

Dinamica sedimentaria dell'area di Goro (Delta del Po)

Umberto Simeoni¹, Giorgio Fontolan², Renzo Dal Cin¹,
Giovanni Calderoni¹ e Andrea Zamariolo¹

¹ Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche, Università di Ferrara
C.so Ercole I d'Este, 32 - 44100 Ferrara

² Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine, Università di Trieste.
Comprensorio S. Giovanni, Via Weiss, 2 - 34127 Trieste

Riassunto

La dinamica dell'area della laguna di Goro è condizionata dalla prominenza del Delta del Po e dalle variazioni delle sue portate. Essa risulta particolarmente articolata per la presenza delle foci del Po di Goro e di Volano, quest'ultima interna alla laguna stessa, e di due bocche lagunari, la più recente d'origine antropica. Se a tutto ciò aggiungiamo gli abbassamenti del territorio, indotti dalle estrazioni di gas ed acqua, la forte dinamicità evolutiva dello scanno, che separa la laguna dal mare, e le molteplici attività antropiche condotte nella Sacca è facile dedurre come la comprensione della dinamica sedimentaria dell'area non sia semplice.

Lo studio esamina le caratteristiche tessiturali dei sedimenti superficiali della laguna di Goro e dei fondali marini antistanti, evidenziandone la distribuzione e le variazioni intercorse nell'ambito di un decennio. L'interpretazione dei dati raccolti ha consentito di definire i principali assi di trasporto dei sedimenti, di individuare le principali aree di deposizione e le modalità con cui essa avviene.

Inquadramento dell'area

La Sacca di Goro (Fig. 1) attuale presenta un'estensione di circa 2600 ettari (Idroser, 1994), con una profondità media che supera di poco il metro. I valori di marea nella Sacca variano da - 40 cm ad un massimo di + 80 cm. L'innalzamento dal livello medio mare supera quest'ultimo valore in momenti particolari (fenomeno dell'acqua alta) per effetto congiunto del *set-up* da onda, ingorgo causato dal vento e marea astronomica.

La Sacca e l'area circostante sono state e sono tuttora interessate da una forte subsidenza naturale, incrementata da numerosi interventi antropici di vario genere ed entità che, nel tempo, hanno interessato l'area del Delta. Ciò ha causato un forte abbassamento dei terreni circostanti messi a coltura, molti dei quali, durante la seconda guerra mondiale, si sono nuovamente allagati. La velocità d'abbassamento mantiene tutt'oggi ritmi sostenuti: studi recenti (Idroser, 1994) indicano per Goro valori di subsidenza di 2,73 e 3,61 cm/anno e per Goro di 1,63 e 2,31 cm/anno, rispettivamente per i periodi 1984-87 e 1987-93.

Nella laguna confluiscono le acque provenienti dal Po di Volano, dagli sbocchi delle idrovore e dalle chiuse sull'asta terminale del Po di Goro. Una freccia litorale (Scanno di Goro) separa dal mare aperto l'insenatura formatasi in seguito all'avanzata verso sud-est della foce del Po di Goro. La sua presenza e la continua evoluzione rappresentano elementi fondamentali per la vita della laguna perché ne condizionano sia la circolazione idrica e le caratteristiche fisico-chimiche delle masse d'acqua interne sia perché esercitano un controllo sulla sedimentazione dell'area (Dal Cin e Pambianchi, 1991; Dal Cin, 1994; Simeoni et al., 1998). A sud la laguna si apre al mare attraverso una bocca na-

turale, delimitata ad occidente dal litorale di Volano, ed una, d'origine antropica, situata all'incirca nella parte centrale della freccia litorale.

Tra gli anni '50 ed '80 sono stati effettuati interventi di difesa nell'area della Sacca: opere aderenti e parallele all'interno della Sacca, posa di difese radenti (tubi longard) e siepi frangivento lungo lo Scanno. Altri interventi, che hanno alterato le caratteristiche naturali della Sacca, sono da ricollegarsi alla recente apertura di un canale artificiale attraverso lo Scanno, alle attività legate alla pesca a strascico ed all'allevamento di vongole e mitili.

L'alimentazione sedimentaria della Sacca è principalmente legata agli apporti solidi del Po. A scala regionale, il delta del Po mostra una distribuzione dei sedimenti marcatamente asimmetrica con massima estensione di sedimenti fangosi nell'area più meridionale, alimentata dai contributi di materiale in sospensione prevalentemente dai rami di Po di Pila, Po di Tolle, Po di Gnocca e Po di Goro (Dal Cin, 1983). Idroser (1994) suggerisce che la quantità di materiale sabbioso che giunge nella Sacca di Goro non possa essere superiore all'apporto fornito dai rami del Po di Goro e di Gnocca, e parzialmente del Po di Tolle (50%), dunque circa il 25% del volume complessivo del materiale to-

