

Influenza del fattore scala sulla classificazione delle spiagge in base alla loro tendenza evolutiva

Enzo Pranzini e Daniela Simonetti

Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze.
epranzini@unifi.it

Riassunto

Lo studio dell'evoluzione della linea di riva effettuato attraverso la misura della variazione areale della spiaggia emersa porta a risultati significativamente diversi al variare della lunghezza dei settori considerati. Ciò emerge dal confronto delle ultime due linee di riva disponibili per la spiaggia di Punta Ala e per quella di Follonica.

Per settori compresi fra 50 e 400 m le differenze non sono rilevanti, ma una loro ulteriore espansione porta a valori percentuali dei tratti in erosione molto diversi. L'attribuzione dei vari tratti costieri a classi di intensità dei processi in atto è ancora più sensibile alla scala a cui vengono effettuate le indagini, così come lo è il parametro di *Uniformità*, che descrive il numero di transizioni Erosione/Accrezione che si registrano al passaggio da un settore all'altro.

Il confronto fra lo stato di litorali diversi deve tenere conto delle modalità con le quali sono state ricavate le percentuali dei tratti in erosione e in accrezione.

Parole chiave: tecniche di monitoraggio, analisi delle linee di riva, classificazione delle spiagge.

Abstract

The study of the shoreline evolution performed by measuring the surface variation within coastal segments is strongly dependent of the length of segments. These are the results from the comparison of the two most recent shoreline positions acquired at Punta Ala and Follonica.

Differences are not relevant for sector lengths between 50 and 400 m, but longer sectors trigger very different erosion/accretion percentages. When shoreline displacement values enter a coastal classification system, results are even more sensitive to scale; the same can be verified when we analyse Uniformity – a parameter describing the number of Erosion/Accretion transitions that occur when we cross from one sector the adjacent one.

Comparing the status of different coastal segments, careful attention must be given to the procedure that was used to give percentages of eroding and accreting coasts in each case.

Keywords: monitoring techniques, shoreline analysis, beach classification.

Introduzione

Le funzioni di basso ordine difficilmente riescono a rappresentare fedelmente una linea di riva a causa delle distorsioni dovute a salienti o concavità distribuite regolarmente o irregolarmente lungo costa, tanto che non è possibile studiare l'evoluzione di un litorale con semplici strumenti matematici, se non per descrivere tendenze generali, come lo sviluppo di *zeta bays* (Silvester e Hsu, 1993) o la rotazione di *pocket beaches* (Short e Masselink, 1999).

Le forme che perturbano il regolare andamento della linea di riva possono essere stabili, come le *cuspede forelands* (Gulliver, 1896), migrare lungo riva (Sonu, 1968) o svilupparsi e morire nella stessa posizione, come i *reversing storm hotspots* (Jeffrey et al., 2006).

Le forme regolari si sviluppano, si modificano e migrano in risposta alle diverse condizioni del moto ondoso: l'asimmetria delle *beach pads* (Tanner, 1975) è il risultato del trasporto di sedimenti indotto da onde oblique, mentre le cuspidi e le mega-cuspidi sono modulate dalle *edge waves* (Guza e Inman, 1975).

Le forme irregolari possono essere il risultato della convergenza o divergenza delle onde indotta dalla diffrazione su di un fondale irregolare indeformabile (Schwab et al., 1999) o deformabile (Courtney et al., 2006): variazioni della direzione di provenienza del moto ondoso o dei parametri d'onda (H e T) possono creare, incentivare o smussare queste morfologie.

Le strutture costiere artificiali fanno aumentare questa variabilità spaziale, inducendo la formazione di tomboli o di salienti (scogliere parallele), facendo assumere alla linea di riva l'andamento a denti di sega (penelli) o innescando la formazione di *spits* (i moli di soprafflutto dei porti) (Nordstrom, 2000). Queste morfologie sono soggette a modesti scorrimenti lungo costa, ma possono variare in modo significativo in estensione.

Su tempi brevi queste irregolarità possono produrre spostamenti della linea di riva maggiori delle variazioni medie di lungo periodo che interessano il tratto costiero a cui appartengono (Esteves et al., 2006).

Il monitoraggio dell'erosione costiera, che costituisce uno dei pilastri della Gestione Integrata delle Zone Costiere (GIZC), deve prendere in considerazione questo aspetto sia per migliorare l'accuratezza della previsione dell'evoluzione futura del litorale, sia per ottimizzare il rapporto costi/benefici nella scelta della frequenza spaziale e temporale dei rilievi.

Considerato un tratto costiero, lo spostamento medio della linea di riva viene calcolato dividendo la variazione areale della spiaggia emersa per la lunghezza del settore stesso (Rogers et al., 2004; Aminti et al., 2004). Questa Analisi della Variazione di Superficie (AVS) consente di determinare lo spostamento medio "effettivo" della linea di riva nei vari settori costieri, che possono avere o no lunghezza costante.

Una buona approssimazione di questo valore è considerata la variazione della distanza della linea di riva da un caposaldo, ed anche in questo caso i capisaldi possono essere equispaziati (Hicks et al., 2002; Morton et al., 2005; Różyński, 2004) o posti a distanza variabili lungo costa (Norcross et al., 2002; Pye e Blott, 2006).

Un'altra possibilità consiste nell'analisi continua della linea di riva effettuata estraendo le coordinate di ciascuna intersezione fra due linee, in modo da identificare ogni singolo tratto in erosione o in avanzamento (Amini et al., 1995); anche in questo caso, però, è necessaria una sintesi, se non altro per fornire statistiche regionali, cumulando le distanze e riducendo quindi la scala dell'analisi.

Tutte queste metodologie implicano una discretizzazione della costa attraverso la definizione della distanza fra i profili o della lunghezza dei settori, valori che in genere vengono stabiliti sulla base della scala del progetto, e che possono variare fra pochi metri per studi di dettaglio (Bowman et al., 2007; Hicks et al., 2002), a centinaia di metri (White e El Asmar, 1999) fino a chilometri per studi regionali (Anfuso e Garcia, 2005; Krause e Soares, 2004).

Operare su profili è più semplice e speditivo, anche se alcuni programmi basati su GIS, come il DSAS (Digital Shoreline Analysis System) dell'USGS-TMPC (Thieler e Martin, 2003), consentono di analizzare le variazioni areali di molti settori costieri in un tempo estremamente ridotto. Nell'ambito del Progetto BeachMed (INTERREG-III) l'Unità Operativa di Firenze ha sviluppato un modulo che opera all'interno di AutoCAD e che svolge le stesse funzioni (BEACHMED, 2004).

L'Analisi della Variazione di Superficie filtra le irregolarità ad alta frequenza spaziale che possono essere messe in evidenza con profili molto ravvicinati. Queste variazioni, però, sono spesso dovute alle irregolarità della costa precedentemente citate e devono essere considerate come *outliers* se si va ad analizzare una tendenza generale del litorale. Questo problema è ben conosciuto ed ha portato alcuni autori a filtrare con medie mobili i loro dati ad alta risoluzione (Esteves et al., 2006; Genz et al., 2007).

Una procedura concettualmente simile è alla base dell'Analisi delle Variazioni di Superficie se l'area delimitata dalle linee di riva viene considerata come la sommatoria delle variazioni misurate su di un numero infinito di profili.

Per ottenere un filtraggio efficace, ciascun settore costiero deve avere una lunghezza almeno doppia di ogni morfologia periodica presente lungo costa; morfologie irregolarmente distribuite lungo riva sono assai più difficili da filtrare, dato che lo *smoothing* dipende dalla loro ampiezza e distanza.

In Figura 1 vengono presentati alcuni esempi in cui è evidente la dipendenza della classificazione dei vari tratti costieri dalla lunghezza dei settori considerati; in tutti i casi presentati il litorale nel suo insieme è posto in equilibrio.

