

Morfodinamica e risposta a corto e medio termine ad eventi di mareggiata delle spiagge comprese tra Foce Bevano e Lido di Classe (RA)

Edoardo Grottoli e Paolo Ciavola

Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Ferrara, Via Saragat, 1 - 44100 Ferrara
cvp@unife.it

Riassunto

Gli scopi del presente studio consistono nel classificare, da un punto di vista morfodinamico, le spiagge comprese tra la foce del Torrente Bevano e la località di Lido di Classe (RA) nel mare Adriatico Settentrionale e di analizzare la risposta di questo tratto di litorale ad eventi di mareggiata nel breve-medio periodo. L'area di studio è lunga circa 4 km ed è delimitata a Sud da opere costiere artificiali, mentre è completamente naturale fino alla foce del Torrente Bevano che rappresenta il limite settentrionale. Gli obiettivi sono stati raggiunti grazie ad un percorso sperimentale che ha compreso: rilievi topografici di 40 profili di spiaggia ripetuti in 7 diverse campagne in un intervallo di 31 mesi; raccolta di 103 campioni di sedimento su 20 profili di spiaggia in corrispondenza degli elementi morfologici più rilevanti; analisi di laboratorio sui campioni per determinarne i principali parametri tessiturali ed il peso specifico. I valori risultanti dalle analisi di laboratorio hanno permesso di calcolare la velocità di caduta del sedimento (W_s) secondo la legge di Le Roux (1996) e di risalire così alla velocità di caduta adimensionale Ω , indispensabile per poter utilizzare le classificazioni morfodinamiche di Masselink e Short (1993) e di Short (1999). I risultati hanno permesso di individuare 3 macrozone con morfologie simili e di catalogare ognuna delle 6 zone, in cui si è scelto di suddividere l'area di studio, secondo le due classificazioni morfodinamiche proposte. Inoltre, le analisi sulle variazioni spaziali e temporali delle principali pendenze riconoscibili sui profili di spiaggia, hanno consentito di individuare quali zone, nel tratto di litorale studiato, abbiano maggiormente subito l'impatto delle mareggiate e quali tra queste siano state più incisive nell'arco dei 31 mesi di misure. Analizzando i rilievi topografici si possono trovare delle relazioni tra i cambiamenti più evidenti nelle pendenze di spiaggia e il verificarsi delle mareggiate.

Parole chiave: erosione dune, pendenza duna, morfodinamica costiera, mareggiate, rilievi topografici, Emilia-Romagna.

Abstract

The aim of the present study is to classify the beaches stretching between the Bevano River mouth and the beach of Lido di Classe, in the northern Adriatic Sea (Italy) and analyze the response of this littoral zone to storm events in the short-medium term. The study site is an almost 4 km-long beach bordered at the southern edge by coastal structures and completely natural up to the Bevano River mouth which represents the northern edge. The objectives have been reached thanks to an experimental programme which included: topographic surveys of 40 cross sections undertaken 7 times in a time interval of 31 months; sampling of 103 samples on 20 cross sections on the most relevant morphological beach elements; laboratory tests on samples to estimate the main textural parameters and sediment density. Values resulting from laboratory tests allowed to calculate the settling velocity (W_s) through the Le Roux (1996) method and to calculate the non-dimensional settling velocity Ω (aka Dean parameter), prerequisite

to use the morphodynamic classifications of Masselink and Short (1993) and Short (1999). The data analysis permitted to find 3 macro zones with similar morphologies and to catalogue each of the 6 zones according to the morphodynamic classifications quoted above. In addition, spatial and temporal analysis on dune and beach slopes, permitted to detect which zones, had been more subjected to the impact of storms and which events were more incisive in generating erosion during the measurements. The analyses of topographic surveys found relations between beach slopes changes and storm events occurrence.

Keywords: *dune erosion, dune slope, coastal morphodynamic, storm events, topographic surveys, Emilia-Romagna.*

Introduzione

La presenza di tratti interamente naturali, in un panorama intensamente antropizzato e sfruttato come il litorale emiliano-romagnolo, conferisce allo studio di questo sito, compreso tra Foce Bevano e Lido di Classe, una particolare rilevanza. In circa 4 km di lunghezza sono presenti diversi tipi di paesaggi, come la foce fluviale del Bevano, spiagge naturali con sistemi dunali e brevi tratti di litorale fortemente antropizzati, protetti da opere di difesa rigide. Il lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto MICORE (Morphological Impact and COastal Risks induced by Extreme storm events), finanziato dalla Comunità Europea (contratto n° 202798) per una durata totale di 40 mesi. Il progetto ha valutato il rischio da erosione e da inondazione lungo le aree costiere di nove paesi europei e ha sviluppato dei sistemi di allerta in grado di prevenire effetti negativi irreversibili sulle cose e sulle persone (www.micore.eu). Nell'intento di classificare l'area di studio secondo gli schemi morfodinamici più noti in letteratura, si è cercato di testare gli schemi classificativi di Masselink e Short (1993) e di Short (1999). Masselink e Short (1993) realizzarono una classificazione morfodinamica riguardante le spiagge con elevate escursioni relative di marea (riferita quindi alle spiagge meso e macrotidali, ma anche alle spiagge microtidali a bassa energia). Lo schema proposto da Masselink e Short include gli effetti delle maree sulle morfologie delle spiagge, oltre a considerare il moto ondoso e le caratteristiche granulometriche. La classificazione si basa sulla velocità di caduta adimensionale Ω e sull'escursione relativa di marea RTR (relative tidal range). La velocità di caduta Ω , definita dall'altezza d'onda (H_b), dal periodo (T) e dalla dimensione dei granuli (determinata dalla velocità di caduta del sedimento W_s) indica se la spiaggia è riflettente, dissipativa o intermedia. L'escursione relativa di marea (RTR) tiene conto, invece, dei processi ondosi che avvengono nelle zone di shoaling, surf e swash, lungo il profilo di spiaggia e consiste nel rapporto tra l'escursione media di marea alle sizigie MSR (Mean Spring tide Range) e l'altezza d'onda alla frangenza H_b (da Masselink e Short 1993; in Masselink e Hegge, 1995). Short (1999) sulla base del parametro di Dean (1973), ossia la velocità di caduta adimensionale (Ω), distingue, invece, 6 diversi stati morfodinamici per le spiagge microtidali: se $\Omega < 1$ la spiaggia è riflettente; se $\Omega > 6$ la spiaggia è dissipativa; se $1 < \Omega < 6$ la spiaggia ricade in uno dei quattro stati intermedi (LBT, Longshore Bar-Trough; LTT, Low Tide Terrace; TBR, Transverse Bar and Rip; RBB, Rhythmic Bar and Beach). Si è scelto di classificare il tratto di litorale in base alle due classificazioni sopra descritte, perché fino ad ora sono state poco utilizzate nel contesto del mar Mediterraneo.

Inquadramento dell'area di studio

Il tratto costiero preso in esame si trova in Emilia-Romagna, all'interno del comune di Ravenna, ed è compreso tra la foce del fiume Bevano e la località balneare di Lido di Classe, situata immediatamente a Nord della foce del fiume Savio (Fig. 1). L'area di studio nel corso del tempo è stata essenzialmente influenzata dall'evoluzione delle cuspidi deltizie del Savio (immediatamente a Sud dell'area di studio), dei Fiumi Uniti (circa 4 km a Nord dell'area di studio), e dalle variazioni morfologiche della bocca del torrente Bevano (compresa nell'area di studio). L'Adriatico Settentrionale, in ragione della sua disposizione geografica, è influenzato principalmente dai mari provenienti dal I e dal II Quadrante (Preti et al., 2009), nello specifico generati dalla Bora (vento proveniente da Nord-Est) e dallo Scirocco (vento che giunge da Sud-Est). Nell'area di studio l'intensità del vento è generalmente maggiore se è associato a fetch più corto (come nel caso del vento di Bora che arriva spesso a 35 nodi di intensità), mentre con fetch più ampi (es. caso dello Scirocco) raramente il vento supera i 30 nodi (Lamberti e Zanuttigh, 2005). In generale, si può affermare che il clima di moto ondoso è caratterizzato da onde di bassa energia, con altezza d'onda significativa (H_s) minore di 1 m (65% dei casi), proveniente per la maggior parte da Est (Gambolati et al., 1998). La dinamica sedimentaria

in quest'area è dominata dal trasporto litorale, che nell'area di studio è diretto da Sud verso Nord ed è responsabile di tutti gli accumuli di sedimenti nei lati sopraflutto dei pennelli o dei moli trasversali alla linea di riva, e del progressivo spostamento verso Nord della foce del torrente Bevano. In Adriatico il regime di marea è di tipo microtidale: infatti nell'area in esame le maree hanno componenti sia diurne che semidiurne, con un valore di escursione massima in sizigie che è pari, mediamente, a 70-80 cm e che scende a 30 cm in quadratura (IDROSER, 1996). I valori relativi alle escursioni di marea, seppur modesti in questa parte dell'Adriatico, assumono particolare importanza se sommati ad altri agenti meteo marini locali (es. storm surge, vedi Masina e Ciavola, 2011). Un importante indice del cambiamento morfologico delle spiagge di questa parte di Adriatico negli ultimi decenni è sicuramente l'arretramento della linea di riva, anche se nella nostra zona di studio, si nota un'importante avanzamento di questa in corrispondenza della foce del Bevano. Esso infatti, essendo situato tra due cuspidi deltidie, le quali in passato erano molto più pronunciate (la foce del Savio, a Sud, e la foce dei Fiumi Uniti, a Nord), ha beneficiato dell'asportazione del sedimento soprattutto dalla cuspidi del Savio e del conseguente trasporto ad opera della corrente lungo costa, che ha creato l'avanzamento della linea di riva nel tratto naturale dell'area di studio. Attualmente la foce del Bevano è influenzata dall'azione combinata delle correnti di marea e del moto ondoso (Balouin et al., 2006b): il sedimento si deposita alla foce, secondo un processo che può essere assimilato a quello di un delta di riflusso (ebb-tidal delta), di dimensioni molto piccole e senza le barre lineari che generalmente si formano ai margini del canale di foce, perpendicolarmente alla linea di riva (Gardelli et al., 2007). Alcune modifiche antropiche hanno riguardato questa area negli ultimi anni. All'inizio del 2006 infatti è stata aperta artificialmente, dalla Regione Emilia-Romagna, la foce che è attualmente visibile, che si trova oggi a circa 500 m più a Sud rispetto alla posizione pre-intervento. Il motivo di tale operazione era la progressiva migrazione verso Nord di una freccia litorale, situata a Sud della foce, la quale andava ad ostruire parzialmente la bocca fluviale diminuendone l'efficienza idraulica (Gardelli et al., 2007). Tale migrazione, alimentata dal trasporto litorale verso Nord, provocava inoltre l'erosione della fascia dunale sulla sponda Nord della foce e il conseguente danneggiamento della pineta retrostante (Ciavola et al., 2005; Ciavola, 2009). Balouin et al. (2006a) hanno dimostrato che tale erosione trasportava il sedimento all'esterno, incrementando in parte il budget sedimentario della spiaggia più a Nord. Nell'area di studio si nota molto bene la differenza tra il tratto di costa naturale (parte Nord della Figura 1, ossia il tratto compreso tra Foce Bevano ed i pennelli di Lido di Classe) ed un tratto di costa fortemente antropizzato e regimato da opere di difesa rigide (pennelli e barriere frangiflutti) presso Lido di Classe (parte Sud della Figura 1). La zona meridionale è infatti contraddistinta da un'evidente tombolo sommerso antistante la spiaggia emersa. Quest'ultima appare maggiormente ampia rispetto al tratto naturale poco più a Nord, dove si nota un progressivo restringimento della spiaggia emersa e del basso fondo ad essa antistante. Inoltre, nel tratto naturale, il basso fondo, che risulta essere a distanze inferiori 60 – 100 m e ad una profondità compresa tra 0.5 - 1 m, (Calabrese e Lorito, 2009) assume una forma sempre più irregolare, arricchendosi di solchi. La spiaggia sommersa interna, nel suo tratto naturale, è inoltre caratterizzata dalla presenza di una barra longitudinale rettilinea che parte dal settore antistante i pennelli e le barriere sommerse ed arriva fino alla foce del Bevano. Essa si trova ad una distanza che oscilla tra i 100 e i 300 m e ad una profondità di circa 1.5 m – 3 m (Calabrese e Lorito, 2009). Per quanto riguarda le opere di difesa, le tipologie di opere rigide presenti sono 3 e sono visualizzate in Figura 1: scogliere parallele emerse che coprono un tratto complessivamente lungo 1200 m (Preti et al., 2009); barriere semisommerse, costruite nel 1989 (Preti et al., 2009) e che coprono un tratto di circa 500 m; 3 pennelli disposti perpendicolarmente alla linea di riva e distanti circa 300 m tra loro. Nel tratto protetto dalle opere di difesa, la linea di riva è in avanzamento al retro delle scogliere e i fondali interni ed esterni alle opere sono in fase di accumulo (Preti et al., 2009). Inoltre, nella porzione a Nord dell'abitato di Lido di Classe, lunga circa 1 km, poiché la situazione della spiaggia nel 2000 era molto critica, nel 2002 è stato fatto un intervento di ripascimento con 41.000 m³ di sabbie sottomarine e questo ha stabilizzato la situazione fino alla foce del Bevano (Preti et al., 2009). Numerosi studi geomorfologici e morfodinamici sono stati eseguiti negli ultimi anni sul litorale ravennate, soprattutto per alcuni siti specifici come la foce del Bevano e la località balneare di Lido di Dante (Balouin et al., 2004; Armaroli et al., 2005; Balouin et al., 2006a; Balouin et al., 2006b; Armaroli et al., 2007; Sedrati et al., 2008; Armaroli e Ciavola, 2011). Per quanto riguarda invece Lido di Classe e la spiaggia naturale a Nord di tale località, uno tra gli studi più dettagliati è stato quello svolto da Armaroli et al. (2007), dove, sull'analisi di rilievi batimetrici, si è osservata una chiusura morfologica del profilo di spiaggia media-

