

L'EVOLUZIONE E LE CARATTERISTICHE METEO-MARINE DEL LITORALE COMPRESO TRA I PORTI DI LIVORNO E DI VIAREGGIO DAL 1846 AL 1983

Valerio Milano

Professore di Costruzioni Idrauliche - Università di Pisa

E' noto che la dinamica evolutiva di un tratto di litorale va inquadrata nell'ambito dell'intera unità fisiografica, che si comporta in modo indipendente rispetto ai tratti di costa limitrofi relativamente allo scambio di materiale solido; in tal senso le competenze dell'Autorità di Bacino dell'Arno e del bacino sperimentale del Serchio interessano la porzione meridionale e mediana di un'unità fisiografica, lunga 65 Km, delimitata a nord da Punta Bianca, ultima propaggine di Monte Marcello e a sud dal Porto di Livorno.

Nella fig. 1 è rappresentata tale unità fisiografica, con indicazione del senso del trasporto longitudinale netto, quale risulta da numerose ricerche effettuate.

Di seguito ci si limiterà allo studio del tratto di litorale compreso tra i porti di Livorno e di Viareggio. Infatti, i vari studi effettuati consentono di valutare il trasporto longitudinale annuo netto all'estremo nord del tratto (molo Sud del porto di Viareggio), mentre si sa che tale trasporto è nullo all'estremità sud (diga del Marzocco del porto di Livorno), in quanto limite dell'intera unità fisiografica.

I principali corsi d'acqua che alimentano con il loro apporto solido il litorale sono i fiumi Arno e Serchio; la diminuzione nel tempo del loro trasporto solido costituisce indubbiamente una delle cause della rapida evoluzione del tratto di costa in esame.

L'orientamento del litorale risulta leggermente variabile, per cui cambiano l'esposizione ai venti e l'incidenza delle mareggiate più violente rispetto alla linea di battigia e cambiano quindi anche il senso prevalente e l'entità del trasporto longitudinale.

Nel litorale in considerazione si distinguono due tratti.

Il primo, compreso tra il porto di Livorno e la foce dell'Arno, è notevolmente influenzato dalla presenza delle secche della Meloria, che originano fenomeni di rifrazione del moto ondoso molto vistosi.

Esso ha un discreto grado di antropizzazione e comprende l'abitato di Marina di Pisa in intensa erosione e difeso da una serie pressochè ininterrotta di scogliere radenti e foranee.

Il secondo tratto, che si estende dalla foce dell'Arno a Viareggio, è scarsamente antropizzato, essendo presenti solo limitate opere di difesa di fronte alla tenuta presidenziale di S. Rossore. Nel passaggio dal 1° al 2° tratto, in corrispondenza della foce dell'Arno, si nota un arretramento della linea di riva di oltre 1 Km passando dalla sponda sinistra alla sponda destra del fiume; ciò fa pensare ad un naturale processo di completa scomparsa del delta fluviale, qualora il lobo sinistro non fosse protetto dalle scogliere che difendono Marina di Pisa.

Il litorale in esame negli ultimi decenni è stato oggetto di numerosi studi e di ricerche con l'esecuzione di rilevamenti sperimentali molto utili, per cui risulta ormai ben nota la sua dinamica evolutiva.

Fra tali studi si ricordano quelli sistematici effettuati, a partire dal 1970, da varie unità operative, di cui tre dell'Università di Pisa, ciascuna composta da più ricercatori, nell'ambito del progetto finalizzato C.N.R. "Conservazione del suolo", sottoprogetto "Dinamica dei litorali" e quelli eseguiti dai Proff. Noli, Benassai e Franco, in collaborazione con il laboratorio di Wallingford, in un primo tempo per l'estensione del Piano Regolatore del porto di Livorno nella zona nord e successivamente per incarico dell'Amministrazione Provinciale, della Camera di Commercio e del Comune di Pisa.

Tutti questi studi hanno consentito di acquisire conoscenze di elementi molto importanti, quali la granulometria, la natura e la provenienza dei sedimenti, il regime dei venti e dei mari, le caratteristiche delle onde al largo, la rifrazione del moto ondoso sotto costa, la direzione prevalente del trasporto solido parallelamente alla battigia, la variazione nel tempo del trasporto solido dell'Arno ecc..

L'evoluzione storica della linea di riva a partire dal 1846

In questo paragrafo viene analizzata l'evoluzione della linea di riva nel periodo 1846 - 1983; la precedente evoluzione, a partire da periodi geologici remoti e quella successiva al 1983 sono trattate negli interventi rispettivamente di R. Mazzanti e di E. Pranzini e T. Sagliocco, cui si rimanda.

La vasta documentazione storica disponibile consente di seguire con una certa esattezza l'evoluzione del litorale in esame a partire dagli inizi del secolo XVII, però, solo nel 1846 appaiono le prime carte nautiche attendibili, eseguite dalla Marina Francese, che permettono di studiare anche l'evolversi della spiaggia sommersa, che, da un punto di vista scientifico, è di importanza non minore rispetto agli spostamenti della linea di battigia.

Il primo interessante fenomeno che risalta è quello del rapido smantellamento del delta del fiume Arno che nel 1850, quando Marina di Pisa non esisteva ancora, aveva raggiunto il suo massimo protendimento. Infatti, la formazione di tale delta cominciò nella prima metà del 1600, dopo il "taglio ferdinando", iniziato nel 1606, mediante il quale la foce dell'Arno veniva spostata verso nord di 1550 m.

Questa importante opera idraulica diede luogo ad un maggior apporto di torbide al mare da parte dell'Arno per l'aumento di pendenza del fiume nel suo tratto terminale ed alla rapida formazione di un nuovo delta, che veniva alimentato anche dalle sabbie provenienti dalla demolizione del vecchio delta, non più alimentato.

Per dare un'idea del protendimento verso il mare del nuovo delta, basti pensare che, da rilievi attendibili della linea di battigia, risulta che lo stesso, dopo un continuo accrescimento fino al 1785, ebbe, tra tale anno ed il 1850, un ulteriore avanzamento di 325 m sul lobo sinistro (pari a 5 m all'anno) e di 250 sul lobo destro. E' da notare però che tale avanzamento non fu costante nel tempo; gran parte di esso si verificò infatti negli ultimi 4 anni del periodo e cioè dal 1846 al 1850.

Dal 1850 ha inizio la scomparsa del lobo sinistro del delta dell'Arno e dal 1878 anche quella del lobo destro. Il processo erosivo risultò addirittura più veloce di quello di formazione del delta. Esso si manifestò in modo diverso sulle due sponde: infatti, per difendere l'abitato di Marina di Pisa, furono realizzate a più riprese opere a mare di protezione, che impedirono il propagarsi dell'erosione oltre un certo limite. Perciò la demolizione del lobo destro dell'Arno, anche se iniziata dopo, risultò più rapida ed intensa.

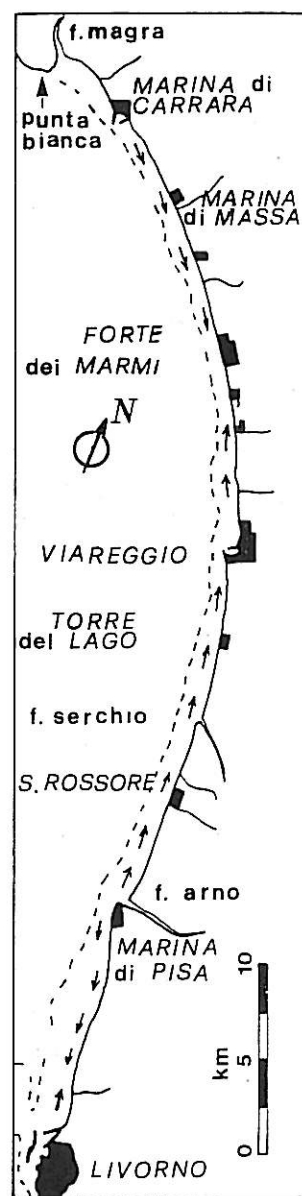


Fig. 1 - Caratteristiche morfologiche dell'unità fisiografica e direzioni del trasporto longitudinale.

Infatti dal 1878 al 1920, la parte più protesa di tale lobo presentò un arretramento di circa 700 m che continuò in seguito, tanto che, nel 1983, la linea di riva in destra d'Arno era più arretrata di 1200 m rispetto alla punta del lobo del 1878.

L'arretramento del lobo sinistro invece, contenuto sin dall'inizio di questo secolo dalle opere di difesa di Marina di Pisa, ha raggiunto un valore massimo di 300 m, ma violente mareggiate hanno provocato gravi danni al lungomare e, a volte, anche alle costruzioni.

Già nel 1920 la linea di riva in destra d'Arno era più arretrata rispetto a quella in riva sinistra di 300 m e sin dagli anni '60 il litorale in sinistra del fiume è più aggettante in mare di quello in destra di circa 700 m; una discontinuità della battigia, in così breve tratto, trova pochi riscontri lungo tutte le coste italiane.

Tutto lascia credere che senza interventi di difesa, l'abitato di Marina sarebbe stato spazzato via da vari decenni.

Nella fig. 2 sono rappresentate le linee di riva tra i porti di Viareggio e di Livorno negli anni 1851-1881-1923-1939-1954-1979-1983. Nella fig. 3 sono riportate le variazioni della battigia degli anni 1881-1931 e 1983 rispetto alla battigia del 1846, assunta come riferimento.

L'evoluzione del litorale in destra d'Arno

Per quanto riguarda l'evoluzione del litorale in destra dell'Arno, fino al Fiume Morto Nuovo, tratto che comprende la tenuta Presidenziale di S.Rossore, si ebbe un arretramento della battigia di circa 70 m dal 1823 al 1846 ed un avanzamento della stessa entità nel successivo periodo 1846 - 1878.

Da tale anno infatti ha inizio un forte fenomeno erosivo che, a partire dal lobo destro dell'Arno, va via nel tempo propagandosi verso nord, fino a raggiungere quasi la foce del Fiume Morto nel 1934; in seguito il fenomeno erosivo è proseguito sino ad oggi in tutto il tratto di costa in esame, salvo brevi interruzioni in qualche punto sporadico, dovute alla realizzazione di modeste opere di difesa, come le scogliere foranee costruite nei pressi del Viale del Gombo.

Un'idea del processo erosivo può essere fornita da tali dati: dal 1878 al 1971, cioè in meno di un secolo, sono scomparsi ben 162 ha di spiaggia, pari ad un arretramento medio della battigia di 270 m (3,00 m all'anno). Ma l'erosione è risultata molto variabile, sia nel tempo che nello spazio: nel tempo la massima intensità erosiva si è avuta nel periodo 1934 - 1939 (40 ha di superficie, cui corrisponde un arretramento medio della battigia di circa 70 m) e nel periodo 1954 - 1960 (30 ha di superficie).

Per quanto riguarda la distribuzione delle erosioni nello spazio, si osserva che queste, nell'ultimo secolo, sono pressochè interamente localizzate nei primi 3,5 Km a nord della foce dell'Arno, dove hanno raggiunto entità eccezionale, mentre nei successivi 2,5 Km fino al Fiume Morto Nuovo si è avuto un avanzamento dal 1851 al 1954 ed un successivo arretramento, che ha riportato nel 1983 la linea di riva in posizione molto prossima a quella del 1881.

Procedendo verso nord, nel tratto di litorale compreso tra la foce del Fiume Morto Nuovo e quella del Fiume Morto Vecchio, di lunghezza poco minore di 2 Km, dopo un arretramento medio di circa 25 m nel periodo 1823 - 1878, si è avuto un avanzamento della linea di riva di 150 m dal 1878 al 1900, cui è seguito un periodo di sostanziale equilibrio fino al 1954.

E' quindi iniziato anche qui un fenomeno erosivo, con un arretramento medio della battigia di 180 m dal 1954 al 1983.

Apprezzabili fenomeni di ripascimento si sono avuti fino al 1954 in un tratto di circa 2 Km a partire dalla foce del Fiume Morto Vecchio, e procedendo verso nord, con avanzamento della linea di riva di 80 m dal 1823 al 1851 e di 350 dal 1851 al 1954, cui ha fatto seguito un arretramento di circa 100 m da tale anno al 1983.

Ancora più a nord il litorale risulta in continuo avanzamento da oltre due secoli ed in misura via via maggiore man mano che ci si sposta verso Viareggio. Le spiagge di questo litorale risentono ormai in

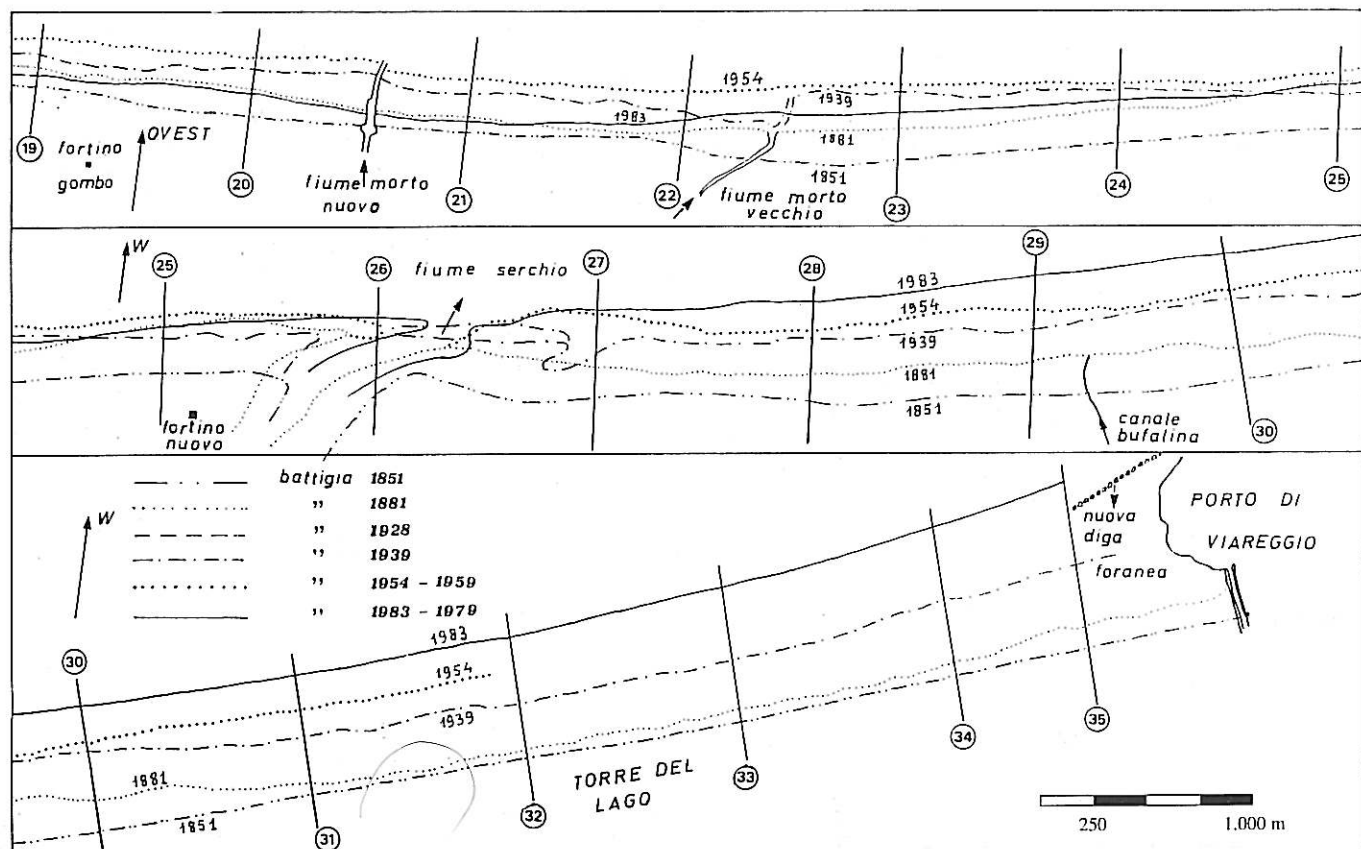
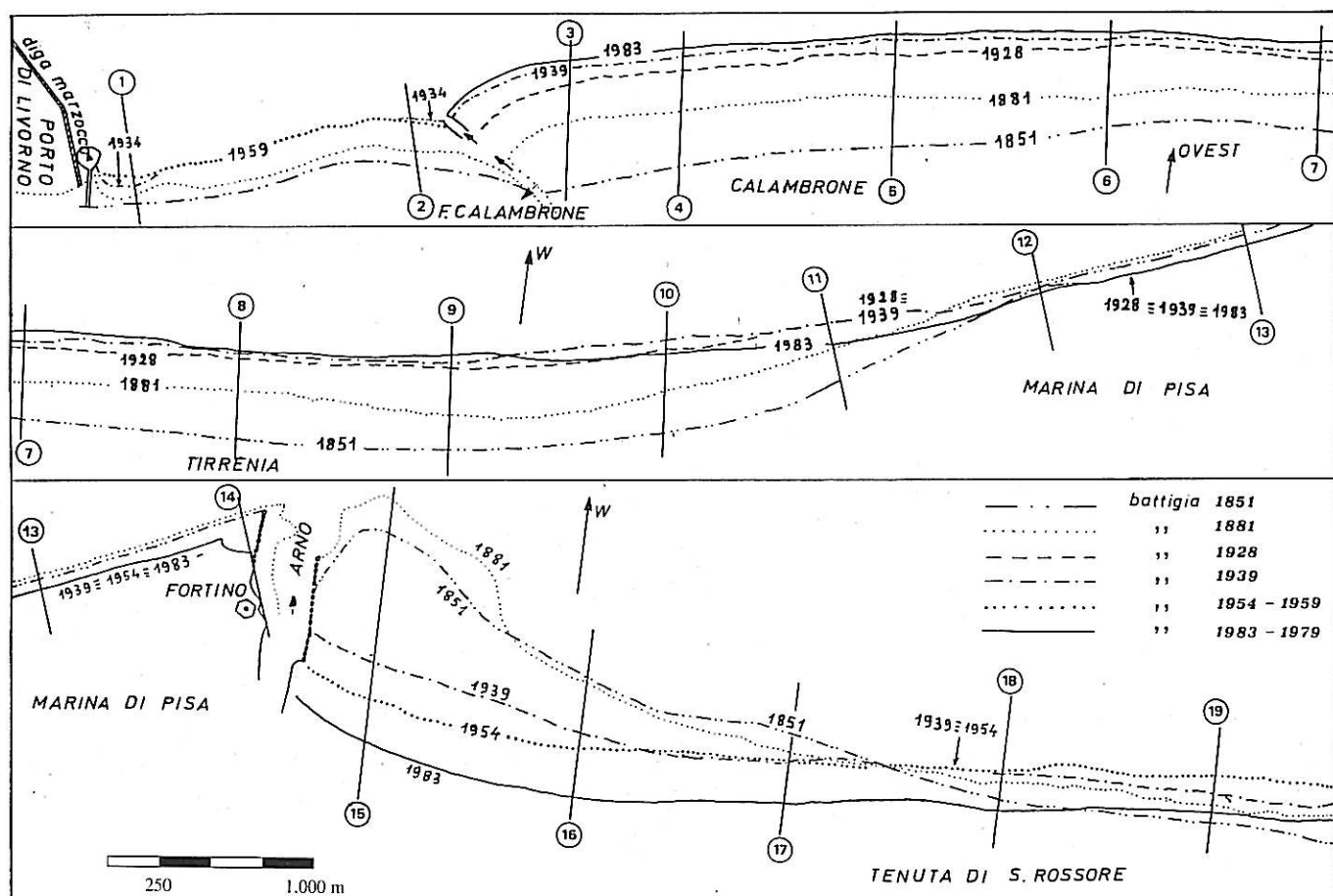


Fig. 2 - Evoluzione storica della linea di battigia tra il porto di Livorno e il Porto di Viareggio.

maniera netta della presenza del porto di Viareggio che, arrestando il naturale flusso longitudinale delle sabbie dovuto al moto ondoso (in tale tratto è diretto da sud verso nord), provoca copiscai fenomeni di ripascimento fin più a sud della foce del fiume Serchio e, nel contempo, fenomeni erosivi sulla spiaggia della stessa Viareggio a nord del porto.

E' da rilevare che tutto ciò si verificava già prima che a Viareggio fosse iniziata, nel 1914, la costruzione di un vero e proprio porto. Infatti, in precedenza, i fenomeni descritti erano dovuti alla presenza dei due pennelli che si spingevano a mare alla foce del Canale Burlamacca, per consentire la navigazione, la cui costruzione iniziò nel 1576.

Per dare un'idea del ripascimento del tratto di litorale in esame si ricorda che nel tratto compreso tra il Fiume Morto Vecchio e la foce del Serchio si è avuto, dal 1851 al 1983, un protendimento della linea di riva di oltre 150 m e, nel successivo tratto a nord fino al porto di Viareggio, un avanzamento medio di circa 600 m, malgrado i dragaggi effettuati a ridosso del molo sud del porto.

