

## Studio dell'evoluzione del litorale pisano tramite rilievi con GPS differenziale (2008-2014)

Nicola Casarosa

nicolacasarosa@hotmail.com

### Riassunto

I processi erosivi, già in atto alla fine del '800 sul litorale pisano, hanno subito un'intensa accelerazione nei primi anni '20 del secolo scorso, con profonde differenze fra i due tratti di litorale posti a nord e sud della foce del F. Arno. Rilievi effettuati fra il 2008 e il 2014 hanno permesso di evidenziare scostamenti dai trend "storici" di spostamento medio della linea di riva rispetto al periodo precedente 1938-2004.

Il tratto meridionale presenta, nel suo insieme, una leggera rotazione con una parte centrale mediamente stabile ed i due estremi con evoluzione opposta (rispettivamente +1 m/a tratto estremo Sud e -2 m/a tratto estremo Nord). Complessivamente si ha una progradazione media pari +0,33 m/a, contro quella di +0,61 m/a del periodo 1938-2004.

La costa posta a nord di Bocca d'Arno può essere divisa in due parti: fino alla foce del F. Serchio è caratterizzata da una forte erosione (-1,99 m/a), mentre quella che si spinge fino a Torre del Lago risulta in evidente progradazione (+6,63 m/a).

Fra le foci dell'Arno e del Serchio alcune opere di difesa realizzate negli anni '60 e all'inizio di questo secolo interagiscono con la dinamica sedimentaria: la spiaggia posta subito a nord di Bocca d'Arno è stata stabilizzata all'inizio degli anni 2000 con pennelli prolungati con setti sommersi, mentre quella posta fra il Gombo e il Serchio mostra una crescente accelerazione dei processi erosivi nonostante la presenza di vecchie scogliere parallele e di nuove opere realizzate con geocontenitori. A nord del pennello di foce del F. Morto Nuovo l'arretramento medio della linea di riva procede con un tasso di circa 5 m/a, con importanti demolizioni degli apparati dunali frontali, raggiungendo nel periodo 2008-2014 un valore mai registrato nel periodo 1938-2004.

**Parole chiave:** linea di riva, GPS differenziale, difese costiere, litorale pisano

### Abstract

*The erosive processes, started at the end of the XIX century on the Pisan coast, have undergone intense acceleration in the early '20s of last century, with strong differences between the two coastal segments to the north and south of the mouth of the R. Arno. Surveys carried out between 2008 and 2014 allowed to evidence deviations from the average "historical" trend of the shoreline displacement from the previous period 1938-2004. The southern part presents, as a whole, a slight rotation with a stable central part and the two extremes with opposite evolution (respectively +1 m/yr to extreme tract South and -2 m/yr to extreme tract North). Overall, there is an average progradation of +0.33 m/yr, compared to +0.61 m/yr of the 1938-2004 period. The coast to the North of Bocca d'Arno can be divided into two parts: the one to the mouth of R. Serchio is characterized by a strong erosion (-1.99 m/yr), while the one that goes up to Torre del Lago shows a strong progradation (+6.63 m/yr). Between the mouths of the R. Arno and the R. Serchio some shore protections made in the 60s and at the beginning of this century interact with the sedimentary dynamics: the beach just north of Bocca d'Arno was stabilized*

*at the beginning 2000s with short groins with submerged extensions, while the stretch between Gombo shows an increasing acceleration of erosive processes despite the presence of old detached breakwaters and new structures built by geobag. To the North of the jetty of the R. Morto Nuovo the average retreat of the shoreline proceeds at a rate of approximately 5 m/yr, with foredune demolition and reaching, over the period 2008-2014, a value never recorded in the period 1938-2004.*

**Key words:** shoreline, differential GPS, shore protection, Pisa coast

## Introduzione

Il litorale pisano, che si estende per circa 25 km dal Porto di Livorno a Marina di Torre del Lago (Lucca), mostra caratteristiche geomorfologiche e paesaggistiche uniche, nonché diverse tendenze evolutive che spiegano l'elevato numero di studi condotti sulla variazione della linea di riva in questa area a partire dai primi del '900; effettuati essenzialmente tramite documenti cartografici storici, rilievi diretti e immagini telerilevate (Toniolo, 1910, 1927; Albani, 1940; Vittorini, 1977; Federici, 1983; Palla, 1983a, 1983b; Pranzini, 1983, 2001, 2004, 2008; Noli e Franco, 1989; Milano, 1994; Cipriani et al., 2001; Bini et al., 2008; Sarti et al., 2010). La Provincia di Pisa dal 2008 ha attivato un servizio di monitoraggio costiero che ha permesso di acquisire annualmente, nel periodo 2008-2014, la linea di riva del litorale pisano e la morfologia dei fondali antistanti tramite rilievi batimetrici. Il presente lavoro si inserisce nella numerosa bibliografia con dati inediti ed aggiornati del litorale pisano e si propone di quantificare i tassi di spostamento medio della linea di riva dell'ultimo decennio.

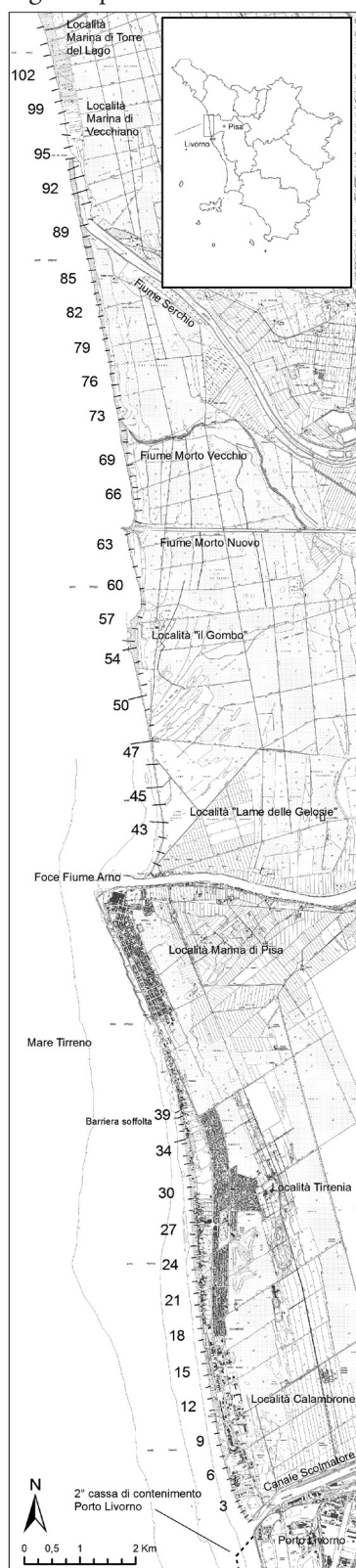
L'indagine impostata su di un arco temporale ridotto di sei anni, ma con frequenza di monitoraggio annuale e una "alta" risoluzione spaziale delle indagini (Pranzini e Simonetti, 2008), si discosta dai numerosi lavori precedenti basati su dati con frequenza temporale superiore all'anno e permette di quantificare variazioni contenute dei tassi di spostamento medio della linea di riva ed evidenziare i meccanismi di trasporto litoraneo per settori di ridotta lunghezza. Il bilancio areale complessivo 2008-2014, esteso ai due tratti meridionale e settentrionale del litorale pisano, permette inoltre di valutare eventuali scostamenti nei trend storici individuati da studi precedenti e fornisce una stima aggiornata delle variazioni areali di spiaggia emersa in relazione alla presenza in alcuni tratti di strutture antropiche e difensive.

## Inquadramento geografico

Il litorale pisano, posto nel tratto meridionale dell'unità fisiografica costiera della Toscana settentrionale che si estende da Livorno a Bocca di Magra (Aiello et al., 1976), presenta due corsi d'acqua principali, i fiumi Arno e Serchio (Fig. 1). La foce dell'Arno divide il litorale in un tratto meridionale ed uno settentrionale, delimitati rispettivamente dal Canale Scolmatore e dal Canale della Bufalina. A ridosso dei depositi di spiaggia attuale la pianura costiera presenta numerosi cordoni dunali (Federici e Mazzanti, 1993; Pranzini, 2007; Sarti et al., 2010), che risultano antropizzati e parzialmente demoliti nel tratto meridionale, mentre sono preservati in quello settentrionale. Il settore meridionale è caratterizzato dalla presenza delle Secche della Meloria, poste a circa 3 miglia a largo di Livorno: si tratta di un banco roccioso ampio circa 40 km<sup>2</sup>, a forma di triangolo equilatero, con profondità variabile da un minimo di 1.5 m fino a circa 50 m (Casarosa et al., 2011), che condiziona la propagazione del moto ondoso a costa. Le località di Calambrone, Tirrenia e Marina di Pisa, interessate da numerose infrastrutture turistiche, mostrano un elevato grado di antropizzazione, mentre il tratto posto a nord della Foce dell'Arno mantiene discrete caratteristiche di naturalità.

L'evoluzione geomorfologica del litorale nell'ultimo secolo è strettamente correlata all'evoluzione del delta dell'Arno ed alle sue variazioni nel trasporto solido (Toniolo 1910, 1927; Pranzini, 1983, 1989, 2001; Milano, 1986, 1994). Dopo una importante fase di costruzione con pronunciato avanzamento dell'apparato deltizio verso mare e progradazione delle ali verso sud (Marina di Pisa e Tirrenia) e verso nord (Lame delle Gelosie, Gombo, fino alla foce del Fiume Serchio) ha seguito una intensa e veloce fase erosiva causata essenzialmente dalla drastica diminuzione del trasporto solido. L'evoluzione successiva del litorale pisano è tendenzialmente *relitta*, cioè strettamente legata allo smantellamento progressivo della morfologia aggettante del delta e la redistribuzione del materiale eroso verso tratti di litorale sempre più distanti dall'area di immissione (Pranzini, 1989). Questa fase provoca la continua progradazione delle spiagge di Calambrone,

complessivamente in avanzamento negli ultimi 100 anni, e lo spostamento verso Marina di Vecchiano di ingenti quantitativi di materiale sabbioso.



