ATTI

DELLA

SOCIETÀ TOSCANA

DI

SCIENZE NATURALI

RESIDENTE IN PISA

MEMORIE - SERIE A

VOL. LXXXI - ANNO 1974

ARTI GRAFICHE PACINI MARIOTTI - PISA - 1975

INDICE

MEMORIE

CONATO V., SEGRE A. G. - Ciottoli di rocce sedimentarie nel golfo di Pozzuoli Pag. 1

CONATO V., SEGRE A. G. - Depositi marini quaternari e nuovi foraminiferi dell'Antartide (Terra Victoria, Valle Wright) . . . . . » 6

RAPETTI F., VITTORINI S. - Osservazioni sulle variazioni dell'ala destra del delta dell'Arno . . . . . » 25

FIERRO G., PIACENTINO G. B., TUCCI S. - Caratteri morfologici e litogenetici di una «beach-rock» della Liguria Occidentale . . . . . » 89

SICHINOLFI G. P., SHIGUEMI FUJIMORI - Petrology and chemistry of diopsidic rocks in granulite terrains from the brazilian basement . . . . . » 103

PLESI G. - L'unità di Canetolo nella struttura di Bobbio (Val Trebbia), Montegroppo (Val Gotra) e lungo la trasversale Cinque Terre-Pracchiola » 121

MAGALDI D. - Caratteri e modalità dell'orientamento delle argille nell'orizzonte B di alcuni suoli . . . . . » 152

ORLANDI P. - Note di mineralogia toscana. 2. - Minerali delle geodi dei marmi di Carrara . . . . . » 167

GIANNELLI G., PASSERINI P. - A K/Ar dating of the pillow lavas of Castiglioncello del Trinoro (Southern Tuscany) . . . . . » 185

LEONI L. - Le rocce silicee non detritiche dell'Appennino Centro-Settrionale . . . . . » 187

FANCELLI GALLETTI M. L. - Analisi pollinica di sedimenti sovrastanti la panchina tirreniana di Torre del Fanale in Livorno . . . . . » 222

DE GIULI C., HEINTZ E. - *Gazella borbonica* (Bovidae, Artiodactyla, Mammalia), nouvel élément de la faune villafranchienne de Montopoli, Valdarno inférieur, Pisa, Italia . . . . . » 227

DE GIULI C., HEINTZ E. - *Croizetoceros ramosus* (Cervidae, Artiodactyla, Mammalia) de Montopoli, nouvel élément de la faune villafranchienne d'Italie . . . . . » 241

GIANNETTI B. - Nuove ricerche petrografiche e petrogenetiche sulle lave fonolitiche della caldera vulcanica di Roccamonfina . . . . . » 253

CAPORUSSO A. M., GIACOMELLI G., LARDICCI L. - On the reaction of tri-isobutylaluminium with pivalonitrile . . . . . » 307

FICCARELLI G., TORRE D. - Nuovi reperti del gatto villafranchiano di Olivola . » 312

RAGGI G., TREVISAN L. - Il bacino idrogeologico di Valdottavo in Val di Serchio . . . . . » 323

DE MUNNO A., BERTINI V., MENCONI A., DENTI G. - Su alcuni nitroderivati del 3-fenil-1,2,5-ossadiazolo . . . . . » 334

RIFFALDI R., LEVI-MINZI R. - Caratteristiche delle sostanze umiche estratte da rendzina . . . . . » 343

FRANZINI M., LEONI L., ORLANDI P. - Mineralogical and geochemical study of K-feldspar megacrysts from the Elba (Italy) granodiorite . . . » 356

LEONI L., RIVALENTI G. - An evaluation of the temperature and the volatile pressure during the crystallization of granitic rocks . . . . . » 379

DE MICHELE V., GIUSEPPETTI G., ORLANDI P. - Anapaite di Castelnuovo dei Sabbioni (Craviglia, Arezzo) . . . . . » 387

LEONI L., TROYSI M. - Ricerche sulla microdurezza dei silicati. I - Gli epidoti » 397

Elenco dei Soci per l'anno 1974 . . . . . » 405

Norme per la stampa di note e memorie sugli Atti della Società Toscana di Scienze Naturali . . . . . » 411

Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A, **81** (1974),
pagg. 25-88, ff. 14, tabb. 12.

F. RAPETTI, S. VITTORINI *

OSSERVAZIONI SULLE VARIAZIONI DELL'ALA DESTRA DEL DELTA DELL'ARNO **

Riassunto — In questo lavoro vengono misurate le variazioni di superficie della spiaggia compresa tra la foce del fiume Arno e quella del Fiume Morto Nuovo. Tali variazioni vengono messe in evidenza dal confronto di serie successive di rilievi topografici e aerofotogrammetrici eseguiti nel periodo compreso tra il 1878 e il 1971. Dalla fine del secolo scorso fino al 1928 la cuspide deltizia dell'Arno, per un tratto di circa 2,5 km, ha subito un forte arretramento, mentre il restante tratto di spiaggia è risultato invece in avanzamento. Dopo il 1928 la battigia, in tutto il tratto di costa in esame, ha subito un forte arretramento, protrattosi fino al 1966. Da quest'ultima data in poi si è verificato un sensibile ripascimento della spiaggia compresa tra la foce dell'Arno e il Gombo oltre il quale invece l'erosione ha continuato a manifestarsi.

Abbiamo cercato di stabilire una relazione tra le variazioni osservate e i possibili fattori, naturali e antropici, responsabili dell'erosione delle spiagge. Da questo tentativo è risultato che non esistono elementi sufficienti per poter individuare, negli ultimi cento anni, variazioni climatiche tali da spiegare le variazioni della spiaggia avvenute. Importanza determinante, a nostro avviso, avrebbero avuto invece, sui fenomeni studiati, gli interventi operati dall'uomo sia sul bacino dell'Arno che sul litorale in esame e su quelli adiacenti.

Abstract — In this paper the surface variations of the shore extending from the mouth of the river Arno to that of the Fiume Morto Nuovo are measured. Such variations are evidenced through the comparison of successive series of topographic and aerophotogrammatic reliefs carried out between the year 1878 and 1971. During the period starting at the end of last century up to 1928 the delta cups of the Arno, along a tract of about 2.5 kms, has undergone a heavy erosion, while the remaining tract of shore has resulted to be in advancement. After 1928 the shore-line has undergone remarkable erosion for the whole tract of coast here examined, erosion which has lasted until 1966. Since that year there has been

* Istituto di Scienze Geografiche dell'Università di Pisa.
** Lavoro eseguito con il contributo del C.N.R.

noticed a sensible renourishment of the shore extending from the mouth of the Arno to the Gombo, beyond which, on the contrary, erosion has continued.

We have tried to establish a relation between the observed variations and natural and anthropic factors which may have been responsible for beach erosion. The results of this attempt show that we are not in possession of sufficient elements for the individuation of climatic variations, which may have taken place in the course of the last hundred years, and which may explain such shore variations as have been noticed. In our opinion, essential effects on the phenomena we have considered may be due to interventions on man's part on the Arno basin, on the shore-line we have considered, and on the adjoing shores as well.

PREMESSA

Il tratto di costa che si estende tra la foce dell'Arno e quella del Fiume Morto Nuovo, prospiciente la tenuta di San Rossore, è costituito da una falcatura sabbiosa le cui estremità distano, in linea d'aria, poco più di sei chilometri e rappresenta ciò che è rimasto del lobo destro del delta dell'Arno dopo i forti ritiri che presero inizio verso la fine del secolo scorso. Nel 1850, infatti, la cuspide deltizia dell'Arno aveva raggiunto il suo massimo protendimento, rappresentando la fase conclusiva della formazione del litorale pisano (A. R. TONIOLO, [1927]).

Malgrado i forti ritiri verificatisi specie negli ultimi cinquanta anni, non sono stati finora compiuti studi intesi a illustrare l'evoluzione della battigia dell'intero tratto considerato e a misurare le entità delle erosioni e dei ripascimenti avvenuti. Avendo tuttavia subito gravi demolizioni per lungo tempo solo la cuspide dell'Arno, cioè un tratto di circa due chilometri a nord e a sud della foce, mettendo in crisi l'attività balneare e l'abitato di Marina di Pisa, un attento ed ampio studio di tal genere, per questo breve tratto, fu compiuto nel 1910 da Toniolo. Egli, prendendo in considerazione i rilievi cartografici eseguiti tra il 1785 e il 1909, descrisse attentamente le variazioni della cuspide deltizia, ne planimetrò le variazioni di superficie osservate tra i rilievi successivi e cercò anche di individuare le loro cause. Successivamente l'Albani, in uno studio sulle spiagge della Toscana settentrionale, ha dedicato un capitolo al tratto di costa compreso tra la foce del Fiume Morto e Livorno. In esso sono descritte le variazioni lineari medie della battigia verificatesi dal 1823 al 1934, dei tratti Fiume Morto-Gombo e Gombo-foce Arno, offrendo così due soli dati medi per ogni

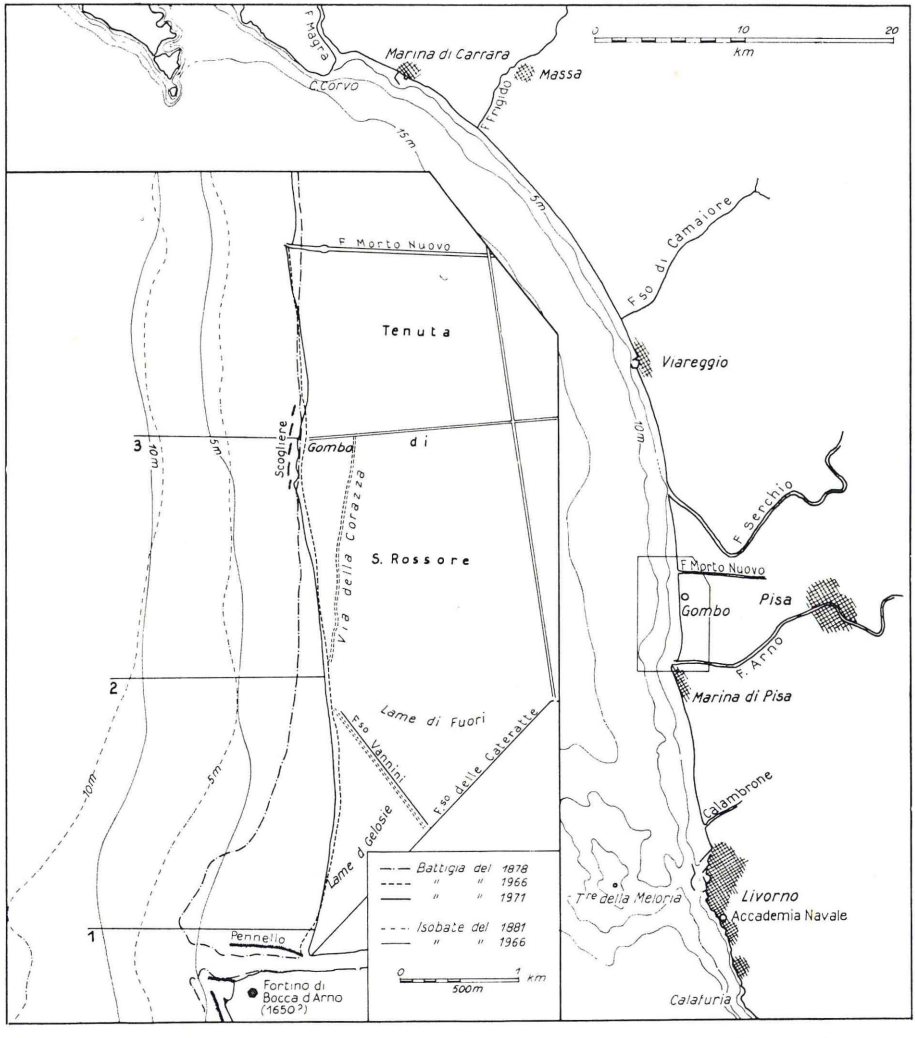

Fig. 1 - L'ala destra del delta dell'Arno dalla foce fino al Fiume Morto Nuovo e la sua posizione nella falcatura sabbiosa che unisce Capo Corvo ai Monti livornesi.

periodo intercorrente tra ciascun rilievo e quello successivo (D. ALBANI [1940]). Dati, questi, insufficienti a spiegare esaurientemente l'evoluzione della battigia poiché le variazioni di questa, sia in senso positivo che in senso negativo, non sono state uguali lungo i tratti presi in esame. Nè risultano significative in tal senso alcune indicazioni riportate dallo stesso Autore in un precedente

lavoro secondo cui, al Gombo, dal 1928 al 1933, la linea di battigia si ritirava con una velocità di sei metri l'anno e che, in corrispondenza delle lame delle Gelosie, la costa aveva subito, dal 1900 al 1933, un arretramento di circa 300 m (D. ALBANI [1933]).

Dopo gli studi dell'Albani, eccetto alcune ricerche sintetiche tendenti ad individuare le cause generali delle variazioni del litorale pisano (COMUNE DI PISA [1948]; A. MORI [1956]; F. SAGGINI [1966]; L. BORGHI [1970]; F. SAGGINI [1970]), non è stata compiuta nessun'altra ricerca tendente invece a misurare le variazioni della spiaggia di San Rossore. Solo nel 1960 infatti, in seguito all'aggravarsi dell'erosione e al deperimento della pineta, fu nominata dalla Presidenza della Repubblica, una commissione interdisciplinare a cui fu affidato il compito di indagare sul regime di questa spiaggia, allo scopo di approntare i provvedimenti di difesa più idonei per la conservazione del litorale e della pineta retrostante. Nel quadro di queste indagini, A. Mori prese in esame le variazioni della battigia, a partire dal 1850 fino al 1963, ma, esistendo solo pochi punti di riferimento, si dovette limitare a riportare l'entità delle variazioni lineari verificatesi in corrispondenza di alcuni punti di essa (A. MORI [1966]). L'Autore ha fatto osservare comunque come l'erosione, lungo il tratto di costa, dalla foce dell'Arno a quella di Fiume Morto, non fosse stata uniforme, ma accentuata nel tratto centrale, mentre, a nord del Gombo, si sarebbero verificati piuttosto dei ripascimenti. Accertato il movimento prevalente dei materiali da SE a NW lungo la costa, la Commissione avanzò precise proposte di intervento per la difesa del litorale del Gombo che, successivamente eseguite, ebbero, come si vedrà, gli effetti previsti.

Nella presente ricerca si vogliono prendere in considerazione, avendo come base la documentazione cartografica esistente, le variazioni avvenute su tutto il tratto di costa in esame, rappresentarne graficamente l'andamento e misurarne l'entità. Il periodo considerato va dal 1878, anno della prima edizione del rilievo all'1:25.000 dell'I.G.M.I. del litorale pisano, fino al 1971.

Al fine poi di tentare di trovare una spiegazione delle variazioni della costa, abbiamo preso in esame alcuni tra i principali fattori con cui il fenomeno può essere messo in rapporto, quali il regime dei venti, quello del mare, nonché alcuni aspetti idrologici e del trasporto solido dell'Arno. Infine si è voluta esaminare anche l'influenza esercitata dalle scogliere frangiflutto erette, su indicazione della Commissione precedentemente ricordata, in corrispondenza del Gombo.

IL REGIME DEI VENTI

Per conoscere l'andamento dei venti che agiscono lungo il tratto di costa in esame abbiamo utilizzato i dati anemometrici giornalieri dell'osservatorio dell'Accademia Navale di Livorno per il quinquennio 1968 - 1972; periodo non lungo ma sufficiente a offrire un quadro esauriente del comportamento del vento nella nostra regione, sulla quale il regime anemometrico presenta una notevole uniformità da un anno all'altro. Abbiamo preferito utilizzare questi dati piuttosto che quelli della stazione di Pisa, considerando che i valori di ventosità registrati in quest'ultima località, che dista alcuni chilometri dal mare, sono falsati, specialmente per quanto riguarda la velocità, dall'azione di smorzamento esercitata sul vento al suolo dagli ostacoli naturali e artificiali (1)

I dati forniti dall'osservatorio dell'Accademia Navale di Livorno si riferiscono alle osservazioni giornaliere delle ore otto, quattordici e diciannove e considerano le sedici direzioni principali di provenienza del vento, fornendo altresì la velocità relativa ad ogni osservazione.

Nell'esaminare le frequenze medie abbiamo preferito distinguere i venti relativi alle tre osservazioni giornaliere, piuttosto che farne la media, sia per meglio mettere in evidenza il loro regime nel corso della giornata sia per non incorrere nell'errore di sbilanciare i rapporti tra le frequenze in alcune direzioni. Infatti, nell'esaminare i risultati, abbiamo riscontrato una forte analogia tra le frequenze delle ore quattordici e quelle delle ore diciannove. Questo fatto, unito ad un'esigenza di sintesi, ci ha indotti a non descrivere, nel presente lavoro, i valori della ventosità relativi alle ore diciannove. Del resto, come ha già fatto notare Pinna le osservazioni delle ore quattordici e delle ore diciannove, nella bassa valle dell'Arno, hanno caratteristiche molto simili (M. PINNA [1958]), verificandosi una prevalenza dei venti occidentali, al contrario di quanto avviene alle ore otto in cui, continuando a farsi sentire la brezza di terra che si sviluppa nelle ore notturne, si riscontra una maggiore frequenza dei venti orientali.

---

(1) Tuttavia bisogna considerare che anche i dati anemometrici di una località costiera non consentono di stabilire una precisa relazione tra il vento e il moto ondoso presso la costa poiché quest'ultimo viene generato dai venti che soffiano al largo, nella zona del «fetch» (per fetch si intende quel tratto di mare sul quale il vento ha velocità e direzione costante in un determinato intervallo di tempo).

Alle ore otto i valori di frequenza più elevati spettano ai venti di NE e di ENE con il 17,13 e il 18,06% del totale delle osservazioni relative a questa ora. Il vento di SW ha invece una frequenza modesta cui spetta il valore del 6,95%. Nelle altre direzioni, le frequenze assumono valori più bassi del 6% raggiungendo il minimo coi venti da N e NNW in cui il numero delle osservazioni è inferiore all'1%. Le calme raggiungono il 30,47%, cioè quasi un terzo di tutte le osservazioni (2). Questa situazione rivela che alle ore otto l'alta frequenza dei venti orientali è un indizio della prevalenza delle brezze di terra su tutti gli altri venti. Inoltre la percentuale delle calme indica che, per circa un terzo dell'anno, le prime ore del mattino sono caratterizzate da calma di vento.

Diversa è la situazione alle ore quattordici in cui la frequenza massima spetta al SW con il 13,70% delle osservazioni mentre al NE e all'ENE spettano le frequenze del 9,41 e del 9,20%. Le calme sono sensibilmente ridotte poiché assommano al 20,49%.

Per quanto riguarda l'andamento delle frequenze nei vari mesi dell'anno, possiamo constatare che nei mesi invernali vengono registrati nelle prime ore del mattino quasi esclusivamente venti orientali, con prevalenza del NE e dell'ENE che raggiungono le massime frequenze tra ottobre e febbraio, come mostra la fig. 2. Nei mesi del semestre estivo si registra una diminuzione del numero delle osservazioni di questi venti ed un aumento di quelle dei venti occidentali, anche se questi non raggiungono mai valori percentuali elevati.

Alquanto diversa è la situazione che si presenta alle ore quattordici e alle ore diciannove. In queste ore infatti, la frequenza dei venti orientali diminuisce sensibilmente, concentrandosi tuttavia ancora nei mesi del semestre invernale, e, in particolar modo, tra dicembre e gennaio. Al contrario aumenta notevolmente quella dei venti occidentali e in specie, durante i mesi intermedi, del SW, con massimo da marzo ad agosto.

In sintesi, analogamente a quanto avviene nella bassa Valle dell'Arno (M. PINNA [1958]), il regime anemometrico a Livorno è

---

(2) In questa indagine sono state considerate *calme di vento* le situazioni con vento avente velocità fino a 3 Km/h, pari a 1,62 nodi, per avvicinarci, anche se per difetto, al criterio stabilito dall'ISTAT, nell'*Annuario di Statistiche Meteorologiche*, in cui alle calme corrisponde una velocità del vento minore od uguale a due nodi.

