

## Verifica su modello numerico di un intervento per il contenimento dell'erosione a sud di Marina di Pisa

Giuseppe Ghezzi<sup>1</sup>, Valerio Milano<sup>2</sup> e Alberto Noli<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Piazza Andrea del Sarto 5, Pisa.

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Idraulica Trasporti e Strade, Università degli Studi di Pisa.

<sup>3</sup> Dipartimento di Ingegneria Edile Idraulica e del Territorio, Università di Roma «La Sapienza».

### Riassunto

Vengono illustrati i criteri seguiti per la progettazione di un intervento di protezione del litorale sabbioso a sud della foce dell'Arno, soggetto ad un continuo processo di erosione. Si tratta di un intervento di ripascimento artificiale effettuato con sabbia dragata nel tratto terminale dell'alveo dell'Arno e quindi con caratteristiche simili a quella presente sulle spiagge. Il ripascimento è stato protetto da una scogliera parallela sommersa il cui comportamento è stato studiato con un moderno modello numerico.

### Premessa

Il litorale pisano, della lunghezza di 26 km, si estende dal Fosso della Bufalina a nord alla foce del Calambrone a sud e costituisce la parte meridionale dell'unità fisiografica, lunga 65 km, delimitata da Punta Bianca e dal porto di Livorno. La parte centrale di tale litorale, a cavallo della foce del fiume Arno, dopo un lungo periodo di incessante avanzamento, è andata incontro ad un cospicuo fenomeno erosivo, a partire dalla seconda metà dello scorso secolo (Aiello et al., 1975; Bartolini et al., 1989). Tale fenomeno ha avuto inizio con la demolizione dell'apice del delta dell'Arno, propagandosi lungo il litorale, sia verso nord che verso sud, con modalità diverse: a nord l'arretramento della linea di riva, che ha interessato la spiaggia di S. Rossore e che non è stato in pratica ostacolato, ha superato addirittura i 1.000 m; a sud, invece, per difendere l'abitato di Marina di Pisa sono state realizzate a più riprese opere a mare di protezione, per cui l'arretramento è stato contenuto in circa 100 m (Milano, 1986). Peraltro a partire dall'anno 1970 circa l'arretramento a sud di Marina di Pisa è divenuto più veloce determinando una serie di interventi d'urgenza che hanno spostato progressivamente sempre più verso sud il fenomeno erosivo.

Considerata la gravità del fenomeno stesso, l'Autorità di Bacino del Fiume Arno ha stanziato un primo finanziamento di lire 2 miliardi per un intervento di contenimento dell'erosione nell'ambito di un progetto generale di sistemazione ben più ampio. Il comitato istituzionale della suddetta Autorità di Bacino, con deliberazione n°78 del 31.10.1995, identificava nella Regione Toscana la competenza amministrativa e nel Comune di Pisa quella territoriale per la realizzazione dell'intervento suddetto.

Nella progettazione ci si è avvalsi dei molti studi sul litorale pisano noti nella letteratura tecnica, alcuni dei quali effettuati dagli scriventi (Noli et al., 1984; Aminti 1989; Bartolini et al., 1989). La scelta dell'ampiezza del tratto di litorale da difendere è stata fatta in base all'entità delle risorse finanziarie disponibili, immediatamente per il progetto esecutivo, ed a lungo termine per il progetto generale.

In tale ottica si è stabilito di non intervenire lungo il tratto della lunghezza di 2,4 km immediatamente a sud della foce dell'Arno e prospiciente all'abitato di Marina di Pisa, sia perché esso risulta già protetto da scogliere radenti e da scogliere foranee, sia perché la sua linea di riva si trova ben più lontana dalla posizione di equilibrio naturale, proprio per la presenza delle suddette opere, per cui un suo avanzamento avrebbe comportato costi assai più elevati, sia in termini di opere da realizzare che di costi di manutenzione.

