

## La componente eustatica nell'erosione del delta del Fiume Volturno: previsione per l'anno 2050

Pierluigi Aminti <sup>1</sup>, Enzo Pranzini <sup>2</sup> e Lorenzo Rossi <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Firenze,  
Via S. Marta 1, 50126 Firenze. aminti@dicea.unifi.it

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze,  
Via Jacopo Nardi 2, 50132 Firenze. epranzini@cesit1.unifi.it

<sup>3</sup> Ryoodo snc, Via Ugo Corsi 12, Firenze. lrossi@geo-logic.it

### Riassunto

Dopo un'analisi critica delle attuali conoscenze sui processi di erosione dei litorali innescati dall'innalzamento del livello del mare, viene presentato un nuovo modello di evoluzione del profilo di spiaggia basato sulla Regola di Bruun, per il quale è stato sviluppato un programma di calcolo automatico.

Il modello è stato quindi applicato al delta del Fiume Volturno, effettuando una previsione dell'arretramento della linea di riva conseguente all'innalzamento del livello del mare previsto per l'anno 2050. Nell'ipotesi di un innalzamento di 15 cm, si avranno arretramenti della linea di riva compresi fra 9.2 e 20.2 metri nei vari tratti di costa analizzati, mentre un innalzamento di 28 cm comporterebbe arretramenti compresi fra 17.5 e 38.0 metri.

In considerazione del fatto che un innalzamento del livello marino pari 30 cm è proprio quello calcolato per gli ultimi 165 anni, si ha una stima di quanto la componente eustatica ha inciso sul recente bilancio sedimentario del delta del Volturno, sia nella fase finale della progradazione che in quella attuale di erosione.

**Parole chiave:** spiagge, erosione, profilo di spiaggia, Regola di Bruun, profondità di chiusura, innalzamento del livello del mare, delta, Volturno, Campania.

### Abstract

*A review of the present knowledge on the processes induced by sea level rise (S.L.R.) on beaches is presented here, together with a new model of beach profile evolution based on the Bruun Rule; an automatic computing procedure has been developed for this model.*

*This new model has been applied to the River Volturno delta, by computing the shoreline retreat induced by a sea level rise as forecasted for the year 2050 (+15 cm): it has been calculated that by that year a beach erosion of 9.2 up to 20.2 m –depending on the different offshore profiles– will be recorded. If a S.L.R. of 28 cm is considered (which is estimated to have a 10% probability to occur) shoreline displacement will be between 17.5 and 38.0 m.*

*Providing that a value of 30 cm for S.L.R. since year 1865 has been proposed, our results allow an evaluation of the eustatic component in the recent sedimentary budget of the River Volturno delta, both in the final accretional stage and in the more recent erosional one.*

**Key-words:** beaches, beach erosion, beach profile, Bruun's Rule, depth of closure, sea level rise, delta, Volturno, Campania.

## Premessa

L'apparato deltizio del Fiume Volturno (Campania) si è formato, come tutti i delta del versante tirrenico, negli ultimi 2500 anni (Marinelli, 1926) a seguito dell'incremento del trasporto solido dei fiumi, conseguente prevalentemente alle variazioni di uso del suolo intervenute in questo periodo (Pranzini, 1994). La fase di costruzione è proseguita fino all'inizio del 1900 (Cocco et al., 1992), quando è iniziata quella inversione di tendenza che ha caratterizzato tutti i delta italiani, originata da un cambiamento nell'uso del suolo e da interventi umani in alveo (Pranzini, 1995). Rispetto ad altri delta tirrenici (Arno, Ombrone e Tevere) l'inizio della fase erosiva risulta leggermente posticipata, probabilmente a causa del ritardo con il quale si sono affermate nell'Italia meridionale le cause che hanno innescato l'erosione dei litorali in prossimità delle foci fluviali, quali il dragaggio di inerti in alveo e la costruzione di invasi artificiali. Seguendo un modello evolutivo già osservato su altri delta a cuspide (Pranzini, 1989), l'erosione è iniziata all'apice deltizio per estendersi poi progressivamente alle spiagge laterali. Questo modello è stato rispettato fino all'inizio degli anni '70, quando è iniziata la costruzione di varie opere di difesa per stabilizzare la linea di riva (Benassai et al., 1995a,b), opere che hanno avuto spesso l'effetto di amplificare il processo erosivo sulle spiagge poste sottoflutto (Cocco et al., 1994).

Se gli interventi effettuati all'interno del bacino idrografico costituiscono le cause principali dei processi erosivi della costa, si ritiene che rivesta una significativa importanza anche l'innalzamento del livello marino (S.L.R.) che è stato sincrono con i processi erosivi della gran parte delle spiagge mondiali. Questa componente, messa in evidenza da Bruun già nel 1962, assume un ruolo particolarmente importante quando si riduce l'input fluviale e sulle spiagge a debole pendenza (Pranzini e Rossi, 1995), quali sono appunto quelle che caratterizzano i delta fluviali, anche se in queste zone, per il momento, la variazione relativa del livello del mare risente più dei fenomeni di subsidenza che non dell'innalzamento globale (Bartolini et al., 1989).

In questo lavoro si è voluto valutare l'effetto del solo innalzamento del livello marino sull'evoluzione futura della linea di riva nel delta del Volturno, ponendo come anno di riferimento il 2050 ed accettando un valore di S.L.R. pari a 15 cm (Titus e Narayanan, 1996). Si è comunque voluto analizzare anche uno scenario più pessimistico, con un valore di 28 cm, a cui lo stesso modello di previsione attribuisce una probabilità del 10% di verificarsi.

Tenendo conto che un valore prossimo a quello assunto da quest'ultimo scenario è proprio quello registrato dalla metà dell'800 ad oggi (30 cm in Antonioli et al., 1999) ed ipotizzando un profilo di spiaggia costante, si può avere una stima di quanto ha inciso questo innalzamento sull'evoluzione passata del delta del Volturno, tenendo conto che sia nella fase di progradazione che in quella di erosione una voce in uscita nel bilancio sedimentario doveva essere costituita da quanto previsto nella Regola di Bruun.

## L'innalzamento del livello del mare come causa dell'erosione dei litorali

L'innalzamento del livello medio del mare, dovuto all'espansione termica degli oceani ed alla fusione dei ghiacci marini e continentali, è un fenomeno universalmente accettato (IPCC, 2001) ma di incerta quantificazione, con la serie storica di dati prodotti dai mareografi messa in discussione dalle misure altimetriche effettuate da satellite (Cabanes et al., 2001). Quest'ultime non coprono però un range temporale tale da consentire il filtraggio di variabilità annuali e decennali e per un'analisi storica del processo i dati mareografici costituiscono ancora un valido riferimento. In base ad essi (Lusetti 1977 e 1982; Pirazzoli, 1993) e a misure indirette (Antonioli et al., 1999) è possibile assumere come valore di S.L.R. per l'ultimo secolo nel Tirreno quello di 15 cm.