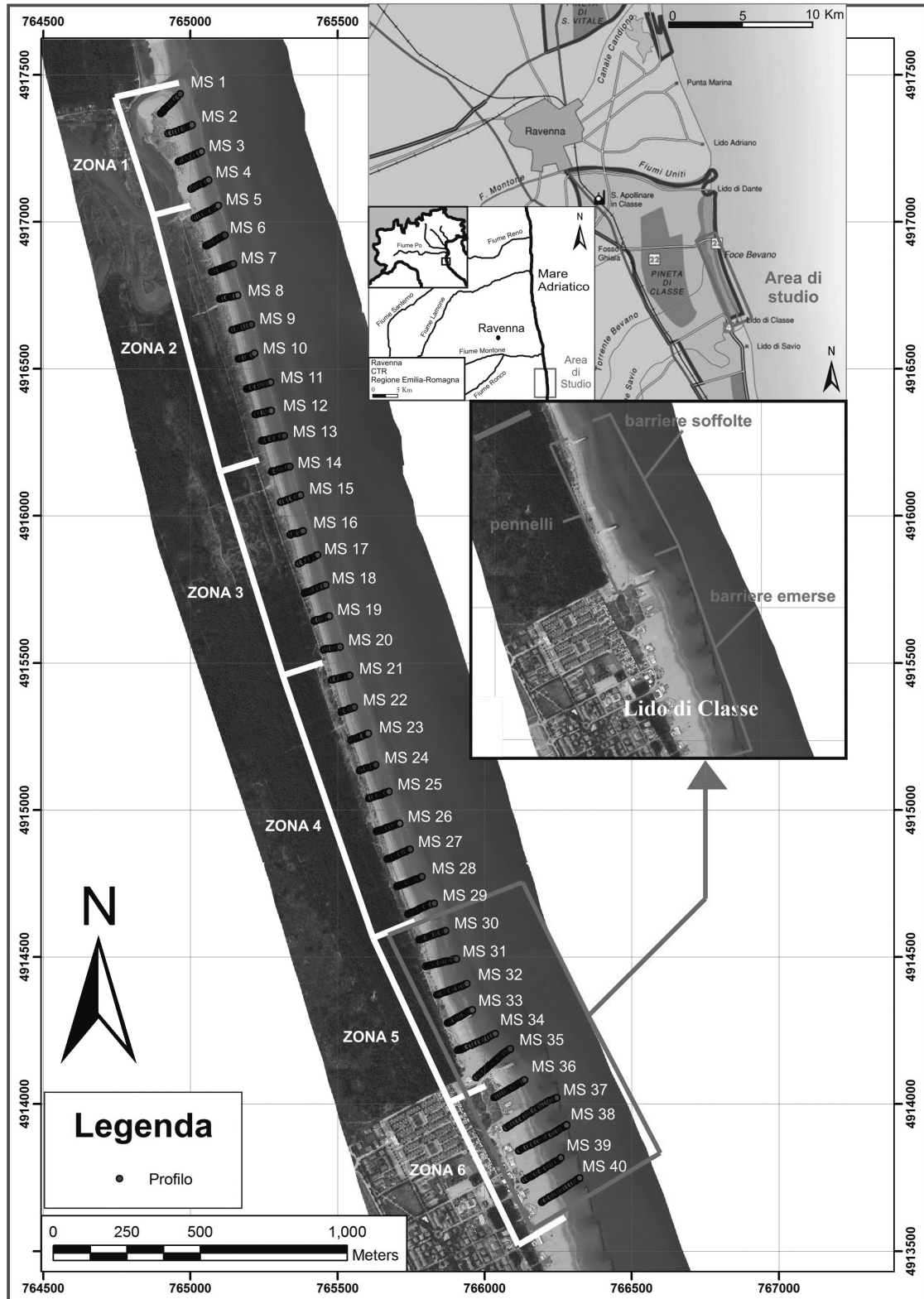


Figura 1 - Ubicazione area di studio su carta topografica (Regione Emilia - Romagna) e relativa foto aerea (volo MICORE Marzo 2009) su cui è indicata la suddivisione in zone e l'ubicazione dei profili topografici rilevati nel corso del triennio di misure. Nell'ingrandimento relativo alle zone 5 e 6 sono indicate le opere di difesa presenti.

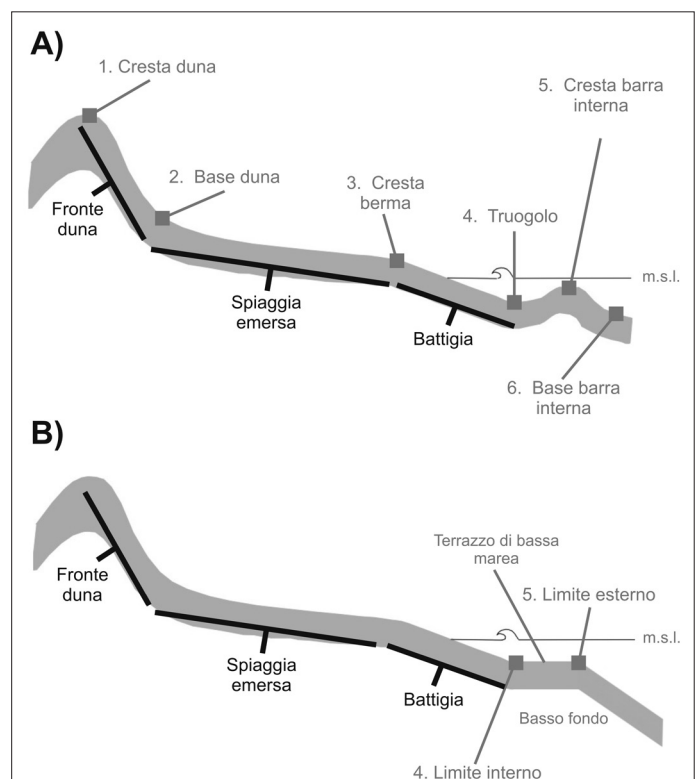
mente ad una profondità di -7 m e tale elemento è stato comparato alla profondità di chiusura del profilo di Hallermaier. Infine, da un punto di vista granulometrico, a profondità superiori ai 6 m, si incontra generalmente una notevole frazione fangosa, sintomo di scarso potere di rimobilizzazione dei fondali, tranne durante le mareggiate eccezionali (Armaroli et al., 2007). Altre osservazioni condotte nell'area riguardano le barre sommerse e le barre intertidali. E' ormai noto come le barre della spiaggia sommersa siano considerate il più importante elemento morfologico che controlla l'equilibrio sedimentario di questa spiaggia (Armaroli et al., 2005). Per quanto riguarda invece le barre intertidali, Balouin et al (2004) hanno confermato come la loro migrazione, nella spiaggia naturale situata a Nord della foce del Bevano, vicino a Lido di Dante (meno di 2 km a Nord della zona di studio), sia regolata dal processo di swash sulla battigia nei periodi di calma del moto ondoso e in assenza di corrente lungo costa (in presenza della quale invece il tasso di migrazione delle barre decresce). Tale migrazione è spiegata anche da Kroon (1994), il quale afferma che la migrazione delle barre di swash dipende dallo spostamento verso costa delle zone di swash e di surf durante il flusso di marea, specialmente quando l'escursione di marea aumenta da una marea di quadratura a quella sizigiale. La migrazione, durante il processo di swash, avviene in questo modo: il sedimento viene trasportato dal lato verso mare (meno inclinato, circa 2%) al lato verso terra della barra (più acclive, circa 4.5%; Balouin et al., 2004). Inoltre, essa al suo interno, presenta delle lamine sub-parallele alla superficie di spiaggia e sul lato sottovento sono presenti delle superfici di riattivazione e strutture di "avalanche" (Balouin et al., 2004). La migrazione verso terra dipende anche dalla durata del processo di swash ed è favorita in mancanza della corrente lungo costa (che ovviamente trasporta il sedimento portato dallo swash lungo costa, attraverso i canali adiacenti alle barre di swash; Balouin et al., 2004). Inoltre, durante la migrazione verso terra, la barra intertidale può essere soggetta ad una variazione morfologica da barra a bassa ampiezza (low-amplitude bar), che è uno stato quasi statico, a una barra con cresta (slip-face ridge) che rappresenta invece uno stato più mobile (Sedrat et al., 2008).

Metodi e strumenti

La zonazione dell'area di studio e il rilievo topografico

L'intero tratto di studio è stato suddiviso in 6 zone (vedi Fig. 1) per facilitare l'analisi dei dati raccolti, la descrizione delle variazioni morfologiche, le differenze sedimentologiche e la classificazione morfodinamica. Nella Figura 1, la dicitura dei profili MS significa MICORE Sud (Sud indica che ci si trova a meridione rispetto la foce del torrente Bevano, il quale divide in due parti, una settentrionale ed una meridionale, l'area di ricerca del progetto MICORE). Il riconoscimento di variazioni morfologiche spaziali è stato il criterio di base secondo il quale è stata suddivisa la zona di studio nelle 6 diverse aree. Per fare ciò, ci si è basati sui seguenti criteri: riconoscimento di pendenze analoghe sui profili topografici provenienti dai rilievi effettuati; individuazione di morfologie simili nella zona intertidale grazie alla fotointerpretazione di immagini aeree e di dati LIDAR; revisione di fotografie scattate in campagna.

Figura 2 - Sia in A che in B sono indicate le pendenze delle 3 principali forme di spiaggia calcolate su ogni profilo (in nero). In grigio sono inoltre indicate le 6 diverse posizioni di campionamento (A) le quali diventano 5 in presenza del basso fondo al posto della barra (B); vedi Paragrafo 2.2.



Il rilevamento topografico è stato eseguito con tecnologia GPS e acquisizioni di dati in modalità RTK e VRS. L'obiettivo specifico di questa attività è stato quello di osservare le variazioni topografiche cicliche stagionali del profilo di spiaggia, e per individuare cambiamenti nella topografia dopo l'occorrenza di una mareggiata. Le campagne di rilevamento effettuate sono 7 e hanno coperto un periodo complessivo di 31 mesi (settembre 2008, febbraio 2009, settembre 2009, febbraio 2010, marzo 2010, ottobre 2010 e marzo 2011). La misurazione delle quote e delle morfologie della spiaggia emersa è stata svolta a partire dalla duna fino a circa 1 – 1.5 m sotto il livello del mare. Uno schema delle pendenze che sono state calcolate dai rilievi topografici è visualizzato nella Figura 2A, in essa sono indicate le 3 pendenze principali che sono state calcolate: fronte della duna, spiaggia emersa e battigia. Per ogni campagna di rilevamento sono state quindi calcolate le tre pendenze su ognuno dei 40 profili che coprono il tratto di litorale studiato.

Come ulteriore aiuto al riconoscimento delle variazioni morfologiche del tratto di litorale studiato, è stata fatta una fotointerpretazione di immagini aeree e di dati LIDAR, ottenuti dal progetto MICORE tramite un volo del marzo del 2009. Una sintesi grafica di ciò che è stato cartografato dal punto di vista geomorfologico è mostrata in Figura 12 nel Paragrafo 3.4 (relativo alla classificazione morfodinamica).

Prelievo ed analisi dei campioni

In prospettiva di classificare il tratto di litorale studiato secondo gli schemi proposti da Masselink e Short (1993) e da Short (1999), si è deciso di realizzare una serie di analisi sul sedimento costituente il tratto di litorale in esame. Le analisi granulometriche, calcimetriche e picnometriche, sono state necessarie per poter inserire dei valori il più possibile reali nel calcolo della velocità di caduta del sedimento. Il campionamento è stato eseguito nei primi giorni del mese di Ottobre 2010, lungo le sezioni perpendicolari alla linea di riva del tratto in studio (vedi Figura 1). Si è scelto di campionare solamente sui profili pari, per un totale, quindi, di 20 profili su 40. Considerando che ogni profilo dista da quello adiacente circa 100 m, tale campionamento alternato ha permesso di ottenere informazioni granulometriche circa ogni 200 m. I punti di campionamento su ogni singolo profilo sono stati scelti tenendo conto delle caratteristiche morfologiche, così come è rappresentato in Figura 2. Idealmente su ogni profilo si sarebbero dovuti prendere 6 campioni, come visualizzato nella Figura 2; ma, sia per necessità tecniche (ossia l'impossibilità in alcuni casi di arrivare a campionare troppo al largo), che per ragioni morfologiche (per esempio l'assenza della barra intertidale o del basso fondo su alcune sezioni) non in tutti i 20 profili si sono prelevati 6 campioni. In totale sono stati raccolti 103 campioni. Le analisi granulometriche sono state eseguite, dopo essiccazione in forno a 105°C, con una batteria di 12 setacci intervallati tra loro di $1/2\varphi$. La classe granulometrica più alta usata è stata la -1φ , posta in cima alla batteria; la classe più piccola considerata è stata la 4φ . In questo modo si è scelto di trattare tutto il passante al setaccio di 63μ come fango indiscriminato (data la sua esigua quantità) e di avere una maggiore discriminazione del materiale sabbioso. I vari pesi in grammi ottenuti per ogni classe di $1/2\varphi$ sono stati inseriti nel programma Gradistat (Blott e Pye, 2001), che calcola le % delle varie frazioni granulometriche ed i principali indici granulometrici. I parametri che sono utilizzati nelle elaborazioni del presente lavoro sono il diametro medio (M_z) e la classazione σ secondo Folk e Ward (1957). Su dieci campioni selezionati (campioni corrispondenti alla cresta della bermà: posizione 3, vedi Fig. 2) sono state eseguite inoltre delle calcimetrie. Tale analisi è stata eseguita tramite l'uso di un calcimetro gas-volumetrico elettronico, per decomposizione del calcare con l'acido cloridrico. Si è scelto di analizzare i campioni corrispondenti alla posizione della cresta di bermà, in modo da considerare una composizione del sedimento mediamente influenzata dai bioclasti. I dieci campioni coprono tutta l'area di studio e sono situati in profili distanti circa 400 m tra loro (profili: MS4 - MS8 - MS12 - MS16 - MS20 - MS24 - MS28 - MS32 - MS36 - MS40, vedi Fig. 1). Sugli stessi dieci campioni, sono state realizzate anche delle analisi picnometriche tramite vasca termostatica (in seguito a previa taratura dei picnometri), per determinare il peso specifico dei sedimenti.

