

La dinamica delle barre nell'evoluzione morfologica della spiaggia di Terracina (Lazio, LT): risultati preliminari

Luca Parlagreco¹, Renata Archetti², Umberto Simeoni³, Saverio Devoti¹,
Andrea Valentini⁴, Sergio Silenzi¹

¹ISPRA, email: luca.parlagreco@isprambiente.it

²DICAM, Università di Bologna

³Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

⁴ARPA-SIMC Emilia Romagna

Riassunto

L'evoluzione morfologica di una porzione (1 km) del litorale di Terracina (Lazio centro meridionale) è stata analizzata tramite dati di video-monitoraggio e topo-batimetrici. Dati di previsione ondosa a cadenza oraria, basata sul modello SWAN, sono stati utilizzati per confrontare la variabilità morfologica all'energia ondosa incidente. Il tratto analizzato rappresenta una porzione di un settore ripasciuto nel 2006 dove, su 1.6 km di litorale, sono stati sversati 345800 m³ di inerti. Le attività di video-monitoraggio sono iniziate circa un anno e mezzo dopo l'intervento di ripascimento, omettendo quindi l'analisi dell'evoluzione morfologica del periodo immediatamente dopo il rinascimento. Complessivamente, i dati di monitoraggio hanno coperto un periodo di osservazione di 34 mesi, da Gennaio 2008 a Ottobre 2010. Indicatori per il posizionamento della linea di riva e delle barre sommerse sono stati estratti dalle immagini video acquisite dalla centralina di monitoraggio e comparati con rilievi topo-batimetrici eseguiti lungo la stessa porzione di spiaggia. A circa un anno e mezzo dal ripascimento, non si registrano forti arretramenti del cuneo di ripascimento e i fondali sono caratterizzati da una barra sommersa lineare e disposta parallelamente a riva. Tale assetto morfologico rimane pressoché inalterato durante i primi 17 mesi di video-monitoraggio finché una serie di violente mareggiate dai quadranti meridionali, con massime altezze d'onda di 4 m, rimodellano profondamente i fondali a fine Novembre 2008. La linea di riva arretra di circa 20 m, si origina una nuova barra sottomarina e quella pre-esistente migra verso mare. Sebbene la linea di riva sia arretrata notevolmente, a tre anni dal ripascimento il tratto analizzato presenta un bilancio netto nullo, compensato da una forte crescita dei fondali antistanti. Negli ultimi 5 mesi di osservazioni la cresta di barra esterna perde la sua evidenza morfologica e induce la migrazione verso mare della barra interna, che essendo più esposta all'energia del moto ondoso incidente, sviluppa una morfologia lineare e uniforme lungo costa.

Parole chiave: video-monitoraggio, ripascimento, trasporto sedimentario, migrazione della barra, dissipazione energetica delle onde.

Abstract

The morphologic evolution of a 1 km-long stretch of the Terracina beach (Tyrrhenian Sea, Italy) is analyzed based on a data set of time-exposure video-images collected during a 34-month period (January 2008 - October 2010). Proxies for shoreline and sandbar crest positions were extracted from video-images and compared with topographic and bathymetric surveys. Forecasted wave data (from SWAN-MEDITARE operational chain) have been used to

constrain the morphologic variability to external forcing. Along the studied sector a beachface nourishment was executed in June 2006, 345800 m³ of materials were pumped along 1.6 km of beach. The video-monitoring activity started one year and half after the nourishment, thus the early morphologic evolution after the nourishment remained unresolved. Anyway, the first video-observation (January 2008) depicts a modest retreat of the nourished wedge and the restoration of a shore-parallel linear bar. This morphology lasted until a cluster of southerly storms (with maximum wave height of 4 m drastically reshaped the nearshore morphology at the end of November 2008. As a consequence the shoreline retreats 20 m, a new inner bar gets generated close to the shoreline and the previous one migrates off-shore. Even if the shoreline experienced a considerable retreat, three years later the nourishment was executed the analyzed stretch of beach is characterized by a null net balance due to the high sedimentation on the bars zone. During the last 5 months of observations the outer bar crest lost its morphologic evidence and contemporaneously inner bar moved 20 m offshore and straightened.

Keywords: *video-monitoring, beach face nourishment, sediment transport, sand bar migration, Tyrrhenian Sea.*

Introduzione

La gestione del fenomeno erosivo rappresenta uno dei maggiori problemi che la politica costiera deve affrontare. Il ripascimento artificiale della spiaggia è una delle tecniche più utilizzate per ripristinarne il budget sedimentario.

Le esperienze nazionali nella pianificazione e nel monitoraggio di tali interventi sono demandate alle amministrazioni locali (Comuni e Regioni). In Italia, nel periodo 1995-2007 sono stati dragati e sversati circa 17.2 milioni di m³ di volumi di inerti (ISPRA, 2009). La tecnica più diffusa di attuazione dell'intervento consiste in refluenti limitati alla sola spiaggia emersa (beachface nourishment) con impiego di inerti principalmente sabbiosi e solo in rari casi ghiaiosi o commisti a sabbia (Evangelista et al. 1992; Benassai et al., 1997; Aminti et al., 2002; Cammelli et al., 2006; Ferri et al., 2008; Pranzini, 2008).

Durante il monitoraggio del post-ripascimento non si può prescindere dall'effettuare ripetuti rilievi topografici al fine di accertare la corretta evoluzione dell'opera e per porre riparo ad eventuali inconvenienti insorti (*erosional hot spots*). La frequenza di questi rilievi, variando da mesi ad anni, pregiudica però l'accertamento di variazioni morfologiche a breve termine, spesso importanti per comprendere il comportamento della nuova spiaggia soprattutto durante eventi singoli o ripetuti di mareggiata. Per ovviare a questa carenza di osservazione continuativa, il video-monitoraggio rappresenta un potente strumento di osservazione ad alta frequenza, per lunghi periodi e con elevate risoluzioni spaziali, quindi utile soprattutto per registrare quella vasta gamma di rapidi aggiustamenti morfologici che è tipica del post-ripascimento (Elko et al., 2005). Le tecniche di video-monitoraggio, inoltre, forniscono numerose informazioni sulla dinamica costiera ad un costo contenuto (Archetti et al., 2008).

