

# Studi costieri

Dinamica e difesa dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

N. 11  
2006



# Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Collana diretta da:

**Enzo Pranzini**

Dipartimento di Scienze della Terra  
Borgo Albizi 28 - 50122 Firenze  
Tel. 055 2479241 - Fax 055 2001618  
E-mail enzo.pranzini@unifi.it

Redazione: **Serena Ferri**

E-mail: serena.ferri@unifi.it

## Comitato scientifico

Segreteria: **Pierluigi Aminti**

Dipartimento di Ingegneria civile  
Via S. Marta 3 - 50139 Firenze  
Tel. 055 4796224 - Fax 055 495333  
E-mail aminti@dicea.unifi.it

Carlo Bartolini - Firenze  
Edoardo Benassai - Napoli  
Antonio Brambati - Trieste  
Leandro D'Alessandro - Chieti  
Giuliano Fierro - Genova  
Leopoldo Franco - Roma  
Giovanni Battista La Monica - Roma  
Alberto Lamberti - Bologna  
Gianfranco Liberatore - Udine  
Elvidio Lupia Palmieri - Roma

Giuseppe Matteotti - Padova  
Alberto Noli - Roma  
Giovanni Palmentola - Bari  
Arturo Ragone - Napoli  
Giulio Scarsi - Genova  
Umberto Simeoni - Ferrara  
Sandro Stura - Genova  
Ugo Tomasicchio - Bari  
Adalberto Vallega - Genova  
Marcello Zunica - Padova

Stampato presso  
**Nuova Grafica Fiorentina**  
Via Traversari, 76  
50126 Firenze

# Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Numero 11

## Indice

<b>La banca dati geografica delle dune costiere in Italia: uno strumento per valutare l'interazione tra queste morfologie costiere, l'evoluzione di litorali ed il loro utilizzo</b> Edi Valpreda	pag.	3-16
<b>Studio geomorfologico delle dune costiere di Marina di Cecina (Toscana) con rilievi Lidar da aereo</b> Deborah Bresci, Sara Carli, Enzo Pranzini e Lorenzo Rossi	pag.	17-30
<b>Le dune costiere oloceniche prossimali lungo il litorale del Lazio</b> Valentina Campo e Giovanni Battista La Monica	pag.	31-42
<b>Apporto sedimentario dalla spiaggia alla duna nella Tenuta Presidenziale di Castelporziano e ai Cancelli (Lazio centro-meridionale)</b> Piero Bellotti, Michele Di Filippo, Silvio Evangelista, Giovanni Battista La Monica, Valerio Minorenti	pag.	43-60
<b>I depositi eolici recenti dell'area di Gonnese (Sulcis, Sardegna sud-occidentale). Implicazioni geologiche e geomorfologiche</b> Marco Biaggioli, Sergio Ginesu, Francesco Secchi e Stefania Sias	pag.	61-70
<b>L'evoluzione dei campi dunari di Platamona-Marritza (Sardegna settentrionale): aspetti morfo-sedimentologici e vegetazionali dell'area di Marina di Sorso</b> Ileana Balduzzi, Nicola Corradi, Marco Ferrari, Luca Maria Mariotti e Ilda Vagge	pag.	71-92
<b>Prime osservazioni sugli aspetti morfosedimentologici e vegetazionali dei campi di dune costiere tra Punta Secca e Punta d'Aliga (Sicilia sud-orientale)</b> Concetto Amore, Eugenio Giuffrida, Elena Amore, Marcella Ruta e Angiola Zanini	pag.	93-102
<b>Dune recenti lungo la costa pugliese</b> Giuseppe Cacciapaglia, Vincenzo De Santis e Giovanni Palmentola	pag.	103-120
<b>Le dune costiere dell'Emilia-Romagna</b> Umberto Simeoni, Edi Valpreda, Cecilia Schiavi e Corinne Corbau	pag.	121-132
<b>Risposta di una spiaggia all'applicazione di un drenaggio artificiale: il BMS di Alassio</b> Dan Bowman, Deborah Bresci, Chiara Danese, Serena Ferri, Enzo Pranzini e Lorenzo Rossi	pag.	133-144
<b>Ortorettifica di immagini satellitari ad alta risoluzione finalizzata al monitoraggio costiero a scala regionale</b> Donatella Dominici, Gian Mario Beltrami e Paolo De Girolamo	pag.	145-156
<b>Repertorio bibliografico delle pubblicazioni di dinamica dei litorali relative alle coste marchigiane 1982 - 2005</b>	pag.	157-160
<b>Tesi</b>	pag.	161-163
<b>Norme per gli Autori</b>	pag.	165-166



Gruppo Nazionale per la  
Ricerca sull'Ambiente Costiero

ISSN 1129-8588

## La banca dati geografica delle dune costiere in Italia: uno strumento per valutare l'interazione tra queste morfologie costiere, l'evoluzione di litorali ed il loro utilizzo

Edi Valpreda

ENEA Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e per l'Ambiente  
Via Martiri di Monte Sole 4 - 40129 Bologna tel. +39-051-6098052 E-mail: valpreda@bologna.enea.it

### Riassunto

Le dune costiere rappresentano un elemento morfologico rilevante nelle politiche di gestione del rischio costiero non tradizionali. Nell'ambito del progetto "I depositi eolici delle coste italiane e il flusso di sedimenti spiaggia-duna" è stata realizzata una base di dati geografici vettoriale dedicata a queste forme costiere. La banca dati progettata e realizzata ha, come soggetto, la presenza e lo stato di vegetazione e di conservazione delle dune costiere in Italia in connessione con la tendenza evolutiva dei litorali, la presenza di opere di difesa e l'utilizzo degli arenili a fini di balneazione. La banca dati realizzata propone una classificazione complessa ed aggiornata, a scala nazionale, delle morfologie dunali costiere integrate con informazioni relative all'ambito costiero significative per la valutazione delle condizioni di rischio di erosione ed alluvionamento delle aree litorali italiane. A seguito di un accordo con il Ministero dell'Ambiente e del Territorio, la banca dati è stata realizzata utilizzando come base comune di riferimento i prodotti cartografici alla scala 1:10.000 contenuti nel Portale Cartografico Nazionale ([www.atlanteitaliano.it](http://www.atlanteitaliano.it)). Essa, pertanto, è del tutto rispondente alle condizioni indicate dall'Unione Europea riguardo a completezza nazionale dell'informazione ed omogeneità di dettaglio e di sistema geografico di riferimento in quanto applica il sistema di proiezione Universale Trasversale di Mercatore e Datum geocentrico WGS4. Le tipologie delle informazioni nella banca dati creata sono molte: alcune descrivono delle caratteristiche proprie delle dune ed altre si riferiscono invece all'ambito litorale limitrofo a queste, oppure a parametri significativi per supportare delle valutazioni di evoluzione del litorale e di rischio di erosione.

**Parole chiave:** banche dati geografiche, metainformazione, dune costiere, erosione costiera.

### Abstract

*Geo Databases are very powerful for local and national planning and monitoring programmes. In Italy geo-knowledge availability, referred to environmental or geological themes, is not so widespread as in other European Countries. The MIUR project on littoral and coastal dune interaction (within which the coastal dune database was done), created a national framework on the presence and status of coastal dunes referred to littoral evolution and uses.*

*In this project, concerning littoral dunes in the whole Country, 14 Universities worked together organising 7 Operative Units. Inside this working group a sole common database structure was created to guarantee the spatial and conceptual congruence. From common discussions and suggestions a common empty structure was built inside ARCGIS8.2 environment. Geodata structure was planned in manner to allow each Operative Units to implement, separately, a piece of database that could be integrated to the whole database in the end of the project. The final geodataset shows a complex structure in which separate feature data sets maintain data from every operative Unit.*

*Aiming not only to perform a description of coastal dunes, but mainly to create a tool to allow comparison between presence and status of coastal dunes, and littoral evolution and uses, the database structure was planned to integrate both dunes description, as coastal environments and trend information. Dunes were classified according to their activity, vegetation, altitudes, presence of pedestrian paths and crossings, distance from current coastline, building and human settings. The geodatabase contains also linear a-dimensional elements allowing both beach classification based on presence of seasonal activities, as presence of seawalls or beach nourishments. This information refers only to beach tracts that face on*

*dunes, to consider potential interaction among human exploitations or interventions and coastal dune status and evolution. The vector geodatabase is based on land units fond of dune outfit; all data on dunes and facing beaches are linked to these forms; information on dune altitudes is linked to a single point feature. Beach uses, presence of seasonal structures, wind stations, presence of sandy beach defences are linked to separate features (drawn as lines or points placed on the beaches).*

*Data were referred to a common cartography at 1:10.000 nominal scale; made available trough an Institutional agreement between Italian National Ministry of Environment and MIUR project coordinator. In this way each Project Operative Units was able to work, connecting ArcGIS software, via web, to Italian Geo-Portal (administrated by Italian National Ministry of Environment). This experience is, until now, the only one done within a National Research Programme, able to involve so many different Universities to work together with a shared GI-data framework on these strategic and frails coastal environments.*

*The geodatabase is completed by metadata presence, created for each geodatabase level, accordingly to suggestions coming from the most recent European strategies on geographic information that sustain a European tendency to create geo-data able to be re-used, shared and exchanged.*

*Keywords: geodatabase, metadata, coastal dunes, coastal erosion, Italy*

### Premessa

In Italia esistono moltissimi studi sperimentali di dettaglio sul tema del rischio geologico in area costiera<sup>1</sup>, studi che spesso utilizzano anche la tecnologia GIS, ma questi sono generalmente sviluppati a scala locale, su tratti di litorale di limitata estensione e spesso anche con metodologie tra loro non comparabili. Si ha però, a differenza di quanto avviene in altri Paesi, una scarsa percezione della rilevanza di poter disporre di informazioni geografiche omogenee a scala nazionale sotto forma di banche dati. Questo dipende certamente dall'assenza nel paese di una struttura scientifica nazionale a tal fine preposta analogamente a quanto invece avviene in altri paesi. Inoltre, in Italia, si assiste ad una maggiore difficoltà di pubblicazione e messa a disposizione libera degli utenti delle banche dati geografiche tematiche (quali sono quelle sul rischio di erosione costiera) rispetto alla situazione mondiale ed europea. Negli altri paesi infatti sia negli ambiti accademici che governativi è normale rendere accessibile il "dato" nei formati GIS e questo avviene. Pur essendo impossibile citare in modo esaustivo gli innumerevoli casi in cui questa accessibilità ai dati oltre che alla loro elaborazione è normale sia da parte di enti della pubblica amministrazione sia da parte di Università ed enti di ricerca, a solo titolo di esempio, ed in particolare nell'ambito del rischio costiero, si possono citare, per l'ambito internazionale, il Dipartimento per la Protezione Ambientale (Florida, USA), il Gruppo di Studi Costieri afferente all'Università di Geoscienze (Texas, USA), il World Research Institute (Washington; USA); analoghe iniziative sono, ad esempio, proposte in Europa in ambito ministeriale dallo "Scottish Natural Heritage" di Edimburgo e dal "Department of Geography and Environment" dell'Università di Aberdeen (UK).

Molto spesso in Italia, gli studi effettuati in ambito geologico-ambientale, che pure si basano su rilievi ed analisi di dati a componente geografica, tendono a presentare solo le interpretazioni senza rendere disponibili i dati al dettaglio di acquisizione, su cui tali elaborazioni si basano. In Italia, ancora oggi, i soli dati utilizzabili per valutazioni a scala nazionale sulla dinamica evolutiva costiera sono infatti rappresentati dall'Atlante delle Spiagge Italiane, documento cartaceo a piccola scala (1:100.000) seppure ricchissimo di contenuti informativi, anche se datati alla fine degli anni '80 (CNR, 1997). Anche i più recenti e significativi prodotti realizzati a scala nazionale sul tema del rischio costiero propongono questa impostazione in termini di scala a cui l'elaborazione è resa disponibile e modalità di accesso alla stessa (D'Alessandro e La Monica, 1999).

L'evoluzione delle politiche e delle strategie di gestione integrata del territorio, ed in particolare di quello costiero, ha evidenziato negli ultimi anni in Europa, l'indispensabilità della creazione e condivisione di banche dati geografiche come strumenti di conoscenza ed intervento sottolineando il problema delle condizioni per la loro realizzazione, condivisione e scambio.

<sup>1</sup> Impossibile citare compiutamente la bibliografia relativa a questa tematica. A parziale dimostrazione dell'entità e significatività di tale produzione è però consultabile la bibliografia raccolta dal GNRAC (Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero) e pubblicata nel Numero 10/2006 della Rivista Studi Costieri *Lo stato dei litorali italiani*.

La realizzazione delle banche dati geografiche, infatti, non ha solo un'enorme rilevanza per la conoscenza e la gestione del territorio, ma ha anche costi molto elevati. Ciò implica l'esigenza di consentire la massima condivisione delle banche dati geografiche rendendo possibile la loro condivisione e riutilizzabilità. Per consentire ciò, i temi delle banche dati geografiche devono quindi essere trattati con condizioni di *dettaglio di acquisizione* (scala nominale) e di *omogeneità* (almeno a scala europea) su cui recentemente è stata definita la posizione ufficiale della Commissione Europea nel progetto INSPIRE, che ha messo a punto e proposto un riferimento ufficiale europeo per la creazione di differenti tipi di informazione geografica come base per la realizzazione di una organizzazione transnazionale col compito di certificare la riduzione di dati geografici in Europa (European Spatial Data Infrastructure). Trattandosi di dati geografici, le condizioni di omogeneità fanno riferimento a due requisiti: il tipo di *astrazione* cioè il simbolo utilizzato per rappresentare in piano gli elementi reali compresi nella banca dati, ed il sistema di riferimento geografico (tipo di proiezione e Datum). L'Europa propone e sostiene l'utilizzo del sistema di proiezione Universale Trasversa di Mercatore e del Datum geocentrico WGS84. L'Italia ha formalmente aderito a questa scelta da alcuni anni ma, nella pratica, il processo di adeguamento culturale è molto lento ed assistiamo ancora a molta disomogeneità nella produzione dell'informazione geografica.

La *certificazione* delle caratteristiche della banca dati (che ne indica anche la riutilizzabilità) avviene attraverso la compilazione della metainformazione che tutte le iniziative europee propongono come condizione imprescindibile proprio per valutare la utilizzabilità dei dati geografici stessi e che in Europa fa riferimento allo standard ISO 19115. Il progetto "I depositi eolici delle coste italiane e il flusso di sedimenti spiaggia-duna", (nel cui ambito il lavoro presentato in questa nota è stato svolto) ha fornito l'occasione per sviluppare un'esperienza, sinora unica in Italia, di produzione di una banca dati geografica applicata al tema del rischio naturale in area costiera e del tutto rispondente alle condizioni indicate dall'Unione Europea al riguardo di completezza nazionale dell'informazione ed omogeneità di dettaglio e di sistema geografico di riferimento.

La definizione dei contenuti informativi (elementi ed informazioni ad essi associate) è stata effettuata attraverso un lavoro collegiale che ha coinvolto tutti i gruppi partecipanti con il coordinamento da parte di ENEA Ambiente (PROT-PREV- Bologna) afferente, per il progetto, all'Unità Operativa dell'Università di Ferrara.

L'implementazione dei contenuti della banca dati è stata eseguita dalle singole Unità Operative, ciascuna facendo riferimento ad un proprio responsabile scientifico e con il coordinamento scientifico nazionale di Giuliano Fierro del DIPTERIS dell'Università di Genova. L'articolo descrive la struttura della banca dati e l'organizzazione dei dati al suo interno evidenziandone le potenzialità di elaborazione in funzione delle valutazioni del rischio costiero. Vengono presentate alcune elaborazioni di dettaglio sui contenuti informativi della banca dati relative all'Unità Operativa di appartenenza dell'Autore. Inoltre, allo scopo di evidenziare le enormi potenzialità che questo prodotto ha nella pianificazione del territorio a scala vasta, sono proposti alcuni esempi, in forma di sintesi, della potenzialità di utilizzo della banca dati a livello nazionale. L'analisi, in dettaglio, dei dati introdotti nelle diverse regioni attiene infatti, in questa fase, alle singole Unità Operative che hanno, in modo concertato e organico, implementato, per le parti di propria competenza, la banca dati stessa. Lo sviluppo delle analisi dei contenuti della banca dati sono state oggetto di elaborazioni specifiche presentate in questo stesso numero della rivista Studi Costieri.

### **Struttura della banca dati geografica delle dune costiere italiane**

Rispondendo ai temi ed obiettivi del Progetto è stata progettata una base di dati geografici vettoriale in grado di raccogliere le esigenze di descrizione delle morfologie dunali costiere e di integrarle con informazioni relative all'ambito costiero significative per la valutazione delle condizioni di rischio di erosione ed alluvionamento delle aree litorali italiane.

La banca dati progettata e realizzata ha, infatti, come soggetto la presenza e lo stato di vegetazione e di conservazione delle dune costiere in Italia in connessione con la tendenza evolutiva dei litorali, la presenza di opere di difesa e l'utilizzo degli arenili a fini di balneazione.

La banca dati è stata progettata per l'ambiente ARCGIS 8 (ESRI), in conformità ad un modello concettuale ed una struttura di organizzazione delle informazioni che consente di mediare tra esigenze di dettaglio descrittivo delle forme e delle condizioni costiere ed esigenze di organizzazione concettuale e fisica dei dati. Ciò allo scopo di garantire la possibilità di sviluppare procedure di analisi spaziale (propria dei GIS) attraverso cui una informazione *semplificata* associata ad un oggetto nella banca dati, può essere confrontata con tutte le altre informazioni disponibili nella stessa banca dati, che riferiscono ad una comune ubicazione geografica. Questo tipo di analisi consente infatti la realizzazione di confronti complessi indispensabili nella valutazione dei fenomeni che interagiscono nell'ambiente e nella progettazione del territorio.

La complessità del Progetto che, interessando l'intero territorio nazionale, ha visto il coinvolgimento di ben 14 Atenei organizzati in 7 Unità Operative (Fig. 1), ha richiesto, in fase progettuale, la creazione di un modello dei dati che consentisse autonomia operativa nella sua implementazione da parte di ciascuna delle Università coinvolte nel progetto e, allo stesso tempo, garantisse la congruenza fisica e logica generale della banca dati generale e quindi dei risultati del progetto complessivo. Per consentire ciò, l'organizzazione logica della banca dati generale ha previsto un unico comune ambito (*Personal Geodatabase*), in cui tutti i dati acquisiti dalle diverse Unità Operative potessero essere inseriti, organizzato in un sistema di sotto-ambiti, definiti su base geografica, e scindibili, in fase di implementazione, in file separati (*Personal Geodatabase Features Data Set*). Ciascuno di questi sotto-ambiti corrisponde ad una delle 7 Unità Operative di cui portano il nome, e la loro struttura interna è assolutamente identica. Questa congruenza ha consentito, al completamento della fase di implementazione da parte delle singole UO, di riaccorpate tutte i singoli sotto-ambiti reinserendoli nella struttura di ordine superiore, il "geodatabase".

In ciascuno di questi *Data set* (che funziona come una singola banca dati indipendente sino al momento del suo riaccorpamento finale), le Unità Operative, ciascuna per la propria area di competenza (Fig. 2), hanno inserito le informazioni convenute, tramite un lavoro di analisi di immagine, rielaborazione di dati pregressi e rilievi *in situ*. Attraverso un accordo formale con il Ministero dell'Ambiente e Difesa del Territorio italiano è stato possibile utilizzare, come riferimento unico cartografico per il Progetto, i contenuti del Portale Cartografico Nazionale, realizzato e gestito dal Ministero, accedendovi attraverso connessione remota. In particolare, le elaborazioni sono state eseguite utilizzando i prodotti a scala nominale 1:10.000, riferiti al 1998-'99, aventi come sistema di riferimento Geografico il Datum WGS84 e la proiezione Universale Transversa Mercatore (UTM) in rispondenza agli standard stabiliti dall'Unione Europea per la produzione di dati geografici. Il Portale cartografico, infatti, è stato sviluppato di concerto con l'iniziativa europea INSPIRE - The INFrastructure for Spatial Information in Europe (<http://inspire.jrc.it/>) a cui fa sostanziale riferimento concettuale e metodologico.

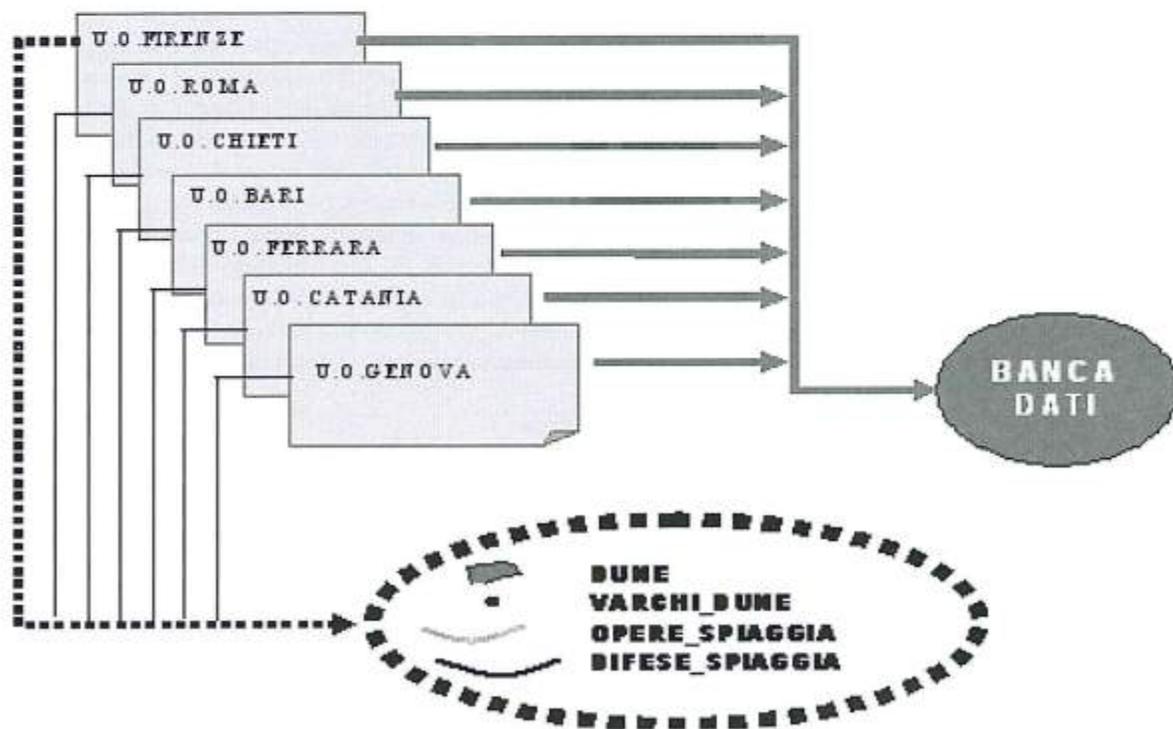


Figura 1- Schema dell'organizzazione della banca dati. I contenuti della banca dati sono organizzati secondo 7 *Feature data set*, ciascuna corrispondente ad un'Unità Operativa (U.O.) ed con un comune modello concettuale e fisico dei dati (sintetizzato e semplificato nello spazio a tratteggio). Tutti i dati inseriti sono stati riunificati alla fine del processo di implementazione da parte delle singole U.O. a tutte le Unità Operative e, i dati inseriti, sono compresi in una unica banca dati omogenea.

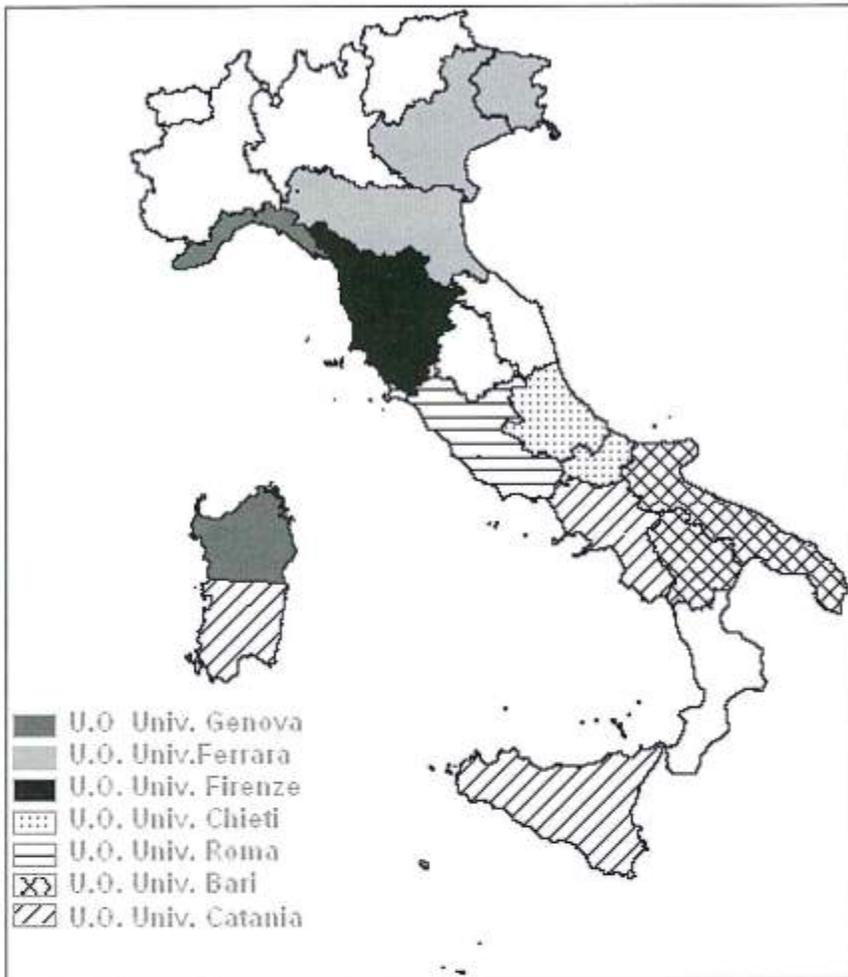


Figura 2 - Aree di indagine di competenza di ciascuna Unità Operativa. Le regioni Calabria e Marche non sono state, al momento, considerate. I dati della Regione Friuli Venezia Giulia non sono stati, al momento, inseriti nella banca dati.

Su queste basi è stato possibile creare nel Progetto una banca dati geografica sulle dune costiere che rispondeva a condizioni altrimenti non possibili:

*1 - omogeneità cartografica a scala nazionale.* L'attuale situazione italiana per la disponibilità di cartografia numerica (o tradizionale) di base non avrebbe offerto, infatti, alternative percorribili tranne che utilizzare cartografie datate e poco dettagliate (1:25.000 o 1:100.000 IGMI) o utilizzare cartografie di grande dettaglio ma diverse per ambiti regionali. Non sarebbe quindi stato possibile ottemperare alla condizione di congruenza geografica nazionale. Le necessarie operazioni di adeguamento tra i diversi sistemi di riferimento utilizzati nelle cartografie delle regioni italiane avrebbero limitato l'accuratezza dei risultati finali;

*2 - dettaglio della scala di lavoro.* Proprio il Progetto INSPIRE afferma, per elementi geografici di grande rilevanza (tra cui la linea di riva), l'esigenza di rilevare queste forme con un dettaglio nominale almeno a scala 1:10.000. Anche in questo caso, senza la possibilità di accedere al Portale cartografico, si sarebbe avuta una disomogeneità di accuratezza di rilievo che avrebbe reso difficile la produzione di un prodotto nazionale.

#### I contenuti informativi della banca dati

La banca dati è, in modo sostanziale, incentrata sulla presenza dei campi dunali costieri attuali, che sono stati rappresentati in base alle loro dimensioni (ingombro) derivato dalla cartografia delle loro forme dalle ortoimmagini a scala nominale 1:10.000.

Le tipologie di informazioni nella banca dati creata sono molte. Alcune descrivono caratteristiche proprie delle dune, mentre altre si riferiscono invece all'ambito litorale limitrofo a queste (ad esempio: tendenza evolutiva del litorale, uso della spiaggia, ecc), oppure a parametri significativi per supportare delle valutazioni di evoluzione del

litorale e di rischio di erosione (ad esempio: le stazioni anemometriche ubicate in un intorno significativo alle zone studiate). Tutte queste condizioni sono state pertanto valutate importanti ed inserite nel *core data* della banca dati. Le dune costiere sono, infatti, su scale temporali brevi, un elemento morfologico fondamentale di stabilizzazione nel quadro morfodinamico costiero (Carter et al., 1992) in quanto interagiscono dinamicamente con i sedimenti dei tratti di spiaggia antistanti con cui avviene lo scambio di sabbie e, in questo modo, agiscono anche come difesa naturale degli ambienti retrostanti la spiaggia soggetti ad ingressione marina, sia dovuta ad eventi contingenti (mareggiate), sia conseguente all'arretramento della linea di riva.

La conservazione della morfologia originale delle dune e della loro continuità laterale sono quindi elementi importanti per poter valutare la loro effettiva potenzialità nella mitigazione naturale del rischio di allagamento ed erosione costieri e, di riflesso, la resilienza morfologica locale. Si intende, infatti, con questo termine, la capacità di un ambiente naturale di prevenire o rispondere all'impatto di un evento potenzialmente dannoso in base a sue caratteristiche ecologiche, morfologiche o socioeconomiche (Klein e MacIver, 1999).

La tipologia delle dune è un parametro fondamentale descrittivo che esprime, oltre che lo stadio evolutivo delle dune, la condizione di conservatività del litorale su cui gli apparati dunari si sviluppano. In un ambiente litorale in lenta progradazione si creano condizioni propizie alla formazione in una successione di cordoni sabbiosi subparalleli alla riva (campi dunari) e con una sequenza morfologica e vegetazionale ben definita che, procedendo dal limite interno della spiaggia, passa dalle forme dunari embrionali (forme effimere, che si accrescono sulle piante pioniere o su materiali vari presenti sulla spiaggia), alle dune attive o *foredunes* (ove le forme sabbiose sono fissate da vegetazione alofila), alle dune stabilizzate che occupano posizioni retrostanti e su cui la vegetazione presenta associazioni arbustive-arboree. Questa successione di forme e di associazioni di specie che colonizzano i campi dunali dipende fortemente dalla mobilità della riva antistante. Una rapida progradazione o arretramento della riva produce una sovrapposizione di questi ambienti dunari e delle specie vegetali ivi presenti; il riscontro di tali sovrapposizioni di habitat assume pertanto significato di indicatore della evoluzione del litorale stesso e della dinamica del movimento.

La tipologia delle dune rilevate è, pertanto, stata distinta in modo da evidenziarne lo stadio evolutivo attuale ed anche le associazioni vegetazionali di specie su di esse presenti.

Le quote s.l.m. delle dune, la presenza di varchi, strade o sentieri che le valicano, o che ne percorrono le creste, sono stati anch'essi acquisiti ed inseriti nella banca dati in quanto indicatori di conservatività e continuità laterale.

Poiché l'evoluzione delle dune ed il loro stato di conservazione, ovviamente, risentono delle situazioni locali di utilizzo dell'area costiera sono infine state considerate la presenza di elementi di irrigidimento delle spiagge che limitano lo scambio di sedimenti tra dune e spiaggia (ad esempio la presenza di opere di difesa radenti), e la pressione antropica sulle zone di spiaggia antistanti gli apparati dunali (ad esempio la presenza di stabilimenti balneari fissi). In sintesi i contenuti informativi della banca dati si riferiscono a:

- tipo di attività della duna in relazione all'ambiente di spiaggia antistante;
- tipo di vegetazione presente sulla duna rilevata;
- ampiezza della spiaggia antistante le dune;
- presenza e tipo di antropizzazione/urbanizzazione presente sulle dune rilevate;
- tendenza della spiaggia antistante le dune (riferita a valutazioni dell'U.O. di competenza sulla dinamica del litorale nell'ultimo decennio);
- presenza e tipo di utilizzo, a fini balneari, della spiaggia antistante le dune;
- presenza e tipo di varchi sulle dune rilevate;
- stazioni di rilevamento di dati anemologici rilevanti per il paraggio.

### Modello concettuale e fisico dei dati

Il modello concettuale e fisico viene sviluppato allo scopo di classificare insieme di dati all'interno di "classi" di oggetti geografici che permettano una migliore capacità di rispondere alle esigenze di elaborazione ed interrogazione. Il modello concettuale dei dati definisce i principali oggetti che il sistema deve manipolare, quali sono gli attributi che descrivono questi oggetti, come questi oggetti sono composti, come sono in relazione tra loro e tra gli oggetti e i processi che li trasformano.

Gli attributi sono proprietà associate a ciascuna entità che ne descrivono le caratteristiche. Nel caso descritto gli attributi associati ad ogni poligono-duna sono: il tipo di attività della duna, le specie di vegetazione dominanti che le colonizzano, la loro naturalità o antropizzazione, ecc. A ciascuna entità-duna sono stati, inoltre,



Figura 3 - Esempio di estrazione delle entità vettoriali (poligoni) corrispondenti alle aree occupate dai cordoni dunari costieri.

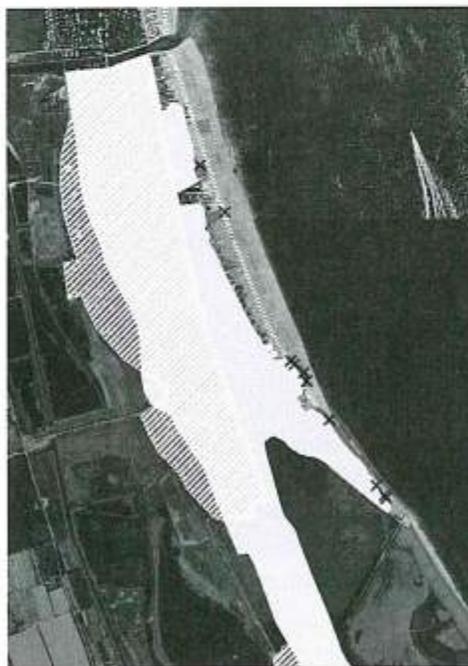


Figura 4 - Esempio di classificazione del territorio litorale in fase di implementazione della banca dati: le aree di duna (in grigio chiaro) vengono rilevate come poligoni distinti dalle aree in cui si riconosce un uso antropico (a tratteggio bianco). L'analisi spaziale successiva consente di associare anche questa ulteriore proprietà alle entità duna in base all'area condivisa.

associati attributi descrittivi dell'ambiente di spiaggia ad esse limitrofo: l'ampiezza ed il trend evolutivo dei tratti di spiaggia antistanti. Le tabelle informative associate a ciascuna entità geometrica (poligono-duna) contengono, sotto forma di colonne, tali attributi sotto forma di stringhe testo.

Il modello concettuale della banca dati si basa su distinte tipologie di oggetti che vengono definite più propriamente *entità* di tipo vettoriale e che rappresentano le astrazioni geometriche di elementi reali: le dune costiere, le quote delle dune, i varchi sulle dune, le caratteristiche dei tratti di spiaggia antistanti le aree dunali, le creste delle dune.

La banca dati è incentrata sull'entità-duna che rappresenta l'area occupata (al 1999) da cordoni dunari costieri. La loro sagoma è stata astratta come poligoni che ne rappresentano l'ingombro proiettato su un piano. La continuità laterale dei poligoni tracciati è stata valutata dai ricercatori in fase di implementazione della banca dati, in base alla presenza e dimensione di varchi sui cordoni dunari, tenuto conto anche della scala nominale della cartografia di base di lavoro (1:10.000).

La delimitazione dei poligoni che rappresentano le entità-duna è stata effettuata agendo contemporaneamente nell'ambiente grafico ed alfanumerico (tabelle degli attributi) in modo da procedere a demarcare graficamente l'area dei cordoni dunari ed inserire nelle corrispondenti tabelle gli elementi descrittivi previsti, creando condizioni univoche tra le porzioni di poligono via via creati e gli attributi a ciascuno associati.

