

L. LEONI (\*+), F. SARTORI (\*), A. BATISTONI, P. CORTOPASSI

CONTRIBUTO ALLO STUDIO DEL TRASPORTO  
E DELLA DISTRIBUZIONE DEI SEDIMENTI RECENTI  
NELL'ALTO TIRRENO-MAR LIGURE  
(BACINO COMPRESO TRA LA SPEZIA E LIVORNO):  
DATI GRANULOMETRICI, MINERALOGICI E CHIMICI

**Riassunto** — Nell'ambito di una ricerca sulla qualità dell'ambiente nella zona della piattaforma costiera toscana sono stati studiati dal punto di vista granulometrico, mineralogico e chimico i sedimenti di fondo del bacino compreso fra Livorno ed il Golfo della Spezia (Alto Tirreno - Mar Ligure). Lo studio è stato intrapreso con lo scopo di individuare e caratterizzare le più importanti sorgenti del materiale sedimentario ed i principali meccanismi di distribuzione di tale materiale. Esso si propone inoltre di costituire la base preliminare per un successivo studio di caratteri geochimico, finalizzato all'individuazione di accumuli di metalli pesanti ed all'analisi delle cause che li hanno determinati.

Il principale contributo di sedimenti al bacino appare senz'altro riferibile ai fiumi Arno, Serchio e Magra, mentre risulta molto ridotto quello dei torrenti apuani. La composizione di tali sedimenti si caratterizza soprattutto per la qualità dei componenti argillosi che sono rappresentati principalmente da illite e da clorite, cui si associano quantità minori di caolinite, smectite, «intergrades» cloritici e minerali a strati misti illite-smectite. In particolare, gli «intergrades» cloritici sembrano essere specifici delle alluvioni dell'Arno e sono stati quindi utilizzati per stabilire la zona di influenza esclusiva (o prevalente) degli apporti di questo fiume.

Dal punto di vista dell'origine dei sedimenti, dei loro andamenti distributivi e dei meccanismi che li determinano, il bacino esaminato può essere descritto come costituito da tre sottobacini: 1) un piccolo sottobacino settentrionale, che si estende dal Golfo di La Spezia fino all'altezza di Marina di Pietrasanta; 2) un grande sottobacino centrale, antistante il litorale compreso fra Marina di Pietrasanta e Tirrenia (appena a sud della foce dell'Arno); 3) la zona antistante Livorno.

---

(\*) Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa, Via S. Maria 53, 56126 Pisa.

(+) Centro di Studio per la Geologia Strutturale e Dinamica dell'Appennino, Via S. Maria 53, 56126 Pisa.

Lavoro eseguito con finanziamenti MURST 40% e con il Contributo C.N.R. Comitato Nazionale Scienze e Tecnologie Ambiente e Habitat.

Nel primo sottobacino i sedimenti grossolani (sabbie e limi sabbiosi) apportati dal fiume Magra sono trasportati lungo costa verso sud dal drift costiero, ma sono anche distribuiti su un'ampia zona al largo del litorale apuano da una corrente diretta verso nord-ovest; all'interno di quest'area vi sono zone limitate, con sedimenti più fini, che segnalano la presenza di piccoli vortici nella circolazione delle acque.

Il sottobacino centrale è costituito dalla zona dominata dalle alluvioni dell'Arno e del Serchio. In essa le alluvioni grossolane di questi fiumi sono trasportate principalmente verso nord dal drift costiero, che li distribuisce in una stretta fascia sottocosta, entro l'isobata dei 10 metri. Di fronte alle foci dell'Arno e del Serchio, però, in zone anche molto vicino alla costa, non vi sono sedimenti grossolani, bensì materiali molto fini (limi argillosi e argille limose), distribuiti su aree a forma di ventaglio. Tali aree indicano evidentemente le zone dove avvengono i più cospicui fenomeni di flocculazione delle argille, all'interfaccia acqua dolce/acqua salata. Anche in questo sottobacino centrale diverse caratteristiche della distribuzione dei sedimenti sono probabilmente riconducibili alla presenza di vortici nella circolazione delle acque.

Il sottobacino meridionale è caratterizzato dalla presenza delle Secche della Meloria e dei fondali relativamente poco profondi intorno all'Isola di Gorgona. Le Secche della Meloria sono coperte da un sedimento nettamente bimodale, costituito, in stragrande maggioranza, da detrito grossolano biogenico e, molto subordinatamente, da un'argilla fine derivante dal carico di torbida dell'Arno. Oltre le Secche della Meloria la componente biogena va diminuendo progressivamente verso il largo, almeno fino al bordo della piattaforma; fa eccezione la zona intorno all'isola di Gorgona, dove fondali relativamente poco profondi creano ancora un ambiente simile a quello delle Secche della Meloria, favorevole ad un'elevata produttività biologica. Per quanto riguarda la circolazione delle acque i dati raccolti indicano che in questo sottobacino sono presenti i più cospicui e persistenti movimenti circolari di tutto il bacino studiato.

**Abstract** — *Contribution to the study of sediment transport and distribution in the Upper Tyrrhenian - Ligurian sea basin (area between La Spezia and Livorno): grain size, mineralogical and chemical data.* As a contribution to an environmental study on Tuscany's marine shelf, textural, mineralogical and chemical characteristics of recent sediments in the area between Livorno and La Spezia (Mediterranean Sea: Ligurian-Tyrrhenian basin) have been analyzed. Mineralogical and grain size data have been applied to the assessment of sediment sources and movement patterns.

For the studied area the main sediment sources appear to be the Arno, Serchio and Magra rivers; very subordinate is the contribution of the creeks flowing from the Apuan Alps. The clay components of the basin's sediments are mostly represented by illite and chlorite, to which minor amounts of kaolinite, smectite, chloritic intergrades and illite-smectite mixed layers are associated. Chloritic intergrades seem to be peculiar of the Arno River sediment load and then they have been utilized to establish the zone of exclusive (or dominant) influence of this river, which is the basin's most important tributary.

As to sediment movement patterns and sources, the surveyed basin can be described as divided into three subbasins: 1) a smaller, northern subbasin extending from La Spezia gulf to Marina di Pietrasanta; 2) a greater, central subbasin extending from Marina di Pietrasanta to Tirrenia (just to the south of the Arno River mouth); 3) the area off Livorno port.

In the first subbasin the coarse-grade Magra River sediments (sands and silty sands) are transported southward along the mainland coast by littoral drift, but they are also spread over a vast area offshore by a northwestward current; within this area patches of finer-grade sediments mark the presence of small-scale circular motions.

The central subbasin is the area dominated by the Serchio and Arno rivers contribution; here the coarse grades from these sources are mostly distributed northward in a narrow belt within the 10 m isobath by the littoral drift. In front of the Serchio and Arno mouths, very close to the coast, fan-shaped areas of fine sediments (clayey silts and silty clays) indicate the zones where significant flocculation phenomena occur. In this subbasin too several elements point to the presence of small-scale gyres in the water circulation.

The southern subbasin is characterized by the presence of Meloria Shoals and the relatively shallow area around Gorgona Island. Meloria Shoals are covered by a clearly bimodal sediment, which is formed by an overwhelmingly dominant coarse skeletal debris of organisms and by very subordinate fine phyllites delivered by the Arno River. The amount of terrigenous materials progressively increase westward with the increasing of bottom depth; only around Gorgona Island a relative rise in sea bottom again provides for a zone of high biological productivity coupled with little terrigenous influx. As to water circulation the southern subbasin is the zone where the most important and persistent circular motions are set up.

**Key words** — Marine sediments, Mineralogy, Chemistry, Grain size, Continental shelf, Tyrrhenian-Ligurian seas, Northern Tuscany, Italy.

## INTRODUZIONE

Nell'ambito di un progetto di studio sulla qualità dell'ambiente dell'Alto Tirreno sono state intraprese varie ricerche, di carattere oceanografico, biologico, sedimentologico, sulla piattaforma costiera prospiciente la regione Toscana (E.N.E.A., 1993). Gli studi sui sedimenti di fondo sono stati condotti dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa in collaborazione con l'Ente Nazionale per l'Energia Atomica e per le Energie Alternative (E.N.E.A.). Già completato e pubblicato è lo studio relativo ai sedimenti del tratto di piattaforma compreso tra l'Isola d'Elba e Livorno (LEONI *et al.*, 1991a; LEONI *et al.*, 1991b); vengono ora presentati i risultati delle ricerche relative a quelli del bacino compreso fra Livorno e La Spezia.

È noto che i sedimenti che si depositano nell'ambiente della piattaforma continentale riflettono il carattere generale dei materiali trasportati dai fiumi dalle terre emerse vicine, derivati dall'erosione delle coste, apportati da zone esterne dalle correnti marine, prodotti «in situ» dagli organismi, creati dalle attività dell'uomo. Il controllo dei materiali derivanti dalle attività antropiche è particolarmente

importante per l'accertamento e la protezione della qualità dell'ambiente. Scopo precipuo delle ricerche eseguite sui sedimenti del bacino in esame è appunto quello di giungere ad individuare eventuali zone di accumulo di metalli pesanti, di distinguere, tra le cause che sono all'origine di tali accumuli, quelle di origine «naturale» da quelle di origine «antropica», di identificare e, in futuro, di controllare le possibili sorgenti di inquinamento. Base essenziale per tale studio geochimico di dettaglio è la determinazione preliminare della composizione granulometrica, mineralogica e chimica (relativa ai componenti maggiori) dei sedimenti del bacino e l'analisi della distribuzione delle loro facies principali. Questo tipo di indagine rappresenta inoltre uno strumento indispensabile per la valutazione dell'influenza degli apporti dei principali tributari sulla sedimentazione che ha luogo nel bacino, per l'individuazione degli schemi di dispersione dei materiali sedimentari, per l'accertamento dei loro meccanismi di deposizione, cioè per la definizione delle principali caratteristiche sedimentologiche del bacino stesso. Il presente articolo riporta appunto i risultati delle indagini granulometriche, mineralogiche e chimiche eseguite sui sedimenti di fondo del bacino dell'Alto Tirreno — Mar Ligure; l'analisi della distribuzione di alcuni elementi in traccia nei sedimenti in questione costituisce l'oggetto di un altro articolo attualmente in corso di preparazione (LEONI *et al.*, 1993).

#### INQUADRAMENTO GEOGRAFICO, GEOLOGICO ED OCEANOGRAFICO

Il bacino marino preso in esame copre un'area di circa 1100 Km<sup>2</sup>, corrispondente a quella parte dell'Alto Tirreno - Mar Ligure delimitata a nord dal Promontorio di Porto Venere, a Sud dalle Secche della Meloria e dall'Isola di Gorgona, ad Est dalla costa ligure-toscana, ad ovest dall'isobata dei 400 m. (Fig. 1). Esso coincide abbastanza da vicino con il «Bacino di Viareggio», individuato da FANUCCI (1981) come unità morfo-strutturale distinta estendentesi tra la «Dorsale del Levante» ed una linea Est-Ovest situata appena a nord di Livorno, coincidente probabilmente con una faglia trascorrente. Da un punto di vista morfo-strutturale il fondo del bacino appare caratterizzato dalla presenza di grandi «horst» e «graben» asimmetrici, a pendenza molto debole ed a sedimentazione plio-quadernaria considerevole (FANUCCI, 1981).

La campionatura effettuata ha interessato prevalentemente la piattaforma continentale che, a partire dal golfo di La Spezia, appa-

re allargarsi progressivamente verso sud, fino a raggiungere la sua massima ampiezza in corrispondenza dell'isola di Capraia (60 Km.). Essa appare incisa da due canyons: uno, relativamente profondo e ben sviluppato, compreso tra Capraia e Gorgona, l'altro, appena accennato, immediatamente a nord di quest'ultima isola. Secondo MOULADE (1978) la piattaforma continentale ha un bordo abbastanza ben

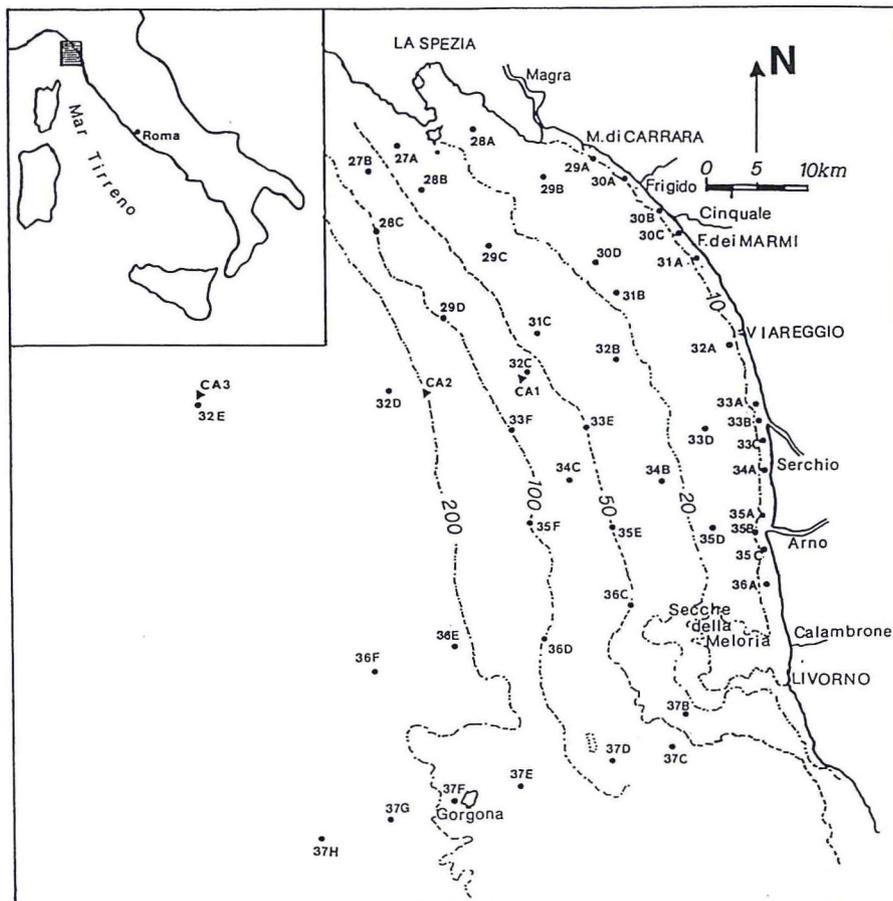


Fig. 1 - Localizzazione geografica delle stazioni di campionamento dei sedimenti studiati. I siti di campionamento dei campioni superficiali e delle carote sono indicati rispettivamente con punti e con triangoli.

definito, che nella zona si trova, per lo più, ad una profondità di 180 m; la scarpata continentale, che la collega alla Piana Abissale Ligure, ha una pendenza moderata ed è interrotta da un'ampia ter-

razza intermedia, chiamata «Terrazza di La Spezia», che ha una orientazione sub-meridionale ed una profondità media di 500 m. Verso sud questa terrazza si innalza leggermente, a profondità di poco superiori ai 400 m., formando la «Soglia Corso-Toscana», fra la Corsica ad ovest e la Capraia ad est (fuori zona rispetto alla mappa di fig. 1). È attraverso questa soglia e attraverso la zona, molto meno profonda, compresa fra Capraia e l'isola d'Elba («Canale dell'Elba» sensu STOCCHINO e TESTONI, 1968) che avviene l'ingresso, nell'Alto Tirreno-Mar Ligure, delle principali correnti provenienti dal Tirreno Centro-Meridionale.

Il litorale che delimita ad est il bacino è caratterizzato, per la maggior parte, da una linea di costa piuttosto monotona, ad andamento falciforme, con la concavità rivolta ad ovest. Fa eccezione la parte più settentrionale di esso, compresa tra Porto Venere e Bocca di Magra, dove è presente una costa a falesia, nella quale si apre l'ampia insenatura del golfo di La Spezia. La regolare falcatura della linea di costa è interrotta a sud soltanto dalla foce dell'Arno, che sporge lievemente verso il mare.

I materiali che si sedimentano nel bacino provengono da un'area continentale caratterizzata da una grande varietà di rocce, principalmente di natura sedimentaria. Queste rocce possono essere suddivise fondamentalmente in due grandi gruppi:

- (1) Le rocce appartenenti ai complessi sedimentari coinvolti nell'orogenesi appenninica;
- (2) le rocce facenti parte delle successioni stratigrafiche post-orogeniche (Neoautoctono).

Del primo gruppo fanno parte:

— le Falde Liguri, costituite principalmente da argille e calcari fini nella parte inferiore, da torbiditi arenacei con intercalazioni marnoso-argillose nella parte superiore. Alle Liguridi s.l. sono sempre associate, in quantità più o meno rilevanti, masse magmatiche basiche ed ultrabasiche (ofioliti).

— Le Unità a facies toscana, metamorfiche (Toscanide I ed Unità di Massa) e non metamorfiche (Falda Toscana), costituite, nella parte inferiore, da formazioni carbonatiche e, nella parte superiore, da formazioni arenacee e marnoso-arenacee. Le unità metamorfiche hanno generalmente alla base un substrato di età triassica (Verrucano s.s.), costituito da metaconglomerati, scisti e quarziti, o un basamento di età paleozoica, rappresentato da filladi, scisti e porfiroidi.