In Italia il video-monitoraggio è stato adottato solo in alcune regioni, le serie temporali più lunghe sono state registrate dalla Regione Emilia Romagna, presso le stazioni di Lido di Dante (Armaroli et al., 2006; 2007; Kroon et al., 2007, Archetti, 2009; Archetti e Lamberti, 2009; Armadori e Ciavola, 2011) e Igea Marina (Archetti et al., 2008; Archetti e Zanuttigh, 2010). Anche nel panorama Mediterraneo questa tecnica non ha ancora conosciuto un impiego adeguato alle sue potenzialità, essendo attiva solo una stazione Argus operante dal 2003 presso la marina di Barcellona (Ojeda e Guillén, 2006; 2008) e alcune stazioni KOSTA (www.kostasystem.com) installate lungo la costa francese (Rihouey et al., 2009).

Nel Giugno 2007, successivamente ad un intervento di ripascimento eseguito in Maggio-Giugno 2006, è stata installata dalla Regione Lazio una stazione di video-monitoraggio SVM (Sistemi di Video Monitoraggio) presso la spiaggia di Terracina, denominata *Torre del Sole*. Il presente lavoro, utilizzando i dati da essa acquisiti (Gennaio 2008 - Ottobre 2010), mira ad identificare il comportamento di questa spiaggia che risente, almeno per l'abbondanza di inerti ancora in loco, dell'intervento del 2006. Il lavoro, si basa su un'analisi che integra dati SVM, informazioni sul moto ondoso e dati di rilievi topografici ripetuti nel tempo.

Sito di studio

Il sito video-monitorato si estende per circa 1 km lungo la spiaggia di Terracina (lungomare Circe) e corrisponde per buona parte al tratto (1.6 km) interessato dal ripascimento del Maggio-Giugno 2006. Più in generale il sito si colloca nel settore orientale dell'unità fisiografica sud-pontina (Lazio centro-meridionale),

un arco litorale che fronteggia il Mar Tirreno e raccorda il promontorio del Circeo alle propaggini orientali dei Monti Ausoni (Fig. 1). Il sedimento di questo litorale è costituito da sabbie fini e medio-fini con a luoghi materiali più grossolani (granuli e ghiaie medio-fini) in genere concentrati in prossimità della riva e derivanti da alcuni ripascimenti anche recenti. Il litorale, cronicamente in erosione, è difeso quasi ovunque da opere rigide e i numerosi interventi morbidi che si sono susseguiti dal 1980 ad oggi hanno introdotto un ingente quantitativo di sedimento “estraneo” a questa costa, pari a 2.3 milioni di m³ (ISMAR, 2009; Centro di Monitoraggio GIZC).

La costa dell'unità fisiografica è esposta ai mari da sud, sud-ovest e sud-est che determinano un *drift* litoraneo netto diretto verso est (Evangelista et al., 2004). Generalmente, la variabilità stagionale dell'energia ondosa incidente è caratterizzata da un consistente numero di mareggiate nel periodo Ottobre-Maggio e periodi di minore intensità dell'attività ondosa nell'intervallo Giugno-Settembre.

L'urbanizzazione e la pressione turistica hanno notevolmente alterato gli ambienti naturali di questo tratto costiero. Già verso la fine degli anni '50 il cordone dunale preesistente veniva distrutto e la mobilità dei sedimenti lungo costa veniva notevolmente compromessa dalla costruzione di opere rigide di difesa longitudinali e trasversali. Queste influenze hanno riguardato anche la spiaggia di Terracina, oggi confinata dalla foce armata del Fiume Portatore (Porto Badino), dal porto di Terracina e, all'interno, dalla strada del lungomare Circe. Appare rilevante il ruolo delle prime due strutture sul trasporto litoraneo verso est, così come si evince dalla vistosa asimmetria della spiaggia ai due lati della foce armata, dal progressivo ampliamento del litorale sopraflutto del porto (Fig. 1) e dal frequente interrimento all'entrata dello stesso, aspetti questi già presenti prima dell'intervento di ripascimento del 2006. Per quest'ultimo intervento sono stati utilizzati 345800 m³ di sabbie-ghiaiose (ghiaia 28%) sversate sulla spiaggia emersa che da Porto Badino prosegue verso est per 1.6 km. In Figura 1 è riportata la linea di riva, intesa come 0 m slm, della spiaggia appena ripasciuta (Giugno 2006). Nell'estate del 2007 il *budget* sedimentario dell'unità fisiografica sud-pontina è stato ulteriormente implementato con lo

sversamento di circa 1 milione di m³ di inerti su una porzione di circa 4 km di litorale presso la foce del Fiume Sisto, posizionato 7 km sopraflutto del lungomare di Terracina (Fig. 1).

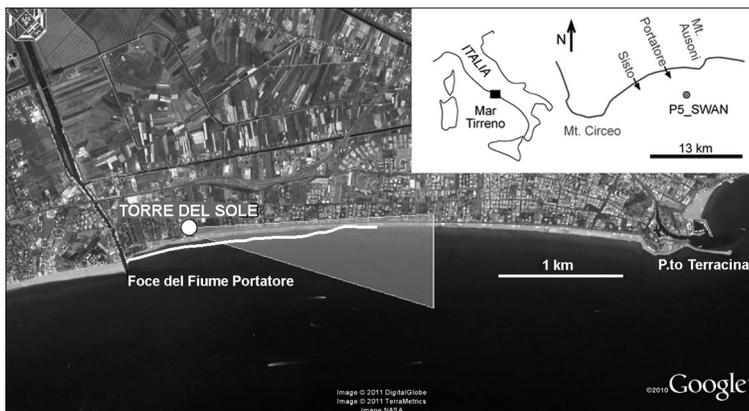


Figura 1 - Localizzazione dell'area di studio all'interno dell'unità fisiografica sud-pontina. Tematismi acquisiti dal portale Centro di Monitoraggio GIZC della Regione Lazio. In particolare si evidenziano la linea di riva di giugno 2006 (tratto continuo bianco) e la porzione di litorale inquadrato da una delle camere della stazione di video-monitoraggio Torre del Sole.

Materiali e metodi

Forzanti marine

I dati ondometrici utilizzati sono stati ottenuti dalle uscite del sistema di previsione dello stato del mare del Servizio IdroMeteoClima di ARPA Emilia-Romagna, denominato MEDITARE (MEDITerraneo-ITALia-REgione, Valentini et al., 2007). Questo sistema è basato sul modello SWAN (Booij et al., 1999), versione 40.51AB, e consiste in una sequenza di corse annidate che parte da un modello sull'intera area mediterranea ad una risoluzione di circa 25 km. Questo primo *run* fornisce le condizioni al contorno per il calcolo delle onde sull'intero dominio italiano ad una risoluzione di 8 km. Nella fase successiva, infine, la risoluzione viene aumentata tramite la precedente tecnica di *nesting* ma localizzata ai domini costieri.