A tale tratto di litorale fa seguito, verso sud, un altro tratto lungo circa 1,5 km in cui sono state realizzate, per lo più dai proprietari degli stabilimenti balneari, alcune scogliere parallele, a volte associate a pennelli; queste opere, eseguite senza alcun piano preordinato, hanno in qualche modo combattuto il fenomeno erosivo, spostandolo però sottoflutto, cioè verso sud.

Nel successivo tratto di litorale della lunghezza di circa 1.500 m, la linea di battigia, dopo un incessante avanzamento dal 1851 al 1939, ha subito un arretramento medio di 70-80 m e, anzi, il fenomeno erosivo si è spinto in effetti ancora più a sud, fin oltre il Largo Belvedere di Tirrenia, se si fa riferimento alla consistenza della spiaggia sommersa.

Nel progetto generale si è perciò previsto di intervenire in un tratto di litorale della lunghezza di 2.600 m, che si estende dalla fine dell'abitato di Marina di Pisa fin quasi al centro di Tirrenia, per contenere il fenomeno erosivo già in atto ed impedire che esso possa raggiungere in futuro la gravità con cui si è manifestato a nord, provocando la distruzione della macchia mediterranea, recando ingenti danni alle attrezzature turistiche e balneari ed alle infrastrutture e costruzioni.

### **Il progetto di difesa del litorale**

La scelta di intervenire con moderne opere di difesa è stata condizionata dal concetto informatore che il deficit attuale di bilancio sedimentario costiero rende indispensabile la realizzazione di un elemento dissipativo che abbatta, lato mare, l'energia del moto ondoso incidente e che protegga, lato terra, il versamento di sedimenti, eseguito per ricostruire la spiaggia emersa e quella sommersa (Noli, 1988).

Come è noto, negli ultimi anni nella nostra nazione sono state privilegiate due soluzioni contrapposte per ottenere il fine illustrato; la prima comprende il ripascimento artificiale protetto mediante una scogliera (barra) sommersa (a quote comprese fra -1,50 e -2,00 m s.m.) e pennelli trasversali sommersi in gran parte del loro sviluppo e posti ad un notevole interesse; la seconda consiste in ripascimenti protetti con scogliere di elevata larghezza a piccola sommergenza (mai superiore a 0,50 m rispetto al livello medio marino). Spesso la prima soluzione è stata paragonata ad un «irrigidimento» delle condizioni tipiche di una spiaggia mediterranea in equilibrio (in questo senso talvolta si è fatto a meno anche dei pennelli trasversali), la seconda ad una barriera artificiale simile a quella delle barriere coralline, che difendono le spiagge dei mari tropicali.

Nel caso del litorale pisano si è prescelta la prima soluzione, perché meglio si inserisce nel contesto naturale. L'abbattimento dell'energia del moto ondoso è certamente inferiore a quello delle barriere quasi emergenti, ma nello stesso tempo sono minori i pericoli per la balneazione e migliore risulta il ricambio acqueo delle zone marine delimitate.

E' comunque da richiamare che la presenza della barra sommersa longitudinale ha non solo lo scopo di costituire un «piede» per il materiale di ripascimento, riducendo le perdite trasversali, ma anche quello di attenuare drasticamente il trasporto longitudinale, limitando la messa in sospensione delle sabbie nella zona di più intensa turbolenza corrispondente alla fascia di frangimento.

La scogliera sommersa, costituita da tre strati di massi, è prevista ad una distanza media di 150 m dall'attuale linea di riva, in un fondale variabile da 2,80 a 4,50 m. La berma ha una lunghezza di 13,50 m ed una sommergenza di 1,50 m; il paramento interno ha una pendenza di 1/3 e quello esterno, dotato di una risberma, di 1/4. I pennelli sono previsti ad un interesse medio di 340 m e servono a limitare gli spostamenti longitudinali dei sedimenti che verranno versati.

