

Le dune costiere dell'Emilia-Romagna: strumenti di analisi, cartografia ed evoluzione

Luisa Perini e Lorenzo Calabrese

Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, Regione Emilia-Romagna, Viale della Fiera 8 - 40122 Bologna, Tel: 051 5274212
Fax: 051-5274208, E-mail: lperini@regione.emilia-romagna.it, lcalabrese@regione.emilia-romagna.it

Riassunto

Le dune costiere sono elementi morfologici di estrema importanza per la fascia costiera emiliano-romagnola caratterizzata da vaste aree con quote al di sotto del livello del mare. Oltre ad essere il serbatoio naturale per il ripascimento delle spiagge, esse costituiscono la principale linea di difesa dall'ingressione marina durante gli eventi di mareggiata associati al fenomeno dell'acqua alta. Attualmente le dune sono preservate solo lungo il 28% del litorale regionale, e spesso si presentano in condizione di forte frammentazione e degrado.

Per questi motivi si è ritenuto fosse indispensabile monitorarne lo stato di conservazione e l'evoluzione nel tempo attraverso un dettagliato lavoro di fotointerpretazione di tutti gli elementi morfo-deposizionali della fascia costiera realizzato sulla base degli ortofotopiani relativi agli anni 1943, 1982, 1998 e 2005. Le dune sono state classificate in funzione del loro grado di maturità distinguendo le dune attive, quelle semi-stabilizzate e quelle stabilizzate, in relazione al diverso livello di inerbimento e/o di vegetazione osservabili da foto aerea. La cartografia 2005 è stata collaudata attraverso il rilevamento in campo e con l'uso di dati altimetrici ad alta risoluzione, acquisiti con sistema di telerilevamento LIDAR (Light Detection and Ranging), che si sono dimostrati fondamentali nell'analisi dei rischi costieri, permettendo una chiara individuazione dei varchi e delle quote delle singole porzioni di duna. L'attività di mappatura e classificazione delle dune rientra nei progetti di cartografia e di studio effettuati per la creazione del Sistema Informativo del Mare e della Costa da parte del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Parole chiave: duna, spiaggia, Sistema Informativo del Mare e della Costa, opere di difesa costiera, geodatabase, erosione della costa.

Abstract

Coastal dunes are very important morphological features along the Emilia-Romagna coastal area, characterised by large areas below sea level. These elements form a part of the sand reservoir needed for natural nourishment of beaches and also represent the main natural defence line against sea flooding during storm events associated to surges that frequently reach the coastal zone. Unfortunately only 28% of the coastline are currently protected by dunes, which are highly fragmented and deeply damaged as consequence of human impacts.

Monitoring the status and evolution of the dune system over time was performed in this study using very detailed cartography of morpho-depositional littoral features, in GIS environment, by means of photo-interpretation of orthophoto-mosaics dated from 1943, 1982, 1998, 2005. Dunes were mapped in detail in terms of their maturity,

and 3 classes were defined: active, semi-stabilized and stabilized dunes, corresponding to the many different levels of plant coverage observed in airborne photos. The most recent cartography was also tested in the field and integrated with high-resolution topography obtained through remote sensing technique, the LIDAR (Light Detection And Ranging), which was crucial in the analysis of coastal hazards and allowing clear identification of gaps and elevation of each dune portion. The activity was carried out within the framework of the project for the creation of the Emilia-Romagna Coastal and Marine Information System developed by the Geological, Seismic and Soil Survey of Emilia-Romagna Region.

Keywords: *dune, beach, Marine & Coastal Information System, coastal defences, geodatabase, coastal erosion.*

Introduzione

La duna costiera costituisce uno degli elementi morfologici più significativi per descrivere lo stato di salute dei litorali (Macchia et al., 2005) e per definire il livello di rischio a cui essi sono esposti in occorrenza di eventi di mareggiata (Ciavola et al., 2007, Corbau et al. 2008) o per effetto dell'innalzamento del livello marino (Gambolati et al., 1998, Simeoni e Corbau, 2008).

Lo studio delle dune costiere dell'Emilia-Romagna ha recentemente beneficiato di nuovi strumenti di analisi, offerti dall'acquisizione di dati telerilevati, che sono stati utilizzati per l'elaborazione delle carte geomorfologiche e dell'uso del suolo della fascia costiera e per la costruzione di modelli altimetrici ad alta risoluzione. Tali informazioni hanno consentito di definire la distribuzione, lo stato e l'evoluzione delle dune lungo la costa regionale mentre, per comprendere la loro origine, si è considerato opportuno fare riferimento al quadro conoscitivo esistente. Il contesto geologico, in cui le dune della regione Emilia-Romagna vanno collocate, è descritto dai Fogli CARG (progetto di Cartografia Geologica d'Italia 1:50000). Le carte, le sezioni geologiche e le ricostruzioni paleo-ambientali testimoniano che la variazione del clima ha fortemente influenzato l'assetto della piana costiera e quindi la configurazione delle dune antiche e recenti, come oggi le possiamo osservare.

La storia olocenica di questo territorio, a partire da circa 12000 anni fa, è segnata da una rapida risalita del livello marino come conseguenza dello scioglimento dei ghiacciai wurmiani. Tale fenomeno ebbe l'effetto di innescare un brusco arretramento della linea di riva che migrò da una posizione posta all'altezza di Pescara fino a raggiungere località ubicate a circa trenta chilometri ad ovest rispetto a quella attuale, come testimoniato dai depositi sepolti della pianura romagnola (Veggiani, 1973; Amorosi et al., 2008). All'annegamento della piana alluvionale pleistocenica si accompagnò una riduzione dell'apporto solido dei fiumi, che, solo partire da circa 5500 anni fa, quando il livello del mare si stabilizzò, ricominciarono a trasportare materiale sufficiente a produrre il progressivo riempimento delle zone allagate e l'avanzamento del sistema litorale e della linea di riva verso est, fino a raggiungere l'attuale posizione. Questa evoluzione sedimentaria trasgressivo-regressiva ha creato un cuneo di depositi costieri spesso fino ad una trentina di metri ed esteso per decine di chilometri nell'entroterra del delta padano, sia recente che antico, mentre è limitato ad una fascia ampia circa un chilometro nel settore meridionale più prossimo al margine appenninico. I sedimenti regressivi sono frequentemente affioranti e sono databili, su basi storico-archeologiche, soprattutto a partire dall'Età Romana. Queste informazioni, accompagnate dalla ricostruzione dei rapporti geometrici tra gli antichi lobi deltizi, hanno reso possibile una buona ricostruzione dell'evoluzione della piana costiera alla scala secolare.

Le dune attuali costituiscono solo una piccola percentuale dell'intero sistema costiero olocenico, la loro evoluzione si realizza alla scala annuale e decennale e mostrano un'estensione decisamente inferiore ai grandi complessi dunosi fossili. La necessità di nuovi strumenti di analisi, con un grado di risoluzione superiore a quello offerto da un approccio strettamente geologico, ha portato il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna ad intraprendere il progetto di 'Cartografia geomorfologica della costa', in cui si è realizzata la mappatura su base foto-interpretativa degli elementi morfologici del sistema costiero, tra cui le dune attuali; in particolare, si è deciso di interpretare come "duna" solo quella porzione di cordone litorale nella posizione più avanzata verso mare (duna primaria, avanduna) e che, dall'analisi della cartografia storica e dalle foto aeree, risultasse di 'recente formazione', ovvero riferibile agli ultimi 50-100 anni.

