

## Evoluzione morfodinamica della foce del Torrente Bevano

Manuela Gardelli, Simone Caleffi e Paolo Ciavola

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara, via Saragat, 1 - 44100 Ferrara

### Riassunto

Il presente lavoro riguarda l'evoluzione morfodinamica della foce di un piccolo corso d'acqua in alto Adriatico (Torrente Bevano), attraverso uno studio a lungo e medio termine della foce "naturale" fino al 2005, ed il monitoraggio iniziale della foce attuale, aperta artificialmente ad inizio 2006. La vecchia foce presentava dinamiche particolari essendo una delle poche, nell'ambiente costiero emiliano-romagnolo, non regimentata da argini artificiali e dunque libera di seguire un'evoluzione naturale. Gli autori ritengono che possa essere assimilata ad un piccolo *tidal inlet*. La sua evoluzione è stata esaminata sia mediante fotointerpretazione su un periodo di 9 anni (1996-2005), sia con 8 campagne di rilievi topografici tra aprile 2003 e ottobre 2004. Quest'ultimo studio, completato da una ricostruzione del clima meteomarinico antistante la zona e da una classificazione delle mareggiate negli anni 2003 e 2004, ha verificato le dinamiche di foce già individuate da studi precedenti: in particolare, l'effetto combinato di moto ondoso da S-E e maree sizigiali, che producono un trasporto lungo costa diretto verso nord e la migrazione della freccia litorale in tale direzione, con conseguente restringimento della sezione di foce, erosione delle dune a nord ed ingressione di acque marine nella pineta retrostante. Queste problematiche hanno spinto la Regione Emilia-Romagna ad effettuare, ad inizio 2006, un intervento di chiusura della vecchia foce e di apertura della foce attuale circa 500 m più a sud. Dalle prime fasi del monitoraggio, si osserva già a pochi mesi dall'apertura della nuova bocca la riformazione della freccia litorale a sud che migrando verso nord va a restringere il canale di foce e produce interrimento dello stesso. Studi futuri monitoreranno tale evoluzione anche in condizioni estreme di onde e maree, per poter così valutare se il sedimento depositato verrà mobilitato con le stesse dinamiche della vecchia foce oppure se il trasporto lungo costa subirà una riduzione evidente in mancanza dell'input sedimentario prodotto dall'erosione delle dune.

**Parole chiave:** *tidal inlet*, fotointerpretazione, mareggiate, rilievi topobatimetrici, Emilia-Romagna.

### Abstract

*The present paper describes the morphodynamic evolution of the mouth of a small river in the northern Adriatic (Bevano River). A medium to long-term study of the natural system was undertaken using data up to 2005; thereafter the river mouth was deflected by local authorities by opening a new inlet at the beginning of 2006. The old mouth had a peculiar behaviour since it was not delimited by artificial embankments and was able to evolve in a natural manner, comparable to a small tidal inlet. Its evolution was studied using 9 sets of aerial photographs (1996-2005) and 8 direct topographic surveys (April 2003-October 2004). The direct monitoring activities were integrated by a study of the concomitant wave climate, including the study of storm events. These results have confirmed the hypothesis proposed by previous studies that the northward migration of the inlet is controlled by the joint action of SE waves and Spring Tides. These generated a net northward sediment transport with maintenance of the inlet's channel that was however narrowed and deepened. The process was associated with lateral dune erosion and flooding of a coastal pine forest that stretches behind the system. Local author-*

*ities performed in 2006 a management policy for the river mouth, closing the old one and opening a new one 500 m further southwards. The monitoring of the new mouth indicates that a few months after the works the process of northward migration of the southern bank of the mouth is already taking place, with formation of a spit that tends to occlude the channel's inlet. Future research activities will concentrate on the behaviour of the system under storm events to evaluate if sediment transport patterns are comparable to the old inlet. Further investigations will also study the role of the decreased dune erosion on the nearshore budget.*

**Keywords:** *tidal inlet, aerial photography, storm events, topographic and bathymetric surveys, Emilia-Romagna.*

### Premessa

La zona della foce del Torrente Bevano (Fig. 1) ha una grandissima importanza dal punto di vista ecologico-paesaggistico in quanto rappresenta un ambiente ormai unico lungo tutta la costa emiliano-romagnola, essendo uno dei pochissimi tratti non fortemente antropizzati del litorale ed in cui sia ancora riconoscibile l'originaria successione di ambienti sedimentari costieri, dalla battigia fino alle zone palustri di acqua dolce. Questo tratto di costa condivide con il resto del sistema costiero emiliano-romagnolo un insieme complesso di problematiche, che vanno dall'eutrofizzazione dovuta agli apporti di nutrienti dai corsi d'acqua, alla dinamica dei sedimenti fluviali e costieri, all'azione degli ecosistemi nel paesaggio costiero e nell'entroterra, agli aspetti economici, infrastrutturali ed insediativi (Regione Emilia-Romagna, 2003).

Fino alla fine del 2005 la zona presentava dinamiche di foce particolari, in quanto non era regimentata da argini artificiali e rimaneva libera di seguire un'evoluzione del tutto naturale. Per questi motivi è ancora oggi protetta con numerosi vincoli a tutela di flora e fauna facendo parte della riserva naturale del Parco del Delta del Po. Gli autori ritengono che l'intera zona possa essere assimilabile ad un piccolo *tidal inlet*. In realtà, secondo Davis e FitzGerald (2004), un *tidal inlet* è nello specifico un'apertura nella linea di costa tra 2 sistemi di barriere (Davis e Barnard, 2003) o tra una barriera ed un'adiacente costa rocciosa (FitzGerald et al., 2002). La zona di foce del T. Bevano si è formata a causa della migrazione verso nord del canale del torrente e non sono presenti ambienti peculiari di retro-barriera direttamente collegati ad essa. Sono però presenti una freccia litorale a sud che migra verso nord ed è andata ripetutamente nel tempo ad ostruire la bocca di foce, una barra di battigia (*swash bar*), forma particolare di barra intertidale (Balouin et al., 2003) che si crea nel lato sottocorrente, ed un delta di fronte alla foce che dipende dalle correnti tidali.

I *tidal inlets* vengono generalmente classificati in base alla dominanza delle correnti tidali, del moto ondoso oppure in condizioni di energia mista (Davis e Hayes, 1984; Davis e FitzGerald, 2004). La zona di studio è influenzata dall'azione combinata delle correnti di marea e del moto ondoso (Balouin et al., 2006b): il sedimento che si deposita alla foce può essere assimilato ad un delta di riflusso (*ebb-tidal delta*), ma di dimensioni molto piccole e senza le barre lineari che si formano ai margini del canale di foce perpendicolari alla linea di riva (Davis e FitzGerald, 2004). Questa morfologia è tipica dei delta dominati dalle correnti tidali. La freccia litorale a sud della bocca di foce però, è condizionata dalla corrente lungo costa: migra infatti verso nord e va ad ostruire la bocca di foce, anche se non la chiude mai completamente, come accade per esempio nell'*inlet* studiato da Conley (1999), perché stagionalmente influenzata anche dagli eventi di piena. Recenti studi effettuati sulle variazioni morfodinamiche della foce (Ciavola et al., 2005; Balouin et al., 2006b), hanno infatti messo in evidenza il continuo e rapido movimento verso nord della freccia litorale e di tutta la bocca di foce, con conseguente erosione della duna ed ingressione di acque marine nella pineta e nei terreni retrostanti.

Il presente lavoro prende in esame l'evoluzione a lungo termine della foce dal 1996 al 2005 utilizzando fonti aereofotogrammetriche, e l'evoluzione a medio termine attraverso l'analisi dei dati acquisiti con una serie di campagne di rilievo concentrate tra aprile 2003 e ottobre 2004, cercando di definirne le dinamiche naturali. Ad inizio 2006, la Regione Emilia-Romagna (tramite il Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli, sede di Ravenna) ha eseguito i lavori di riqualificazione funzionale del tratto costiero in corrispondenza della foce, tramite chiusura della vecchia foce ed apertura di una nuova bocca circa 500 m più a sud, con un'ulteriore uscita parziale (scolmatore) alla quota del medio mare, localizzata a sud per altri circa 400 m (Regione Emilia-Romagna, 2003; Fig. 2). La fase iniziale del monitoraggio della nuova foce, effettuato con rilievi topobatimetrici e prelievo di campioni sia sulla spiaggia emersa, sia nel tratto pre-foce, sia sulla spiaggia sommersa, è stata eseguita dagli autori che presentano in questo lavoro i risultati raccolti fino all'estate del 2006. Tale monitoraggio è ancora in corso.

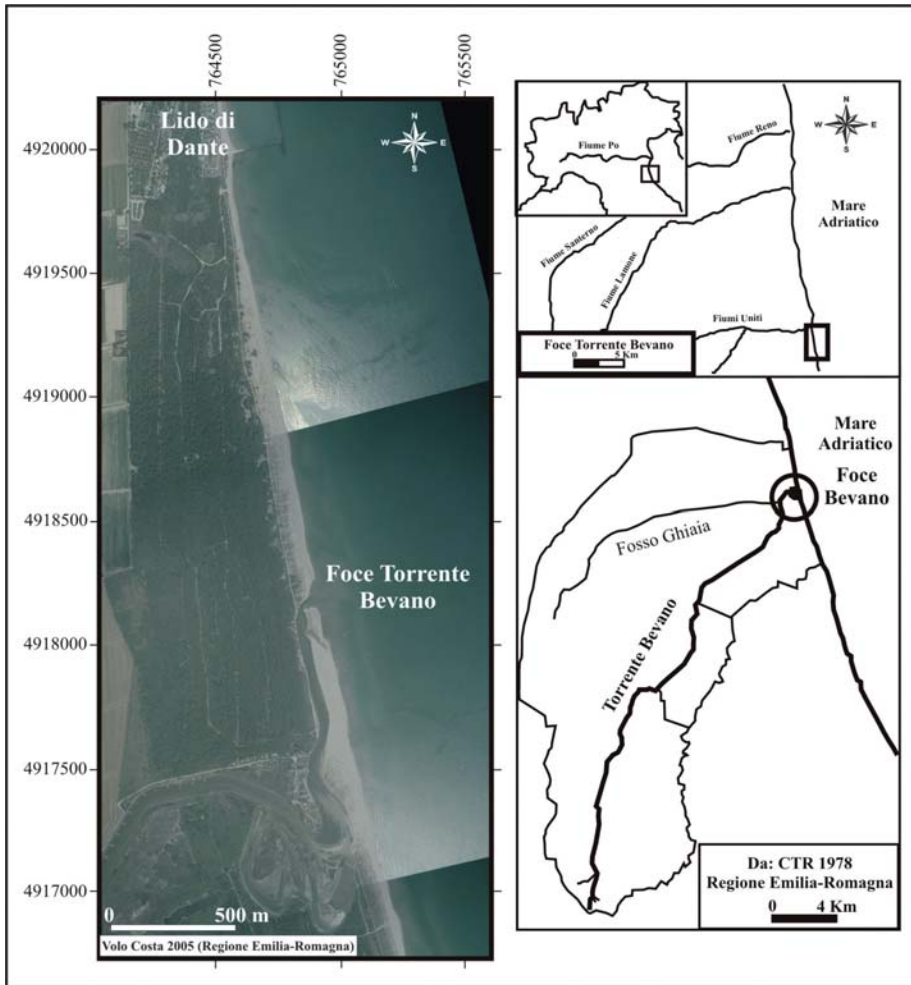


Figura 1 - Inquadramento geografico dell'area di studio. A sinistra, particolare della foce del Torrente Bevano (Volo Costa 2005, Regione Emilia-Romagna); in basso a destra, schematizzazione del bacino idrografico. Sistema di coordinate UTM32 ED50.

### Geomorfologia della zona di studio

Il Torrente Bevano ha origine dai versanti collinari ad est di Bertinoro in provincia di Forlì-Cesena, scorre in direzione nord-est e, dopo un percorso di circa 17 km, entra in provincia di Ravenna dove attraversa da ovest ad est la pianura ravennate per altri 18 km, sfociando in Mar Adriatico nell'area antistante la Pineta di Classe, fra le località di Lido di Classe e Lido di Dante (Fig. 1).