TABELLA 1 - *Frequenza media percentuale dei venti per direzione e classi di velocità, a Livorno, per il quinquennio 1968-1972 alle ore otto e alle ore quattordici e loro velocità media ponderata (Vmp).*

Ore 8

Km/h	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Totali %
4-10	0,27	0,93	9,58	8,21	3,01	0,71	0,99	0,77	0,11	0,60	0,82	0,22	0,27	0,44	0,44	0,22	27,59
11-30	0,27	0,55	6,79	8,16	2,74	0,88	0,82	1,42	0,66	0,88	2,30	1,20	0,77	0,44	0,66	0,33	28,87
31-50	0,05	0,05	0,71	1,48	0,22	0,05	0,33	0,77	0,22	0,60	1,97	1,20	0,38	0,22	0,05	0,11	8,41
51-70	—	—	0,05	0,16	—	0,05	0,05	0,33	0,11	—	0,82	1,04	0,05	—	—	—	2,66
71-90	—	—	—	0,05	—	—	0,05	0,16	0,05	—	0,82	0,49	—	—	—	—	1,62
>90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,22	0,16	—	—	—	—	0,38
Calme																	30,47
Totali	0,59	1,53	17,13	18,06	5,97	1,69	2,24	3,45	1,15	2,08	6,95	4,31	1,47	1,10	1,15	0,66	100,00

Ore 14

4-10	0,22	0,22	4,05	3,07	0,88	0,22	0,77	0,71	0,66	1,97	4,22	1,31	1,10	1,42	1,48	0,49	22,79
11-30	0,38	0,60	4,76	4,93	1,59	0,93	0,88	2,41	1,37	2,35	5,48	2,52	2,63	2,85	3,23	1,75	38,66
31-50	0,05	0,05	0,44	1,15	0,16	0,05	0,49	1,59	1,26	1,04	1,81	2,25	0,77	0,60	0,22	0,27	12,20
51-70	—	0,05	0,11	0,05	—	0,05	0,16	0,22	0,27	0,33	1,37	1,26	0,16	0,05	—	—	4,08
71-90	—	—	0,05	—	—	—	0,11	0,16	—	0,11	0,66	0,27	—	0,05	0,05	—	1,46
>90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,16	0,16	—	—	—	—	0,32
Calme																	20,49
Totali	0,65	0,92	9,41	9,20	2,63	1,25	2,41	5,10	3,56	5,80	13,70	7,77	4,66	4,97	4,98	2,51	100,00

Vmp	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Media
Km/h	1,8	20,0	33,3	44,7	12,4	4,6	8,9	20,6	11,4	15,1	53,9	38,8	11,8	10,4	9,3	5,3	17,45

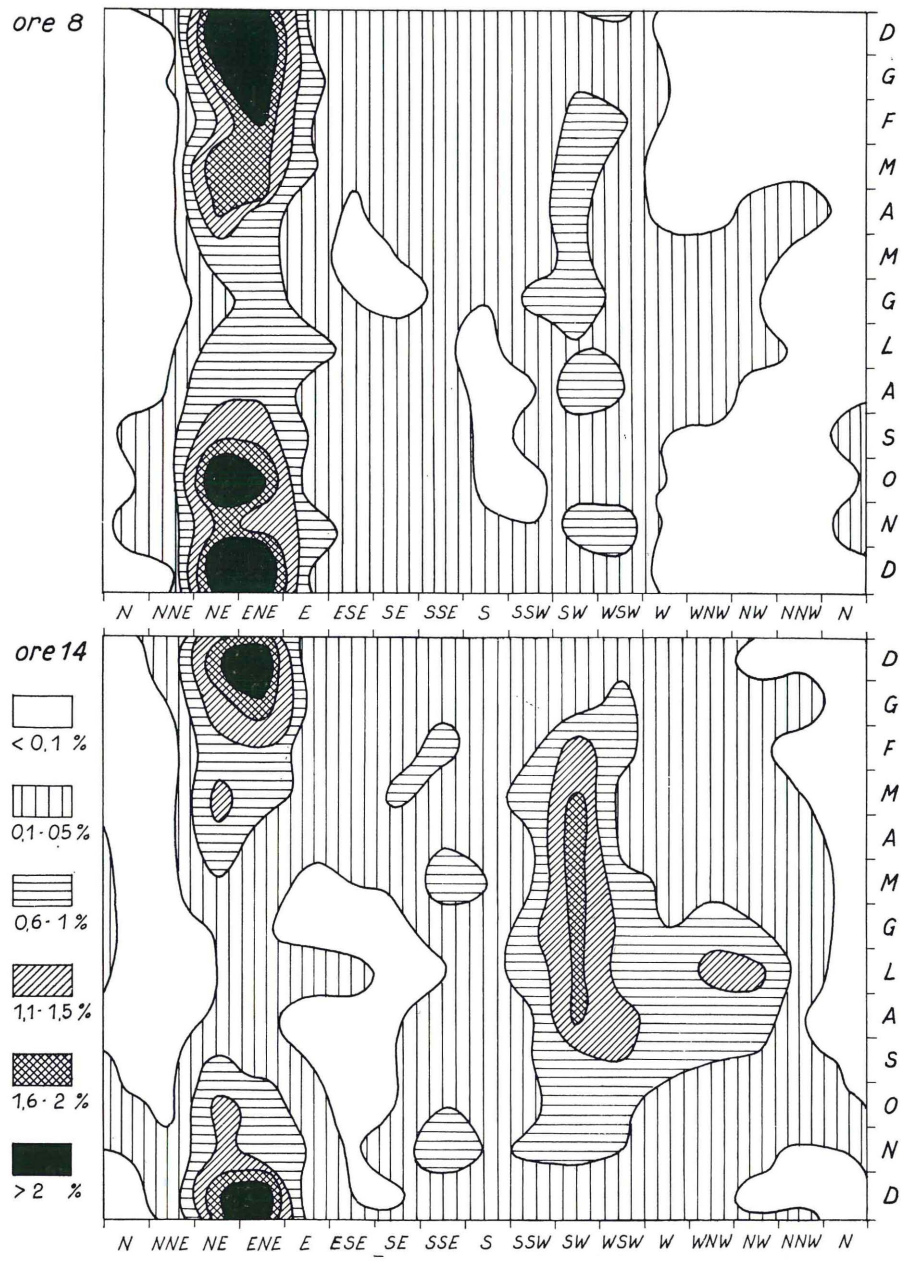

Fig. 2 - Distribuzione media percentuale dei venti a Livorno (Accademia Navale) nei vari mesi dell'anno, per direzione di provenienza, alle ore otto e alle ore quattordici, nel periodo 1968-1972.

caratterizzato da una prevalenza dei venti orientali in inverno e di quelli occidentali in estate.

Quanto alla velocità risulta che, in media nella giornata, ben il 67,87% dei venti non raggiunge 50 Km/h e, tenendo conto che le calme sono in media il 26,94%, solo il 5,17% dei venti supera tale velocità. Considerando separatamente ciascuna direzione, si osserva (Tab. 2) che i venti più veloci sono quelli del terzo quadrante i quali fanno registrare talora punte massime di oltre 100 Km/h e che la massima frequenza dei venti con velocità superiore a 50 Km/h si verifica da novembre ad aprile, con un totale di 94 casi su 130. Nel semestre caldo la frequenza di tali venti è bassa, fatta eccezione per agosto in cui si registrano ben 14 casi.

TABELLA 2 - *Frequenza, nei vari mesi dell'anno, dei venti con velocità superiore a 50 Km/h, relativamente alle ore 14, nel periodo 1968-1972.*

	g	f	m	a	m	g	l	a	s	o	n	d	anno
N	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNE	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1
NE	—	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	1	3
ENE	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	2	3
E	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ESE	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1
SE	2	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	5
SSE	1	2	—	1	—	—	—	1	1	—	7	—	13
S	1	2	1	2	—	—	—	—	—	—	4	—	10
SSW	—	1	1	—	—	1	2	1	1	—	1	1	9
SW	2	9	6	6	2	1	2	6	—	1	5	2	42
WSW	6	4	1	3	1	1	2	6	3	2	5	3	37
W	1	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	1	3
WNW	—	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	2
NW	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	1
NNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Totale	13	21	11	15	3	4	6	14	5	4	22	12	130

Si può affermare pertanto che, durante l'inverno, i venti del terzo quadrante, pur avendo una debole frequenza come risulta dalla fig. 2, spirano con forte velocità, determinando quelle mareggiate che, periodicamente, sconvolgono le spiagge e le località poste sulla costa.

Considerando allora le frequenze dei venti e le loro velocità, si può concludere che, a Livorno, nel periodo da noi considerato,

i venti regnanti appartengono al primo quadrante (in particolare il NE e l'ENE) mentre quelli dominanti appartengono al terzo quadrante (il SW e l'WSW).

A questo punto sarebbe opportuno verificare se ci sono state variazioni pluriennali nella frequenza del vento; tuttavia la scarsità di dati pubblicati e la difficoltà di poter far confronti, considerati i diversi metodi di indagine adottati dai vari autori (vedi ad esempio il diverso orario delle osservazioni, l'esposizione dei risultati per quadranti piuttosto che per direzioni di provenienza del vento, l'adozione di otto direzioni piuttosto che di sedici), invitano ad una grande prudenza nel considerare i valori di ventosità relativi agli anni passati. Abbiamo ritenuto comunque utile consultare i lavori sui venti a Livorno finora pubblicati e riferirne brevemente i risultati.

Secondo quanto scrive l'Eredia (F. EREDIA [1908]), nel periodo 1891 - 1900, la massima frequenza dei venti di W e di SW si sarebbe verificata nei mesi centrali di primavera e estate, mentre nell'autunno inoltrato e nell'inverno si sarebbe avuta una prevalenza di quelli di NE e di SE. Anche per il Toniolo, secondo i dati rilevati alle ore nove, nel periodo 1905-1910, si constata la supremazia dei venti di SW e « contermini » nei mesi centrali (A. R. TONIOLO [1910]). Egli inoltre afferma che le libecciate più violente sono assai più numerose in primavera e nel tardo autunno. Per il Merciai (G. MERCIAI [1910]), dai dati relativi al trentennio 1856-1886, risulta che da dicembre a marzo spirano generalmente i venti da N a E e, negli altri mesi, quelli da NW a SW, con una velocità media complessiva di 10,29 Km/h. Secondo Innocenti infine (P. INNOCENTI [1968]), nel periodo 1951-1961, si è avuto il netto predominio dei venti dei quadranti orientali pur rilevandosi una marcata presenza di quelli occidentali da aprile a settembre. Questo Autore fa rilevare che il settore di traversia corrisponde al libeccio il quale « raggiunge in autunno anche la velocità di 148 Km/h » ([3]).

([3]) I risultati cui è giunto questo Autore, pur concordando in linea di massima con quelli da noi ottenuti, se ne discostano per i valori percentuali relativi alle singole direzioni. Ciò può dipendere da diversi motivi: a) L'A. ha utilizzato i dati di un altro osservatorio e precisamente quelli dell'Osservatorio Meteorologico Comunale di Livorno che è posto nel Centro cittadino; b) avrebbe usato un criterio diverso dal nostro di valutare le calme dal momento che, secondo i suoi calcoli, esse ammonterebbero ad appena il 3,1%; c) infine ha considerato otto anziché sedici direzioni di provenienza del vento.

Dalle conclusioni cui sono giunti questi Autori si potrebbe arguire che, nel complesso, almeno dal 1856 in poi, il regime dei venti sulla costa livornese non abbia subito notevoli mutamenti, ma l'insufficienza e la scarsa comparabilità dei dati non consente di giungere a conclusioni attendibili. Purtroppo, non essendoci osservazioni relative agli anni precedenti, non è possibile attribuire ad un'eventuale variazione del regime dei venti l'erosione costiera iniziatasi proprio dopo il 1850.

Lo stato del mare

Anche per lo stato del mare, non essendovi stazioni di rilevamento più vicine al tratto di costa in esame, abbiamo utilizzato i dati forniti dall'Accademia Navale di Livorno, relativi al periodo 1968 - 1972. Come per il vento, esistono tre osservazioni giornaliere; alle ore otto, quattordici e diciannove, tuttavia, non avendo riscontrato sensibili variazioni nell'ondazione durante la giornata, data la notevole inerzia del moto ondoso, abbiamo operato la media delle tre osservazioni giornaliere.

Lo stato medio del mare, come risulta dalla tab. 3, è caratterizzato da una netta prevalenza del moto ondoso proveniente da SW e da WSW la cui frequenza rispettivamente è pari al 25,90% e al 16,94% delle osservazioni.

Le altre direzioni presentano delle frequenze molto più basse,

Tabella 3 - *Frequenza percentuale del moto ondoso, per direzioni di provenienza delle ondazioni e per classi di altezza delle onde, a Livorno, nel periodo 1968 - 1972.*

Altezza delle onde in metri	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	Calme	totale
<0,10	0,24	3,10	14,32	8,20	3,87	0,47	0,46		30,66
0,10 - 0,50	0,15	1,84	6,19	4,47	0,93	0,18	—		13,76
0,50 - 1,25	0,02	0,53	3,20	2,61	0,29	0,02	—		6,67
1,25 - 2,50	0,04	0,11	1,81	1,11	0,11	0,02	—		3,20
2,50 - 4,00	—	0,02	0,33	0,42	—	0,02	—		0,79
>4,00	—	—	0,05	0,13	0,02	—	—		0,20
calme								44,72	44,72
Totali	0,45	5,60	25,90	16,94	5,22	0,71	0,46	44,72	100,00

sempre inferiori al 5,6%. Quelle minime spettano al S e al NW che raggiungono lo 0,45 e lo 0,46% delle osservazioni (4).

Queste caratteristiche si presentano quasi costanti nel corso dell'anno, fatta eccezione per l'ondazione proveniente da SW la cui frequenza subisce una flessione durante i mesi estivi e precisamente da giugno ad ottobre, anche se ad agosto essa permane molto elevata. Le calme di mare raggiungono il 44,72% delle osservazioni e si registrano con maggior frequenza nel periodo da luglio a ottobre mentre il loro minimo si verifica a febbraio.

Per quanto riguarda la forza del mare, si registrano onde superiori ai quattro metri solo da tre direzioni e cioè da SW, da WSW e da W. Tuttavia da quasi tutte le altre direzioni, eccetto che da NW, le onde possono raggiungere un'altezza superiore a 1,25 m, cui corrisponde, nella scala marina internazionale, mare forza quattro (mare molto mosso).

TABELLA 4 - *Numero di casi con mare avente forza quattro e oltre, cui corrisponde un'altezza d'onda superiore a 1,25 m, a Livorno, alle ore quattordici, nel periodo 1968 - 1972.*

	g	f	m	a	m	g	l	a	s	o	n	d	anno
S	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SSW	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	3
SW	4	3	3	2	—	2	2	7	1	1	4	3	32
WSW	3	9	1	4	1	—	1	2	—	—	3	3	21
W	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
WNW	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
NW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Totale	8	10	4	6	1	2	3	9	1	1	7	7	59

(4) E' necessario far rilevare che l'Accademia Navale di Livorno è posta a sud del porto per cui, a nostro parere, le osservazioni dello stato del mare non corrisponderebbero appieno alla situazione che si verifica al largo o in corrispondenza del tratto di costa di San Rossore, a causa dell'azione di disturbo e smorzamento operata dalle secche della Meloria e dalle dighe foranee del porto di Livorno sulle onde in arrivo all'Accademia Navale dal quarto quadrante e in particolare da NW. Tuttavia la frequenza del vento di NW è molto bassa, di oltre 1/3 inferiore a quella del Libeccio, ma soprattutto la sua forza è relativamente ancora più bassa. Infatti, mentre per il Maestrale si ha una velocità media ponderata di 9,3 Km/h, per il Libeccio si raggiungono ben 54,0 Km/h. Perciò, anche se i dati relativi all'ondazione di NW, a Livorno, non fossero molto attendibili, per i motivi

Nella tab. 4 è riportata la distribuzione nell'anno dei casi con mare avente forza quattro e oltre e vi si può osservare che la maggior frequenza dei casi spetta al mare proveniente da SW e da WSW, con 32 e 21 casi su 59. Vi si può notare inoltre che il periodo in cui il mare raggiunge e supera tale forza più frequentemente va dal tardo autunno all'inizio della primavera e cioè da novembre ad aprile (5) con 42 casi, anche se ad agosto se ne registra un numero rimarchevole, paragonabile a quello dei mesi invernali. Simile andamento è rispecchiato pure dalle mareggiate più violente; durante il quinquennio infatti si sono potuti contare sei casi di mare con forza sei (onde di oltre 4 m di altezza) in corrispondenza dei mesi di novembre, dicembre (due casi), gennaio, aprile e in agosto. La provenienza dell'ondazione, in occasione di queste mareggiate, è stata prevalentemente da WSW, con una frequenza di quattro casi; gli altri due spettano l'uno all'W (novembre) e l'altro al SW (agosto).

Il movimento della sabbia lungo la riva

« Le spiagge sono molto sensibili alle forze agenti su di esse, come le onde, i venti e le correnti; sono depositi provvisori di materiali che prima o poi si rimetteranno in moto o lungo la costa o alternativamente da e verso il mare » (W. Bascom [1965]). Quasi tutti i movimenti della sabbia sono dovuti, come vedremo meglio, alle onde e alle correnti causate dalle onde. Con mare mosso, si può notare che, quando le onde si frangono in prossimità di una spiaggia sabbiosa, l'acqua in movimento, sia che vada verso la riva (onde di traslazione), risalendola per un tratto, sia che ritorni indietro (risacca), porta con sè in sospensione della sabbia. Se essa verrà tolta dalla spiaggia o, al contrario, verrà aggiunta ad essa dipende da numerosi fattori.

Prendiamo per esempio il caso di onde che si frangono paral-

---

citati, è molto probabile che la frequenza e la forza del mare da Maestro, sulla costa di San Rossore, non siano elevate come alcuni Autori potrebbero far credere (L. Trevisan [1949]; D. Albani [1952]), ma siano invece contenute almeno entro i limiti in cui la costringerebbero la frequenza e la forza del vento che spira dalla stessa direzione, che come abbiamo visto sono molto modeste.

(5) Ad analoghe conclusioni sono giunti altri Autori che hanno studiato lo stato del mare a Livorno (A. R. Toniolo [1910]; G. Conti [1950]; P. Innocenti [1968]).

lelamente alla costa. Durante le mareggiate, le correnti che, per bilanciare il moto di traslazione superficiale si formano sul fondo (*undertow current*) (J. LARRAS, [1957]; A. GUILCHER [1965]; V. PEZZA [1973]) trascinano la sabbia verso il largo fino alla zona dei frangenti dove si verificherebbe la formazione di scanni, a tutto scapito della riva che verrebbe così erosa. Quando invece le onde sono piccole, la sabbia del fondo viene trascinata verso la battigia dalle correnti orbitali, la cui azione prevale sulla corrente di ritorno che, in questo caso è molto debole, e si avrà perciò ripascimento. Se la quantità di sabbia interessata da questi movimenti è costante, come avviene sulle spiagge costituenti sistemi chiusi, cioè delimitate da promontori rocciosi, l'intero fenomeno, poiché le più grosse burrasche si verificano d'inverno, si limita ad uno scambio stagionale di sabbia tra la riva e gli scanni (P. CORNAGLIA [1891]; W. BASCOM [1965]; F. OTTMANN [1965]).

Nel caso in cui le onde incidano la costa obliquamente, la sabbia, trasportata dalla massa liquida in espansione sulla battigia giunge anch'essa obliquamente secondo la direzione e il verso delle onde. Durante il riflusso invece la sabbia descrive un percorso perpendicolare alla riva, avvenendo tale movimento per gravità e quindi lungo la linea di massima pendenza. Ciò determina uno spostamento della sabbia, comunemente chiamato *a denti di sega*, la cui componente è parallela alla costa. Il verso di questo spostamento dipenderà naturalmente dalla direzione di provenienza delle onde.

Grande importanza è stata data recentemente, come fattore determinante il trasporto laterale della sabbia, alla *corrente radente* (6) che si genera tra la zona dei frangenti e la battigia, quando le onde formano un angolo con la costa. La velocità di questa corrente, che è chiamata dagli americani *long-shore current* e dai francesi *dérive littorale*, è funzione del periodo e della velocità dell'onda, dell'energia per unità di superficie dissipata dall'onda stessa, dell'angolo di incidenza della cresta dell'onda con la linea di riva nonché della pendenza media della spiaggia e della rugosità del fondo (J. LARRAS [1957]; C. A. M. KING [1959]; W. BASCOM [1965]; F. OTTMANN [1965]; A. GUILCHER [1965]) (7).

(6) Tale termine è stato tratto da A. Metallo (A. METALLO [1969]).

(7) E' stato accertato che la massima velocità viene raggiunta dalla corrente radente quando l'angolo di incidenza delle onde con la riva è di circa 50-60° (F. OTTMANN [1965]). Secondo misure eseguite su spiagge del Lazio questa corrente raggiunge facilmente la velocità di 0,45 m/s, pari a 1650 m/h (A. METALLO [1969]).

In concomitanza con la corrente radente, per smaltire l'ammassamento di acqua sulla riva, si formerebbero, oltre alla *undertow current*, anche le *rip currents* che sono, al contrario della prima, delle correnti raccolte in zone ristrette interessanti tutta l'altezza d'acqua (J. LARRAS [1957]; A. GUILCHER [1965]); esse sarebbero dei veri e propri « fiumi » entro il mare, diretti verso il largo, la cui distanza tra loro può variare da cento a mille metri. La fig. 3 relativa ad un tratto di costa tra il Gombo e la foce del Fiume Morto è molto esplicativa a riguardo in quanto mostra dei valloncelli sottomarini, perpendicolari alla riva, distanti circa 100 m l'uno dall'altro, che potrebbero essersi formati proprio per l'azione delle *rip currents*. Tali correnti avrebbero pertanto un'importante azione morfologica sia nei confronti della battigia, tras-

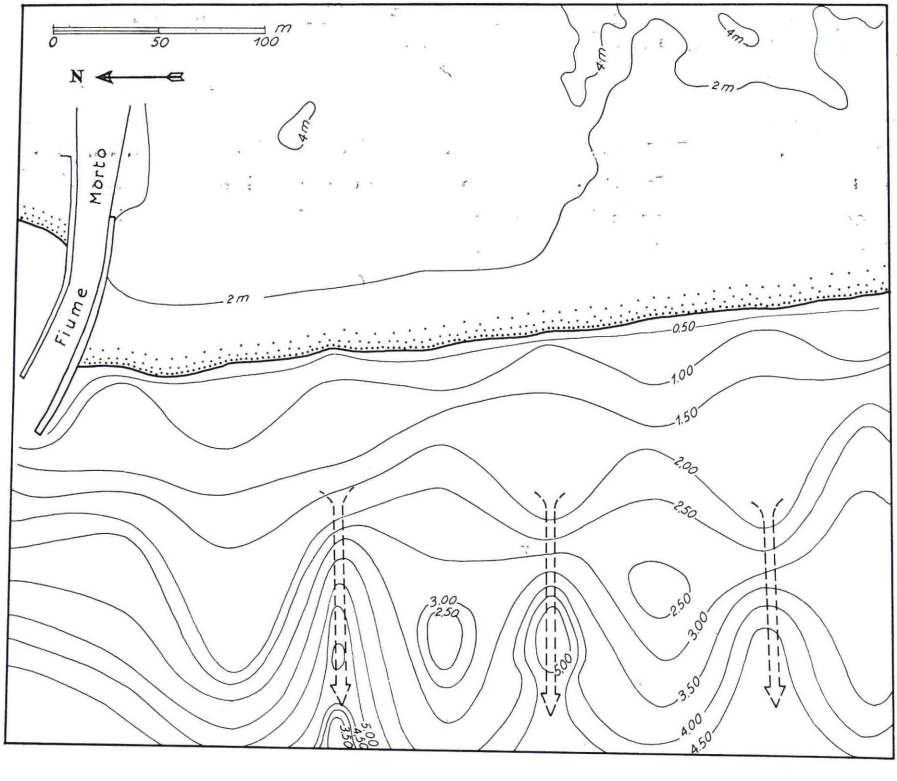

Fig. 3 - Andamento delle isobate, in corrispondenza di un tratto di costa di San Rossore, a sud del Fiume Morto Nuovo. Si possono notare i valloncelli sottomarini originati probabilmente dalle rip currents (Rilievo eseguito dalle Opere Marittime del Genio Civile di Genova in collaborazione con l'Istituto di Idraulica Agraria dell'Università di Pisa nell'ottobre del 1971).

portando verso il largo i materiali rimossi dal moto ondoso obliquo e dalla corrente radente, sia nei confronti del fondo marino, nel provocare la formazione dei solchi o valloncelli perpendicolari alla costa. Questi solchi spesso inciderebbero anche le barre longitudinali litoranee, permettendo così l'allontanamento verso il largo dei materiali rimossi dalla spiagge.