L'evoluzione del litorale in sinistra dell'Arno

Il tratto immediatamente a sud della foce del Fiume, lungo circa 2,5 Km e comprendente quindi l'abitato di Marina di Pisa, iniziò ad avanzare a partire dal XVII secolo; dal 1785 al 1850 la linea di riva si protese per 150 m (2,3 m all'anno). Dal 1880 iniziò il fenomeno erosivo, dapprima lentamente e poi in maniera sempre più rapida; l'erosione continuò senza soste fino al 1909, mettendo in pericolo l'abitato di Marina; le varie opere di difesa a mare non furono in grado di arrestarla, sebbene l'abbiano contenuta entro limiti molto minori rispetto all'erosione che si manifestò sul litorale in destra.

Tra il 1909 ed il 1913 si ebbe l'illusione che le opere di protezione potessero dar luogo ad un miglioramento dell'arenile, in quanto, dopo anni di continua erosione, si ebbe un avanzamento della linea di battigia da 10 a 40 m, a seconda dei punti; tale situazione favorevole continuò fino al 1917.

Da tale anno, fino al 1923, si verificò un arretramento che nel tratto più vicino alla foce fu di oltre 200 m (23 metri all'anno), mentre lungo tutto l'abitato di Marina di Pisa scomparvero gli ultimi metri di spiaggia, che permettevano di tenere in vita alcuni piccoli bagni, tanto che le più violente mareggiate mettevano in serio pericolo non solo il lungomare ma anche le case.

Dopo il 1926 si è avuto un momentaneo accrescimento dell'arenile solo nel periodo 1932 - 1938, a seguito della costruzione di alcune scogliere foranee.

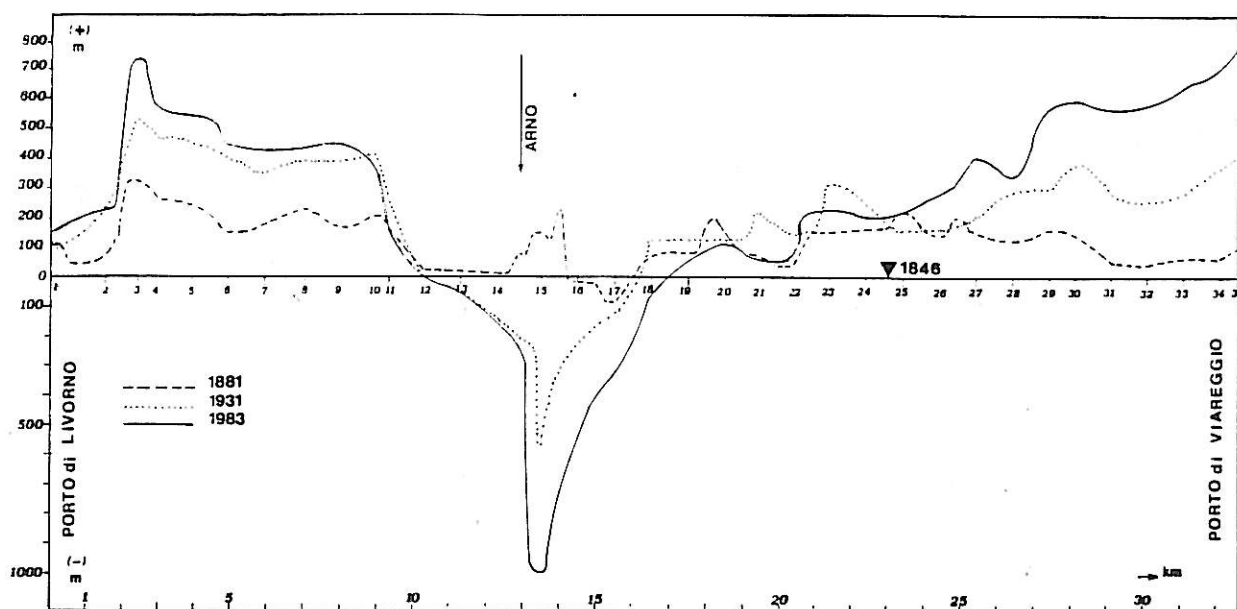


Fig. 3 - Variazioni della linea di riva rispetto a quella del 1846.

In pratica, negli ultimi 50 anni un doppio ordine di opere di difesa (scogliere radenti e scogliere a mare) hanno fatto sì che l'erosione non proseguisse oltre, difendendo in tal modo l'abitato.

Procedendo verso sud, segue un tratto di litorale della lunghezza ancora di circa 2,5 Km, che va dalla fine dell'abitato di Marina fino a 800 m a Nord del largo Belvedere di Tirrenia (tratto all'incirca compreso tra le sezioni 12 e 9 di fig.2) dove si nota un incessante avanzamento della battigia dal 1851 fino al 1939, a cui seguì un arretramento, che dal 1939 al 1983 risulta mediamente di 70 -80 metri.

Il tratto del litorale ancora più a sud, fino al porto di Livorno, risulta in continuo avanzamento dal 1823, per effetto delle opere a mare del porto di Livorno, che arrestano le sabbie il cui movimento longitudinale è diretto prevalentemente da nord verso sud.

L'avanzamento della linea di riva risulta sempre maggiore man mano che si procede verso sud: davanti all'abitato di Tirrenia è stato mediamente di 210 m dal 1851 al 1881, di 140 m dal 1881 al 1928, di 50 m dal 1928 al 1939 e di 20 - 30 m dal 1939 al 1983. Nel tratto più a sud l'avanzamento è stato mediamente di 60 m (2,6 m all'anno), dal 1823 al 1846, di ben 200 m dal 1846 al 1881 (5,7 m all'anno), di 130 m dal 1881 al 1928 (2,8 m all'anno) e di soli 60 -70 dal 1928 ad oggi.

L'evoluzione dei fondali a partire dal 1846 ed il trasporto solido longitudinale

L'evoluzione del litorale pisano può essere ancor meglio seguita esaminando i rilievi batimetrici effettuati in varie epoche; in questo modo, infatti, si riesce a conoscere anche le variazioni nel tempo dei volumi di sedimenti della spiaggia sommersa. Le carte nautiche e i rilievi batimetrici presi in esame sono i seguenti (Milano, 1986):

- 1) - Carta nautica della Marina francese, relativa al tratto di costa tra il Golfo di La Spezia e la foce dell'Arno del 1852 (rilievi del 1846) in scala 1:50.000.
- 2) - Carta nautica della Marina Francese relativa alla rada di Livorno del 1848 (rilievi del 1846) in scala 1:20.000.
- 3) - Grafici di scandagliamento dell'Istituto Idrografico della Marina di Genova del 1881 per il tratto compreso tra Viareggio e la foce dell'Arno in scala 1:25.000 e per il tratto che va dalla foce dell'Arno al porto di Livorno in scala 1:20.000.
- 4) - Rilievi batimetrici eseguiti dalla Idrocart, per conto del Comune, della Provincia e della Camera di Commercio di Pisa, nell'aprile del 1983 in scala 1:5.000. Tali rilievi riguardano solo il tratto di litorale che ricade in provincia di Pisa, lungo 26 Km e giungono fino all'isobata di 10 m.
- 5) - Grafici di scandagliamento dell'Istituto Idrografico della Marina n. 8361 del 1976 e 4256/I del 1979 in scala 1:25.000.
- 6) - Rilievi parziali dell'Ufficio Escavazione Porti del 1931 e dell'Ufficio del Genio Civile OO.MM di Livorno di varie epoche.

La cartografia disponibile ha consentito di seguire l'evoluzione del litorale nel corso di tre periodi di tempo abbastanza ampi: il 1° dal 1846 al 1881 (35 anni); il 2° dal 1881 al 1931 (50 anni); il 3° dal 1931 al 1983 (52 anni).

Allo scopo, il litorale tra i porti di Viareggio e di Livorno è stato suddiviso in n° 34 tronchi mediante il tracciamento di n° 35 sezioni trasversali, la cui posizione è indicata nella fig. 2.

Sono state calcolate le aree di sabbia delle varie sezioni nel 1846 - 1881 - 1931 - 1983, aree comprese tra il profilo della spiaggia sommersa, l'orizzontale ad una profondità dal livello medio marino pari al valore dell'isobata "di chiusura", la verticale passante per il punto di battigia più arretrato tra quelli dei



Fig. 4 - Area di sabbia della generica sezione trasversale.

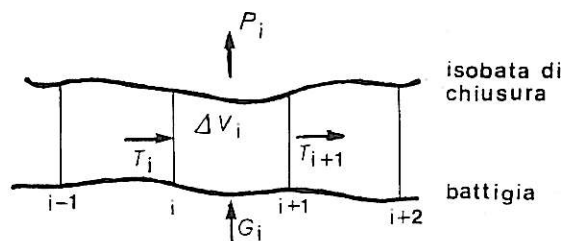


Fig. 5 - Schema del bilancio di materiale solido.

profili considerati e l'orizzontale a quota del livello medio marino (nella fig. 4 è indicata una generica di queste aree). L'isobata di chiusura, che è quella profondità oltre la quale le modifiche del profilo trasversale sono irrilevanti, è stata assunta pari a -12 m nel tratto che va dal porto di Livorno fin quasi al Fiume Morto (sezioni 1-21) e a -11 m nel restante tratto fino al porto di Viareggio (sez. 23-35).

Nella tab. 1 sono riportate le distanze tra le varie sezioni, i valori delle relative aree di sabbia nel 1846-1881-1931-1983, le variazioni A di tali aree e quelle dei volumi V dei sedimenti nei diversi periodi.

Mediante un semplice modello matematico, basato sull'equazione di continuità dei sedimenti (Milano, 1986), sono stati dedotti i valori medi annui del trasporto longitudinale netto delle diverse sezioni nei tre periodi 1846-1881, 1881-1931 e 1931-1983.

In tale modello l'intero tratto di litorale è stato suddiviso in tronchi di lunghezza piuttosto limitata (circa 1000 m) ed è stato quindi preso in esame il generico tronco compreso tra le sezioni i ed $i+1$ e delimitato inoltre dalla linea di battigia e dall'isobata di chiusura (fig.5). Con riferimento ad un dato periodo di tempo, assunti positivi i volumi Q_i di materiale solido entranti nel tronco e negativi quelli uscenti, si ha:

$$\sum Q_i = \Delta V_i \quad (1)$$

essendo V_i la variazione di volume solido all'interno del tronco, da assumersi positiva se c'è un aumento di volume

Attraverso le sezioni trasversali i e $i+1$ transitano i volumi solidi T_i e T_{i+1} dovuti al trasporto longitudinale; attraverso la linea di battigia si può ritenere che entri nel tronco un volume solido nullo nel caso in cui non sfocia tra le due sezioni alcun corso d'acqua e, in caso contrario, un volume G_i pari al trasporto di materiale del corso d'acqua. Attraverso l'isobata di chiusura, per quanto elevata possa essere, si ha in genere uno scambio di materiale P_i tra il tronco in esame e la zona limitrofa avente fondali maggiori, scambio che è di solito negativo per il tronco per il quale si sta facendo il bilancio di materiale solido, nel senso cioè che c'è una perdita P_i dovuta a un movimento verso il largo del materiale interno al tronco.

Con le precisazioni fatte, se gli scambi di materiale sono diretti secondo quanto indicato in fig. 5, l'equazione (1) può essere così scritta:

$$T_i + G_i = T_{i+1} + P_i + \Delta V_i \quad (2)$$

Il termine G_i va determinato valutando il trasporto solido dell'eventuale corso d'acqua che sfocia nel tratto di litorale $i - i+1$; inoltre, disponendo dei rilievi batimetrici all'inizio ed alla fine del periodo di tempo cui sono riferite le equazioni (1) e (2), è possibile trovare il valore di V_i .

Nel caso in esame, l'unico corso d'acqua che dà un apporto solido considerevole al litorale è il fiume Arno, mentre il trasporto solido del Serchio, come si vedrà meglio in seguito, risulta pressochè del tutto trascurabile. L'apporto solido dell'Arno sarà trattato in un successivo paragrafo.

Per l'applicazione della (2) è stato innanzi tutto calcolato il trasporto solido longitudinale annuo in corrispondenza del porto di Viareggio, estremo nord del tratto di litorale in studio.

Da un esame della documentazione disponibile sui volumi di sabbia accumulatisi a ridosso del molo

sud e nei pressi dell'imboccatura del porto di Viareggio, tale trasporto, diretto nel senso S-N, è stato stimato in 100.000 m³ annui nel periodo 1931 - 1983 (Milano, Di Martino, 1980).

Applicando allora la (2) all'intero tratto del litorale compreso tra i porti di Livorno e Viareggio, relativamente al periodo 1931 - 1983, è stato possibile ricavare la perdita globale annua P di sedimenti attraverso la sezione di chiusura, essendo noti il valore dell'apporto solido dell'Arno G, i valori del trasporto longitudinale P nelle due sezioni estreme e la variazione globale ΔV media annua di materiale nel periodo suddetto (Milano, 1986).

Tale perdita è risultata di 351.000 m³, pari a 10,7 m³ per metro lineare di litorale.

Applicando quindi successivamente la (2) ai vari tratti di litorale, a partire dal porto di Livorno (sez. 1, $T_1=0$) e procedendo verso Nord, sono stati ricavati i valori del trasporto longitudinale annuo in tutte le 35 sezioni del litorale in ciascuno dei tre periodi presi in esame; tali valori sono riportati in tab. 1 (sono stati assunti positivi se diretti nel senso sud-nord) mentre nella fig. 6 è riportato l'andamento del trasporto longitudinale netto lungo l'intero litorale nei tre periodi suddetti.

L'esame della tabella e del grafico consente di fare considerazioni molto utili sulla dinamica evolutiva del litorale.

I tratti di litorale in cui il trasporto è crescente sono caratterizzati da un trasporto longitudinale in uscita maggiore rispetto a quello in ingresso e quindi da una perdita di materiale, che è ancora più elevata se si tiene conto anche della perdita trasversale attraverso l'isobata di chiusura; tali tratti risultano perciò in erosione.

I tratti in cui l'andamento del trasporto longitudinale è decrescente risultano, invece, in avanzamento, solo se la differenza tra il trasporto in ingresso e quello in uscita è superiore alla perdita trasversale di materiale; per il tronco 14-15 occorre poi tener conto anche dell'apporto solido dell'Arno.

Si passa di seguito all'analisi delle variazioni di consistenza del litorale in ciascuno dei tre periodi, al fine di conoscere le tendenze evolutive del litorale stesso.

Periodo 1846-1881

Il senso del trasporto longitudinale presenta una divergenza in corrispondenza della foce dell'Arno: da tale punto fino al porto di Livorno è diretto da nord verso sud, mentre dalla foce dell'Arno fino al porto di Viareggio è diretto nel senso sud - nord.

Il trasporto da nord verso sud presenta un massimo di 318.000 m³ all'anno in corrispondenza della sez. 7: risulta quindi in avanzamento il tratto di litorale, compreso tra le sez. 1 e 7, che va dal porto di Livorno fino all'estremo Sud di Tirrenia (che all'epoca non esisteva ancora), con un aumento di volume di sabbia, al netto della perdita trasversale, di 255.000 m³ all'anno.

In tale periodo ha già inizio la forte erosione sia a sud che a nord della foce dell'Arno, come pure la fase della rapida demolizione del delta fluviale, che aveva raggiunto, verso il 1850, la sua massima consistenza.

In sinistra d'Arno, dove proprio in questo periodo inizia a sorgere Marina di Pisa, l'erosione si spinge verso sud fin oltre Tirrenia (sez. 7); in questo tratto, che va dalla sezione 7 alla 14, sono scomparsi, comprese le perdite trasversali, 240.550 m³ all'anno di sedimenti.

Nel tratto delimitato dalle sezioni 13 e 16, che comprende il delta dell'Arno, il trasporto longitudinale passa da 41.200 m³ all'anno nel senso N-S (sez. 13) a 415.300 m³ nel senso S-N (sez. 16), con un incremento di 456.500 m³ annui e quindi con una perdita di materiale di pari entità; per ottenere la perdita complessiva di materiale, a tale valore va aggiunta la perdita attraverso l'isobata di chiusura, che è di 34.200 m³ e va sottratto, secondo l'equazione (2) del bilancio di materiale solido, l'apporto dei sedimenti dell'Arno (331.600 m³). Ne risulta una perdita di 159.100 m³ annui, che è notevole, se si pensa che la lunghezza del tratto è di soli 3,2 Km.

Procedendo verso nord, si nota che l'erosione, di entità peraltro molto limitata, si estende solo fino a poco più di 2 Km a nord della foce dell'Arno (sezione 17), dove si ha un valore massimo del trasporto di 431.800 m³ all'anno nel senso S-N.

| No sezione | Distanza fra le sezioni (m) | Area sezione del 1846 (m²) | Area sezione del 1881 (m²) | Δ A (1846-1881) (m²) | Δ A (1881-1931) (m²) | Δ A (1931-1983) (m²) | Δ V (1846-1881) (m³ · 10³) | Δ V (1881-1931) (m³ · 10³) | Δ V (1931-1983) (m³ · 10³) | Trasporto longitudinale annuo (1846-1881) (m³ · 10³) | Trasporto longitudinale annuo (1881-1931) (m³ · 10³) | Trasporto longitudinale annuo (1931-1983) (m³ · 10³) |
|------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--|--|--|
| 1 | 1500 | 11.000 | 11.000 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1.935 | 93,0 | 82,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2 | 900 | 10.900 | 13.600 | 2.580 | 120 | 110 | 2.331 | 399,15 | 455,85 | — 71,4 | — 17,9 | — 17,7 |
| 3 | 500 | 10.870 | (14237) | 2.600 | 767 | 903 | 1.441,5 | 322,75 | 410,75 | — 147,7 | — 35,54 | — 36,10 |
| 4 | 1000 | 12.280 | 15.970 | 3.166 | 524 | 740 | 2.221 | 691,00 | 653,0 | — 194,2 | — 47,35 | — 49,36 |
| 5 | 1000 | 13.000 | (15134) | 1.276 | 858 | 566 | 913 | 1.227,0 | 680,0 | — 268,4 | — 71,90 | — 72,6 |
| 6 | 1000 | 12.200 | (14346) | 550 | 1.596 | 794 | 69 | 1.231,0 | 175,5 | — 305,2 | — 107,2 | — 96,4 |
| 7 | 1000 | (14492) | (14949) | 412 | 866 | 443 | 893,5 | 724,5 | 840,5 | — 317,9 | — 142,5 | — 110,5 |
| 8 | 1000 | (15775) | 14.983 | — 1.375 | 583 | — 1.238 | 1.856 | 1.026,5 | — 1.049,0 | — 303,1 | — 167,7 | — 105,1 |
| 9 | 1000 | (12807) | (11945) | — 2.337 | 1.470 | 860 | — 2.818,5 | 1.889 | 696,5 | — 260,8 | — 199,0 | — 95,7 |
| 10 | 1000 | 15.060 | 14.068 | — 3.300 | 2.308 | 533 | — 1.270,6 | 377,6 | — 545,6 | — 191,0 | — 247,5 | — 93,0 |
| 11 | 400 | (12818) | (9345) | 9.765 | — 420 | — 2.195 | — 2.745,0 | 1.667,5 | — 2.112,5 | — 159,0 | — 259,3 | — 86,8 |
| 12 | 1000 | (12852) | 7.500 | — 2.437 | — 2,915 | — 2.030 | — 2.129 | 3.552,5 | — 2.040,0 | — 91,3 | — 236,7 | — 56,9 |
| 13 | 1000 | (12661) | 6.650 | — 1.821 | 4.190 | — 2.050 | — 1.513,5 | — 4.367,0 | — 3.002,5 | — 41,2 | — 176,4 | — 28,39 |
| 14 | 1000 | 12.850 | 7.100 | — 1.206 | — 4.544 | — 3.955 | — 2.229,6 | 7.190,4 | — 6.075 | — 8,7 | — 99,8 | — 18,6 |
| 15 | 1200 | 26.350 | 16.400 | — 2.510 | — 7.440 | — 6.170 | — 1.830 | 6.270 | — 5.710 | 373,7 | 362,7 | 372,6 |
| 16 | 1000 | 20.050 | 13.800 | — 1.150 | — 5.100 | — 5.250 | — 955 | — 4.049,5 | — 4.325,5 | 415,3 | 477,7 | 471,7 |
| 17 | 1000 | 15.043 | (11281) | — 760 | — 2.999 | — 3.401 | 75 | — 2.458,8 | — 2.986,5 | 431,8 | 547,7 | 544,1 |
| 18 | 1000 | 10.760 | (9752) | 910 | — 1.918 | — 2.572 | — 930 | — 1.453,5 | — 2.234,0 | 419,0 | 586,1 | 590,8 |
| 19 | 1000 | 9.570 | (9581) | 950 | — 989 | — 1.896 | 1.590 | — 1.068,5 | — 2.101,5 | 381,7 | 604,4 | 623,1 |
| 20 | 1000 | 9.780 | (10862) | 2.230 | — 1.148 | — 2.306 | 360 | — 241,5 | — 1.526,0 | 325,5 | 615,1 | 652,8 |
| 21 | 1000 | 10.045 | 9.200 | — 1.510 | 665 | — 745 | 1.165 | 466,0 | — 656,0 | 304,5 | 609,2 | 671,4 |
| 22 | 1000 | 8.010 | (7457) | — 820 | 267 | — 567 | — 80 | 69,0 | — 447,3 | 260,5 | 589,0 | 673,3 |
| 23 | 900 | 7.300 | (7847) | 660 | — 113 | — 427 | 580 | — 102,5 | — 127,5 | 253,1 | 578,1 | 672,2 |
| 24 | 1000 | 6.760 | (7168) | 500 | — 92 | 172 | 325 | 96,0 | 456 | 225,8 | 563,3 | 663,9 |
| 25 | 1000 | 7.090 | 7.140 | 150 | — 100 | 740 | 327,5 | 70 | 650 | 205,8 | 560,5 | 644,40 |
| 26 | 1000 | 8.040 | 8.785 | 505 | 240 | 560 | — 30 | 695,5 | 1.098,5 | 185,7 | 548,4 | 621,2 |
| 27 | 1000 | 7.600 | (8186) | — 565 | 1.151 | 1.619 | — 450 | 837,0 | 1.378,0 | 175,8 | 523,8 | 589,4 |
| 28 | 1000 | 8.140 | 8.328 | 335 | 523 | 1.137 | — 482,5 | 890,5 | 1.214,5 | 178,0 | 496,3 | 552,1 |
| 29 | 1000 | 9.380 | (9008) | 630 | 1.258 | 1.292 | — 371 | 983,85 | 1.460,9 | 181,0 | 467,8 | 513,0 |
| 30 | 700 | 8.540 | (9663) | — 430 | 1.553 | 2.882 | — 475 | 1.509,0 | 3.048,5 | 184,1 | 440,6 | 482,5 |
| 31 | 1000 | 8.480 | (9425) | — 520 | 1.465 | 3.215 | — 710 | 1.213,0 | 3.172,0 | 186,9 | 399,7 | 413,1 |
| 32 | 1000 | 7.580 | (7641) | 900 | 961 | 3.129 | — 430 | 1.156,5 | 3.534,5 | 196,5 | 364,7 | 341,4 |
| 33 | 1000 | 6.820 | (8212) | 40 | 1.352 | 3.940 | — 452,5 | 1.519,5 | 4.317,5 | 198,1 | 330,8 | 262,7 |
| 34 | 1000 | 5.440 | (7992) | 865 | 1.687 | 4.625 | — | — | — | 174,4 | 289,7 | 168,9 |
| 35 | 625 | 4.100 | 8.845 | 2.370 | 2.375 | 5.645 | 1.010,9 | 1.269,38 | 3.231,25 | 138,9 | 257,6 | 100 |

Tab. 1 - Dati relativi al calcolo del trasporto solido longitudinale (positivo nel senso S-N).