Marina di Pisa, per la salvaguardia dell'abitato, è stata pesantemente difesa (Aminti et al., 2003) ed ha mantenuto la posizione della linea di costa degli anni '20 del secolo scorso. La cronologia degli effetti erosivi iniziata dall'apice deltizio e progressivamente migrata verso le "ali" settentrionale e meridionale del delta corrisponde alla successiva migrazione delle difese costiere nell'area. La costruzione della foce armata nel 1926, necessaria per equilibrare la elevata asimmetria della foce fluviale e per ridurre i problemi di insabbiamento, ha intensificato i processi erosivi nel tratto sottoflutto, specialmente nelle spiagge delle Lame delle Gelosie (Cipriani et al., 2001; Bini et al., 2008) con tassi di arretramento che tra il 1928 e il 1944 sono stati di circa 20 m/a, ed ha generato una complessiva riduzione dell'esiguo trasporto solido del Fiume Arno verso il tratto settentrionale del litorale pisano. I processi erosivi amplificati dalla costruzione della foce armata si sono rafforzati sulla località balneare di Marina di Pisa con la completa scomparsa della spiaggia, che ha portato nel 1928 alla costruzione di un muro radente in massi a protezione dell'abitato. Dal 1938 al 1965 si è visto la costruzione, da nord verso sud, di 10 scogliere parallele emerse davanti a Marina di Pisa, e dal 1975 al 2014 (Fig. 3) di una seconda serie di barriere emerse ed una soffolta al confine meridionale del centro abitato. La costruzione o sostituzione dei sistemi difensivi non si conclude con il secolo scorso: fra il 2001 e il 2003 sono stati realizzati 9 pennelli, alcuni estesi come setti sommersi, fra la foce dell'Arno e il Gombo, nel 2007 viene completata la sostituzione delle barriere emerse n°6 e n°7 con un sistema sperimentale sommerso associato a spiaggia in ghiaia, e fra il 2015 e il 2016 la sostituzione delle barriere emerse n°4 e n°5 con il medesimo sistema.

Al Gombo, nell'inverno-primavera 2009, il Servizio Difesa del Suolo della Provincia di Pisa ha attuato un sistema difensivo sperimentale a basso impatto ambientale il cui scopo era quello di diminuire il trasferimento di materiale sabbioso verso nord. Il sistema è costituito da un tombolo artificiale delimitato da geotubi ed in parte reso semi-emerso da ripascimento di materiale sabbioso all'interno, due pennelli di geotubi a nord, salpamento della barriera più settentrionale (resa soffolta) ed infine una duna artificiale costruita con materiale sabbioso dragato dalla barra esterna (nel settore 58) allo scopo di difendere e di creare un apporto di materiale sabbioso al sistema.

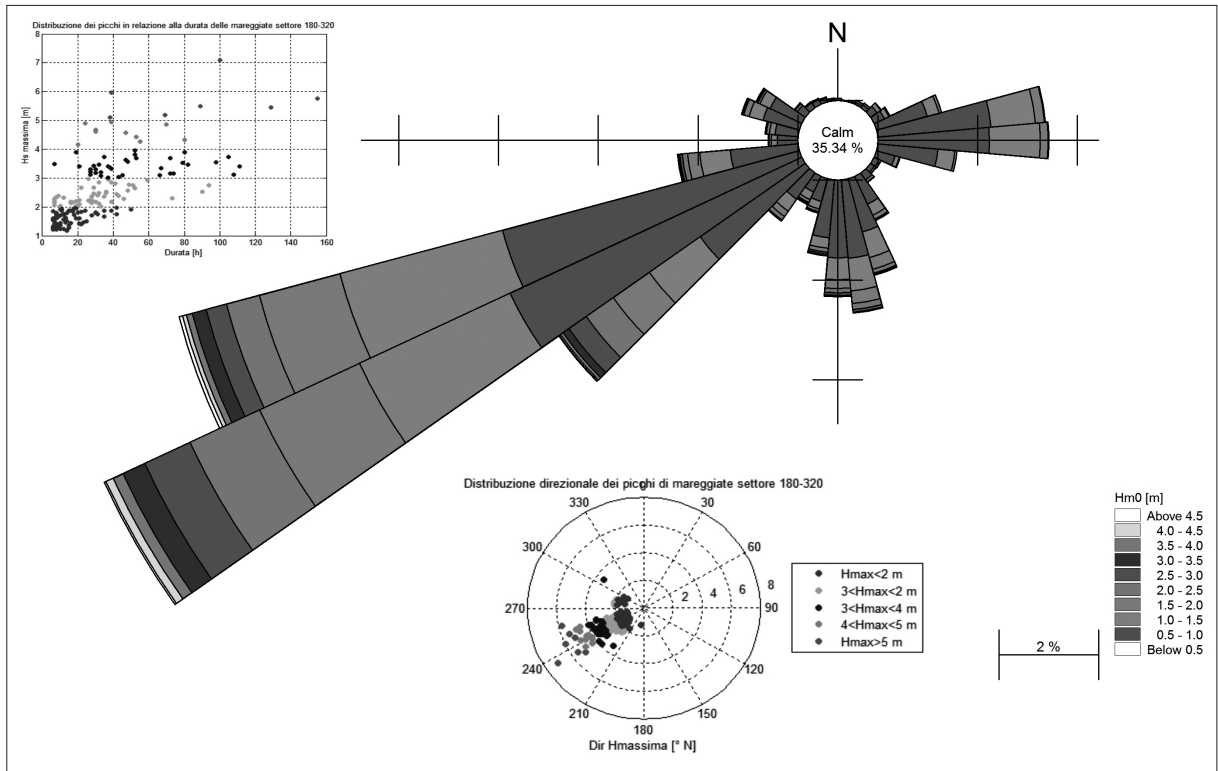
### Clima meteo-marino e trasporto litoraneo:

Gli studi sul clima meteo-marino condotti dagli anni '70 in poi mostrano per il litorale pisano una polarizzazione delle mareggiate principali dal settore 240°-270°N (Cipriani et al., 2001) in accordo con il regime dei venti, i dominanti appartengono infatti al III quadrante, con massimi per le direzioni OSO e SO (Rapetti e Vittorini, 1978).

Studi più recenti sul clima marino al largo (Studio di progettazione della Provincia di Pisa, Servizio Difesa Suolo "Adeguamento idraulico del Canale Scolmatore d'Arno – Studio morfodinamico ed analisi degli effetti della nuova foce armata, dicembre 2012") del tratto di litorale pisano meridionale, effettuati sulla base dei dati della boa di Gorgona relativi

Figura 1. Inquadramento geografico del litorale pisano e delimitazione dei settori di analisi.

al periodo compreso tra il 1 ottobre 2008 e il 1 maggio 2012, evidenziano un trend consolidato con risultati compatibili con gli studi passati. L'analisi direzionale dei dati (eseguita tramite il software MIKE 21), accorpata per direzione media di provenienza e per classe di altezza, mostrano come le onde più frequenti e di maggior intensità provengano nettamente dal settore sud-ovest. Nel dettaglio, i dati della boa (Fig. 2) mostrano come le calme ( $H_s < 0,5$  m) costituiscano il 35% del totale delle registrazioni, le onde con altezza compresa tra 0,5 m e 2 m rappresentano il 57% del totale e provengono per più della metà (30% del totale) dal settore  $220^\circ$ - $260^\circ$  N. Le onde di altezza compresa fra 2 e 4 m provengono quasi interamente dal settore  $220^\circ$  -  $260^\circ$  N (3,2% del totale contro il 3,6% valutato sull'intera rosa), dato che risulta ancor più evidente per quelle con altezza maggiore di 4 m (pari a 0,51% del totale per il settore  $220^\circ$ - $260^\circ$  N contro lo 0,53% se valutato su tutte le direzioni).



**Figura 2. Inquadramento meteo marino.**

L'analisi sugli eventi di mareggiata conferma la predominanza del settore di provenienza  $220^\circ$ - $260^\circ$  N, con il 93% delle mareggiate che si verificano ogni anno (in media 48 eventi). Dal settore  $270^\circ$ - $320^\circ$  N si sono verificati in media meno di 3 eventi ad anno, mentre dal settore  $210^\circ$ - $180^\circ$  N meno di un evento ad anno (Fig. 2). La stima del trasporto solido medio annuo e degli effetti (in termini di peso sul trasporto complessivo) dovuti alle singole onde è stata condotta mediante il modulo LITDRIFT, di tipo monodimensionale, che in base alle caratteristiche del profilo (batimetria, caratteristiche granulometriche) e del moto ondoso consente di stimare il trasporto solido dovuto a ciascuna onda e di conseguenza il valore medio annuo; mentre l'applicazione del modello LITPACK ha permesso l'individuazione della rosa del clima ondoso sottocosta non in termini di frequenza delle mareggiate ma in termini di peso delle stesse sul trasporto litoraneo annuo. Le analisi della risultante dell'energia del moto ondoso evidenziano come il trasporto litoraneo verso NO sia nettamente prevalente rispetto a quello verso SE. Le onde principalmente responsabili del trasporto litoraneo in questo tratto meridionale sono quelle provenienti da libeccio con altezza media  $1\text{ m} < H_s < 3$  m ed in misura minore quelle più alte ( $3\text{ m} < H_s < 5$  m; Boninsegni e Mori., 2014).

Studi passati sulla composizione provenienza e dispersione delle sabbie (Gandolfi e Paganelli, 1975) e più recenti sullo studio delle linee di riva (Bini et. al., 2008; Sarti et al., 2010) evidenziano per il tratto meri-



Figura 3. Morfologia e sezioni batimetriche del tratto meridionale del litorale pisano.

dionale una alimentazione sia da sud, dalle “Secche delle Melorie”, che da nord grazie al rimaneggiamento dei fondali di Marina di Pisa e dalle spiagge di Tirrenia; mentre a nord della foce dell’Arno si ha una preponderanza di eventi di provenienza da 240° ed un trasporto litoraneo diretto essenzialmente verso nord (Rapetti e Vittorini, 1978, 1983; Baldini e Rigattieri, 1983; Baldini et al., 1983; Pranzini, 2008).