Allo scopo si è convenuta una gerarchia nella classificazione e perimetrazione a partire dal tipo di duna (attiva e non attiva); la segmentazione successiva dei poligoni avviene sulla base del tipo di vegetazione dominante, dell'ampiezza della spiaggia antistante e quindi, del trend evolutivo recente del litorale antistante (Fig. 3). Ad ogni ulteriore e geometrica corrisponde, per ogni nuovo elemento creato, un nuovo mento dell'attributo corrispondente nella tabella associata. In questo modo le porzioni del poligono via via generate dalla progressiva scissione grafica ereditano, tutti gli attributi in precedenza associati alla specifica frazione di poligono. Per semplificare questo processo, l'ulteriore attributo relativo alla presenza di varie forme di antropizzazione sulle dune è stata associata (come condizione descrittiva e come ulteriore divisione geometrica delle entità dune) attraverso un'operazione di analisi spaziale effettuata nella fase finale di riaccorpamento delle banche dati implementate dalle diverse Unità Operative. Le aree antropizzate sono state infatti inizialmente rilevate come un elemento geometrico distinto (poligonale) parzialmente sovrapposto alle aree di duna (Fig. 4).

Alcuni ulteriori elementi descrittivi delle dune sono archiviati e descritti come elementi grafici indipendenti: è il caso dei varchi, delle linee di cresta e delle quote delle creste dei cordoni dunali. Questa scelta deriva dall'esigenza del gruppo di lavoro di poter disporre anche della posizione reale di questi elementi. La congruenza spaziale dei dati consente comunque il confronto tra questi ed i corpi dunali.

Elementi geometrici distinti rappresentano, con simboli (linee e punti), altre caratteristiche dei tratti di spiaggia antistanti i campi dunari studiati: l'uso della spiaggia, le opere di difesa radenti e le stazioni anemometriche significative.

La banca dati finale si compone di 7 entità geometriche che rappresentano le dune, le creste delle dune, i punti quotati delle dune, i varchi e passaggi antropici presenti sulle dune, le opere di difesa e l'utilizzo a fini turistico ricreativi dei tratti di spiaggia antistanti le dune, l'ubicazione di stazioni anemometriche significative.

Ciascuna entità fa riferimento ad una astrazione (elementi geometrici) distinta, per ciascuna delle quali è stata creata una struttura di archiviazione delle informazioni associate (di natura descrittiva e numerica).

### Entità "Duna"

Elemento poligonale che rappresenta l'intera area di duna in cui ricadono dune incipienti, avandune e dune secondarie o inattive. Sono classificate per:

**TIPO DI DUNA:** è prevista una suddivisione in attiva o riattivata (AT) o inattiva (NA)

**AMPIEZZA DELLA SPIAGGIA:** sono presenti 3 classi ( $A < 20$  metri,  $20 < A < 60$  metri,  $A > 60$  metri). La valutazione deriva da misure effettuate, via connessione web, sulle ortoimmagini del Portale Cartografico. Si riferisce alla distanza tra il piede, verso mare, della duna rilevata e la linea di riva.

**TENDENZA DELLA SPIAGGIA:** si riferisce ai soli tratti di spiaggia antistanti le dune rilevate. Sono previste 3 classi (tendenza all'avanzamento, tendenza all'arretramento, stabile) e deriva dagli studi e conoscenze pregresse delle Unità Operative di riferimento.

**TIPO DI VEGETAZIONE SULLE DUNE:** sono presenti 6 classi in base alla tipologia visivamente dominante (Arborea/Erbacea/Assente/Arbustiva/Arborea rada/Arbustiva rada) (Figg. 5 e 6).

**TIPO DI USO DELLE DUNE:** prevista una classificazione in 4 classi: Naturale (NA); Aree urbane (UR); Urbanizzato sparso (US); Antropizzato (AN). Con questa ultima definizione si intendono le aree di duna utilizzate ma non cementificate (ad esempio aree adibite a parcheggio a suolo nudo o ad attività sportive). L'associazione di questa caratteristica alle entità dune deriva da operazioni di analisi spaziale prima descritte.



Figura 5 - Duna costiera non attiva con vegetazione dominante di tipo arbustivo.



Figura 6 - Dune costiere, riattivate, caratterizzate da vegetazione arborea.

### Entità "Cresta delle dune"

Elementi lineari che indicano, graficamente, l'andamento medio delle creste dei cordoni di dune sia attive, sia inattive. Le linee non hanno informazioni associate.

### Entità "Quota delle dune"

Elementi puntuali che individuano i valori numerici delle quote delle creste dunari (sul livello del mare). È specificato, con un codice associato a ciascun valore, la fonte del dato: cartografia tecnica regionale, rilievo diretto, tavole IGM, valutazioni *in situ*. È importante tenere presente che la quota s.l.m. può anche differire sensibilmente dall'altezza delle dune.

**Entità "Opere"**

Elementi lineari posizionati, per convenzione, al limite della battigia distinti per tipi diversi di opere: RIPASCIMENTI (RI); OPERE RADENTI (OR); RIPASCIMENTI associati ad OPERE RADENTI (RO). Solo per i tratti di spiaggia antistanti le dune.

**Entità "Uso della spiaggia"**

La presenza di attività di balneazione temporanee (TE) o permanenti (PE) nei tratti di spiaggia antistanti le dune è stata rappresentata con elementi lineari dimensionali posizionati in prossimità del limite tra spiaggia e dune a cui sono state associate nelle tabelle allegate le possibili opzioni di uso.



Figura 7 - Sentiero lungo la cresta che attraversa una duna costiera attiva con vegetazione dominante di tipo cespugliato.

**Entità "Varchi"**

Elementi puntuali posizionati all'interno dei poligoni di duna in prossimità della posizione reale del varco sul lato verso mare. E' prevista la distinzione tra: sentieri (SE), strade (ST) che hanno sbocco al mare, strade/sentieri lungo le creste dunari (SL) (Fig. 7).

**Entità "Vento"**

Elemento puntuale che riporta la posizione geografica di stazioni meteorologiche significative, anche al di fuori dell'area costiera, scelte in base alla disponibilità di serie di dati (vengono associate nome, quota di rilievo, frequenza, anni di osservazione).

La struttura della banca dati è piuttosto articolata ed è stato necessario un consistente impegno affinché venissero mantenute condizioni di congruenza dei contenuti nella fase di implementazione collettiva. Le condizioni descrittive possibili degli attributi sono, ad esempio, state prefissate

in base a definizioni concordate in fase progettuale; inoltre, per garantire la conformità dei dati inseriti, è stata predisposta la definizione di "domini" che contengono tali espressioni e cioè l'insieme dei valori (o descrizioni) ammessi per ogni attributo. In questo modo l'inserimento degli attributi avviene tramite una serie di menu a tendina che propone tutte le opzioni possibili all'operatore evitando ogni tipo di digitazione diretta nelle tabelle dei dati. Ognuna delle definizioni possibili è inoltre sintetizzata da un codice alfanumerico.

**Metainformazione**

La banca dati si compone di tre ambiti interconnessi: la componente geometrica, la componente informativa e la metainformazione.

La componente geometrica e quella informativa (alfanumerica) sono normalmente contemplate in un GIS.

La metainformazione è un elemento fondamentale perché rappresenta l'informazione dell'informazione. Viene infatti raccolta in questa sezione della banca dati, le informazioni relative al *dove*, al *come* e da *chi* in merito ai dati contenuti.

E' quindi un fondamentale componente di una banca dati perché ne certifica i contenuti dichiarando le condizioni di realizzazione, i responsabili, e quindi, in estrema sintesi, illustra le effettive possibilità di uso dei dati da parte di chiunque, anche a distanza di tempo.

I formati possibili di riferimento per la produzione di una organica metainformazione associata ai dati, sono diversi.

La banca dati delle dune nazionali è stata realizzata in modo da essere uniformata con i principi guida del programma Europeo INSPIRE per permettere e favorire l'interscambio ed il riutilizzo di informazioni spazialmente georiferite (banche dati geografiche).

Nella banca dati descritta, la metainformazione è stata inserita manualmente dagli scriventi, nella fase di progettazione ed organizzazione della struttura dei dati, compilando un catalogo di metadati realizzato secondo un model-

lo già implementato nel sistema GIS ARCGIS utilizzato dal Progetto. Accanto a questo tipo di informazioni il sistema consentiva l'inserimento, in via automatica, di elementi di tipo geometrico e spaziale. Questa parte della metainformazione, essendo gestita direttamente dal sistema GIS, è aggiornata automaticamente, ed in tempo reale, ogniqualvolta nell'ambiente grafico si effettuino variazioni alla componente geometrica associata. Essa, infatti, descrive la natura degli oggetti grafici (punti, linee, poligoni), la loro posizione nello spazio ( $x$ ,  $y$  minima e massima), la loro entità numerica, la data di loro modifica ultima, ecc.

Il modello citato, composto di elementi ed attributi (codificati in XML), fa riferimento allo standard del Federal Geographic Data Committee's (FGDC). Non era, infatti, al momento della realizzazione del progetto, disponibile un catalogo, già implementato nel sistema GIS, che facesse riferimento specifico allo standard Europeo ISO 19115. L'utilizzo di metadati creati secondo uno standard condiviso da tutti i produttori di dati geografici è, infatti, da più tempo percepito negli Stati Uniti che in Europa. Negli USA, infatti, dal 1994 vige la legge federale che istituisce la presenza di una "Spatial Data Infrastructure" (SDI) nazionale ed impone alle agenzie federali di creare dati geografici con metadati standardizzati oltre che verificare, prima di produrre nuovi dati geografici, che questi non siano già disponibili. Esiste a tal fine un catalogo accessibile, attraverso Internet (*Clearinghouse*) che, in base allo standard del FGDC, descrive il *come, dove e chi* dei dati a componente geografica esistenti nel paese. Anche in Europa, dal Giugno 2005, esiste una Direttiva Europea (10553/05) che, recentemente entrata in vigore, sollecita la creazione, in ogni stato membro, di infrastrutture per i dati a componente geografica (con compiti analoghi a quella americana); la direttiva sancisce anche regole generali per la creazione dei metadati. Le specifiche in essa contenute indicano le componenti indispensabili (minime) per la creazione di metainformazione adeguata.

La direttiva Europea richiede che siano dichiarate :

- la conformità del set di dati geografici;
- la dichiarazione delle modalità e degli eventuali limiti di accesso, di uso dei dati (e l'eventuale loro costo);
- la qualità dei dati (compreso il riferimento di validità temporale);
- la descrizione dell'Autorità responsabile per la creazione, gestione, mantenimento e distribuzione dei dati;
- le limitazioni all'uso pubblico dei dati (per motivi di sicurezza, diritti di proprietà, ecc).

La struttura utilizzata nella banca dati descritta risponde a tutti questi requisiti, ed offre un risultato pienamente rispondente a queste recenti indicazioni normative.

I metadati creati descrivono, infatti, per ogni livello della banca dati (*Geodatabase, Feature classes e Feature data set*) tutte queste condizioni (Figg. 8 e 9); è stata inserita, inoltre, una serie di informazioni che descrive, nel dettaglio, il contenuto ed il significato delle chiavi della legenda utilizzate nella banca dati stessa (cioè delle descrizioni contenute nei campi delle tabelle in forma di stringa e di codici sintetici associati) (Fig. 10).

**Description:**

**Abstract:**

Atlante GIS delle dune costiere in Italia aggiornato al 1998-99 con integrazioni al 2003 e con scala nominale 1:10.000. Il rilievo delle forme si basa sostanzialmente sull'esame di ortofotografie numeriche del VOLO ITALIA, riferite al 1998-99, realizzate dalla CGR ed esaminate via web per gentile concessione del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio- Direzione V.I.A. I rilievi sono integrati con dati esistenti, documenti cartografici e rilievi diretti.

**Purpose:**

Banca dati geografica relativa allo stato delle dune costiere in Italia in relazione al bilancio duna-spiaggia. Realizzazione nell'ambito del Progetto "I depositi eolici delle coste italiane e il flusso di sedimenti spiaggia- duna" Finanziamento MIUR 2002-2004- progetti Cofinanziati di Interesse Nazionale

**Supplemental Information:**

Coordinatore Prof. Giuliano Fierro- Università di Genova, Dipartimento di Studio del Territorio e delle sue Risorse DIPTERIS

**Time\_Period\_of\_Content:**

**Time\_Period\_Information:**

**Single\_Date/Time:**

**Calendar\_Date:** 1998-99- 2003

**Currentness\_Reference:**

Rilievi diretti al 2003 integrati da osservazione di ortofotografie numeriche riferite al 1998-99

Figura 8 - Esempio, parziale, dei contenuti della metainformazione associata al livello "Geodatabase", che corrisponde alla banca dati complessiva.

*Description:**Abstract:*

Banca dati georiferita relativa alle dune costiere dei litorali in Emilia Romagna e Veneto

*Purpose:*

Analisi tramite ortofotomagini, cartografie e rilievi in situ delle forme dunari costiere attuali in relazione ai processi evolutivi del sistema spiaggia-duna

*Supplemental Information:*

I rilievi e le elaborazioni sono state effettuate, per il tratto di litorale dell'Emilia Romagna e del Veneto fino alla foce del fiume Adige, dall'Università di Ferrara (Dipartimento Scienze della Terra), mentre per il litorale veneto compreso tra la foce del fiume Adige e la foce del fiume Tagliamento, dall'Università di Trieste (Dipartimento Scienze Geologiche Ambientali e Marine)

*Time\_Period\_of\_Content:**Time\_Period\_Information:**Single\_Date/Time:*

*Calendar\_Date:* inizio progetto 2002

*Time\_of\_Day:* Fine progetto 2004

*Currentness\_Reference:*

Dati al 1998-99 integrati da osservazioni al 2003

*Status:*

*Progress:* In fase di elaborazione

*Maintenance\_and\_Update\_Frequency:* Non previsto

*Spatial\_Domain:**Bounding\_Coordinates:*

*West\_Bounding\_Coordinate:* 12.186506

*East\_Bounding\_Coordinate:* 13.100476

*North\_Bounding\_Coordinate:* 45.675113

*South\_Bounding\_Coordinate:* 44.008969

*Keywords:**Theme:*

*Theme\_Keyword\_Thesaurus:* Dune, Spiaggia, Erosione, Italia

*Theme\_Keyword:* Dune Costiere, Erosione, Emilia Romagna, Veneto

*Access\_Constraints:* I dati sono di proprietà dei soggetti che hanno eseguito la ricerca e possono essere richiesti attraverso il Coordinatore del progetto

*Use\_Constraints:*

Attività di ricerca non a fine di lucro

*Point\_of\_Contact:**Contact\_Information:**Contact\_Person\_Primary:*

*Contact\_Person:* Prof. Umberto Simeoni

*Contact\_Organization:* Università di Ferrara - Dipartimento di Scienze della Terra -

Figura 9 - Esempio, parziale, dei contenuti della metainformazione associata ai livelli "Feature class", che corrisponde alle banche dati relative a ciascuna Unità Operativa. Nel caso riportato, i contenuti si riferiscono all'Unità Operativa dell'Università di Ferrara.

*Description:**Abstract:*

Elemento poligonale che rappresenta l'intera area di duna

*Purpose:*

Rappresentare l'areale relativo a: dune incipienti, dune attive (o riattivate) e dune inattive

*Supplemental Information:*

Poligono a cui sono associate caratteristiche di:

VEGETAZIONE suddivisa in: Arboreo, Arbustivo, Erbaceo, Assente; per la sola duna attiva (o riattivata) è prevista un'ulteriore suddivisione in Arboreo Rado ed Arbustivo Rado;

AMPIEZZA SPIAGGIA antistante suddivisa in 3 classi: < 20 metri, 20-60 metri, >60 metri;

TENDENZA EVOLUTIVA della spiaggia antistante suddivisa in avanzamento, arretramento e stabile

Figura 10 - Esempio, parziale, dei contenuti della metainformazione associata ai livelli "Feature data set" che corrisponde ai singoli gruppi di elementi omogenei (dune, creste di duna, quote, ecc). Nel caso presentato i contenuti si riferiscono alla Feature Data Set "Duna". E' evidente come questo tipo di descrizione, strettamente correlata con gli elementi grafici, risulti vantaggioso nella condivisione e scambio e riutilizzo dei dati.

## Conclusioni

La conoscenza puntuale del territorio che le banche dati geografiche a tema (come quella presentata, relativa alle dune costiere) rendono disponibile, rappresenta uno strumento non consueto nella regione mediterranea. D'altra parte, nell'ultimo decennio, si è molto accresciuta l'attenzione verso i fenomeni di rischio naturale nell'area costiera, particolarmente vulnerabile e su cui i cambiamenti (in senso di perdita di litorale) hanno un immediato risvolto in termini di danno economico (dal punto di vista degli operatori) e di perdita di risorsa da disporre (dal punto di vista di un generico fruitore esterno).

L'esigenza di poter pianificare le scelte di mitigazione possibile del rischio costiero è una forte sollecitazione alla capacità degli enti locali di disporre di adeguata conoscenza in termini di forma, di aggiornamento e di sua accessibilità. La capacità di gestire banche dati geografiche non richiede più, come un tempo, strumenti molto costosi e complessi: la tendenza del mercato è di rendere compatibili i diversi sistemi GIS esistenti, e di creare piattaforme di semplice utilizzo. La richiesta di informazione che tratta la componente geografica avviene anche da parte dei cittadini e non solo degli esperti del settore. La società dell'*e-governance* propone modelli in cui il cittadino conosce le vulnerabilità del suo territorio accedendo ai sistemi web-GIS tramite Internet, senza disporre di alcun software specialistico. In questo contesto, confrontando la realtà italiana con quella europea ed internazionale, emerge con evidenza la mancanza di strutture nazionali preposte alla realizzazione di banche dati geografiche tematiche che rispondano alle esigenze di conoscenza, gestione dei rischi naturali e programmazione delle possibili azioni di mitigazione. Dalla sollecitazione dei grandi progetti europei sull'informazione geografica, a cui la banca dati realizzata, si ispira concettualmente, è presumibile che anche l'Italia sviluppi nel prossimo futuro, strategie e progetti a scala nazionale che superino questa momentanea carenza di strumenti a scala nazionale, significativi per dettaglio e disponibili, invertendo la tendenza attuale di creazione di banche dati geografiche, create per iniziativa del singolo ricercatore, redatte senza un contesto culturale tecnico di riferimento, difficilmente conosciute, scambiate senza la certificazione di qualità fornita dalla presenza di metadati, e spesso vincolate a diritti di proprietà che ne impediscono, di fatto, un ampio riuso.

D'altra parte poter elaborare dati geografici certificati e di alto dettaglio consente non solo una capacità di rappresentazione di notevole elasticità e semplicità. La banca dati propone un'enorme potenzialità di rappresentazione semplice di temi inseriti oltre che lo sviluppo di analisi integrate tra i contenuti informativi disponibili. Alcune di queste elaborazioni sono state ipotizzate sin dalla fase di organizzazione del modello concettuale.

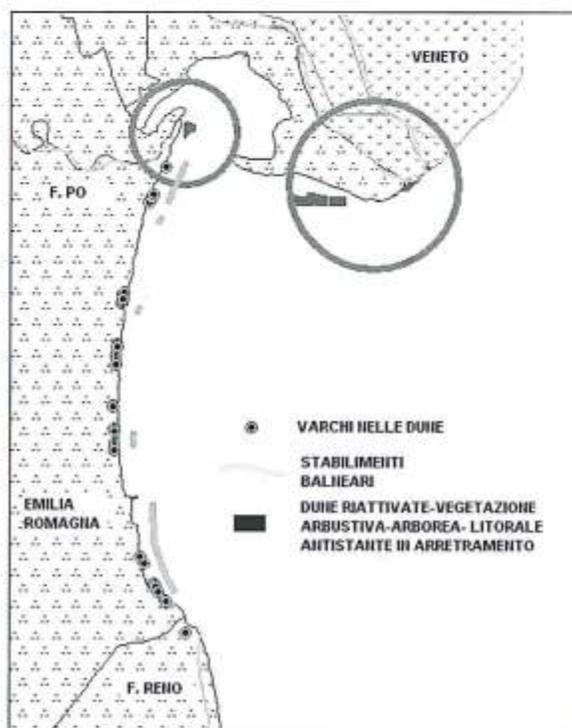


Figura 11 - Esempio di analisi spaziale complessa effettuata in Emilia Romagna e Veneto, tra i fiumi Reno e Po sui dati dell'Unità Operativa dell'Università di Ferrara. Sono confrontate la presenza di varchi nelle dune attive, la presenza di stabilimenti balneari sulle spiagge ad esse limitrofe e la concomitanza di arretramento del litorale e presenza nelle dune attive di vegetazione di tipo arbustivo o arboreo ad indicare uno stato di smantellamento profondo del cordone dunare stesso. Questa condizione risulta localizzata in figura all'interno delle aree cerchiata.

Sono possibili anche una serie di valutazioni di natura quantitativa altrimenti impensabili. Indicatori di stato possono essere facilmente calcolati e, quindi, rappresentati. Sono infatti disponibili per ciascuno degli elementi geometrici attribuiti quantitativi che possono essere elaborati e matematicamente confrontati (quote, aree, ecc). Ad esempio la distribuzione dei valori delle quote sulle dune attive rilevate sull'intero litorale dell'Emilia Romagna risulta essere variabile tra 1 e 9.5 metri s.l.m. con i valori massimi ubicati al confine con il Veneto; risultano essere stati rilevati dall'U.O. Università di Ferrara 546 punti quotati di cui 190 da rilievi diretti. L'area complessiva delle dune attive in questa regione risulta essere pari a circa 0.6 km<sup>2</sup>.

Oltre a queste semplici elaborazioni di parametri numerici, ben più interessanti e significative analisi comparate possono essere facilmente effettuate. Ogni caratteristica inserita è infatti elaborabile, sempre considerando anche la sua posizione geografica (*dove*) ed in relazione agli elementi vicini inseriti.

In questo modo è possibile mettere a confronto fenomeni diversi che agiscono nello stesso contesto spazio e metterli in relazione tra loro. Una tra le tante possibili elaborazioni complesse, e realizzate negli studi svolti nelle aree d'indagine (Simeoni et al., 2005), mette in relazione lo stato di degrado delle dune (e per erosione, e per attraversamento) con la tendenza evolutiva dei litorali antistanti e con la presenza di attività di balneazione e stabilimenti ad essa connessi. Risulta, ad esempio, di particolare significato individuare le situazioni in cui si ha una condizione di tendenza all'arretramento del litorale, e le dune, in passato, stabilizzate, si trovano oggi interessate da fenomeni di erosione diretta da parte del mare. Per effettuare questa analisi spaziale, interessante per evidenziare zone dunali a maggiore fragilità, è necessario poter confrontare caratteristiche delle dune contemporaneamente a quelle dell'ambiente litorale ad esse limitrofo.

Applicando la procedura di analisi al territorio Emiliano Romagnolo si evidenzia, a scala regionale, un risultato non scontato in relazione all'impatto delle strutture di balneazione sullo stato di conservazione delle dune. Le situazioni di maggiore smantellamento in atto dei cordoni dunari si evidenziano in zone non attrezzate a scopi turistici (Fig. 11, zone cerchiare); l'ubicazione di sentieri ed attraversamenti delle morfologie dunari sono invece concentrate in corrispondenza dei tratti di spiaggia attrezzata.



Figura 12 - a) I tratti di litorale rilevati ed inseriti nella banca dati; b) esempio di classificazione complessa delle dune costiere in base alla loro naturalità: in grigio le dune attive su cui insiste una qualsiasi forma di antropizzazione; in nero le dune attive naturali; c) esempio di classificazione complessa delle dune costiere: dune attive con tratti di spiaggia antistanti ad ampiezza inferiore a 20 metri e tendenza all'arretramento. Dati implementati dalle 7 U.O. del Progetto.

La possibilità di utilizzare la banca dati consente di effettuare in modo automatico e semplice queste analisi, altrimenti piuttosto complesse, attuando tutte le possibili condizioni di interrogazione tra le caratteristiche introdotte: il tipo di duna, il tipo di vegetazione su di essa dominante, l'ampiezza della spiaggia antistante, il trend del litorale antistante, la presenza e la natura di stabilimenti balneari stagionali, la presenza (e natura) dei varchi sulle dune.

Un ulteriore schematico esempio dei risultati possibili è la valutazione del grado di antropizzazione delle dune attive che potrebbe rappresentare il primo livello per l'avvio di politiche di priorità di intervento per la protezione di questi ambienti fragili ed importantissimi per l'equilibrio ambientale e sedimentologico costiero (Fig. 12). L'efficacia di un simile strumento è evidente se si considera che il progetto ha analizzato a scala nazionale il fenomeno e che questa dimensione dell'approccio (ancorché non ancora completo per tutte le aree di litorale italiano) rende possibili analisi di una estrema efficacia per organismi di governo del territorio sovra regionali.

Assume inoltre un particolare significato nell'ottica di utilizzare la banca dati come descrizione di uno stato zero di riferimento per rilievi ripetuti nel tempo che consentano di confrontare l'evolvere della situazione in un approccio multitemporale ed individuare tendenze e criticità. Su questa base vengono sviluppate le politiche ambientali a scala paese.

La possibilità, che si è concretizzata nel corso del progetto, di attivare un processo di concreta interazione con il Ministero dell'Ambiente e del Territorio, nell'ottica di integrazione, della banca dati realizzata, nel Portale Cartografico Nazionale, possono essere la base di un utilizzo della banca dati stessa e di avvio di un nuovo percorso di integrazione e di sviluppo di azioni di integrazione e di implementazione di ulteriori strati tematici geografici certificati e condivisi.

### Ringraziamenti

Si ringraziano il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio per la disponibilità ed il supporto fornito, il coordinatore del Progetto, Prof. Giuliano Fierro e tutti i colleghi delle Unità Operative del Progetto PRIN 2002, per la fattiva collaborazione nell'impostazione della banca dati e nella sua implementazione.

### Bibliografia

- Bartlett D.J. (2000) - *Working on the frontiers of science: applying GIS to the coastal zone*. In: Marine and Coastal Geographical Information Systems, Wright, D.J. & Bartlett, D.J. Eds, Taylor and Francis. Pp.11-24, London.
- Brown I., Jude S., Koukoulas S., Nicholls R., Dickson M., Walkden M. e Jones A. (2004) - *Dynamic Simulation and Visualisation of Coastal Erosion: Past, Present and Future*. GISRUK04, University of East Anglia, Norwich, 28-30 April 2004.
- Carter R.V. G., Curtis T.G.F. e Sheely-Sheffington M.J. (1992) - *Coastal dunes: Geomorphology, Ecology and Management*. Balkema, Rotterdam.
- CNR- M.U.R.S.T. (1997) - *Atlante delle Coste Italiane. Dinamismo, tendenza evolutiva, opere umane*. 108 Fogli in Scala 1:100.000, SELCA, Firenze.
- D'Alessandro L. e La Monica G.B. (1999) - *Rischio per erosione dei litorali italiani*. Atti dei Convegni Lincei, vol.154: 251-256.
- Fotheringham S., Rogerson P. Eds.(1994) - *Spatial analysis and GIS*, Taylor & Francis, pp.296, London.
- Harvey C. e Press J. (1996) - *Databases in Historical Research. Theory, methods and applications*. Macmillan Press Ltd., Houndmills, Basingstoke and London.
- Houston J. A. Edmondson S. E. e Rooney P.J. (2001) - *Coastal Dune Management: Shared Experience of European Conservation Practice*. Liverpool University Press, pp. 472.
- Klein R.J.T. e MacIver D.C. (1999) - *Adaptation to climate variability and change: methodological issues*. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, vol. 4 (3-4): 189-198.
- Nicholls R., Brown I., Dawson R., Dickson M., Hall J., Koukoulas S., Mokrech M., Pearson S., Rees J., Richards J., Stansby P., Walkden M., Watkinson A. e Zhou J. (2005) - *An Integrated Assessment of Erosion and Flooding in North-East Norfolk, England*. LOICZ II Inaugural Open Science Meeting, Egmond aan Zee, Netherlands, 27-29 June 2005.
- Simeoni U., Valpreda E., Schiavi C. e Corbau C. (2005) - *Le dune costiere dell'Emilia Romagna*. Studi Costieri, 11: 121-132.
- Tuttle D. C. (1987) - *A small community's response to catastrophic coastal bluff erosion*. ASCE Fifth Symposium on Coastal and Ocean Management. Coastal Zone, vol. 87, (2): 1876-1881.
- Wickham H.G. (1984) - *Management of vegetated Dune Reserves on a Receding Coast*. Journ. Soil Cons., NSW 40(i): 46-55.

Manoscritto ricevuto il 19/07/2005; accettato il 20/10/2005.

## Studio geomorfologico delle dune costiere di Marina di Cecina (Toscana) con rilievi Lidar da aereo

Deborah Bresci, Sara Carli, Enzo Pranzini e Lorenzo Rossi

Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze  
Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze. E-mail: epranzini@unifi.it

### Riassunto

Nel Gennaio 2004 è stato effettuato un volo sulla fascia costiera di Marina di Cecina (Toscana) durante il quale sono stati acquisiti dati Lidar, immagini multispettrali con un CASI e foto a colori con camera metrica. Un rilievo topografico eseguito con una Stazione totale lungo 11 transetti ortogonali a costa ha consentito di valutare l'accuratezza dei dati altimetrici ottenuti con il Lidar. I dati CASI sono stati utilizzati per estrarre profili di NDVI e valutare come la vegetazione influisce sull'accuratezza del dato altimetrico Lidar.

Il confronto con una carta geomorfologia realizzata con metodi tradizionali (rilievi di campagna e fotointerpretazione) nel 1996 ha messo in evidenza le grandi potenzialità dei rilievi Lidar per lo studio geomorfologico in aree densamente coperte da vegetazione. Il modello digitale del terreno (DTM) ottenuto con risoluzione di 1 m ha permesso di tracciare l'andamento di numerosi cordoni dunari e di studiare i loro rapporti geometrici fino a portare all'identificazione di due fasi erosive storiche nel delta del Fiume Cecina. L'identificazione di numerosi *blow-outs* su la gran parte dei cordoni, spiegabile con periodo di intenso disboscamento, ha messo in evidenza come sia stata importante l'attività antropica nell'evoluzione morfologica di questa parte della costa toscana.

**Parole chiave:** dune costiere, delta, LIDAR, DTM, NDVI, *blow-outs*.

### Abstract

*The study of dune evolution is of major relevance for the management of the coastal zone, as it constitutes an interface environment under both terrestrial and marine influence. Traditional survey technologies used in coastal evolution studies, such as airborne photograph, usually pose limitations and cannot be applied to the study of dune morphodynamics due to the dense vegetation cover that can be present in these environments. LIDAR (Light Detection And Ranging) is a new airborne technology producing altimetric data that can be used in the generation of a Digital Terrain Model (DTM) of high accuracy even in the presence of dense vegetation. Although LIDAR has been widely used on coastal evolution studies, few have applied this technology to investigate dune morphology. In order to assess the validity, applicability and accuracy of LIDAR-born data in the study of coastal dune evolution, an aerial survey was performed in January 2004 over a stretch of coast at Marina di Cecina (Tuscany). In addition to LIDAR altimetric data, multispectral images and airborne colour photographs were acquired during the same survey, and topographic surveys were performed along 11 transects using Total Station. The NDVI image produced with the use of multispectral data allowed to evaluate the influence of vegetation on the accuracy of altimetric data, whereas comparison of the DTM generated to a 1996 geomorphological map of the area (produced using traditional methods such as field work and photointerpretation) provided an indication of the potential of LIDAR surveys in studying the geomorphology of densely vegetated areas. The 1 meter resolution DTM produced allowed to identify several dune alignments and to study their geometric relationships, leading to the identification of two erosional phases in the historical evolution of the River Cecina delta. Several blow-outs were also identified in most of the dunes as related to a period of intense deforestation in the past, demonstrating the importance of human impact on the morphological evolution of this part of the Tuscany coast.*

**Keywords:** coastal dunes, deltas, LIDAR, DTM, NDVI, *blow-outs*.

## Premessa

Lo studio della morfologia delle dune si pone come un momento fondamentale nella gestione integrata della fascia costiera in quanto esse costituiscono l'interfaccia fra la zona in cui sono prevalenti i processi costieri e quella in cui agiscono i fattori continentali (Pranzini e Simeoni, 2005).

L'analisi morfologica delle dune consente di ricostruire le fasi di formazione di questi depositi, eventuali episodi di intenso rimodellamento caratterizzati spesso dalla formazione di *blow-outs*, e fenomeni di incisione lineare dovuti all'apertura di percorsi di accesso al mare.

La realizzazione di una carta altimetrica delle aree dunari comporta un notevole impegno sul terreno, dato che queste sono spesso coperte dalla vegetazione che rende vana l'utilizzazione delle foto aeree. D'altra parte il rilievo topografico diretto non sempre può avvalersi del GPS, poiché sotto agli alberi il segnale non viene ricevuto. Non vi è quindi che ricorrere ai tradizionali rilievi celerimerici, estremamente costosi se si intende ottenere una maglia di punti sufficientemente densa da consentire la descrizione delle morfologie più minute.

Recentemente si sono resi disponibili sistemi di rilievo LIDAR (*Light Detection And Ranging*) aviotrasportati che consentono la produzione di Modelli Digitali del Terreno (DTM) di grande accuratezza anche in aree con densa copertura vegetale. Sebbene siano state effettuate numerose applicazioni di queste metodologie in ambiente costiero (Irish e White 1998; Krabill et al., 2000; Stockdon et al., 2002; Haxel e Holman, 2004), anche con indagini svolte in aree con estesi depositi eolici (Woolard e Colby, 2002), non è nota l'accuratezza dei dati altimetrici acquisiti sotto alla vegetazione in aree con elevata variabilità altimetrica quali sono le dune costiere.

Lo scopo di questa ricerca è quello di analizzare la validità dei rilievi LIDAR per la ricostruzione della morfologia dei depositi eolici costieri, valutandone l'accuratezza in aree con densa copertura vegetale e le possibili applicazioni nella gestione integrata della costa.

A tal fine queste tecniche sono state applicate allo studio delle dune che orlano la costa di Marina di Cecina (Fig. 1), fra Punta del Tesorino, a nord, e la foce del Fosso Le Basse, a sud, dove in precedenza uno degli autori aveva realizzato una carta geomorfologica basata sulla fotointerpretazione e su controlli in campagna effettuati senza rilievo topografico di precisione (Pranzini, 1996). Mentre il confronto fra i due prodotti consente di valutare l'efficacia dei rilievi LIDAR, questi ultimi aiutano a delineare l'evoluzione subita negli ultimi secoli dai cordoni sabbiosi litoranei lungo questo tratto della costa toscana.

## L'area di studio

Fatta eccezione per l'abitato di Marina di Cecina, sviluppatosi lungo il litorale a sud della foce, la fascia costiera presenta una limitata antropizzazione, con alcuni stabilimenti balneari sul lato settentrionale e una pineta completamente libera da edifici in quello meridionale. Entrambi i settori costituiscono la Riserva Naturale dei "Tomboli di Cecina", caratterizzata da una pineta di pino marittimo e domestico, con una elevata frequenza di leccio, mentre sul lato esterno compare il ginepro comune e il coccolone; in molti tratti si ha un denso sottobosco con le tipiche essenze della macchia mediterranea (Figg. 2 ÷ 5).

La pineta fu creata nel 1839, per iniziativa di Leopoldo II di Lorena Granduca di Toscana, col duplice scopo di proteggere le colture interne dalla salsedine e dai venti marini e di produrre pinoli.

La *Carta geomorfologica della fascia costiera del Comune di Cecina*

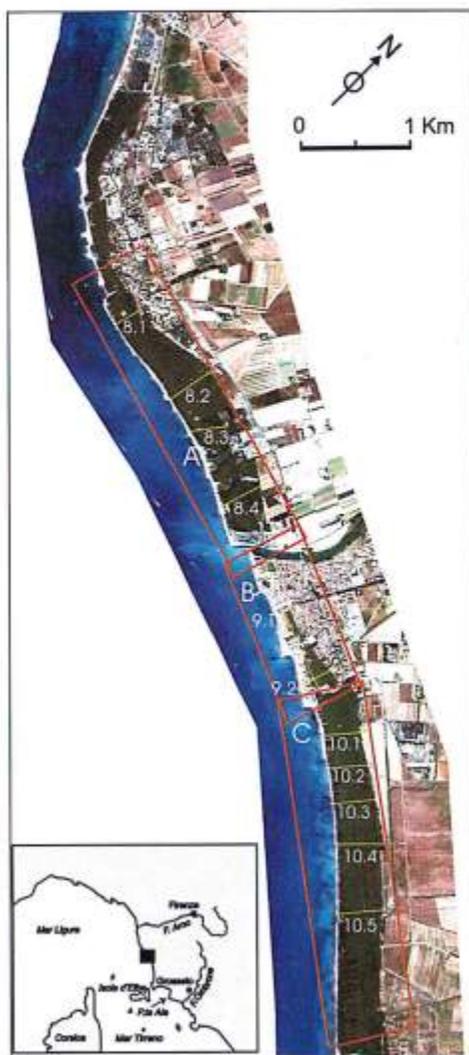


Figura 1 – Immagine QuickBird del Settembre 2004; litorale di Marina di Cecina con indicate le tre zone di acquisizione dei dati LIDAR e la posizione dei profili topografici. Bande 1 (Blu), 2 (Verde) e 3 (Rosso).