Da tale sezione fino al porto di Viareggio il litorale è in protendimento, per la diminuzione del trasporto longitudinale, tranne il tratto tra le sezioni 27-33, dove si ha una perdita di materiale molto limitata. L'aumento complessivo di volume nel tratto 17-35, al netto della perdita trasversale, risulta però abbastanza contenuta (119.500 m^3), rispetto a quello che si verificherà nei successivi periodi.

Si nota poi che anche nel tratto immediatamente a ridosso del molo sud di protezione della foce del Canale Burlamacca (sez. 33- 35), la diminuzione del trasporto longitudinale, e quindi l'accumulo di materiale, è molto limitata, dati i bassi fondali fino ai quali si spingeva il molo.

Sempre dall'analisi dei dati di tab.1 e dalla figura 6, si possono fare, in maniera del tutto analoga, le seguenti considerazioni sul trasporto longitudinale e sulle variazioni della consistenza dei volumi di materiale nei vari tratti nei due successivi periodi.

Periodo 1881 - 1931

Il senso del trasporto longitudinale presenta ancora una divergenza in corrispondenza della foce dell'Arno ed è quindi diretto in senso opposto nei tratti a nord ed a sud di questa.

Il trasporto nel senso N-S raggiunge un massimo nella sez.11 (un pò a sud di Marina di Pisa), per poi diminuire fino al porto di Livorno; rispetto al precedente periodo, il tratto in ripascimento, a partire dalla sez.1, si è quindi esteso verso nord dalla sez. 7 fino alla sez.11, con un incremento di materiale che però è ora di soli 149.000 m^3 annui, perciò minore rispetto a quello del precedente periodo.

Continua l'erosione del tratto 11 - 14 (cioè a Marina di Pisa), con una perdita di ben 191.600 m^3 all'anno in soli 3 Km, e si intensifica la demolizione della foce dell'Arno (sez. 13-16) con una perdita addirittura di 288.300 m^3 annui.

In destra dell'Arno l'erosione risulta di entità maggiore e si è protratta verso nord fino alla sez. 20 (cioè oltre il Gombo), dove il trasporto longitudinale S-N presenta un massimo di 615.100 m^3 all'anno.

La perdita di materiale sul tratto in destra d'Arno (sez. 15-20) è di 306.000 m^3 annui. Malgrado l'apporto solido del Fiume nel tratto tra le sez. 11 - 20, lungo 9,2 Km, sono scomparsi 641.300 m^3 all'anno di materiale.

In tutto il successivo tratto, della lunghezza di 13,2 Km che va dalla sezione 20 fino al porto di Viareggio (sezione 35), si è accentuata la fase di ripascimento rispetto al precedente periodo, con un incremento di materiale di 216.300 m^3 annui.

Periodo 1931-1983

In questo periodo l'inversione del senso prevalente del trasporto longitudinale si verifica tra le sezioni 13 e 14, quindi circa un Km a Sud della foce dell'Arno.

E' opportuno peraltro osservare che l'entità del trasporto nel senso N-S in sinistra d'Arno risulta di entità molto limitata e il valore massimo si è spostato nuovamente verso sud (sezione 7).

Molto limitato risulta quindi il protendimento del litorale che va dalla sezione 7 fino al porto di Livorno (solo 36.700 m^3 di materiale all'anno), mentre diminuisce l'entità dell'erosione del tratto 7-14, comprendente Marina di Pisa (197.600 m^3 all'anno) anche se essa resta sempre apprezzabile.

Continua la fase di demolizione del delta dell'Arno, sia pure in maniera un pò meno intensa rispetto al precedente periodo; fra le sezioni 13 e 16 sono ora scomparsi 216.600 m^3 di materiale all'anno.

Si accentua invece l'erosione in destra dell'Arno, spingendosi ancora verso nord fino alla sez. 21, cioè oltre la foce del Fiume Morto Nuovo (nel tratto 21-23 il trasporto longitudinale è pressochè costante e si verifica una lieve erosione solo per effetto della perdita trasversale di materiale); nel tronco tra le sezioni 15 e 21 la scomparsa di materiale è ora di ben 363.000 m^3 annui.

Si accentua, ancora, in questo terzo periodo, il processo di ripascimento a sud del porto di Viareggio e ciò è dovuto al fatto che il nuovo molo sud, spingendosi in maggiori fondali, arresta in gran parte i sedimenti in movimento nel senso S-N. L'accumulo di materiale tra le sezioni 23 e 35 risulta di 462.000 m^3

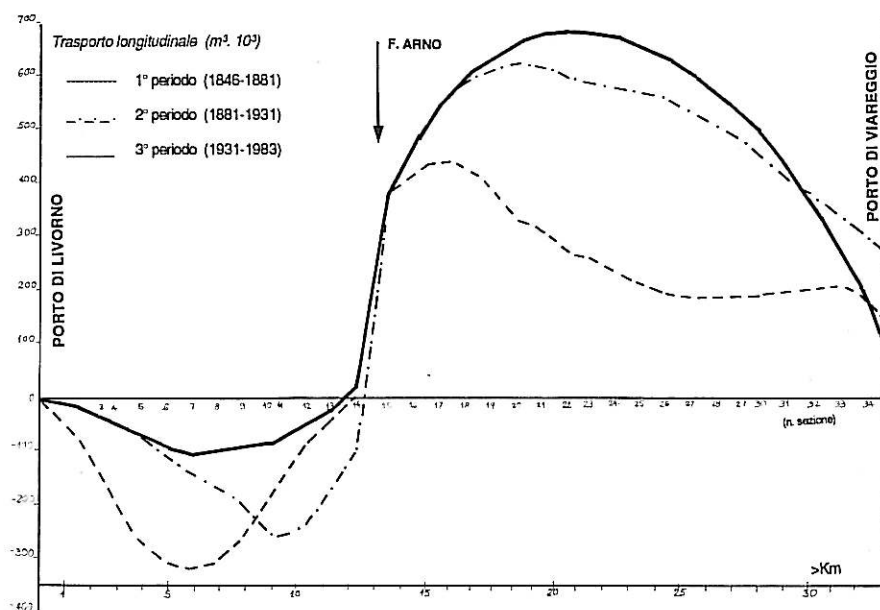


Fig. 6 - Andamento del trasporto solido longitudinale nel tratto di litorale compreso tra i porti di Livorno e di Viareggio dal 1846 al 1983.

all'anno, contro i 216.300 m³ del precedente periodo.

E' da notare che il protendimento del tratto 23-35 va accentuandosi man mano che si avvicina al porto di Viareggio, per la sempre maggior rapidità con cui diminuisce il trasporto nel senso S-N.

Analizzando l'evoluzione dei vari tronchi di litorale nell'intero periodo 1846 - 1983 si nota quanto segue.

L'estremità sud del litorale, che va dalla fine dell'abitato di Tirrenia fino al porto di Livorno (sez. 7-1) è in protendimento ininterrottamente del 1846 ad oggi; la velocità di accrescimento è però andata calando nel tempo, tanto che, attualmente, il litorale si è ormai avvicinato verso una situazione di equilibrio.

Procedendo verso Nord si incontra un tratto che va dall'estremo sud di Tirrenia all'estremo sud di Marina di Pisa (sezioni 7-11) con alterne vicende: in forte erosione nel 1° periodo, in lieve avanzamento nel 2° e di nuovo in erosione nel terzo; è però da rilevare che anche qui le variazioni di consistenza del litorale sono andate fortemente smorzandosi nel tempo.

Restando in sinistra d'Arno, segue il tratto tra le sezioni 11-14, lungo il quale si sviluppa Marina di Pisa, in incessante erosione dal 1846 al 1983.

Anche qui però le erosioni sono andate fortemente riducendosi nel tempo, per effetto delle opere pressochè ininterrotte di difesa dell'abitato, costituite da un doppio ordine di scogliere (radenti e foranee); tuttavia i fenomeni erosivi sono risultati ancora abbastanza gravi anche nell'ultimo periodo, con la scomparsa di 137.500 m³ di materiale all'anno.

E' da notare che in tutto il tratto in sinistra dell'Arno il trasporto longitudinale prevalente è diretto nel senso N-S, con l'eccezione, ma solo per il 3° periodo, di un tratto di appena 1 Km immediatamente a sud del fiume.

Prosegue poi ininterrottamente, a partire dal 1846, il processo di demolizione del delta dell'Arno, con intensità molto forte e non molto variabile nel tempo: anche questo quindi è un fenomeno particolarmente preoccupante, cui occorrerebbe porre un rimedio.

Il fenomeno è imputabile al fatto che, come detto in precedenza, il delta attuale dell'Arno si è formato in epoca recente e non rappresenta perciò il risultato dell'evoluzione del litorale.

Dopo un continuo avanzamento della foce del Fiume dalla prima metà del '600 fino al 1850, non appena l'apporto solido fluviale è risultato inferiore alla capacità di distribuzione dei sedimenti lungo il litorale da parte del moto ondoso, è iniziata la demolizione del delta.

In destra d'Arno il tratto in erosione è andato via via nel tempo prolungandosi verso nord, dalla sezione 17 (2,4 Km a nord della foce) fino alla quale si estendeva nel primo periodo, alla sezione 21 (oltre il Fiume Morto Nuovo) nel terzo periodo; al prolungamento del tratto in erosione si è associato l'intensificarsi del processo erosivo, che è divenuto nel tempo sempre più grave anche perchè investe l'intera tenuta di S. Rossore, dove sorge la Villa Presidenziale.

Man mano che si è prolungato nel tempo verso nord il tratto in destra d'Arno in erosione, si è ovviamente accorciato il successivo tratto in ripascimento che prosegue per 13-14 Km fino al porto di Viareggio. E' tuttavia andata aumentando molto la consistenza del protendimento per il prolungamento a mare dei moli portuali che arrestano in maggior misura il flusso dei sedimenti diretto da sud verso nord (ciò provoca naturalmente fenomeni erosivi sempre maggiori sulla spiaggia di Viareggio a nord del porto).

Considerazioni conclusive sull'evoluzione del litorale

Lo smantellamento del delta dell'Arno in pratica ha avuto inizio quando l'apporto solido del fiume è divenuto inferiore alla capacità di distribuzione dei sedimenti lungo il litorale da parte del moto ondoso.

La tendenza evolutiva naturale del litorale sarebbe stata quella di una demolizione totale del delta, con distribuzione dei sedimenti sia a sud che a nord e con rettificazione della linea di riva, in quanto, in litorali con sabbie sottili, un andamento curvilineo della battigia è instabile. La suddetta rettificazione della battigia avrebbe comportato un arretramento del litorale nei tratti in destra ed in sinistra adiacenti al delta ed un avanzamento dei tratti più lontani, alimentati dai sedimenti provenienti dalla demolizione del delta e dai tratti a questo limitrofi.

Tale tendenza naturale ha avuto perfettamente modo di manifestarsi a nord della foce, dove l'antropizzazione è scarsa, con erosioni molto intense nel primo tratto ed avanzamenti altrettanto cospicui man mano che ci si avvicina al porto di Viareggio, nelle vicinanze del quale la battigia è avanzata di 770 m dal 1850 al 1983 (quasi 400 m dopo il 1939).

A sud della foce la tendenza naturale del litorale non ha avuto modo di manifestarsi per effetto delle scogliere realizzate a difesa dell'abitato di Marina, che hanno anche alterato l'equilibrio del tratto di litorale immediatamente a sud.

Per trovare il punto del litorale in cui ha inizio un incessante avanzamento dal 1850 ad oggi occorre giungere a circa 800 m a nord dal largo Belvedere di Tirrenia.

Infatti, essendo il trasporto longitudinale prevalente diretto nel senso N-S, il tratto di litorale, che si trova immediatamente sottoflutto alle scogliere foranee realizzate, ha incominciato a subire delle erosioni che si sono propagate sempre più a sud man mano che procedeva la realizzazione delle scogliere stesse.

Le scogliere quindi, pur difendendo il litorale retrostante, in quanto arrestano il moto ondoso ad una certa distanza dalla costa, hanno effetti negativi a sud, effetti che sarebbe opportuno limitare con appropriati interventi.

In conclusione, i fenomeni erosivi immediatamente a sud dell'Arno sono dovuti ad un deficit di sedimenti, essendo l'apporto solido del Fiume notevolmente diminuito nel tempo, fino a risultare insufficiente a compensare il trasporto solido longitudinale e le perdite di materiale dovute all'asportazione verso il largo da parte del moto ondoso; all'erosione che si è manifestata nel tratto di litorale a sud di Marina ha contribuito anche la realizzazione delle scogliere, che intercettano parte del trasporto longitudinale in arrivo nel tratto stesso. Questo è confermato anche dal fatto che le erosioni si sono propagate verso sud man mano che le scogliere sono state prolungate, senza lo studio di un piano organico di interventi sull'intero tratto di litorale che prevedesse l'orientamento, la distanza dalla battigia e la lunghezza dei vari segmenti di scogliera e prevedesse, soprattutto, fin dove occorreva spingere a sud la realizzazione delle scogliere stesse.

E' da notare che, mentre per un primo tratto della lunghezza di circa 2,5 Km partendo dalla foce dell'Arno sono state realizzate sia scogliere radenti che foranee ad una distanza di circa 100 m dalla battigia, nel successivo tratto sono state eseguite, per circa 1 Km, delle difese in massi o di tipo radente o vicinissime alla riva (a 10-20 m al più), spesso per iniziativa degli stessi proprietari dei Bagni, costretti a ciò dal propagarsi verso Sud del fenomeno erosivo.

Il successivo tratto di litorale in arretramento, della lunghezza di 1.500 m, che si estende dal punto ove cessano le opere di difesa (quindi a 3,5 Km a sud della foce dell'Arno) fino a 800 m a nord del Largo Belvedere di Tirrenia, non ha alcuna opera a mare che possa contenere l'erosione ed è quindi quello che più necessita di interventi.

Apporti di materiale solido al litorale da parte dei corsi d'acqua

I corsi d'acqua che sfociano nel tratto di litorale in esame sono, a partire da sud, il Calambrone, l'Arno, il Fiume Morto ed il Serchio, dei quali solo l'Arno alimenta efficacemente il litorale con il suo apporto solido.

Infatti il Serchio ha un bacino imbrifero di limitata estensione (1040 Km²) rispetto a quello dell'Arno ed inoltre gli sbarramenti esistenti lungo il corso d'acqua e i suoi affluenti ed altri interventi effettuati hanno ridotto a valori minimi il trasporto solido: quello in sospensione è stato stimato in soli 15.000 m³ all'anno e quello di fondo è ancora minore.

Apporto solido dell'Arno

Il fiume Arno ha un bacino imbrifero della superficie di 8.229 Km² (che agli effetti della legge 183/1989 arriva a 9.116 km²) e con le sue torbide alimenta il litorale verso sud fino al porto di Livorno e verso nord fin oltre il porto di Viareggio.

Sul Fiume è in funzione dal 1936 una stazione di misura del trasporto solido in sospensione a S. Giovanni alla Vena, a 35 Km dalla foce; la validità delle misure può essere estesa fino alla sezione terminale del corso d'acqua, poichè a valle di S. Giovanni alla Vena il Fiume scorre arginato e non riceve più alcun apporto, nè liquido nè solido.

Nella fig. 7 è riportato l'andamento del trasporto solido annuo in sospensione, calcolato come media in successivi trienni, nel periodo 1936-1974, con l'interruzione nel periodo 1942-1954, per la distruzione della stazione di misura durante la guerra.

Si nota, fino al 1962, una continua oscillazione del trasporto torbido che dipende da fattori contingenti, quali, ad esempio, il numero annuo di piene di una certa entità, il periodo in cui esse si verificano per la diversa degradabilità del bacino, ecc.. Dal 1962 in poi si ha invece una progressiva diminuzione del trasporto torbido nel tempo, fino al 1974, che è da attribuire a interventi sul corso d'acqua e, soprattutto, ai massicci prelievi di inerti dall'alveo nel decennio 1960-1970.

E' da rilevare che non tutto il trasporto in sospensione del Fiume risulta utile per il ripascimento del litorale, in quanto quello di granulometria più sottile viene disperso al largo dalla corrente fluviale. Al riguardo è da far presente che i moli alla foce dell'Arno, che si spingono in mare per un lungo tratto e fino a notevoli profondità, e che sono necessari per assicurare la navigabilità del fiume, rendono più difficile la sedimentazione delle torbide in bassi fondali, favorendone la dispersione al largo e quindi riducono l'alimentazione del litorale, contribuendo al verificarsi dei fenomeni erosivi.

Nel tratto di costa tra i porti di Livorno e Viareggio le sabbie più sottili si trovano in corrispondenza della foce del Calambrone, dove, ad una distanza di 150 m dalla battigia, le dimensioni minime dei grani sono 0,06 mm. Da analisi granulometriche per sedimentazione effettuate sulle torbide dell'Arno (fig. 8), si è visto che solo il 22% di esse è di dimensioni superiori a 0,06 mm e risulta perciò utile per l'alimentazione del litorale, mentre il restante 78% viene disperso al largo dalla corrente fluviale e dal moto ondoso. Per

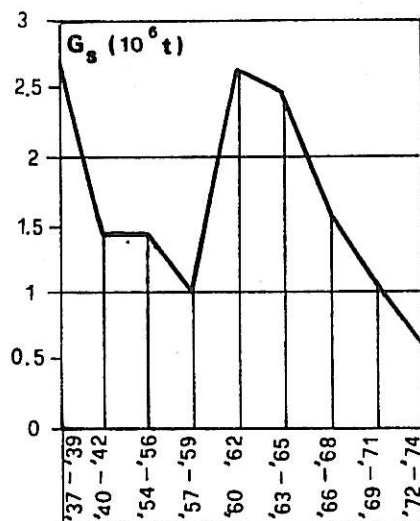


Fig. 7 - Variazioni nel tempo del trasporto solido in sospensione.

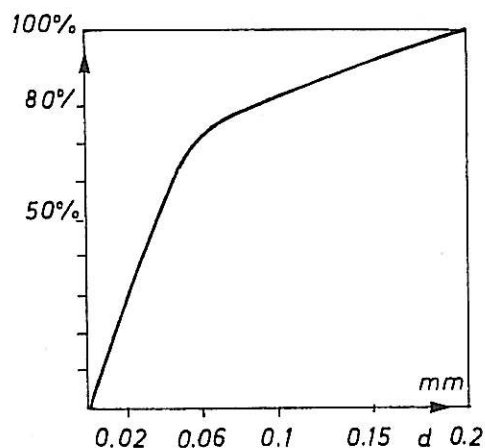


Fig. 8 - Curva granulometrica delle torbide dell'Arno.

ottenere quindi gli apporti solidi efficaci dell'Arno, i trasporti di fig.7 vanno moltiplicati per 0,22 e ad essi va poi sommato il trasporto solido di fondo, che è però di entità molto minore.