### **Inquadramento morfo-batimetrico**

L’analisi quantitativa dell’evoluzione della linea di riva è stata integrata con descrizioni qualitative dei fondali allo scopo di creare una connessione tra le variazioni osservate e la morfologia della spiaggia sommersa. I rilievi batimetrici eseguiti dal 2008 al 2014 dal Servizio Difesa Suolo della Provincia di Pisa permettono di suddividere, dal punto di vista morfo-batimetrico, i fondali del litorale in tre settori, due meridionali (a sud della foce dell’Arno; Fig. 3) ed uno settentrionale (a nord della stessa foce; Fig. 4). Il primo settore meridionale, che si estende dal Canale Scolmatore fino a Tirrenia (in prossimità di una barriera soffolta; Fig. 3) mostra fondali a bassissima pendenza costituiti da sedimenti molto fini (da sabbia fine a sabbia molto fine). In questo tratto si registrano profondità esigue in relazione alla distanza dalla costa: -1,5 metri a 200 metri e -3 m a circa 450 metri; la batimetrica dei 10 m viene raggiunta ad una distanza dalla costa di circa 1,3 – 1,5 km. Spostandoci verso l’abitato di Tirrenia, i fondali mostrano caratteristiche ben strutturate con alternanza continua di barre e truogoli per una fascia mediamente di 200 metri dalla costa. La profondità di -3 m si raggiunge in media a circa 170 m dalla linea di riva e la granulometria degli arenili diventa più grossolana, si passa infatti da sabbia fine a sabbia media. Le sezioni batimetriche (Fig. 3) mostrano verso nord un graduale incremento della pendenza nel primo tratto della spiaggia sommersa, in virtù dell’aumento della granulometria e dei primi effetti erosivi indotti dalla presenza delle prime opere emerse di difese costiere (sezioni a nord della barriera soffolta). Verso Marina di Pisa il litorale risulta inizialmente interessato da piccole barriere emerse distaccate, costruite a più riprese dal 1975 al 2001 (Bini et al., 2008), dove la linea di costa risulta artificialmente immobile, per la presenza dei sistemi difensivi emersi, ma con fondali ancora interessati da morfologie deposizionali, con barre e esigue profondità in prossimità del piede delle strutture foranee. Il passaggio verso l’abitato di Marina di Pisa (secondo tratto meridionale) mostra caratteristiche dei fondali completamente differenti e peculiari. L’abitato, totalmente interessato per la sua lunghezza da opere di protezione (scogliera radente e barriere emerse, sommerse distaccate e pennelli), presenta una linea di riva immobile e consolidata dagli anni ‘20. La massiccia presenza di barriere emerse ha scongiurato un ulteriore arretramento della linea di costa (ed un abbandono dell’abitato), ma ha generato una concentrazione dei processi erosivi sui fondali antistanti, che hanno progressivamente incrementato la loro profondità (anche in relazione ai processi riflessivi innescati dalle barriere distaccate-emerse) che ora risulta essere tra i 6 e i 7 metri al piede delle dighe foranee di protezione dell’abitato (Fig. 3).

Il terzo settore, che si sviluppa in destra idraulica della foce dell’Arno fino al confine settentrionale della Provincia di Pisa (Fig. 4), ha subito anch’esso dagli anni ‘20 una intensa fase erosiva, con importanti arretramenti generalizzati della linea di costa. I fondali sono caratterizzati dall’alternanza di diverse barre sommerse fino alla isobata 6 m e da un canale continuo che si sviluppa da sud verso nord a profondità variabile tra 5 e 6 m. La spiaggia sommersa mostra una pendenza maggiore di quella del tratto meridionale, con i -3 m a circa 100-130 m dalla costa e i -10 m a circa 1,2 km.

### **Materiali e metodi**

Il Servizio Difesa Suolo della Provincia di Pisa ha condotto, fra il 2008 e il 2014 e con propria strumentazione e natanti, un monitoraggio dell’evoluzione del litorale pisano con il rilievo sia della posizione della linea di riva sia della morfologia dei fondali. In tutti la posizione è stata acquisita con GPS differenziale in modalità RTK (accuratezza x, y = 8 mm), mentre il rilievo batimetrico è stato eseguito con strumentazione single beam (accuratezza z = 15 mm). Il rilievo diretto ha permesso di eliminare l’errore indotto dall’interpretazione soggettiva della posizione della linea di riva su immagini telerilevate.

La linea di riva è stata rilevata con cadenza annuale nei mesi di giugno e luglio; la batimetria, sempre annualmente fra giugno ed agosto, con rilievi estesi dall’isobata 0 alla 10 m.

Nel presente lavoro le variazioni areali della spiaggia emersa e i tassi di spostamento della linea di riva vengono analizzati per intervalli biennali (2008-2010, 2010-2012 e 2012-2014) e per l’intero periodo 2008-2014. Il tratto di litorale che si estende a nord della barriera soffolta fino al porto di Marina di Pisa in sponda sini-

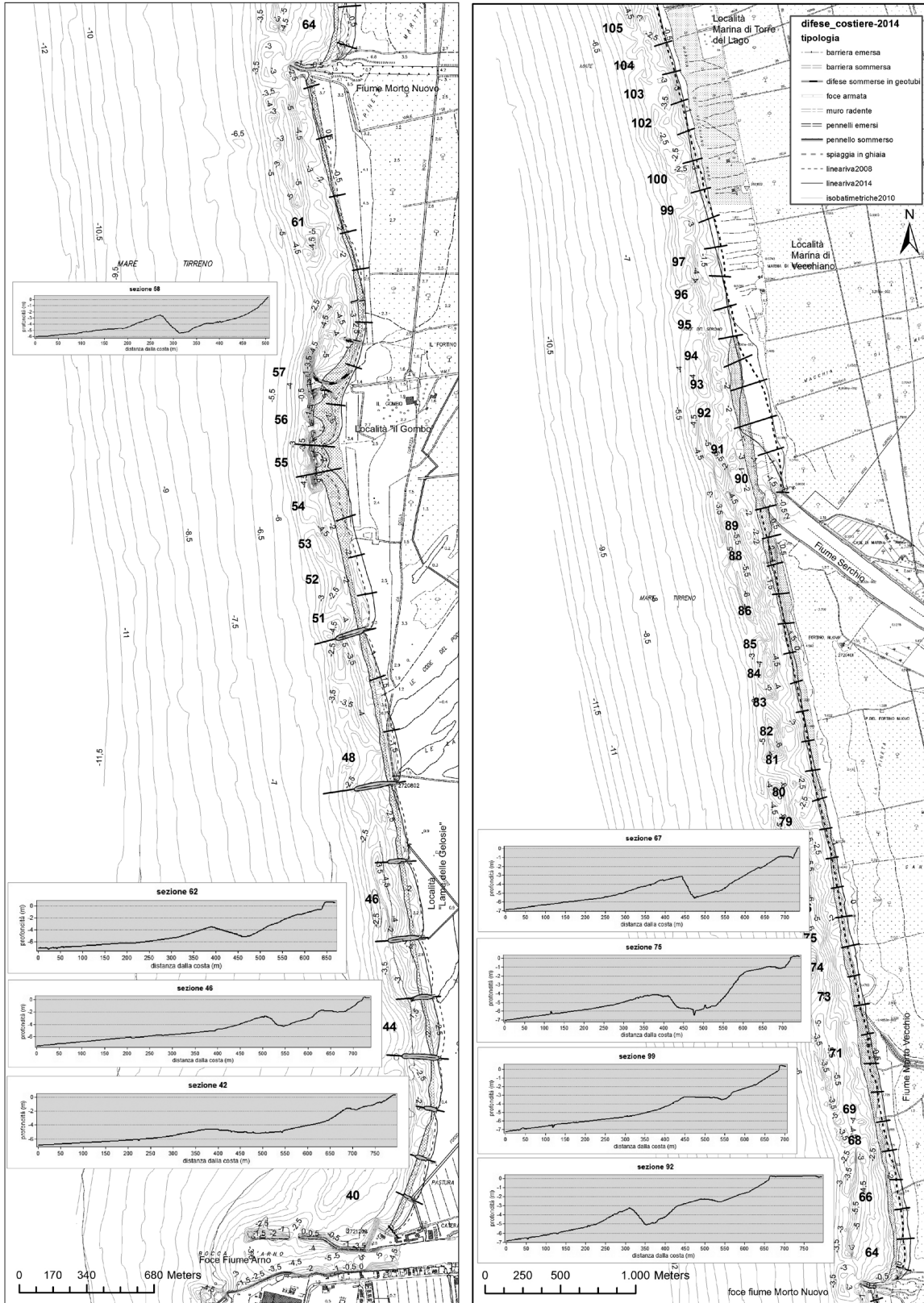


Figura 4. Morfologia e sezioni batimetriche del tratto settentrionale del litorale pisano.

stra del fiume Arno è stato escluso dallo studio in quanto interessato per tutta la sua lunghezza da numerose difese costiere che impediscono lo spostamento della linea di costa. La linea di riva del 2013 risulta completa fino al transetto numero 80, inoltre per evidenziare l'entità degli spostamenti della linea di costa degli ultimi 70 anni è stata inserita in alcuni elaborati grafici la linea di costa del 1938, che deriva da foto restituzione di riprese aeree I.G.M.

I dati topografici e batimetrici acquisiti nelle campagne di rilievo in formato x,y,z sono stati elaborati in ambiente GIS (ESRI Arc GIS, vers. 10) per la ricostruzione di modelli digitali del terreno (raster e DEM) necessari al calcolo areale della spiaggia emersa all'interno dei singoli settori. La rappresentazione digitale del fondale è stata utilizzata per la costruzione delle sezioni batimetriche oltre che per tracciare le isobate con equidistanza di un metro.

I rilievi topografici della linea di riva negli intervalli di tempo considerati sono stati analizzati suddividendo il litorale pisano (circa 25 km) in 105 settori di lunghezza media di 200 metri ad esclusione di tratti interessati da difese costiere come pennelli e barriere emerse e sommerse dove la lunghezza del settore è stata diminuita o aumentata in relazione alla distanza tra le singole opere. L'estensione dei singoli settori è stata scelta in relazione alla lunghezza del litorale pisano, alla necessità di evidenziare l'efficacia di sistemi di difesa costiera e alla cadenza temporale annuale dei rilievi delle linee di riva, con una "alta" risoluzione spaziale delle analisi come proposto da Pranzini e Simonetti (2008). Utilizzando come linea di riva di riferimento quella del 2008 ( $t_0$ ), è stata calcolata la variazione positiva o negativa di spiaggia emersa ( $m^2$ ) dal confronto con la linea di riva degli anni successivi. La variazione areale di spiaggia ( $m^2$ ) divisa per la lunghezza di ciascun settore ha dato lo spostamento medio della linea di riva (m), che suddiviso per i rispettivi intervalli temporali ha permesso di calcolare il tasso di spostamento medio annuo (m/a). Il bilancio areale complessivo tra la linea di riva 2008 e 2014 calcolato nei 4 settori "storici" del litorale pisano, 0-39 (tratto meridionale), 40-63, 64-89, 90-105 (tratto settentrionale) ha permesso di comparare i risultati del presente lavoro con quelli prodotti da Bini et al. (2008) sulla base del confronto di immagini aeree georeferenziate allo scopo di evidenziare eventuali variazioni nei trend storici.