(Pranzini, 1996) indica la presenza di depositi eolici in una striscia di ampiezza compresa i 550 m a nord e i 450 m a sud. La continuità delle dune è interrotta in modo evidente solamente dal corso del Fiume Cecina, che sfocia in mare nella parte centro-settentrionale del territorio qui studiato.

Altre interruzioni minori dei cordoni dunari sono presenti a nord della foce del Cecina, in località Le Gorette, toponimo che indica appunto tre aree depresse sulla cui origine non è mai stata fatta chiarezza. E' difficile pensare che possano corrispondere a vecchie "rotte" del Cecina, perché questo avrebbe dovuto scorrere anche parallelamente ad essa, percorrendo in alcuni tratti i bassi interdunari. E' più probabile che siano stati creati artificialmente per favorire il deflusso dalle aree umide retrostanti. Il taglio deve essere stato prodotto fra il XVIII e il XIX secolo, quando, in questa parte della Maremma toscana, fu condotta una intensa opera di bonifica. Il taglio più settentrionale ha davanti a sé un cordone dunare che dovrebbe essersi quindi formato fra il XIX e il XX secolo: questo, più a sud, è stato asportato dall'erosione costiera e non è possibile sapere se chiudesse o meno anche i due varchi meridionali, che oggi si aprono direttamente sulla spiaggia.

A sud della foce, al limite meridionale dell'abitato di Marina di Cecina, vi è un'altra interruzione in corrispondenza del Fosso della Cecinella, un corso d'acqua minore che drena le parti meridionali della pianura di Cecina; anche in questo caso è molto probabile che l'incisione sia stata creata all'epoca delle bonifiche. Il Fosso le Basse, che limita a sud l'area di studio, taglia le dune con alveo assai stretto e con un percorso rettilineo ed ortogonale alla costa, essendo uno dei canali di scolo delle acque della pianura tracciato artificialmente in occasione della bonifica.



Figura 2 - Settore A: il basso cordone che si stende fra le due dune maggiori, la più interna delle quali compare sul lato destro della foto.



Figura 3 - Settore A: dune a monticelli nel tratto mediano del settore.



Figura 4 - Settore C: la densa vegetazione dell'estremità meridionale.



Figura 5 - Settore C: le dune mediane spesso prive di sottobosco.

I depositi colici, infatti, separano dal mare una pianura alluvionale posta a quote estremamente basse nella quale erano presenti, fino alla metà del Settecento, ampie aree palustri (Barsanti e Rombai, 1986). In realtà la fotointerpretazione aveva consentito di identificare alcuni cordoni sabbiosi anche sotto ai depositi alluvionali, che, in questo caso, risultano maggiormente drenati e quindi di tonalità più chiara. I cordoni sabbiosi di questo tratto di litorale sono stati distinti in dune a prevalente andamento lineare, dune a monticelli e *beach ridges*. La discriminazione non è semplice e vi possono essere molte forme intermedie:

- le dune a prevalente andamento lineare mostrano una notevole continuità ed è possibile seguirle, anche dopo occasionali interruzioni, per svariate centinaia di metri o, talvolta, per tutto il territorio studiato;
- le dune a monticelli (traduzione del termine inglese *hummocky*) sono costituite da piccoli rilievi, nei quali è più difficile identificare un allineamento e derivano dallo smembramento di antiche dune longitudinali quale conseguenza del disboscamento e con la formazione di *blow-outs*;
- come *beach ridges* sono stati classificati quei cordoni che mostrano una continuità simile a quella delle dune longitudinali, ma che si sviluppano ad altezze minori e presentano una cresta a quote relativamente costanti, tali da fare pensare che nella loro formazione abbia giocato un ruolo maggiore il *run-up* che non il trasporto eolico.

Nella *Carta geomorfologica della fascia costiera del Comune di Cecina* (Pranzini, 1996) vennero indicate anche alcune aree potenzialmente soggette a deflazione concentrata, ove è possibile la formazione di *blow-outs*.

Complessivamente furono riconosciuti 12 cordoni nel settore posto a nord della foce del Fiume Cecina e 10 in quello posto a sud. La discontinuità creata dalla foce del Cecina, e ancor più dall'abitato che ha obliterato (se non spianato) gran parte delle morfologie naturali, non consente di collegare i cordoni settentrionali con quelli meridionali. In corrispondenza della foce del fiume, laddove l'erosione costiera è stata più forte, la fascia dunare risulta ristretta ed alcuni cordoni vengono troncati dalla linea di riva.

Una datazione assoluta di questi cordoni non è mai stata effettuata, ma la presenza di reperti risalenti al periodo romano sulla duna più interna nel tratto settentrionale, collegabili all'attività di una fornace, e la presenza di torri di guardia del XVIII secolo sul limite esterno della penultima duna poco fuori dall'area studiata (Forti di Bibbona e di Castagneto), consente di affermare che l'intero sistema si è formato negli ultimi 2000 anni. La duna più esterna, quella successiva al XVIII sec., non è più presente nel tratto studiato a causa dell'erosione che, dal 1938 ad oggi, ha determinato un arretramento della linea di riva di circa 50 m nelle zone esterne e di ben 120 nel tratto posto immediatamente a sud delle difese costiere che proteggono l'abitato di Cecina Mare (Fig. 6).

La foce del Cecina, stabilizzata da un pennello in sponda destra, ha visto l'arretramento della barra di foce che si attacca sul lato sinistro di quasi 200 m. L'erosione ha interessato anche la spiaggia in cui è posto il Forte di Bibbona, circa 5 km a sud del Fosso Le Basse, con un arretramento di circa 20 m, ma l'edificio settecentesco dista ancora 100 m dalla linea di riva.



Figura 6 - Erosione della duna a sud di Marina di Cecina.

### Materiali e metodi

Il LIDAR è una metodologia di rilievo basata sulla scansione del territorio per mezzo di un telemetro Laser (*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*), che determina la direzione in cui è posto un riflettore e la distanza fra questo e il punto di emissione.

Per applicazioni territoriali la strumentazione viene posta su piattaforme aeree in modo da poter acquisire dati su ampie superfici e con il minimo di copertura prospettica.

Per il nostro studio è stato effettuato un volo con aereo Partenavia P68' sul quale era installato un altimetro LIDAR ALTM (*Airborne Laser Terrain Mapping*), che opera ad una lunghezza d'onda di 1.047 mm. Sulla stessa piattaforma era posta una camera digitale metrica ed una sensore multispettrale CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*).

Il volo, effettuato il 24 gennaio 2004, è avvenuto ad una quota di 1800 m dalla quale lo strumento ha operato con un angolo di scansione di 20°, rilevando così strisce di territorio ampie 800 m, con un fascio di 1 cm e un'accuratezza in quota di 15 cm.

La zona, divisa in tre settori (Fig. 1), è stata oggetto di due sorvoli consecutivi con sovrapposizione quasi totale, al fine di raffittire il numero di punti acquisiti, in modo tale da ottenere una densità media di circa 3 punti per metro quadro.

Un test effettuato con la stessa strumentazione nell'ambito del Progetto Beachmed sulla zona campione del delta dell'Arno (Beachmed, 2004) ha mostrato che le quote rilevate sulla spiaggia (quindi senza vegetazione) in tre diversi sorvoli non differiscono di più di 10 cm, un valore accettabile per la ricostituzione delle morfologie della fascia costiera.

I dati, provenienti dal sistema inerziale POS (*Position and Orientation System*) e dalla stazione DGPS (*Differential Global Positioning System*) di bordo, vengono elaborati per fornire l'orientamento esterno del sensore.

La procedura di elaborazione dei dati ALTM è articolata nelle seguenti fasi principali:

- correzione differenziale dei dati GPS al fine di ottenere la traiettoria dell'aeromobile;
- elaborazione dei segnali di ritorno acquisiti dal sensore con rimozione dei punti relativi a brusche variazioni di quota (*outliers*) dovuti a falsi ritorni misurati dal sensore Laser;
- estrazione dei *first-pulses* per la realizzazione del DEM (*Digital Elevation Model*) che, nelle aree vegetate, descrive il top della *canopy*;
- estrazione dei *last-pulses*, ossia gli ultimi ritorni del segnale che hanno effettuato un percorso più lungo e che quindi probabilmente hanno raggiunto il suolo;
- attribuzione dei *last-pulses* alle classi Suolo, Vegetazione ed Edifici (eventualmente altro) grazie ad un classificatore al quale viene fornito preliminarmente il tipo di morfologia prevalente dell'area, unitamente alla stima della densità (bassa, media o alta) della vegetazione da rimuovere<sup>2</sup>;
- estrazione dei soli punti identificati come Suolo;
- ricampionamento e interpolazione di questi punti per la generazione di un Grid di 1 m x 1 m, risoluzione che Woolard e Colby (2002) valutano ottimale per questo tipo di dati anche ai fini del calcolo del bilancio sedimentario dei sistemi dunari.

I dati sono stati quindi elaborati con il software ENVI per creare carte altimetriche a isolivelli e modelli 3D (Fig. 7). Un apposito software sviluppato in ambiente AutoCAD ha consentito inoltre di estrarre profili altimetrici su sezioni ortogonali e parallele alla costa.

Nel Gennaio 2005 sono stati rilevati 11 profili topografici al suolo con una stazione totale Geotronics 600, per uno sviluppo lineare complessivo di 5500 m, al fine di valutare l'accuratezza dei dati telerilevati. Ogni profilo è stato georiferito su una coppia punti rilevati con GPS geodetico modello Leica system 530, in modalità statico-rapida, con sessione di durata 30 minuti da un punto situato a San Vincenzo (circa 20 km a sud) ed appartenente alla rete IGM95. Questo per riferire i dati allo stesso sistema utilizzato con il rilievo LIDAR e quindi per operare i confronti.

Dal sensore multispettrale CASI, in fase di acquisizione, sono state selezionate 8 bande delle 220 disponibili, corrispondenti ad un range di valori che vanno da 0.4655 mm a 0.8059 mm (centri di banda). Sono state quindi prodotte immagini di NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index = NIR-R/NIR+R*) utilizzando la Banda 3 (0.6760 mm) per il Rosso (R) e la Banda 8 (0.8059 mm) per l'Infrarosso vicino (NIR).

<sup>1</sup> Il rilievo e la prima elaborazione sono stati effettuati dalla Soc. Aquater su incarico del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze nell'ambito del Progetto Beachmed (Commissione Europea, VI Programma Quadro).

<sup>2</sup> Il codice di calcolo utilizzato nelle elaborazioni è coperto da segreto industriale e non è stato possibile avere informazioni più dettagliate sui criteri con cui esso opera.

### Valutazione dell'accuratezza dei dati

L'estrazione degli impulsi associati alla vegetazione, al suolo e agli edifici si basa sul riconoscimento automatico di queste tipologie sulla base delle variazioni di quota registrate fra ciascun punto ed i punti limitrofi.

Se però la vegetazione è molto densa e con una *canopy* estremamente regolare vi sono maggiori probabilità che questa non sia riconosciuta come tale (Okagawa, 2001).

In ogni caso, quando la vegetazione diventa impenetrabile, anche se essa venisse riconosciuta grazie alle brusche variazioni di quota della sua *canopy*, non si avrebbe l'acquisizione di punti associabili al suolo; in questi casi la *Grid* viene ricostruita per interpolazione fra i punti più vicini.

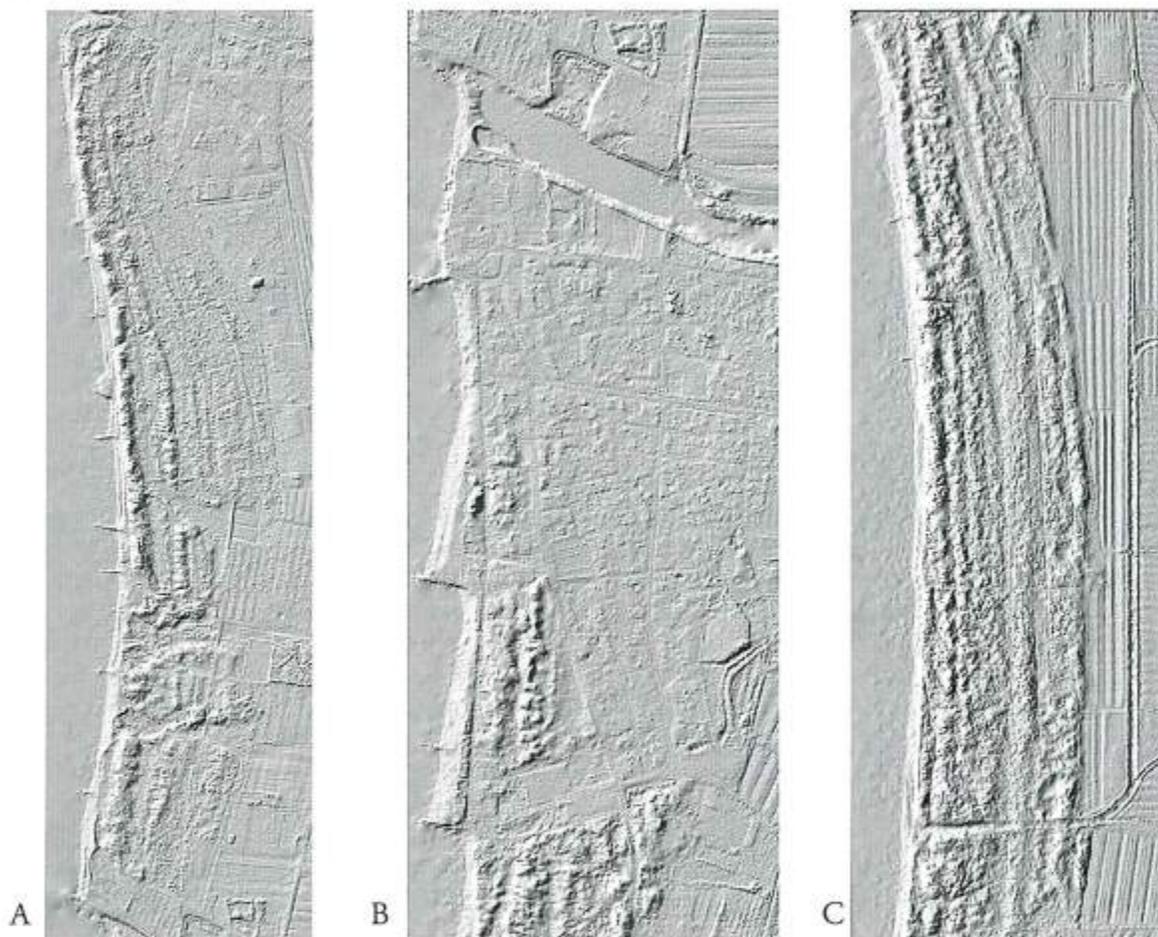


Figura 7 - Shaded relief delle tre strisciate acquisite lungo il litorale di Marina di Cecina; vedi Figura 1 per l'ubicazione delle strisciate. (Scala 1:14.000 circa).

In Figura 8 (alto) viene rappresentata la nuvola di punti corrispondenti ai *last-pulses* acquisiti nel tratto di litorale posto a sud della foce del Fiume Cecina (in corrispondenza del profilo topografico 10.3 di Fig. 1) mentre in basso vi sono i punti filtrati dal software che ha escluso quelli riconosciuti come vegetazione.

Si può osservare come nell'immagine superiore vi sia una elevata densità di punti (fino a 4 per m<sup>2</sup>), mentre in quella inferiore vi sono ampie fasce completamente vuote, dove la generazione del Grid con maglia 1 m x 1 m richiederà numerose interpolazioni. Ciò avviene spesso negli avvallamenti fra i cordoni dunari, dove l'umidità del suolo consente lo sviluppo di un fitto sottobosco. È evidente quindi che il Grid ottenuto dall'interpolazione dei dati originali risulta meno preciso proprio in corrispondenza di queste zone.

Il mancato riconoscimento della vegetazione porta sempre ad attribuire ad un punto quote più elevate di quelle del suolo, anche se valori eccessivi vengono poi riconosciuti come *outliers* ed eliminati. La mancanza di punti prodotta dal riconoscimento della vegetazione, al contrario, può portare all'attribuzione di quote maggiori o minori

di quelle reali in funzione delle quote dei punti adiacenti. E' per questo che in aree coperte da densa vegetazione possiamo avere errori in quota sia positivi che negativi.

In Figura 9 è riportato il confronto fra un profilo topografico rilevato con la Stazione Totale, che in questo studio costituisce la "verità al suolo", e le quote dei punti filtrati accettando solo quelli che ricadono entro una circonferenza di raggio 50 cm e centro nei punti di verità.

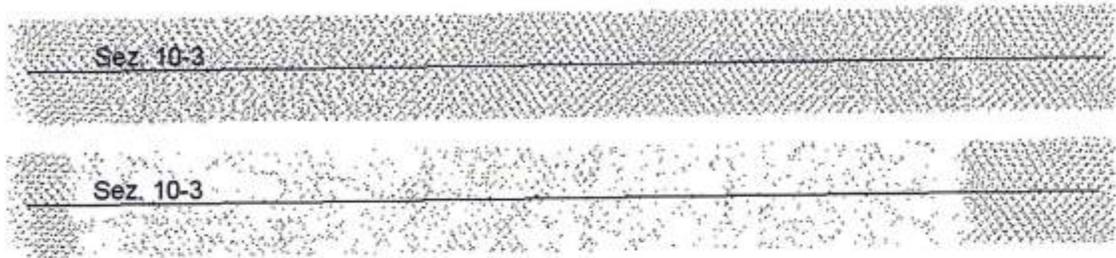


Figura 8 - Sezione 10.3: nuvola dei punti corrispondenti ai *last-pulses* (sopra) e la stessa dopo la filtratura che toglie i punti riconosciuti come vegetazione (sotto).

Le differenze di quota rilevate con i due metodi su questo profilo appaiono in Figura 9: sulla diagonale cadono i punti per i quali le due quote sono uguali, mentre sotto e sopra ad essa vi sono i punti in cui il LIDAR ha sovrastimato o sottostimato la quota. Come si vede le differenze sono assai contenute, con uno scostamento medio che in valore assoluto risulta essere pari a 0.173 m (N = 51; Deviazione standard = 0.115). L'errore risulta equamente distribuito fra sovra- e sottostime, tanto che la media reale è prossima a zero (+0.024 m). Analizzando la totalità dei punti di verità al suolo si ha uno scostamento medio in valore assoluto ancora minore (Media 0.176 m; N = 613; Deviazione standard = 0.171), anche in questo caso con una modesta sovrastima della quota da parte del Grid (+0.049 m).

Gli scostamenti massimi fra quote LIDAR e quote Stazione Totale si sono registrati in un tratto del Profilo 8.3, rappresentato in Figura 10: qui vi è una buona corrispondenza nelle aree prive di copertura vegetale (Zona 1, strada) ed in quelle sottostanti la vegetazione ad alto fusto (Zona 3), mentre lo scostamento raggiunge 1.34 m fra le prime due dune (Zona 2), dove più fitto è il sottobosco che, evidentemente, non è stato riconosciuto come vegetazione. Dove questa viene riconosciuta si genera una mancanza di punti ed il Grid è frutto di interpolazione fra punti distanti: in presenza di forti pendenze il profilo che si genera tende a sottostimare le quote maggiori e sovrastimare quelle minori (Zona 4 in Fig. 11).

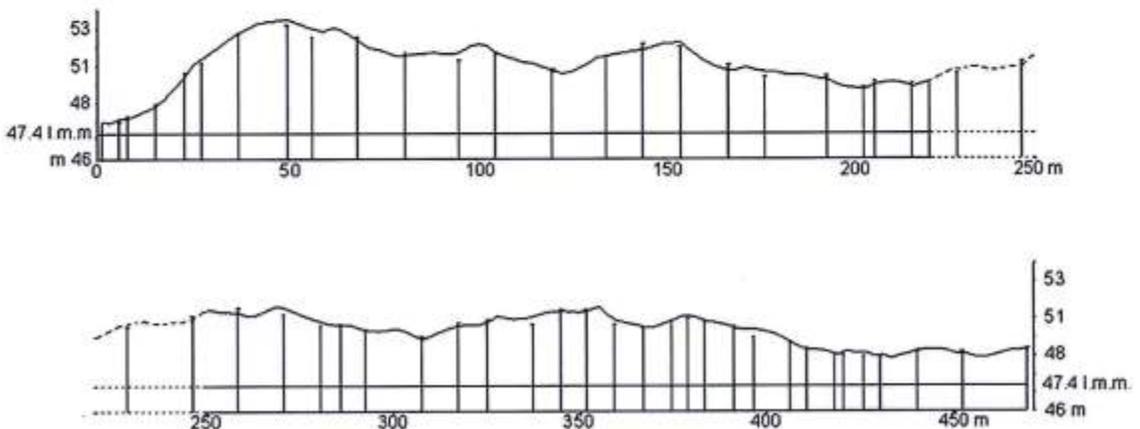


Figura 9 - Profilo 10.3 estratto dai dati LIDAR filtrati. Le aste verticali forniscono la quota dei punti di controllo rilevati con la Stazione Totale. Le quote sono riferite all'ellissoide che, localmente, è 47.4 m più basso del livello del mare.

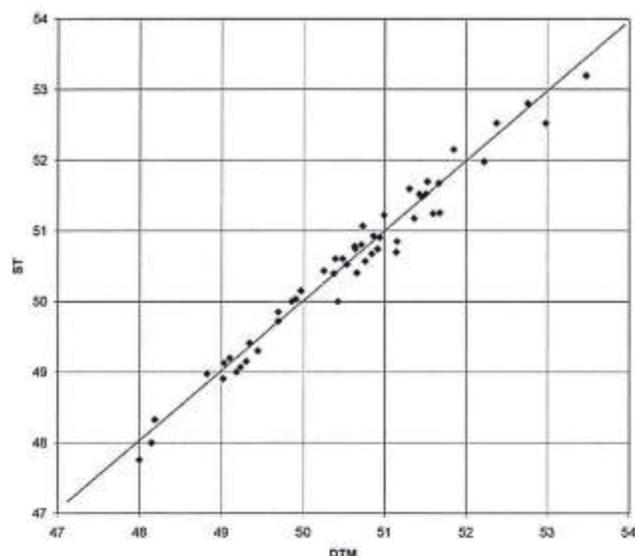


Figura 10 - Diagramma bivariato delle quote rilevate con il LIDAR e quelle ottenute con la Stazione Totale (Profilo 10.3).

che, essendo coltivate a grano, al momento del rilievo (Gennaio) avevano una scarsa copertura vegetale. Nella zona corrispondente alla pineta (omogenea nel profilo considerato), i valori dell'NDVI risultano piuttosto costanti e compresi in genere fra 0.5 e 0.7, ad indicare una copertura vegetale densa e ben distribuita, dovuta in parte anche al sottobosco. Confrontando le differenze fra la quota dei punti Grid e quella dei corrispondenti punti rilevati con la Stazione Totale con i valori di NDVI delle rispettive celle, si osserva che le discordanze sono minori dove la vegetazione è meno densa, ma che dove essa è più densa si possono avere valori sia positivi che negativi, a conferma di quanto detto in precedenza.

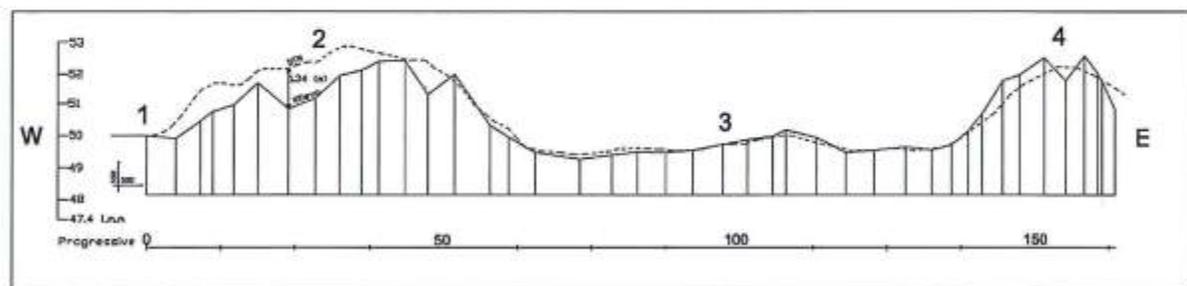


Figura 11 - Confronto fra un profilo topografico (N. 8.3) estratto dal Grid prodotto con i dati LIDAR e quello rilevato a terra con la Stazione Totale. E' in questa sezione che si sono registrati gli scostamenti massimi fra i due metodi utilizzati (esagerazione verticale 1:5; quote ellissoidiche). I numeri in neretto si riferiscono alla Zone di cui si parla nel testo.

Si può comunque affermare che il Modello Digitale del Terreno prodotto con il LIDAR aerotrasportato ha un'accuratezza sufficiente per consentire uno studio geomorfologico di dettaglio del sistema dunare. Ciò è sorprendente se si considera che tutta la fascia costiera, ad eccezione dell'abitato di Marina di Cecina, presenta una copertura boschiva completa, come appare dai valori delle immagini dell'NDVI, seppure costituita in prevalenza da pini la cui chioma è limitata ad uno strato di modesto spessore. Le potenzialità dei rilievi LIDAR appaiono evidenti dal confronto fra il DTM e la fotoaerea ripresa nel medesimo istante: mentre il primo permette un'accurata mappatura di numerosi cordoni dunari, la seconda non consente neppure l'identificazione di queste morfologie (Fig. 14).

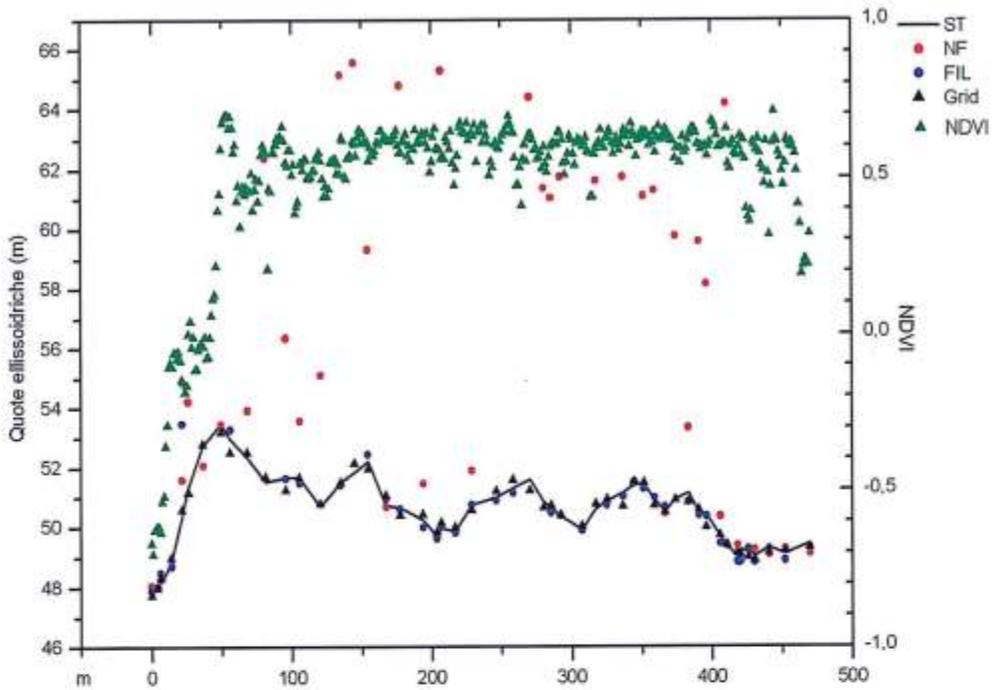


Figura 12 - Profilo topografico rilevato con la Stazione Totale lungo la Sezione 10.3. Vengono riportati anche i punti relativi ai *last-pulses* riconosciuti come vegetazione (NF), quelli identificati come suolo (FIL), e quelli che costituiscono il Grid. Con riferimento all'asse di destra sono riportati anche i valori dell'Indice di Vegetazione (NDVI) ricavato sullo stesso profilo dai dati CASI.

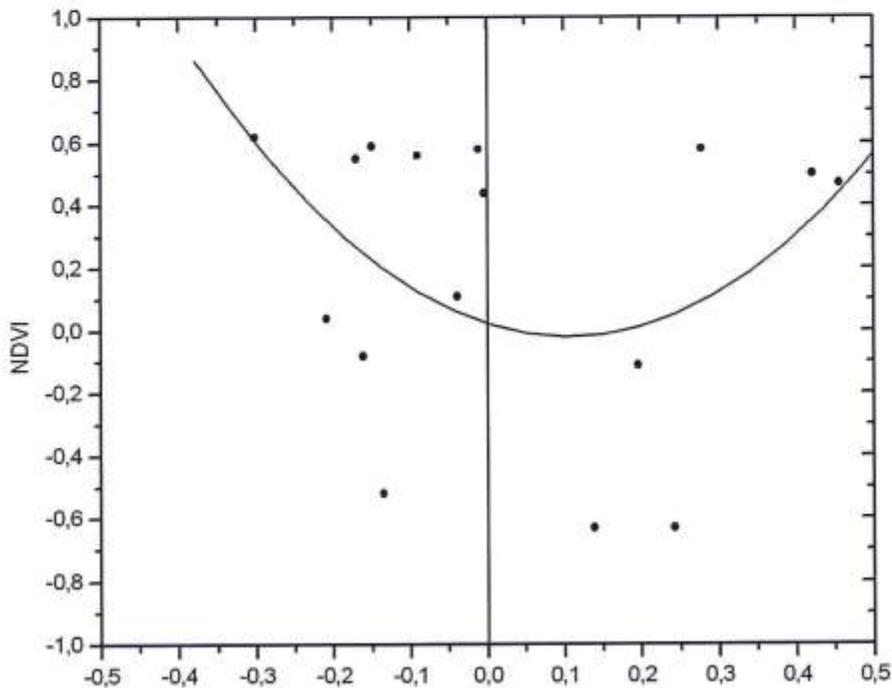


Figura 13 - Distribuzione dei valori di differenza fra DTM e ST in relazione al corrispettivo valore di NDVI nel Profilo 10.3.

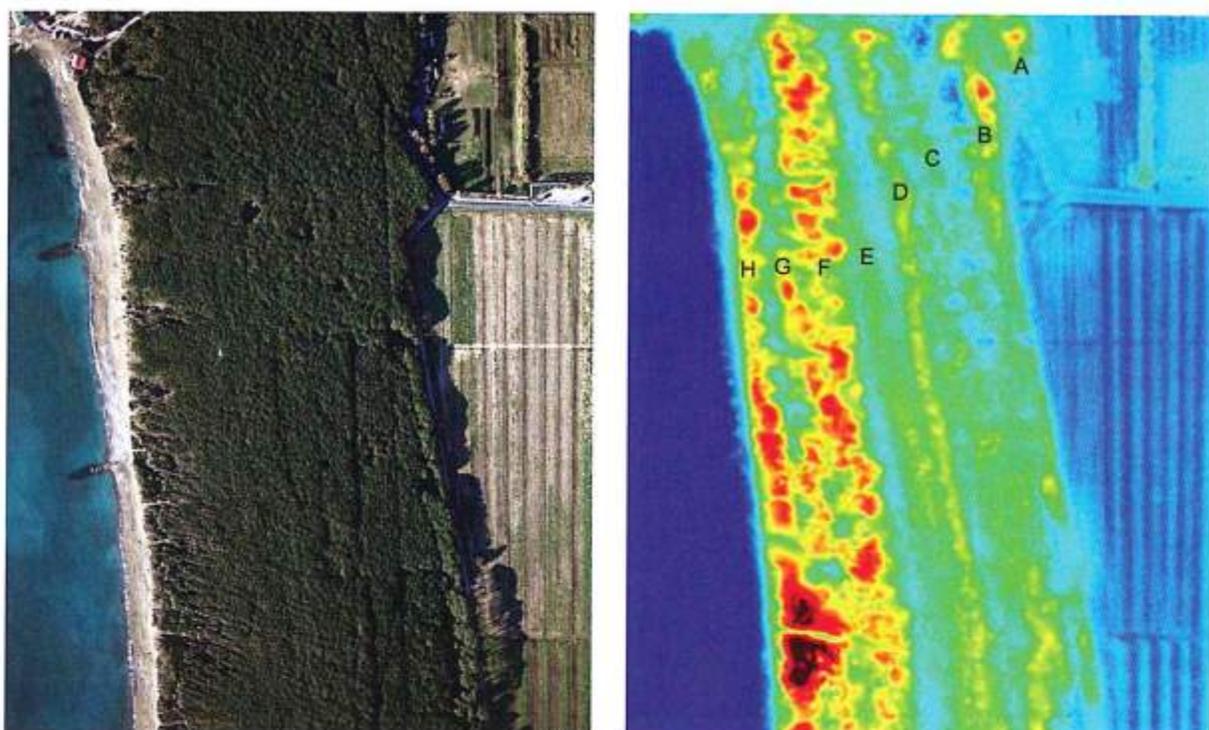


Figura 14 - Foto aerea del tratto di litorale posto a sud di Marina di Cecina (a sinistra) e DTM della stessa zona prodotto con i dati LIDAR (a destra).

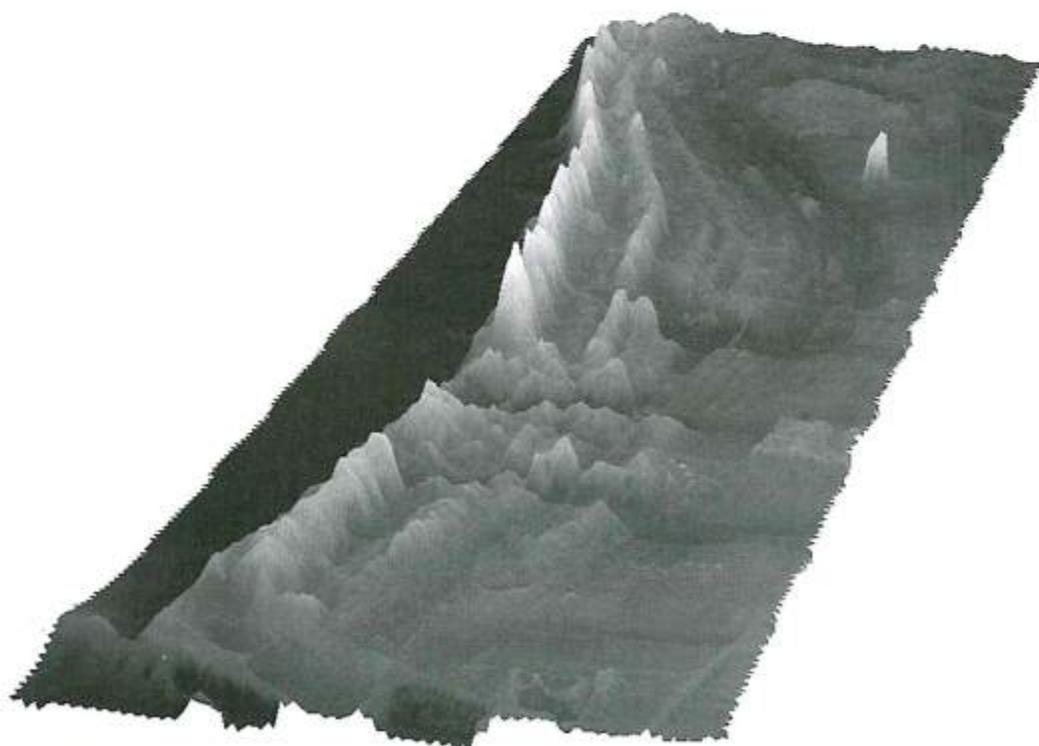


Figura 15 - Modello Digitale del Terreno della fascia costiera posta a nord della foce del Fiume Cecina (Zona A in Fig. 1). La forte esagerazione verticale (1:100) consente l'identificazione dei bassi cordoni posti all'interno nella parte settentrionale dell'immagine, associabili più a *beach ridges* che non a vere e proprie dune.