Il bacino idrografico ha un'estensione di circa 92 km<sup>2</sup> (suddiviso in 12 sottobacini quasi tutti di pianura), con una classica forma ad anfiteatro, consistente in colline plioceniche con versanti a morfologia dolce tipica dei rilievi a componente prevalentemente argilloso-marnosa. Nella zona di pianura il corso d'acqua scorre in ghiaie, sabbie ed argille alluvionali dell'Olocene ed il materiale di fondo è di natura limoso-argillosa, con poche sabbie. Il canale ha una conformazione rettilinea, ma il tratto terminale pre-fociale è caratterizzato da una morfologia meandriforme che ha portato, nel corso di questo secolo, alla formazione ed al successivo abbandono di varie anse a ridosso della spiaggia (Ciavola et al., 2005).

Il T. Bevano riceve numerosissime immissioni da fossi e canali di scolo, il principale dei quali è il Canale Fosso Ghiaia (Fig. 1), che si immette nel T. Bevano ad una distanza di circa 2 km dalla foce. Gli altri affluenti sono costituiti da piccoli scoli consorziali delle aree agricole-industriali del ravennate che, data la limitata portata liquida e l'assenza di apporto di sedimenti, influenzano poco la dinamica evolutiva dell'alveo e della sua foce. Il bacino si presenta con una forma allungata lungo la direzione dell'asta principale,

con rapporto di allungamento  $Re$  (rapporto tra il diametro di un cerchio di area uguale a quella del bacino e la lunghezza massima del bacino misurata lungo l'asta principale) pari a 0.6 (Ciavola et al., 2005). Balouin et al. (2006b) hanno dimostrato che la foce fino al 2006 era fortemente influenzata dagli agenti meteorologici, in particolare dalle correnti di marea che, in condizioni sizigiali e grazie anche al trasporto litorale lungo costa, erano in grado di spingere la bocca verso nord e di trasportare all'esterno il materiale eroso nella parte del cordone dunare interna alla foce, incrementando così il budget sedimentario della spiaggia a nord. Questo tratto di spiaggia presenta un cordone di dune sulla spiaggia emersa ed una linea di barre sulla spiaggia sommersa, le cui evoluzioni sono state descritte rispettivamente da Balouin et al. (2006a) e da Armaroli et al. (2005), attraverso studi delle variazioni a medio e lungo termine effettuati utilizzando fotointerpretazione ed analisi di immagini video (ARGUS). Le dune risultano in arretramento nella zona immediatamente a ridosso delle strutture di protezione a Lido di Dante, mentre rimangono abbastanza stabili più a sud, nei pressi della vecchia foce.

## Metodi di studio

### *Variazioni morfologiche*

Per lo studio a lungo termine (9 anni) dell'evoluzione geomorfologica della zona sono state utilizzate ortofoto digitali, un'immagine satellitare QuickBird ed un volo LIDAR terrestre (dati forniti dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna). Su tali supporti sono stati digitalizzati in ambiente GIS il tratto terminale pre-fociale del canale del T. Bevano e le linee di riva immediatamente a nord e a sud della zona di foce.

Lo studio evolutivo a medio termine (19 mesi) è stato realizzato attraverso un monitoraggio della zona di foce articolato in 8 campagne di rilevamento topografico, effettuate con Stazione Totale dall'aprile del 2003 all'ottobre del 2004. Da notare che tale periodo comprende anche la campagna intensiva svolta da Balouin et al. (2006b) dal 14 aprile al 20 giugno 2003, per studiare la dispersione dei sedimenti di foce tramite il metodo delle sabbie traccianti.

In previsione dei lavori di chiusura della vecchia foce e di apertura della nuova, è stato svolto dalla Regione Emilia-Romagna un rilievo topobatimetrico pre-lavori (17 dicembre 2005) rilevando l'asta terminale del torrente e vari profili distanziati di circa 20 m l'uno dall'altro fino a 3 m di profondità sulla spiaggia sommersa. A fine lavori, lo stesso ente faceva eseguire un nuovo rilievo batimetrico il 21 aprile 2006 ed un rilievo topografico a fine maggio 2006.

La fase iniziale del monitoraggio della zona della nuova foce (Fig. 2) è stata eseguita attraverso rilievi topobatimetrici a fine giugno (21-28 giugno) e a fine agosto 2006 (29 agosto-5 settembre): la topografia è stata rilevata tramite sistema DGPS con correzione RTK, mentre le batimetrie sono state effettuate utilizzando un ecoscandaglio a singola frequenza interfacciato con un sistema DGPS con correzione differenziale submetrica OMNISTAR.



Figura 2 - Schematizzazione della posizione della nuova foce del T. Bevano, ricavata dal rilievo batimetrico del 21 aprile 2006 (base di riferimento: Volo Costa 2005, Regione Emilia-Romagna). Per "Zona Scolmatore" si intende un tratto di spiaggia con quota di fondo al medio mare, posizionata all'altezza dell'ultimo meandro.



Prendendo come riferimento il rilievo di dicembre 2005, sono state inquadrate 10 sezioni perpendicolari alla linea di riva, distanziate tra loro di circa 100 m: quattro a sud della nuova foce e 6 a nord, numerate da 1 a 10 da nord verso sud (Fig. 3). Lungo tali sezioni sono stati eseguiti i rilievi topografici ed i rilievi batimetrici della spiaggia sommersa e del tratto terminale del canale della nuova foce.

### **Campionamenti ed analisi granulometriche**

Sono stati effettuati dagli autori dei campionamenti nel tratto terminale della vecchia foce, della spiaggia emersa e della battigia, rispettivamente il 6 febbraio, il 7 febbraio ed il 16 maggio 2006. I campionamenti avvenivano lungo i 10 profili stabiliti (Fig. 3), tramite raccolta di campioni di superficie e bennate da piccola imbarcazione. I prelievi di campioni superficiali di sabbia sono stati eseguiti sul retro-duna, sulla cresta duna, sul piede duna, sulla battigia e ad una profondità di 1 m (6 febbraio 2006). Sei sezioni sono state poi prolungate anche dentro l'asta terminale della vecchia foce, con prelievo di campioni tramite una piccola benna, sulla riva destra, al centro e sulla riva sinistra (7 febbraio 2006). Il campionamento della spiaggia sommersa è stato eseguito in un secondo momento (16 maggio 2006), poiché l'ubicazione dei campioni richiedeva un inquadramento batimetrico recente. Sulla base della batimetria effettuata il 21 aprile, tramite uso di una benna sono stati prelevati campioni lungo i transetti del 7 febbraio, bennando il truogolo, la cresta ed il piede della barra sommersa a circa 3 m di profondità. Una volta raccolti tutti i campioni, sono state effettuate in laboratorio le analisi granulometriche. Nel caso in esame è stata impiegata la tecnica di setacciatura a secco solo per pulire il campione dai frammenti di bioclasti: in primo luogo perché la granulometria delle sabbie della spiaggia alla foce del T. Bevano è in generale medio-fine, in secondo luogo perché la tecnica a secco non permette di calcolare i diametri delle particelle immerse in un mezzo, per cui si è preferito adottare un metodo di analisi che avesse valenza idraulica.

Per l'analisi vera e propria si è utilizzata una bilancia di sedimentazione di tipo standard che misura la velocità di deposizione dei grani secondo la legge di Stokes. Per quanto riguarda invece l'analisi della frazione fangosa (da 63 a 0.49 micron), è stato utilizzato un sedigrafo a raggi X della Micromeritics, che fa anch'esso riferimento alla legge di Stokes. Una volta conosciuta la distribuzione granulometrica si è proceduto alla costruzione delle curve di frequenza e delle curve cumulative derivate. Il "Metodo grafico" di Folk e Ward (1957) è stato utilizzato per calcolare il diametro medio ( $Mz$ ), la classazione o Sorting ( $s_i$ ) ed il coefficiente di Skewness ( $sk_i$ ).

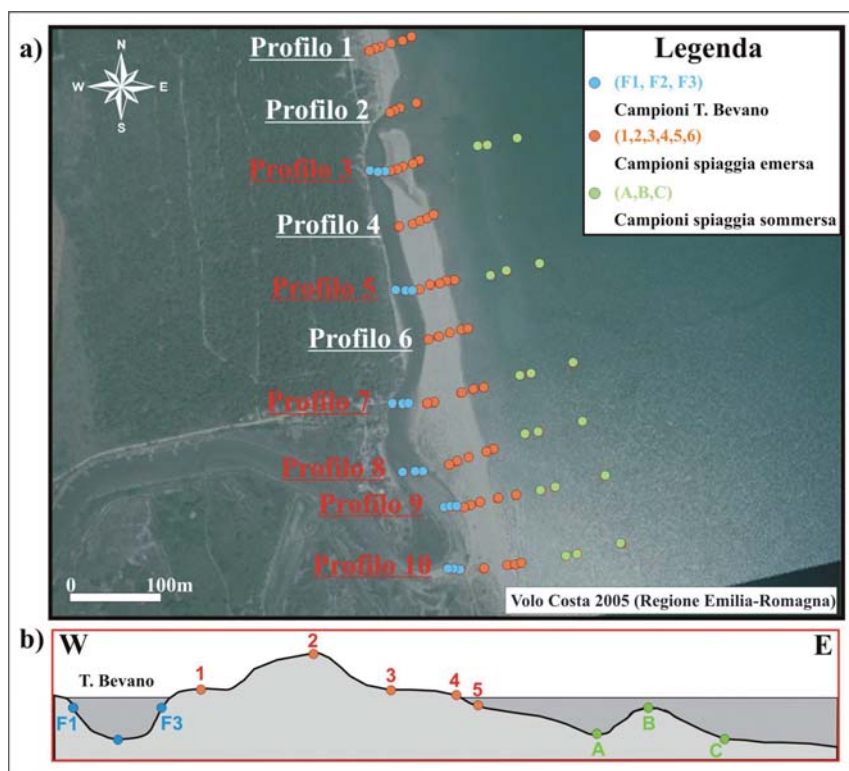


Figura 3 - a) ubicazione e denominazione dei profili stabiliti per il monitoraggio della nuova foce del T. Bevano (basata su: Volo Costa 2005, Regione Emilia-Romagna) ed i relativi punti di campionamento. In rosso sono indicate le sezioni prolungate sia nel fiume sia sulla spiaggia sommersa; b) schematizzazione della posizione dei punti di prelievo dei campioni lungo i profili.

**Clima meteomarinò**

E' stato analizzato il clima meteomarinò antistante la zona di studio, utilizzando i dati delle boe ondametrichè della Rete Ondametrica Nazionale (R.O.N.). Sono stati esaminati sia i dati ondametrichè della boa di Punta della Maestra (boa del Nord Adriatico posta di fronte alla foce del Fiume Po), sia quelli della boa di Ancona (boa dell'Adriatico Centrale posizionata di fronte ad Ancona). La boa piú vicina è quella di Punta della Maestra, ma da dicembre 2004 non sono piú reperibili i dati, a causa della rimozione della stessa per mal funzionamento. In questa stazione inoltre, i dati si riferiscono a soli due anni (2003 e 2004), periodo troppo breve per elaborare un clima annuo medio di buona significatività.