Alle formazioni delle Unità Liguri e Toscane vanno aggiunte l'U-

nità di Canetolo, costituita da argille e calcari, e l'Unità del Cervarola, costituita principalmente da arenarie.

Del secondo gruppo fanno parte:

— la serie mio-pliocenica, costituita prevalentemente da sabbie e da argille marine e, subordinatamente, da conglomerati e da calcari organogeni.

— i depositi alluvionali quaternari, costituiti da sabbie, limi e argille, affioranti lungo tutta la fascia costiera e nei fondovalle dei principali corsi d'acqua.

Se si escludono le ofioliti, nell'area continentale adiacente il bacino non sono presenti rocce magmatiche.

Da ricordare infine le rocce metamorfiche, rappresentate dagli «schistes lustrés» (calcescisti), associate ad ofioliti, che affiorano nella piccola isola di Gorgona.

Nell'area continentale scarse sono le mineralizzazioni. Tra di esse ricordiamo le mineralizzazioni a solfuri misti (Fe, Pb, Cu, Zn) del Bottino e le mineralizzazioni a barite, cui sono associate quantità minori di solfuri, di Val di Castello e di Monte Arsiccio. L'estensione di queste mineralizzazioni è assai limitata e la loro influenza sulla mineralogia dei sedimenti può essere considerata trascurabile. Anche l'analisi di elementi in tracce, quali Pb, Zn, Cu, As, non mostra alcun contributo significativo di queste mineralizzazioni (LEONI *et al.*, 1993) ai sedimenti del bacino, nemmeno nelle zone più prossime ai loro affioramenti.

I principali corsi d'acqua che drenano l'area continentale sono l'Arno, il Serchio e il Magra. Nettamente subordinata è l'importanza del Frigido ed ancor più ridotta quella degli altri corsi d'acqua apuani, quali il Cinquale, il Tonfano, il Camaiole ecc., che hanno caratteri di torrenti intermittenti.

Il bacino del Magra è costituito dalla fusione di due vallate principali, tra loro «grosso modo» parallele: ad occidente la valle del fiume Vara, ad oriente l'alta e media valle del fiume Magra. La portata media del fiume, rilevata nella stazione di Calamazza, è di circa 40 m<sup>3</sup>/sec (RAGGI, 1976). Nel bacino del Magra affiorano serie di eu-geosinclinale comprendenti arenarie, calcareniti, calcari, marne, argille e rocce magmatiche di tipo ofiolitico; tra le serie di miogeosinclinale prevalgono quelle a composizione prevalentemente arenacea (Macigno, arenarie del Cervarola). La mineralogia delle sabbie che il fiume trasporta al mare è caratterizzata, in ordine di abbondanza, da quarzo, feldspati, miche, cloriti; sono presenti frammenti di rocce varie, con predominanza di quelle ofiolitiche. Relativamente scar-

so è il tenore in carbonati (GANDOLFI e PAGANELLI, 1975).

Il bacino del Serchio si estende principalmente nella Garfagnana e nella Val di Lima. La portata media del fiume, registrata a Borgo a Mozzano, è di circa 46 m<sup>3</sup>/sec (MM. LL. PP., Servizio Idrografico, 1923-1943 e 1946-1951). Il bacino si sviluppa soprattutto nelle formazioni della Falda Toscana, rappresentate qui sia dalle formazioni carbonatiche mesozoiche che dal Macigno. Vi affiorano anche, sebbene con limitata estensione, le formazioni del Verrucano s.s. e quelle del basamento paleozoico, presenti sia nei M. Pisani che nelle Alpi Apuane. La mineralogia delle sabbie del Serchio si differenzia da quella delle sabbie del Magra principalmente per un contenuto molto basso in frammenti di rocce ofiolitiche e per un minore contenuto di miche + cloriti (GANDOLFI e PAGANELLI, 1975).

Tra i tre principali tributari del bacino marino in esame l'Arno è il fiume che ha la maggiore lunghezza, il bacino idrografico più ampio e la portata media più cospicua. I valori di quest'ultima, registrata nella stazione di S. Giovanni alla Vena, è di 102 m<sup>3</sup>/sec (MM.LL.PP., Servizio Idrografico, 1923-1943 e 1946-1951). Data la sua notevole ampiezza risulta difficile delineare, seppur a grandi linee, le caratteristiche litologiche del suo bacino. Si può tuttavia sottolineare la notevole estensione che in esso raggiungono le aree di affioramento delle formazioni arenacee (Macigno e arenarie del Cervarola) e la non trascurabile presenza delle serie neoautoctone del Pliocene (sabbie ed argille) e dei depositi quaternari. La mineralogia delle sabbie dell'Arno si differenzia da quella del Magra e del Serchio principalmente per un maggior contenuto in quarzo e carbonati e per un più basso tenore in miche + cloriti (GANDOLFI e PAGANELLI, 1975).

Tra i fiumi minori il Frigido è l'unico ad avere un carattere perenne. La sua portata media è di 6.41 m<sup>3</sup>/sec (PICCINI e PRANZINI, 1989). Le rocce affioranti nel suo bacino appartengono al complesso metamorfico apuano (Toscanide I e Unità di Massa). Le sabbie del Frigido sono caratterizzate da un contenuto in carbonati molto elevato (< 50%) e tenori in clorite + miche paragonabili a quelli delle sabbie del Magra (GANDOLFI e PAGANELLI, 1975). Nelle sabbie di questo fiume è stata segnalata anche la presenza di moissanite (SiC) e di corindone (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (GANDOLFI e PAGANELLI, 1975). La presenza di questi minerali non è certamente di origine naturale, ma è imputabile agli scarichi industriali delle attività connesse alla lavorazione dei marmi, particolarmente diffuse nella zona.

Per quanto riguarda la circolazione delle acque nel bacino mari-

no in esame va osservato che i dati relativi ai «drift» costieri presenti in letteratura sono relativamente numerosi e dettagliati (AIELLO *et al.*, 1975; GANDOLFI e PAGANELLI, 1975) mentre meno conosciuta, anche perché più complessa, è la situazione delle correnti al largo (ASTRALDI e GASPARINI, 1986; GASPARINI *et al.*, 1987; ASTRALDI *et al.*, 1993). Secondo ASTRALDI e GASPARINI (1986) la complessità di quest'ultima è dovuta a vari fattori, tra i quali l'incontro tra tre differenti tipi di acqua: quella ligure (più fredda), quella tirrenica (più calda) e quella della costa toscana, molto influenzata dagli apporti fluviali. Vanno inoltre considerati gli effetti legati alla morfologia del fondo, che in quest'area è abbastanza accidentata, ed alla presenza del Canale di Corsica, che può favorire la creazione di movimenti che tendono a propagarsi verso la piattaforma ligure e quella dell'Alto Tirreno. Comunque, per la zona oggetto del presente studio, ASTRALDI e GASPARINI (1986) propongono uno schema di circolazione con flussi generali rivolti verso nord, ma con la formazione di vortici e di meandri. La parte più meridionale del bacino, cioè quella a sud della foce dell'Arno, è soggetta a variazioni stagionali, ed anche interannuali, più marcate (ASTRALDI *et al.*, 1993); in particolare il flusso generale verso nord vi appare massimo in inverno, tende ad indebolirsi in estate e risulta variabile in autunno, con possibilità anche di una sua completa inversione (GASPARINI *et al.*, 1987). Nel periodo autunnale si possono avere, cioè, correnti che dalla foce dell'Arno fluiscano verso sud, sino oltre Livorno, ruotando in senso antiorario intorno alle Secche della Meloria ed all'isola di Gorgona. L'ostacolo costituito dalle Secche della Meloria provoca, nelle zone circostanti, la frequente formazione di vortici, che tendono a far ricircolare a lungo l'acqua in una stessa zona; questo fenomeno è stato osservato al largo di Livorno in quasi tutte le stagioni (GASPARINI *et al.*, 1987).

Per quanto concerne i «drifts» costieri AIELLO *et al.* (1975) distinguono un «drift» distale e un «drift» prossimale. Il «drift» costiero distale, che agisce nella zona oltre l'isobata dei 10 m, è diretto da nord verso sud nella zona tra Punta Bianca e Marina di Pietrasanta, mentre è diretto in senso inverso nel tratto tra Bocca d'Arno e Marina di Pietrasanta. La zona antistante Marina di Pietrasanta rappresenta una zona neutra, senza «drift» prevalente, ad equilibrio trasversale. A sud dell'Arno il «drift» distale è diretto da nord a sud tra Bocca d'Arno e una zona neutra situata tra Tirrenia e Calambrone, mentre si inverte tra questa zona e Livorno.

Il «drift» costiero prossimale ha un andamento più complesso ed è soggetto a maggiori variazioni stagionali ed annuali. Nella zona

a sud dell'Arno esso appare diretto da sud a nord tra Tirrenia e Marina di Pisa, in senso inverso tra Tirrenia e Calambrone e di nuovo da sud a nord tra Livorno e quest'ultima località. A nord dell'Arno il «drift» prossimale fluisce parallelamente e nello stesso verso di quello distale, anche se sono presenti inversioni locali nella zona compresa tra la foce del Cinquale e quella del Frigido (AIELLO *et al.*, 1975).

#### CAMPIONAMENTO E METODOLOGIE DI STUDIO

Nel corso di una crociera oceanografica organizzata dall'ENEA, che ebbe luogo nell'autunno del 1987 a bordo della nave Bannock, sono stati raccolti, mediante una benna Shipek, 48 campioni di sedimento superficiale e, tramite un carotiere Reineck, tre carote di circa 30 cm di lunghezza.

La posizione delle stazioni di prelievo dei campioni di sedimento superficiale (punti pieni) e delle carote (triangoli pieni) è indicata in fig. 1. Nel complesso tali stazioni sono distribuite in modo da coprire abbastanza uniformemente le diverse aree del bacino; la campionatura risulta carente soltanto nella zona delle Secche della Meloria, dove, a causa dei bassi fondali, la raccolta di campioni da una nave oceanografica risulta particolarmente difficile o, spesso, addirittura impossibile.

I campioni, prima di essere studiati, sono stati sottoposti a dialisi per eliminare i sali marini in essi contenuti. L'analisi granulometrica è stata effettuata sul campione globale (senza rimozione dei bioclasti), mediante sedigrafo per la frazione inferiore a 63  $\mu\text{m}$  e mediante setacciatura in acqua per la frazione superiore a 63  $\mu\text{m}$ .

Le analisi chimiche degli elementi maggiori sono state eseguite sul campione globale in fluorescenza-X, seguendo la procedura proposta da FRANZINI *et al.* (1975). I componenti volatili ( $\text{H}_2\text{O}^+$ ,  $\text{CO}_2$  e materia organica) sono stati determinati globalmente, come perdita alla calcinazione a 850°C, sulla polvere essiccata a 110°C. L'anidride carbonica è stata anche dosata singolarmente tramite gasometria (LEONE *et al.*, 1988).

La composizione mineralogica qualitativa del campione globale e della frazione argillosa è stata determinata in diffrazione di polvere a raggi-X. La stima quantitativa dei vari componenti mineralogici è stata ottenuta, per ogni campione, tramite una metodologia che combina i dati chimici con quelli diffrattometrici (LEONI *et*

*al.*, 1988). In una prima fase sono state stimate le quantità dei minerali «non argillosi» in diffrazione-X, mediante il metodo dello standard esterno (KLUG e ALEXANDER, 1974), sul campione globale. La differenza a 100 della somma di tali componenti è stata assegnata interamente ai minerali argillosi; le proporzioni relative di questi ultimi sono state poi determinate, a livello semiquantativo, sulla frazione a granulometria inferiore ai 4  $\mu\text{m}$  con il metodo di BISCAVE (1965).

La composizione mineralogica quantitativa definitiva è stata quindi ottenuta per affinamento delle stime semiquantitative iniziali tramite un programma di calcolo che combina i dati chimici, relativi al campione globale, con quelli diffrattometrici (LEONI *et al.*, 1988). È questa la metodologia più affidabile attualmente in uso per l'esecuzione di analisi mineralogiche quantitative di sedimenti pelitici (CALVERT e PALKOWSKI, 1985).

## I CAMPIONI SUPERFICIALI

### *Caratteri granulometrici*

I risultati delle analisi granulometriche sono sinteticamente esposti in tab. 1, nella quale sono riportate le percentuali in peso delle principali classi della scala di Wentworth (ghiaia, sabbia, limo e argilla).

In fig. 2 è illustrata la distribuzione areale delle principali facies sedimentarie; per ogni stazione è riportato il contenuto (% in peso) di argilla del sedimento. Essa mostra chiaramente come la distribuzione delle facies nel bacino sia profondamente influenzata dalla batimetria. I sedimenti a granulometria più fine (argille limose) sono per lo più presenti nelle zone più esterne del bacino, oltre l'isobata dei 50 m. I sedimenti più fini in assoluto, cioè le argille s.s. sono localizzate in una zona molto ristretta, situata all'incirca tra le Secche della Meloria e l'Isola di Gorgona. La deposizione prevalente di materiali fini in tale area deve probabilmente essere messa in relazione con la presenza di un vortice locale nella circolazione delle correnti. Una caratteristica di quest'area è anche l'assenza di un'elevata attività biologica, presente invece nelle zone vicine, e quindi l'assenza di bioclasti a granulometria grossolana.

I limi argillosi sono, in genere, compresi tra l'isobata dei 50 m e quella dei 20 m, ma si possono spingere fino sotto costa in corri-

Tab. 1 - *Composizione granulometrica dei campioni superficiali (Alto Tirreno - Mar Ligure, bacino compreso fra La Spezia e Livorno).*

(I contenuti delle frazioni granulometriche sono espressi come % in peso).

	GH	SA	LI	AR	Classificazione granulometrica
27A	0	11.3	74.1	14.6	Limo
27B	0	1.6	56.1	42.3	Limo argilloso
28A	0	4.2	61.3	34.5	Limo argilloso
28B	0	5.5	56.7	37.8	Limo argilloso
28C	0	0.2	50.9	48.9	Argilla limosa
29A	0	63.0	23.7	13.3	Sabbia limosa
29B	0.1	48.1	36.2	15.5	Sabbia limosa
29C	0	31.6	55.4	13.0	Limo sabbioso
29D	0	0.4	46.8	52.8	Argilla limosa
30A	0.1	32.1	35.9	31.9	«Loam»
30B	0	84.2	13.6	2.2	Sabbia
30C	0	31.1	41.4	27.5	«Loam»
30D	0.3	1.0	55.3	43.4	Limo argilloso
31A	0	74.1	19.9	6.0	Sabbia limosa
31B	0	80.8	14.8	4.4	Sabbia
31C	0	5.6	67.0	27.4	Limo argilloso
32A	0.1	3.2	66.7	30.0	Limo argilloso
32B	0	3.2	61.9	34.9	Limo argilloso
32C	0	0	39.0	61.0	Argilla limosa
32D	0	1.6	26.6	71.8	Argilla limosa (limo parz. organog.)
32E	0.5	10.5	30.3	58.7	Argilla limosa (limo parz. organog.)
33A	0	4.0	70.1	25.9	Limo argilloso
33B	0	0.4	57.6	42.0	Limo argilloso
33C	0	81.1	11.5	7.4	Sabbia
33D	0	0.2	57.9	41.9	Limo argilloso
33E	0	1.0	59.4	39.6	Limo argilloso
33F	0	0.9	42.6	56.5	Argilla limosa
34A	0	0.1	44.9	55.0	Argilla limosa
34B	0	0	74.0	36.0	Limo argilloso
34C	0	0	46.0	54.0	Argilla limosa
35A	0	87.2	7.4	5.4	Sabbia
35B	0	6.2	49.7	44.1	Limo argilloso
35C	0	3.7	50.1	46.2	Limo argilloso
35D	0	0	59.0	41.0	Limo argilloso
35E	0	0.8	54.6	44.6	Limo argilloso
35F	0	0.1	25.0	74.9	Argilla
36A	0	82.0	15.3	2.7	Sabbia
36C	21.5	45.1	13.0	20.4	Sabbia ghiaiosa (organog.)
36D	0	8.4	5.5	86.1	Argilla (sabbia e limo organog.)
36E		n.d.			
36F	0	0.8	23.8	75.4	Argilla limosa (limo organog.)
37B	12.3	87.7	0	0	Sabbia (organog.)
37C		n.d.			
37D	2.9	93.1	1.1	2.9	Sabbia (organog.)
37E	0	15.5	3.4	81.1	Argilla (sabbia e limo organog.)
37F	1.5	46.7	17.6	34.2	Sabbia argillosa (organog.)
37G	0	36.4	7.0	56.6	Argilla sabbiosa (sabbia e limo organog.)
37H	0	2.5	27.3	70.2	Argilla limosa (limo organog.)

GH = ghiaia; SA = sabbia; LI = limo; AR = argilla; n.d. = non determinato.

