

2° Giornata di Studio

Il monitoraggio idrotorbidimetrico dei corsi d'acqua

per la stima dei processi erosivi e il bilancio dei solidi sospesi

8 ottobre 2004

**EVOLUZIONE MORFOSEDIMENTARIA DELL'AREA COSTIERA
DI FOCE RENO**

Prof. Umberto Simeoni

Dipartimento di Scienze della Terra – Università di Ferrara

INTRODUZIONE

I litorali italiani hanno subito durante l'ultimo secolo una trasformazione radicale.

Un grosso impulso all'incremento demografico sui litorali è stato dato, oltre che dalle infrastrutture costiere, soprattutto dallo sviluppo della rete autostradale e ferroviaria, che hanno creato collegamenti rapidi fra le grandi città del nord con il sud e fra i territori interni e la costa.

La maggior occupazione del territorio costiero coincise con la nascita dell'industria turistica che presentò uno sviluppo urbanistico caotico favorito da inadeguati controlli e dall'assenza di attenti piani urbanistici.

Nell'Adriatico il turismo balneare cominciò ad essere organizzato, per le classi più agiate, fin dalla metà del secolo scorso a Rimini, Lido di Venezia e Grado; una forte accelerazione si verificò tra le due guerre mondiali soprattutto nel Riminese.

L'urbanizzazione iniziò come protendimento verso mare di numerosi centri situati nell'immediato entroterra e con la costruzione di nuovi insediamenti anche su cordoni dunari o cuspidi di foce, formando una vera e propria massificazione edilizia della costa, come in Emilia-Romagna.

A tal riguardo giova ricordare come nel 1881 nei comuni costieri risiedeva il 18% della popolazione italiana, nel 1951 il 26%, nel 1984 il 30%; tra il 1951-61 c'è stato un incremento demografico nei comuni costieri del 14,2%, fra il 61 e il 71 del 12,4%.

Nel 1996 lungo le coste del nostro Paese furono censite 2.200 km di costa non urbanizzati su circa 7500 km indagati.

Oggi si può stimare che vi sia circa il 29% del litorale italiano integralmente libero ed il 13% parzialmente occupato; ad esempio nell'Adriatico settentrionale l'unica grande area costiera naturale rimasta è costituita dall'area del delta del Po.

Un'ulteriore preoccupazione per la conservazione e salvaguardia dell'area costiera è rappresentata dalle recenti tendenze normative che favoriscono la vendita ai privati di parte delle proprietà demaniali. Ciò determina una situazione opposta a quella di altri paesi che, invece, acquistano tratti costieri dai privati per garantirne la tutela: in Francia il "Conservatoire de l'Espace Littoral et de Rivages Lacustres" nel 1999 aveva già messo acquistato da privati circa 808 km di costa; nel Regno Unito il "National Trust" attualmente protegge circa 565 miglia di coste britanniche; nel 1979 il governo federale degli Stati Uniti possedeva già 1.300.000 acri classificati come National Lake Shores, National Rivers e National Seashores.

L'intervento dell'uomo nell'ultimo secolo con le modifiche indotte dalle coltivazioni, dalla costruzione di strade e di ferrovie, dalle opere di sistemazione dei bacini imbriferi, dalle estrazioni di inerti dagli alvei, dalla costruzione di opere di sbarramento per molteplici usi (energetico, irriguo, difesa delle piene, ecc.) e dalla costruzione di opere a mare ha, dunque, violentemente mutato

le condizioni naturali della dinamica idrosedimentaria lungo riva e del trasporto solido a mare dei fiumi.

In merito a quest'ultimo punto è stato stimato (Idroser, 1983) che nel 1972 i fiumi emiliano-romagnoli avessero un apporto solido complessivo di materiali utili al ripascimento delle spiagge di circa 0,68 milioni di m³ anno e che vi sia stata una riduzione fra il 1945 ed il 1972 prossima ad un fattore 2, cioè un calo annuo del 2%. La stessa indagine suggerisce, sulla base di ipotesi plausibili ma con elevata estrapolazione, che dopo gli anni '80 si rileva una tendenza al recupero degli apporti solidi dei fiumi, anche se, pur con tempi lunghi, non si potrà mai ritornare ai livelli della prima metà del secolo.

Inoltre lo sfruttamento a volte incontrollato della costa ha modificato pesantemente i caratteri naturali dell'ambiente litorale e determinato un aumento della sua vulnerabilità per la riduzione delle protezioni naturali e non all'aggravamento delle condizioni d'attacco del mare.

A fronte di ciò, tuttavia, ancor oggi sono rare le azioni rivolte al loro ripristino e conservazione favorendo maggiormente l'attuazione d'interventi che sottraggono la costa all'azione del mare.

CARATTERIZZAZIONE EVOLUTIVA DELLA COSTA

Lo studio condotto da Bondesan *et al.* (1978) lungo la costa delle province di Ferrara e Ravenna presenta l'evoluzione di circa un secolo della linea di riva e dei fondali.

Gli autori identificano tre paraggi:

- da P.to Garibaldi alla foce del fiume Reno;
- dal Reno a Casal Borsetti;
- da Casal Borsetti a P.to Corsini.

I primi due tratti sono situati su di un territorio deltizio la cui formazione è da imputare al Po, con il suo ramo Spinatico (Eridano), proveniente da NW, fino circa al VI secolo d.C., e successivamente al Po di Primaro, particolarmente attivo fra l'VIII ed il XII secolo.

Tra il 1767 ed il 1795 a questo ramo, che aveva progressivamente perso officiosità, viene definitivamente allacciato il Reno, con una foce orientata verso est.

Successivamente, a causa di alcune opere adottate nel secolo XIX lungo il corso terminale del fiume, si dà inizio ad un nuovo sviluppo dell'apparato di foce che progressivamente ruota verso nord.

L'area posta immediatamente a settentrione viene così interessata direttamente dagli apporti solidi del fiume i quali, tra il 1920 ed il 1935, danno origine ad un cordone litoraneo che separa una laguna la cosiddetta Sacca di Bellocchio.

In concomitanza, le spiagge poste a sud dell'antica foce entrano in crisi erosiva per il mancato apporto dei sedimenti fluviali.