Infatti il trasporto sul fondo valutato applicando la formula di Meyer-Peter e tenendo conto della granulometria del materiale, della frequenza delle portate liquide (suddivisa in classi di ampiezza molto piccole per le maggiori portate) e delle pendenze motrici corrispondenti alle portate stesse, risulta pari, in questi ultimi tempi, a 10.000- 15.000 m³ annui (Milano 1986).

Non sono ancora disponibili presso l'Ufficio Idrografico di Pisa dati sul trasporto torbido dell'Arno a S. Giovanni alla Vena successivi al 1974, tuttavia esistono validi motivi per ritenere che esso abbia ripreso in questi ultimi anni ad aumentare, motivi su cui si riferirà in seguito.

Il fenomeno dell'interrimento della foce e del tronco terminale dell'Arno

Il tronco terminale dell'Arno è classificato come porto di 4° classe della 2° categoria. Attualmente la golena in sinistra del suddetto tronco fluviale dispone di attrezzature idonee per l'ormeggio di 2500-3000 imbarcazioni; è inoltre notevolmente sviluppata la cantieristica navale da diporto, che costituisce una delle attività economiche più fiorenti della zona.

I punti di ormeggio sono normati con deliberazione del C.R. n. 258 del 27/05/1992 relativa al "Piano Regionale di coordinamento dei porti ed approdi turistici della Toscana".

Sempre nella stessa deliberazione viene individuata un'area in darsena in foce d'Arno da destinare a Porto Turistico della capacità di 500 posti barca.

La corrente fluviale non è però in grado di evitare la tendenza all'interrimento della foce del corso d'acqua per effetto del deposito sia di una parte del trasporto solido del fiume che dei sedimenti che vengono sospinti dal moto ondoso; ciò rende molto precario, e in alcuni periodi impossibile, l'accesso in Arno dal mare, creando gravi disagi alla nautica da diporto e a tutte le attività ad essa collegata e dando luogo a situazioni di pericolo, proprio in coincidenza delle mareggiate di una certa violenza, quando maggiore è l'esigenza per l'imbarcazioni che si trovano in mare di trovare un approdo sicuro lungo la sponda sinistra attrezzata del fiume.

E' da notare che il fenomeno descritto si verifica malgrado l'esistenza dei due moli alla foce dell'Arno, che si spingono ben oltre la linea di battigia; moli realizzati con il previsto scopo di rendere navigabile il

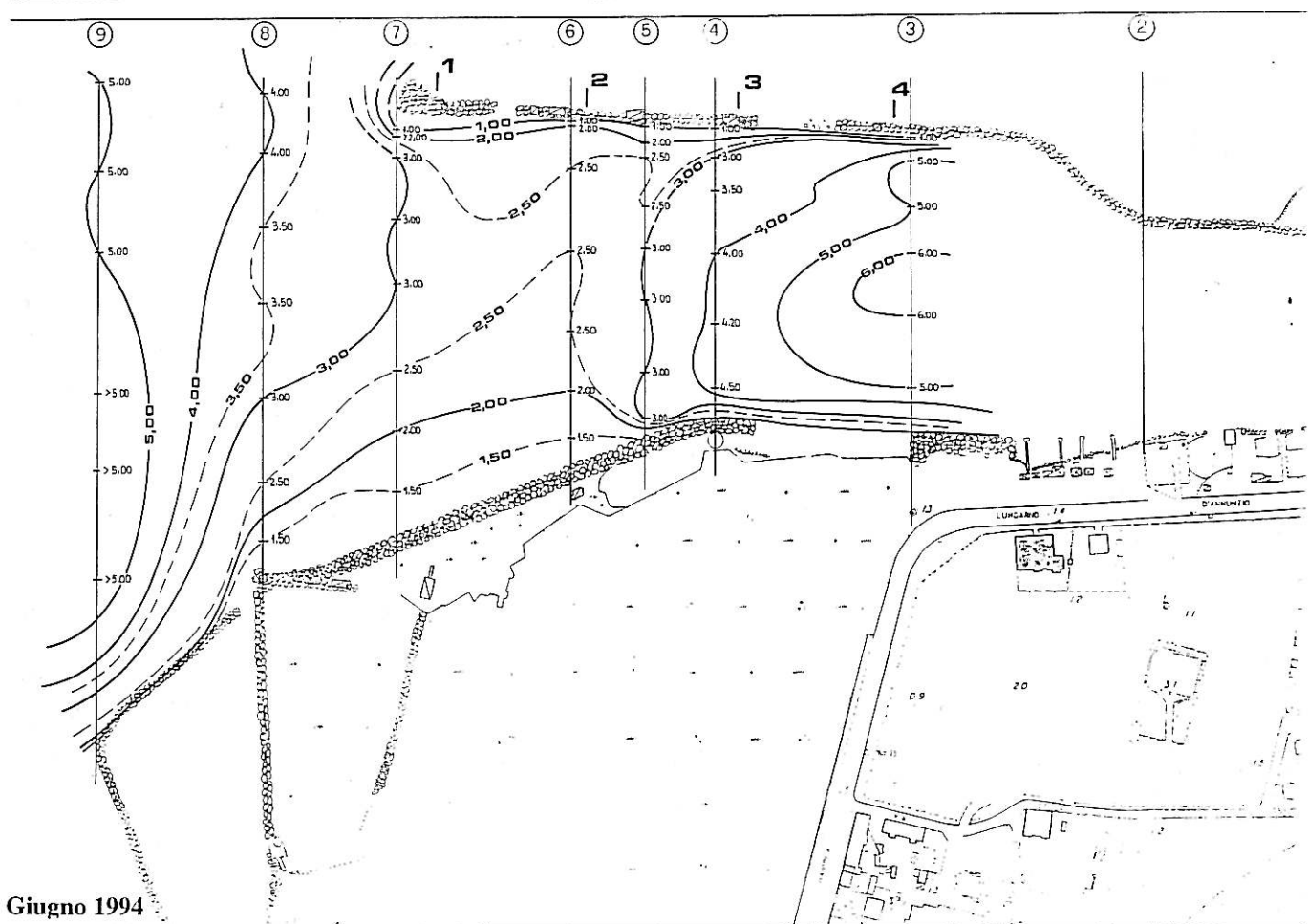
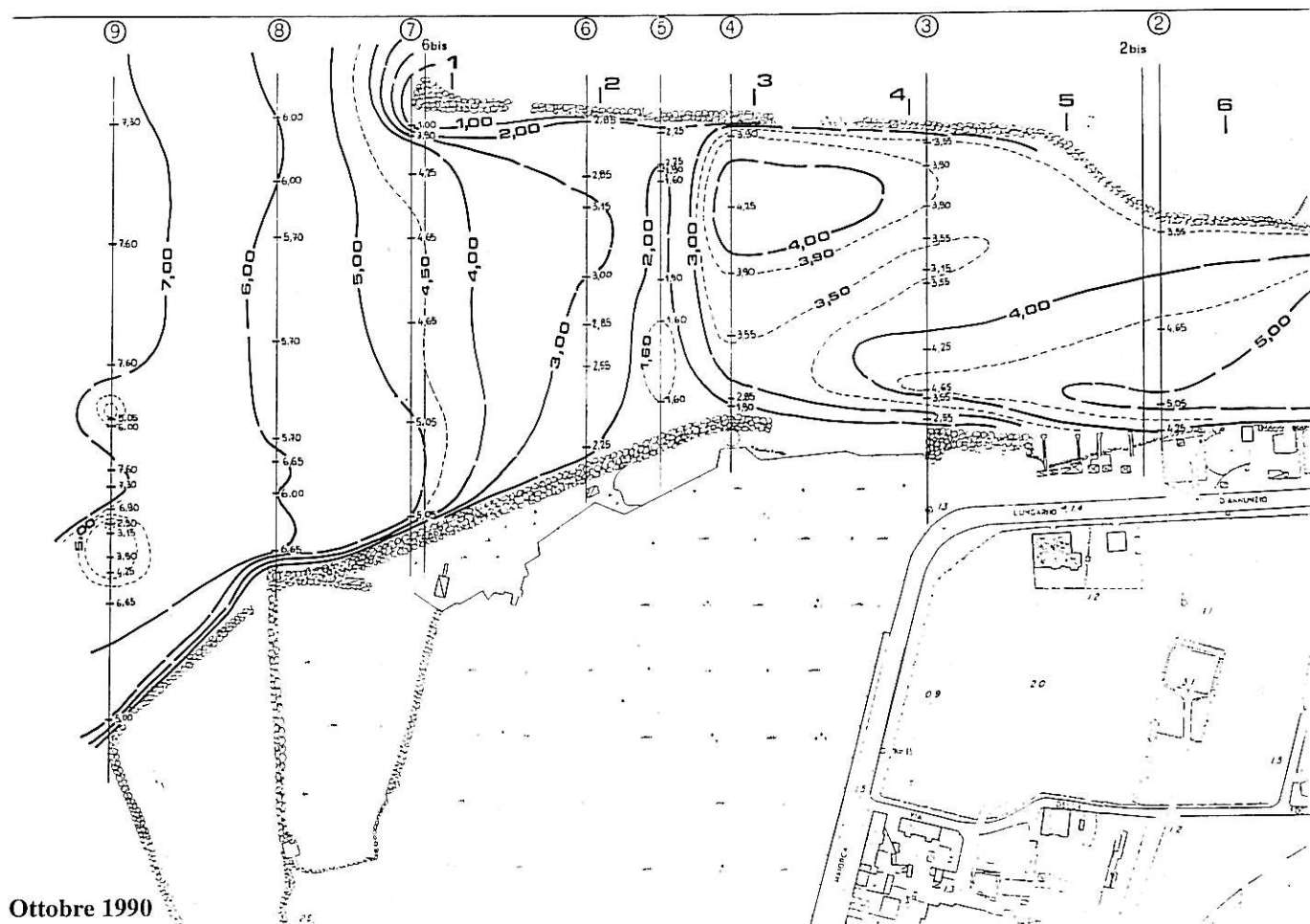


Fig. 9 - Rilievi batimetrici del tronco terminale dell'Arno, effettuati nell'ottobre 1990 e nel giugno 1994. Si noti il basso fondale in corrispondenza della foce.

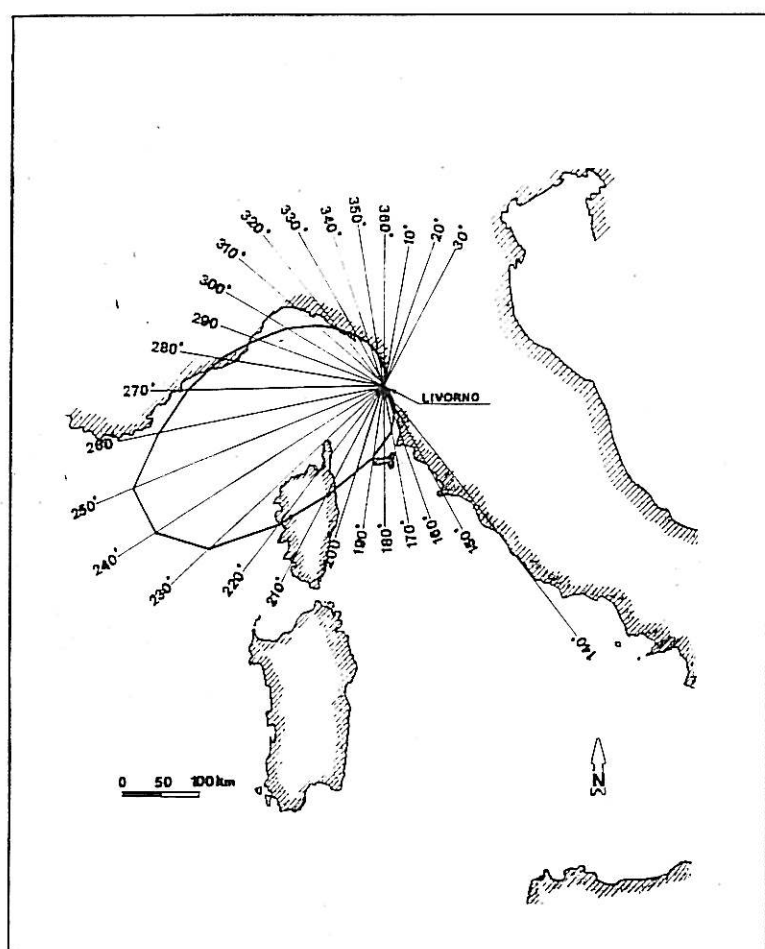


Fig. 10 - Settore di traversia e lunghezze di fetch efficace del litorale pisano.

perciò la stima indiretta del moto ondoso mediante opportuni metodi di previsione.

Il vento esercita, inoltre, un'azione diretta sui litorali sabbiosi, di entità non trascurabile se le spiagge sono costituite da sedimenti molto fini, come nel caso del litorale pisano.

Il regime dei venti può essere studiato esaminando i dati disponibili delle varie stazioni anemometriche ubicate sulla costa o nell'immediato entroterra nei pressi del paraggio in esame e delle stazioni di importanza non minore, che si trovano nell'area di generazione del moto ondoso, su delle isole o lungo la costa.

Il gran numero delle stazioni anemometriche, per le quali sono disponibili i dati relativi a periodi di funzionamento abbastanza estesi, consente di acquisire una soddisfacente conoscenza del regime dei venti lungo il litorale pisano e in mare aperto nell'area di generazione delle onde.

Pertanto i dati relativi alle diverse stazioni non sempre risultano sufficientemente in accordo tra di loro e vanno perciò analizzati criticamente; infatti, la direzione e la velocità del vento risultano alterate dalle condizioni orografiche locali delle stazioni di rilevamento. Per quanto riguarda la velocità, i venti foranei rilevati risultano notevolmente attenuati nell'entroterra, anche a modeste distanze dalla costa (è questo, ad esempio il caso della stazione di Pisa S. Giusto); la velocità del vento aumenta poi in misura non trascurabile al crescere della quota di rilevamento.

Per quanto riguarda invece la direzione, nulla si può in genere dire a priori sul modo in cui questa viene alterata dall'orografia della stazione di rilevamento.

Le stazioni anemometriche prese in esame sono quelle dell'Istituto Idrografico della Marina Militare, dell'Aeronautica Militare e altre stazioni di Enti Pubblici.

Nelle stazioni della Marina il vento viene rilevato tre volte al giorno (alle ore 8-14-19); i dati pubblicati hanno però una risoluzione notevolmente inferiore a quella dei rilevamenti, essendo la velocità del vento trasformata in "Forza" della scala Beaufort e le direzioni di provenienza raggruppate in settori di 45° di ampiezza (in alcuni casi addirittura di 90°).

L'Aeronautica Militare effettua, invece, rilevamenti ogni tre ore, rilevando la velocità del vento con l'approssimazione di un nodo e raggruppando le direzioni in settori di ampiezza di 10°; tuttavia, anche in questo caso, i dati statistici pubblicati hanno una minore risoluzione.

Nella figura 11 è indicata l'ubicazione delle stazioni prese in esame, mentre nella tabella 2 sono indicate, per le varie stazioni, l'Ente di appartenenza, la quota sul l.m. e il periodo di disponibilità dei dati; nella tabella 3 sono poi riportate la velocità del vento corrispondenti ai diversi valori della "Forza", secondo la scala Beaufort.

Un esame dei dati statistici del vento rilevati nelle diverse stazioni è sintetizzato di seguito.

Livorno (Istituto Idrografico della Marina)

Nella figura 12 è riportato il diagramma di frequenza dei venti, suddivisi per classi di velocità, secondo le varie direzioni ed il diagramma di frequenza delle burrasche di vento (Forza 7-12). Si può osservare che i venti regnanti sono quelli da NE, che però sono di terra, mentre tra i venti foranei sono regnanti quelli da SW (Libeccio) e da W (Ponente); vento dominante è il Libeccio, seguito, con frequenza molto minore, dal Ponente. Si nota la completa assenza di burrasca di vento nel settore compreso tra 315° e 90°.

Esaminando i venti per assi di provenienza, si osserva che la maggior frequenza compete ai venti dell'asse NE-SW, seguiti da quelli dell'asse E-W.

Capraia (Istituto Idrografico della Marina)

La stazione è ubicata in mare aperto a S-SW del litorale Pisano, ma si trova a quota molto elevata. Rispetto alla stazione di Livorno I.I.M. si nota una rotazione di 90° dell'asse dei venti più frequenti,

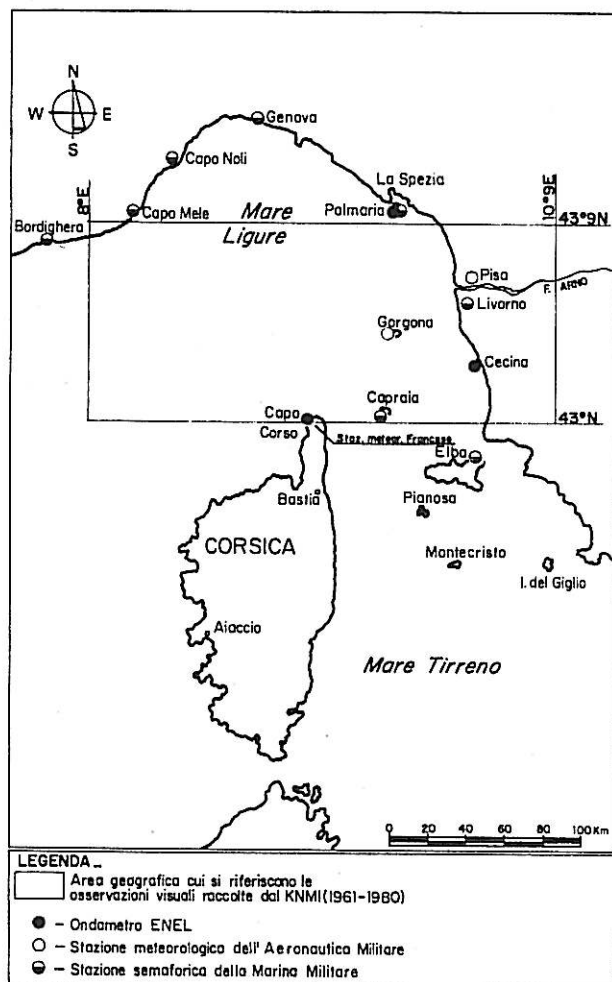


Fig. 11 - Corografia generale con la localizzazione delle stazioni di rilevamento.

Tab. 2 - Ubicazione e caratteristiche delle stazioni anemometriche.

| <i>Stazioni</i> | <i>Ente</i> | <i>Quota (m.s.m.)</i> | <i>Periodo disponibilità dati</i> |
|---------------------|------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| LIVORNO | I.I.M. | 19 | 1931-1937; 1950-1963 |
| CAPRAIA | I.I.M. | 441 | 1930-1942; 1949-1952 |
| ELBA MONTEGROSSO | I.I.M. | 348 | 1930-1942; 1947-1960 |
| PALMARIA | I.I.M. | 201 | 1930-1942; 1947-1963 |
| PISA S.GIUSTO | A.M. | 11 | in funzione dal 1951 |
| GORGONA | A.M. | 255 | 1951-1973 |
| ELBA-PUNTA CALAMITA | A.M. | 396 | 1951-1974 |
| PIANOSA | A.M. | 15 | 1951-1976 |
| LIVORNO | COMUNE | | 1857-1976 |
| VIAREGGIO | COMUNE | 4 | 1948-1968 |
| S. ROSSORE | C.N.R. | 2 | 1975-1977 |
| CAPO CORSO | Serv. Met. Fran. | 110 | 1949-1976 |

Tab. 3 - Velocità del vento corrispondenti ai diversi valori della Forza secondo la scala Beaufort.

| <i>Forza Beaufort</i> | <i>Nodi</i> | <i>Velocità equiv. in Km/h</i> | <i>Velocità equiv. in m/s</i> |
|-----------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 0 | <1 | <1 | 0- 0,2 |
| 1 | 1-3 | 1-5 | 0,3-1,5 |
| 2 | 4-6 | 6-11 | 1,6-3,3 |
| 3 | 7-10 | 12-19 | 3,4-5,4 |
| 4 | 11-16 | 20-28 | 5,5-7,9 |
| 5 | 17-21 | 29-38 | 8,0-10,7 |
| 6 | 22-27 | 39-49 | 10,8-13,8 |
| 7 | 28-33 | 50-61 | 13,9-17,1 |
| 8 | 34-40 | 62-74 | 17,2-20,7 |
| 9 | 41-47 | 75-88 | 20,8-24,4 |
| 10 | 48-55 | 89-102 | 24,5-28,4 |
| 11 | 56-63 | 103-117 | 28,5-32,6 |
| 12 | 64 ed oltre | 118 ed oltre | 32,7 ed oltre |

che a Capraia sono quelli delle direzioni SE e NW; elevata frequenza hanno anche i venti da NE e da W.

I venti dominanti sono quelli da NE (che però non danno luogo a agitazione ondosa sul litorale pisano) e quelli da W, seguiti da quelli da SW e da NW.