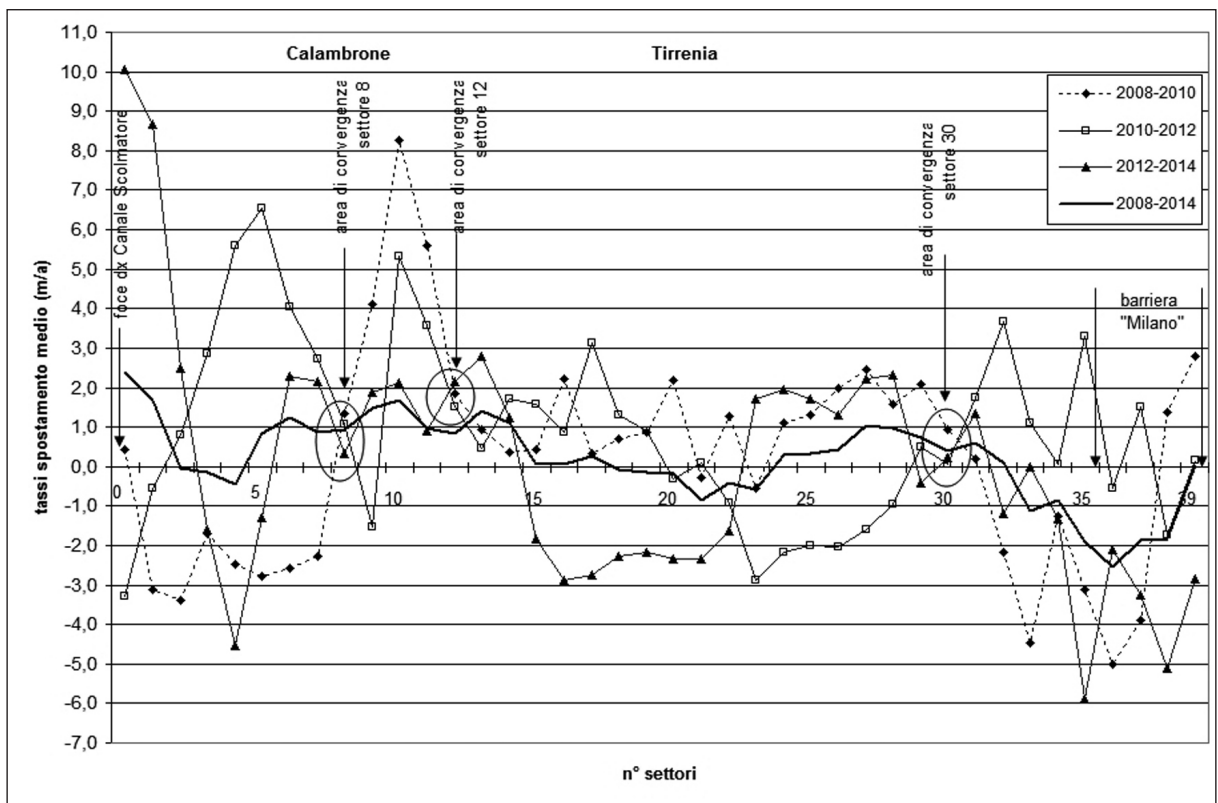


Figura 5. Tasso di spostamento medio annuo della linea di riva del tratto meridionale del litorale pisano.



### Evoluzione della linea di riva 2008 – 2014

Il tratto meridionale tra il settore 0 e 39 (cfr. Fig. 1) mostra entrambi gli estremi confinanti con tratti di costa interessati da strutture difensive antropiche: la terminazione meridionale, in sinistra idraulica del Canale Scolmatore, con due casse di contenimento del porto di Livorno costruite rispettivamente nel 2000 e nel luglio – agosto 2013, e quella settentrionale con la barriera soffolta seguita da numerose micro difese emerse presenti fino all'abitato di Marina di Pisa. Il tratto centro meridionale (località Tirrenia - Calambrone) risulta totalmente libero da difese costiere. La Figura 5 riassume il tasso di spostamento medio della linea di riva nei vari settori del tratto meridionale del litorale pisano. Fra il settore 0 e il settore 8, in località Calambrone, si ha un'accentuata variabilità sia di avanzamento che di arretramento della linea di riva nei rispettivi bienni, con variazioni nei pressi dei transetti prossimi alla foce di anche 10 m/a e -4,5 m/a. Verso nord, il tratto 8-12 mostra marcati valori di progradazione dal 2008 al 2014, anche se lo spostamento medio, sebbene di valore positivo, tenda a diminuire nel tempo (2008-2010: circa 8 m/a; 2010-2012: circa 5 m/a; 2012-2014: circa 2 m/a).

Il tratto successivo, dal settore 12 al 30 (lunghezza circa 3,7 km), mostra un segmento di costa compreso tra Calambrone e Tirrenia privo di strutture portuali o difensive e con alterne variazioni dello spostamento della linea di riva che vedono susseguirsi fasi erosive e deposizionali, ma con variazioni annuali contenute nell'ordine dei 2 m ed un bilancio complessivamente stabile. L'ultima zona si estende dal transetto 30 fino alla chiusura verso nord della cella soffolta (transetti 36 – 39 tratto di litorale delimitato da cella soffolta) e mostra una marcata variazione del trend delle curve di spostamento medio della linea di riva con valori compresi tra 4 m/a e -5 m/a ed un bilancio complessivamente negativo. Le 4 zone descritte, delimitate rispettivamente dal settore 8, 12 e 30, sono tratti dove nei diversi intervalli temporali la velocità di spostamento medio della linea di riva è rimasta pressoché costante e positiva nei periodi di studio: settore 8 circa 1,00 m/a, settore 12 circa 2 m/a e settore 30 circa 0,5 m/a e possono rappresentare aree di convergenza della linea di riva.

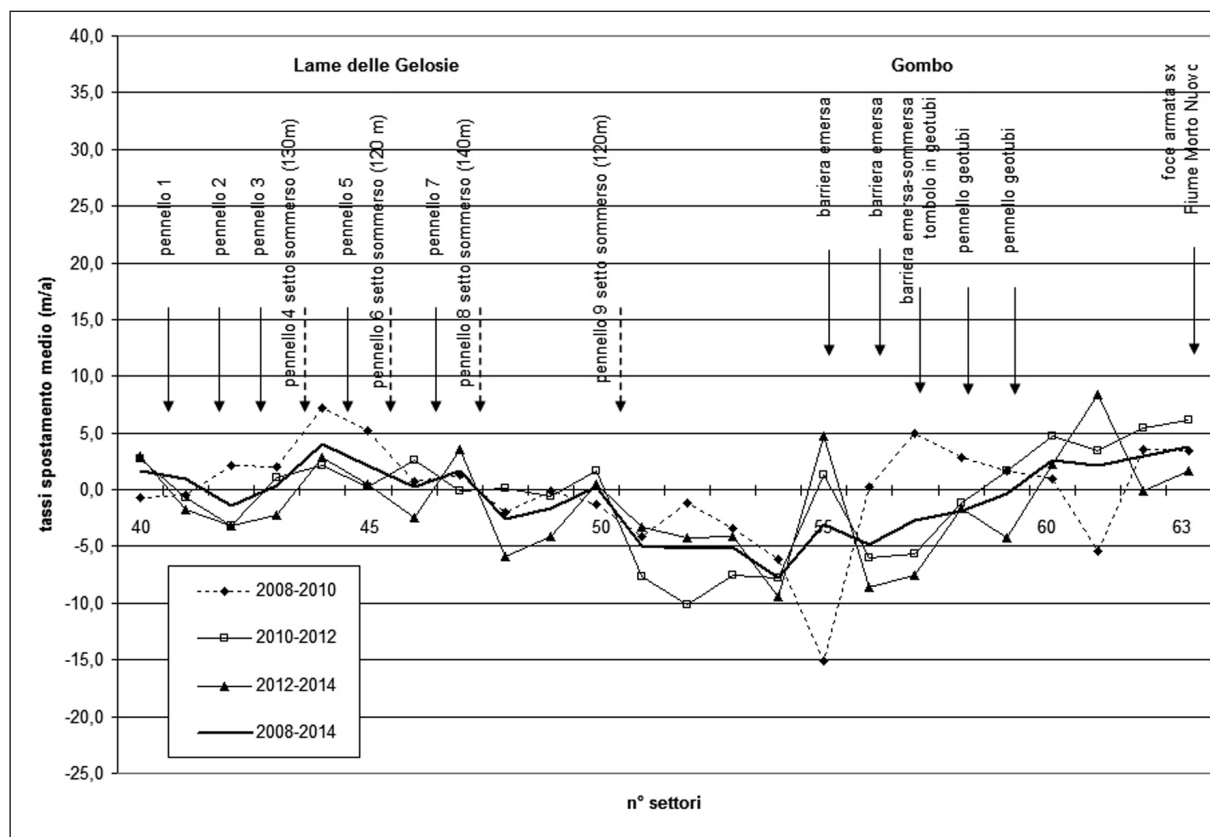


Figura 6. Tassi di spostamento medio della linea di riva del 1° tratto settentrionale del litorale pisano.

