito dell'innalzamento del livello marino (Bruun, 1962).

## **Caratteristiche granulometriche dei sedimenti**

### ***Analisi dei sedimenti***

L'analisi granulometrica dei sedimenti raccolti è stata fatta per mezzo di setacciatura meccanica a secco con intervallo di  $1/2$  phi e per una durata di 10 minuti. Sulla base delle percentuali relative a ciascuna classe granulometrica, sono stati tracciati gli istogrammi di frequenza e le curve cumulative in scala probabilistica. Da queste sono stati ricavati, per interpolazione lineare, i percentili necessari al calcolo dei parametri grafici di Folk e Ward (1957): Media ( $M_z$ ), Classazione ( $\sigma_1$ ) ed Asimmetria ( $Sk_1$ ). Si è registrato anche il valore del Primo percentile e la percentuale di frazione fine, intesa come quella avente dimensioni inferiori a 0.063 mm (4 phi).

Per le campionature che hanno interessato esclusivamente la spiaggia emersa sono stati tracciati i grafici relativi alle variazioni di ciascun parametro lungo costa. Per la campagna del giugno 1996 sono state realizzate le carte di distribuzione dei parametri statistici Media ( $M_z$ ), Classazione ( $\sigma_1$ ), I° Percentile e Percentuale della frazione fine.

Sono stati tracciati ed analizzati anche i diagrammi bivariati delle combinazioni Media ( $M_z$ )/Profondità, Media ( $M_z$ )/Classazione ( $\sigma_1$ ), Media ( $M_z$ )/Asimmetria ( $Sk_1$ ) e Classazione ( $\sigma_1$ )/Asimmetria ( $Sk_1$ ). E' stata infine effettuata l'analisi delle direzioni di trasporto dei sedimenti con il metodo proposto da Gao e Collins (1992).

### ***Caratteristiche granulometriche dei sedimenti di battigia***

I sedimenti che costituiscono la battigia del litorale di Punta Ala presentano una significativa variabilità della Media ( $M_z$ ), sia in senso longitudinale che in senso temporale (Fig. 10). Questa variabilità è comunque da considerarsi relativa se messa a confronto con quella mostrata da sedimenti di battigia di gran parte del litorale toscano (vedi ad es. Bartolini, 1976a; Aiello et al., 1980; Pranzini, 1983). L'analisi dell'andamento del valore di  $M_z$  lungo costa mostra che la maggiore variabilità temporale si registra nel settore meridionale del Golfo, con valori che oscillano fra 0.15 phi e 2.47 phi (aprile '93 e febbraio '96 rispettivamente). La prima campionatura registra la massima variabilità spaziale che, anche in questo caso, è massima nel settore meridionale.

Complessivamente le dimensioni medie dei sedimenti mostrano una riduzione andando da Sud verso Nord, cosa che può fare ipotizzare, in prima approssimazione, una analoga direzione di trasporto prevalente dei sedimenti. In questo movimento avverrebbe anche una graduale classazione dei materiali che perderebbero le frazioni più grossolane. Ciò comporta la presenza, nel settore settentrionale, di sabbie assai più omogenee di quelle presenti più a Sud. A ciò sarebbe imputabile la minore variabilità, spaziale e temporale, presente nel tratto più settentrionale del Golfo.

La "sorgente" dei materiali grossolani presenti nel tratto meridionale è da ricercare, non solo nel deposito quaternario evidenziato da Gandolfi e Paganelli (1976) ma anche nei sedimenti che qui fu-

rono riportati alla fine degli anni '70 in occasione del ripascimento, durante il quale furono usati materiali molto eterogenei che comprendevano anche inerti provenienti da discariche. L'ipotesi che col trasporto verso Nord i sedimenti diventino più classati è avvalorata dai dati relativi alla Classazione ( $\sigma_1$ ) che raggiunge valori estremamente bassi (sedimenti *ben classati*, secondo la classificazione di Folk e Ward, 1957) proprio nel tratto più settentrionale (Fig. 11), mentre sul lato meridionale i materiali di spiaggia si presentano, in quasi tutti i periodi analizzati da *poco classati a molto poco classati*.

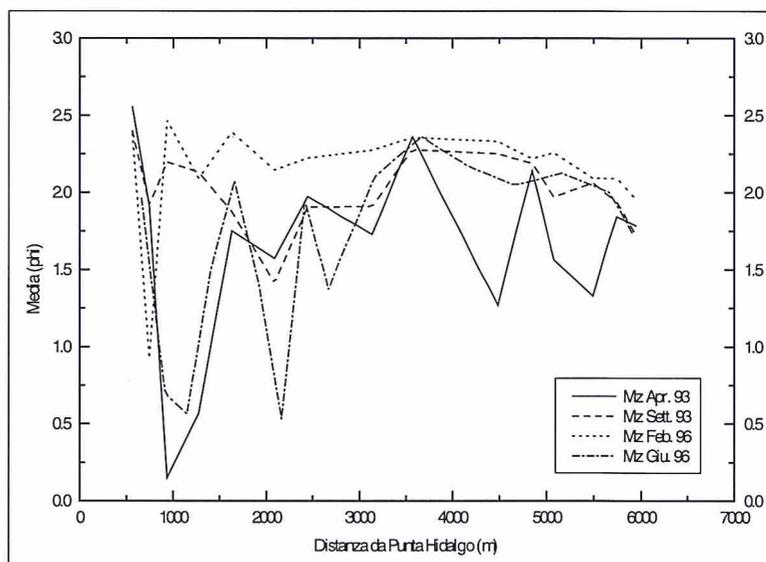


Figura 10 - Andamento delle dimensioni medie ( $M_z$ ) dei sedimenti di battigia lungo il litorale.

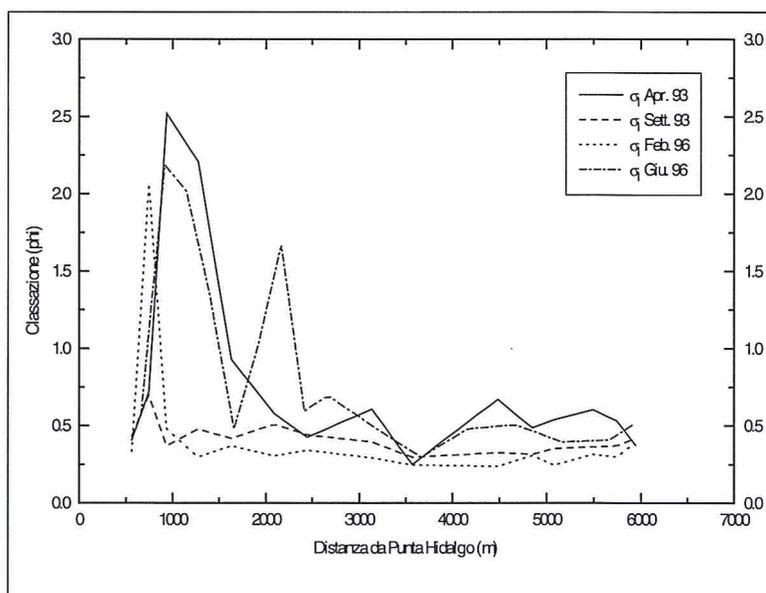


Figura 11 - Andamento della Classazione ( $\sigma_1$ ) dei sedimenti di battigia lungo il litorale.

Per quanto riguarda l'Asimmetria ( $Sk_1$ ), i sedimenti di battigia presentano valori quasi esclusivamente negativi (Fig. 12), in accordo con quanto trovato da numerosi autori (vedi ad es. Folk, 1966; Friedman, 1961), in particolare per sabbie fini.

Valori decisamente negativi si trovano nel settore più meridionale, mentre procedendo verso Nord si incontrano valori sempre più prossimi a zero.

Il confronto fra i valori della Media ( $M_z$ ) e della Classazione ( $\sigma_1$ ) per i campioni di battigia delle quattro campagne (Fig. 13) indica una discreta correlazione fra questi due parametri ( $R^2 = 0.80$ ), con *sabbie fini ben classate e sabbie grossolane da poco a molto poco classate*. Le prime si ritrovano nel settore più settentrionale, in avanzamento, mentre le seconde nella spiaggia meridionale in erosione.