## Analisi del DTM

Il Modello Digitale del Terreno delle dune del litorale di Marina di Cecina consente di riconoscere le morfologie precedentemente identificate e ne permette anche una migliore descrizione e discriminazione.

Nel tratto settentrionale (Fig. 15) si riconoscono 9 cordoni dunari, più o meno continui, che possono raggiungere anche la quota di circa 6 m. Laddove si è persa la loro continuità, ed essi sono stati trasformati in dune a monticelli, come era stato precedentemente indicato (Pranzini, 1996), e il DTM consente di ricostruire l'allineamento della duna longitudinale da cui si sono sviluppate, ma solo in pochi casi si identificano i lobi del materiale spostato dal vento.

Ben evidenti sono i solchi corrispondenti agli attraversamenti pedonali, conseguenza del fatto che il numero limitato degli accessi concentra i visitatori su pochi percorsi.

Nella zona de Le Gorette sono evidenti i varchi che attraversano il sistema dunare per quasi tutta la sua larghezza e che si collegano alle aree depresse retrostanti, residuo delle paludi bonificate fra il XVIII e il XIX secolo. Dove questi tracciati attraversano i bassi interdunari si notano degli argini che, molto probabilmente, sono costituiti dal materiale di risulta dall'incisione dei canali. Tutto ciò avvalorava l'ipotesi che questi varchi sono stati creati artificialmente.

L'accuratezza del dato altimetrico consente di identificare anche i bassi cordoni presenti al limite delle zone agricole, come quello che ospitava la fornace romana e che è stato in parte spianato in anni recentissimi.

Nell'abitato di Marina di Cecina le dune sono state spianate quasi ovunque, fatta eccezione per il tratto meridionale, dove sono evidenti tre allineamenti. Il filtro che elimina vegetazione ed edifici è stato efficace e qui il Grid è stato generato con molte interpolazioni che rendono il DTM assai poco rugoso (Fig. 7).

Nel settore meridionale (Fig. 16) si riconoscono 8 allineamenti ben definiti ed altri cordoni meno regolari e di quota ridotta. Di particolare interesse è un piccolo cordone intermedio (E in Fig. 16) che, verso nord, viene decapitato (Kukavcic e Pranzini, 2003) dalla più interna di una coppia di dune longitudinali di notevole sviluppo: il piccolo cordone, poco più che un *beach ridge*, disegna una costa che doveva essere assai prominente alla foce del fiume e quindi associabile ad un periodo di intenso input fluviale. I cordoni successivi sono meno prominenti ma assai più imponenti, quali quelli che si sviluppano in periodi di lenta crescita di una spiaggia che comunque riceve una costante alimentazione. Una fase erosiva separa questi due periodi che, nel modello concettuale di Psuty (1992), sono riferibili a condizioni diverse del budget della duna e di quello della spiaggia.

Durante la fase erosiva è stato tagliato l'apice delta del Fiume Cecina al quale il piccolo cordone si raccordava. E' quanto avvenuto anche nel secolo scorso, quando il più esterno dei cordoni dunari, ora presente solo all'estremità meridionale dell'area studiata, è stato asportato dall'erosione che affligge tutt'ora questa costa.

Anche il cordone C (in Fig. 16) risulta convergere con il successivo D a delimitare, seppure in modo meno evidente, una fase erosiva ancor più antica di quella sopra citata.

Tracce di rimodellamento delle dune da parte del vento si ritrovano, in questa parte del litorale, nella fusione dei due cordoni maggiori e in numerosi *blow-outs* presenti in essi, ma anche nei più piccoli cordoni interni. Purtroppo non si hanno al momento elementi per datare questi processi ed associarli eventualmente a periodi di forte disboscamento, quale quello conseguente alla liberalizzazione del taglio dei boschi attuata in Toscana nel '700 dai Lorena e ritenuta responsabile, oltre che dell'aumento dell'input fluviale in tutta la regione (Pranzini, 2001), anche della rimobilizzazione delle dune in un tratto di litorale posto poco più a sud di quello qui studiato (Mazzanti et al., 1980). Considerando che la pineta è stata impiantata nella prima metà dell'800, è probabile che il rimodellamento eolico abbia agito anche in questo periodo.

Anche in questa parte del sistema dunare si riconoscono alcuni percorsi che collegano la strada che corre sul margine interno della pineta al mare. Su questi allineamenti, all'incisione dei cordoni fa riscontro la deposizione della sabbia nel tratto interdunare dove si viene a costituire di un rilevato: si tratta in pratica di *blow-outs* consecutivi.

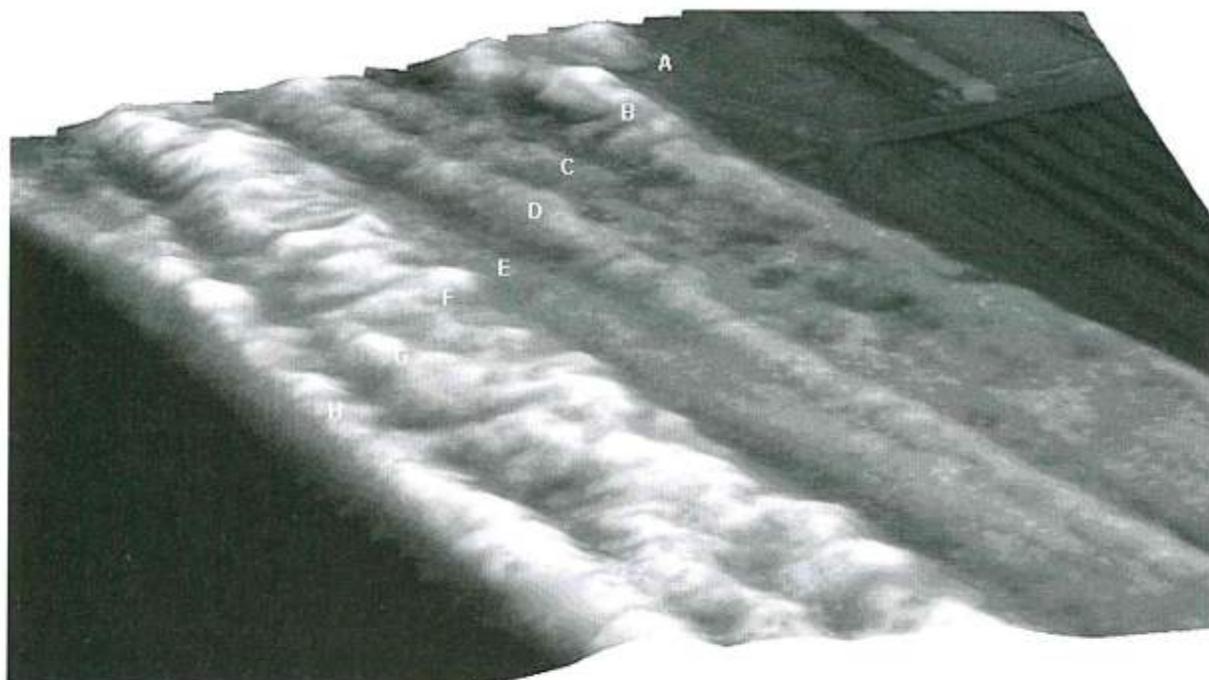


Figura 16 - Modello tridimensionale del terreno della parte settentrionale del settore C. Si nota il basso cordone sabbioso E "decapitato" da quello più esterno F e segno di una fase erosiva della costa. Simile andamento lo si rileva nel cordone più interno C che viene intersecato dal D.

### Conclusioni

I dati ALTM consentono la generazione di Modelli Digitali del Terreno (DTM) di buona precisione anche in aree con una copertura vegetale piuttosto densa. Laddove il segnale (*last-pulse*) non riesce a raggiungere il suolo il filtro vegetazionale è spesso capace di rimuovere il punto, ma il Grid che si genera viene qui interpolato, creando punti che possono stare sia sopra che sotto la superficie topografica reale.

L'elaborazione dei dati acquisiti ha consentito una fedele ricostruzione del sistema dunare di Marina di Cecina, sulla quale è stato possibile riconoscere numerosi elementi d'interesse. Primi fra tutti due cordoni decapitati da cordoni successivi che identificano due fasi erosive nel processo di formazione del delta del Fiume Cecina. Nella zona de Le Gorette è stato possibile ritrovare tracce dell'intervento che l'uomo ha fatto per aprire dei varchi in modo da favorire il deflusso dalle zone depresse retrostanti, riconoscendo quindi che queste incisioni non sono da attribuire a tagli operati dal fiume.

I numerosi *blow-outs* identificati sui vari cordoni hanno messo in evidenza quanto l'attività antropica abbia influito sull'evoluzione morfologica di quest'area; attività che oggi è limitata all'attraversamento del sistema dunare per raggiungere la spiaggia. Anche questa, comunque, lascia tracce evidenti sulla morfologia delle dune.

Il DTM generato con i dati LIDAR e le indicazioni tratte dalla sua lettura costituiscono un materiale importante per impostare un corretto piano di gestione di questa fascia costiera, piano difficilmente impostabile con i dati cartografici prodotti con i tradizionali sistemi di rilievo.

### Ringraziamenti

Lo studio è stato condotto nell'ambito del Progetto di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN) *I depositi eolici delle coste italiane e il flusso di sedimenti spiaggia-duna*, utilizzando anche dati acquisiti con il Progetto Beachmed (INTERREG III B).

Si ringrazia l'Ing. Tonino Tarsi, dell'Aquater S.p.A., per le informazioni sull'ALTM fornite con estrema disponibilità e cortesia.

## Bibliografia

- Barsanti D. e Rombai L. (1986) - *La "Guerra delle acque" in Toscana. Storia delle bonifiche dai Medici alla Riforma Agraria*. Edizioni Medicea, Firenze. 170 pp.
- Beachmed (2004) - *3° Quaderno tecnico*. Commissione Europea, Dir. Generale alle Politiche Regionali e alla Coesione. Programma operativo INTERREG III B, Misura 4.3: Protezione e valorizzazione del patrimonio naturale e culturale, gestione della biodiversità, dei territori e dei paesaggi. Spazio del Mediterraneo Occidentale. 278 pp.
- Haxel J.H. e Holman R.A. (2004) - *The sediment response of a dissipative beach to variations in wave climate*. *Marine geology*, 206: 73-99.
- Irish J.L. e White T.E. (1998) - *Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry*. *Coastal engineering*, 35: 47-71.
- Krabill W.B., Wright C., Swift R., Frederick E., Manizade S., Yungel J., Martin C.F., Sonntag J., Duffy M., Hulslander W. e Brock J. (2000) - *Airborne laser mapping of Assateague National Seashore Beach*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66: 65-71.
- Kukavacic M. e Pranzini E. (2003) - *Beach ridges and dunes of the Arno River delta*. Medcoast Conference, Ravenna, Ottobre 2003, pp. 1413-1424.
- Mazzanti R., Pranzini E. e Taccini S. (1980) - *Studi di geomorfologia costiera: VII - Variazioni della linea di riva dal Pleistocene medio-superiore ad oggi, caratteristiche sedimentologiche e stato delle associazioni vegetali del litorale di San Vincenzo (Toscana)*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 99: 341-364.
- Okagawa M. (2001) - *Algorithm of multiple filter to extract DSM from LIDAR data*. ESRI User Conference. Pap. 986., 12 pp. [http://gis.esri.com/library/userconf/proc01\\_professional/papers/pap986/p986.htm](http://gis.esri.com/library/userconf/proc01_professional/papers/pap986/p986.htm).
- Pranzini E. e Simeoni U. (2005) - *Morfologia delle dune costiere*. In *Le dune costiere in Italia*, a cura di U. Macchia, E. Pranzini e P.E. Tomei, Felici Editore, Pisa. Pp. 93-113.
- Pranzini E. (1996) - *Carta geomorfologica della fascia costiera del Comune di Cecina*. ARCA, Firenze.
- Pranzini E. (2001) - *Updrift river mouth migration on cusped deltas: two examples from the coast of Tuscany (Italy)*. *Geomorphology*, 1-2: 125-132.
- Psuty N.P. (1992) - *Spatial variation in coastal foredune development*. In *Coastal dunes: Geomorphology, Ecology and Management*. A cura di R.W.G. Carter, T.G.F. Curtis e M.J. Sheehy-Skeffington. Balkema, Rotterdam. Pp.3-13
- Stockdon H.F., Sallenger A.H., List J.H. e Holman R.A. (2002) - *Estimation of shore position and change using Airborne Topographic Lidar data*. *Journ. Coastal Research*, 3: 502-513.
- Woolard J.W. e Colby J.D. (2000) - *Spatial characterization, resolution, and volumetric change of coastal dunes using airborne LIDAR: Cape Hatteras, North Carolina*. *Geomorphology*, 48: 269-287.

Manoscritto ricevuto il 19/07/2005; accettato il 20/10/2005.

## Le dune costiere oloceniche prossimali lungo il litorale del Lazio

Valentina Campo<sup>1</sup> e Giovanni Battista La Monica<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Servizio Geologico d'Italia - Dipartimento Difesa del Suolo - APAT - Via Curtatone, 3 - 00185 Roma.

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Roma "La Sapienza".

### Riassunto

Vengono esposti i risultati di uno studio realizzato sul litorale del Lazio, ma esteso anche sul tratto costiero meridionale toscano, fino al Promontorio dell'Argentario, utilizzando prevalentemente fotografie aeree e ortoimmagini. Dalla fotointerpretazione sono stati ricavati i tematismi relativi ai cordoni dunali, presenti su buona parte della costa in esame, alla vegetazione e alle infrastrutture. I risultati ottenuti permettono di conoscere l'estensione e le caratteristiche principali delle dune litoranee rilevate in scala 1:10.000; i dati, che hanno permesso di costruire un GIS (Geographic Information System), aggiornabile ed integrabile anche con informazioni di altro tipo, costituiscono un importante archivio di informazioni che possono essere analizzate ed elaborate per scopi diversi.

**Parole chiave:** ambiente costiero, dune, GIS, Lazio -Toscana meridionale, Italia.

### Abstract

*The aim of this research is to study the state of Holocene coastal dunes of Latium and of the southern coastal shoreline of Tuscany, Italy, in relation to the dune-beach sedimentary budget and to constitute a geographic database, creating a GIS, at the scale 1:10.000, updated to 1998-'99, and integrated with existing data, cartographic documents and more recent information, deduced from direct observations (in-situ). Making use mostly of aerial photographs dune features, beach vegetation units and infrastructures were mapped and digitised to create a geocoded data set. The obtained data can therefore be analyzed and elaborated for various purposes.*

**Keywords:** coastal marine environment, dune, GIS, Latium - southern Tuscany, Italy.

### Premessa

Lo stato delle coste in Italia, caratterizzate per il 61% da arenili gran parte dei quali risulta attualmente in erosione, pone la necessità di salvaguardare gli ecosistemi costieri che costituiscono entità complesse e dinamiche con equilibri connessi sia alla componente marina che a quella terrestre. Tuttavia molto spesso non si dispone di informazioni sufficienti ad una più approfondita conoscenza di questi ambienti.

Il presente studio nasce proprio dall'esigenza di fornire un quadro a scala regionale della situazione delle dune costiere del tratto costiero laziale: passando attraverso il rilevamento dei cordoni dunali, la costruzione di una banca dati geografica e un atlante GIS, in scala 1:10.000, aggiornati al 1998-'99, e l'integrazione con dati esistenti, documenti cartografici e informazioni puntuali più recenti, desunte da rilievi diretti, si è cercato di creare un sistema flessibile sul quale avviare un monitoraggio di questo tratto di litorale.

Bisogna infatti considerare che lo stato di conservazione di queste dune e delle spiagge, in alcuni tratti del litorale in studio, è anche strettamente legato a quello degli altri ecosistemi contigui, di estrema importanza, quali gli ambienti umidi retrodunali, le lagune ed i laghi costieri, tutti ecosistemi che, oltre alla funzione strettamente ecologica, hanno notevole valore economico, diretto ed indiretto.

Più in particolare l'esame della fascia costiera è stato rivolto ad alcuni degli elementi principali che permettono di definire i caratteri dei sistemi dunali, al fine di valutare le modificazioni subite degli originari equilibri dinamici geologici e vegetazionali e dell'eventuale stato di crisi dell'intero ecosistema.

Con il progressivo sviluppo del sistema GIS realizzato sarebbe pertanto possibile una quantificazione del rischio costiero ai fini della pianificazione territoriale, utilizzando allo scopo quei parametri e quegli indicatori, impiegati in letteratura, che possono essere facilmente indicizzati.

La situazione del litorale laziale, come è noto, presenta una generale condizione di diminuzione dell'ampiezza delle spiagge (almeno il 40% del litorale di competenza regionale è in arretramento - Regione Lazio 2000). Con la realizzazione di un Piano Generale della Difesa delle Coste (Regione Lazio, 2001) è stato costituito l'Osservatorio regionale dei litorali con il compito di monitorare le coste e la loro evoluzione. Su di esse, infatti, grava anche una assai intensa pressione turistica, infrastrutturale e urbanistica.

E' accertato che la crescente pressione antropica degli ultimi decenni ha fortemente e direttamente pesato sull'evoluzione di un ambiente già di per sé tanto vulnerabile, modificando le componenti ambientali e, in alcuni casi, accelerando l'erosione delle spiagge (Caputo et al., 1983, Evangelista et al., 1983). E il litorale laziale non rappresenta un caso isolato.

Più in generale, i risultati di uno studio condotto dal WWF Italia ("Progetto Oloferne" - 1996-'97) sullo stato di urbanizzazione delle coste italiane indicano che si va da valori massimi di aree completamente libere da occupazione, pari al 73.6 % in Sardegna, a valori minimi, addirittura dello 0 % in Abruzzo, con situazioni ancora buone o discrete in Basilicata (54.9%), Toscana (43.3%), Veneto (40.2%), Emilia Romagna (29.2%) e Friuli-Venezia Giulia (25.4%), molto preoccupanti in Campania (6.5%), Marche (8.3%) e Molise (4.3%), e valori attestati circa tra il 14 e il 18% nelle rimanenti regioni.

### Area di studio

Lo studio è stato realizzato sull'intero litorale regionale, compreso tra il Fosso del Chiarone, a nord, e Gaeta, a sud. Il tratto costiero Gaeta - Garigliano non è stato preso in considerazione in quanto compreso in un'altra più ampia unità fisiografica, appartenente alla Campania, che si estende almeno fino alla foce del Fiume Volturno. L'indagine è stata estesa per altri 20 km anche al tratto costiero toscano più meridionale (Fosso del Chiarone - Promontorio dell'Argentario) al fine di chiudere l'unità fisiografica laziale più settentrionale.

La fascia costiera analizzata, con una lunghezza complessiva di oltre 300 km, ha andamento NW-SE ed è principalmente costituita da spiagge sabbiose, che si sviluppano per circa 250 km, e da coste rocciose e articolate, di minore estensione, localizzate soprattutto nella parte centro-meridionale della regione - area compresa tra Sperlonga e Gaeta - propaggini sud-occidentali dei Monti Aurunci - e Promontorio del Circeo, e in quella più settentrionale, lungo la fascia da Civitavecchia a S. Marinella - propaggini occidentali dei Monti della Tolfa (D'Alessandro et al., 1986).

Per quanto attiene a una sommaria definizione del regime dei venti che agiscono sul litorale del Lazio, è opportuna una suddivisione in tratti distinti, corrispondenti grossomodo alle unità fisiografiche, definendo per ciascuno di essi una o più stazioni anemometriche di riferimento. Per il tratto compreso tra l'Argentario e Capo Linaro, le stazioni individuate sono quelle di M. Argentario, per la parte toscana, e di Civitavecchia per quella laziale. La prima registra come regnanti i venti da SW e subordinatamente da sud che, tra i foranei, sono quelli che fanno registrare le massime velocità; i dati della stazione di Civitavecchia indicano come regnanti i venti da SE, ai quali seguono con elevate frequenze quelli da sud e da NW; i venti foranei dominanti provengono da SW e sono particolarmente intensi e frequenti nel semestre freddo (Lupia Palmieri e Tortora, 1980).

Scendendo a sud, tra Capo Linaro e Anzio, nella stazione di Fiumicino (considerata la più rappresentativa del medio Tirreno) si osserva la prevalenza in inverno dei venti del IV e del I quadrante, una rotazione oraria verso SE in primavera, un'ulteriore rotazione verso ovest in estate, con intensità più moderata; quindi, dall'estate all'inverno la rotazione si inverte in senso antiorario, passando di nuovo al II quadrante durante l'autunno (Noli et al., 1996). Il litorale risulta, inoltre, interessato durante tutto l'anno da brezze (Caputo, 1983).

Infine, ancora più a sud, alla stazione di Torre Olevola (San Felice Circeo), l'andamento generale indica una prevalenza dei venti spiranti lungo una diagonale NW-SE: questi, per la maggior parte, sono caratterizzati da valori bassi e medi, in termini di forza di Beaufort; dalla rosa annuale dei venti risulta, inoltre, che anche i venti da est si presentano intensi, con valori di Beaufort ben più elevati (Noli et al., 1996).

## Materiali e metodi

Il rilevamento delle forme si è basato sostanzialmente sull'interpretazione di fotografie aeree da bassa quota e sull'analisi di ortoimmagini numeriche del Volo Italia (Fig. 1), riferite al 1998-'99, realizzate dalla CGR (Compagnia Generale Riprese Aeree - Parma) ed esaminate via web, per concessione del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio - Direzione V.I.A.



Figura 1 - Ortofoto b/n del Volo Italia 1988-89, realizzate dalla CGR (Compagnia Generale Riprese Aeree - Parma) ed esaminate via web per concessione del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio. A sinistra, in alto il tratto costiero toscano dal Fosso del Chiarone all'Argentario, sotto il litorale laziale.

Le ortoimmagini hanno costituito anche il supporto "cartografico" di base su cui rappresentare i dati. Dal momento che la ricerca è stata svolta nell'ambito di un progetto di rilevante interesse nazionale, avente come obiettivo lo studio dei depositi eolici delle coste italiane e il flusso di sedimenti spiaggia-duna, era stata definita e messa a punto, dai ricercatori partecipanti, una procedura per trasferire i dati rilevati dalle fotografie aeree direttamente su ortofotografie georeferenziate, utilizzando come sistema informativo territoriale il software ArcGIS 8.2 della Esri - Italia.

Riassumendo sinteticamente le diverse fasi del lavoro, inizialmente è stata compiuta una raccolta di materiale bibliografico e cartografico e si è poi provveduto all'acquisizione delle coperture aeree stereoscopiche. Queste hanno reso possibile l'analisi fotointerpretativa che, in alcuni casi, è stata anche supportata da controlli di terreno per accertare la qualità del lavoro fotointerpretativo.

Nell'ultima fase, quindi, è stato creato un GIS nel quale sono stati inseriti ed elaborati tutti i dati ottenuti.

Più in particolare, per la fotointerpretazione sono state analizzate fotografie aeree pancromatiche b/n da alta (Volo Italia 1988-'89, in scala nominale 1:70.000) e da bassa quota, ma è stato soprattutto attraverso le immagini da bassa quota che si è effettuato il rilevamento e la caratterizzazione delle dune. Si tratta di circa 300 fotogrammi, in scala nominale 1:13.000, appartenenti a coperture aerofotografiche stereoscopiche pancromatiche b/n realizzate da ditte diverse (Rossi – Brescia e Alisud – Portici) ma tutte riferite al 1998-'99. La buona qualità dei fotogrammi e, soprattutto, l'elevata risoluzione a terra (circa 50 cm) hanno consentito di rilevare altresì gli elementi descrittivi della condizione attuale dei cordoni dunali, distinguendone lo stato di attività, la densità della vegetazione, l'antropizzazione e la condizione di degrado.

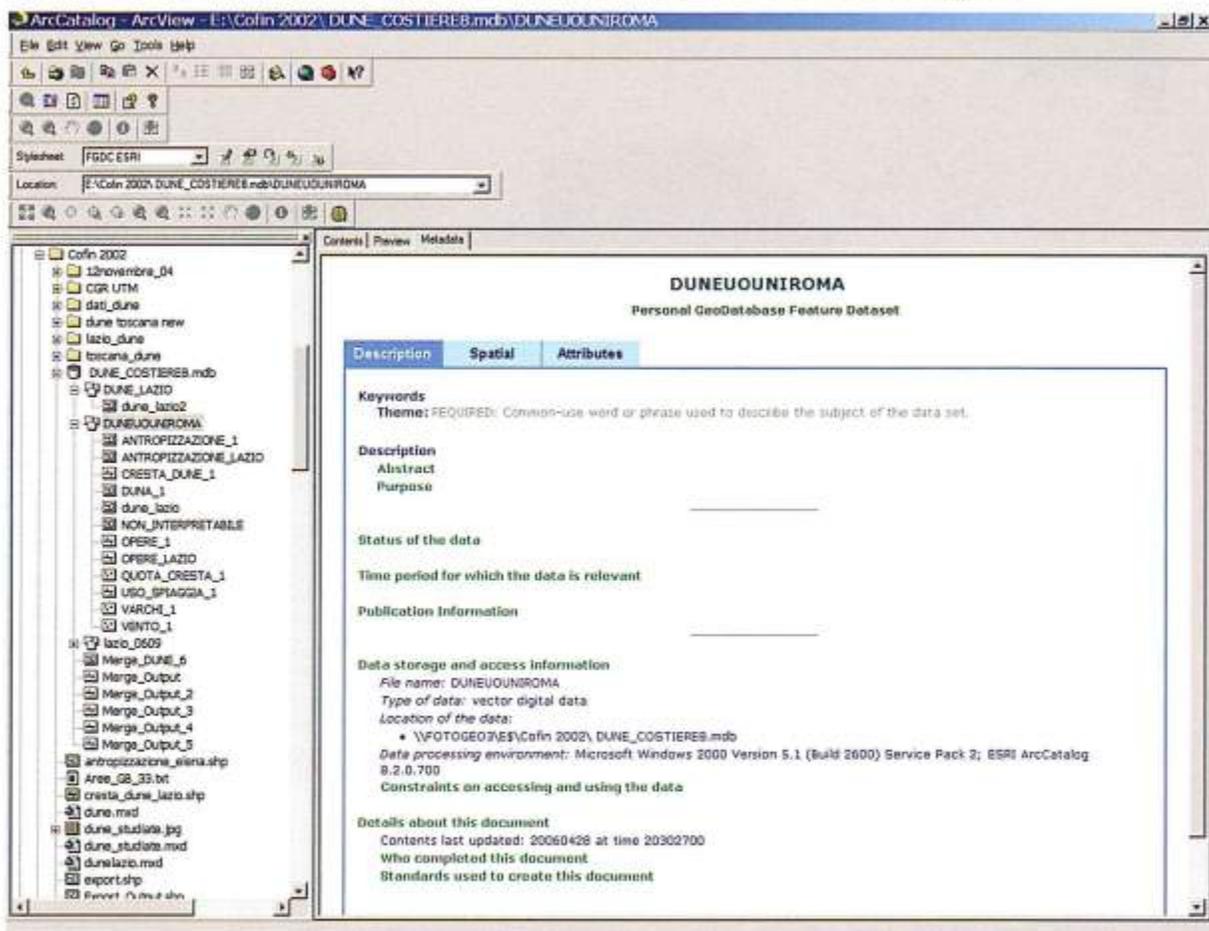


Figura 2 - Esempio di strutturazione del data base della “Banca Dati Dune”, dal modulo ArcCatalog del software ArcGis.

L'analisi fotointerpretativa si è rivelata una efficace e conveniente tecnica per il rilevamento anche di dettaglio degli elementi morfologici caratteristici dell'ambiente costiero, nel quale si sviluppano i sistemi dunali.

La percezione della tridimensionalità degli oggetti fotografati ed il conseguente effetto di esagerazione verticale del rilievo, caratteristiche peculiari della fotointerpretazione, si sono rivelati assai utili in un contesto territoriale in cui domina una morfologia pressoché pianeggiante; è stato così possibile riconoscere forme che sarebbero risultate di difficile identificazione nella visione non stereoscopica delle ortofotografie sulle quali sono stati rappresentati, in fase finale, i dati rilevati.

Per la classificazione degli elementi fotointerpretati si è fatto riferimento alla legenda già predisposta della “Banca Dati Dune” (Fig. 2), messa a punto su scala nazionale per l'organizzazione e l'elaborazione di tutti i dati delle coste italiane all'interno del GIS.

Tramite la fotointerpretazione sono stati delimitati i cordoni dunali (*poligono duna*), distinguendone lo

stato di attività (nel senso di apporto di sedimenti) e la direzione di allungamento (*cresta*) con le relative quote (ricavate dalla CTR della Regione Lazio); particolare importanza è stata data alla individuazione di elementi di discontinuità (*varchi*), sia naturali che antropici, e sono state indicate con il termine *opere* quelle strutture aderenti che influiscono sul bilancio sedimentario spiaggia/duna, realizzate per mitigare l'erosione costiera. Con il termine *uso spiaggia* sono stati indicati altri tipi di infrastrutture quali gli insediamenti di tipo turistico-balneare, rappresentati anche in questo caso da elementi lineari. Si è provveduto, inoltre, alla definizione della copertura del suolo, evidenziando la presenza di aree urbanizzate (*antropizzazione*) e la *vegetazione*, distinguendone tipo e attività.

L'attività finale, come già accennato, è consistita nell'informatizzazione dei dati, trasferendo i risultati dell'analisi fotointerpretativa all'interno di un sistema, al fine di creare uno strumento con caratteristiche di flessibilità e versatilità, che risultasse facilmente fruibile dalle diverse categorie di utenti.

### Discussione e risultati

Lo studio ha messo in evidenza che tra i sistemi dunali cartografati non sono presenti dune integre o in un'accettabile stato di naturalità.

Più in particolare sono state individuate zone in cui la vegetazione naturale è ridotta a frammenti localizzati sulla duna mobile ed è ancora presente una spiaggia e sulle quali l'eliminazione delle cause del disturbo, congiuntamente a interventi di ripristino ambientale, potrebbero rendere possibile il recupero di condizioni naturali.

Complessivamente i cordoni dunali rilevati occupano una superficie superiore a 20 km<sup>2</sup>, interessando, con andamento subparallelo alla linea di riva e diversa ampiezza, un tratto di costa di circa 200 km di estensione totale (Fig. 3).

Su gran parte di queste dune è stata riconosciuta una copertura vegetale più o meno densa, prevalentemente di tipo arboreo, secondariamente di tipo arbustivo, con caratteristiche proprie della macchia mediterranea; l'analisi ha anche evidenziato uno stato di conservazione reso precario dall'antropizzazione che, in alcuni casi, è così intensa da compromettere le dune stesse, dando inizio al processo della loro demolizione. Molto rari sono risultati i tratti costieri in cui l'antropizzazione e/o l'urbanizzazione non sia ancora intervenuta in modo distruttivo (Fig. 4).

Nell'individuazione delle aree antropizzate si è tenuto conto sia di quanto riconosciuto all'interno delle dune stesse che dell'esistente al loro intorno, mentre per la vegetazione sono state distinte le varie comunità vegetali e la loro densità (Fig. 5), data l'estrema importanza che la copertura vegetale riveste per le funzioni di consolidamento ed accrescimento di questi depositi eolici.

L'elevato grado di urbanizzazione è testimoniato da numerosi nuclei abitativi che si susseguono, a distanze molto ravvicinate, lungo il litorale esaminato e che nel tempo, partendo da una fascia facente parte dell'immediato retrospiaggia, si sono ampliati in misura consistente sia parallelamente alla spiaggia che verso l'interno. Tali centri, in alcuni casi, risultano interrotti localmente da modeste fasce di rispetto in corrispondenza di collettori che riversano in mare le acque delle retrostanti bonifiche operate a partire dalla fine del XIX secolo fino agli interventi integrali degli anni del fascismo (1921-'30) su vaste aree paludose pianeggianti più interne. Questa situazione è ben evidente lungo tutto il litorale laziale. In particolare, in corrispondenza della fascia costiera della Maremma Laziale, che si estende per diverse decine di chilometri a nord della foce del Fiume Tevere, nel tratto compreso tra Fregene e Fiumicino (Fig. 6), l'urbanizzazione, caratterizzata principalmente da abitazioni secondarie di villeggiatura, nel tempo si è andata accentuando al punto che, attualmente, il sistema dunale appare quasi del tutto distrutto e spianato (La Monica e Raffi, 1996); si individuano solo sporadici lembi di uno o più cordoni di dune cui seguono, verso l'interno, depositi interdunari, molto spesso ricoperti da vegetazione cespugliosa e arbustiva, a luoghi anche molto fitta.

A Fregene, verso l'interno, si riconosce, inoltre, una vera e propria pineta. Scendendo a sud di Roma, lungo l'area costiera della Campagna Romana inferiore, il litorale è costituito quasi completamente da un arenile sabbioso di ampiezza e altezza variabili nei diversi tratti.

Oltrepassato il Lido di Ostia fino a Torvaianica (Fig. 7), una fascia sabbiosa ampia in alcuni punti anche oltre i 60 m precede una serie di dune e depositi interdunari ricoperti quasi del tutto da una fitta vegetazione arbustiva cui segue, sempre più all'interno, l'estesa zona delle pinete di Castel Fusano e di Castel Porziano. Proprio nel territorio protetto della Tenuta Presidenziale di Castel Porziano la spiaggia e le dune risultano ancora ben conservate.

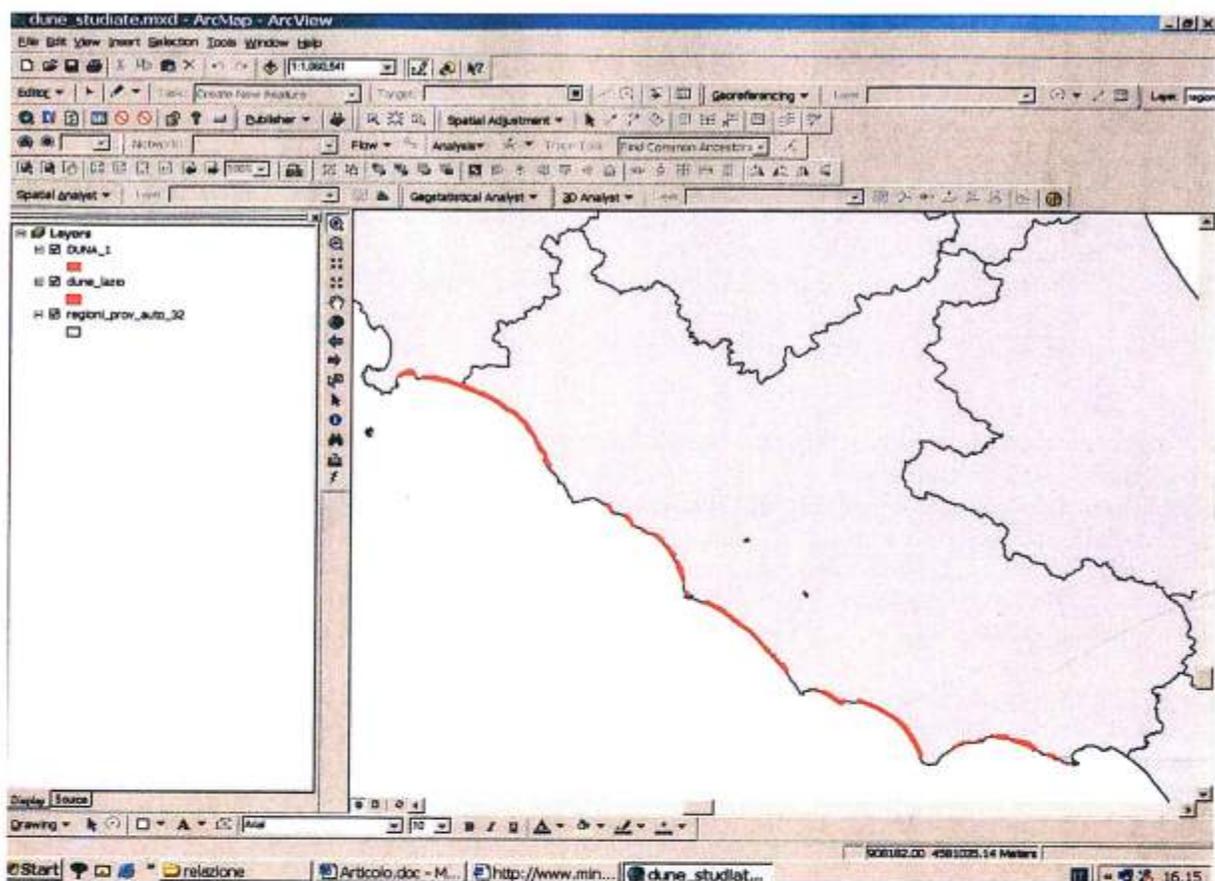


Figura 3 - Localizzazione delle dune (in rosso) lungo il litorale in studio.