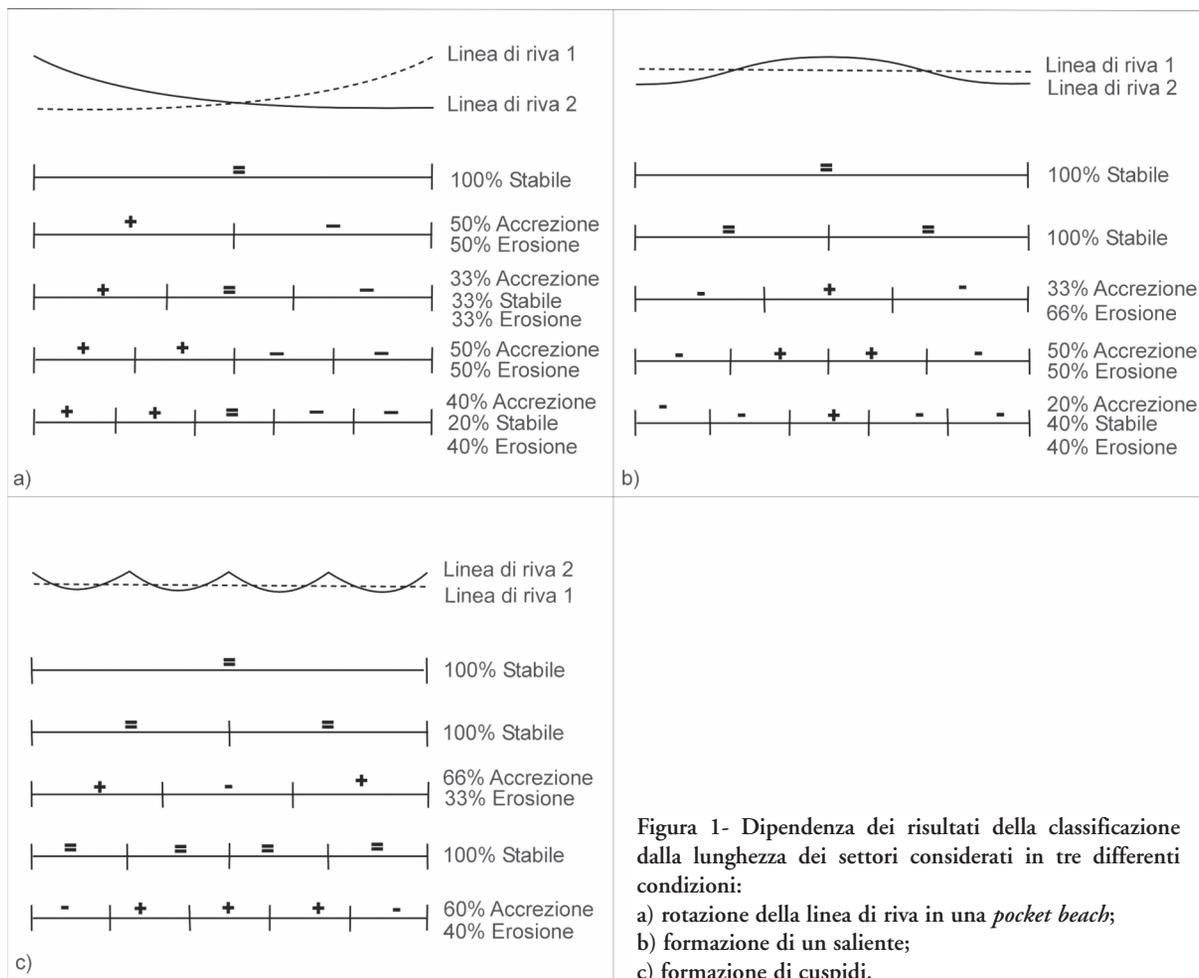


Figura 1- Dipendenza dei risultati della classificazione dalla lunghezza dei settori considerati in tre differenti condizioni:

- a) rotazione della linea di riva in una *pocket beach*;
- b) formazione di un saliente;
- c) formazione di cuspidi.

Fin dal 1985 per la Regione Toscana sono stati effettuati monitoraggi basati sull'Analisi delle Variazioni di Superficie lungo i 192 km delle spiagge continentali, composte da 8 ampie unità fisiografiche (da 8 a 65 km di lunghezza) e da una *pocket beach* lunga 2 km (Bartolini et al., 1989).

Da allora le indagini si sono basate sulla suddivisione della costa in 45 settori di lunghezza diversa, compresa fra 542 e 5705 m, ma omogenei nelle tendenze evolutive o nel tipo di opera di difesa presenti. Lo stesso metodo è stato poi applicato a venti *pocket beaches* dell'Isola d'Elba, di lunghezza compresa fra 1245 m e 121 m.

La necessità di una risoluzione maggiore (vedi in Tabella 1 una proposta di classificazione della risoluzione delle analisi) per valutare l'efficacia dei nuovi progetti di difesa costiera basati su opere strutturali e/o su ripascimenti artificiali, ha imposto l'adozione di settori più corti. Aumentando la risoluzione dell'analisi le statistiche relative allo stato dei litorali toscani sono cambiate in modo significativo. In questo lavoro si analizza appunto l'influenza della risoluzione dell'Analisi della Variazione di Superficie sui risultati della classificazione delle spiagge in termini di erosione/progradazione.

Tabella 1 - Proposta di classificazione della risoluzione dell'analisi per lo studio della variazione della linea di riva (L = lunghezza dei settori o distanza fra transetti).

Altissima	$L < 1^0 \text{ m}$
Molto alta	$10^0 \text{ m} < L < 10^1 \text{ m}$
Alta	$10^1 \text{ m} < L < 10^2 \text{ m}$
Media	$10^2 \text{ m} < L < 10^3 \text{ m}$
Bassa	$10^3 \text{ m} < L < 10^4 \text{ m}$
Molto bassa	$10^4 \text{ m} < L < 10^5 \text{ m}$
Bassissima	$L > 10^5 \text{ m}$

Materiali e metodi

Sono stati studiati due tratti della costa toscana lunghi 4800 m ciascuno:

- la spiaggia di Punta Ala, priva di opera di difesa che si sta evolvendo verso una *zeta bay* con erosione del tratto sopraflutto ed accrezione in quello sottoflutto (Pranzini e Rossi, 2000);
- la spiaggia di Follonica, in un tratto di costa intensamente difeso da scogliere parallele emerse e sommerse e da pennelli (Aminti et al., 2002).

Per ciascun tratto sono state prese in considerazione le due linee di riva più recenti al fine di analizzare la loro tendenza evolutiva. La costa è stata suddivisa in 96 settori lunghi 50 m ciascuno, per i quali è stata misurata la superficie persa o guadagnata utilizzando il sistema basato su AutoCAD precedentemente citato (BEACHMED, 2004); dividendo questo valore per la lunghezza del settore si è ottenuto lo spostamento medio della linea di riva. Le lunghezze cumulate dei settori in erosione o in avanzamento sono poi state trasformate in percentuali.

Successivamente, l'analisi è stata ripetuta fondendo settori adiacenti per crearne di nuovi sempre più ampi (100, 200, 300, 400, 600, 800, 1200, 1600, 2400 e 4800 m). La lunghezza totale del litorale da analizzare è stata definita in modo da poter fondere i settori di lunghezza unitaria per ottenerne di nuovi sempre più ampi senza escluderne alcuno.

I valori di spostamento medio della linea di riva sono stati poi confrontati per valutare quanto la risoluzione delle indagini influenzi i risultati della classificazione delle coste, sia in termini generali di settori in erosione o in accrescimento, sia facendo riferimento ad una classificazione più specifica in cui si tiene conto anche del valore dello spostamento:

Accrescimento > +5 m

Probabile accrescimento +5 m ÷ +2 m

Stabile +2 m ÷ -2 m

Probabile erosione -2 m ÷ -5 m

Erosione < -5 m

Questa classificazione, recentemente adottata per le spiagge della Regione Toscana (Carli et al., 2006), è basata sull'accuratezza dei rilievi, nel senso che uno spostamento misurato della linea di riva entro +/-2 m è considerato non certo, mentre si ritiene che uno spostamento superiore a +/-5 metri indichi che quel settore è stato certamente in accrezione o in erosione nell'intervallo di tempo considerato. La velocità del processo (erosione o accrezione) viene poi definita in termini di tasso di spostamento (m/anno) ma non ha interesse ai fini del presente studio.

Si è analizzata anche la variabilità lungo costa degli spostamenti della linea di riva, espressa dal numero di variazioni +/- che si hanno al passaggio da un settore a quello adiacente. Se non si hanno variazioni il sistema costiero è molto ordinato (tutti i settori sono in erosione o in accrezione), mentre nel caso opposto si ha il massimo delle transizioni, ossia settori in erosione si alternano a settori in accrezione.

Possiamo chiamare questo ordine *Uniformità* e calcolarla con:

$$U = 1 - t_a/t_p$$

dove: t_a numero delle transizioni effettive,

t_p numero delle transizioni possibili, corrispondenti a n-1, dove n è il numero dei settori in cui è stato suddiviso il tratto di litorale.

La spiaggia di Punta Ala

La spiaggia di Punta Ala è lunga circa 6.1 km e collega Punta Hidalgo con Punta delle Cannelle, ai piedi della quale si trova la foce del Fiume Alma, protetta da due moli guardiani (Fig. 2). Studi recenti (Pranzini e Rossi, 2000) mostrano che questo litorale si sta evolvendo verso una *zeta bay* (Silvester e Hsu, 1993) con erosione del settore meridionale (*updrift*) ed espansione di quello settentrionale (*downdrift*). Nella parte meridionale alcuni affioramenti di *beach rock* rendono irregolare la linea di riva.

L'evoluzione della linea di riva è stata analizzata confrontando i rilievi del 1996 con quelli del 2005, entrambi effettuati con DGPS acquisendo circa un punto ogni 5 m percorrendo l'isoipsa 0 m.