Alquanto discutibile sembra invece l'azione delle correnti litoranee sul trasporto e la sistemazione dei materiali lungo le spiagge perché esse si muovono ad una velocità troppo piccola per poter avere un'influenza morfologica (P. CORNAGLIA [1891]; O. MARINELLI [1909]; A. D'ARRIGO [1936]). Tuttalpiù tali correnti possono trasportare solo materiali che hanno la capacità di rimanere a lungo sospesi nelle acque e cioè materiali sottili che non entrano a far parte della composizione delle spiagge, ma vanno a depositarsi al largo ([8]). Ciò è avvalorato dal fatto che la loro velocità diminuisce in prossimità della riva (G. ROVERETO [1923]), come del resto è stato dimostrato da recenti misure ([9]).

Ora, nel nostro caso, come si è già visto, il moto ondoso di gran lunga prevalente, in prossimità del litorale pisano, è quello proveniente da SW che forma un angolo abbastanza grande con la linea di costa. Inoltre la forza del mare relativa a questa direzione raggiunge i massimi valori registrati. Per tali motivi, il movimento a denti di sega e la corrente radente, sul litorale di San

---

([8]) Infatti, da analisi granulometriche eseguite sulle sabbie di San Rossore, a circa 500 m a nord della foce dell'Arno, risulta che la maggior parte dei granuli ha dimensioni medie di 0,50 mm e, in ogni caso, il loro diametro è compreso tra un massimo di 1 mm e un minimo di 0,15 mm (S. BONATTI [1948]). I sedimenti attuali e recenti del Mar Tirreno, invece, nella piana batiale e nei bacini peritirrenici, sono costituiti da fanghi argillosi in cui la sabbia è quasi assente; la loro composizione granulometrica media infatti è la seguente: argilla 61%, silt 33% e sabbia 6% (R. SELLI [1971]).

([9]) Nel tratto di costa compreso tra il Lido di Roma e il Fosso della Moletta, con vento da Sud, si è registrata, nel 1954, una corrente diretta verso NW. Essa raggiungeva una velocità di 620 m/h a 500 m dalla battigia, di 600 m/h a 200 m e di 360 m/h (0,1 m/s) a 100 m dalla battigia stessa (A. METALLO [1969]). Inoltre questi dati si riferiscono a misure di superficie mentre, com'è noto, la velocità della corrente sul fondo è sensibilmente inferiore.

Il D'Arrigo a sua volta riporta alcuni valori della velocità della corrente sul fondo, come risulta da misure eseguite nell'Adriatico; essi oscillano da un minimo di 0,14 ad un massimo di 0,19 m/s (A. D'ARRIGO [1936]), valori già elevati se si tiene conto che la velocità superficiale di una corrente generata da un vento che spiri costantemente nella stessa direzione, per un periodo di tempo ragionevole, non supera il 2-3% della velocità media del vento stesso.

Rossore, generati dal mare di SW, determinerebbero un forte movimento di sabbia da sud verso nord, com'è stato notato da altri Autori (A. MORI [1966]; F. SAGGINI [1970]). L'ondazione da WSW, d'altro canto, per quanto raggiunga una frequenza molto elevata e una forza notevole, non determinerebbe apprezzabili spostamenti di sabbia lungo la spiaggia perché i suoi fronti d'onda giungono quasi paralleli alla riva, sia per essere questa disposta con un angolo molto vicino a 90° rispetto alla direzione di provenienza delle onde, sia per effetto della rifrazione. Questa sarebbe infatti favorita dal fatto che, essendo l'ondazione da WSW di formazione lontana, e perciò caratterizzata da onde lunghe, sarebbe soggetta ad una forte deviazione. Le mareggiate da WSW avrebbero lo stesso un'azione morfogenetica nei confronti della spiaggia, limitatamente però a quegli spostamenti di sabbia normali alla linea di battigia già prima descritti. Pertanto la direzione finale prevalente, «deriva litoranea netta» (W. BASCOM [1965]), del moto della sabbia lungo la riva, sarebbe quella diretta *da sud verso nord.*

La prevalenza del flusso di sabbia diretto a nord è dimostrata inoltre dalla deviazione verso nord della foce del fiume Serchio, dall'evidente insabbiamento della parte meridionale della foce armata del Fiume Morto e del molo meridionale del porto di Viareggio e dalla presenza di sabbia proveniente dall'Arno molto a nord dalla sua foce, come per esempio sulla spiaggia di Viareggio stessa (S. BONATTI [1932]; A. MORI [1956]).

Questo flusso verso nord della sabbia, provocato dal moto ondoso di SW obliquo alla costa, quando non vi fosse un sufficiente apporto di sabbia esterno, come quello proveniente dall'Arno, sarebbe una delle cause principali dell'arretramento della battigia lungo il litorale di San Rossore. La sabbia strappata a questo lido tuttavia non costituirebbe una perdita assoluta di materiale in quanto essa andrebbe a ripascere, in parte con meccanismi naturali, tratti di spiaggia posti più a nord. Infatti, lungo il litorale toscano, a nord dell'Arno, esistono tratti di costa sottile in aumento, come quello compreso tra la foce del Serchio e Viareggio e quello compreso tra la foce del Rio Arginello e Marina di Massa (D. ALBANI [1940]; COMUNE DI PISA [1948]; A. MORI [1956]). Un'altra porzione di questo flusso di sabbia viene intercettato e fissato dalle opere umane che si protendono in mare (moli, porti, scogliere, ecc.) determinando così dei ripascimenti artificiali, come già si è visto in precedenza.

Ben più grave sarebbe l'azione delle *rip currents*, perpendicolari alla costa, agenti durante le mareggiate, nel caso riuscissero a trasportare la sabbia su fondali tanto profondi che essa non sentisse più l'effetto del moto ondoso.

Gli apporti solidi dell'Arno

Nell'ampia falcatura sabbiosa formatasi fra Capo Corvo e i Monti Livornesi, in cui è compresa la spiaggia di San Rossore, i corsi d'acqua che per l'entità dei loro apporti solidi possono influire sulle variazioni della costa sono, da nord a sud, il Magra, il Serchio e l'Arno. Per quanto riguarda in particolare la loro influenza sulla dinamica del tratto di costa in esame, poiché risulta da alcune indagini psammografiche che i minerali presenti nella sabbia del litorale a nord dell'Arno provengono quasi esclusivamente dalle formazioni arenacee mio-oligoceniche presenti nel bacino di questo fiume (I. Chelussi [1910]; S. Bonatti, M. Della Bianchina [1948]; S. Bonatti [1948]) e che è presente un movimento prevalente dei materiali sabbiosi da sud verso nord, già descritto nel paragrafo precedente, possiamo ritenere trascurabile l'apporto sabbioso del Serchio e del Magra. Assai rilevante invece ci appare il ruolo esercitato dall'Arno e questo riguardo. Per questo motivo stimiamo necessario esaminare brevemente alcuni aspetti idrologici e del trasporto solido di questo corso d'acqua.

Le prime misure sistematiche della torbidità dell'Arno ebbero inizio nel 1936 ([10]), a cura dell'Ufficio Idrografico del G.C. di Pisa, a San Giovanni alla Vena, che è la stazione torbiometrica più vicina alla foce (Km 35), e i cui dati possono estendersi a tutto il bacino poiché, a valle di essa il fiume scorre arginato e non riceve praticamente nessun altro apporto solido.

Nel presente lavoro sono state considerate due serie di misure, una di sette anni (1936-1942) e l'altra di quindici anni (1954-1968) ([11]). Dall'esame delle medie annue relative ai due periodi

([10]) In realtà le prime misure della torbidità specifica e del deflusso torbido dell'Arno furono eseguite a Firenze dal 1871 al 1876 da G. Dainelli il quale misurò un deflusso torbido medio annuo di 2.358.260 T (E. Natoni [1956]).

([11]) Tale suddivisione si è resa necessaria per l'interruzione delle osservazioni dovuta a cause belliche. I dati sono stati ricavati dagli Annali Idrologici del Servizio Idrografico del Ministero dei LL.PP., Bacini dell'Arno e limitrofi, tra il Magra e il Fiora, parte seconda, Roma, annate 1936-42 e 1954-71.

risulta che le portate torbide relative al periodo 1936-1942 sono maggiori di quelle del periodo successivo. Infatti, come si può vedere dalla tabella 5, i materiali trasportati in sospensione nel

TABELLA 5 - *Caratteristiche idrologiche e del trasporto solido dell'Arno a San Giovanni alla Vena, nei periodi 1936-1942 e 1954-1968.*

Periodo	Tonn. 10^2	m^3	afflussi mm	deflussi mm	coeff. di deflusso
1936-42	2.677	1.070.800	1087,0	466,4	0,42
1954-68	1.732	692.800	1061,3	370,4	0,33

primo periodo ammontano in media all'anno a 2,677 milioni di tonnellate cui corrispondono, assumendo come peso specifico medio delle torbide il valore di 2,5 g/cmc (C. RUGGIERO [1948]), 1.070.800 metri cubi di materiale convogliato al mare. Assai più bassi sono i valori corrispondenti al secondo periodo poiché si hanno 1.732 milioni di tonnellate in media all'anno cui corrispondono 692.800 mc di torbide.

A questa diminuzione delle portate torbide non ha fatto riscontro tuttavia una diminuzione degli afflussi meteorici annui in quanto, nei due periodi, questi si sono mantenuti pressocché uguali. Risulta invece che, negli ultimi anni, si sia verificata una diminuzione sensibile dei deflussi liquidi che, da 466,4 mm annui nel primo periodo, sono passati a 370,4 mm annui nel secondo. Abbiamo allora cercato di spiegare questi fatti con una possibile variazione del regime pluviometrico, ma, come si può osservare dalla tabella 6, non si è verificata alcuna sensibile variazione degli afflussi stagionali nei due periodi di osservazione.

TABELLA 6 - *Regime delle precipitazioni nel bacino dell'Arno, sotteso dalla stazione idrometrografica di San Giovanni alla Vena, relativo ai periodi 1936-1942 e 1954-1968.*

Periodi	Inverno		Primavera		Estate		Autunno	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
1936-42	309	28,5	280	25,5	163	14,9	344	31,1
1954-68	297	28,7	250	24,9	150	14,4	336	31,9

Escludendosi perciò variazioni pluriennali e stagionali degli af-

flussi meteorici nel bacino dell'Arno, almeno dal 1936 in poi, si è costretti a spiegare la diminuzione del deflusso liquido e quindi del coefficiente di deflusso con un aumentato valore dell'evapotraspirazione. Tale fatto riteniamo sia imputabile principalmente all'intervento dell'uomo, sia sotto forma di opere di sistemazione agraria che sotto forma di prelievi di acqua per scopi irrigui ([12]).

Se si osserva che alla diminuzione dei deflussi liquidi si è accompagnata anche una diminuzione del numero delle piene e in particolare di quelle maggiori (le piene di oltre 500 m^3/s sono

TABELLA 7 - *Numero di piene in media all'anno, registrate a San Giovanni alla Vena, per classi di portata e per periodi di osservazione.*

Classi di portata m^3/s	PERIODI		
	1936-42	1954-68	1969-71
120 - 300	69,6	70,9	70,0
301 - 500	18,4	14,1	15,7
501 - 1000	14,7	5,3	1,3
>1000	2,0	0,8	—
Totale	104,7	91,1	87,0

([12]) A tale proposito il Passerini afferma che «ad una buona sistemazione deve fare riscontro una riduzione del coefficiente di deflusso a valori certamente inferiori alla metà di quello relativo a terreno non sistemato». Egli infatti mette in risalto che il suolo «sistemato» rappresenta uno dei principali organi regolatori della circolazione idrica «con la sua capacità idrostatica, con la sua permeabilità e con il suo potere evaporante» (G. PASSERINI [1953]). Secondo il Giandotti inoltre, l'irrigazione, a sua volta, è uno dei motivi principali delle variazioni pluriennali del coefficiente di deflusso (M. GIANDOTTI [1937]). Ciò sarebbe in accordo col fatto che in Toscana l'irrigazione ha avuto un incremento molto forte negli anni seguenti la seconda guerra mondiale. La superficie irrigata è passata infatti da 12.000 ha nel 1905 ai 18.000 ha nel 1931, ai 43.000 ha nel 1956 e agli 88.000 ha nel 1962 (E. GIORGI [1965]).

Tuttavia, secondo un recente studio, sembra che il coefficiente di deflusso abbia subito in questi ultimi anni una sensibile diminuizone in tutta l'Italia centro-settentrionale, a prescindere dagli interventi di sistemazione agraria. A tale conclusione sarebbe giunto Panicucci il quale ha preso in esame 117 bacini idrografici nei quali l'antropizzazione non solo non ha raggiunto livelli elevati, ma ha subito un'involuzione. Secondo l'A. la diminuzione del coefficiente di deflusso riscontrata non dipenderebbe nemmeno da variazioni di piovosità (e in ciò vi è concordanza con i nostri risultati), ma sarebbe una conseguenza dell'abbandono dei campi nelle zone collinari e montane (M. PANICUCCI [1971]).

passate infatti da 16,7 in media all'anno nel periodo 1936-42, a 6,1 nel periodo 1954-68, e a 1,3 nel periodo 1969-71), si può affermare che, almeno dal 1954 in poi, si sia determinata una minore capacità di trasporto dell'Arno.

Inoltre quel complesso di opere di sistemazione montana e collinare, che vanno dal rimboschimento alla costruzione di briglie di sistemazione torrentizia, alla costruzione di laghetti montani e collinari, alle sistemazioni idraulico-agrarie effettuate nel bacino imbrifero negli ultimi anni, può aver causato una diminuzione dei processi erosivi e quindi un minor apporto di materiale solido nel fiume (M. GIANDOTTI [1963]) ([13]).

Per completare il quadro relativo all'apporto di materiali solidi al mare da parte dell'Arno, non si può fare a meno di considerare la sottrazione di ghiaie e sabbie dall'alveo per scopi edilizi e stradali. Questi prelievi, secondo la stime del Genio Civile di Pisa, nel solo tratto che va dalla confluenza del Rio Arnino (all'altezza di San Miniato) fino a Pisa, per una lunghezza d'asta di circa 55 Km, ammonterebbero, dal dopoguerra al 1969, a oltre due milioni di metri cubi cui corrisponderebbe un prelievo medio annuo di circa 100.000 m^3 ([14]).

Fatte queste considerazioni, risulterebbe quindi assai utile conoscere la quantità di sabbia che perviene al mare dall'Arno, la quale in definitiva rappresenta la frazione del trasporto solido che alimenta le spiagge. Essa può essere convogliata al mare sia per trascinamento sul fondo sia in sospensione, cosa quest'ultima provata da analisi granulometriche delle torbide dell'Arno, anche se le uniche indagini di questo tipo sono quelle eseguite da F. Sestini

---

([13]) A titolo di cronaca riferiamo che attualmente la superficie sottoposta a comprensori di bonifica, nel bacino dell'Arno, è di 261.043 ha, pari al 31,7% dell'intero bacino. Tali comprensori sono in massima parte di bonifica montana in cui si attua principalmente il rinsaldamento delle pendici franose, l'imbrigliamento e la regimazione dei corsi d'acqua (E. TADDEI [1957]).

([14]) E. Gallareto, in generale, e A. Castelli, per quanto riguarda l'Arno, affermano infatti che da alcuni anni si registra una riduzione degli apporti solidi fluviali, come conseguenza diretta di opere umane effettuate nell'alveo dei corsi d'acqua e nei bacini imbriferi e dei prelievi dei materiali lapidei dal fondo dei fiumi (E. GALLARETO [1963]; A. CASTELLI [1973]). Per quanto riguarda l'Arno non abbiamo potuto eseguire una stima completa dei materiali estratti dall'alveo dell'asta principale e degli affluenti poiché non è stato possibile conoscere l'entità dei prelievi relativi ai tratti di competenza degli Uffici del G.C. di Firenze e di Arezzo.

nel 1902 a Pisa e da F. Mancini nel 1954 a Firenze ([15]). Tuttavia, data la mancanza di un sistematico rilevamento di dati sulla composizione granulometrica delle torbide dell'Arno, non si può giungere ad alcuna valutazione quantitativa della sabbia convogliata in sospensione al mare. Altrettanto può dirsi per i materiali trascinati sul fondo, in quanto non esiste, almeno per l'Arno, alcun tipo di misura sull'entità e la qualità di tale tipo di trasporto. D'altra parte però si possono fare valutazioni teoriche sul trasporto di fondo, basate su modelli sperimentali e su calcoli empirici. Importante è in proposito la stima eseguita da Ruggiero secondo cui la corrente fluviale a Bocca d'Arno, nel 1939, durante le piene con portate di almeno 120 mc/s ([16]), avrebbe potuto convogliare al mare, per trascinamento sul fondo, circa il 12% delle materie complessivamente contenute nelle acque del fiume, cui sarebbe corrisposta una quantità media di sabbia pari a 117.320 mc (C. RUGGIERO [1948]) ([17]).

Naturalmente ogni afflusso di sabbia al mare è condizionato dal costante rifornimento di materiali sabbiosi provenienti dalla parte alta e media del bacino e dall'entità dei prelievi di ghiaia e sabbia effettuati lungo l'alveo dell'Arno. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, è noto che dal 1969 tali prelievi, che erano tra l'altro effettuati in maniera indiscriminata, non sono stati più consentiti o almeno sono stati limitati considerevolmente, per cui è assai

---

([15]) Nel primo caso, a Pisa, è stata trovata in media, su 14 piene, una quantità di sabbia pari al 64% delle torbide. Tale valore appare eccessivo, ma bisogna tenere conto che esso è stato ottenuto senza effettuare nessuna dispersione degli aggregati argillosi. Nel secondo caso, a Firenze, utilizzando lo stesso criterio, si è pervenuti a risultati molto vicini poiché, su 16 campioni di torbide si è trovato in media il 58% di sabbia. Trattando invece gli stessi campioni con una soluzione disperdente, la frazione sabbiosa ha subito una notevole riduzione percentuale poiché il valore minimo ottenuto è stato del 4,44% in corrispondenza di una portata liquida di 84 mc/s ed il massimo del 45,31% in corrispondenza di una portata liquida di 561 mc/s.

Per quanto riguarda le dimensioni dei granuli della sabbia il Mancini si limita ad indicare il diametro minimo (0,12 mm) senza specificare quello massimo. Tuttavia doveva trattarsi di materiale non grossolano se lo stesso A. lo ha definito «sabbietta».

([16]) Secondo il Ruggiero, la portata di 120 mc/s, nel tratto terminale dell'Arno, data la conformazione della foce, corrisponderebbe a quella minima necessaria al trasporto per trascinamento sul fondo della sabbia.

([17]) Tali valori si riferiscono al 1939 poiché l'A. ha considerato quell'anno come rappresentativo per il periodo prebellico.

probabile che da quella data si sia verificato un aumento dell'afflusso di sabbia al mare.

Il fondo marino antistante la spiaggia di San Rossore

Per conoscere l'ampiezza e l'acclività della piattaforma litoranea antistante il tratto di spiaggia in esame si sono utilizzare le carte nautiche n. 3 e 4, all'1: 100.000, dell'Istituto Idrografico della Marina Italiana, aggiornate al 1966. Dal loro esame si ricava che, in corrispondenza del Gombo, l'isobata dei 200 m dista dalla riva circa 34 Km. Di conseguenza la pendenza media del fondo compreso da questa isobata è del 5,9‰, anche se essa non è uniforme in tutto il profilo. Infatti la pendenza aumenta con la distanza dalla riva, come è messo in evidenza dalla tab. 8, conferendo al fondale un andamento convesso. Questo andamento è caratteristico di tutto il fondale relativo alla falcatura sabbiosa che va da Capo Corvo alla foce dell'Arno. Facendo il confronto con i fondali sabbiosi di altri tratti delle coste tirreniche a sud di Livorno, i profili risultano essere invece quasi sempre concavi, come si verifica ad esempio nella piattaforma antistante la foce dell'Ombrone, il cui andamento è marcatamente concavo, e in quella antistante la foce del Tevere che risulta convessa fino all'isobata 100 e concava verso le profondità maggiori.

Tabella 8 - *Distanza tra le isobate in Km e relativa pendenza del fondo marino dinanzi al Gombo.*

Distanza tra le isobate 0-50 m	Pend.	Distanza tra le isobate 50-100 m	Pend.	Distanza tra le isobate 100-200 m	Pend.	Distanza tra le isobate 0-200 m	Pend.
Km	‰	Km	‰	Km	‰	Km	‰
17,0	2,94	6,8	7,35	10,1	9,90	33,9	5,90

Per quanto riguarda il confronto tra i rilievi eseguiti in epoche diverse, facciamo notare che, dal 1881, anno del primo rilievo dell'Istituto Idrografico della Marina Italiana, fino al 1966, anno dell'ultimo rilievo, le isobate, per un tratto di circa 2-3 Km a sud e a nord della foce dell'Arno, hanno subito un notevole arretramento che testimonia una forte erosione del fondo marino, come

si può notare dalla fig. 1. Per il restante tratto di fondale fino al Fiume Morto, la posizione relativa delle batimetriche è pure cambiata nel tempo, sì che il fondale stesso risulterebbe in alcuni tratti in insabbiamento ed in altri in erosione, ma le variazioni riscontrabili sono di così lieve entità che non si possono formulare giudizi circa erosioni o ripascimenti avvenuti nel periodo descritto. Sembrerebbe comunque che in generale i fondali a nord dell'Arno si siano mantenuti in uno stato di relativo equilibrio, almeno dalla metà del secolo scorso. Infatti, da un confronto tra rilievi batimetrici del 1846 e del 1872, sarebbe risultato che, mentre il fondo marino dal Calambrone fino a circa due Km a nord della foce dell'Arno aveva subito corrosioni, il restante fondale fino a Capo Corvo aveva invece manifestato una tendenza quasi generale all'insabbiamento (D. ALBANI [1940]).