Per quanto riguarda la previsione dei futuri livelli del mare, i più recenti modelli climatici hanno ridimensionato le prospettive catastrofiche degli scenari elaborati negli anni '80, che prevedevano innalzamenti del livello del mare compresi in un fra i 65 e i 345 cm per l'anno 2100 (Hoffman et al., 1983; Barth e Titus, 1984), ma hanno anche confermato, con una serie più ampia di dati e

con algoritmi più sofisticati, che l'attuale tasso di innalzamento (circa 1.3 mm/anno) subirà nei prossimi anni un graduale incremento (Mörner, 1994).

Valori oggi ritenuti attendibili indicano un innalzamento di 15 cm per l'anno 2050, e di 34 cm per l'anno 2100, con una probabilità del 10% che i valori siano rispettivamente 28 e 65 cm (Titus e Narayanan, 1996).

Un simile innalzamento non determinerebbe un significativo arretramento della linea di riva se implicasse solo l'aumento della sezione bagnata, dato che la battigia e la spiaggia emersa hanno pendenze notevoli. In realtà è stato dimostrato (Bruun, 1962) che i processi che connessi con l'innalzamento del livello del mare sono assai più rilevanti. In particolare si prevede che la risalita eustatica determini un analogo innalzamento del profilo di spiaggia fino alla profondità di chiusura. Se i materiali necessari a questo innalzamento non vengono forniti dall'input sedimentario, vengono prelevati dalla spiaggia emersa che arretra in modo consistente anche per modesti valori di S.L.R.

Questo modello, noto ormai come Regola di Bruun (Schwartz, 1967), ha subito negli anni alcune revisioni, aggiornamenti e verifiche sul campo ed in laboratorio da parte di numerosi ricercatori (Clarke e Eliot, 1983; Dean, 1987, 1990, 1991; Dean e Maurmeyer, 1983; Dubois 1975, 1976, 1977, 1992; Everts, 1985; Ferreira et al., 1990; Hands, 1980, 1983; Healy, 1991; Pilkey e Davis, 1987; Kriebel e Dean, 1985; Kraus, 1992; Leatherman, 1990; Lofty e Frihy, 1993; Rosen, 1978; Schwartz, 1967; SCOR, 1991; Vellinga, 1982) ad anche da parte dello stesso Bruun (1983 e 1988; Bruun e Schwartz, 1985; Titus, 1986 e 1987), rimanendo però concettualmente ancora valido.

In particolare il modello di Bruun prevede un arretramento della linea di riva  $R$  pari a:

$$R = XS / B + d \quad [\text{Eq. 1}]$$

dove:

- $R$  = arretramento della linea di riva,
- $X$  = la lunghezza del profilo attivo,
- $S$  = innalzamento del livello del mare,
- $B$  = altezza media della spiaggia emersa nella zona erosa,
- $d$  = la profondità limite del profilo attivo.

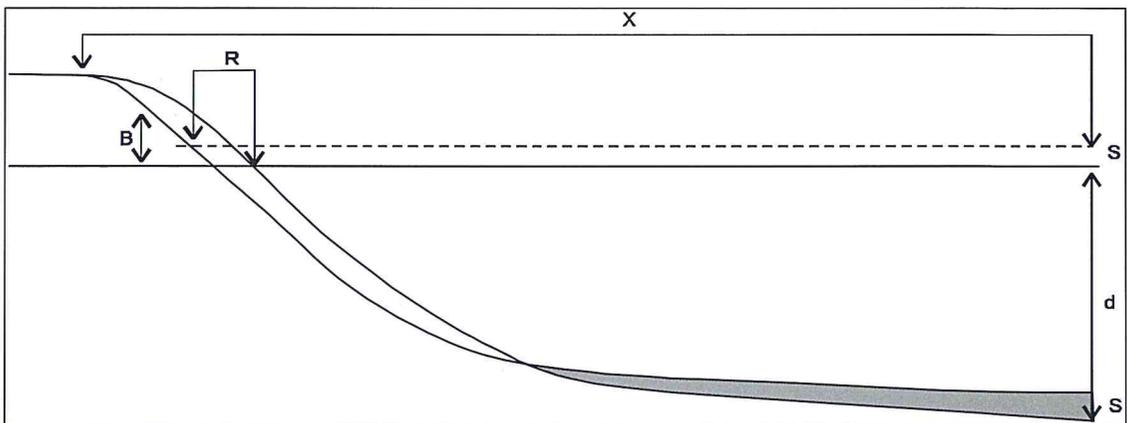


Figura 1 - Evoluzione di un profilo di spiaggia conseguente all'innalzamento del livello marino secondo Bruun (1962).

Vi sono almeno due componenti fondamentali del processo di adeguamento del profilo all'innalzamento del livello del mare che non vengono prese in considerazione nella Regola di Bruun: una è la formazione di una "rampa" di sedimenti che si viene a creare nella parte finale del profilo, anche grazie alla traslazione verso riva del punto di chiusura (Krauss, 1992); l'altra riguarda

l'erosione della duna nella sua parte basale ed il suo conseguente collasso, come venne già messo in evidenza dallo stesso Bruun (1962) e successivamente discusso da Dolotov (1992).

Vi è inoltre il problema della esatta determinazione del volume di sedimenti disponibili nella parte di profilo interna alla cresta della prima duna, che non può essere quella definita dalla equazione [1] che la stima per eccesso della quantità  $i$  rappresentata in grigio in Figura 2.

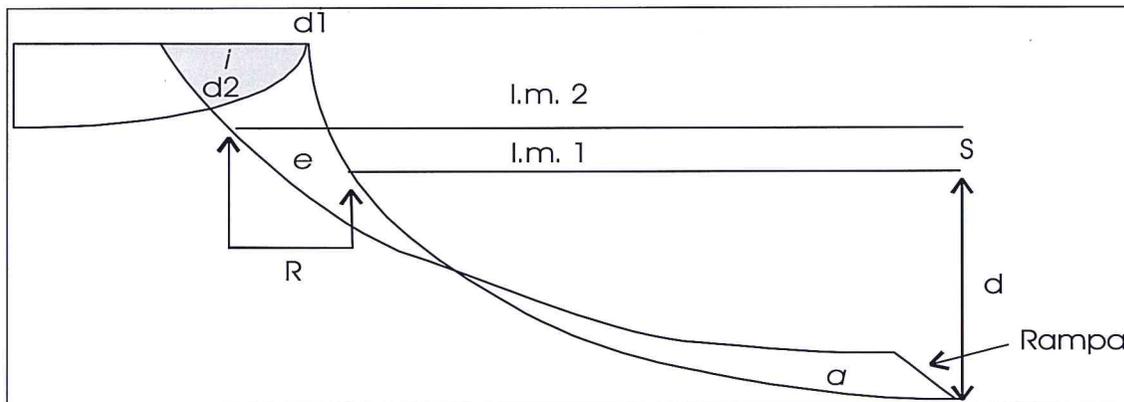


Figura 2 - Rappresentazione geometrica del modello proposto.

Considerando che tale area non può fornire sedimenti si ottengono stime dell'arretramento della linea di riva superiori a quelle previste dalla Regola di Bruun, soprattutto per previsioni a lungo termine che portano a considerare ampi tratti del profilo emerso. Infatti, se l'area di deposito deve risultare uguale a quella erosa, e in quest'ultima non compare quella di retroduna, il profilo arretrerà ulteriormente alla "ricerca" di ulteriore materiale per il bilanciamento.