La progradazione della foce verso settentrione (*Fig. 1*), inoltre, porta allo sviluppo di una penisola confinata tra la sponda destra del fiume ed il mare, che, pur mantenendo una tendenza all'allungamento, denota, a partire dal 1920, una tendenza all'erosione marina.

Nel 1932 sono già evidenti i segni di un accorciamento di detta penisola, associati ad un assottigliamento.

Tale tendenza ha portato nel 1981 alla comparsa di una nuova foce del Reno, arretrata più a sud della precedente di circa 2 km (Idroser, 1996).

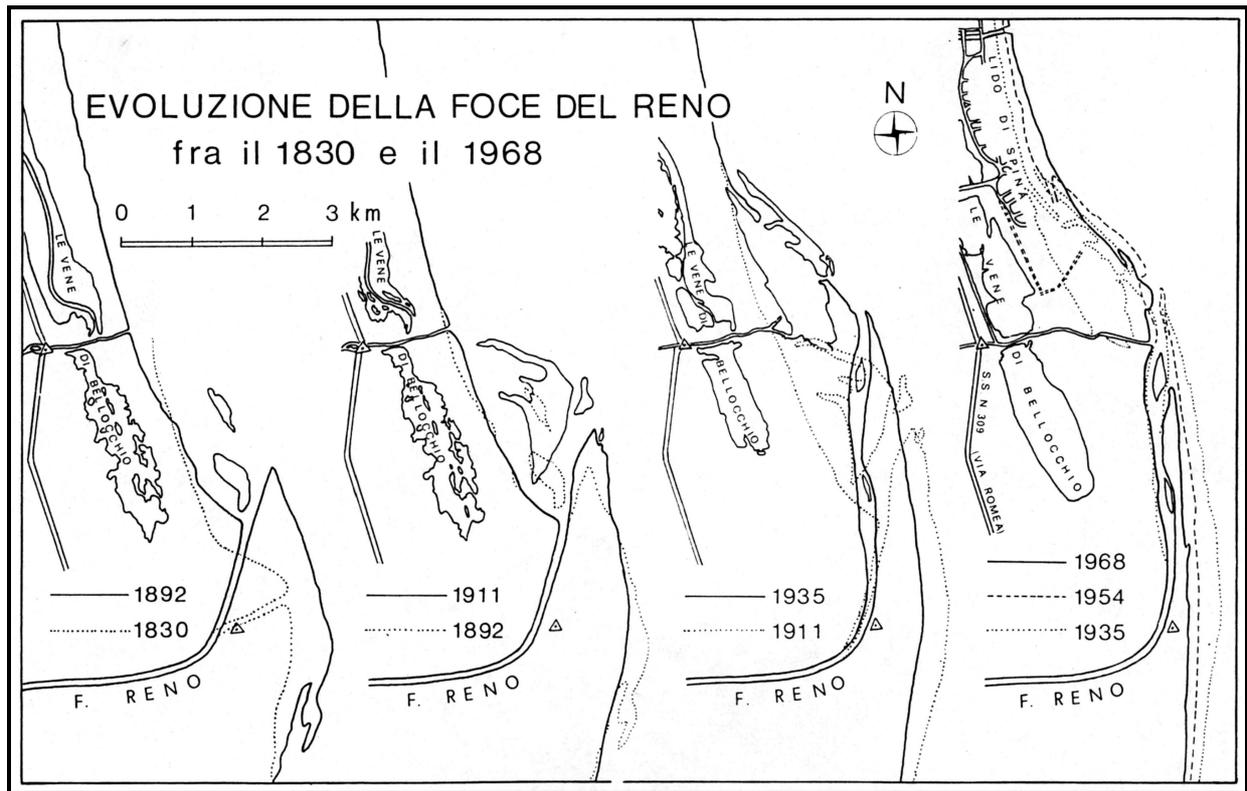


Figura 1 - Evoluzione planimetrica della foce del Reno tra il 1830 ed il 1968 (da Bondesan et al., 1978)

Nei pressi di Porto Garibaldi è evidente, già dalle testimonianze risalenti al secolo scorso, la tendenza all'accumulo sedimentario sul lato meridionale dei moli.

Nel corso dell'ultimo secolo tale tendenza è stata fortemente accentuata dalla rotazione verso nord della foce del Reno.

In sostanza l'evoluzione, nel corso dell'ultimo secolo, dei due paraggi risulta fortemente influenzata dagli spostamenti della foce e dalla diminuzione delle portate del fiume Reno.

Nel tratto compreso tra P.to Garibaldi e la foce fluviale l'andamento della variazione della linea di riva può essere così sintetizzato (Bondesan et al., 1978):

- 5,6 m/anno nel periodo 1835-1892; condizioni di inversione nel periodo 1892-1917;
- +8,9 m/anno dal 1917 al 1935; +5.0 m/anno dal 1935 al 1971.

Per il tratto successivo (da foce Reno a Casal Borsetti) l'evoluzione mostra il passaggio da condizioni di avanzamento a condizioni di arretramento delle spiagge:

- +16,0 m/anno tra il 1835 ed il 1892; condizioni di inversione tra il 1892 ed il 1917;
- 9,5 m/anno tra il 1917 ed il 1935; -7,8 m/anno dal 1935 al 1971.

L'evoluzione simmetrica dei due tratti è conseguenza diretta del mutamento di direzione e di migrazione della foce del Reno.

Per quanto concerne l'evoluzione dei fondali Bondesan *et al.* (1978) hanno approntato confronti estesi in tre periodi:

tra il 1869-70 ed il 1901, tra il 1901 ed il 1953-54 e tra il 1953-54 ed il 1968.

Nel tratto tra P.to Garibaldi e la foce del Reno i fondali nel primo periodo manifestano notevoli incrementi davanti alla nuova foce fluviale, così come al largo, verso NE, mentre subiscono abbassamenti nel tratto verso P.to Garibaldi, sino a 2 km al largo.

Nel secondo periodo prevalgono in tutta l'area i fenomeni di innalzamento, mentre nel terzo periodo i fondali tornano in condizioni di abbassamento (con l'eccezione dei fondali più vicini a riva).

Tra la foce del Reno e Casal Borsetti l'evoluzione è correlata alla migrazione dell'apparato di foce, ponendo in evidenza marcati fenomeni erosivi estesi a tutto il periodo considerato (1869/70-1968), in concordanza con quanto osservato per la spiaggia emersa.