Se ci si riferisce solo ai venti foranei per il litorale pisano, si nota che, come a Livorno, le burrasche di vento provengono dal settore W-SW, con uno spostamento della direzione prevalente da SW (a Livorno) a W (a Capraia).

Elba Montegrosso (Istituto Idrografico della Marina)

Si nota una notevole rassomiglianza del diagramma di frequenza dei venti di questa stazione con quello della stazione di Capraia; anche a Montegrosso sono infatti regnanti i venti dell'asse SE-NW.

Diversa è invece la situazione relativa alle burrasche di vento; infatti, pur essendo anche a Montegrosso molto frequenti le burrasche da W, i venti dominanti sono quelli da SE, mentre a Capraia erano quelli da NE.

Si osserva una discreta analogia tra il diagramma di frequenza dei venti di questa stazione e quello di Livorno; anche a Palmaria i venti regnanti sono infatti quelli dell'asse NE-SW. Rispetto a Livorno, si nota però una maggior frequenza dei venti da N e una minor frequenza dei venti da E.

Per quanto riguarda le burrasche di vento, a Palmaria risulta dominante, oltre al Libeccio (come a Livorno), anche il Grecale, che però è vento di terra per il litorale pisano.

Pisa S. Giusto (Aeronautica Militare)

Per questa e per le altre stazioni dell'Aeronautica Militare la rosa dei venti risulta divisa in 16 settori anziché in 8, per cui si hanno indicazioni più precise sulla direzione del vento.

Dal diagramma di figura 13 a) si deduce che sono regnanti i venti del settore E-SE (da 90° a $112,5^\circ$), con elevate frequenze anche dei venti dei due settori adiacenti (da $67,5^\circ$ a 90° e da 90° a $112,5^\circ$).

Fra i venti foranei risultano regnanti quelli da 225° - $247,5^\circ$ (SW-WSW), seguiti immediatamente da quelli del settore $247,5^\circ$ - 270° (W-WSW) che hanno una frequenza di poco inferiore; sempre tra i venti di mare una discreta frequenza hanno anche quelli dei due settori adiacenti a quelli sopra citati (da $202,5^\circ$ a 225° e da 270° a $292,5^\circ$).

La direzione dei venti regnanti risulta a Pisa molto prossima al levante, perciò ruotata di 45° rispetto al Grecale, che risulta regnante a Livorno e alla Palmaria; per quanto riguarda le frequenze dei venti foranei, si nota, invece, un accordo dal punto di vista qualitativo tra Pisa e le due suddette stazioni.

Se si fa riferimento alle burrasche di vento ($V > 24$ nodi), si vede che è dominante il vento da SW come a Livorno e alla Palmaria (figura 13 b), ma i venti più intensi provengono con una elevata frequenza anche da S e da NE (quest'ultima direzione era frequente anche a Palmaria).

Gorgona (Aeronautica Militare)

Questa stazione, essendo ubicata in mare aperto al largo del litorale pisano, è la più significativa per quanto riguarda la formazione del moto ondoso, anche se si trova a quota piuttosto elevata.

Dal diagramma di figura 14 si nota un'analogia delle frequenze dei venti di questa stazione con quelle di Capraia e Elba Montegrosso; anche a Gorgona i venti regnanti sono infatti quelli dell'asse SE-NW.

Diversa è la situazione se si considerano solo i venti di velocità maggiore di 24 nodi (venti dominanti): alla Gorgona sono dominanti i venti del settore 225° - $247,5^\circ$ (SW-WSW), ma i venti con il $V > 24$ nodi

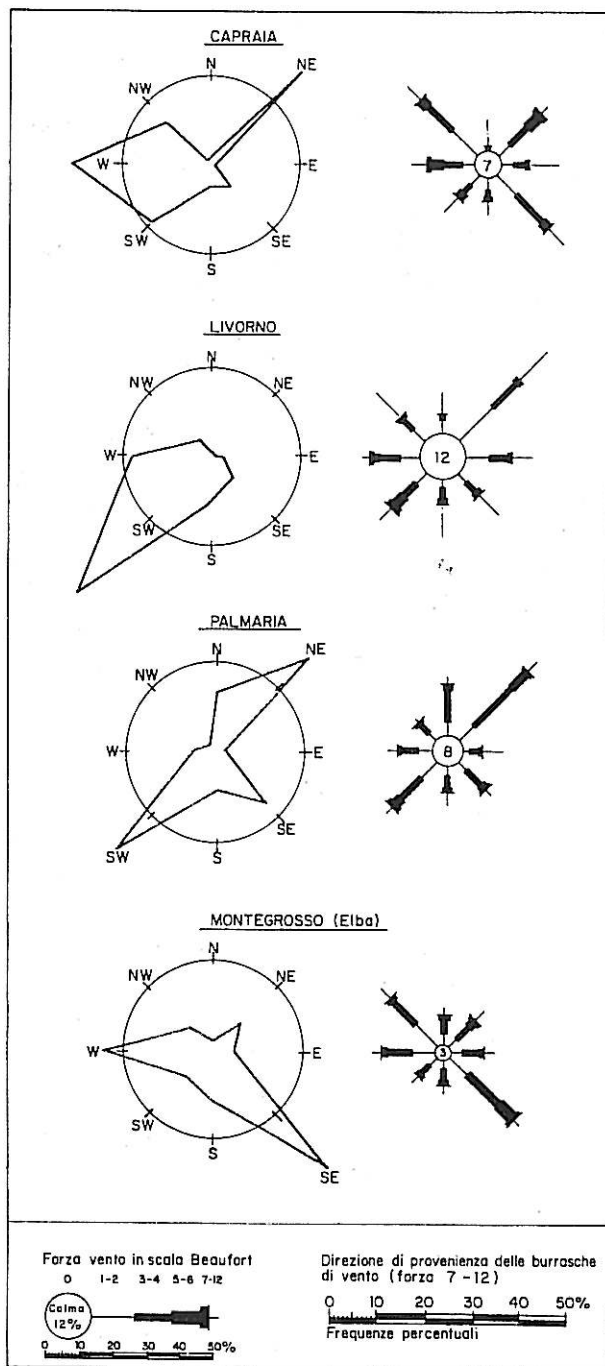


Fig. 12 - Frequenze medie in percentuale dei venti (dedotte da tre osservazioni giornaliere) e direzione di provenienza delle burrasche di vento.

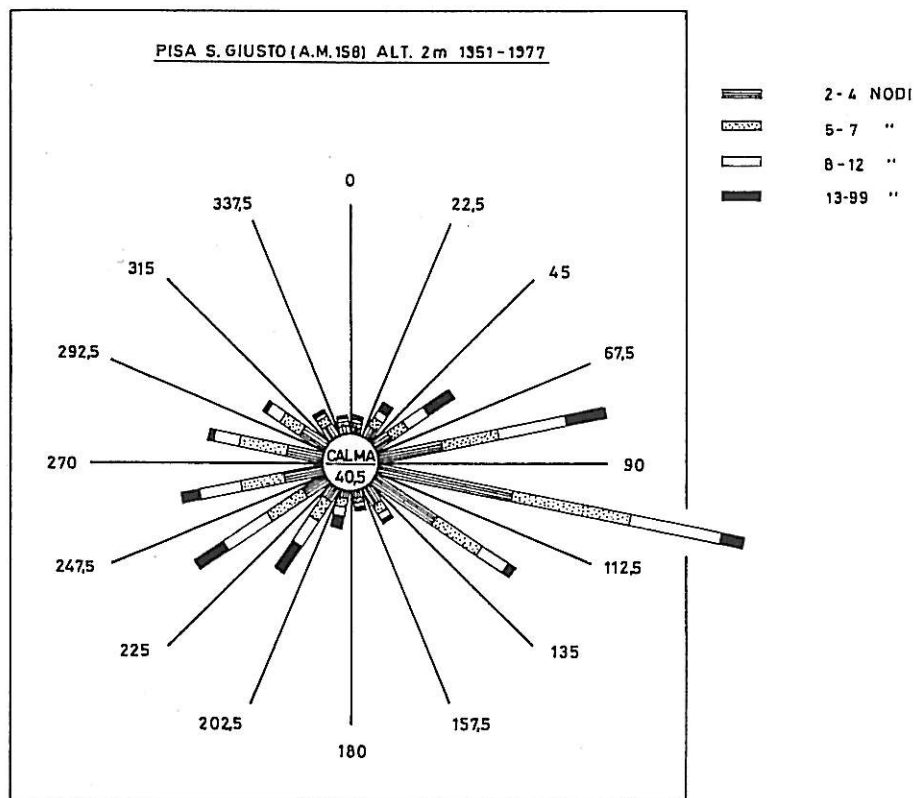


Fig. 13 a - Frequenza dei venti per classi di velocità alla stazione di Pisa S. Giusto (cm 0.375=1 %).

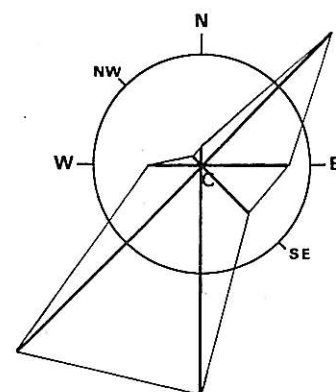


Fig. 13 b - Frequenza dei venti con velocità > 24 nodi alla stazione di Pisa S. Giusto.

spirano con elevate frequenze da tutte le direzioni da 202,5° a 292,5° e dal settore 112,5°-157,5° (cioè intorno a SE). Si hanno pertanto differenze apprezzabili rispetto a Capraia e Elba Montegrosso; se ci si riferisce solo ai venti foranei per il litorale pisano, si nota alla Gorgona uno spostamento dei venti dominanti dalla direzione W, che si aveva nelle due citate stazioni, verso la direzione SW-WSW.

Elba Punta Calamita (Areonautica Militare)

Per quanto riguarda la frequenza dei venti, si nota una certa analogia con le stazioni di Elba Montegrosso, Capraia e Gorgona (figura 15): i venti regnanti risultano a Punta Calamita quelli dell'asse SSE-NNW, perciò ruotati di soli 22°30' rispetto ai venti regnanti delle tre precedenti stazioni citate, che erano quelli dell'asse SE-NW; però, a differenza di tali stazioni, a Punta Calamita presentano elevata frequenza anche i venti intorno a NE.

Le direzioni dei venti dominanti ($V > 24$ nodi) sono pressochè coincidenti con quelle di Elba Montegrosso, con una lieve rotazione delle burrasche di vento dalla direzione SE (Montegrosso) verso la direzione SSE (Punta Calamita); in entrambe le stazioni una discreta frequenza hanno i venti forti di ponente.

Pianosa (Areonautica Militare)

In questa stazione l'asse dei venti regnanti risulta molto prossimo alla direzione N-S- (figura 16), perciò ruotato in senso orario di 22°30' rispetto a quello di Punta Calamita e di 45° rispetto a quello di Capraia, Montegrosso e Gorgona. Trovandosi Pianosa in mare aperto, i venti forti provengono da varie direzioni, come accadeva anche per Gorgona; direzioni dei venti dominanti risultano infatti, oltre a quelle prossime all'asse N-S, anche a quelle intorno al NE e al SE:

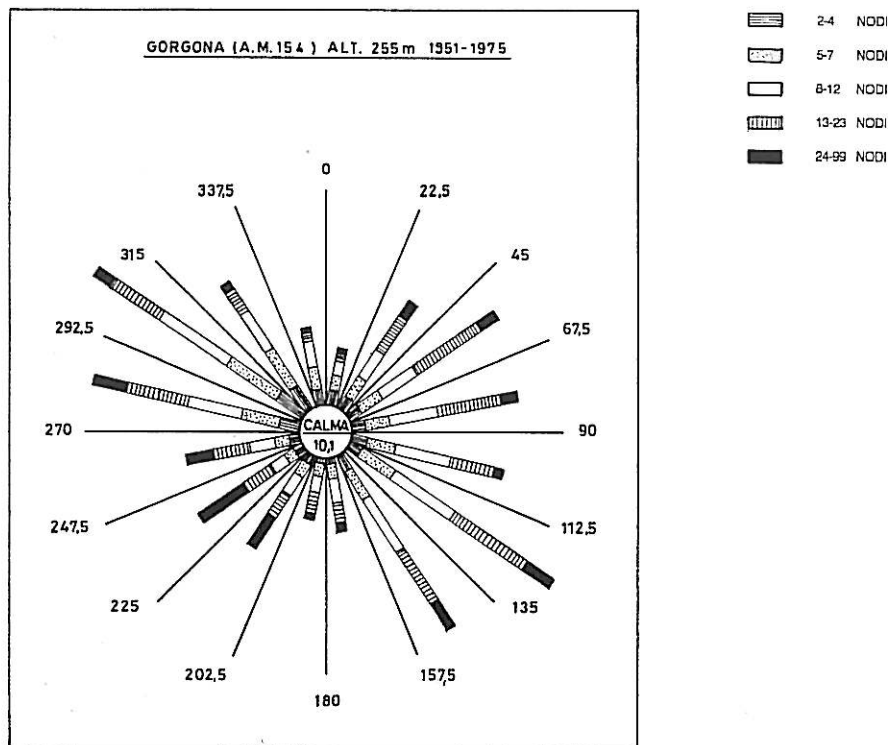


Fig. 14 - Venti alla stazione della Gorgona (cm 0.375=1%).

Livorno (Osservatorio Comunale)

I rilevamenti di questa stazione, ubicata nel centro urbano, sono stati elaborati da Meini, Mucci e Vittorini per un periodo estremamente esteso (120 anni) e sono riportati in tabella 4.

Da tali dati si possono osservare alcune variazioni nel tempo del regime dei venti, che peraltro risultano contenute, anche se non completamente trascurabili.

Se si fa riferimento all'intero periodo di osservazione, risulta regnante il vento di NE (19,8%), come nella stazione di Livorno dell'I.I.M. (figura 12); seguono il Ponente (17,7%), il Levante (16,2%) e il SO (12%). Il regime dei venti è quindi sostanzialmente analogo a quello che si deduce dai dati della stazione dell'I.I.M.; nell'Osservatorio Comunale si nota però una maggior frequenza del Ponente e una minore frequenza del Libeccio, a conferma dell'alterazione che subisce la velocità del vento sulla terraferma.

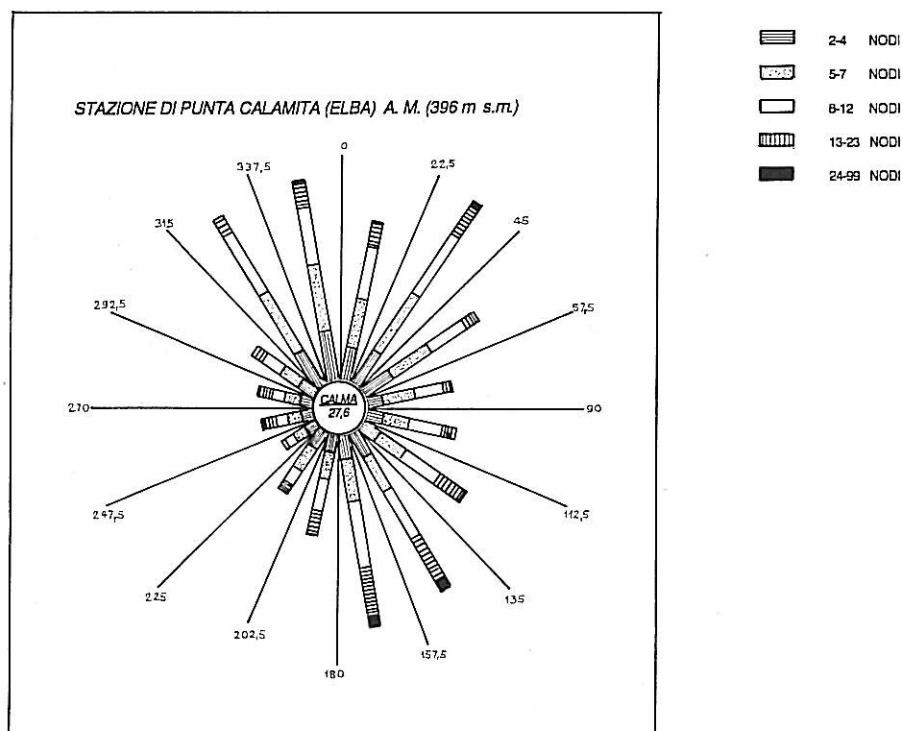


Fig. 15 - Frequenza dei venti per classi di velocità alla stazione Punta Calamita (cm 0.375=1%).

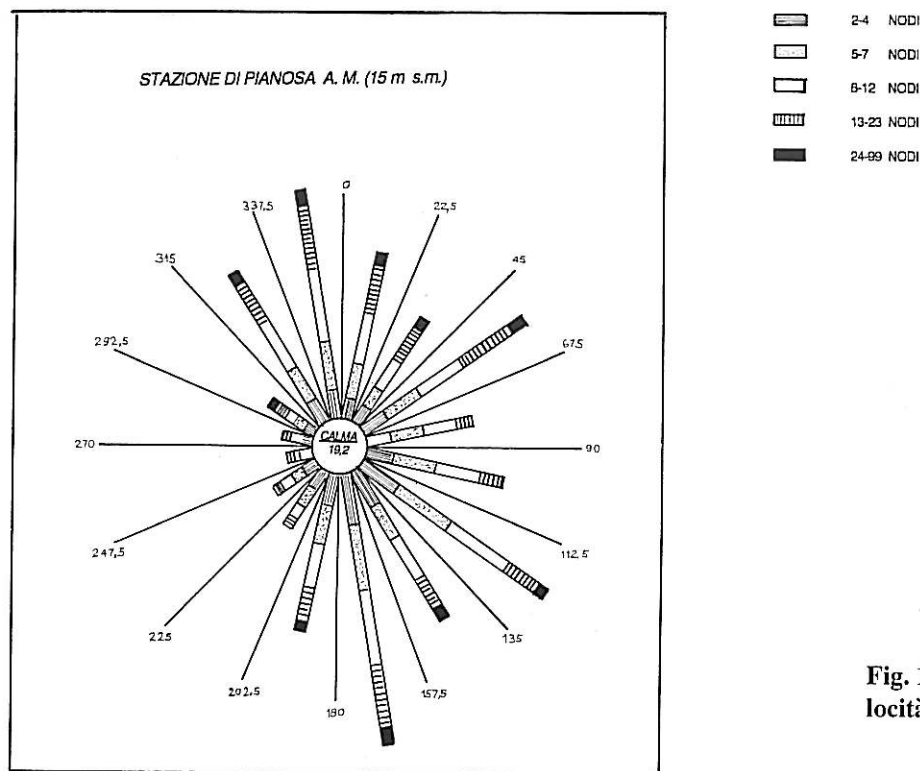


Fig. 16 - Frequenza dei venti per classi di velocità alla stazione di Pianosa (cm 0.375=1%).

Se ci si riferisce alle frequenze dei venti con $V > 37$ Km/h, si nota che risulta dominante il Libeccio, seguito dal Ponente, come nella stazione I.I.M.

Viareggio (Osservatorio Comunale)

La stazione era ubicata sul lungomare e sono disponibili solo i dati relativi alla frequenza complessiva del vento secondo le varie direzioni (figura 17 e tabella 5).

Tab. 4 - LIVORNO (Osservatorio Comunale) Periodo 1857-1976 - Medie decennali delle frequenze percentuali dei venti secondo le otto direzioni principali.

| Periodo di osservazione | N | NE | E | SE | S | SO | O | NO | Calme |
|-------------------------|-----|------|------|-----|------|------|------|------|-------|
| 1862/1867 | 4,3 | 22,7 | 14,6 | 2,6 | 9,0 | 12,1 | 17,5 | 6,6 | 10,6 |
| 1867/1870 | 5,3 | 19,8 | 14,5 | 4,0 | 9,2 | 10,3 | 17,4 | 7,4 | 12,1 |
| 1878/1881 | 3,3 | 23,3 | 17,7 | 2,4 | 9,2 | 12,0 | 19,5 | 5,4 | 12,2 |
| 1882/1885 | 4,0 | 20,2 | 11,8 | 2,7 | 8,8 | 11,6 | 19,0 | 6,8 | 15,1 |
| 1887/1896 | 4,2 | 24,4 | 13,4 | 2,8 | 8,0 | 10,4 | 19,4 | 9,3 | 11,1 |
| 1897/1906 | 4,6 | 27,4 | 7,3 | 4,0 | 10,4 | 14,2 | 13,7 | 8,7 | 12,8 |
| 1907/1916 | 2,1 | 19,7 | 14,4 | 3,3 | 12,1 | 11,5 | 22,9 | 6,6 | 7,5 |
| 1917/1926 | 3,3 | 19,6 | 12,5 | 1,9 | 14,3 | 18,0 | 17,2 | 4,0 | 9,2 |
| 1927/1936 | 3,0 | 15,5 | 17,9 | 3,0 | 11,5 | 14,8 | 22,2 | 5,4 | 9,2 |
| 1937/1942 | 3,8 | 18,3 | 18,4 | 4,7 | 6,4 | 9,2 | 18,7 | 13,3 | 10,5 |
| 1951/1956 | 0,2 | 13,9 | 24,4 | 2,8 | 13,5 | 14,4 | 17,4 | 4,9 | 8,7 |
| 1957/1966 | 2,1 | 16,4 | 21,6 | 7,5 | 9,4 | 13,1 | 12,2 | 6,3 | 11,4 |
| 1967/1976 | 4,4 | 18,9 | 22,8 | 7,2 | 8,3 | 7,8 | 13,5 | 8,0 | 12,1 |
| 1862/1976 | 3,0 | 19,8 | 16,2 | 3,5 | 10,0 | 12,0 | 17,7 | 7,1 | 11,0 |

Vento regnante risulta il Levante, come a Pisa S. Giusto; rispetto a questa stazione si osserva una frequenza molto maggiore del Maestrale (NW).