Per un'analisi più particolareggiata dei fondali fino alla profondità di circa 11 m, abbiamo utilizzato un rilievo batimetrico al 1:2000 eseguito dalle Opere Marittime del Genio Civile di Genova e dalla nave oceanografica « Cornaglia », nel periodo tra il maggio e il giugno del 1960. Tale rilievo, limitato tuttavia al solo tratto compreso tra la foce dell'Arno e il Gombo, è l'unico rilievo batimetrico a grande scala, riguardante San Rossore, eseguito, per quanto ci consta, dal 1929 al 1960 ([18]). Dalle isobate costruite e dai profili eseguiti, di cui tre sono riportati nella fig. 4, si può constatare che il fondale è diviso, per caratteristiche ben precise, in due parti, la prima, che va dalla riva al primo scanno, ha una conformazione molto movimentata, con variazioni repentine di profondità dovute alla presenza di altri scanni e di avvallamenti; la seconda, che va dal piede del primo scanno verso il largo, presenta invece un andamento più regolare, anche se la pendenza del fondale aumenta gradatamente verso il Gombo. In genere la profondità del piede del primo scanno si aggira sui sei metri, mentre la sua distanza dalla riva diminuisce procedendo dalla foce dell'Arno verso nord, variando tra gli 800 e i 500 m. Questo ultimo fatto, se posto in relazione con l'aumento della pendenza, appare come lo-

([18]) Altri rilievi batimetrici dei fondali di San Rossore erano stati eseguiti alla stessa scala, tra il 1929 e il 1933 dall'Ufficio Escavazione Porti di Livorno. Tale Ufficio però è stato soppresso nel 1952 e i nostri tentativi di rintracciare i rilievi citati sono rimasti infruttuosi.

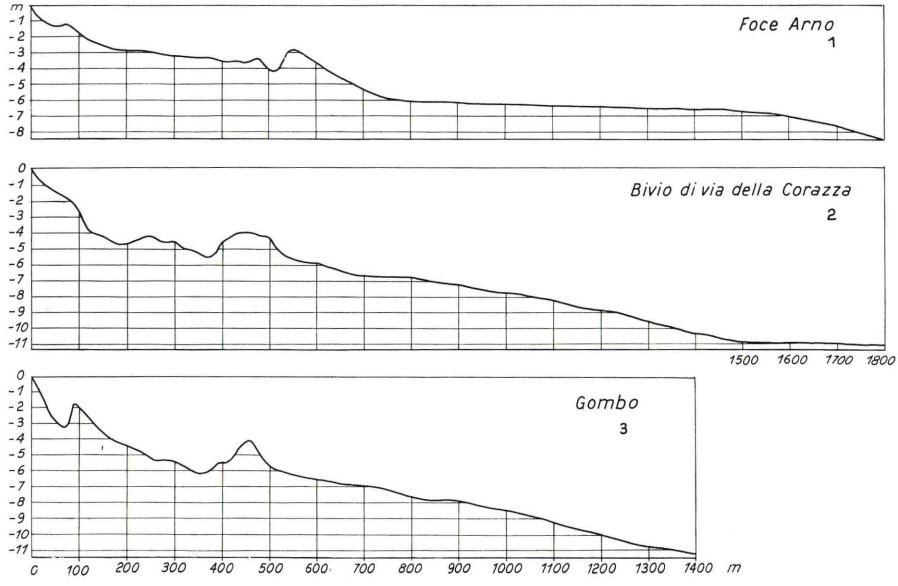

Fig. 4 - Profili del fondale del tratto di mare compreso tra la foce dell'Arno e il Gombo (Da un rilievo batimetrico eseguito dalle Opere Marittime del Genio Civile di Genova nel 1960).

gica conseguenza di una minore distanza del punto di frangenza dalla battigia man mano che ci si allontana dalla cuspide deltizia.

Naturalmente la conformazione del fondo, così come appare dai profili eseguiti, dipende da ben definite condizioni del mare e dei venti verificatesi prima dell'esecuzione del rilievo, specie per quanto riguarda il tratto compreso tra la riva e il primo scanno. Infatti questo primo tratto del fondale può subire, in dipendenza dello stato di agitazione del mare, variazioni sia di dimensioni, a seconda della posizione in cui viene via via a trovarsi il primo scanno, sia di conformazione, per la formazione o la distruzione degli altri scanni più vicini alla linea di battigia.

Variazioni pluriennali della linea di costa di San Rossore

L'evoluzione del litorale in esame è stata ricostruita attraverso l'analisi dei rilievi all'1:25.000 eseguiti dall'I.G.M.I. nel 1878, 1920, 1928, 1934, 1939 e 1954, nonché attraverso l'interpretazione di tre serie di foto aeree eseguite, nel 1960, nel 1966 e nel 1971, a cura dell'Aeronautica Militare.

Per apprezzare le variazioni della spiaggia abbiamo proceduto a misure planimetriche delle differenze di superficie riscontrate tra i rilievi successivi. Tuttavia, avendo osservato una distribuzione spaziale e temporale non uniforme di tali variazioni, poiché a tratti in erosione si sono alternati tratti in ripascimento o in stasi, abbiamo suddiviso la spiaggia da foce Arno a foce Fiume Morto Nuovo in dodici sezioni della lunghezza di circa 500 m. Siamo ricorsi a tale espediente per poter meglio seguire l'evoluzione del fenomeno tratto per tratto, anche in vista della valutazione dell'effetto delle opere umane sull'equilibrio della spiaggia (costruzione dei pennelli a foce Arno e delle scogliere frangiflutto al Gombo).

Nel 1878, data della prima levata dell'I.G.M.I., il lobo destro del delta dell'Arno formava ancora un notevole protendimento che si raccordava, con un ampio arco, alla foce del Fiume Morto Vecchio. L'arretramento della cuspide destra, in confronto alla situazione del 1850, anno in cui la battigia si protendeva per oltre 1200 metri rispetto a quella attuale, era stato compensato da ripascimenti avvenuti più verso la foce per cui la superficie del lobo destro, a differenza di quanto avveniva per quello sinistro, aveva subito in realtà un aumento, come del resto risulta dalle misure eseguite dal Toniolo e indicate nella tabella 9.

TABELLA 9 - *Variazioni di superficie di spiaggia dal 1850 al 1895, a nord della foce dell'Arno, per un tratto di circa 1 Km* (da A. R. TONIOLO [1910]).

Anno del rilievo	Intervallo in anni	Superficie in mq	Differenza di sup. in mq	Media annua delle variazioni in mq
1850		332.300		
	28		+ 44.000	+ 1.571
1878		376.300		
	12		+ 133.400	+ 11.117
1890		509.700		
	5		— 137.700	— 27.540
1895		372.000		

Come si può osservare, fino al 1890 il lobo destro aveva continuato ad estendersi per cui si può affermare che, a nord della foce dell'Arno, l'erosione si sia iniziata dopo quest'ultima data.

Nella levata successiva dell'I.G.M.I., che risale al 1920, il protendimento esistente nel 1878 era quasi scomparso e il lobo destro

TABELLA 10 - *Variazioni della superficie della spiaggia, in ettari, nel tratto foce Arno-foce Fiume Morto Nuovo, per sezioni e per periodi.*

	PERIODI								
Sezioni	1878-1920	1920-28	1928-34	1934-39	1939-54	1954-60	1960-66	1966-71	1878-1971
1	—24,39	—4,40	0,00	—5,04	—6,13	—6,43	+0,30	—1,74	—48,03
2	—21,54	—5,00	0,00	—6,55	—8,57	—4,25	—2,02	+0,93	—47,00
3	— 0,26	—4,11	0,00	—8,94	—5,53	—3,14	—3,48	+1,86	—23,60
4	+ 2,95	—4,30	0,00	—9,22	—1,18	—3,90	—4,11	+2,51	—17,25
5	+ 2,37	—2,23	0,00	—5,51	—1,65	—3,41	—2,97	+2,21	—11,19
6	+ 1,25	+0,07	—2,04	—2,76	—2,93	—2,67	—1,65	+0,74	— 9,99
7	+ 0,28	+1,81	—1,07	—1,77	—2,11	—1,67	—1,67	+0,91	— 5,29
8	+ 0,67	+2,09	—1,49	—1,21	—0,37	—2,65	+0,49	+2,16	— 0,31
9	+ 0,77	+2,58	—1,70	—0,79	+0,37	—2,18	—0,53	+1,72	+ 0,24
10	+ 0,81	+2,63	—1,74	—0,42	+1,42	—1,18	—2,39	—1,60	— 2,47
11	+ 0,81	+3,46	—2,25	+0,81	—0,88	—0,07	—2,32	—0,98	— 1,42
12	+ 0,81	+6,69	—2,49	+1,14	—1,16	—0,28	—1,09	+0,16	+ 3,78
Totali	—35,47	—0,91	—12,78	—40,26	—28,72	—31,83	—21,44	+8,88	—162,53

TABELLA 11 - *Variazioni medie annue della superficie della spiaggia, in ettari, nel tratto foce Arno-foce Fiume Morto Nuovo, per sezioni e per periodi.*

	PERIODI								
Sezioni	1878-1920	1920-28	1928-34	1934-39	1939-54	1954-60	1960-66	1966-71	1878-1971
1	—0,58	—0,58	0,00	—1,01	—0,41	—1,06	+0,05	—0,35	—0,51
2	—0,52	—0,63	0,00	—1,32	—0,56	—0,71	—0,33	+0,19	—0,50
3	—0,01	—0,51	0,00	—1,79	—0,37	—0,52	—0,57	+0,37	—0,25
4	+0,07	—0,54	0,00	—1,84	—0,08	—0,65	—0,68	+0,51	—0,19
5	+0,06	—0,28	0,00	—1,10	—0,11	—0,57	—0,50	+0,44	—0,12
6	+0,03	+0,01	—0,34	—0,55	—0,20	—0,45	—0,28	+0,15	—0,11
7	+0,01	+0,23	—0,18	—0,35	—0,14	—0,28	—0,28	+0,18	—0,06
8	+0,02	+0,26	—0,25	—0,24	—0,02	—0,44	+0,08	+0,43	—
9	+0,02	+0,32	—0,28	—0,16	+0,02	—0,36	—0,09	+0,34	+
10	+0,02	+0,33	—0,28	—0,08	+0,10	—0,20	—0,40	—0,31	—0,03
11	+0,02	+0,43	—0,38	+0,16	—0,06	—0,01	—0,39	—0,20	—0,02
12	+0,02	+0,85	—0,42	+0,23	—0,08	—0,05	—0,18	+0,03	+0,04
Totali	—0,84	—0,11	—2,13	—8,05	—1,91	—5,30	—3,57	+1,78	—1,75

del delta risultava già più arretrato di quello sinistro prospiciente Marina di Pisa, dove erano state approntate delle difese rappresentate da pennelli ortogonali alla costa e da scogliere atte a proteggere l'abitato. Pertanto, dal 1878 al 1920, come risulta dalle nostre misure, nella prima sezione e cioè nei primi 500 m a nord della foce, si è verificata una perdita di 24,39 ha e, nella seconda sezione, di 21,54 ha. Nella terza sezione l'erosione si è manifestata ancora, ma la perdita di superficie è stata irrisoria, ammontando a soli 0,26 ha. In complesso, mentre nelle prime tre sezioni si è avuta una perdita di superficie complessiva di 46,19 ha, negli altri tratti più a nord, ossia a cominciare da 1,5 Km circa dalla foce, si è verificato un leggero ripascimento che ha assunto il massimo sviluppo nella quarta e quinta sezione, in corrispondenza delle Lame di Fuori. L'acquisto di superficie dovuto a questo ripascimento è stato di 10,72 ha per cui, su tutta l'estensione della spiaggia, si è verificata una perdita di 35,47 ha, pari a 0,84 ha l'anno, come si può osservare nelle tabelle 10 e 11. L'andamento del fenomeno, espresso graficamente, è osservabile chiaramente dalla fig. 5 che mostra le variazioni pluriennali della costa in esame dal 1878 al 1971, cioè per quasi cento anni.

Tra il 1920 e il 1928 la velocità dell'erosione è sensibilmente diminuita, raggiungendo il valore medio per tutta la spiaggia di 0,11 ha per anno. Come per il periodo precedente, l'erosione si è manifestata solo nel tratto più meridionale della costa, per circa 2,5 Km, mentre a nord è continuato il ripascimento che si è rivelato addirittura più sensibile che negli anni passati. Si è avuto pertanto un equilibrio tra le perdite e gli acquisti; infatti la perdita assoluta di superficie relativa al periodo è stata di appena 0,91 ha.

Tra il 1928 e il 1934 si è verificata invece un'inversione di tendenza nell'andamento delle variazioni della linea di costa poiché questa, contrariamente a quanto era avvenuto prima, non ha subito variazioni, apprezzabili almeno nella scala considerata, per i primi 2,5 Km più meridionali. Nel tratto di costa più a nord invece, dove fino a questo periodo la battigia era sempre avanzata, a cominciare da circa 3 Km dalla foce, ha avuto inizio una forte erosione che, nella sesta sezione, ha determinato una perdita di spiaggia di 0,34 ha l'anno e, nell'ultima, di 0,42 ha l'anno. A queste variazioni di superficie è corrisposto un sensibile arretramento della battigia che ha raggiunto il valore di 55 m all'altezza della

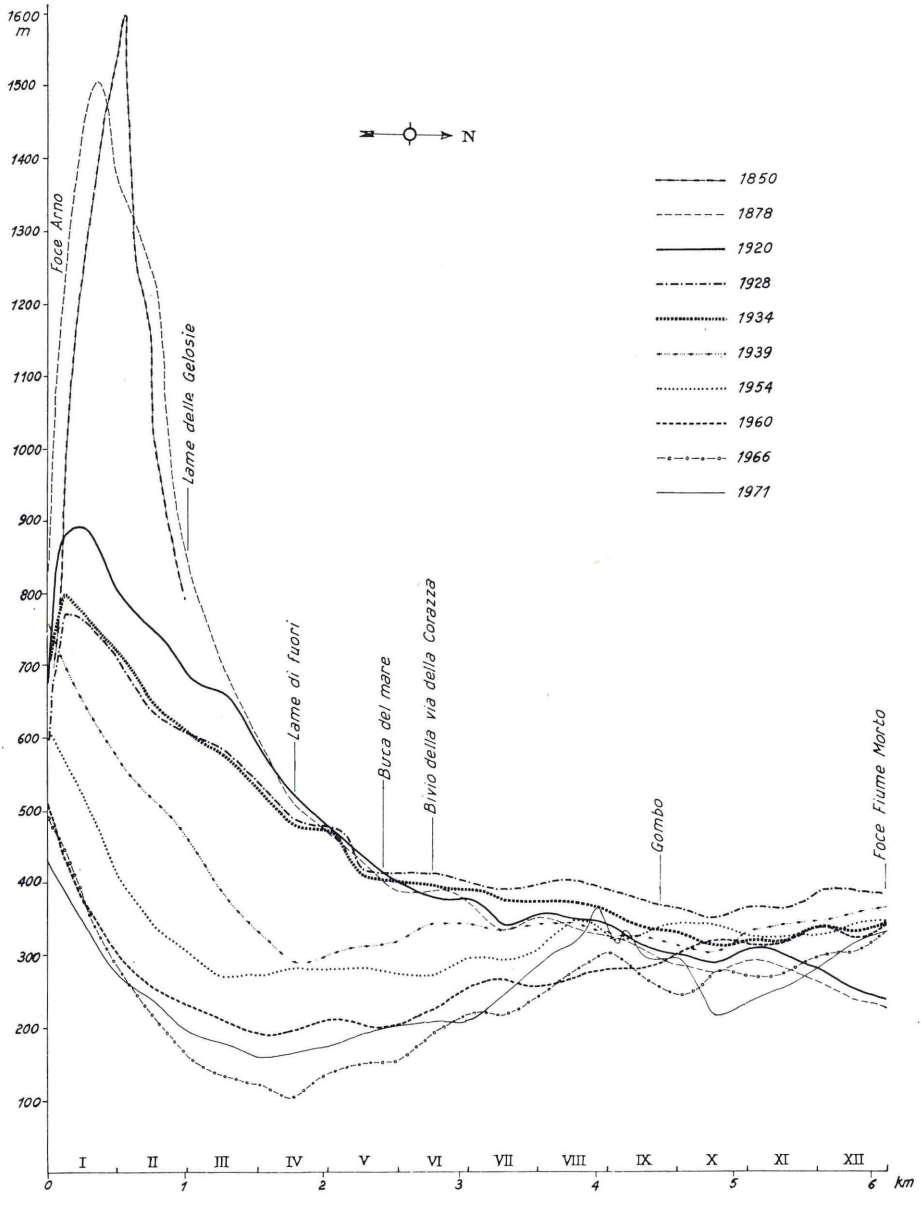

Fig. 5 - Variazioni della linea di spiaggia tra foce Arno e foce Fiume Morto Nuovo, nel periodo 1878-1971.

foce del Fiume Morto Nuovo. La perdita assoluta di spiaggia su tutto il tratto in esame è stata di 12,78 ha, pari ad una media annua di 2,13 ha.

Questo nuovo andamento delle variazioni della costa di San Rossore è coinciso con la costruzione, nel 1926, di un lungo pennello prolungante la foce dell'Arno sul lato destro. Senza dubbio quest'opera ha provocato una rottura di equilibrio tra i fattori determinanti i movimenti della sabbia, di cui però è difficile conoscerne il meccanismo. Tuttavia la costruzione del pennello non può non aver avuto delle conseguenze sulle modificazioni delle variazioni della costa posta nord di esso. Questo fatto fu notato dall'Albani la quale dice testualmente: «Nel 1926 la costruzione della diga sulla destra di Bocca d'Arno provocò un ripascimento della spiaggia tra il 1926 e il 1927, dopo di che l'erosione riprese il sopravvento » (D. ALBANI [1940]).

Infatti dal 1934 al 1939 l'erosione riprese con grande energia, e questa volta su tutto il litorale in esame, escluso l'ultimo chilometro a sud di Fiume Morto. In soli cinque anni si ebbe una perdita complessiva di 40,26 ha, superiore a quella verificatasi in quarantadue anni, dal 1878 al 1920, con una sottrazione media annua di 8,05 ha di spiaggia, la massima verificatasi in tutto il periodo di osservazione. Le perdite medie annue superarono in alcune sezioni l'ettaro, sfiorando nella quarta, in corrispondenza delle Lame di Fuori, i due ettari (1,84 ha) [19]. Quivi l'arretramento è stato fortissimo, raggiungendo 188 m lineari, pari a 37,5 m l'anno. Procedendo verso nord l'entità dell'erosione è andata decrescendo fino ad annullarsi poiché, nelle ultime due sezioni, in prossimità del Fiume Morto, si è potuto registrare un debole ripascimento, ammontante a circa due ettari.

Dal 1939 al 1954 si è riscontrato un rallentamento nel ritmo di arretramento della spiaggia poiché in qiundici anni si è verificata una perdita assoluta di 28,72 ha, pari a 1,9 ha annui, per lo più concentrata nelle prime tre sezioni, per un tratto di circa 1,5 Km dalla foce. Più a nord l'erosione è stata minore, mentre al Gombo si è verificato un leggero ripascimento.

Una ripresa dell'erosione si è verificata dal 1954 al 1960, nel

---

[19] Questo forte arretramento si è verificato nonostante che in tale periodo le portate torbide dell'Arno ammontassero in media a 2.739.000 T annue, quantità quasi doppia di quella postbellica.

quale periodo si è registrata una perdita assoluta di 31,83 ha e cioè di 5,3 ha annui. In questi sei anni il fenomeno ha per la prima volta interessato, anche se con maggiore energia il tratto più meridionale, tutta la spiaggia in esame la quale è arretrata mediamente di 53 m in sei anni pari a circa 8,8 m l'anno ([20]).

Dal 1878 fino al 1960 pertanto i ritiri sono stati più ingenti tra la foce dell'Arno e il Gombo nel quale tratto si è avuta complessivamente una perdita di 158,08 ettari e le variazioni del litorale, considerando gli avanzamenti e i ritiri verificatisi nei vari periodi, sono state negative in tutte le sezioni. A nord del Gombo invece, la risultante delle variazioni della linea di spiaggia è stata positiva, si è avuto cioè un leggero avanzamento, che ha comportato un aumento della superficie della spiaggia di 8,11 ha su un tratto di circa 1,5 Km. Praticamente, fino a questa data, il Gombo ha rappresentato, come ha fatto notare Mori, una delicata zona di «cerniera» (A. MORI [1966]) a sud della quale hanno prevalso i ritiri della spiaggia mentre, a nord di essa, ci sono state alternanze di ritiri e avanzamenti che hanno avuto come risultante un leggero ripascimento.

Negli anni successivi tuttavia i processi morfologici sono stati ulteriormente alterati dalla costruzione delle cinque scogliere frangiflutti parallele alla costa in corrispondenza del Gombo, sollecitata dagli ingenti ritiri della spiaggia che minacciavano la pineta e la stessa villa presidenziale. Tra il 1962 e il 1963 vennero costruite infatti le prime due scogliere, quelle più meridionali relative al progetto iniziale, collocate a circa 300 m a sud del viale del Gombo. Esse provocarono sopraflutto, rispetto alla direzione di traversia, un sensibile ripascimento cui corrispose però una forte erosione sottoflutto che interessò proprio la spiaggia prospiciente il viale del Gombo che doveva essere difesa. Ebbe inizio così, per il tratto più settentrionale della costa in esame, che abbiamo visto conservare negli anni precedenti una certa stabilità ed una tendenza all'avanzamento, una forte erosione.