La Figura 2 illustra una schematizzazione più realistica rispetto al modello di Bruun, tenendo conto dell'area effettiva erosa sulla duna la cui sommità passa da  $d_1$  a  $d_2$ .

Per la stima dell'arretramento del profilo in caso di geometria complessa della spiaggia emersa è stato sviluppato un apposito programma di calcolo.

### La profondità di chiusura

Un parametro che nel modello di Bruun assume una importanza fondamentale è l'estensione del profilo attivo ( $X$  in Fig. 1), che di fatto implica la determinazione della profondità di chiusura ( $d$  in Fig. 1) (Hallermeier, 1978), che oggi avviene sulla base dell'analisi dei dati meteorologici relativi a lunghi periodi di tempo (Nicholls et al. 1996, 1998a).

La relazione originaria ha la forma:

$$d_i = 2.28H_s - 68.5 \left( \frac{H_s^2}{gT_s^2} \right) \quad [\text{Eq. 2}]$$

dove:

$H_s$  = altezza d'onda significativa locale (superata per 12 ore l'anno) [m],

$T_s$  = periodo significativo ad essa associato [s],

$g$  = accelerazione di gravità [ $\text{m/s}^2$ ].

Nella forma generalizzata per la stima della profondità di chiusura alla scala di  $t$  anni ( $d_t$ ) deve essere utilizzato il valore di altezza d'onda  $H_{12t}$ , ossia l'altezza d'onda significativa superata per 12 ore in  $t$  anni.

Dalle analisi eseguite su profili rilevati per periodi più lunghi risulta evidente che la profondità di chiusura non è deterministicamente dipendente dalle grandezze  $H_{12}$  e  $T$ , e che la relazione generalizzata a finestre temporali fornisce una stima per eccesso di  $dt$  (Nicholls et al., 1998b). Nei casi in

cui è stato possibile eseguire delle verifiche sperimentali è stato evidenziato che la profondità di chiusura osservata non cresce, all'aumentare della finestra temporale, così rapidamente come indicano i valori calcolati. Da un punto di vista fisico ciò significa che la profondità di chiusura non rappresenta un limite al trasporto dei sedimenti ma solo un limite morfodinamico di breve termine. Hinton e Nicholls (1998) riportano un'analisi su profili della costa olandese sui quali la profondità di chiusura calcolata con i dati di 5 anni (usando  $H_{12.5}$ ) è risultata pari a quella osservata su un periodo di 20 anni.

I dati in letteratura sono ancora troppo limitati e, pur riscontrando un generale accordo sul fatto che la [2] sovrastimi la profondità di chiusura su intervalli di tempo superiori a 1 o 2 anni, non permettono una stima dei possibili errori.

Dalle sperimentazioni eseguite (Nicholls et al., 1998a,b) appare evidente che la relazione [2] è idonea a prevedere la profondità di chiusura a scala di una singola mareggiata e quindi, ad esempio, può fornire una stima attendibile per la mareggiata con tempo di ritorno 50 anni, ma non è idonea a prevedere la profondità di chiusura per un intervallo di tempo di 50 anni.

### Il Programma "SeaLevel"

Il programma, il cui diagramma di flusso è rappresentato in Figura 3, è stato sviluppato in Visual Basic ed è suddiviso in una prima parte di calcolo analitico, in cui vengono elaborati i dati di input per ottenere i valori numerici che descrivono il profilo conseguente all'innalzamento del livello del mare, e una parte finale grafica, che rende possibile la visualizzazione, in scala appropriata, del nuovo profilo di spiaggia.

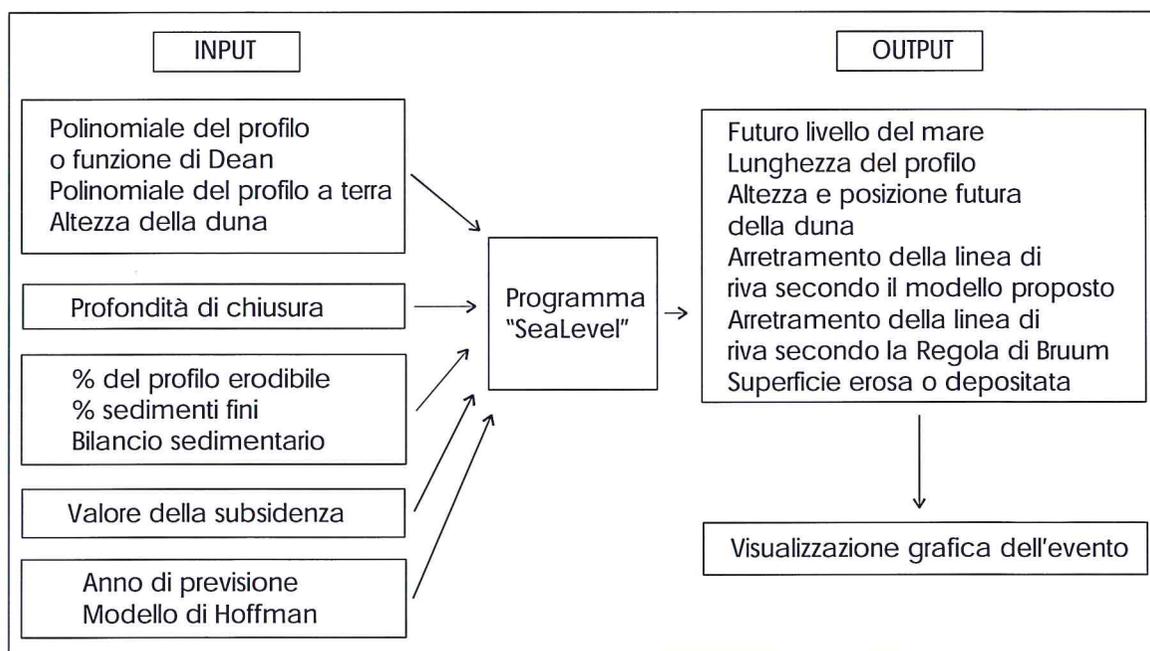


Figura 3 - Diagramma di flusso del programma "SeaLevel".

Il programma richiede, come dato di input, la descrizione del profilo per coordinate, sia nella sua parte sommersa che in quella emersa e di retroduna. Per la funzione interpolante del profilo è possibile usare sia la formula polinomiale, del grado scelto, sia la funzione di Dean (Bruun, 1954 in Bruun, 1962; Bruun, 1955, in Bruun, 1988), quando essa risulti più idonea della precedente a descrivere il profilo sommerso sulla base di un test sullo scostamento dal profilo reale. Vi è inoltre la possibilità di inserire informazioni sui tratti di sezione eventualmente costituiti da sedimenti fini (es. a-

ree di depositi limoso-argillosi in zone retrodunali) e/o da substrato roccioso, che non possono produrre materiale utile all'innalzamento dei fondali. E' inoltre possibile immettere, se conosciuto, il valore del tasso di subsidenza della zona.

Il programma SeaLevel fornisce quindi, in modo automatico, tutti i parametri richiesti per la costruzione degli scenari futuri.