Il confronto fra i valori della Media ( $M_z$ ) e quelli dell'Asimmetria ( $Sk_1$ ) (Fig. 14) mostra una correlazione assai più debole, con l'unico elemento di rilievo dato da una Asimmetria più negativa per i sedimenti più grossolani, che ovviamente rappresentano il settore meridionale dell'area studiata.

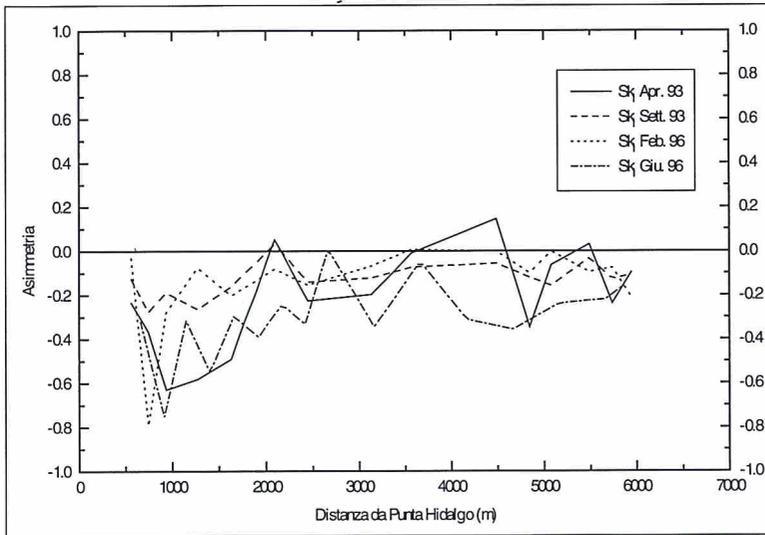


Figura 12 - Andamento dell'Asimmetria ( $Sk_1$ ) dei sedimenti di battigia lungo il litorale.

Questa tendenza, presente in tutte e quattro le campagne, potrebbe essere associata alle condizioni di erosione che caratterizzano il settore meridionale. Qui l'erosione asporterebbe prevalentemente le particelle più fini lasciando un deposito con una coda più grossolana. Ciò è in buon accordo con quanto trovato da Bartolini (1976b) che giustifica valori positivi dell'Asimmetria solo in tratti di costa protetti, laddove l'energia del moto ondoso non è in grado di asportare le frazioni a granulometria minore.

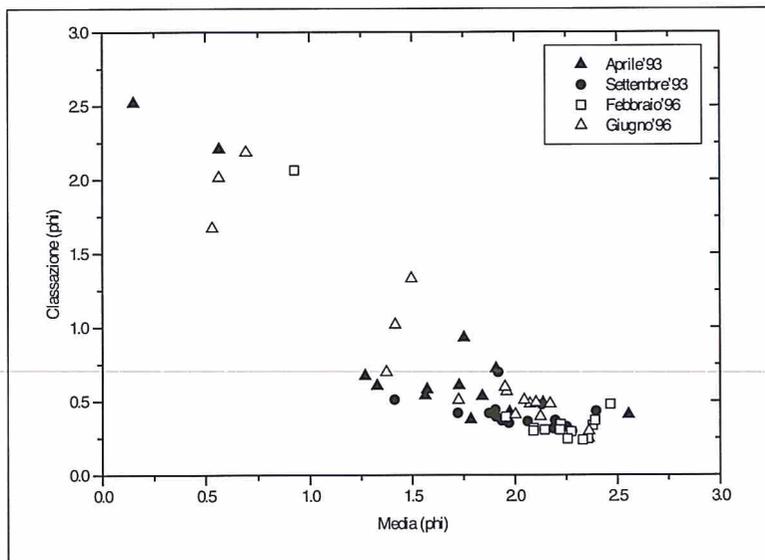


Figura 13 - Confronto tra Media ( $M_z$ ) e Classazione ( $\sigma_1$ ) per i sedimenti di battigia.

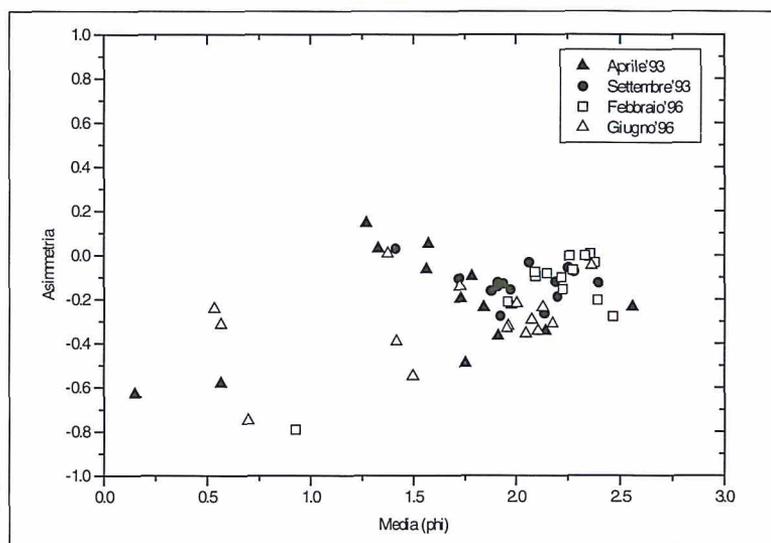


Figura 14 - Confronto tra Media ( $M_z$ ) e Asimmetria ( $Sk_1$ ) per i sedimenti di battigia.

Per quanto riguarda il confronto Classazione ( $\sigma_1$ ) / Asimmetria ( $Sk_1$ ) (Fig. 15), si può solo notare che i sedimenti più classati presentano una distribuzione più simmetrica e che, col peggiorare della Classazione, l'Asimmetria diventa sempre più negativa. I campioni più classati e più simmetrici derivano dalla zona settentrionale del litorale, mentre quelli meno classati e con Asimmetria più negativa rappresentano i sedimenti più grossolani appartenenti al tratto meridionale in erosione.

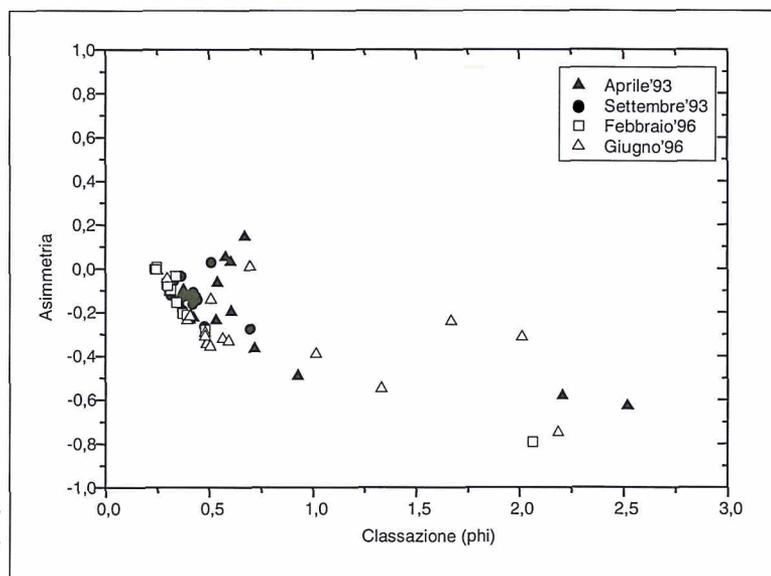


Figura 15 - Confronto tra Classazione ( $\sigma_1$ ) e Asimmetria ( $Sk_1$ ) per i sedimenti di battigia.

### *Caratteristiche granulometriche dei sedimenti di spiaggia alta*

La spiaggia di Punta Ala è delimitata verso terra da un apparato dunale estremamente ridotto e coperto da vegetazione, ed anche nei tratti in progradazione non vi è traccia di dune di neo formazione, forse anche a causa delle operazioni di pulizia meccanica dell'arenile eseguite con eccessivo zelo. I depositi eolici attuali sono estremamente modesti e molto spesso si appoggiano a manufatti presenti sul limite interno della spiaggia. I materiali campionati rappresentano la parte più alta della

spiaggia, che dal punto di vista morfologico può in alcuni punti assomigliare più ad una berma di temp. sta che non ad una vera e propria *foredune*.