Si è previsto di prelevare la sabbia necessaria per il ripascimento dal tronco terminale del fiume Arno, che da alcuni anni è soggetto ad intensi fenomeni di deposito e andrebbe perciò comunque dra-

gato, per rendere sicura la navigazione. Ciò consente di ridurre fortemente il costo dei versamenti di sedimenti, che in genere risulta assai elevato. La sabbia dell'Arno, inoltre, è di pezzatura ottimale, essendo di granulometria un po' più grossolana di quella presente nella spiaggia sommersa da ripascere.

Il ripascimento artificiale a tergo della scogliera risulta mediamente di 115 m<sup>3</sup> per m di litorale e permette di ridurre la pendenza media della spiaggia sommersa dal valore medio attuale del 2% al 1,2%, con un avanzamento della linea di riva di 20-25 m.

La protezione fornita della scogliere e dai pennelli, la minor pendenza dei fondali rispetto a quella attuale e la granulometria più grossa della sabbia da versare rispetto a quella attualmente presente sul posto, conferiranno al ripascimento artificiale elevate garanzie di stabilità.

### Studio su modello numerico

Le scelte progettuali eseguite sono state sempre verificate attraverso l'impiego di un idoneo modello matematico, che ha permesso di confrontare la futura evoluzione del litorale, ed in particolare della linea di battigia, in assenza ed in presenza dell'intervento di difesa.

Il modello ricade nella categoria dei modelli ad una linea, che secondo numerosi Autori (Hanson e Kraus, 1987) sono gli unici utilizzabili ai fini progettuali, pur tenendo conto delle notevoli semplificazioni che vengono introdotte nelle formulazioni analitiche poste a base dello sviluppo numerico. Il modello, denominato Aries, è stato implementato dalle Società Enel-Modimar ed è stato progressivamente perfezionato, introducendovi fra l'altro la possibilità di simulare, oltre ai pennelli trasversali ed alle opere di difesa longitudinali, aderenti o al largo, anche le opere longitudinali sommerse, utilizzando a tal fine le più recenti formulazioni di Van Der Meer (1993).

La fase più delicata di impiego del modello, che richiede una conoscenza approfondita dei limiti del modello stesso e della fisica dei fenomeni simulati, è quella di «calibrazione» (o taratura), cioè di riproduzione dell'evoluzione passata. In tale fase entra in gioco particolarmente la conoscenza del «clima» d'onda, fattore determinante sull'evoluzione della linea di battigia e generalmente noto con scarsa precisione. Una particolare attenzione è stata dedicata all'argomento, considerando tutti i precedenti studi noti, oggetto di pubblicazione, i quali hanno sempre utilizzato metodi di ricostruzione del moto ondoso a partire dai dati di vento (Noli et al., 1984). I risultati ottenuti sono stati impiegati dagli Autori degli studi indicati, per studiare l'equilibrio del litorale sia a nord che a sud della foce dell'Arno, ricevendo così una indiretta validazione. In questo particolare progetto si sono anche considerati, a titolo di controllo e di verifica, i dati misurati direttamente nella stazione ondometrica di La Spezia, che fa parte della rete ondometrica nazionale (R.O.N.). A conclusione dello studio si è infine deciso di adottare anche in questo caso il «clima» utilizzato da Noli e Benassai (1984) per la valutazione degli effetti indotti sulla spiaggia di Tirrenia da un ampliamento ipotizzato per il porto di Livorno.

Un altro aspetto studiato con accuratezza è stato quello delle portate solide del Fiume Arno, nel loro andamento temporale, caratterizzato da una progressiva riduzione negli ultimi anni, e nella granulometria del loro trasporto solido.

Relativamente alla «taratura» del modello, si è voluto indagare preliminarmente sulla capacità di riprodurre il rilevante avanzamento della linea di battigia verificatosi fra gli anni 1881 e 1911, ricavando per tentativi il valore di portata solida (300.000 m<sup>3</sup>/anno) che ha alimentato la spiaggia nel periodo in questione.