La lunghezza dei settori di primo ordine (50 m) è sufficiente a mediare le piccole irregolarità dovute alla discontinua presenza della *beach rock* nella *nearshore* e le piccole cuspidi talora presenti in questo litorale.

A questa scala di indagine (settori lunghi 50 m) la spiaggia è caratterizzata da valori medi di spostamento compresi fra -16.30 e +15.13 m, con una distribuzione normale (Shapiro Wilk Test; $P = 0.42$); il 69.8% dei settori è in erosione e il valore medio dello spostamento della linea di riva è di -2.04 m (s.d. = 5.44 m) (Fig. 3).

In Figura 4 viene rappresentata l'evoluzione del litorale in modo classico per le diverse scale di analisi: istogrammi in cui ciascuna barra è associata ad un determinato settore. Se i settori hanno uguale lunghezza si ottiene un grafico "equivalente" in cui le variazioni di superficie sono in scala.

Dal primo grafico (settori lunghi 50 m) si rileva che la gran parte dei settori è soggetta ad una modesta erosione, con l'eccezione dei settori settentrionali e di alcuni centro-meridionali in accrezione. Alcuni *outliers* interrompono questo schema, ma l'*Uniformità* del sistema è molto alta ($U = 0.91$) con solo 9 transizioni +/- sulle 95 possibili; la differenza media in valore assoluto fra settori adiacenti è molto contenuta: 1.91 m.

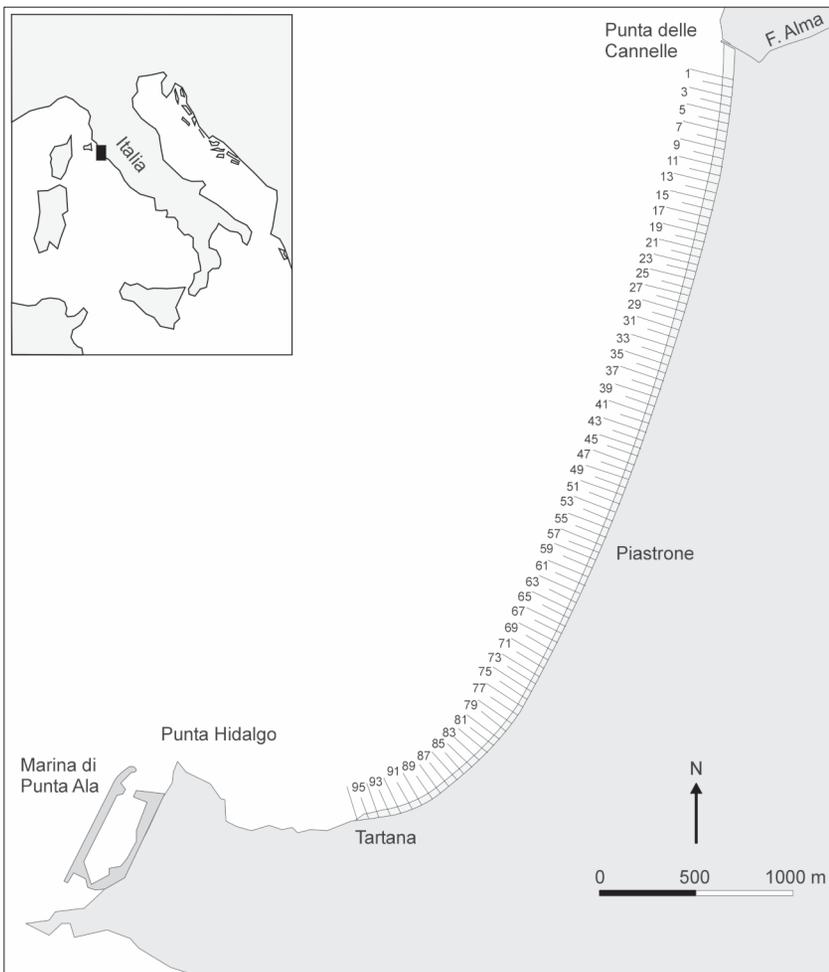


Figure 2 - Punta Ala: posizione dei settori analizzati.

La fusione dei settori unitari in settori di lunghezza crescente fino a 400 m non modifica in modo sostanziale lo stato del litorale (Fig. 5); con la percentuale di erosione che oscilla fra il 66.7% e il 70.8%; l'*Uniformità* si riduce fino ai 300 m ($U = 0.67$) e cresce nuovamente a 400 m ($U = 0.73$). Con settori di 600 m e di 1200 m il 75% del litorale è in erosione, mentre per settori di 800 e 1600 m questo valore scende al 66.7%. I due settori lunghi 2400 m risultano entrambi in erosione. L'*Uniformità*, dopo una ulteriore riduzione a 600 m ($U = 0.57$), passa a 0.80 (800 m) e 0.67 (1200 m) per diventare 1 a 2400 m.

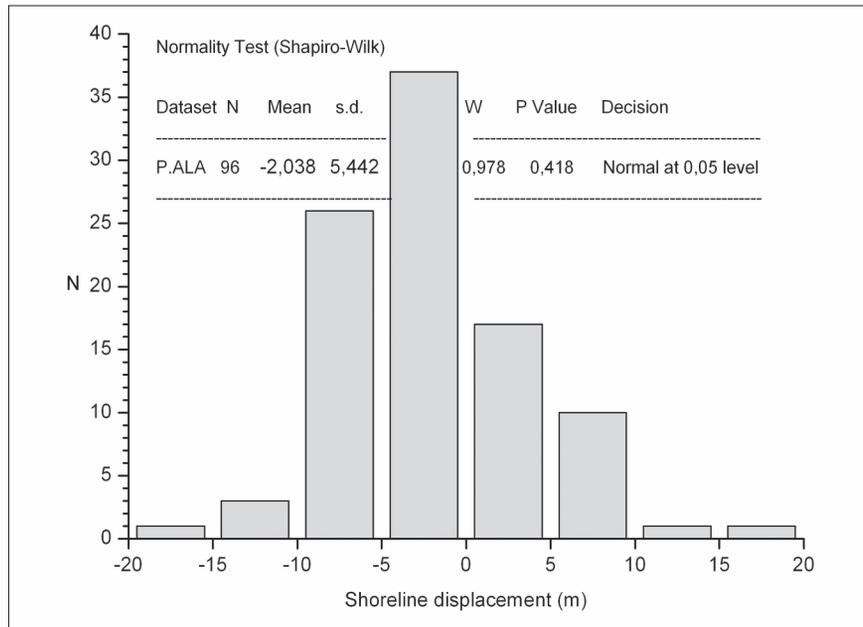


Figura 3 - Distribuzione di frequenza degli spostamenti della linea di riva per classi di ampiezza di 5 m per il litorale di Punta Ala.

Estendendo la lunghezza dei settori gli *outliers* spariscono e l'evoluzione del litorale diviene più regolare con i settori "forti" che mangiano i settori "deboli".

Questo avviene per il settore n. 24 in accrescimento, che è affiancato da due settori in forte erosione, quando viene fuso per l'analisi a 100 m (Fig. 4).

Ulteriori fusioni non modificano il *trend* generale, ma i valori dello spostamento medio della linea di riva si riducono progressivamente. Solo quando si arriva a due settori di 2400 m tutto il litorale risulta in erosione con valori di -1.62 e -2.45 m, e non rimane memoria né della forte erosione del settore più meridionale né della crescita di quelli settentrionali (dove si avevano anche più di 15 m di avanzamento).

Quando i valori di spostamento della linea di riva vengono inseriti nelle categorie utilizzate per la Regione Toscana la dipendenza dei risultati dalla lunghezza dei settori è ancora più evidente (Figg. 6 e 7).

Nel range 50 ÷ 800 m le spiagge stabili oscillano fra il 16.7 e il 33.3%, mentre quelle in erosione hanno una variabilità ancora maggiore (25 ÷ 41.7%). Questo dipende dagli alti valori di erosione di alcuni settori, che influenzano il comportamento dei settori adiacenti dopo la fusione.

I settori in crescita mostrano maggiore stabilità e fra 50 e 600 m rimangono nel range 8.3 ÷ 12.5%, ma scompaiono poi con l'ulteriore fusione a 800 m.

Un'altra ragione per la stabilità delle classi estreme (Erosione e Accrescimento) alla prima fusione deriva dal fatto che molti settori che esse raccolgono sono contigui e la loro fusione non ne modifica lo *status*. Nel tratti di litorale in transizione, dove i settori in *Probabile accrescimento*, *Stabile* e in *Probabile erosione* si alternano è più facile che la fusione inneschi cambiamenti di appartenenza alle varie classi. La classe *Accrescimento* scompare a 800 m e quella in *Probabile accrescimento* a 1600.