Nel periodo tra il 1960 e il 1966 si è verificato un leggero ri-

---

([20]) Si fa notare che in questo periodo le portate torbide dell'Arno sono ammontate a 1.447.000 T annue, circa la metà di quelle registrate nel periodo prebellico. Non ci sembra fuori luogo mettere in relazione tale andamento col fatto che, dopo la guerra, l'estrazione di sabbie dall'alveo ha raggiunto valori elevatissimi, dato il forte sviluppo dell'edilizia e delle costruzioni stradali.

pascimento in prossimità della foce dell'Arno ([21]) mentre l'erosione del litorale è proseguita con la stessa intensità del periodo precedente. Nella quarta sezione infatti si è verificata un'erosione di 4,11 ha ed un arretramento della battigia di 92 m. Tuttavia l'entità dell'erosione, da questo tratto, è andata man mano attenuandosi fino ad annullarsi in prossimità del Gombo dove si è verificato invece un ripascimento, rafforzato e ampliato dalla costruzione di altre due scogliere, portata a termine nel 1965. A nord del Gombo tuttavia l'arretramento del litorale si è andato accentuando poiché la battigia si è ritirata di ben 50 m con una perdita di 6,33 ha di spiaggia. Durante questi sei anni, malgrado che le portate torbide dell'Arno avessero avuto un incremento rispetto agli anni precedenti, raggiungendo una media annua di 2.320.000 tonnellate, molto vicina a quella del periodo prebellico, l'erosione ha raggiunto complessivamente valori assai elevati.

Dal 1966 al 1971 infine, per la seconda volta, si osserva un'inversione di tendenza del fenomeno erosivo; in questo caso si verifica un brusco passaggio dall'erosione al ripascimento nel tratto tra foce d'Arno e il Gombo. Ad esso ha corrisposto, nella sezione più meridionale, per circa 600 m, una sensibile erosione che ha interessato particolarmente la cuspide deltizia subito a ridosso della foce, laddove nel periodo precedente c'era stato un ripascimento. Al Gombo, dove nel 1968 era stata ultimata la costruzione dell'ultima scogliera, il fenomeno del ripascimento già verificatosi in precedenza, ha assunto proporzioni più vistose tanto che la linea di battigia, in corrispondenza della scogliera più meridionale, ha raggiunto e superato il limite della spiaggia del 1934.

Complessivamente, su tutto il tratto di spiaggia in esame, dal 1966 al 1971, si è verificato un incremento della superficie della spiaggia di circa 8,88 ha, pari a 1,78 ha per anno. Tale incremento ha interessato tutto il tratto di costa da circa 600 m a nord della foce dell'Arno fino al Gombo ed ha determinato un avanzamento della battigia abbastanza sensibile, come si può osservare dal confronto delle fotografie della fig. 6.

([21]) Tale ripascimento è stato generalmente attribuito all'afflusso delle torbide dell'Arno attraverso un varco apertosi, per effetto di una mareggiata, nel pennello settentrionale di Bocca d'Arno. Questa ipotesi sembra essere tuttavia in contrasto col fatto che tra il 1966 e il 1971 si è verificata una forte erosione proprio nello stesso tratto di costa.

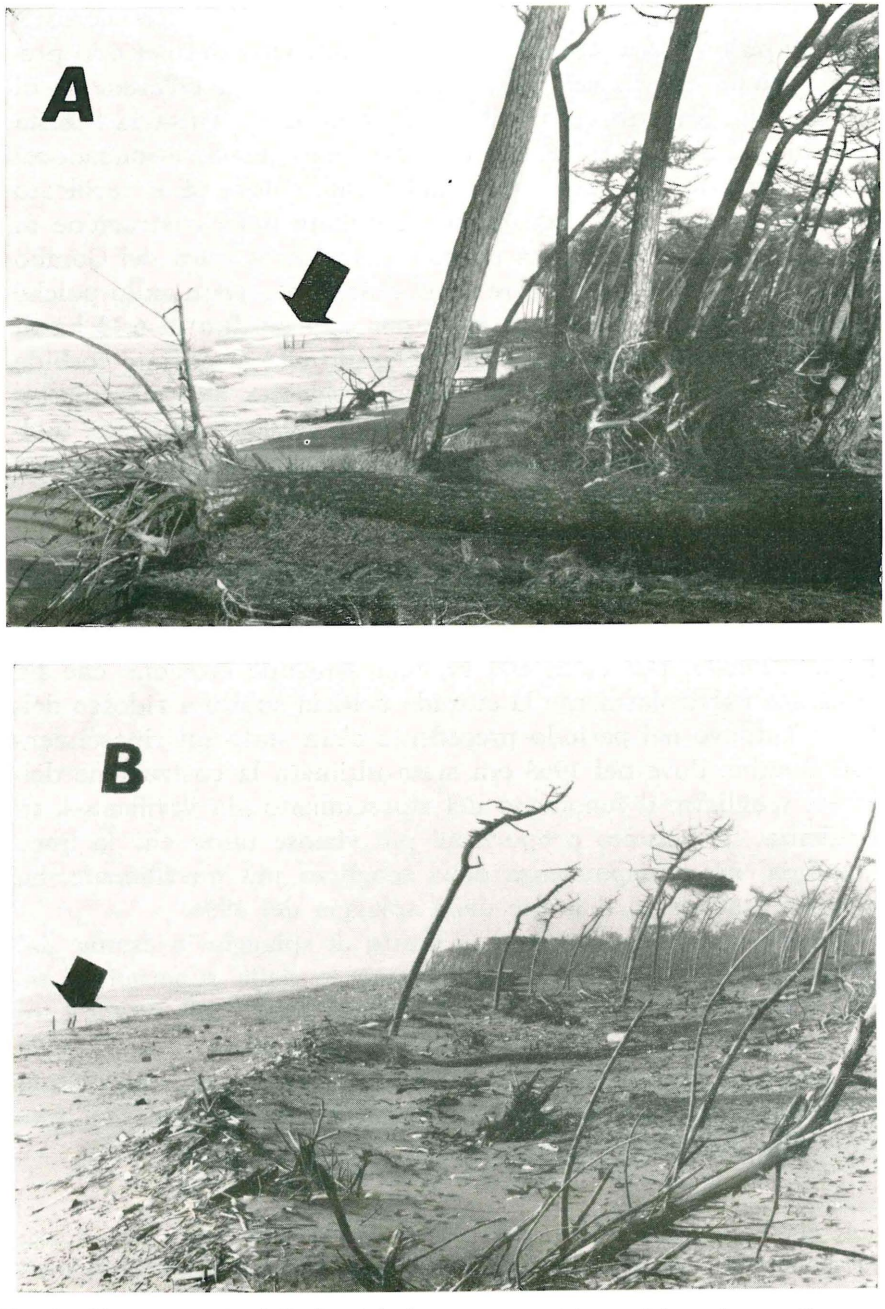

Fig. 6 - L'avanzamento della battigia è messo in evidenza dal confronto di queste due fotografie eseguite presso il bivio di Via della Corazza: in A (nov. 1963) i tre piloni di cemento armato, indicati dalla freccia, sono chiaramente in mare e distanti circa 50 m dalla riva; in B (maggio 1974) i piloni sono stati raggiunti dall'avanzare della spiaggia e appaiono parzialmente sommersi dalla sabbia. Dal confronto delle due fotografie si può notare anche la notevole degradazione subita dal sottobosco e dalla pineta in quest'ultimo decennio (Foto S. Vittorini).

A nord del Gombo invece l'erosione ha assunto valori elevati, facendo arretrare, in cinque anni, la battigia di circa 60 m subito a nord delle scogliere e provocando la perdita di altri 2,58 ha di spiaggia.

A questo punto non ci sembra fuori luogo attribuire il ripascimento verificatosi all'azione di intercettamento e di fissaggio del flusso di sabbia, che, come abbiamo visto, procede da sud verso nord, operato dalle scogliere frangiflutto costruite al Gombo. La sabbia, in poche parole, si sarebbe «appoggiata» al protendimento formatosi alle spalle delle scogliere stesse.

L'azione delle scogliere frangiflutto al Gombo

Come più volte accennato, tra il 1962 e il 1963 furono ultimate le prime due scogliere delle cinque progettate per difendere le opere costruite al Gombo (Villa Presidenziale) minacciate dall'avanzare del mare. Queste scogliere erano state collocate a circa 300 m a sud del viale del Gombo e apportarono una notevole rottura di equilibrio al tratto di costa da esse interessato, come è stato messo in evidenza dalla serie di misure dirette, da noi eseguite periodicamente, su circa 2 Km di spiaggia a nord e a sud delle scogliere medesime, dal 1963 al 1971.

Nel settembre del 1962, subito dopo la costruzione, si verificò infatti un ripascimento in corrispondenza di esse; maggiore in quella settentrionale che in quella meridionale, ma contemporaneamente, sottoflutto rispetto all'ondazione principale proveniente da SW la linea di battigia subì un sensibile ritiro rispetto a quella del 1960. Questo fenomeno andò accentuandosi nei mesi successivi, anche se con andamento discontinuo, dovuto essenzialmente alla frequenza delle mareggiate ed alla loro direzione di provenienza. Comunque si può notare una stasi del ripascimento durante i mesi del semestre invernale ed una ripresa durante i mesi estivi, tanto che, nell'ottobre del 1963, si raggiunse il massimo protendimento della spiaggia, relativo a quell'anno, a ridosso della scogliera settentrionale, come mostra la fig. 7. Sottoflutto intanto l'erosione aveva asportato una larga fetta di spiaggia proprio in corrispondenza del viale del Gombo che si voleva proteggere, come si può chiaramente notare dalla foto aerea della fig. 8, mettendo in evidenza così l'errato ordine di successione nel-

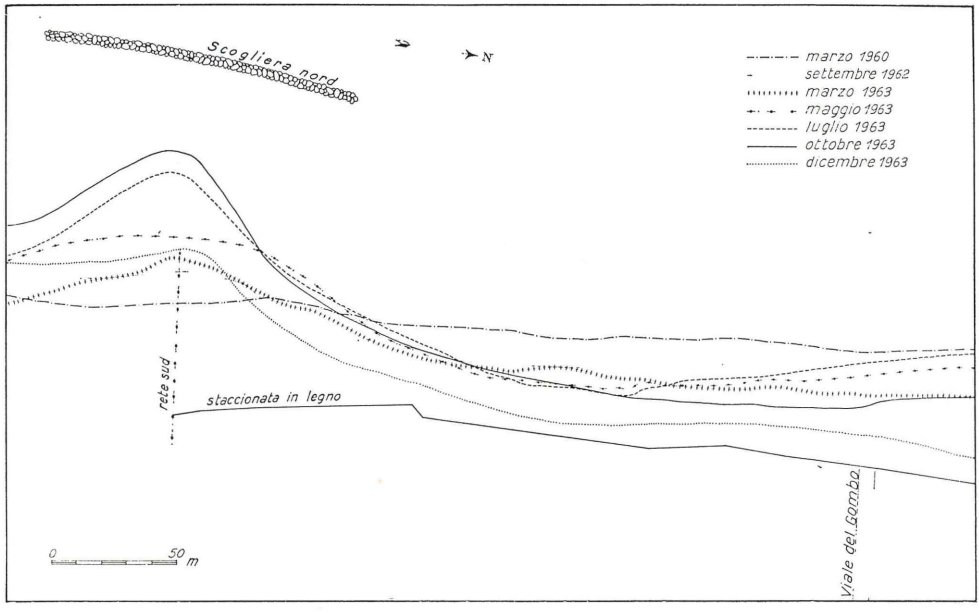

Fig. 7 - Variazioni della battigia in prossimità del Viale del Gombo dopo la costruzione delle prime due scogliere frangiflutto.

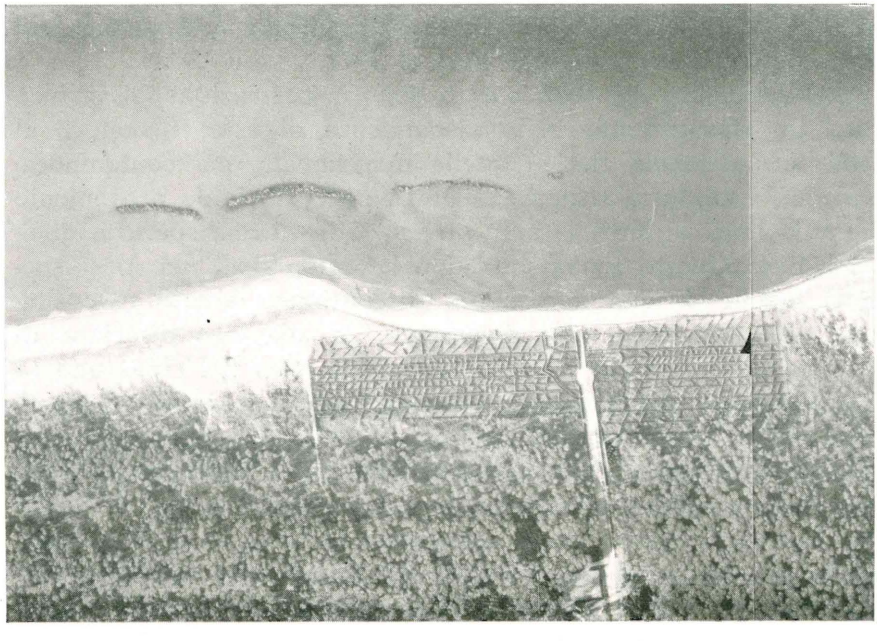

Fig. 8 - La fotografia aerea, eseguita il 7 gennaio 1966, mostra il ripascimento prodottosi a tergo delle scogliere frangiflutto più meridionali e la forte erosione verificatasi invece sottoflutto rispetto alla traversia principale (libeccio), in corrispondenza del Viale del Gombo (Concessione dello Stato Maggiore A.M. n. 460 del 6 sett. 1973).

la costruzione delle scogliere e il danno provocato dall'interruzione verificatasi nella costruzione stessa. Per questo, negli anni successivi, furono costruite le altre tre scogliere che, sia pure con un certo ritardo, determinarono un ripascimento anche in questo tratto di costa il quale raggiunse il suo massimo nel 1971, dopo la costruzione dell'ultima scogliera avvenuta nel 1968.

Il meccanismo secondo cui si verifica il ripascimento a ridosso delle scogliere parallele alla costa non è molto chiaro, comunque sembra che, oltre all'opera di smorzamento esercitata sui frangenti, si verifichi all'interno di esse una dispersione di energia delle onde, a causa di fenomeni complessi quali la diffrazione delle onde ecc., per cui si viene a determinare all'interno una zona di calma che favorisce il deposito dei materiali trasportati dal movimento a denti di sega, dalla corrente radente ed anche dalle onde di scavalco.

Assai più difficile è da spiegare l'erosione che si verifica sottoflutto. Essa è un fenomeno molto complesso che ha dato adito a numerose ipotesi. In generale, alle modificazioni della battigia, dovute all'accumulo di sabbia a tergo delle scogliere, corrisponde ovviamente un diverso andamento dei fondali adiacenti. Questi tendono ad elevarsi sopraflutto mentre, per mancanza di apporto di sabbia, intercettata e fissata più a monte, tendono ad approfondirsi sottoflutto (J. LARRAS [1957]).

Ciò determina un allontanamento della zona di frangenza sopraflutto ed un avvicinamento di essa sottoflutto, causando condizioni rispettivamente favorevoli ad un ulteriore ripascimento nel primo caso e di erosione nel secondo (A. MAIONE [1963]).

D'altra parte una scogliera parallela alla riva, mentre contrasta e assorbe l'energia delle onde oblique che si frangono su di essa, lasciando libere le componenti tangenziali delle forze, che si producono alla frangenza, determina delle traslazioni di masse d'acqua parallele alle scogliere stesse. Tali masse d'acqua, aggirando la testata della scogliera, produrrebbero sottoflutto una sacca eroriva (A. CAMOSCI [1964]; A. MORI [1966]). Un processo analogo si verificherebbe nel caso di più scogliere parallele alla costa, ove l'una non fosse ridossata col prolungamento di quella successiva, ossia quando esistono varchi tra scogliera e scogliera.

In tal caso si determinerebbero zone di erosione in corrispondenza dei varchi e la riva assumerebbe un andamento ondulato, come del resto si è verificato al Gombo.

Sull'influenza dei varchi e sulla loro disposizione i pareri sono tuttavia discordi. Infatti per alcuni (A. MAIONE [1963]) la loro apertura nella direzione della traversia principale determinerebbe una libera entrata delle onde, e la formazione di correnti forzate, con conseguente concentrazione di energia sulla battigia retrostante che verrebbe così erosa. Per altri (F. SAGGINI [1970]) i varchi orientati nella direzione della traversia principale favorirebbero invece l'ingresso e l'intercettamento della sabbia trasportata dai noti meccanismi, con conseguente ripascimento della battigia.

Infine la disposizione assunta dalle isobate alla testata della scogliera sottoflutto determinerebbe una rifrazione delle onde tale da favorire la concentrazione di energia subito sottovento alla scogliera, con conseguente erosione della battigia. Infatti si può osservare, nel nostro caso, che l'erosione è più accentuata subito a nord delle scogliere, formando una concavità piuttosto sensibile, mentre risulta minore man mano che ci si allontana dalle scogliere medesime. Tale fenomeno potrebbe essere schematizzato dal disegno della fig. 9 che mostra quanto potrebbe avvenire al Gombo nel caso di mare proveniente dal SW. Naturalmente le linee costruite nella figura, eccetto le isobate, che si riferiscono ad un rilievo effettuato il 22 giugno 1972, sono soltanto ideali ed esemplificative, in quanto, per costruire un *piano d'onda*, e cioè l'andamento delle onde per effetto della rifrazione, è necessario conoscere, oltre all'altezza d'onda, anche la sua lunghezza ed il suo periodo, dati questi ultimi mai rilevati per il tratto di costa in esame.

Per effetto della rifrazione infatti, causata dall'andamento del fondale, le normali al fronte d'onda si avvicinano procedendo verso la spiaggia ove nel tratto A' B' viene ad essere concentrata in più breve spazio tutta l'energia che al largo era contenuta nel tratto A B di più ampia estensione ([22]).

Poiché nel nostro caso queste condizioni si verificano specialmente in concomitanza di ondazioni generate dal vento di Libec-

---

([22]) Com'è noto, l'energia contenuta nel tratto di un'onda compreso tra due ortogonali parallele, tende a conservarsi durante la propagazione, per cui la diminuzione della distanza tra le ortogonali determina una concentrazione di energia (E. GALLARETO [1960]; W. BASCOM [1965]; A. GUILCHER [1965]).

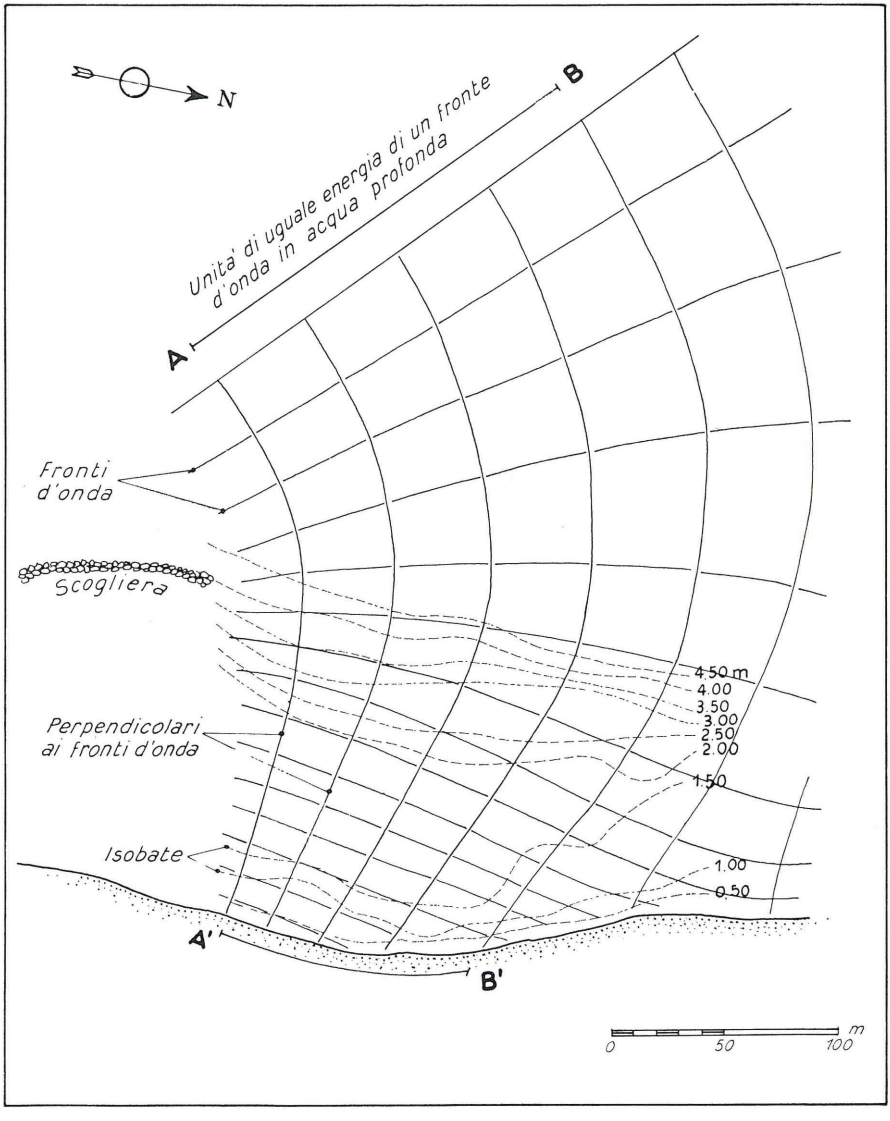

Fig. 9 - Ipotetico «piano d'onda» illustrante la concentrazione dell'energia delle onde di libeccio nel tratto A' B', sottoflutto alle scogliere costruite in prossimità del Gombo (Le isobate e la linea di costa si riferiscono a un rilievo eseguito nel giugno 1972 dalle Opere Marittime del G. C. di Genova in collaborazione con l'Istituto di Idraulica Agraria dell'Università di Pisa).

cio, le quali, essendo di formazione vicina, data la limitata lunghezza del fetch, dovuta alla presenza della Corsica e dell'Isola d'Elba ([23]) (fig. 10), sono corte e di grande ripidità.