La Tenuta, infatti, fino a diversi decenni fa rappresentava uno dei pochissimi ambienti costieri "incontaminati" dal punto di vista dell'utilizzazione antropica. Nel 1965 la parte meridionale della spiaggia di pertinenza della Tenuta (poi denominata I Cancelli), fu messa a disposizione del pubblico, quale spiaggia libera, con atto dell'allora Presidente della Repubblica On. Saragat e con l'impegno, del Comune di Roma, a "sistemare adeguatamente l'arenile, dotandolo di servizi igienici e di parcheggi". Agli impianti igienici e ai parcheggi, sempre più ampi, sono seguiti strade di collegamento interdunari, sentieri di accesso al mare e anche impianti di ricezione balneare.

Tutto ciò ha comportato una profonda alterazione delle dune e della loro copertura vegetale, rappresentata da una rigogliosa macchia. Attualmente è assai evidente il diverso stato di conservazione dei due litorali limitrofi (Tenuta Presidenziale e I Cancelli) ed è significativo che in tutto il litorale laziale le uniche zone in cui siano stati riconosciuti cordoni di dune non particolarmente degradati, sono quelle protette (parchi di diversa tipologia e poligoni militari). Là dove non è prevista alcuna tutela questo habitat è stato o è sul punto di essere completamente cancellato o quantomeno risulta fortemente degradato. Nel tratto di litorale adiacente la Tenuta di Castel Porziano è particolarmente sensibile l'azione erosiva delle correnti tangenti alla costa, createsi in seguito allo sbocco del Tevere poco più a nord. Le dune, alte qualche metro sul livello del mare, sono disposte pressoché regolarmente su due allineamenti. Quelle più lontane dal mare sono fissate da vegetazione stabile, mentre quelle più prossime al mare sono continuamente rimaneggiate dal vento e dalle invasioni marine stagionali, pur essendo colonizzate da vegetazione psammofila, con alcune tipiche piante fissatrici della sabbia.

Ancora più a sud lo sviluppo ininterrotto di aree urbanizzate prosegue lungo costa con densità variabile, pertanto risultano visibili solo lembi isolati e discontinui di preesistenti cordoni dunali.

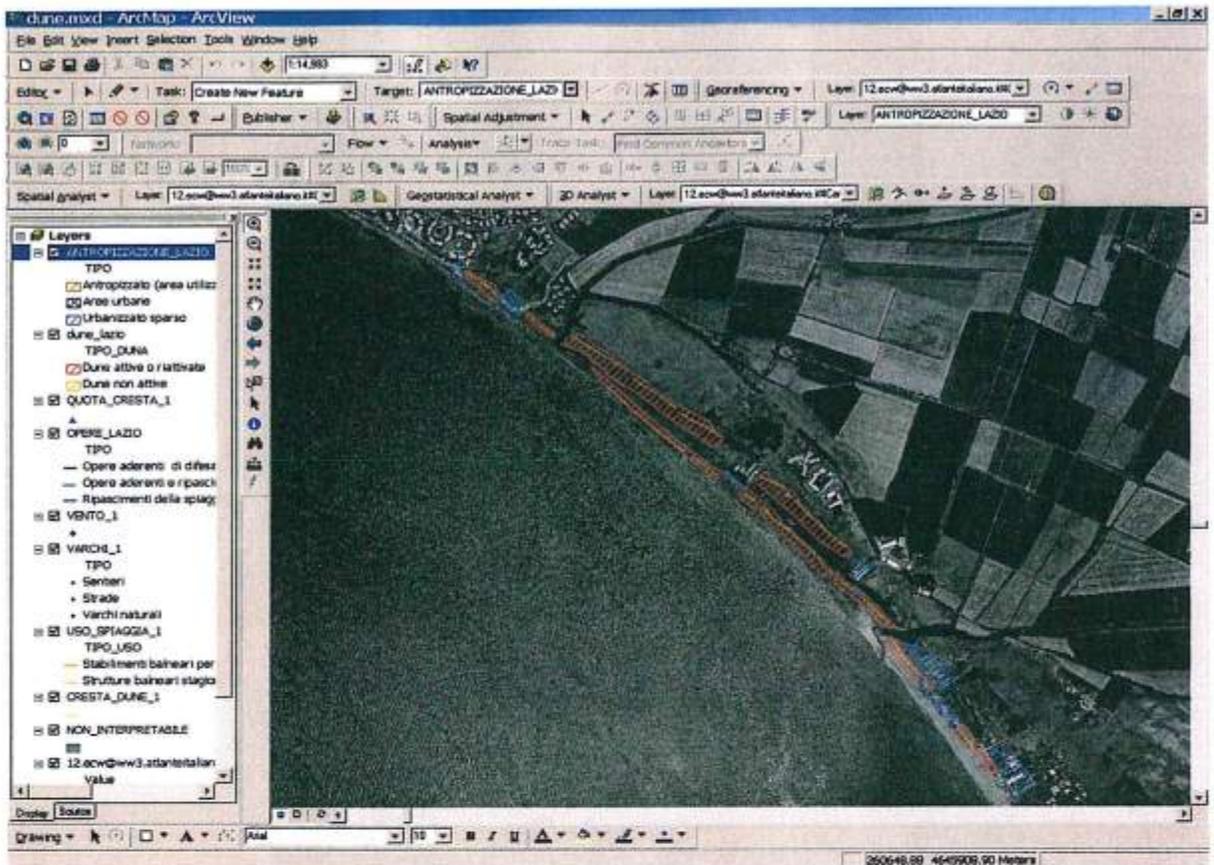


Figura 4 - Le dune nel litorale compreso tra Palidoro, a nord, e Passo Oscuro, a sud. E' uno dei rari tratti costieri in cui l'antropizzazione e/o l'urbanizzazione non è ancora intervenuta in modo distruttivo: si riconoscono uno o più cordoni di dune (in rosso), con vegetazione per lo più erbacea.

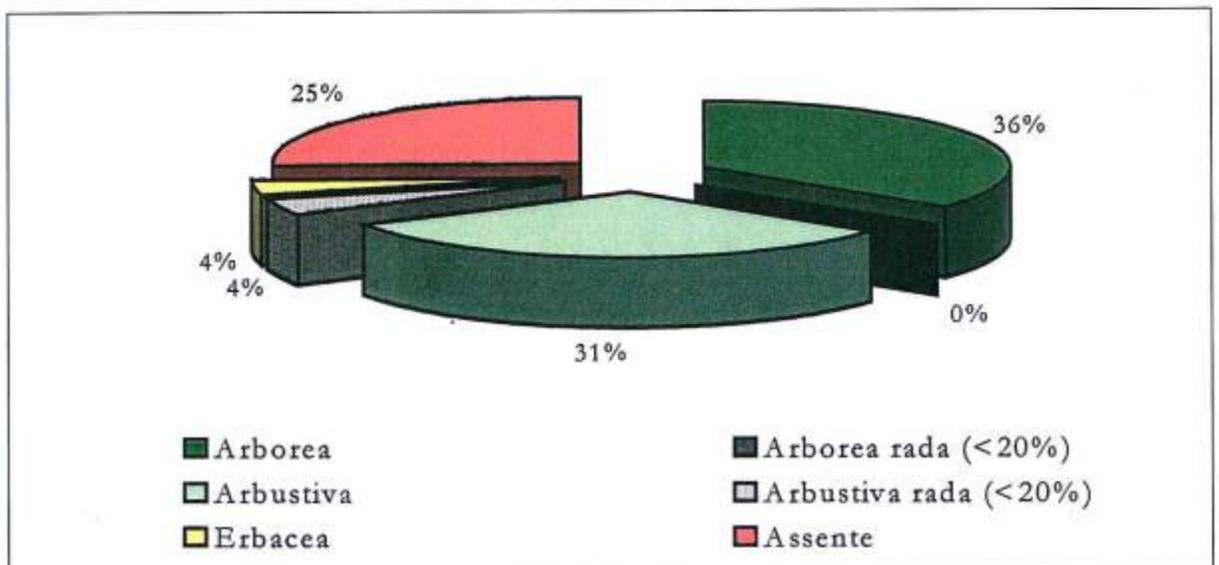


Figura 5 - Tipi e densità della vegetazione presente nelle dune studiate.

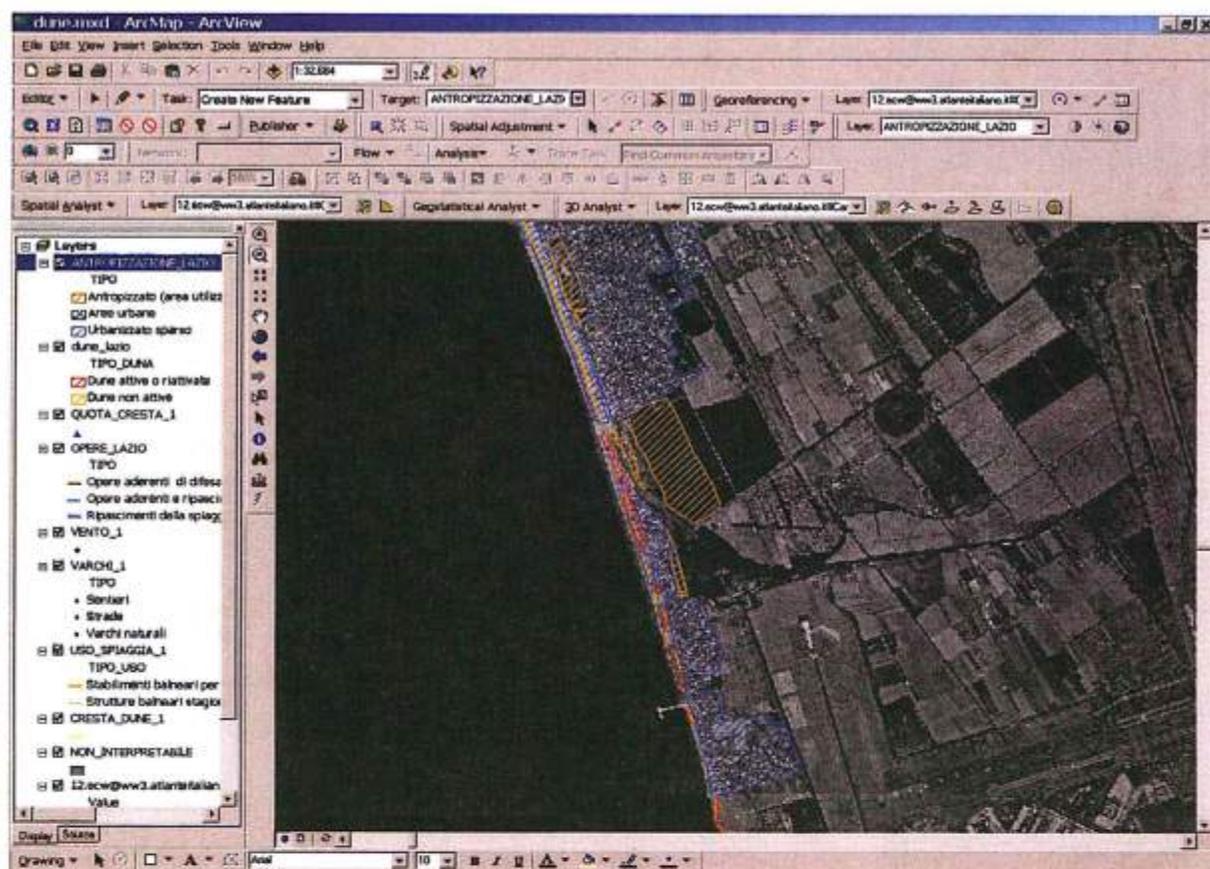


Figura 6 - Le dune nel litorale compreso tra Fregene, a nord, e Focene, a sud. L'elevato sviluppo dell'urbanizzazione (in tratteggio azzurro) ha completamente demolito il sistema dunale sul quale sorgono attualmente i due centri costieri; di questi cordoni si riconoscono ormai solo alcuni lembi isolati (in rosso e arancione).

Nel Lazio centro-meridionale, dal Lido di Latina fino al Promontorio del Circeo, le dune presentano uno sviluppo lineare di circa 25 km, un'ampiezza che mediamente si aggira intorno ai 120 m ma che può raggiungere anche valori superiori a 200 m, ed un'altezza che varia da 8 + 10 m sino ad un massimo di oltre 20 m; si tratta di un cordone in larga parte consolidato da vegetazione specializzata bloccato nella propria dinamica e nel meccanismo di autoprotezione (ossia il libero avanzamento ed arretramento che gli consentirebbe di limitare i danni prodotti dall'azione erosiva delle mareggiate) dalla strada litoranea, realizzata su di esso negli anni trenta, in corrispondenza del suo asse longitudinale (Fig. 8).

Quest'opera, oggi parzialmente abbandonata proprio a seguito dell'erosione costiera e non ricostruita per conservare la duna, non solo impedisce l'evoluzione morfologica naturale, ma accentua l'erosione da ruscellamento poiché contribuisce a concentrare le acque meteoriche. A ciò si aggiunge l'erosione del vento che approfondisce, e in particolare amplia, le canalizzazioni da ruscellamento, porta all'esposizione degli apparati radicali con conseguente impoverimento della copertura vegetale, asporta la sabbia (in tal modo definitivamente sottratta al meccanismo di conservazione della duna e conseguentemente della spiaggia) trasferendola nell'area pianeggiante retrodunale o nei bacini lacustri retrostanti la duna.

A tale azione "naturale" si aggiunge quella antropica. Infatti i solchi, purtroppo molto frequenti, vengono poi utilizzati per l'accesso incontrollato alla spiaggia e costituiscono una via da cui si dipartono zone di calpestio diffuso da parte di una popolazione di bagnanti e turisti che, in occasione della stagione estiva, raggiunge punte molto alte, insostenibili per un ambiente tanto vulnerabile. Le indagini effettuate hanno evidenziato come in questa zona l'attraversamento disordinato delle dune inneschi anche importanti fenomeni erosivi, il depauperamento della vegetazione autoctona e la diffusione di specie aliene.

Gli ambienti naturali e gli originari equilibri dinamici geologici e vegetazionali di questo tratto costiero, rela-

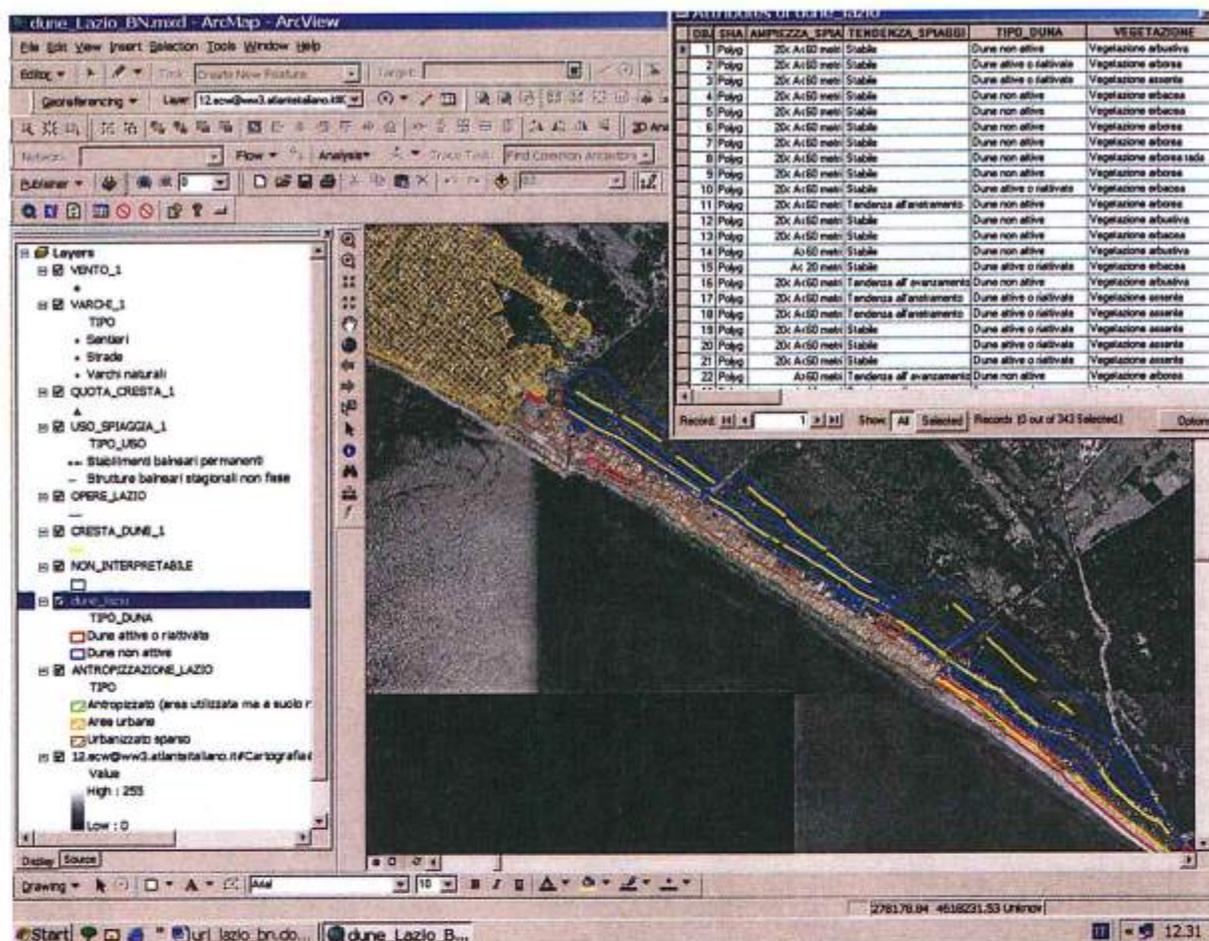


Figura 7 - Il litorale a sud del Lido di Ostia: si riconoscono lembi di dune (in rosso) non vegetati, cordoni dunali continui (in azzurro) ricoperti da una fitta vegetazione di macchia, che più all'interno diventa una pineta. In alto a destra la tabella (data base) con i vari attributi definiti per i poligoni "duna": stato di attività, ampiezza e tendenza (ossia avanzamento, arretramento ed equilibrio) della spiaggia antistante, vegetazione.

tivamente poco urbanizzato (almeno in alcuni tratti) risultano pertanto modificati e l'intero sistema è entrato in crisi. Infatti allo stato di conservazione di queste dune e della spiaggia antistante è strettamente legato quello degli ecosistemi contigui quali gli ambienti umidi retrodunali, le lagune ed i laghi costieri che, oltre ad assolvere una funzione strettamente ecologica, hanno notevole valore economico diretto e indiretto.

## Conclusioni

I meccanismi che contribuiscono a determinare l'elevato stato di degrado e di erosione, che presentano quasi tutte le dune rilevate nel Lazio e nel tratto costiero toscano meridionale, sono quindi principalmente legati al grado di antropizzazione e/o urbanizzazione del litorale, all'erosione costiera, alla fruizione turistica incontrollata.

E' pur vero che gli ecosistemi costieri sabbiosi, per loro stessa natura e collocazione topografica, debbono sempre confrontarsi con situazioni difficili e mutevoli nel breve e nel lungo termine, tuttavia le modificazioni operate dall'uomo creano un forte e devastante impatto, al quale difficilmente tali ambienti riescono a resistere.

Allo stato attuale l'equilibrio delle spiagge in studio appare quasi ovunque intaccato dagli interventi sul territorio (non solo costiero) e, di conseguenza, risulta alterato il flusso di sedimenti spiaggia-duna. Laddove tali interventi sono ancora limitati è possibile riconoscere i migliori esempi di dune: in corrispondenza della parte più settentrionale della regione, dalla foce del Chiarone fino a Bagni S. Agostino, il litorale è caratterizzato

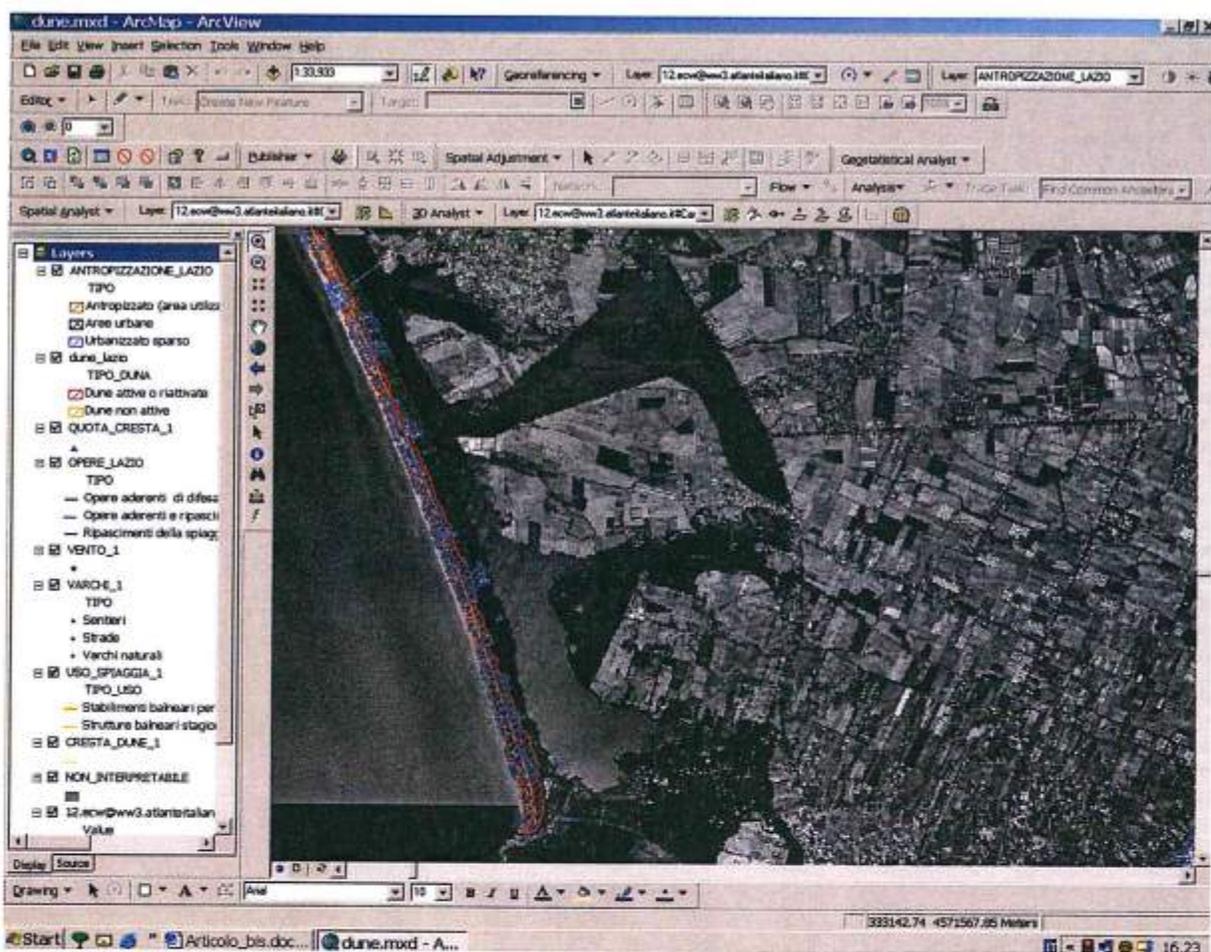


Figura 8 - Il litorale tra Sabaudia e il Promontorio del Circeo: è riconoscibile un unico cordone dunale, continuo, con un'ampiezza che può superare in alcuni punti anche i 200 m. La linea gialla, che indica l'asse longitudinale della duna, coincide con la strada litoranea. Alle spalle è visibile una parte del Lago di Sabaudia.

da spiagge ampie diverse decine di metri, bordate da sistemi di dune estesi e continui, attivi e/o in riattivazione, ricoperti da una vegetazione arborea e/o arbustiva piuttosto fitta, che appaiono in un discreto stato di conservazione.

Procedendo verso sud l'urbanizzazione comincia ad intensificarsi e raggiunge il massimo sviluppo ed espansione nel tratto che si estende da Ladispoli, passando per Fregene e Focene, fino a Fiumicino. Lungo questa fascia le dune individuate risultano discontinue, frammentate, interrotte da un elevato numero di varchi. Il loro stato di degrado è assai elevato e il sistema in alcuni punti appare ormai demolito.

Oltrepassato il Lido di Ostia, in corrispondenza della Tenuta Presidenziale di Castel Porziano, si individuano di nuovo cordoni dunali di una certa ampiezza ed estensione e una spiaggia antistante in grado di garantire una buona sopravvivenza, in termini di apporto di sedimenti. Continuando ancora più a sud, si torna a osservare una densità di urbanizzazione tale per cui risultano riconoscibili solo piccoli e isolati lembi di duna. La situazione resta invariata almeno fino a Nettuno. Poi, in corrispondenza dell'area del poligono militare di questa cittadina, lo stato di integrità paesaggistica, legato al divieto di accesso per la presenza del Poligono Militare, è notevole pur considerando la modesta distanza da Roma: tuttavia vi si risentono ampiamente gli effetti negativi degli interventi antropici effettuati nella contigua zona occidentale.

Da Torre Astura fino al Promontorio del Circeo, il litorale sabbioso risulta caratterizzato da un sistema dunale molto esteso, che gradualmente si innalza sempre più sul mare sino a raggiungere quote superiori a 20 m presso Torre Paola. Le condizioni di degrado di questa duna sono ben evidenti: la vegetazione appare discon-

tinua, sono presenti numerosi varchi e anche lo stato di antropizzazione è elevato. Non si può parlare dell'esistenza di centri urbani veri e propri, tuttavia è presente una diffusa urbanizzazione di tipo sparso.

Infine, fra i promontori di Terracina e di Gaeta, lungo la spiaggia della piana di Fondi, estesa per una quindicina di chilometri, si sviluppa, su buona parte di questa, un cordone dunale attuale, ampio anche fino a 100 m, caratterizzato da vegetazione arbustiva rada.

Nell'attuale situazione di forte antropizzazione dei litorali sabbiosi in esame, non è stato rilevato alcun cordone embrionale, in fase di crescita, antistante la duna: si sono osservati solo accumuli temporanei di sabbia legati alla presenza di recinzioni, che fungono da ostacolo al trasporto di sedimenti da parte del vento, non colonizzati da vegetazione.

Se i meccanismi naturali di auto-riparazione del sistema spiaggia-duna vengono definitivamente squilibrati dalla variazione indotta di qualche parametro ambientale, nessun intervento artificiale (apporti di sabbia alloctona, costruzione di dune artificiali, ecc.) potrà mai porre fine a danni come erosione o interrimento, ma solo ritardarli, a meno che non si ponga riparo anche alle cause iniziali dello squilibrio.

In base ai principi della geomorfologia dei litorali sabbiosi nessun intervento antropico può, quindi, essere in grado di ripristinare il ciclo evolutivo naturale di un sistema spiaggia-duna squilibrato da fattori di disturbo persistenti. Questo però non significa che un buon intervento di riqualificazione ambientale non possa rappresentare un'utile soluzione per riportare in pochi anni un ambiente litoraneo ad un accettabile grado di naturalità, purché siano stati rimossi, o almeno attenuati, i fattori di disturbo che ne avevano procurato la totale o parziale distruzione, e purché il sito in oggetto non sia totalmente isolato da altre zone costiere sabbiose che possano fungere da serbatoio naturale di ripopolamento.

#### Ringraziamenti

La ricerca è stata eseguita nell'ambito del Progetto di rilevante interesse nazionale "I depositi eolici delle coste italiane e il flusso di sedimenti spiaggia-duna" COFIN 2002/2004.

#### Bibliografia

- A.A. V.V. (1996) - *Relazione annuale sulle attività del WWF Italia*. Oloferne- Crociera 1996, vol. I: "Le arce libere costiere".
- Caputo C., D'Alessandro L., La Monica G.B., Landini B., Lupia Palmieri E. e Pugliese F. (1983) - *Erosion problems on the coast of Lazio, Italy*. In: "Coastal problems in the Mediterranean Sea. Proceedings of a Symposium held in Venice", 1982. I.G.U. Commission on the Coastal environment, Bologna.
- Caputo C. (1988) - *Evoluzione del litorale del Lazio centrale, effetti dell'antropizzazione e ipotesi di intervento per la difesa delle spiagge*. Atti del XXIV Congresso Geografico Italiano, estratto da "Nuova città, nuova campagna spazio fisico e territorio", Patron Editore, Bologna.
- D'Alessandro L., Evangelista S., La Monica G.B. e Landini B. (1986) - *Caratteristiche geomorfologiche e sedimentologiche del litorale fra Terracina e Sperlonga (Lazio Meridionale)*. Mem. Soc. Geol. It., 35: 811-818.
- Evangelista S., La Monica G.B. e Landini B. (1983) - *Antropizzazione e conservazione dei litorali. L'arco sabbioso Circeo - Terracina*. Bioclimatologia marina e talassoterapia, vol. 1, Ed. Universo, Roma, pp. 103-111.
- La Monica G.B. e Raffi R. (1996) - *Morfologia e sedimentologia della spiaggia e della piattaforma continentale interna*. Il mare del Lazio. Università degli Studi di Roma La Sapienza - Assessorato opere e reti di servizi e mobilità della Regione Lazio.
- Lupia Palmieri E. e Tortora P. (1980) - *Risultati preliminari delle indagini fisiografiche svolte su alcuni settori del litorale laziale*. Progetto Finalizzato Conservazione del Suolo - Sottoprogetto Dinamica dei Litorali - C.N.R. - Pubbl. n.123. Atti del XII Forum Rotary International, L'erosione delle coste.
- Noli A., De Girolamo P. e Sammarco P. (1996) - *Parametri meteo marini e dinamica costiera*. Il mare del Lazio. Università degli Studi di Roma La Sapienza - Assessorato opere e reti di servizi e mobilità della Regione Lazio.

Manoscritto ricevuto il 30/7/2005; accettato il 30/4/2006.

## Apporto sedimentario dalla spiaggia alla duna nella Tenuta Presidenziale di Castelporziano e ai Cancelli (Lazio centro-meridionale)

Piero Bellotti, Michele Di Filippo, Silvio Evangelista,  
Giovanni Battista La Monica, Valerio Minorenti

Dipartimento di Scienze della Terra, Università "La Sapienza", P.le A. Moro, 5 - 00185 Roma.

### Riassunto

Le dinamiche eoliche sono state studiate in due aree contigue gestite secondo differenti criteri (Tenuta Presidenziale di Castelporziano e Cancelli Comunali di Castelporziano). La ricerca ha valutato i tassi di trasporto eolico in funzione dei venti regionali basandosi sull'analisi delle variazioni granulometriche dello strato più superficiale del deposito e ha esaminato le variazioni topografiche dei profili. Il confronto tra i due siti ha permesso, inoltre, di valutare l'influenza dell'impatto antropico sulle dinamiche eoliche. Alla Tenuta il fattore principale che ha impedito un efficace trasporto del sedimento sembra essere stato il grado di copertura vegetazionale. Il *saucer blowout* analizzato è stato caratterizzato da un andamento marcatamente stagionale, con modesti accumuli durante l'estate e ingenti quantitativi di sabbia erosa durante l'inverno. Il rapporto tra il sedimento accumulato ed eroso ( $-1.762 \text{ m}^3/\text{m}$  su base annuale) appare indicare una migrazione del *blowout* lungo la direzione prevalente del vento. Per i Cancelli i fattori decisivi appaiono essere quelli correlati con le attività antropiche (livello del flutto montante durante le principali mareggiate, ripida pendenza del lato sopravvento della duna, versamento di elementi grossolani provenienti dai lavori di ristrutturazione del chiosco limitrofo alla spiaggia). I risultati ottenuti evidenziano come sia necessario, al fine di raffinare i modelli teorici di valutazione del trasporto eolico, ragionare sull'insieme delle classi e non solo sulla dimensione media. Ai Cancelli è necessario salvaguardare il più possibile la naturalità dell'area durante i mesi invernali/primaverili in cui i cordoni dunari possono accumulare in maniera efficace il sedimento. La presenza su larga scala di *blowouts* e l'assenza di depositi significativi nel secondo profilo investigato alla Tenuta pongono l'attenzione sul futuro di quest'intero ecosistema.

**Parole chiave:** trasporto eolico, variazioni sedimentologiche, variazioni topografiche, impatto antropico, *saucer blowout*.

### Abstract

*The aeolian dynamic is analyzed in two close areas managed with different criterions (Tenuta Presidenziale di Castelporziano e Cancelli Comunali di Castelporziano). The research estimated the aeolian transport rate due to regional winds and to sedimentological variations in the more superficial layer of the surface. Also, it investigated the topographic variation of dunes trough DGPS. Comparison of the two sites allowed us to evaluate the human impact on these processes. In Castelporziano the main factor that prevented an effective transport of sediment to the dune system, seems to be vegetation. The saucer blowout investigated in Castelporziano has been characterized by an accentuated seasonal trend: little deposit during summer and erosion during winter. The ratio between deposited and eroded sediment ( $-1.762 \text{ m}^3/\text{m}$  on annual base) seems to indicated a migration of the blowout along the prevailing direction of the wind. At Cancelli the decisive factors are connected to human activities (level of run-up during highest swells, slope of the stoss side of the established dune, artificial pebble concentration in the beach). These results show that in order to define theoretical model of sand transport from beach to dune it is necessary to study all sedimentological classes of the samples and not only the median. Also, at Cancelli it's essential to safeguard the natural characteristics of the area during winter/spring months, when the dune system can accumulate more sediment. At last, wide presence of blowouts in Castelporziano and absence of deposits in other areas call for attention on the future of this ecosystem.*

**Keywords:** aeolian transport, sedimentological variations, topographic variations, human impact, *saucer blowout*.

### Premessa

Nell'arco dell'ultimo ventennio i rapporti tra le comunità costiere e le dune si sono modificati profondamente. Molte delle aree che solamente alcuni decenni fa erano praticamente intatte hanno subito una profonda trasformazione a seguito dello sviluppo urbanistico e a favore di un impiego turistico-balneare. Questo utilizzo, pur se inizialmente realizzato in maniera contenuta e localizzata, ha visto una progressiva accelerazione che ha portato in molti casi ad una parziale degradazione o, nei casi estremi, alla completa distruzione di tratti di litorale assieme ai cordoni dunari associati.

Nel Lazio il tratto di costa compreso tra Ostia e Tor Vaianica, con particolare riferimento ai litorali contigui della Tenuta Presidenziale di Castelporziano e dei Cancelli Comunali (Fig. 1) rappresenta un efficace esempio sui differenti effetti che l'azione dell'uomo ha prodotto sui litorali. La Tenuta di Castelporziano è un territorio privilegiato che, passato nel tempo da proprietari religiosi a privati laici e poi nel 1872 al Governo Italiano, è stato sottratto ai pericoli di un'intensa frequentazione umana. Ciò ha permesso di preservare il migliore esempio di un ecosistema dunare di tipo mediterraneo, ancora intatto e in quasi perfetto equilibrio. Ben diversa è, invece, la condizione in cui versa la parte litoranea comunale, facente parte della Tenuta Presidenziale di Castelporziano fino al 1965 e poi ceduta dal Quirinale (Presidente Saragat) al Comune di Roma perché la destinasse al libero utilizzo dei cittadini. Mentre la prima duna (*incipient foredune*) è stata completamente cancellata dai concessionari degli stabilimenti allo scopo di migliorare la fruibilità della spiaggia e non ha nessuna possibilità di ricostituirsi a causa del calpestio e dell'azione dei mezzi meccanici, la duna esterna (*established foredune*) è fortemente provata dall'assenza di qualunque protezione e soggetta ad un elevato carico antropico. La prima interduna ospita parcheggi ed è attraversata da strade battute per il transito dei veicoli (Manni e Sleiter, 2003).



Figura 1 - Veduta generale dell'area di studio della Tenuta Presidenziale di Castelporziano (a sinistra) e dei Cancelli di Castelporziano (a destra).