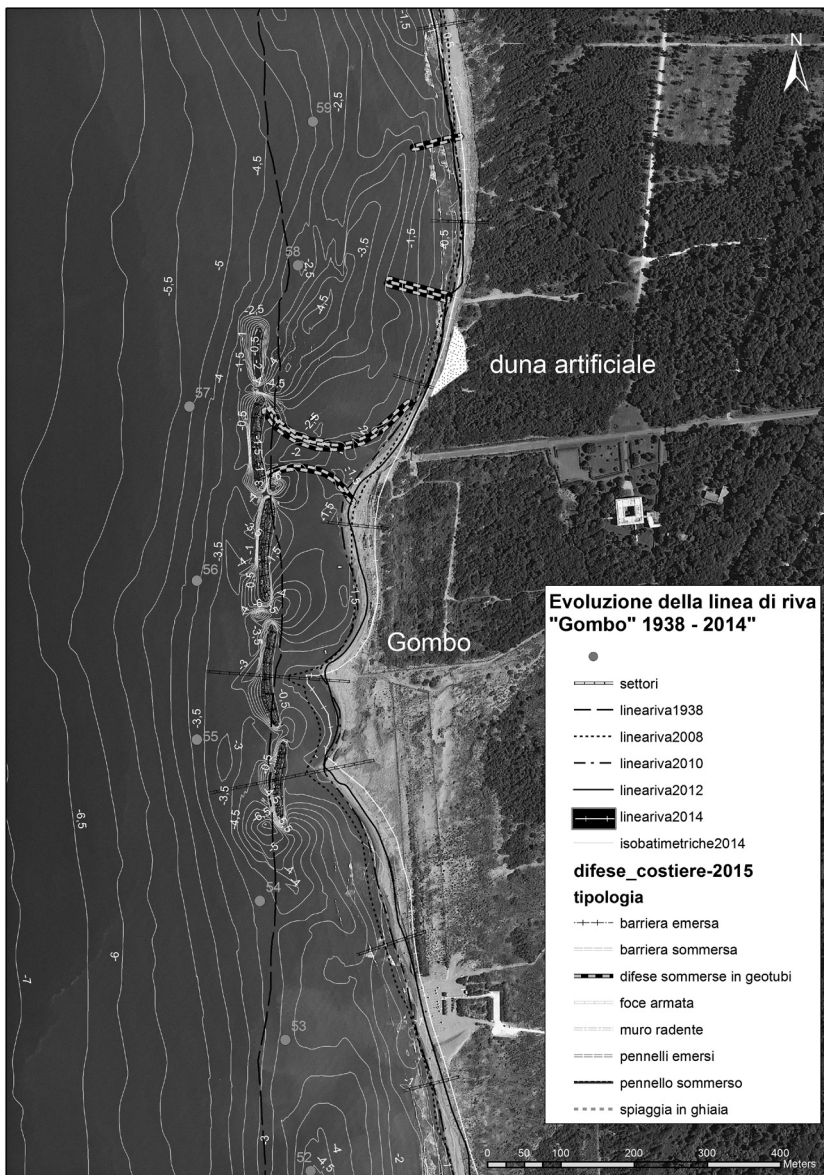
Le curve biennali del tratto 12–30 presentano un andamento caratterizzato dall'alternanza temporale e spaziale con tratti in arretramento ed avanzamento: la curva di spostamento medio 2010–2012 mostra un avanzamento di circa 1-2 m/a nei settori 13-21 ed una inversione di tendenza nei successivi transesti più settentrionali 21-30, con una fase di erosione mediamente di 2 m/a. La curva successiva del 2012–2014 mostra un trend simile ma invertito: una fase erosiva nel tratto 16–23 di circa 2 m/a ed una fase di avanzamento nel tratto seguente 24–30 di circa 2 m/a. I transesti più meridionali (13-21), che nel biennio 2010-2012 sono in avanzamento, mostrano nello stesso periodo transesti settentrionali in erosione (22-29), mentre nel biennio successivo 2012-2014 i transesti meridionali risultano in erosione e quelli settentrionali in avanzamento con velocità di spostamento particolarmente costanti. Questo sviluppo temporale ad impulsi alternati caratterizzato dalla migrazione dei processi deposizionali ed erosivi dai transesti più meridionali a quelli settentrionali, seguendo la sequenza temporale 2008-2014, può evidenziare una continua migrazione longitudinale del materiale sabbioso in accordo con quanto esposto dallo studio della direzione del trasporto solido.

I grafici delle Figure 6 e 8 mostrano le tendenze evolutive della parte settentrionale del litorale pisano (settori 40-105) nei diversi settori suddivisi in due tratti: il primo (Fig. 6) si estende dalla destra idraulica della foce dell' Arno fino alla sinistra idraulica della foce del Fiume Morto Nuovo, il secondo (Fig. 8) dalla destra idraulica della foce del Fiume

Morto Nuovo fino al Canale della Bufalina.

La spiaggia delle Lame delle Gelosie, a nord di Bocca d'Arno (settori 40–50) è da tempo interessata da intensi processi erosivi (Bini et al., 2008; Pranzini, 2008) ed è stata difesa con 9 pennelli di lunghezza variabile costruiti negli anni 2002 e 2003. I pennelli numero 1, 2, 3, 5 e 7 si estendono per 60 - 80 m con una testata tra l'isobata 1,5 m e 2,5 m, mentre i pennelli numero 4, 6, 8 e 9 sono provvisti di setto sommerso e lunghezza totale (emerso – sommerso) variabile tra 120 e 140 metri e testata che raggiunge i 3 m o 4 m di profondità.

Il grafico di Figura 6 mostra l'evoluzione della linea di riva in questo tratto: le curve rivelano un andamento simile nei vari bienni, con alternanza tra variazioni positive e negative in un intervallo ristretto di litorale di circa 3 km. In un primo tratto (settori 40 e 41) la linea di riva risulta variamente stabile, nel tratto successivo (43-47) è in avanzamento con valori variabili tra 1 e 7 m/a, mentre fino al settore 49



**Figura 7. Evoluzione della linea di riva nell'area del Gombo dal 1938 al 2014.**

la costa è in erosione con valori variabili tra -1 e -5 m/a. Il settore 50 mostra una rottura nel trend erosivo dei tratti precedenti, con una linea di riva generalmente stabile, mentre nei settori da 51 a 54 riprende il processo erosivo con valori compresi fra -1 e -10 m/a. I settori che si estendono da 54 a 63 vanno dal Gombo alla sinistra idraulica della foce del Fiume Morto Nuovo (Fig. 6); qui la posizione delle 5 barriere emerse (quella più settentrionale, come abbiamo visto, è stata ribassata nel 2009) ricade approssimativamente sulla linea di riva del 1938 (Fig. 7).

Il tasso di spostamento medio della linea di riva (Fig. 6) mostra in questa area un trend abbastanza simile, caratterizzato da una marcata erosione al Gombo (ad esclusione del biennio 2008-2010) a cui corrispondente una continua progradazione nei settori 59-63 nel 2010-2012 e nel 2012-2014 (fa eccezione il biennio 2008-2010 limitatamente ai settori 60 e 61 dove si osserva un brusco arretramento).

Spostandoci verso nord, in destra idraulica del Fiume Morto Nuovo i settori 64-66, (Fig. 8) mostrano un arretramento progressivo della linea di riva; si passa infatti da -5 m/a nel biennio 2008-2010, a -6,5 m/a in quello successivo, per arrivare fino a quasi -8 m/a nel biennio 2012-2014. Il tratto seguente (settori 67-89) che arriva alla foce del Serchio è caratterizzato da un'alternanza di settori in erosione ed avanzamento: nel 2008-2010 i settori 75-79 sono in erosione, 81-83 in avanzamento e 84-89 in erosione. Nel biennio successivo (2010-2012) i settori 75-78 sono stabili o in avanzamento, mentre i settori 79-85 risultano erosione e quelli fra 86 e 90 in avanzamento. L'alternanza di fasi alterne nei rispettivi settori durante i diversi periodi è il risultato della migrazione degli stock sabbiosi dalla foce del Fiume Morto Nuovo verso nord, fino alla foce del Fiume Serchio.

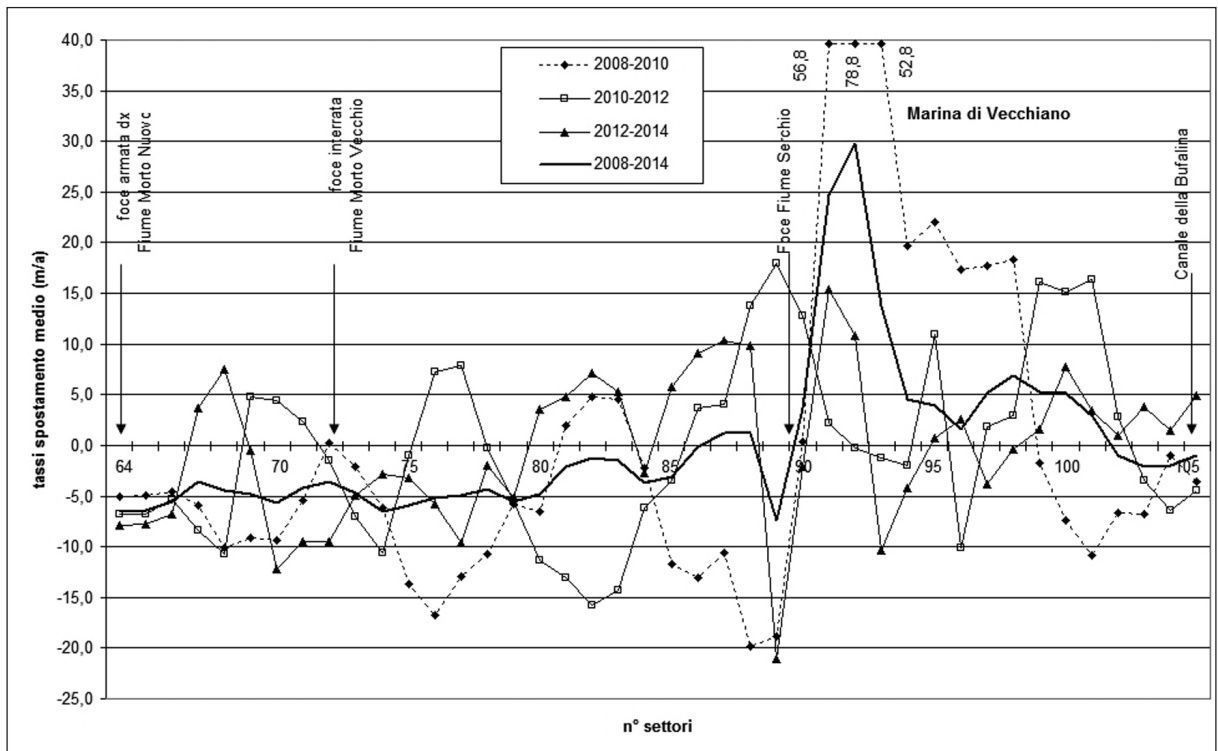


Figura 8. Tasso di spostamento medio della linea di riva del 2° tratto settentrionale del litorale pisano.

Nel biennio 2008-2010 a nord della foce del Serchio si ha una progradazione particolarmente forte nei settori 91, 92 e 93 (tra 53 e 80 m/a), e comunque significativa (5-20 m/a), nel tratto che arriva fino a Marina di Vecchiano (94-98), mentre più a nord si ha un evidente processo erosivo. Nei periodi successivi le variazioni sono meno intense e mostrano l'alternarsi di processi opposti.