Strumenti e Metodi

La mappatura delle dune costiere rientra nel lavoro di “Cartografia geomorfologica della costa” dell’Emilia-Romagna che è stato avviato nel 2002 con la creazione del “Sistema Informativo del Mare e della Costa”, strumento di elaborazione e di gestione dei dati a supporto delle attività di programmazione e di progettazione degli interventi (Perini et al., 2007). In tale ambito sono stati realizzati numerosi studi e prodotti cartografici di dettaglio finalizzati a migliorare le strategie di difesa della costa della Regione Emilia-Romagna.

La metodologia di analisi e di mappatura è stata messa a punto nell’ambito di una convenzione con l’Università di Ferrara (Ciavola et al., 2003) grazie alla quale è stata attuata una sperimentazione in tre aree campione della costa regionale. La procedura è stata successivamente migliorata grazie alla disponibilità dei nuovi dati altimetrici acquisiti con sistema laserscan LIDAR (Light Detection and Ranging) nel 2004.

Nella prima fase, come approccio metodologico per la classificazione delle dune ci si è riferiti ai lavori presenti in letteratura (Pranzini, 2005; Pranzini e Simeoni, 2005), tra cui l’Atlante delle Dune Costiere Nazionali (Valpreda, 2006; Simeoni et al., 2006).

Come per gli altri elementi morfologici, anche la mappatura delle dune è stata realizzata confrontando varie fonti di dati, acquisiti in periodi diversi, al fine di produrre una dettagliata analisi evolutiva di tale elemento morfologico. I principali strumenti cartografici e i dati utilizzati sono stati:

- la Carta Geologica della Pianura dell’Emilia-Romagna in scala 1: 250 000;
- le carte storiche: 1° impianto IGM del 1893 e la Carta storica regionale 1:50.000, derivata dalla ‘Carta austriaca scala 1:86400’ del 1850 (Foschi et al., 1999);
- le foto aeree ortorettificate relative agli anni 1943-45, 1982, 1998, 2005;
- i dati altimetrici LIDAR 2004;
- immagini e dati rilevati in campo.

La metodologia operativa adottata per la mappatura degli elementi morfologici della costa può essere schematizzata nel modo seguente:

- fotointerpretazione in ambiente GIS e creazione dei poligoni;
- coerenza dell’attribuzione tra i vari periodi analizzati;
- calibrazione con i modelli digitali del terreno ad alta risoluzione.

La mappatura e la classificazione delle dune costiere

La cartografia della duna costiera è stata elaborata attraverso la fotointerpretazione degli ‘Ortofotomosaici della costa’ relativi agli anni 1943-45, 1982, 1998 e 2005, prodotti nell’ambito del Sistema Informativo del Mare e della Costa (Luciani e Perini, 2009). Il criterio di classificazione utilizzato fa riferimento a quello dell’Atlante delle Dune Costiere Nazionali (Simeoni et al., 2006, 2010), adattato al caso delle coste emiliano-romagnole. L’approccio è stato quello di creare i poligoni delle aree che, all’occhio del fotointerpretatore, racchiudessero le zone più elevate rispetto alla quota della spiaggia e di retroduna e che contestualmente risultassero ricoperte dalla tipica vegetazione dunale.

Sulla base della densità e della tipologia della copertura vegetazionale si sono ulteriormente suddivisi i poligoni, attribuendo a ciascuno di essi l’informazione relativa al grado di maturità della duna (Fig. 1), ottenendo così la seguente classificazione:

- duna attiva: è priva di vegetazione o con vegetazione sparsa di tipo erbaceo; è definita tale perché è in continua evoluzione morfo-sedimentaria e in costante scambio litologico con la spiaggia emersa, da intendersi come area sorgente di sedimento;
- duna semi-stabilizzata: presenta una vegetazione di tipo arbustivo abbastanza diffuso, ma intervallata da tratti con vegetazione di tipo erbaceo o privi di vegetazione;
- duna stabilizzata: è caratterizzata da una vegetazione prevalente di tipo arboreo che impedisce o diminuisce i cambiamenti della duna (legati all’azione del vento).

E’ da sottolineare che, per quanto concerne la duna stabilizzata, sono sorti numerosi dubbi sulla posizione del limite interno.

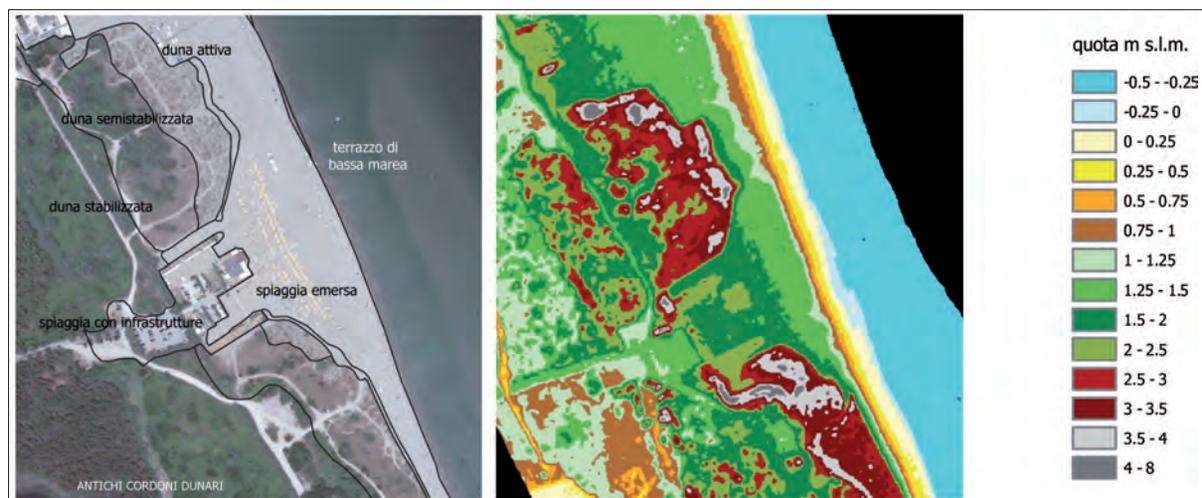


Figura 1 - Esempio di cartografia della duna e della spiaggia emersa; la duna è distinta in attiva, semi-stabilizzata e stabilizzata; con l'utilizzo di un modello digitale del terreno (DTM) è possibile evidenziare le caratteristiche morfologiche del sistema duna/spiaggia: risaltano chiaramente l'andamento della cresta della duna e l'interruzione del rilievo dovuto allo spianamento della duna per opera dell'uomo (da Calabrese e Lorito, 2009).

Frequentemente, infatti, il passaggio all'ambiente di retroduna con fitta vegetazione arborea, tipica di molte pinete regionali costiere, risulta piuttosto sfumato e di difficile interpretazione poiché si sovrappone ad antichi complessi di duna.