### Applicazione del programma

#### Il profilo di spiaggia

Il profilo di una spiaggia può essere schematizzato con la nota equazione di Dean (Bruun, 1955, in Bruun, 1988; Bruun, 1954; in Bruun, 1962):

$$h(y) = AX^m \quad [3]$$

dove:

$h(y)$  = profondità dell'acqua ad una determinata distanza da costa (definita in seguito  $Y$ ),

$X$  = lunghezza del profilo fino a tale distanza,

$A$  = parametro di scala definito in base alla granulometria dei sedimenti,

$m$  = costante pari a  $2/3$ .

Per l'area di studio sono disponibili solo 8 profili (Fig. 4) di lunghezza tale da raggiungere la profondità di chiusura (vedi paragrafo successivo). Essi sono stati rilevati nel 1995 per conto dell'Autorità di Bacino del Fiume Volturno e messi a disposizione di questo Progetto. La loro estensione verso terra, oltre la spiaggia emersa, è stata effettuata sulla base della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5000 e sulle tavolette I.G.M. al 25.000.

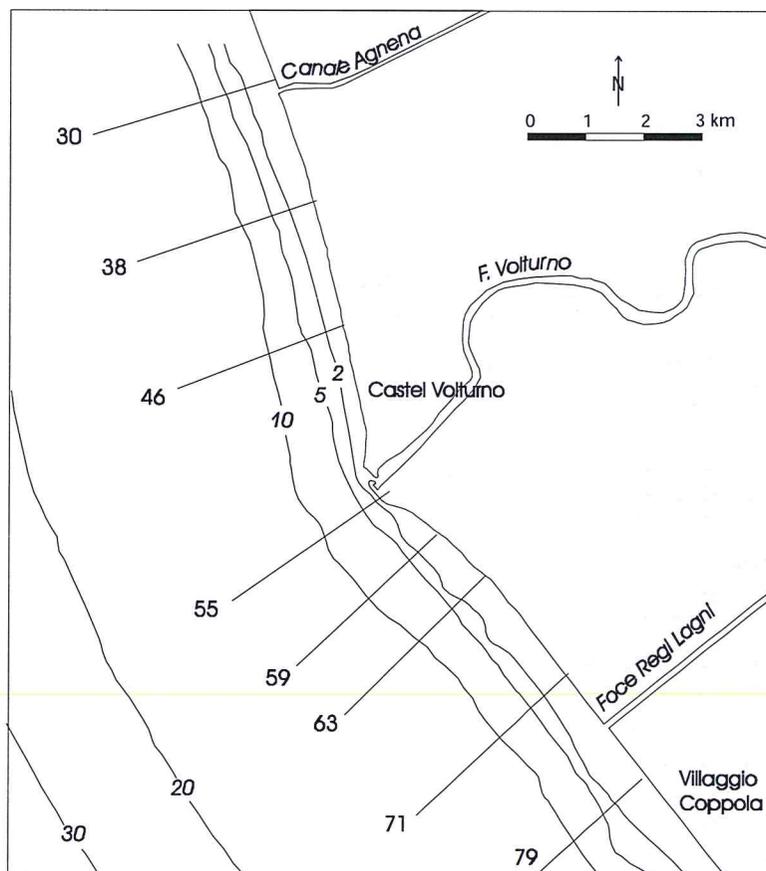


Figura 4 – Posizione dei profili batimetrici utilizzati.

I profili così ottenuti non sono stati interpolati con l'equazione di Dean che, in un caso precedente di applicazione di questo modello alla costa toscana (Pranzini e Rossi, 1995), ha dimostrato di non essere idonea ad approssimare questi profili di spiaggia. Su 36 profili era stato infatti ottenuto un valore medio di  $m$  pari a 0.813, con un range compreso fra 0.37 e 1.52. In particolare si è messo in evidenza che lo scostamento fra i profili reali e quelli di Dean aumenta all'aumentare della profondità. Come nel caso delle costa toscana, anche qui è stato necessario utilizzare una curva polinomiale per la quale si è ottenuta una rappresentazione più accurata:

$$y = d + Ax + Bx^2 + Cx^3 + \dots Nx^n \quad [\text{Eq. 4}]$$

dove  $d$  è l'altezza della duna,  $A, B, \dots, N$  sono variabili che risultano dall'interpolazione effettuata con un software commerciale (Surfer, Rel 6.0). Il grado del polinomio interpolante è stato definito in funzione delle irregolarità del profilo; il massimo valore utilizzato è l'ottavo.

In Figura 5, relativa al profilo N° 59 posto a sud della foce del foce del Volturno, si nota come una polinomiale interpoli più fedelmente il profilo reale rispetto a quanto non faccia la funzione di Dean, specialmente in prossimità della profondità di chiusura.

Un altro aspetto importante è che essa mantiene comunque caratteristiche di generalità tali che consentono di considerare gli elementi morfologici minori, quale ad esempio la barra sommersa, come oscillazioni attorno ad una forma media.

Un curva polinomiale, seppur di grado più basso, è stata usata nell'interpolazione del profilo che va dal limite superiore della spiaggia emersa, che come già detto corrisponde in genere alla sommità della duna, fino ad alcune centinaia di metri verso l'interno (Fig. 6).

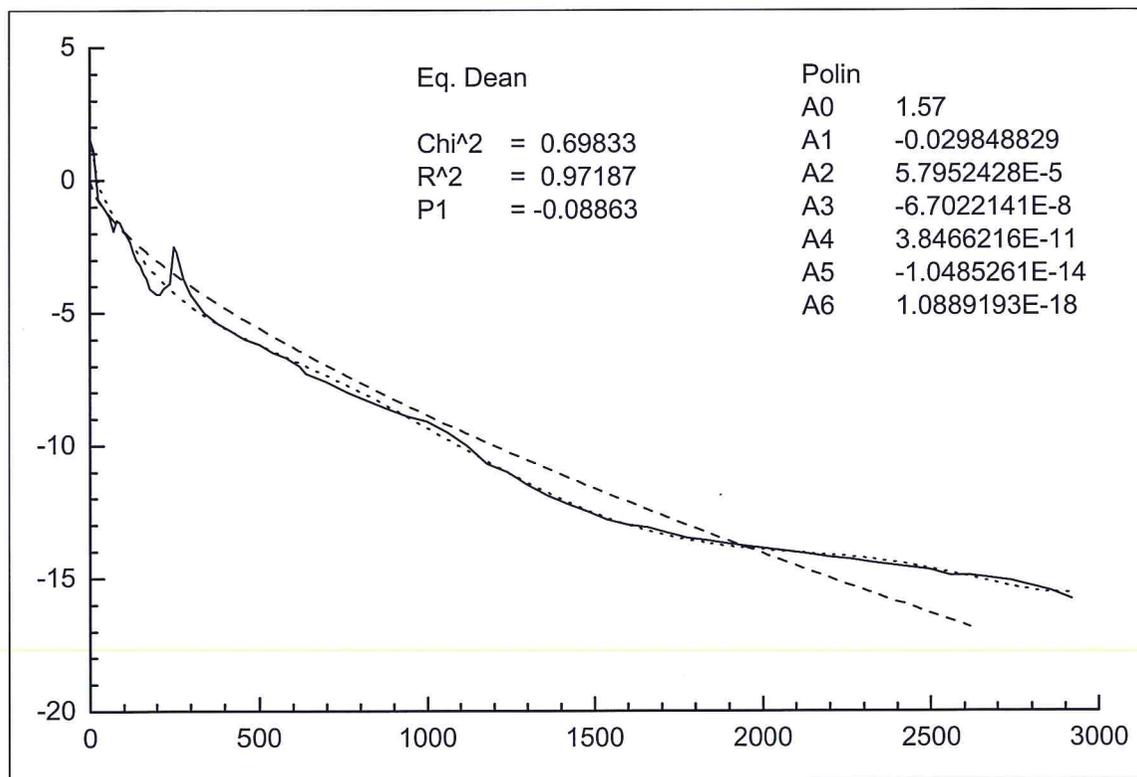


Figura 5 - Profilo n° 59, parte a mare. Tratto continuo = profilo misurato; Tratti lunghi = equazione di Dean; Tratti brevi = polinomiale di 6° grado i cui coefficienti sono riportati sul grafico.