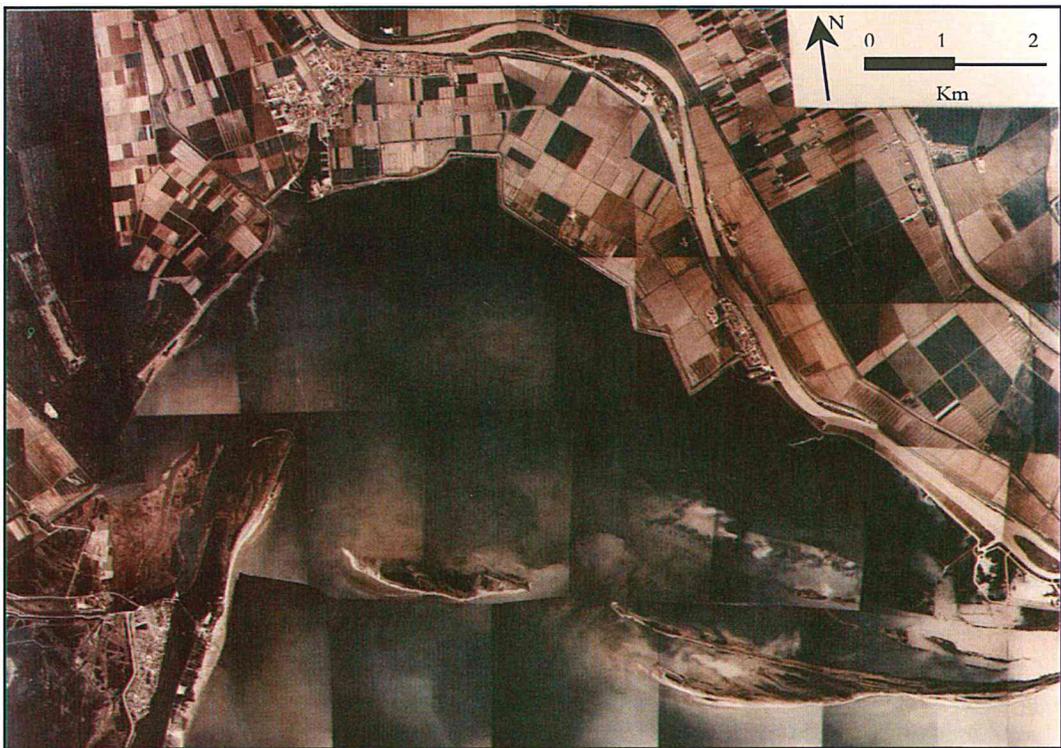


Figura 1 - Fotomosaico della Sacca di Goro del 1996 (scala grafica approssimativa).

tale trasportato sul fondo dal Po. Per quanto riguarda il trasporto in sospensione, il Po di Goro contribuisce per circa il 9% del trasporto torbido complessivo del fiume e poiché quest'ultimo è pari a 10,5 milioni di t/anno, si deduce che il ramo di Goro immette in mare circa 0,94 Mt/anno di sedimenti. Poiché questo ramo del Po ha una limitata capacità di trasporto sul fondo (intorno al 5% della capacità complessiva), e dato che il suo alveo è costituito da sabbie solo per il 63%, a fronte di valori intorno all'80-90% degli altri rami deltizi (Dal Cin e Simeoni, 1984), si può supporre che i suoi contributi siano costituiti in prevalenza da limi ed argille. Sulla base delle alterazioni volumetriche subite dal Delta (Idroser, 1994), mancando ricerche dirette alla valutazione del trasporto sul fondo, si può stimare per il Po di Goro, nel quinquennio 1975-1980, un apporto di materiali sabbiosi complessivo di circa 1,3 Mm³.

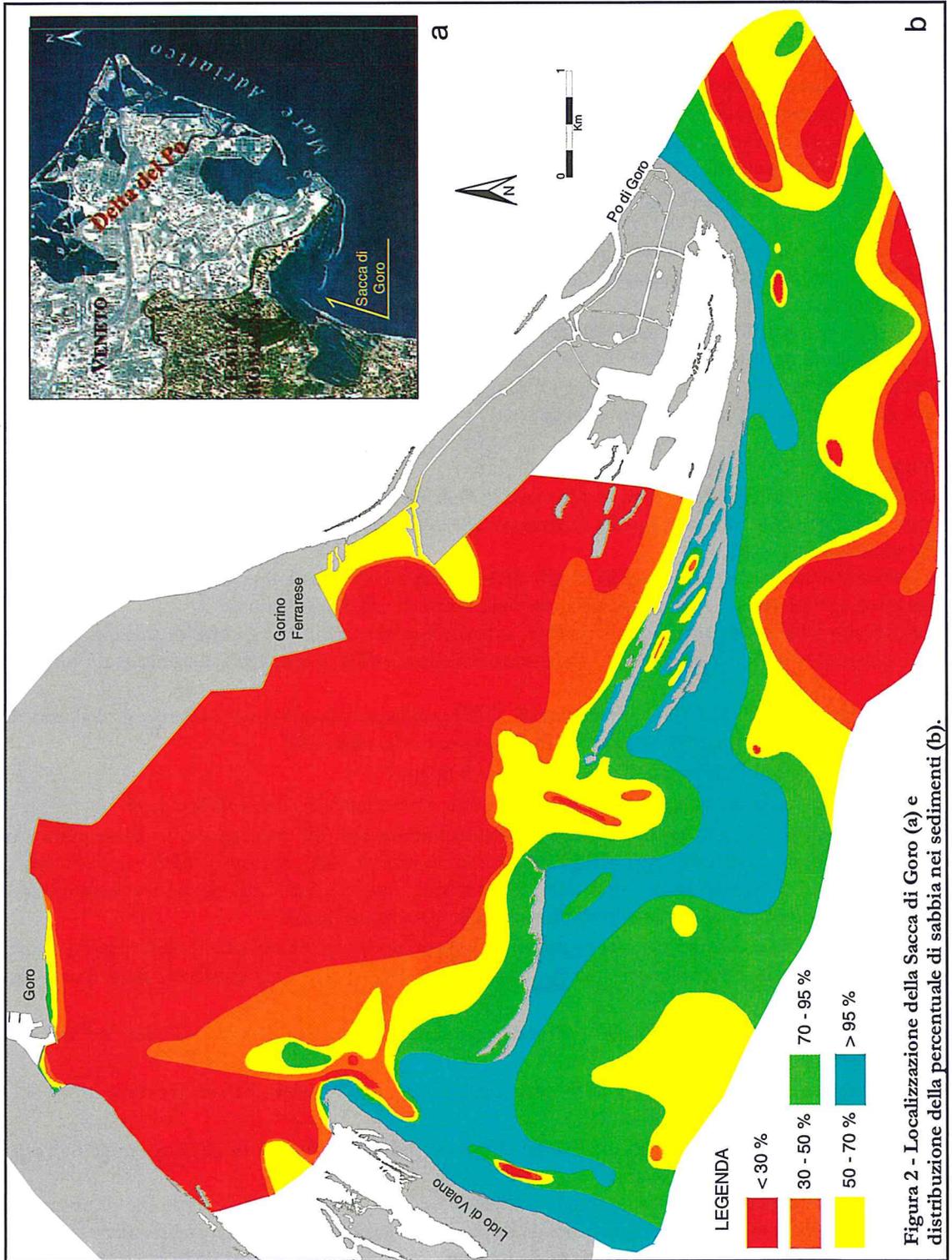


Figura 2 - Localizzazione della Sacca di Goro (a) e distribuzione della percentuale di sabbia nei sedimenti (b).

Per l'ultimo ventennio sono disponibili stime (Idroser, 1994) sufficientemente accurate dell'effettivo budget sedimentario dell'area di Goro: nell'area sono giunti nel 1980 0,19 Mm³ di sedimenti, 0,21 Mm³ nel 1985, 0,24 Mm³ nel 1990 ed, infine, 0,25 Mm³ nel 1995. Tali materiali, tuttavia, solo in minima parte alimentano la freccia litorale: gran parte sono dispersi verso il largo secondo direttrici che variano durante l'anno (Dal Cin, 1983; 1994), mentre in quantità subordinata entrano nella Sacca ove sedimentano nelle aree marginali o protette dallo Scanno.