Per risolvere queste situazioni sono stati effettuati confronti con tutti i voli aerei disponibili e con la cartografia storica che hanno chiarito molti dubbi soprattutto nelle situazioni in cui le dune risultavano di nuova formazione rispetto all'epoca della cartografia. Sono risultati infine cruciali i rilievi in campo presso i punti di controllo (Fig. 2), che hanno permesso di collaudare i livelli cartografici più recenti (2000 e 2005).



Figura 2 - Duna del litorale emiliano-romagnolo; si notano le porzioni parzialmente vegetate e stabilizzate e le lingue di sabbia di porzioni attive.

L'uso dei dati altimetrici ad alta risoluzione

I poligoni ottenuti dalla fotointerpretazione sono stati incrociati con la griglia altimetrica al fine di verificare l'elevazione degli elementi morfologici e di analizzare, con maggiore chiarezza, i diversi settori che caratterizzano l'intero sistema deposizionale spiaggia-duna definendone anche gli stadi evolutivi (Fig. 3).



Figura 3 - Sezione altimetrica trasversale alla spiaggia di Lido di Volano realizzata sulla base del DTM LIDAR 2004, si possono osservare le diverse porzioni del sistema duna-spiaggia negli ultimi 60 anni.

Uno strumento molto efficace per questo tipo di analisi è rappresentato dal DTM (Digital Terrain Model) ad alta risoluzione (grid con cella 1 m x 1 m) ottenuto con tecnica LIDAR, già utilizzata con successo nell'ambito di studi costieri dei litorali italiani (Bresci et al., 2006; Pranzini, 2007). Nel caso del rilievo LIDAR 2004, effettuato dalla Regione Emilia-Romagna in collaborazione con l'Istituto Cartografico della Catalogna, i valori misurati attraverso il sistema di telerilevamento sono stati verificati con misure dirette in campo che hanno dimostrato un grado di accuratezza altimetrica nettamente superiore a quella nominale che è di circa 1 metro in planimetria e 20 cm in altimetria (Perini, 2005). La disponibilità dei dati LIDAR acquisiti dal 2003 al 2009, da parte di vari Enti, ha consentito di posizionare accuratamente e di confrontare l'evoluzione nel tempo di alcuni elementi caratteristici delle dune costiere quali: il piede della duna, il fronte, la cresta, le depressioni interdunali e i varchi. Tali controlli, effettuati sovrapponendo in GIS i grid dei diversi DTM, hanno permesso di evidenziare dove le dune si sono mantenute più o meno stabili negli ultimi 6 anni e dove si sono registrate variazioni volumetriche. Altra analisi molto importante che si può ottenere con tali dati è quella sullo stato dei varchi che rappresentano le vie preferenziali di ingressione dell'acqua marina durante i fenomeni di mareggiata e/o di acqua alta. I varchi sono per lo più generati dagli spianamenti artificiali e dai numerosissimi camminamenti verso le spiagge antistanti, più raramente dallo sfondamento da parte di mareggiate e dall'azione del vento.

Caratteristiche della duna costiera a scala regionale ed evoluzione recente

I risultati del lavoro di cartografia e di classificazione delle dune costiere dell'Emilia-Romagna offrono un quadro chiaro dell'estensione, dello stato di attività e del grado di conservazione di questi corpi sedimentari. Il confronto tra le cartografie relative ai diversi anni ha permesso inoltre di ricostruire l'evoluzione delle dune negli ultimi 60 anni (si veda Tab. 1 e Fig. 4) e di comprendere la loro dinamica in rapporto con l'intero sistema spiaggia-duna. L'estensione della duna costiera all'epoca del volo R.A.F. 1943-45 era di circa 90 km ed era

Tabella 1 - Lunghezza dei tratti di costa protetti da duna nei tre anni di osservazione 1943, 1982 e 2005.

Provincia	Lunghezza totale tratto costiero	Lunghezza tratto costiero con duna 1943-45	Lunghezza tratto costiero con duna 1982	Lunghezza tratto costiero con duna 2005
Ferrara	Circa 30 km esclusa laguna	26.6	23.1	17.8
Ravenna	47.4 km	42.2	26.2	18.3
Forlì	9.4 km	3.8	1.12	0.18
Rimini	35.0 km	18.2	0.4	0.4

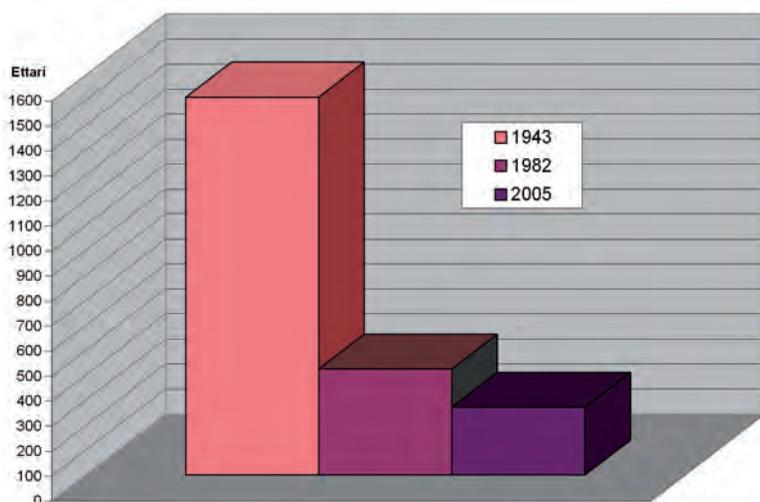


Figura 4 - Variazione della superficie della duna costiera dal 1943 al 2005 (da Lorito et al., 2009).

ampiamente presente anche nel territorio della provincia di Rimini, interessando oltre il 50% di questo litorale. Le stesse foto aeree mettono chiaramente in evidenza che, all'epoca del volo, era già avviato un intenso sfruttamento delle dune utilizzate come cave di sabbia e, in molte zone, furono spianate per far spazio alle nascenti strutture turistiche e balneari. I decenni successivi, e in particolare fino agli anni '80, sono stati caratterizzati da una progressiva riduzione della duna che, in parte, è stata spianata anche al fine di aumentare la superficie utile di spiaggia, come si evince dai diagrammi della cartografia dell'uso del suolo tratti dal lavoro 'Uso del suolo della Costa' (Lorito et al., 2009). La combinazione dell'evoluzione naturale e degli interventi antropici hanno

inesorabilmente ridotto l'estensione delle dune lungo le coste dell'Emilia-Romagna al punto tale che all'anno 2005 solo il 28% del litorale regionale, equivalente a circa 37 km, presenta porzioni di duna preservata. Esse si concentrano quasi esclusivamente nelle province di Ravenna e Ferrara, mentre lungo la costa delle province di Rimini e Forlì-Cesena, la duna è rilevabile solo in piccoli tratti (Fig. 5). Le dune attuali, mostrano chiare caratteristiche di dinamicità naturale anche se risentono fortemente della pressione antropica che limita la loro crescita areale e altimetrica.

Solo nei tratti di costa privi di centri abitati si possono riscontrare apparati dunosi con lunghezza superiore a 1 km. L'area in cui si osserva la massima continuità è quella compresa tra Foce Savio e Foce Fiumi Uniti, lungo la costa ravennate, dove le dune, pur intaccate da frequenti camminamenti, si estendono con continuità per circa 5 km.