La loro analisi granulometrica di fatto sembrerebbe avvalorare l'origine eolica, dato che i sedimenti si presentano tutti *fini* ( $2.10 < M_z < 2.35$ ) e *molto ben classificati* ( $0.22 < \sigma_1 < 0.38$ ), come risulta anche dalla Figura 16. In base a ciò e ai valori assunti dall'Asimmetria ( $Sk_1$ ) (generalmente prossimi a zero; Fig. 17), secondo quanto affermato da Friedman (1961) si tratterebbe con certezza di sabbie di duna.

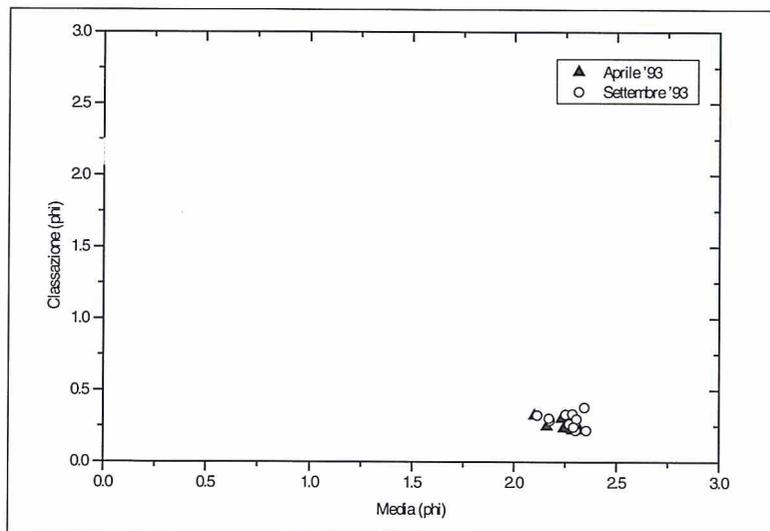


Figura 16 - Confronto tra Media ( $M_z$ ) e Classazione ( $\sigma_1$ ) per i sedimenti di spiaggia alta.

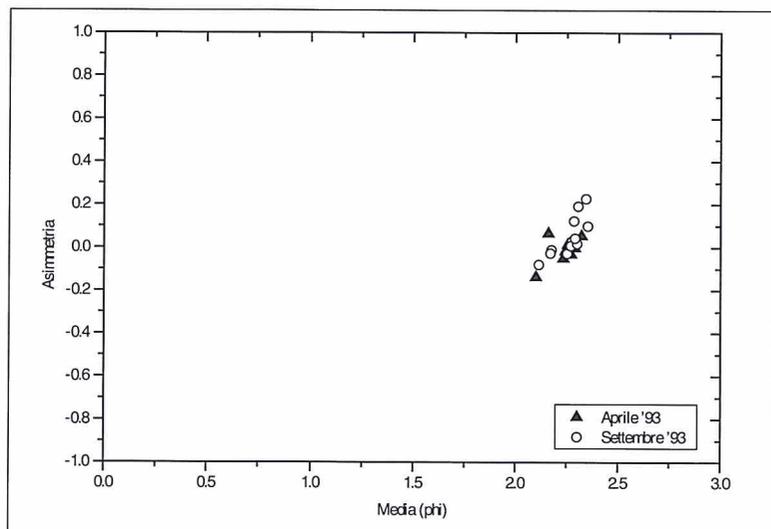


Figura 17 - Confronto tra Media ( $M_z$ ) e Asimmetria ( $Sk_1$ ) per i sedimenti di spiaggia alta.

L'assenza di cordoni dunali attuali, pur in presenza di una sorgente idonea alla loro formazione, quale è la spiaggia emersa del litorale in questione (costituita da sabbie fini, generalmente asciutte per motivi climatici, ed esposta a venti foranei anche forti) può essere giustificata solo dalla ridotta larghezza dell'arenile (circa 30 metri nei tratti più ampi) e dal fatto che le mareggiate maggiori riescono a risalire la berma a debole pendenza fino alla zona di sedimentazione eolica, rimettendo così in circolazione i materiali accumulati durante il periodo estivo.

### Caratteristiche granulometriche dei sedimenti di spiaggia sommersa

L'analisi dei dati granulometrici dei campioni prelevati sulla spiaggia sommersa mostra come vi sia una buona correlazione fra dimensioni medie ( $M_z$ ) dei sedimenti e loro posizione batimetrica (Fig. 18).

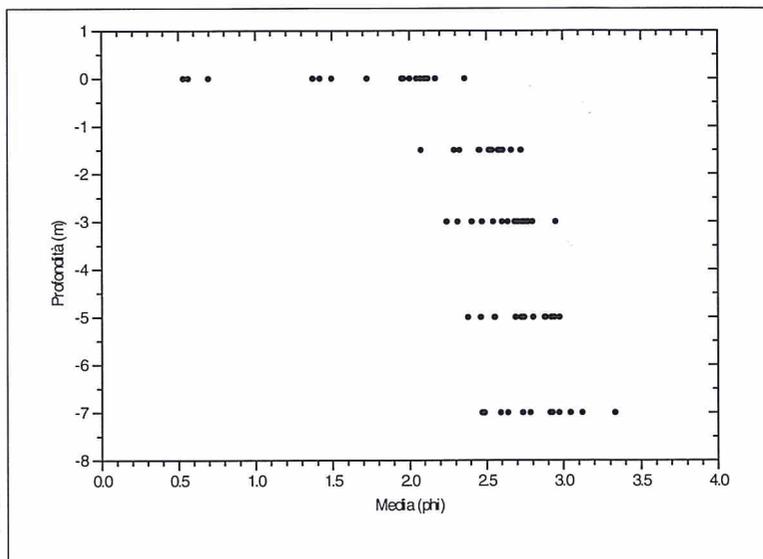


Figura 18 - Confronto tra Media ( $M_z$ ) e profondità per i sedimenti di spiaggia sommersa.

Andando dalla battigia verso i fondali maggiori si assiste infatti ad una diminuzione delle dimensioni, diminuzione assai brusca nel passaggio fra 0 e -1,5 metri ed estremamente modesta e graduale verso i fondali maggiori. Lasciata la battigia, si hanno sempre sedimenti di dimensioni comprese fra 2 e 3,5, costituiti quindi da *sabbie fini* e *molto fini*. La gamma dimensionale dei materiali prelevati da ciascuna fascia batimetrica è comunque dello stesso ordine di grandezza della riduzione media registrata passando dai sedimenti prelevati a 1,5 metri a quelli prelevati a 7,5 metri di profondità. Infatti, le sabbie più fini fra tutte quelle prelevate a 1,5 metri di profondità hanno dimensioni minori dei sedimenti più grossolani fra quelli presenti sul fondale di 7 metri. Ciò consente di ipotizzare una dinamica sedimentaria in cui siano possibili spostamenti da e verso riva ed un costante rimescolamento dei materiali, processi che sembrerebbero non interessare i materiali di battigia, almeno quelli presenti nel settore meridionale, che potrebbero solo perdere le frazioni granulometriche minori a vantaggio dei fondali antistanti. Questo aspetto verrà ripreso in seguito, nel momento in cui verranno analizzati i "vettori di trasporto" con una opportuna analisi dei parametri statistici (Gao e Collins, 1992).

Anche osservando la carta delle dimensioni medie ( $M_z$ ) dei sedimenti (Fig. 19) emerge l'estrema omogeneità dei materiali che costituiscono i fondali della zona di studio, assai diversi dai sedimenti di battigia, estremamente più grossolani, in particolare nel settore meridionale in erosione. Da notare è l'allontanamento da riva dell'isolina dei 2,5 phi e l'aumento delle dimensioni medie dei sedimenti di battigia nel settore settentrionale. Ciò potrebbe essere messo in relazione sia con una alimentazione del litorale da parte di questo corso d'acqua, smentita però dall'andamento regolare delle isobate, che con la provenienza da nord di materiali prodotti dall'erosione di rocce intensamente alterate analoghe a quelle presenti sul promontorio di Punta Ala.