Per ottimizzare la sovrapposizione fra valori calcolati e misurati si è dovuto intervenire con una lieve modifica della risultante energetica del moto ondoso incidente rispetto al valore ottenuto dai dati ricostruiti. Si è poi assunto il clima così modificato anche per la simulazione della spiaggia attuale, ottenendo risultati che mostrano la validità dell'ipotesi di un quasi annullamento degli apporti solidi da parte dell'Arno. Viceversa il regime del moto ondoso non sembra abbia subito significativi mutamenti nell'arco di tempo di oltre un secolo che va dal 1881 al giorno d'oggi.

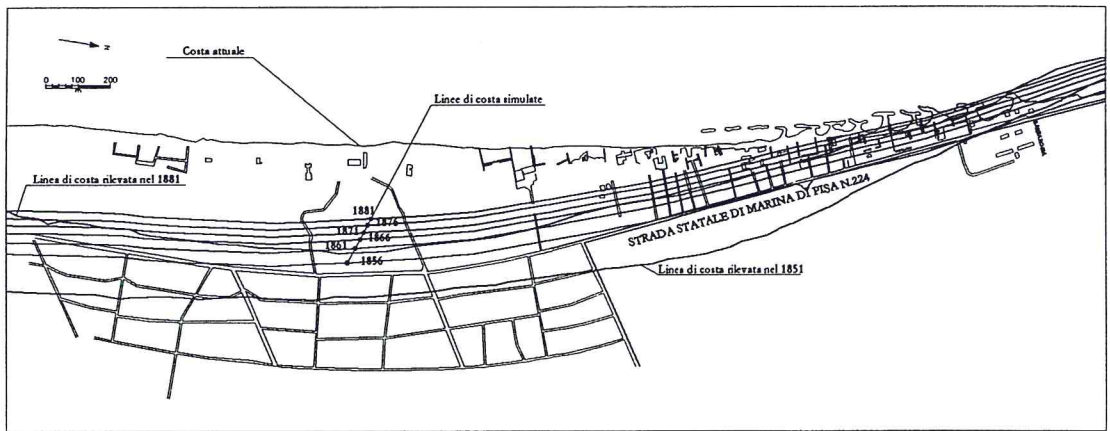


Figura 1 - Fase di taratura: simulazione della costa dal rilievo 1851 sino al 1881.

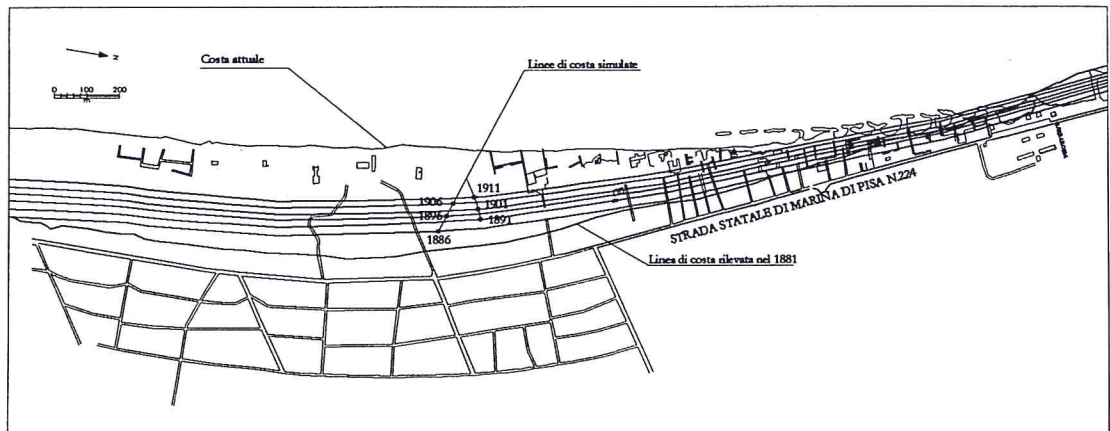


Figura 2 - Fase di taratura : simulazione della costa dal rilievo 1881 sino al 1911.