Le quote altimetriche dei corpi più recenti sono generalmente comprese tra 1,5 e 3 metri e solo localmente, lungo il litorale ferrarese, si osservano porzioni di duna con quote che raggiungono i 5-6 m s.l.m.



Figura 5 - Distribuzione della duna nelle quattro province costiere.

Le osservazioni condotte in campo lungo sezioni di duna messe a nudo dalle mareggiate evidenziano la presenza di materiale di origine antropica, come per esempio bottiglie di plastica, anche in porzioni di duna stabilizzata. Ciò indica un ciclo di formazione, evoluzione ed erosione molto rapido, realizzatosi nell'ultimo cinquantennio. Con riferimento alla 'Carta Geomorfologica Costiera 2005' (Calabrese e Lorito, 2009), la distribuzione in classi di attività dei 250 ettari di duna mappati risulta la seguente:

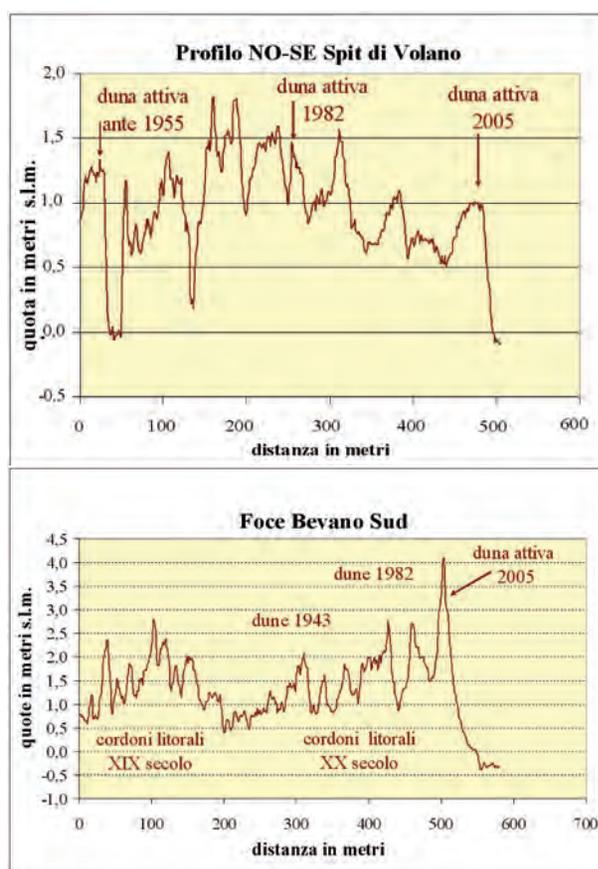
- 9% duna attiva;
- 32% duna semi-stabilizzata;
- 59% duna stabilizzata.

L'assetto e l'estensione delle dune attuali nei diversi tratti della costa regionale è ben osservabile, oltre che su base planimetrica, anche in sezione lungo profili topografici (Fig. 6a e b). Questi ultimi forniscono informazioni chiare circa la posizione reciproca dei complessi di duna riferibili alle diverse età e consente di determinare anche l'ampiezza e le quote dei singoli corpi sedimentari.

Con riferimento alla costa Ferrarese e Ravennate, si può osservare che nelle aree dove il retroduna è urbanizzato ed impostato sui cordoni più antichi, la duna recente è estremamente ridotta in ampiezza da pochi metri a poche decine di metri. In altre situazioni, più conservative, tra la duna attuale e l'urbano è interposta invece una pineta, artificialmente piantata sui vecchi depositi di cordone litorale spianati.

Nelle aree naturali, come la freccia litorale di Volano, l'ampio tratto costiero a nord e a sud di Foce Reno e l'area di Foce Bevano, le zone di retroduna sono caratterizzate da zone umide e ampie pinete, o da aree agricole molto sviluppate. In questi settori sono generalmente ben riconoscibili le diverse tappe di sviluppo delle dune e l'estensione delle porzioni riferibili al dopoguerra è generalmente di alcune centinaia di metri.

Il confronto tra l'evoluzione della duna recente con quello della spiaggia, effettuato sulla base della cartografia GIS, dimostra la naturale coincidenza tra la tendenza evolutiva della linea di riva e quella del fronte dunale.



Lungo i tratti in forte arretramento, come le foci di F. Reno e Fiumi Uniti, si è manifestato lo smantellamento completo di corpi di duna anche di recente formazione, come quelli riportati sulla cartografia geomorfologica relativa al volo 1943-45. Tale tendenza si osserva in tutti i tratti critici, come il litorale di Lido delle Nazioni, a sud di Foce Lamone o a sud di Lido di Dante dove, parallelamente all'arretramento della linea di riva, si registra una forte erosione del fronte della duna più recente.

Analogamente, i pochi tratti di litorale regionale dove ad una ampia spiaggia in accrescimento si abbina anche la presenza di duna attiva, come per esempio a Marina Romea o Marina di Ravenna nord, si osserva la tendenza all'accrescimento verso mare della duna con uno spostamento del piede anche di 4-5 m/a. In queste zone durante la primavera la vegetazione dunale tende ad attecchire in porzioni di spiaggia antistanti il piede della duna, favorendo così l'intrappolamento della sabbia trasportata dal vento e gettando le basi per il futuro accrescimento della duna stessa.

Figura 6 - Sezioni topografiche realizzate sulla base dei dati LIDAR 2004 in corrispondenza dello 'spit' di Volano e a sud di Foce Bevano.

L'evoluzione e le caratteristiche della duna a scala locale

Quando dalla scala regionale si passa a quella locale, le caratteristiche delle dune lungo il litorale emiliano-romagnolo diventano molto diversificate ed articolate. Il sistema regionale duna-spiaggia mostra una grande variabilità geomorfologica che riflette la complessa tipologia degli ambienti morfo-deposizionali costieri e la loro diversa storia evolutiva. E' possibile quindi riconoscere: grandi complessi di duna antica fittamente vegetati che, per erosione, si trovano direttamente fronte mare, come nel tratto settentrionale della costa ferrarese (Fig. 7a); la compresenza di duna e *beach-ridge* presso le principali foci fluviali regionali, quali foce Reno (Fig. 7b) e foce F. Uniti; i complessi progradanti di dune, oggi stabilizzate dalla vegetazione del XIX-XX secolo, come quelli presso Lido degli Estensi, Marina di Ravenna e foce Bevano (Fig. 7c); le dune associate alle frecce litorali di Volano (Fig. 7d) e di Goro (Scanno di Goro).