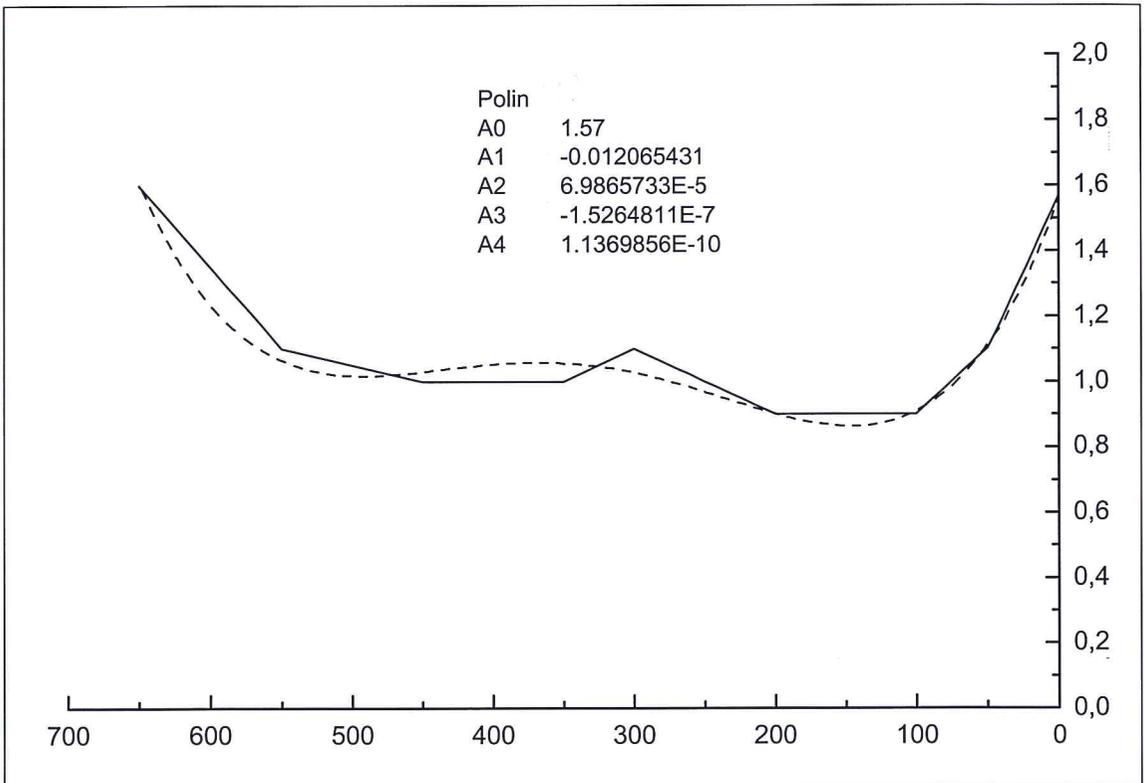


Figura 6 - Profilo n. 59, parte a terra dalla cresta della prima duna (a destra nel grafico). Tratto continuo = profilo misurato; Tratti lunghi = polinomiale di 4° grado i cui coefficienti sono riportati sul grafico.

### *Calcolo della profondità di chiusura per l'area di studio*

Per la stima della profondità di chiusura è necessaria la conoscenza del valore di  $H_s$  da inserire come input nell'equazione [2]. Per questa stima sono stati utilizzati i dati dell'ondametro di Ponza della Rete Ondametrica Nazionale. Lo strumento, certamente in grado di rappresentare le condizioni meteomarine della zona di studio, è attivo dal 1989 e pertanto sono disponibili 11 anni di registrazioni.

In letteratura non esiste un criterio consolidato per la scelta del valore di altezza d'onda da utilizzare per scopi previsionali, pertanto sono stati presi in esame due diversi metodi tenendo conto dei risultati di indagini sperimentali (Hinton e Nicholls, 1998)

La prima stima è stata eseguita considerando il valore di altezza d'onda superata 12 ore per anno come una variabile aleatoria e stimando il valore atteso per un tempo di ritorno di 50 anni.

Un secondo valore è stato determinato come altezza d'onda superata 12 ore nel periodo di disponibilità dei dati.

Sulla base dei dati triorari registrati all'ondametro di Ponza nel periodo 1989 - 2001 sono stati ricavati i valori di altezza d'onda significativa superati per 4 volte per ciascun anno ed è stata determinata la curva interpolante col metodo di Gumbel (Fig. 7). E' stata successivamente determinata la relazione fra altezza d'onda  $H_{12}$  ed il tempo di ritorno (Fig. 8). Si ricava pertanto che il valore di  $H_{12}$  associato ad un tempo di ritorno di 50 anni risulta di 6.85 m.

Per quanto riguarda il secondo valore, in questo caso esso risulta legato ad un solo evento relativo alla mareggiata eccezionale del dicembre 2000 (Arseni et al., 2000), il valore triorario massimo registrato risulta di 7.4 m ed il valore superato per 12 ore risulta di 6.8 m.

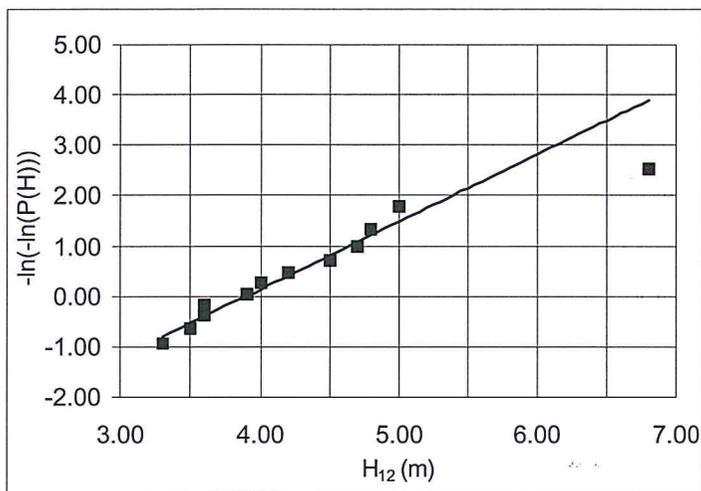


Figure 7 - Determinazione del valore di  $H_{12}$  mediante il metodo di Gumbel.