Il data-set della boa di Ancona copre invece un periodo che va dalla seconda metà di marzo 1999 alla prima metà di marzo 2006. Tale boa è però situata circa 200 km a sud del sito di studio, per cui si è deciso di trasportare a Ravenna i dati registrati in questa stazione. E' stato quindi utilizzato il criterio di trasposizione basato sulla similitudine tra i *fetch* efficaci. L'ipotesi che viene fatta a priori è che gli stessi eventi meteomarini si verifichino sulle due zone, Ancona e Ravenna, e che le differenze nel moto ondoso siano attribuibili alle diversità tra i *fetch* geografici disponibili per la generazione del moto ondoso. Il *fetch* geografico è la lunghezza, per una direzione fissata, del tratto di mare sul quale le onde nascono per interazione con il vento. Il suo valore massimo, in zone chiuse come quella del Mediterraneo, non viene mai preso in considerazione in misura superiore ai 600 km (Corsini e Inghilesi, 2004). Per stimare, oltre che l'estensione lungo una direzione specifica, anche gli effetti delle porzioni di mare adiacenti a quella considerata, e quindi per valutare gli effetti della "larghezza" della zona di generazione oltre a quelli della "lunghezza", viene introdotto il concetto di *fetch* efficace. Il calcolo del *fetch* efficace lungo una direzione è quindi influenzato dalle lunghezze dei *fetch* geografici nelle direzioni circostanti. Utilizzando il metodo SMB (Sverdrup and Munk, 1947) con i successivi aggiornamenti (Saville, 1954; Seymour, 1977; CERC, 1984), la lunghezza  $F_{eff}(\theta_j)$  associata alla direzione del vento  $\theta_j$ , è calcolata come media ponderale delle lunghezze  $F_i$  (geografiche), incluse in un settore angolare pari a 180°, con la formula (1):

$$F_{eff}(\theta_j) = \frac{\sum_{i=J-90}^{j+90} F_i \cos^{n+1}(\theta_i - \theta_j)}{\sum_{i=J-90}^{j+90} \cos^n(\theta_i - \theta_j)} \tag{1}$$

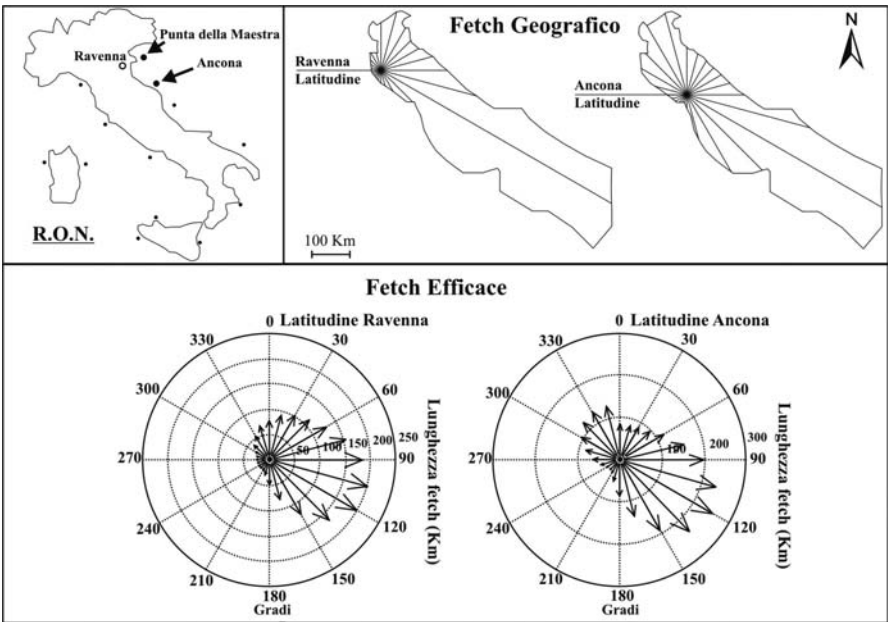


Figura 4 - In alto: schematizzazione dei confini del Mare Adriatico e rappresentazione del *fetch* geografico alla latitudine di Ravenna e della boa ondametrica di Ancona; in basso: *fetch* efficace alla latitudine di Ravenna e della boa di Ancona, settori in gradi N e distanze in km.

in cui n è un esponente legato alla legge di distribuzione direzionale dell'energia del moto ondoso, generalmente posto uguale a 2. Le lunghezze dei fetch geografici (Fig. 4) su cui trasporre il moto ondoso, sono state calcolate per un punto alle coordinate geografiche di 44° 25' N - 12° 38' E, corrispondente sulle carte nautiche (carta nautica n° 37 del Mare Adriatico "Da Pesaro al Po di Goro", Istituto Idrografico della Marina, 5a edizione, scala 1:100000, aggiornata a luglio 1999) alla profondità di 30 metri.

Il criterio di trasposizione basato sulla similitudine tra i *fetch* efficaci, lasciando invariata la direzione di provenienza del moto ondoso, restituisce un nuovo valore di periodo d'onda T e di altezza H secondo le proporzioni sotto indicate:

$H_{Ravenna} = [F_{eff:Ravenna} / F_{eff:Ancona}]^{1/2} * H_{Ancona}$	(2)
$T_{Ravenna} = [F_{eff:Ravenna} / F_{eff:Ancona}]^{1/2} * T_{Ancona}$	(3)

Una volta che i dati raccolti dalla boa di Ancona sono stati trasposti a Ravenna, sono stati analizzati per determinare le principali mareggiate: queste sono state identificate come eventi di moto ondoso con altezza minima di 1.5 m e con durata minima di 6 ore, considerando un tempo massimo di 12 ore per unire in un unico evento fenomeni ravvicinati (Mendoza e Jiménez, 2004). Si è considerata inoltre una variazione di direzione massima di 45° tra un dato di onda e l'altro (intervallo temporale di 30 minuti).

La densità di energia media (energia per unità di area orizzontale) costruita da ogni singola onda di altezza H è espressa da:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad [N \cdot m / m^2] \quad (4)$$

dove g è l'accelerazione di gravità e ρ è la densità dell'acqua.

Nel caso di un numero n di onde, l'espressione può esser generalizzata sfruttando la definizione di altezza quadratica media H<sub>rms</sub>:

$$E = \frac{1}{8} \rho g \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i^2 = \frac{1}{8} \rho g \cdot H_{rms}^2 \quad [N \cdot m / m^2] \quad (5)$$

Nel caso di onde misurate da stati di mare reali, dallo spettro energetico viene ricavato il parametro di altezza d'onda significativa H<sub>s</sub>, la cui relazione con H<sub>rms</sub> è espressa da:

$$H_s = \sqrt{2} \cdot H_{rms} \quad (6)$$

la quale, sostituita nella formula (5) della densità di energia, trasforma l'espressione in:

$$E = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 \quad [N \cdot m / m^2] \quad (7)$$

D'ora in poi, data la proporzionalità diretta tra densità di energia ed altezza d'onda al quadrato e volendo tenere in considerazione l'effetto delle onde nel tempo, per caratterizzare i fenomeni meteomarini di mareggiata, ci si riferirà al contenuto di densità di energia espresso dal parametro E\* [m²hr], ottenuto dall'integrazione sull'asse del tempo dell'altezza significativa al quadrato:

$$E^* = \int_{t_1}^{t_2} H_s^2 dt \quad [m^2 \cdot hr] \quad (8)$$

dove t<sub>1</sub> e t<sub>2</sub> definiscono l'intervallo temporale (hr=ore) entro il quale H(t) > 1.5 m.

Una volta identificate le differenti mareggiate e calcolato il loro contenuto energetico, si è proceduto effettuando una divisione per classi di intensità. In questa caratterizzazione, scegliendo in base ad una miglior analogia di condizioni, viene sostituita la nota scala ricavata per eventi in oceano Atlantico (*Atlantic Coast Northeast Storms Intensity Scale*, vedi Dolan e Davis, 1992) con un'altra scala (Tab. 1), ricavata dall'osservazione di eventi meteomarini nel Mar Mediterraneo sulla costa di Barcellona, Spagna (Mendoza e Jiménez, 2004).

Si è considerata più appropriata la scala scelta in base all'intensità delle perturbazioni che mediamente colpiscono le coste del Mar Mediterraneo: i range più limitati della scala scelta caratterizzano meglio i fenomeni registrati, essendo questi mediamente di minor intensità rispetto a quelli che si verificano in oceano aperto.

Tabella 1 - Classi di mareggiate basate sul contenuto di densità di energia (Mendoza e Jimenez, 2004).

CLASSE	DENSITA' DI ENERGIA [m <sup>2</sup> hr]
<b>I debole</b>	$E^* \leq 58.4$
<b>II moderata</b>	$58.4 < E^* \leq 127.9$
<b>III significativa</b>	$127.9 < E^* \leq 389.7$
<b>IV intensa</b>	$389.7 < E^* \leq 706.9$
<b>V estrema</b>	$E^* > 706.9$

Il regime tidale nel Nord Adriatico è fortemente asimmetrico con componenti diurne e semi-diurne; la massima escursione di marea è di 1.0 m in sizigie (Gambolati et al., 1998).

Per la correzione dei rilievi batimetrici durante il monitoraggio della nuova foce del T. Bevano è stato inoltre installato un trasduttore di pressione posizionato alla foce dei Fiumi Uniti, circa 2 km più a nord della zona studiata, riferendo successivamente i dati raccolti al livello del medio mare del mareografo di Porto Corsini.

### Evoluzione morfodinamica della vecchia foce del T. Bevano

#### *Studio a lungo termine (9 anni)*

Per l'evoluzione della foce a lungo termine si è mappata la Linea di Alta Marea (*High Water Line – HWL*) che viene definita come l'intersezione tra la spiaggia ed il livello più alto raggiunto dall'acqua durante l'alta marea precedente il volo (Dolan e Hayden, 1983) e può essere facilmente individuata sia su immagini in bianco e nero sia su immagini a colori. La variazione della HWL, che corrisponde al limite tra sabbia asciutta e bagnata, dipende dalle condizioni meteomarine al momento del volo e dalle variazioni giornaliere e stagionali del ciclo tidale (Ciavola et al., 2004). Tale criterio di mappatura è stato adottato come standard a livello regionale in Emilia-Romagna per la fotointerpretazione costiera (Ciavola et al., 2003).

La Figura 5 mostra l'evoluzione della foce del T. Bevano dal 1996 al 2005, attraverso l'analisi della HWL digitalizzata con un programma GIS (Arcview) alla scala 1:3000, sulle seguenti basi di riferimento:

- volo AIMA del 1996 (CGR Parma), scala media 1:10000;
- volo IT2000 del 1998 (CGR Parma), scala media 1:10000;
- volo AGEA del 2002 (CGR Parma), scala media 1:10000;
- immagine satellitare QuickBird del 2003;
- volo LIDAR effettuato dall'Istituto Cartografico della Catalogna per conto del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna, tra settembre e ottobre 2004;
- volo Costa 2005 (CGR Parma), scala media 1:5000.

La bocca di foce dal 1996 in poi è sempre rivolta verso nord (Ciavola et al., 2005) e la sua migrazione in tale direzione continua anche negli anni successivi in modo molto evidente (Fig. 5). Nel 1996 si distingue la formazione di una freccia litorale a sud della bocca, che si prolunga verso nord nel 1998. Nel 1996 la sezione della bocca di foce è larga circa 50 m, che si restringe però a 20 m nel tratto chiuso dalla freccia litorale. Nel 1998, anche se la freccia continua a prolungarsi verso nord e si sposta verso mare di circa 20 m, si nota come tutta la bocca sia migrata nella stessa direzione di 130-150 m (70 m/anno), per cui la freccia litorale non restringe più la zona della bocca, che risulta essere larga quasi 80 m.

Dal 1998 al 2002 la foce si sposta ancora di altri 250 m verso nord (80 m/anno), ma l'estremità settentrionale della freccia litorale viene erosa notevolmente, in quanto l'asta terminale del canale di foce ruota verso est tanto da diventare quasi perpendicolare alla linea di riva, e viene mantenuta una sezione N-S ancora abbastanza larga (65-80 m). Nel 2003 la sezione trasversale dell'asta terminale diminuisce mentre la zona più esterna della bocca di foce ha un'ampiezza di circa 80 m e migra ancora verso nord di 100 m.

Nel 2004 la zona di foce cambia nuovamente la sua configurazione morfologica: tutto il tratto terminale del canale principale mostra una sezione N-S larga più di 100 m e si sposta verso nord l'ultima ansa che il fiume forma prima di sfociare in mare. Questa migrazione produce una grossa erosione delle dune a nord della foce ed in varie occasioni il mare raggiunge anche la pineta retrostante (Regione Emilia-Romagna, 2003).

Nel 2005, infine, la bocca di foce migra verso nord di altri 100 m: in particolare si sviluppa ancora la freccia litorale a sud che va a restringere nuovamente la sezione trasversale del canale.



Nel complesso quindi, la foce del T. Bevano è migrata verso nord di 500-600 m nei 9 anni presi in considerazione.



Figura 5 - Evoluzione della foce del T. Bevano dal 1996 al 2005 (base fotografica Volo Costa 2005, Regione Emilia-Romagna).

Questa veloce migrazione, ed in particolare l'evoluzione degli anni 2004 e 2005 con la distruzione di più di 150 m di dune e di parte della pineta, hanno indebolito il sistema di protezione naturale del territorio dalle mareggiate. Inoltre, nei periodi di magra la foce risentiva del trasporto di sabbia lungo costa interrandosi e rendendo molto difficoltoso lo sbocco a mare in caso di piena. La difficoltà dell'acqua di sfociare a mare si ripercuoteva a monte, facendo innalzare il livello dell'acqua nel fiume e rendendo più difficile lo scolo dei canali. In caso di grossa mareggiata il mare poteva infatti anche penetrare nei canali dentro la pineta e mettere in crisi il sistema di bonifica, che arriva a scolare fino alle porte di Ravenna (Regione Emilia-Romagna, 2003).