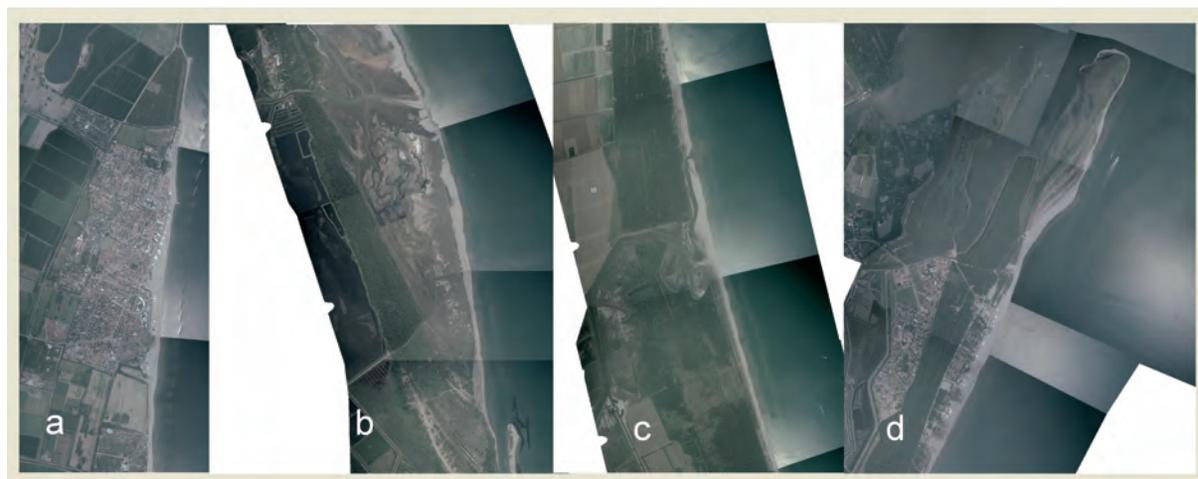


Figura 7 - a)-cordoni dunosi antichi presso Lido delle Nazioni; b)- cordoni dunosi antichi, dune recenti, beach ridge e zone umide presso foce Reno nord; c)- cordoni dunosi antichi e recenti presso foce Bevano; d)- cordoni dunosi presso la freccia di Volano.

Negli ultimi 50 anni, la complessa evoluzione della duna è stata fortemente condizionata oltre che dalla varietà del paesaggio naturale anche dall'azione dell'uomo che ha modificato artificialmente e profondamente la sua dinamica e la sua forma. Si registrano variazioni profonde dell'uso del suolo e si osservano camminamenti, varchi, scavi e spianamenti, sia parziali che totali, con la scomparsa definitiva del rilievo dunoso.

Un esempio molto efficace di questa complessa evoluzione della duna, è stato recentemente studiato nel tratto a nord di Lido delle Nazioni, dove, la forte erosione del fronte dunale, ha messo a nudo una sezione stratigrafica molto rappresentativa (Fig. 8).

In questo tratto, i depositi attuali di spiaggia e di duna sono organizzati verticalmente in una sequenza di facies caratterizzata, a partire dal basso, da sedimenti limoso-argillosi lagunari, sovrastati da sabbie di spiaggia a loro volta ricoperte da limi di palude e da depositi di mareggiata e sabbie di duna. Sovente quest'ultimo intervallo presenta una struttura caotica e screziature probabilmente dovute ad aratura e a processi di pedogenesi incipienti. L'intervallo più alto è costituito da sabbie sciolte di duna con intercalati rifiuti plastici di diverso tipo, appoggiati su una superficie irregolare erosiva. Questo record sedimentario, e il confronto con le carte topografiche storiche degli ultimi 200 anni, le foto aeree degli ultimi 60 anni (Fig. 9) e la datazione dei principali complessi antichi di spiaggia/duna, testimoniano una complessa evoluzione del sistema costiero, con fasi di avanzamento ed arretramento, che hanno profondamente influenzato la formazione e la dinamica della duna.

Una possibile interpretazione di questa successione è che i depositi lagunari siano associati alle fasi di attività e di progradazione del delta del Po di Volano del XV-XVI secolo, mentre, i depositi di spiaggia in cui si riconoscono facies appartenenti al *beach ridge*, ai canali e ai depositi di mareggiata, rappresentino una fase di abbandono del delta e la conseguente migrazione verso terra del cordone litorale. I depositi limosi di palude e quelli sabbiosi

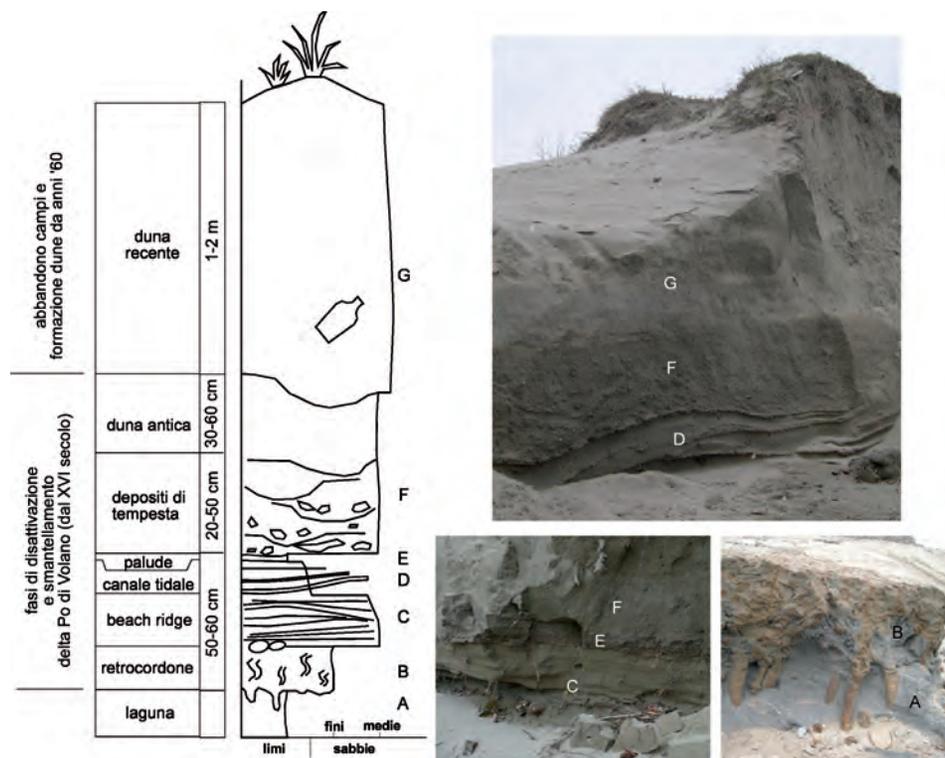


Figura 8 - Sequenza ricostruita delle litofacies affioranti a nord di Lido delle Nazioni e loro interpretazione ambientale; i sedimenti sabbiosi della spiaggia attuale appoggiano direttamente sui depositi lagunari. Per maggiori dettagli si veda il testo.



Figura 9 - a)- carta topografica del 1814: il punto di affioramento osservato (stella rossa) cade su un cordone litorale che segue le geometrie dell'antico delta del Po di Volano; b) Volo GAI (1953-1954): lo stesso punto è ubicato sopra aree coltivate; c)- Ortofotoaia 2008: attualmente il punto di affioramento si trova sopra rilevati dunosi paralleli alla costa stabilizzati dalla vegetazione.

di duna pedogenizzata rappresenterebbero il rallentamento e la stasi del severo smantellamento della cuspidè deltizia; l'alterazione di questo intervallo sarebbe legata invece alla diffusione di campi agricoli, presenti dalla fine del XIX secolo alla prima metà del XX secolo. L'abbandono dei campi e la formazione di una duna recente

sarebbero avvenuti infine a partire dalla metà del XX secolo, come testimonia il più alto intervallo stratigrafico. Come esempio della complessità delle forme delle dune, che oggi si rilevano a scala locale lungo il litorale, vengono illustrati di seguito tre casi che mostrano la morfologia dettagliata di tratti costieri di circa 400-500 metri ottenute tramite rilievo LIDAR (vedi sopra) in cui è possibile apprezzare la profonda diversità della configurazione della duna e della spiaggia.