Ai materiali portati dai rami del Po vanno aggiunti 0,3 Mm³/anno di sedimenti trasportati dalla corrente lungo riva che risale da meridione e si esaurisce nella laguna, e quelli legati alla produzione bioclastica, la cui quantificazione è estremamente difficoltosa. Uno studio condotto (Dal Cin e Pambianchi, 1991) su oltre un centinaio di campioni ha evidenziato come i sedimenti della Sacca siano caratterizzati da percentuali di CaCO₃ comprese tra 10 e 15%. Tali valori sono superiori a quelli che normalmente caratterizzano le sabbie portate dal Po e quindi indicativi dei contributi bioclastici dell'area.

In quest'ultimo secolo, anche nei periodi di maggior deficit sedimentario del Po (anni '60-'80) la Sacca ha mantenuto una funzione di "trappola sedimentaria", presentando un bilancio dei materiali in attivo. A riprova di ciò risulta che negli ultimi 10 anni sui fondali antistanti lo Scanno di Goro si sono depositati circa 8 milioni di m³ di sedimento.

I sedimenti

Come in tutti gli ambienti lagunari, la conoscenza delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti può fornire indicazioni valide sulla dinamica delle acque e, per via indiretta, sul livello d'energia nelle varie aree lagunari.

La granulometria inoltre influisce in modo determinante sulle possibilità d'insediamento d'alcuni organismi, quali i mitili, la cui importanza per l'economia locale è fondamentale.

Dalle caratteristiche tessiturali dei sedimenti, infine, dipende anche la capacità di intrappolare sostanze inquinanti e di rilasciarle successivamente (Förstner e Wittmann, 1979; Salomons e Förstner, 1984).

Un precedente studio (Dal Cin e Pambianchi, 1991) condotto sui sedimenti superficiali dell'area di Goro (Fig. 2, pag. prec.), prelevati nel 1985/86, aveva evidenziato che:

- i sedimenti più diffusi erano di tipo argilloso e limoso;
- le sabbie erano presenti in prossimità della bocca e nella parte orientale della Sacca;
- la presenza di frazioni sabbiose era legata presumibilmente alle mareggiate, al proseguimento entro la laguna del trasporto solido lungo riva a partire dagli Scanni di Goro e di Volano, all'esistenza di paleostrutture sabbiose (gli antichi scanni, ora quasi del tutto smantellati e trasformati in barene), alla presenza di bioclasti, alle correnti di marea;
- la presenza dello Scanno esercitava notevole influenza sulla sedimentazione delle parti centrale ed orientale della Sacca, soprattutto per la sua funzione protettiva nei confronti delle mareggiate;
- il fattore predominante sul livello energetico era il moto ondoso, mentre ruolo subordinato assumevano le correnti di marea;
- particolarmente efficaci, nei riguardi della circolazione idrica, erano i mari provenienti da Scirocco (SE);
- le aree a minor energia erano quelle che cingono i limiti più interni della Sacca e quelle maggiormente protette dallo Scanno.

Nel decennio successivo la migrazione e l'evoluzione dello Scanno, l'apertura artificiale di un varco, rapidamente trasformatosi in un'ampia bocca lagunare, hanno determinato un significativo riassetto dei fondali, modificando significativamente la dinamica sedimentaria dell'area delle bocche.

Va anche ricordato che nell'area in esame la componente antropica, che si esplica attraverso profondi rimaneggiamenti operati dalle rasche, per la pesca delle vongole, e dalle draghe, per il mantenimento dell'efficienza del canale navigabile d'accesso al porto di Goro, e dello scavo di nuovi canali lagunari, per migliorare la circolazione idrica della laguna, ha prodotto e produce sensibili variazioni sull'assetto dei fondali e sulla tessitura dei materiali di fondo.

Per verificare i cambiamenti avvenuti nei fondali marini e lagunari sono stati effettuati, tra il 1997, 1998 e 1999, oltre 200 prelievi di sedimento superficiale, classificati utilizzando il diagramma di Shepard (Fig. 3). Per l'ubicazione dei campioni si veda la figura 4. L'analisi delle loro caratteristiche tessiturali, parzialmente integrate, ma solo per le aree interne della laguna perché meno suscettibili di rapidi cambiamenti composizionali, dalle informazioni fornite dallo studio di Dal Cin e Pambianchi (1991) hanno consentito di fotografare l'attuale dinamica sedimentaria dell'area.

Caratteristiche dei sedimenti

Per la classificazione dei sedimenti sono stati utilizzati sia il diagramma ternario di Shepard (1954) sia quello di Stevens (1984): il primo per uniformità con lo studio condotto negli anni '80 ed il secondo (Fig. 5) perché migliora la distinzione tra le particelle fini e grossolane. Secondo la suddivisione proposta da Shepard (1954) la maggior parte dei sedimenti raccolti sono classificabili come sabbie (54,4 %), argille limose (15,9 %) e argilla-silt-sabbia (10 %). Nel diagramma non viene fatta alcuna distinzione in base al contenuto d'argilla, che raggiunge, in alcuni casi, anche il 58,6 %.

I sedimenti sabbiosi o prevalentemente sabbiosi sono concentrati lungo le spiagge fino ad una profondità di 2 m e presso l'imboccatura principale della Sacca, lungo una fascia che si sviluppa con una direzione coerente con quella dei mari di Scirocco. Nelle aree, poco estese, in cui compaiono sabbie argillose, si può ipotizzare che la frazione sabbiosa sia prevalentemente costituita da frammenti bioclastici. Le aree a limo argilloso e, soprattutto, ad argilla limosa rappresentano le zone a minima energia, sia perché riparate dagli scanni di Goro e Volano, sia perché gli effetti dell'escursione di marea si fanno sentire in misura assai attenuata. La stessa litologia contraddistingue alcune aree meno estese, ma più articolate, in corrispondenza della foce del Po di Goro e delle massime profondità dei fondali marini antistanti lo Scanno. Da segnalare la presenza di un solo campione di silt e l'assenza di sedimenti, secondo la classificazione di Shepard, di argilla e argilla sabbiosa.