Il litorale, anche per quanto concerne il suo assetto attuale, può essere suddiviso nelle tre subunità fisiografiche precedentemente identificate.

Nella prima, situata interamente nel Comune di Comacchio, il litorale risulta in forte erosione (Idroser, 1996; Arpa, 2000): alla rottura, avvenuta nel 1981, della sottile lingua di terra che delimitava sul lato mare gli ultimi 3 km del percorso del fiume Reno e alla conseguente formazione di una foce spostata verso sud rispetto alla precedente di 2 km, hanno fatto seguito forti modificazioni della morfologia costiera, evidenti, in particolar modo, nel tratto compreso tra la nuova foce del Reno e quella del canale Gobbino, canale collettore delle Valli di Comacchio.

Elemento dominante, così come nei decenni precedenti, è risultato il mare, che ha continuato ad erodere ciò che era rimasto della vecchia riva destra del fiume, a trasportare verso nord ingenti quantità di sabbia, tanto da realizzare in pochi anni, un'ampia spiaggia laddove vi erano le vecchie foci del Reno e ad allagare la nuova foce portandola ad un'ampiezza di 700 m.

In questo tratto gli arretramenti, riscontrati soprattutto nel periodo 1978-83, hanno raggiunto i 120 metri.

A protezione del paraggio, nel 1990, sono state realizzate delle difese in Tubi Longard ed un ripascimento artificiale di circa 40.000 m³ di sabbia.

Malgrado ciò la tendenza erosiva in prossimità della foce fluviale è continuata compromettendo seriamente anche la funzionalità delle opere difensive (*Fig. 2*).



Figura 2 - Tubi Longard posti a difesa del litorale in prossimità del Lido di Spina

Il materiale eroso viene trasportato verso nord, determinando così un forte tasso d'accumulo in prossimità del molo di Porto Garibaldi, la cui spiaggia sopraflutto si è protratta verso mare di circa 400 metri.

Si calcolano (Idroser, 1996) avanzamenti medi di 50-70 metri (con valori massimi di 120 m) per il periodo 1978-93, estesi per circa 4 km a sud del molo.

Il paraggio compreso tra la foce del fiume Reno e Casal Borsetti, di pertinenza del Comune di Ravenna, risulta fortemente influenzato dall'evoluzione della foce Reno, la cui crisi erosiva è ormai evidente da oltre 60 anni.

Tale paraggio è oggi quasi completamente irrigidito da opere difensive radenti, costruite negli anni '80.

Le opere, estese per una lunghezza di circa 4 km, lasciano indifeso solo il tratto compreso tra la foce del Canale Gobbino e la foce del fiume Reno, i cui tassi erosivi, negli ultimi 15 anni, hanno determinato arretramenti della linea di riva di circa 80 metri (Idroser, 1996).

Appare evidente come l'evoluzione di questo tratto di costa sia fortemente correlabile con l'evoluzione della foce del Reno e, quindi, con la possibilità di trasporto dei sedimenti del fiume stesso.

Malgrado sia evidente una ripresa nel trasporto solido, attualmente il volume di materiale trasportato, utile al ripascimento, non risulta ancora sufficiente a contrastare la tendenza erosiva dei litorali limitrofi.

Come nella maggior parte delle coste italiane anche in questo tratto di costa lo stato di conservazione degli apparati dunari non è buono.

Oltre a qualche lembo residuo di dune, resistito all'intensa antropizzazione nella parte ravennate e nella parte ferrarese più settentrionale, vi è la riserva di Bellocchio, dove le dune conservano ancora una continuità rilevante.

La cartografia di seguito riportata sintetizza i principali aspetti morfo-evolutivi dell'area in esame (Fig. 3).