Il primo caso (Fig. 10) ritrae l'andamento del terreno nel settore a sud di foce Bevano dove è osservabile una prima duna continua ed elevata (superiore ai 4 metri) immediatamente a tergo di una spiaggia emersa molto sottile. Nel retro della prima duna si sviluppa un complesso di dune più antico in cui le quote sono generalmente più basse, lo sviluppo è discontinuo e sono presenti ampi settori di interduna con quote prossime al livello del mare. Il tratto fa parte di un settore di costa naturale e progredante con continuità dal XIX secolo.

Il secondo caso (Fig. 11) interessa un tratto costiero presso Marina Romea dove si può osservare una configurazione simile alla precedente ma con significative differenze: la spiaggia emersa è ampia e la prima duna è spesso

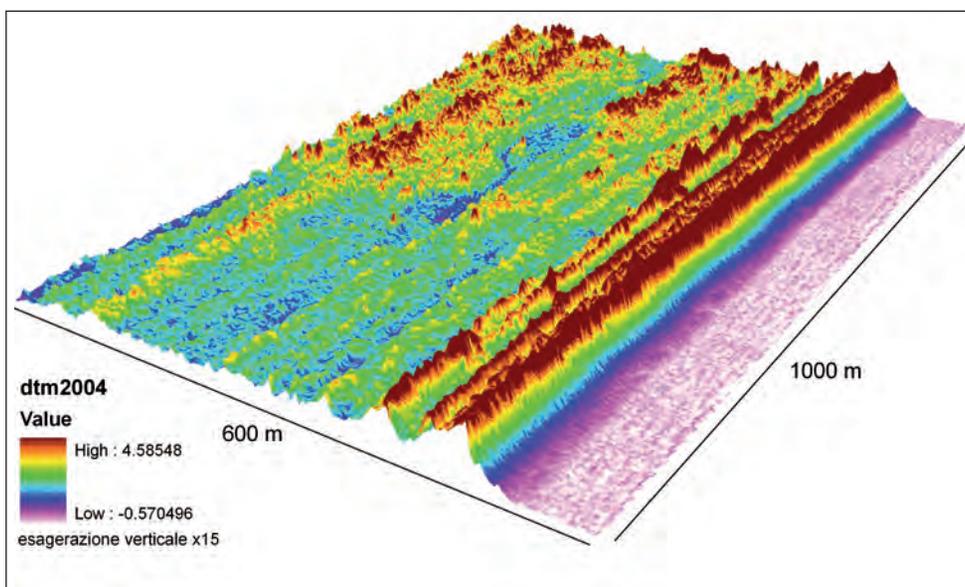


Figura 10 - DTM da LIDAR 2004 che evidenzia la duna presso Foce Bevano sud.

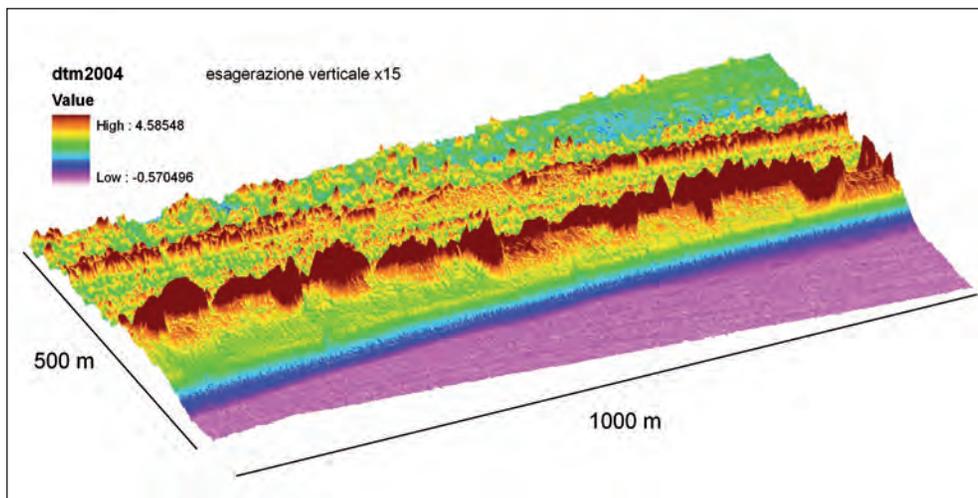


Figura 11 - DTM da LIDAR 2004 che evidenzia la duna presso Marina Romea.

interrotta da profondi varchi che ne compromettono la continuità. Questo tratto di costa, naturalmente in crescita, presenta un medio impatto antropico.

Il terzo caso (Fig. 12) illustra la situazione presso Punta Marina dove la configurazione è molto differente rispetto alle precedenti: il sistema è fortemente antropizzato con locali dune ben sviluppate ed estesi spianamenti occupati da strutture turistiche, camminamenti e varchi; l'ampiezza della spiaggia è variabile. Questo tratto ricade in un settore costiero in naturale arretramento, con diffusi sistemi di opere di difesa costiera.

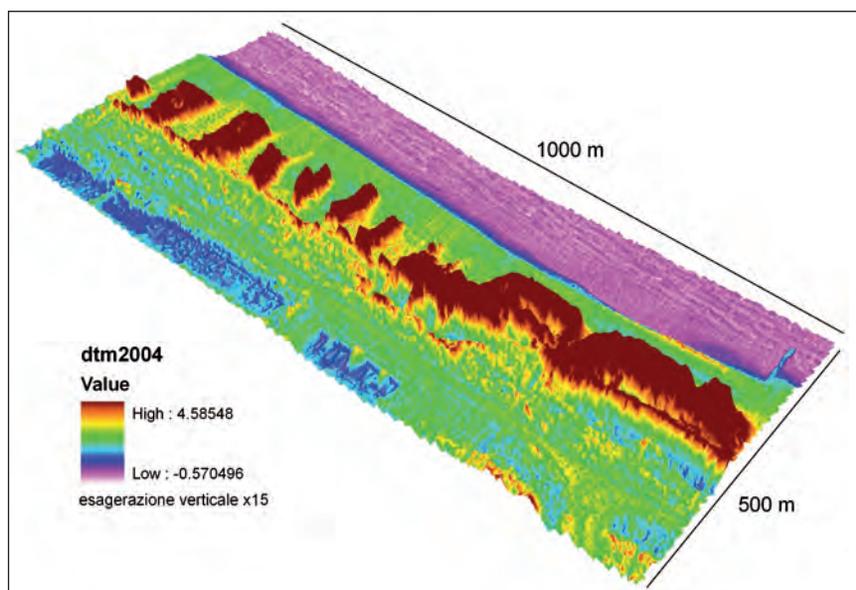


Figura 12 - DTM da LIDAR 2004 che evidenzia la duna presso Punta Marina.