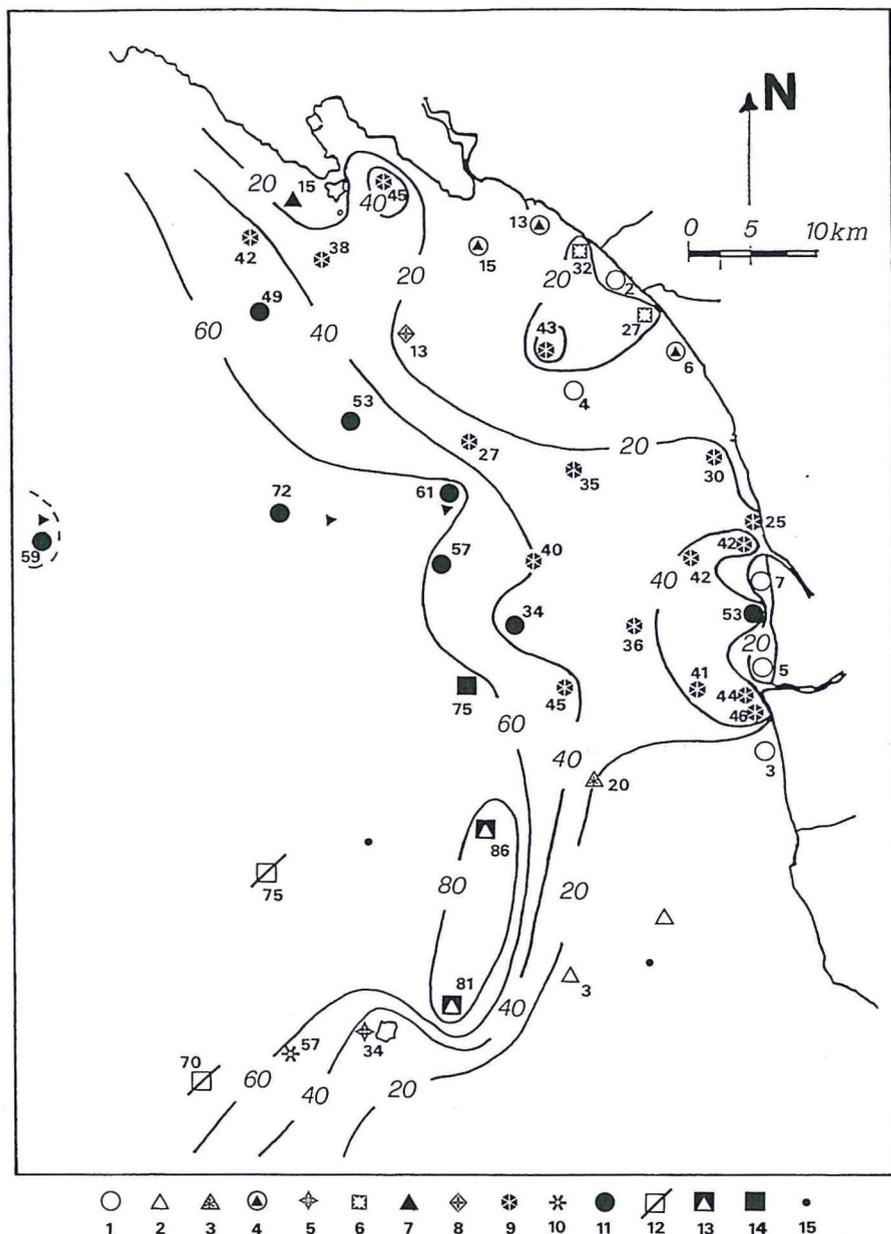


Fig. 2 - Distribuzione delle facies sedimentarie e del contenuto di argilla nei sedimenti (% in peso) nel bacino compreso tra La Spezia e Livorno. L'intervallo tra le linee di isoconcentrazione dell'argilla è del 20%.  
 Simboli grafici: 1 = sabbia (terrig.); 2 = sabbia (organ.); 3 = sabbia-ghiaiosa (organ.); 4 = sabbia-limosa; 5 = sabbia-argillosa (organ.); 6 = loam; 7 = limo; 8 = limo-sabbioso; 9 = limo-argilloso; 10 = argilla-sabbiosa (limo organ.); 11 = argilla-limosa; 12 = argilla-limosa (limo organ.); 13 = argilla (sabbia e limo organ.); 14 = argilla; 15 = campioni non analizzati.

spondenza delle foci dei fiumi Serchio ed Arno. Tra le foci dei due fiumi, sempre sotto costa, si possono trovare addirittura delle argille limose. Ciò è probabilmente conseguente al verificarsi di processi di flocculazione di materiali fini già nella prima zona di mescolamento dell'acqua fluviale con quella marina. Una situazione simile si ritrova anche nella zona del litorale apuano, in corrispondenza delle foci del Frigido e del Tonfano.

I sedimenti francamente sabbiosi, normalmente localizzati nella zona intorno ai 10 m, sono arealmente poco estesi a sud di Viareggio, mentre assumono un'importanza maggiore tra Viareggio e Bocca di Magra. In questa parte di bacino, se si esclude la piccola area antistante le foci del Frigido e del Tonfano, le sabbie formano un'ampia sacca che si spinge fino all'isobata dei 20 m; si tratta però di sedimenti nei quali assume una certa importanza anche la componente limosa.

La zona delle Secche della Meloria costituisce un'area molto particolare; essa è caratterizzata da una sedimentazione terrigena molto scarsa, nella quale i sedimenti di fondo presentano una distribuzione delle classi granulometriche tipicamente bimodale, essendo costituiti da una frazione terrigena molto fine (normalmente scarsissima) e da una frazione sabbiosa di natura bioclastica (molto abbondante). Caratteristiche simili si ritrovano nei sedimenti della zona circostante l'Isola di Gorgona, anche se qui la componente terrigena è ben rappresentata e quella bioclastica meno abbondante.

### *Caratteri mineralogici*

La composizione mineralogica dei sedimenti superficiali del bacino è riportata in tab. 2. La distribuzione areale dei principali minerali è illustrata nelle figure 3, 4, ecc., nelle quali il numero associato ad ogni stazione rappresenta il contenuto percentuale del minerale nel sedimento.

Nel caso dei minerali non carbonatici tali percentuali sono riferite alla sola frazione non carbonatica, cioè esse sono state ricalcolate riportandone a 100 la somma trascurando i carbonati. Poiché questi ultimi sono quasi sempre molto abbondanti e possono essere in larga misura di origine organica, l'accorgimento sopra citato è giustificato dall'opportunità di meglio evidenziare gli andamenti distributivi dei minerali esclusivamente terrigeni.

### *Carbonati*

I carbonati sono rappresentati in maniera significativa in tutti

TAB. 2 - *Composizione mineralogica dei campioni superficiali (Alto Tirreno - Mar Ligure, bacino compreso fra La Spezia e Livorno).*

(I contenuti dei minerali sono espressi come % in peso).

	Qz	Cc	Ar	Do	Pg	Kf	Mi	Cl	Ka	Sm
27A	26	14	—	4	7	4	27	9	6	3
27B	21	14	—	3	7	2	32	10	7	4
28A	22	17	—	3	6	4	30	10	5	3
28B	26	13	tr	4	8	5	26	9	5	4
28C	19	14	—	4	6	4	32	11	6	4
29A	31	13	—	4	11	6	24	7	2	2
29B	28	9	—	5	10	5	25	7	7	4
29C	31	10	—	5	11	6	23	7	4	3
29D	18	15	—	—	4	4	37	9	8	5
30A	16	21	—	7	4	4	26	13	4	5
30B	31	14	—	6	9	6	21	8	4	1
30C	15	26	—	8	6	4	25	8	3	5
30D	24	11	—	4	6	4	30	10	8	3
31A	31	9	—	4	11	6	23	10	4	2
31B	38	11	—	3	13	6	18	7	3	1
31C	27	12	—	4	8	4	27	9	7	2
32A	22	11	tr	4	7	5	30	12	7	2
32B	24	12	—	3	7	5	27	11	7	4
32C	18	11	—	4	4	4	33	14	8	4
32D	14	14*	tr	3	4	2	38	12	7	6
32E	8	35*	7	—	2	0	26	7	4	11
33A	29	12	tr	2	13	5	22	8	4	5
33B	22	9	—	4	5	4	34	10	6	6
33C	42	12	—	3	13	7	12	5	4	2
33D	25	11	—	3	8	5	27	9	5	7
33E	20	10	tr	5	5	4	34	8	7	7
33F	14	10	—	4	5	5	36	11	6	9
34A	21	6	—	5	5	4	34	10	11	4
34B	18	8	—	3	6	2	36	10	6	11
34C	17	9	—	5	4	2	35	11	8	9
35A	33	10	—	1	11	5	23	9	5	3
35B	24	9	—	2	9	2	32	10	6	6
35C	26	9	—	2	8	4	30	10	6	5
35D	23	8	—	4	6	5	28	12	8	6
35E	18	8	—	4	4	4	34	13	8	7
35F	14	12	—	2	4	2	40	12	7	7
36A	40	9	—	6	15	7	14	4	4	1
36C	2	67*	16	1	3	1	6	2	1	1
36D	12	19*	3	1	4	—	38	10	7	6
36E	14	22*	—	1	3	—	36	10	8	6
36F	8	35*	—	1	3	—	32	6	5	10
37B	—	70*	21	2	—	—	4	1	—	2
37C	2	62*	21	3	1	—	6	3	1	1
37D	2	67*	19	2	2	—	4	2	1	1
37E	12	24*	5	1	3	1	32	8	7	7
37F	7	56*	12	—	2	—	14	3	3	3
37G	10	36*	9	2	3	—	23	5	5	7
37H	10	32*	4	1	3	—	28	6	8	8

\* Sono presenti calciti magnesiane.

Qz = quarzo; Cc = calcite; Ar = aragonite; Do = dolomite; Pg = plagioclasio; Kf = K-feldspato; Mi = Mica (illite e muscovite); Cl = clorite (+ «intergrades» cloritici + vermiculite); Ka = caolinite; Sm = smectite (+ interstratificati illite/smectite).

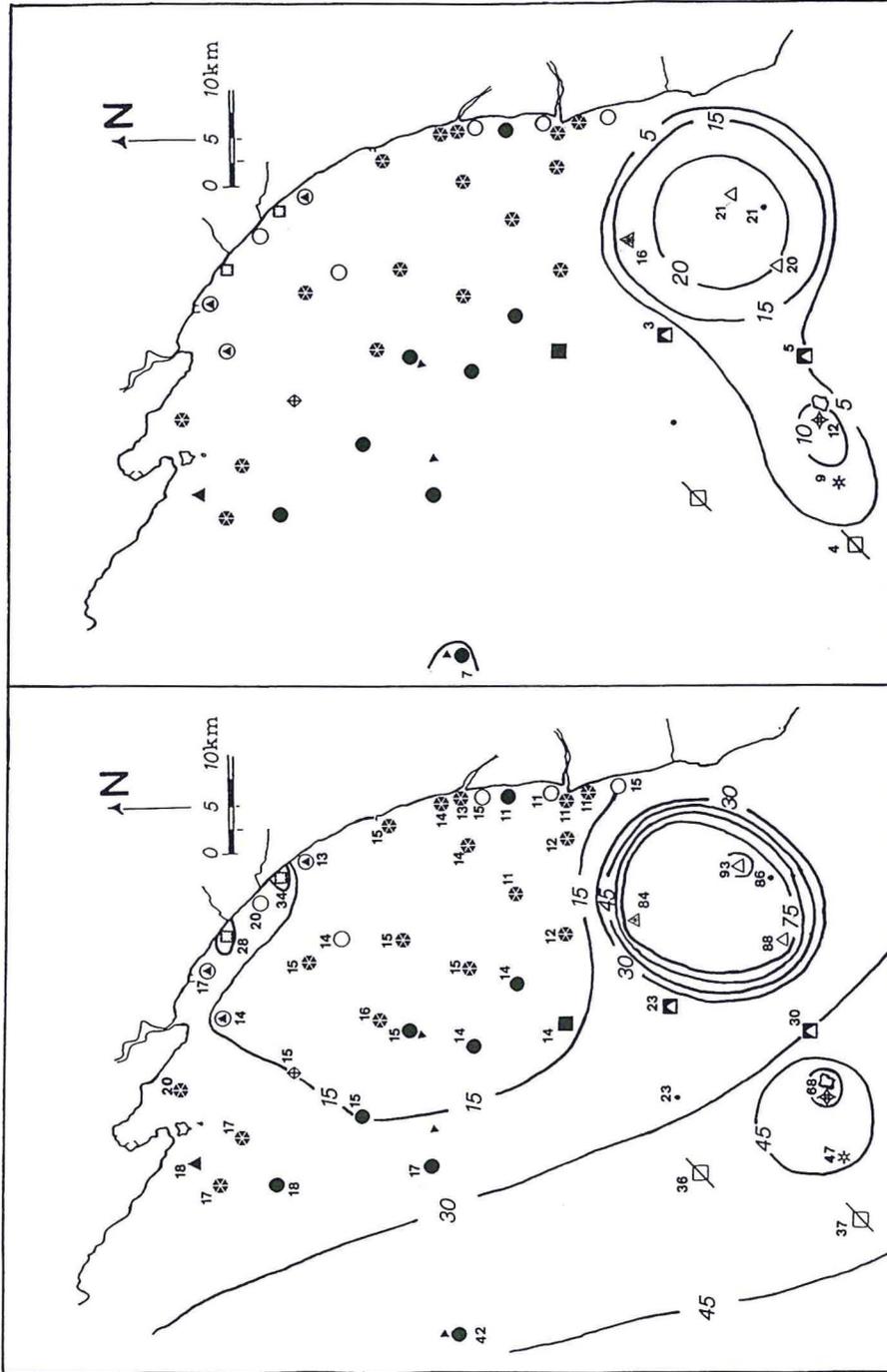


Fig. 3a - Distribuzione del contenuto in carbonati (calcite + aragonite + dolomite) nei sedimenti del bacino compreso tra La Spezia e Livorno (% in peso del campione globale). L'intervallo tra le linee di isoconcentrazione è del 15%.

Fig. 3b - Distribuzione del contenuto in aragonite nei sedimenti del bacino compreso tra La Spezia e Livorno (% in peso del campione globale). L'intervallo tra le linee di isoconcentrazione è del 5%.

i campioni (Fig. 3a), con tenori generalmente compresi fra il 10% ed il 45%; in alcune zone però essi arrivano anche al 90%.

È il caso delle Secche della Meloria, dove i tenori dei carbonati sono appunto compresi tra 80% e 90%. In questa zona l'alta concentrazione di carbonati è sicuramente imputabile alla elevata attività biologica, come suggeriscono l'elevato contenuto in aragonite (Fig. 3b) e la granulometria grossolana della frazione carbonatica, che appare costituita in prevalenza da frammenti di gusci di organismi marini. La prateria a Posidonia che occupa la zona delle Secche costituisce infatti una biocenosi riparata, caratterizzata da basse energie, dove organismi a guscio calcareo, quali molluschi, vermi (policheti), alghe calcaree ecc., hanno possibilità di prosperare (HINE *et al.*, 1987).

Un altro massimo, anche se meno pronunciato, è localizzato nella zona immediatamente circostante l'Isola di Gorgona, dove l'ambiente non è molto dissimile da quello delle Secche della Meloria (scarsa profondità, elevata attività biologica, ridotto apporto terrigeno).

Nelle porzioni centro-settentrionali del bacino non esistono massimi pronunciati nella distribuzione dei carbonati; nella zona compresa tra la costa e l'isobata dei 100 metri i tenori tendono ad aumentare progressivamente, ma con gradualità, verso il largo, dove la frazione biogena diviene via via più abbondante. Tale parte del bacino rappresenta chiaramente la zona di massima influenza degli apporti dei fiumi Arno e Serchio, le cui alluvioni contengono dal 13 al 16% di materiali carbonatici (GANDOLFI e PAGANELLI, 1975). Concentrazioni costiere relativamente più elevate (20-35%) si osservano in corrispondenza del litorale apuano. Esse sono presumibilmente da attribuirsi alla particolare composizione del carico di torbida dei corsi d'acqua provenienti dalle Alpi Apuane, dove affiorano, su vaste aree, rocce di natura carbonatica. GANDOLFI e PAGANELLI (1975) riportano infatti, per i sedimenti del Frigido, contenuti in carbonati superiori al 50%.

Nell'ambito della frazione carbonatica massimi contenuti di aragonite (Fig. 3b) si osservano in corrispondenza delle zone caratterizzate da una più alta attività biologica (Secche della Meloria e Isola di Gorgona). Essi si accompagnano spesso a quantità rilevanti di calciti magnesiane, ben evidenziabili nei diffrattogrammi di polvere per la forte asimmetria verso gli angoli alti del riflesso (104) del minerale. Come l'aragonite, anche le calciti magnesiane sono indicative di una abbondante frazione carbonatica organogena.