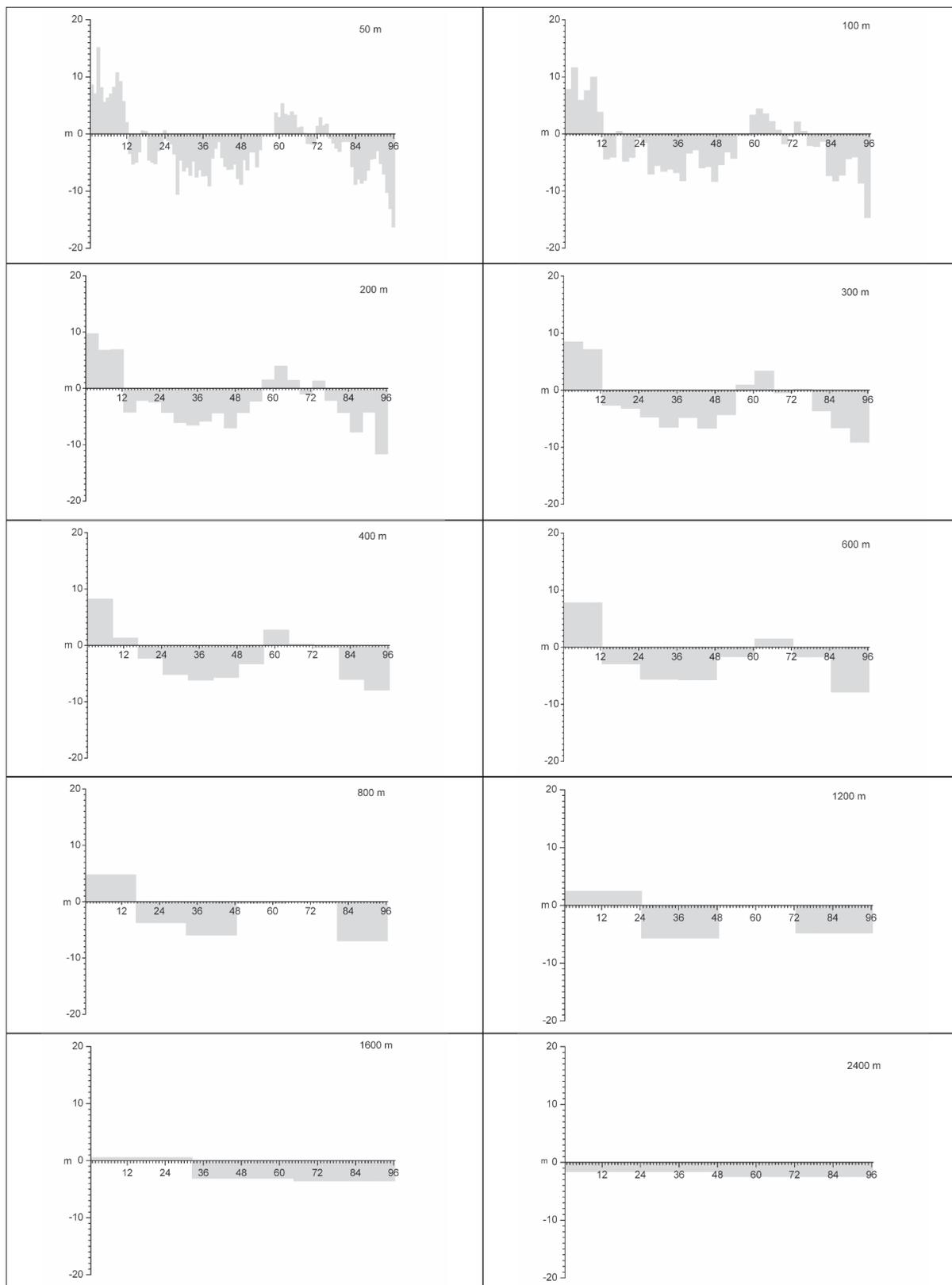


Figura 4 - Punta Ala: spostamento medio della linea di riva a Punta Ala per settori di lunghezza crescente da 50 a 2400 m.

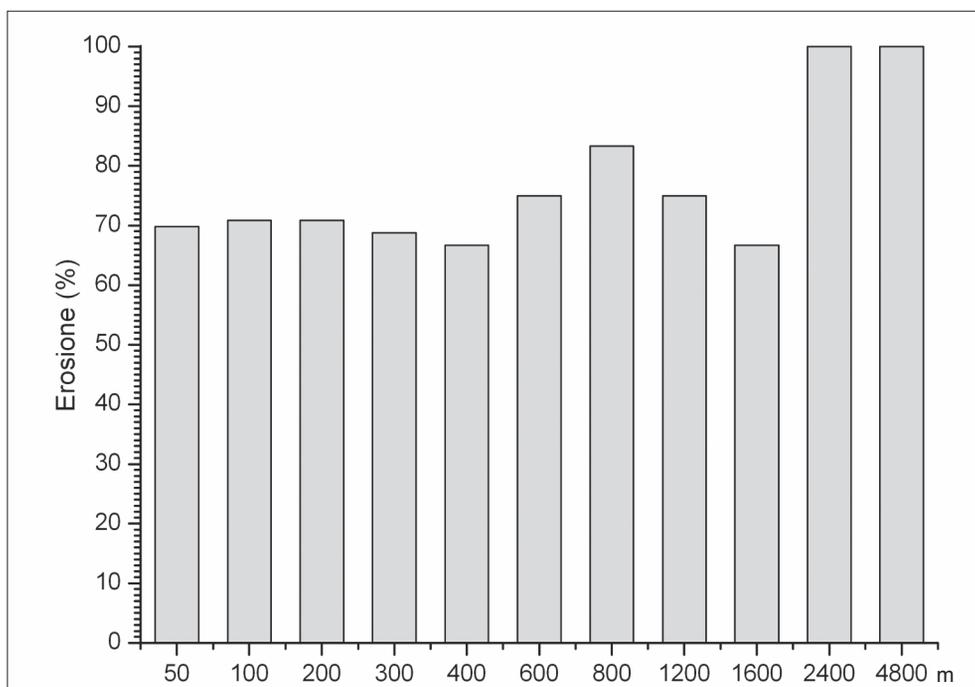


Figura 5 - Punta Ala: percentuale di spiaggia in erosione al variare della scala dell'indagine (*i.e.* lunghezza dei settori).

Tabella 2 - Numero di transizioni (+/-) e valori di *Uniformità (U)* alle diverse scale di analisi.

Lunghezza dei settori (m)	50	100	200	300	400	600	800	1200	2400
N. dei settori	96	48	24	16	12	8	6	4	2
Transizioni	9	7	5	5	3	3	1	1	0
<i>U</i>	0.91	0.85	0.78	0.67	0.73	0.57	0.80	0.67	1.00

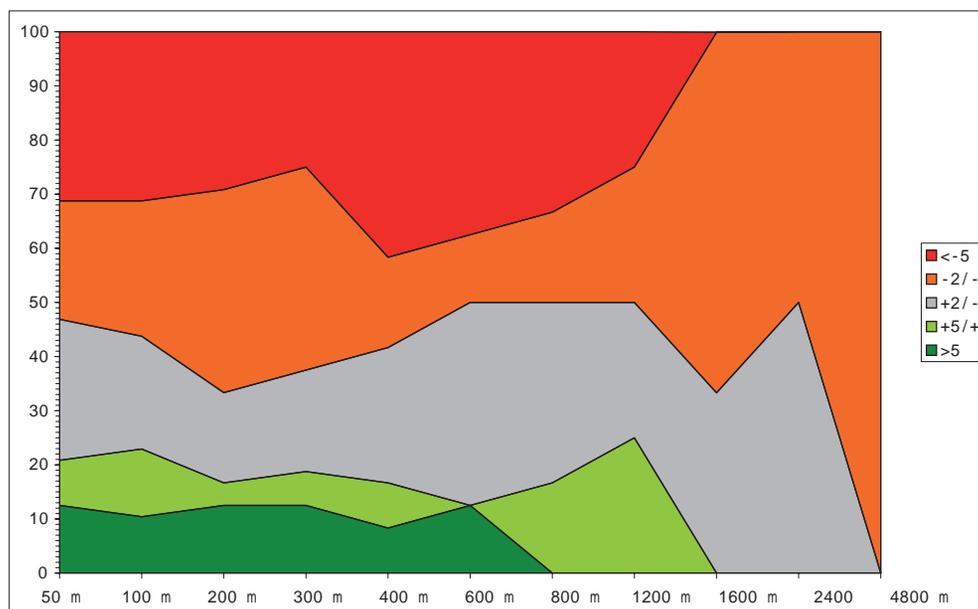


Figura 6 - Punta Ala: frequenza delle varie classi della Regione Toscana per differente lunghezza dei settori.