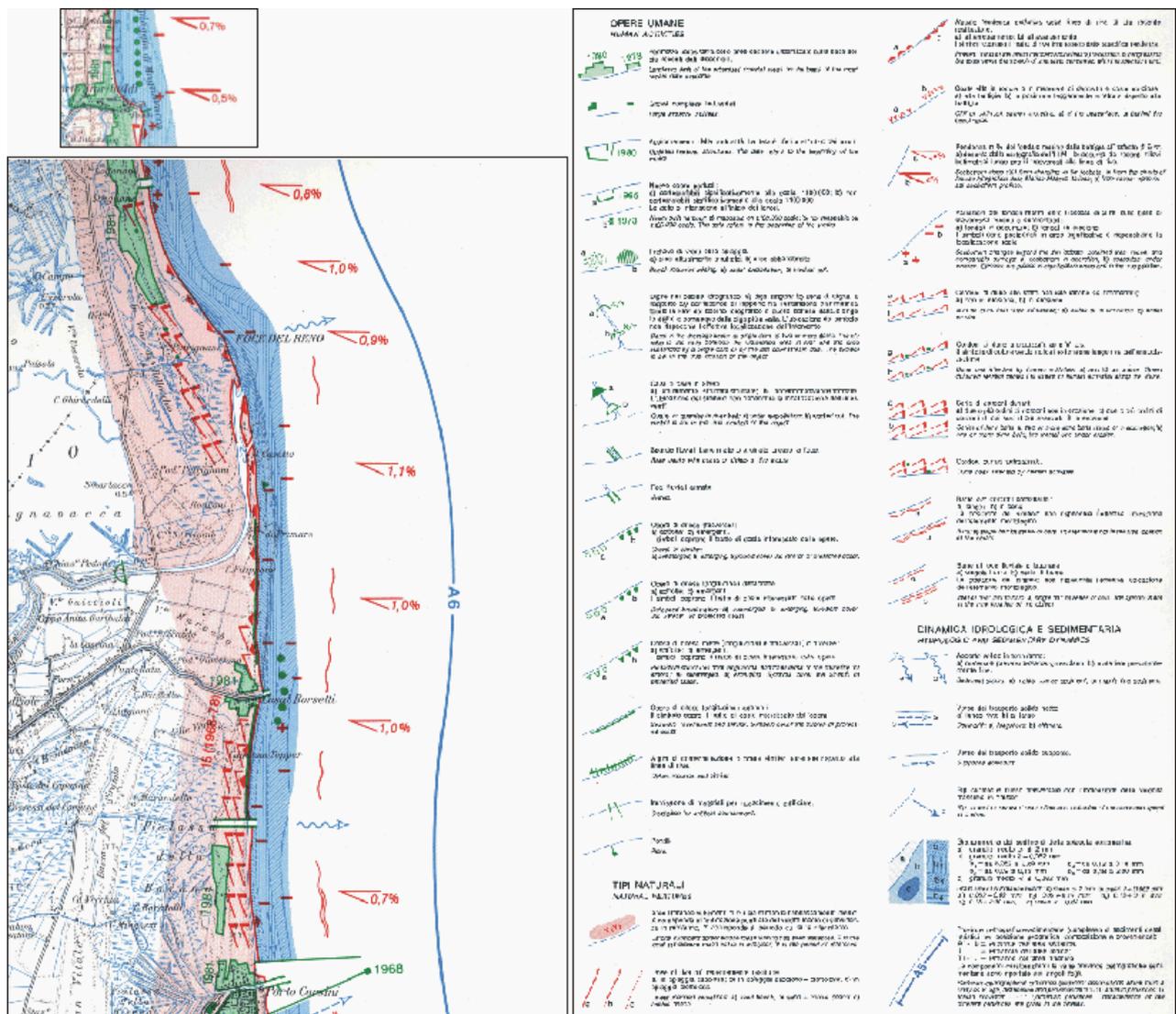


Figura 3 - Principali aspetti morfo-evolutivi tra P.to Garibaldi e P.to Corsini (da: Atlante delle Spiagge, 1997 – mod.).

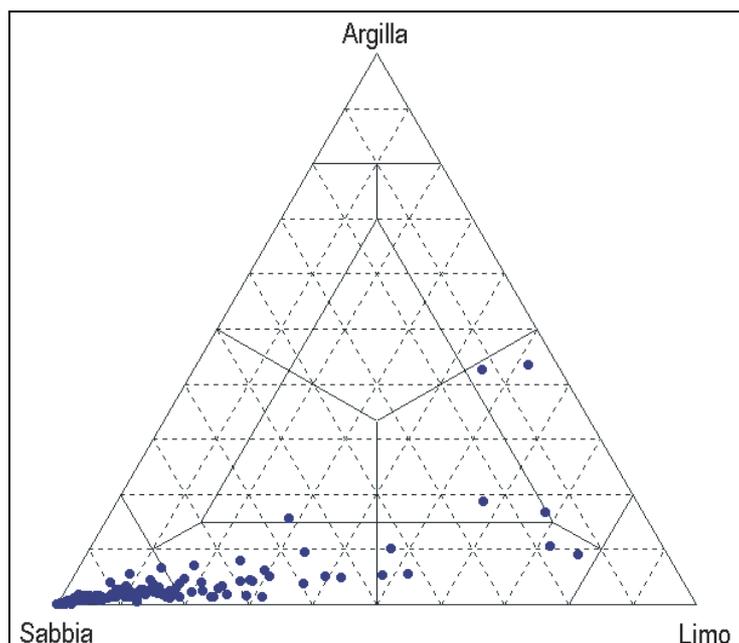
CARATTERIZZAZIONE SEDIMENTOLOGICA

Nell'ambito di una ricerca condotta dal Parco del Delta del Po emiliano-romagnolo (Simeoni *et al.*, 2000) è stata svolta una indagine sedimentologica su 213 campioni raccolti sulle spiagge e sui fondali compresi tra P.to Garibaldi e P.to Corsini.

Dallo studio emerge che, in questo paraggio, le percentuali di sabbia e di conseguenza dei fanghi, dato che nell'area indagata non sono presenti altre popolazioni granulometriche, variavano tra il 99,7% ed il 4,5%, ma il 91,6% presentava percentuali superiori al 70%.

I campioni con percentuali di fango superiori al 30% sono ubicati a profondità maggiori di -5 m.

In base alla suddivisione proposta da Shepard (1954) lo 0,9% dei campioni ricade (*Fig. 4*) nell'area del silt argilloso, 1,9% in quella del silt sabbioso, 8,9% nella sabbia siltosa, 87,4% nella sabbia e lo 0,9% nella parte centrale del triangolo (argille silt sabbia).



*Figura 4 - Diagramma di Shepard (1954) relativo alla classificazione dei sedimenti prelevati nel 1999 (da Simeoni *et al.*, 2002).*

La percentuale del fango generalmente aumenta con l'approfondimento dei fondali, tuttavia tale relazione non è né graduale né costante per una quasi assenza di questa frazione (<5%) sui fondali fino a -2 m di profondità, per la presenza di massimi relativi tra i -2 ed i -6 m e per le elevate, ma disperse, percentuali di fango sui fondali più profondi.

La distribuzione areale della sabbia (*Fig. 5 a*) evidenzia nel litorale più settentrionale un notevole sviluppo della banda 95-70% della sabbia che presenta la massima estensione in corrispondenza di P.to Garibaldi caratterizzando i fondali compresi tra 3 e 6-7 m di profondità.

Essa si restringe progressivamente, raggiungendo i valori minimi di tutta l'area indagata, in corrispondenza dei fondali antistanti il tratto meridionale del Lido di Spina e si sviluppa su fondali compresi tra 7 e 5-6 m di profondità.

I materiali con più del 95% di sabbia caratterizzano i fondali più prossimi a riva e l'estensione di questa banda tessiturale risulta assai uniforme, anche se per le differenti pendenze dei fondali (0,58% a nord e 1,02% a sud del tratto) si spinge a profondità maggiori in corrispondenza del lago di Spina.

Tra tratto tra il lago di Spina e Casal Borsetti è caratterizzato da fondali con pendenze via via minori procedendo da settentrione verso la foce Reno si passa da pendenze di circa 1,2% a 0,84%.

In quest'area la massima estensione della fascia di sedimenti con una percentuale di sabbia maggiore del 95% si riscontra in corrispondenza del litorale settentrionale della foce Reno, mentre la minima è ubicata alle due estremità ed in corrispondenza dei fondali a meridione della foce Reno (area del poligono di tiro militare).

Assai interessante risulta l'andamento delle fasce tessiturali in corrispondenza di un breve tratto (circa 1 km) ubicato subito a nord di Casal Borsetti dove i sedimenti con quantità inferiori al 30% di sabbia si avvicinano molto a riva.