### *Quarzo e feldspati*

Quarzo, plagioclasio e K-feldspato presentano buone correlazioni positive fra di loro ed appaiono prevalentemente legati alla frazione sabbiosa e, subordinatamente, a quella limosa di origine terrigena, come mostra la matrice dei coefficienti di correlazione lineare riportata in tab. 3. In generale (Fig. 4b) si osserva una progressiva diminuzione dei tenori di questi componenti spostandosi dalla costa verso il largo. Le più alte concentrazioni di quarzo e feldspati si hanno sotto costa, in vicinanza delle foci del Serchio e dell'Arno. I due massimi più vistosi (> 70%) sono situati a sud di ciascuna delle due foci; per l'Arno questa zona coincide con la fascia antistante Tirrenia. Massimi meno pronunciati (> 50%) sono localizzati a nord delle foci dei due fiumi e in una vasta area che si estende tra il litorale apuano, Bocca di Magra e l'isobata dei 50 metri. Quest'ampia zona rappresenta l'area di influenza delle alluvioni del Magra, che vengono trasportate verso sud dal «drift» costiero distale, probabilmente fino all'altezza di Marina di Pietrasanta (AIELLO *et al.*, 1975). La sua considerevole estensione verso il largo è spiegabile con l'interazione di tale «drift», diretto da nord-ovest verso sud-est, con la corrente generale dell'Alto Tirreno-Mar Ligure, che fluisce da sud-est verso nord-ovest. Per quanto concerne i soli feldspati (plagioclasio + K-feldspato) la loro distribuzione (Fig. 4a) è assai simile a quella dell'associazione quarzo + feldspati (Fig. 4b). I massimi più pronunciati, anche in questo caso, sono localizzati in prossimità delle foci dei fiumi Arno e Serchio e nell'area comprendente Bocca di Magra ed il litorale apuano.

### *Fillosilicati*

Tra i fillosilicati la mica è il minerale più abbondante nei sedimenti del bacino; molto subordinati quantitativamente appaiono la clorite, la caolinite e la smectite. Mica e smectite sono concentrate prevalentemente nelle frazioni a granulometria più fine, come evidenziato dai coefficienti di correlazione positivi piuttosto elevati di questi componenti con la frazione argillosa (Tab. 3). Caolinite e clorite, al contrario, presentano coefficienti di correlazione scarsamente significativi sia con le frazioni a granulometria più fine (argille e limi) sia con quelle a granulometria più grossolana (sabbie). Questo dato sta presumibilmente ad indicare la presenza di questi due minerali sia nelle frazioni fini che in quelle grossolane. Per la caolinite, che comunemente è un minerale a grana finissima, la sua associazione anche a frazioni relativamente grossolane può essere spiegata con la presenza di feldspati

TAB. 3 - Coefficienti di correlazione lineare tra elementi maggiori, minerali e frazioni granulometriche.

	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Qz	Pg	Kf	Cc	Ar	Do	Mi	Cl	Ka	Sm	Re	SA	LI	AR	
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.32																										
Na	-0.48	-0.87																									
Mg	-0.05	0.51	-0.62																								
Al	-0.55	0.45	-0.45	0.69																							
Si	-0.86	-0.73	0.85	0.33	0.06																						
P	-0.50	-0.17	0.37	0.43	0.09	0.50																					
K	-0.65	0.31	-0.27	0.71	0.93	0.22	0.07																				
Ca	0.99	0.28	-0.43	-0.12	-0.59	-0.83	-0.47	-0.70																			
Ti	-0.61	0.32	-0.30	0.37	0.88	0.20	0.41	0.78	-0.63																		
Mn	0.63	0.63	-0.73	0.15	0.04	-0.79	-0.32	-0.15	0.63	-0.03																	
Fe	-0.18	0.71	-0.73	0.75	0.87	-0.33	-0.07	0.80	-0.24	0.73	0.32																
Qz	-0.62	-0.88	0.96	-0.54	-0.28	0.93	0.44	-0.11	-0.58	0.10	-0.78	-0.61															
Pg	-0.51	-0.86	0.97	-0.62	-0.39	0.86	0.37	-0.24	-0.46	-0.24	-0.70	0.70	0.94														
Kf	-0.23	-0.72	0.78	-0.51	-0.62	0.71	0.05	-0.51	-0.10	-0.44	-0.65	-0.71	0.77	0.71													
Cc	0.98	0.32	-0.47	-0.10	-0.55	-0.84	-0.45	-0.67	0.98	-0.57	0.70	-0.20	-0.61	-0.49	-0.23												
Ar	0.88	-0.77	-0.08	-0.92	-0.93	-0.87	-0.55	-0.93	0.86	-0.98	-0.03	-0.56	-0.55	-0.57	0.00	0.76											
Do	-0.12	-0.13	0.26	0.18	-0.11	0.19	-0.09	0.15	-0.18	-0.20	-0.51	-0.08	0.22	0.13	0.29	-0.27	0.95										
Mi	-0.07	0.78	-0.80	0.74	0.83	-0.43	-0.18	0.72	-0.12	0.64	0.45	0.93	-0.71	-0.64	-0.78	-0.06	-0.84	-0.22									
Cl	-0.38	0.51	-0.41	0.70	0.76	-0.03	0.09	0.77	-0.43	0.63	-0.11	0.73	-0.29	-0.39	-0.48	-0.41	-0.76	0.10	0.63								
Ka	-0.23	0.36	-0.43	0.40	0.67	-0.10	0.20	0.54	-0.27	0.64	0.24	0.63	-0.28	-0.43	-0.42	-0.24	-0.88	-0.14	0.54	0.38							
Sm	0.38	0.73	-0.71	0.24	0.25	-0.66	-0.17	0.03	0.39	0.20	0.65	0.46	-0.77	-0.68	-0.64	0.40	0.16	-0.31	0.56	0.09	0.18						
Re	-0.01	0.84	-0.86	0.72	0.81	-0.50	-0.14	0.67	-0.06	0.65	0.48	0.94	-0.76	-0.81	-0.77	-0.02	-0.77	-0.23	0.96	0.67	0.59	0.65					
SA	-0.09	-0.60	0.73	-0.60	-0.68	0.46	0.08	-0.48	-0.04	-0.63	-0.39	-0.78	0.66	0.68	0.65	-0.11	0.95	0.22	-0.78	-0.49	-0.52	-0.58	-0.81				
LI	-0.37	-0.03	-0.06	0.39	0.50	0.19	0.15	0.49	-0.41	0.56	-0.33	0.38	0.02	-0.05	-0.20	-0.39	-0.24	0.23	0.27	0.39	0.26	0.04	0.27	-0.62			
AR	0.39	0.82	-0.89	0.43	0.44	-0.75	-0.21	0.21	0.36	0.34	0.78	0.66	-0.87	-0.83	-0.76	0.42	-0.87	-0.46	0.76	0.30	0.47	0.69	0.79	-0.72	-0.09		

Qz = quarzo; Cc = calcite; Ar = aragonite; Do = dolomite; Pg = plagioclasio; Kf = K-feldspato; Mi = mica; Cl = clorite; Ka = caolinite; Sm = smectite; Re = frazione fillosilicatica; AR = argilla; SA = sabbia; LI = limo.

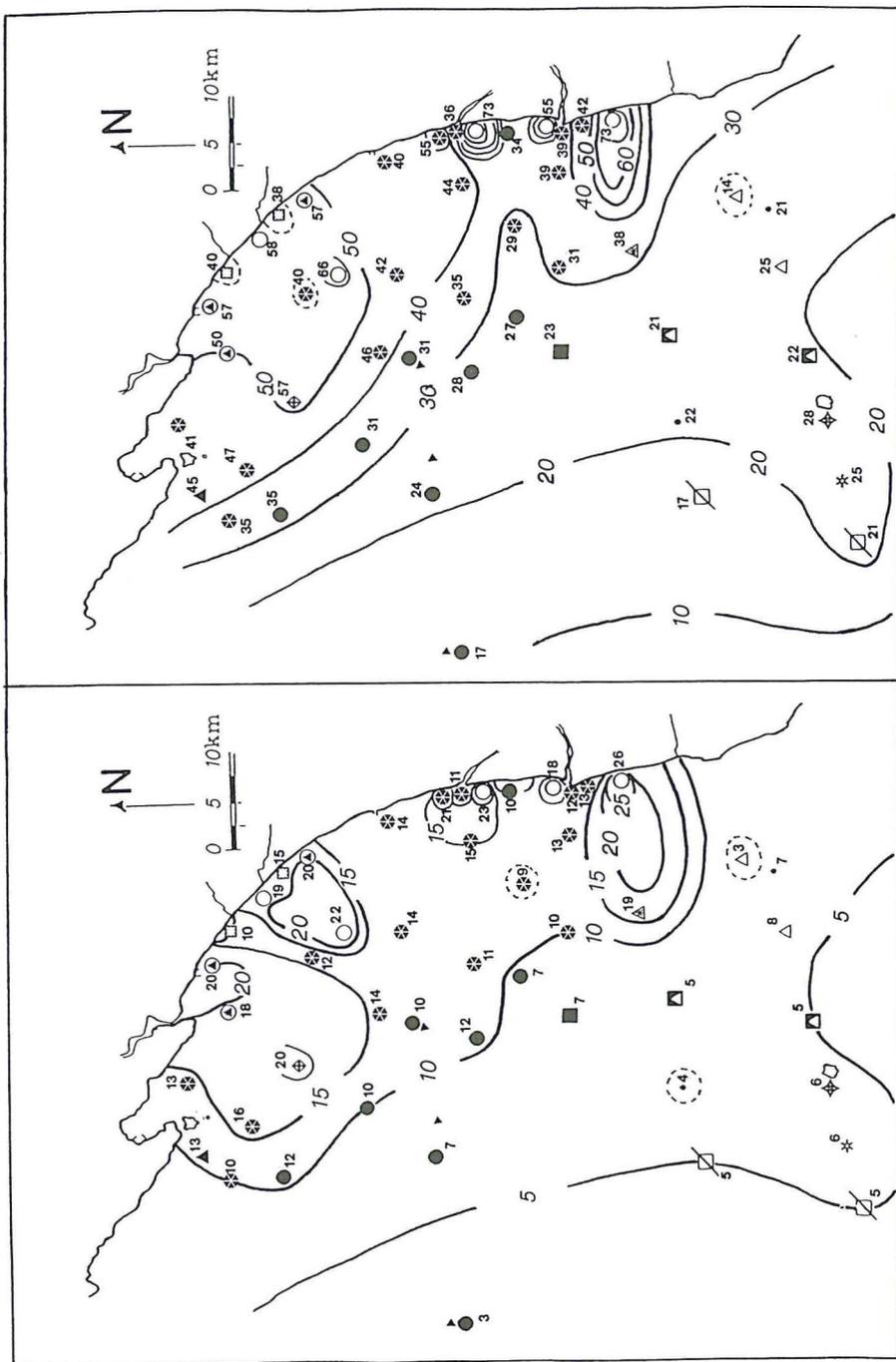


Fig. 4a - Distribuzione del contenuto in feldspati (plagioclasio + K-feldspato) nei sedimenti del bacino compreso tra La Spezia e Livorno (% in peso della frazione non carbonatica). L'intervallo tra le linee di isocentrazione è del 5%.  
 Fig. 4b - Distribuzione del contenuto in quarzo + feldspati (plagioclasio + K-feldspato) nei sedimenti del bacino compreso tra La Spezia e Livorno (% in peso della frazione non carbonatica). L'intervallo tra le linee di isocentrazione è del 10%.

più o meno profondamente caolinizzati per pseudomorfofi.

Mica - Sotto la generica denominazione di «mica» sono stati considerati insieme quei fillosilicati che nei diffratogrammi di polvere ai raggi X sono identificabili per un picco caratteristico a  $10 \text{ \AA}$  e cioè le illiti, le muscoviti e le biotiti più o meno alterate. Le biotiti sono assai rare; nei sedimenti più grossolani la mica presente è prevalentemente muscovite, mentre nei sedimenti più fini predomina largamente l'illite. I minerali micacei presentano una distribuzione (Fig. 5) che risulta influenzata sostanzialmente dalla granulometria dei sedimenti. Il loro tenore, infatti, appare aumentare progressivamente dalla costa verso il largo, secondo un andamento che ricalca esattamente quello dell'argilla, di cui l'illite è il componente di gran lunga dominante. I tenori più bassi (10-30%) si osservano in corrispondenza delle zone costiere, a sedimentazione terrigena prevalentemente sabbiosa, poiché la muscovite è una componente delle sabbie minore rispetto a quarzo e feldspati. Sotto costa tenori un po' più elevati si osservano in corrispondenza delle foci dei fiumi Arno e Serchio e di quelle dei fiumi apuani (Frigido e Cinquale), dove, per effetto di processi di flocculazione, si depositano anche materiali a granulometria più fine. Un massimo locale è situato in corrispondenza delle Secche della Meloria, dove i sedimenti hanno granulometrie tipicamente bimodali, essendo costituiti da una abbondantissima frazione bioclastica grossolana e da una scarsa frazione terrigena fine; in quest'ultima l'illite rappresenta un componente maggiore.

Clorite - Sotto il termine «clorite» sono stati raggruppati le cloriti s.s. e gli «intergrades» cloritici. Come è noto con «intergrades» cloritici si intendono delle fasi minerali con caratteristiche intermedie fra quelle delle cloriti s.s. e quelle delle vermiculiti o delle smectiti. Si tratta di minerali derivati da originarie vermiculiti e smectiti, che hanno subito un processo di parziale cloritizzazione per precipitazione di idrossidi di Fe, di Al o di Mg nella zona di interstrato, o di originarie cloriti, che sono state parzialmente degradate e che quindi posseggono strati brucitici (o gibbsitici) incompleti. Tali fasi hanno composizioni chimiche non molto differenti da quelle delle cloriti s.s. Di conseguenza, pur essendo ben identificabili e stimabili semiquantitativamente nei diffratogrammi di polvere ai raggi X, le loro quantità non sono poi affinabili separatamente da quelle delle cloriti con la metodologia adottata nel presente lavoro (LEONI *et al.*,

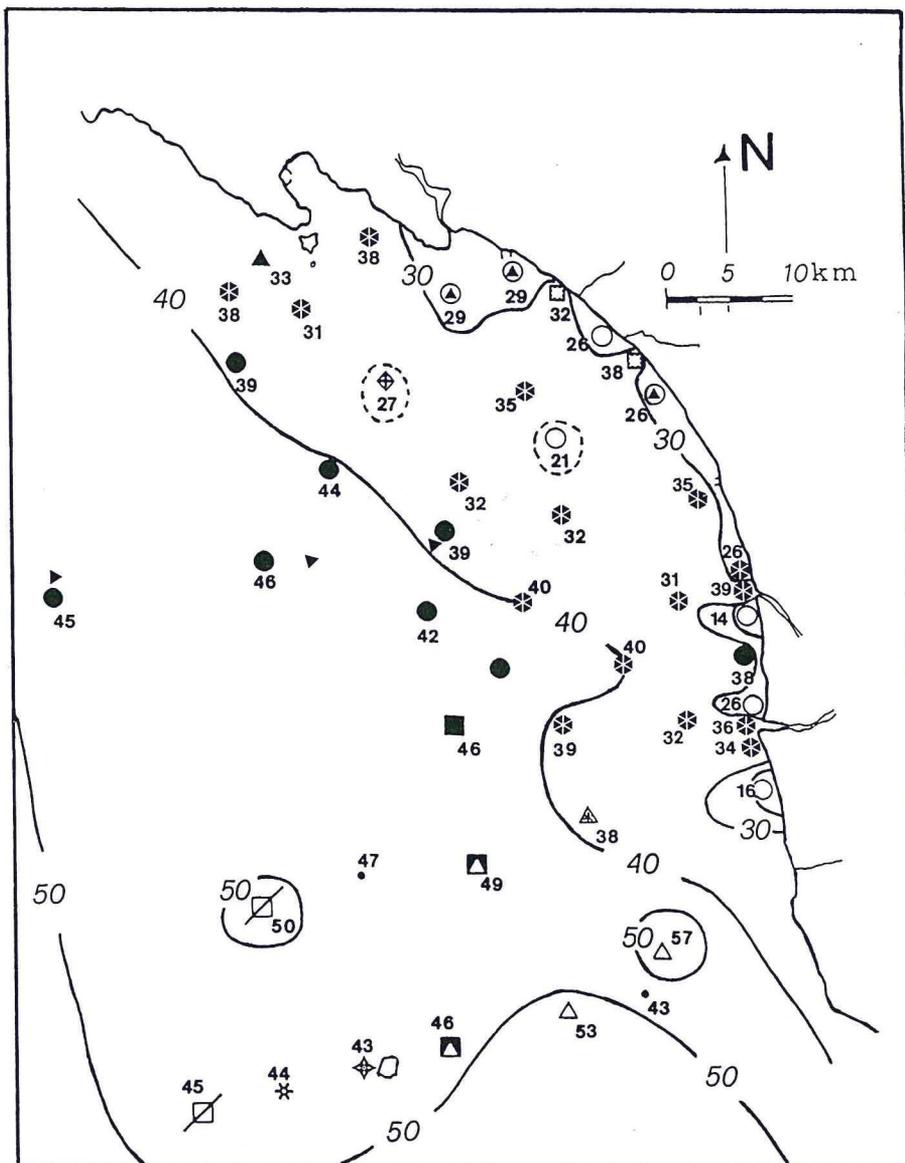


Fig. 5 - Distribuzione del contenuto in mica nei sedimenti del bacino compreso tra La Spezia e Livorno (% in peso della frazione non carbonatica). L'intervallo tra le linee di isoconcentrazione è del 10%.