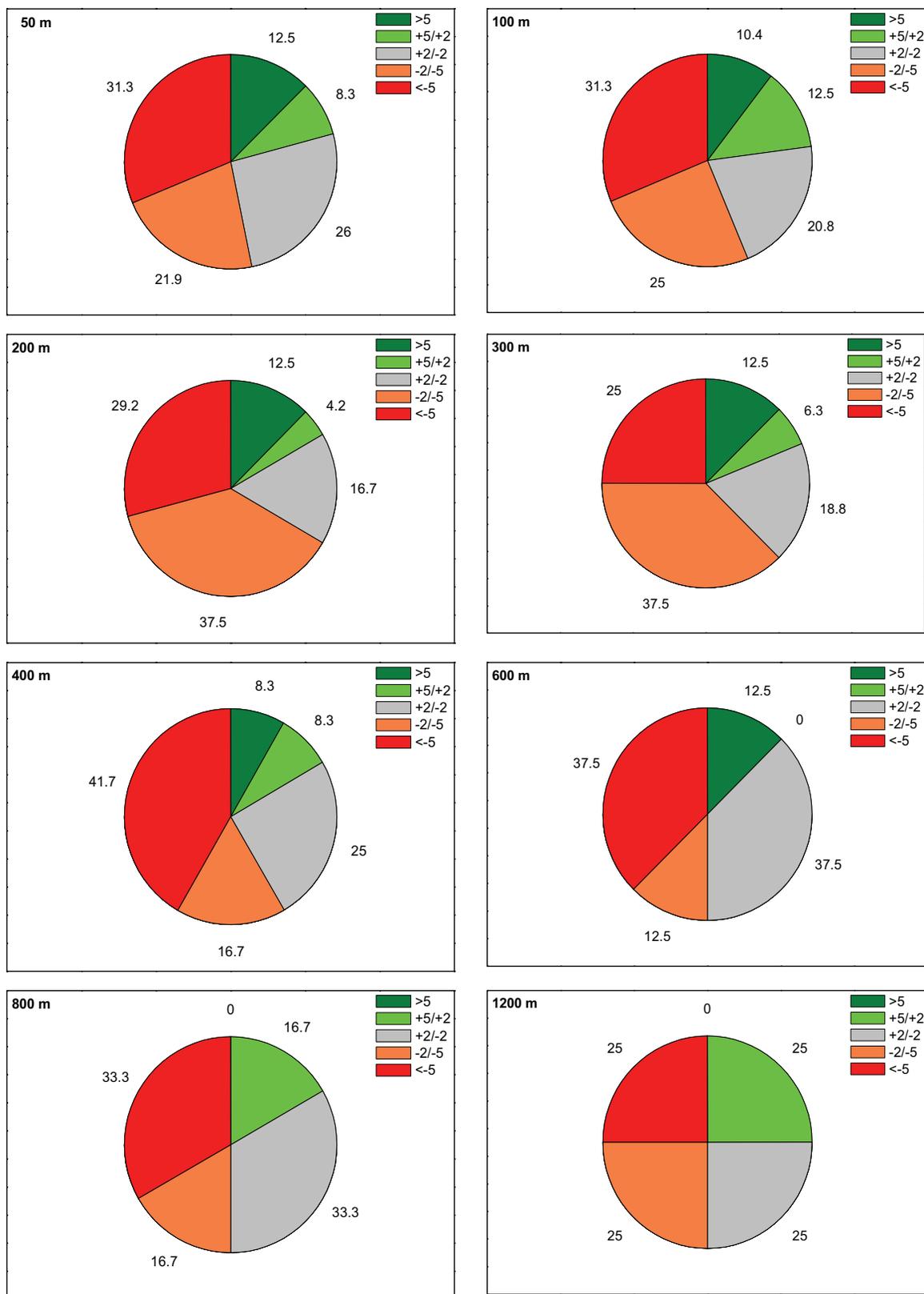


Figura 7 - Punta Ala: diagrammi a torta che mostrano la percentuale di settori appartenenti alle varie classi per lunghezze dei settori crescenti da 50 a 1200 m.

La spiaggia di Follonica

Il secondo caso di studio è costituito dal tratto di spiaggia antistante l'abitato di Follonica, intensamente protetto da opere di difesa (Fig. 8). In questo caso vengono messe a confronto le linee di riva del 2000 e del 2005 su di un fronte di 4800 m e diviso in settori lunghi 50 m, progressivamente uniti a formare settori di 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1200, 2400 e 4800 m.

L'eterogeneità della costa, con numerose difese di vario tipo, rende le variazioni della linea di riva in ciascun settore più indipendenti da quelle dei settori adiacenti, tanto che si registrano 17 transizioni +/- sulle 95 possibili ($U = 0.82$) e una differenza assoluta fra settori adiacenti di 3.14 m (Tab. 3).

A questa scala di analisi (settori lunghi 50 m) i valori di spostamento della linea di riva hanno una distribuzione normale ($p = 0.05$); il 59.4% dei settori è in erosione e lo spostamento medio della linea di riva è di -1.41 (s.d. = 6.68) (Fig. 9).

Nei primi processi di fusione (100, 200, 300 e 400 m) l'erosione rimane quasi costante (56.3, 58.3, 56.3 e 58.3%; Fig. 10) mentre il valore di U subisce variazioni significative (0.68, 0.61, 0.53 e 0.36). Ulteriori estensioni dei settori portano ad un costante incremento dei settori in erosione: 62.5% per 600 m, 66.7% per 800 m e 75.0% per 1200 m; i due settori da 2400 m sono entrambi in erosione. L'*Uniformità*, anche se il suo significato è dubbio per settori molto lunghi, raggiunge il valore più basso a 600 m ($U = 0.29$) per salire di nuovo a 800 m ($U = 0.40$) e a 1200 ($U = 0.67$) arrivando ovviamente ad 1 quando entrambi i settori sono in erosione.

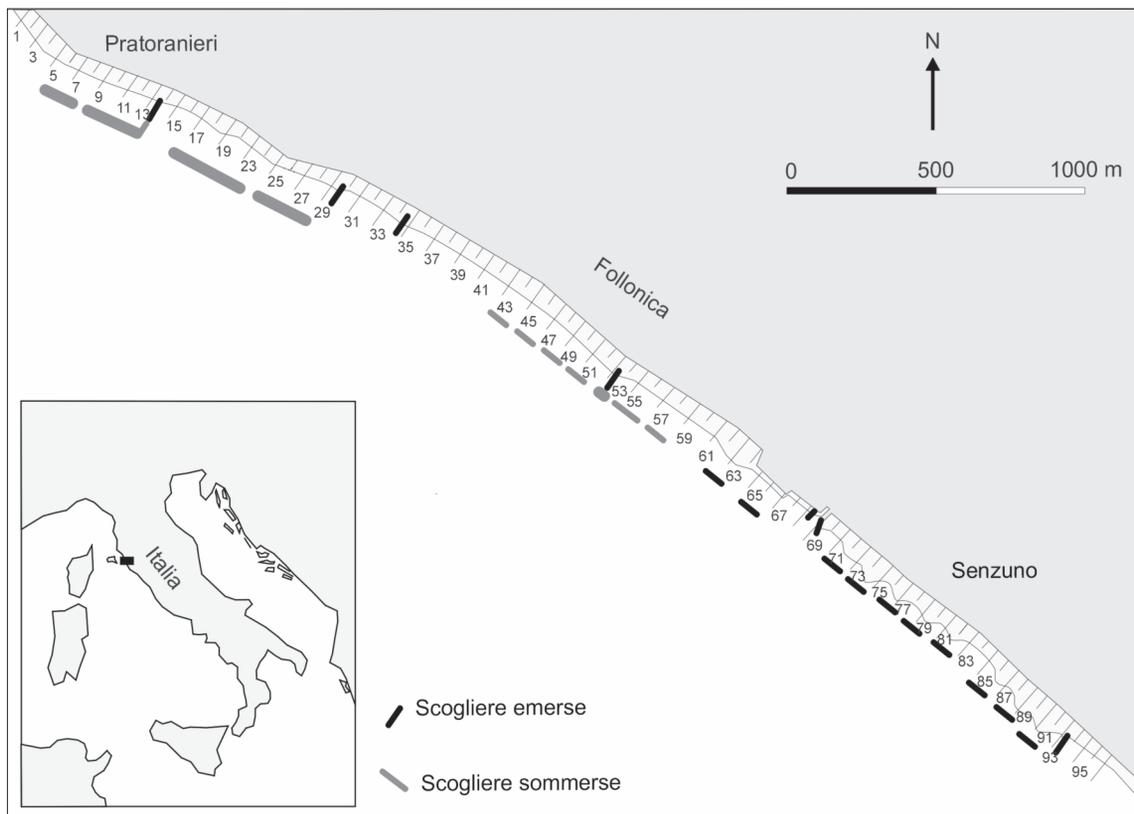


Figura 8 - Follonica: posizione dei settori analizzati e difese costiere presenti.

Tabella 3 - Numero di transizioni (+/-) e valore dell'*Uniformità* (U) alle diverse scale di analisi.