Calcolo delle velocità di caduta

Le classificazioni morfodinamiche utilizzate nel presente lavoro richiedono il calcolo della velocità di caduta (W) dei sedimenti presenti sul tratto costiero. Tale parametro compare infatti nella formula della velocità di caduta adimensionale Ω (parametro di Dean) secondo Dean (1973), che è un fattore discriminante per poter classificare le spiagge sia in base a Masselink e Short (1993) sia facendo riferimento a Short (1999). W è stata calcolata secondo relazioni idrodinamiche note, come la formula di Le Roux (1996), dove equivale a:

$$W_s = \frac{W_{ds}}{\sqrt[3]{\frac{\rho_f^2}{\mu g(\rho_s - \rho_f)}}} \quad (1)$$

W_{ds} è la velocità adimensionale di caduta di una particella sferica (vedi formula (2)), che dipende dal coefficiente di forma D_d di una sfera (vedi formula (3)), il quale dipende a sua volta dal diametro nominale D_n . Assumendo per approssimazione che la forma delle particelle della sabbia in questione sia sferica, D_n equivale al diametro medio Mz ottenuto dalle analisi granulometriche:

$$W_{ds} = (0.2636D_d - 0.37) \quad \text{per } 2.9704 < D_d < 22.9866 \quad (2)$$

$$D_d = D_n \sqrt[3]{\frac{\rho_f g(\rho_s - \rho_f)}{\mu^2}} \quad (3)$$

dove,

$D_n = Mz$ (diametro medio del sedimento espresso in metri);

ρ_f è la densità dell'acqua marina (pari a 1025 kg/m³, alla temperatura di 20°C, alla salinità di 35g/kg ed alla pressione atmosferica);

g è l'accelerazione di gravità (9.81 m/s);

ρ_s è la densità del sedimento;

μ è la viscosità dell'acqua marina (pari 0.001080 kg/ms, a 20°C di temperatura, alla salinità di 35g/kg ed alla pressione atmosferica).

Risultati

Variazioni spaziali delle morfologie

Dai 7 rilievi topografici eseguiti nell'arco di 31 mesi, sono stati estratti dei valori medi della pendenza del fronte duna, della spiaggia emersa e della battigia (ossia delle tre principali rotture di pendenza presenti su un profilo di spiaggia), per ognuna delle 6 zone individuate (Tab. 1).

Tabella 1 - Valori medi delle 3 pendenze principali riconosciute su ogni profilo di ogni zona, relativamente a tutte e 7 le campagne di rilevamento effettuate.

ZONE	ELEMENTO MORFOLOGICO	Set-08	Feb-09	Set-09	Feb-10	Mar-10	Ott-10	Mar-11
Zona 1	% _{media} Fronte duna	11%	10%	9%	10%	10%	12%	8%
	% _{media} Spiaggia emersa	2%	3%	2%	1%	2%	2%	3%
	% _{media} Battigia	4%	5%	8%	8%	6%	7%	8%
Zona 2	% _{media} Fronte duna	17%	21%	14%	18%	20%	19%	23%
	% _{media} Spiaggia emersa	5%	6%	3%	4%	7%	5%	7%
	% _{media} Battigia	7%	5%	7%	7%	3%	7%	7%
Zona 3	% _{media} Fronte duna	34%	55%	38%	61%	86%	71%	102%
	% _{media} Spiaggia emersa	6%	10%	4%	5%	7%	4%	8%
	% _{media} Battigia	5%	5%	8%	7%	13%	7%	5%
Zona 4	% _{media} Fronte duna	16%	28%	32%	191%	138%	42%	116%
	% _{media} Spiaggia emersa	5%	8%	6%	5%	6%	5%	7%
	% _{media} Battigia	4%	6%	6%	7%	8%	5%	5%
Zona 5	% _{media} Fronte duna	18%	20%	18%	22%	29%	21%	23%
	% _{media} Spiaggia emersa	4%	5%	4%	4%	6%	3%	5%
	% _{media} Battigia	4%	5%	6%	8%	8%	5%	4%
Zona 6	% _{media} Fronte duna	24%	14%	24%	13%	no dati	24%	22%
	% _{media} Spiaggia emersa	1%	2%	1%	1%	2%	1%	2%
	% _{media} Battigia	3%	3%	6%	3%	2%	5%	2%

Dalla Tabella 1 si nota come i valori massimi di ripidità del fronte duna si osservano sempre nella zona 3 e nella zona 4 di ogni campagna di rilevamento (102% è il valore medio più alto misurato nella zona 3; 191% è il valore medio più elevato per la zona 4). La pendenza del fronte duna mantiene valori intermedi (minimo 14%; massimo 29%) nelle zone 2 e 5, per poi raggiungere progressivamente i valori più bassi agli estremi dell'area di studio (zone 1 e 6) dove il valore minimo è pari all'8% e quello massimo al 14%, se si escludono i casi in cui si ha un unico dato per la zona 6. I massimi di pendenza misurati nelle zone 3 e 4 sono dovuti alla maggiore vicinanza al mare della duna: in tali aree, infatti, la duna appare (dai risultati di molti rilievi) avere subito erosione al piede (vedi Figg. 3 e 4) e questo ha determinato il crollo della cresta ed il conseguente aumento della sua inclinazione verso mare. Non a caso, le zone 3 e 4 si trovano immediatamente a Nord dei pennelli posti a protezione di Lido di Classe (vedi Fig. 1) e dunque, trovandosi sul lato sottoflutto, sono più soggette all'erosione. Inoltre, come si vedrà in seguito (vedi Fig. 6), la spiaggia emersa in queste zone raggiunge la sua larghezza minima, quindi le dune, trovandosi più vicine alla linea di riva, sono maggiormente esposte ai fenomeni erosivi durante le mareggiate. Per quanto riguarda la spiaggia emersa, anch'essa presenta

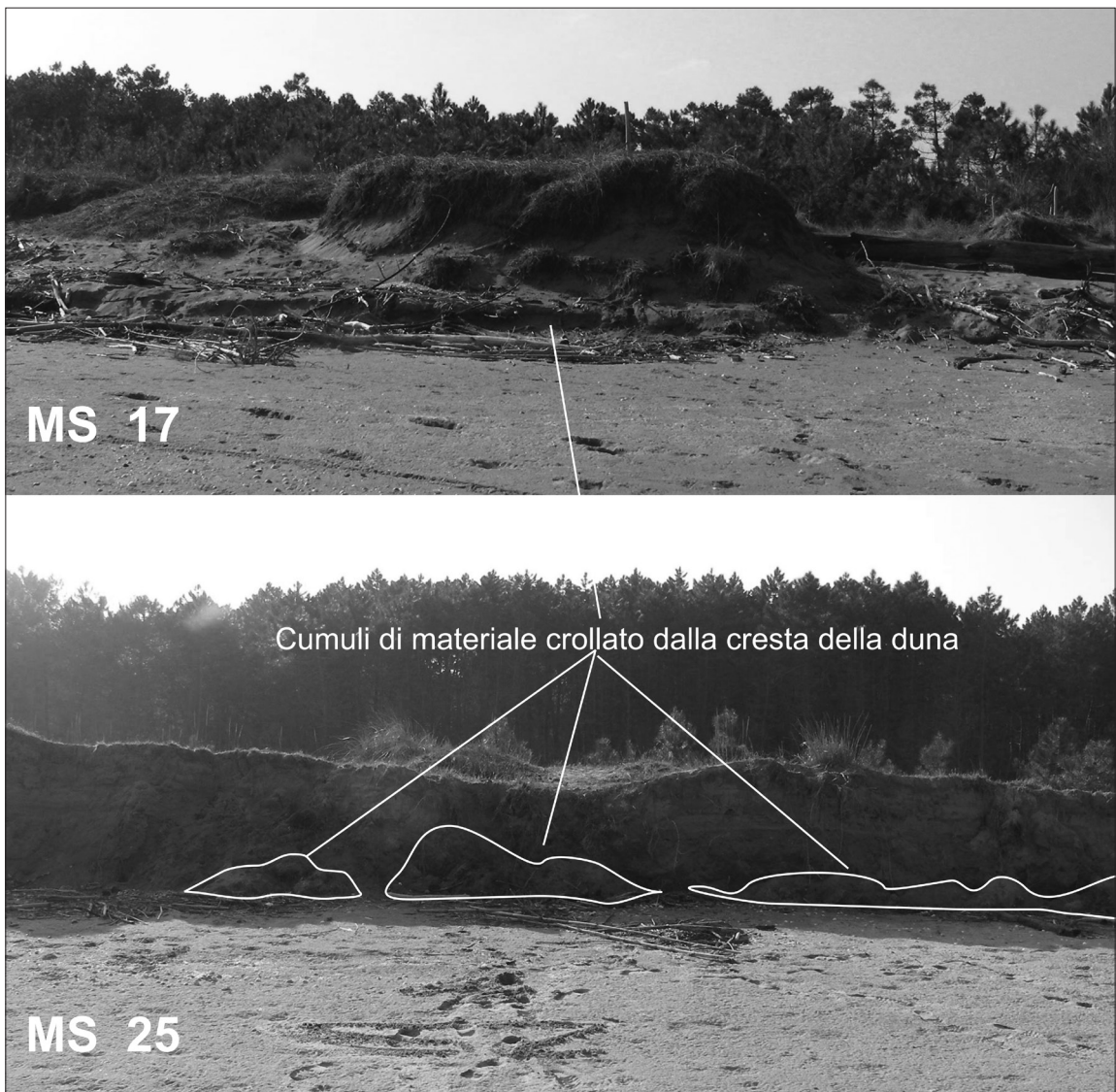


Figura 3 - Fronti di duna erosi dei profili MS17 e MS25, situati rispettivamente nelle zone 3 e 4. Le foto si riferiscono al rilievo di febbraio 2010, durante il quale si sono registrate le pendenze più alte dei fronti duna per l'intero triennio di misure topografiche.

una maggiore inclinazione verso le aree centrali (zone 3 e 4), con il valore medio più alto (10%) misurato nella zona 3 del febbraio 2009, per poi tornare praticamente piana (1-3%) agli estremi dell'area di studio, ossia nei pressi della foce del Bevano (zona 1) e nella spiaggia protetta davanti all'abitato di Lido di Classe (zona 6). Dalla Tabella 1 si nota infine come la battigia abbia un andamento discontinuo nelle 6 zone, non ha cioè una zona preferenziale in cui presenta sempre una minore o una maggiore pendenza, l'unica evidenza è il calo d'inclinazione nella zona 6 riscontrabile in ogni rilievo per la presenza di opere di difesa rigide poste a protezione di quella zona.

In sintesi si possono distinguere tre "macrozone" caratterizzate da simili valori di pendenza in tutti e 7 i rilievi

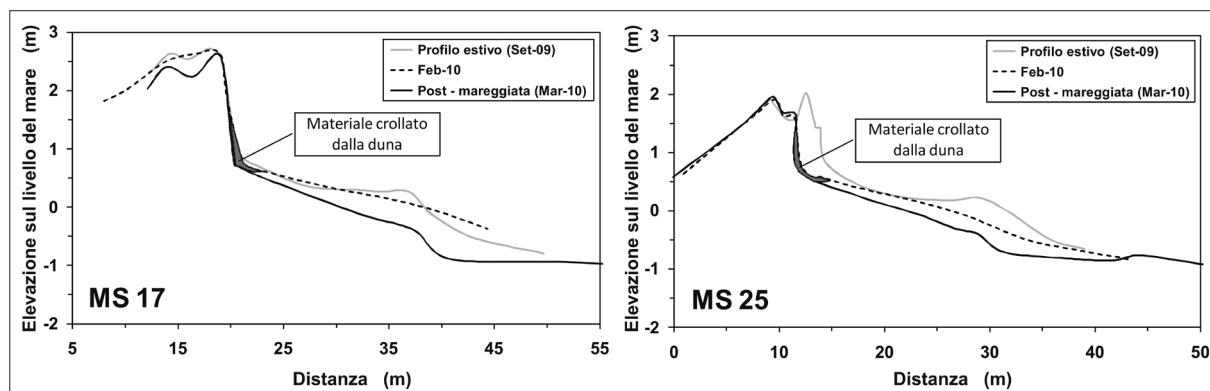


Figura 4 - Fronti di duna erosi dei profili MS17 e MS25, situati rispettivamente nelle zone 3 e 4. I due profili sono gli stessi rappresentati in Figura 3 e si riferiscono al rilievo di febbraio 2010 (rappresentato con la linea tratteggiata) per il quale è indicato il materiale crollato dalla duna. Per capire l'evoluzione della duna sono stati anche rappresentati i profili misurati nel rilievo precedente (Set-09) e successivo (Mar-10) al febbraio 2010.

realizzati: una macrozona centrale (zone 3 e 4), dove i fronti duna e la spiaggia emersa raggiungono le pendenze più elevate per l'intera area di lavoro; una macrozona intermedia (zone 2 e 5) in cui le pendenze sia dei fronti duna che della spiaggia emersa assumono valori intermedi, costituendo quindi una zona di transizione tra i massimi valori della zona centrale e i minimi valori delle aree situate agli estremi del litorale in studio; una macrozona esterna (zone 1 e 6) dove le pendenze dei fronti duna e della spiaggia emersa raggiungono valori minimi, portando la spiaggia ad un generale appiattimento. Questo è dovuto da una parte (zona 1) alla presenza della foce del Bevano, dove spesso si verificano dei ventagli di overwash; dall'altra (zona 6) alla protezione offerta dalle opere di difesa (trasversali e parallele alla linea di riva), le quali attenuano la forza del moto ondoso incidente preservando la spiaggia retrostante.