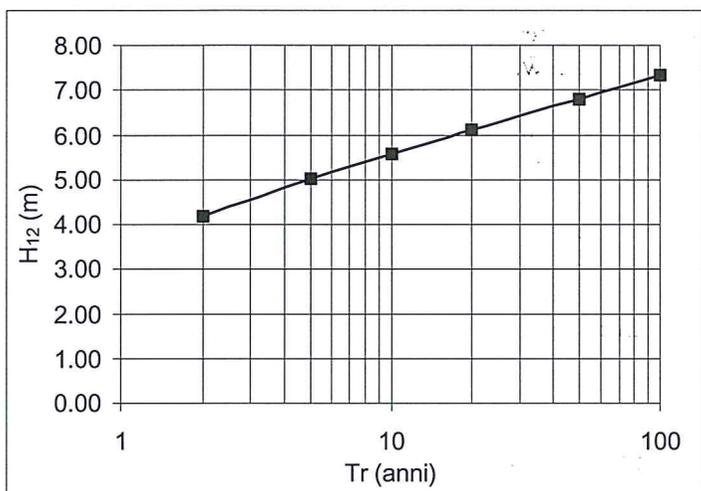


Figura 8 - Relazione fra altezza d'onda e tempo di ritorno.

La scelta di questo valore per la determinazione della profondità di chiusura che deve essere considerata certamente per eccesso su un periodo di 11 anni, può considerarsi ragionevolmente attendibile per un periodo 4-5 volte più lungo, in analogia a quanto osservato da Hinton e Nicholls (1998).

I valori trovati sono, in questo caso, molto simili e pertanto la profondità di chiusura è stata calcolata con un'onda caratterizzata dai valori riportati in Tabella 1.

Tabella 1 - Valori d'ingresso per un tempo di ritorno di 50 anni e corrispondente profondità di chiusura calcolata con la formula di Hallermeier (1978).

Settore	235 ÷ 290°
$H_{12}$	6.8 m
T	11.0 s
Profondità di chiusura	12.8 m

### Analisi dei risultati

Il calcolo dell'arretramento della linea di riva in funzione dell'innalzamento del livello del mare sul delta del Volturno è stato effettuato per l'anno 2050 e per i valori stimati di 15 e 28 cm (Titus e Narayanan, 1996).

I dati riportati in Tabella 2 indicano che con lo scenario più ottimistico (S.L.R. = 15 cm) la linea di riva dovrebbe arretrare sul delta del Volturno per valori compresi fra 9.2 e 20.2 metri, ad un tasso compreso fra 0.18 e 0.40 metri/anno. Valori di arretramento circa doppi si verificherebbero in conseguenza di un innalzamento del livello del mare di 28 cm.

Complessivamente si tratta di valori modesti, ma è opportuno ricordare che questi costituiscono solo una componente, per il momento marginale, del processo erosivo globale.

Confrontando i valori di arretramento con la pendenza media della spiaggia entro la profondità di chiusura per ciascun profilo (Fig. 7), si nota come vi sia una chiara correlazione inversa fra i due parametri.

In presenza di caratteristiche morfologica uniformi dell'entroterra, l'arretramento determinato dal bilancio di volume è condizionato prevalentemente dalla lunghezza del profilo sul quale deve essere deposto lo strato di sedimenti di spessore pari a quello dell'innalzamento del livello del mare. Lo scostamento dei singoli punti dall'andamento generale descritto dalle rette interpolanti dipende quindi dalla maggiore (spostamenti verso il basso) o minore (spostamenti verso l'alto) quota media del profilo emerso e, in misura anche minore, dalla diversa forma del profilo sommerso.

**Tabella 2 - Arretramento della linea di riva (m) previsto per l'anno 2050 in corrispondenza degli otto profili considerati per un innalzamento del livello del mare di 15 e 28 cm.**

A = Arretramento della linea di riva (m),

Hd = Altezza della nuova duna (m),

Ad = Arretramento della cresta della duna (m)

Sd = Superficie di profilo emerso erosa (m<sup>2</sup>).

Pro- filo	Pen- denza	SLR 15 cm				SLR 28 cm			
		A	Hd	Ad	S	A	Hd	Ad	S
N	%								
30	1,32	9.2	3.93	5.1	42.0	18.7	3.82	10.2	83.5
38	1,18	11.5	7.00	2.6	35.5	23.2	2.57	14.2	69.1
46	1,00	13.1	2.47	7.3	49.2	26.5	2.38	15.0	96.2
55	0,75	20.2	1.05	2.4	46.0	40.7	1.01	4.8	90.0
59	0,84	16.4	1.47	8.8	57.0	33.1	1.38	18.0	111.0
63	0,83	16.2	2.00	8.0	55.2	32.8	1.90	16.5	107.0
71	0,99	14.1	3.92	4.6	48.8	28.6	3.83	9.4	96.0
79	0,98	13.7	2.97	4.8	46.5	27.7	2.88	9.8	90.8

Il maggiore arretramento della linea di riva si manifesterebbe quindi sull'apice deltizio (profili n. 55, 59 e 63), dove la pendenza della spiaggia è minore, mentre fra le due ali sarà quella meridionale (profili 71 e 79), con profilo meno ripido, quella più colpita.

In considerazione del fatto che un valore prossimo ai 28 cm può essere preso come rappresentativo dell'innalzamento del livello marino registrato negli ultimi 165 anni nel tratto di costa in esame (S.L.R. = 30 cm per Antonioli et al., 1999), è possibile pensare che valori di arretramento della linea di riva simili a quelli previsti per 50 anni nello scenario pessimistico (arretramento 17.5 ÷ 38.0 m) costituiscano una stima di quanto la componente eustatica ha inciso da allora nel bilancio sedimentario del delta.

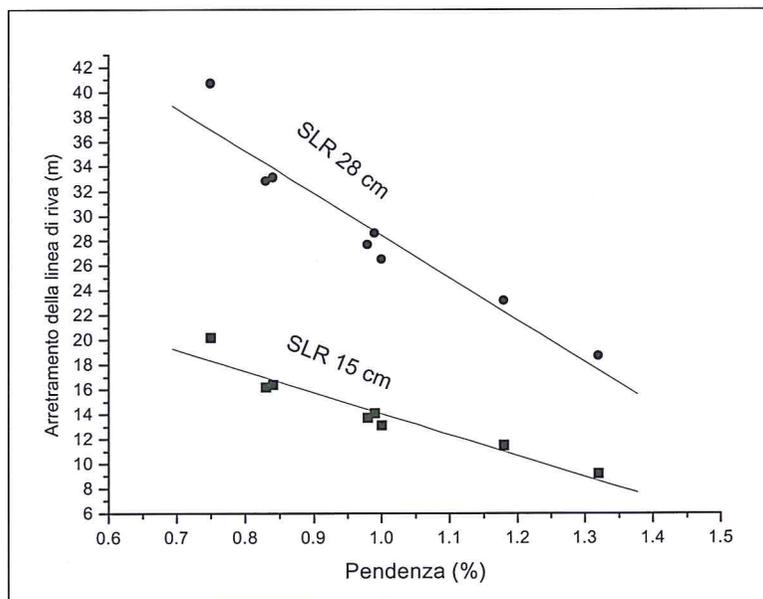


Figura 7 - Correlazione fra pendenza media dei profili fra la battigia e la profondità di chiusura e l'arretramento della linea di riva nei due scenari considerati.