Lunghezza dei settori	50	100	200	300	400	600	800	1200	2400
N. di settori	96	48	24	16	12	8	6	4	2
Transizioni	17	15	9	7	7	5	3	1	0
U	0,82	0,68	0,61	0,53	0,36	0,29	0,40	0,67	1,00

Tutto ciò appare evidente dal confronto fra gli istogrammi che mostrano lo spostamento medio della linea di riva nei vari settori (Fig. 11) per settori di 50 m questi si raggruppano per tendenza evolutiva con valori positivi o negativi piuttosto elevati. Le prime fusioni non modificano quindi l'aspetto generale degli istogrammi, anche se alcuni settori "singolari" svaniscono, come avviene già al primo passaggio con il settore n. 59 in leggerissima accrezione, "annullato" dal settore n. 60 in forte erosione.

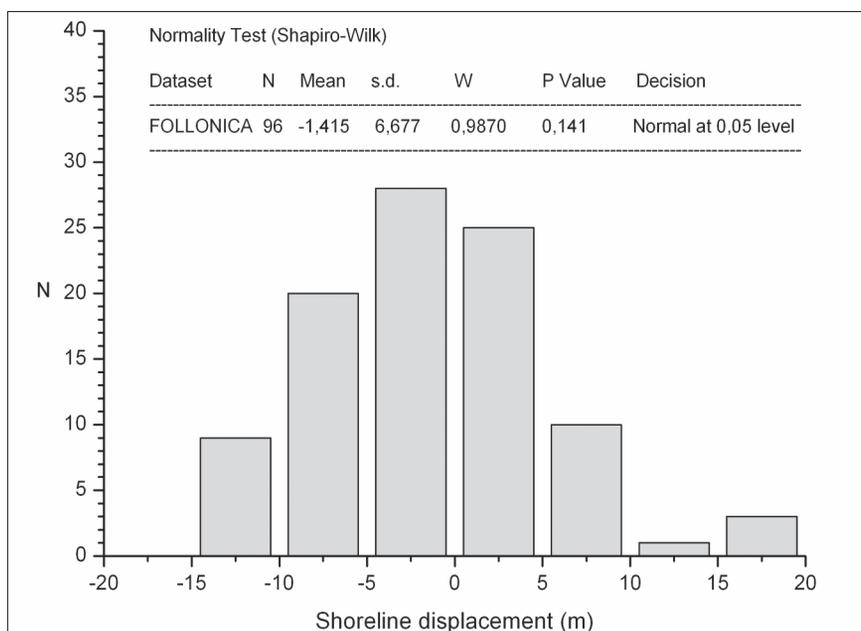


Figure 9 - Distribuzione di frequenza degli spostamenti della linea di riva per classi di ampiezza di 5 m per il litorale di Follonica.

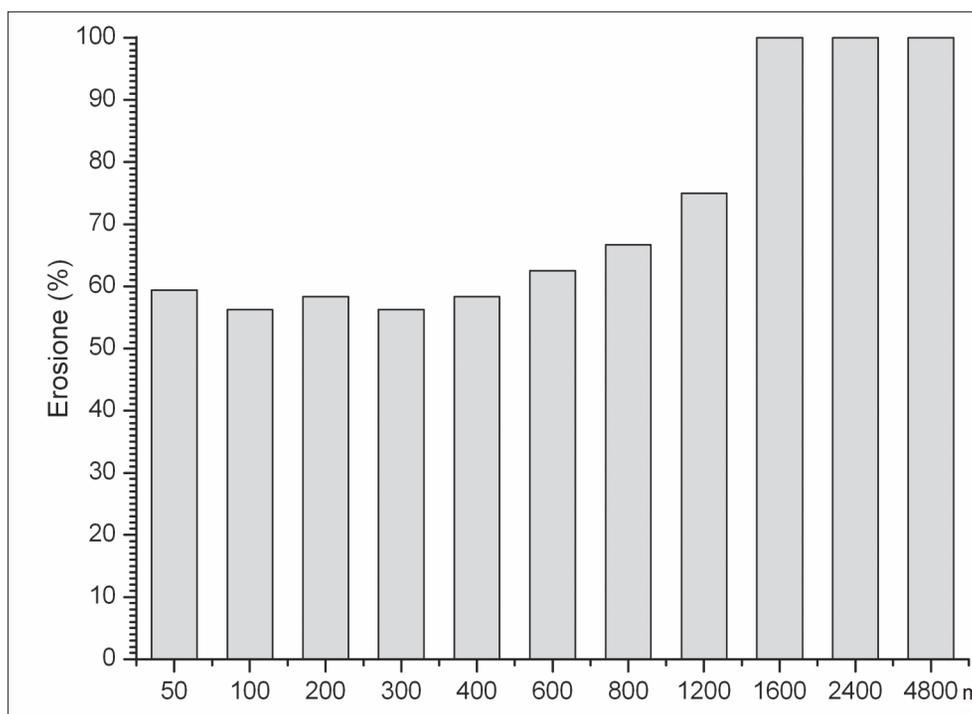


Figure 10 - Follonica: percentuale di spiaggia in erosione al variare della scala dell'analisi (i.e. lunghezza dei settori).

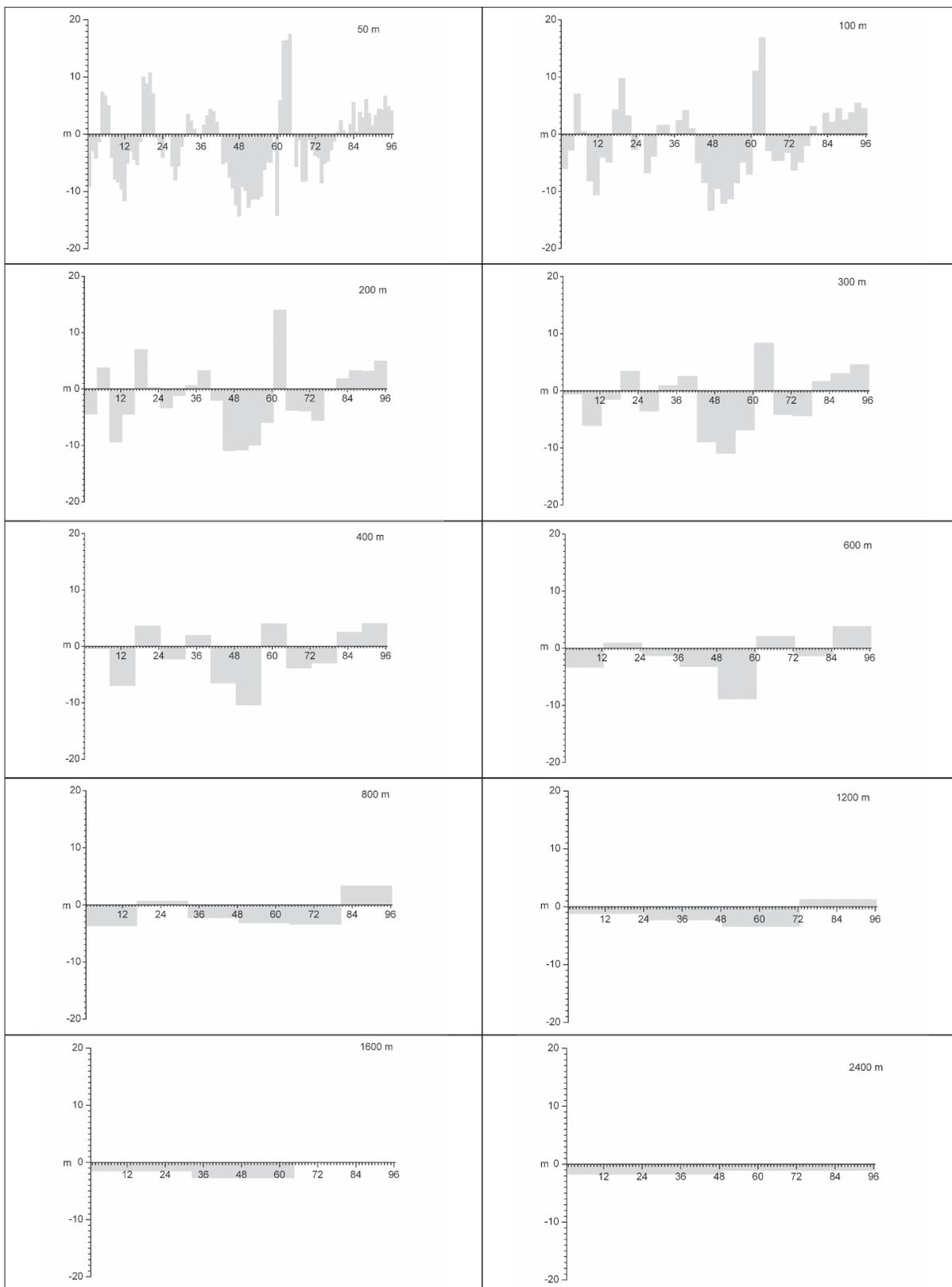


Figure 11 - Follonica: spostamento medio della linea di riva a Punta Ala per settori di lunghezza crescente da 50 a 2400 m.