#### ***Studio a medio termine (19 mesi)***

Lo studio dell'evoluzione a medio termine della foce è stato condotto attraverso 8 campagne di rilevamento topografico concentrate tra aprile 2003 e ottobre 2004 (Fig. 6 e Fig. 7): 14 aprile 2003, 22 aprile 2003, 9 maggio 2003, 4 giugno 2003, 20 giugno 2003, 13 febbraio 2004, 24 maggio 2004, 8 ottobre 2004. Le campagne del 2003 sono le stesse per le quali è stata effettuata un'analisi delle variazioni a breve termine, tra aprile e giugno 2003, in Ciavola et al. (2005).

La Figura 6 e la Figura 7 mostrano la conformazione morfologica della zona, con la presenza di ambienti costieri tipici di un *tidal inlet*: è ben visibile la formazione di una freccia litorale a sud della bocca di foce, di una zona di delta di fronte alla foce (delta di riflusso) influenzato dalle correnti di marea (Balouin et al., 2006b), di una barra di battigia e di un cordone dunare a nord.

E' stata analizzata una sezione N-S della bocca di foce (Fig. 6), ripetuta su tutti gli 8 rilievi: da aprile a giugno 2003 c'è stato uno spostamento della gola del canale di circa 40 m verso nord, come già notato da Ciavola et al. (2005).

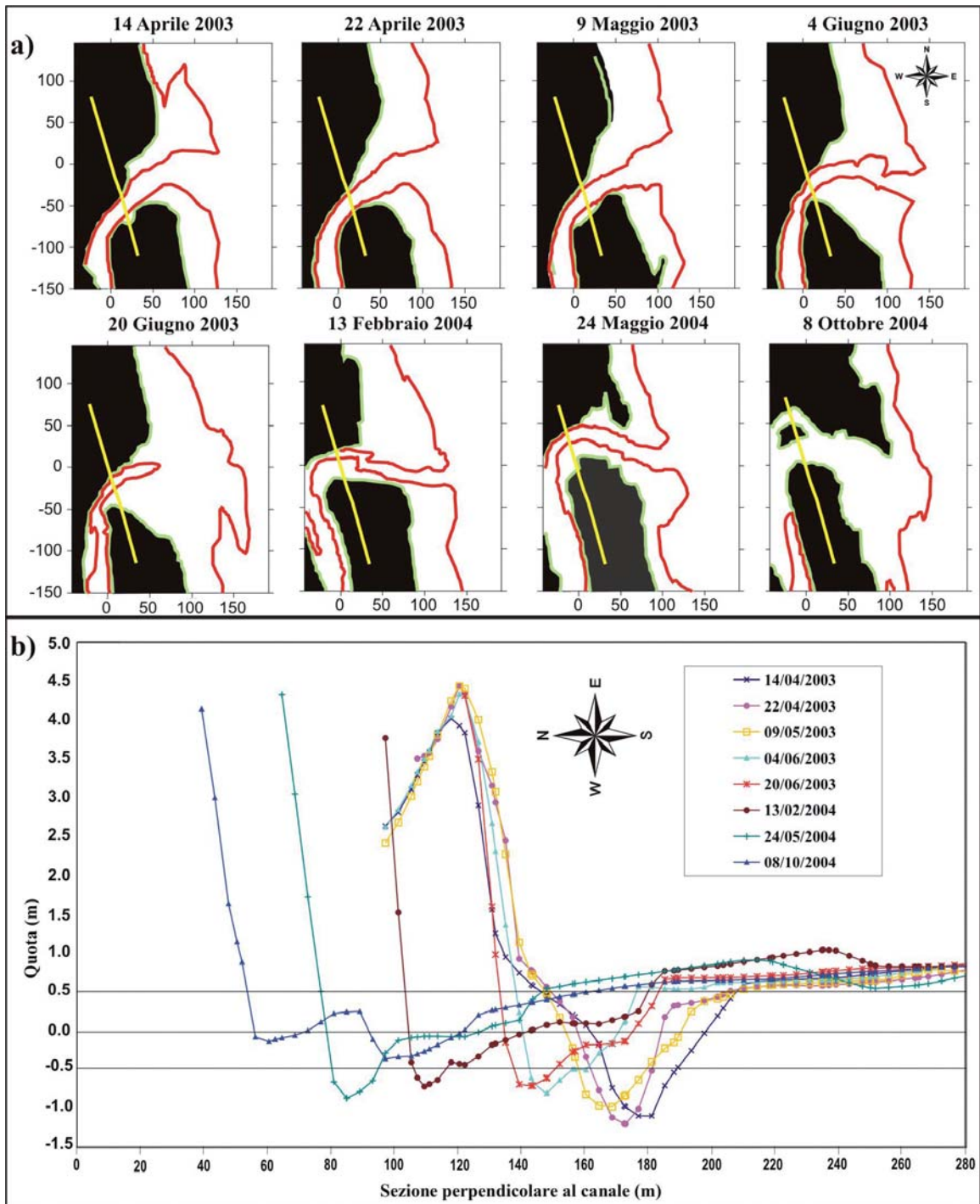


Figura 6 - a) Evoluzione schematica del tratto terminale del canale nelle 8 campagne di rilevamento topografico: la linea verde indica la batimetria 0.5 m; la linea rossa la batimetria 1 m. La linea gialla indica l'ubicazione della sezione N-S analizzata per studiare la migrazione laterale (verso nord) della zona di foce (unità di misura degli assi: m); b) Sezione perpendicolare al canale di foce, riportata per le 8 campagne di rilievo.

Un ulteriore spostamento verso nord di più di 70 m si è avuto successivamente da giugno 2003 a ottobre 2004. Queste variazioni sono associate ad una leggera diminuzione dell'area della sezione trasversale dell'alveo fino a giugno 2003, che aumenta poi a fine 2003, assestandosi nell'estate del 2004 intorno ai 40-50 m di larghezza. L'alveo del canale è più ristretto nel 2003 con l'argine sud più ripido, tendendo poi ad allargarsi man mano che nel tempo migra verso nord, con una diminuzione della pendenza dell'argine stesso ed un'evidente erosione della duna a nord. La migrazione verso nord del tratto terminale del canale è stata valutata in uno spostamento di circa 112 m, stimato intorno a 6.2 m al mese su tutto il periodo considerato. Questa migrazione non è stata però uniforme: il movimento più veloce si ha tra aprile e giugno 2003, dove lo spostamento è di 34 m nell'arco di poco più di due mesi. Da giugno 2003 a febbraio 2004 si ha lo stesso spostamento (33 m), ma in un periodo di tempo quadruplicato. Tra febbraio e maggio del 2004 si ha nuovamente una veloce migrazione verso nord di circa 45 m. Fino a ottobre 2004 la foce rimane infine pressoché stabile nella posizione assunta a maggio, allargando solo la sua sezione N-S.

La Figura 6 mostra anche la rotazione verso S-E dello stesso tratto, che era già stata notata dalla fotointerpretazione: il suo andamento diventa quasi ortogonale alla spiaggia nel periodo intercorso tra giugno 2003 e febbraio 2004, rimanendo poi tale per tutto il 2004.

Queste variazioni sono legate ed in parte causate dalla migrazione a nord della freccia litorale che si forma a sud della bocca di foce, alimentata dal predominante trasporto litorale verso nord (Ciavola et al., 2005) e che si presenta in erosione alla sua estremità orientale per tutto il 2003, erosione che va nel tempo ad interessare anche le spiagge più a sud. Nel lato nord della foce è presente un cordone di dune ben sviluppato, le cui creste spesso superano i 3.5 m ma che, come si è già detto, è in continua erosione a causa della migrazione verso nord della foce: fa eccezione il periodo tra il 4 ed il 20 giugno 2003, in cui è visibile una moderata accrezione, forse dovuta alle condizioni di bel tempo con scarse precipitazioni.

Di fronte a tali dune è presente una barra di battigia che migra in direzione E-O. Tale barra si muove verso terra nella primavera del 2003, mentre tende a spostarsi verso il largo nell'autunno del 2004, movimento confermato anche dalla presenza di una barra sommersa.

Anche il delta di marea che si forma di fronte alla bocca di foce a causa delle correnti tidali di riflusso (*ebb-tidal delta*), varia nel tempo la sua conformazione: dalle mappe di erosione-deposizione (Fig. 7b) è visibile una sostanziale deposizione fino all'estate del 2003. Nel periodo successivo il delta migra ulteriormente verso nord, ma l'asta terminale del canale ruota verso S-E: si ha perciò una predominanza delle zone in erosione soprattutto a sud della foce. Le zone in accrezione sono invece presenti di fronte alla bocca di foce e a nord, dove infatti si ha la formazione della barra di battigia.

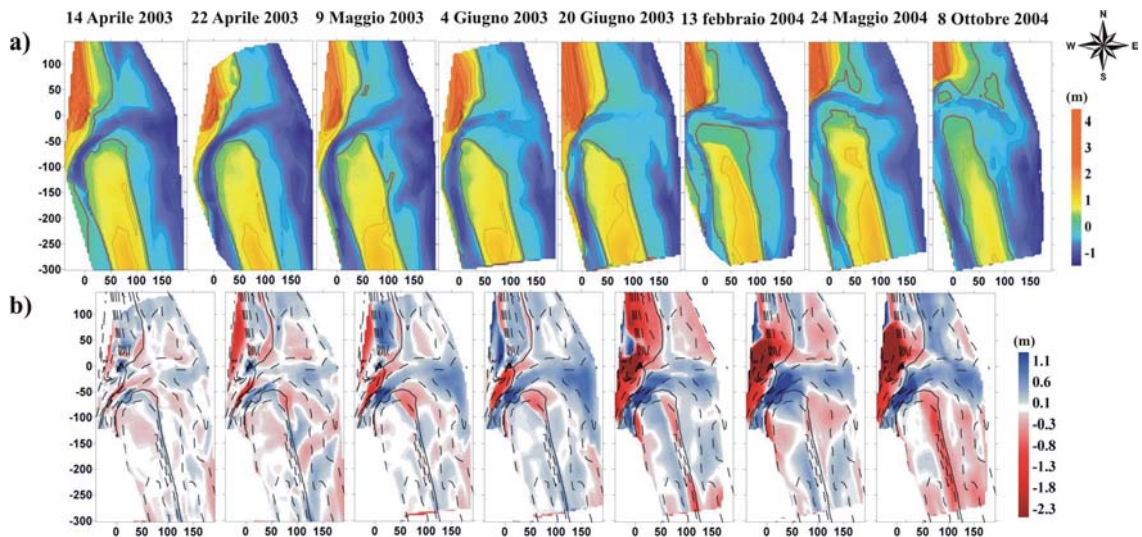


Figura 7 - a) DTM interpolati dai dati degli 8 rilievi topografici eseguiti tra aprile 2003 e ottobre 2004; b) Variazioni di quota calcolate prendendo come riferimento il primo rilievo: le linee di livello sullo sfondo sono ottenute dal rilievo del 14 aprile 2003. Si nota la mancanza dei dati nel tratto del canale parallelo alla linea di riva: tale area non era infatti stata rilevata ad aprile 2003, per cui non sono state calcolate le differenze di quota (unità di misura degli assi: m).



Attraverso i dati ricavati dai rilievi tra aprile 2003 e ottobre 2004, è stata effettuata una stima dei volumi di sedimento mobilitati nel tempo, con un andamento che rispetta nel complesso le dinamiche inizialmente rilevate nel periodo compreso tra aprile e giugno 2003 da Ciavola et al. (2005).

La Figura 8 schematizza tali variazioni volumetriche e mostra un modello concettuale del bilancio sedimentario della zona di studio. L'erosione della duna a nord è stata stimata sui 2200 m<sup>3</sup>/mese da aprile a giugno 2003 in accordo con Ciavola et al. (2005); poi fino ad ottobre 2004 si assesta sui 1600 m<sup>3</sup>/mese, ma si può affermare che rimane elevata per tutto il periodo in esame. Nel complesso, tra giugno 2003 e febbraio 2004 sono stati asportati 15700 m<sup>3</sup> di duna (Tab. 2): tale erosione non è però stata accompagnata da una deposizione sul delta. Infatti, mentre da aprile a giugno 2003 è stato stimato un accumulo di 1950 m<sup>3</sup>/mese, nuovamente in accordo con Ciavola et al. (2005), successivamente si ha erosione per tutto l'inverno del 2004 (275 m<sup>3</sup>/mese).