Sono state ricercate, inoltre, alcune possibili correlazioni tra elementi morfologici (pendenza del fronte duna e della spiaggia emersa), e relazioni tra questi ed un possibile fattore di controllo come l'ampiezza della spiaggia emersa. Dal grafico di Figura 5 si evince che non esiste alcuna relazione diretta, statisticamente rappresentativa, tra la pendenza media del fronte duna e la pendenza media della spiaggia emersa. Le cause sono molteplici: 1) mentre le pendenza della spiaggia varia continuamente in risposta alle mareggiate ed alle stagioni, il fronte duna varia solo in seguito all'azione diretta da parte del moto ondoso durante le mareggiate che generano quote di run-up più elevato; 2) mentre per la spiaggia è documentata in bibliografia una relazione diretta tra pendenza della spiaggia e granulometria (vedi Wright e Short, 1984 e Short, 1999), per il fronte duna la pendenza è funzione della presenza di apparati radicali che portano ad ottenere pendenze sub-verticali, ben oltre l'angolo di riposo del materiale; 3) in seguito ai fenomeni di crollo già accennati in precedenza, ma che verranno meglio descritti successivamente, il fronte duna può variare molto rapidamente l'inclinazione al di là dello stato morfodinamico della spiaggia presente in quel momento. Tra le varie zone di suddivisione del litorale, le zone 3 e 4 (macrozona centrale) mostrano un'elevata variabilità nella relazione tra le due pendenze poiché questa parte di litorale è maggiormente soggetta all'impatto delle mareggiate. Si è invece esclusa la zona 6 dal grafico di Figura 5 perché è in gran parte priva della duna e dove presente, è praticamente stabile, in quanto si trova al retro di edifici balneari ed è quindi invariabile nel tempo.

Un'altra relazione esaminata è stata quella tra la pendenza del fronte duna e l'ampiezza della spiaggia emersa

(Fig. 6), dove non è stata presa in considerazione la zona 6 per i motivi di cui sopra e perché in tale area la spiaggia arriva ad ampiezze massime di circa 180 m, grazie alle opere di difesa trasversali e parallele alla linea di riva in essa presenti (vedi Fig. 1). Dalla Figura 6 si vede come soltanto per le zone 1, 2 e 5 (macrozona intermedia ed esterna) valga la relazione tra una bassa inclinazione del fronte duna ed un'elevata ampiezza della spiaggia emersa (per le zone 1 e 2 ciò potrebbe essere imputabile alla vicinanza con la foce del Bevano, invece per la zona 5 ciò è spiegabile grazie alla presenza dei pennelli perpendicolari alla linea di riva; vedi Figura 1). Non è però altrettanto vero che per elevate inclinazioni del fronte duna corrispondano limitate ampiezze della spiaggia emersa, o meglio questo

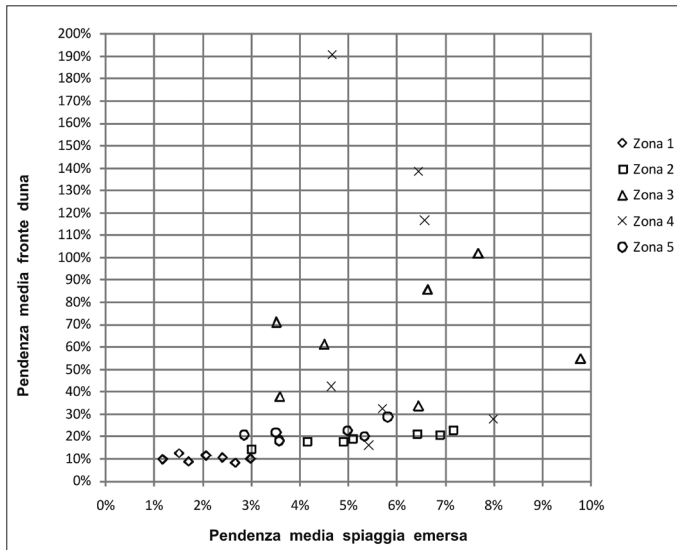


Figura 5 - Grafico che mette in relazione le pendenze medie del fronte duna e delle spiaggia emersa per ogni singola zona. I dati (mediati in ogni singola zona) provengono da tutte le 7 campagne di rilevamento topografico. I punti di ogni linea rappresentano ognuna delle 7 campagne di rilevamento topografico.

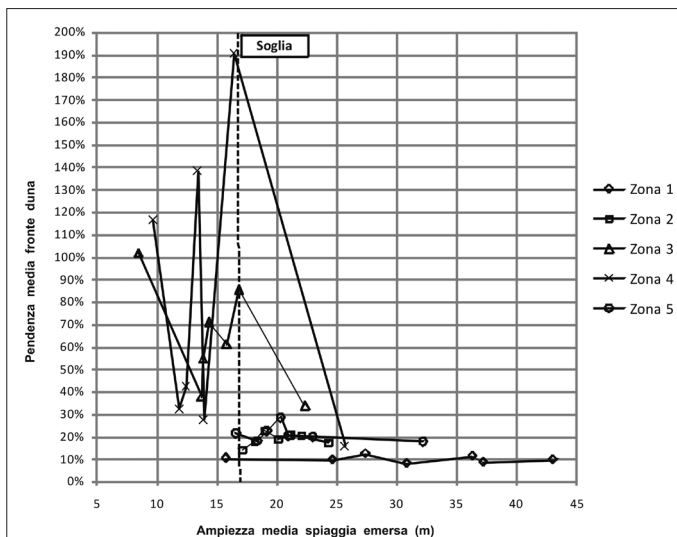


Figura 6 - Grafico che mette in relazione la pendenza media del fronte duna e l'ampiezza media della spiaggia emersa per ogni singola zona. I dati (mediati in ogni singola zona) provengono da tutte le 7 campagne di rilevamento topografico. I punti di ogni linea rappresentano ognuna delle 7 campagne.

è stato riscontrato solo in alcune campagne di rilevamento topografico, ma quest'ultima relazione, se si guardano le linee relative alle zone 3 e 4, non è sempre riscontrabile. L'elevata variabilità delle pendenze del fronte duna nelle zone 3 e 4 è condizionata dalla capacità erosiva delle mareggiate che provocano aumenti di pendenza dei fronti duna. Tali fronti duna si trovano quindi in situazioni altamente instabili dopo il verificarsi di una mareggiata e possono dar vita a crolli verticali che interessano la loro parte sommitale (cresta) in qualsiasi momento dell'anno, tornando così ad assumere inclinazioni minori. Si può, infine, individuare un valore soglia (linea tratteggiata di Fig. 6) posizionato tra i 16-17 m di ampiezza della spiaggia emersa: infatti, per valori di ampiezza della spiaggia superiori a tale soglia, i valori di pendenza del fronte duna (indipendentemente dalla zona e dalla campagna di rilevamento) non superano mai il 30-35%. Probabilmente le onde, durante le mareggiate occorse nell'arco dei 31 mesi di misure, nelle porzioni di spiaggia con una ampiezza superiore a 16-17 m, non sono riuscite ad aggredire la duna. Questa soglia, interpretata esclusivamente in base ai dati di Figura 6, può essere paragonata al concetto di "Corridoio di Sicurezza" (Safe Corridor Width) che è uno degli indicatori dell'impatto da mareggiata, sviluppati dal progetto MICORE e che viene calcolato in modalità operativa dal sistema di allerta sul sito di progetto (<http://geo.regione.emilia-romagna.it/schede/micore/>).

Variazioni temporali delle morfologie

Nel precedente paragrafo si è affermato che l'area di studio può essere suddivisa in 3 macrozone nelle quali il fronte duna e la spiaggia emersa hanno pendenze simili, mentre la battigia è caratterizzata da un andamento delle pendenze discontinuo su tutta l'area di studio. Questa caratteristica è rintracciabile

in tutte le campagne di rilevamento realizzate ed è dunque un requisito che si mantiene nel tempo. Analizzando più nel dettaglio i dati relativi alle pendenze medie misurate su ogni singola zona (vedi Fig. 7), è possibile interpretare meglio le variazioni morfologiche nel corso del tempo, per capire se ci sono state delle situazioni ricorrenti stagionalmente oppure che si sono verificate soltanto in alcuni periodi precisi durante i 31 mesi di misure.

Intanto, per quanto riguarda il fronte duna, il fatto che la pendenza aumenti nelle zone centrali appare più

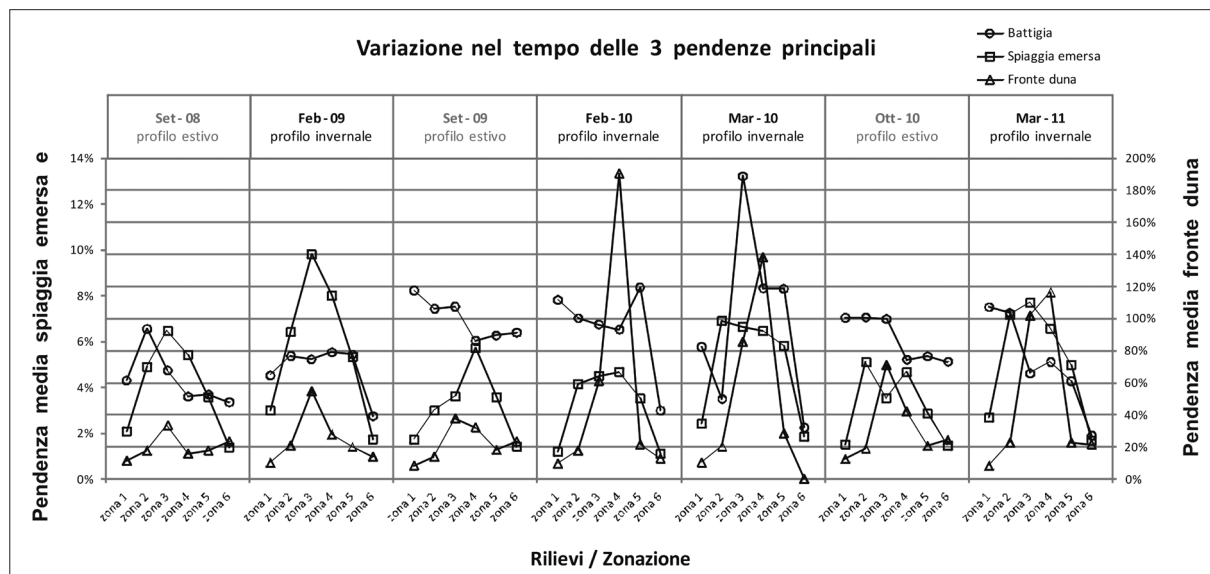


Figura 7 - Grafico che mette in relazione le pendenze medie del fronte duna, della spiaggia emersa e della battigia per tutti e 7 i rilievi topografici eseguiti durante il triennio di misure.

circoscritto alle sole zone 3 e 4 (macrozona centrale), mentre per la spiaggia emersa tale incremento avviene più gradualmente dagli estremi verso le zone centrali dell'area di studio: difatti si registrano valori abbastanza elevati di inclinazione anche nelle zone 2 e 5 (macrozona intermedia). Nel caso del fronte duna (Fig. 7) non è rintracciabile una definita stagionalità nel mutare delle pendenze. Inoltre, guardando l'evoluzione temporale del fronte duna, sarebbe verosimile pensare che una volta raggiunta un'inclinazione massima (vedi Feb - 10 in Fig. 7) tale pendenza si mantenga costante anche nei rilievi successivi, invece si assiste ad una sua diminuzione. Questo comportamento è probabilmente dovuto al fatto che la duna, durante le mareggiate, venendo erosa al piede dalle onde, raggiunge una pendenza assai elevata o comunque molto più elevata dell'angolo di riposo di una sabbia fine che è il sedimento presente sulla cresta di queste dune. Il raggiungimento di tali pendenze è reso possibile dalla presenza degli apparati radicali della vegetazione che cresce sulla cresta dunale. Il fronte duna, non trovandosi dunque nel suo angolo di riposo naturale, si trova in una situazione instabile e col tempo viene interessato da crolli nella sua parte sommitale (cresta). Il materiale crollato, depositandosi al piede della duna (vedi Figg. 3 e 4), provoca così una diminuzione dell'inclinazione del fronte duna. Tale pendenza continuerebbe a diminuire fino al raggiungimento del naturale angolo d'attrito del materiale, ma se la duna viene nuovamente erosa al piede durante una successiva mareggiata invernale (come è plausibile che sia accaduto nel Mar-11 in Fig. 7), ciò non si verifica. Come già osservato da Ciavola e Armaroli (2010) relativamente al cordone dunale presente nel tratto a Nord di Foce Bevano, anche nel tratto posto a Sud il fronte duna può essere eroso secondo due meccanismi dominanti: erosione dovuta al crollo del lato esposto verso mare o scavalciamento della cresta e progressiva formazione di morfologie "a collinetta", che vengono erose lateralmente alla loro obliterazione durante eventi di washover (Ciavola e Armaroli, 2010). La spiaggia emersa non sembra avere una chiara alternanza stagionale nel variare della sua pendenza media, anche se i valori maggiori sono riscontrabili comunque nei periodi più erosivi, ossia in quelli invernali (vedi Feb-09, Mar-10 e Mar-11 della Fig. 7). La discontinuità della battigia è rintracciabile, oltre che nello spazio (come detto in precedenza) anche nel corso del tempo: infatti non è riscontrabile uno stesso andamento in tutti i rilievi. L'unica ricorrenza sta-

gionale, per quanto riguarda la battigia, è il ristretto range di variazione della pendenza media durante tutti i rilievi eseguiti al termine delle stagioni estive (i rilievi realizzati nei periodi invernali, anche perché eseguiti al termine di ogni mareggiata occorsa, appaiono infatti molto più irregolari e con intervalli di pendenze misurati più ampi).