Il dato di input del modello è rappresentato dai valori orari del vento a 10 m previsti dal modello meteorologico COSMO-I7 (COSMO Newsletter, 2004) e dal modello IFS-ECMWF per il dominio geografico esterno a quello di COSMO.

La serie temporale di onde utilizzata in questo studio è stata estratta su un nodo della griglia di calcolo localizzata a circa 1200 m da riva e approssimativamente ad una profondità di 21 m (P5_SWAN in Fig. 1). La lun-

ghezza del *dataset* di onde (713 giorni) è minore della serie di dati video (1025 giorni), ma sufficientemente lunga per avere tutte le informazioni ondamiche necessarie a coprire un arco temporale di due stagioni invernali consecutive.

Dai dati di onda sono stati identificati e isolati 28 eventi di mareggiata attraverso la metodologia sviluppata durante il progetto europeo CADSEALAND (2004-2006, INTERREG IIIB CADSES – EU Project), che identifica come mareggiata le condizioni di moto ondoso in cui l'altezza significativa è maggiore della soglia di 1.5 m per almeno sei ore consecutive.

In seguito è stato calcolato il flusso energetico per ogni evento secondo il metodo di Dail et al. (2000), ovvero l'integrale tra i momenti di inizio e di fine della mareggiata della potenza ondosa

$$\int \frac{1}{8} \rho g H^3 c_g dt$$

dove c_g è la celerità di gruppo, ρ la densità dell'acqua marina, g l'accelerazione di gravità ed H l'altezza d'onda.

Rilievi di campo

La Regione Lazio (Centro di Monitoraggio) ha eseguito un rilievo topo-batimetrico nel Giugno 2006 per valutare il nuovo assetto morfologico e il volume di spiaggia ripasciuta. Per tutto il 2007 e 2008 non sono stati eseguiti ulteriori rilievi topo-batimetrici, se non mappature del posizionamento della linea di riva (reperibili sul portale internet del progetto Beachmed-e). Da Marzo 2009 ad Ottobre 2010 quattordici rilievi topografici eseguiti tramite dGPS con tecnica Real Time Kinematic (RTK) hanno fornito informazioni sull'evoluzione morfologica del tratto monitorato dalla stazione video di *Torre del Sole*. La griglia di campionamento è stata impostata per assicurare una copertura di 25 m e 2 m rispettivamente nelle direzioni *alongshore* e *cross-shore*. Sono stati eseguiti due rilievi batimetrici completi in Agosto 2009 e Aprile 2011, con profili spaziatosi ogni 100 m, a cui si aggiungono misure ripetute su specifici transetti per monitorare la persistenza temporale delle morfologie sommerse. Sia per i rilievi topografici che batimetrici è stato definito un sistema di riferimento locale centrato sul posizionamento della stazione di video-monitoraggio. Gli assi del nuovo sistema di riferimento locale sono stati ruotati di circa 5°N per far coincidere la direzione media

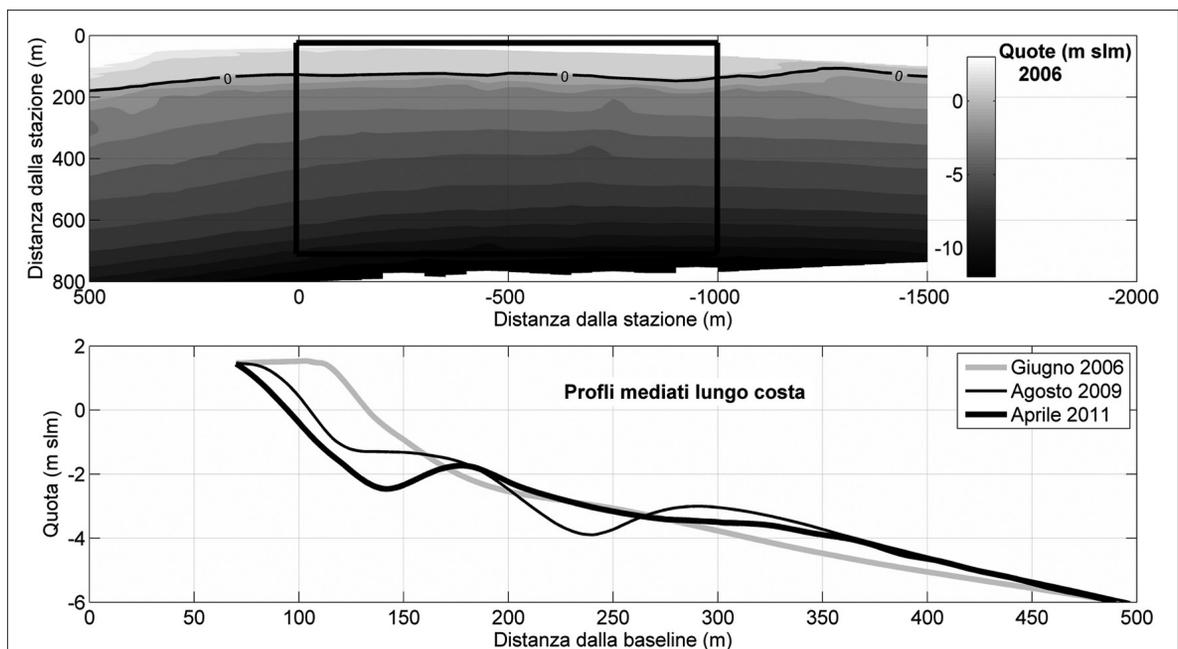


Figura 2 - Profili rappresentativi dell'area di studio. Nel pannello superiore è riportata la finestra entro cui sono stati mediati i profili, riferita alla morfologia del post-ripascimento 2006. I profili mediati sono riportati nel pannello inferiore. Sia i profili che la mappa sono riportati nel sistema di riferimento metrico locale.

della spiaggia con l'asse x e la direzione media *cross-shore* con l'asse y.

I dati topo-batimetrici sono stati sintetizzati tramite l'estrazione di alcuni indicatori morfologici. In particolare, la profondità minima della barra è stata scelta come rappresentativa della sua cresta ed è stata mediata lungo costa a rappresentare il posizionamento delle barre. Per quanto riguarda la spiaggia emersa, per ogni rilievo topografico è stato mediato lungo costa il posizionamento *cross-shore* delle quote 0 e +1 m slm. Le deviazioni tra il valore mediato e il dato originale sono state rappresentate dalla deviazione standard. In questo modo i movimenti *cross-shore* di queste isoipse sono stati evidenziati dai valori mediati lungo costa e la loro variabilità di forma planimetrica è stata documentata dall'andamento (temporale) della deviazione standard. In Figura 2 sono riportati i profili mediati lungo 1 km di costa rispettivamente per i rilievi di Giugno 2006, Agosto 2009 e Aprile 2011 e l'areale su cui è stata computata la loro media spaziale (riferito al settore ripasciuto nel 2006).