Materiali ben più grossolani si trovano in prossimità della riva nel settore meridionale e costituiscono la più consistente fonte di alimentazione di tutto il litorale.

I materiali più fini presenti nel settore meridionale intorno alla profondità di 7 metri potrebbero essere associati alla deposizione delle frazioni a granulometria minore che, in sospensione, riescono ad uscire dall'unità fisiografica dell'Ombrone, come dimostrato, fra l'altro, dall'analisi dei dati raccolti dal Coastal Zonel Color Scanner (CZCS) fra il 1978 e il 1986 (Landi e Pranzini, in prep.). Questo

materiale non va a costituire la spiaggia emersa dove l'energia del moto ondoso non ne consente la sedimentazione, e non consente il collegamento fra la provincia petrografica dell'Alma e quella dell'Ombrone (Gandolfi e Paganelli, 1975 e 1977).

La carta relativa alle dimensioni del Primo percentile (Fig. 20) mostra, ovviamente, molte analogie con quella della Media ( $M_z$ ), anche se si presenta più articolata, in particolare sui fondali. La maggiore variabilità di questo parametro è comunque insita nel fatto che differenze significative nelle code delle distribuzioni sono assai più probabili che non differenze nelle medie.

Le dimensioni del Primo percentile sono state spesso messe in relazione all'energia dell'ambiente di deposizione (Passega et al., 1967; Pranzini, 1981). Ciò porterebbe ad associare alte energie al settore meridionale dove questo parametro raggiunge il valore di  $-4.23 \phi$  (18.8 mm). Si deve però considerare che, nel nostro caso, i materiali presenti in questa zona sono di fatto residuali di un deposito grossolano e poco classato quale era quello di ripascimento. La correlazione fra dimensioni del Primo percentile ed energia dell'ambiente ha senso per materiali di ugual classazione (Pranzini, 1986), mentre nel nostro caso in questo settore abbiamo proprio materiali *molto poco classati*.

Nella carta delle dimensioni del Primo percentile si nota anche un aumento del valore di questo parametro in prossimità della Foce del Fiume Alma. Questo fatto, come già visto precedentemente per la carta della Media ( $M_z$ ), potrebbe essere imputabile al contributo sedimentario di materiale più grossolano da parte di questo fiume.

Una forte variabilità è mostrata anche dalla carta della percentuale della frazione fine ( $<63$  micron o  $4 \phi$ ), frazione granulometrica praticamente assente sulla battigia, dove l'energia del moto ondoso non consente la sedimentazione delle particelle fini (Fig. 21).

Sui fondali abbiamo concentrazioni più elevate di sedimenti fini nella parte meridionale del Golfo, dove, in base a quanto detto precedentemente, si accumulano forse quelli trasportati in sospensione dalla foce dell'Ombrone.

Per quanto riguarda il confronto fra Media ( $M_z$ ) e Classazione ( $\sigma_1$ ) dei sedimenti (Fig. 23), si nota un andamento a parabola dovuto agli alti valori della Classazione per i sedimenti più grossolani, ai valori estremamente bassi per i materiali di dimensioni prossime a  $2.5 \phi$  e ad un nuovo aumento dei valori della Classazione per i sedimenti ancora più fini. Un simile andamento del rapporto tra Media e Classazione sembra essere una caratteristica generale dei materiali di spiaggia, come messo in evidenza già da Folk (1966), Inman (1949) e Folk e Ward (1957), i quali trovavano come le *sabbie fini* fossero ben classate e come la Classazione peggiorasse per sedimenti più fini e più grossolani. Alcuni Autori (Frank e Friedman, 1973) trovano che i materiali meno classati sono presenti in zone caratterizzate da bassa energia.

Nel nostro caso, come emerge dall'analisi della carta della Classazione ( $\sigma_1$ ) (Fig. 22), la zona in questione sarebbe quella meridionale, in cui però i materiali devono in buona parte essere considerati come residuali e quindi non rappresentativi delle condizioni energetiche.

Un altro fatto osservabile dalla carta della Classazione è il leggero peggioramento di questo parametro nelle vicinanze del Fiume Alma. Qui infatti i sedimenti passano da *molto ben classati* a *ben classati* e questa variazione, di nuovo, potrebbe indicare sia la presenza di apporti fluviali più grossolani che l'arrivo di sabbie dal tratto costiero posto a nord della zona studiata. Quest'ultima ipotesi, che riemerge costantemente dall'analisi dei dati raccolti, non è mai stata presa in considerazione dai vari autori che si sono occupati di questo litorale e dovrebbe essere più attentamente valutata con una estensione verso nord dell'area di studio.

Per quanto riguarda l'Asimmetria ( $Sk_1$ ), a differenza di quanto si è riscontrato per i sedimenti di battigia, che erano tutti con Asimmetria negativa, quelli presenti sui fondali mostrano una maggiore differenziazione, andando da  $-0.75$  a  $+0.33$  (Fig. 24). Un'analisi più dettagliata ha messo in evidenza come i sedimenti fino alla profondità di 1.5 metri conservino in genere l'Asimmetria negativa dei campioni di battigia, mentre sui fondali maggiori il valore diventa decisamente positivo.

Ciò si spiega con la presenza di una coda di materiali grossolani nelle distribuzioni granulometriche dei campioni di minore profondità, associabile con livelli energetici più elevati, mentre i sedimenti