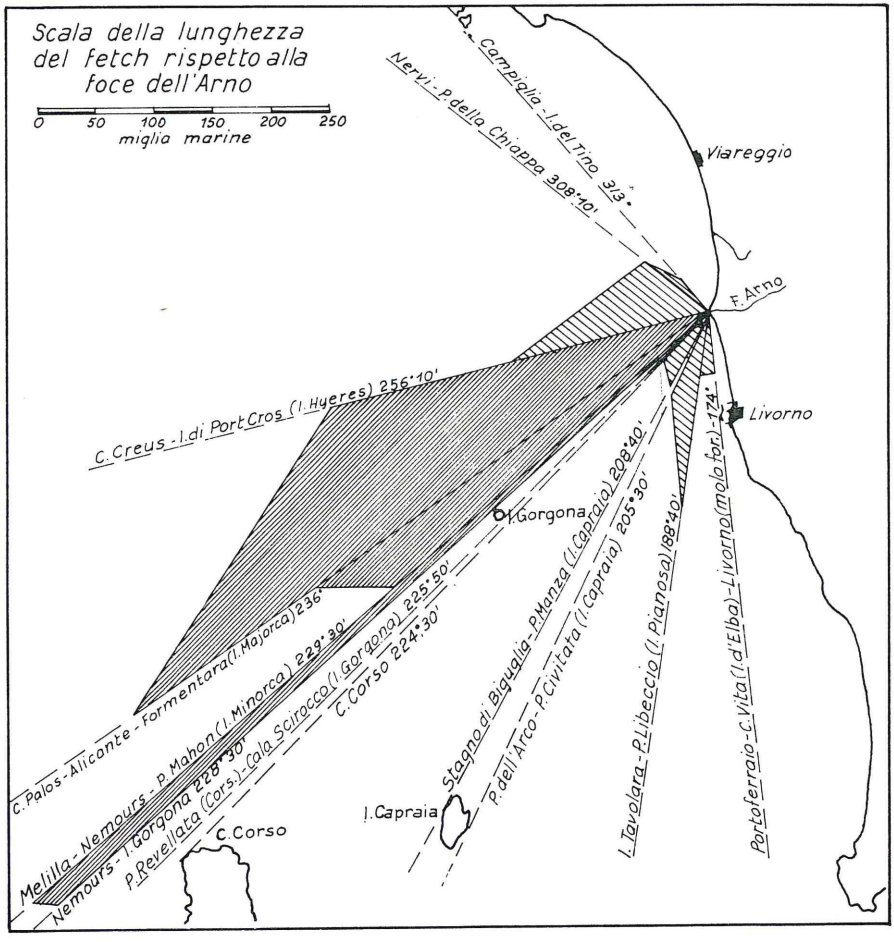

Fig. 10 - Settore ortodromico di traversia relativo alla foce dell'Arno (da A. D'ARRIGO [1950]). I segmenti radiali sono proporzionali alla lunghezza del fetch secondo la scala riportata nella figura.

([23]) Il limite sopravvento, o inizio del *Fetch*, può essere, tra l'altro, costituito da una costa. Nel caso delle onde di Libeccio che investono la foce dell'Arno, tale inizio è rappresentato dalla Corsica e dall'Isola d'Elba.

Esse perciò sentono poco il fondo e giungono con una forte inclinazione rispetto alla costa, provocando da un lato quei noti fenomeni che sono causa di notevole trasporto della sabbia e di forti erosioni della spiaggia non protetta dalle scogliere e dall'altro i fenomeni di interferenza con le scogliere stesse.

Pertanto l'erosione che si è prodotta a nord delle scogliere, tra il Gombo e la foce del Fiume Morto, pur essendo il risultato di fenomeni complessi, si potrebbe spiegare schematicamente nel modo seguente: verificandosi un movimento prevalente dei materiali verso nord e uno scalzamento prodotto dall'aggiramento delle testate settentrionali delle scogliere, e non essendovi compensazione per gli apporti sabbiosi provenienti da sud, a causa della funzione di intercettazione delle scogliere stesse, prevarrebbe solo asportazione di materiale. Infatti si è visto nella fig. 5 che in tale tratto di costa, dal 1960 in poi, dopo la costruzione delle scogliere, si è venuta a formare una falcatura che col tempo ha assunto una forte concavità.

Questo processo di erosione tuttavia non dovrebbe continuare all'infinito, ma dovrà fermarsi al raggiungimento di un nuovo equilibrio rispetto alla situazione venutasi a creare.

Com'è noto, il raggio di curvatura di una spiaggia dipende dalla distanza che intercorre tra i due capisaldi tra i quali essa è contenuta, nel senso che, quanto più questi capisaldi sono vicini, tanto più tale falcatura è pronunciata. Ora la costruzione delle scogliere al Gombo e la formazione del cuneo sabbioso a tergo di esse hanno creato un nuovo caposaldo, molto vicino a quello rappresentato dalla foce armata del Fiume Morto. Questa nuova situazione, pertanto, che in un primo tempo ha determinato l'accentuazione della curvatura della spiaggia, dovrà determinare in seguito una stabilizzazione del litorale in un nuovo assetto.

Molto probabilmente, infatti, l'andamento delle isobate, che, seguendo quello della linea di costa dovrà avere una concavità rivolta verso il largo, determinerà, a causa della rifrazione delle onde sui fondali bassi, un allontanamento delle ortogonali alle creste in prossimità della costa, cui farà riscontro una dispersione di energia con conseguente diminuzione o arresto dell'erosione. Ciò, se non interverranno altri elementi a turbare questo processo, porterà ad una nuova situazione di equilibrio.

La formazione del nuovo delta dal 1606

A dare un altro aspetto al problema dell'individuazione delle cause che hanno portato al rapido smantellamento del delta dell'Arno sta il fatto che l'attuale delta si è formato in epoca recente e non rappresenta perciò il risultato graduale dell'evoluzione del litorale compreso tra i Monti livornesi e Capo Corvo. Il delta attuale infatti cominciò a formarsi nella prima metà del 1600, dopo il taglio « ferdinandeo », iniziato nel 1606, mediante il quale la foce dell'Arno veniva spostata di circa 1550 m più a nord. Questa importante opera idraulica dovette apportare sull'equilibrio del fiume e su quello della costa notevoli influenze. In primo luogo dovette verificarsi un temporaneo maggior apporto di torbide al mare, per effetto del diverso orientamento della foce rispetto ai venti dominanti di libeccio che prima del taglio rallentavano il deflusso delle acque del fiume in mare e per il ringiovanimento subito dall'alveo nella sua parte terminale. In secondo luogo causò lo smantellamento del vecchio delta, non più alimentato dalle torbide dell'Arno. Il materiale che costituiva il vecchio apparato sarebbe stato rimosso dai noti processi legati al moto ondoso e trasportato verso nord, contribuendo in qualche misura alla costruzione del nuovo delta ([24]).

Tali considerazioni ci vengono suggerite dalla presenza di un caposaldo che rappresenta un punto di riferimento alle vicende subite dal delta dell'Arno. Al termine dell'opera di sistemazione idraulica, di cui si è fatto cenno, infatti, fu costruito alla nuova foce del fiume il Fortino di Bocca d'Arno, che doveva servire da « forte, scalo e dogana » (A. R. Toniolo [1910]). Questa costruzione fu terminata intorno al 1650, come sarebbe stato testimoniato da una lapide situata all'interno della costruzione medesima, e, per la sua funzione, doveva essere posta molto vicino alla riva. Ora, ciò che più desta perplessità, tale fortino mantenne questa sua posizione rispetto al mare anche quando il delta attuale ebbe rag-

([24]) L'esistenza del flusso di sabbia verso nord è stata constatata anche in passato, come si rileva in uno studio dello Zendrini nel quale si legge testualmente: «Noi osserviamo le arene di qualunque fiume, i lavaroni, i svelti arboscelli ed ogni altra materia venire sempre portata alla destra (dell'Arno e del Serchio) per lungo tratto, spargendone largamente la spiaggia, senza che punto passino alla sinistra» (B. Zendrini [1736]).

giunto uno sviluppo considerevole, assai prossimo a quello massimo, come mostra la linea di battigia del 1785, rilevata con metodi geometrici, e quindi di sicuro affidamento. Oltretutto esso si troverebbe ancora oggi, se non fosse stato smantellato, assai avanzato rispetto all'allineamento ideale della costa Tirrenia-San Rossore. Ciò può trovare spiegazione nel fatto che, assai probabilmente, anche all'epoca della sua costruzione, la linea di battigia antistante il fortino fosse già protesa nel mare e non rappresentasse altro che il contorno del lobo settentrionale del delta dell'Arno esistente prima del taglio ferdinandeo, come mostra la fig. 11.

L'esistenza del vecchio delta sarebbe suggerita poi da alcune testimonianze cartografiche, anche se quest'ultime non hanno valore probativo, dato che si tratta di carte a piccola scala e non costruite geometricamente. Tuttavia le carte consultate, quella del Bonsignori del 1584, quella del Magini del 1602 circa e quella del Bleau del 1663, riportano, in corrispondenza della vecchia foce dell'Arno, una evidente intumescenza, sviluppata in particolar modo a sud.

Dopo un lungo periodo di relativo equilibrio, durato fino al 1843, in cui l'accrescimento del lobo meridionale fu minimo, si ebbe un nuovo rapidissimo avanzamento della cuspide del delta il cui lobo settentrionale, in soli sette anni, dal 1843 al 1850, avanzò di circa 400 m. Anche in questo caso tale fenomeno è a nostro avviso da collegarsi a interventi antropici attuati durante questo periodo, poiché dal 1840 al 1847 furono eseguiti importanti lavori di sistemazione nell'alveo dell'Arno. Questi lavori ebbero lo scopo di aumentare la velocità della corrente onde ottenere un maggiore potere di trasporto delle acque del fiume sui materiali solidi. Queste opere consistettero soprattutto nella diminuzione della sezione delle grandi anse e nella riduzione dell'alveo a sezione regolare, nel tratto compreso tra il torrente Chiecinella (circa sette Km in linea d'aria a monte di Pontedera) a Pisa (L. MATERASSI [1849]; D. ALBANI [1952]) ([25]).

([25]) Detti lavori dovettero anzi proseguire negli anni seguenti per portare a termine l'intera progettata opera di sistemazione dell'alveo del fiume, come del resto fa comprendere lo stesso Materassi: « Le rettificazioni di cui abbisognano le ripe dell'Arno, essendo molte, ben si comprende che non potevano essere portate ad effetto nel breve giro di circa sei anni» (L. MATERASSI [1849]). L'importanza di questi lavori nei confronti del rapido avanzamento del delta dell'Arno viene messa in evidenza anche dall'Albani (D. ALBANI [1952]).

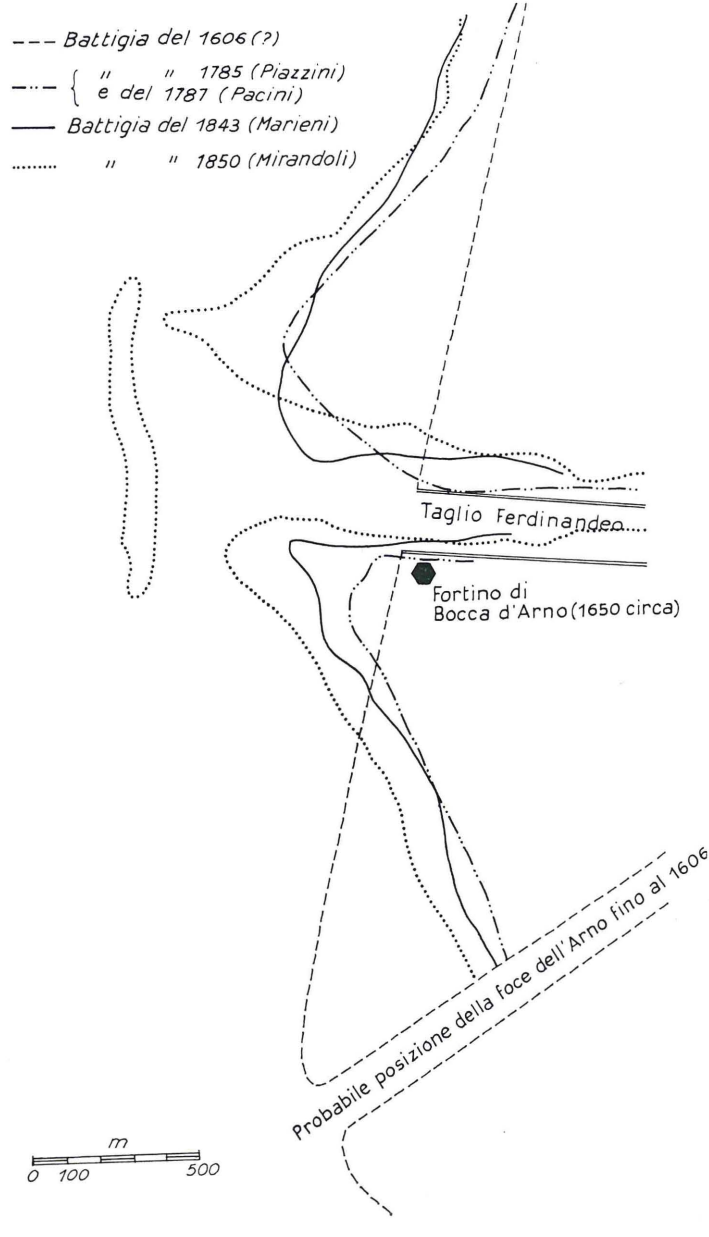

Fig. 11 - Ricostruzione ipotetica del delta dell'Arno esistente prima del taglio ferdinandeo e sviluppi successivi del nuovo delta.

A questo rapido accrescimento del delta avrebbero potuto contribuire anche eventi eccezionali tali da determinare una forte erosione nel bacino dell'Arno, sottoposto, a cominciare dalla fine del XVIII secolo, ad un intenso diboscamento ([26]) e quindi un aumento degli apporti solidi al mare. Infatti, secondo il Toniolo, dal 1843 al 1850 si verificò il maggior numero medio annuo di piene rispetto al periodo 1829-1909 (A. R. TONIOLO [1910]).

LA DEGRADAZIONE DELLA PINETA

Trattando di erosione marina non si può fare a meno di considerare i danni che, a prescindere dalla perdita della spiaggia, si determinano sulle strutture antropiche e naturali poste sulla fascia costiera.

La fascia litoranea relativa al tratto di spiaggia in studio, a differenza di quella posta a sud dell'Arno, dove vi sono notevoli insediamenti umani (Marina di Pisa e Tirrenia), è ricoperta, per una profondità che in alcuni tratti raggiunge 5 Km, esclusivamente da una vegetazione arbustiva e arborea, che costituisce la nota pineta di San Rossore. Questa, negli ultimi anni, ha subito una fortissima degradazione (fig. 12) e arretramento provocati, sia direttamente che indirettamente, dall'avanzare del mare. L'arretramento del bosco infatti, posto in evidenza dalle misure eseguite su due serie di foto aeree, fatte rispettivamente nel 1960 e nel 1971, ha raggiunto, nel tratto compreso tra il bivio di Via della Corazza e il Fiume Morto, il valore medio di circa 200 m, cui corrisponde la distruzione di 73 ha di bosco.

Nel caso dell'azione diretta del mare, l'arretramento della bat-

---

([26]) Secondo Del Noce infatti, nel 1574 la copertura baschiva del Granducato di Toscana era valutata intorno ai 3/4 dell'estenzione dell'intera regione (G. DEL NOCE [1849]). Sebbene i boschi fossero protetti da leggi rigorose della Repubblica Fiorentina e dei Medici, il disboscamento tuttavia, secondo il Viviani, fu sempre in atto (V. VIVIANI [1684]). Dal 1780 in poi la situazione fu aggravata da una legge forestale che accordava la più ampia facoltà nel taglio dei boschi (E. NATONI [1944]) e a nulla valsero le leggi del Regno d'Italia emanate nel 1865 e nel 1877 che, secondo il Serpieri, più che programmare una politica dei boschi, costituirono semplicemente una legislazione di polizia forestale (A. SERPIERI [1926]). La loro applicazione infatti non arrestò nè tantomeno regolamentò la trasformazione delle terre a boschi e pascoli in terre destinate alle colture.

Fig. 12 - Aspetto della pineta degradata a sud del Viale del Gombo (Foto S. Vittorini).

tigia ha provocato, in alcuni tratti, lo scalzamento e l'abbatimento dei pini e la distruzione del sottobosco, come mostra la fig. 13. Per quanto riguarda invece l'azione indiretta, i pareri sono discordi, tuttavia è necessario far rilevare due fatti di fondamentale importanza:

a) la degradazione della pineta di San Rossore si è manifestata procedendo dal mare verso terra;

b) la degradazione è un fatto recente e si può far facilmente risalire agli ultimi 15-20 anni (V. GALLUZZI [1952]; O. VERONA - G. TREGGI [1972]; A. FANFANI [1973]).

La degradazione della pineta è da mettersi in relazione con fattori di recente comparsa legati all'ambiente marino (presenza nel mare di sostanze nocive alla vegetazione). E' stato dimostrato recentemente infatti che la presenza in mare di alcune sostanze, come gli idrocarburi (M. TIRELLI [1971]) e i detergenti sintetici non biodegradabili o ABS (P. LAPUCCI et Al. [1972]), è molto dannosa per la vegetazione rivierasca. Queste sostanze hanno assunto inoltre una concentrazione molto forte solo negli ultimi anni. I

Fig. 13 - Pini scalzati e divelti dall'avanzare del mare in prossimità del bivio di Via della Corazza (Foto eseguita nel 1963 da S. Vittorini).

detergenti sintetici in particolare, per le loro proprietà tensioattive, tendono a stratificarsi sulla superficie dell'acqua e a formare, col moto ondoso, una schiuma nella quale vengono fortemente concentrati. Per l'azione del vento di mare, durante le mareggiate, la schiuma può essere facilmente sollevata per formare un aerosol che va a investire i pini più vicini alla riva. Queste sostanze ABS, secondo gli AA., determinerebbero la distruzione localizzata della clorofilla, impedendo la fotosintesi clorofilliana, e provocando il disseccamento delle gemme terminali. In tale maniera si verificherebbe la moria dei pini.

Il fatto che la degradazione della pineta proceda da mare verso terra avrebbe in tal modo una spiegazione logica poiché la concentrazione di ABS sulle foglie decresce con l'aumentare della distanza della riva. Infatti a San Rossore la concentrazione di tali sostanze a 100 m dalla battigia è risultata essere di 23,3 milligrammi per ogni Kg di foglie, mentre, a 500 m, è risultata essere di appena 0,4 milligrammi.

Insieme a questi fattori si devono prendere in esame le conseguenze derivanti dalla erosione delle dune formanti il capezzale

dell'arenile. La loro scomparsa in seguito all'arretramento della battigia, avrebbe infatti privato la pineta di una barriera naturale di protezione contro i venti di mare, veicolo, come abbiamo visto, di sostanze dannose. In secondo luogo avrebbe innescato un altro processo di degradazione del bosco poiché, la distruzione conseguente della vegetazione erbacea ed arbustiva ad esse collegata, che aveva una funzione di fissaggio delle dune stesse, avrebbe reso possibile il trasporto eolico della sabbia e determinato un'azione meccanica di smerigliatura degli aghi di pino dimostratasi, secondo alcuni, assai dannosa (O. VERONA - G. TREGGI [1972]).

Da queste considerazioni appare evidente che l'arretramento della battigia può aver avuto sulla vegetazione, che si sviluppa nella zona retrostante, delle ripercussioni che vanno oltre la zona direttamente interessata dall'erosione della costa. Infatti « è da tener presente che la zona più preziosa, dal punto di vista botanico, è quella più prossima al mare. La difesa di tale flora, che è necessaria dal punto di vista del paesaggio naturale della foresta mediterranea, coincide con l'interesse pratico in quanto, qualsiasi distruzione della successione naturale della vegetazione dal mare verso l'interno e qualsiasi taglio anche parziale, avrebbe come effetto di permettere la penetrazione del vento di libeccio e di compromettere così non solo il sottobosco, ma tutte le culture erbacee ed anche legnose per una notevole profondità » (F. CATERINI sta in V. GALLUZZI [1952]) quale conseguenza di una rottura di equilibrio delle formazioni climax costiere (A. CASTELLI [1973]).

CONSIDERAZIONI FINALI

Nei paragrafi precedenti abbiamo preso in esame le variazioni del litorale di San Rossore, accennando alle probabili cause dei fenomeni di ripascimento e di erosione verificatisi nel tempo, limitati però ad alcuni casi in cui risultava, almeno per noi, evidente una relazione di causa ed effetto.

Non siamo riusciti tuttavia a trovare una spiegazione generale soddisfacente, anche per la mancanza quasi assoluta dei dati relativi ad alcuni dei fattori dell'erosione delle spiagge, come quelli riguardanti le variazioni pluriennali del vento, del moto ondoso, nonché quelli relativi alla distribuzione in mare dei materiali so-

lidi trasportati dall'Arno e alle caratteristiche attuali del moto ondoso relativi al tratto di costa in esame ([27]).

Tuttavia ci proponiamo ora di riassumere i dati raccolti e le osservazioni fatte negli altri paragrafi, mettendoli a confronto con le conclusioni cui sono giunti altri Autori.

Non sembra fuori luogo a tale proposito fare un'osservazione di carattere generale e che cioè un delta, nei confronti della dinamica del mare, rappresenta un « promontorio » sul quale, a causa della rifrazione, viene a concentrarsi l'energia delle onde. Su di esso si eserciterebbero così due forze antagoniste, l'una costruttrice, rappresentata dagli apporti solidi del fiume, l'altra demolitrice, rappresentata dall'azione del moto ondoso. Quando queste due forze si equivalgono il delta assume una configurazione di relativo equilibrio quale quella raggiunta dalla foce dell'Arno tra la metà del 1700 e il 1843 e tra il 1850 e il 1890; al contrario si ha avanzamento o arretramento. Evidentemente, dal 1890 in poi, l'azione del moto ondoso ha prevalso sulla quantità degli apporti solidi trasportati dall'Arno e il delta ha cominciato ad arretrare.