Le pendenze dei fondali del tratto più meridionale diminuiscono progressivamente procedendo verso meridione: si passa da valori di circa 1,02% in corrispondenza del litorale di Casal Borsetti, a 0,81% in prossimità dello sbocco del Lamone, per raggiungere 0,77% nell'area di P.to Corsini.

La presenza dei moli portuali condiziona l'andamento delle frazioni sabbiose determinando, nei fondali a loro vicini, un richiamo verso il largo dei sedimenti più sabbiosi (>95% e tra 95 e 70%).

Assai uniforme ed estesa risulta la fascia più fangosa (<30% di sabbia) che si estende generalmente oltre i -6 m di profondità.

Nell'area in esame il diametro medio (*Fig. 5 b*) varia da un minimo di 1,6 f ad un massimo di 7,58 f.

Secondo la scala di Wentworth (1922) i campioni analizzati ricadono in un ampio spettro tessiturale che si estende dalla sabbia fine al silt molto fine, ma solo il 6,5% ricade nell'ambito dei sedimenti siltosi.

Come prevedibile questo parametro presenta una buona correlazione sia lineare ($R^2=0,84$) sia polinomiale ($R^2=0,86$) con la percentuale di sabbia.

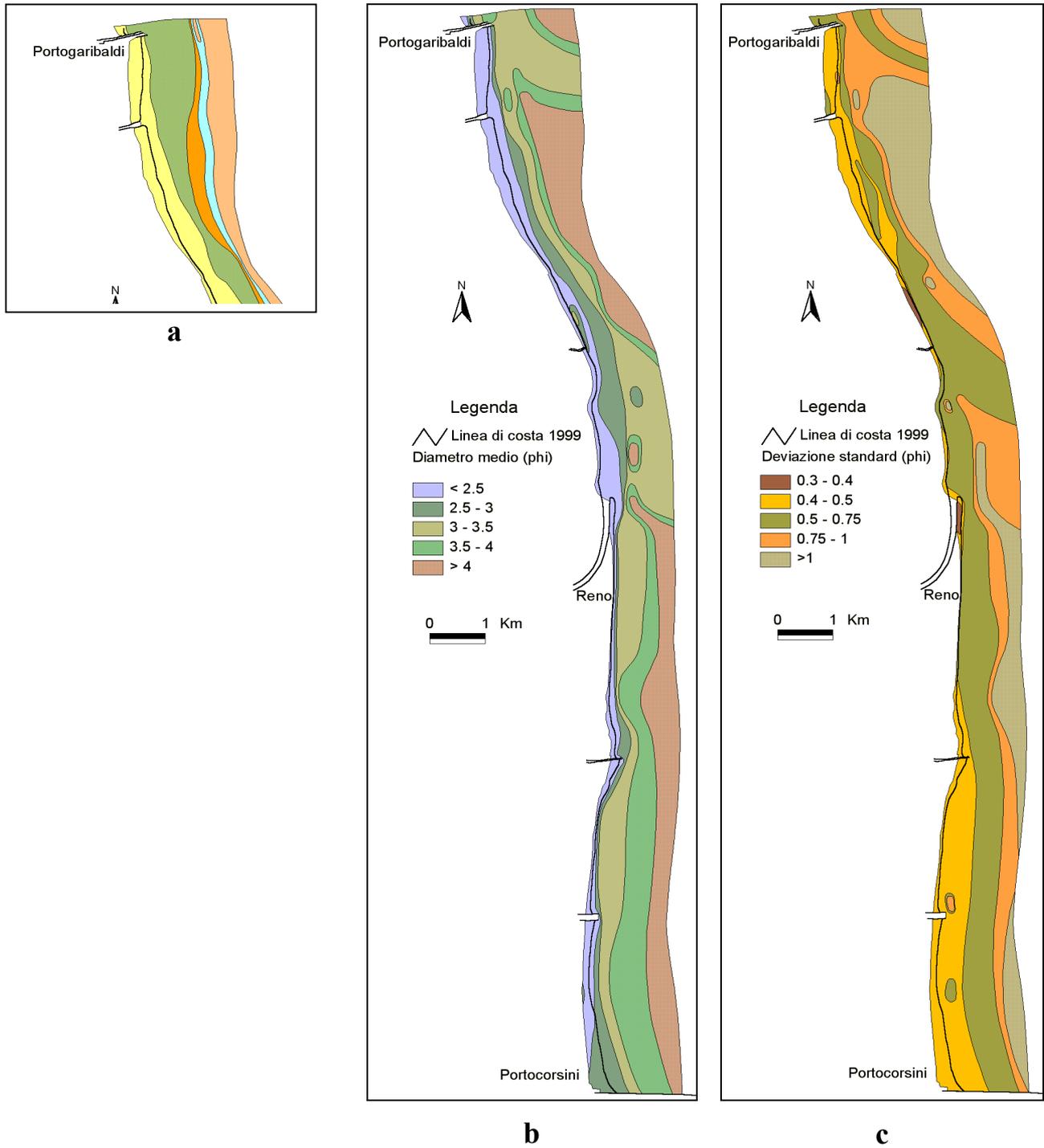


Figura 5 - Distribuzione della percentuale di sabbia (a), del diametro medio in ϕ (b) e della deviazione standard (c) (modificato da Simeoni et al., 2002).

La distribuzione areale del diametro medio appare meno lineare e più articolata di quella della percentuale della sabbia.

La spiaggia emersa ed i fondali prossimi a riva sono caratterizzati dalla fascia dimensionale $<2,5$ f e presenta il maggior sviluppo a mare sui fondali prospicienti il Lido di Spina e Casal Borsetti e delle foci del Reno e Lamone.

Non è praticamente presente nel tratto compreso tra foce Reno e l'estremità settentrionale di Casal Borsetti ed a ridosso del molo nord di P.to Corsini, dove viene sostituita da sedimenti con Mz compresi tra 2,5 e 3 f. Quest'ultima banda assume importanza soprattutto sui fondali a nord del Reno fino al Lido di Spina, in corrispondenza delle opere di difesa di Casal Borsetti e nel tratto a sud del Lamone.