San Rossore (Pisa)

Si tratta dell'elaborazione effettuata da Rapetti e Vittorini sui dati dei venti registrati da una capannina meteorica installata a S. Rossore dagli stessi ricercatori; malgrado il periodo di osservazione sia di soli due anni (1975/1977), i dati risultano abbastanza significativi (figura 18).

Si nota una discreta analogia con il diagramma dei venti della Gorgona: regnanti risultano a S. Rossore i venti del settore ESE-SE, seguiti da quelli dell'asse E-W; dominanti sono invece i venti del settore W-SW (Ponente-Libeccio).

Capo Corso (Servizio Meteorologico Francese)

Per questa stazione risultano sia regnanti che dominanti i venti delle direzioni intorno al Ponente; apprezzabili frequenze, sia complessive che relative solo ai venti più forti, si hanno secondo tutte le altre direzioni, tranne quelle dei due settori, ciascuno di ampiezza di circa 50°, aventi come assi le direzioni N e S (figura 19).

Considerazioni conclusive sul regime anemometrico

Tutte le elaborazioni sopra riportate, pur fornendo delle indicazioni molto utili per la conoscenza del regime dei venti lungo il litorale pisano e nell'area di mare aperto a esso prospiciente, non sono direttamente utilizzabili per la ricostruzione del clima marittimo per vari motivi; la particolare posizione di alcune stazioni, che dà luogo a una deviazione della direzione del vento o a una attenuazione della velocità; la quota molto elevata di altre stazioni, per cui le velocità rilevate andrebbero riportate alla quota di 10 m s.l.m.; la mancanza delle registrazioni continue di direzione e velocità del vento peraltro disponibili per le stazioni dell'aeronautica Militare e per quella di Capo Corso, i cui dati saranno presi in considerazione nel

Tab. 5 - Frequenze medie percentuali dei venti a Viareggio dal 1948 al 1968.

| Direzione | N | NE | E | SE | S | SO | O | NO | Calme |
|-------------|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Frequenza % | 3,09 | 2,29 | 26,91 | 9,84 | 6,50 | 9,96 | 12,36 | 19,56 | 9,49 |

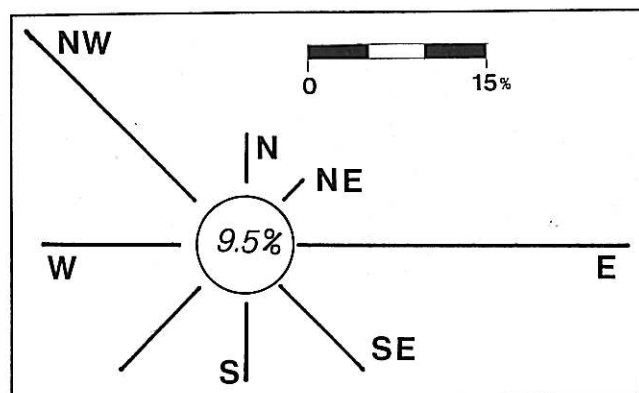


Fig. 17 - Diagramma della frequenza dei venti a Viareggio.

seguito) ecc..

Comunque, fra le stazioni prese in esame, le più significative per quanto riguarda il fetch sono quelle di Gorgona e di Capo Corso (quella di Capraia è ubicata a quota molto alta) e fra le stazioni sulla costa quella di Livorno I.I.M.

Da tutti i dati elaborati si deduce che nelle stazioni che si trovano in mare aperto di fronte al litorale pisano (Gorgona, Capraia, Punta Calamita, Montegrosso) i venti regnanti sono sempre all'incirca quelli dell'asse SE-NW; nelle stazioni sulla costa di Livorno e di Palmaria, invece, i venti regnanti sono quelli dell'asse NE-SW, esattamente ortogonale al primo e ciò è dovuto alla posizione orografica delle stazioni stesse. La posizione di Livorno, ad esempio, è ridossata dallo scirocco dai monti livornesi, per cui non possono essere rilevati tutti i venti che spirano in mare aperto.

Nelle stazioni di Pisa, S. Rossore e Viareggio si ha una situazione intermedia tra quelle descritte: i venti regnanti sono quelli del settore E-ESE, con elevate frequenze a Viareggio anche del Maestrale.

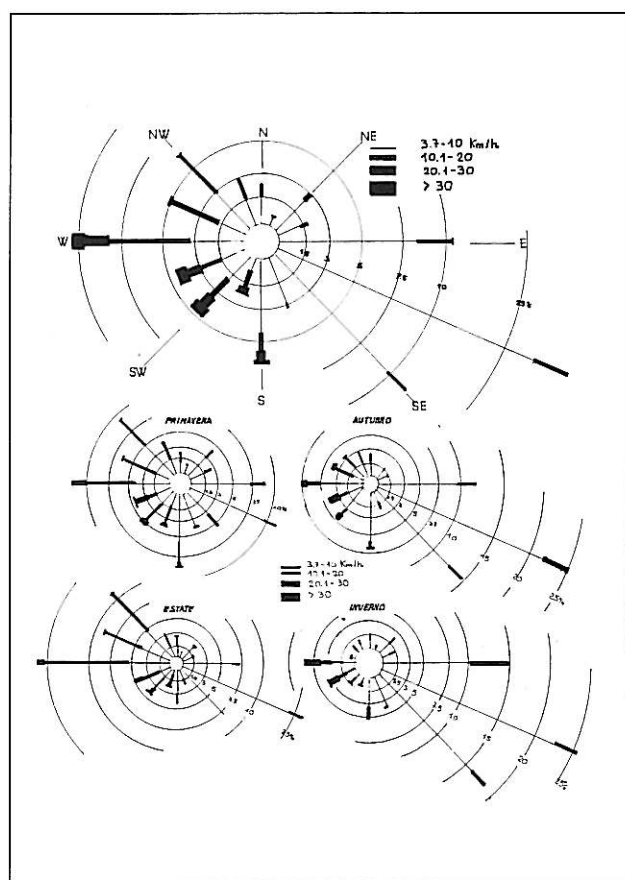


Fig. 18 - Distribuzione annua e stagionale dei venti a S. Rossore per classi di velocità (%); i valori al centro si riferiscono alle calme

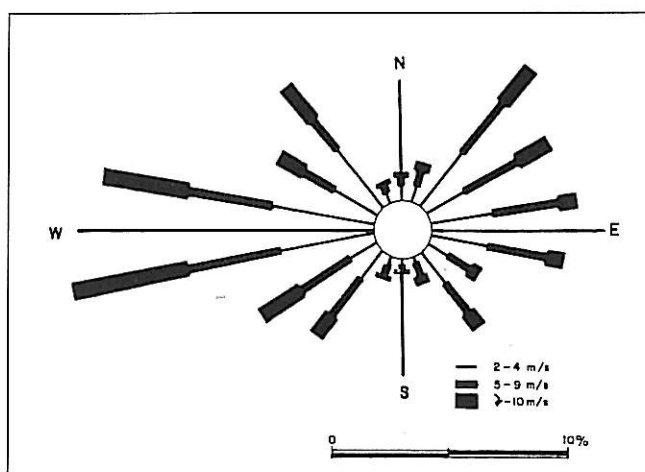


Fig. 19 - Regime dei venti alla stazione francese di Capo Corso.

I venti dominanti, invece, sono quelli del settore W-SW in gran parte delle stazioni, sia in mare aperto che sulla costa (Livorno, Palmaria, Pisa, S. Rossore, Capraia, Gorgona e, in minor misura, anche a Montegrosso e Punta Calamita). Altri venti dominanti, ma solo in alcune stazioni, sono quelli da NE e S-SSE.

A Pianosa, che si trova però a una maggiore distanza dal litorale pisano, risultano invece, sia i regnanti che dominanti, i venti dell'asse N-S, mentre a Capo Corso è il Ponente vento sia regnante che dominante.

In definitiva, dal quadro che risulta dal regime dei venti, si deduce che le mareggiate al largo del litorale pisano, che si verificano con maggior frequenza e che hanno forza più elevata sono quelle provenienti dal settore W-SW.

Il regime del moto ondoso

I dati relativi al moto ondoso possono essenzialmente distinguersi in tre categorie:

- dati ricavati da osservazioni e stime a vista effettuate da stazioni di rilevamento a terra e da navi in movimento in una data superficie di mare;
- dati provenienti da misure dirette effettuate in stazioni ondametriche poste a una certa distanza dalla costa;
- dati ottenuti mediante la ricostruzione del moto ondoso, partendo dai rilevamenti anemometrici effettuati nell'area di generazione delle onde.

I dati ricavati da osservazioni a vista hanno un carattere indicativo, essendo privi di una accettabile approssimazione per quanto concerne sia le grandezze caratteristiche delle onde che la direzione di provenienza; la grossolanità delle stime è maggiore se queste sono effettuate da osservatori a terra.

I dati ottenuti mediante misure dirette sono ovviamente quelli che presentano maggiore validità; tuttavia, i periodi di funzionamento non molto lunghi delle stazioni ondametriche installate al largo delle coste italiane, la distanza spesso notevole tra tali stazioni e i paraggi in cui necessita conoscere il moto ondoso e soprattutto il fatto che generalmente le stazioni stesse non sono munite di ondamenti direzionali, rendono i dati stessi di difficile, se non impossibile, applicazione diretta.

I dati di moto ondoso ottenuti mediante ricostruzione hanno un grado di attendibilità che dipende dalla bontà dei dati anemometrici di partenza, dai modelli matematici applicati, che possono essere più o meno accurati e dalle misure dirette di moto ondoso disponibili per la taratura di tali modelli; al riguardo, risulta spesso molto utile la conoscenza dei rilevamenti eseguiti mediante stazioni ondametriche, anche se non direzionali.

Le stazioni di osservazione dei mari dell'Istituto Idrografico della Marina

I dati relativi a osservazioni e stime a vista provengono da stazioni a terra dell'I.I.M., che effettuano n. 3 osservazioni giornaliere; le stazioni che interessano il paraggio in esame sono quelle di Livorno, Palmaria, Capraia e Montegrosso, per le quali esistono dati statistici pubblicati dall'I.I.M.

Nella fig. 20 sono riportate, per le quattro stazioni, le frequenze secondo le varie direzioni delle mareggiate di forza > 6 (alla forza del mare corrispondono, secondo la scala descrittiva dello "stato del mare" dell'O.M.M. le altezze d'onda riportate nella tabella 6).

Si può osservare il buon accordo tra le situazioni di Livorno e di Palmaria, dove prevalgono nettamente i mari da SW; invece, date le diverse esposizioni dei paraggi, a Capraia risultano più frequenti le forti mareggiate da W, NW e NE e a Montegrosso quelle da W, NW e SE.

Per la stazione di Livorno, che è la più significativa per il litorale pisano, sono disponibili dati statistici più dettagliati, anche se limitati ai 5 anni del periodo 1968-1972 (tabella 7).

Si può osservare che i mari da SW e da WSW presentano sia la maggior frequenza complessiva che la maggior frequenza dei soli mari con forza > 5; seguono, ma con frequenze assai minori, i mari da SSW e a W. Solo nel settore SW-W le altezze d'onda superano i 4 metri.

Spesso, come si è detto in precedenza, i dati presentano una precisione molto limitata, specie per la stazione di Livorno, in quanto il moto ondoso sotto costa risente in modo marcato di cospicui effetti di rifrazione dovuti alla presenza delle secche della Meloria.

Tab. 6 - Scala dell'agitazione del mare.

| <i>Codice</i> | <i>Altezza media delle onde (m)</i> | <i>Termine specifico (italiano - inglese)</i> |
|---------------|-------------------------------------|---|
| 0 | 0 | Calmo-piatto (calm) |
| 1 | 0-0,1 | Quasi calmo (rippled) |
| 2 | 0,1 | Leggermente mosso (smooth) |
| 3 | 0,5 | Mosso (slight) |
| 4 | 0,5-1,25 | Molto mosso (moderate) |
| 5 | 1,25-2,5 | Agitato (rough) |
| 6 | 2,5-4,0 | Molto agitato (very rough) |
| 7 | 4,0-6,0 | Grosso (high) |
| 8 | 9,0-14,0 | Molto grosso (very high) |
| 9 | oltre 14 | Tempestoso (phenomenal) |

Le osservazioni dell'Istituto Metereologico Olandese

Le osservazioni dirette sullo stato del mare effettuate da navi in transito vengono raccolte e elaborate dall'Istituto metereologico olandese (KNMI).

I dati che interessano la zona al largo del litorale pisano sono quelli relativi alle osservazioni effettuate sulla superficie di mare delimitata dalle coordinate geografiche: 43,0 N-43,9 N; 8,0 E-10,9 E; tale superficie è quella evidenziata in figura 11.

Le osservazioni effettuate in detta superficie nel ventennio 1961-1980 sono 10.199, di cui 663 con valore di altezza indeterminato, e comprendono sia quelle di mare vivo che mare morto.

I dati disponibili sono stati dettagliatamente elaborati da Benassai e Noli, che hanno distinto le onde per classi di altezza e direzione di provenienza. Nella tabella 8 è riportato il numero delle osservazioni nei vari mesi e nell'intero periodo relative a n. 12 settori di provenienza; nella tabella 9 sono indicate le frequenze delle onde, suddivise in n. 4 classi di altezza, sempre secondo n.12 settori di provenienza, frequenze rappresentate anche nel diagramma polare di figura 21. Ovviamente, le onde che interessano il litorale pisano sono quelle provenienti da direzioni interne al settore di traversia.

Si può osservare che i dati del KNMI risultano in accordo con quelli della stazione di Livorno dell'I.I.M.; le mareggiate più frequenti provengono dal settore 225°-255°, che ha come bisettrice la direzione di 240°; seguono i mari dei settori 255°-285° e 195°-225°, mentre molto minori sono le frequenze dei mari delle altre direzioni.

Anche i mari dominanti, con altezze d'onda > 2 metri, sono quelli provenienti, in ordine, dai tre suddetti settori; altezze > 3,5 metri hanno una frequenza dello 0,65% dal settore 225°-255°, dello 0,57% dal settore 255°-285° e dello 0,13% dal settore 195°-225°.

I rilevamenti delle stazioni ondametrichie

Per quanto riguarda i dati ondametrichi, rivestono interesse per il litorale pisano quelli relativi all'ondametro di Lerici, installato di fronte all'isola del Tino, nei pressi del golfo di La Spezia, in un fondale

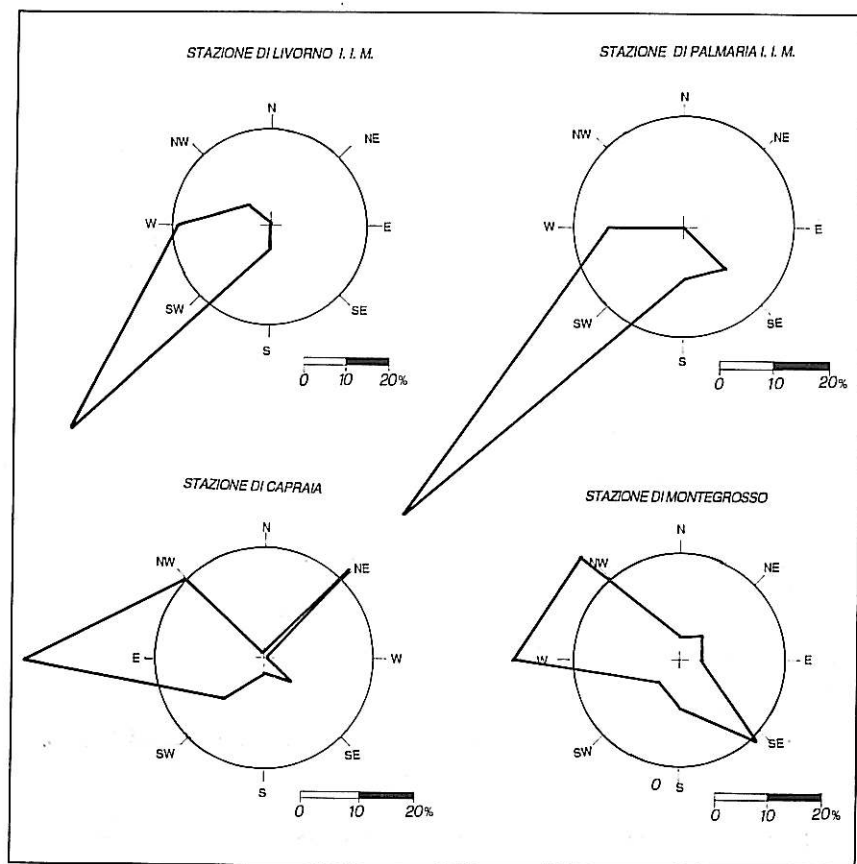


Fig. 20 - Direzione di provenienza delle mareggiate alle stazioni di Livorno, Capraia, Palmaria e Montegrosso.

Tab. 7 - Frequenza percentuale del moto ondoso per direzioni di provenienza e per classi di altezza delle onde a Livorno nel periodo 1968-1972.

| Forza | Altezza signif. delle | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | Calme | Totale |
|----------|-----------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|--------|
| 0 | CALME | | | | | | | | 44,72 | |
| 1 | <0,10 | 0,24 | 3,10 | 14,32 | 8,20 | 3,87 | 0,47 | 0,46 | | 30,66 |
| 2 | 0,10-0,50 | 0,15 | 1,84 | 6,19 | 4,47 | 0,93 | 0,18 | - | | 13,76 |
| 3 | 0,50-1,25 | 0,02 | 0,53 | 3,20 | 2,61 | 0,29 | 0,02 | - | | 6,67 |
| 4 | 1,25-2,5 | 0,04 | 0,11 | 1,81 | 1,11 | 0,11 | 0,02 | - | | 3,20 |
| 5 | 2,5-4,00 | - | 0,02 | 0,33 | 0,42 | - | 0,02 | - | | 0,79 |
| 6-7-8-9- | >4,00 | - | - | 0,05 | 0,13 | 0,02 | - | - | | 0,20 |
| | | | | | | | | | | 44,72 |
| | Totale | 0,45 | 5,60 | 25,90 | 16,94 | 5,22 | 0,71 | 0,46 | 44,72 | 100,00 |

di 27 metri e all'ondametro di Marina di Cecina, ubicato subito al largo delle secche di Vada, in un fondale di 25 metri (figura 11); tali ondametri sono gestiti dall'ENEL, che ne pubblica periodicamente i dati.

Nella figura 22 sono riportate le curve di durata dell'altezza d'onda significativa relative alle registrazioni effettuate nelle due stazioni nell'anno 1978: dall'ondametro di Lerici è stata registrata un'altezza massima di 5,95 metri e dall'ondametro di Cecina un'altezza massima di 4,95 metri.

Sempre nella figura 22 sono indicati gli istogrammi di frequenza del periodo T_z di up-crossing delle onde, relative al periodo 1978-1979 per l'ondametro di Lerici e al periodo 1978-1980 per quello di Cecina: si può osservare che in entrambe le stazioni la massima frequenza compete a periodi T_z compresi tra 4 e 5 secondi. Comunque, dall'analisi sia delle curve di durata dell'altezza che degli istogrammi di frequenza, si rileva la presenza di una maggiore agitazione ondosa per il paraggio di Lerici.

Per l'ondametro di Cecina, in figura 23 è riportato, relativamente al solo anno 1978, l'istogramma di frequenza della forza del mare, cui corrispondono le altezze d'onda di tabella 6: si vede che la massima frequenza compete a mare forza 2 ($0,10 < H < 0,50$ metri), mentre la forza 5 ($2,50 < H < 4,00$ metri) ha una

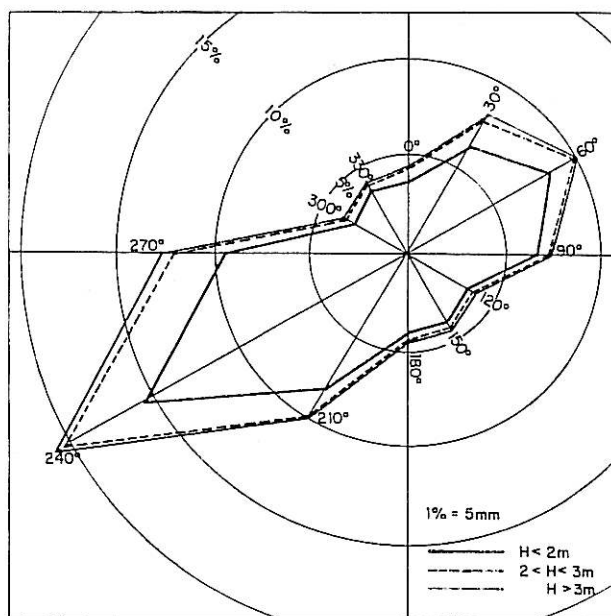


Fig. 21 - Regime del moto ondoso nel mare Ligure ricavato dai dati KNMI (1961-80) (da Noli, Franco e Benassai).