Nella ricerca di variazioni di pendenza stagionali, si intuisce che il principale fattore che controlla l'inclinazione dei profili di spiaggia è l'arrivo delle onde di mareggiata. L'energia totale (E) di ogni mareggiata è calcolata come l'integrazione dell'altezza d'onda significativa (H_s) al quadrato per la durata della mareggiata (t_1 , t_2), seguendo così la metodologia di Mendoza e Jimenez (2004), adottata successivamente anche da Armaroli et al. (2007, 2012) per studi locali, per adattare la scala delle mareggiate oceaniche proposta da Dolan e Davis (1992) al contesto mediterraneo (vedi anche Perini et al., 2011). Analizzando i rilievi topografici si possono trovare delle relazioni tra i cambi di pendenza più evidenti, misurati in alcune delle 7 campagne effettuate, e il verificarsi degli eventi. Come si vede infatti dal grafico di Figura 8, gli eventi meteo marini più influenti sono stati registrati nei periodi invernali. I rilievi topografici maggiormente influenzati dal verificarsi delle mareggiate sono quelli di Feb-09, Set-09, Feb-10 e soprattutto Mar-10. Il rilievo realizzato nel Mar-11 non è mostrato in Figura 8 poiché mancano i dati meteo marini relativi ai primi mesi invernali del 2011 per poter fare un quadro completo dell'ultima stagione invernale. L'evento di maggiore intensità (energia pari a 311.56 m^2/hr , classe 3; altezza d'onda massima pari a 3.86 m, Perini et al., 2011) si è verificato nei primi giorni del mese di Mar-10 (ed in particolare l'8 Marzo). Tale evento ha in effetti determinato considerevoli aumenti nella pendenze di spiaggia: infatti se si guarda la Figura 7 si nota come, soprattutto per il fronte duna e la battigia, si siano registrate pendenze tra le più alte per l'intero triennio di misure. Le zone che hanno maggiormente subito l'azione erosiva di quella mareggiata sono le zone 3 e 4 relativamente al fronte duna e le zone 3,4 e 5 per quanto riguarda invece la battigia. Infatti, aver ripetuto il rilievo invernale nel 2010 (Feb-10 e Mar-10), testimonia l'"eccezionalità" dell'evento meteo marino accaduto nei primi giorni del Marzo di quell'anno. Dalla Figura 8 si osserva, dunque, come ci sia una stretta correlazione tra il verificarsi della mareggiata e il conseguente cambio di pendenze dei profili di spiaggia. Nonostante ciò, anche dopo mareggiate meno energetiche si sono misurati notevoli aumenti di pendenza: infatti, in Figura 7 relativamente alla zona 4, il più alto valore d'inclinazione media del fronte di duna è stato misurato nel rilievo di Feb-10, ossia prima della mareggiata più intensa in assoluto, verificatasi appena un mese dopo. E' probabile che la duna, già in seguito alle mareggiate dell'inverno 2009-2010, si trovava in una situazione altamente instabile e ciò ha portato al crollo di materiale dalla cresta al piede della duna durante la successiva mareggiata (più intensa) del Mar-10, causando una diminuzione di inclinazione rispetto il rilievo precedente. Questo è lo stesso comportamento che si è cercato di spiegare nel Paragrafo 3.1 e nelle Figure 3 e 4.

Altre osservazioni sui periodi che in 31 mesi di misure, hanno influito maggiormente sulle morfologie di

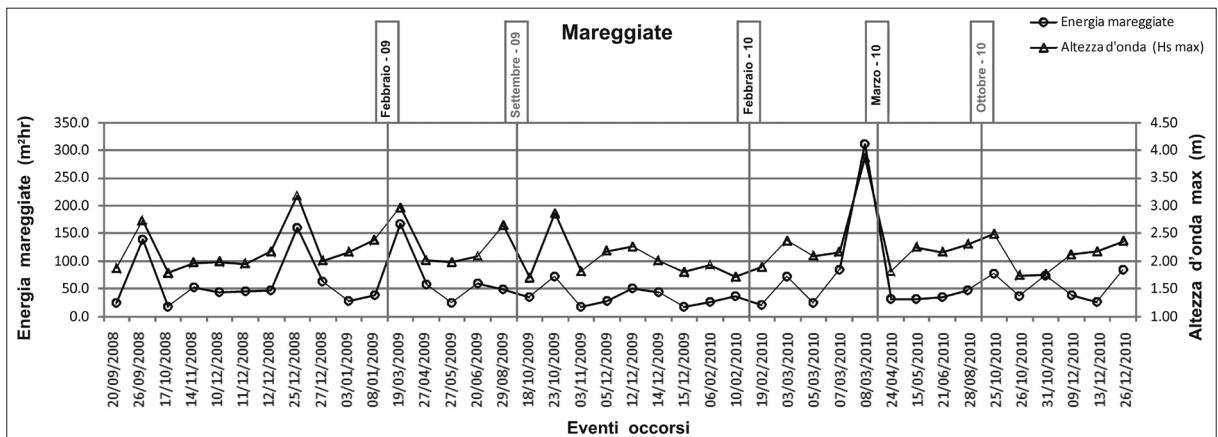


Figura 8 - Grafico che mette in evidenza quali mareggiate hanno influito maggiormente sulle pendenze misurate durante i 31 mesi di rilievi. Nel grafico sono indicate sia l'energia (m^2/hr) che l'altezza d'onda (m) massima registrata durante le mareggiate. In ascissa sono elencati cronologicamente gli eventi di mareggiata registrati per gli anni 2008, 2009 e 2010. Le etichette indicano il momento in cui è stato fatto il rilievo topografico.

spiaggia di questo tratto di litorale, possono essere fatte esaminando la Figura 9. I 3 grafici rappresentati in essa sintetizzano i valori di pendenza realmente misurati su ognuno dei 40 profili relativamente alle 3 pendenze principali riconoscibili su ogni profilo. Dalla Figura 9 A si nota come siano i periodi invernali degli anni 2010 e 2011 (Feb-10, Mar-10 e Mar-11) ad avere influito pesantemente sulla pendenza dei fronti duna, specialmente nella macrozona centrale (che, come già ampiamente detto, è quella più vulnerabile alle mareggiate). In particolare si distinguono 3 picchi tra i quali il più alto è relativo al profilo MS 26 del febbraio 2010 (pendenza

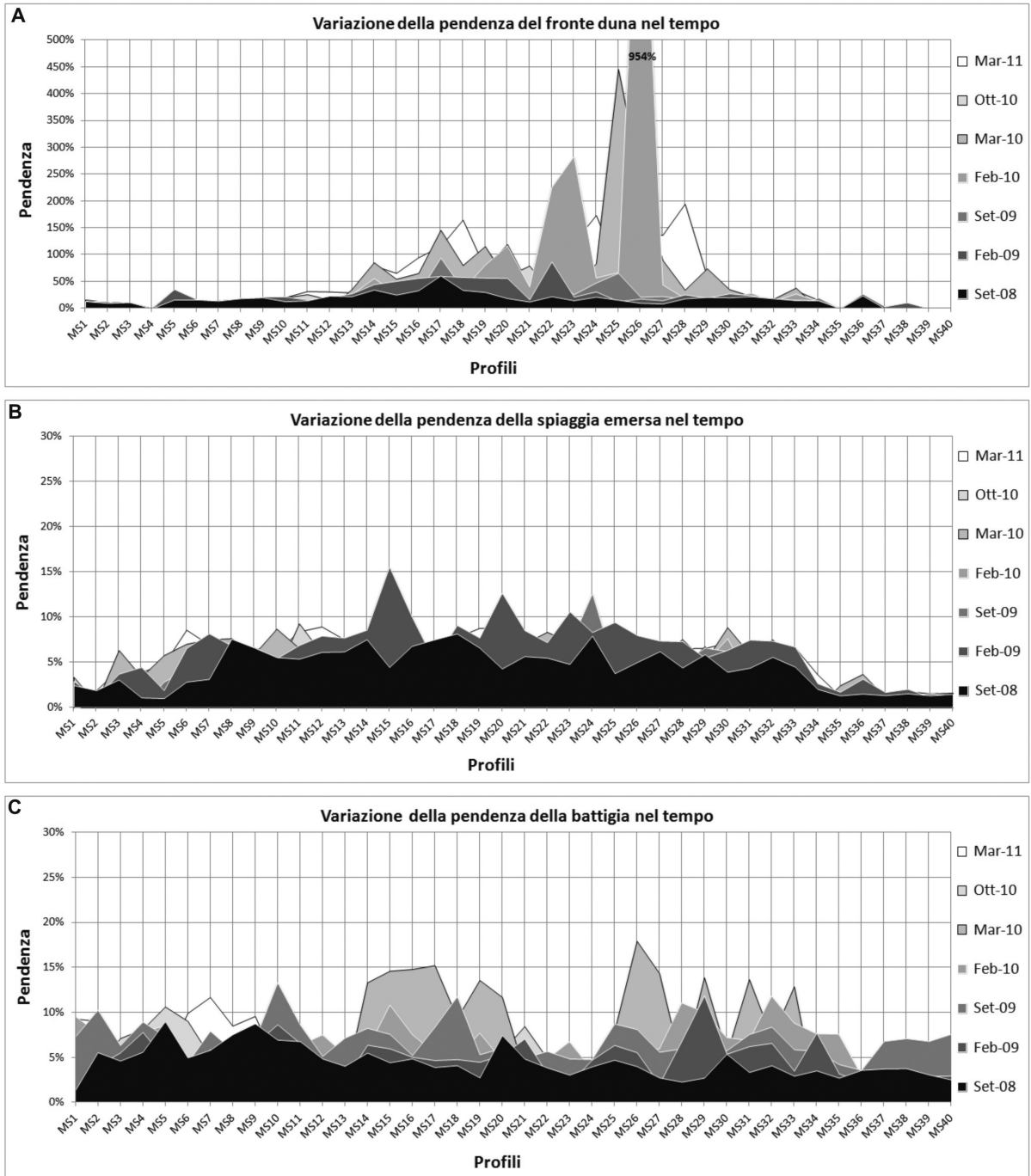


Figura 9 - Grafici che mettono in evidenza in quali momenti (nell'arco del triennio di misure) si sono misurate le pendenze più elevate per i 3 principali elementi morfologici considerati (A - fronte duna; B - spiaggia emersa; C - battigia).

del 954% \cong 84°). Nelle aree più esterne del litorale in studio si nota invece come i fronti duna siano rimasti in gran parte gli stessi che sono stati misurati nei primi due rilievi (Set-08 e Feb-09). Nella Figura 9 B, si vede come per le pendenze della spiaggia emersa, il periodo più influente sia stato l'inverno 2009 (vedi Feb-09) e solo per alcuni profili c'è stato un incremento nei periodi successivi. A differenza del fronte duna, la spiaggia emersa, seppur registra le maggiori inclinazioni sempre nella macrozona centrale, mantiene comunque delle pendenze elevate anche nella macrozona intermedia. La zona 6 (che è quella protetta dalle opere di difesa) è l'unica parte di litorale che ha subito meno variazioni. Infine, nella Figura 9 C, la battigia conferma la sua variazione di pendenza altamente discontinua sia nel tempo che nello spazio. I picchi massimi di inclinazione sono stati causati dalle mareggiate dell'inverno 2010 (vedi Mar-10) ma in generale si è assistito ad un progressivo aumento di pendenza nel corso del triennio di misure.