I sedimenti con diametro medio di 3-3,5 f sono quelli che coprono il più ampio spettro di profondità, dai -2 m ai -6/7 m.

La loro distribuzione è assai articolata ed in corrispondenza del Lido degli Estensi e del litorale settentrionale della foce Reno raggiungono le massime profondità indagate.

I sedimenti più fini Mz $>3,5$ f generalmente caratterizzano le profondità maggiori, ma in prossimità del lobo meridionale del Reno ed a settentrione di Casal Borsetti raggiungono profondità prossime a -2 m.

Infine le variazioni della deviazione standard σ (da 0,39 a 2,53 f) evidenziano come i sedimenti dell'area indagata coprano il campo compreso tra quelli ben selezionati a molto poco selezionati (2,3% del totale), ma la maggior parte (85,1%) risulta ben o moderatamente ben selezionati (*Fig. 5 c*).

Questo parametro tende a crescere al diminuire delle dimensioni medie dei granuli, della percentuale della sabbia e, quindi, con l'aumentare della profondità.

In generale la distribuzione areale della deviazione standard rispecchia l'andamento del diametro medio.

Rispetto alla distribuzione della sabbia mostra significative differenze sui fondali antistanti P.to Garibaldi e quelli ubicati a settentrione della foce Reno dove a percentuali relativamente alte di sabbie corrispondono alti valori della deviazione standard.

I valori più bassi di σ caratterizzano la spiaggia emersa ed i fondali prossimi a riva antistanti i Lidi di Spina e degli Estensi ed il tratto compreso tra Casal Borsetti e P.to Corsini.

CONSIDERAZIONI

Le variazioni delle caratteristiche tessiturali dei sedimenti dei fondali e della spiaggia emersa rappresentano l'adattamento dei materiali a mutate condizioni morfo e idro-sedimentarie del litorale (Simeoni *et al.*, 2000 e 2002).

Non tener conto di ciò comporterebbe errori significativi nell'interpretazione dei dati sedimentologici.

Confrontando l'evoluzione della linea di riva tra il 1968 ed il 1975 (Bondesan *et al.*, 1978) appare evidente come essa, a nord del Lido di Spina, fosse in sostanziale avanzamento. Ciò veniva confermato anche dalla tendenza all'innalzamento dei fondali antistanti, registrata tra il 1968 ed 1971 come riportato nello studio di Bondesan *et al.* (1978).

Questo lavoro evidenzia inoltre come i sedimenti di quest'area fossero prevalentemente sabbiosi anche alle massime profondità di campionatura (percentuali di fango sempre inferiori al 10%), dove era stata individuata un'ampia area di massimo relativo.

I valori di diametro medio e deviazione standard consentirono di stabilire che, mediamente, questi sedimenti erano delle sabbie molto fini, da ben a moderatamente ben selezionate.

Gli autori, in base ai dati raccolti, ipotizzarono che questi fondali fossero caratterizzati da una relativa bassa energia. Ciò era determinato, in primo luogo, dalla forma concava del litorale che determinava una diminuzione dell'energia specifica media delle onde per il fenomeno di rifrazione.

In merito all'assenza d'importanti depositi della frazione fangosa suggerirono che questi fondali non fossero alimentati né dai fanghi provenienti dal Po, che si depositavano sul litorale posto a nord di P.to Garibaldi, né da quelli del Reno.

Inoltre, il forte accrescimento della linea di riva riscontrato a ridosso del molo sud di Porto Garibaldi confermava per quest'area un prevalente trasporto sottomarino verso settentrione delle sabbie, provenienti sia dal fiume Reno sia dall'erosione della sua foce.

Il tratto compreso tra Lido di Spina e Casal Borsetti era caratterizzato da importanti arretramenti della linea di riva (confronto fra i rilievi del 1968 e del 1975), specialmente in corrispondenza dell'area di foce Reno, e da consistenti abbassamenti dei fondali antistanti (Bondesan *et al.*, 1978).

Rispetto al tratto precedente i sedimenti superficiali presentavano valori massimi della percentuale di fango assai maggiori anche se confinati oltre i -5 m di profondità.

La distribuzione areale di questo parametro consentì di evidenziare, a sud del Lido di Spina, la zona d'accumulo dei fanghi trasportati in mare dal Reno (circa 85% del suo trasporto solido totale).

Altri massimi relativi di fango vennero evidenziati dallo studio prossimi a riva (2/3 m di profondità) in corrispondenza del litorale meridionale della foce Reno, essi furono attribuiti alla presenza di depositi residuati portati in luce dall'erosione dei fondali.

L'area d'influenza di questo fiume era abbastanza limitata e caratterizzata da bassi valori di diametro medio (in f), di deviazione standard e della percentuale di fango. Ciò veniva interpretato come un'area ad alta energia, dovuta principalmente alla forma convessa del litorale, alla presenza di correnti fluviali e di marea che trasportano i sedimenti portati in mare dal fiume.

Sui parametri tessiturali evidenziati in questo tratto centrale una grossa influenza era dovuta all'apporto di una quantità non trascurabile di materiale grossolano ad opera del Reno che nel 1970, secondo stime Idroser (1996), scaricava in mare circa $190.000 \text{ m}^3/\text{a}$ di materiale sabbioso.

A queste quantità vanno aggiunte le sabbie messe in gioco dall'attiva erosione delle spiagge e dei bassi fondali che, vagliate dal moto ondoso, venivano successivamente trasferite verso settentrione lungo riva o, per le frazioni più sottili, disperse verso il largo.

Infine, nel tratto più meridionale (Casal Borsetti – P.to Corsini) i fenomeni d'arretramento della linea di riva si esauriscono progressivamente procedendo da Casal Borsetti verso la foce armata del Lamone, mentre i fondali presentano una sia pur lieve tendenza all'abbassamento.

Da questo punto in poi la spiaggia è in evidente avanzamento specie in prossimità del molo portuale di P.to Corsini ed i fondali sono caratterizzati da evidenti fenomeni d'innalzamento del fondale. Ciò è da collegare in parte agli apporti sabbiosi del Lamone ($55.000 \text{ m}^3/\text{a}$) stimati da Idroser (1996) per il 1970 che vengono trasferiti verso sud dalla deriva litoranea.