A questo punto ci si chiede se è cambiato lo stato del mare o, al contrario, sono diminuiti gli apporti solidi del fiume. Dalle poche osservazioni pervenuteci sembra che, negli ultimi secoli, ben poco sia cambiato nell'andamento delle cose per quanto riguarda i

---

([27]) Per quanto riguarda il problema della valutazione quantitativa dei fattori attuali dell'erosione delle spiagge sottili, è necessario rilevare che, sin dal 1962, era stata chiesta dall'Istituto di Geografia dell'Università di Pisa, diretta dal Prof. A. Mori, la collaborazione della Direzione Generale delle Opere Marittime e dell'Istituto Idrografico della Marina per l'elaborazione di un piano sistematico di ricerche oceanografiche. Contemporaneamente fu chiesta la collaborazione e il contributo del Comune di Pisa per l'impianto di una stazione meteorologica a Marina di Pisa. Altrettanto fu fatto presso l'Aeronautica Militare per l'esecuzione di foto aeree del litorale pisano.

A queste richieste rispose solo l'Aeronautica Militare che eseguì numerose foto aeree del litorale, in varie occasioni. Gli altri Enti interpellati non dettero seguito alle richieste loro fatte; tale atteggiamento ha avuto una notevole ripercussione non solo sugli studi aventi carattere puramente speculativo, ma anche su quelli a carattere applicativo, miranti alla protezione di Marina di Pisa in particolare e del litorale in generale. Se la collaborazione richiesta fosse stata accordata, a tuttoggi potremmo disporre di oltre 10 anni di interessantissime ed irripetibili osservazioni.

E' doveroso far notare che tali richieste erano state più volte sollecitate dal Prof. Mori che alla fine credette opportuno renderle di pubblica conoscenza in una lettera al quotidiano «La Nazione» del 14 gennaio 1966.

venti e lo stato del mare. Ad esempio lo Zendrini, nel 1763, a proposito degli insabbiamenti del porto di Viareggio, scriveva che: « Ogni altro sconcerto proviene poscia dai venti di fuori, e sono tutti quelli, che spirano dall'Ostro al Maestro, e più di ognuno dal Libeccio ... dal quale sconvolto il mare col massimo di sua forza ... sarà ben ancora valevole a spingere al lido immensa quantità di rena, e quivi dipositarla, con danno molto sensibile della foce, che quasi ad ogni marata si atterra e ricolma ... » ([28]). Del resto lo stesso Toniolo afferma che « nulla ci autorizza a ritenere che le condizioni generali della distribuzione atmosferica nell'alto Mediterraneo si siano profondamente modificate così da far supporre che sulla costa toscana fossero diversi i venti dominanti che hanno azione prevalente sul moto ondoso. Anzi una prova indiretta della costanza del regime dei venti ci è data dal lavoro eseguito nel 1606 per spostare verso ovest l'ultimo tratto del corso dell'Arno che prima si apriva a sud-ovest, al fine di liberare la foce del fiume dagli insabbiamenti prodotti dalle libecciate dominanti » (A. R. Toniolo [1910]).

Malgrado queste affermazioni, le cause della demolizione del delta dell'Arno e del conseguente arretramento della spiaggia di San Rossore andrebbero tuttavia ricercate in fattori sia antropici che naturali, agenti su vasta scala, se è vero, come viene affermato dal De Marchi e dall'Albani, che l'erosione che ha interessato la costa pisana non è altro che un episodio di un più ampio fenomeno che ha riguardato gran parte delle spiagge italiane a partire dalla fine del secolo scorso (L. De Marchi [1930]; D. Albani [1933]) ([29]). Su questi fattori invero ben poco si può dire poiché, se si cerca di

([28]) Si fa notare che tuttora il porto di Viareggio deve essere continuamente dragato con un sistema di pompaggio, per liberarlo dalle sabbie che continuamente vi si depositano.

([29]) In realtà però la documentazione portata dall'Albani non sarebbe abbastanza probante per poter parlare di una crisi generale delle spiagge italiane iniziatasi verso il 1880, a conferma di quanto aveva detto il De Marchi in precedenza. Inoltre, ammesso che questa crisi si sia verificata, non si può negare che, oltre ai fatti naturali, possano aver giocato un ruolo importante e forse determinante anche gli interventi dell'uomo, come ammette la stessa Albani in un suo più recente lavoro (D. Albani [1952]), che si sono intensificati proprio in quell'epoca, sia per l'avvenuta unificazione dell'Italia, sia per la maggiore pressione demografica, sia per l'accresciuto livello tecnico che avrebbe permesso opere idrauliche e marittime di più vasta mole rispetto a quelle dei periodi precedenti, tali da turbare l'equilibrio naturale delle spiagge. Il De Marchi, a sua volta, era giunto alla con-

trarre elementi dalla bibliografia riguardante le variazioni della linea di riva delle spiagge sottili italiane, si rischia di fare una grossa confusione dal momento che i pareri dei singoli autori sono numerosi e in genere rivolti a spiegare il fenomeno con cause contingenti e limitate all'area in studio. Quando poi essi cercano di collegare il ritiro delle spiagge a fattori di carattere più generale, come per esempio quello delle variazioni climatiche, i pareri sono discordi e spesso contradditori. Ad esempio Toniolo in un primo tempo afferma che l'accrescimento del delta dell'Arno, dal 1843 al 1878 e i ritiri verificatisi dal 1890 al 1909 siano da collegarsi a variazioni in più o in meno della media delle precipitazioni (riferendosi però ai dati pluviometrici della sola stazione di Firenze); in un secondo tempo, come abbiamo già visto, nega categoricamente che « le condizioni generali della distribuzione atmosferica, nell'alto Mediterraneo, si siano profondamente modificate ... » (A. R. TONIOLO [1910]). A sua volta De Marchi scrive, senza appoggiarsi ad una sufficiente documentazione, a proposito delle variazioni delle spiagge in corrispondenza a variazioni di clima, che « non si può affermare che sia intervenuto un periodo di piovosità media sensibilmente minore della normale » atto a spiegare una diminuzione delle portate torbide dei corsi d'acqua ([30]). Mentre spiegherebbe il rapido ritiro delle coste col mutamento del regime del

---

clusione che il 1880 rappresentasse un anno critico per le spiagge italiane, fondando la sua affermazione solo sull'esame di quattro tratti di costa italiani (tratto di costa foce Piave-foce Livenza, delta dell'Arno, spiaggia di Chiavari e spiaggia di Favazzina in Calabria), mettendo in evidenza però che il processo di ritiro delle spiagge italiane non sia un processo uniforme e continuo, ma rappresenti la risposta ad una certa fase climatica, «alla quale potranno e, si può dire, dovranno succedere fasi opposte, se non intervengono cause più generali di modificazioni permanenti sia del clima sia delle linee di spiaggia».

Dalle nostre ricerche bibliografiche risulta appunto che, in gran parte delle spiagge italiane prese in esame non risulta una data precisa a cui si possa riferire un generale ritiro, ma che si sono verificate piuttosto alternanze di ritiri e avanzamenti, variabili da luogo a luogo e da periodo a periodo (M. VISENTINI, G. BORGHI [1938]; D. ALBANI, A. GRISELLI, A. MORI [1940]; U. BULI, M. ORTOLANI [1947]; B. SPANO, M. PINNA [1956]; M. ZUNICA [1971]).

([30]) Queste affermazioni sono in contrasto con quelle espresse dal Polli in uno studio sulle variazioni del clima della regione veneta. Questo A. infatti, mettendo a confronto i dati delle precipitazioni di alcune stazioni venete per il trentennio 1871-1900 con quelli del trentennio 1931-1960, ha riscontrato nel secondo periodo una diminuzione del totale annuo delle precipitazioni pari al 9% (S. POLLI [1966]).

mare collegato a variazioni del regime dei venti che avrebbe investito tutta l'Europa, appellandosi ad una teoria di A. Wagner. Secondo De Marchi infatti l'erosione delle spiagge italiane, iniziatasi negli ultimi anni del secolo scorso, non potrebbe spiegarsi che con una causa comune e cioè con un'intensificazione dei venti di sud (L. De Marchi [1930]).

Tuttavia, a questo riguardo, c'è da osservare che la grande scarsità di dati anemometrici relativi alla nostra regione non ci permette di esprimere alcun giudizio in merito, eccetto quello, già espresso nel paragrafo dedicato al regime dei venti, secondo cui dal 1854 in poi non ci sarebbe stata nessuna grande variazione nella frequenza dei venti dominanti a Livorno, i quali sono il Libeccio e l'WSW. Malgrado ciò bisogna segnalare che l'Albani, pur riconoscendo la scarsa rappresentatività della stazione anemometrica della Facoltà di Agraria dell'Università di Pisa nei confronti del litorale pisano e versiliese, interpretandone i dati dal 1881 al 1942, individua una certa difformità nella *frequenza* dei venti registrati in quella stazione: « Raggruppati i dati per quadranti, ne risulta una maggiore frequenza dei venti dei quadranti settentrionali prima del 1889, mentre, durante il ventennio seguente 1889-1909, la prevalenza sarebbe passata ai quadranti meridionali, con maggiore frequenza di quelli di terra su quelli di mare ... Dopo il 1910, torna a verificarsi una maggiore frequenza dei venti dei quadranti settentrionali, mentre i venti di mare più frequenti sono rispettivamente l'ovest, il nord-ovest e il sud-ovest. Dal 1933 al 1942 si nota un certo equilibrio fra le frequenze dei venti meridionali e quelle dei venti settentrionali, con una leggerissima prevalenza di questi ultimi ». Esisterebbe pertanto un certo andamento ciclico nella direzione dei venti « per cui prevalgono ora i venti dei quadranti settentrionali ora quelli dei quadranti meridionali, mentre si osserva una oscillazione nella prevalenza tra i venti di terra e i venti di mare » (D. Albani [1952]).

Questi dati, per vari motivi, sono poco indicativi in quanto: a) si riferiscono alla sola frequenza dei venti e non alla loro velocità per cui non si conosce l'andamento dei venti dominanti; b) pur riscontrando una maggior frequenza dei venti meridionali nel periodo 1889-1909, in coincidenza con l'inizio della erosione della cuspide deltizia dell'Arno, non si spiega come, negli anni seguenti, pur avendosi una prevalenza dei venti settentrionali, l'erosione del delta abbia continuato a manifestarsi e si sia estesa

anche a tutta la spiaggia di San Rossore; c) ammessa pure una generale maggior frequenza dei *venti meridionali*, a partire dal 1880, tal come la prospetta il De Marchi, si deve far rilevare che per quento riguarda gli effetti sulle coste italiane, data la diversa orientazione di queste ultime rispetto ad una determinata traversia, non si sarebbero comunque dovute osservare variazioni in un unico senso (ritiro), ma variazioni diverse da luogo a luogo, a seconda appunto dell'esposizione delle spiagge rispetto all'impatto del vento dominante proveniente dal mare.

In effetti, non è semplice definire le variazioni storiche del clima sia per la scarsità delle osservazioni che per la difficoltà intrinseca della elaborazione statistica dei dati. A proposito delle precipitazioni, infatti, il Pinna, in uno studio sulle variazioni del clima in epoca storica, fa notare che « è difficile raccogliere in un insieme unico e coerente tutti i dati della piovosità, dato che in questo elemento del clima le tendenze a lungo termine sono mascherate da variazioni a più corto periodo e queste ultime dalla variabilità interannuale ... tuttavia, con opportuni metodi statistici, è possibile ricavare dei dati di un certo valore» (M. PINNA [1969]).

A questo riguardo l'A. riporta i risultati di E. B. Kraus, L. Lysgaard ed altri secondo cui sembra che in Europa e nel Mediterraneo si sia verificato un aumento delle precipitazioni nel periodo 1870-90, una successiva diminuzione fino al 1920 e, da quell'anno in poi, variazioni in senso diverso tra le varie parti del Continente (M. PINNA [1969]). Queste variazioni delle precipitazioni sembrerebbero coincidere col verso delle oscillazioni della battigia avvenute sul litorale pisano, e in particolare su quello di San Rossore fino al 1920, e potrebbero nello stesso tempo spiegare il contemporaneo ritiro delle spiagge italiane verificatosi secondo taluni autori proprio verso la fine del secolo scorso.

Tuttavia, per quanto riguarda il bacino dell'Arno, secondo i dati forniti dalle cinque stazioni pluviometriche in esso installate e funzionanti sin dal secolo scorso ([31]) e che danno il maggior affi-

([31]) Tali stazioni sono: Firenze Museo (inizio delle osservazioni 1832), Arezzo (1876), Pisa Agraria (1880), Vallombrosa (1881) e Camaldoli (1885). I dati pluviometrici sono stati ricavati dalle seguenti pubblicazioni:
MINISTERO DEI LL.PP., Ispettorato del Servizio Idrografico, Osservazioni pluviometriche raccolte a tutto l'anno 1915, vol. I, Italia peninsulare e isole, Roma, 1920; MINISTERO DEI LL.PP., Servizio Idrografico, Osservazioni pluviometriche raccolte nel

damento per quanto riguarda l'attendibilità dei dati, non ci sarebbe una corrispondenza completa con le variazioni pluriennali della piovosità indicate dal Pinna, poiché l'andamento degli afflussi, come è indicato dalla fig. 14, mostra aspetti diversi da stazione a stazione. Ciò del resto sarebbe giustificato perché, pur ammettendo l'esistenza di cicli nell'andamento delle precipitazioni relative alle serie di osservazioni nelle varie stazioni, non si trovano sempre di conserva le ripetizioni degli stessi periodi. Cosicché ne deriva che ad una fase ascendente delle precipitazioni di una regione può corrispondere una fase discendente di altre regioni. Comunque, tra le stazioni da noi prescelte si avrebbe un'elevata corrispondenza a partire dal 1915-1920, ossia dopo l'istituzione del Servizio Idrografico e la conseguente standardizzazione degli apparecchi misuratori. Esistono però altre corrispondenze, sia pure parziali e con uno sfasamento di qualche anno; una di queste si verificherebbe intorno al 1900 in cui si riscontrerebbe nella maggior parte delle stazioni un massimo pluviometrico che coinciderebbe col massimo sviluppo del delta dell'Arno. Tuttavia negli anni seguenti non si riscontra una generale diminuzione degli afflussi tale che si possa mettere in rapporto con il regresso del delta e con l'erosione, avvenuta poi, del litorale di San Rossore.

Riconducendoci al motivo che ci ha spinti a parlare delle variazioni pluriennali della piovosità quale possibile causa generale del ritiro del delta dell'Arno dal 1890 in poi, siamo costretti a constatare in primo luogo che i dati pluviometrici a nostra disposizione non ci offrono elementi sufficienti per stimare, anche in via approssimativa, il volume delle precipitazioni sull'intero bacino, periodo per periodo, dall'inizio dell'erosione del delta. In secondo luogo, la conoscenza delle medie ponderate degli afflussi, anche plurisecolari del bacino, non avrebbe apportato, a nostro avviso, alcun sensibile contributo alla spiegazione del problema delle variazioni della costa. Infatti, come abbiamo dimostrato in precedenza, non esiste una correlazione diretta tra afflussi e deflussi liquidi, specie in un bacino fortemente antropizzato come quello dell'Arno, dato che il coefficiente di deflusso varia nel tempo, di-

---

quinquennio 1916-1920, Pubbl. n. 1, vol. IV, Italia peninsulare e isole, Roma, 1925; MINISTERO DEI LL.PP., Servizio Idrografico, Precipitazioni medie mensili ed annue e numero dei giorni piovosi per il trentennio 1921-1950, Pubbl. n. 24, Fasc. V, Roma, 1957.

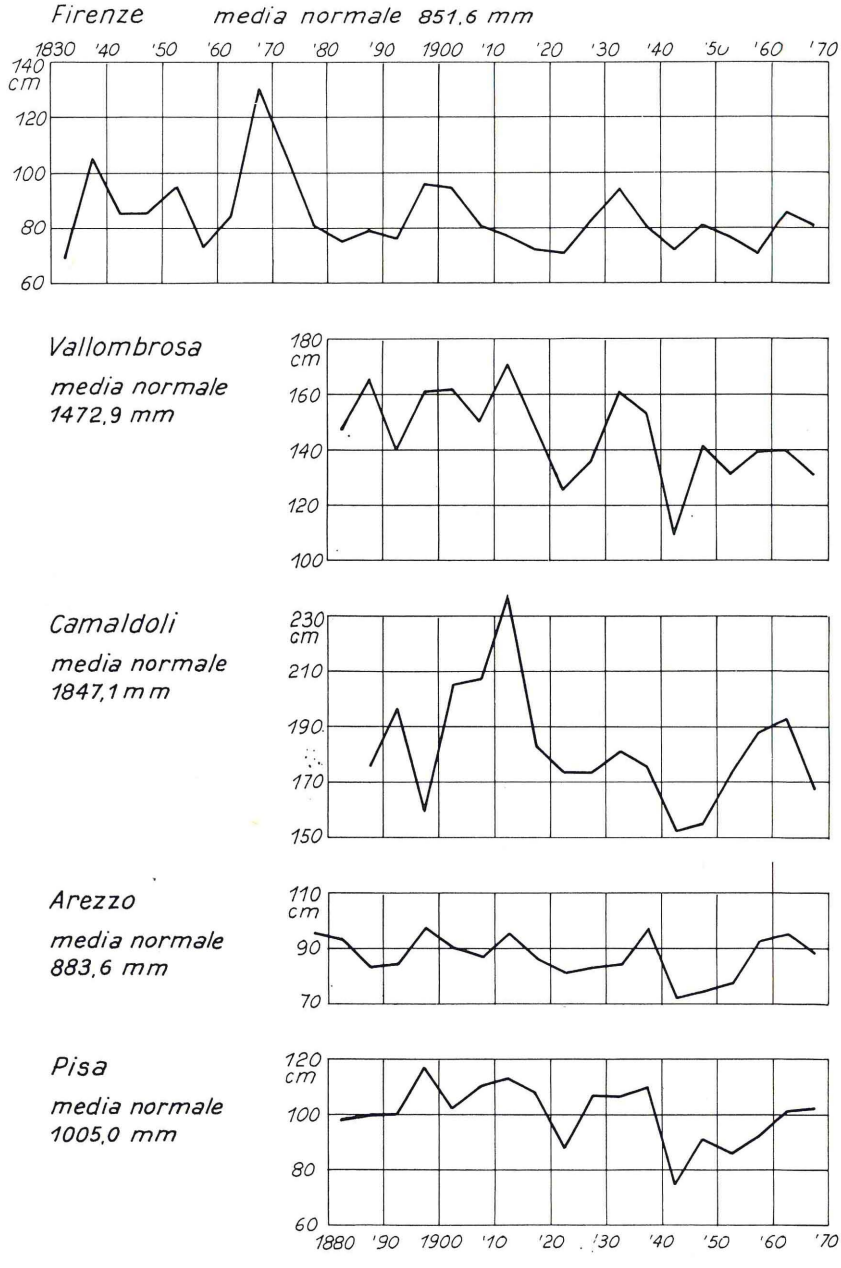

Fig. 14 - Variazioni pluriennali delle precipitazioni in alcune stazioni del bacino dell'Arno.

pendendo da numerosi fattori essenzialmente collegati all'insediamento ed all'attività umana (A. CASTELVECCHI, S. VITTORINI [1967]; M. PANICUCCI [1971]).

A conclusioni analoghe si sarebbe giunti partendo dalla conoscenza delle portate liquide e delle piene dell'Arno sin dall'inizio dei fenomeni di erosione della spiaggia, anche se a tale proposito Bendini ha dimostrato che esiste una correlazione tra l'entità delle piene e il trasporto torbido. Tale Autore afferma in particolare che « solo poche piene sono sufficienti a trasportare quasi tutto il deflusso torbido annuale » (C. BEDINI [1969]) ([32]). Sulla traccia di queste affermazioni abbiamo voluto controllare, fin dove era possibile, se esiste effettivamente una relazione tra il numero delle piene dell'Arno e le variazioni dl litorale di San Rossore.

Abbiamo perciò calcolato, dall'inizio delle osservazioni idrometriche a San Giovanni alla Vena, il numero medio annuo delle piene dell'Arno per classi di portata, suddividendole secondo gli intervalli di tempo intercorrenti tra una misura e l'altra della linea di battigia, a iniziare dal 1921, come mostra la seguente tabella.

TABELLA 12 - *Numero medio annuo di piene per classi di portata e per periodi di osservazione, registrate a San Giovanni alla Vena, in confronto con le variazioni medie annue, espresse in ettari, della spiaggia di San Rossore.*

Classi di portata mc/s	PERIODI						
	1921-28	1928-34	1934-39	1939-54	1954-60	1960-66	1966-71
120 - 300	63,2	59,8	69,2	50,2	65,8	91,8	59,6
301 - 500	17,8	14,0	22,6	14,9	14,0	16,8	12,0
501 - 1000	11,4	7,7	17,0	9,0	5,2	6,7	1,8
>1000	2,0	2,8	2,0	1,9	0,8	0,8	0,2
Totale annuo	94,4	84,3	110,8	76,0	85,8	116,1	73,6
Variazioni in Ha	—0,11	—2,13	—8,05	—1,91	—5,30	—3,57	+1,78

([32]) L'A. osserva infatti che il 65% del deflusso torbido, e quindi i 2/3 di tutto il materiale solido in sospensione, è da attribuirsi in media, relativamente ai periodi 1936-42, e 1954-60, ad una durata di 12 giorni ed appena 1/3 di questo ai rimanenti 353 giorni (C. BENDINI [1969]).