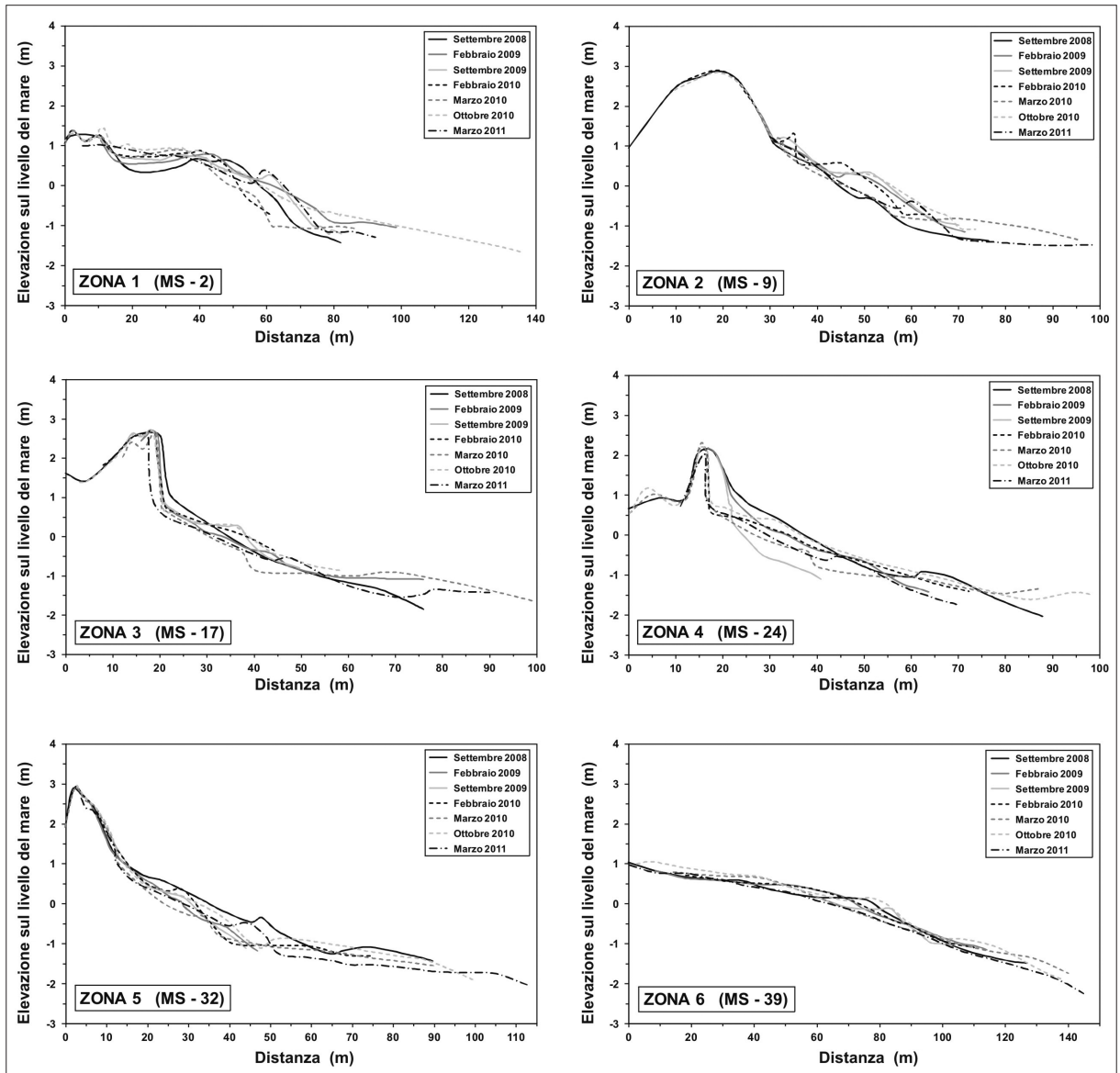


Figura 10 - Profili tipo rappresentativi per ognuna delle sei zone di suddivisione del litorale studiato. In ordinata e in ascissa sono indicate rispettivamente l'altezza sul livello del medio mare e la distanza in metri. Per la zona 6 si è scelto un profilo privo della duna poiché in tale parte del litorale essa è pressoché assente e, se presente, è stabilizzata dagli edifici circostanti, non seguendo più uno sviluppo naturale.

Altre considerazioni, in base alla Figura 9 e alla Tabella 1, possono essere evidenziate zona per zona, relativamente ai cambiamenti morfologici avvenuti durante i 31 mesi di misure. L'elemento morfologico che più degli altri varia nella zona di studio, è sicuramente il fronte duna. Esso ha la sua maggiore variabilità nella zona 4 e mantiene un'elevata mutevolezza anche nella zona 3 (quindi nell'intera macrozona centrale). Le zone 1 e 6 (macrozona esterna) oltre ad avere i valori di pendenza media più bassi hanno anche il minor grado di variabilità (se si tiene conto che la zona 6 ha pochissime dune, le quali sono praticamente tutte stabili trovandosi sul retro di edifici e stabilimenti balneari). Le zone 2 e 5 (macrozona intermedia) hanno valori di pendenza media leggermente più elevati rispetto alle zone più esterne, e allo stesso tempo hanno anche un range poco più grande rispetto sempre alla macrozona esterna. La spiaggia emersa e la battigia hanno, in generale, un minor grado di variabilità.

Per avere una visione complessiva di come siano cambiati i profili di spiaggia nel corso dei 31 mesi di misure vengono nella Figura 10 rappresentati 6 profili tipo scelti come rappresentativi di ogni singola zona di suddivisione del litorale in studio. In ogni profilo mostrato il profilo a colore nero (a linea continua) relativo al Settembre 2008, ossia alla prima campagna di rilevamento, rappresenta la situazione iniziale da cui è possibile vedere l'evoluzione delle morfologie nel tempo fino al Marzo 2011 (linea nera tratto-punteggiata). Si può dire che: la zona 1 è andata verso un progressivo appiattimento delle morfologie di spiaggia; la zona 2, al di là delle morfologie stagionali, ha visto la spiaggia e la duna rimanere praticamente invariate; la zona 3 ha subito un discreto arretramento al piede della duna pur rimanendo pressoché invariata in altezza; la zona 4 è la porzione di litorale che ha subito pesantemente gli effetti delle mareggiate, infatti, se si guarda la distanza tra la linea del profilo iniziale (Set-08) e quella finale (Mar-11) si percepisce di quanto sia arretrata la duna e tale peggioramento è avvenuto tra il Settembre 2009 e il Febbraio 2010 (dunque imputabile alle mareggiate dell'inverno 2009/2010); la zona 5 e la zona 6, trovandosi all'interno della spiaggia protetta da opere di difesa non hanno praticamente subito variazioni degne di nota.

Analisi di laboratorio per la classificazione morfodinamica delle spiagge

Per poter classificare il litorale in esame secondo l'approccio morfodinamico di Masselink e Short (1993) e Short (1999), sono state eseguite alcune analisi sul sedimento campionato (analisi granulometriche, calcimetriche e picnometriche) in modo tale da avere dei parametri il più possibile reali per calcolare la velocità di caduta del sedimento. I dati ottenuti da ogni analisi sono stati sintetizzati nella Tabella 2, relativamente alle 6 zone in cui si è deciso di suddividere il tratto di litorale studiato. Dai risultati delle analisi granulometriche, si evince che il sedimento costituente il tratto di spiaggia studiato è sabbia fine, con un grado di selezione buono. Nonostante l'uniformità del sedimento, si nota comunque un andamento decrescente del diametro medio (M_z) a partire dalla foce del Bevano (zona 1) fino ad arrivare alla spiaggia protetta (zona 6). Si tratta comunque di differenza molto piccole nel diametro medio, che di solito mantiene la stessa classe in φ lungo i profili di ogni zona. Per quanto riguarda la classazione (σ), essa ha un andamento simile al diametro medio, nel senso che, pur essendo buona per la quasi totalità dell'area di studio, tende comunque a migliorare dalla zona 1 alla zona 6. Le analisi calcimetriche sono state eseguite sui campioni relativi alla sola cresta della berma (posizione 3). I risultati ottenuti sono mostrati nella Tabella 2. In media lungo l'intero tratto di litorale analizzato si ha una quantità di CaCO_3 del 26.1%. Le analisi picnometriche sono state eseguite sui medesimi campioni su cui sono state realizzate le calcimetrie. Come si vede dalla Tabella 2, i valori medi di peso specifico vanno da 2.68 a 2.72. Per calcolare la velocità di caduta del sedimento, come già detto nel Paragrafo 2.3, è stata usata la formula di Le Roux (1996). Si è considerato il diametro medio (in metri) relativo al sedimento della cresta di berma, poiché, i campioni su cui sono state realizzate le analisi picnometriche sono relativi a tale posizione di campionamento. L'ordine di grandezza W di che risulta dai calcoli (vedi Tab. 2) è verosimile per una sabbia fine che si avvicina ad una sabbia media come quella presente nel tratto di litorale in studio (con φ compreso principalmente tra 2.00 e 2.50). Ciavola et al. (2000) hanno calcolato velocità di caduta comparabili per spiagge situate nella zona del delta del Po. Alla luce di risultati ottenuti dal calcolo delle velocità di caduta (W) secondo la legge di Le Roux, sono stati calcolati i valori di velocità di caduta adimensionale Ω per le 6 zone. Sono stati utilizzati valori modali di altezza d'onda alla frangenza (H_p ; pari a 0.5 m) e di periodo d'onda (T ; pari a 4.5 s), al fine di avere risultati comparabili con lo studio morfodinamico di Armaroli e Ciavola (2011), relativo alla contigua spiaggia di Lido di Dante. I risultati del parametro di Dean (Ω) sono esposti sempre nella Tabella 2.

Tabella 2 - Sintesi delle analisi di laboratorio fatte sui sedimenti campionati in corrispondenza della cresta della berma (posizione 3 nella Figura 2). Vengono illustrati oltre ai parametri sedimentologici (diametro medio M_z ; classazione σ_z) anche i valori in contenuto di carbonato di calcio, di densità e di velocità di caduta (calcolata secondo la formula di Le Roux). Tutti i parametri sono stati mediati tra i vari profili compresi nelle varie zone.

ZONE	M_z (Φ)	M_z (mm)	Granulometria	σ_z (Φ)	CaCO ₃	ρ_z (g/cm ₃)	W_s (m/s)
Zona 1	2.25 - 2.00	0.243	sabbia fine	0.385	27.0%	2.69	0.030
Zona 2	2.25 - 2.00	0.221	sabbia fine	0.382	28.0%	2.72	0.027
Zona 3	2.25 - 2.00	0.230	sabbia fine	0.382	27.5%	2.71	0.029
Zona 4	2.50 - 2.25	0.200	sabbia fine	0.360	25.5%	2.72	0.024
Zona 5	2.50 - 2.25	0.192	sabbia fine	0.353	23.0%	2.68	0.022
Zona 6	2.50 - 2.25	0.179	sabbia fine	0.362	25.5%	2.68	0.020

Classificazione morfodinamica delle sei zone di suddivisione del litorale in studio

In base alla classificazione di Masselink e Short (1993), oltre a calcolare Ω è indispensabile conoscere il parametro RTR (Relative Tidal Range), che consiste nel rapporto tra l'escursione media di marea alle sizigie MSR (Mean Spring tide Range) e l'altezza d'onda alla frangenza H_b (da Masselink e Short, 1993; in Masselink e Hegge, 1995). Il valore di RTR utilizzato è stato precedentemente proposto da Armaroli e Ciavola (2011) ed è pari a 1.66. Questo valore, anche se è relativo alla spiaggia di Lido di Dante (situata immediatamente a Nord di Foce Bevano), può essere ritenuto idoneo anche per il litorale in studio, per la prossimità tra le due spiagge e le medesime condizioni meteo-marine che le contraddistinguono. In definitiva, le sei zone distinte nell'area di studio, secondo la classificazione di Masselink e Short (1993), sono classificabili come:

- Zona 1 ($\Omega=3.66$): spiaggia intermedia caratterizzata da barre (intermediate barred beach, vedi Fig. 12). In questa prima zona è presente una barra intertidale (o interna) a tratti saldata con il basso fondo (vedi Fig. 12). Come si può vedere dalla carta geomorfologica di Fig. 12 è presente anche una barra sommersa che si trova ad una distanza di circa 130 m dalla linea di riva (in Fig. 12 è indicata come barra esterna). Tale barra, che risulta continuare anche a Nord di Foce Bevano, non subisce spostamenti in senso perpendicolare alla costa nemmeno durante le mareggiate, come provato da Armaroli e Ciavola (2011). Tali autori affermano infatti che la barra, nell'intervallo continuo di monitoraggio che va dal 2003 al 2006, non si è mai spostata, ma al massimo è stata interessata da piccole variazioni della sua forma in pianta (da ritmica a rettilinea durante eventi di mareggiata). Dai dati topo-batimetrici (nota 1) in possesso è possibile stimare se la barra sommersa sia dotata di una forma pronunciata o se sia invece piatta (come vorrebbe distinguere la classificazione di Masselink e Short, 1993; vedi Figura 12). Dalla Figura 11 si vede come la barra esterna (o sommersa) abbia qui una forma più o meno simmetrica ed appuntita.
- Zona 2 ($\Omega=4.09$): spiaggia intermedia caratterizzata dalla presenza di barre (intermediate barred beach, vedi Fig. 12). Anche in questa parte di litorale la spiaggia presenta due barre (una interna ed una esterna, vedi Fig. 12). Come per la zona 1 la barra esterna si trova ad una distanza di circa 130 m dalla linea di riva e ha una forma pronunciata e pressoché simmetrica (vedi Fig. 11). La barra interna, anche in questa parte di litorale, è a tratti saldata al basso fondo.
- Zona 3 ($\Omega=3.90$): spiaggia intermedia caratterizzata dalla presenza di barre (intermediate barred beach, vedi Figura 12). La situazione morfologica è identica alle due precedenti zone (vedi Fig. 12), salvo per il fatto che la barra esterna, sempre pronunciata, qui assume una forma asimmetrica (vedi Fig. 11).
- Zona 4 ($\Omega=4.69$): spiaggia intermedia caratterizzata dalla presenza di barre (intermediate barred beach, vedi Fig. 12). Anche in questa parte di litorale sono presenti i due tipi di barra, ma la barra interna si sdoppia saldandosi al basso fondo tramite due barre oblique, a circa 550 -570 m dal primo pennello giungendo da Nord (vedi Fig. 12). La barra esterna si mantiene sempre a circa 130 m dalla linea di riva, tranne per un breve tratto in cui si inarca, allontanandosi dalla linea di riva di circa 150 m (vedi Fig. 12); la sua forma è più articolata e meno pronunciata rispetto alle precedenti zone, anche se ancora asimmetrica (vedi Fig. 11).
- Zona 5 ($\Omega=5.07$): spiaggia dissipativa caratterizzata dalla presenza di barre (dissipative barred beach, vedi Fig. 12). In questa zona la spiaggia, secondo la classificazione di Masselink e Short (1993), entra nel

campo delle spiagge a profilo dissipativo. Questa è l'ultima zona del tratto di studio in cui sono ancora presenti le due barre: la barra interna scompare poco dopo il primo pennello che si incontra venendo da Nord e la barra esterna, mantenendosi alla solita distanza dei 130 m circa, termina proprio al "confine" con la zona 6, in prossimità del terzo pennello che si incontra giungendo da Nord (vedi Fig. 12). Seppure già in questa zona le morfologie di spiaggia inizino a risentire della presenza delle opere di difesa presenti (pennelli e barriere soffolte, vedi Figura 12), si è scelto comunque di classificarla, poiché sono ancora presenti elementi morfologici naturali (come la barra sommersa) individuati anche per le precedenti 4 zone. Dalla Figura 11 si nota infatti come la barra esterna diventi qui fortemente asimmetrica e più bassa rispetto alle precedenti zone prive di strutture di difesa. Inoltre, al di là della barra esterna, verso mare (a circa 230 m da costa), si nota un accumulo generato dalle barriere soffolte presenti in questo tratto di litorale (vedi Figg. 12 e 11).