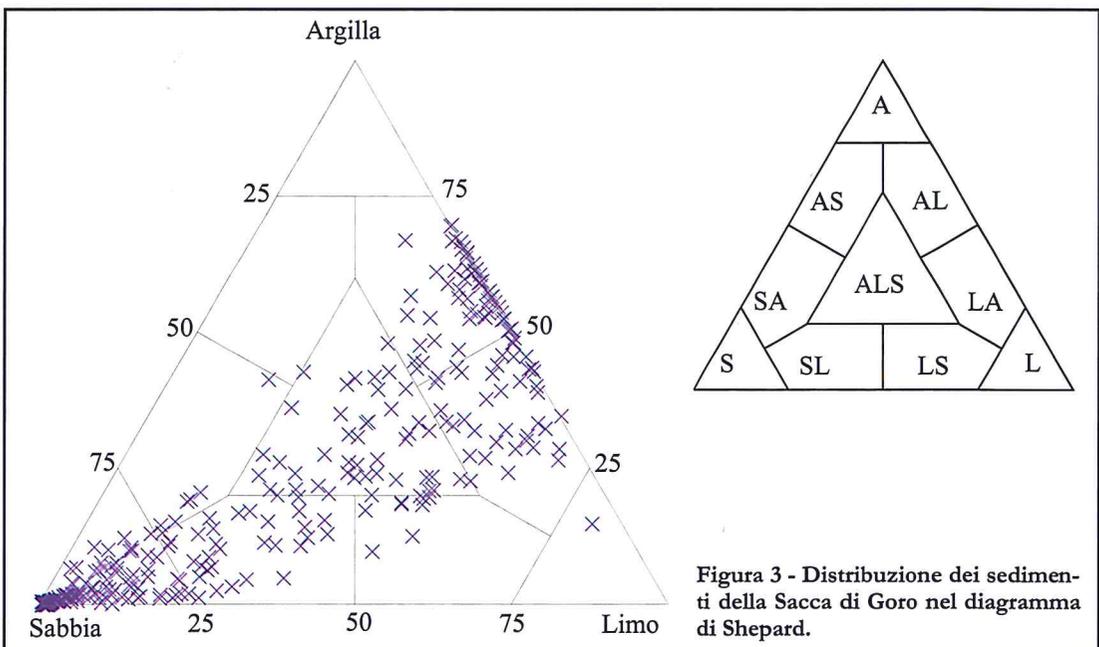


Figura 3 - Distribuzione dei sedimenti della Sacca di Goro nel diagramma di Shepard.