1988). La distribuzione areale della somma «clorite s.s. + intergrades cloritici» (cloriti s.l.) è riportata in fig. 6b; la distribuzione dei soli «intergrades» cloritici è illustrata in fig. 6a mediante simboli gra-

fici che danno un'idea approssimativa dell'abbondanza di queste fasi, basata sui dati semiquantitativi deducibili dai diffrattogrammi. La clorite s.l. appare distribuita in maniera piuttosto uniforme nell'intero bacino (Fig. 6b); concentrazioni leggermente più elevate si registrano nella zona centrale, in un'ampia area situata tra l'isobata dei 50 metri e quella dei 200 m. e, lungo costa, in corrispondenza del litorale apuano. A differenza delle miche, le cloriti non aumentano dunque con continuità procedendo verso il largo. Si deve quindi pensare all'intervento di un meccanismo di sedimentazione selettivo che comporti una deposizione precoce della clorite, ad una distanza minore dalla costa rispetto all'illite. Questo comportamento del minerale potrebbe essere connesso con una sua maggiore densità o con le sue maggiori dimensioni granulometriche o potrebbe anche essere dovuto a processi di flocculazione che interessano prima i minerali a più bassa carica superficiale, come le cloriti, rispetto a quelli a più alta carica (come, ad esempio, illite e smectite) (ENGELHARDT, 1977).

La zona a concentrazione più elevata di clorite situata in corrispondenza del litorale apuano-versiliese può essere dovuta all'influenza degli apporti dei fiumi apuani, nelle cui torbide la clorite è piuttosto abbondante (GANDOLFI e PAGANELLI, 1975; QUAKERNAAT, 1968) o, più probabilmente, può essere riconducibile alla concentrazione locale dei fillosilicati relativamente più pesanti contenuti nelle alluvioni del Magra, che sono soprattutto disperse verso sud dal «drift» costiero. La clorite s.s. costituisce infatti un componente importante delle alluvioni del Vara (affluente principale del Magra), nel cui bacino idrografico sono molto diffuse rocce ricche in cloriti (ofioliti, «shales», ecc.).

Un massimo locale particolarmente evidente è situato in corrispondenza delle Secche della Meloria. Esso coincide con un massimo nella concentrazione dell'illite, la cui origine è già stata discussa. Si ritiene che il massimo di concentrazione della clorite sia spiegabile sulla base delle stesse considerazioni svolte a proposito dell'illite.

Per quanto concerne la distribuzione degli «intergrades» cloritici, dalla fig. 6a si evince chiaramente che questi minerali sono particolarmente diffusi ed abbondanti nei sedimenti della parte centrale e meridionale del bacino, mentre sono praticamente assenti in quelli deposti nella sua parte settentrionale, dove è presente sempre e soltanto una clorite s.s. Questo andamento distributivo è ben interpretabile sulla base di quanto evidenziato da SARTORI *et al.* (1979),

secondo i quali tali minerali sono caratteristici delle alluvioni dell'Arno, mentre non sono stati segnalati nei carichi di torbida degli altri corsi d'acqua tributari del bacino (QUAKERNAAT, 1968). Pertanto la loro presenza può essere utilizzata come tracciante delle alluvioni dell'Arno ed applicata all'individuazione delle zone dove più importante, o addirittura esclusiva, è la sua influenza.

Caolinite - La caolinite, individuata nel carico di torbida di tutti i fiumi tributari del bacino (QUAKERNAAT, 1968), è, in genere, un componente minore della frazione non carbonatica dei sedimenti marini analizzati (Fig. 7a). Le concentrazioni più basse di questo minerale si osservano tra l'isobata dei 10 m e la costa, dove l'energia ambientale, piuttosto elevata, non permette il suo accumulo. Tra i campioni prelevati lungo costa fanno eccezione soltanto quello rappresentativo della zona immediatamente a sud del porto di Viareggio e quello della zona intermedia tra la foce d'Arno e la foce di Serchio, che presentano tenori in caolinite relativamente alti (rispettivamente 8% e 12% della frazione non carbonatica). Non a caso però tali zone sono caratterizzate da sedimenti eccezionalmente fini per la loro ubicazione costiera; essi contengono rispettivamente il 30% e il 53% di argilla.

Tenori di caolinite leggermente più elevati della media si osservano anche nella zona centrale del bacino, a sud-est di Bocca di Magra, ed in una vasta area meridionale al largo di Livorno. Questi massimi, anche se scarsamente significativi, potrebbero indicare zone ad energia ambientale relativamente più bassa rispetto alle zone circostanti o zone a lunga residenza delle masse d'acqua, per la presenza di vortici nella circolazione delle correnti, nelle quali è favorita la sedimentazione delle particelle più fini.

Nell'ampia zona di massimo più meridionale spicca, al largo della Gorgona, un'area caratterizzata da concentrazioni di caolinite nettamente più elevate. Questa particolare concentrazione di caolinite potrebbe essere connessa con la sedimentazione di materiali alloctoni fini apportati da correnti marine e/o aeree (TOMADIN, 1981) provenienti da sud, analogamente a quanto osservato da LEONI *et al.* (1991) per alcune zone più esterne del bacino tirrenico compreso tra Livorno e l'Isola d'Elba.

Smectite - La smectite (sotto questo nome sono stati raggruppati sia la smectite s.s. che gli strati misti illite/smectite) è scarsamente rappresentata in tutti i sedimenti esaminati, sebbene si ritrovi, più o meno abbondante, nelle alluvioni di tutti i fiumi tributari del

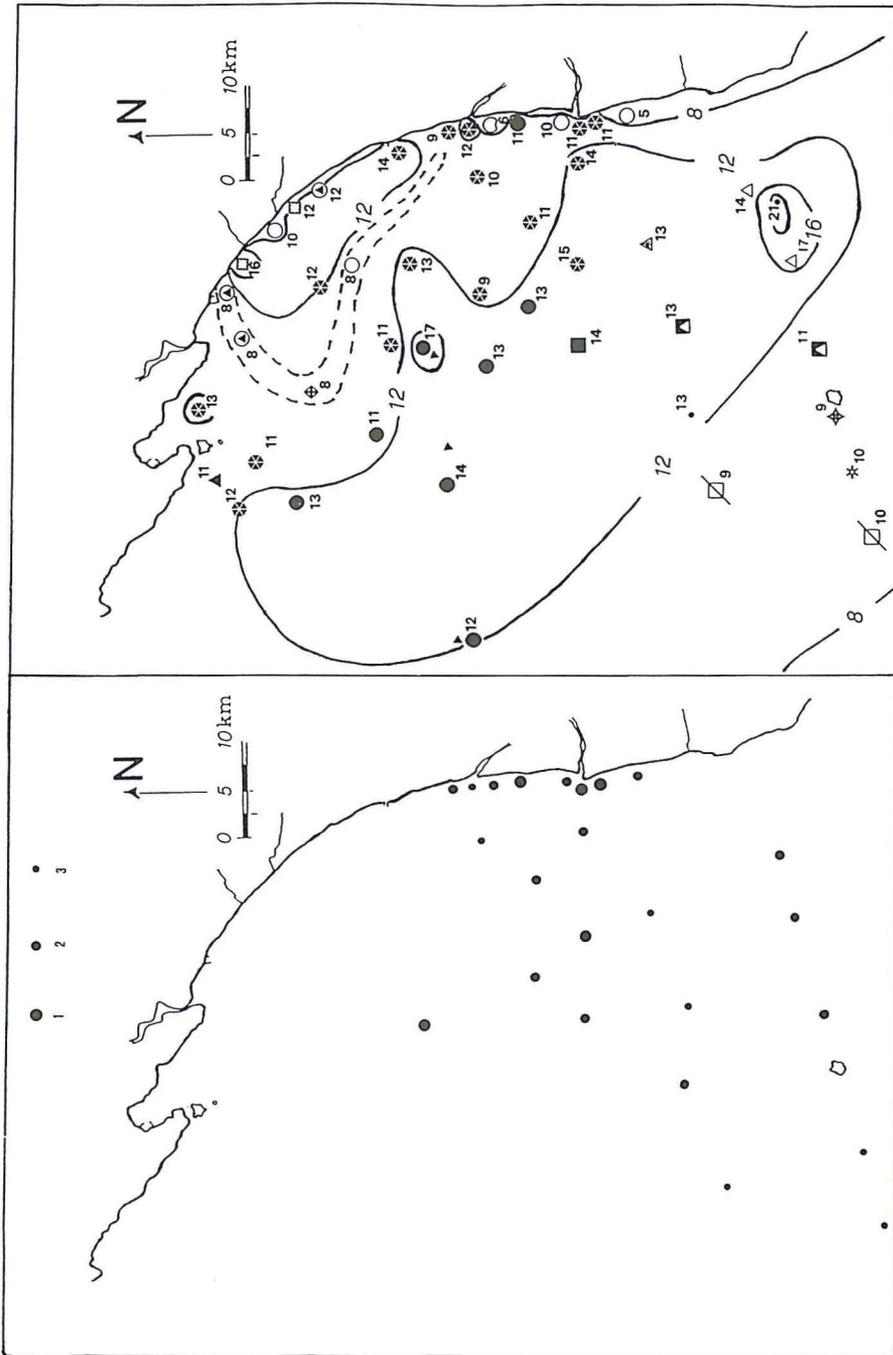


Fig. 6a - Distribuzione del contenuto in «intergrades» cloritici nei sedimenti del bacino compreso fra La Spezia e Livorno. Simboli grafici: 1 = molto abbondante; 2 = mediamente abbondante; 3 = poco abbondante.

Fig. 6b - Distribuzione del contenuto in clorite nei sedimenti del bacino compreso fra La Spezia e Livorno (% in peso della frazione non carbonatica). L'intervallo tra le linee di isoclorite è del 4%.

bacino; soltanto nelle alluvioni del Magra le sue quantità sono realmente molto piccole (QUAKERNAAT, 1968).

La smectite è, normalmente, il componente più fine della frazione argillosa; essa viene quindi allontanata dalle zone dove i movimenti dell'acqua risultano più attivi, dispersa su vaste aree e deposta solo in zone di calma relativa.

L'importanza del contributo della smectite alla composizione dei sedimenti marini del bacino è illustrata in fig. 7b; il contenuto di smectite, generalmente basso, tende a crescere verso il largo, ma solo verso l'isobata dei 200 m raggiunge valori significativamente più elevati ( $> 10\%$ ) che nel resto del bacino. Nei sedimenti sotto costa il contenuto di smectite è molto basso, fatta eccezione per pochi campioni situati in corrispondenza delle foci dei fiumi Arno, Serchio, Frigido e Cinquale; questi campioni sono sempre caratterizzati da una granulometria piuttosto fine e derivano, in parte, dalla flocculazione del carico di torbida dei fiumi stessi. Nei sedimenti compresi nel tratto di mare tra Bocca di Magra e Viareggio, dove più forte è l'influenza delle alluvioni del Magra, il contenuto di smectite si mantiene molto basso ( $< 4\%$ ) anche in zone relativamente distanti dalla costa, fino all'isobata dei 100 m.

Un massimo modesto ( $> 10\%$ ), peraltro scarsamente significativo, è ubicato nella zona centrale del bacino, al largo delle foci dell'Arno e del Serchio. Tale massimo corrisponde, in parte, anche con una delle zone di particolare concentrazione della caolinite (Fig. 7a). Tale coincidenza sembrerebbe suggerire che in questa parte del bacino sia presente, nella circolazione delle correnti, un vortice che favorisce la sedimentazione dei materiali più fini.

### *Caratteri chimici*

La composizione chimica dei sedimenti superficiali è riportata in tab. 4. Come era da aspettarsi, la distribuzione degli elementi maggiori è largamente influenzata dalla granulometria dei sedimenti e dalla loro composizione mineralogica. La matrice dei coefficienti di correlazione lineare, riportata in tab. 3, illustra bene queste relazioni.

Al, Fe e, in minor misura, Mg, K e Ti appaiono legati principalmente ai minerali della frazione fillosilicatica. Risultano invece assenti, o scarsamente significative, le correlazioni tra questi elementi e la frazione a granulometria più fine (argilla). Questo dato, apparentemente in contrasto con la buona correlazione positiva prece-

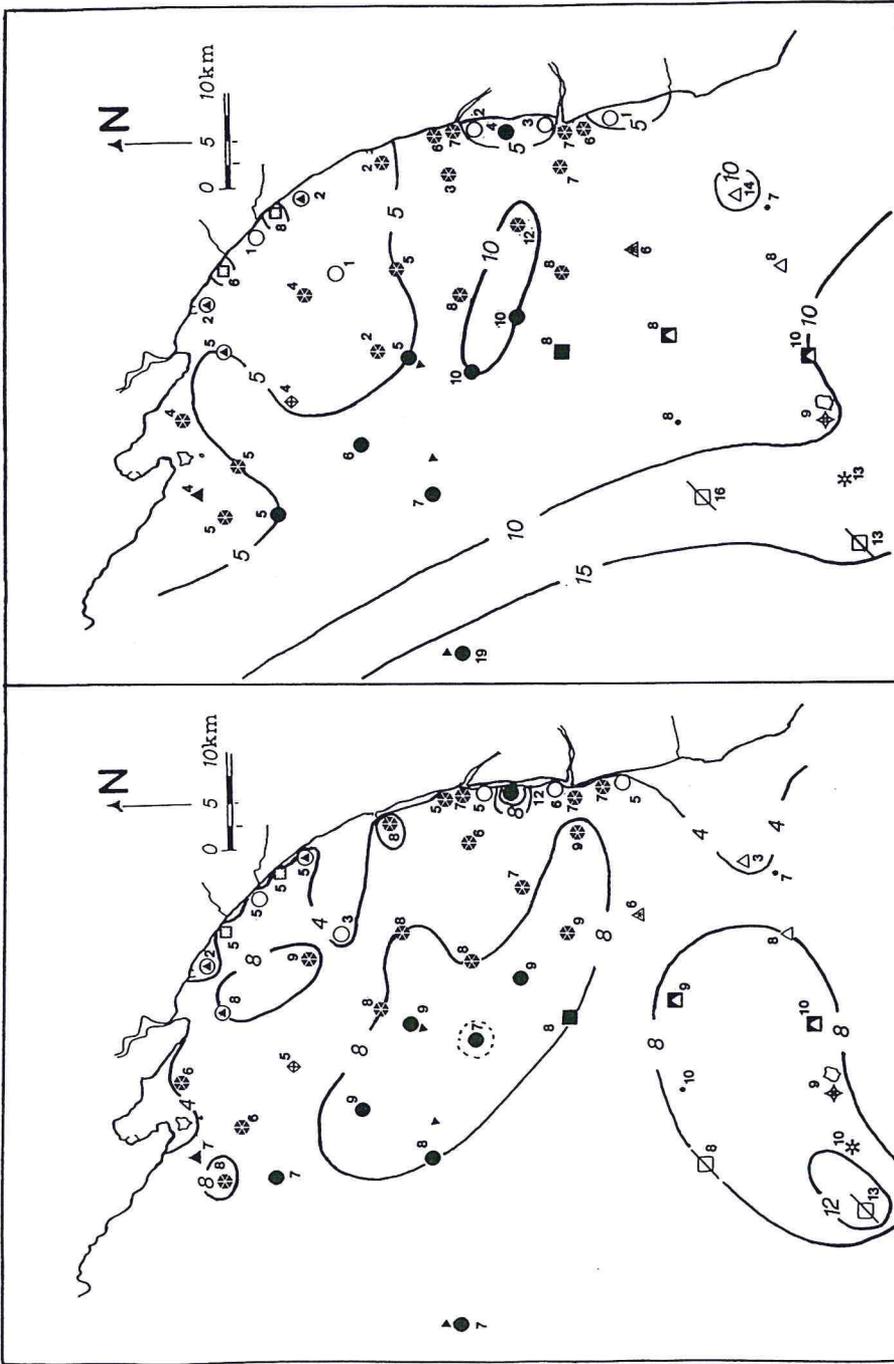


Fig. 7a - Distribuzione del contenuto in caolinite nei sedimenti del bacino compreso tra La Spezia e Livorno (% in peso della frazione non carbonatica). L'intervallo tra le linee di isoconcentrazione è del 4%.

Fig. 7b - Distribuzione del contenuto in smectite nei sedimenti del bacino compreso tra La Spezia e Livorno (% in peso della frazione non carbonatica). L'intervallo tra le linee di isoconcentrazione è del 5%.

TAB. 4 - *Composizione chimica dei campioni superficiali (Alto Tirreno - Mar Ligure, bacino compreso fra La Spezia e Livorno).*  
(I componenti maggiori sono espressi come % in peso).