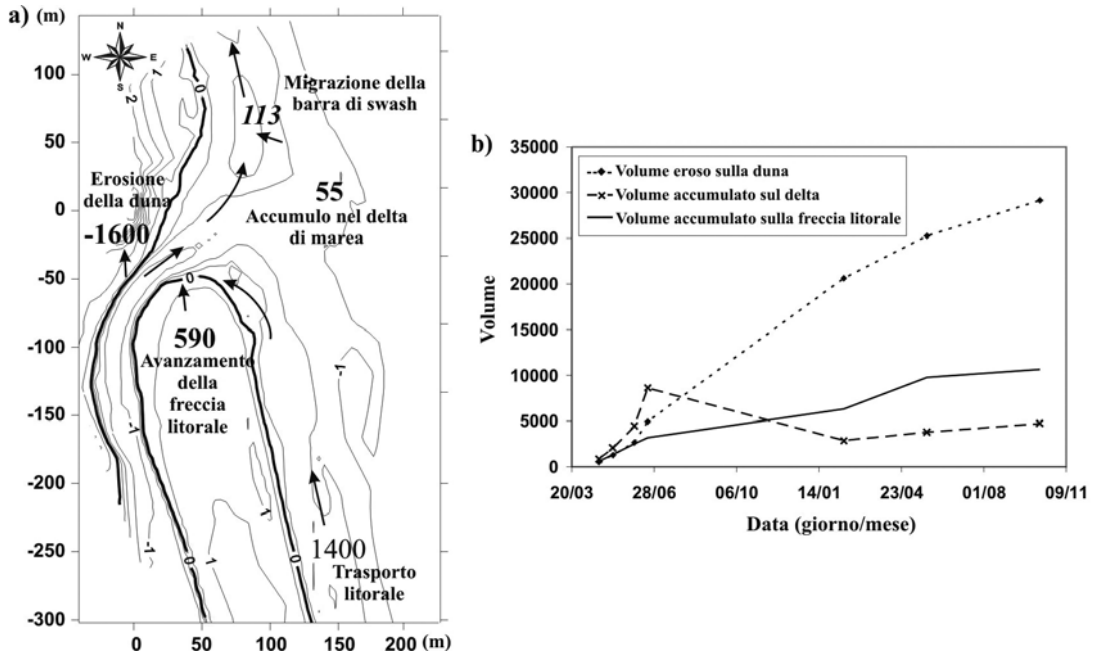


Figura 8 - a) Modello concettuale del bilancio sedimentario dell'area di foce del T. Bevano (valori numerici espressi in m<sup>3</sup>/mese) ottenuto dai rilievi topografici eseguiti nel periodo che va da aprile 2003 ad ottobre 2004. Le frecce indicano la direzione del trasporto sedimentario; b) Variazioni cumulative dei volumi di materiale accumulato sul delta e sulla freccia litorale e del materiale eroso sulla duna dell'area di foce del T. Bevano (valori numerici espressi in m<sup>3</sup>/mese), ottenuti dai rilievi topografici nel periodo che va da aprile 2003 ad ottobre 2004; c) Tabella con i volumi (m<sup>3</sup>) accumulati o erosi tra un rilievo ed il successivo.

L'area del delta di marea nell'intero periodo di studio mostra comunque un accumulo di sedimento che, mediato sull'intero periodo di studio, è di 55 m<sup>3</sup>/mese. Parte della sabbia proveniente dall'erosione delle dune a nord, a cui si aggiunge il sedimento derivato dall'erosione laterale delle dune lungo l'asta terminale del T. Bevano, va ad alimentare la barra di battigia più a nord che nell'estate del 2003 presentava una forte accrezione di 1250 m<sup>3</sup>/mese. Tale barra, come si è visto, migra verso terra per tutto il 2003 e parte del 2004 e si ha su di essa un accumulo di sedimento pari a 113 m<sup>3</sup>/mese.

Altro sedimento si accumula sulla freccia litorale che si forma a sud della foce, che a febbraio 2004 è notevolmente ampia. Tale freccia migra, come più volte illustrato, sia verso nord sia verso terra, con un accrescimento medio di 590 m<sup>3</sup>/mese su tutto il periodo in esame. Tale accrescimento ancora una volta non è però uniforme: l'accrescimento maggiore si ha sempre tra aprile e giugno 2003, con accumuli di 1430 m<sup>3</sup>/mese, che diventano poi di 500 m<sup>3</sup>/mese dall'autunno 2003 e per tutto il 2004. Il restringimento della sua ampiezza è in parte dovuto al trasporto litoraneo verso nord, stimato come 1400 m<sup>3</sup>/mese da Ciavola et al. (2005) che erode il margine orientale della freccia litorale e sposta il sedimento, incrementando la sua progradazione in questa direzione. Tra giugno 2003 e febbraio 2004 essa rimane relativamente stabile per quanto riguarda la sua posizione: in questo

periodo infatti si ha la rotazione verso S-E del tratto pre-fociale del canale del T. Bevano. Questo comportamento potrebbe indicare una diminuzione del trasporto lungo costa verso nord.

Per poter mettere in relazione le variazioni morfologiche osservate con le forzanti meteomarine, si è proceduto a svolgere una ricostruzione del clima antistante la zona di studio. Il settore di traversia che influenza la zona della costa ravennate è limitato a nord dall'apparato del delta del Fiume Po (Punta della Maestra) e a sud dalla zona del promontorio del Conero vicino Ancona. Il settore derivante da tali limitazioni risulta compreso geograficamente tra circa 25°N e 125°N; le onde al largo ritenute significative a livello di processi costieri per la zona ravennate, saranno considerate invece in un settore leggermente più ampio, tra 10°N e 140°N, per comprendere anche effetti dovuti alla rifrazione del moto ondoso sottocosta nei settori di confine.

**Tabella 2 - Volumi (m<sup>3</sup>) accumulati (valori positivi) ed erosi (valori negativi) tra un rilievo ed il precedente.**

Data Rilievo	V eroso	V accumulato	V accumulato	V Accumulato
	sulla Duna	sul Delta	sulla Freccia Litorale	sulla Barra di Battigia
22/04/2003	-530	861	601	2211
09/05/2003	-757	1182	762	2714
04/06/2003	-1380	2377	1162	2971
20/06/2003	-2265	4192	667	4721
13/02/2004	-15669	-5732	3124	3320
24/05/2004	-4640	903	3463	3104
08/10/2004	-3878	934	867	4242

I dati di moto ondoso sono stati divisi e raggruppati in settori di ampiezza 10° (ad es.: il settore indicato con "10°N" raggruppa le onde provenienti tra 0° e 10°N), ed in classi di altezza spaziate 1 m. E' stata considerata la condizione di "mare calmo" per onde inferiori a 0.25 m di altezza.

Sull'intero set di dati disponibili nel dataset della Boa di Ancona, da marzo 1999 a marzo 2006, circa il 20% dei dati è mancante per problemi di mal funzionamento della Rete Ondametrica Nazionale. Il 35% delle onde registrate nell'intero periodo (1999-2006) proviene dal settore considerato come efficace, e le percentuali indicate in seguito si riferiranno a questo sott'insieme. Quasi il 15% del tempo in cui le onde appartengono al settore considerato è da attribuire alla condizione di mare calmo.

Si nota l'affermarsi di due settori dominati dal moto ondoso (Fig. 9): il primo compreso tra i 20° ed i 50° N, in cui le mareggiate di Bora raggiungono presenze significative di onde con altezza superiore ai 3 m. Il secondo, attorno ai 120° N, in cui si raggruppano le onde con maggior frequenza di apparizione (percentuali superiori al 4% sul totale delle onde registrate per i singoli settori di ampiezza 10°), mostrando rispetto ai settori più settentrionali minor energia ed altezza.

Questi risultati sono in accordo con studi precedenti dove risulta che nel Mare Adriatico prevalgono le mareggiate generate dai venti di Scirocco (S-E) e di Bora (N-E): la velocità massima del vento di Bora è normalmente più alta rispetto a quella dello Scirocco. Tuttavia nella zona di studio, situata nella parte nord-orientale dell'Adriatico, le tempeste di Scirocco hanno un *fetch* più lungo rispetto a quelle di Bora (Gambolati et al., 1998). Il mare regnante proviene dunque da E, S-E; il mare dominante da N-E (Idroser, 1996).

Nel 2004 manca il 23% delle misurazioni, il 39% appartiene al settore 10°-140°N, di cui il 15% è di mare calmo.

Il 2003 è stato un anno caratterizzato da pochi eventi ad alta energia, essenzialmente concentrati nel periodo gennaio-febbraio con dominanza degli eventi da Bora. Inoltre tra ottobre e novembre 2003 si sono verificate condizioni di moto ondoso perturbato per lunghi periodi in seguito a venti da N-E associati a condizioni tidali di sizigie (Fig. 10c). Tali eventi non compaiono però nella banca dati delle mareggiate in quanto non hanno superato la soglia scelta.

Il 2004 è stato invece un anno con maggior contenuto energetico, con maggiore presenza di eventi da Scirocco. Inoltre, tra il 18 ed il 22 gennaio 2004, sono state identificate 2 mareggiate particolarmente intense, di classe 2 e 3, ancora associate a maree sizigiali elevate (Tab. 3 e Fig. 10c).



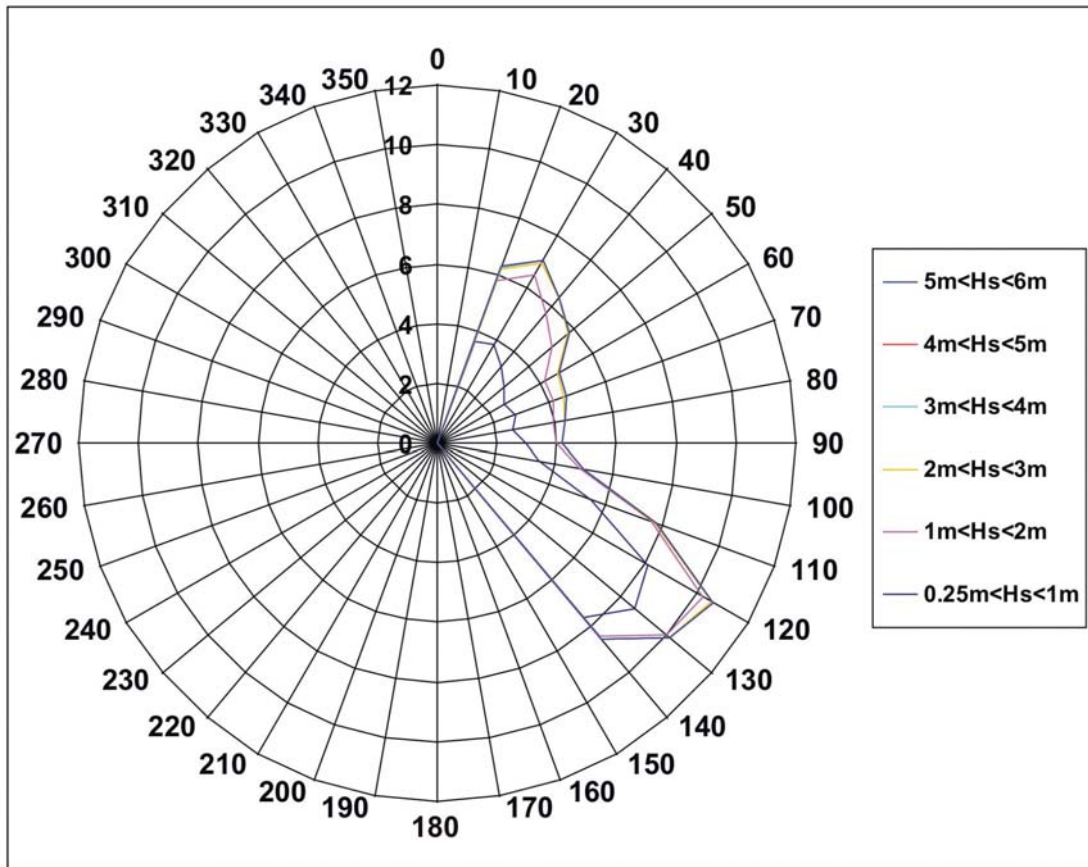


Figura 9 - Frequenza percentuale cumulativa di apparizione del moto ondoso divisa per settori di provenienza di ampiezza 10°, distinguendo classi di altezza di 1.0 m per ogni direzione. I dati provengono dalla boa ondometrica di Ancona e sono stati trasposti al largo di Ravenna (30 m di profondità); coprono il periodo compreso tra marzo 1999 e marzo 2006.