### Teorie di riferimento

Recenti ricerche hanno dimostrato come i processi di trasporto eolico all'interno del sistema spiaggia-duna siano controllati da una serie di fattori chiave: intensità, frequenza e direzione dei venti (Svasek e Terwindt, 1974; Jungerius et al., 1981; Hsu, 1986; Rasmussen, 1989; Wal e McManus, 1993; Arens et al., 1995), fetch della spiaggia (Nordstrom e Jackson, 1993; Sherman e Bauer, 1993; Ruz e Allard, 1994; Sherman e Lyons, 1994; Davidson-Arnott e Law, 1996; Jackson e Cooper, 1999; Bauer e Davidson-Arnott, 2002), copertura vegetazionale (Buckley, 1987; Arens, 1996), umettamento (Namikas e Sherman, 1995; Jackson e Nordstrom, 1998; Cornelis e Gabriels, 2003), presenza di ciottoli sulla spiaggia (Davidson-Arnott e White, 1997) e temperatura e umidità dell'aria (McKenna, 2004). Tuttavia, sebbene molti esperimenti siano stati effettuati per calibrare le varie equazioni del trasporto eolico, attualmente non esiste alcun dato che dimostri chiaramente quale sia l'equazione più valida.

In questo studio si è utilizzato il modello proposto da Hsu (1986). Questo modello è stato scelto basandosi sulle osservazioni svolte da Chapman (1990) che, determinando l'efficacia nella valutazione del tasso di trasporto di diverse equazioni, ha dimostrato come l'equazione proposta da Hsu sia quella con il più alto grado di determinazione,  $r^2$  (Tab. 1).

Tabella 1 - Coefficiente di determinazione valutato per le diverse espressioni analitiche. L'equazione di Hsu, modificata da Chapman (1990) presenta il più alto coefficiente di determinazione.

O'Brien e Rindlaub (1934)	0.80
Bagnold (1941)	0.63
Zingg (1953)	0.78
Horikawa e Shen (1960)	0.84
Kadib (1964)	0.65
Hsu (1986)	0.87

Il tasso di trasporto eolico secondo l'equazione di Hsu è pari a:

$$q = K \left[ \frac{u_*}{\sqrt{gD}} \right]^3 \quad (I)$$

in cui  $K$  è un coefficiente adimensionale funzione della granulometria del sedimento,  $V_{u*}$  è la velocità di taglio in cm/s,  $g$  l'accelerazione di gravità e  $D$  la media (*median* in Hsu, 1986) del sedimento in millimetri.

La velocità di taglio è stata calcolata tramite due metodologie differenti: la prima ponendo a sistema l'equazione (II) definita per le due diverse velocità registrate a diversa quota dalla stazione anemometrica (50 e 100 cm):

$$U_z = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z_0 + z}{z_0} \right) \quad (II)$$

in cui  $V_k$  è la velocità del vento alla quota di acquisizione, è la velocità di taglio,  $z$  l'altezza da terra,  $V_{u*}$  è il parametro di irregolarità della superficie e  $k$  è la costante di Karman pari a 0.4. A tal riguardo è necessario sottolineare che, per il calcolo della velocità di taglio, il Coastal Engineering Manual (U.S. Army, 2002) consiglia di collocare i due sensori per la velocità ad una distanza minima tra loro di 3 - 4 metri. Per questa ricerca è stata, invece, scelta una distanza di 50 centimetri.

La seconda metodologia ha utilizzato le relazioni sperimentali tra  $V_{u*}$  e  $V_{u_{2m}}$ , velocità del vento a 2 metri di altezza, ottenute da Hsu (1977) a seguito dell'analisi in diversi ambienti. Ciò ha permesso di verificare la capacità predittiva della equazione (II) per il calcolo della velocità di taglio quando la distanza verticale tra i sensori per la velocità del vento fosse di 50 cm. La sua relazione per una spiaggia asciutta è:

$$u_* = 0.044 u_{2m} \quad (III)$$

Questo coefficiente numerico proposto da Hsu è però fortemente dipendente dalle condizioni sperimentali in cui è stato ricavato, in modo particolare dalla rugosità della superficie. Nell'ambito di questa ricerca il coefficiente 0.044 non è stato ritenuto idoneo a rappresentare le condizioni sperimentali dell'area considerata dato che la centralina anemometrica è stata collocata, nel sito d'indagine, non direttamente sulla spiaggia ma all'interno di un campo dunare (con dune d'altezza inferiore ai 60 cm) prospiciente alla duna esterna. Sulla base del lavoro di Hsu (1977) e delle condizioni anemometriche registrate dalla centralina, l'equazione (III) diviene:

$$u_* = 0.050 u_{2m} \quad (IV)$$

La velocità di taglio critica per il trasporto del sedimento è stata calcolata, invece, secondo il modello pro-

I tassi di trasporto, calcolati per ogni classe granulometrica determinata in laboratorio, sono stati successivamente filtrati in base alla direzione del vento e al fattore d'intrappolamento, ottenuto confrontando la percentuale di sedimento trattenuto in ogni classe granulometrica tra i campioni di spiaggia e di duna (U.S. Army, 2002).

### Area di studio

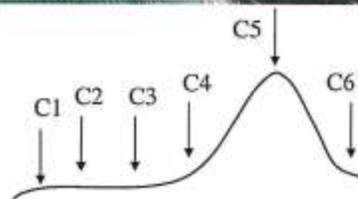
Il tratto di litorale in esame si sviluppa nel Comune di Roma, a sud della foce del Fiume Tevere, dal tratto meridionale della Tenuta Presidenziale di Castelporziano fino al settimo cancello della spiaggia comunale, gestita dal XIII Municipio del Comune di Roma, denominata "Cancelli di Castelporziano". Questa porzione di litorale presenta un andamento rettilineo con un orientamento prevalente Sud Est – Nord Ovest, per un'estensione complessiva di circa 5 km. L'area di studio s'inserisce all'interno di una più ampia unità fisiografica, dominata dal delta del Tevere, la cui parte meridionale è limitata a NW dalla foce del Fiume Tevere e a SE da Capo d'Anzio. La scelta dell'area di studio è legata alla presenza di cordoni dunari che presentano una più vasta estensione ed un migliore stato di conservazione rispetto al resto dell'unità fisiografica, ove l'intensa antropizzazione ne ha determinato o un notevole degrado o il totale spianamento (Bellotti et al., 1987).

### Materiali e metodi

Per ciascuno dei due tratti di litorale sono stati individuati 2 profili, *P*, perpendicolari alla linea di riva, ed estesi dalla battigia al retroduna della duna esterna (*established foredune*). Il Profilo 1, coincidente con l'asse principale di un *saucer blowout* (secondo Cooper, 1958) e il 2, con una duna parzialmente vegetata, sono in corrispondenza della Tenuta di Castelporziano; i Profili 3 e 4 insistono nella zona dei Cancelli. La fase di raccolta dati è stata articolata in un campionamento mensile dall'ottobre 2003 all'ottobre 2004. Per ogni profilo sono stati scelti 6 siti, *C*, ove effettuare la campionatura delle sabbie (Fig. 2). Allo scopo di analizzare il trasporto indotto dal vento si è proceduto alla campionatura dello strato più superficiale (1-3 mm) del deposito su di una superficie di 30 cm di lato. Il campione è stato analizzato mediante setacciatura meccanica a secco (20 minuti) con setacci ad intervalli di maglia pari a  $1/4 \Phi$ . I parametri descrittivi dell'andamento delle distribuzioni granulometriche sono stati calcolati secondo Folk e Ward (1957).



Figura 2 - In alto, l'area di studio con i 4 profili individuati. A destra, schema con l'ubicazione dei siti dove è stato effettuato il campionamento (C1: in prossimità della battigia; C2 e C3: spiaggia esterna e interna; C4: piede della duna; C5: cresta della duna; C6: retroduna).



Nel settore studiato è stata installata una centralina anemometrica Silimet SILIDATA AD2/AD22 a circa 20 metri dalla battigia in una zona priva di barriere che potessero alterare il flusso del vento. Questa centralina è dotata di una coppia di sensori per la registrazione della velocità e direzione del vento all'altezza di 50 cm e 100 cm dal suolo, dell'umidità, della temperatura e del grado d'umettamento della sabbia alla base di una colonna di 30 cm di sedimento. Tutti i sensori sono stati programmati per fornire dati orari ottenuti dalla media dei dati acquisiti dal sensore ogni 10 secondi. Per ogni mese è stata elaborata la distribuzione dei venti per frequenza, direzione e intensità, utilizzando i valori orari di velocità media registrati al sensore posto a 100 cm dal suolo. Queste elaborazioni non hanno tenuto conto delle calme (0 - 0.2 m/s) che sono state indicate separatamente.

Il trasporto eolico è stato stimato seguendo le indicazioni riportate nel Coastal Engineering Manual (U.S. Army, 2002) valutando i tassi di trasporto per ognuna delle classi granulometriche per ogni singola ora di registrazione (8736 ore totali).

L'analisi delle variazioni topografiche dei singoli profili, registrate tramite DGPS, ha permesso di valutare, a partire dalle variazioni areali lungo ciascun profilo e considerando una striscia trasversale al profilo, i volumi di sabbia effettivamente accumulati nel sistema dunare. Ha fornito, inoltre, un metodo per confrontare il valore del trasporto potenziale, calcolato tramite l'equazione di Hsu (1986) con quello misurato sul terreno. A tal scopo sono state valutate solamente le variazioni volumetriche comprese nell'intervallo tra la base della duna e il retroduna.

E' da osservare che la contiguità dei siti ha permesso di assumere che le variazioni nel regime dei venti nelle due aree fossero trascurabili. In questo modo si è potuto focalizzare l'attenzione sugli altri parametri che potessero influire sulle differenze registrate nei tassi di trasporto eolico.

## Risultati

### *Regime dei venti a Castelporziano*

La distribuzione dei venti (Fig. 3) è in accordo con le caratteristiche climatiche mediterranee dell'area di studio (Noli et al., 1996). Nei mesi invernali i venti regnanti, escludendo i venti da terra provenienti da NE, sono collocati essenzialmente nel I quadrante (nel mese di dicembre il vento proveniente da NNE ha una frequenza del 20% sulle ore totali d'osservazioni e un'intensità massima del 3° Beaufort), mentre da marzo a maggio i venti provenienti dal II e III quadrante amplificano la loro frequenza (per il mese di maggio i venti provenienti da W e WSW hanno una frequenza rispettivamente del 14 e 11% e un'intensità massima del 6° Beaufort). In estate le cellule anticicloniche dominano il Mediterraneo e si assiste ad un ulteriore spostamento in senso orario dei venti regnanti (per il mese di luglio i venti provenienti da W e WNW hanno una frequenza rispettivamente del 19 e 17% e un'intensità massima del 4° Beaufort) a cui si accompagna una diminuzione d'intensità.

Tale tendenza s'inverte in autunno (per il mese di ottobre il vento proveniente da ESE ha una frequenza del 18% e un'intensità massima del 4° Beaufort) quando i venti regnanti, compiendo una rotazione in senso antiorario, si riportano nel I quadrante.

In tutto il periodo di osservazione i venti dominanti provengono essenzialmente dal III quadrante (SW), e quindi sono circa perpendicolari alla linea di riva.

### *Il trasporto eolico*

Al fine di valutare quale delle due diverse metodologie di calcolo della velocità di taglio fosse la più idonea, inizialmente (primi sei mesi di rilevazione) sono stati calcolati i tassi di trasporto secondo la (I) utilizzando sia la velocità ottenuta secondo la (II) che la (IV). In entrambi i casi il dato granulometrico immesso nella relazione (I) è stato il valore medio della media (*median*) del sedimento prelevato per i quattro profili al sito C2.

Dalla Tabella 2 appare evidente il disaccordo tra i dati diversamente ottenuti, valutabile in un ordine di grandezza. Tale discordanza è stata riscontrata anche da Berg (1983) in una valutazione sul trasporto eolico condotta tramite l'utilizzo di traccianti fluorescenti. Nel mese d'ottobre, il motivo per cui il rapporto di un ordine di grandezza non è rispettato è dovuto all'insufficienza di dati disponibili (solo 229 dati orari); tale motivazione è stata evidenziata anche da Berg (1983).

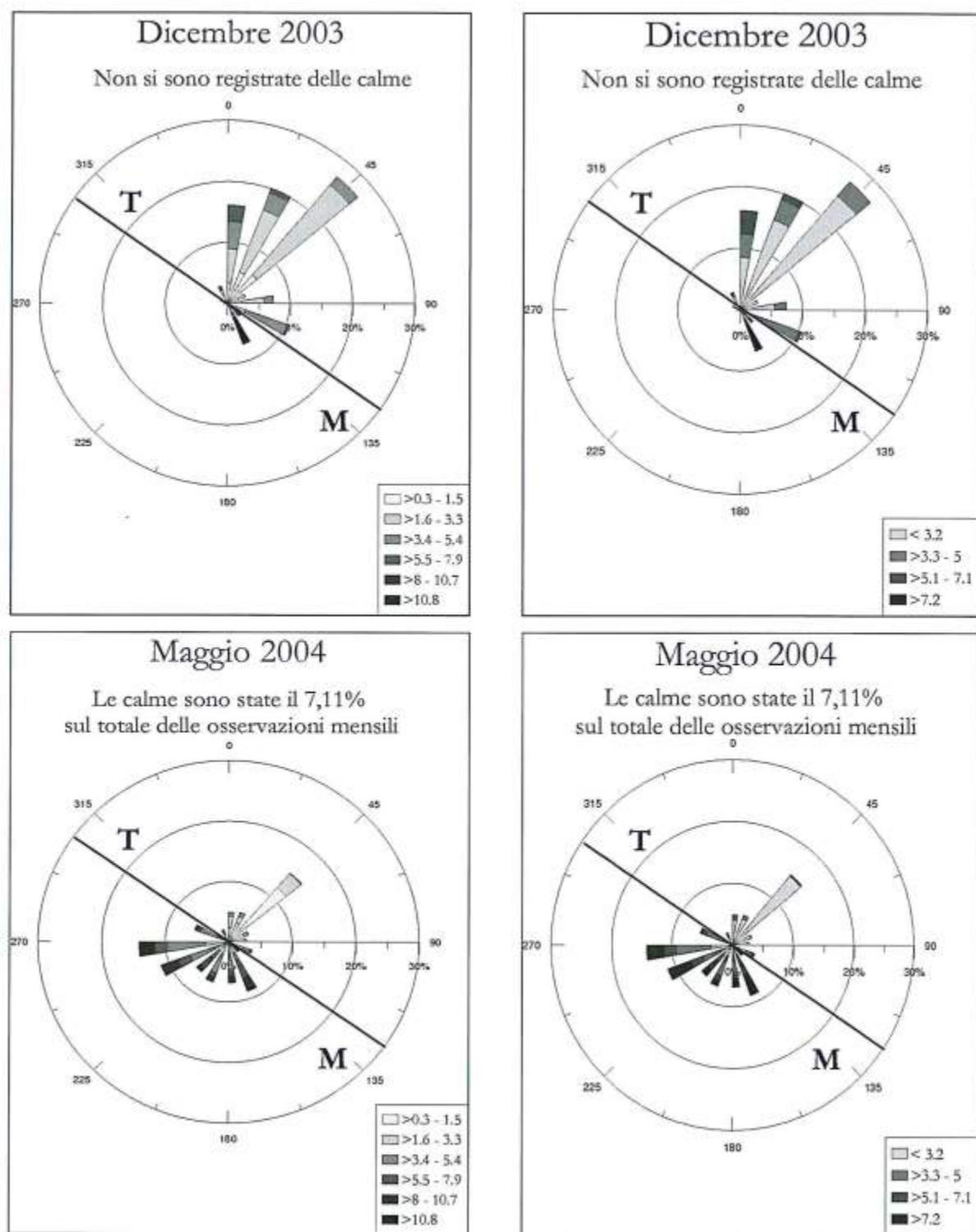


Figura 3 - Per ciascuna coppia di mesi (dicembre e maggio): a sinistra è riportata la rosa dei venti con gli intervalli di velocità (m/s) espressi secondo la scala di Beaufort; a destra la velocità di soglia (m/s) necessaria al trasporto delle diverse classi granulometriche (grigio chiaro: nessun trasporto; grigio tenue: sabbia molto fine e fine; grigio scuro: sabbia media; nero: sabbia grossolana e molto grossolana). La linea nera rappresenta la linea di riva (T: terra; M: mare).

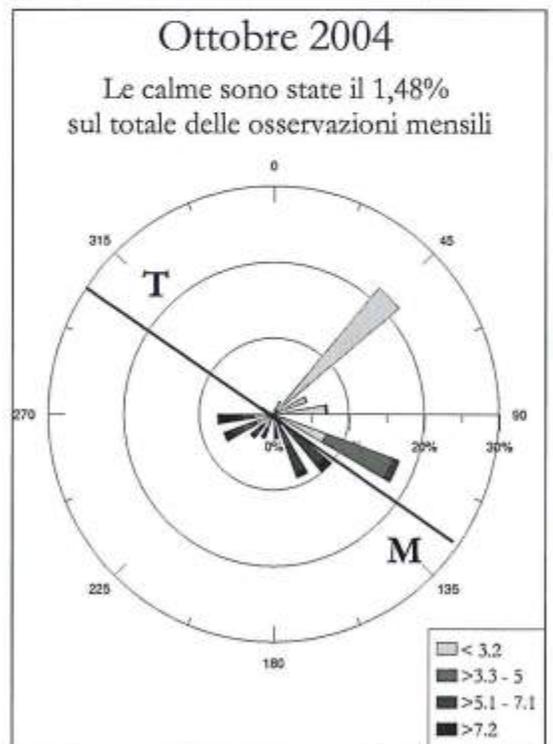
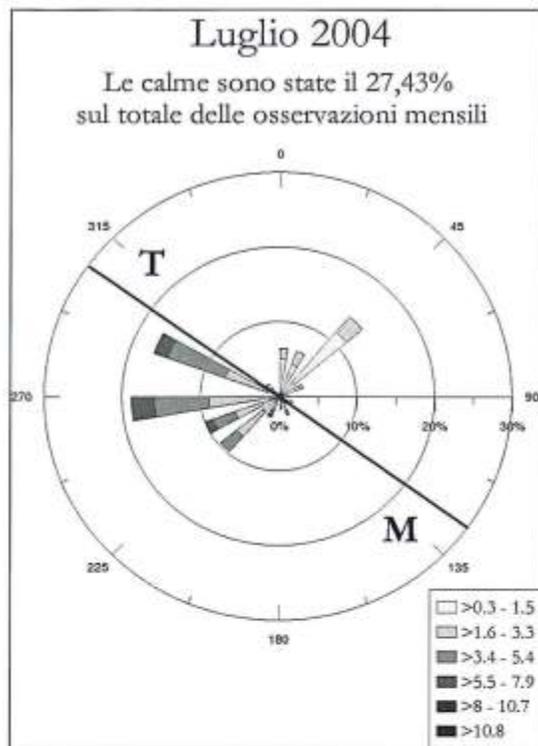


Figura 3 - Per ciascuna coppia di mesi (luglio e ottobre): a sinistra è riportata la rosa dei venti con gli intervalli di velocità (m/s) espressi secondo la scala di Beaufort; a destra la velocità di soglia (m/s) necessaria al trasporto delle diverse classi granulometriche (grigio chiaro: nessun trasporto; grigio tenue: sabbia molto fine e fine; grigio scuro: sabbia media; nero: sabbia grossolana e molto grossolana). La linea nera rappresenta la linea di riva (T: terra; M: mare).

Tabella 2 - Valori del trasporto potenziale dedotti tramite le due differenti metodologie per il calcolo della velocità di taglio.

	I metodologia (eq. II)	II metodologia (eq. IV)
Ottobre 2003	107.61 m <sup>3</sup> /m	5 m <sup>3</sup> /m
Novembre 2003	15.15 m <sup>3</sup> /m	1.45 m <sup>3</sup> /m
Dicembre 2003	48.04 m <sup>3</sup> /m	4.9 m <sup>3</sup> /m
Gennaio 2004	75.6 m <sup>3</sup> /m	5.38 m <sup>3</sup> /m
Febbraio 2004	124.47 m <sup>3</sup> /m	9.44 m <sup>3</sup> /m
Marzo 2004	56.84 m <sup>3</sup> /m	4.24 m <sup>3</sup> /m

Tabella 3 - Volumi di sabbia potenzialmente trasportati dalla spiaggia alla duna nei mesi osservati e per ogni profilo considerato (i valori sono espressi in m<sup>3</sup>/m di spiaggia).

	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3	Profilo 4	Totale
Ottobre 2003	0.5	0.88	1.74	0.26	3.38
Novembre 2003	0.01	0.005	0.14	0.13	0.285
Dicembre 2003	0.08	0.039	0.95	0.56	1.629
Gennaio 2004	2.9	0.29	0.82	2.7	6.71
Febbraio 2004	2.15	2.56	5.52	3.04	13.27
Marzo 2004	2.26	0.39	1.08	1.36	5.09
Aprile 2004	1	0.07	1.32	0.82	3.21
Maggio 2004	4.33	0.97	3.35	0.02	8.67
Giugno 2004	0.02	0.32	0.08	0.07	0.49
Luglio 2004	0.03	0.16	0.15	0.03	0.37
Agosto 2004	0.15	0.13	0.55	0.05	0.88
Settembre 2004	0.21	0.02	0.25	0.008	0.488
Ottobre 2004	1.24	0.36	0.87	0.32	2.79
Totale	14.88	6.194	16.82	9.368	3.38
Totale per le due aree	21.074		26.188		47.262

Se per il calcolo dei volumi si utilizza la velocità di taglio dedotta dalla (IV) l'ordine di grandezza è più vicino a quanto osservato sul campo e, pertanto, la ricerca è proseguita acquisendo la velocità di taglio in tal modo e calcolando i volumi di sabbia potenzialmente trasportati dalla spiaggia alla duna per tutto il periodo d'indagine (Tab. 3).

Oltre a rilevare come l'area relativa ai Cancelli comunali (Profili 3 e 4) sia stata caratterizzata da un mag-

giore tasso di trasporto eolico rispetto all'area della Tenuta di Castelporziano (24.27 % in più) si può osservare anche una differenza tra i tassi di trasporto all'interno della stessa area tra i diversi profili. Il Profilo 1 presenta nel periodo analizzato un surplus sedimentario pari al 140.23 % nei confronti del Profilo 2 e al profilo 3 il surplus è del 79.55 % rispetto al Profilo 4. Nel mese di febbraio si hanno i valori più alti del trasporto dalla spiaggia alla duna, con un massimo assoluto di 5.52 m<sup>3</sup>/m al Profilo 3. Il maggior quantitativo di sabbia trasportata in questo mese è da collegarsi alla presenza di forti venti (4 - 6 grado Beaufort) provenienti dal III quadrante, quindi circa normali alla linea di riva. Nel mese di novembre, invece, gli spostamenti sono assai modesti, in particolare nella Tenuta di Castelporziano dove si è avuto il valore minimo assoluto di 0.005 m<sup>3</sup>/m al Profilo 2. E' evidente una marcata stagionalità nei tassi di trasporto: i mesi più efficaci sono compresi tra inverno e primavera con l' 82.4 % sul totale trasportato nell'arco dei tredici mesi analizzati.

### *Analisi della variazioni topografiche*

Le variazioni volumetriche più significative ottenute tramite il confronto delle variazioni topografiche e i valori teorici dedotti tramite il modello di Hsu (1986) sono riportati in Figura 4.

Al Profilo 1 la zona d'accumulo preferenziale nei mesi invernali è stata quella retrostante la duna (3.61 m<sup>3</sup>/m tra gennaio e marzo) mentre il lato verso mare della duna ha subito erosione (1.98 m<sup>3</sup>/m tra gennaio e marzo). Ne deriva un accumulo netto pari a 1.63 m<sup>3</sup>/m ben minore di quello potenziale calcolato per lo stesso periodo (7.31 m<sup>3</sup>/m). Contrariamente nel periodo estivo, da luglio a settembre, si ha un deposito preferenziale nel lato sopravvento della duna e il valore misurato (0.354 m<sup>3</sup>/m) è assai prossimo a quello calcolato (0.39 m<sup>3</sup>/m).

Il Profilo 2, relativamente all'intervallo tra gennaio e settembre, non ha subito significative variazioni ad esclusione della cresta della duna che ha subito una minima diminuzione volumetrica pari a 0.1 m<sup>3</sup>/m (trasporto potenziale 4.71 m<sup>3</sup>/m).

Al Profilo 3 si ha, tra dicembre e aprile, un ingente accumulo alla base della duna (2.85 m<sup>3</sup>/m) ed uno più modesto sulla cresta (0.575 m<sup>3</sup>/m) per un totale di 3.425 (trasporto potenziale 9.69 m<sup>3</sup>/m). In questo caso, però, l'accumulo osservato alla base appare non essere legato alla sola dinamica eolica. Infatti, durante il periodo invernale, è stato osservato uno spianamento della spiaggia mediante ruspe con uno spostamento verso la duna stessa di gran parte del sedimento rimosso.

Anche il Profilo 4 è stato caratterizzato, durante i mesi compresi tra ottobre e aprile da un'intensa rielaborazione a causa dell'attività antropica di restauro del chiosco limitrofo al profilo stesso. Questi interventi hanno comportato ingenti versamenti di sedimento, proprio alla base della duna, che hanno causato un suo deciso modellamento topografico e anche una disponibilità di sedimento per la presa in carico ad opera del vento.

Al contrario, durante la stagione balneare, terminati quindi i lavori, le variazioni al profilo evidenziano una sostanziale stabilità dipendente probabilmente da una duplice causa: basso regime anemometrico e impedimento al trasporto dei sedimenti dalla spiaggia alla duna per la massiccia presenza dei bagnanti.

Le maggiori variazioni, pertanto, si registrano tra i mesi d'ottobre e aprile quando la zona di maggior accumulo si è verificata principalmente sul lato sopravvento della duna e per un totale pari a 10.79 m<sup>3</sup>/m (trasporto potenziale 8.87 m<sup>3</sup>/m) (Tab. 4).

Il periodo compreso tra maggio ed ottobre non è caratterizzato invece da accumuli consistenti. Si nota, anzi, una piccola area d'erosione sul lato sopravvento, dovuto probabilmente alla ripresa in carico del sedimento deposto precedentemente.

### *Analisi delle principali variazioni sedimentologiche*

Tutti i sedimenti campionati lungo ciascun profilo rientrano nel campo delle sabbie, la cui popolazione è comunemente superiore al 99% del campione; solo in un caso (P3C2 nel mese d'ottobre) è inferiore (88.80%) per la presenza di ghiaia fine (10.83%). Le percentuali di limo sono sempre inferiori al 1%.

Al Profilo 1 i sedimenti più fini sono presenti nel retroduna ( $M_z$  2.10  $\Phi$  a settembre) a testimonianza di un loro trasferimento più prolungato ad opera del vento. La massima escursione di  $M_z$  lungo il profilo tra battigia e retroduna si ha a dicembre ( $M_z$  1.05  $\Phi$ ), quella minima in aprile ( $M_z$  0.37  $\Phi$ ); comunque la variabilità lungo il profilo non appare legata alla stagionalità.

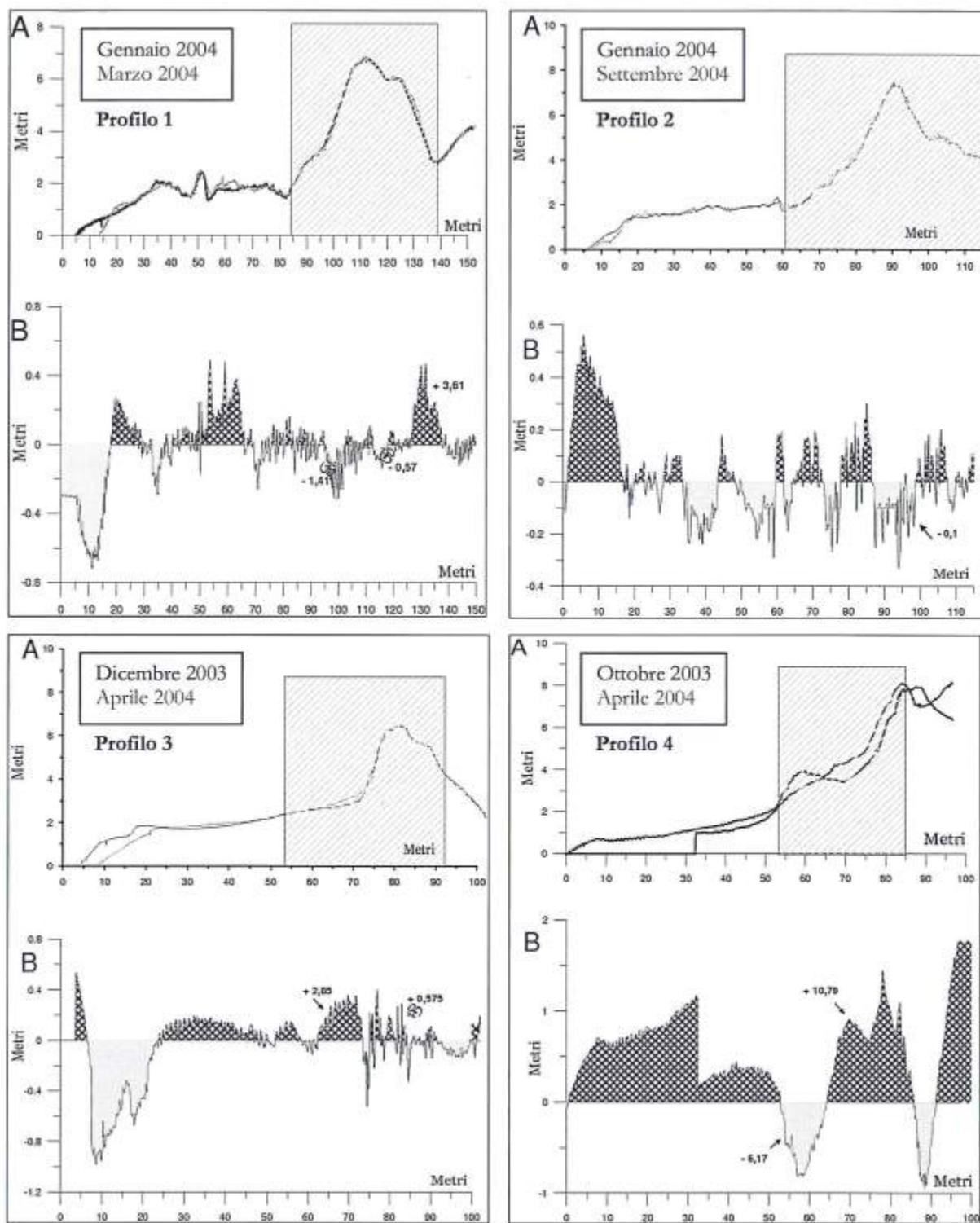


Figura 4 - (A) Variazioni altimetriche dei profili. (B) Aree d'accumulo (retino) e di erosione (puntinato) tra i due mesi di confronto. I valori riportati rappresentano i metri cubi di sabbia asportati o depositi dal vento per metro di spiaggia. All'interno del rettangolo il tratto analizzato per il calcolo dei volumi.

Tabella 4 - Confronto tra gli accumuli teorici e reali ( $m^3/m$  di spiaggia) sulla duna esterna. Il Profilo 4 è l'unico caso in cui l'accumulo reale è maggiore di quello teorico, dovuto probabilmente all'intensa attività antropica.

	Accumuli teorici	Accumuli reali
Profilo 1 - Gennaio 2003/Marzo 2004	7.31 $m^3/m$	3.61 $m^3/m$
Profilo 2 - Gennaio 2004/Settembre 2004	4.71 $m^3/m$	- 0.1 $m^3/m$
Profilo 3 - Dicembre 2003/Aprile 2004	9.69 $m^3/m$	3.425 $m^3/m$
Profilo 4 - Ottobre 2003/Aprile 2004	8.87 $m^3/m$	10.79 $m^3/m$

Il confronto fra i dati granulometrici evidenzia come, lungo questo profilo dalla spiaggia alla base della duna, siano state attivate maggiormente le classi granulometriche 1.5  $\Phi$  (la cui percentuale sull'intero campione alla base della duna passa da 7.59% a dicembre a 15.80% a febbraio) e 1.7  $\Phi$  (che a dicembre incide per il 17.85%, a febbraio per il 29.30%) come osservato anche per via teorica per lo stesso periodo (la classe 1.5  $\Phi$  costituisce il 27.6% del totale mobilitato e la classe 1.75  $\Phi$  il 18% per un totale del 45.6%). Le classi più fini (da 2.25  $\Phi$  a 2.75  $\Phi$ ), hanno, invece, subito per lo stesso intervallo di tempo alla base della duna un decremento in percentuale passando per la classe 2.25  $\Phi$  dal 25.2% al 14.85% e per la classe 2.50  $\Phi$  dal 13.14% al 7.23%. Queste frazioni probabilmente hanno trovato la loro nuova collocazione più in avanti rispetto al profilo in quanto al sito P1C5 (sommità della duna) nel sedimento si rileva un incremento, seppur debole, di tali classi (la 2.25  $\Phi$  passa dal 15.58% al 18.26% e la 2.75  $\Phi$  dal 3.46% al 4.46%).

Il differente incremento percentuale nel trasporto delle diverse classi granulometriche risente molto probabilmente del fattore pendenza del lato sopravvento della duna che favorisce il trasporto degli elementi più fini a scapito di quelli più grossolani che probabilmente non sono in grado di raggiungere la sommità della duna sistemandosi in una posizione intermedia (Fig. 5). Solo i venti più intensi del mese di maggio hanno invertito tale tendenza riuscendo a trasportare fino alla sommità anche i sedimenti della classe di 1.75  $\Phi$ , la cui incidenza aumenta dal 19.28% al 30.10%. Pertanto appare esistere una stretta correlazione tra il movimento delle diverse classi granulometriche del sedimento e la pendenza della duna.

Durante il periodo estivo (da giugno ad ottobre) il sedimento campionato è stato caratterizzato dalla diminuzione nel tempo del classamento (da 0.31 a 0.58) e dell'asimmetria (da 0.17 a 0.09) e da un aumento del coefficiente dell'appuntimento (da 1.15 a 0.99). Tali variazioni sembrano riflettere l'andamento delle dinamiche eoliche: i campioni di sedimento depositi nel mese di giugno sono il risultato dell'azione dei venti intensi che hanno agito, in particolare, nei mesi di febbraio e maggio e che hanno reso il sedimento molto ben classato; il sedimento a ottobre è moderatamente classato (la distribuzione di frequenza da leptocurtica diviene mesocurtica e la  $M_2$  da 1.50  $\Phi$  a maggio passa a 1.34  $\Phi$  a ottobre) probabilmente a causa della variazione in direzione del trasporto eolico legato al cambiamento nel regime dei venti.

I deboli venti del periodo estivo, provenienti dal IV quadrante, determinano un trasporto parallelo ai cordoni dunari a cui segue un cambiamento nel sito sorgente di sedimento (dalla spiaggia esterna alla base della duna) che non può più garantire un adeguato rifornimento delle classi granulometriche dominanti nel mese di giugno che, quindi, potrebbero essere state erose mettendo così a giorno i sedimenti più grossolani sottostanti. La situazione rilevata nell'ottobre 2004 è, inoltre, molto simile alla situazione riscontrata nell'ottobre 2003 ( $\sigma_1$  0.47  $\Phi$ ;  $Sk_1$  0.05;  $K_G$  0.98), indicando un comportamento non casuale (Fig. 6).

Per il Profilo 2 i materiali più fini sono ubicati nuovamente nel retroduna ( $M_2$  2.03  $\Phi$  a novembre). La variazione è massima alla battigia (0.89  $\Phi$ ) e si riduce a valori inferiori a 0.3  $\Phi$  per l'ambiente di spiaggia e inferiori a 0.2  $\Phi$  per la cresta ed il retroduna. Le analisi granulometriche hanno evidenziato minime variazioni nella distribuzione delle diverse classi.

In entrambi i profili il sedimento è nella quasi totalità molto o ben classato e la distribuzione è per lo più simmetrica, con tendenza positiva per i campioni alla base e alla cresta della duna.

Il Profilo 3 si distingue principalmente per la presenza sulla spiaggia di sedimenti grossolani (la dimensione massima presente a ottobre 2003 è di - 3.5  $\Phi$ ) da collegarsi ad un versamento di sicura origine antropica successivamente sepolto (Fig. 7).