Dal confronto tra l'andamento delle piene e le variazioni della superficie della spiaggia non emerge una correlazione molto chiara. L'unico dato di fatto accertabile è che, contrariamente a quanto stimato da alcuni autori (A. R. TONIOLO [1910]), non si verifica nessun aumento della spiaggia in corrispondenza di un maggior numero di piene e in particolar modo con quelle di grande portata. Ad esempio, nel periodo 1934-39, in cui si sono verificate ben 110,8 piene annue, di cui 19 di portata superiore a 500 mc/s, ha corrisposto il più forte ritiro della battigia a San Rossore, pari ad una perdita media annua di 8,05 ha di spiaggia. Al contrario, nel periodo 1966-71, in cui si è verificato il minor numero di piene annue (73,6) di cui solo due di portata superiore a 500 mc/s, si è verificato un sensibile ripascimento della spiaggia.

Tale rapporto inverso tra la portata e la frequenza delle piene dell'Arno e le variazioni della linea di spiaggia può trovare spiegazione nel fatto che sono proprio le piene più grosse che determinerebbero una maggiore dispersione al largo dei materiali portati in sospensione o depositati in precedenza in corrispondendenza della foce (L. TREVISAN [1948]; A. MORI [1956]). Secondo Ruggiero inoltre « l'aumento delle piene con conseguente aumento di velocità allo sbocco e trascinamento delle torbide al largo determinerebbe un approfondimento dei fondali allo sbocco dell'Arno », comè stato osservato dall'A. relativamente al periodo 1936-1939 (C. RUGGIERO [1948]). Queste affermazioni vengono indirettamente avvalorate dal fatto che la foce dell'Arno, in questi ultimi anni, in cui si è avuta una forte diminuzione del numero e della portata delle piene, si è progressivamente insabbiata, tanto da creare problemi per la navigazione di battelli anche di piccola stazza, come viene messo in risalto dalla stampa locale (LA NAZIONE, 6 febbr. 1974; IL TELEGRAFO, 10 febbr. 1974; LA NAZIONE, 28 marzo 1974; IL TELEGRAFO, 21 marzo 1974).

In sintesi possiamo dire, riportando il pensiero di Zunica, che l'attività umana, riguardante l'assetto dei bacini dei corsi d'acqua e dei litorali, si è inserita in un tempo così limitato rispetto all'evolversi dei fenomeni naturali, « da introdurre una serie vasta e complessa di variabili. Sfugge così il senso delle trasformazioni in ordine alle cause di indole fisica e non è possibile indagare a fondo sul peso che hanno i fenomeni fisici sulle variazioni in senso ciclico » (M. ZUNICA [1971]).

Pur non potendo tuttavia escludere l'azione del clima sulle va-

riazioni del litorale di San Rossore, ci sembra opportuno sintetizzare alcuni fatti che emergono dalle osservazioni degli Autori che si sono occupati del tratto di costa in esame e dai dati raccolti ed elaborati nel presente studio:

1) l'analisi cartografica e la particolare posizione del Fortino di Bocca d'Arno, permettono di supporre l'esistenza di un delta in corrispondenza dell'antica foce del fiume, anteriormente al taglio ferdinandeo iniziatosi nel 1606;
2) l'attuale delta si sarebbe formato in breve tempo, subito dopo il taglio ferdinandeo, molto probabilmente anche a spese del vecchio delta;
3) a questo rapido accrescimento del delta ha fatto seguito un periodo di relativa stasi protrattasi fino al 1843. Tale affermazione che noi formuliamo come ipotesi fino al 1785, data del primo rilievo geometrico della cuspide deltizia, è invece, da quella data in poi, ampiamente documentata;
4) dopo il 1780, nel bacino dell'Arno ha inizio un massiccio disboscamento;
5) tra il 1843 e il 1850 furono effettuati importanti lavori di rettifica nell'alveo del fiume tra il torrente Chiecinella e il mare, onde accrescere il potere di trasporto della corrente fluviale;
6) nel 1850 la cuspide deltizia raggiunse il massimo protendimento;
7) dal 1850 al 1890 si ha, per il lobo destro del delta, un periodo di relativo equilibrio;
8) dal 1890 ha inizio l'erosione della cuspide deltizia che interessa, a nord della foce, un tratto di circa 1,5 Km mentre, ancora più a nord, la spiaggia è in avanzamento. Tale andamento permane fino al 1928;
9) nel 1926 furono costruiti due pennelli prolungati in mare la foce dell'Arno allo scopo di consentire lo smaltimento più rapido delle portate di piena;
10) dal 1928 ha inizio anche l'erosione della costa di San Rossore che fino ad allora aveva continuato ad avanzare. L'erosione perciò si estende dalla foce dell'Arno fino a quella del Fiume Morto;

11) dal 1930 hanno inizio nel bacino dell'Arno varie opere di sistemazione idraulico forestale e idraulico agrarie;

12) la massima intensità dell'erosione, nel tratto di costa di San Rossore, si verifica tra il 1934 e il 1939, nonostante che in questo periodo si sia registrato il massimo numero di piene superiori a 500 mc/s ed anche il massimo apporto di torbide;

13) tra il 1962 e il 1968 vengono costruite al Gombo cinque scogliere frangiflutto parallele alla costa;

14) nel 1969 vengono considerevolmente ridotti e regolamentati i prelievi di ghiaia e sabbia dall'alveo dell'Arno;

15) nel periodo 1966-1971 si verifica un sensibile avanzamento della linea di battigia da foce Arno fino al Gombo, oltre il quale invece l'erosione continua a manifestarsi con forte intensità.

Se da una parte, come abbiamo visto, non è possibile verificare l'influenza dei fattori climatici sulle variazioni della costa in studio, dall'altra, dalla considerazione dei fatti sopra elencati, ci sembra di poter affermare che i fattori legati all'azione antropica possano invece aver influito in maniera sensibile, come viene messo in evidenza ad esempio dalla correlazione tra i punti 5 e 6 da cui emerge che il rapido avanzamento della cuspide deltizia, dal 1843 al 1850, può essere messo in relazione con i lavori eseguiti nello stesso periodo nell'alveo dell'Arno. Correlazioni analoghe possono essere stabilite tra i punti 9 e 10 da un parte e tra i punti 13, 14 e 15 dall'altra. Nel primo caso infatti la costruzione dei pennelli a foce Arno, per i motivi visti precedentemente (vedi maggiore dispersione dei materiali al largo e interferenza con i moti del mare), può spiegare l'inizio dell'erosione su tutta la costa di San Rossore. Nel secondo caso, la diminuzione dei prelievi di sabbia dall'alveo dell'Arno e la costruzione delle scogliere frangiflutto al Gombo potrebbero aver determinato l'inizio di una fase di ripascimento della spiaggia.

Questo quadro tuttavia non ci consente invece di porre una relazione tra l'erosione della cuspide verificatasi intorno al 1890 e alcun fatto di ordine naturale o antropico verificatosi in quell'epoca. A tale riguardo è però da segnalare il tentativo fatto dal Borghi secondo cui l'inizio dell'erosione della cuspide sia da porre in

relazione con la costruzione dele dighe foranee del porto di Livorno avvenuta proprio tra il 1850 e la fine del secolo scorso. Secondo questo Autore infatti la costruzione delle opere portuali avrebbe notevolmente alterato l'andamento delle correnti di deriva provocate dai venti del terzo quadrante. Tali correnti, che in condizioni naturali si sarebbero biforcate per la presenza delle secche della Meloria e si sarebbero ricongiunte più a nord annullando la loro energia cinetica, dopo la costruzione delle dighe foranee, « la corrente di ovest (quella esterna) riusciva a raggiungere il litorale su una linea direttrice che va direttamente a frangersi contro l'abitato di Marina e la foce dell'Arno » determinando l'erosione del delta, sia in modo diretto che per interferenza con la *fiumara* dell'Arno (L. BORGHI [1970]). Tale ipotesi tuttavia non viene suffragata da dati sperimentali che dimostrino l'esistenza stessa di tali correnti di deriva, nonché il loro andamento e la loro velocità. Per tali motivi, allo stato attuale delle conoscenze, non possiamo accettare la spiegazione proposta dall'A., mentre, nello stesso tempo, non possiamo fare a meno di constatare la concomitanza verificatasi tra la costruzione delle dighe foranee del porto di Livorno e l'inizio dell'erosione del delta dell'Arno.

Per concludere vorremmo far rilevare che l'accenno alla formazione del nuovo delta ci è servito per mettere in evidenza che tale apparato non è stato il risultato di una lenta e progressiva evoluzione in concordanza con la formazione della falcatura sabbiosa compresa tra Capo Corvo e i Monti Livornesi, ma la conseguenza di interventi straordinari e sporadici operati dall'uomo nel corso del fiume e nel suo bacino, anche se non si possono escludere cause legate a variazioni climatiche. Esso pertanto ha avuto ragione di formarsi e di accrescersi fino a quando lo hanno consen tito gli effetti provocati da tali processi sia naturali che artificiali. Una volta che questi sono venuti a cessare, il delta dell'Arno ha rappresentato un elemento di forte squilibrio nei confronti del rapporto tra le forze del mare e la naturale distribuzione dei materiali solidi lungo la costa in esame.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

ALBANI D. (1932) - Variazioni della linea di spiaggia delle coste italiane. *Atti Soc. Ital. per il progresso delle Scienze,* XXI Riunione, **2**, Roma, 1-7.

ALBANI D. (1933) - Indagine preventiva sulle recenti variazioni della linea di spiaggia delle coste italiane. C.N.R., Roma.

ALBANI D., GRISELLI A., MORI A. (1940) - C.N.R., Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane; II, Le spiagge toscane. Roma.

ALBANI D. (1952) - Nuove osservazioni sulle variazioni di spiaggia del litorale della Versilia. In: Studi Geografici in onore di A. R. Toniolo, Istit. di Geografia dell'Università di Bologna; Milano, 5-43.

BASCOM W. (1965) - Onde e spiagge; dinamica della superficie marina. Zanichelli, Torino.

BENDINI C. (1969) - Il porto turistico e peschereccio di Marina di Pisa. *Boll. degli Ing. del Coll. degli Ing. di Firenze e Toscana*, **7**, 7-28.

BLAEU J. (1663) - Le Grand Atlas ou Cosmographie Blaviane, **9**, Amsterdam, 1663, ristampa anagrafica 1968.

BONATTI S. (1932) - La sabbia di Viareggio (proprietà fisiche, chimiche e mineralogiche). *Atti Congr. Naz. di Idrol., Climatol. e Terapia Fisica*, Viareggio, 3-13.

BONATTI S. (1948) - Le sabbie dell'Arno e del litorale alla foce. Sta in: Comune di Pisa - Le possibilità di ripascimento del litorale di Marina. Pisa, Tip. Com., 61-63.

BONATTI S., DELLA BIANCHINA M. (1948) - La sabbia dell'Arno e le sue relazioni con l'Arenaria Macigno. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat.*, Serie A, **55**, 247-252.

BORGHI L. (1970) - Apporto allo studio sulle cause di variazioni del litorale pisano. *Rassegna del Comune di Pisa*, 53-62.

BULI U., ORTOLANI M. (1947) - Le spiagge marchigiane. C.N.R., Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane, Roma.

BUONSIGNORI S. (1584) - Carta del Dominio Fiorentino. Sta in: ISTITUTO GEOGRAFICO MILITARE - Monumentae Italiae Cartographica, Tav. XLVIII, Firenze, 1929.

CAMOSCI A. (1964) - La difesa e la riconquista delle spiagge erose dal mare. Galeati, Imola.

CASTELVECCHI A., VITTORINI S. (1967) - Osservazioni preliminari per uno studio sulla erosione in Val d'Orcia. *Atti XX Congr. Geogr. Ital.*, **3**, Roma, 151-168.

CHELUSSI I. (1910) - Osservazioni petrografiche sopra alcune sabbie della costa totoscana e della pianura grossetana. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, **29**, Roma, 207-219.

CASTELLI A. (1973) - Sulla regressione floristica del litorale pisano e sui sistemi adottati per la riforestazione della fascia litoranea. *Rassegna*, **2**, Comune di Pisa, 10-15.

COMUNE DI PISA (1948) - Le possibilità di ripascimento del litorale di Marina (Relazione della Commissione Comunale presieduta dal Prof. Ing. C. Ruggiero), Pisa.

CONTI G. (1950) - L'approdo di Livorno. *Atti Congr. Naz. Porti*, **1**, Livorno, 251-268.

CORNAGLIA P. (1891) - Sul regime delle spiagge e sulla regolazione dei porti. Paravia, Torino.

D'ARRIGO A. (1936) - Ricerche sul regime dei litorali del Mediterraneo. C.N.R. Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane, Roma.

D'ARRIGO A. (1950) - L'evoluzione fisiografica e le caratteristiche del regime batili-

tologico della piattaforma litorale toscana. *Congr. Naz. dei Porti,* Livorno, 1-17.

DEL NOCE G. (1849) - Trattato istorico-scientifico ed economico delle macchie e foreste del Granducato di Toscana. Tip. Ducci, Firenze.

EREDIA F. (1908) - I venti in Italia, IV, Toscana. *Boll. Soc. Aeronautica Ital.,* (2), Roma, 1-28.

FANFANI A. (1973) - Condizione dei pini del litorale marino italiano in relazione ai fattori ecologici. *Min. Agric. For.,* Collana Verde **32**, Roma.

GALLARETO E. (1960) - La difesa delle spiagge e delle coste basse. Hoepli, Milano.

GALLARETO E. (1963) - La diminuzione degli apporti solidi fluviali ed i ripascimenti artificiali delle spiagge per limitarne l'erosione. *I° Conv. degli Ing. Idraulici del Corpo del G. C.,* Parma, 122-130.

GALLUZZI V. (1952) - San Rossore (Oggi e domani). *La provincia Pisana,* **1** (3-4), 3-11.

GIANDOTTI M. (1937) - Idrologia della bonifica integrale, Parte I^{a}, Idrologia generale. Firenze.

GIANDOTTI M. (1963) - Erosione del suolo nella penisola italiana per effetto delle acque correnti in relazione alla bonifica ed al ripascimento delle spiagge. Sta in: MINISTERO DEI LL.PP., *Memorie e studi idrologici,* **1** (2), (Nuova serie), Roma, 47-59.

GIORGI E. (1965) - I laghetti collinari in Italia. Istituto Sperimentale per lo studio e la difesa del Suolo, Firenze.

GUILCHER A. (1954) - Morphologie littorale et sous-marine. Presse Univ. de France, Paris.

GUILCHER A. (1965) - Précis d'hydrologie marine et continentale. Masson, Paris.

INNOCENTI P. (1968) - Il porto di Livorno. Giuffrè, Milano.

KING C. A. M. (1953) - The relationship between wave incidence, wind direction and beach changes at Marsden bay, co. Durham. Transactions and Papers, **19**.

KING C. A. M. (1959) - Beaches and coasts. London.

KING C. A. M. (1966) - Techniques in geomorphology. Arnold; London.

LAPUCCI P. L., GELLINI R., PAIERO P. (1972) - Contaminazione dell'acqua marina quale causa di moria dei pini lungo le coste tirreniche. *Annali dell'Acc. Ital. di Sc. For.,* **21**, 323-358.

LARRAS J. (1957) - Plages et côtes de sable. Eyrolles, Paris.

MAGINI G. A. (1602 circa) - Carta del Dominio Fiorentino. Monumenta Cartographica Vaticana, **2**, tav. XIII, Bibl. Apost. Vat.

MAIONE A. (1963) - Possibilità tecniche e convenienza economica di arrestare l'erosione dei litorali marini operando ripascimenti secondo la tendenza delle forze del mare. *I° Conv. degli Ing. Idraulici del Corpo del G. C.,* Parma, 64-73.

MANCINI F. (1956) - Torbide dell'Arno a Firenze nel 1954. *Riv. di Sc. Nat., Natura,* **47**, Milano, 3-23.

MARINELLI O. (1909) - Sull'azione morfologica delle correnti litorali nel Mediterraneo. *Riv. Geogr. Ital.,* **16**, 136-147.

MATERASSI L. (1849) - Del fiume Arno nel Compartimento Pisano e dei lavori in quello eseguiti dal 1840 al 1847. Pisa.

MERCIAI G. (1910) - Mutamenti avvenuti nella configurazione del litorale tra Pisa e Orbetello dal Pliocene in poi. Pisa.

MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI (1920) - Ispettorato del Servizio Idrografico. Osservazioni pluviometriche raccolte a tutto l'anno 1915, **1**, Italia peninsulare e isole. Roma.

MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI (1925) - Servizio Idrografico, Osservazioni pluviometriche raccolte nel quinquennio 1916-1920. Pubbl. n. 1, **4**, Italia peninsulare e isole. Roma.

MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI (1957) - Servizio Idrografico, Precipitazioni medie mensili ed annue e numero dei giorni piovosi per il trentennio 1921-1950. **24** (5), Roma.

MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI (1936-42; 1954-1968) - Servizio Idrografico, Annali Idrologici: Bacini dell'Arno e Limitrofi fra il Magra e il Fiora, parte II. Roma.

MORI A. (1940) - Le spiagge della Toscana meridionale fra il fiume Cornia e il monte Argentario. In: ALBANI D., GRISELLI A., MORI A., Le spiagge toscane. C.N.R., Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane, Roma.

MORI A. (1965) - Le variazioni del litorale della Toscana settentrionale. *La Regione*, **3** (12), Empoli, 63-65.

MORI A. (1963) - Relazione sulle variazioni del litorale della tenuta di San Rossore e sui lavori di difesa della linea di spiaggia e della pineta (inedito).

MORI A. (1966) - Sulle variazioni del litorale della Tenuta di San Rossore e sui lavori di difesa della linea di spiaggia e della pineta. *Atti Conv. per la Difesa del litorale toscano*, Ammin. Prov. di Pisa, 110-115.

NATONI E. (1944) - Le piene dell'Arno e i provvedimenti di difesa. Le Monnier, Firenze.

NATONI E. (1956) - Il regime delle acque nel bacino dell'Arno. In: ACCADEMIA ECONOMICO AGRARIA DEI GEORGOFILI - Il bacino dell'Arno, Firenze.

OTTMANN F. (1965) - Introduction a la geologie marine et litorale. Paris.

PANICUCCI M. (1971) - Indagine sulle variazioni del coefficiente di deflusso annuo medio nei corsi d'acqua italiani. *Annali Istit. Sper. Studio e Difesa del Suolo*, Firenze, 131-145.

PASSERINI G. (1953) - Influenza delle sistemazioni idraulico-agrarie sul regime dei corsi d'acqua. *Ann. Fac. Agr. Univ. di Pisa*, nuova serie, **79**, 3-32.

PEZZA V. (1973) - Rottura dell'equilibrio costiero a Capo d'Orlando, *L'Industria delle costruzioni*, **33**, 47-62

PINNA M. (1958) - Il regime dei venti nella bassa valle dell'Arno. *Riv. Geogr. ital.*, **65**, 97-118.

PINNA M. (1969) - Le variazioni del clima in epoca storica e i loro effetti sulla vita e le attività umane. *Boll. Soc. Geogr. Ital.*, serie IX, **10**, Roma, 198-275.

POLLI S. (1966) - La variazione attuale del clima della regione veneta. *Ateneo Veneto*, Venezia, 75-91.

RUGGIERO C. (1948) - Relazione idraulica. In: COMUNE DI PISA - Le possibilità di ri-

pascimento del litorale di Marina. Relazione della Commissione Comunale presieduta dal Prof. Ing. C. Ruggiero. Pisa, 25-54.

SAGGINI F. (1966) - Intervento al «Convegno per la difesa del litorale toscano». Amministrazione Provinciale di Pisa, Pisa, 58-69.

SAGGINI F. (1970) - Linee essenziali di un intervento urgente per la difesa di Marina di Pisa, *Rassegna,* **6** (1-2), Comune di Pisa, 63-69.

SELLI R. (1971) - Attività scientifica svolta nel 1970 dal Laboratorio per la Geologia Marina del C.N.R.. *La ricerca Scientifica,* **41**, 155-172.

SERPIERI A. (1926) - L'Italia Forestale. L'ambiente economico e sociale. *Ann. R. Ist. Sup. Agr. e Forest.* di Firenze, ser. II, 229-256.

SESTINI F. (1903-5) - Materiali per una carta chimico agronomica dei terreni della pianura pisana ed in special modo di quelli dei dintorni di Pisa. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Proc. Verb.,* **14**, 7-38.

SPANO B., PINNA M. (1956) - Le spiagge della Sardegna. C.N.R., Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane, Faenza.

TADDEI E. (1957) - Le bonifiche toscane. *Ist. Sper. per lo studio e la Difesa del Suolo,* Firenze.

TIRELLI M. (1971) - Effetti degli inquinamenti, il deperimento dei pini. *Le scienze ed il loro insegnamento,* **8** (5), Le Monnier, Firenze, 267-281.

TONIOLO A. R. (1910) - Sulle variazioni di spiaggia a foce d'Arno. Pisa.

TONIOLO A. R. (1927) - Variazioni storiche del litorale toscano tra l'Arno e la Magra. *Atti del X Congresso Geogr. Ital.,* **1**, Milano, 314-330.

TREVISAN L. (1948) - Relazione geodinamica sulla spiaggia di Marina. In: COMUNE DI PISA - Le possibilità di ripascimento del litorale di Marina. Relazione della Commissione Comunale presieduta dal Prof. Ing. C. Ruggiero, Pisa, 55-60.

VERONA O., TREGGI G. (1972) - Sul deperimento delle pinete di una parte della fascia costiera della Toscana, con particolare riferimento alla Versilia. *L'agricoltura italiana,* **72** (6), 381-396.

VISENTINI M., BORGHI G. (1938) - Le spiagge padane. C.N.R., Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane, Roma.

VIVIANI V. (1684) - Relazione al Serenissimo Granduca Cosimo III. Intorno al riparare, per quanto possibile sia, la città, e le campagne di Pisa dall'inondazione ecc.. R.A.I.T.M.A. Ediz. IV, **3**.

ZENDRINI B. 1736) - All'illustrissimo Ufficio della Foce di Viareggio. Relazione che concerne il miglioramento dell'aria e la riforma di quel porto. Lucca.

ZUNICA M. (1971) - Le spiagge del Veneto. C.N.R., Ricerche sulle variazioni delle spiagge italiane, Padova.

(*ms. pres. il 13 maggio 1974; ult. bozze il 25 giugno 1974*).