	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
27A	2.30	8.13	1.19	3.78	13.99	53.23	0.15	2.36	8.82	0.65	0.11	5.30
27B	4.19	7.50	0.91	3.92	15.34	50.59	0.14	2.45	8.31	0.69	0.11	5.85
28A	2.83	8.90	0.98	3.84	14.35	50.00	0.14	2.38	10.18	0.68	0.11	5.61
28B	2.18	7.67	1.26	3.94	14.11	54.37	0.14	2.24	8.22	0.65	0.09	5.12
28C	5.06	8.01	0.80	3.95	15.30	48.57	0.14	2.47	8.51	0.72	0.15	6.33
29A	1.45	7.68	1.60	3.44	12.16	57.88	0.11	2.20	8.40	0.49	0.08	4.50
29B	2.21	6.25	1.45	3.79	14.17	57.30	0.13	2.35	6.69	0.59	0.10	4.97
29C	0.89	6.89	1.65	3.57	13.08	59.05	0.15	2.18	6.94	0.59	0.09	4.92
29D	4.96	6.70	0.75	4.01	16.30	49.57	0.14	2.67	6.83	0.82	0.19	7.06
30A	7.99	12.80	0.88	4.14	12.47	40.88	0.15	2.13	12.67	0.52	0.11	5.26
30B	0.33	8.50	1.42	4.13	12.37	56.27	0.10	2.24	9.92	0.45	0.07	4.20
30C	5.44	15.30	1.07	3.45	10.71	39.33	0.13	2.06	16.75	0.46	0.11	5.20
30D	3.48	6.80	1.03	3.87	15.47	52.93	0.14	2.48	6.85	0.74	0.11	6.09
31A	1.11	5.70	1.72	3.85	13.44	59.91	0.12	2.43	6.33	0.51	0.09	4.78
31B	0.40	5.70	1.97	3.04	11.35	63.82	0.16	1.94	7.01	0.54	0.09	3.96
31C	1.91	7.25	1.20	3.71	14.62	54.77	0.15	2.38	7.36	0.72	0.10	5.82
32A	3.48	6.90	1.04	4.13	15.58	52.23	0.12	2.56	6.76	0.76	0.11	6.33
32B	2.34	6.70	1.07	3.86	15.13	54.53	0.16	2.40	7.37	0.72	0.09	5.63
32C	5.87	6.88	0.76	4.01	16.08	48.60	0.14	2.64	7.23	0.77	0.12	7.00
32D	6.60	7.76	0.61	4.02	16.33	45.88	0.15	2.59	8.34	0.73	0.16	6.82
32E	6.38	18.60	0.51	3.44	11.26	31.22	0.11	1.67	21.74	0.50	0.19	4.39
33A	1.44	6.25	1.71	3.36	13.40	58.85	0.15	2.10	7.47	0.61	0.09	4.57
33B	4.51	5.78	0.87	3.87	15.87	52.79	0.13	2.61	5.96	0.80	0.12	6.70
33C	0.21	5.70	2.09	2.47	10.20	65.63	0.21	1.80	7.74	0.66	0.09	3.21
33D	3.39	6.25	1.15	3.54	14.43	55.56	0.14	2.23	6.84	0.78	0.10	5.61
33E	4.80	6.95	0.96	3.86	15.56	51.51	0.14	2.43	6.76	0.72	0.11	6.19
33F	6.10	6.35	0.70	4.02	16.34	48.46	0.15	2.69	7.09	0.77	0.15	7.18
34A	5.49	4.90	0.84	3.92	17.06	52.68	0.14	2.70	4.67	0.78	0.11	6.72
34B	5.93	4.76	0.93	3.90	16.31	51.91	0.14	2.60	5.84	0.75	0.12	6.80
34C	6.14	6.50	0.72	4.01	16.65	48.70	0.15	2.64	6.54	0.77	0.15	7.03
35A	3.11	4.96	1.52	2.95	13.07	61.03	0.16	2.10	5.80	0.65	0.11	4.54
35B	4.20	5.04	1.10	3.58	15.92	55.33	0.17	2.45	5.34	0.82	0.10	5.94
35C	3.84	4.78	1.17	3.54	15.60	56.62	0.16	2.38	5.50	0.76	0.10	5.55
35D	4.96	5.32	0.95	3.67	15.78	53.94	0.15	2.45	5.67	0.80	0.11	6.22
35E	6.51	5.28	0.76	3.99	16.54	50.28	0.15	2.64	6.04	0.76	0.12	6.94
35F	7.18	6.34	0.62	4.05	16.81	46.67	0.14	2.66	7.58	0.75	0.20	6.99
36A	0.18	5.78	2.17	2.78	10.90	65.22	0.15	1.94	6.98	0.50	0.10	3.29
36C	1.83	37.79	0.42	4.17	2.93	8.55	0.07	0.45	41.61	0.12	0.13	1.94
36D	7.52	10.30	0.57	3.85	15.08	41.77	0.13	2.34	11.42	0.66	0.16	6.20
36E	5.63	10.45	0.52	3.86	15.38	42.53	0.14	2.47	11.42	0.71	0.28	6.60
36F	6.71	15.56	0.47	3.64	12.72	34.41	0.12	1.95	18.45	0.57	0.25	5.15
37B	2.31	41.36	0.34	3.93	1.11	2.82	0.02	0.15	47.10	0.05	0.08	0.73
37C	2.56	38.60	0.38	3.74	2.49	6.73	0.06	0.33	43.41	0.12	0.08	1.50
37D	0.80	39.24	0.45	3.42	1.92	6.02	0.09	0.31	44.17	0.11	0.10	3.37
37E	5.83	13.60	0.54	3.73	14.01	38.62	0.13	2.11	14.28	0.59	0.20	6.36
37F	2.34	30.19	0.49	3.21	5.69	18.06	0.11	0.94	34.75	0.24	0.13	3.85
37G	4.17	20.84	0.54	3.38	9.81	29.99	0.12	1.55	23.79	0.42	0.19	5.20
37H	4.89	16.46	0.50	3.62	12.83	34.88	0.12	1.97	18.60	0.58	0.25	5.29

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = ferro totale espresso come Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

dentemente citata, può essere spiegato sulla base di due possibili fattori:

a) la frazione a granulometria più fine del sedimento è formata, oltre che da argilla, anche da quantità di sostanza organica non trascurabili e variabili da campione a campione.

b) il contenuto in fillosilicati è parzialmente controllato anche dalla frazione limosa, che è assai diffusa in tutto il bacino.

Il sodio mostra una buona correlazione con il plagioclasio, con il K-feldspato, con il quarzo e con la sabbia. Appare chiaro che la distribuzione di questo elemento, contenuto prevalentemente nel plagioclasio e, subordinatamente, nel K-feldspato, è controllata principalmente dalla frazione terrigena a granulometria più grossolana (sabbia), costituita in gran parte da quarzo e da feldspati.

Il calcio è legato quasi esclusivamente ai carbonati (aragonite e calcite).

Il fosforo non presenta coefficienti di correlazione significativi con alcun elemento chimico o componente mineralogico.

Il manganese appare invece legato sia alla frazione a granulometria più fine (argilla) che alla calcite. Tale doppia correlazione trova una giustificazione se si considera che questo elemento può essere contenuto sia nei fillosilicati di tale frazione e negli ossidi ed idrossidi ad essi associati, sia nella calcite. La scarsa correlazione tra Mn ed aragonite lascia supporre che i carbonati cui l'elemento è in parte associato siano prevalentemente quelli di origine terrigena.

## I SEDIMENTI DELLE CAROTE

### *I caratteri chimici e mineralogici*

La composizione mineralogica e la composizione chimica dei campioni delle carote sono riportate rispettivamente nelle tabelle 5 e 6.

Nelle tre carote si nota una sostanziale uniformità lungo tutta la colonna; ciò indica che le aree in cui esse sono state prelevate sono caratterizzate da un regime sedimentario pressoché costante, sia negli apporti terrigeni che in quelli di natura bioclastica, almeno nell'intervallo temporale corrispondente alla sedimentazione dei circa 30 cm. del loro spessore. Tale uniformità mineralogica e chimica è particolarmente evidente nella carota CA-1.

La carota CA-2, pur nel quadro di una sostanziale omogeneità, presenta una leggera diminuzione della calcite (dal 13 al 9%) ed un leggero aumento del quarzo (dal 14 al 16%) procedendo dalla superficie ver-

TAB. 5 - *Composizione mineralogica dei campioni della carota 1 (CA1), della carota 2 (CA2) e della carota 3 (CA3) (Alto Tirreno - Mar Ligure, bacino compreso fra La Spezia e Livorno).*

(I contenuti dei minerali sono espressi come % in peso).

	Qz	Cc	Ar	Do	Pg	Kf	Mi	Cl	Ka	Sm
CA1-01	18	10	—	4	5	3	33	14	8	5
CA1-02	18	10	—	4	5	3	33	14	8	5
CA1-03	18	10	—	4	5	3	33	14	8	5
CA1-04	18	10	—	4	5	3	33	14	7	6
CA1-05	18	10	—	4	5	3	33	14	8	5
CA1-07	21	9	—	5	6	3	34	11	7	4
CA1-08	22	10	—	5	6	3	33	11	6	4
CA1-09	19	10	—	3	5	3	33	14	7	6
CA1-10	17	10	—	3	5	3	35	14	7	6
CA1-11	17	10	—	3	5	3	35	14	7	6
CA1-12	17	9	—	4	5	3	36	14	7	5
CA1-13	17	9	—	4	5	3	36	14	7	5
CA1-14	17	9	—	4	5	3	36	14	7	5
CA1-15	18	10	—	4	5	3	36	14	6	4
CA1-16	17	9	—	4	5	3	36	14	8	4
CA1-17	17	9	—	4	5	3	36	14	8	4
CA1-18	18	9	—	4	5	3	35	14	8	4
CA1-19	19	10	—	4	5	3	34	14	7	4
CA1-20	20	10	—	4	5	3	34	14	6	4
CA1-21	18	10	—	4	5	3	35	13	8	4
CA1-22	17	9	—	4	5	3	36	14	8	4
CA1-23	17	9	—	4	5	3	36	14	8	4
CA1-24	18	9	—	4	5	3	35	14	8	4
CA2-01	14	13	—	4	4	2	38	12	7	6
CA2-02	14	13	—	4	4	2	38	12	7	6
CA2-03	15	13	—	4	4	2	38	12	6	6
CA2-04	15	13	—	4	4	2	38	12	6	6
CA2-05	15	12	—	4	4	2	38	12	7	6
CA2-06	16	11	—	5	4	2	38	12	8	4
CA2-07	16	10	—	5	4	2	38	12	8	5
CA2-08	16	11	—	4	4	2	39	12	7	5
CA2-09	15	11	—	4	4	2	39	12	8	5
CA2-10	15	11	—	4	4	2	40	12	7	5
CA2-11	15	11	—	4	4	2	40	12	7	5
CA2-12	14	11	—	4	4	2	40	12	8	5
CA2-13	15	11	—	4	4	2	39	12	8	5
CA2-14	15	10	—	4	4	2	40	12	8	5
CA2-15	15	10	—	4	4	2	40	12	8	5
CA2-16	15	10	—	4	4	2	40	12	8	5
CA2-17	15	10	—	4	4	2	40	12	8	5
CA2-18	16	10	—	4	4	2	39	12	8	5
CA2-19	15	10	—	4	4	2	40	12	8	5

TAB. 5 (continua)

	Qz	Cc	Ar	Do	Pg	Kf	Mi	Cl	Ka	Sm
CA2-20	16	9	—	5	4	2	40	11	8	5
CA2-21	17	10	—	4	4	2	39	12	7	5
CA2-22	16	10	—	5	4	2	39	11	8	5
CA2-23	15	10	—	4	4	2	40	12	7	6
CA2-24	14	11	—	4	4	2	40	12	7	6
CA2-25	15	10	—	4	4	2	40	12	7	6
CA2-26	15	9	—	4	4	2	41	12	8	5
CA2-27	15	9	—	4	4	2	41	12	8	5
CA2-28	16	10	—	4	4	2	39	12	8	5
CA2-29	16	10	—	4	4	2	39	12	8	5
CA2-30	16	9	—	5	4	2	39	12	8	5
CA3-01	8	33*	7	1	2	—	26	7	4	12
CA3-02	8	33*	7	1	2	—	26	7	4	12
CA3-03	8	33*	7	1	2	—	26	7	4	12
CA3-04	8	34*	7	1	2	—	26	7	3	12
CA3-05	8	33*	7	1	2	—	28	7	3	11
CA3-06	8	35*	7	1	2	—	27	6	3	11
CA3-07	8	33*	7	—	2	—	28	7	3	12
CA3-08	8	33*	7	2	2	—	28	6	3	11
CA3-09	8	34*	7	1	2	—	28	6	3	11
CA3-10	7	34*	7	1	2	—	28	6	3	12
CA3-11	7	35*	7	1	2	—	27	5	3	13
CA3-12	7	36*	7	1	2	—	26	5	3	13
CA3-13	8	36*	7	1	2	—	26	5	3	12
CA3-15	7	36*	7	1	2	—	26	5	3	13
CA3-16	7	36*	7	1	2	—	26	5	3	13
CA3-17	7	36*	7	1	2	—	26	5	3	13
CA3-18	7	36*	7	1	2	—	26	5	3	13
CA3-19	6	37*	7	1	2	—	26	5	2	14
CA3-20	7	37*	7	1	2	—	26	5	2	13
CA3-21	7	34*	7	1	2	—	29	5	2	13
CA3-22	8	35*	7	2	2	—	27	4	3	12
CA3-23	9	35*	7	2	2	—	27	4	3	11
CA3-24	9	35*	7	2	1	—	28	4	3	11
CA3-25	9	35*	7	1	2	—	28	4	3	11
CA3-26	9	34*	7	1	2	—	28	5	3	11
CA3-27	10	36*	7	—	2	—	28	5	2	10
CA3-28	10	37*	7	1	2	—	26	4	3	10
CA3-29	10	35*	7	—	2	—	28	5	3	10
CA3-30	11	37*	7	1	2	—	26	4	3	9
CA3-31	10	35*	7	1	2	—	28	4	3	10
CA3-32	14	41*	7	—	2	—	24	4	3	5
CA3-33	14	39*	7	1	4	—	23	4	3	5

Le cifre dopo la sigla della carota indicano la profondità, in cm, del campione.

\* Sono presenti calciti magnesiane.

Qz = quarzo; Cc = calcite; Ar = aragonite; Do = dolomite; Pg = plagioclasio; Kf = K-feldspato; Mi = mica (illite e muscovite); Cl = clorite (+ «intergrades» cloritici + vermiculite); Ka = caolinite; Sm = smectite (+ interstratificati illite/smectite).

so la zona più profonda della colonna; queste modeste variazioni mineralogiche si riflettono naturalmente in leggere variazioni di composizione chimica, consistenti in una diminuzione dei contenuti di CaO e di CO<sub>2</sub> ed in un incremento del contenuto di SiO<sub>2</sub>.

Nella carota CA-3 le variazioni mineralogico-chimiche appaiono un poco più marcate di quelle osservate nella carota CA-2, anche se, in verità, esse sono sempre molto modeste. Tali variazioni consistono principalmente in un aumento del quarzo e dei carbonati ed in una diminuzione dei fillosilicati nelle zone più profonde della colonna. Dal punto di vista chimico esse determinano un aumento di CaO, CO<sub>2</sub> e SiO<sub>2</sub> ed una diminuzione di H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Degna di nota è la distribuzione del manganese nelle tre carote (Fig. 8). Nelle carote CA-1 e CA-2 il contenuto di Mn è significativamente più elevato nei due campioni più superficiali, mentre è più basso e praticamente costante nel resto della colonna. Tale distribuzione non è giustificata da fattori mineralogico-chimici relativi ai componenti maggiori; essa è invece spiegabile con i noti processi di solubilizzazione e migrazione dell'elemento nelle condizioni riducenti che predominano nella zona profonda della colonna sedimentaria e con la sua successiva precipitazione nella zona di interfaccia acqua-sedimento, dove prevalgono condizioni più ossidanti (WEDEPOHL, 1978a e 1978b). La conservazione di queste caratteristiche nei primi due centimetri della colonna indica una modesta omogeneizzazione, e quindi una scarsa bioturbazione, del sedimento nella zona di prelievo delle carote CA-1 e CA-2.

Nella carota CA-3 i tenori di Mn sono relativamente elevati e costanti nei primi 10-11 cm di sedimento, subiscono una brusca diminuzione tra i 12 ed i 15 cm, e si mantengono poi bassi e praticamente costanti fino in fondo alla colonna. Anche in questo caso la distribuzione del Mn non è spiegabile con le modeste variazioni di tipo mineralogico e/o chimico osservate nella colonna; essa sembra piuttosto determinata, in larga misura, dal già citato processo di solubilizzazione e migrazione dell'elemento nella parte profonda della colonna e di precipitazione nella sua parte più superficiale. In questo caso si deve però ammettere l'intervento anche di una intensa bioturbazione, che ha interessato i primi 10 cm di sedimento, con conseguente omogeneizzazione di tutto questo tratto della colonna. Del resto tutta la carota mostra (con la presenza di aragonite e di calciti magnesiane) indizi dell'influenza, nella sua zona di prelievo, di una attività biologica molto più spiccata di quanto non si verifichi nelle zone da cui provengono le altre carote.

TAB. 6 - *Composizione chimica dei campioni della carota 1 (CA1), della carota 2 (CA2) e della carota 3 (CA3) (Alto Tirreno - Mar Ligure, bacino compreso fra La Spezia e Livorno).*

(I componenti maggiori sono espressi come % in peso).