Mettere in evidenza queste differenze e caratterizzare dettagliatamente il sistema duna-spiaggia dal punto di vista altimetrico e morfologico è indispensabile ai fini della progettazione degli interventi e per affrontare in modo adeguato l'analisi dei rischi costieri relativamente ai fenomeni di erosione dei litorali e di ingressione marina. In particolare, la visione tridimensionale dei corpi dunali offerta dai DTM ottenuti con sistema LIDAR permette di valutare i volumi dei corpi sedimentari, di caratterizzare i settori più critici e di identificare le caratteristiche delle principali discontinuità. La possibilità di confrontare due o più modelli morfologici di dettaglio della duna consente inoltre di quantificare le perdite e i guadagni in termini di volumi, di localizzare e caratterizzare gli aspetti morfologici di queste variazioni e di interpretarne le cause. In Figura 13 è rappresentato il risultato dell'analisi sulla dinamica della duna presente a sud di Lido di Dante, effettuata combinando in GIS le morfologie ricavate con il rilievo LIDAR del 2004 e quelle del 2009. Le aree dove si sono verificati dei cambiamenti sono rappresentate nei toni del rosso, per esprimere la perdita di sedimento, e nei toni di blu, per evidenziare il guadagno. In questo caso, che si riferisce ad un tratto di costa naturale, sono chiaramente intuibili l'effetto erosivo da parte del mare che ha causato perdita di volume del fronte dunoso e processi di *overwashing* e i fenomeni di trasporto eolico che hanno trasferito verso terra parte del cumulo sabbioso osservabile a tergo della duna. Nel margine superiore si osserva l'accumulo corrispondente agli interventi di ripascimento eseguiti a Lido di Dante.

Nell'esempio di Figura 14, che ritrae un tratto costiero presso Punta Marina, si osserva una diversa conformazione della spiaggia e della duna tra i dati LIDAR del 2009 (c) e quelli del del 2004 (b) (per maggior chiarezza, in (a) è stata riportata la foto aerea del 2005). Si può osservare un generale aumento di quota dei rilievi attribuibile per lo più ai naturali processi di cattura della sabbia da parte delle dune; un'altra parte delle modificazioni avvenute sono invece da ricondurre all'opera dell'uomo. In questo caso, si distinguono rilievi particolarmente elevati e circoscritti attribuibili ad accumuli e depositi di sabbia e la presenza di argini artificiali, costruiti durante l'inverno 2008-2009 per la difesa dall'acqua alta, che comportano una massiccia movimentazione delle sabbie.

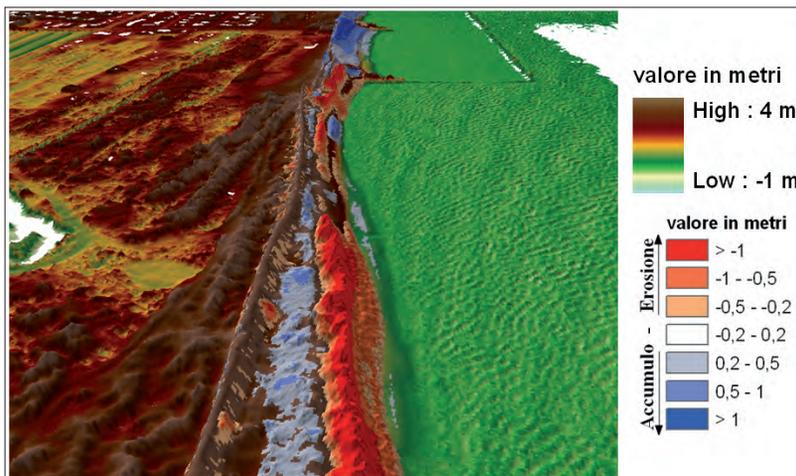


Figura 13 - DTM da LIDAR 2004 e aree dove vi è stata perdita e guadagno dal confronto con DTM da LIDAR 2009.

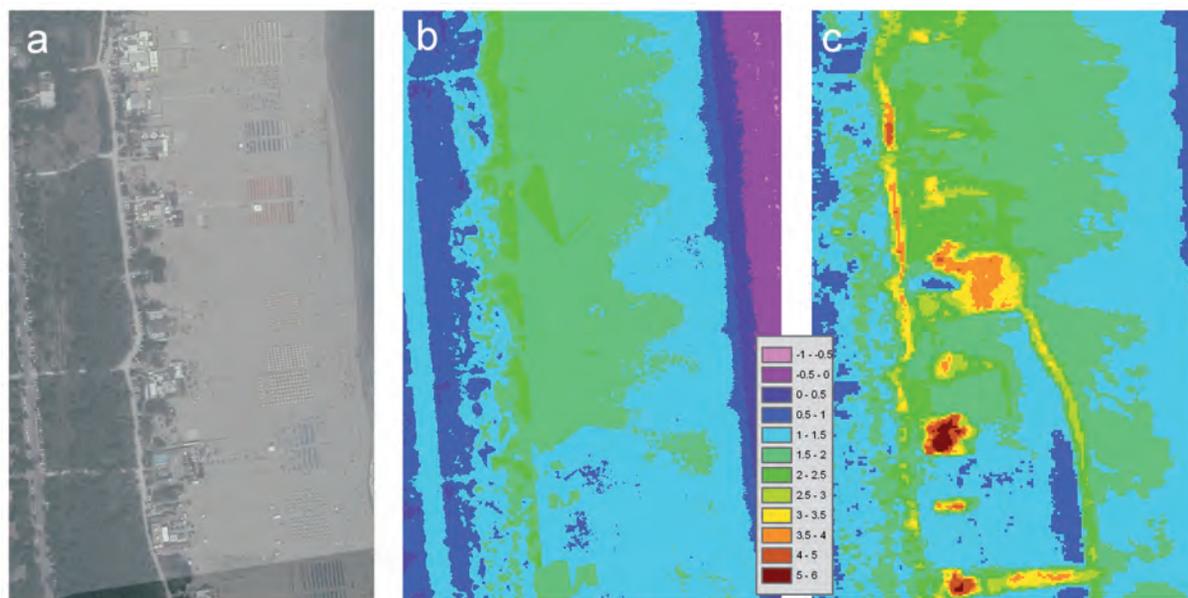


Figura 14 - a)- foto aerea 2005 di un tratto del litorale di Punta Marina; b) DTM da LIDAR 2004; c)- DTM da LIDAR2009.

Conclusioni

Lo studio delle dune costiere dell'Emilia-Romagna, realizzato nell'ambito dello sviluppo di un Sistema Informativo del Mare e della Costa, si è basato sull'uso di strumenti GIS e sulla creazione di cartografie tematiche che hanno consentito di effettuare uno studio a scala regionale e locale molto accurato. La metodologia di analisi fondamentale è stata la foto-interpretazione delle immagini aeree georeferenziate ed ortorettificate riferite agli anni 1943-45, 1982, 1998 e 2005, sulla base delle quali sono state prodotte altrettante cartografie geomorfologiche della fascia costiera che contengono la classificazione delle dune in base al grado di copertura vegetale e al relativo stato di attività. Questi strumenti cartografici, combinati con l'analisi morfologica dei modelli digitali del terreno ad alta risoluzione, recentemente acquisiti, e con attente osservazioni in campo, hanno fornito un quadro chiaro e completo dell'evoluzione delle dune negli ultimi 60 anni, dei loro rapporti stratigrafici con gli altri depositi costieri, delle loro caratteristiche geometriche e dello stato di conservazione sia a scala regionale che a scala locale.