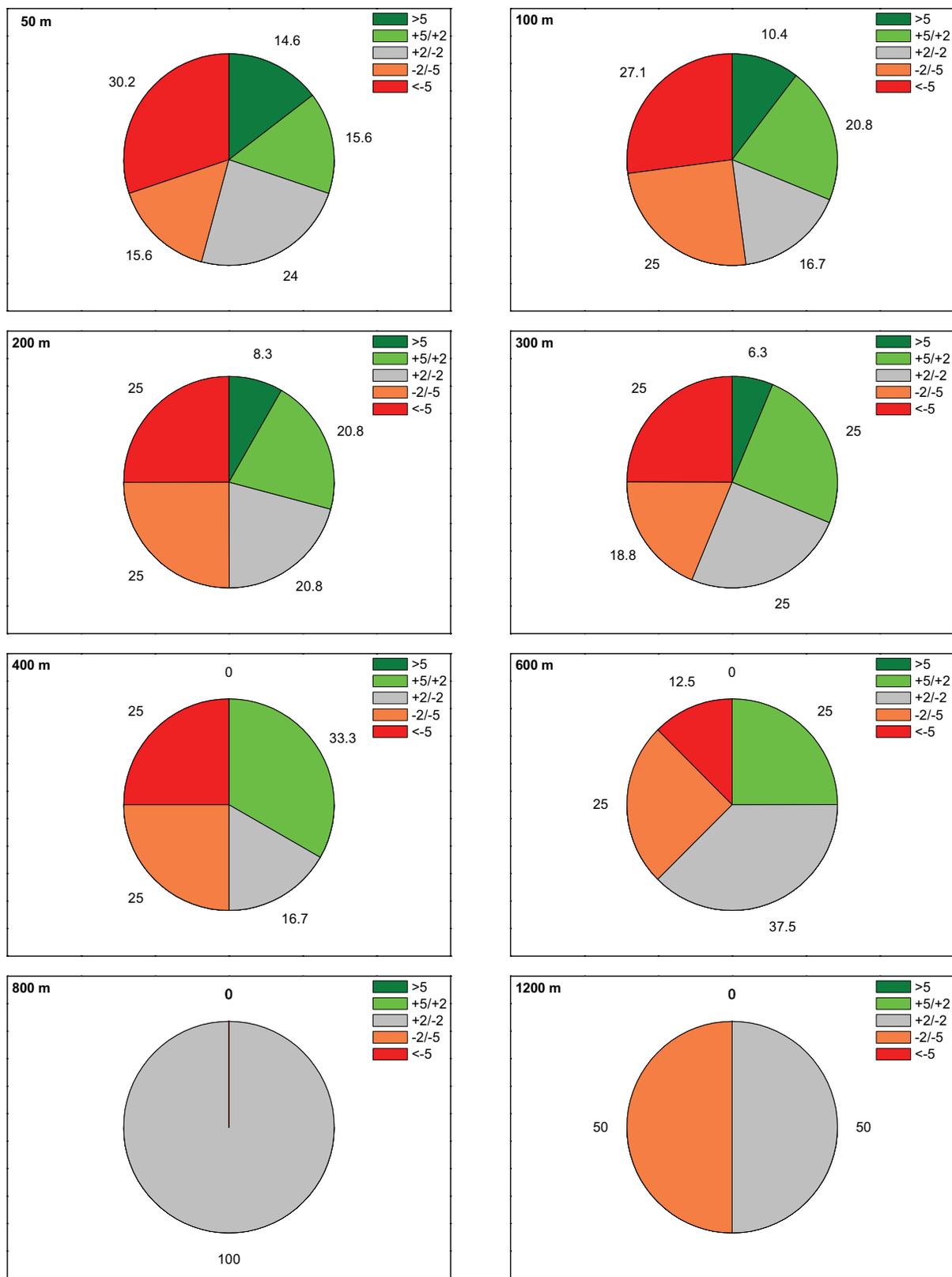


Figure 12 - Follonica: Diagrammi a torta che mostrano la percentuale di settori appartenenti alle varie classi per lunghezze dei settori crescenti da 50 a 1200 m.

La variabilità lungo riva si stabilizza solo dopo i 600 m, quando l'aspetto degli istogrammi non cambia se non per l'entità degli spostamenti della linea di riva. Già a 1600 m, in questo caso, si è persa traccia del processo di accumulo, dato che tutti e tre i settori che si vengono a creare sono in erosione (cfr. anche la Fig. 10).

Quando i valori di spostamento della linea di riva vengono raggruppati nelle classi adottate per la Regione Toscana, l'influenza della scala dell'indagine sui risultati della classificazione è ancor più evidente (Fig. 12). Con settori di 50 m il 30.2% delle costa è in *Erosione*, ma questa classe accoglie poi il 27.1% dei settori lunghi 100 m e solo il 25% quando la lunghezza è di 200, 300 e 400 m. A 600 m scende al 12.5% e questa classe scompare quando i settori raggiungono gli 800 m.

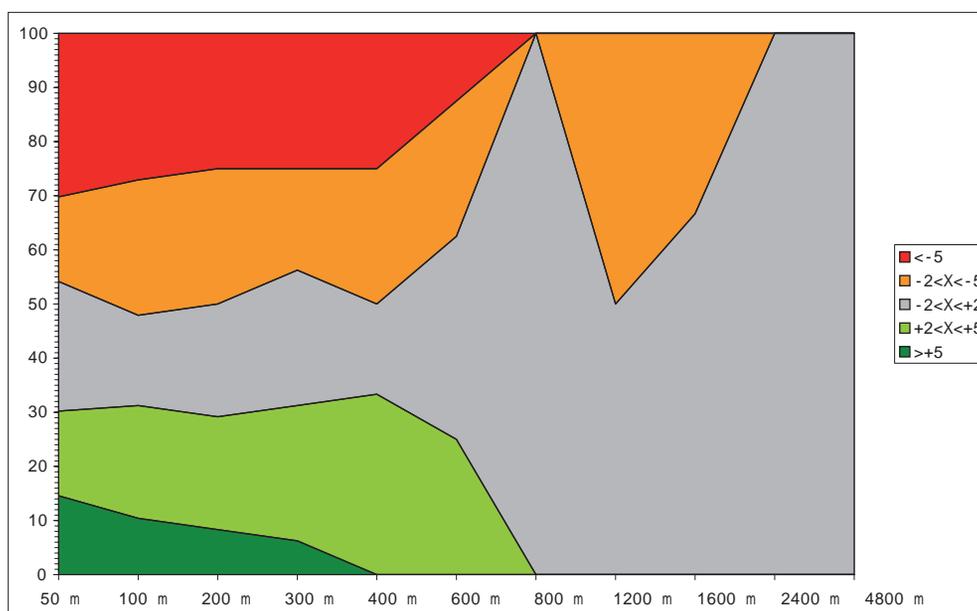


Figure 13 - Follonica: frequenza delle varie classi della Regione Toscana per differente lunghezza dei settori.

Anche la classe *Probabile erosione* registra variazioni notevoli: parte con il 15.6% a 50 m, è il 25% a 100, 200, 400 e 600 m, ma scende al 18.8% a 600 m. Questa classe non è presente quando i settori hanno una lunghezza di 800 m, ma salta al 50% a 1200 m, per scomparire poi alle successive fusioni.

La classe *Stabile* raccoglie inizialmente il 24% dei settori, per ridursi immediatamente al 16.7% a 100 m; oscilla poi fra questo valore e il 37.5% nelle successive espansioni fino a 600 m, ed è l'unica classe presente (100%) per settori lunghi 800 m, ma scompare ai 2400 m.

I settori in *Avanzamento* sono frequenti all'analisi a 50 m (14.6%) ma si riducono progressivamente per scomparire poi ai 400 m.

Anche la classe *Probabile accrescimento* mostra importanti cambiamenti: parte con 15.6%, raggiunge il 33% a 400 m, ma dopo un valore del 25% a 600 m non è più presente.

Conclusioni

E' stato analizzato lo spostamento della linea di riva in due tratti del litorale toscano applicando il metodo dell'Analisi della Variazione Areale della spiaggia emersa per settori di lunghezza crescente da 50 a 4800 m. I risultati, in termini di percentuale di settori in erosione, variano in modo sostanziale con il variare della lunghezza dei settori, senza che sia stato possibile riconoscere una regola generale, salvo la presenza di alcune *risonanze* per settori di lunghezza multipla.

L'Analisi della Variazione Areale per settori estesi filtra le variazioni ad alta frequenza spaziale della linea di riva, impedendo il riconoscimento di *hot spot* erosivi. La cancellazione dell'erosione del settore n. 24 a Punta Ala per analisi con scala superiore ai 50 m ne è una prova.