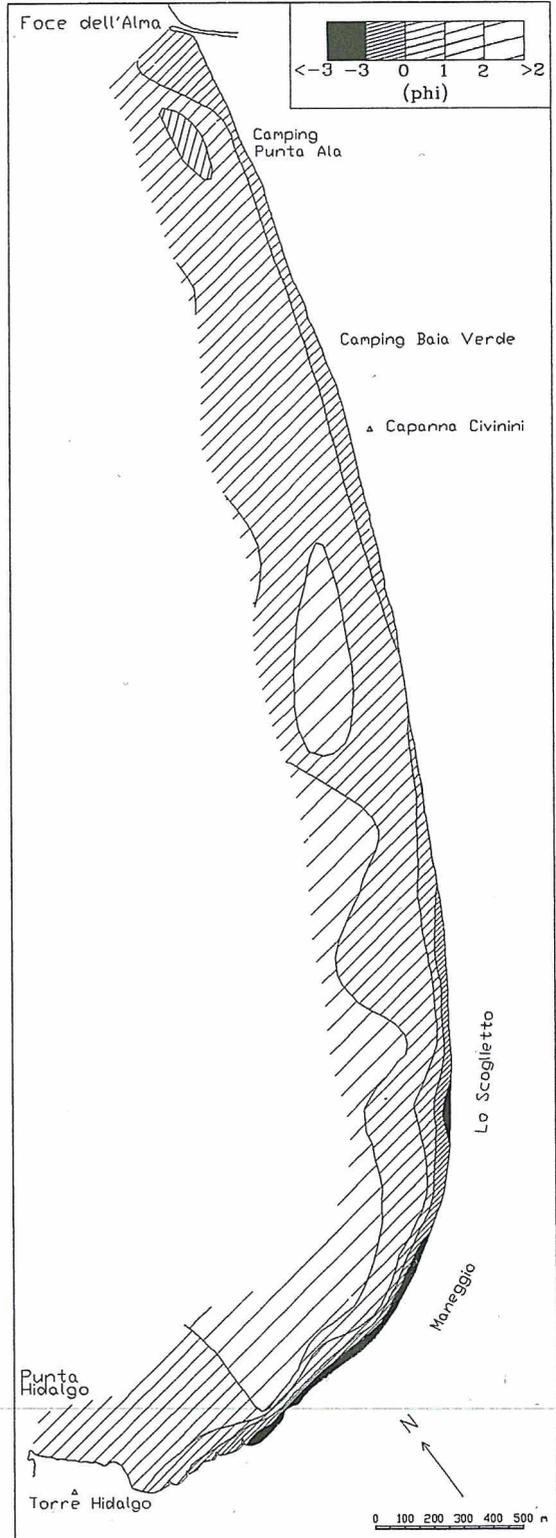
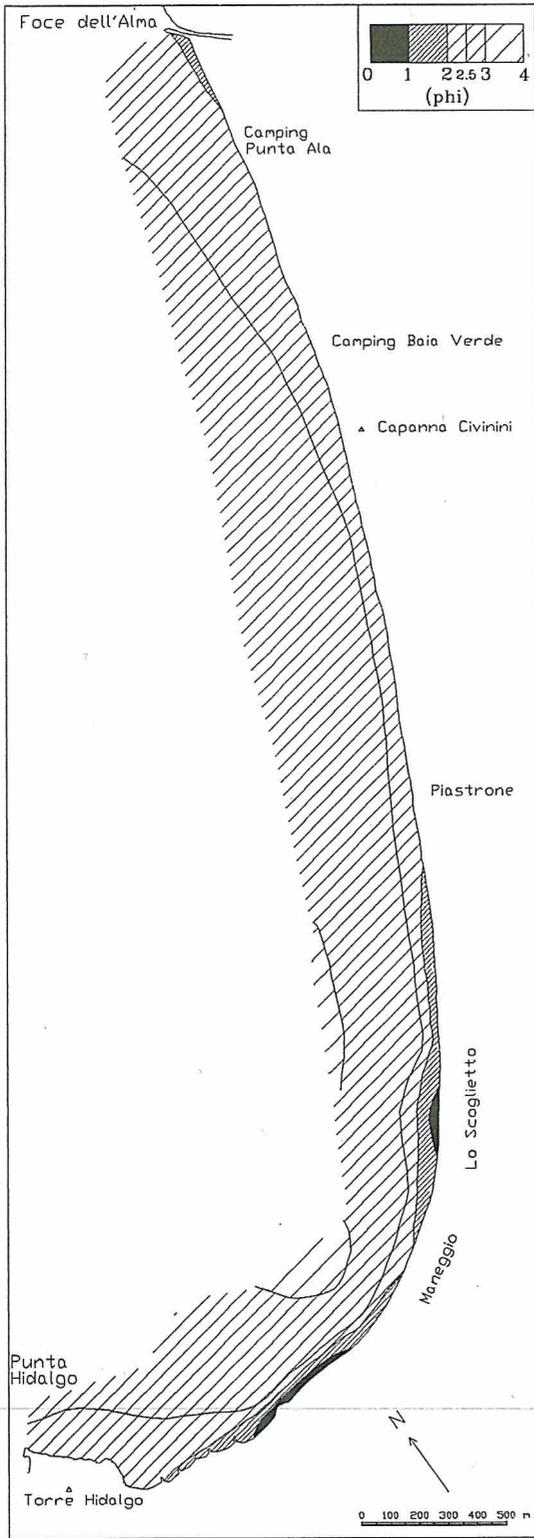


Figura 19 - Dimensioni medie (Mz) dei sedimenti del litorale di Punta Ala.

Figura 20 - Dimensioni del Primo percentile dei sedimenti del litorale di Punta Ala.

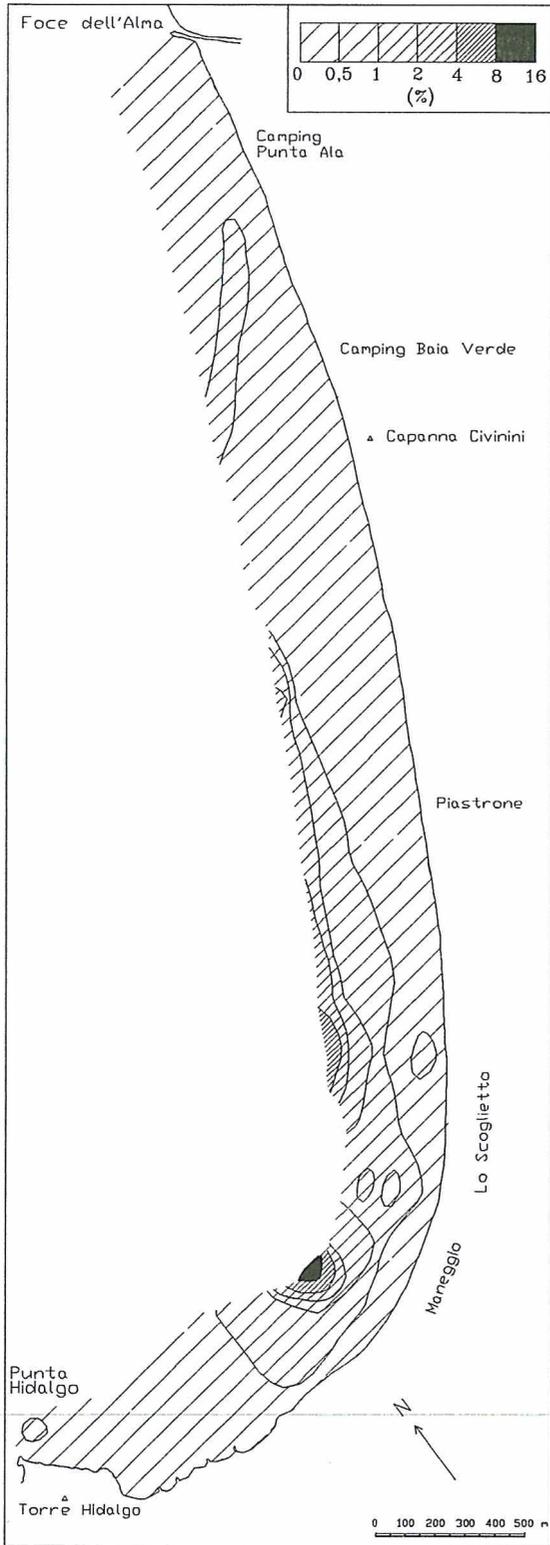


Figura 21 - Percentuale di frazione fine presente nei sedimenti del litorale di Punta Ala.

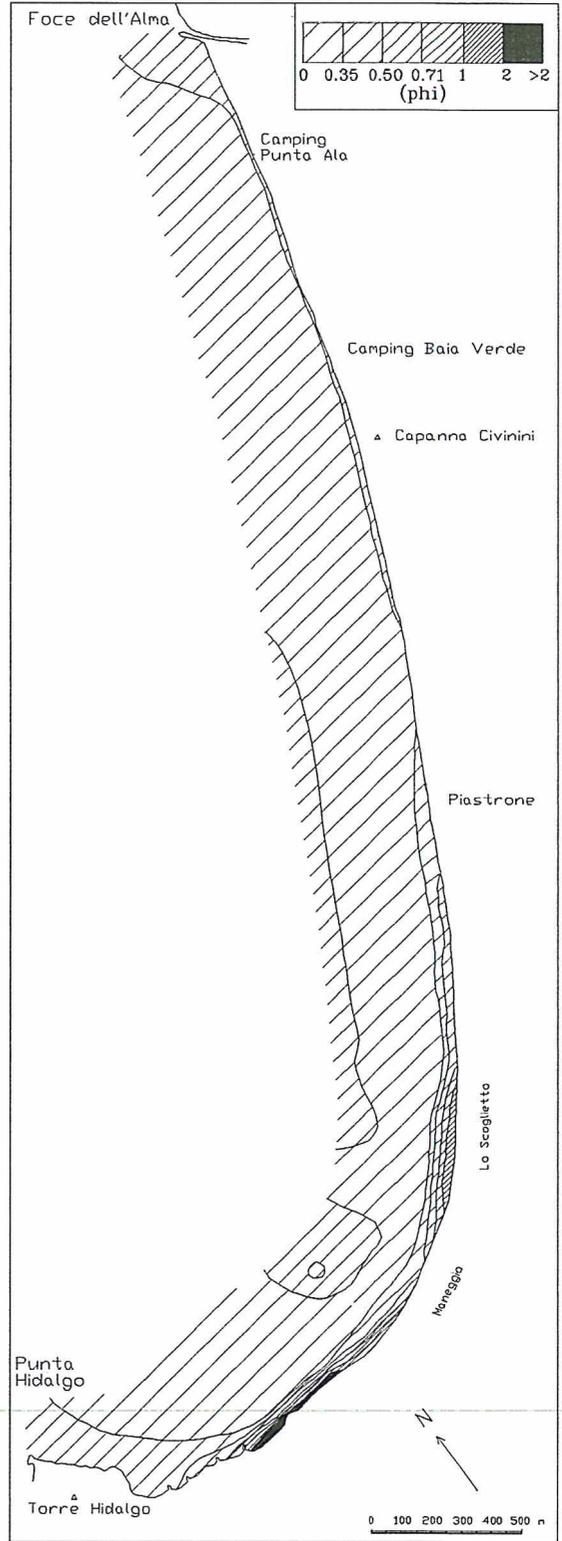


Figura 22 - Classazione dei sedimenti presenti nell'area di studio.

più profondi presentano una coda di materiali fini che possono rimanere nell'ambiente grazie ai livelli energetici decisamente modesti che caratterizzano questi fondali, anche in considerazione del fatto che l'energia del moto ondoso nel paraggio è comunque bassa, come emerso dall'analisi dei dati meteomarini.