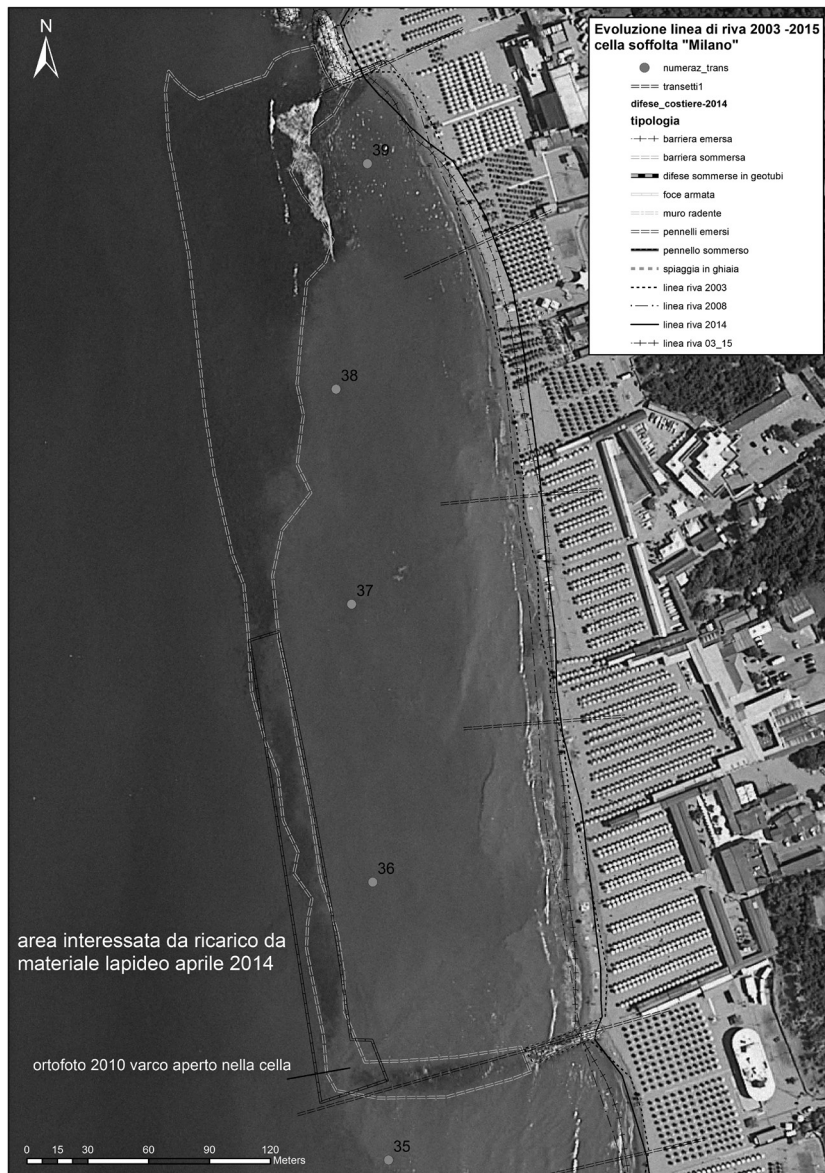
### Evoluzione della linea di riva e difese costiere del tratto meridionale

L'interazione tra la dinamica litoranea, le difese costiere e le opere portuali risulta evidente anche nei due estremi del tratto meridionale. Quello delimitato dai transesti 0 e 12 mostra un avanzamento mediamente

tra 1 e 2 m/a, ad esclusione del tratto 2-5 dove si osserva un leggero arretramento nel periodo 2008-2014 e più marcato nel periodo 2012-2014 (Fig. 5). Questa interruzione delle condizioni di progradazione nei settori 2-5, già evidenziata a seguito della costruzione della prima cassa di contenimento del porto di Livorno, nel periodo 2000-2003 tra il settore 2 e 6 (Cappiotti et al 2003; Bini et al 2008) si ripete successivamente alla realizzazione della seconda cassa di contenimento e può dipendere da perturbazioni e variazioni nella direzione delle correnti e del trasporto solido causate dalla geometria e ubicazione della nuova struttura.

Verso il tratto settentrionale di Tirrenia, i rilievi batimetrici eseguiti dal 2008 sulla barriera soffolta evidenziano una diffusa perdita di forma della cresta sommersa, sprofondamenti ed un profondo varco di 4-5 metri nel tratto tra l'intersezione della barriera sommersa ed il pennello che rendeva di fatto la cella soffolta aperta verso mare. Queste variazioni geometriche risultavano associate ad un'inversione di trend all'interno della cella: in avanzamento fino al 2008, in erosione dal 2008 al 2014. Durante il mese di aprile 2014 la barriera è stata ricaricata con circa 1500 t di scogli di 3° e 4° categoria, in particolar modo il tratto centrale e meridionale (Fig. 9), dove è stato ricostruito e rafforzato il tratto di cresta soffolta esistente ed inoltre è stato eliminato il varco, rendendo di fatto continuo il perimetro della cella. A conferma della interazione tra le caratteristiche geometriche della barriera soffolta e l'evoluzione della linea di riva, il rilievo dell'aprile 2015 evidenzia un ripristino dell'arenile emerso nel

trasetto 36, una migrazione di materiale verso nord ed un ulteriore avanzamento nei trasetti 38 e 39.



### Evolutione della linea di riva e difese costiere del tratto settentrionale

Lo studio dello spostamento della linea di riva del tratto di costa posto a nord della foce dell'Arno, alle Lame delle Glosie (Fig. 6), mostra andamenti particolarmente alterni e discontinui. Una possibile chiave di lettura può essere quella di associare tale comportamento alle caratteristiche geometriche del sistema difensivo che interagisce dinamicamente con la porzione sommersa di spiaggia. I settori che mostrano variazioni positive, o che sono relativamente stabili, come i settori 43-45 ed i settori 47 e 50 corrispondono a tratti di costa disposti sopraflutto ai pennelli dotati di setto sommerso, viceversa i settori interessati dai pennelli numero 1, 2, 3,5 e 7, che sono privi di setto sommerso, mostrano valori negativi o positivi sempre inferiori rispetto a quelli dei tratti precedenti.

**Figura 9. Evolutione della linea di riva del tratto di costa interno alla cella soffolta 2003-2015.**

La Figura 10 mostra il profilo batimetrico di una sezione “tipo” del tratto interessato dai pennelli dove i fondali mostrano due barre con la cresta rispettivamente a circa -2 m e a -3 m, ed un truogolo la cui profondità massima raggiunge i 4 m.

La morfologia del fondale evidenziata dalle curve batimetriche della Figura 4 mostra l'estensione longitudinale di un sistema a barre e truogoli e la presenza di una canalizzazione sottomarina continua diretta sud – nord che veicola il materiale sabbioso tramite un trasporto *long-shore* verso nord in accordo con la direzione del trasporto solido dominante (Fig. 10).

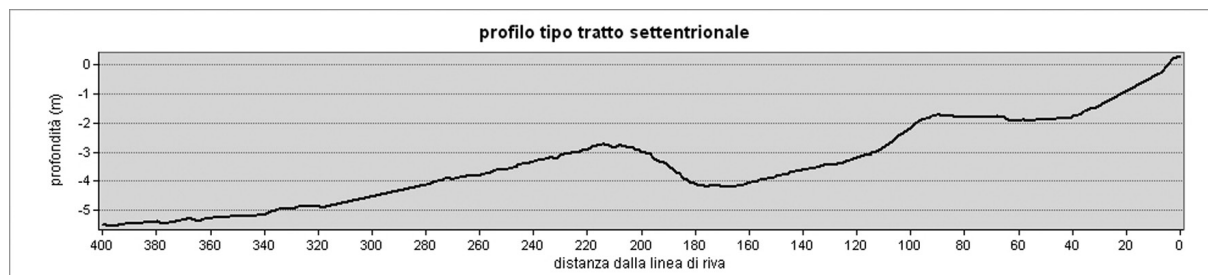


Figura 10. Sezione batimetrica “tipo” del 1° tratto settentrionale del litorale pisano.

I pennelli dotati di setti sommersi dispongono le rispettive testate all'interno del truogolo, limitando di fatto il trasporto *long-shore* verso i tratti sottoflutto e conseguentemente trattenendo una maggiore quantitativo di sabbia nel rispettivo tratto sopraflutto, risultato (come già evidenziato nel medesimo tratto nel periodo 2003-2007 da Pranzini, 2008) che non viene raggiunto dai pennelli di dimensioni inferiori e non provvisti di setto sommerso. Un ulteriore allungamento dei setti sommersi fino al raggiungimento della superficie della seconda barra (circa 200 m di distanza dalla costa) porterebbe ad una drastica diminuzione del trasporto longitudinale all'interno della canalizzazione con ulteriori avanzamenti della linea di riva nei tratti sopraflutto, ma con possibilità non remote di rafforzamenti dei processi erosivi nei tratti sottoflutto.

A conferma degli effetti indotti sottoflutto dai pennelli, i settori 51-54 (Fig. 6) disposti immediatamente a nord di essi mostrano valori importanti di arretramento della linea di riva in tutti i bienni di analisi con tassi medi variabili tra -1 e -10 m/a.

Anche l'evoluzione complessiva (2008-2014) della linea di costa dell'area del Gombo (55-59) risente della presenza delle strutture difensive sperimentali precedentemente descritte. L'andamento anomalo della linea 2008-2010 nei settori 57 e 58, con valori positivi fino a 5 m/a, è da correlarsi al loro effetto; in particolar modo si può notare come il maggiore avanzamento della linea di riva sia ubicato nel settore 57, all'interno dell'area della radice del tombolo artificiale, oltre che nei settori 58 e 59, dove sono presenti i pennelli in geotubi. Anche il settore 56, disposto sopraflutto del sistema tombolo, mostra una stabilizzazione della linea di riva. Questo effetto migliorativo è da ricondursi all'iniziale efficacia dell'intervento, in particolar modo al mantenimento delle caratteristiche strutturali e geometriche dei geotubi oltre che alla presenza dello stock sabbioso della duna artificiale. Negli anni successivi le diverse campagne di rilievo hanno evidenziato un graduale peggioramento delle caratteristiche dei geotubi a cui corrisponde il ripristino del trend erosivo all'interno dell'area del Gombo: i settori 56-59 tornano a mostrare nei bienni 2010-2012 e 2012-2014 importanti valori negativi, fino a quasi -9 m/a. In accordo con le precedenti indicazioni sulla direzione del trasporto solido, tutto il materiale eroso nell'area del Gombo viene ridistribuito e depositato a nord, fino alla sinistra idraulica della foce armata del Fiume Morto Nuovo (settore 63). L'erosione del settore 61 nel periodo 2008-2010 può essere il risultato della efficacia del sistema difensivo sperimentale, che trattenendo più materiale nei settori 56-59 tende a diminuire il trasporto solido verso il successivo tratto sottoflutto. Il profilo batimetrico delle sezioni 58 e 62 della Figura 4 evidenzia la geometria dei fondali interessati da differente evoluzione: la concavità del tratto compreso fra la linea di riva e l'isobata dei 5 m della sezione 58 (Gombo) denota un marcato processo erosivo, mentre la convessità rivolta verso mare del profilo 62 (sx idraulica Fiume Morto Nuovo) mostra un accumulo di materiale.