Dati video

Durante l'estate 2007 è stata installata una stazione di video-monitoraggio SVM sul tetto dell'albergo Torre del Sole, a 44 m slm e a circa 100 m dalla linea di riva. Il sistema è costituito da due fotocamere programmate per collezionare cinque foto a lunga esposizione (*timex*) ogni giorno.

Per ottenere informazioni morfologiche quantitative dalle foto, sono state utilizzate procedure fotogrammetriche standard per proiettare le viste prospettiche delle foto su una superficie piana, generalmente coincidente con il livello marino locale (Holland et al., 1997). Le soluzioni geometriche della procedura di ribaltamento (proiezione) sono state vincolate con diversi punti di controllo a terra (*Ground Control Points*, GCPs), ovvero porzioni chiaramente visibili dalla foto di cui si conoscono le coordinate sia nel piano immagine che nel sistema di riferimento locale. Le geometrie sono state calcolate per ogni immagine selezionata, dopo una correzione della distorsione ottica utilizzando il metodo proposto da Zhang (2000). Successivamente, queste immagini corrette da distorsione sono state trasformate (proiettate) in viste piane con un ricampionamento dei *pixel* a produrre una griglia di 2.5 m x 2.5 m (Holland et al., 1997). Le dimensioni delle immagini rettificate sono state scelte in funzione dell'andamento della risoluzione nominale del *pixel footprint*, e come conseguenza i limiti *cross-shore* e *alongshore* sono stati fissati ad una distanza di 500 m e 1000 m dalla stazione, dove le risoluzioni spaziali dei *pixel* ricampionati sono rispettivamente di 1.2 m e 14 m. In questa nota vengono presentati i risultati della sola camera guardante a Levante (Fig. 3). Negli ultimi anni, sono stati implementati diversi metodi di estrazione semi-automatica delle morfologie da foto. Seguendo il metodo proposto da Van Enckevort e Ruessink (2001), il posizionamento della cresta di barra è stato computato tramite il campionamento (sulla foto) dei picchi di intensità luminosa lungo costa. Il posizionamento del frangimento a riva, utilizzato come indicatore del posizionamento della linea di riva, è stato estratto in maniera analoga.

La posizione della cresta di barra estratta da video, però, devia di un certo valore (Δx) dalla posizione reale in funzione della batimetria, della marea e dell'altezza d'onda (Van Enckevort e Ruessink, 2001). In questo lavoro, Δx è stato calcolato per la sola influenza dell'altezza d'onda, trascurando il contributo minimo legato alla batimetria e alla variazione di marea. A tale fine di calcolo, sono state utilizzate due differenti campagne batimetriche eseguite nel 2009 e nel 2010. Le massime deviazioni calcolate sono state quindi utilizzate per vincolare le risoluzioni di posizionamento planimetrico delle video-morfologie estraibili da foto, 20 m per la barra interna e 50 m per quella esterna.

Durante il periodo di analisi, 1025 giorni, sono state campionate le video-morfologie 112 volte per la linea

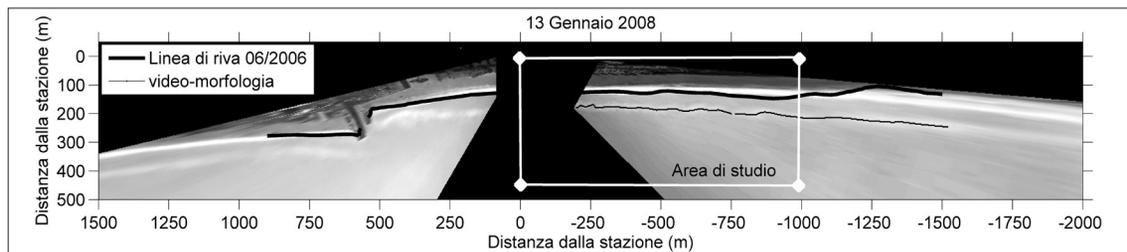


Figura 3 - Immagini *timex* rettificate della spiaggia di Terracina. Sistema di riferimento locale metrico.

di riva, 46 e 102 volte per le barre, implicando una diversa frequenza di osservazione per le differenti video-morfologie. In media la frangenza sulla linea di riva e sulla barra interna (bar2) è stata osservata (e misurata) con una frequenza bi-settimanale (Tab. 1). Similmente al processamento dei dati topo-batimetrici, da ogni foto rettificata è stata estratta la posizione *cross-shore* mediata lungo costa e la deviazione standard di ogni video-morfologia identificata.

Tabella 1 - Statistiche degli intervalli temporali (giorni) intercorsi tra due osservazioni consecutive delle video-morfologie campionate.

Giorni tra due osservazioni consecutive	Linea di riva	Bar1	Bar2
Valore massimo	127	149	127
Valore medio	9.2	17.5	6.5
Deviazione standard	17.6	27.2	14.6

Risultati

I risultati presentati di seguito si riferiscono all'evoluzione morfologica della spiaggia video-monitorata nei primi 4 anni successivi al ripascimento. L'evoluzione immediatamente successiva all'opera di ripascimento non è stata tuttavia analizzata, visto che l'attività di video-monitoraggio è iniziata circa un anno e mezzo dopo l'intervento (da Gennaio 2008) e la campagna di rilievi topo-batimetrici quasi 3 anni dopo l'intervento (da Marzo 2009).

A partire da Gennaio 2008, circa un anno e mezzo dopo l'esecuzione del rinascimento la morfologia della spiaggia sommersa si caratterizza per la presenza di un sistema a barra singola (nominata bar1) localizzata a 50 m dalla riva (Fig. 4). Anche se gli spostamenti *on/offshore* di bar1 ricadono spesso nei *range* di incertezza di posizionamento, qualitativamente si può riconoscere una migrazione diretta verso mare durante gli eventi di mareggiata ed un suo successivo spostamento verso la posizione occupata precedentemente alla mareggiata. Nella sua posizione più generale, tale barra non si posiziona mai ad una distanza minore di 50 m dalla riva (Fig. 5).