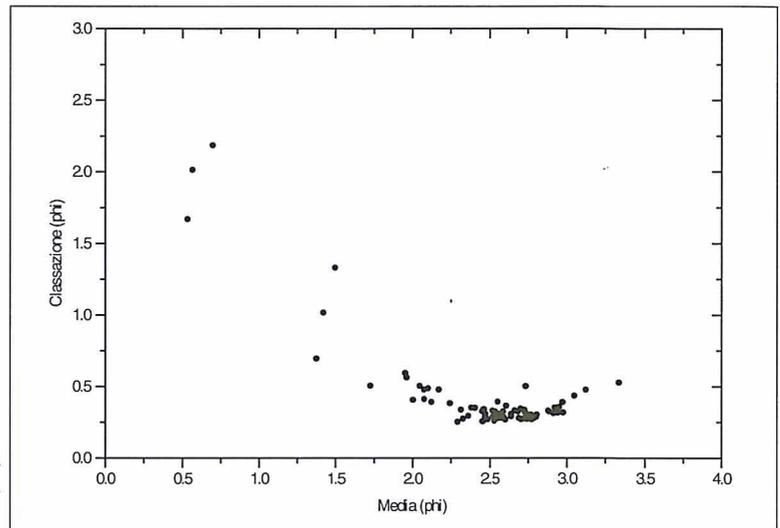


Figura 23 - Confronto tra Media ( $M_z$ ) e Classazione ( $\sigma_1$ ) per i sedimenti di spiaggia sommersa.

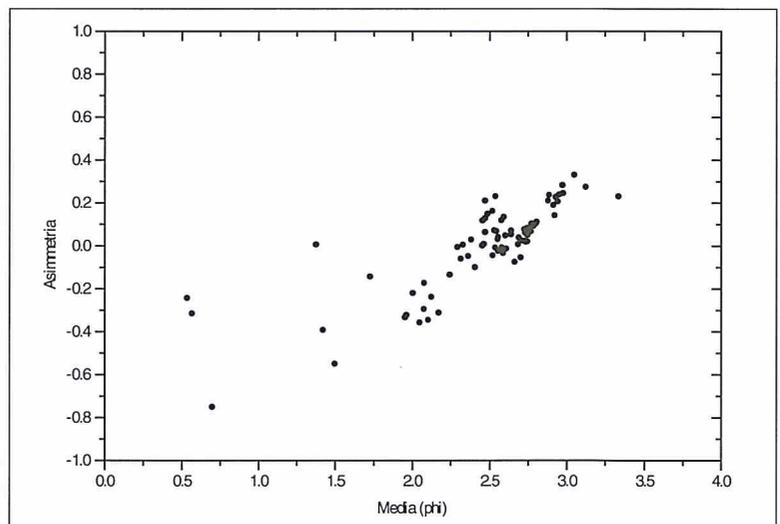


Figura 24 - Confronto tra Media ( $M_z$ ) e Asimmetria ( $Sk_1$ ) per i sedimenti di spiaggia sommersa.

### Direzione di trasporto dei sedimenti

L'analisi delle caratteristiche granulometriche di campioni di sedimenti raccolti in una determinata area consente di formulare ipotesi sul flusso sedimentario nella zona. Questa possibilità deriva dal fatto che il trasporto dei materiali da parte di un fluido ne determina una variazione granulometrica ed è quindi possibile associare a coppie di campioni caratteristiche rispettivamente di "sorgente" e di "deposito". I presupposti teorici sono in realtà ancora oggetto di discussione e i diversi Autori riconoscono effetti diversi all'azione di trasporto (vedi Gao e Collins, 1992 per una analisi delle teorie formulate). Mentre inizialmente si pensava che durante il processo di trasporto i materiali dovessero necessariamente assumere dimensioni minori (vedi ad esempio Pettijhon e Ridge, 1932), si è

poi scoperto che è anche possibile un fenomeno inverso, nel quale i sedimenti diventano progressivamente più grossolani lungo le direzioni di trasporto, in particolare quando si ha una progressiva perdita verso il largo delle frazioni a granulometria minore (Schalk, 1938). In ogni caso la gran parte dei modelli oggi utilizzati si basa sul presupposto che i materiali che costituiscono un deposito hanno una Classazione migliore di quelli riconoscibili come sorgente. Inoltre, sono stati sviluppati modelli che si basano anche sulle variazioni di valore dell'Asimmetria (McLaren, 1981; Pranzini, 1986). In questo lavoro viene utilizzato un modello sviluppato recentemente da Gao e Collins (1992) e basato su parte dei presupposti definiti da McLaren (1981) (vedi anche Tab. 4):

- da un sedimento vengono asportate con più probabilità le sue frazioni più fini, la cui successiva sedimentazione da luogo ad un deposito più fine, meglio classato e con Asimmetria spostata verso valori negativi;

- se il processo erosivo è stato capace di asportare particelle di dimensioni superiori a quelle della media, una deposizione parziale di queste può portare ad un sedimento di dimensioni medie più grossolane dell'originario, meglio classato e con Asimmetria più positiva; mentre una deposizione totale dà luogo ad un deposito più fine, meglio classato e con Asimmetria negativa.

**Tabella 4 - Rapporti fra parametri granulometrici che consentono di considerare il campione 1 come sorgente del campione 2 (Gao e Collins, 1992).**

Caso 1	$Mz_2 > Mz_1$ (più fine)	$\sigma_2 \leq \sigma_1$ (meglio classato)	$Sk_2 \leq Sk_1$ (Asimmetria più negativa)
Caso 2	$Mz_2 < Mz_1$ (più grossolano)	$\sigma_2 \leq \sigma_1$ (meglio classato)	$Sk_2 \geq Sk_1$ (Asimmetria più positiva)

Dove:  $Mz_1$ ,  $\sigma_1$  e  $Sk_1$  = Media, Classazione e Asimmetria del sedimento sorgente;

$Mz_2$ ,  $\sigma_2$  e  $Sk_2$  = Media, Classazione e Asimmetria del sedimento deposito.

Nel modello di trasporto di Gao e Collins (1992) ogni direzione possibile dà luogo ad un vettore unitario che viene sommato a tutti quelli in uscita da un punto-campione per dare un vettore di trasporto risultante, filtrando poi il risultato con l'integrazione di più punti in modo da eliminare il "rumore" ad alta frequenza. Il risultato è di tipo semi-quantitativo, in quanto il modulo dei vettori tiene conto del numero delle sorgenti possibili, ma non delle differenze numeriche fra i parametri tessiturali, alle quali sarebbe comunque difficile dare un peso in assenza di solide basi teoriche dei modelli di trasporto. Una ridistribuzione casuale, reiterata per 50 volte, assegna ai vari punti i parametri statistici degli altri campioni consentendo così una stima della significatività del primo risultato ottenuto mediante il calcolo del  $\chi^2$ .