### Analisi delle variazioni di superficie del litorale pisano 2008-2014 e 1938-2014

La Figura 11 rappresenta le variazioni areali della spiaggia emersa nei singoli settori del litorale pisano negli ultimi 6 anni.

Dal 2008 al 2014 il tratto meridionale subisce variazioni areali contenute e tendenzialmente positive, ad esclusione dei settori delimitati dalla barriera soffolta; il bilancio totale è positivo per 13.297 m<sup>2</sup>.

Nello stesso periodo il litorale settentrionale mostra tendenze opposte in due tratti ben delimitati: nel primo, che si estende dalla Foce dell'Arno fino alla Foce del Serchio (11,7 km), prevalgono i processi erosivi (-140.353 m<sup>2</sup>), mentre nel secondo, dalla Foce del Serchio alla Foce del Canale della Bufalina (3,5 km), prevalgono i processi deposizionali (131.457 m<sup>2</sup>).

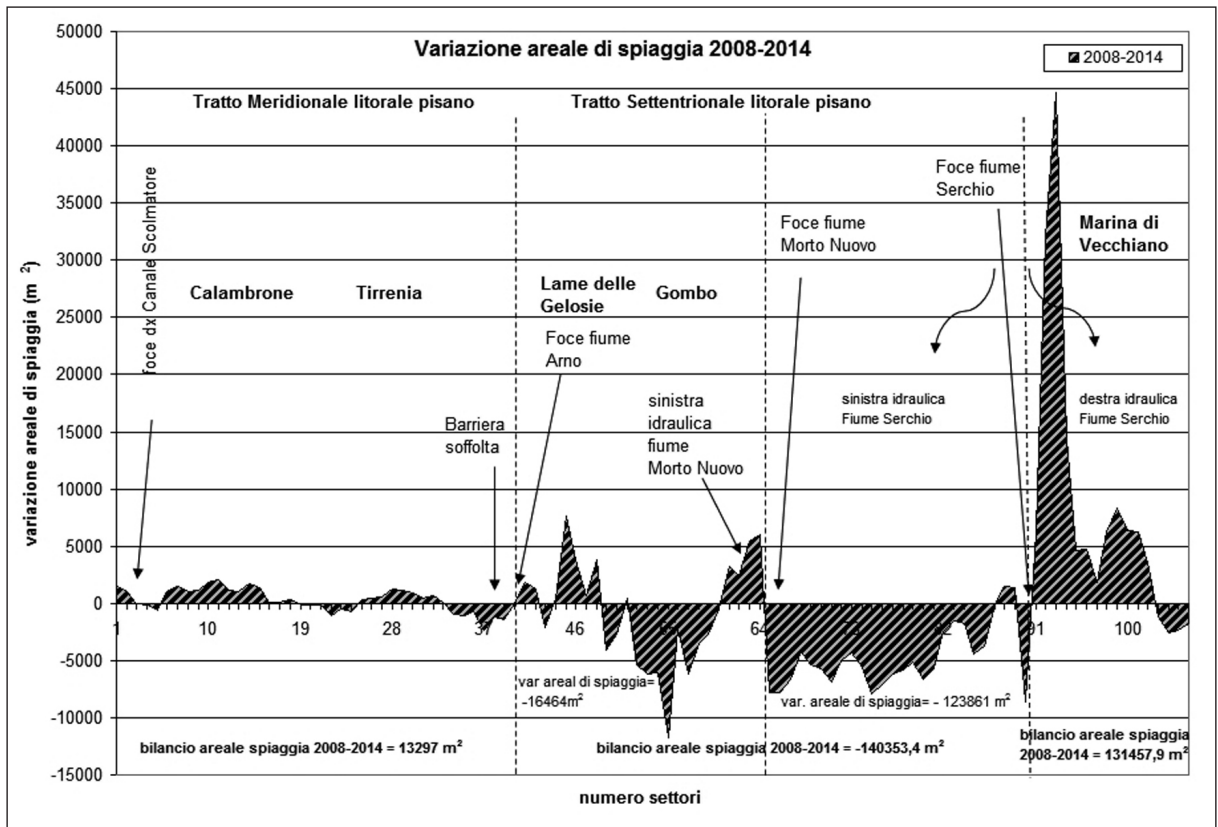


Figura 11. Variazione areale di spiaggia emersa del litorale pisano 2008-2014.

Il deficit del primo tratto deriva dai 16.464 m<sup>2</sup> persi dalla spiaggia delle Lame delle Gelosie e del Gombo e dai 123.861 m<sup>2</sup> persi fino alla foce del Fiume Serchio. La superficie di spiaggia emersa persa del primo tratto è analoga a quella guadagnata dal secondo. Questi valori particolarmente simili, ma di segno opposto, evidenziano come il materiale eroso nel tratto delle Lame delle Gelosie, del Gombo ed in particolar modo nel tratto posto immediatamente a nord dalla foce del fiume Morto Nuovo venga riversato completamente nel tratto di litorale che si sviluppa fino alla foce del Serchio.

Inoltre, la corrispondenza in valore assoluto tra la variazione areale di spiaggia emersa dei due tratti a sud e nord della foce del Fiume Serchio (-140.353 m<sup>2</sup> contro 131.457 m<sup>2</sup>) fa ipotizzare che il Serchio immetta nel sistema costiero un quantitativo di sedimenti molto scarso.

Per evidenziare eventuali variazioni nel trend storico del litorale pisano sono stati paragonati i risultati del presente lavoro con quelli calcolati per il periodo 1938 – 2004 da Bini et al. (2008).

La Tabella 1 mostra il confronto tra i valori di spostamento medio della linea di riva tra il 1938-2004 ed il periodo 2008-2014. Il tratto meridionale (tratto A, settori 0-39) mostra un rallentamento nel processo di progredazione da 0,61 m/a del periodo 1938-2004 a 0,33 m/a del periodo 2008-2014.

**Tabella 1. Variazione areale della spiaggia per ogni tratto o raggruppamento di settori.**

Valori ricavati da Tab. 2 in Bini et al., 2008			Valori ricavati dal presente lavoro		
Tratto (m)	1938-2004	66 anni	Intervallo settori	2008-2014	6 anni
	m	m/a		m	m/a
A: Canale Scolmatore-Marina di Pisa	40,23	0,61	0 - 39	2,01	0,33
C: F.Arno - F.Morto Nuovo	-232,35	-3,52	40 - 63	-2,69	-0,44
D: F.Morto Nuovo - F.Serchio	-170,67	-2,58	64 - 89	-22,94	-3,82
E: F.Serchio - Canale Bufalina	120,8	1,83	90 - 105	39,83	6,63

Il tratto settentrionale, nel periodo 2008-2014, tra i settori 40-63 (tratto C) evidenzia una significativa diminuzione dei processi erosivi, causata essenzialmente dalla stabilizzazione ed avanzamento della spiaggia delle "Lame delle Gelosie", processo già in atto (2003-2007) successivamente alla costruzione dei 9 pennelli (Pranzini, 2008) ed al costante incremento nel tratto in sinistra idraulica del Fiume Morto Nuovo, la cui causa può essere associata alla presenza dell'intervento di difesa sperimentale nell'area del Gombo. Contrariamente, i settori 64-89 (tratto D) tra il Fiume Morto Nuovo e la Foce del Serchio mostrano un forte aumento dei processi erosivi rispetto al periodo 1938-2004, a cui corrisponde nel successivo tratto a nord della foce del Serchio (tratto E, settori 90-105) un marcato incremento del tasso di progradazione: da 1,83 m/a nel periodo 1938-2004 a 6,63 m/a nel periodo 2008-2014.

### Conclusioni

Le analisi svolte sull'evoluzione della linea di riva della costa pisana tramite rilievi diretti e frequenti in un intervallo temporale ridotto di sei anni ha permesso di ricostruirne l'attuale tendenza evolutiva e di evidenziare, con settori di analisi lunghi mediamente di 200 m, tratti dal comportamento difforme rispetto alla tendenza generale. Si è potuto anche valutare l'efficacia o meno delle opere di difesa realizzate negli ultimi anni.

Il tratto meridionale mostra una complessiva stabilità della linea di costa, con tassi tendenzialmente positivi, variabili tra 1-1,5 m/a per il tratto di Calambrone e negativi, -1,5 m/a nel tratto di costa delimitato dalla barriera soffolta la cui evoluzione è strettamente collegata alle caratteristiche geometriche e strutturali dell'opera di difesa. Lo studio ha permesso di evidenziare il meccanismo di spostamento del materiale sabbioso tendenzialmente verso nord e di localizzare tre zone con tasso di spostamento della linea di riva rimasto pressoché costante e positivo.

L'elevata variabilità del tasso di spostamento medio nei settori estremi del tratto meridionale è determinata dall'effetto delle opere antropiche poste ai loro margini. Le aree di convergenza che delimitano tratti di costa con particolari ed autonomi trend evolutivi possono così rappresentare i limiti esterni di influenza delle rispettive opere portuali o di difesa costiera sulla evoluzione e migrazione longitudinale del trasporto solido e di conseguenza sulla evoluzione della linea di riva. L'influenza della costruzione della seconda cassa di contenimento del porto di Livorno (chiusura perimetro esterno nell'estate 2013) registrata dalle variazioni fuori scala della curva 2012-2014 evidenzia un effetto che si manifesta fino a circa 3 km a nord, mentre l'area di convergenza al settore 30, ubicata a circa 600 m a sud dal pennello meridionale della barriera soffolta, demarca verso sud l'influenza di quest'opera sulla dinamica costiera. Il confronto con il periodo di osservazione 1938-2004 evidenzia una riduzione del tasso di crescita di questa parte del litorale pisano.