I materiali sottili trasportati da questo fiume (79% del trasporto solido totale) venivano invece dispersi verso il largo e verso meridione, andando a depositarsi in corrispondenza di Marina Romea oltre i 3-4 m di profondità. I bassi valori della percentuale di fango rinvenuti sui fondali a ridosso del molo, secondo gli autori, dipendevano sia dalle sabbie trasportate dalla corrente lungo riva sia dalla presenza di correnti locali, innescate dalla presenza dei moli portuali.

Tra il 1984 ed il 1993 lo studio condotto da Idroser (1996) mise in rilievo come a fronte di una relativa ripresa del trasporto solido di fondo dei fiumi Reno e Lamone e della riduzione della subsidenza, il tratto litorale in esame non modificò il suo trend evolutivo.

L'indagine stimò che la variazione di volume, tra le quote +1 m e -6 m, potesse essere valutata attorno a +1,3 milioni di m^3 (media annua $+138 \cdot 10^3 \text{ m}^3$) per il tratto compreso tra P.to Garibaldi e foce Reno, -2,4 Mm^3 (media annua $-264 \cdot 10^3 \text{ m}^3$) tra foce Reno e Casal Borsetti, e di +2,3 Mm^3 (media annua $+260 \cdot 10^3 \text{ m}^3$) tra Casal Borsetti e P.to Corsini.

Questi valori suggerivano quindi un sostanziale bilancio positivo (+1,2 Mm³) dell'unità fisiografica oggetto dello studio, anche se non omogeneo.

Più in dettaglio Idroser (1996) ed Arpa (2000) stabiliva che nel tratto P.to Garibaldi-Casal Borsetti vi fosse stato un apporto di materiale di fondo >0,13 mm dai corsi d'acqua di +125 *10³ m³ ogni anno e di +40 *10³ m³ nel tratto Casal Borsetti - P.to Corsini.

Questo bilancio volumetrico positivo dava origine ad un accrescimento della spiaggia nell'area subito a nord dei moli foranei di P.to Corsini, tra i Lidi degli Estensi e di Spina ed in prossimità di P.to Garibaldi.

Al contrario il tratto di foce Reno, che tra il 1981 ed il 1993 si è spostata più a sud di 1500 m, presentava importanti fenomeni erosivi, così come il litorale tra il Lido delle Nazioni e le Bocche del Bianco.

In sintesi lo studio valutò che nel 1993 tra P.to Corsini e P.to Garibaldi (21 km di lunghezza) vi fossero 7 km di litorale in avanzamento, 10 stabili e 4 km in arretramento.

Per contrastare i preoccupanti fenomeni erosivi in atto sul litorale tra Casal Borsetti e foce Lamone tra il 1989 ed il 1993 fu effettuato un ripascimento protetto, da barriere soffolte, della spiaggia a ridosso della scogliera radente preesistente.

In totale, a più riprese, furono versati 340.000 m³ di sabbia (150 m³/m) che già nel maggio del 1994 si erano ridotti a 250.000 m³ con una perdita netta del 27% (Noli *et al.*, 1995).

A queste tendenze evolutive corrisposero, sui fondali, modificazioni nella distribuzione dei sedimenti.

Pur con le dovute cautele, per i differenti metodi di campionamento e d'analisi, dal confronto con i dati di Bondesan *et al.* (1978) i dati tessiturali inerenti ai campionamenti effettuati nel 1993 evidenziarono una relativa diminuzione della percentuale dei fanghi. Ciò si ripercosse sulla distribuzione della dimensione media dei sedimenti, che risultavano relativamente grossolani, anche procedendo verso il largo.

Lo spostamento più a sud (circa di 1,5 km) registrato tra il 1981 ed il 1993 della foce Reno determinò uno spostamento verso meridione dell'area di deposito di materiali sottili portati in mare dal fiume (massimo assoluto della percentuale di fango). Inoltre la distribuzione areale della percentuale di sabbia mise in evidenza, tra -3 e -6 m di profondità a meridione del Lido di Spina, importanti incrementi delle percentuali dei materiali sottili. Essi corrispondevano alle aree di deposito dagli apporti dei fiumi Reno e Lamone, ed alla zona ove la protezione offerta dai moli del porto di Ravenna era più intensa.

L'influenza degli apporti solidi dei due fiumi e dei moli portuali viene inoltre messa in luce dalla progressiva diminuzione del diametro medio (Mz in mm) procedendo da foce Reno verso P.to Corsini.

Aree con elevata deviazione standard, ubicate a profondità a 4, 6 m di profondità sui fondali antistante la foce Reno ed in prossimità dei moli di P.to Corsini, avvaloravano quanto sopra esposto.

Le indagini condotte da Borgato (1995) ed Idroser (1996) confermarono sui fondali antistanti P.to Garibaldi - Lido di Spina una percentuale relativamente più bassa di fango rispetto al litorale emiliano-romagnolo più settentrionale. Ciò avvalorava l'ipotesi che il limite meridionale dell'influenza, sui depositi, dei materiali sottili trasportati dal Po sia da porre in corrispondenza dei moli di P.to Garibaldi.

In definitiva nell'area in esame, nell'arco di circa un ventennio, si evidenziò una lieve diminuzione delle dimensioni medie dei granuli sui fondali prossimi a riva che veniva attribuita non a modificazioni dell'energia dell'onda, ma alla presenza di opere di difesa: tubi tipo Longard a sud del Lido di Spina, scogliere e ripascimenti protetti nel tratto a meridione della foce Reno.

A profondità maggiori questa tendenza s'invertiva per la presenza di sedimenti relativamente più grossolani (minori percentuali di fango) di quelli rilevati nel 1972. Ciò fu attribuito ad una ripresa dei contributi sabbiosi portati al mare dai fiumi (15% del totale stimato per il Reno e 79% per il Lamone), per la progressiva chiusura delle cave in alveo.

Le indagini morfo-batimetriche condotte nel 1999 (Simeoni *et al.*, 2000 e 2002) confermano, a grandi linee, le tendenze evolutive emerse dai precedenti rilievi.

I tratti di litorale posti alle estremità dell'area (Lido di Spina – P.to Garibaldi e Casal Borsetti – P.to Corsini) sono caratterizzati da evidenti avanzamenti della linea di riva, mentre nel tratto intermedio continuano gli arretramenti della costa, con maggiore intensità nell'area di foce del Reno.