Alla fine di Novembre 2008 una serie di mareggiate provenienti dai settori meridionali, con massime altez-

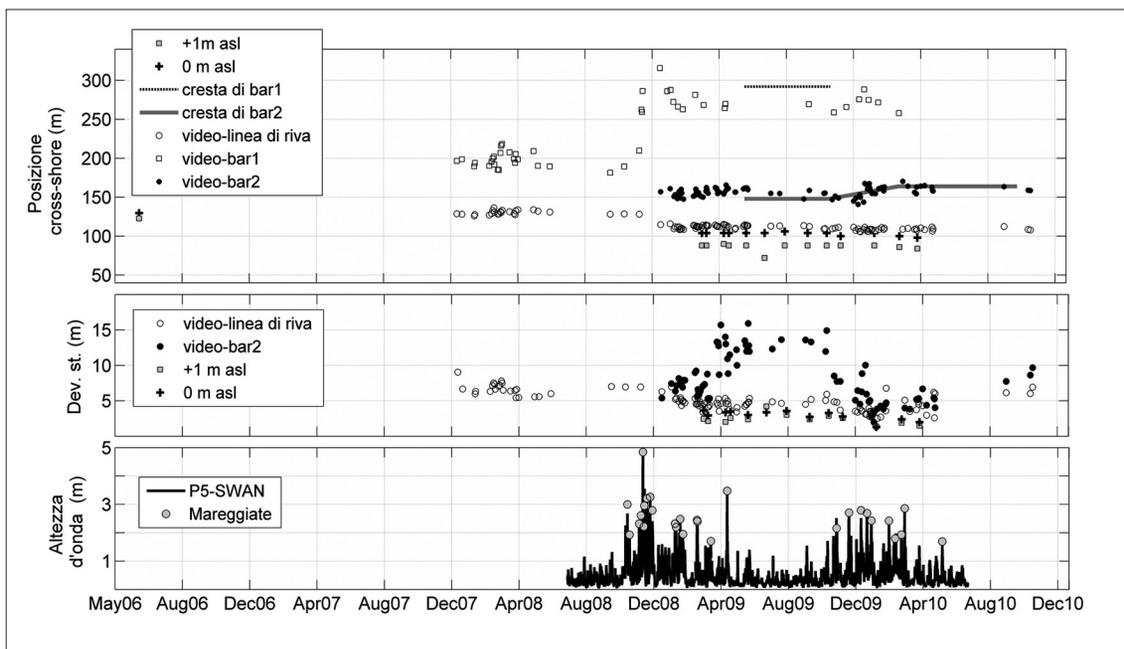


Figura 4 - Serie temporale delle morfologie (video e misurate) mediate lungo il tratto di studio (panello superiore) e loro deviazione standard (pannello intermedio). I dati onda metrici da modello SWAN-MEDITARE insieme alle mareggiate classificate sono riportati nel pannello inferiore.

ze d'onda maggiori di 4 m e periodi di picco di circa 11 secondi, rimodellano drasticamente la morfologia della spiaggia sommersa. In pochi giorni bar1 si sposta 50 m verso mare, si origina una nuova barra interna (bar2) e la linea di riva arretra di circa 20 m (Fig. 4).

Durante la primavera/estate 2009 la dinamica morfologica della barra interna (bar2) si attua prevalentemente con variazioni della sua forma planimetrica, gli spostamenti *on/offshore* della stessa sono minimi e permangono sempre nei *range* di incertezza (20 m circa). La nuova barra interna si posiziona sempre ad una distanza da riva minore rispetto alla precedente condizione a singola barra (bar1 in Fig. 5). Sia i dati video che quelli batimetrici evidenziano una morfologia lineare e parallela a costa e la presenza di culminazioni della cresta di barra esterna nella porzione antistante il tratto ripasciuto. I preliminari calcoli volumetrici eseguiti indicano che, a tre anni dal ripascimento, la volumetria della barra esterna nel settore del ripascimento è paragonabile alla quantità di materiali asportati dal fronte della spiaggia emersa (bilancio nullo). All'occorrenza delle mareggiate invernali del 2010 un'ulteriore modifica interessa i fondali in esame. La cresta di barra esterna perde la sua evidenza morfologica (si vedano i profili di Fig. 2) e ciò induce una diminuzione del numero di foto in cui essa è chiaramente identificabile dalla frangenza delle onde. Contestualmente, la barra interna (bar2) assume una morfologia lineare (diminuisce la deviazione standard) e si sposta 20 m verso mare (Fig. 4). Il sistema costiero è ora costituito da una barra interna lineare ben sviluppata e da una barra esterna meno evidente con morfologia tipo *bar terraced* (si veda il profilo in Fig. 2). Durante lo stesso periodo la linea di riva è soggetta ad un progressivo arretramento di circa 5 m lungo tutto il fronte di spiaggia (Fig. 4).

Da Giugno 2008 a Giugno 2010 (estensione della serie temporale dei dati SWAN-MEDITARE) la mareggiata più lunga proviene da sud-est (Scirocco) con altezze d'onda soprasoglia per 86 ore e altezze maggiori di 3 m. Anche le onde maggiori provengono da Scirocco con altezze superiori a 4 m e periodi di picco oltre i 10 secondi. Gli eventi ondosi provenienti da sud-ovest (Libeccio), contrariamente, non hanno mai raggiunto valori di altezza d'onda maggiori di 3 m (Fig. 5).