In questi mesi, consultando i dati delle precipitazioni e dei livelli idrometrici raccolti nelle stazioni idrografiche situate nel bacino del T. Bevano, acquisiti tramite interfaccia Dexter (ARPA-SIM; <http://www.arpa.emr.it>), si ricava che sono stati registrati tre eventi di piena concentrati sempre tra ottobre e novembre 2003.

La particolare configurazione della foce che si ritrova a febbraio 2004, è quindi in parte dovuta alla migrazione della freccia litorale verso nord che ha chiuso sempre più il tratto pre-foce del canale, restringendone la sezione.

I successivi eventi di piena, ostacolati da questa ostruzione, hanno generato una maggiore escavazione del tratto settentrionale della sponda di foce, aumentando l'erosione laterale del cordone dunare.

Nel rilievo di maggio 2004 si nota poi che la foce ricomincia a migrare verso nord, pur mantenendo la sua nuova conformazione. Tra febbraio e maggio 2004 si sono verificate infatti due forti mareggiate generate da venti di S-E, entrambe associate a maree sizigiali elevate (Tab. 3 e Fig. 10c).

In particolare la mareggiata a inizio maggio, di classe 2, ha avuto un notevole impatto su tutto il litorale ravennate.

In questo periodo dunque, la freccia ricomincia ad essere erosa nella sua estremità orientale e a migrare verso nord, indice di una ripresa del trasporto lungo costa. Fino a ottobre 2004 si hanno 3 mareggiate di classe 1, di breve durata e tutte da N-N-E, non associate a condizioni tidali estreme. Solo a fine settembre si verifica una forte mareggiata, sempre da N-E e di classe 3, associata ad un'alta marea sizigiale con punte di 0.80 m (Tab. 3 e Fig. 10c).

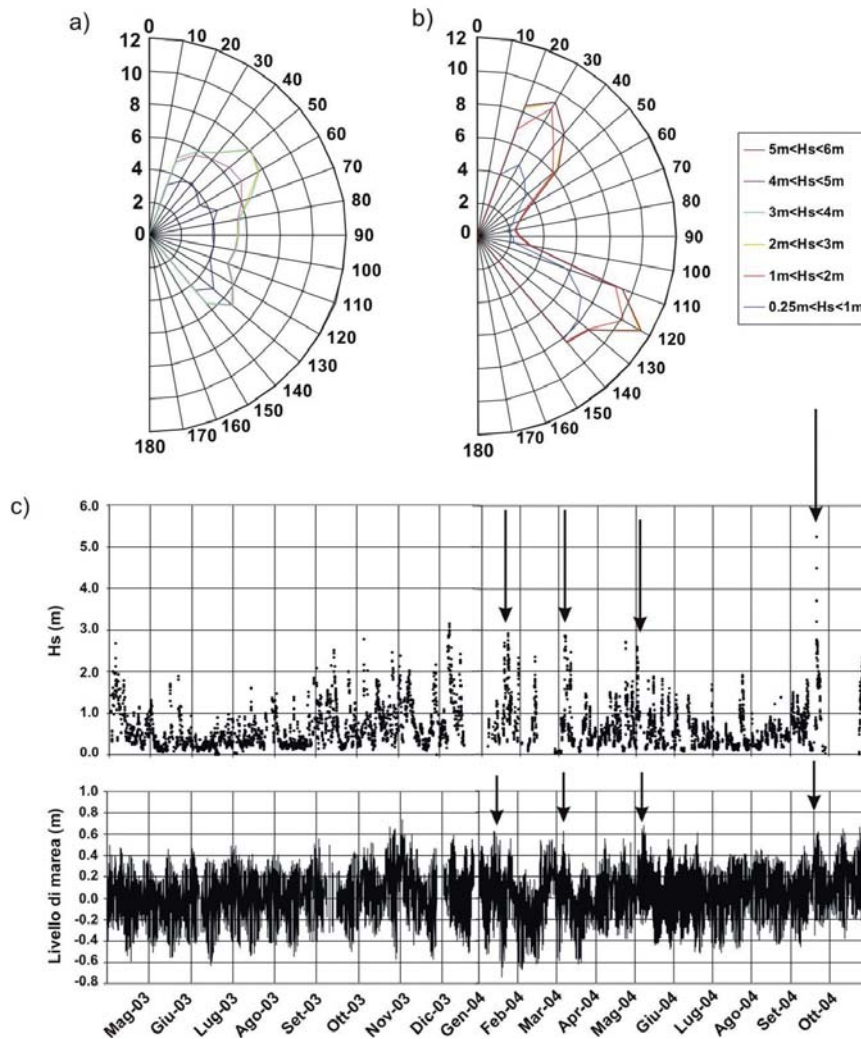


Figura 10 - Clima meteomarinico ricostruito per il periodo di studio tra aprile 2003 e ottobre 2004. In particolare: i grafici a) e b) rappresentano le frequenze percentuali cumulative di apparizione del moto ondoso nel settore di traversia, divise per settori di provenienza di ampiezza 10° e distinguendo classi di altezza di 1.0 m per ogni direzione, rispettivamente per l'anno 2003 e per l'anno 2004; dati boa di Ancona trasposti a Ravenna. Il grafico c) mostra le Hs delle onde all'interno del settore di traversia e le rispettive variazioni tidali misurate dal mareografo di Porto Corsini (Ravenna); le frecce nere indicano la posizione temporale delle mareggiate di casse 2 e 3 verificatesi nel periodo oggetto di studio (si veda la Tabella 3).

Come è possibile vedere dalla Figura 6 la mareggiata produce un completo interrimento della foce. Si può quindi concludere che la migrazione della foce verso nord era controllata da eventi di moto ondoso da Scirocco, mentre gli eventi da Bora non facevano altro che occluderla.

**Morfodinamica della foce attuale del T. Bevano**

Ad inizio 2006 la Regione Emilia-Romagna eseguiva dei lavori di chiusura della vecchia foce e di apertura di una nuova bocca, situata circa 500 m più a sud (Fig. 2). La vecchia foce veniva chiusa utilizzando la sabbia dragata per aprire la nuova foce e la zona dello scolmatore, un canale in corrispondenza dell'ultimo meandro con quota di fondo al medio mare e con funzione di facilitare lo smaltimento delle acque in caso di piena. In corrispondenza della nuova foce veniva costruita una palificata in legno posta sul lato nord, anche a protezione dell'intervento di ricostruzione della duna nella zona della vecchia foce realizzato tramite l'installazione di viminate morte e piantumazione di vegetazione.

Tabella 3 - Parametri delle mareggiate classificate per gli anni 2003 e 2004 (nrg tot= energia totale; dir max nrg= direzione massima energia). In grassetto sono evidenziate le mareggiate nel periodo compreso tra aprile 2003 e ottobre 2004. Le due mareggiate in corsivo sono quelle che sono state più dannose per il litorale emiliano-romagnolo.

Periodo	Classe	nrg tot	durata ore	dir max nrg	Hs max	Hs media	tp medio
06/01/2003	3	141.6	18	60	3.6	2.7	7.1
08/01/2003	2	72.2	19	45	2.8	1.9	6.7
11/01/2003	3	224.9	44	44	3.1	2.2	6.9
21/01/2003	1	24	7.5	124	2	1.8	6.2
24/01/2003	3	266.3	59	60	2.8	2.1	6.2
31/01/2003	2	106	26	56	2.6	2	6.2
04/02/2003	1	34.5	6.5	34	2.7	2.3	6.6
18/01/2004	2	85.3	18.5	37	2.7	2.1	6.9
21/01/2004	3	165	32.5	35	2.9	2.2	6.8
30/01/2004	1	36.8	9	17	2.3	2	6.3
12/02/2004	1	36.3	11	73	2.4	1.8	6.1
07/03/2004	2	89.2	14	110	2.9	2.5	7.9
09/03/2004	1	44.6	11.5	29	2.3	2	6.5
11/03/2004	2	86.6	23.5	93	2.5	1.9	7.2
<i>04/05/2004</i>	2	<i>99.7</i>	<i>22.5</i>	<i>110</i>	2.6	2.1	7.2
17/05/2004	1	17.9	6.5	24	1.8	1.7	5.9
27/07/2004	1	38.1	12.5	12	1.9	1.7	6.6
17/09/2004	1	21.3	7.5	36	1.9	1.7	6.1
<i>24/09/2004</i>	3	<i>343.1</i>	<i>68.5</i>	<i>17</i>	5.6	2.1	6.8
31/10/2004	2	70.8	17	104	2.4	2	7.5
07/11/2004	1	28.6	7.5	15	2.3	1.9	6.7
07/11/2004	3	181.5	28.5	16	3.3	2.5	7.1
09/11/2004	2	83.6	23.5	133	2.4	1.9	7
26/12/2004	3	247.4	41	114	3.4	2.4	8.6
29/12/2004	3	222.1	34.5	47	3.3	2.5	7.1

Una volta terminati i lavori, è cominciato il monitoraggio della nuova foce, eseguito sia tramite campionamenti sia attraverso campagne di rilievi topobatimetrici. Come già accennato, sono stati eseguiti prelevamenti di campioni sull'asta terminale del canale della vecchia foce, sulla spiaggia emersa e su quella sommersa per ottenere una caratterizzazione granulometrica del sito precedentemente ai lavori.

I sedimenti della spiaggia emersa sono risultati sabbie da medie a fini, mentre la sabbia finissima si ritrova con regolarità nel campione prelevato al piede della barra sommersa. I campioni nell'alveo T. Bevano mostrano invece una variabilità nelle caratteristiche granulometriche, che vanno dal silt alla sabbia media. Inoltre, i sedimenti di spiaggia emersa, che presentano una distribuzione omogenea nei diametri medi, sono ben classati e con asimmetria poco pronunciata (intorno allo zero). Al contrario, i campioni di fiume hanno una distribuzione più eterogenea nei diametri medi, sono molto poco classati e hanno sempre code di materiali fini (Fig. 11).

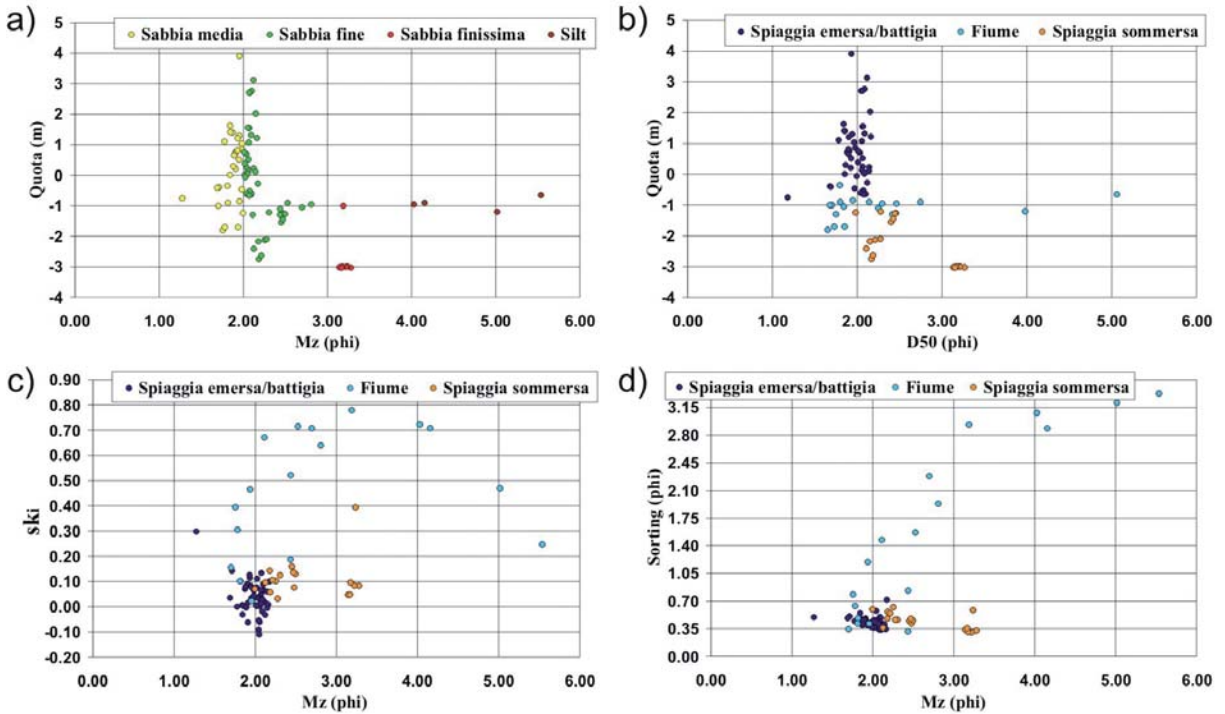


Figura 11 - Grafici di distribuzione di alcuni parametri granulometrici di Folk & Ward (1957) ricavati dalle analisi sedimentologiche effettuate sui campioni prelevati, quali diametro medio (Mz), mediana (D<sub>50</sub>), sorting e skewness (sk<sub>i</sub>). Il grafico a) mostra la distribuzione del diametro medio; gli altri tre indicano le distribuzioni dei parametri raggruppando i punti in base all'ambiente sedimentario e cioè fiume, spiaggia emersa/battigia e spiaggia sommersa.