Rispetto al 1972 ed al 1993 i sedimenti raccolti presentano maggiori percentuali di fango sia alle basse che alle maggiori profondità di prelievo, con massime variazioni tra -2 e -4 m di profondità.

La distribuzione areale della percentuale di sabbia evidenzia l'influenza dei moli portuali di P.to Garibaldi e di P.to Corsini nell'intercettare i materiali grossolani che transitano lungo riva (Simeoni *et al.*, 2002).

L'influenza degli apporti sabbiosi del Reno e del Lamone risulta evidente solo in corrispondenza della sola zona di foce, mentre risultano ben delineate le aree al largo in cui si depositano i materiali fangosi di questi fiumi ed in minor misura di quelli provenienti dal canale di bonifica di Casal Borsetti.

La distribuzione areale del diametro medio riferita ai campioni raccolti nel 1999 mette in rilievo il transito lungo riva divergente dei sedimenti grossolani: dalla foce Reno, area di divergenza, le sabbie si spostano verso P.to Garibaldi e verso P.to Corsini dove vengono trattenute dai moli portuali.

Nel tratto tra foce Reno e Casal Borsetti la deriva litoranea non è ben definita, ma dati gli accumuli di sabbia con diametro $>2,5$ f sembra che la componente di maggior intensità sia rivolta verso sud.

La distribuzione dei depositi di sedimento con bassi valori di diametro medio ($Mz >4$ f) mette in rilievo come i sedimenti sottili del Po si arrestino in prossimità di P.to Garibaldi.

Gli accumuli dei materiali fangosi suggeriscono come i sedimenti sottili portati dal Reno si distribuiscano verso il largo, con una componente principale rivolta a nord ed una secondaria a sud, mentre quelli del Lamone si disperdano principalmente verso il largo e verso meridione (Simeoni *et al.*, 2000 e 2002).

La scarsa estensione della fascia con $Mz < 2,5$ f di fronte alla foce Reno sottolinea la limitata area di competenza delle sabbie portate da questo corso d'acqua, anche perché è ipotizzabile che in essa confluiscono anche quelle erose nello smantellamento dall'apparato di foce.

L'area di pertinenza dei contributi sottili del Reno è evidenziata anche dai materiali con una deviazione standard compresa tra 0,5-0,75 f, la cui estensione conferma la prevalenza di contributi sottili di questo fiume.

Come era implicito supporre, dato l'andamento della sabbia, i valori della variazione di questo parametro pongono in rilievo come in sette anni la classazione dei sedimenti sia peggiorata sui fondali a nord della foce Reno e migliorata in quelli più meridionali.

In sintesi, negli anni '90 nel tratto a nord del Reno si è registrato un generale aumento della percentuale del fango (Simeoni *et al.*, 2002) che ha determinato un aumento della taglia media dei granuli ed una peggiore classazione dei sedimenti. Ciò è da ricondurre ad una ripresa del trasporto solido del Reno, legata soprattutto alla chiusura delle cave in alveo avvenuta nei primi anni '90.

Quest'aumento ha fatto sì che oggi il Reno, secondo stime Idroser (1996), porti a mare 190.000 m³/anno di sabbia utile al ripascimento della costa, quantità uguale a quella stimata per il 1970.

Ma poiché trent'anni fa vi era una forte erosione sulla cuspide e sui fondali antistanti il Reno (Bondesan *et al.*, 1978) non è ipotizzabile che nei prossimi anni s'inverta la tendenza all'arretramento di quest'area di foce. E' possibile, però, che essa si attenui, supponendo reali le stime effettuate da Idroser (1996) sull'incremento del volume di materiale sabbioso trasportato dal Reno nel 2010 (250.000 m³/anno) e sulla riduzione degli abbassamenti del territorio legati alle attività antropiche.

Resta tuttavia il fatto che le condizioni del bilancio sedimentario attuali e del prossimo futuro non sono sufficienti a sostenere l'attuale forma arcuata del delta. Per contro è prevedibile che, mano a mano che si ridurrà il fenomeno erosivo in foce Reno, si ridurranno le velocità di avanzamento della spiaggia di Lido degli Estensi, che viene in buona parte alimentata dalle sabbie delle spiagge in erosione. Tutto ciò è ipotizzabile sempre che la geometria e la posizione dell'asta terminale del fiume non subisca sostanziali variazioni.

BIBLIOGRAFIA

- Arpa (2002) – *Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2000*. I quaderni di Arpa, Regione Emilia-Romagna, Bologna, pp. 124.
- Borgato P. (1995) - *Incidenza degli interventi antropici, delle variazioni della subsidenza e degli apporti solidi fluviali sulla dinamica dei sedimenti lungo la fascia costiera emiliano-romagnola*. Tesi inedita, Università degli Studi di Ferrara, Relatore U. Simeoni., pp. 206.
- Bondesan M., Calderoni G. e Dal Cin R. (1978) - *Il litorale delle province di Ferrara e Ravenna (Alto Adriatico); evoluzione morfologica e distribuzione dei sedimenti*. Bol. Soc. Geol. It., 97, 247-287.
- Idroser (1983) - *Il trasporto solido fluviale nei bacini tributari dell'Adriatico*. - Regione Emilia-Romagna, Piano progettuale per la difesa della costa Emiliano-Romagnola, volume IV, Bologna, pp. 429.
- Idroser (1996) – *Progetto di Piano per la Difesa dal Mare e la Riqualificazione Ambientale del Litorale della Regione Emilia-Romagna; Relazione Generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna, pp.365.
- Simeoni U., Anconetani P., Gabbianelli G., Gonella M., C. Del Grande, M. Pellizari, Tessari U., Zamariolo A. (2000) – *Studio dell'Ancona e delle Vene di Bellocchio, del litorale tra Porto Garibaldi e Porto Corsini: proposte di sistemazione ambientale*. Parco del Delta del Po Emilia-Romagna, Rapporto interno, pp.190.
- Simeoni U., Atzeni P., Bonora N., Borasio E., Del Grande C., Gabbianelli G., Gonella M., Tessari U., Valpreda E., Zamariolo A. (2002) – *Integrated management study of Comacchio Coast (Italy)*. Journal of Coastal Research, Special Issue 36, 686-693.