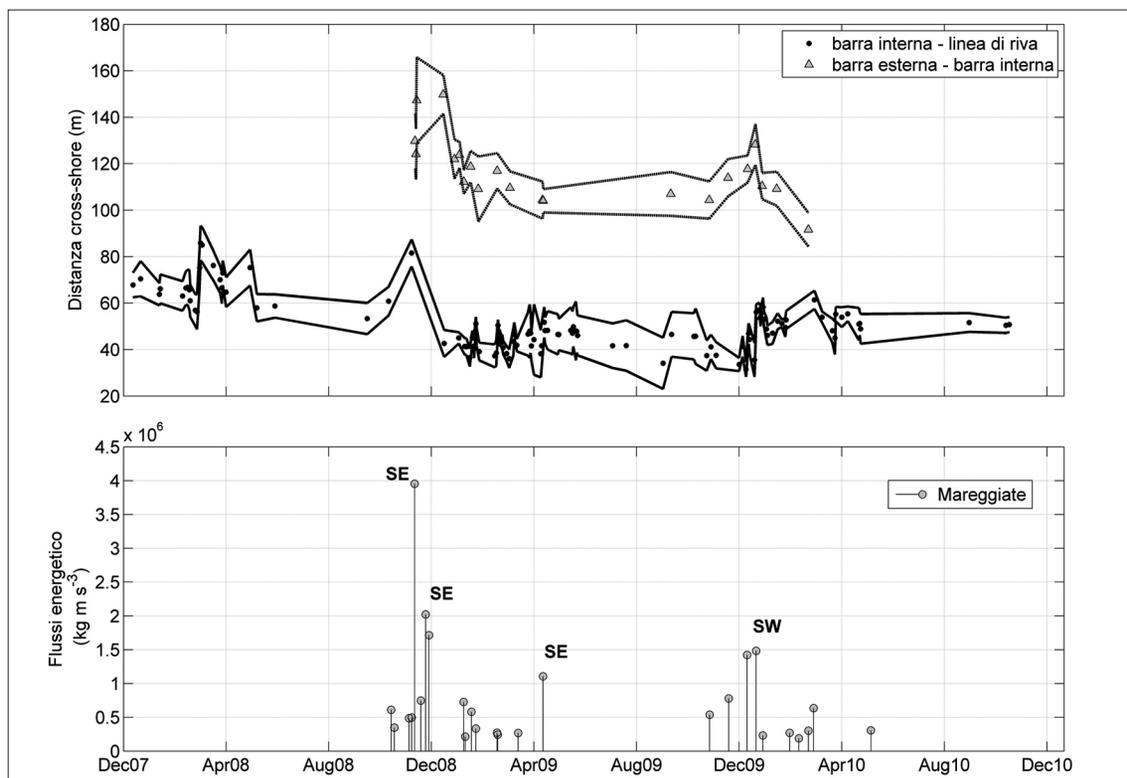


Figura 5 - Serie temporale delle distanze tra le video-morfologie mediate lungo costa più l'involuppo di ± 1 deviazione standard (pannello superiore) e flusso energetico calcolato per ogni evento di mareggiata (pannello inferiore).

Discussioni e conclusioni

L'evoluzione morfologica di una porzione (1 km) del litorale di Terracina è stata analizzata tramite dati di video-monitoraggio e topo-batimetrici. Il tratto analizzato è stato ripasciuto nel 2006 con un volume unitario di circa 216 mc/m di sabbie-ghiaiose (ghiaia 28%). Le attività di monitoraggio sono iniziate circa un anno e mezzo dopo l'intervento di ripascimento, permettendo un'analisi del tratto ripasciuto che già era stato rimodellato dalle mareggiate del 2006 e 2007. Da un confronto tra il posizionamento della linea di riva di Giugno 2006 (intesa come 0 m slm) e quello della prima linea di riva estratta da video (Fig. 4), tuttavia, sembra che durante questo intervallo temporale la volumetria della porzione emersa del cuneo di ripascimento sia diminuita in maniera molto modesta. Dalla Figura 2 è bene evidente l'assenza di morfologie sommerse nel tratto di ripascimento immediatamente dopo il reflui mento dei materiali. Se si considera il minimo spostamento della linea di riva tra Giugno 2006 e Gennaio 2008, l'emersione della nuova barra (visibile a partire da Gennaio 2008) sarebbe maggiormente ascrivibile ad un rimodellamento dei fondali ad opera delle mareggiate più che ad una redistribuzione degli inerti ripasciuti verso mare. Fatte tali assunzioni, le maggiori movimentazioni dei sedimenti ripasciuti si sono registrate durante le mareggiate di fine Novembre 2008, inducendo evidenti variazioni morfologiche. I meccanismi di tali variazioni sono stati prodotti da notevoli gradienti di trasporto sedimentario diretti verso mare ad opera delle elevate altezze d'onda (Gallagher et al., 1998, Marino Tapia et al., 2007). Ciò ha prodotto l'erosione dei materiali dalla spiaggia emersa, la formazione di una nuova barra sotto riva e la migrazione verso mare della barra pre-esistente (Figg. 4 e 5). Risposte similari ad eventi molto energetici sono state osservate anche lungo altre spiagge non-protette nel Mediterraneo (Certain e Barusseau, 2005) e in altri contesti oceanografici (Ruessink et al., 2009).

La serie temporale di osservazioni video-morfologiche fornisce la possibilità di analizzare e confrontare le differenti risposte della spiaggia analizzata alle mareggiate incidenti, soprattutto in funzione delle morfologie a barra singola e a barra doppia. Anche se non sono disponibili i valori di altezza d'onda che hanno caratterizzato la condizione a barra singola da Gennaio a Novembre 2008, in generale si riconosce una ben definita tendenza allo spostamento verso mare della barra durante le mareggiate (visibili dalle foto) ed un successivo lento recupero della posizione che la barra occupava in precedenza, come osservato già da Gallagher et al. (1998) e Armaroli et al. (2006) e generato dall'aumento della velocità dei flussi di ritorno al fondo (*undertow*) durante le mareggiate. Differentemente, durante lo stadio a barra doppia barra interna ed esterna reagiscono differentemente alle mareggiate. La dinamica della barra interna si esplica tramite lo sviluppo di morfologie festonate più o meno regolari (elevati valori della deviazione standard), come già osservato da Ruessink et al. (2000). La barra esterna, invece, rimane inattiva la maggior parte del tempo, mantenendo una morfologia lineare e parallela a riva durante tutte le condizioni energetiche. I maggiori movimenti di tale barra vengono registrati solo nel periodo immediatamente successivo alle violente mareggiate di Novembre 2008, in seguito essa si sposta verso riva e permane ad una distanza costante da questa, fino a perdere la sua evidenza morfologica (Figg. 4 e 5). Le morfologie festonate, o più generalmente non uniformi lungo costa, assunte dalla barra interna (bar2) sono degli importanti indicatori dei *pattern* di circolazione nel sotto costa. Esse sono state osservate esclusivamente durante lo stadio morfologico a barra doppia, innescandosi al diminuire della distanza tra le due barre (Figg. 4 e 5). Come già osservato da Ruessink et al. (2007) lo sviluppo di tali morfologie può dipendere, infatti, da interazioni tra barra interna ed esterna e/o da una auto-organizzazione della prima (*self-organization*). Similmente, l'evidente diminuzione della deviazione standard a fine 2009 indica un repentino passaggio a morfologie lineari della barra interna per il restante periodo di osservazione. Quest'ultimo fenomeno è relazionabile all'aumento della profondità della cresta di barra e alla diminuita capacità di dissipazione dell'energia ondosa ad opera della barra stessa, capace di indurre frangimento solo durante le mareggiate più intense (meno frequenti). All'aumentare del contenuto dell'energia ondosa incidente la barra interna compie un passaggio ad uno stadio morfodinamico più dissipativo (Wright e Short, 1984; Lippmann e Holman, 1990; Ranasinghe et al., 2004).