Camp.	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
CA1-01	6.42	6.22	0.72	3.94	16.17	48.90	0.14	2.66	6.79	0.78	0.16	7.11
CA1-02	6.12	6.39	0.72	3.97	16.38	48.87	0.14	2.67	6.73	0.77	0.13	7.09
CA1-03	6.56	6.27	0.69	4.02	16.40	48.83	0.14	2.65	6.64	0.77	0.12	6.92
CA1-04	6.57	6.40	0.75	3.99	16.04	49.13	0.14	2.58	6.80	0.75	0.11	6.74
CA1-05	6.48	6.30	0.72	4.00	16.41	48.76	0.14	2.67	6.69	0.78	0.11	6.95
CA1-07	4.48	6.41	0.94	3.89	15.77	52.00	0.14	2.53	6.71	0.71	0.10	6.32
CA1-08	5.44	6.78	1.00	3.70	14.97	51.79	0.13	2.40	7.05	0.68	0.10	5.97
CA1-09	6.33	5.91	0.74	3.99	16.34	49.96	0.14	2.67	6.70	0.76	0.10	6.86
CA1-10	6.76	5.85	0.68	4.02	16.59	49.13	0.13	2.64	6.55	0.75	0.10	6.79
CA1-11	6.85	5.76	0.70	4.05	16.61	48.87	0.14	2.71	6.55	0.78	0.11	6.88
CA1-12	6.43	5.74	0.65	4.11	16.97	49.06	0.14	2.74	6.34	0.77	0.10	6.96
CA1-13	6.73	5.98	0.69	4.03	16.63	48.79	0.13	2.75	6.41	0.79	0.11	6.96
CA1-14	6.47	5.71	0.70	4.00	16.70	49.27	0.13	2.71	6.49	0.78	0.11	6.93
CA1-15	5.98	6.25	0.69	4.03	16.42	49.14	0.14	2.72	6.75	0.78	0.10	6.99
CA1-16	6.65	5.77	0.67	4.07	16.88	48.89	0.13	2.74	6.32	0.77	0.10	6.99
CA1-17	6.41	5.69	0.70	4.08	16.91	49.29	0.13	2.72	6.32	0.76	0.10	6.87
CA1-18	6.22	5.73	0.72	4.04	16.63	49.47	0.13	2.71	6.62	0.77	0.10	6.85
CA1-19	5.56	6.24	0.74	3.95	16.09	49.78	0.14	2.65	7.19	0.77	0.10	6.80
CA1-20	5.34	6.40	0.81	3.95	15.97	50.27	0.13	2.60	7.03	0.75	0.10	6.63
CA1-21	5.64	6.23	0.69	4.05	16.61	49.29	0.13	2.72	6.80	0.78	0.10	6.98
CA1-22	5.76	5.97	0.71	4.08	16.92	49.28	0.14	2.78	6.45	0.76	0.10	7.05
CA1-23	5.97	5.71	0.69	4.11	17.01	49.02	0.14	2.80	6.35	0.77	0.10	7.05
CA1-24	5.79	5.73	0.75	4.03	16.65	49.66	0.13	2.75	6.66	0.77	0.10	6.98

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = ferro totale espresso come Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Le cifre dopo la sigla della carota indicano la profondità, in cm, del campione.

TAB. 6 (continua)

Camp.	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
CA2-01	6.56	7.74	0.58	3.99	16.22	45.77	0.15	2.59	8.58	0.74	0.21	6.87
CA2-02	6.36	7.65	0.50	4.03	16.65	45.84	0.15	2.65	8.26	0.75	0.15	7.02
CA2-03	6.33	7.81	0.60	3.99	16.29	46.11	0.14	2.65	8.36	0.76	0.10	6.88
CA2-04	5.67	7.69	0.60	3.96	16.32	46.23	0.15	2.72	8.53	0.77	0.10	7.26
CA2-05	6.10	7.29	0.57	4.05	16.47	46.74	0.14	2.68	8.10	0.76	0.10	7.00
CA2-06	5.69	7.20	0.61	4.04	16.75	47.15	0.14	2.77	7.76	0.78	0.10	7.01
CA2-07	5.92	6.91	0.63	4.05	16.73	47.94	0.14	2.77	7.06	0.78	0.11	6.95
CA2-08	5.96	6.89	0.62	4.04	16.52	47.65	0.15	2.76	7.68	0.77	0.10	6.86
CA2-09	6.12	6.67	0.54	4.06	16.90	47.27	0.14	2.73	7.34	0.76	0.10	6.77
CA2-10	6.11	6.80	0.59	4.08	16.73	47.13	0.14	2.82	7.56	0.79	0.10	7.14
CA2-11	6.28	6.69	0.58	4.08	16.79	47.28	0.14	2.78	7.53	0.78	0.10	6.96
CA2-12	6.83	6.77	0.54	4.09	17.04	46.87	0.14	2.77	7.16	0.76	0.10	6.94
CA2-13	6.52	6.94	0.56	4.06	17.00	47.21	0.14	2.78	7.01	0.76	0.10	6.92
CA2-14	6.30	6.50	0.56	4.12	17.16	47.51	0.14	2.84	6.83	0.78	0.10	7.17
CA2-15	6.67	6.24	0.61	4.12	17.11	47.87	0.14	2.84	6.71	0.78	0.10	6.93
CA2-16	6.44	6.37	0.60	4.11	17.24	47.87	0.13	2.83	6.62	0.78	0.10	6.92
CA2-17	6.36	6.41	0.61	4.10	16.97	47.81	0.13	2.83	6.91	0.78	0.10	6.99
CA2-18	6.27	6.19	0.58	4.15	17.10	48.15	0.13	2.77	6.89	0.76	0.10	6.91
CA2-19	6.69	6.44	0.58	4.08	16.98	47.81	0.13	2.80	6.68	0.77	0.10	6.94
CA2-20	5.65	6.32	0.61	4.14	17.08	48.68	0.14	2.82	6.72	0.78	0.10	6.96
CA2-21	5.77	6.23	0.62	4.07	16.82	48.98	0.14	2.77	6.95	0.78	0.10	6.78
CA2-22	5.35	6.95	0.63	4.13	16.95	48.22	0.14	2.81	7.00	0.78	0.11	6.92
CA2-23	6.37	6.39	0.61	4.06	16.96	47.64	0.14	2.84	7.05	0.79	0.11	7.04
CA2-24	6.56	6.65	0.58	4.10	17.06	46.92	0.14	2.80	7.28	0.77	0.10	7.05
CA2-25	6.15	6.22	0.57	4.07	17.22	48.02	0.13	2.86	6.72	0.80	0.10	7.13
CA2-26	6.22	5.92	0.58	4.17	17.50	47.90	0.13	2.94	6.45	0.80	0.10	7.29
CA2-27	6.29	5.71	0.59	4.18	17.53	48.08	0.13	2.93	6.51	0.78	0.10	7.17
CA2-28	5.99	6.15	0.60	4.10	17.07	48.34	0.14	2.81	6.86	0.79	0.10	7.03
CA2-29	5.98	6.29	0.57	4.08	17.22	47.95	0.14	2.85	6.89	0.80	0.11	7.13
CA2-30	5.88	6.22	0.61	4.13	17.10	48.36	0.13	2.81	6.80	0.79	0.10	7.06

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = ferro totale espresso come Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Le cifre dopo la sigla della carota indicano la profondità, in cm, del campione.

TAB. 6 (continua)

Camp.	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
CA3-01	5.96	18.15	0.50	3.51	11.40	31.87	0.11	1.70	21.59	0.50	0.18	4.52
CA3-02	5.76	18.20	0.49	3.52	11.53	31.81	0.11	1.69	21.59	0.51	0.19	4.49
CA3-03	5.82	18.19	0.47	3.48	11.41	31.99	0.11	1.69	21.62	0.51	0.20	4.51
CA3-04	5.52	18.75	0.51	3.44	11.12	31.26	0.11	1.70	22.30	0.51	0.20	4.58
CA3-05	5.69	18.30	0.52	3.50	11.52	31.89	0.11	1.73	21.47	0.52	0.19	4.56
CA3-06	5.25	19.10	0.48	3.46	11.13	31.16	0.11	1.67	22.50	0.50	0.19	4.45
CA3-07	5.99	17.80	0.46	3.52	11.69	32.37	0.11	1.70	21.20	0.51	0.18	4.45
CA3-08	5.21	18.80	0.51	3.49	11.36	31.68	0.11	1.76	21.72	0.51	0.18	4.66
CA3-09	5.55	18.55	0.53	3.49	11.03	31.51	0.11	1.75	22.11	0.50	0.19	4.68
CA3-10	5.71	18.69	0.47	3.48	11.30	31.27	0.11	1.72	21.97	0.51	0.20	4.65
CA3-11	5.08	19.20	0.50	3.45	10.79	31.05	0.11	1.69	22.90	0.49	0.20	4.54
CA3-12	4.78	19.60	0.53	3.39	10.63	30.75	0.10	1.69	23.32	0.49	0.16	4.56
CA3-13	4.94	19.51	0.52	3.38	10.59	31.04	0.10	1.69	23.07	0.49	0.14	4.53
CA3-15	5.69	18.92	0.52	3.39	10.52	30.72	0.11	1.69	23.30	0.48	0.13	4.54
CA3-16	5.34	19.55	0.49	3.39	10.80	30.58	0.11	1.66	22.93	0.49	0.08	4.57
CA3-17	5.10	19.63	0.49	3.39	10.67	30.47	0.11	1.61	23.50	0.48	0.06	4.50
CA3-18	4.51	19.70	0.53	3.39	10.74	30.60	0.12	1.70	23.16	0.49	0.07	4.99
CA3-19	4.63	20.09	0.48	3.38	10.46	29.67	0.13	1.65	23.94	0.48	0.06	5.03
CA3-20	4.21	19.95	0.53	3.37	10.36	30.39	0.12	1.68	23.83	0.48	0.07	5.01
CA3-21	4.41	18.75	0.50	3.47	11.24	31.82	0.12	1.82	22.05	0.52	0.07	5.22
CA3-22	2.97	19.70	0.49	3.43	10.80	31.35	0.13	1.72	23.06	0.51	0.07	4.86
CA3-23	3.92	19.58	0.49	3.41	10.76	31.93	0.10	1.71	22.94	0.50	0.07	4.59
CA3-24	3.91	19.55	0.51	3.38	10.77	32.12	0.09	1.76	22.90	0.52	0.07	4.42
CA3-25	4.66	19.03	0.53	3.38	10.81	32.30	0.09	1.69	22.87	0.49	0.06	4.08
CA3-26	4.94	18.77	0.52	3.42	10.84	32.60	0.09	1.77	22.28	0.50	0.06	4.20
CA3-27	4.17	19.15	0.56	3.39	10.60	32.52	0.09	1.71	23.10	0.51	0.07	4.13
CA3-28	3.61	20.11	0.52	3.37	10.39	32.02	0.09	1.64	23.77	0.48	0.06	3.93
CA3-29	4.54	18.67	0.55	3.42	10.82	32.81	0.09	1.77	22.57	0.52	0.07	4.17
CA3-30	3.41	19.93	0.59	3.37	10.10	32.40	0.09	1.59	24.15	0.49	0.06	3.82
CA3-31	3.69	19.21	0.52	3.50	10.96	33.01	0.09	1.74	22.55	0.51	0.07	4.15
CA3-32	2.01	21.42	0.71	3.44	8.95	32.20	0.08	1.43	25.59	0.47	0.07	3.65
CA3-33	2.49	21.02	0.69	3.40	9.23	33.11	0.08	1.46	24.31	0.49	0.07	3.65

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = ferro totale espresso come Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Le cifre dopo la sigla della carota indicano la profondità, in cm, del campione.

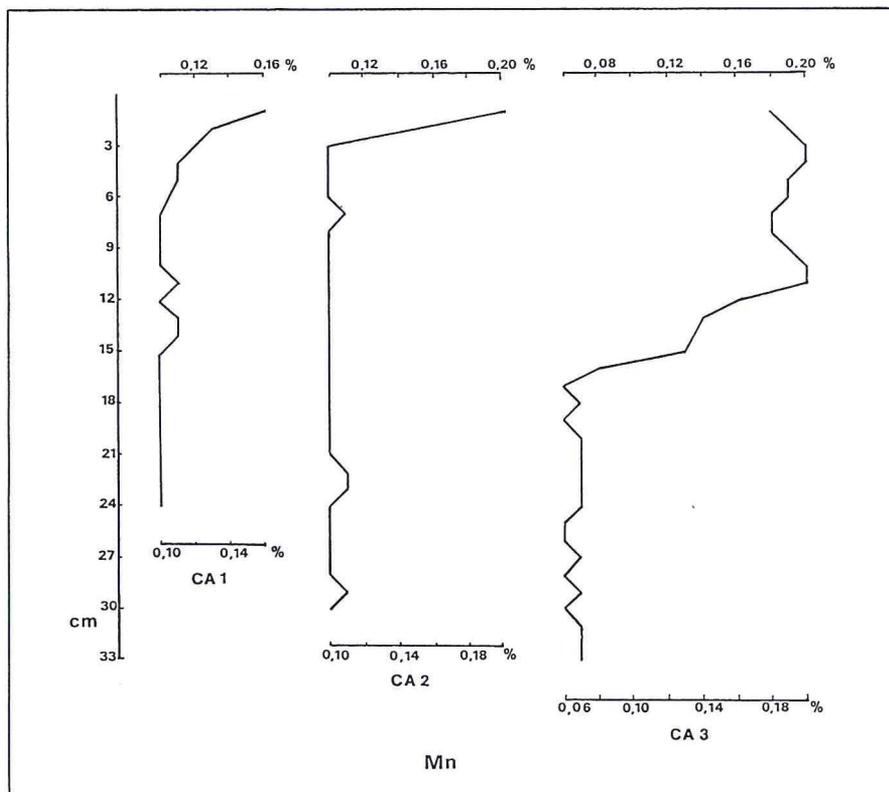


Fig. 8 - Distribuzione della concentrazione di MnO nelle carote CA-1, CA-2, CA-3. La profondità, espressa in cm., è riportata sull'asse delle ordinate; i contenuti percentuali in MnO sono riportati sull'asse delle ascisse.

## CONCLUSIONI

I dati granulometrici, mineralogici e, in minor misura, quelli chimici, forniscono indicazioni interessanti sull'origine dei materiali sedimentari che si depositano nell'Alto Tirreno-Mar Ligure, sull'andamento dei principali agenti di trasporto che ne operano la distribuzione e sull'influenza delle caratteristiche morfologiche del bacino sulla sedimentazione. Uno schema che riassume in parte i risultati ottenuti è presentato in fig. 9, nella quale sono indicate le aree di influenza prevalente dei principali tributari del bacino e l'andamento delle principali correnti che operano il trasporto dei materiali da essi apportati. Quest'ultimo è frutto di una sintesi dei dati

desumibili dalla distribuzione dei sedimenti ottenuta nel presente studio con quelli derivati dalla letteratura (GANDOLFI e PAGANELLI, 1975; AIELLO *et al.*, 1975; ASTRALDI e GASPARINI, 1986).

È opportuno sottolineare innanzitutto che i materiali che si depositano nel bacino derivano principalmente dal carico di torbida dei tre più importanti tributari: l'Arno, il Serchio e il Magra. Il contributo dei corsi d'acqua più piccoli (Frigido, Cinquale, Tonfano) è assai limitato e ristretto alle zone sotto costa, in prossimità delle foci. Questo materiale viene distribuito da «drifts» costieri e da correnti che, interagendo con i principali elementi morfologici del fondo e della costa, determinano l'instaurazione di regimi sedimentologici piuttosto diversi nelle varie zone del bacino.

La zona antistante Livorno, occupata in parte dalle Secche della Meloria, è un settore che si differenzia nettamente da tutto il resto del bacino. I sedimenti delle Secche, caratterizzate da fondali molto bassi (1,5-25 m; MAZZANTI *et al.*, 1984), presentano, per lo più, una distribuzione granulometrica bimodale, nella quale la frazione grossolana (molto abbondante) è rappresentata quasi esclusivamente da gusci di organismi marini, e la frazione terrigena (molto scarsa) è rappresentata da peliti molto fini, costituite da illite (dominante), da smectiti e da cloriti. La prateria a Posidonia, che rappresenta la biocenosi tipica di questa zona, determina un ambiente riparato, caratterizzato da basse energie ambientali, e quindi particolarmente adatto alla vita degli organismi marini (in particolare quelli a guscio calcareo) e alla sedimentazione di materiali fini. Queste caratteristiche sedimentologiche si estendono, in parte, oltre le Secche vere e proprie fin verso l'isola di Gorgona, in una zona ancora caratterizzata da ridotta profondità (compresa tra i 25 ed i 100 m; MAZZANTI *et al.*, 1984), dove però si osserva una progressiva diminuzione della frazione bioclastica ed un aumento della frazione terrigena fine.

La zona situata immediatamente a nord della trasversale «Secche della Meloria-Isola di Gorgona» sembra invece rappresentare un bacino di particolare accumulo di materiali terrigeni molto fini (argilla > 80%). Si può ipotizzare che quest'area costituisca il centro di una circolazione a vortice, dove è facilitata appunto la sedimentazione di materiali fini.