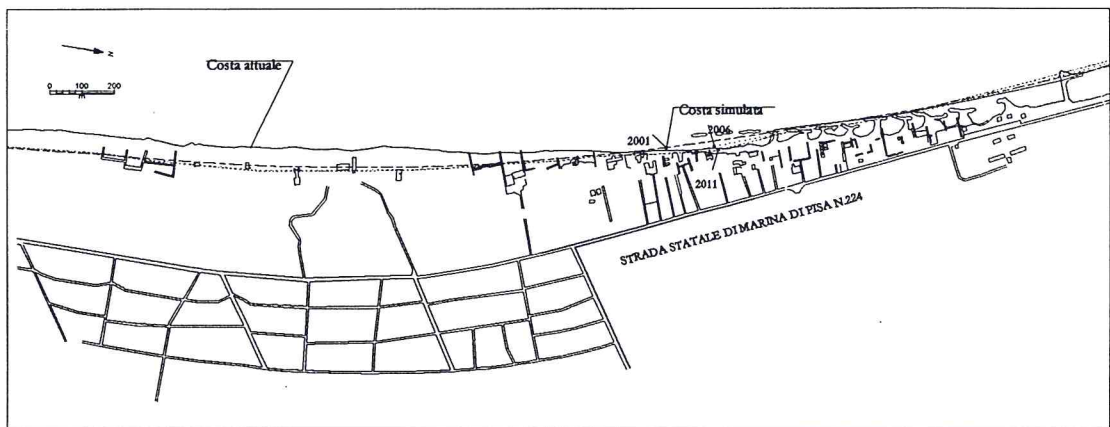


Figura 3 - Fase di verifica : simulazione della linea di battigia dalla situazione attuale ( 1996) al 2011 in assenza di opere.

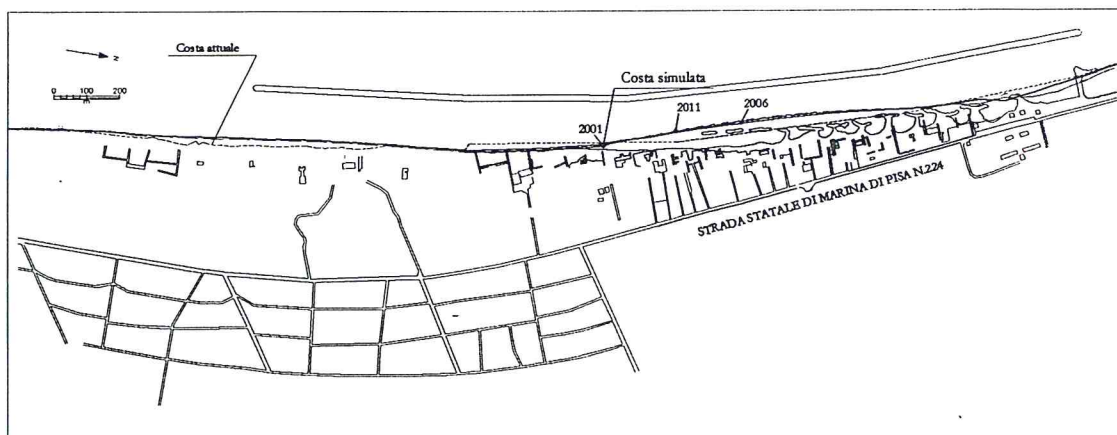


Figura 4 - Fase di verifica : simulazione della linea di battigia dalla situazione attuale ( 1996) al 2011 in presenza della sola barriera sommersa.