Per quanto riguarda il recente tasso di arretramento, valutato in  $1 \div 6$  m/anno in sponda destra e in  $1 \div 19$  m/anno in sponda sinistra fra il 1954 e il 1982 (Cocco et al. 1984) ed assumendo un tasso di innalzamento del livello marino di 1.5 mm/anno, si può pensare che questo fenomeno costituisca una componente minore del processo erosivo in corso. Nonostante ciò, l'erosione differenziale dei due lobi è ben spiegabile, nell'ambito della Legge di Bruun, con la diversa pendenza delle due spiagge. E' d'altra parte vero che l'erosione, indipendentemente dalle cause che la innescano, determinando l'arretramento della linea di riva ma non quello del punto di chiusura, causa indirettamente una riduzione della pendenza dei profili.

L'analisi della Figura 7 mette comunque in evidenza quanto sensibile sia il sistema alle variazioni del tasso di innalzamento del livello del mare: valori di S.L.R. leggermente superiori a quelli adottati, ma comunque nel *range* degli scenari possibili, porterebbero ad arretramenti della linea di riva assai più consistenti di quelli qui calcolati.

## Conclusioni

La debole pendenza del fondale e la quota relativamente bassa dell'entroterra, unite alle caratteristiche del moto ondoso che investono questo tratto di litorale, rendono il delta del Fiume Volturno estremamente vulnerabile all'innalzamento del livello del mare.

Analoghi effetti sono prodotti anche dalla subsidenza, se essa coinvolge anche la spiaggia sommersa. In una zona di recente deposizione, soggetta per giunta ad ingenti estrazioni di acqua dal sottosuolo per uso agricolo ed umano, è probabile che il tasso di subsidenza sia per lo meno analogo a quello dell'innalzamento del livello del mare. Questa subsidenza, pur essendo certamente centrata nell'entroterra, può estendersi anche ai fondali antistanti ed amplificare i processi indotti dall'innalzamento del livello del mare. Tutto ciò pone il delta del Volturno fra le aree che più probabilmente vedranno nei prossimi anni l'accentuarsi dei processi erosivi.

## Ringraziamenti

Si ringrazia Aldo Cinque ed Umberto Simeoni per l'attenzione prestata nella revisione e per i numerosi e validi suggerimenti dati.

Ricerca svolta nell'ambito del Progetto strategico Ambiente e Territorio - Dinamica fisica delle aree costiere: modificazioni naturali e antropiche. U. O. 17 - Università di Roma "La Sapienza".

## Bibliografia

- Antonoli F., Chemello R., Improra S. e Riggio S. (1999) - *Dendropoma lower intertidal reef formations and their palaeoclimatological significance, NW Sicily*. Marine Geology, 161: 155-170.
- Arseni A., Corsini S., Guiducci F. e Inghilesi R. (2000) - *Analisi della tempesta del 28-29 dicembre 1999 nei mari occidentali italiani*. V Giornate di Ingegneria Costiera, Reggio Calabria. Pp. 153-166.
- Barth M. e Titus J. (1984) - *Greenhouse effect and Sea Level Rise*. V.N. Reinhold Co., New York, 1-56.
- Bartolini C., Palla B. e Pranzini E. (1989) - *Studi di geomorfologia costiera: X - Il ruolo della subsidenza nell'erosione litoranea della pianura del Fiume Cornia*. Boll. Soc. Geol. It., 108: 635-647.
- Benassai E., Calabrese M., Ragone A., Gonella M. e Teatini P. (1995a) - *A numerical study of the coast-line evolution at the Volturno river mouth*. HIDRA 2000, XXVI Congr. Int. Ass. Hydraulic Research, London, Future paths for maritime hydraulics. A.J. Grass Ed., 3: 110-115.
- Benassai G., Mainolfi R. e Sansone E. (1995b) - *Monitoring of the coastal zone at the mouth of river Volturno, Italy*. Proc. Medecoast '95, Tarragona, Spain. Pp. 965-974.
- Bruun P. (1962) - *Sea-level rise as a cause of shore erosion*. J. Waterways and Harbors Division, ASCE, 88: 117-130.
- Bruun P. (1983) - *Review of conditions for uses of the Bruun Rule of erosion*. Coastal Engineering, 7: 77-89.
- Bruun P. (1988) - *The Bruun Rule of Erosion by Sea-Level Rise: A Discussion of Large-Scale Two- and Three-Dimensional Usages*. J. of Coastal Research, 4: 627-648.
- Bruun P. e Schwartz M.L. (1985) - *Analytical predictions of beach profile change in response to a sea level rise*. Z. Geomorph. N.F. Supp. Bd., 57: 33-50.
- Cabanes C., Cazenave A. e Le Provost C. (2001) - *Sea Level Rise During Past 40 Years Determined from Satellite and in Situ Observations*. Science, 294: 840-842.
- Clarke D.J. e Eliot I.G. (1983) - *Mean sea-level and beach-width variation at Scarborough, Western Australia*. Marine Geology, 51: 251-267.
- Cocco E., Crimaco L. e de Magistris M.A. (1992) - *Dinamica ed evoluzione del litorale campano-laziale: 5 - Variazioni della linea di riva dall'epoca romana ad oggi nel tratto compreso tra foce Volturno e Torre S. Limato - Mondragone*. Atti 10° Congr. AIOL, Alassio, Novembre 1992, pp. 543-550.
- Cocco E., de Magistris M.A. e Iacono Y. (1994) - *Modificazioni dell'ambiente costiero in Campania (Litorale Domitio, Golfo di Gaeta) in conseguenza delle opere umane*. Il Quaternario, 7: 409-414.
- Cocco E., de Magistris M.A., Bentivoglio C., Iacono Y. e Serpico M. (1993) - *Processi erosivi, opere di difesa e riequilibrio dei litorali in Campania*. In La difesa dei litorali in Italia. A cura di Aminti P. e Pranzini E. Edizioni delle Autonomie, Roma. Pp. 175-194.
- Cocco E., de Magistris M.A., De Pippo T. e Perna A. (1984) - *Dinamica ed evoluzione del litorale campano-laziale: 3. Il complesso di foce del Fiume Volturno*. Atti 6° Congr. AIOL, Livorno, Aprile 1984, pp. 279-286.
- Corsini S., Guiducci F. e Inghilesi R. (2000) - *Statistical Extreme Wave Analysis of SWAN dataset in the period 1989-1999*. Proc. 10<sup>th</sup> ISOPE 2000 meeting, Seattle.
- Dean R.G. (1987) - *Additional sediment input to the nearshore region*. Shore and Beach, 55: 76-81.
- Dean R.G. (1990) - *Beach response to sea level rise*. In The Sea, Ocean Engineering Science, J. Wiley & Sons Pub. N.Y., 9: 869-887
- Dean R.G. (1991) - *Equilibrium beach profiles: characteristics and application*. J. of Coastal Research, 7: 53-84.
- Dean R.G. e Maurmeyer E.M. (1983) - *Models for beach profile response*. In: Komar P.D. "Handbook of coastal processes and erosion". C.R.C. Press, pp 151-163.
- Dolotov Y. (1992) - *Possible Types of Coastal Evolution Associated with the Expected Rise of the World's Sea Level Caused by the "Greenhouse Effect"*. J. of Coastal Research, 8: 719-726.
- Dubois R.N. (1975) - *Support and refinement of the Bruun rule on beach erosion*. J. of Geology, 75: 651-657.
- Dubois R.N. (1976) - *Nearshore evidence in support of the Bruun rule of shore erosion*. J. of Geology, 84, 485-491.
- Dubois R.N. (1977) - *Predicting beach erosion as a function of rising water level*. J. of Geology, 85, 470-476.