Il modello prevede il confronto fra campioni adiacenti o fra campioni racchiusi entro una circonferenza di dimensioni opportune. Avendo a disposizione una campionatura effettuata su profili batimetrici, lungo i quali la distanza fra campioni è minore di quella fra profili adiacenti, il metodo della circonferenza non fornisce risultati credibili, dato che con essa vengono privilegiati gli spostamenti *cross-shore* rispetto a quelli *longh-shore*. Si è quindi utilizzato il metodo che confronta campioni adiacenti.

I risultati (Fig. 25) mettono in evidenza un flusso sedimentario con componente lungo riva diretta prevalentemente verso nord fino al profilo 14, mentre essa risulta opposta da questo profilo fino alla foce dell'Alma. La zona di convergenza, fra i profili 14 e 12 è caratterizzata da un flusso prevalente verso riva. Risultanti di verso discorde e modulo modesto si hanno nel settore centro-meridionale, in prossimità del Maneggio, dove la linea di riva è avanzata negli ultimi anni. A Nord di questo tratto, e fino alla zona di convergenza, si osserva un flusso sedimentario diretto dalla battigia verso l'esterno, cui fa riscontro, però, un flusso con componente opposta sui fondali antistanti.

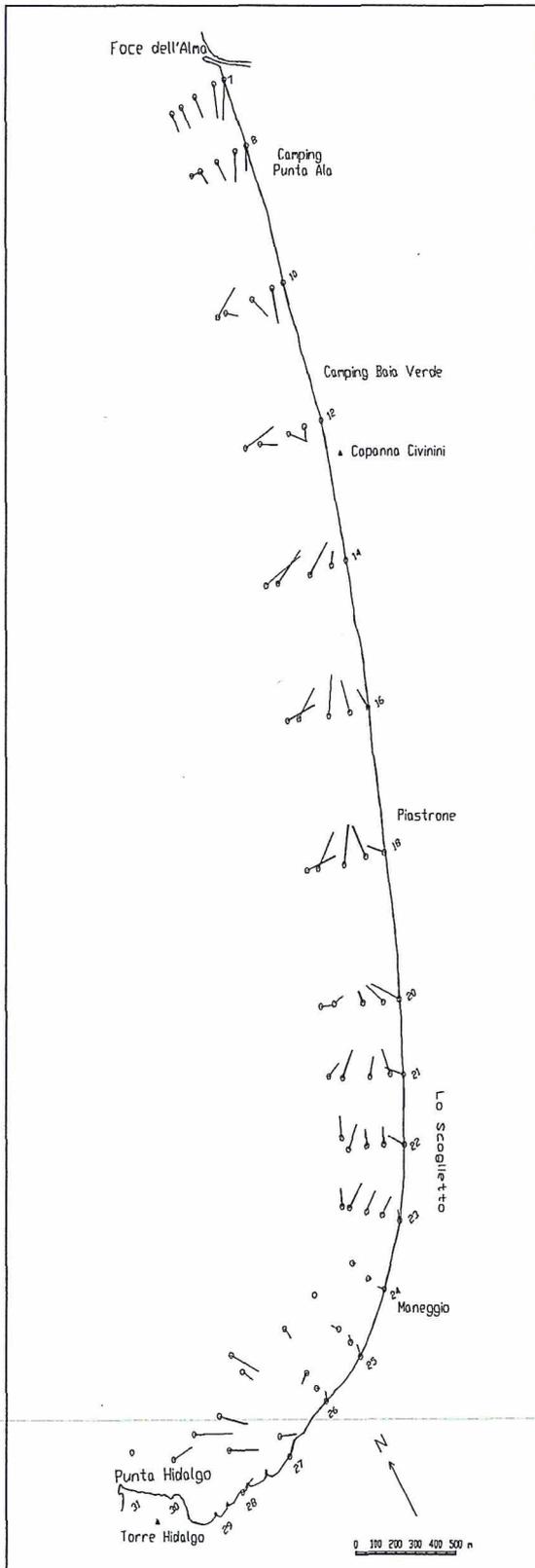


Figura 25 - Vettori di trasporto dei sedimenti ottenuti con il metodi di Gao e Collins (1992).

Il litorale di Punta Ala risulterebbe quindi alimentato prevalentemente dai materiali provenienti all'estremità meridionale, in forte erosione, anche se si evidenzia un modesto apporto da nord, che potrebbe essere associato sia ad un ipotetico input sedimentario dell'Alma che, cosa più probabile, all'erosione della costa alta settentrionale.

### Le cause dell'erosione

Contrariamente a quanto accade alla maggior parte dei litorali italiani, per i quali le cause dell'erosione sono facilmente identificabili e spesso correlabili con interventi antropici effettuati all'interno dei bacini idrografici o sul litorale stesso (Pranzini, 1995), per il litorale di Punta Ala non è stato possibile trovare delle cause ai processi erosivi che lo caratterizzano, nel settore meridionale, almeno dagli anni '40. Gli apporti sedimentari dell'Alma devono essere stati sempre insignificanti se Gandolfi e Paganelli (1977) non hanno riconosciuto nelle sabbie di spiaggia elementi caratteristici provenienti dal suo bacino. Le bonifiche a cui è stata soggetta la sua pianura costiera e le conseguenti opere di regimazione idraulica non possono quindi essere chiamate in causa per una riduzione dell'input sedimentario. Ciò anche in considerazione del fatto che l'erosione non interessa le spiagge vicine alla foce, ma quelle più lontane e posizionate sul lato opposto al drift prevalente. D'altra parte, la mancanza di alimentazione da sud, dal bacino dell'Ombrone, e l'erosione preesistente alla costruzione del porto escludono quest'ultima dalle cause di erosione. Non sono stati al momento identificati altri fattori antropici ai quali sia ragionevolmente imputabile una responsabilità nei processi erosivi in atto.

Esclusi questi, è necessario ricorrere a fattori naturali o, comunque, a fattori innescati a scala globale, quali l'innalzamento del livello marino ed eventuali variazioni nel regime anemometrico. Relativamente a quest'ultime è difficile il reperimento di dati omogenei ed attendibili per un lungo periodo di tempo, quali sono quelli necessari per l'analisi di un processo che era già in atto negli anni '40.

Un fattore certamente presente è dato dall'innalzamento del livello del mare che, su spiagge a debole pendenza può giocare un ruolo

determinante (Pranzini e Rossi, 1995), sebbene in questo caso la ridotta profondità di chiusura limiti fortemente il volume di sabbia che può essere spostato perpendicolarmente a costa a seguito dei processi descritti da Bruun (1961).

Una stima dell'arretramento medio di questa spiaggia, ipotizzando una profondità di chiusura di circa 5.5 metri (identificata, come detto in precedenza, su basi puramente morfologiche) ed un tasso di innalzamento del livello marino di 1.3 mm/anno (quale è quello attuale nel Tirreno) fornisce infatti un valore di soli 0.05 metri/anno. Si tratta di un valore estremamente modesto, che può giustificare solo una piccolissima parte del deficit sedimentario dell'unità fisiografica e che verrebbe abbondantemente riassorbito, nel tratto settentrionale, dal flusso sedimentario identificato.

L'unica spiegazione che al momento è stato possibile trovare si basa sul modello di Silvester e Hsu (1993) che, in condizioni di provenienza del moto ondoso costanti ed in assenza di input sedimentario, descrive la forma di equilibrio assunta da una linea di riva delimitata da due promontori. Essa è definita da una spirale logaritmica di equazione:

$$R_2/R_1 = e^{\theta \cot \alpha}$$

dove:  $R_1, R_2$  = raggio in due punti,

$\theta$  = angolo fra  $R_1$  e  $R_2$ ,

$\alpha$  = angolo costante fra ciascun raggio e la sua tangente alla curva.

Assumendo come direzione di provenienza del moto ondoso prevalente il settore di traversia corrispondente al Canale di Piombino ( $283^\circ - 300^\circ$ ) e come punti fissi Punta Hidalgo (*upcoast*) e la foce dell'Alma (*downcoast*) è possibile calcolare la forma di equilibrio nella quale la diffrazione delle onde sul promontorio *upcoast* porta queste a raggiungere perpendicolarmente ogni punto della spiaggia, impedendo così il trasporto litoraneo lungo costa e ogni successiva evoluzione del litorale, se non quella di lungo periodo dovuta al flusso dei sedimenti verso il largo.