Tab. 8 - Distribuzione delle frequenze percentuali degli eventi di moto ondoso osservati dal KNMI (1961-1980) per direzioni di provenienza. Totale osservazioni registrate 10.199 (da Benassai e Noli).

| Dir. (°) | n° osserv. | 15-45 | 45-75 | 75-105 | 105-135 | 135-165 | 165-195 | 195-225 | 225-255 | 255-285 | 285-315 | 315-345 | 345-15 |
|----------------------------|------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Hs (m) | | | | | | | | | | | | | |
| Gennaio | 736 | 105 | 106 | 68 | 40 | 64 | 43 | 89 | 190 | 110 | 52 | 60 | 73 |
| Febbraio | 726 | 104 | 179 | 98 | 29 | 41 | 46 | 82 | 182 | 121 | 23 | 47 | 48 |
| Marzo | 717 | 92 | 123 | 104 | 47 | 39 | 46 | 89 | 197 | 123 | 40 | 52 | 48 |
| Aprile | 758 | 70 | 65 | 70 | 66 | 60 | 65 | 119 | 202 | 148 | 46 | 37 | 52 |
| Maggio | 695 | 50 | 78 | 65 | 54 | 62 | 56 | 145 | 266 | 134 | 36 | 40 | 14 |
| Giugno | 974 | 51 | 56 | 57 | 33 | 43 | 49 | 158 | 296 | 148 | 39 | 33 | 37 |
| Luglio | 1310 | 63 | 67 | 70 | 33 | 27 | 50 | 137 | 277 | 154 | 53 | 38 | 31 |
| Agosto | 1240 | 68 | 92 | 85 | 34 | 26 | 44 | 109 | 271 | 160 | 37 | 33 | 41 |
| Settembre | 1048 | 108 | 122 | 88 | 46 | 45 | 33 | 106 | 187 | 105 | 41 | 49 | 69 |
| Ottobre | 585 | 104 | 121 | 89 | 41 | 58 | 50 | 87 | 171 | 135 | 29 | 46 | 69 |
| Novembre | 737 | 109 | 88 | 69 | 53 | 73 | 57 | 75 | 202 | 117 | 58 | 53 | 46 |
| Dicembre | 673 | 141 | 151 | 67 | 45 | 36 | 28 | 68 | 155 | 128 | 34 | 73 | 74 |
| Inverno (dic. gen. feb.) | | 116,7 | 145,3 | 77,7 | 38 | 47 | 39 | 79,7 | 175,7 | 119,7 | 36,3 | 60 | 65 |
| Primavera (mar. apr. mag.) | | 70,7 | 88,7 | 79,7 | 55,7 | 53,7 | 55 | 117,7 | 221,7 | 135 | 40,7 | 43 | 38 |
| Estate (giu. lug. ago.) | | 60,7 | 71,7 | 70,7 | 33,3 | 32 | 48,3 | 134,7 | 281,3 | 154 | 43 | 34,7 | 36,3 |
| Autunno (set. ott. nov.) | | 107,0 | 110,3 | 82 | 46,7 | 58,7 | 46,7 | 89,3 | 186,7 | 119,3 | 42,7 | 49,3 | 61,3 |
| Media Annuale | | 88,7 | 104,0 | 77,5 | 43,4 | 47,8 | 47,3 | 105,31 | 216,3 | 132 | 40,7 | 46,8 | 50,2 |

frequenza di circa il 2% e la forza 6 una frequenza ancora minore.

Degli altri dati pubblicati, si riporta nella tabella 10 la distribuzione di frequenza delle altezze significative H_s relative a varie classi di periodi T_z ; i dati si riferiscono alle registrazioni dell'ondametro di Lerici nell'anno 1978. Si può notare come all'aumentare dell'altezza aumenta anche il periodo delle onde.

Per la stazione di Cecina, nella tabella 11 sono invece riportate, per varie classi di altezza di onda, poste in ordine crescente, le frequenze dei rilevamenti, le frequenze cumulate di non superamento e le frequenze cumulate di superamento, relative al periodo 1978-1980, durante il quale le massime altezze d'onda rilevate sono comprese tra 6,50 e 6,90 metri; tuttavia, già altezze $H > 2,50$ metri presentano una frequenza cumulata inferiore al 2% e altezze $H > 4,10$ metri una frequenza cumulata pari solo allo 0,2%. Tali dati risultano sufficientemente in accordo con quelli di tabella 9 relativi alle osservazioni del KNMI, tenendo conto che queste ultime sono effettuate in mare aperto e riguardano quindi altezze d'onda provenienti da tutte le direzioni, mentre le registrazioni ondametrichhe sono eseguite a breve distanza dalla costa e sono quindi relative a onde provenienti da un settore più limitato.

Tab. 9 - Frequenze medie dei mari, suddivisi per classi d'altezza d'onda, secondo le varie direzioni, in base ai dati del KNMI (da Benassai e Noli).

| Dir. (°) | 15-45 | 45-75 | 75-105 | 105-135 | 135-165 | 165-195 | 195-225 | 225-255 | 255-285 | 285-315 | 315-345 | 345-15 | Totale |
|---------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| Hs (m) | | | | | | | | | | | | | |
| Indeterminata | 0,65 | 0,82 | 0,57 | 0,50 | 0,35 | 0,33 | 0,70 | 0,78 | 0,53 | | 0,50 | 0,45 | 6,48 |
| 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 1 | 6,40 | 8,18 | 6,68 | 3,57 | 4,12 | 4,10 | 8,30 | 15,92 | 9,48 | 8,20 | 3,68 | 77,38 |
| 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 1,5 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 2,5 | 2 | 1,65 | 1,28 | 0,50 | 0,20 | 0,31 | 0,30 | 1,40 | 4,28 | 2,62 | 0,53 | 0,42 | 14,22 |
| 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 3,5 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 3 | 0,15 | 0,10 | - | 0,02 | - | - | 0,09 | 0,60 | 0,52 | 0,04 | 0,08 | 1,68 |
| 4,5 | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | |
| 5,5 | 4 | 0,02 | 0,02 | - | 0,05 | - | - | 0,04 | 0,05 | 0,05 | - | - | 0,24 |
| 6 | | | | | | | | | | | | | |
| 6,5 | | | | | | | | | | | | | |
| Totale | | 8,87 | 10,40 | 7,75 | 4,34 | 4,78 | 4,73 | 10,53 | 21,63 | 13,20 | 4,07 | 4,68 | 100,00 |

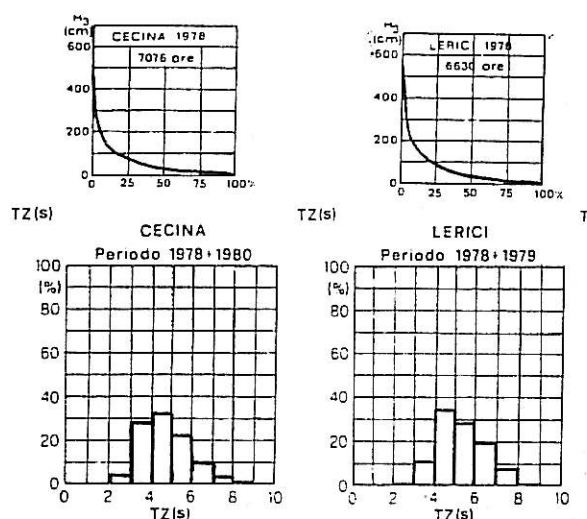


Fig. 22 - Curve di durata delle altezze d'onda e istogrammi di periodo di un up-crossing (T_z) a Cecina e Lerici.

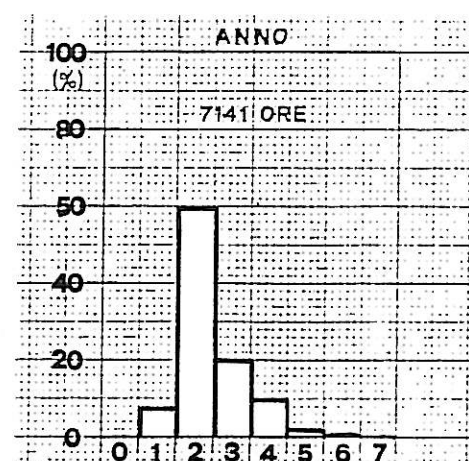


Fig. 23 - Istogramma di frequenza del mare a Cecina nel 1978.

Comunque, i dati ondametrici sopra riportati sono di utilità abbastanza limitata, dal momento che non forniscono alcuna indicazione sulla direzione di provenienza delle onde; risultano invece di enorme validità per la taratura delle ricostruzioni del moto ondoso partendo dai dati anemometrici.

Ricostruzione del clima marittimo mediante modelli matematici

Per quanto riguarda la ricostruzione indiretta del moto ondoso (hindcasting) si riportano i risultati ottenuti da Benassai, Noli, Franco e altri e i risultati cui si è pervenuti nell'ambito del Progetto Finalizzato del C.N.R. "Dinamica dei litorali".

La ricostruzione di Benassai et alii è stata fatta mediante il noto metodo di previsione dell'onda significativa di S.M.B., sulla base dei dati anemometrici di 23 anni della stazione dell'Aeronautica Militare della Gorgona (circa 70.000 dati triorari).

Per la descrizione del modello applicato, molto accurato e laborioso, si rimanda alla bibliografia. Qui si ricorda solo che la velocità del vento rilevata alla Gorgona, a quota +254 m.s.m., è stata riportata alla quota di 10 m.s.m. - come richiede il metodo di S.M.B. - mediante formule semiempiriche; le lunghezze di

Tab. 10 - Distribuzione delle frequenze delle altezze delle onde significative con il loro periodo; () dati in % - Località LERICI - Periodo di registrazione: 1978 (da Galeati e Tommasino).

| | 0-50 | 50-100 | 00-150 | 150-200 | 200-250 | 250-300 | 300-350 | 350-400 | 400-450 | 450-500 | 500-550 | 550-600 | 600-650 | Totale |
|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| 3 | - | 14 (0,2) | 2 (0,03) | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 16 (0,23) |
| 4 | - | 192 (2,9) | 40 (0,6) | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 232 (3,5) |
| 5 | - | 443 (5,7) | 276 (4,2) | 82 (1,2) | 13 (0,2) | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 814 (12,3) |
| 6 | - | 210 (3,2) | 201 (3,0) | 138 (2,1) | 72 (1,1) | 38 (0,6) | 2 (0,03) | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 661 (10,03) |
| 7 | - | 112 (1,6) | 113 (1,7) | 50 (0,9) | 62 (0,9) | 58 (0,1) | 39 (0,6) | 12 (0,2) | 2 (0,03) | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 471 (7,1) |
| 8 | - | 26 (0,4) | 24 (0,4) | 10 (0,2) | 21 (0,3) | 10 (0,2) | 32 (0,5) | 33 (0,5) | 15 (0,2) | 5 (0,1) | 2 (0,03) | 2 (0,03) | 2 (0,03) | 184 (2,8) |
| 9 | - | 0 (0,03) | 2 (0,03) | 2 (0,03) | 0 0 | 0 0 | 2 (0,03) | 10 (0,1) | 6 (0,1) | 8 (0,1) | 1 (0,02) | 1 (0,02) | 0 0 | 32 (0,03) |
| 10 | - | 0 (0,03) | 2 (0,03) | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 2 (0,03) |
| non. ident. | 4218 (63,6) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4218 (53,5) |
| totale % | 4218 63,6 | 997 15 | 660 10,0 | 292 4,4 | 168 2,5 | 115 1,8 | 75 1,1 | 55 0,8 | 24 0,4 | 17 0,3 | 3 0,05 | 3 0,05 | 2 0,03 | 6830 100% |

Tab. 11 - Organizzazione dei valori sperimentali di altezza significativa per il sito di Cecina (da Galeati e Tommasino).

| Classe | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
|---------|------|------|---------|---------|---------|
| 0-10 | 940 | 940 | 10.4759 | 10.4759 | 89.5241 |
| 10-50 | 4771 | 5711 | 53.1705 | 53.5455 | 35.3535 |
| 50-90 | 1105 | 5817 | 12.3259 | 75.9724 | 24.0275 |
| 90-130 | 934 | 7751 | 10.4090 | 86.3814 | 13.5186 |
| 130-170 | 447 | 8198 | 4.9815 | 91.3650 | 8.5370 |
| 170-210 | 315 | 8513 | 3.5105 | 94.8735 | 5.1255 |
| 210-250 | 179 | 8592 | 1.9949 | 95.8884 | 3.1319 |
| 250-290 | 113 | 8805 | 1.2593 | 98.1277 | 1.8723 |
| 290-330 | 59 | 8854 | 0.5575 | 98.7852 | 1.2148 |
| 330-370 | 42 | 9805 | 0.4581 | 99.2533 | 0.7457 |
| 370-410 | 29 | 8935 | 0.3232 | 99.5765 | 0.4235 |
| 410-450 | 18 | 8953 | 0.2005 | 99.7771 | 0.2229 |
| 450-490 | 7 | 8950 | 0.0780 | 99.8851 | 0.1449 |
| 490-530 | 5 | 8955 | 0.0557 | 99.9103 | 0.0892 |
| 530-570 | 3 | 8958 | 0.033 | 99.9443 | 0.0557 |
| 570-610 | 3 | 8971 | 0.0334 | 99.9777 | 0.0223 |
| 610-650 | 0 | 8971 | 0.000 | 99.9777 | 0.0223 |
| 650-690 | 2 | 9973 | 0.0223 | 100,000 | 0,000 |

LEGENDA

- (1) - Numero di campioni per classe
- (2) - Numero di campioni cumulati
- (3) - Frequenza sperimentale
- (4) - Frequenza sperimentale cumulata di non superamento
- (5) - Frequenza sperimentale cumulata di superamento

fetch messe in conto sono quelle efficaci, indicate nel grafico di figura 10; il modello è stato tarato in base ai dati degli ondametri di Lerici e di Cecina del periodo 1978-1979. Tuttavia per la mancanza dei dati anemometrici alla Gorgona nel suddetto periodo, si è prima reso necessario un confronto multiplo tra i dati di tale stazione e quelli delle stazioni di Livorno, Capo Corso e, soprattutto, quelli ricavati dalle carte bariche dell'Aeronautica Militare.

Una volta tarato, il modello ha consentito di ricostruire circa 7.000 eventi ondosi, caratterizzati dalla direzione di provenienza, dall'altezza H e dai periodi significativi T. Le coppie (H-T) ottenute sono state classificate in tabelle di frequenza a doppia entrata, suddivise in classi di altezza (di ampiezza 0,50 metri) e di periodo (di ampiezza 1 s) e distinte in base al settore di provenienza, ciascuno di ampiezza di 10°.

In figura 24 sono riportate le frequenze dei mari secondo le varie direzioni di provenienza per il paraggio in esame; si osserva che sono regnanti i mari del 4° quadrante e in particolare quelli dalle direzioni di 290° e 300°.

Dalla figura 25, in cui sono riportati le frequenze dei mari suddivisi in classi di altezza d'onda, si deduce, invece, che sono dominanti i mari da 240°, che sono quelli che presentano la massima frequenza con altezza d'onda $H > 4,25$ m; se si fa però riferimento alle altezze $H > 2,75$ m, le massime frequenze competono ancora ai mari da 300°. E' da notare che nel diagramma polare di figura 21 le direzioni di provenienza sono suddivise per settori di 30° di ampiezza, mentre nel diagramma di figura 24 per settori di ampiezza 10°.

Se si considerano le frequenze di tutti i mari, i risultati ottenuti con il modello hindicasting non sono in buon accordo con le osservazioni del KNMI, come si deduce confrontando il diagramma di fig. 21 col diagramma di fig. 24. Se però si effettua un raffronto relativo solo alle onde con altezza significativa $H > 2$

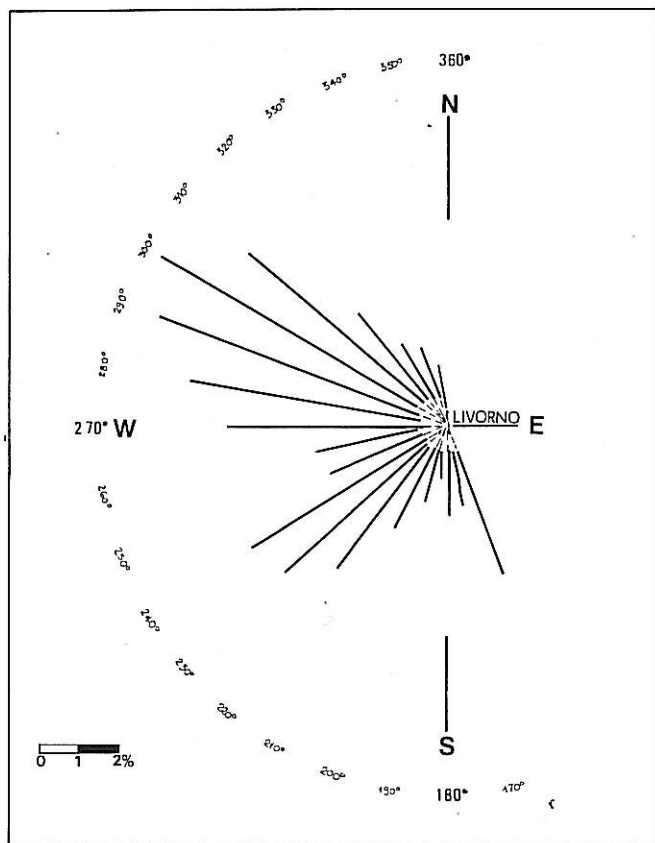


Fig. 24 - Frequenza dei mari a Livorno secondo le varie direzioni ricostruite con il modello matematico da Noli e Benassai (1982).

m, trascurando quindi quelle di altezza minore, che hanno uno scarso contenuto energetico, l'accordo tra i dati è abbastanza soddisfacente, come si può dedurre da quanto riportato in tab. 12; le differenze maggiori consistono in una minore frequenza dei mari da 300° osservati dal KNMI e in una maggiore frequenza, per tutte le direzioni, delle mareggiate con $H > 3,50$ m ricostruite rispetto a quelle osservate dal KNMI.

Per ogni settore di provenienza del moto ondoso sono state poi determinate le grandezze medie H e T , rappresentative di un'unica condizione ondosa, che è stata scelta in modo tale che essa dia luogo allo stesso contributo di flusso energetico di tutte le condizioni ondose del settore e l'onda abbia una ripidità pari alla media pesata della ripidità delle onde corrispondenti alle condizioni suddette.

In termini analitici, le due condizioni si esprimono così:

$$H^2 T \sum_T \sum_H f(T, H) = \sum_T \sum_H f(T, H) H^2 T$$

$$\frac{H}{T^2} \sum_T \sum_H f(T, H) = \sum_T \sum_H f(T, H) \frac{H}{T^2}$$

essendo H , T , f l'altezza, il periodo e la frequenza della generica onda appartenente al settore che si considera.

Nella tabella 13 sono riportati, per ciascun settore, i valori di H , T e del contributo percentuale al flusso complessivo di energia; nella figura 26 sono riportati, in diagramma polare, i flussi percentuali di energia secondo le varie direzioni. Si può osservare che il flusso più cospicuo proviene dal settore 235°-245° (21,98%) seguito da quelli del settore 225°-235° (13,05%) e dai tre settori compresi tra 245° e 275°, con contributi poco superiori al 9%; la risultante dei flussi di energia ha la direzione di 247° (figura 26).

Anche questi risultati sono in buon accordo con le osservazioni KNMI.

Nella tabella 14 sono indicati i valori delle altezze medie H , dei periodi medi T e delle frequenze percentuali determinate per ciascuna direzione; le onde da 242° sono state introdotte, in aggiunta a quelle di mare vivo, per rappresentare il moto ondoso di mare morto. Si può osservare che le onde di maggiori

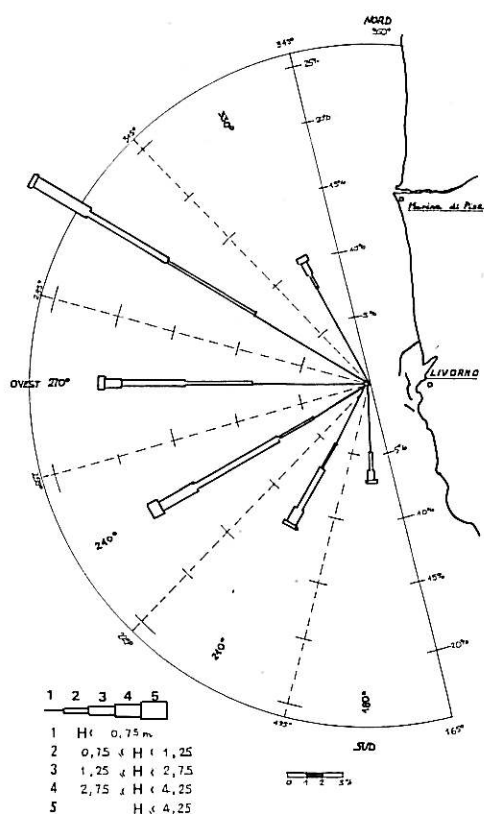


Fig. 25 - Frequenza dei mari per classi di altezza d'onda secondo le varie direzioni al largo del litorale pisano ricostruite con il modello matematico (da Benassai e Noli, 1982; Noli e Franco, 1989).