Riducendo la risoluzione (settori più lunghi) i settori con valori, sia positivi che negativi, molto elevati annullano i settori adiacenti, ma ovviamente producono spostamenti medi più moderati.

Il risultato finale della fusione dei settori è la creazione di un unico settore che porta ad affermare che il 100% del litorale è in accrezione o in erosione.

In ogni caso, in entrambi i tratti di litorale analizzati, entro “ragionevoli” valori di scala (i.e. 400 m) le percentuali non cambiano in modo significativo: la percentuale di settori in erosione oscilla entro una fascia del 4.1% a Punta Ala, mentre l’oscillazione è solo del 3.1% a Follonica, sebbene quest’ultimo tratto di litorale abbia una *Uniformità* minore (0.82 contro 0.91).

Se i valori di spostamento della linea di riva devono essere inseriti in classi, come qui fatto utilizzando quelle create per classificare il litorale toscano, i risultati sono ancor più influenzati dalla scala delle indagini.

Al momento, non è stato possibile definire una scala ottimale per un determinato tratto di litorale ed ancor meno una applicabile a tutte le spiagge.

Essendo i risultati “sensibili alla scala” ogni confronto fra tratti di litorale diversi dovrebbe essere effettuato solo utilizzando la stessa scala di analisi, ed anche ciò non garantisce di ottenere risultati affidabili.

Un criterio di classificazione più efficace potrebbe non solo basarsi sulla percentuale di settori in erosione ad una determinata scala di analisi, ma tenere conto anche della variabilità lungo riva delle tendenze, in termini di differenza media in valore assoluto fra settori adiacenti o di *Uniformità* (*U*). La necessità di avere informazioni omogenee per grandi aree geografiche, come le coste europee o quelle del Mediterraneo, per monitorare i cambiamenti globali in atto ed impostare opportune strategie di Gestione Integrata della Zona Costiera condivise a livello sovra-nazionale, impone lo sviluppo, non solo di tecniche di monitoraggio efficaci ed applicabili ai vari contesti, come quelle basate sul telerilevamento, ma anche di idonei protocolli di elaborazione dei dati. In questo senso il presente lavoro intende richiamare l’attenzione dei ricercatori e degli amministratori sulla scarsa affidabilità di un confronto fra dati non omogenei e sulla necessità di sviluppare metodi di elaborazione e di sintesi dei dati più oggettivi.

Ringraziamenti

Ricerca svolta nell’ambito dell’Operazione Quadro Regionale BEACHMED-e, Sottoprogetto OpTIMAL.

Bibliografia

- Aminti P., Cammelli C., Cappiotti L., Jackson N.L., Nordstrom K.F. e Pranzini E. (2004) - *Evaluation of beach response to submerged groin construction at Marina di Ronchi, Italy, using field data and a numerical simulation model*. J. Coastal Research, 33: 99-120.
- Aminti P., Cipriani L.E. e Pranzini E. (2002) - *Beach erosion control along the Golfo di Follonica (Suthern Tuscany): actual hard protections vs. potential soft solutions*. Littoral 2002, 6th Int. Symp., Porto, Portogallo. Pp.355-363.
- Aminti P., Pruszek Z. e Zeidler R. (1995) - *Multiscale shore variability at two coasts*. Proc. Int. Conf. On Coastal Research in Terms of Large-Scale Experiments, Coastal Dynamics '95, Gdansk, Poland, pp. 617-628.
- Anfuso G. e Garcia F-J. (2005) - *Morphodynamics characteristics and short-term evolution of a coastal sector in SW Spain: implications for coastal erosion management*. J. Coastal Research, 21: 1139-1153.
- Bartolini C., Cipriani L.E., Pranzini E., Sargentini M. (1989) - *Caratteristiche geomorfologiche ed evoluzione della linea di riva del litorale toscano e criteri di lettura*. In: “Coste toscane”, Regione Toscana. pp. 33-56.
- Bartolini C., Pranzini E., Lupia Palmieri C. e Caputo C. (1977) - *Studi di geomorfologia costiera: IV - L'erosione del Golfo di Follonica*. Boll. Soc. Geol. It., 96: 87-116.
- BEACHMED, 2004. *Quaderno tecnico n. 3*. Roma, pp. 278.
- Carli S., Iandelli N., Pranzini E. e Vitale G. (2006) - *L'erosione del litorale toscano*. Operazione Quadro Regionale BEACHMED-e, Sottoprogetto OpTIMAL, www.beachmed.it
- Bowman D. e Pranzini E. (2007) - *Beach morphodynamics under draining conditions*. Coastal Engineering, 54: 791-800.
- Courtney A.S., Jesse E.M. e Jeffrey H.L. (2006) - *Nearshore shore-oblique bars, gravel outcrops, and their correlation to shoreline change*. Marine Geology, 233: 63-79.
- Esteves L.S., Williams J.J. e Dillenburg S.R. (2006) - *Seasonal and Interannual influences on the patterns of shoreline changes in Rio Grande do Sol, Southern Brazil*. J. Coastal Research, 22: 1076-1093.
- Gulliver F.P. (1896) - *Cuspate forelands*. Geol. Soc. America Bull., 7: 399-422.

- Guza R. e Inman D. (1975) - *Edge waves and beach cusps*. J. Geophysical Research, 80: 2997-3012.
- Hicks D.M., Green M.O., Smith R.K., Swales A., Ovenden R. e Walsh J. (2002) - *Sand volume change and cross-shore sand transfer, Mangawhai Beach, New Zealand*. J. Coastal Research, 18: 760-775.
- Jeffrey H.L., Amy S.F. e Charlene S. (2006) - *Reversing storm hotspots on sandy beaches: Spatial and temporal characteristics*. Marine Geology, 226: 261-279.
- Krause G. e Soares C. (2004) - *Analysis of beach morphodynamics on the Bragantian mangrove peninsula (Pará, North Brazil) as prerequisite for coastal zone management recommendations*. Geomorphology, 60: 225-239.
- Morton R.A., Miller T. e Moore L. (2005) - *Historical shoreline changes along the US Gulf of Mexico: a summary of recent shoreline comparisons and analyses*. J. Coastal Research, 21: 704-709.
- Norcross Z.M., Fletcher C.H. e Merrifield M. (2002) - *Annual and interannual changes on a reef-fringed pocket beach: Kailua Bay, Hawaii*. Marine Geology, 2002: 553-580.
- Nordstrom K.F. (2000) - *Beaches and dunes of developed coasts*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 338.
- Pranzini E. e Rossi S. (2000) - *L'erosione del litorale di Punta Ala: un caso di naturale riequilibrio morfologico*. Studi costieri, 3: 3-27.
- Pye K. e Blott S.J. (2006) - *Coastal processes and morphological change in the Dunwich-Sizewell area, Suffolk, UK*. J. Coastal Research, 22: 453-473.
- Regione Toscana (1985) - *Coste toscane*. Firenze, pp. 62, con 14 carte alla scala di 1:5.000 con l'evoluzione della linea di riva dal 1938.
- Rogers S.S., Sandweiss D.H., Maasch K.A., Belknap D.F. e Agouris P. (2004) - *Coastal change and beach ridges along the Northwest coast of Peru: image and GIS analysis of the Chira, Piura, and Colán beach-ridge plains*. J. Coastal Research, 20: 1102-1125.
- Różyński G. (2004) - *Long-term shoreline response of a nontidal, barred coast*. Coastal Engineering, 52: 79-91.
- Schwab W.C., Theiler E.R., Allen J.S., Foster D.S., Swift B.A., Denny J.F. e Danforth W.W. (1999) - *Geologic mapping of the nearshore area offshore Fire Island, New York*. Coastal sediments '99, New York. Amm. Soc. Civili Eng.: 1552-1567.
- Short A.D. e Masselink G. (1999) - *Embayed and structurally controlled beaches*. In Short A.D. (edit) Handbook of beach and shoreface morphodynamics, Wiley, pp.230-250.
- Silvester R. e Hsu J.R.C (1993) - *Coastal stabilization. Innovative concepts*. PRT Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp 578.
- Sonu C.J. (1968) - *Collective movement of sand in littoral environment*. Proc.11th Conf. Coastal Eng., London, pp. 373-400.
- Tanner W.F. (1975) - *Beach process*. Berrien County, Michigan. J. Great Lakes Res., 1: 171-178.
- Thieler E.R. e Martin D. (2003) - *The Digital Shoreline Analysis System, Version 2.0: Shoreline change measurement software extension for ArcView*. US Geol. Surv. Open-File Report 03-076.
- White K. e El Asmar H.M. (1999) - *Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper imagery, an example from the Nile Delta*. Geomorphology, 29: 93-105.

Manoscritto ricevuto il 27/11/2007, accettato il 18/1/2008.