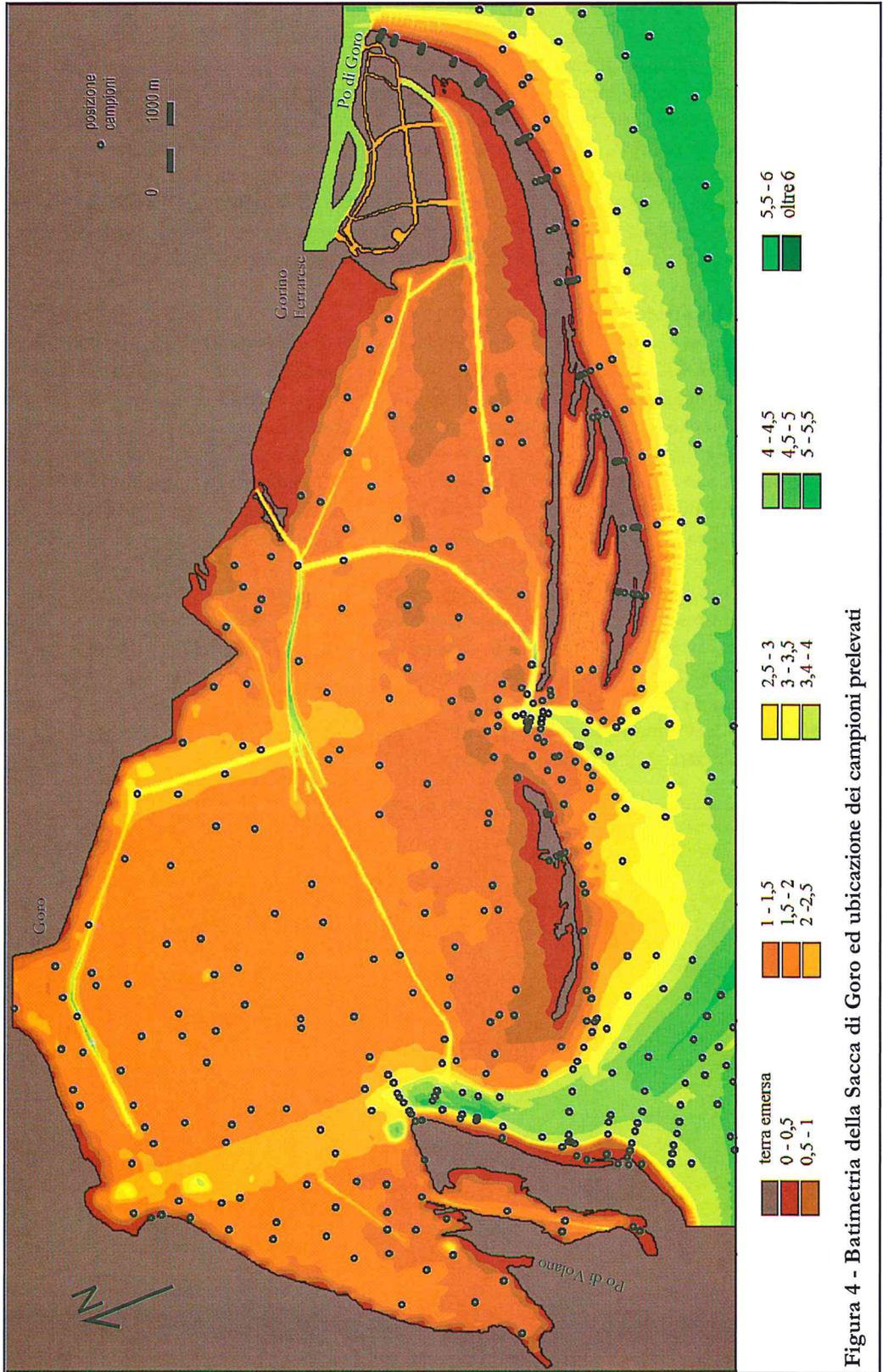


Figura 4 - Batimetria della Sacca di Goro ed ubicazione dei campioni prelevati

La classificazione di Stevens (1984) interpreta gli stessi campioni con almeno sette diverse classi, offrendo così considerazioni più accurate in base alla suddivisione interna del campo dimensionale del silt. In sostanza, questa classificazione offre un buon compromesso fra sinteticità e capacità descrittiva. Dall'analisi della figura 5 è possibile suddividere l'area indagata in tre grandi zone a seconda che prevalga la sabbia, il silt o l'argilla. I sedimenti superficiali dell'area lagunare presentano una componente principale d'argilla (sempre superiore al 5 %) che presenta le massime percentuali (tra 40 e 70 %) lungo il lato nord orientale della Sacca. La presenza di questi sedimenti suggerisce che la parte interna della laguna sia un'area riparata dal moto ondoso, per la protezione offerta dallo Scanno, con deboli o trascurabili effetti legati alle correnti di marea. Percentuali consistenti di sabbia frammista ad argilla e con una componente secondaria di silt [(si)cS] caratterizzano piccoli tratti in corrispondenza di Goro e di Gorino, il primo probabilmente dovuto ai lavori di scavo legati alla costruzione e manutenzione del porto di Goro, mentre il secondo rappresenta vecchie conoidi di rotta del Po.

Assai interessante risulta l'area di copertura dei sedimenti classificati come siC (argilla con una componente di silt) perché si estende fino al limite nord orientale della laguna. Essa potrebbe essere rappresentativa della diffusione del moto ondoso, che entra attraverso la bocca principale, e dell'effetto dell'espansione del flusso mareale.

Il contenuto in acqua dei campioni raccolti nel 1998 sui fondali della Sacca varia considerevolmente: da un minimo di 18,5% ad un massimo di 63,1% (Simeoni et al., 1999). Le densità dei materiali mostra invece una variazione piuttosto contenuta, entro valori compresi tra 2,59 e 2,78 g cm⁻³. Il diagramma di figura 6 evidenzia la variazione di questi due parametri in funzione del contenuto di sabbia, riportata in sequenza crescente di valori. Come si può notare, esiste una certa tendenza al decremento del contenuto in acqua all'aumentare della sabbia, mentre la densità non mostra alcun andamento significativo. E' dunque evidente che i sedimenti superficiali mostrano un gradiente d'acqua crescente procedendo verso le parti interne della Sacca, caratterizzate dai massimi tenori in fango.

La densità dei sedimenti superficiali appare decisamente più disomogenea arealmente, tuttavia il range dei valori rientra nel campo dei materiali "naturali" di varia litologia. Possono quindi essere escluse, almeno in prima istanza, forti commistioni con matrici di natura antropogenica, quali oli minerali ed idrocarburi in genere, che tendono ad abbattere i valori al di sotto di 2,2-2,3 g.cm⁻¹ (Furlan et al., 1999).

La banda di csSi (Fig. 5), sedimenti silteosi con componenti di sabbia ed argilla, delimita all'interno della laguna l'area della piattaforma dello Scanno. In corrispondenza della bocca secondaria essa si allarga delimitando l'area sia del delta di flusso sia di riflusso, mentre in corrispondenza di quella principale si assottiglia fino a scomparire in corrispondenza del bordo orientale del canale.

La classe granulometrica dei sedimenti che occupa la maggiore estensione all'interno della bocca di Volano è quella della sabbia. Procedendo verso l'interno vi è la tendenza all'incremento della componente argillosa [cS, (si)cS], mentre procedendo verso mare i sedimenti sabbiosi si arricchiscono nella frazione silteosa [(si)S, sSi]. L'area del canale è evidenziata da due aree strette ed allungate lungo l'asse nord-sud: la prima, più interna e corrispondente alla maggiori profondità, dove prevalgono i sedimenti (si)sC (argille con una percentuale principale di sabbie ed una secondaria di silt e la seconda, più spostata verso mare, dove alla sabbia si uniscono componenti importati di silt o d'argilla. I fondali marini prossimi a riva sono caratterizzati da una stretta ed articolata fascia di sedimenti sabbiosi, più ampia verso ovest in corrispondenza della bocca principale, per effetto delle correnti di marea. L'allargamento di questa fascia in corrispondenza della parte terminale dello Scanno potrebbe essere sintomatico della crescita di una nuova geminazione: l'accumulo di sabbia rappresenterebbe l'embrione della piattaforma sommersa di una nuova freccia litorale.

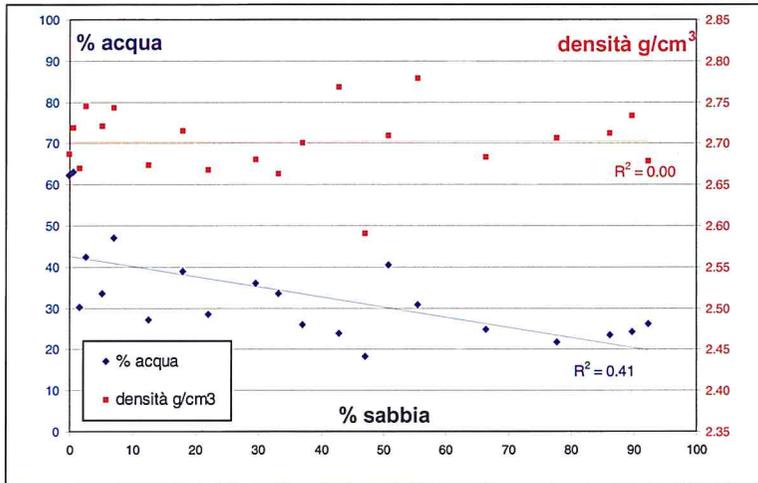


Figura 6 - Andamento della percentuale d'acqua e della densità dei sedimenti in funzione della percentuale di sabbia.

La terza ed ultima banda è caratterizzata da sedimenti siltosi con una componente principale prevalentemente sabbiosa. Si estende generalmente da profondità prossime a 2 m verso i fondali più profondi ed il suo andamento è molto articolato per la presenza di numerose ondulazioni. E' probabile che la distribuzione risenta degli effetti di diffrazione e della rifrazione delle onde su questi fondali complessi perché caratterizzati dalle numerose micro e macro digitazioni dello Scanno. Verso mare, a profondità comprese tra 5 e 6 m, essa si chiude a ridosso di sedimenti argillosi con una componente principale di sabbia e secondaria di silt [(si)C].