- Dubois R.N. (1992) - *A re-evaluation of Bruun's Rule and supporting evidence*. J. of Coastal Research, 8: 618-628.
- Everts C.H. (1985) - *Sea level rise effects on shoreline position*. J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 111: 985-999.
- Ferreira O., Dias J., e Taborda R. (1990) - *Sea-level rise, sediment input and shoreline retreat: the case of Aveiro-Cabo Mondego (Portugal)*. Contribution n° A11 of the Projecto Disepla., 87, 259.
- Franco L. e Contini P. (1996) - *Wave measurements and climatology in the Italian seas*. PIANC Bulletin, pp. 67-75.
- Hallermeier R.J. (1978) - *Uses for a calculated limit depth to beach erosion*. 16<sup>th</sup> Coastal Eng. Conf., pp.1493-1512.
- Hands E.B. (1980) - *Prediction of shore retreat and nearshore profile adjustments to rising water levels on the Great Lakes*. U.S. Army, Corp of Engineering Research Center, Technical paper No 80-7, pp 119.
- Hands E.B. (1983) - *The Great Lakes as a test model for profile response to sea level changes*. In: Komar P.D. Handbook of coastal processes and erosion. C.R.C. Press. Pp. 167-189.
- Healy T. (1991) - *Coastal erosion and sea level rise*. Z. Geomorph.N.F. Supp. Bd., 81: 15-29.
- Hinton H. e Nicholls R. (1998) - *Spatial and Temporal Behaviour of Depth of closure along the Holland Coast*. Coastal Eng. Conf., pp. 2913-2925.
- Hofmann J.S., Keyes D. e Titus J.G. (1983) - *Projecting futures sea level rise. Methodology, Estimates to the Year 2000 and Research Needs*. U.S. Environmental Protection Agency. 230-09-007. Pp. 121.
- IPCC (2001) - *Climatic Change 2001: The Scientific Basis*. www.ipcc.ch/pub/spm22-01.
- Krauss N.C. (1992) - *Engineering approaches to cross-shore sediment transport processes*. Proc. Short Course, design and reliability of coastal structures. Venezia, 175-191.
- Kriebel D.L. e Dean R.G. (1985) - *Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion*. Coastal Eng., 9: 221-245.
- Leatherman S.P. (1990) - *Modelling shore response to sea-level rise on sedimentary coasts*. Progress Physical Geography, 14: 447-463.
- Lofty M.F. e Frihy O.E. (1993) - *Test of Bruun model on cross-shore variations in sediments texture of the near-shore zone off the Nile Delta Coast, Egypt*. Medcoast '93, pp. 2-5.
- Lusetti C. (1977) - *Osservazioni mareografiche del porto di Genova*. Istituto Idrografico della Marina, F.C.1079, Genova, pp 35.
- Lusetti C. (1982) - *Contributo allo studio del livello medio marino a Genova*. Istituto Idrografico della Marina, Genova, 13 pp.
- Marinelli, O. (1926) - *Sull'età dei delta italiani*. La geografia 1/2: 21-29.
- Mörner N. (1994) - *Recorded sea level variability in the Holocene and expected future changes*. Bulletin of the Inqua Neotectonics Commission, 17: 48-53.
- Nicholls R., Birkmeier W. e Hallermeier R. (1996) - *Application of the depth of closure concept*. 245<sup>th</sup> Coastal Eng. Conf., pp. 3874-3887.
- Nicholls R., Birkmeier W. e Lee G.H. (1998a) - *E valuation of depth of closure using data from Duck, NC, USA*. Marine Geology, 148: 179-201.
- Nicholls R., Larson M., Capobianco M. e Birkmeier W. (1998) - *Depth of closure: improving understanding and prediction*. 26<sup>th</sup> Coastal Eng. Conf. pp. 2888-2901.
- Pilkey O.H. e Davis T. (1987) - *An analysis of coastal recession models: North Carolina coast*. In Sea-level fluctuation and coastal evolution. Soc. of Econ. Paleontologists and Mineralogists, Spec Pub., 41: 59-68.
- Pirazzoli P.A. (1986) - *Secular trends of relative sea level changes indicated by tide-gauge records*. J. Coastal Research, Special Issue, 1: 1-26
- Pirazzoli P.A. (1993) - *Global sea-level changes and their measurements*. Global Planet Change, 8: 135-148.
- Pranzini E. (1989) - *L'innalzamento del livello marino ed i suoi effetti sul quadro ambientale della costa toscana nel prossimo secolo*. In Coste Toscane, Regione Toscana Giunta Regionale, Firenze, 57-62 .

- Pranzini E. (1994) - *Bilancio sedimentario ed evoluzione storica delle spiagge*. Il Quaternario 7: 197-202.
- Pranzini E. (1995) - *Cause naturali ed antropiche nelle variazioni del bilancio sedimentario del litorali*. Riv. Geogr. It., n.s. 1: 47-62.
- Pranzini E. e Rossi L. (1995) - *A new Bruun-based model to predict shoreline evolution*. MEDCOAST'95. 24-27 Ottobre 1995, Tarragona, Spagna. Pp. 1145-1159
- Rosen P. S. (1978) - *A regional test of the Bruun Rule on shoreline erosion*. Marine Geology, 26, 7-16.
- Schwartz M.L. (1967) - *The Bruun theory of sea-level rise as a cause of shore erosion*. J. of Geology, 75: 76-92.
- Schwartz M.L. (1987) - *The Bruun Rule - Twenty years later*. J. Coastal Research, 3, ii-iv.
- SCOR. Working Group 89 (1991) - *Beach Response to Sea-Level Change*. J. Coastal Research, 7: 895-920.
- Titus J.G. (1986) - *Greenhouse Effect, Sea Level Rise and Coastal Zone Management*. Coastal Zone Management Journal, 14: 147-1.
- Titus J.G. (1987) - *Greenhouse Effect, Sea Level Rise, and Coastal Drainage System*. J. of Water Resources Planning and Management, 113: 216-227.
- Titus J.G. e Narayanan V. (1996) - *The risk of sea level rise*. Climatic Change, 33: 151-212.
- Vellinga P. (1982) - *A tentative description of a universal erosion profile for sandy beaches and rock beaches*. Coastal Eng., 8: 178-188.

**Manoscritto ricevuto il 15/6/2001, accettato il 28/11/2001.**