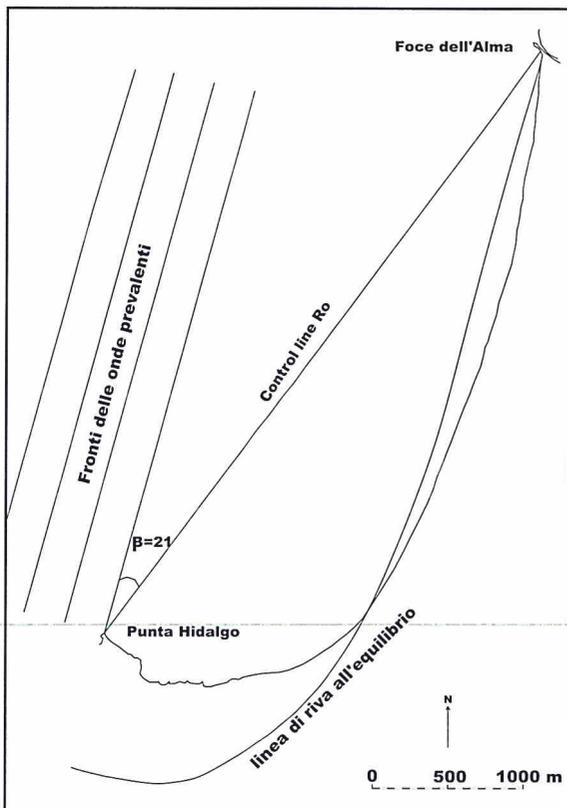


Figura 27 - Configurazione di equilibrio del litorale di Punta Ala secondo il modello di Silvester e Hsu (1993).

Il Figura 27 è tracciata questa spirale logaritmica ottenuta tramite la tabella riportata da Silverster e Hsu (1993) ipotizzando una *control line* congiungente Punta Hidalgo e la foce dell'Alma e una cresta delle onde prevalenti che forma un angolo di 21° con essa. Si vede chiaramente come, assunte queste ipotesi, il litorale di Punta Ala sia ben lontano dall'equilibrio e come l'erosione si sviluppi maggiormente proprio in quel tratto di costa più lontano dalla spirale logaritmica e come, al contrario, il settore settentrionale tenda verso una progradazione.

Al momento non ci è dato di sapere quali condizioni paleogeografiche abbiano determinato l'originaria forma del litorale, ma è evidente che esso ha oggi una configurazione instabile che "naturalmente" si evolve verso condizioni di equilibrio.

### Ringraziamenti

Si ringrazia Pierluigi Aminti per l'aiuto dato nella verifica del modello di Silverster e Hsu e Lorenzo Rossi per il calcolo dell'arretramento della linea di riva dovuto all'innalzamento del livello marino.

### 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.
- Aiello E., Bartolini C., Conedera C., Pranzini E. e Taccini S. (1980) - *Il litorale della provincia di Livorno fra Marina di Castagneto e Follonica*. Provincia di Livorno, 44 pp.
- Aminti P.L. (1985) - Raccolta ed analisi dei dati relativi ai venti ed al moto ondoso. In: *Coste toscane*. Regione Toscana. pp. 9-31
- Bartolini C. (1976) - *Studies of coastal geomorphology: I. Beach grain-size features of Follonica Gulf (Southern Tuscany)*. Boll. Soc. Geol. It., 96, 117-157.
- Bartolini C. (1976) - *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., Caputo C., Cavazza S., Ceffa L., Celestre P., Cortemiglia G.C., Fanucci F., Fierro G., Gandolfi G., Gnaccolini M., Imperiale G., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Marone V., Mordenti A., Montano F., Nardi M., Paganelli L., Paoletti A., Piacentino G.B., Piccazzo M., Pranzini E. e Versino L. (1976) - *Area campione Alto Tirreno. Ricerche sul regime e la conservazione dei litorali. Rapporto 1974*. La Ricerca scientifica, 92, 61-126.
- Bartolini C., Cipriani L.E., Pranzini E. e Sargentini M. (1989) - *Caratteristiche geomorfologiche ed evoluzione della linea di riva del litorale toscano. Documenti e criteri di lettura*. In "Coste Toscane - studi sulla erosione, sui venti e sul moto ondoso". Giunta Regionale Toscana, 35-56.
- Cipriani L.E. e Pranzini E. (1999) - *Evoluzione recente delle spiagge toscane*. In: *Stato dell'ambiente della regione Toscana - Rapporto '98*. Regione Toscana. Pp. 77-85.
- Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze (1989) - *Carta delle linee di riva. Tavola IX*. In "Coste Toscane - studi sulla erosione, sui venti e sul moto ondoso". Giunta Regionale Toscana, 16 tavole.
- Folk R.L. (1966) - *A review of grain size parameters*. Sedimentology, 6, 73-93.
- 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.
- Frank G.M. e Friedman G.M. (1973) - *Continental-shelf sediments off New Jersey*. Journ. Sedim. Petrol., 27, 3-26.
- Friedman G.M. (1961) - *Distinction between dune, beach and river sands from their textural characteristics*. Journ. Sedim. Petrol., 31, 514-529.
- Gandolfi G. e Paganelli L. (1975) - *Il litorale toscano fra Piombino e la foce dell'Ombrone (Area campione Alto Tirreno). Composizione provenienza e dispersione delle sabbie*. Boll. Soc. Geol. It., 94: 1811-1832.
- Gandolfi G. e Paganelli L. (1977) - *Le province petrografiche del litorale toscano*. Boll. Soc. Geol. It., 96: 653-663.

- 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.
- Istituto Idrografico della Marina (1995) - *Tavole di marea e delle correnti di marea. Mediterraneo - Mar Rosso - Venezia - Stretto di Messina*. Genova. Pp. 96.
- Inman D.L. (1949) - *Sorting of sediments in the light of fluid mechanics*. Journ. Sedim. Petrol., 19, 51-70.
- Inman D.L. (1952) - *Measures for describing the size distribution of sediments*. Journ. Sedim. Petrol., 33, 125-145.
- Krumbein W.C. (1934) - *Size frequency distribution of sediments*. Journ. Sedim. Petrol., 4, 65-77.
- Mc Laren P. (1981) - *An interpretation of trend in grain-size measures*. Journ. Sedim. Petrol., 51, 611-624.
- Passega R., Rizzini A. e Borghetti G. (1967) - *Transport of sediments by waves, Adriatic coastal shelf, Italy*. Amer. Ass. Petr. Geol. Bull., 51, 1304-1319.
- Pettijhon F.G. e Ridge J.D. (1932) - *A textural variation series of beach sands from Cedar Point, Ohio*. Journ. Sedim. Petrol., 2: 76-88.
- Pranzini E. (1981) - *Caratteristiche granulometriche e distribuzione dei sedimenti lungo riva*. Ricerche sulla dinamica dei litorali della Calabria. Pub. 127, 37-46. C.N.R, Roma.
- Pranzini E. (1983) - *Random changes in beach grain size parameters*. Boll. Soc. Geol. It., 102, 177-189.
- Pranzini E. (1986) - *La dinamica dei sedimenti nel Golfo di Campo (Isola d'Elba)*. Boll. Soc. Geol. It., 105, 253-264.
- Pranzini E. (1995) - *Cause naturali ed antropiche nelle variazioni del bilancio sedimentario del litorali*. Riv. Geogr. It., n.s. 1: 47-62.
- Pranzini E. e Rossi L. (1995) - *A new Bruun-based model to predict shore line evolution*. MEDCOAST'95. 24-27 Ottobre 1995, Tarragona, Spagna. Pp. 1145-1159.
- Schalk M. (1938) - *A textural study of the outer beach of Cape Cod, Massachusetts*. Journ. Sedim., 8: 41-54.
- Silvester R. e Hsu J.R.C. (1993) - *Coastal Stabilization: innovative concepts*. Prentice Hall, Inc., New Jersey. Pp. 578.

Manoscritto ricevuto il 21/5/1999, accettato il 12/9/1999.