Le analisi svolte sul tratto settentrionale mostrano una continuità nel processo di stabilizzazione del tratto delle Lame delle Gelosie ad opera dei pennelli dotati di setto sommerso, ma una marcata fase erosiva nel tratto posto sottoflutto fino al Gombo. Qui, il sistema difensivo sperimentale installato nel 2009 non ha indotto effetti positivi sulla stabilizzazione della linea di riva, mentre ha generato una marcata fase deposizionale, mai verificatasi in precedenza, nei settori 59-63 in sinistra idraulica della foce del Fiume Morto Nuovo. Il tratto successivo, fino alla foce del Fiume Serchio, mostra i maggiori valori negativi del tasso di spostamento dell'intero litorale pisano, con alcuni settori che arretrano anche di 15-20 m/a. Questi valori, associati a intense modifiche della morfologia dei sistemi dunali frontali, spiegano l'evoluzione del tratto di costa posto a nord del Fiume Serchio, caratterizzato da una generalizzata ed estesa fase di progradazione costiera, con

settori i cui tassi di spostamento raggiungano anche gli 80 m/a.

La comparazione tra le variazioni areali di spiaggia dei due periodi di indagine evidenzia una migrazione verso nord del punto in cui si hanno i più intensi processi erosivi; dalla spiaggia delle Lame delle Gelosie (periodo 1938-2004) verso il tratto Fiume Morto Nuovo-Serchio (2008-2014). Inoltre, i due tratti mostrano valori di arretramento simili in differenti periodi di analisi e di intervalli temporali (rispettivamente -3,52 e -3,82).

Lo studio della linea di riva nel periodo 2008-2014 ha evidenziato come i sistemi difensivi che maggiormente hanno contribuito e contribuiscono a stabilizzare la linea di riva del tratto settentrionale siano i pennelli con setto sommerso realizzati alle Lame delle Gelosie grazie ad un trasporto litoraneo diretto prevalentemente verso nord. Tale tipologia di sistema difensivo esportato nel tratto a maggiori tassi erosivi potrebbe interrompere l'eccessiva migrazione verso nord del materiale sabbioso, anche se non è da escludere una successiva fase erosiva nel tratto sottoflutto che interesserebbe inizialmente l'area della foce del Fiume Serchio e successivamente le spiagge di Marina di Vecchiano. Il mantenimento (o l'incremento) nei prossimi anni degli attuali tassi erosivi sull'interno del tratto di costa del Parco Regionale di Migliarino-SanRossore-Massaciuccoli avrà come conseguenza importanti modificazioni geomorfologiche del litorale e dell'ambiente dunale, già oggi esposto a intense fasi di demolizione con conseguenti ripercussioni sull'habitat naturale, in particolar modo nel tratto che si estende dal Gombo alla foce del Serchio.

### Ringraziamenti

Questo lavoro è stato svolto tramite rilievi ed elaborazioni eseguite direttamente dalla Provincia di Pisa. Il Dirigente del Servizio Difesa Suolo, G. Bracci ed il Funzionario A. Carli.

I rilievi sono stati eseguiti da N.Casarosa, L.Sardi, A. Pannocchia e S. Matteoni.

### Bibliografia

- Aiello E., Bartolini C., Caputo C., D'Alessandro L., Fanucci F., Fierro G., Gnaccolini M., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Piccazzo M. e Pranzini E. (1976) - *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.
- Albani D., (1940). *Le spiagge della toscana settentrionale dalla foce del fiume Magra ai Monti Livornesi*. in: Albani d., Griselli A., Mori A., Ricerche sulle variazioni delle spiagge toscane, 2. CNR Roma: 11-8.
- Aminti P.L., Cipriani L.E., e Pranzini E. (2003) "*back to the beach*": *converting seawalls into gravel beaches*. In Soft Shore Protection, Coastal System and Continental Margins Volume 7, C. Goudas et al. (eds), Kluwer Academic Publishers, 2003, pp.261-274
- Baldini A., Regattieri M., (1983). *Correnti prossimali e apporto solido tra la Foce dell'Arno e la Foce del Fiume Morto Nuovo*. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A, suppl. XC: 21-34.
- Baldini A., Regattieri M. e Tongiorgi M., (1983). *Analisi granulometrica delle sabbie e dinamica del litorale di S. Rossore (Pisa): un anno di osservazioni (aprile 1979 - aprile 1980)*. Atti Soc. tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A, suppl. XC: 35-79.
- Bini M., Casarosa N., Ribolini A., (2008). *L'evoluzione diacronica del litorale pisano (1938-2004) sulla base del confronto delle immagini aeree georeferenziate*. Atti Soc. tosc. Sci. nat., Mem., Serie A, 113 pagg. 1-12
- Boninsegni G., Mori E., (2014) *Studio Idrodinamico e Morfodinamico Marino: Progetto Esecutivo "Adeguamento idraulico del canale scolmatore d'Arno lotto 1 – opere a mare"*. Provincia di Pisa, Servizio Difesa Suolo, U.O. Opere Idrauliche e Marittime.
- Cappietti L., Cammelli C., Farrell E., Ferri S., Aminti P.L., Pranzini E., (2003). *A case of updrift erosion induced by a Harbour-breakwater*. Medcoast 2003, Ravenna:1701-1718.
- Casarosa N., Bini M., DeBiasi A., (2011) *Morfologie relitte e antiche linee di riva delle "Secche della Meloria"* Studi costieri 2011-18:43-52
- Cipriani L.E., Ferri S., Iannotta P., Paolieri F., Pranzini E., (2001) *Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale*. Studi Costieri 4: 119-156.
- Federici P.R., (1983). *Lineamenti geografici e geomorfologici*. In «*Dal Calambrone al Burlamacca: Guida alla natura del Parco Migliarino-S. Rossore-Massaciuccoli*», Nistri-Lischi Editori, Pisa: 3-17.
- Federici P.R., Mazzanti R., (1993). *Note sulle pianure costiere della Toscana. Aspetti fisici e problemi ambientali delle pianure italiane*. Mem. Soc. Geogr. It. 53: 165-270.
- Gandolfi G., Paganelli L., (1975). *Il litorale pisano versiliese (area campione Alto Tirreno) composizione prove-*



- nienza e dispersione delle sabbie*. Boll. Soc. Geol. It. 94: 1273-1295.
- Milano V., (1994). *L'evoluzione e le caratteristiche meteo-marine del litorale compreso tra i porti di Livorno e Viareggio dal 1864 al 1983*. in «L'evoluzione e la dinamica del litorale prospiciente i bacini dell'Arno e del Serchio e i problemi di erosione della costa». Quaderni dell'Autorità di Bacino dell'Arno e del Serchio 3: 53-90.
- Noli A., Franco L., (1989). *L'evoluzione del litorale pisano: risultati di uno studio con impiego di modelli matematici*. Camera di Commercio industria Artigianato di Pisa, Amministrazione Provinciale di Pisa, Comune di Pisa. Giardini Editore: 1-37.
- Palla B., (1983). *Tre anni di osservazioni (1978-1981) sulla morfologia della spiaggia campione dalla foce dell'Arno al Gombo (Tenuta di S. Rossore - Pisa)*. Atti Soc. tosc. Sci. Nat., Mem, suppl. XC: 99-124.
- Palla B., (1983). *Variazioni della linea di riva tra i Fiumi Arno e Serchio (Tenuta di S. Rossore - Pisa) dal 1878 al 1981*. Atti Soc. tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A, suppl. XC: 125-149.
- Pranzini E., (1983). *Studi di geomorfologia costiera: IX - L'erosione del delta dell'Arno*. Quad. Mus. St. Nat. Livorno 4: 7-18
- Pranzini E., (1989). *A model for cusped delta erosion*. 6th Symp. On Coastal and Ocean Management / ASCE. Charleston, SC. Coastal Zone 89. Pp. 4345-4357.
- Pranzini E., (2001). *Updrift river mouth migration on cusped deltas: two examples from the coast of Tuscany (Italy)*. Geomorphology 38: 125-132.
- Pranzini E., (2004). *Caratteristiche morfologiche e sedimentologiche di una zona di convergenza del trasporto litoraneo (Versilia, Toscana)*. Studi Costieri 8:135-149.
- Pranzini E., Simonetti D., (2007). *Beach evolution monitoring: Surface Variation Analysis vs Transept Based Analysis*. Beach Erosion Monitoring result from BEACHMED-e/OpTIMAL PROJECT. 25-31
- Pranzini E., (2008). *L'intervento di stabilizzazione del litorale delle Lame (Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli, Toscana)*. Studi Costieri 14: 29-42.
- Pranzini E., Simonetti D., (2008). *Influenza del fattore scala sulla classificazione delle spiagge in base alla loro tendenza evolutiva*. Studi Costieri 14: 14-38
- Pranzini E. (2007), *Airborne LIDAR survey applied to the analysis of historical evolution at the Arno River delta (Italy)* in «Journal of Coastal Research» SI 50 (Proceedings of the 9th International Coastal Symposium), pp. 400 – 409 <http://www.griffith.edu.au/conference/ics2007/pdf/ICS078.pdf>.
- Rapetti F., Vittorini S., (1978). *Osservazioni sul clima del litorale pisano*. Riv. Geogr. It. LXXXV (1): 1-22.
- Rapetti F., Vittorini S., 1983. *Brevi considerazioni sull'influenza dei venti riguardo alle fluttuazioni della linea di costa del litorale di S. Rossore-Massaciuccoli*. Atti Soc. tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A, suppl.13-20.
- Sarti G., Bini M., Giacomelli S. (2010), *The growth and decline of Pisa (Tuscany, Italy) up to the Middle Ages: correlations with landscape and geology* in «Il Quaternario Italian Journal of Quaternary Sciences», 23(2Bis), Volume Speciale, pp. 311-322
- Toniolo A.R., (1910). *Sulle Variazioni di spiaggia a foce d'Arno (Marina di Pisa) dalla fine del secolo XVIII ai nostri giorni: Studio storico fisiografico*. Comune di Pisa (a cura di), Tipografia Municipale, Pisa: 1-93.
- Toniolo A.R., (1927). *Variazioni storiche del litorale toscano tra l'Arno e la Magra*. Atti X Congresso Geografico Italiano, Milano.
- Vittorini S., 1977. *Variazioni della linea di costa al Gombo (litorale pisano)*. Atti Soc. tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A: 91-103.

**Ricevuto il 18/07/2015, accettato il 02/04/2016.**