I meccanismi sedimentari che durante il 2010 hanno portato al passaggio dalla morfologia a barra doppia a quella a barra singola necessitano ulteriori analisi, poiché le osservazioni disponibili sono limitate alla sola stagione autunnale e, generalmente, sono le mareggiate invernali quelle che causano i maggiori effetti morfologici. Tuttavia, un'interpretazione preliminare dei dati di video-monitoraggio e topo-batimetrici pone alcune interessanti questioni sulla dinamica delle barre. Se la dinamica evolutiva fosse stata interessata esclusivamente da un trasporto *cross-shore* del sedimento, la transizione da un sistema a barra doppia ad uno

a barra singola sarebbe ascrivibile alla diminuzione del frangimento sulla barra esterna e al conseguente aumento del trasporto sedimentario diretto verso riva a causa delle correnti al fondo generate dalla crescente asimmetria d'onda (Hoefel e Elgar, 2003). Tali dinamiche trasversali vanno tuttavia inquadrate all'interno dell'intera unità fisiografica sud-pontina. L'ingente quantitativo di materiale sversato a circa 7 km a nord-ovest del sito di studio durante l'estate 2007, 649000 m³ e 412500 m³ rispettivamente in sinistra e destra della foce del F. Sisto (si veda la Fig. 1), lascia ipotizzare che il bilancio nullo riscontrato tra il 2006 e il 2009 non sia interamente dovuto ad una ridistribuzione trasversale del sedimento. Più ragionevolmente tale bilancio può essere dovuto ad una sovralimentazione dei fondali nel tratto analizzato per l'afflusso laterale di parte del materiale sversato nel 2007 nei settori di sopraflutto (si veda la posizione di F. Sisto in Fig. 1). La barra esterna, infatti, a circa 8 mesi dalle mareggiate che ne hanno determinato la migrazione *off-shore*, presenta un volume paragonabile al quantitativo di materiali asportati dal cuneo di ripascimento tra il 2006 e il 2009.

Il rilievo batimetrico di Agosto 2009 (eseguito lungo tutto il tratto litorale di Terracina) indica che la cresta della barra esterna sviluppa evidenti culminazioni nella zona del ripascimento 2006, evidenziando elevati tassi di crescita della barra. Contrariamente prima dell'intervento di ripascimento del 2006 (dati 2003/2004 della Regione Lazio) la cresta della barra esterna presentava un progressivo innalzamento nel senso della deriva litoranea, come risultante della decelerazione del flusso sedimentario indotta dall'ostacolo del porto di Terracina (3 km a sottoflutto dal tratto ripasciuto). La degenerazione del sistema barra/truogolo esterno durante il 2010, oltre che innescato da un disfacimento della cresta di barra esterna ad opera delle correnti al fondo generate dall'asimmetria d'onda (e quindi ad opera del trasporto sedimentario diretto verso riva), potrebbe risultare anche dal così detto *lee effect* (Van Duin et al., 2004; Grunnet e Ruessink, 2005) causato dalle inusuali dimensioni della barra esterna a seguito delle mareggiate di fine Novembre 2008. Tale morfologia avrebbe indotto un ulteriore rallentamento dei flussi lungo costa, già influenzati dall'azione idraulica della foce armata del F. Portatore, con deposizioni preferenziali nei pressi della barra stessa e parziale depauperamento delle sabbie che avrebbero raggiunto i fondali sottoflutto.

In conclusione, l'evoluzione delle barre presso il sito analizzato è il risultato di una complessa interazione tra dinamiche sedimentarie trasversali e disponibilità di materiali lungo costa. L'analisi della risposta alle singole mareggiate della spiaggia analizzata dipende sia dalla natura delle mareggiate stesse (direzione, altezza e periodo d'onda) che dalla morfologia dei fondali (forma e numero delle barre). Ulteriori analisi, attualmente in corso, potranno inquadrare meglio l'influenza della disponibilità sedimentaria lungo costa sull'evoluzione trasversale delle barre sommerse e quindi sulla loro minore o maggiore capacità di dissipazione del contenuto energetico che raggiunge la costa.

Ringraziamenti

Si ringrazia Paolo Lupino, Fabio Fabbri e Alessandro Bratti del CMGIZC della Regione Lazio (www.cmgizc.info) per la completa autonomia lasciataci nel consultare i dati di video-monitoraggio, Daniele Sigismondi e Matteo Paita della SVM (www.svm.it) per il supporto fornitoci durante la calibrazione del sistema video di Torre del Sole. Si ringrazia Paolo Ciavola per le utili indicazioni e chiarimenti circa le problematiche inerenti la dinamica delle barre nel contesto Mediterraneo. Le utili osservazioni dei revisori (Paolo Tortora e Marco Ferrari) hanno migliorato molto la struttura del lavoro.

Bibliografia

- Aminti P., Pelliccia F. e Pranzini E. (2002) - *Evoluzione del profilo di spiaggia a seguito di un ripascimento artificiale in ghiaia su di una spiaggia altamente protetta*. Studi Costieri, 5: 47-57.
- Archetti R. (2009) - *Study of the evolution of a beach protected by low crested structures using video monitoring*. Journal of Coastal Research, 25(4): 884-899.
- Archetti R. e Lamberti A. (2009) - *Storm-driven shore changes of a beach protected by a low crested structure*. Proceedings International Conference on Coastal Engineering, Hamburg. Jane McKee Smith (ed.), 2: 1977-1989. ISBN-13 978-981-4277-38-9.
- Archetti R. e Zanuttigh B. (2010) - *Integrated monitoring of the hydro-morphodynamics of a beach protected by low crested detached breakwaters*. Coastal Engineering, 57(10): 879-891.
- Archetti R. Torricelli E. Erdman R. e Lamberti A. (2008) - *First application of a new imaging system for the coastal monitoring*. Proceedings of the 5th Coastal Structures International Conference, Coastal Structures