Prima dell'intervento è stato eseguito per conto della Regione Emilia-Romagna un rilievo di inquadramento della situazione morfologica, denominato rilievo "pre-lavori" (dicembre 2005), di cui si è già detto sopra. La stessa Regione ha fatto poi eseguire anche i rilievi per inquadrare la zona a fine lavori: una batimetria ad aprile 2006 ed una topografia della spiaggia emersa a fine maggio 2006 (Fig. 12).

I rilievi "post-lavori" sono stati eseguiti in un periodo di tempo troppo distanziato per poterli considerare parte di un'unica condizione morfologica della spiaggia: si è quindi deciso di considerare la batimetria di aprile 2006 come rappresentativa della situazione di fine-lavori per quanto riguarda la spiaggia sommersa e la bocca di foce, e la topografia di maggio 2006 rappresentativa della stessa situazione per la spiaggia emersa.

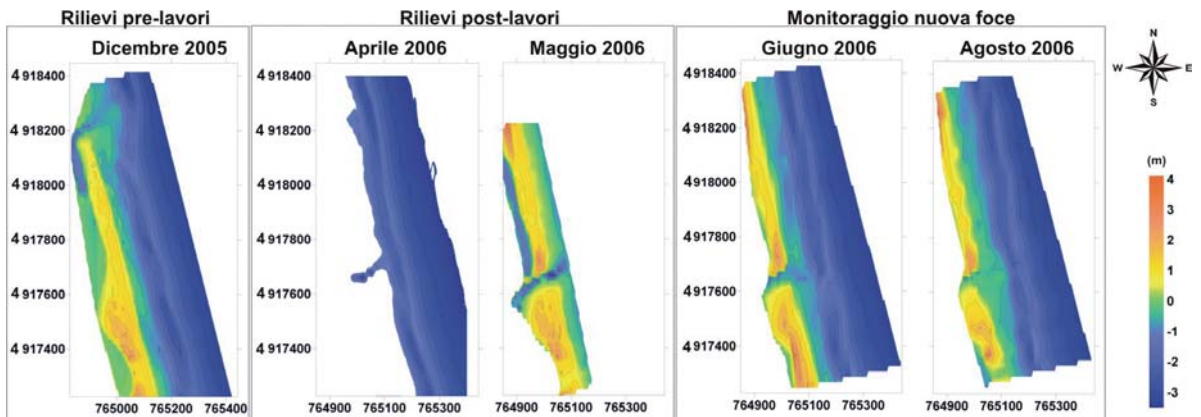


Figura 12 - DTM interpolati dai rilievi topobatimetrici eseguiti. Si noti come i rilievi post-lavori siano stati interpolati in due mappe separate, una per la batimetria (aprile 2006) ed una per la topografia (maggio 2006). Sistema di coordinate: UTM32\* ED50.

Sono poi state eseguite dagli autori due campagne di rilievi topobatimetrici a fine giugno e a fine agosto 2006 (Fig. 12). Ad integrazione di questi dati sono stati fatti anche vari sopralluoghi per verificare la tenuta dell'intervento e per pianificare le future campagne.

L'intervento ha incluso anche l'apertura di un canale, all'altezza dell'ultimo meandro della vecchia foce, con quota di fondo al medio mare, situato circa 400 m a sud della nuova foce, con funzione di scolmatore in caso di alta marea o di piena del fiume (Regione Emilia-Romagna, 2003).

Tale scolmatore è ben visibile sul rilievo di agosto 2006.

Il lato settentrionale della foce è abbastanza stabile grazie alla palificata posta a protezione della duna a nord. In realtà essa presenta dei problemi e periodicamente la Regione è costretta ad intervenire con lavori di ripristino dei pali in legno. Anche durante il periodo di monitoraggio, eseguito quasi interamente in estate, le onde hanno più volte scavalcato i pali ed eroso la spiaggia retrostante, producendo la fluidificazione delle sabbie e quindi il loro conseguente refluento attraverso i pali stessi. In altri casi ci sono stati dei cedimenti dovuti a processi di scalzamento al piede, si ritiene da parte delle correnti di marea.

Il lato sud della foce mostra la presenza di una freccia litorale, che è stata erosa nel tempo nella sua estremità N-E ed è contemporaneamente leggermente avanzata verso nord (Fig. 13), andando a restringere in parte la bocca di foce. Questo comportamento sembra essere assimilabile alle dinamiche sopra descritte per la vecchia foce, anche se la palificata in legno posta a nord impedisce la sua migrazione in tale direzione. La zona del canale di foce è poi sempre caratterizzata da deposizione di sedimento, che contribuisce anch'essa a chiudere la zona della bocca.

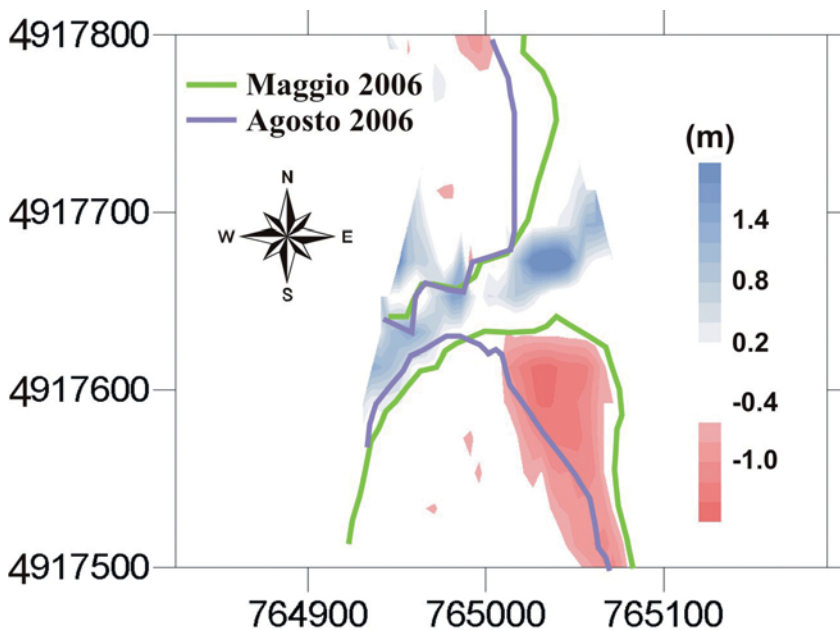


Figura 13 - Mappa di erosione-deposizione sulla spiaggia emersa e nel tratto pre-fociale del canale del T. Bevano, nel periodo di tempo tra maggio e agosto 2006. Sistema di coordinate: UTM32 ED50.

La Figura 14 mostra i DTM interpolati utilizzando solo i punti sulla spiaggia sommersa, per i quali è stata creata una scala di colori scelta in modo tale da mettere in risalto la presenza delle barre sommersa al largo della foce. Già ad aprile 2006, quando la nuova foce era funzionante da quasi due mesi, si era sviluppata una barra continua, parallela a riva. A giugno l'interpolazione mostra il medesimo sistema di barre che però non ha più la stessa continuità e sembra attaccarsi verso terra al terrazzo di bassa marea/barra intertidale subito a sud della zona di foce.

Ad agosto infine, le barre cominciano a mostrare una certa ritmicità. In ogni caso le creste delle barre rimangono comunque al di sotto della profondità di 1 m. Il riquadro nero mostra la posizione della zona più esterna della bocca di foce: la sua conformazione è in parte visibile solo nel rilievo di aprile 2006 in quanto si è successivamente spostata verso terra.



## Discussione

Negli ultimi 10 anni la foce del T. Bevano è migrata verso nord con un tasso di spostamento elevato, tanto da essere osservato direttamente anche tra campagne di rilievo distanziate tra loro pochi mesi. In media tale spostamento, abbastanza uniforme, è stato stimato intorno a 70 m/anno. Quasi sempre la migrazione verso nord ha interessato tutto l'apparato fociale.

Solo tra l'autunno del 2003 e l'autunno del 2004, la zona di foce rimane nel complesso stabile, migrando di poche decine di metri: in realtà in questo periodo si allarga la sua sezione N-S, perché la duna a nord viene notevolmente erosa e si ha la rotazione del segmento terminale del canale di foce verso S-E. Il comportamento differente di questo periodo è confermato anche dall'osservazione della variazione della linea di riva: essa rimane nel complesso stabile, sia a nord sia a sud della foce, fino al 2004, quando invece si ha un evidente arretramento (circa 20 m) osservabile sui voli aerei e sui DTM interpolati dai rilievi diretti eseguiti in campagna.

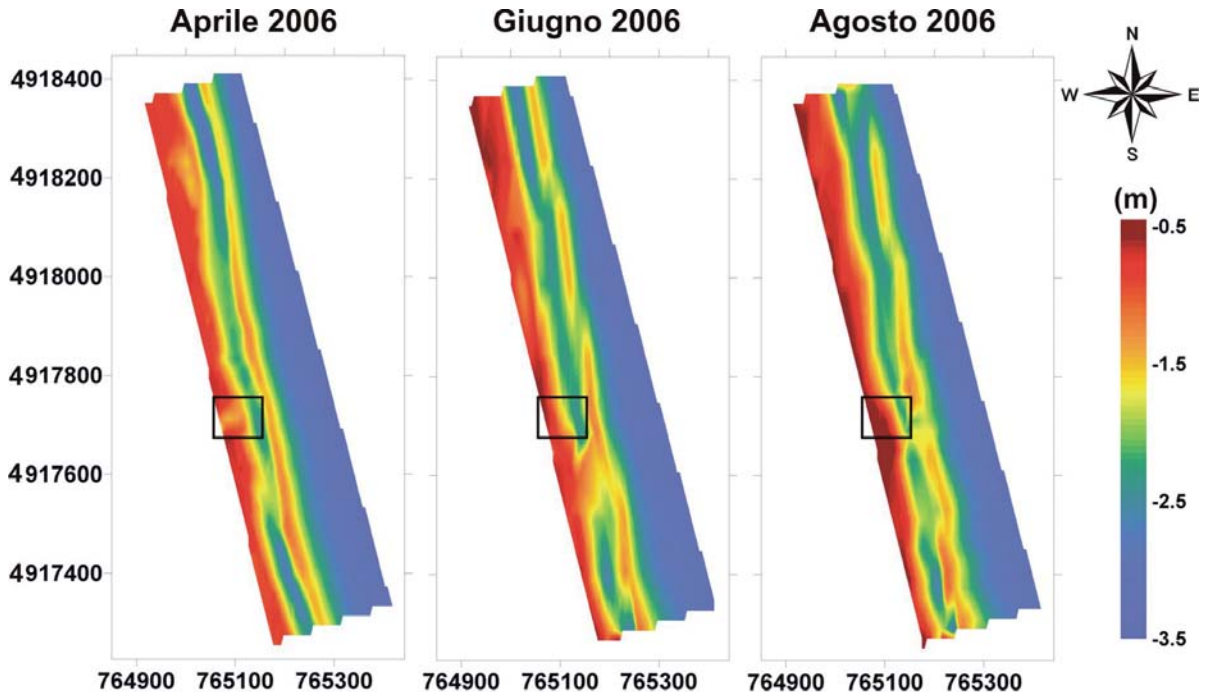


Figura 14 - DTM interpolati dai rilievi batimetrici eseguiti ad aprile, giugno e agosto 2006. Il riquadro nero indica la posizione della zona più esterna della bocca della foce del T. Bevano. La scala cromatica è stata creata appositamente per evidenziare la presenza delle barre.

Ciavola et al. (2005) hanno osservato che se la linea di riva rimane stabile, probabilmente è perché c'è apporto di sedimento dovuto all'erosione delle dune che immette sabbia nel bilancio sedimentario di tutta l'area. In questo periodo infatti le dune a nord sono erose ed il sedimento si deposita sul delta di marea (delta di riflusso) e sulla barra di battigia a nord della foce, che migra a riva e quindi protegge dall'erosione il tratto di costa subito a nord. Il bilancio sedimentario però non si chiude, quindi il sedimento eroso sulla duna va in parte ad alimentare anche le spiagge tra la foce e Lido di Dante ed è forse in parte trasportato al largo.