- Zona 6 ($\Omega=5.61$): all'ultima zona si è deciso di non applicare la classificazione di Masselink e Short (1993). Infatti, in questa zona non sono più presenti nessuna delle due barre precedentemente descritte (barra interna ed esterna) e il generale appiattimento della spiaggia emersa e della battigia, con formazione del tombolo sommerso (vedi Fig. 12), ci dice che in questa parte di litorale nessun elemento morfologico di spiaggia si è sviluppato in modo naturale, ma la spiaggia risente delle strutture di protezione (vedi Fig. 11). Non avrebbe dunque senso utilizzare una classificazione che si basa sul riconoscimento di morfologie che si sviluppano naturalmente in una spiaggia.

In generale, dal confronto con classificazione di Masselink e Short si può dedurre che, partendo dalla zona 1 (spiaggia naturale situata nei pressi della foce del Bevano) fino ad arrivare alla zona 5 (inizio della spiaggia

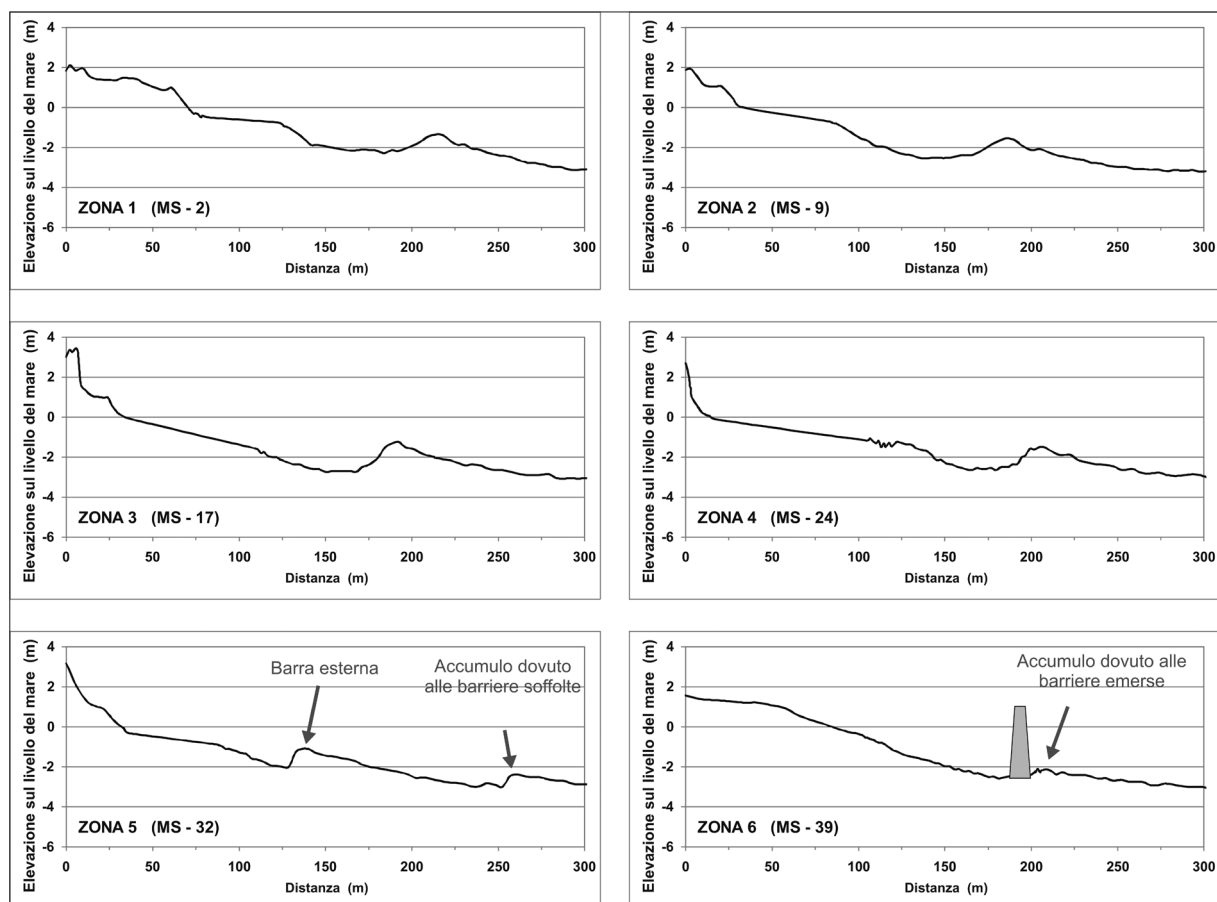


Figura 11 - Profili topo-batimetrici realizzati nel settembre 2009 dal progetto MICORE. Per ognuna delle 6 zone è stato scelto un profilo rappresentativo della situazione morfologica di quella zona. Sulle ordinate è indicata l'altezza dal livello del medio mare e in ascissa è indicata la distanza. L'esagerazione verticale è pari a 12.5.

protetta dai pennelli nei pressi di Lido di Classe), le variazioni morfologiche portano la spiaggia ad assumere un profilo via via più dissipativo (e quindi meno inclinato). Se si vanno ad osservare le pendenze si nota, infatti, come soprattutto la spiaggia emersa subisca nelle zone 5 e soprattutto 6 (cioè nella parte di spiaggia protetta artificialmente) una diminuzione di inclinazione (vedi Fig. 7).

Per quanto riguarda invece la classificazione morfodinamica di Short (1999), considerando sempre il valore di velocità di caduta adimensionale Ω , ottenuto tramite la velocità di caduta W_s secondo la legge di Le Roux (vedi Tab. 2), le varie zone sono così catalogabili:

- Zona 1 ($\Omega=3.66$): spiaggia intermedia (LBT - LTT, vedi Fig. 12). Essendo tale zona (come già spiegato in occasione della precedente classificazione) contraddistinta da una barra esterna (distante circa 130 m dalla linea di riva) e da una barra interna localmente saldata al basso fondo (vedi Fig. 12), essa potrebbe essere classificabile come Longshore bar-trough (LBT). Tuttavia vanno tenute presenti sia le dovute proporzioni riguardo alle dimensioni del trugolo e della barra tra questa spiaggia e una spiaggia oceanica per la quale è stata realizzata la classificazione di Short (1999), così come le differenti condizioni idrodinamiche tra una spiaggia oceanica, che è dominata da onde di swell e rip currents ben sviluppate, e una spiaggia di un piccolo bacino come l'Adriatico dove tali condizioni non si creano. Potrebbe altrimenti trattarsi di una Low tide terrace o ridge-runnel (LTT) se si considera come terrazzo di bassa marea l'intero basso fondo e la barra interna (vedi Fig. 12).
- Zona 2 ($\Omega=4.09$): spiaggia intermedia (LBT - LTT, vedi Fig. 12). La stessa situazione morfologica e le medesime ipotesi fatte per la zona 1 possono essere valide anche per questa zona di spiaggia.
- Zona 3 ($\Omega=3.90$): spiaggia intermedia (LBT - LTT, vedi Fig. 12). Anche in questo caso valgono le ipotesi esposte per la zona 1.
- Zona 4 ($\Omega=4.69$): anche in questo caso si tratta di una spiaggia intermedia (LBT - TBR, vedi Fig. 12). In particolare, in questa parte di litorale si nota la presenza di due barre oblique attaccate alla spiaggia (vedi Fig. 12) che potrebbero far pensare ad una Transverse bar and rip (TBR). Secondo Short (1999) la spaziatura di queste barre, per una spiaggia non oceanica, dovrebbe aggirarsi tra 150-250 m, ed in effetti misurando la distanza tra le due barre sulla carta geomorfologica (Fig. 12) si rientra in tale intervallo. Tuttavia, per la presenza della barra esterna, a tale zona si addice anche la classificazione come Longshore bar-trough (LBT, vedi Fig. 12).
- Zona 5 ($\Omega=5.07$): spiaggia intermedia (LBT - LTT, vedi Fig. 12). Pur trovandoci già all'interno della spiaggia protetta da opere di difesa (zona dei pennelli perpendicolari alla linea di riva, vedi Fig. 12) si è comunque deciso (per gli stessi motivi esposti già in occasione della precedente classificazione) di considerare classificabile questa parte di spiaggia. La morfologia di questa zona è del tutto simile a quella delle zone 1,2 e 3, pur avendo termine all'inizio di questa zona a barra interna (subito dopo il primo pennello, vedi Fig. 12).
- Zona 6 ($\Omega=5.61$): In questa zona, la spiaggia è completamente influenzata dalla presenza delle opere di difesa trasversali e parallele alla linea di riva. Ecco quindi che anche per la classificazione di Short (1999) si è deciso di non catalogare questo tratto di spiaggia.

Tabella 3 - Sintesi della classificazione morfodinamica per le 6 zone di suddivisione del litorale in studio.

ZONE	Ω	Masselink & Short (1993)	Short (1999)
Zona 1	3.66	intermediate barred beach	LBT - LTT
Zona 2	4.09	intermediate barred beach	LBT - LTT
Zona 3	3.90	intermediate barred beach	LBT - LTT
Zona 4	4.69	intermediate barred beach	LBT - TBR
Zona 5	5.07	intermediate barred beach	LBT - LTT
Zona 6	5.61	non classificata	non classificata

Tra le due classificazioni analizzate esiste una similitudine: ossia in entrambe, considerato il graduale aumento di Ω dalla zona 1 alla zona 5, si assiste ad un progressivo passaggio dei profili di spiaggia da condizioni intermedie, nel tratto di spiaggia naturale della zona di studio (zone 1, 2, 3 e 4), a condizioni tendenzialmente dissipative nella parte di litorale protetto artificialmente dai pennelli (zona 5). E' importante notare inoltre,

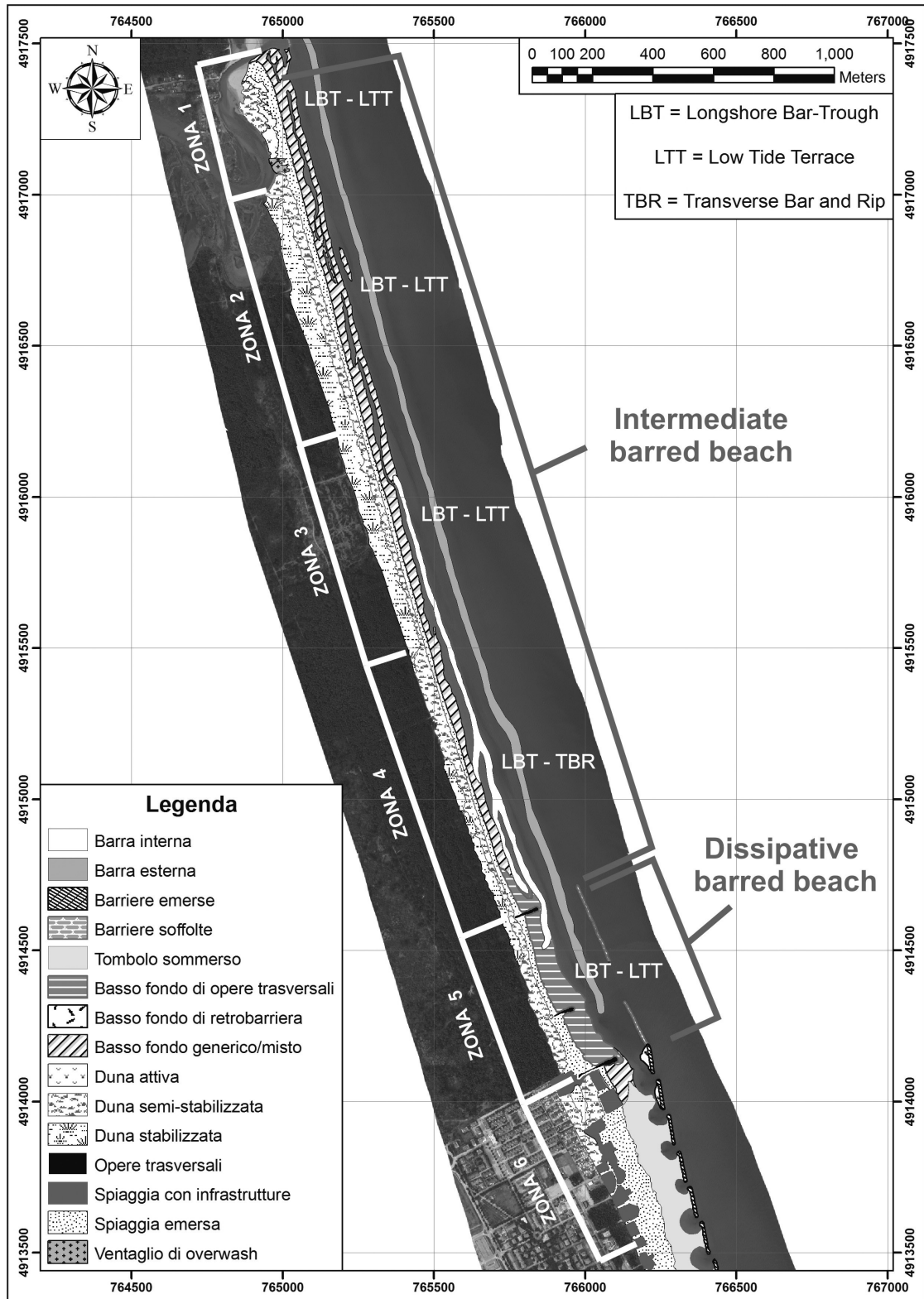


Figura 12 - Classificazione morfodinamica delle 6 zone individuate nell'area di studio. In grigio è indicata la classificazione secondo Masselink e Short (1993); in bianco è segnalata la classificazione secondo Short (1999). La base dell'immagine è una fotointerpretazione realizzata con dati LIDAR e immagini aeree entrambi relativi al marzo 2009.

come ci sia una certa corrispondenza tra la classificazione morfologica realizzata per il presente studio e quella di Armaroli e Ciavola (2011) (nota 2), la quale si riferisce però al tratto di litorale (di circa 3 km) che va da Foce Bevano alla località balneare di Lido di Dante (cioè il tratto di spiaggia immediatamente a Nord della presente area di studio). Nel lavoro sopra citato tali spiagge vengono, per la maggior parte, classificate (secondo Short, 1999) come spiagge intermedie al limite del campo dissipativo, con morfologie predominanti di RBB e TBR. Esiste, dunque, una similitudine relativamente al tipo di profilo di spiaggia (in entrambi gli studi il profilo è intermedio vicino al dissipativo nelle zone in prossimità di opere di difesa), c'è però una sostanziale differenza nella forma in pianta della barra sommersa. Essa infatti a Nord della foce del Bevano appare principalmente ritmica, mentre nel tratto di litorale studiato in questo lavoro, è pressoché rettilinea. Secondo, invece, la classificazione di Masselink e Short (1993), Armaroli e Ciavola classificano il tratto tra Lido di Dante e Foce Bevano come costituito da spiagge a profilo intermedio, con la presenza di una barra sommersa (o esterna) più o meno pronunciata, in accordo quindi con quanto stimato per il tratto di litorale oggetto di questo studio.