Questi materiali ed altri con maggior contenuto d'argilla [siC ed (si)C] presentano una maggiore diffusione anche a profondità minori (circa 3 m) in corrispondenza dell'area del delta sommerso del Po di Goro, dove avviene la deposizione dei materiali fini portati dal fiume. La forma e l'estensione di questi accumuli evidenzia come la distribuzione di questi materiali portati dal fiume avvenga in un'area molto ristretta e come la componente principale della loro dispersione sia diretta verso mare e verso ovest.

I valori della deviazione standard (Fig. 7) evidenziano come la maggior parte dei campioni siano ben classati; in particolare modo sono le sabbie e le sabbie pelitiche ad essere prevalentemente ben o molto ben classate. Il confronto con il diametro medio (in ϕ) e con la percentuale di fango, mette in rilievo l'esistenza di una buona correlazione inversa tra i due parametri (rispettivamente, $R^2=0,73$ e $R^2=0,74$), mentre è priva di significato con la profondità ($R^2=0,34$).

La variazione dell'asimmetria (Fig. 7) non fornisce molte informazioni, anche con il confronto con la profondità ($R^2 = 0,22$): essa varia da $-0,16$ a $0,84$, ma risulta negativo solo in una decina di campioni. I sedimenti prelevati nell'area manifestano una buona simmetria: sono ancora le sabbie e le sabbie pelitiche a presentare prevalentemente questa caratteristica. Infine, poco più della metà dei campioni analizzati è mesocurtica, e sono ancora le sabbie e le sabbie pelitiche ad avere tale caratteristica. Tra i campioni pelitico sabbiosi e molto sabbiosi prevale una classazione da moderata a buona, l'asimmetria positiva e la mesocurticità. Le curve di frequenza denotano una costante unimodalità delle sabbie, fatti salvi alcuni campioni bimodali. Nei casi di materiali più fini, dove tende a prevalere la componente pelitica, le classi dimensionali della sabbia sono ridotte al solo campo di transizione verso il silt grossolano. La caratterizzazione risultante è quindi meno significativa dei restanti, seppur identificativa di un processo di graduale decremento dimensionale tipico dei processi selettivi. La distribuzione della media, che è risultata pressoché coincidente con quella della moda, mostra una ben evidente zonazione areale. I più bassi valori di Mz ($2,0\phi < Mz < 2,5\phi$) si trovano in corrispondenza della fascia costiera di Volano, dimostrando così l'alta competenza del trasporto lungo costa che caratterizza quest'area. Per lo stesso motivo anche parte della fascia costiera dello Scanno è contraddistinta dallo stesso campo dimensionale.

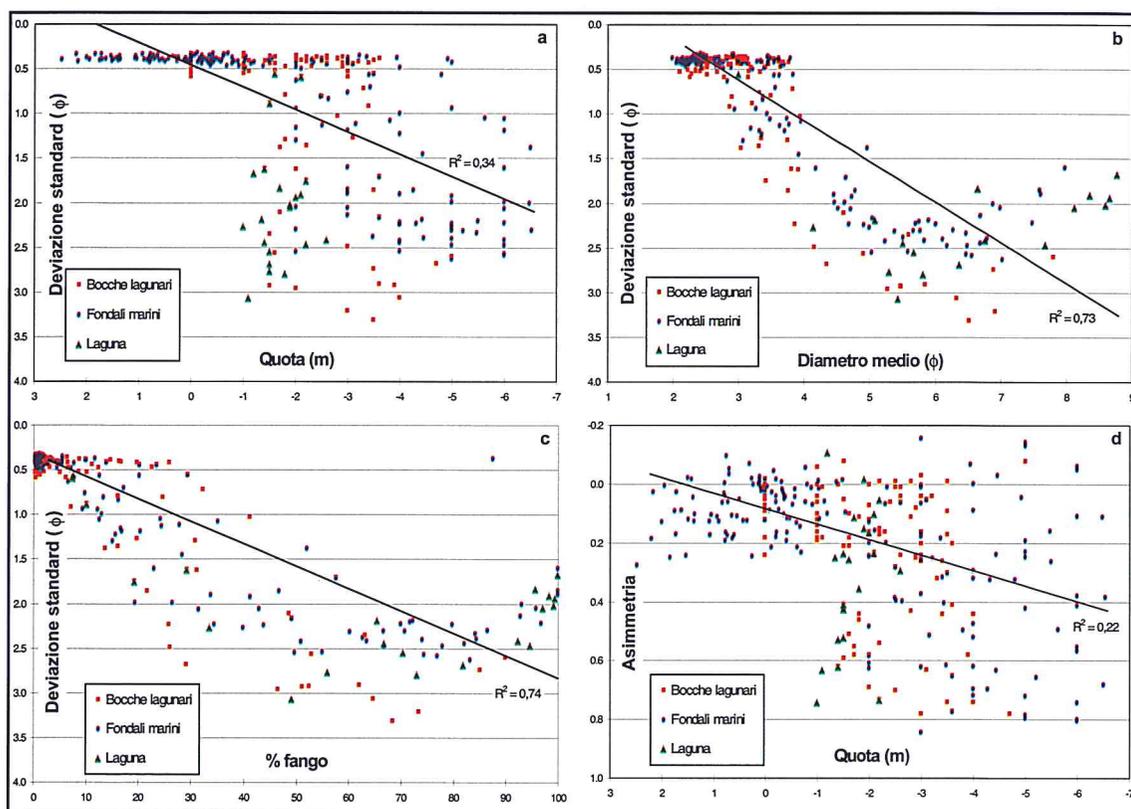


Figura 7 - Confronto fra parametri granulometrici dei sedimenti: a - Deviazione standard Vs. Quota; b - Deviazione standard Vs. Diametro medio; c - Deviazione standard Vs. percentuale fango; d - Asimmetria Vs. Quota.

L'imboccatura del canale, ed in pratica la quasi totalità del canale tidale, sono distinti da un Mz compreso tra $2,0 \phi$ e $3,0 \phi$, come parte della piattaforma della freccia litorale. Questa distribuzione indica che la corrente tidale risulta meno competente del trasporto lungo costa nella distribuzione dei sedimenti. Rispetto allo Scanno, il decremento di Mz verso sud-ovest indica una perdita di competenza del trasporto lungo costa, legata all'aumento della profondità.