Tab. 12 - Frequenza delle altezze d'onda secondo le varie direzioni al largo del litorale pisano ricostruite con il modello matematico (0) e secondo i dati KNMI (*) (da Noli, Franco e Benassai).

| Dir. (°N) | 180° | | 210° | | 240° | | 270° | | 300° | | 330° | |
|----------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| Altezza d'onda Significativa (m) | 0 | * | 0 | * | 0 | * | 0 | * | 0 | * | 0 | * |
| 2<Hs<3,5 | 3,35 | 2,53 | 13,60 | 11,8 | 29,76 | | 17,93 | | 9,45 | 4,48 | 2,23 | 3,55 |
| 3,5<Hs<5 | 0,21 | - | | 4,57 | 36,15 | | 22,13 | | 1,13 | 0,34 | 0,06 | 0,68 |
| 5<Hs | - | - | 0,76 | 0,15 | 9,91 | 5,07 | 3,99 | 4,39 | - | - | - | - |
| | | | 0,34 | | 2,90 | 0,42 | 1,74 | 0,42 | | | | |
| Totale % | 3,56 | 2,53 | 18,32 | 12,92 | 42,57 | 41,64 | 23,66 | 26,94 | 9,58 | 4,82 | 2,29 | 4,22 |

altezze e periodi provengono dal settore tra 225° e 255°.

Non molto diversi da quelli riportati sopra sono i risultati ai quali sono pervenuti altri ricercatori nell'ambito del Progetto Finalizzato C.N.R. "Dinamica dei litorali"; nella figura 27 è riportato il diagramma polare delle frequenze delle varie classi di altezza d'onda (esprese in Forza del mare) secondo le diverse direzioni di provenienza e il diagramma vettoriale dei flussi d'energia al largo della foce dell'Arno.

I mari da 240° sono sia regnanti che dominanti, in accordo con i dati di tabella 12, relativi sia alla ricostruzione del moto ondoso vista in precedenza che alle osservazioni del KNMI; per quanto riguarda invece le altre direzioni, dal diagramma di figura 27 si deduce che i mari da 210° prevalgono, sia per frequenza che per forza, rispetto ai mari da 270°, mentre dai dati di tabella 12 risulterebbe il contrario.

Tuttavia, dato il tipo di fenomeno, particolarmente complesso per una esatta ricostruzione, le differenze tra i risultati dei due modelli matematici applicati sono accettabili; si fa però rilevare che i dati della

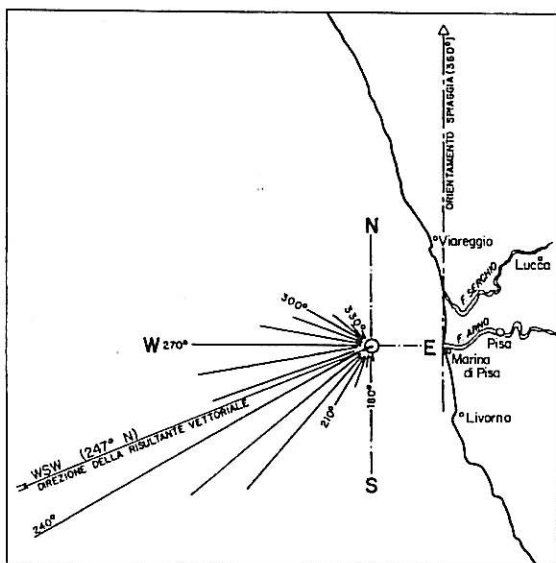


Fig. 26 - Distribuzione direzionale dell'energia ondosa al largo del litorale pisano (risultato del modello matematico di ricostruzione del moto ondoso (da Benassai e Noli, 1982; Noli e Franco, 1989).

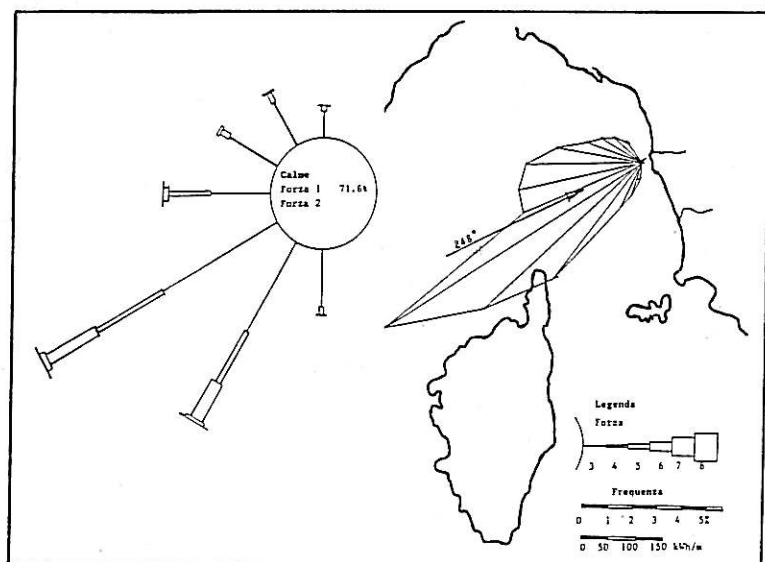


Fig. 27 - Distribuzione dell'altezza d'onda e del flusso di energia verso riva al largo di foce d'Arno (da Aminti).

ricostruzione di Benassai, Noli, Franco ed Altri presentano un accordo molto migliore con le osservazioni del KNMI rispetto a quelli della ricostruzione effettuata nell'ambito del progetto finalizzato C.N.R..

Discreto è anche l'accordo tra i diagrammi polari delle fig. 26 e 27, rappresentanti i flussi energetici percentuali secondo le varie direzioni; anche le risultanti vettoriali sono pressochè coincidenti.

In fig. 28 si riporta infine il diagramma polare di frequenza dell'altezza d'onda relativo a un breve periodo di funzionamento, successivo al 1989, dell'ondamento direzionale di la Spezia del Ministero LL.PP; anche tale diagramma conferma che i mari del settore 220° - 250° sono sia regnanti che dominanti.

Il trasporto solido longitudinale

Il senso del trasporto longitudinale netto lungo l'intera unità fisiografica alla quale appartiene il litorale pisano è stato individuato mediante una serie di ricerche, anche a carattere sperimentale.

Tab. 13 - Altezza significativa, periodo, frequenza e contributo % al flusso di energia per ciascun settore al largo del litorale pisano (da Noli, Franco e Benassai).

| Direzione media dell'onda al largo (N°) | Altezza media (m) | Periodo medio (s) | Contributo al flusso di energia (%) |
|---|-------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 165-175 | 0,83 | 4,44 | 0,47 |
| 175-185 | 1,07 | 4,97 | 0,91 |
| 185-195 | 1,27 | 5,47 | 0,85 |
| 195-205 | 1,57 | 5,96 | 2,12 |
| 205-215 | 1,68 | 6,14 | 3,53 |
| 215-225 | 2,14 | 6,99 | 10,49 |
| 225-235 | 2,15 | 7,00 | 13,05 |
| 235-245 | 2,60 | 7,66 | 21,98 |
| 245-255 | 2,30 | 7,31 | 9,21 |
| 255-265 | 2,28 | 7,31 | 9,68 |
| 265-175 | 1,88 | 6,73 | 9,80 |
| 275-285 | 1,43 | 5,97 | 6,00 |
| 285-295 | 1,17 | 5,36 | 4,27 |
| 295-305 | 1,08 | 5,17 | 3,75 |
| 305-315 | 0,97 | 4,87 | 2,25 |
| 315-325 | 0,93 | 4,80 | 1,14 |
| 325-355 | 0,79 | 4,36 | 0,48 |

Tab. 14 - Altezze medie, periodi medi e frequenze percentuali dei mari al largo del litorale pisano secondo le varie direzioni di provenienza, determinate col modello matematico (da Noli, Franco e Benassai).

| | Frequenza (%) | Altezza (m) | Periodo (3) | Direzione (°N) |
|----|---------------|-------------|-------------|----------------|
| 1 | 1,2 | 1,57 | 5,96 | 200 |
| 2 | 1,8 | 1,68 | 6,14 | 210 |
| 3 | 6,3 | 2,145 | 7,00 | 225 |
| 4 | 3,7 | 2,60 | 7,66 | 240 |
| 5 | 4,2 | 2,29 | 7,31 | 255 |
| 6 | 3,6 | 1,88 | 6,73 | 270 |
| 7 | 4,2 | 1,43 | 5,91 | 280 |
| 8 | 5,0 | 1,17 | 5,36 | 290 |
| 9 | 5,4 | 1,08 | 5,17 | 300 |
| 10 | 14,6 | 1,13 | 9,0 | 242 |

Nella fig. 1 è indicato il senso del trasporto individuato nell’ambito del progetto finalizzato del C.N.R. “Conservazione del suolo”, sottoprogetto “Dinamica dei litorali”. Per quanto riguarda il litorale pisano, risalta subito in evidenza l’inversione del senso del trasporto netto longitudinale in corrispondenza della foce dell’Arno: il trasporto è infatti diretto nel senso S-N a nord della foce e nel senso N-S a sud della foce. Il fiume quindi, alimenta con le sue torbide il tratto di litorale in sinistra fino alla foce del Calambrone e quello in destra fino a Forte dei Marmi.

In perfetto accordo sono i risultati ai quali si è pervenuti in altri studi: quelli di Milano sono sintetizzati nella tabella 1 e nella figura 6. Nella tabella 1 sono indicati i valori del trasporto netto in tre periodi di tempo lungo il tratto di litorale compreso tra i porti di Livorno e di Viareggio e nella figura 6 è rappresentato l’andamento di tale trasporto; trova conferma l’inversione del senso del trasporto netto in corrispondenza della foce dell’Arno.

Anche le ricerche di Noli e Franco, basate sull’applicazione di alcuni modelli matematici, su cui si riferisce nel paragrafo seguente, hanno chiaramente individuato la suddetta inversione.

L'andamento del trasporto solido longitudinale ricostruito con modelli matematici

I modelli matematici per la determinazione del trasporto longitudinale nel tratto di litorale in esame sono dovuti a Noli, Franco e ad alcuni ricercatori del Laboratorio di Wallinford.

Il primo modello è relativo al tratto di litorale compreso tra la foce dell’Arno e il porto di Viareggio; dato l’andamento piuttosto regolare delle isobate, è del tipo “ad una linea”, riproduce cioè le modifiche planimetriche della spiaggia rappresentata da una sola linea (la linea di battigia).

Il modello, pur non fornendo indicazioni sui mutamenti del profilo trasversale della spiaggia som-

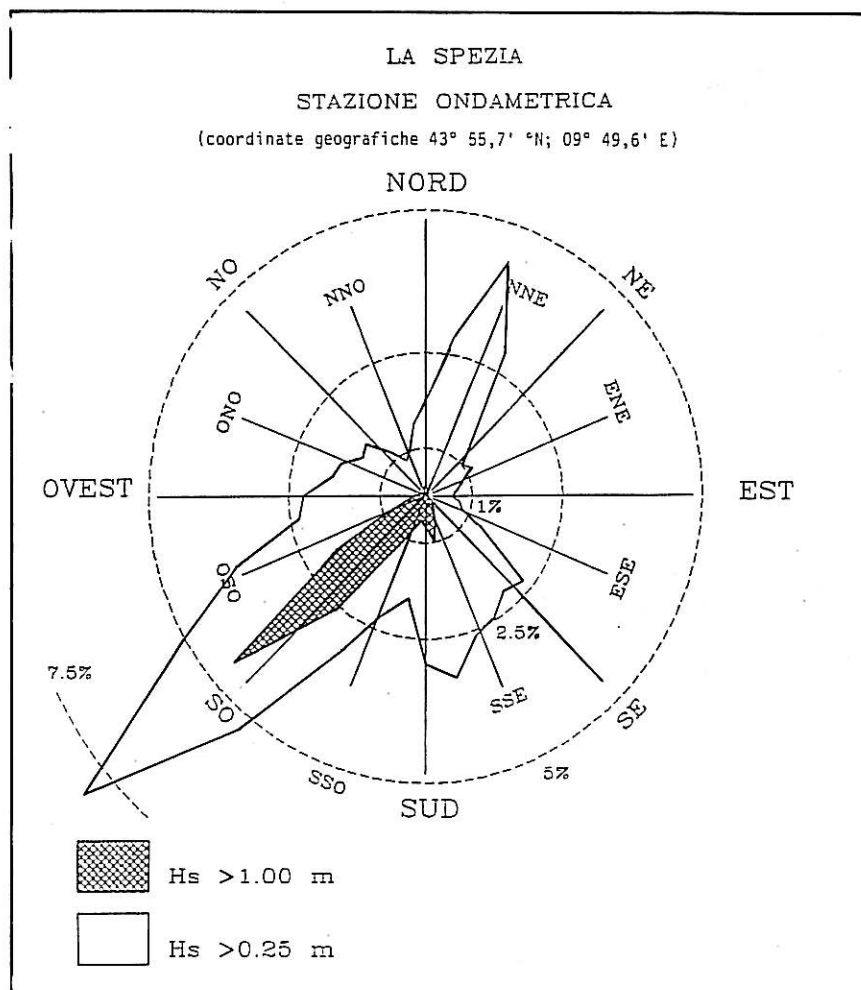


Fig. 28 - Distribuzione polare degli eventi ondosi rilevati dall'ondametro di La Spezia.

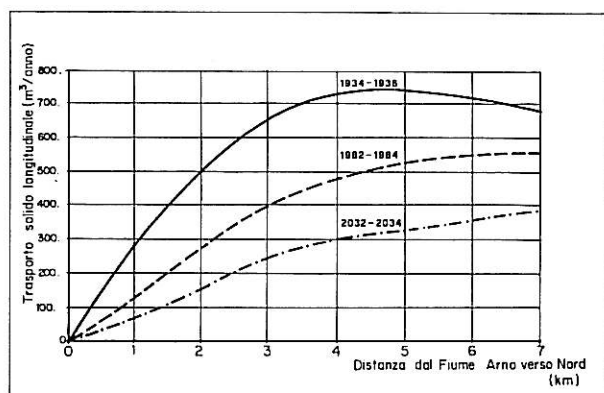


Fig. 29 - Andamento del trasporto solido a Nord dell'Arno (da Noli e Franco, 1989).

mersa, consente di studiare gli effetti dovuti alla realizzazione di opere di difesa.

Il fondamento matematico su cui si basa il modello è l'equazione di continuità dei sedimenti, sospinti dalle mareggiate parallelamente alla riva e l'equazione della portata solida longitudinale, dovuta ad un moto ondoso di date caratteristiche, avente una certa incidenza rispetto alla battigia.

La ricostruzione del moto ondoso al largo è quella già riportata in tab. 14; il modello, tarato in base all'avanzamento della linea di riva verificatasi nel tempo a ridosso del molo sud di Viareggio, ha fornito, per i primi 7 Km del litorale ubicati subito a nord della foce dell'Arno, l'andamento del trasporto longitudinale riportato in fig. 29 nei periodi 1934 - 1936, 1982 - 1984 e una proiezione dell'andamento stesso nel periodo 2032 - 2034. Le linee di riva fornite dal modello matematico in vari anni, a partire dal 1878, sono in buon accordo con quelle reali.

Il tratto di litorale a sud dell'Arno è influenzato in modo molto significativo dalla presenza delle secche della Meloria, che per le mareggiate più importanti danno luogo a cospicui fenomeni di rifrazione, per cui il modello matematico "ad una linea" non risulta più applicabile.

Per determinare il trasporto solido longitudinale Noli e Franco hanno perciò applicato un modello molto più complesso, basato sul fenomeno della rifrazione inversa spettrale, in grado di fornire il valore del trasporto longitudinale solo in punti prescelti; modello che è stato però in grado di confermare l'inversione del senso del trasporto annuo netto in corrispondenza della foce dell'Arno; infatti, subito a sud della foce è stato determinato un trasporto annuo netto di 128.000 m³, diretto nel senso N-S.

Il moto ondoso in acque basse: la rifrazione

Lungo tutto il tratto di litorale dalla foce dell'Arno al porto di Viareggio le isobate hanno un andamento abbastanza regolare, per cui la rifrazione del moto ondoso in acque basse si manifesta con i consueti aspetti, il più appariscente dei quali è la rotazione di fronti d'onda, che riducono il loro angolo di incidenza rispetto alle isobate, tendendo a disporsi parallelamente alla battigia.

Il tratto di litorale a sud dell'Arno, fin oltre il porto di Livorno, risente invece in misura molto marcata della presenza delle Secche della Meloria, che originano cospicui fenomeni di rifrazione.

Tali fenomeni sono molto più evidenti per le mareggiate provenienti dal 3° quadrante: si verifica una forte convergenza dei fronti d'onda intorno alle Secche, con conseguente notevole aumento dell'altezza d'onda, che provoca i primi frangimenti a notevole distanza dalla riva; il fenomeno descritto si estende fin quasi alla foce dell'Arno.

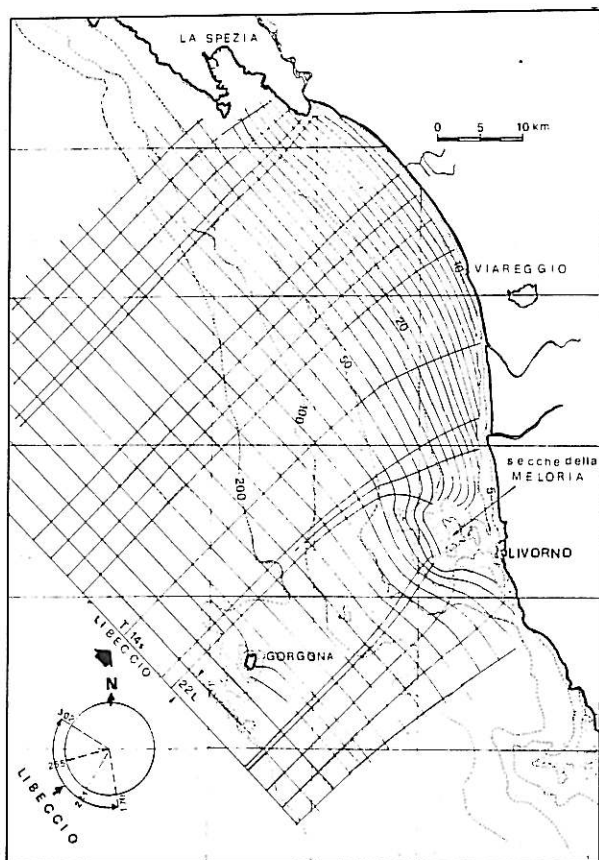


Fig. 30 - Isola del Tino (LI) - Piano d'onda in alto fondale. Onda di Libeccio: T= 14s.

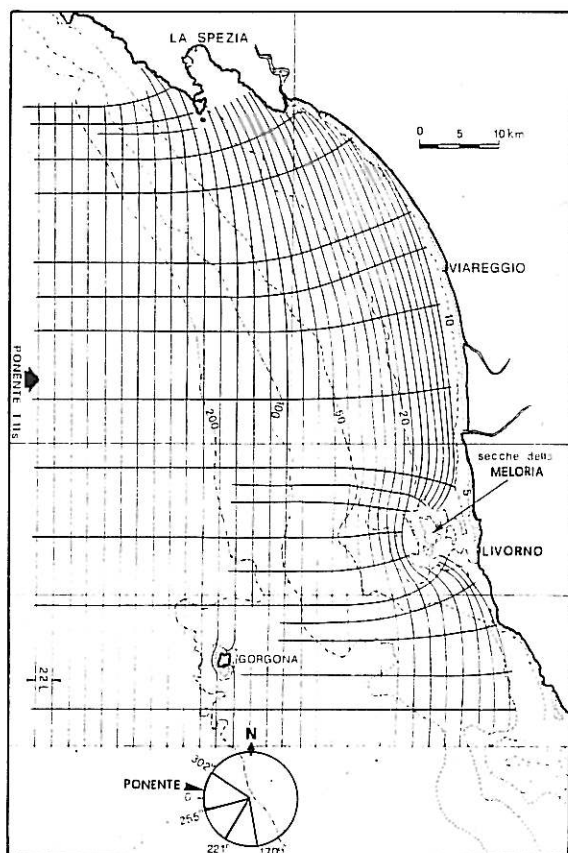


Fig. 31 - Isola del Tino (LI) - Piano d'onda in alto fondale. Onda di Ponente: T= 11s.

Per visualizzare quanto sopra, nelle figg. 30 e 31 sono riportati due piani d'onda (tratti da una pubblicazione del CNR relativa al progetto finalizzato "Conservazione del Suolo", sottoprogetto "Dinamica dei litorali"), per le direzioni al largo da 235° e 270° , per il tratto di litorale che va da Livorno a La Spezia.

Per informazioni più dettagliate sull'argomento si rimanda ad altri lavori citati in bibliografia.