La presenza di «intergrades» cloritici tra i fillosilicati della frazione terrigena suggerisce che il materiale pelitico che arriva in questi settori del bacino sia, in larga misura, quello delle alluvioni dell'Arno. Tale provenienza è giustificata dai dati sulla circolazione delle acque nella zona presentati da GASPARINI *et al.* (1987); secondo tali

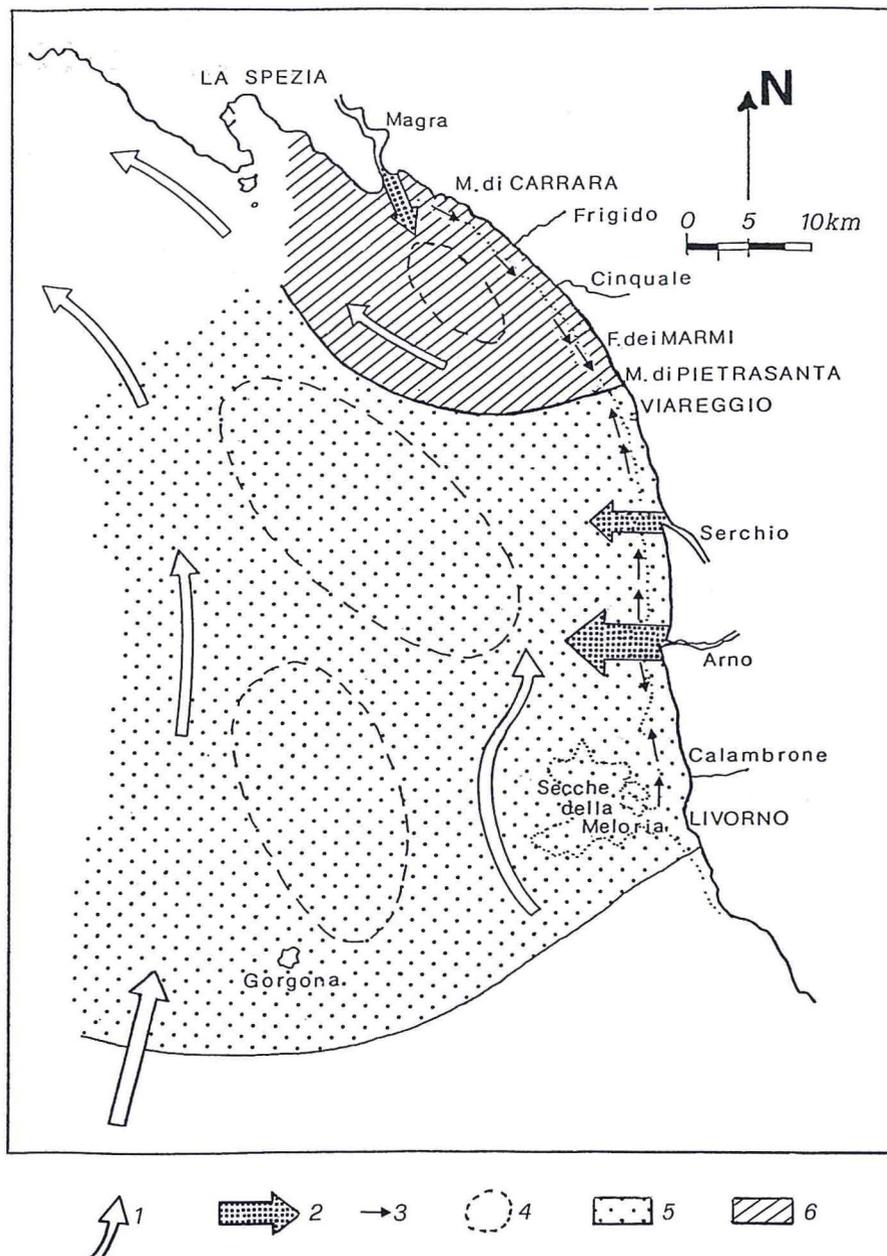


Fig. 9 - Rappresentazione schematica delle aree di influenza prevalente dei principali tributari del bacino compreso tra La Spezia e Livorno e dell'andamento delle principali correnti che operano il trasporto dei materiali da essi apportati. Simboli grafici: 1 = correnti prevalenti; 2 = principali apporti terrigeni; 3 = «drift» costieri distali; 4 = lenti movimenti circolari; 5 = zona di influenza delle alluvioni dei fiumi Arno e Serchio; 6 = zona di influenza delle alluvioni del fiume Magra.

autori, durante il periodo autunnale, quando più frequenti e maggiori sono le piene dell'Arno, le correnti marine superficiali, responsabili della dispersione dei materiali più fini, attraversano il tratto di mare antistante la foce di questo fiume fluendo da nord verso sud, e si spingono fino oltre Livorno, aggirando in senso antiorario le Secche della Meloria e l'Isola di Gorgona.

Un particolare commento richiede la presenza di una piccola zona a concentrazione di caolinite relativamente elevata (10-13% della frazione non carbonatica), situata al largo della Gorgona, verso occidente. Essa appartiene a quelle aree più esterne della piattaforma (o della scarpata) continentale toscana, influenzate da materiali alloctoni di provenienza meridionale, che sono già state messe in evidenza nel settore compreso tra Livorno e l'isola d'Elba (LEONI *et al.*, 1991). L'arricchimento relativo di caolinite di tali zone può essere connesso ad un trasporto di tale minerale da sorgenti meridionali da parte delle principali correnti marine che entrano nell'Alto Tirreno-Mar Ligure proprio in corrispondenza di queste zone più esterne. È però più probabile che tale arricchimento in caolinite evidenzii invece l'importanza dell'apporto eolico in zone poco interessate dall'arrivo di materiale sedimentario dalle terre emerse più vicine. TOMADIN (1981) ha dimostrato l'influenza, tutt'altro che trascurabile, sulla composizione mineralogica dei sedimenti del Tirreno meridionale, del materiale detritico di origine africana trasportato dai venti di scirocco; in essi la caolinite è il fillosilicato di gran lunga più abbondante.

La fascia centrale del bacino, antistante la costa compresa tra Viareggio e Tirrenia, è la zona di influenza delle alluvioni dell'Arno e del Serchio. In tale zona, nelle aree più vicine alla costa fino all'isobata dei 10 m, i «drift» costieri provvedono alla dispersione dei materiali più grossolani apportati dai due fiumi. A sud della foce dell'Arno il «drift» costiero, in particolare quello distale, che è diretto verso sud fino all'altezza di Calambrone (GANDOLFI e PAGANELLI, 1975), disperde in questa direzione le sabbie del fiume. A nord di Bocca d'Arno il «drift» diretto verso settentrione disperde in tale direzione, sino poco oltre Viareggio, le sabbie sia dell'Arno che del Serchio. Di fronte alla foce dei due fiumi esiste un'ampia zona a forma di ventaglio, nella quale i sedimenti sono caratterizzati dalla presenza di una frazione fine eccezionalmente abbondante per la batimetria e la distanza dalla costa della zona stessa (argilla > 40%). Tali sedimenti, presumibilmente, devono la loro particolare composizione granulometrica a processi di flocculazione delle particelle

argillose, che sono particolarmente attivi nelle zone di mescolamento delle acque fluviali con quelle marine.

La mineralogia dei sedimenti più vicini alla costa è, in genere, caratterizzata da alti tenori in quarzo e feldspati, da tenori relativamente bassi in carbonati (quasi esclusivamente di origine terrigena) e da bassi tenori in fillosilicati. Allontanandosi dalla costa aumenta il tenore in materiali fini (argilla) e diminuisce la frazione sabbiosa. Dal punto di vista mineralogico i sedimenti appaiono impoverirsi in quarzo e feldspati e diventare più ricchi in fillosilicati. Tra questi ultimi la distribuzione di quelli a granulometria più fine (caolinite e smectite) individua alcune aree nelle quali è plausibile ipotizzare uno schema di circolazione delle masse d'acqua di tipo ciclonico, cioè caratterizzata appunto da lenti movimenti vorticosi, con tempi di ricambio molto lunghi, tali da favorire la sedimentazione di quantità maggiori di caolinite e smectite (Fig. 7a, b). La presenza di movimenti circolari di questo tipo è in accordo con le considerazioni generali esposte da ASTRALDI e GASPARINI (1986), secondo le quali il flusso generale del bacino, diretto in prevalenza verso nord, è stagionalmente complicato da parziali inversioni con formazione di vortici e meandri.

Gli «intergrades» cloritici che, come si è già detto, individuano le zone dove più importante, o addirittura esclusiva, è l'influenza delle alluvioni dell'Arno, sono assai diffusi e abbondanti in questo settore del bacino. Essi arrivano fino all'altezza di Viareggio e sono presenti sia nei sedimenti della fascia costiera che in quelli situati oltre l'isobata dei 100 m.

Il settore a nord di Viareggio è quello in cui i sedimenti di fondo appaiono influenzati in maniera preponderante dalle alluvioni del Magra. Le sabbie di questo fiume sono disperse verso sud dal «drift» costiero all'incirca fino all'altezza di Marina di Pietrasanta. Però esse non si limitano ad occupare la fascia costiera, ma, in associazione con i limi sabbiosi, si distribuiscono su un'ampia sacca, che si spinge al largo fino all'isobata dei 50 m. All'interno di tale sacca sabbiosa, o sabbioso-limosa, esiste una zona caratterizzata da sedimenti più fini, che hanno contenuti di argilla compresi tra il 20% e il 40%; essa indica, presumibilmente, la presenza di un vortice nella circolazione delle correnti nell'area antistante il litorale apuano.

La mineralogia dei sedimenti è largamente condizionata dalla granulometria che, in questa parte del bacino, fino all'isobata dei 50 m, si mantiene piuttosto grossolana. Abbondanti sono quindi quarzo e feldspati, relativamente scarsi i fillosilicati, in particolare quel-

li a granulometria più fine. I carbonati risultano relativamente abbondanti lungo la fascia costiera, soprattutto in corrispondenza delle foci dei fiumi apuani, dove l'influenza degli apporti terrigeni di tali fiumi è più forte. Il loro carico di torbida contiene infatti quantità molto alte di carbonati; esse sono riferibili sia alle caratteristiche litologiche dei bacini imbriferi di tali fiumi, dove affiorano su vaste estensioni rocce di natura carbonatica, sia alla discarica, nel loro alveo, delle acque dell'industria della lavorazione del marmo. Tra i fillosilicati a granulometria più fine la smectite risulta particolarmente scarsa anche nei sedimenti più fini. La generale scarsità di tale minerale nella zona influenzata soprattutto dalle alluvioni del Magra deve essere messa in relazione al fatto che i materiali apportati da questo fiume contengono soltanto tracce del minerale (QUAKERNAAT, 1968). L'assenza di «intergrades» cloritici nella frazione fillosilicatica sembra escludere una qualche influenza delle alluvioni dell'Arno in questa parte del bacino.

#### BIBLIOGRAFIA

- AIELLO E., BARTOLINI C., CAPUTO C., D'ALESSANDRO L., FANUCCI F., FIERRO G., GNACCOLINI M., LA MONICA G.B., PALMIERI E.L., PICAZZO M., PRANZINI E. (1975) - Il trasporto litoraneo lungo la costa toscana tra la foce del fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina. *Boll. Soc. Geol. It.*, **94**, 1519-1571.
- ASTRALDI M., GASPARINI G.P. (1986) - La circolazione costiera nel Mar Ligure orientale. *Boll. Mus. Biol. Univ. Genova*, **52**, suppl., 317-331.
- ASTRALDI M., BACCIOLA D., BORGHINI M., DELL'AMICO F., GALLI G., GASPARINI G.P., LAZZONI E. (1993) - Caratteristiche stagionali delle masse d'acqua nell'Arcipelago Toscano. In: E.N.E.A. (ed.). Studi oceanografici, sedimentologici, geochimici e biologici - Arcipelago Toscano. Serie Studi Ambientali E.N.E.A. A cura di O. Ferretti e F. Immordino. In stampa.
- BISCAYE P.E. (1965) - Mineralogy and sedimentation of recent deep sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **76**, 803-832.
- CALVERT C.S., PALKOWSKY D.A. (1985) - Combined X-ray diffraction and chemical data for the quantitative analysis of geologic samples. Workshop on «Quantitative Mineral Analysis of Clays and Other Minerals». *Intern. Clay Conf., Denver, Colorado*, 1985.
- E.N.E.A. (1993) - Studi oceanografici, sedimentologici, geochimici e biologici. Arcipelago Toscano. Serie Studi Ambientali E.N.E.A. A cura di O. Ferretti e F. Immordino. In stampa.
- ENGELHARDT W. (1977) - The origin of sediments and sedimentary rocks. Halsted Press / Wiley & Sons, New York.
- FANUCCI P. (1981) - Bassin sédimentaires de la marge continentale ligure: caractères,

- structure et evolution. In: F.C. Wezel (ed.). Sedimentary basins of Mediterranean margins, C.N.R. Italian Project of Oceanography, Tecnoprint, Bologna, pp. 83-99.
- FRANZINI M., LEONI L., SAIITA M. (1975) - Revisione di una metodologia analitica per fluorescenza X, basata sulla correzione completa degli effetti di matrice. *Rend. Soc. It. Min. Petr.*, **31**, 365-378.
- GANDOLFI G., PAGANELLI L. (1975) - Il litorale Pisano-Versiliese (Area campione Alto Tirreno). Composizione, provenienza e dispersione delle sabbie. *Boll. Soc. Geol. It.*, **94**, 1273-1295.
- GASPARINI G.P., MARRI P., ROSSI C., DELL'AMICO F. (1987) - Il sistema marino livornese. Caratteristiche delle masse d'acqua. Atti del I Convegno sullo Stato dell'Ambiente a Livorno, Livorno 7-8/11/1986, pp. 177-178.
- HINE A.C., EVANS M.W., DAVIS R.A., BELKNAP D.F. (1987) - Depositional response to seagrass mortality along a low - energy barrier - island coast: West - Central Florida. *J. Sedim. Petrol.*, **57**, 431-439.
- KLUG H.P., ALEXANDER L.E. (1974) - X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials. Wiley & Sons, New York.
- LEONE G., LEONI L., SARTORI F. (1988) - Revisione di un metodo gasometrico per la determinazione di calcite e dolomite. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem., Ser. A*, **95**, 7-20.
- LEONI L., SAIITA M., SARTORI F. (1988) - Analisi mineralogica quantitativa di rocce e sedimenti pelitici mediante combinazione di dati diffrattometrici e dati chimici. *Rend. Soc. It. Min. Petr.*, **43**, 743-756.
- LEONI L., SARTORI F., SAIITA M., DAMIANI V., FERRETTI O., VIEL M. (1991 a) - Mineralogy, chemistry, and grain size composition of recent sediments in the northern Tyrrhenian Sea: contribution to the study of sediment transport and distribution. *Environ. Geol. Water Sci.*, **17**, 23-46.
- LEONI L., SARTORI F., DAMIANI V., FERRETTI O., VIEL M. (1991 b) - Trace element distribution in surficial sediment of the northern Tyrrhenian Sea: contribution to heavy metal pollution assessment. *Environ. Geol. Water Sci.*, **17**, 103-116.
- LEONI L., SARTORI F. (1993) - Clay minerals and heavy metals in the sediments of the northern Tuscany's marine shelf (NW Italy). In stampa.
- MAZZANTI R., PASQUINUCCI M., SALGHETTI DRIOLI U. (1984) - Il sistema Secche della Meloria - Porto Pisano: geomorfologia e biologia marina in relazione ai reperti archeologici. In: E.T.S. Editrice Pisa (ed.), 1284 - L'anno della Meloria, S.A.T., Lama (Perugia), pp. 7-54.
- MIN. LL. PP., SERVIZIO IDROGRAFICO (1923-1943), (1946-1951) - Annali Idrologici. Parte seconda. Poligrafico dello Stato, Roma.
- MOULLADE M. (1978) - The Ligurian Sea and the adjacent areas. In A.E.M. Nairn and W.H. Kanes (ed.), The ocean basins and margins, Vol. 4B. The western Mediterranean. Plenum Press, New York, pp. 67-125.
- PICCINI L., PRANZINI G. (1989) - Idrogeologia e carsismo del bacino del fiume Frigido (Alpi Apuane). *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Ser. A*, **96**, 107-158.
- QUAKERNAAT J. (1968) - X-ray analyses of clay minerals in some recent fluvial sediments along the coast of Central Italy. Thesis, University of Amsterdam, The Netherlands.
- RAGGI G. (1976) - Contributo alla conoscenza della idrogeologia della bassa Val di Magra. *Mem. Acc. Lun. Sc.*, **60**, 27-38.

- SARTORI F., RIFFALDI R., LEVI-MINZI R. (1979) - Occurrence of chloritic intergrades in the recent sediments of the Arno river (Italy). *Clay Miner.*, **14**, 47-65.
- STOCCHINO C., TESTONI A. (1968) - Le correnti nel canale di Corsica e nell'Arcipelago Toscano. Istituto Idrografico della Marina, Stazione Oceanografica, v. 1036, Genova.
- TOMADIN L. (1981) - Provenance and dispersal of clay minerals in recent sediments of the central Mediterranean Sea. In: F.C. Wezel (ed.), *Sedimentary basins of Mediterranean margins. C.N.R. Italian Project of Oceanography*, Tecnoprint, Bologna, pp. 313-324.
- WEDEPOHL K.H. (1978 a) - Manganese: factors influencing the solubility of manganese in natural waters; adsorption processes. In: K.H. Wedepohl (ed.), *Handbook of geochemistry*, Vol. II-3, Springer-Verlag, Berlin, pp. 25-H-1 - 25-H-5.
- WEDEPOHL K.H. (1978 b) - Manganese: abundance in common sediments and sedimentary rocks. In: K.H. Wedepohl (ed.), *Handbook of geochemistry*, Vol. II-3, Springer-Verlag, Berlin, pp. 25-K-1 - 25-K-17.

(ms. pres. il 25 novembre 1992; ult. bozze il 12 marzo 1993)