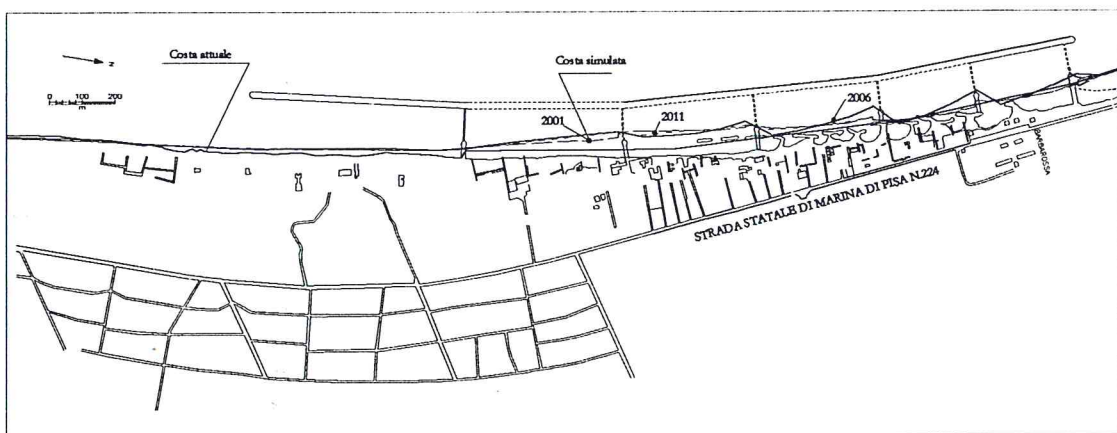


Figura 5 - Fase di verifica : simulazione della linea di battigia dalla situazione attuale ( 1996) al 2011 in presenza della barriera sommersa e di sei pennelli trasversali.

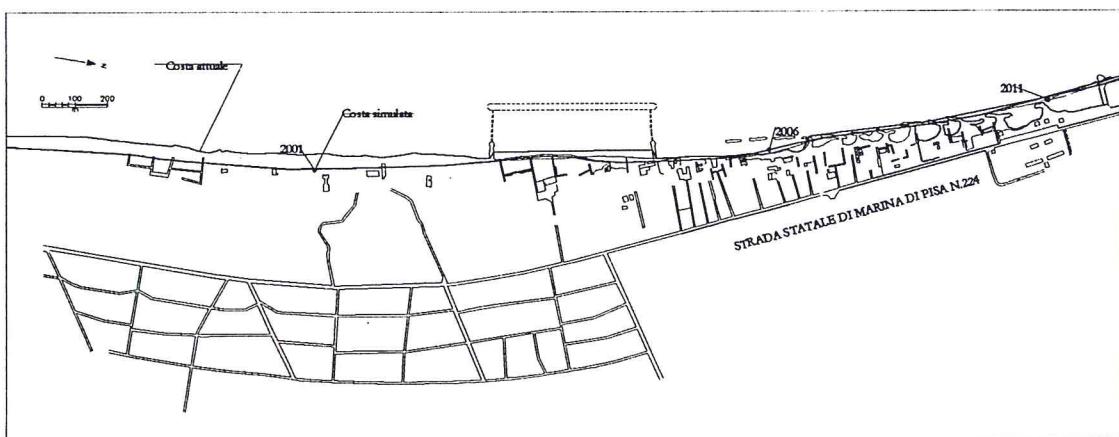


Figura 6 - Fase di verifica : simulazione della linea di battigia dalla situazione attuale ( 1996) al 2011 in presenza del solo intervento di primo stralcio.

Terminata la fase di taratura (Figg. 1 e 2) si è proceduto, con il modello ad una linea, alla fase di previsione del futuro andamento della linea di battigia confrontando la soluzione senza opere (Fig. 3) con quella comprendente la sola barra sommersa ed infine con quella comprendente sia la barra sommersa (Fig. 4) che i pennelli trasversali di contenimento, previsti in numero di sei (Fig. 5).