Lo studio a breve termine eseguito con l'utilizzo di sabbie traccianti da Balouin et al. (2006b) ha messo infatti in evidenza il rapporto tra la foce ed il mare aperto, con l'influenza del trasporto lungo costa e delle correnti di marea che, in particolari condizioni di sizigie, spingono la bocca verso nord e portano la sabbia erosa dalle dune ad alimentare le spiagge a nord. Comportamento qui confermato sia dallo studio a medio termine sia dal monitoraggio della foce attuale.

Inoltre è confermata la formazione di una freccia litorale a sud della bocca di foce, che migra verso nord ed in particolari condizioni va a restringere la sezione della bocca stessa. Ciò crea una particolare conformazione morfologica della zona ostruendo lo sbocco a mare delle acque durante le piene. Questo comportamento è

stato ben evidenziato durante lo studio a medio termine, ma si può osservare una situazione simile anche nella morfologia della zona nel 2002, dove la freccia litorale ostruiva in maniera evidente la bocca di foce (Fig. 5). L'evoluzione della nuova foce, aperta circa 500 m più a sud mostra, già dai primi mesi di monitoraggio, una ripresa delle dinamiche osservate in passato: la formazione di una freccia litorale a sud che tende a migrare verso terra e leggermente verso nord, ostruendo la bocca di foce e producendo un elevato deposito di sedimento nel tratto pre-fociale e sul delta sommerso. Inoltre si può osservare come la foce attuale sia posizionata poco più a nord rispetto all'ubicazione che aveva nel 1996 (Fig. 5).

### Considerazioni conclusive

È stato illustrato il comportamento morfodinamico della foce del T. Bevano, che fino al 2005 era libera di seguire un'evoluzione naturale, influenzata sia dal trasporto lungo costa dominante sia dalle correnti tidali. Gli autori ritengono che le dinamiche rilevate possano essere assimilate a quelle di un piccolo *tidal inlet* di tipo misto, governato dall'interazione tra il moto ondoso e le correnti tidali. In particolare, influiscono sulla sua conformazione le correnti di riflusso che contribuiscono alla formazione di un delta di riflusso di fronte alla foce stessa. Le correnti che si producono durante l'innalzamento del livello delle acque in alta marea non creano alcuna morfologia in quanto l'*inlet* non presenta una zona di retro-barriera, essendo l'area verso terra costituita solo dal tratto terminale del canale stesso.

La conformazione di questo tratto terminale, che si sviluppa parallelo alla linea di riva, induce la formazione di una freccia litorale, che è stato dimostrato migrare verso nord a seguito dell'azione della corrente lungo costa dominante. La ricostruzione del clima meteomarinario antistante la zona di studio ha confermato che il mare dominante proviene da S-E, per cui la corrente lungo costa si muove da sud verso nord producendo la migrazione della freccia in tale direzione. Questo andamento è stato confermato sia dagli studi a breve termine effettuati da Ciavola et al. (2005), sia dagli studi a lungo e medio termine presentati in questo lavoro.

La maggior parte dei grandi *tidal inlets* studiati in letteratura migrano nella direzione del trasporto lungo costa dominante, come accade per esempio nel sistema "*barrier-inlet*" presente lungo la Gulf Coast della Florida (Davis e Barnard, 2003), nel sistema di *inlets* della Ria Formosa nel sud del Portogallo (Balouin e Howa, 2002, Vila-Concejo et al., 2002) ed in parte anche nell'*Ameland Inlet* in Olanda (Cheung et al., 2007). Aubrey e Speer (1984) mostrano tre casi in cui un *inlet* può migrare in direzione opposta alla corrente lungo costa dominante, sotto l'influenza di particolari condizioni morfodinamiche che però non sono presenti nella zona di foce del T. Bevano, oppure a causa di un marcato aumento nella frequenza delle mareggiate in direzione opposta a quella dominante. Lo studio del clima meteomarinario effettuato nel periodo di analisi delle variazioni a medio termine ha messo in evidenza che quando si hanno mareggiate intense da N-E la migrazione della foce del T. Bevano in parte si arresta, ma tali condizioni non sono mai durate tanto a lungo da determinarne un'inversione.

Prima dell'intervento di deviazione, lo spostamento verso nord della freccia litorale produceva la migrazione in tale direzione di tutta la zona di foce, ma a volte, in particolari condizioni di bel tempo e mare calmo, la freccia migrava più velocemente e andava a restringere la sezione della bocca di foce, impedendo lo smaltimento delle acque in caso di piena del T. Bevano, con conseguente erosione delle dune e della pineta presenti a nord della foce. Dai dati ricavati dalle prime fasi del monitoraggio della foce attuale, sembra che le dinamiche in atto nella vecchia foce siano riprese.

La foce attuale è stata però monitorata solo per il periodo estivo. Studi futuri monitoreranno la sua evoluzione in inverno ed in condizioni estreme di onde e maree, per poter così valutare se il sedimento depositato verrà mobilitato con le stesse dinamiche della vecchia foce o se il trasporto lungo costa subirà una riduzione evidente in mancanza dell'input sedimentario prodotto dall'erosione delle dune. Sarà inoltre necessario monitorare il comportamento del canale di foce durante le piene e la tenuta dei pali di contenimento a protezione della duna ricreata a nord.

### Ringraziamenti

Un ringraziamento speciale per gli indispensabili aiuti nell'esecuzione dei rilievi topobatimetrici e dei campionamenti al Dott. Yann Balouin, al Dott. Emanuele Castiglione, a Christian Boettger e a Francesco Menani. Un sentito grazie anche al Dott. Paolo Luciani per l'aiuto nell'inquadramento topografico dei dati raccolti nei rilievi. Si ringrazia inoltre il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna per aver messo a disposizione l'immagine satellitare QuickBird ed il volo LIDAR utilizzati per la digitalizzazione della linea di

riva. Le foto aeree pubblicate (© CGR Parma) sono state utilizzate sempre su concessione del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Il monitoraggio della nuova foce del T. Bevano è stato eseguito in collaborazione con il Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli, sede di Ravenna, sotto la direzione lavori del Dott. Claudio Miccoli. L'Ing. Carlo Albertazzi (Servizio Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica della Regione Emilia-Romagna) ha coordinato le attività di studio.

## Bibliografia

- Armaroli C., Balouin Y., Ciavola P. e Capatti D. (2005) - *Nearshore bars as a natural protection of beaches, field evidences from Lido di Dante beach, Adriatic Sea*. Proceedings of the First International Conference on Coastal Conservation and Management in the Atlantic and Mediterranean, Eurocoast Portugal, Porto (Portugal): 295-303.
- Aubrey D.G. e Speer P.E. (1984) - *Updrift migration of tidal inlets*. Journal of Geology, 92: 531-545.
- Balouin Y. e Howa H. (2002) - *Sediment transport pattern at the Barra Nova inlet, south Portugal: a conceptual model*. Geo-Marine Letters, 21: 226-235.
- Balouin Y., Ciavola P., Anfuso G. e Armaroli C. (2003) - *Relationship between bar migration and swash duration: field assessments at Lido di Volano beach, Adriatic Sea, Northern Italy*. Atti di: 3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, A. Sanchez-Arcilla and A. Bateman (ed.), IAHR, Barcellona, Spagna. Pp. 1121-1133.
- Balouin Y., Ciavola P. e Armaroli C. (2006a) - *Sediment transport patterns and coastal evolution at Lido di Dante beach, Adriatic Sea*. Proceedings of Coastal Dynamics 2005, ASCE, New York (USA).
- Balouin Y., Ciavola P. e Michel D. (2006b) - *Support of subtidal tracer studies to quantify the complex morphodynamics of a river outlet: the Bevano, NE Italy*. Journal of Coastal Research, SI 39: 602-607.
- Cheung K.F., Gerritsen F. e Cleveringa J. (2007) - *Morphodynamics and sand bypassing at Ameland Inlet, The Netherlands*. Journal of Coastal Research, 23 (1): 106-118.
- Ciavola P., Corbau C., Cibin U. e Perini L. (2003) - *Mapping of the coastal zone of the Emilia-Romagna region using Geographical Information Systems*. Proceedings of MEDCOAST 2003 Conference, E. Ozhan (ed.), MEDCOAST, Ravenna (Italy): 2363-2374.
- Ciavola P., Gatti M., Armaroli C. e Balouin Y. (2004) - *Valutazione della variazione della linea di riva nell'area di Lido di Dante (RA) tramite GIS e monitoraggio con GPS cinematico*. Atti della XXI Giornata dell'Ambiente, Aree Costiere, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma. Pp. 113-121.
- Ciavola P., Billi P., Armaroli C., Preciso E., Salemi E. e Balouin Y. (2005) - *Valutazione della morfodinamica di foce del Torrente Bevano (RA): il ruolo del trasporto solido di fondo*. Geologia Tecnica ed Ambientale, 2005/1: 41-57.
- Coastal Engineering Research Center (1984) - *Shore Protection Manual*. U.S. Army Engineer, Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Conley D.C. (1999) - *Observations on the impact of a developing inlet in a bar built estuary*. Continental Shelf Research, 19: 1733-1754.
- Corsini S. e Inghilesi R. (2004) - *Atlante delle onde nei mari italiani*. APAT.
- Davis Jr. R.A. e Hayes M.O. (1984) - *What is a wave-dominated coast?* In: Greenwood B., Davis Jr., R.A. (Ed), Hydrodynamics and Sedimentation in Wave-Dominated Coastal Environments. Marine Geology, 60: 313-329.
- Davis Jr. R.A. e Barnard P. (2003) - *Morphodynamics of the barrier-inlet system, west-central Florida*. Marine Geology, 200: 77-101.
- Davis Jr. R.A. e FitzGerald D.M. (2004) - *Beaches and Coasts*. Blackwell Science Ltd a Blackwell Publishing Company, Oxford, UK. Pp. 419.
- Dolan R. e Hayden B. (1983) - *Patterns and prediction of shoreline change*. In: CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion, Komar P. D. (ed.), CRC Press, Boca Raton, USA. Pp. 123-149.
- Dolan R. e Davis R.E. (1992) - *An intensity scale for Atlantic coast northeast storms*. Journal of Coastal Research, 8 (4): 840-853.
- FitzGerald D.M., Buynewich I.V., Davis Jr R.A. e Fenster M.S. (2002) - *New England tidal inlets with special reference to riverine-associated inlet systems*. Marine Geology, 48: 179-208.

- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos River Bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journal of Sedimentary Petrology, 27: 3-26.
- Gambolati G., Giunta G., Putti M., Teatini P., Tomasi L., Betti I., Morelli M., Berlamont J., De Backe K., Decouttere C., Monbaliu J., Yu C.S., Broeker I., Kristenser E.D, Elfrink B., Dante A. e Gonella M. (1998) - *Costal evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise, and Natural and Anthropic Land Subsidence*. In: CENAS, Kluwer Academic (ed.), Dordrecht, Paesi Bassi. Pp. 1-34.
- Idroser (1996) - *Progetto di piano per la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia-Romagna*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. Pp. 100-122.
- Mendoza E.T. e Jimenez J.A. (2004) - *Factors controlling vulnerability to storm impacts along the Catalanian coast*. Proceedings International Conference of Coastal Engineering, Lisbona. Pp. 3087-3099.
- Regione Emilia-Romagna (2003) - *Studio di impatto ambientale. Riqualificazione funzionale del tratto costiero in corrispondenza di foce Bevano*. Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli, Ravenna. Pp. 239.
- Saville T. (1954). *The effect of fetch width on wave generation*. U.S. Army Coastal Engineering Research Centre, Tech. Memorandum No. 70.
- Seymour R.J. (1977) - *Estimating wave generation on restricted fetches*. In: Journal of the Waterway Port, Coastal and Ocean Division, Proc. ASCE, No. 103.
- Sverdrup H.U. e Munk W.H. (1947) - *Wind, sea and swell; theory of relations for forecasting*. U.S. Navy Hydrographic Office, H.O., No. 601. Pp. 44.
- Vila - Concejo A., Matias A., Ferreira O., Duarte C. e Dias J.M.A. (2002) - *Recent evolution of the natural inlets of a barrier island system in Southern Portugal*. In: Proceedings of International Coastal Symposium, Journal of Coastal Research, SI 36: 741-752.

**Ricevuto il 04/05/2007, accettato il 06/07/2007.**