Gli Mz maggiori ($> 5,0 \phi$) sono distribuiti in due aree: la prima verso mare rispetto allo Scanno, e la seconda all'interno della laguna. Nel primo caso, il calo dimensionale verso profondità maggiori rappresenta il prevalere del dominio marino, caratterizzato da Mz compresi tra $3,5$ e $7,0 \phi$. Nel secondo caso esso rappresenta la naturale diminuzione delle dimensioni, che si ha spostandosi verso l'interno della laguna, in corrispondenza d'acque più tranquille.

La distribuzione della moda conferma totalmente ciò che è stato appena esposto: a zone con alta competenza, come la costa di Volano, la parte mediana del canale tidale e parte della costa dello Scanno, corrisponde la moda più elevata ($2,5 \phi$), che va aumentando a mano a mano che la competenza diminuisce a sua volta. Infine, le mode $3,0$ e $3,5 \phi$ si localizzano nelle zone di transizione tra i due campi estremi, che competono alla corrente tidale e alla corrente litoranea da un lato, e al dominio marino dall'altro.

Confrontando le relazioni esistenti fra deviazione standard, diametro medio e percentuale di fango dei sedimenti superficiali dell'area della bocca principale viene evidenziata la presenza dei tre raggruppamenti. Il primo gruppo si identifica con i campioni aventi deviazione standard inferiore $0,7 \phi$, diametro medio compreso tra 2 e 4ϕ e percentuale di fango $< 20 \%$; il secondo presenta deviazione standard compresa fra $0,7$ e $2,7 \phi$, diametro medio tra $2,9$ e 5ϕ e percentuale di fango tra 10

% e 40 %; infine il terzo gruppo individua sedimenti con deviazione standard compresa fra 1,5 e 3,3 ϕ , diametro medio $>5 \phi$ e percentuale di fango >40 %.

Il primo gruppo si identifica con i campioni situati al centro dell'imboccatura della Sacca, lungo lo Scanno e lungo la spiaggia di Volano. In generale, c'è da sottolineare che la tendenza al restringimento dell'imboccatura della Sacca, causato dalla costante e progressiva migrazione dello freccia litorale verso ovest (Volano), ha influenzato il fattore idrodinamico, il quale a sua volta ha un notevole effetto sulla sedimentazione. L'area, soggetta al moto ondoso e agli effetti dell'escursione di marea, assume un livello d'energia tale da impedire il deposito di particelle fangose. Infatti, per quanto riguarda i campioni situati al centro dell'imboccatura della sacca, considerando la percentuale di sabbia come un indicatore del livello d'energia, si può dedurre che la massima energia si trovi all'imboccatura della Sacca.

Nei campioni situati lungo lo Scanno e lungo la spiaggia di Volano, l'elevata percentuale di sabbia è dovuta all'azione delle correnti lungo riva, che nel caso di Volano proseguono, per un certo tratto, entro la sacca.

Il secondo gruppo si identifica, in generale, con la zona in cui ha inizio l'approfondimento dei fondali verso mare. All'aumentare della profondità si osserva una crescita continua della percentuale di fango ben visibile nella figura 2. Questo fenomeno è indotto dalla frequenza e dall'energia con cui il moto ondoso interessa l'interfaccia acqua-sedimento, selezionando le particelle in funzione della resistenza, che queste riescono ad opporre all'energia dell'onda. Al crescere della profondità l'azione del moto ondoso diviene sempre più debole, consentendo la deposizione di particelle dimensionalmente sempre più piccole, le quali si sostituiscono alla sabbia. In pratica il calo d'energia consente un graduale incremento di silt e fango a spese della frazione sabbiosa.

Il terzo gruppo si identifica, in generale, con i fondali della laguna e con la zona più interna della bocca, probabilmente interessata dalla rampa di flusso. Lungo la rampa di flusso, cioè quella rampa a debole pendenza inclinata verso mare, risale la massa d'acqua legata al flusso di marea crescente. In quest'area ha un notevole effetto sulla sedimentazione il fattore idrodinamico. L'area è riparata nei confronti del moto ondoso dallo Scanno e gli effetti dell'escursione di marea si fanno sentire in modo attenuato. Per tali ragioni il livello dell'energia è molto basso e ciò favorisce il deposito delle particelle fangose.

Dinamica sedimentaria

La diminuzione progressiva della sabbia ed il contemporaneo aumento del fango allontanandosi dall'imboccatura, fanno ragionevolmente ipotizzare che in quest'area il principale, se non l'unico, fattore responsabile della distribuzione dei sedimenti sia di carattere idrodinamico. Anche lo studio effettuato da Dal Cin e Pambianchi (1991) aveva evidenziato come le caratteristiche granulometriche variassero con continuità andando dall'imboccatura della Sacca verso l'interno.

Dal confronto degli studi effettuati nel decennio scorso emerge un aumento della presenza di argilla nella parte interna della laguna. E' ragionevole supporre che nella Sacca le argille si depositano non solo per un abbassamento progressivo del livello d'energia, ma anche per flocculazione dovute alla variazione del pH all'incontro acqua dolce-salata. Ciò però è in contrasto con le percentuali non particolarmente elevate di argilla rinvenute in prossimità della foce del Po di Volano

Considerando la percentuale di sabbia come un indicatore del livello di energia, si può dedurre che la massima energia si trovi all'imboccatura principale della laguna e lungo la direttrice che dalla parte occidentale dell'imboccatura arriva a Goro. Tale energia è certamente legata anche alle correnti di marea; tuttavia riteniamo che influisca soprattutto l'energia del moto ondoso. In modo particolare dovrebbero avere il massimo influsso sul "lavaggio" dei sedimenti i mari di Scirocco, che si infilano nel settore nordoccidentale della sacca obliquamente, a causa della presenza dello Scanno, che funge da barriera protettiva. Infatti la disposizione della fascia a più elevata percentuale di sabbia è nettamente orientata in senso nord-sud.

La maggior percentuale di sabbia lungo la direttrice Volano-Goro è dovuta anche alla prosecuzione entro la Sacca, per un certo tratto, del trasporto dei sedimenti lungo riva, sedimenti provenienti dalle spiagge di Volano e da quelle dello Scanno.