## Conclusioni

I risultati principali delle elaborazioni mostrano l'indubbia utilità degli interventi previsti, con riduzione dell'erosione nella zona di Tirrenia «a valle» degli interventi (per migrazione di parte dei sedimenti versati) e graduale ripascimento procedendo verso Marina di Pisa. La presenza dei pennelli rende l'avanzamento della linea di battigia più uniforme lungo il litorale rispetto all'assenza dei pennelli stessi. Non sono rappresentate alcune simulazioni eseguite con diverso interasse dei pennelli che hanno consentito di ottimizzare la loro posizione definitiva, che è stata prescelta anche in vista della preesistenza di ubicazioni preferenziali (confini di stabilimenti balneari, pennelli residui, etc.). Il progetto stralcio esecutivo prevede la protezione di un primo tratto di litorale lungo 500 m, mediante la scogliera sommersa e due pennelli alle estremità. Anche il comportamento di tale intervento parziale è stato soddisfacentemente verificato con i modelli matematici sopra citati (Fig. 6).

## Bibliografia

- AA.VV. (1994) - *L'evoluzione e la dinamica del litorale prospiciente i bacini dell'Arno e del Serchio ed i problemi di erosione della costa*. Autorità di Bacino del Fiume Arno. pp. 116.
- Aiello E., Bartolini C., Caputo, D'Alessandro L., Fanucci F., Fierro G., Gnaccolini M., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Piccazzo M. e Pranzini E. (1975) - *Il trasporto litoraneo lungo la costa toscana fra la foce del Fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina*. Boll. Soc. Geol. It., 94, 1519-1571.
- Aminti P. (1989) - *Raccolta ed analisi dei dati relativi ai venti ed al moto ondoso*. In: "Coste Toscane". Regione Toscana. pp. 11-34.
- Bartolini C., Caputo C., Cavazza S., Ceffa L., Celestre P., Cortemiglia G.C., Fanucci F., Fierro G., Gandolfi G., Gnaccolini M., Imperiale G., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Marone V., Mordenti A., Montano F., Nardi M., Paganelli L., Paoletti A., Piacentino G.B., Piccazzo M., Pranzini E. e Versino L. (1976) - *Area campione Alto Tirreno. Ricerche sul regime e la conservazione dei litorali. Rapporto 1974*. La Ricerca scientifica, 92, 61-126.
- Bartolini C., Cipriani L. E. e Pranzini E. (1989) - *Caratteristiche geomorfologiche ed evoluzione della linea di riva del litorale toscano: documenti e criteri di lettura*. In: "Coste Toscane". Regione Toscana. pp. 35-56.
- Gandolfi C. e L. Paganelli - *Il litorale toscano fra Piombino e la foce dell'Ombro - Composizione, provenienza e dispersione delle sabbie*. Boll. Soc. Geol. It. 94: 1811-1932.
- Hanson H. e Kraus N.C. (1989) - *GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change*. Cerc Report: 89-19.
- Milano V. (1986) - *Modello dell'evoluzione di un tratto di litorale costruito sulla base di dati storici e sperimentali*. Giornale del Genio Civile, Fasc.4-5-6.
- Noli A. (1988) - *Difendere la spiaggia rispettando l'ambiente*. Rivista VIA, n.8.
- Noli A., Brampton A. e Franco L. (1984) - *Mathematical model of shoreline north of River Arno (Pisa)*. Idrotecnica, n.1.
- Noli A., Galante F. e Silva P. (1993) - *Il progetto di ripascimento dei litorali veneziani: indagini, studi modellistici e breve descrizione delle opere previste*. Giornate italiane di Ingegneria Costiera, Genova. Vol. D pp. 74-89.
- Noli A. e Benassai E. (1984) - *A study of the effects of a proposed extension to the Leghorn on the adjacent northern coastline*. Int. Symp. «Maritime Structures in the Mediterranean Sea», Atene. pp. 4.15-4.28.
- Van Der Meer (1993) - *Conceptual design of rubble mound breakwater*. Delf Hydraulics, Publ. n. 483.