I risultati dell'analisi evidenziano che le dune costiere sono attualmente presenti quasi esclusivamente nelle province di Ravenna e Ferrara, per una lunghezza pari al 28% del fronte mare regionale, poiché nelle restanti aree sono state completamente spianate o urbanizzate. Le dune attuali, presentano porzioni molto ridotte di duna attiva, ovvero di quella parte del sistema in cui avviene il maggiore interscambio di sedimento con la spiaggia, quantificato solo nel 9% della superficie totale.

Le dune costiere si sono continuamente ridotte a partire dal dopoguerra ad oggi sia in corrispondenza dei tratti dove è avvenuto un intenso sfruttamento del litorale ed un aumento sensibile delle infrastrutture turistiche, sia in corrispondenza dei tratti in cui si è manifestata una forte tendenza all'arretramento del sistema costiero. Quest'ultima situazione si riscontra principalmente in corrispondenza delle cuspidi deltizie, dove è l'erosione esercitata dal mare il principale fattore di distruzione della duna. In entrambi i casi, tuttavia, l'analisi della dinamica dell'uso del suolo effettuata sui settori di retroduna mostra che l'occupazione antropica ha sottratto ovunque lo spazio necessario alla migrazione della duna verso terra.

La crescita di tali morfologie, quindi, avviene prevalentemente verso mare, in quei rari settori del litorale regionale dove si osserva un importante avanzamento della linea di riva e della spiaggia. Questo fenomeno indica che, almeno nelle aree dove le spiagge non sono in deficit sedimentario, adeguate politiche di conservazione delle dune potrebbero favorire la loro conservazione ed il loro sviluppo.

A scala locale si è rivelata fondamentale l'analisi dei modelli morfologici ad altissima risoluzione per evidenziare la forma della duna nei dettagli e per comprendere la dinamica recente e i processi geomorfologici dominanti. Lo studio della duna a scala locale ha beneficiato anche di rilevamenti stratigrafico-sedimentologici di campagna che hanno permesso di ricostruire dinamiche morfo-sedimentarie locali assai complesse, alla scala delle decine e centinaia di anni, difficilmente interpretabili attraverso il solo telerilevamento.

Bibliografia

- Amorosi A., Dinelli E., Rossi V., Vaiani S.C. e Sacchetto M. (2008) - *Late Quaternary palaeoenvironmental evolution of the Adriatic coastal plain and the onset of Po River Delta*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 268: 80-90.
- Bresci E., Carli S., Pranzini E. e Rossi L. (2006) - *Studio geomorfologico delle dune costiere di Marina di Cecina (Toscana) con rilievi Lidar da aereo*. Studi Costieri, 11: 121- 132.
- Calabrese L. e Lorito S. (2009) - *Geomorfologia costiera*. In: Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna. A cura di: L. Perini e L. Calabrese, Pendragon Editore. Pp. 87-107.
- Carta Geologica di Pianura dell'Emilia-Romagna in scala 1:250.000 (1999) - Regione Emilia-Romagna.
- 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), pp. 2363-2374.
- Ciavola P., Armaroli C., Chiggiato J., Valentini A., Deserti M., Perini L. e Luciani P. (2007) - *Impact of storms along the coastline of Emilia-Romagna: the morphological signature on the Ravenna coastline (Italy)*. Journal of Coastal Research, 50: 540-544.
- Corbau C., Simeoni U., Tessari U., Martinelli L., Brunelli V. e Utizi K. (2008) - *Approcci metodologici per la valutazione della propensione alla sommersione della costa ferrarese e ravennate*. Atti del Convegno "Coste: Prevenire, Programmare, Pianificare", Maratea, 15-17 Maggio 2008, pp. 45-54.
- Foschi M., Gavaruzzi R., Orlandi F., Pezzoli S. e Venturi S. (1999) - *Immagini raster ad alta qualità per la realizzazione digitale della Carta storica regionale 1:50.000 in Emilia-Romagna*. In Atti 3ª Conferenza Nazionale ASITA 9 - 12 novembre 1999, Napoli.
- 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 Anthropogenic Land Subsidence*. CENAS, Kluwer Academic (ed.), Dordrecht, The Netherlands: 1-34.

- Lorito S., Calabrese L., Perini L. e Cibin U. (2009) - *Uso del suolo della Costa*. In: Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna. A cura di: L. Perini e L. Calabrese, Pendragon Editore. Pp. 109-118.
- Luciani P. e Perini L. (2009) - *Ortofotomosaici della Costa*. In: Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna. A cura di: L. Perini e L. Calabrese, Pendragon Editore. Pp. 19-28.
- Macchia U., Pranzini E. e Tomei P. (2005) - *La duna costiera in Italia. La natura, il paesaggio*. Felici Ed., Pp. 200.
- Perini L. (2005) - *Rilievo della fascia costiera emiliano-romagnola con sistema LIDAR aerotrasportato*. Relazione di attività del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli: http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito_cartografia/web_gis_costa
- Perini L., Calabrese L., Cibin U., Lorito S. e Luciani P. (2007) - *Il Sistema Informativo della Costa e i prodotti cartografici di supporto agli studi e alle strategie di difesa*. In: Ambiente e Territorio, 127. Terzo Forum Nazionale. Pianificazione e tutela del territorio costiero: questioni, metodi, esperienze a confronto. A cura di Erminio M. Ferrucci, Maggioli Editore, pp. 71-88.
- Pranzini E. (2004) - *La forma delle coste. Geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali*. Zanichelli Ed., Bologna, pp. 2445.
- Pranzini E. (2007) - *Airborne LIDAR survey applied to the analysis of the historical evolution of the Arno River delta (Italy)*. Journal of Coastal Research, SI 50: 400 - 409.
- Pranzini E. e Simeoni U. (2005) - *Morfologia delle dune costiere*. In: Macchia U., Pranzini E. e Tomei P. "La duna costiera in Italia. La natura, il paesaggio." Felici Ed., Pisa, pp. 200.
- Simeoni U., Valpreda E. e Corbau C. (2010) - *A National database on coastal dunes: Emilia-Romagna and Southern Veneto littorals*. Coastal System e Continental Margin, 13, 1: 87-96.
- Simeoni U. e Corbau C. (2008) - *Coastal vulnerability related to sea-level rise*. Geomorphology, 107: 64-71.
- Simeoni U., Valpreda E., Schiavi C. e Corbau C. (2006) - *Le dune costiere dell'Emilia-Romagna*. Studi Costieri, 11, 121- 132.
- Valpreda E. (2006) - *La banca dati geografica delle dune costiere in Italia: uno strumento per valutare l'interazione tra queste morfologie costiere, l'evoluzione di litorali e il loro utilizzo*. Studi Costieri, 1: 121-132.
- Veggiani A. (1973) - *Le trasformazioni dell'ambiente naturale del Ravennate negli ultimi millenni*. Studi Romagnoli, 24: 3-26.

Ricevuto il 14/04/2010, accettato il 15/09/2010.