Nella parte più interna di quest'area vi è una elevata percentuale di fango. Poiché qui i fondali non presentano caratteristiche batimetriche particolari, si deduce che l'elevata concentrazione del fango non è dovuta a ragioni morfologiche ma soprattutto a fattori idrodinamici. Anche in questo caso riteniamo che tale situazione sia legata non tanto ai lievi effetti dell'escursione di marea, quanto ad una forte diminuzione dell'energia del moto ondoso. L'esistenza, l'estensione e la disposizione della fascia fangosa in questa parte della sacca, oltre che da fattori fisici comuni ad altre lagune di questo tipo, sono certamente condizionate dalla presenza e dalla disposizione dello Scanno. Questo esercita sui fondali della sacca una protezione dalle mareggiate, in modo particolare da quelle di Scirocco. Ciò si deduce dalla forma dell'area ad alta concentrazione di fango: il "cono d'ombra" generato dallo Scanno non può riferirsi che ai mari di Scirocco.

Dallo studio condotto ed in accordo con quanto rilevato da Dal Cin e Pambianchi (1991) risulta che le aree ove meno si fanno sentire gli effetti del moto ondoso e dell'escursione di marea sono, nel complesso, le parti marginali della Sacca: in modo particolare quelle protette dall'agitazione del mare, grazie allo Scanno di Goro.

Conclusioni

L'analisi della distribuzione dei sedimenti e delle loro caratteristiche tessiturali ha consentito di evidenziare le principali direttrici di trasporto ubicate lungo la spiaggia di Volano e lo Scanno di Goro, ed alcune minori confinate nelle bocche lagunari. Il confronto con i rilievi del 1985/86 hanno messo in evidenza le modificazioni introdotte dall'apertura della nuova bocca lagunare e dal restringimento di quella principale.

Analizzando i processi di riduzione granulometrica è stato possibile individuare le aree di transizione tra mare, bocche lagunari e laguna. La deposizione dei materiali fini dovuti al richiamo d'acqua che si crea alle spalle dello Scanno, per l'espansione del getto della corrente tidale, vengono ben evidenziati dal confronto dei diagrammi e delle mappe tessiturali. Così come gli effetti del moto ondoso e dell'escursione di marea sui fondali della laguna sono stati qualitativamente individuati. Lo studio ha inoltre evidenziato come la diversa circolazione delle masse d'acqua abbia determinato una nuova distribuzione dei livelli di energia nei fondali lagunari.

Un aspetto applicativo estremamente importante dell'indagine condotta è collegato allo sfruttamento ittico dell'area, che è particolarmente legato alla distribuzione dei sedimenti sabbiosi e della circolazione idrica. I risultati ottenuti possono dunque fornire utili informazioni per approntare un corretto piano per l'utilizzo delle risorse dell'area.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano U. Tessari, A. De Nardo e S. Bencivelli per la collaborazione che, in vario modo, hanno fornito durante lo svolgimento della ricerca.

Lo studio è stato condotto con finanziamenti della Regione Emilia-Romagna (Assessorato Agricoltura, Obiettivo 5B, Sottoprogramma 1, Misura 7 - responsabile U. Simeoni) e dell'Università degli Studi di Ferrara (ex 60% - responsabile U. Simeoni), e con fondi COFIN98 del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica (responsabile R.. Dal Cin).

Bibliografia

- Dal Cin R. (1983) - *I litorali del delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta: caratteri tessiturali e dispersione dei sedimenti, cause dell'arretramento e previsioni sull'evoluzione futura*. Bollettino Società Geologica Italiana, 102: 9-56.
- Dal Cin R. (1994) - *Lo scannone di Goro nel Delta del Po: evoluzione morfologica e possibili interventi per conservare l'ambiente della laguna retrostante*. In: Bencivelli S., Castaldi N. & Finessi D. (Editors), Sacca di

- Goro: Studio integrato sull'ecologia in relazione ai problemi dell'inquinamento, della conservazione e dello sviluppo - 2° anno di ricerche. Franco Angeli, Provincia di Ferrara, Milano, I. pp. 291-303.
- Dal Cin R. e Pambianchi P. (1991) - *I sedimenti della Sacca di Goro (Delta del Po)*. In: Studio integrato sull'ecologia della Sacca di Goro, a cura di S. Bencivelli e N. Castaldi; Provincia di Ferrara, Franco Angeli: pp. 253-263.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1984) - *Variazioni volumetriche del delta padano nell'ultimo secolo, distribuzione dei sedimenti nei rami deltizi e caratteri granulometrici dei materiali cavati nel basso Po*. In: Atti del 2° Convegno di Idraulica Padana, Tecnografica, Parma, I. pp. 255-279.
- Förstner U. e Wittmann G.T.W. (1979) - *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer, Berlin. pp. 257.
- Furlan N., Fontolan G., Sartore L., Milani B., Mosca R. e Meriani S. (1999) - *Caratterizzazione chimico-fisica dei sedimenti del porto di Trieste e problematiche derivanti dall'eventuale dragaggio e smaltimento a mare*. Bollettino della Società Adriatica di Scienze, 79: 3-26.
- Idroser (1994) - *Aggiornamento ed integrazione del Piano progettuale per la difesa della costa adriatica emiliano-romagnola. Relazione generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. pp. 276.
- Salomons W. e Förstner U. (1984) - *Metals in the hydrocycle*. Springer, Berlin. pp. 312.
- Simeoni U., Borghesi A., Calderoni G., Ciavola P., Fontolan G., Gatti M., Gonella M., Tessari, U. e Zamariolo A. (1998) - *Analisi previsionale dell'evoluzione dello Scanno e della Sacca di Goro*. Regione Emilia-Romagna, Obiettivo 5B - Sottoprogramma 1, Misura 7 -, Relazione Finale. pp. 273.
- Shepard F.P. (1954) - *Nomenclature based on sand-silt-clay ratios*. Journal of Sedimentary Petrology, 24: 151-158.
- Simeoni U., Bezzi A., Calderoni G., Covelli S., Fontolan G., Sartore L., Tesolin V., Tessari, U. e Zamariolo A. (1999) - *Caratteristiche dei sedimenti della Sacca di Goro*. Regione Emilia-Romagna, Obiettivo 5B - Sottoprogramma 1, Misura 7 -, Relazione Finale. pp. 137
- Stevens R. (1984) - *A new sand-silty-clay triangle for textural nomenclature*. Geologiska Foreningens Stockholm Forhandlingar, 105: 245-250.

Manoscritto ricevuto il 20/1/2000, accettato il 26/3/2000.