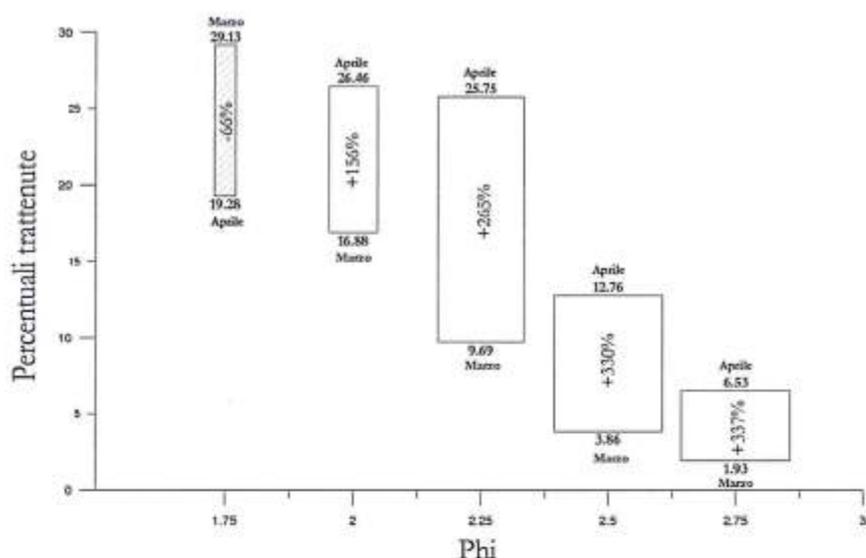


Figura 5 - Variazioni delle percentuali di ciascuna classe granulometrica tra marzo ed aprile al sito PIC5 (sommità della duna). L'ampiezza dei rettangoli è proporzionale all'incremento percentuale (riportato all'interno delle aree).

Il Profilo 4 presenta una distribuzione spaziale dei sedimenti più complessa rispetto ai precedenti. I sedimenti più fini sono in posizione diversa nelle singole campionature mensili: principalmente nel retroduna ( $M_z$  1.85  $\Phi$  ad ottobre 2003) ma anche alla base della duna ( $M_z$  1.84  $\Phi$  a febbraio) o nei campioni di spiaggia ( $M_z$  1.90  $\Phi$  a febbraio). Il sedimento più grossolano è più frequentemente collocato sulla battigia ( $M_z$  1.10  $\Phi$  a luglio) ma talvolta è presente nei campioni più interni, fino alla base della duna ( $M_z$  1.18  $\Phi$  a maggio). L'analisi delle variazioni granulometriche evidenzia come si sia avuto un incremento considerevole delle frazioni fini sulla cresta della duna (da  $Sk_1 = -0.05$  per il mese di dicembre si passa a  $Sk_1 = 0.15$  per il mese di marzo); tale incremento ha interessato in particolare la classe 2  $\Phi$  (si passa dal 12% al 31% per il periodo indicato) e per la classe 2.25  $\Phi$  (dal 4% al 16%). Al contrario durante la stagione balneare, terminati quin-

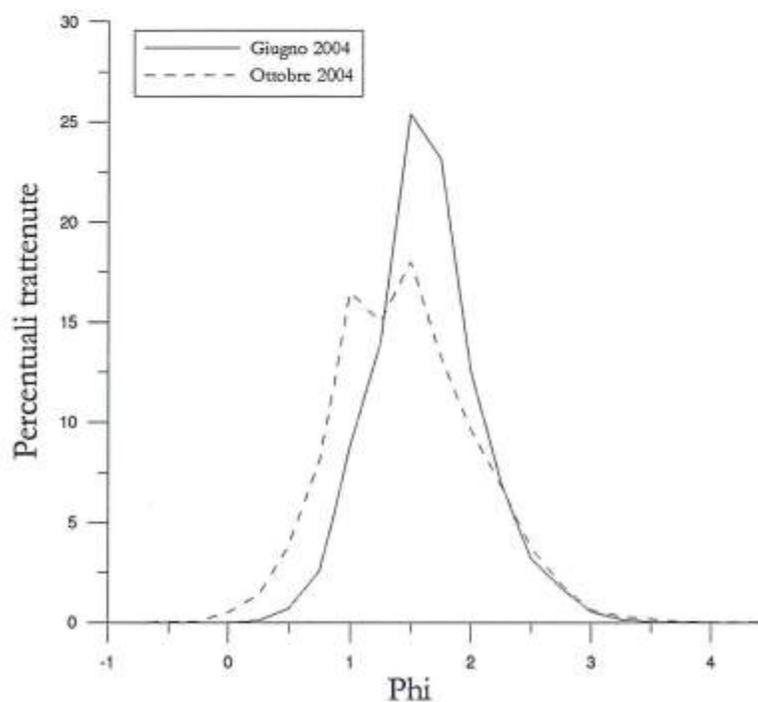


Figura 6 - Distribuzione granulometrica alla base della duna, campione PIC4, nei mesi di giugno e ottobre 2004.

di i lavori di manutenzione della spiaggia, il sedimento diviene omogeneo nel tempo, probabilmente a seguito della modesta intensità del vento e dall'impedimento al trasporto dei sedimenti dalla spiaggia alla duna dovuta alla maggiore presenza dei bagnanti. Anche in questo profilo si può notare una variazione dell'indice di appuntimento che passa da 1.32 ad aprile a 1.12 ad ottobre, con un andamento simile alla situazione riscontrata al Profilo 1. E' da notare come i sedimenti siano genericamente più fini nella Tenuta ( $M_z$  2.10  $\Phi$ ) rispetto all'area dei Cancelli ( $M_z$  1.85  $\Phi$ ).

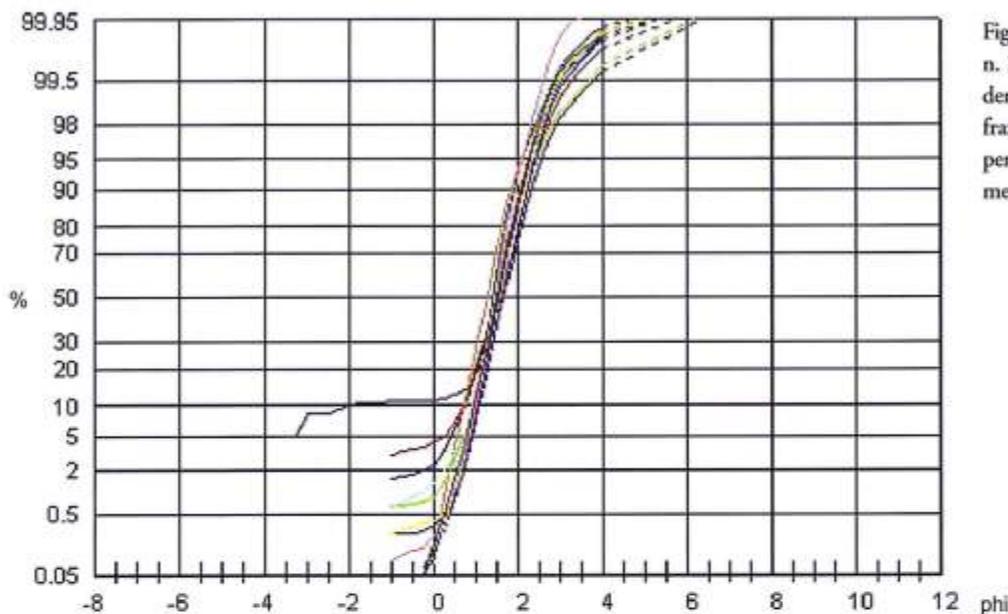


Figura 7 - Profilo 3 al sito n. 2. Si può notare l'evidente variabilità nelle frazioni più grossolane per i campioni nei diversi mesi.

## Discussione

### Tenuta Presidenziale di Castelporziano

Il *saucer blowout* su cui insiste il Profilo 1 è stato caratterizzato da un andamento marcatamente stagionale, con modesti accumuli durante l'estate e ingenti quantitativi di sabbia erosa durante l'inverno. Tale tendenza, evidenziata da Byrne (1997) per un *trough blowout*, appare essere legata sia al cambiamento di direzione dei venti dominanti, che alla minore copertura vegetazionale durante il periodo autunnale/invernale (Arens et al., 1995). Il rapporto tra il sedimento accumulato ed eroso ( $-1.762 \text{ m}^3/\text{m}$  su base annuale) appare indicare una migrazione del *blowout* lungo la direzione prevalente del vento. Tale andamento porta ad ipotizzare che, se i processi in atto non subiranno una inversione di tendenza (grado di copertura vegetazionale o aumento d'ampiezza della spiaggia), la duna si ridurrà in altezza in modo consistente secondo il processo ipotizzato in Figura 8. Variazioni significative potranno essere osservate probabilmente nell'arco di 4 - 5 anni (Ritchie, 1972; Gares e Nordstrom, 1987).



Figura 8 - A sinistra l'evoluzione supposta per la *foredune* osservata nel Profilo 1. A destra il *saucer blowout* analizzato.

Il Profilo 2 presenta, come abbiamo visto precedentemente, variazioni volumetriche minime, confermate anche dall'analisi dei campioni di spiaggia e di duna. Il fattore principale che ha impedito un efficace trasporto del sedimento ad opera del vento sembra essere stato il grado di copertura vegetazionale, dato che questo è il principale parametro che lo differenzia dal primo. Questa ipotesi è in accordo con altri Autori che hanno dimostrato come una copertura del solo 10% determini una riduzione del trasporto eolico potenziale pari al 20% (Wasson e Nanninga, 1986), al 50% (Buckley, 1987), al 60% (Leys, 1991) e, addirittura, al 100% (Gilles et al., 2000) in funzione delle diverse specie vegetali presenti sul litorale e del loro pattern vegetazionale.

Il confronto tra i volumi effettivamente accumulati nel sistema dunare e quelli potenzialmente calcolati evidenzia come il modello abbia predetto con maggiore accuratezza il trasporto durante il periodo estivo (90.77% del valore teorico ipotizzato per il Profilo 1) piuttosto che nel periodo invernale (27.08%). Queste differenze sono, probabilmente, legate sia al mancato inserimento del fattore umettamento che, specialmente nel periodo autunnale/invernale in cui le piogge sono più frequenti, è in grado di ridurre considerevolmente i quantitativi di sedimento rimovibile, sia al mancato inserimento del volume di sedimento trasportato oltre il sistema spiaggia/duna dai venti intensi per lo stesso periodo.

### *Cancelli di Castelporziano*

Quest'area risulta essere molto più complessa, probabilmente per l'impatto antropico che il sistema ha subito nell'anno e, più in generale, nell'arco degli ultimi decenni. Qui, la vegetazione non può più rappresentare un fattore fondamentale per il meccanismo di presa in carico/trasporto/sedimentazione dato che è presente solo in alcuni lembi sparsi sulla sommità della duna. I fattori decisivi appaiono, invece, essere quelli correlati con le attività antropiche.

Il primo fattore è il livello raggiunto dal flutto montante durante le principali mareggiate (Fig. 9); infatti l'assenza di vegetazione e di depositi anche se embrionali, permette al flutto montante di avanzare liberamente sulla spiaggia aumentando la superficie umettata e quindi diminuendo considerevolmente l'importanza della velocità dei venti. Nell'area comunale, pertanto, le mareggiate che giungono con una certa angolazione rispetto la linea di riva consentono al flutto montante associato di avanzare in misura minore di quanto avverrebbe per una mareggiata perpendicolare.



Figura 9 - Profilo 3. La linea tratteggiata individua il limite raggiunto da una mareggiata precedente al campionamento del mese di febbraio. In questa occasione l'acqua ha coperto circa i 2/3 della spiaggia.

Questa differenza di situazioni è ampliata ai Cancelli rispetto a Castelporziano in quanto la spiaggia è resa piatta e senza ostacoli dall'azione delle ruspe che, da anni, spianano l'arenile per migliorarne la fruizione turistica (Fig. 10). Questa operazione, inoltre, viene eseguita principalmente nel periodo primaverile e quindi non permette in alcun modo la colonizzazione della spiaggia da parte di quelle specie psammofile che garantirebbero, con il loro sviluppo, il costituirsi di depositi embrionali a protezione dell'attuale duna esterna.

Il secondo fattore è sempre legato alle ruspe che, ripulendo la spiaggia fino alla base della duna, determinano la formazione di una ripida pendenza sul lato sopravvento che, come osservato anche da Gares (1988), è un fattore decisivo nel ridurre i tassi di trasporto.

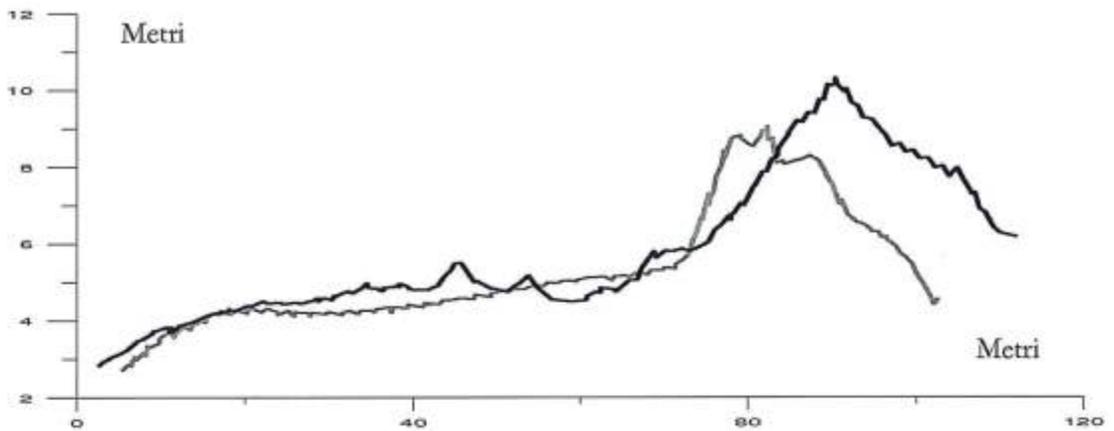


Figura 10 - Confronto tra il Profilo 3 (in grigio), appartenente all'area a gestione comunale, ed il Profilo 2 (in nero), collocato nella Tenuta di Castelporziano. E' evidente la semplicità morfologica dell'area comunale rispetto alla Tenuta di Castelporziano. Si può osservare, inoltre, la maggiore pendenza del lato verso mare della *foredune* del Profilo 3.

Sugli apporti di sabbia dalla spiaggia alla duna in corrispondenza del Profilo 3 influisce la presenza sulla spiaggia di elementi grossolani provenienti dai lavori di ristrutturazione del chiosco limitrofo alla spiaggia. Questi elementi, evidenziati dalle distribuzioni di frequenza (Fig. 7), hanno determinato l'instaurarsi di un deposito (una sorta di *lag deposit*) che ha parzialmente "blindato" la superficie riducendo il trasporto (Davidson-Arnott et al., 1997).

L'ingente deposito di sedimento che caratterizza il Profilo 4 sembra difficilmente attribuibile alle sole dinamiche eoliche. L'azione dell'uomo è stata anche in questo caso determinante in quanto l'accumulo è dovuto, per quanto è stato possibile osservare, all'attività degli addetti alla manutenzione del chiosco che versavano, alla base della duna, ingenti quantità di sabbia. Tali accumuli hanno sicuramente contribuito ad incrementare la quantità di sabbia depositata riducendo così la discrepanza, registrata negli altri profili, tra il tasso di trasporto reale e quello potenziale.

Per entrambi i profili è difficile operare un confronto tra i tassi potenziali e reali in quanto troppo profonda è l'interferenza delle diverse attività antropiche che hanno comportato un aumento dei tassi reali, che divengono assai simili a quelli calcolati. In un caso (a giugno per il Profilo 4) il tasso reale risulta addirittura superiore a quello potenziale.

## Conclusioni

Sebbene i due tratti di litorale investigati siano stati interessati da tassi di trasporto modesti, le motivazioni di tale situazione sono assai diverse. Per la Tenuta di Castelporziano i fattori naturali, come la vegetazione, hanno interagito profondamente con le dinamiche del sistema spiaggia/duna mentre per i Cancelli comunali è stata l'attività antropica ad essere decisiva. Tali differenze riflettono le grandi difficoltà esistenti nella determinazione di un modello predittivo unico ed efficace per il trasporto eolico.

Il campionamento di un livello estremamente superficiale del sedimento ha dimostrato di essere valido ed essenziale quando si voglia valutare il diverso comportamento delle singole classi granulometriche soggette all'azione del vento. Infatti le ricerche effettuate hanno evidenziato come sia necessario, al fine di raffinare i modelli teorici di valutazione del trasporto eolico, ragionare sull'insieme delle classi e non solo sulla dimensione media.

Le differenze riscontrate tra il tasso potenziale e reale sono imputabili al mancato inserimento nelle elaborazioni teoriche di una serie di fattori correttivi, primo fra tutti l'umettamento della superficie.

L'uomo, con le sue attività, ha interagito profondamente con i processi di dinamica eolica nel sistema spiaggia/duna; attività quali il versamento sulla spiaggia di sedimenti grossolani e lo spianamento con mezzi meccanici talora fino al piede della duna, influiscono sia ostacolando la presa in carico, sia impedendo la formazione degli accumuli embrionali, sia favorendo il diradarsi della vegetazione dunare.

In considerazione dello stato in cui versa l'area dei Cancelli e dell'insieme dei fattori che rischiano di compromettere in modo irreversibile la sua naturalità, appaiono necessari interventi decisivi per la salvaguardia e tutela di questo sito, soggetto ad una pressione antropica che ha raggiunto il limite delle sue capacità di carico. Tali interventi andrebbero in direzione opposta a quelli in atto, anche se non dichiarati, da coloro (Enti, Cooperative, Privati) che

questo ecosistema utilizzano e sfruttano. Infatti sarebbe essenziale impedire il transito dei bagnanti lungo i sentieri non autorizzati al fine di evitare l'accentuarsi dei processi erosivi lineari dei cordoni dunari. L'eccessivo calpestio è, del resto, già evidente dalla presenza di alcune Plantaginaceae che hanno colonizzato ampi tratti della fascia dunare dei Cancelli Comunali (Manni e Sleiter, 2003). Ciò sarebbe possibile tramite il ripristino delle recinzioni, ora quasi totalmente demolite, oltre all'opera di maggiore sensibilizzazione degli utenti della spiaggia, per esempio mediante pannelli informativi. È necessario, inoltre, che l'area venga gestita secondo i criteri propri delle aree protette. Ogni intervento d'ampliamento delle strutture di servizio dovrebbe essere assolutamente impedito ed i chioschi già presenti dovrebbero necessariamente salvaguardare l'aspetto naturalistico dell'area rimanendo a carattere precario e limitati alla fornitura di servizi di balneazione e limitato ristoro.

Infine, alla luce dei primi dati emersi dalla ricerca, è necessario salvaguardare il più possibile la naturalità dell'area durante i mesi invernali/primaverili al fine di preservare i naturali processi di trasporto eolico. Questo periodo è, infatti, l'unico durante il quale i cordoni dunari prossimi al mare possono accumulare in maniera efficace sedimenti; pertanto la costruzione di graticciate semipermeabili per trattenere la sabbia è inutile quando se ne impedisce o impoverisce il transito.

Sono quindi assolutamente da evitare la costruzione di ostacoli impermeabili che influenzano il libero transito dei sedimenti fra spiaggia e duna, lo spianamento degli accumuli invernali, la ripulitura della sabbia fino al piede della duna.

I dati raccolti alla Tenuta di Castelporziano, infine, non portano a considerazioni positive. La presenza su larga scala di *blowouts* (sia di tipo *saucer* che *trough*) e l'assenza di depositi significativi nelle altre aree, pongono l'attenzione sul futuro di quest'intero ecosistema. Al fine di preservare la naturalità di questo sito, sarebbe auspicabile progettare specifiche opere di ripristino dei *blowouts*, attraverso uno studio approfondito dei fattori interni (ciclicità dei nutrienti, processi di successione) e esterni (attività antropiche, cambiamenti climatici) che li determinano.

#### Finanziamenti

La ricerca è stata inizialmente eseguita nell'ambito del Progetto di rilevante interesse nazionale "I depositi eolici delle coste italiane e i flussi di sedimenti spiaggia-duna" COFIN 2002/2004.

È quindi proseguita nell'ambito del Progetto "Monitoraggio morfo-sedimentologico e idrogeologico della fascia litorale della Tenuta Presidenziale di Castel Porziano" finanziato dall'Accademia delle Scienze detta dei XL.

#### Bibliografia

- Arens S.M. (1996) - *Pattern of sand on a vegetated foredunes*. *Geomorphology*, 17: 339-350.
- Arens S.M., Van Kaam-Peters H.M.E., Van Boxel J.H. (1995) - *Airflow over foredunes and implications for sand transport*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20 (4): 315-322.
- Bagnold R.A. (1941) - *The physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Chapman and Hall, London. 265 pp.
- Bauer B.O., Davidson-Arnott R.G.D. (2002) - *A general framework for modelling sediment supply to coastal dune including wind angle, beach geometry and fetch effects*. *Geomorphology*, 49: 89-108.
- Bellotti P., Biagi P.F., Tortora P., Valeri P. (1987) - *Il delta del Tevere: caratteri morfologici e sedimentologici della piana deltizia*. *Giornale di Geologia*, 49: 89-99.
- Berg N.H. (1983) - *Field evaluation of some sand transport models*. *Earth surface processes and Landforms*, 8: 101-114.
- Buckley R. (1987) - *The effects of sparse vegetation cover on the transport of dune sand by wind*. *Nature*, 325 (6103): 426-428.
- Byrne M.L. (1997) - *Seasonal sand transport through a trough blowout at Pinery Provincial Park, Ontario*. *Canadian Journal of Earth Science*, 34: 1460-1466.
- Chapman D.M. (1990) - *Aeolian sand transport. An optimized model*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15: 751-760.
- Cooper W.S. (1958) - *The coastal sand dunes of Oregon and Washington*. *Geological Society of American Memories*, 72. 169 pp.
- Cornelis W.M., Gabriels D. (2003) - *The effect of surface moisture on the entrainment of dune sand by wind: an evaluation of selected models*. *Sedimentology*, 50: 771-790.
- Davidson-Arnott R.G.D., Law M.N. (1996) - *Measurements and prediction of long term sediment supply to coastal foredunes*. *Journal of Coastal Research*, 13 (3): 654-663.

- Davidson-Arnott R.G.D., White D.C. (1997) - *The effects of artificial pebble concentration on eolian sand transport on a beach*. Canadian Journal of Earth Science, 34: 1499-1508.
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazor river bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journal of Sedimentary Petrology, 27: 3-26.
- Gares P.A. (1988) - *Factors affecting aeolian sediment transport in beach and dune environments*. Journal of Coastal Research, Special Issue 3, Dune/Beach Interaction, edited by Psuty N.P., pp. 121-126.
- Gares P.A., Nordstrom K.F. (1987) - *Dynamics of a coastal Foredune blowout at Island Beach State Park, N.J.* Proceedings of Coastal Sedimentology '87, ASCE, pp. 213-221.
- Gilles J.A., Lancaster N., Nickling W.G., Crawley D.M. (2000) - *Field determination of drag forces and shear stress partitioning effects for a desert shrubs *Sarcobatus vermiculatus*, greasewood*. Journal of Geophysical Research, 105 (D20): 24871-24880.
- Hsu S.A. (1977) - *Boundary layer meteorological research in the coastal zone*. Geoscience and Man, H.J. Walker, ed., School of geoscience, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, vol 18: 341-351.
- Hsu S.A. (1986) - *Correction of Land Based Wind Data for Offshore Applications: A Further Evaluation*. Journal of Physical Oceanography, 16: 390-394.
- Jackson D.W.T., Cooper J.A.G. (1999) - *Beach fetch distance and Aeolian sediment transport*. Sedimentology, 46 (43): 517-522.
- Jackson N.L., Nordstrom K.F. (1998) - *Aeolian transport of sediment on a beach during and after rainfall, Wildwood, NJ, U.S.A.* Geomorphology, 22: 151-157.
- Jungerius P.D., Verhagene J.T., Wiggers A.J. (1981) - *The development of blowouts in "de Blink" a coastal dune area near Noordwijkerhout, The Netherlands*. Earth surface Processes and Landforms, 6: 375-396.
- Leys J.F. (1991) - *Towards a better model of the effect of prostrate vegetation cover on wind erosion*. Vegetatio, 91: 49-58.
- Manni C., Sleiter G. (2003) - *Stato delle dune del litorale Laziale compreso fra Castel Fusano e Capocotta*. A.I.A.S. nazionale. Volume unico.
- McKenna C.N. (2004) - *Effects of temperature and humidity upon the transport of sedimentary particles by wind*. Sedimentology, 51: 1-17.
- Namikas S., Sherman D. (1995) - *A review of the effects of surface moisture content on Aeolian sand transport*. In: Tchakerian, V Ed., Desert Aeolian Processes. Chapman & Hall, London. Pp 269-294.
- Noli A., De Girolamo P., Sammarco P. (1996) - *Parametri meteomarini e dinamica costiera*. In "Il Mare del Lazio", ed. Università degli Studi di Roma "La Sapienza", pp. 285-315.
- Nordstrom K.F., Jackson N.L. (1993) - *The role of wind direction in eolian transport on a narrow sandy beach*. Earth surface Processes and Landforms, 18 (8): 675-686.
- Rasmussen K.R. (1989) - *Some aspects of flow over coastal dunes*. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh 96B: 129-147.
- Ritchie W. (1972) - *The evolution of coastal sand dunes*. Scottish Geographic Magazine, 88: 19-35.
- Ruz M.H., Allard M. (1994) - *Foredune development along a subarctic emerging coastline, eastern Hudson Bay, Canada*. Marine Geology 117: 57-74.
- Sherman D.J., Bauer B.O. (1993) - *Dynamics of a beach-dune systems*. Progress in Physical Geography, 17 (4): 413-447.
- Sherman D.J., Lyons W. (1994) - *Beach-state controls on Aeolian sand delivery to coastal dunes*. Physical Geography, 15: 381-395.
- Svasek J.N., Terwindt J.H.J. (1974) - *Measurements of sand transport by wind on a natural beach*. Sedimentology, 21: 311-322.
- U.S. Army (2002) - *Coastal Engineering Manual*. U.S. Army. Chapter III-4, Wind-Blown Sediment Transport, pp 1-79.
- Wal A. e McManus J. (1993) - *Wind regime and sand transport on a coastal beach-dune complex, Tentsmuir, eastern Scotland*. In: Pye K. (Ed), "The dynamics and environmental Context of Aeolian Sedimentary Systems". The Geological Society, London, pp. 159-171.
- Wasson R.J., Nanninga P.M. (1986) - *Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces*. Earth surface Processes and Landforms, 11: 504-514.

## I depositi eolici recenti dell'area di Gonnese (Sulcis, Sardegna sud-occidentale). Implicazioni geologiche e geomorfologiche

Marco Biaggioli<sup>1</sup>, Sergio Ginesu<sup>2</sup>, Francesco Secchi<sup>2</sup> e Stefania Sias<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Consorzio per la Promozione degli studi universitari nella Sardegna centrale (Nuoro).

<sup>2</sup> Istituto Scienze Geologiche e Mineralogiche, Università di Sassari.

### Riassunto

Il Sulcis occidentale è articolato in sub-bacini colmati in età oligo-miocenica da sequenze vulcaniche orogeniche potenti fino a 1000 m. Il basculamento dei blocchi in cui insistono queste sequenze vulcaniche favorisce, lontano dalle culminazioni assiali, il parziale accumulo in età recente di sedimenti di ambiente litorale ed eolico.

Gli scavi effettuati ad uso industriale nell'area di Ponte Fixi, presso l'abitato di Gonnese, hanno messo in evidenza una sequenza potente sino a 40 m di sabbie e, subordinatamente, di calcari lacustri che si estende fino alle coste del Sulcis meridionale. Tale sequenza è riferibile al Pleistocene medio inf. ed è schematicamente costituita da una porzione inferiore di sabbie e ghiaie di ambiente marino e calcari lacustri e da una porzione superiore che rappresenta un esteso campo dunare, caratterizzato da sabbie arrossate a composizione quarzoso-feldspatica e stratificazione incrociata. L'attribuzione cronologica della sequenza studiata è vincolata dalla collocazione stratigrafica posteriore a frane di tipo rotazionale, ben evidenti lungo le coste a falesia, impostate sulle successioni vulcaniche oligo-mioceniche osservabili lungo il litorale della zona di Capo Altano. L'attribuzione precedente all'ultimo glaciale è confermata in letteratura da informazioni di ordine paleontologico.

Il sito di Ponte Fixi, documenta pertanto l'esistenza di una linea di spiaggia, posta a circa 25-30 m al disopra del livello del mare attuale, che permette di ipotizzare l'esistenza di una profonda ria favorita dal basculamento verso est del blocco costituente l'attuale Fossa di Cortoghiana. I depositi sabbiosi poggiano sulle coperture eocenico-oligoceniche riferibili alla Formazione del Cixerri facendo supporre l'esistenza di una paleo-valle ben evoluta e profonda che ha favorito l'accumulo di sabbie eolico-litorali.

**Parole chiave:** Evoluzione della costa, evoluzione geologica, Pleistocene, Sulcis, Sardegna.

### Abstract

*Western Sulcis is schematically made-up of several sub-basins named Carbonia and Cortoghiana though, covered in Oligo-Miocene times by orogenic volcanic sequences that are at least 1000 m thick and which range in composition from andesites to peralkaline rhyolites. Tilting of blocks covered by volcanic sequences favour the infilling during Pleistocene of deposits of littoral and aeolian environment.*

*The study of excavation located in the industrial area of Ponte Fixi, near the Gonnese town, evidenced a 40 m thick sequence of quartz-feldspar sand deposits and subordinately lacustrine limestones of middle-lower Pleistocene age, covering a quite large area of 200 km<sup>2</sup> until the coastline of southern Sulcis area. The investigated sequence is schematically made up of a lower portion of medium to coarse grained sands and gravel of littoral environment with local interbedding of micritic lacustrine limestones. The upper portion is constituted by cross bedded homogeneous fine-grained sand, reddish coloured in the uppermost part, of aeolian environment. Chronological position is constrained by field relationships corroborated by published analytical data. Indeed, in several zones, the sand deposits studied postdated rotational landsliding documented on cliff coasts formed on Oligo-Miocene ignimbrites along the coastline of Capo Altano.*

*The pre-wurmian age is confirmed by continental vertebrate palaeontological contents (i. e. *Elephas lamarmorae*) as well as a  $43000 \pm 1.4$  years radiometric age collected with radiocarbon method on cervid remains. This radiometric data represent by far a minimum age, because they refer to the upper part of the sequence.*

*Moreover, the site studied at Ponte Fixi documents the occurrence of a coastline at 25-30 m of altitude above the present sea level, suggesting the occurrence of a pronounced ria favoured by the eastern tilting of Cortoghiana block. The investigated sand sequences lie above Eocene-Oligocene clastic deposits, indicating the occurrence of a pronounced and well-evolved paleo-valley that favoured the infilling of littoral to aeolian sediments.*

**Keywords:** coastal evolution, geological evolution, Pleistocene, Sulcis, Sardinia.

## Introduzione

L'area investigata comprende la fascia costiera della Sardegna sud-occidentale, lungo il litorale che si affaccia sull'arcipelago del Sulcis, geologicamente noto come Fossa di Cortoghiana (Fig. 1). L'area è, per oltre 200 km<sup>2</sup>, diffusamente interessata dalla presenza di una copertura uniforme e discontinua di depositi eolici genericamente attribuiti al Quaternario (Assorgia et al., 1992). Emergono tra queste coperture le successioni vulcanoclastiche del ciclo magmatico orogenico oligo-miocenico e i sottostanti depositi paleogenici riferibili al "produttivo" Auct. ed alla Formazione del Cixerri (Fig. 2). Verso l'interno e nel settore meridionale, i depositi sabbiosi si interrompono in appoggio al basamento paleozoico e alle coperture mesozoiche solo sporadicamente affioranti. Quasi l'intera fascia costiera conserva la presenza delle sabbie in giacitura originaria o in processi di sedimentazione attuali. I lavori finora intrapresi nell'area hanno focalizzato l'attenzione sul basamento Paleozoico o sulle coperture pre-pleistoceniche. Alcuni lavori hanno investigato le coperture recenti, allo scopo di definirne forme e dinamiche (Orru e Ulzèga, 1986; Ginesu e Manca, 2005), o i contenuti paleontologici (Melis et al., 2002). Tali studi forniscono utili indicazioni sulle dinamiche geomorfologiche e sull'assetto strutturale in cui tali processi insistono, facilitando l'interpretazione della dinamica costiera. Questo vasto territorio, pur nell'estesa presenza dei depositi eolici, conserva morfologie dunari principalmente solo in due settori. Il primo è localizzato nella parte più settentrionale, in località Is Arenas presso l'abitato di Gonnese, l'altro nella porzione meridionale, in prossimità nella baia di Porto Pino, a sud dell'abitato di Masainas fuori dall'area investigata.

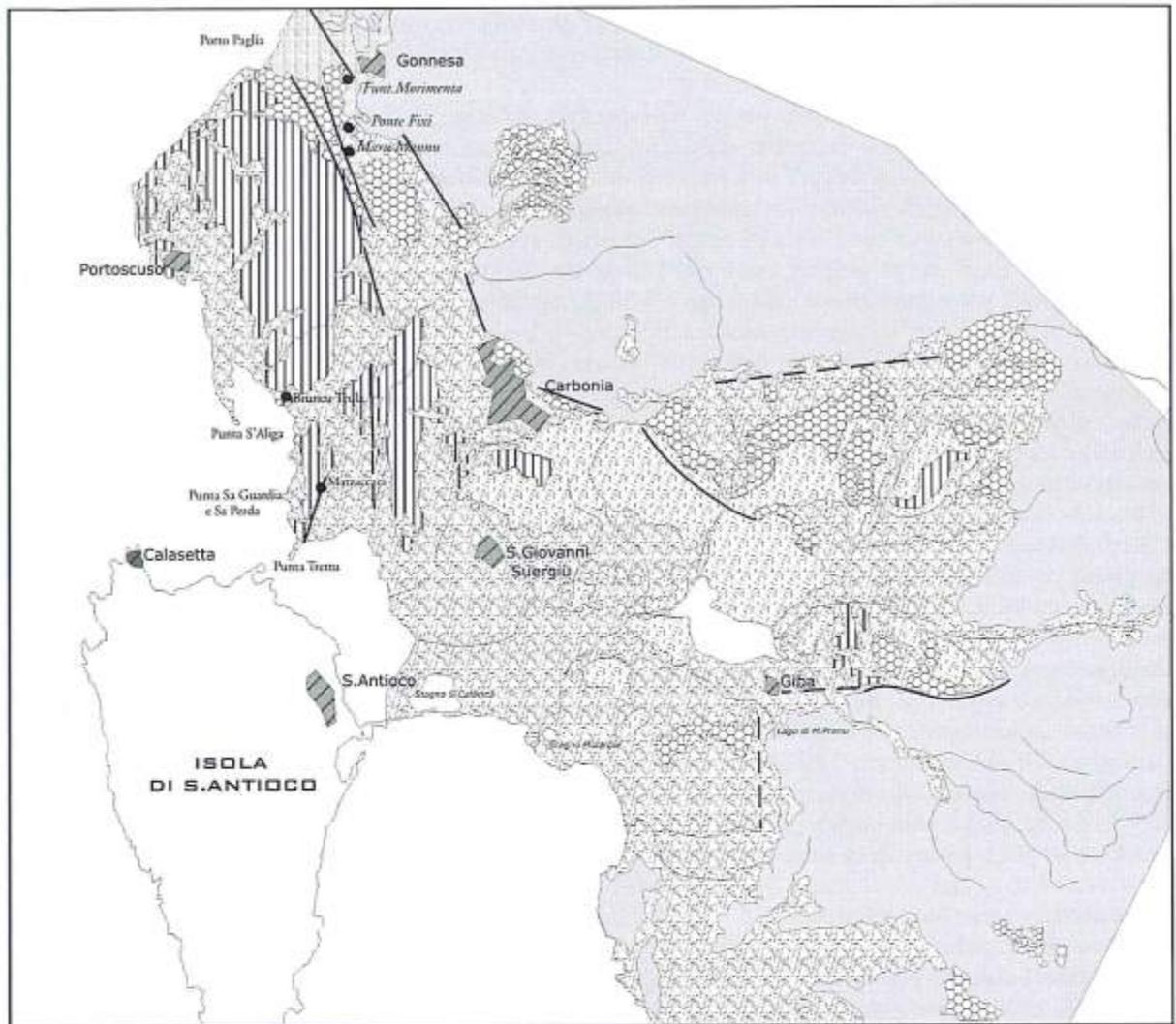


Figura 1 – Localizzazione dell'area in studio.