- 2007, Venice, 2-4 July 2007: 1964-1975.
- Armaroli C. e Ciavola P. (2011) - *Dynamics of a nearshore bar system in the northern Adriatic: A video-based morphological classification*. *Geomorphology*, 126: 201-216.
- Armaroli C., Balouin Y., Ciavola P. e Gardelli M. (2006) - *Bar changes due to storm events using ARGUS: Lido di Dante, Italy*. *Proceedings of Coastal Dynamics 2005*, ASCE, New York, USA, ISBN: 0-7844-0855-6.
- Armaroli C., Ciavola, P. Caleffi, S. e Gardelli M. (2007) - *Morphodynamics of nearshore rhythmic forms: an energy-based classification*. *Proceedings of 2007 International Conference on Coastal Engineering*, ASCE: 4009-4021.
- Benassai E., Gentilomo M., Ragone A., Setaro F. e Tomassichio U. (1997) - *Littoral restoration by means of protected beach nourishment-recent Italian works*. *PIANC Bulletin*, 94: 43-55.
- Booij N., Ris R.C. e Holthuijsen L.H. (1999) - *A third-generation wave model for coastal regions. Part I - Model description and validation*. *Journal of Geophysical Research*, 104 (C4): 7649-7666.
- CADSEALAND Project, <http://www.cadses.net/en/projects>
- Cammelli C., Jackson N.L., Nordstrom K.F. e Pranzini E. (2006) - *Assessment of a gravel nourishment project fronting a seawall at Marina di Pisa (Italy)*. *Journal of Coastal Research*, SI 39: 770-775.
- Centro di Monitoraggio GIZC, <http://www.cmgezic.info/>
- Certain R. e Barousseau J.P. (2005) - *Conceptual modelling of sand bars morphodynamics for a microtidal beach (Sete, France)*. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 176: 343-354.
- COSMO Newsletter (2004) - *Operational Applications*. ARPA-SIM (BOLOGNA). Deutscher WetterDienst (DWD), Offenbach, 6: 25-26.
- Dail H.J., Marrisfield M.A. e Bevis, M. (2000) - *Steep beach morphology changes due to energetic wave forcing*. *Marine Geology*, 162: 443-458.
- Elko N.A., Holman R.A. e Gelfenbaum G. (2005) - *Quantifying the rapid erosion of a nourishment project with video imagery*. *Journal of Coastal Research*, 21: 633-645.
- Evangelista S., Full W.E., La Monica G.B. e Nelson D. (2004) - *Aspects of littoral dynamics along the Circeo-Terracina coastal area (Lazio-Italia Centrale)*. *Geologica Romana*, 37: 127-130.
- Evangelista S., La Monica G.B. e Landini B. (1992) - *Artificial beach nourishment using crushed limestone gravel: first data about short and long-term beach response at Terracina (Latium, Italy)*. *Bolettino di Oceanografia Teorica e Applicata*, 10: 273-278.
- Ferri S., Pelliccia F., Pranzini E., Rizzo M.G. e Vitale G. (2008) - *Prima risposta della spiaggia di Marina di Carrara ad un ripascimento artificiale non protetto*. *Studi costieri*, 15: 57-72.
- Gallagher E., Elgar L., S. e Guza R., T. (1998) - *Observations of sand bar evolution on a natural beach*. *Journal of Geophysical Research*, 103: 3203-3215.
- Grunnet N.M. e Ruessink B.G. (2005) - *Morphodynamic response of a nearshore bars to a shoreface nourishment*. *Coastal Engineering*, 52: 119-137.
- Hoefel F. e Elgar S. (2003) - *Wave-induced sediment transport and sandbar migration*. *Science*, 299: 1885-1887.
- Holland K.T., Holman R., Lippmann T., Stanley J. e Plant N. (1997) - *Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies*. *Journal of Oceanic Engineering*, 22: 81-92.
- ISMAR (2009) - *Climatologia delle coste del Lazio per la determinazione delle correlazioni tra clima meteo marino e presenza di posidonia oceanica mediante simulazioni da modello, ricerca dei budget sedimentari e stime a grande scala delle dinamiche del trasporto solido litoraneo*. Scaricabile da <http://www.cmgezic.info>.
- ISPRA (2009) - *Annuario dei dati ambientali*. Scaricabile da <http://www.isprambiente.gov.it/site/it-IT/>.
- Kroon A., Aarninkhof S.G.J., Archetti R., Armaroli C., Gonzalez M., Medri S, Osorio A., Aagaard T., Davidson M.A., Holman R.A. e Spanhoff R. (2007) - *Application of remote sensing video systems for coastline management problems*. *Coastal Engineering*, 54(6-7): 493-505.
- Lippmann T.C. e Holman R.A. (1990) - *The spatial and temporal variability of sand bar morphology*. *Journal of Geophysical Research*, 95: 11575-11590.
- Marino-Tapia I., Russel J., O'Hare P. E, Davidson T. J., e Huntley D. A. (2007) - *Cross-shore sediment transport on natural beaches and its relation to sandbar migration patterns: 1. Field observations and derivation of a transport parametrization*. *Journal of Geophysical Research*, 112.
- Ojeda E. e Guillén J. (2006) - *Monitoring beach nourishment based on detailed observations with video measu-*

- rements. *Journal of Coastal Research*, SI 48: 100-106.
- Ojeda E. e Guillén J. (2008) - *Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches*. *Marine Geology*, 253: 51-62.
- Pranzini E. (2008) - *L'intervento di stabilizzazione del litorale de Le Lame (Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli, Toscana)*. *Studi Costieri*, 14: 29-42.
- Ranasinghe R., Symonds G., Black K. e Holman R. (2004) - *Morphodynamics of intermediate beaches: a video imaging and numerical modelling study*. *Coastal Engineering*, 51: 629-655.
- Rihouey D., Dugor J., Dailloux D. e Morichon D. (2009) - *Application of remote sensing video system to coastal defence monitoring*. *Journal of Coastal Research*, SI 56: 1582-1586.
- Ruessink B.G., Coco G., Ranasinghe R. e Turner I. L. (2007) - *Coupled and noncoupled behavior of three-dimensional morphological patterns in a double sandbar system*. *Journal of Geophysical Research*, 112, C07002.
- Ruessink B.G., Pape L. e Turner I.L. (2009) - *Daily to interannual cross-shore sandbar migration: Observations from a multiple sandbar system*. *Continental Shelf Research*, 29: 1663-1677.
- Ruessink B.G., van Enckevort I.M.J., Kingston K.S. e Davidson M. A. (2000) - *Analysis of observed two- and three-dimensional nearshore bar behaviour*. *Marine Geology*, 169: 161-183.
- Valentini A., Delli Passeri L., Paccagnella T., Patruno P., Marsigli C., Deserti M., Chiggiato J. e Tibaldi S. (2007) - *The Sea State forecast system of ARPA-SIM*. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*, 48 (3): 333-349.
- Van Duijn M.J.P., Wiersma N.R., Walstra D.J.R., van Rijn L.C. e Stive M.J.F. (2004) - *Nourishing the shore-face: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands*. *Coastal Engineering*, 51: 813-837.
- Van Enckevort I.M.J. e Ruessink B.G. (2001) - *Effects of hydrodynamics and bathymetry on video estimates of nearshore sandbar position*. *Journal of Geophysical Research*, 106: 16969-16979.
- Wright L.D. e Short A.D. (1984) - *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis*. *Marine Geology*, 56: 93-118.
- Zhang Z., (2000) - *A flexible new technique for camera calibration*. *IEEE Trans. On PAMI*, 22(11): 1330-1334.

Ricevuto il 01/02/2011, accettato il 20/05/2011.