Conclusioni

Il presente lavoro ha riguardato lo studio morfodinamico e la risposta alle mareggiate nel breve-medio termine delle spiagge comprese tra la foce del Torrente Bevano e la località di Lido di Classe (RA), per un tratto lungo circa 4 km. Sono state classificate le 6 zone in cui si è scelto di suddividere il litorale, secondo due delle classificazioni più note nello stato dell'arte della morfodinamica di spiaggia, ossia la classificazione di Masselink e Short (1993) e la classificazione di Short (1999).

Considerando i valori di pendenza media ottenuti dall'analisi dei dati provenienti da 7 campagne di rilevamento topografico, il tratto di litorale studiato può essere suddiviso in 3 macrozone: una macrozona centrale (zone 3 e 4), dove i fronti duna e la spiaggia emersa raggiungono i valori di pendenza più elevati per l'intera area di lavoro; una macrozona intermedia (zone 2 e 5), in cui le pendenze sia dei fronti duna che della spiaggia emersa assumono valori intermedi, costituendo quindi una zona di transizione tra i massimi valori della zona centrale e i minimi valori delle aree situate agli estremi del litorale in studio; una macrozona esterna (zone 1 e 6), dove le pendenze dei fronti duna e della spiaggia emersa raggiungono valori minimi, portando la spiaggia ad un generale appiattimento. La battigia ha invece un andamento discontinuo nelle 6 zone, non ha cioè una zona preferenziale in cui presenta sempre una minore o una maggiore pendenza, l'unica evidenza è il calo d'inclinazione nella zona 6 riscontrabile in ogni rilievo per la presenza di opere di difesa rigide in quella zona. La distinzione in 3 macrozone si è visto essere sostanzialmente riscontrabile in ognuno dei 7 rilievi topografici eseguiti durante i 31 mesi complessivi di misure.

Non è stata individuata nessuna stagionalità nel variare di inclinazione del fronte duna e della spiaggia emersa, anche se il fronte duna appare comunque incrementare fortemente la sua pendenza nei periodi invernali a seguito di mareggiate soprattutto nella macrozona centrale (zone 3 e 4) dell'area di studio. La battigia, pur non avendo nessuna ricorrenza stagionale nei valori medi della sua inclinazione, ha comunque mostrato un range di valori di pendenza più ristretto nei periodi estivi e più ampio in quelli invernali. Tra le varie correlazioni indagate, si può affermare che non esiste alcuna relazione diretta, statisticamente rappresentativa, tra la pendenza media del fronte duna e la pendenza media della spiaggia emersa per questo tratto di litorale. Il fronte duna, in seguito ai fenomeni di crollo a cui è soggetto, può variare molto rapidamente la sua inclinazione aldilà dello stato morfodinamico della spiaggia presente al momento del franamento.

Infine, si è trovata una certa correlazione tra il verificarsi di intense mareggiate e conseguenti aumenti di pendenza dei profili di spiaggia (soprattutto per il fronte duna e la battigia) come ad esempio è accaduto nel Marzo 2010. Gli eventi meteo-marini dell'inverno 2009-2010 sono stati quelli maggiormente destabilizzanti, soprattutto per i fronti duna della macrozona centrale (zone 3 e 4). In tale parte di litorale la vulnerabilità erosiva si è visto essere accentuata dalla massima vicinanza al mare delle dune. Ulteriori approfondimenti sugli impatti da mareggiata, riguardanti l'area di studio, sono stati proposti da Armaroli et al. (2012), dove sono state cercate delle soglie di vulnerabilità in base ai cambiamenti morfologici e ai danni causati dagli eventi meteo-marini estremi.

I valori ottenuti dalle analisi di laboratorio sono serviti a calcolare le velocità di caduta adimensionale Ω che varia da un minimo di 3.66 (per la zona 1) a un massimo di 5.61 (per la zona 6). In base ad Ω e a considerazioni sulle morfologie di spiaggia, secondo la classificazione di Short (1999) le prime tre zone (zona 1,2 e 3)

sono catalogabili come Longshore bar-trough (LBT) o anche come Low tide terrace (LTT). La zona 4 può essere considerata invece come Transverse bar and rip (TBR) oppure come Longshore bar trough (LBT). Le morfologie della zona 5, nonostante comincino ad essere influenzate dalle opere di difesa presenti in questa parte di litorale, può comunque essere classificata come LTT o LBT. Nel caso dell'ultima zona (zona 6), la presenza delle strutture di difesa in essa presenti, ha indotto alla formazione di una morfologia (tombolo sommerso e scomparsa della barra sommersa) che sarebbe stata sicuramente diversa se avesse potuto seguire uno sviluppo naturale e per tale motivo non ha senso analizzarla secondo la classificazione di Short (1999). Utilizzando invece la classificazione di Masselink e Short (1993) le 5 zone risultano distinguibili in due sole categorie: le prime quattro zone (zone 1,2,3 e 4) possono essere considerate come intermediate barred beach, mentre la zona 5 risulta come dissipative barred beach. Per lo stesso motivo esposto sopra, in occasione della classificazione di Short (1999), non è stata ritenuta classificabile la zona 6. Confrontando le due classificazioni utilizzate, quella di Masselink e Short (1993) sembra più idonea per descrivere la morfologia di una spiaggia, poiché si basa sul riconoscimento in sezione delle forme. Invece, lo schema di Short (1999), cataloga le spiagge con profilo intermedio troppo dettagliatamente e in base a morfologie riconoscibili in pianta. Nella realtà, molto spesso accade che tali forme evolvono velocemente o appaiono degli ibridi tra le varie distinzioni proposte da Short (1999), rendendo quest'ultima classificazione più complicata da applicare.

Ringraziamenti

Si ringrazia il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli per la fornitura del rilievo LIDAR 2008 nell'ambito delle attività del progetto MICORE ed in particolare Paolo Luciani per l'assistenza nella formattazione dei dati e per l'aiuto nei rilievi di campo. Si ringraziano inoltre tutte le persone che negli anni hanno partecipato ai rilievi ed aiutato nell'analisi dati ed in particolare Clara Armaroli, Mouncef Sedrati, Elisa Fontana, Marinella Masina, Mitchell Harley e Quentin Lequeux. L'articolo è un contributo al progetto MICORE (contratto EU-202798), finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro (coordinatore P. Ciavola).

Bibliografia

- Armaroli C., Balouin Y., Ciavola P. e Capatti D. (2005) - *Nearshore bars as a natural protection of beaches, field evidence from Lido di Dante beach, Adriatic sea* - Atti di: ICCM'05 Conference, Tavira, Algarve, Portogallo, pp. 295-303.
- Armaroli C., Ciavola P., Perini L. e Luciani P. (2007) - *Morfologia delle spiagge ravennati e vulnerabilità per fenomeni di inondazione* - Terzo Forum Nazionale, Pianificazione e tutela del territorio costiero; questioni, metodi, esperienze a confronto, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RN), vol. 127: 363 - 389.
- Armaroli C. e Ciavola P. (2011) - *Dynamics of a nearshore bar system in the northern Adriatic: A video-based morphological classification* - *Geomorphology*, n.126: 201-216.
- Armaroli C., Ciavola P., Perini L., Calabrese L., Lorito S., Valentini A. e Masina M. (2012) - *Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coastline, Italy* - *Geomorphology*, vol. 143-144: 34-51.
- Balouin Y., Ciavola P., Anfuso G., Armaroli C., Corbau C. e Tessari U. (2004) - *Morphodynamics of intertidal sand bars: field studies in the Northern Adriatic, NE Italy* - *Journal of Coastal Research*, Special Issue 39: 323-328.
- Balouin Y., Ciavola P. e Armaroli C. (2006a) - *Sediment transport pattern and coastal evolution at Lido di Dante beach, Adriatic sea* - ASCE, Reston, VA, Atti di: Coastal Dynamics 2005, Barcellona, pp. 1-13.
- 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*, Special Issue 39: 602-607.
- Blott S.J. e Pye K. (2001) - *Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments* - *Earth Surface Processes and Landforms*, n.26: 1237-1248
- Calabrese L. e Lorito S. (2009) - *Geomorfologia costiera*, in "Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna" - a cura di: Perini L. e Calabrese L., Pendragon, Bologna, cap.7, 87-108.
- Ciavola P., Gatti M., Tessari U., Zamariolo A. e Del Grande C. (2000) - *Caratterizzazione della morfologia di spiaggia lungo lo Scanno di Goro tramite tecniche GPS e rilievi batimetrici* - *Studi Costieri*, vol.2: 175-188.

- 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, vol.1: 41-57.
- Ciavola P. (2009) - *Foce Bevano: l'area naturale protetta e l'intervento di salvaguardia* - Regione Emilia-Romagna, Bologna, cap. 2, 17-18.
- Ciavola P. e Armaroli C. (2010) - *Evoluzione recente del sistema dunale di Lido di Dante-Foce Bevano (Ravenna): fattori naturali ed impatto antropico* - Studi Costieri, vol. 17: 19-37.
- Dean R.G. (1973) - *Heuristic models of sand transport in the surf zone* - Proceedings of the Conference on Engineering Dynamics of the Coastal Zone, Sidney, N.S.W., Australia, pp. 208-214.
- Dolan R. e Davis R.E. (1992) - *An intensity scale for Atlantic coast northeast storms* - Journal of Coastal Research, vol. 8: 352-364.
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters* - Journal of Sedimentary Petrology, vol. 27: 3-26.
- Gambolati G., Giunta G., Putti M., Teatini P., Tomasi L., Betti I., Morelli M., Berlamont J., De Backer, K., Decouttere C., Monbaliu J., Yu C.S., Broeker I., Kristenser E.D, Elfrink B., Dante A. e Gonella M. (1998) - *Coastal evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise, and natural and anthropic land subsidence* - CENAS, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, pp. 1-34.
- Gardelli M., Caleffi S. e Ciavola P. (2007) - *Evoluzione morfodinamica della foce del Torrente Bevano* - Studi Costieri, vol.13: 53-74.
- IDROSER S.p.A. (1996) - *Progetto di Piano per la difesa dal mare e la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia-Romagna*, Regione Emilia-Romagna, Bologna, 365 pp.
- Kroon A. (1994) - *Sediment transport and morphodynamics of the beach and Nearshore zone, near Egmond, The Netherlands* - PhD Thesis, Univ. Utrecht (NL), 275 pp.
- Lamberti A. e Zanuttigh B. (2005) - *An integrated approach to beach management in Lido di Dante, Italy* - Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol.62: 441-451.
- Le Roux J.P. (1996) - *An EXCEL program for computing the dynamic properties of particles in Newtonian fluids* - Computer & Geosciences, vol.23, n.6: 671-675.
- Masina M. e Ciavola P. (2011) - *Analisi dei livelli marini estremi e delle acque alte lungo il litorale ravennate* - Studi Costieri, vol.18:84-98.
- Masselink G e Hegge B. (1995) - *Morphodynamics of meso-macrotidal beaches: examples from central Queensland, Australia* - Marine Geology, vol.129: 1-23.
- Mendoza E.T. e Jimenez J.A. (2004) - *Factors controlling vulnerability to storm impacts along the Catalanian coast* - Proceedings International Conference of Coastal Engineering 2004, Lisbon, pp. 3087-3099.
- Perini L., Calabrese L., Deserti M., Valentini A., Ciavola P. e Armaroli C. (2011) - *Le mareggiate e gli impatti sulla costa in Emilia-Romagna 1946-2010* - I Quaderni di ARPA, ARPA Emilia-Romagna, 143 pp.
- Preti M., De Nigris N., Maurizio M., Monti M., Bonsignore F. e Aguzzi M. (2009) - *Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione* - I Quaderni di ARPA, ARPA Emilia-Romagna, 270 pp.
- Sedрати M, Ciavola P., Reyns J. (2008) - *Swash bar behaviour on a protected microtidal beach: Lido di Dante, Italy* - Atti di: 3rd International short conference/course on Applied Coastal Research, Nuova Editoriale Bios, Cosenza, pp. 153-164.
- Short A.D. (1999) - *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics* - Wiley, Chichester , cap.7, pp.171-203.
- Wright L.D. e Short A.D. (1984) - *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis* - Marine Geology, vol. 56: 93-118.

Ricevuto il 05/09/2011, accettato il 13/03/2012.