La fascia costiera mostra invece le più imponenti frecce litoranee presenti in Sardegna, che rimarkano la struttura della costa dal promontorio di Capo Altano a Cala di Piombo. L'andamento di tali forme costiere rivela uno dei fattori di maggiore dinamicità di questa costa, l'esistenza di una forte corrente che segue la costa da nord verso sud, determinando imponenti movimenti di sabbia verso il canale di S. Antioco. Tali movimenti suscitano particolare interesse anche da un punto di vista economico per la presenza di un importante polo industriale nell'area di Portovesme, responsabile di apporti a mare carichi di metalli pesanti che costituiscono un tracciante nello studio dei moti di deriva.

## Contesto geologico

Il Sulcis occidentale è schematicamente caratterizzato da coperture sedimentarie e vulcaniche mesozoiche e cenozoiche poggianti in discordanza sul basamento Paleozoico caratterizzato da sequenze carbonatiche e arenacee di età Cambro-Devoniana (Fig. 2). Le coperture, differenti per caratteri litologici d'insieme, età e significato geodinamico, comprendono dal basso verso l'alto sedimenti carbonatici mesozoici (Trias di Maladroxia nell'Isola di S. Antioco), depositi clastici di ambiente paralico con intercalati livelli di carbone (Paleogene), depositi terrigeni continentali riferibili alla Formazione



## LEGENDA

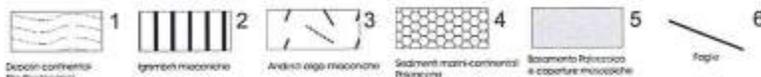


Figura 2 - Schema geologico semplificato del Sulcis occidentale. (1) Depositi pleistocenici indifferenziati; 2-3 coperture vulcaniche orogeniche del ciclo Oligo-miocenico; (2) ignimbriti (sequenza superiore); (3) andesiti (sequenza superiore); (4) coperture sedimentarie pre-mioceniche; (5) basamento paleozoico indifferenziato; (6) principali faglie (da Assorgia et al., 1992; modificato).

del Cixerri (Eocene-Oligocene inf.) e sequenze vulcaniche orogeniche del ciclo Oligo-miocenico (Assorgia et al., 1990 e riferimenti).

Le sequenze vulcaniche, affiorano diffusamente nell'area in esame e costituiscono uno dei tratti geologici e geomorfologici più salienti del territorio investigato. Si tratta di imponenti successioni vulcaniche potenti sino a 1000 m che, sulla base di numerosi dati radiometrici K-Ar, Rb-Sr e Ar-Ar, sono riferibili all'intervallo temporale 27-15 Ma (Morra et al., 1994; Lecca et al., 1997, e riferimenti).

Tale vulcanismo è schematicamente articolato in una sequenza inferiore costituita da rocce andesitiche, andesiti basaltiche e rari basalti ad affinità calcalkalina, e da una superiore dominata da espandimenti ignimbritici (subordinati appaiono i prodotti lavici) di composizione variabile da daciti a rioliti peralkaline (comenditi). Le sequenze piroclastiche sono articolate in almeno 12 unità princi-

pali la cui stratigrafia è stata sintetizzata (Morra et al., 1994) e comprendono, nella parte alta, peculiari tipi comenditici riconducibili a fasi di transizione a un dominio tettonico francamente estensionale che prelude all'apertura del Tirreno (Sau et al., 2005).

In sintesi, le vulcaniti sono costituite alla base prevalentemente da facies laviche composizionalmente riconducibili a sequenze di basalti andesitici, andesiti e rari basalti di tipo "medium-K" (Pl + Opx + Cpx ± Ol ± Hb), su cui poggia una successione potente circa 500 m di espandimenti ignimbrici a chimismo variabile da dacitico, a riolitico, a (nella parte alta della sequenza) comenditico.

Dal punto di vista tettonico, l'area in esame è posizionata su una paleo-struttura della Sardegna occidentale, al di fuori del principale ramo del Rift sardo che probabilmente ridefinisce antiche strutture compressive paleogeniche, dando luogo a blocchi tiltati e bacini di tipo half-graben colmati dalle successioni vulcaniche oligo-mioceniche. In dettaglio, le sequenze vulcaniche colmano due differenti sub-bacini: la Fossa di Carbonia nella porzione meridionale e la Fossa di Cortoghiana in quella settentrionale. Nella fossa di Carbonia, disposta grosso modo est-ovest, si riconosce la serie completa delle unità vulcaniche e soprattutto un'ampia distribuzione delle rocce andesitiche della sequenza inferiore. La fossa di Cortoghiana, ad andamento NNO-ESE è di gran lunga dominata dalla sequenza superiore e rappresenta un blocco disarticolato che mostra, soprattutto nella parte più settentrionale, deboli basculamenti verso est.

I dati desunti dalla letteratura al riguardo suggeriscono che il vulcanismo oligo-miocenico della Sardegna, a cui le successioni del Sulcis appartengono, è in relazione con processi di subduzione della litosfera oceanica tetidea, con conseguente deriva del blocco sardo-corso (Lecca et al., 1997 e riferimenti). Nell'ambito di questo magmatismo, le potenti sequenze ignimbriche del Sulcis sono state interpretate come prodotti di estrema differenziazione di fusi mantellici di composizione basaltica e concomitante assimilazione della crosta continentale (Morra et al., 1994). Il cosiddetto "effetto plagioclasio" condurrebbe infine alla generazione di magmi peralcalini piuttosto peculiari in un contesto orogenico (Morra et al., 1994). La messa in posto dei prodotti peralcalini del settore in studio è riconducibile a lave e ad eventi esplosivi con sviluppo di flussi piroclastici emessi da molteplici apparati, la cui localizzazione appare non ben precisabile a causa di successivi processi erosivi, di fenomeni tettonici sin e post-vulcanici, e delle coperture sedimentarie plio-quadernarie.

### Le coperture pleistoceniche

Lontano dalle culminazioni dei blocchi tiltati, la strutturazione precedentemente descritta, nel Pleistocene rende favorevole l'accumulo di sedimenti eolici nella fascia compresa fra basamento Paleozoico e coperture vulcaniche, secondo un andamento meridiano dal litorale ad ovest dell'abitato di Gonnese nell'area Is Arenas-Porto Paglia (Fig. 2). Si tratta di un esteso campo di paleodune che lungo la fascia meridionale si appoggia lungo costa direttamente sulle coperture vulcaniche. Questi depositi si estendono fin oltre l'abitato di Carbonia, fino a giungere all'area di Portovesme ed alle coste del Sulcis meridionale. Si tratta di sabbie di colore rossiccio, a composizione quarzoso-feldspatica e stratificazione incrociata la cui potenza in due sondaggi effettuati nell'area di Ponte Fixi raggiunge circa i 40 m (Fig. 3).

Nella medesima località ed in zone adiacenti, negli scavi effettuati per uso industriale, sono affiorati questi depositi per uno spessore di circa 10-12 m rivelando l'esistenza di più generazioni di sabbie. Nella porzione inferiore, al disotto di un episodio in parte pedogenizzato (per lo spessore di circa 0.5 m), sono emerse sabbie di ambiente francamente litorale di granulometria tendente alle ghiaie. Scavi adiacenti, localizzati poco più a sud dei precedenti, hanno messo in luce episodi di origine lacustre caratterizzati dalla presenza di calcari neri palustri (Fig. 4). Il livello superiore delle sabbie sembra decarbonatizzarsi ed assottigliarsi verso la zona periferica dello scavo osservato a sud di Ponte Fixi.

Al disopra dell'episodio lacustre, si rinvencono almeno due generazioni di dune riferibili verosimilmente al Pleistocene sup. e medio (Fig. 3). Le relazioni di campagna indicano infatti che questi sedimenti sono successivi a frane di tipo rotazionale che interessano le coperture vulcaniche (Fig. 5), ben evidenti lungo il litorale ad ovest dell'abitato di Gonnese, verosimilmente riconducibili allo scalzamento alla base operato dal mare (Orrù e Ulzèga, 1986). In località Funtana Morimenta, poco distante dall'abitato di Gonnese, sono stati rinvenuti i resti di un elefante nano della specie



Figura 3 - Sabbie stratificate plio-pleistoceniche (Ponte Fixi). Si noti la presenza di due generazioni di depositi dunari, separati dalla superficie erosionale sub-orizzontale, in corrispondenza della linea del piano di lavoro.

*Mammuth lamarmorae* (Comaschi-Caria, 1955) riferibili ad un periodo precedente l'ultimo glaciale. Un dato radiometrico ottenuto con il metodo del radiocarbonio su resti di cervidi rinvenuti nella parte alta dei depositi eolianitici in località Funtana Morimonta, fornisce un'età di  $43000 \pm 1.400$  anni che suggerirebbe sostanzialmente la loro attribuzione all'ultimo glaciale (Melis et al., 2002).

Il significato geologico di tale dato va comunque utilizzato con cautela sia perché riferito ad un solo campione sia perché praticamente coincidente con il limite di utilizzazione del metodo, condizionata dal breve tempo di dimezzamento del  $C^{14}$ . Pertanto, tale dato radiometrico si avvicina verosimilmente al limite superiore per le coperture recenti del Sulcis occidentale in quanto riferite a depositi fluviali posizionati nella parte alta della sequenza.

Il sito di Ponte Fixi è ubicato a circa 50 m sul livello del mare attuale a oltre 4 km di distanza dalla linea di costa attuale (Fig. 2). L'esistenza pertanto di una linea di spiaggia posta a circa 25-30 m al di sopra del livello del mare attuale presuppone l'esistenza di una profonda ria nell'attuale valle asimmetrica del rio di Benazzu Mannu. I depositi sabbiosi poggiano sulle coperture eocenico-oligoceniche riferibili alla Formazione del Cixerri facendo supporre l'esistenza di una paleo-valle ben evoluta e profonda che ha favorito l'accumulo di sabbie eolico-litorali attraverso un processo perdurato e ripetuto nel tempo.

L'episodio lacustre sottolinea il passaggio climatico alle sabbie eoliche superiori e pare costituire un livello di riferimento nell'area in oggetto poiché la sua presenza è stata riscontrata anche in scavi situati nel settore di Bacu Abis. I caratteri petrografici suggeriscono una distinzione tra le varie generazioni di sabbie in funzione dell'incidenza del cemento e di alcuni elementi mineralogici. Infatti, le sabbie inferiori mostrano globalmente una grana medio-grossolana piuttosto eterogenea con presenza sporadica di bioclasti, mentre le sabbie superiori sono piuttosto omogenee ed a grana medio-fine.



Figura 4 – Sabbie litorali sottostanti il livello di calcare palustre (centro della foto); il passaggio sottostante è marcato da un orizzonte di argille sabbiose (Ponte Fixi).



Figura 5 – Depositi eolici pleistocenici all'interno delle nicchie di distacco delle frane lungo costa attualmente interessate dalla regressione della falesia (Capo Altano).

### Forme della dinamica costiera

Il litorale che domina l'area in studio appare assai singolare nell'ambito del paesaggio costiero della Sardegna. Vi è una netta differenza fra il settore settentrionale dell'area, compreso fra la spiaggia di Is Arenas-Porto Paglia e il promontorio di Capo Altano, e il resto della costa che si affaccia verso sud-ovest di fronte alle isole di S. Antioco e di S. Pietro. Qui la fascia costiera è caratterizzata da un sistema di drenaggio superficiale impostato lungo direttrici NE-SO, di cui il Rio di Palmas e il Riu S. Milano costituiscono gli apporti maggiori. Il primo crea un'ampia piana costiera sulla quale si osservano i cordoni litorali che separano dal mare gli stagni di Mulargia e S. Caterina; il secondo determina un rapido sollevamento dei fondali per l'intrappolamento dei corpi sabbiosi sommersi in prossimità della costa. La stessa foce del corso d'acqua è chiusa dalla sequenza di frecce litorali che si dispongono parallelamente alla costa, caratterizzando lunghi tratti di litorale. A nord chiudono l'insenatura di Portovesme mentre, poco più a sud, la Punta de s'Aliga crea un'ampia insenatura che tende progressivamente a chiudere il braccio di mare dove si trova lo stagno di su Mare Segau oggi sede degli impianti di decantazione dei fanghi rossi provenienti dall'area industriale di Portovesme. Tutto questo primo tratto di costa è oggi profondamente antropizzato. Il recente sviluppo industriale dell'area di Portovesme, ha determinato un significativo intervento antropico attraverso opere di stabilizzazione della costa, che sono oggetto di un ulteriore studio (Ginesu et al., in preparazione).

La parte più meridionale mostra nel promontorio di Sa Guardia e sa Perda le frecce S'Ega manna e Punta Trettu che chiudono l'ampia insenatura della foce del Riu Macuarba presso l'abitato di Is Pizzus. La modifica della linea di costa in questo tratto del litorale è la più significativa della Sardegna. Dall'analisi della cartografia più recente appare evidente che, nel corso degli ultimi 35 anni, la situazione in questo tratto di costa è profondamente mutata sia nella crescita e nel prolungamento delle frecce litorali (tra Punta de s'Aliga e Punta Trettu) sia nella sostanziale progradazione della costa, in particolare nell'area di S'Ega Manna. Qui l'apporto delle sabbie ha determinato l'avanzamento dello stagno di Punta S'Arena per circa 1 km determinando un'ampia freccia litorale a monte di Punta Trettu.

La condizione di basso fondale fa ritenere possibile nell'arco di un tempo sufficientemente breve la crescita esponenziale di tali forme indotta sia dalla corrente proveniente da nord che si immette nella stretta di Punta Trettu, sia dall'imponente sistema di regimazione adottato lungo i corsi d'acqua che sfociano nella parte centrale in linea con il polo industriale di Portovesme. I tratti costieri finora considerati sono caratterizzati dalla presenza continua di una costa sabbiosa ad elevata dinamicità i cui caratteri compositivi e sedimentologici appaiono uniformi a sottolineare il profondo intervento selettivo dei processi morfodinamici in atto.

In alcune località, in particolare nel tratto a nord di Portoscuso, la costa assume morfologia a falesia di una certa importanza e i valori batimetrici cambiano decisamente. Nell'area di Capo Altano la batimetrica dei 50 m è situata a meno di 3 km dalla costa mentre all'altezza di Bruncu Teula, in prossimità di Punta e s'Aliga, alla stessa distanza insiste la batimetrica di 5 m. L'intero canale navigabile tra la Sardegna e l'Isola di S. Antioco è compreso in questa profondità. Lungo le falesie di Capo Altano, in parte definite da alcune frane roto-traslazionali impostate sulle successioni vulcaniche oligo-mioceniche, si ritrovano frequentemente resti dei depositi eolici del Pleistocene superiore, probabili resti della progressiva ingressione marina post-glaciale. Questi depositi si trovano diffusi anche nelle parti sommitali dei rilievi vulcanici di Conca de Masoni Arcas, in condizioni di trappole morfologiche, che hanno conservato queste eolianiti. In prossimità di Funanamare è ubicato il vasto campo di dune di Is Arenas che testimonia la persistenza dei venti del IV quadrante per tutto il Pleistocene superiore, come nel resto dell'Isola. Il campo di dune ricopre la paleo valle asimmetrica di Gonnesa di origine strutturale, impostata fra le vulcaniti cenozoiche del versante meridionale e il basamento paleozoico dei versanti settentrionali. I sondaggi effettuati nella zona di Ponte Fixi, permettono di riconoscere l'evoluzione di questa valle fin dal Pleistocene inferiore e l'esistenza di un substrato eocenico al fondo di tale morfologia che fa ascrivere la sua origine ad una struttura tettonica pre-pliocenica facendo in tal modo attribuire a quella di Gonnesa una genesi valliva tra le più antiche della Sardegna generalmente ascrivibili al Pliocene medio-finale.

I movimenti recenti che hanno caratterizzato il sollevamento di questo territorio sono testimoniati dalle numerose forme presenti sul substrato Paleozoico e nelle coperture vulcaniche oligo-mioceniche che dominano il settore settentrionale dell'area in studio. In particolare, appare assai singolare il raffronto fra i depositi carbonatici mesozoici che costituiscono il versante settentrionale a monte della località di Funanamare, presso l'abitato di Gonnesa, e le ignimbriti che dominano il promontorio di Acqua sa

Canna, nel versante opposto. I calcari mostrano una giacitura inclinata verso sud, seguendo la gola di Gutturu su Forru, in posizione di inversione di rilievo mentre, sul versante opposto, le ignimbriti, culminanti nel Monte Perdaias Mannas, presentano un basculamento verso sud-est che evidenzia un diverso comportamento dei blocchi tiltati a nord e a sud dell'area di Is Arenas. Sono altrettanto evidenti, sui versanti meridionale di Monte Arbu, le forme a flatirons e cuspidi triangolari nelle rocce carbonatiche del Cambiano.

### Evoluzione paleogeografica

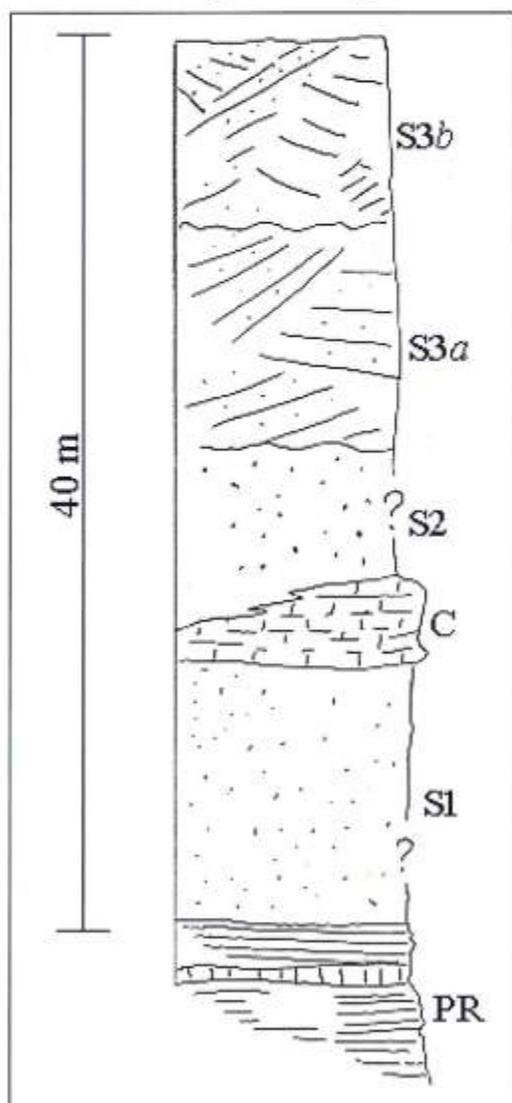
Nel corso dei lavori effettuati in località Ponte Fixi, lungo il tracciato stradale che dall'abitato di Gonnese conduce all'abitato di Carbonia, sono emersi alcuni elementi di particolare interesse che hanno consentito di ipotizzare una possibile ricostruzione dell'intera area costiera del basso Sulcis durante il Pleistocene. L'area di Ponte Fixi, interessata da un profondo scavo di oltre 7 m dal piano di campagna allo scopo di realizzare un vascone di contenimento ad uso privato, ha messo in luce la continuità delle coperture sabbiose tranne che in due punti dell'opera. Il primo situato nel settore settentrionale dello scavo, verso Gonnese, il secondo nella porzione meridionale a circa 200 m dal primo.

Benché, precedentemente allo scavo, siano stati realizzati due sondaggi, la sequenza stratigrafica non si è evidenziata nel dettaglio ma dalle perforazioni è emersa con chiarezza la potenza delle coperture eolico-sabbiose

(Fig. 6). Come precedentemente indicato, si è individuata la base di appoggio di questa sequenza a circa 40 m dal piano di campagna in appoggio sui depositi dell'Eocene che sono stati perforati fino a giungere alle vecchie gallerie abbandonate della miniera di Seruci, totalmente allagate. Nel punto più a nord dello scavo è affiorata una formazione costituita da grossi blocchi ad elevata maturità, provenienti dallo smantellamento delle coperture mesozoiche e costituenti una sorta di barriera trasversale rispetto all'attuale configurazione della valle. Non è stato possibile osservare il loro appoggio, ma la notevole abbondanza di bentonite originata dall'alterazione delle vulcaniti oligo-mioceniche, indicherebbe l'assenza dei depositi sabbiosi sotto tale deposito. Tale formazione può essere interpretata come il rimaneggiamento pre-pleistocenico dei depositi alluvionali già segnalati e interpretati come terrazzi pre-deriva del blocco sardo-corso (Cocozza, 1966) e provenienti dai bacini di sedimentazione ad ovest della Sardegna, affioranti in località prossime all'area in studio.

Nella porzione meridionale dello scavo di Ponte Fixi, a circa 10 m di profondità dal piano di campagna, è emerso un livello lenticolare di calcari micritici nerastri di ambiente lacustre che gradatamente si assottiglia verso nord in corrispondenza della formazione a blocchi. Al disotto di questo livello riprende un deposito sabbioso a grana eterogenea di chiara origine costiera. Lo scavo si è fermato circa 2 m all'interno di tale formazione che, dai sondaggi, mostra avere una potenza superiore ai 5 m. Simili caratteri stratigrafici sono emersi anche in uno vicino scavo, nella zona di Muru Nieddu, a circa un chilometro di distanza da quello di Ponte Fixi.

Figura 6 - Sezione schematica rappresentativa delle coperture pleistoceniche nell'area di Ponte Fixi. PR = calcari, marne ed argille del "Produttivo" Auct. (Paleogene); S1 = sabbie quarzose di ambiente litorale; C = calcari lacustri; S2 = sabbie eoliche inferiori; S3a = sabbie superiori decarbonatizzate; S3b = sabbie superiori rossastre.



In entrambi gli scavi, la parte sommitale risulta costituita da un complesso di due generazioni di dune spesso separate da una riconoscibile superficie di erosione al loro contatto; nella parte inferiore, spesso sono presenti livelli centimetrici di sostanza organica attribuibili a locali disseccamenti dei livelli di ristagno delle acque, coevi al deposito dei calcari palustri di Ponte Fixi. In considerazione del fatto che l'area di Ponte Fixi è localizzata a circa 6 km di distanza dall'attuale linea di riva e le coperture sommitali giungono a circa 60 m sopra il livello del mare attuale, appare chiaro che i depositi lacustri giacciono a circa 45 m e possono essere attribuiti ad un periodo antecedente l'ultimo interglaciale, quando le condizioni generali della valle di Gonnese, la valle del Rio Crabiola costituiva una profonda ria fino allo spartiacque di Bacu Abis. Oltre tale spartiacque, più a sud, la linea di costa era estremamente frammentata dalle rias provenienti dalla costa meridionale di S. Giovanni Suergiu e Matzaccara, ancora oggi testimoniate dall'evidente allineamento dei rilievi vulcanici che emergono dalle coperture sabbiose, lungo assi impostati nord-sud (Concali Arrubiu e Monte di Matzaccara). La situazione generale offre un quadro evolutivo importante per il Pleistocene medio e medio-inferiore, determinando una condizione paleogeografia della linea di costa assai differente dall'attuale e condizionata da una neotettonica assai più significativa di altre zone dell'Isola. La difficoltà di reperire elementi per datazioni radiometriche rende necessario un raffronto per analogia con altre zone dell'Isola; tuttavia, la presenza di un noto giacimento a elefanti nani nell'area prospiciente lo scavo di Ponte Fixi (Fontana Morimenta) e soprattutto la recente scoperta di tale fauna anche nella piana di Campu Giavesu, nel nord dell'isola, riferita al Pleistocene medio (Palombo et al., 2003), rende verosimile l'ipotesi che la presenza dello stagno sia coeva o immediatamente precedente la presenza di tale fauna. Ciò assume particolare significato poiché aiuta a comprendere lo stato conservativo di quest'area per questo periodo e induce a ritenere che il riempimento della fossa di Cortoghiana sia avvenuto con estrema rapidità precedentemente ad un progressivo e più rapido sollevamento dell'area rispetto a zone limitrofe.

### Considerazioni conclusive

Da quanto precedentemente esposto, si evincono alcune informazioni che permettono di fornire elementi innovativi nel contesto geologico, geomorfologico ed evolutivo del basso Sulcis occidentale. Per quanto questo territorio sia stato oggetto anche di precedenti indagini volte a definire lo stile tettonico del settore, i dati ottenuti attraverso i sondaggi effettuati nell'area di Ponte Fixi, indicano l'evidenza di processi neotettonici di una certa entità verosimilmente attribuibili al Pleistocene medio e medio-inferiore, periodo che in Sardegna è particolarmente carente di letteratura, analisi, dati e attenzione.

Il ruolo della neotettonica riferibile a questo periodo è ben documentato nell'area del Logudoro (Sardegna centro-settentrionale) attraverso le periodiche emissioni di lave basaltiche s.l. che hanno consentito la valutazione del sollevamento post-pliocenico per l'intera Sardegna settentrionale (Marini e Murru, 1983; Sias, 2002; Ginesu e Sias, 2005). Analogamente, nell'area del graben campidanese, gli studi effettuati hanno consentito di valutare la potenza della subsidenza e dei relativi sollevamenti dei blocchi laterali a partire dal Pliocene (Carboni e Lecca, 1985). Considerazioni simili sono state documentate negli imponenti depositi di origine periglaciale presenti lungo la fascia costiera centro-orientale che hanno permesso di definire l'evoluzione di questa fascia a partire dal Pliocene (Cordy e Ginesu, 1995). Per la prima volta, si definiscono dei parametri di interpretazione nel settore del basso Sulcis occidentale che permettono una precisa definizione della genesi delle coste che insistono nell'area investigata e che valutano la considerevole diffusione delle coperture eoliche recenti.

Tali informazioni forniscono utili elementi alla comprensione delle rapide trasformazioni lungo la linea di costa attuale per tutto il tratto che comprende il canale delle isole di S. Antioco e S. Pietro con la costa continentale. Lo studio vuol essere il primo elemento di conoscenza atto a definire i processi di trasformazione della linea di riva attuale e la forte variazione spazio-temporale delle forme ad esse associate. Inoltre, l'imponente trasformazione di questo tratto costiero a partire dal Pleistocene medio, aiuta a ben comprendere come le condizioni generali di questo territorio rappresentino un importante campo di indagine nel movimento delle masse sabbiose sommerse e nel movimento delle correnti sotto-costa, tra le più importanti dell'Isola. La ricostruzione degli elementi paleogeografici offerti dalle nostre indagini permette di considerare un progressivo mutamento della genesi di questa costa che da un'originaria condizione di costa a rias, presente fino al Pleistocene medio, si evolve progressivamente e costantemente in una costa sabbiosa a causa degli imponenti processi di deposizione di cordoni litoranei indotti dalla corrente proveniente da nord.

**Bibliografia**

- Assorgia A., Brotzu P., Callegari E., Fadda A., Lonis R., Ruffini R. e Abrate T. (1992) – *Carta geologica del distretto vulcanico cenozoico del Sulcis (Sardegna sud-occidentale)*. Selca. Firenze.
- Assorgia A., Fadda A., Gimeno Torrente D., Morra V., Ottelli L. e Secchi F. (1990) – *Le successioni ignimbriche terziarie del Sulcis (Sardegna sud-occidentale)*. Mem. Soc. Geol. It., 45: 951-963.
- Beccaluva L., Brotzu P., Macciotta G., Morbidelli L., Serri G. e Traversa G. (1987) – *Cainozoic tectono-magmatic evolution and inferred mantle sources in the Sardo-Tyrrhenian area*. In: *The Lithosphere in Italy: Advances in Earth Science Research*. Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, pp. 229 - 248.
- Carboni S. e Lecca L. (1985) – *Osservazioni sul Pleistocene medio superiore della penisola del Sinis (Sardegna occidentale)*. Boll. Soc. Geol. It., 104: 459-477.
- Carmignani L., Decandia F. A., Disperati L., Fantozzi P. L., Lazzarotto A., Casula G., Cherchi A., Montadert L., Murru M. e Sarria E., (2001) – *The Cenozoic graben system of Sardinia (Italy): geodynamic evolution from new seismic and field data*. Marine and Petroleum Geology, 18: 863-888.
- Cherchi A. e Montadert L. (1982) – *The Oligo-Miocene Rift of Sardinia and early history of the western mediterranean basin*. Nature, 298: 736-739.
- Cocozza T. (1966) – *Contributo allo studio dei depositi ciottolosi dell'isola di S. Pietro (Sardegna sud-occidentale)*. Mem. Soc. Geol. It., 5: 165-188.
- Comaschi-Caria (1955) – *Resti di cervidi nel Quaternario di Portovesme*. Riv. It. Paleont. Strat., 61: 17-27.
- Cordy J. M. e Ginesu S. (1995) – *Il Monte Tuttavista. I riempimenti carsici e la scoperta delle nuove specie del Pleistocene*. Edizioni Poiddighe. Sassari.
- Coulon C. (1977) – *Le volcanisme calco-alcaline cénozoïque de Sardaigne (Italie): pétrographie, géochimie et genèse des laves andésitiques et des ignimbrites. Signification géodynamique*. Thèse Univ. Marseille, pp. 1-370.
- Ginesu S. e Manca R. (2005) – *I campi dunari della Sardegna: implicazioni geomorfologiche e paleoclimatiche*. Workshop su "I depositi eolici delle coste italiane ed il flusso di sedimenti spiaggia-duna. Arbus, loc. Piscinas, 31 Marzo – 2 Aprile 2005.
- Ginesu S. e Sias S. (2005) – *Drainage network modifications by Plio-pleistocenic lava flows in Sardinia (Italy)*. Sixth international Conference on Geomorphology. Saragoza, 7-11 Settembre 2005, pp. 120.
- Lecca L., Lonis R., Luxoro S., Melis F., Secchi F. e Brotzu P. (1997) – *Oligo Miocene volcanic sequences and rifting stages in Sardinia: a review*. Per. Mineral., 66: 7-61
- Marini A. e Murru M. (1983) – *Movimenti tettonici in Sardegna fra il Miocene superiore ed il Pleistocene*. Geogr. Fis. Dinam. Quatern., 6: 39-42.
- Melis R. T., Palombo M. R. e Mussi M. (2002) – *The stratigraphic sequence of Gonnese (SW Sardinia): palaeoenvironmental, palaeontological and archaeological evidence*. In: Waldren W.H., Ensenyat J.A. (eds.), *World Islands in Prehistory, International Insular Investigations*, BAR Int. Ser., 1095: 445-453.
- Morra V., Secchi F. e Assorgia A. (1994) – *Petrogenetic significance of peralkaline rocks from cenozoic calcalkaline volcanism from SW Sardinia (Italy)*. Chem. Geol., 118: 109-142.
- Orrù P. e Ulzega A. (1986) – *Geomorfologia costiera e sottomarina della baia di Funtanamare (Sardegna sud-occidentale)*. Geogr. Fis. Din. Quatern., 9: 59-67.
- Palombo M. R., Ginesu S., Melis R. T. e Sias S. (2003) – *The endemic elephants from Sardinia: an unsolved problem*.
- Sau A., Lecca L., Lonis R., Secchi F. e Fercia M. L. (2005) – *La seconda fase del Rift sardo: vulcanismo ed evoluzione dei sub-bacini di Ardara-Chilivani e Bonorva*. Boll. Soc. Geol. It., 124: 3-20.
- Sias S. (2002) – *Plio-pleistocenic evolution of Rio Mannu valley (Logudoro, northern Sardinia)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 25: 135-148.

Manoscritto ricevuto il 07/01/2006; accettato il 22/02/2006.

## L'evoluzione dei campi dunari di Platamona-Marritza (Sardegna settentrionale): aspetti morfo-sedimentologici e vegetazionali dell'area di Marina di Sorso

Ileana Balduzzi<sup>1</sup>, Nicola Corradi<sup>1</sup>, Marco Ferrari<sup>1</sup>, Luca Maria Mariotti<sup>1</sup>, Ilda Vagge<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dip. Te. Ris., Università degli Studi di Genova, C.so Europa, 26 - 16132 Genova, Italia.

<sup>2</sup> Dipartimento di Produzione Vegetale, Università degli Studi di Milano, Italia.

E-mail: corradi@dipteris.unige.it

### Riassunto

La ricostruzione dell'evoluzione dei campi dunari costieri italiani è stata oggetto del progetto di ricerca PRIN-COFIN 2002 "I depositi eolici delle coste italiane e flusso dei sedimenti spiaggia-duna", volto a produrre un atlante dei sistemi dunari italiani, primo esempio in Mediterraneo.

Il progetto nazionale, coordinato dall'Università di Genova, ha avuto come obiettivo locale lo studio dei depositi eolici della costa settentrionale della Sardegna, area ad elevata fruizione turistica.

L'obiettivo specifico è stato quello di analizzare l'evoluzione del settore studiato, inquadrandolo nelle dinamiche naturali ed antropiche integrando i dati derivati dal telerilevamento e dall'attività di campo in cui a processi erosivi delle spiagge si sommano pressioni antropiche determinando un generale degrado dei depositi dunari e delle associazioni vegetazionali.

Vengono presentate le risultanze dello studio del tratto di costa di Marina di Sorso, nell'ampia unità fisiografica che comprende il settore Platamona - Marritza (Sardegna nord-occidentale).

I dati bibliografici, l'elaborazione di ortofotografie e quelli derivati dall'attività di campo, relativi sia agli aspetti morfologici sia a quelli vegetazionali hanno messo in evidenza la situazione di grave crisi in cui versa il tratto costiero compreso tra Platamona e Marritza ed in particolare l'area di Marina di Sorso, per cause sia naturali che antropiche. Nonostante la situazione di generale degrado, l'area presenta caratteristiche naturali molto interessanti ed alcuni aspetti correttivi sulla gestione del territorio porterebbero ad una migliore conservazione del patrimonio dunare ed una mitigazione degli effetti dell'erosione.

**Parole chiave:** dune costiere, fotointerpretazione, spiagge, sedimentologia, morfologia, fitosociologia, Platamona-Marritza, Sardegna.

### Abstract

*The reconstruction of the evolution of the coastal dune fields of Italy was undertaken as part of the PRIN-COFIN 2002 research project "I depositi eolici delle coste italiane e flusso dei sedimenti spiaggia-duna - The aeolian deposits of the Italian coast and the beach-dune sedimentary flux" with the aim of producing an atlas of the Italian dune systems, which would be the first example of such an atlas for the Mediterranean area.*

*The national project, co-ordinated by the University of Genoa, had the specific objective of studying the aeolian deposits of the northern coast of Sardinia, an area of intensive tourist activity.*

*The specific object of the study was to analyse the evolution of the sector under study and place it within the natural and anthropic dynamics by integrating the data derived from remote sensing and field work, which revealed that the erosive processes of the beach, worsened by anthropic activity, have caused a general degradation of the dune fields and their associated vegetation.*

*This paper presents the results of the study of the Marina di Sorso coastal tract that lies within the Platamona-Marritza physiographical unit (north-western Sardinia).*

*The bibliographical data, the elaboration of the remote sensing data and the morphological and vegetational studies revealed that the ecosystem of the area between Platamona and Marritza, and specifically that of Marina di Sorso, is in crisis due to both natural and anthropic causes.*

*Despite the general degradation, the area has very interesting natural characteristics and corrective action could bring about better conservation of the dunal patrimony and the mitigation of the effects of erosion.*

**Keywords:** coastal dunes, remote sensing, coastal dynamics, sedimentology, morphology, phytosociology, Platamona-Marritza, Sardinia.

### Inquadramento geografico

Il litorale di Platamona-Marritza, situato nel nord della Sardegna, costituisce un esempio di ambiente costiero mediterraneo caratterizzato da una marcata eterogeneità tipologica dei sistemi dunari.

Il litorale, come si deduce dalla lettura del foglio n° 180 dell'Atlante delle Spiagge italiane (Fig. 1), si sviluppa tra la foce del Rio Pedras de Fogu ad est e la Torre di Abbacurrente ad ovest; la morfologia si presenta poco articolata ed è caratterizzata da una lunga spiaggia sabbiosa (17 km circa) bordata da più cordoni di dune, longitudinali e paraboliche, prevalentemente orientate N-W/S-E, alcune delle quali con altezze che raggiungono i 32 metri (Federici et al., 1987-'88).

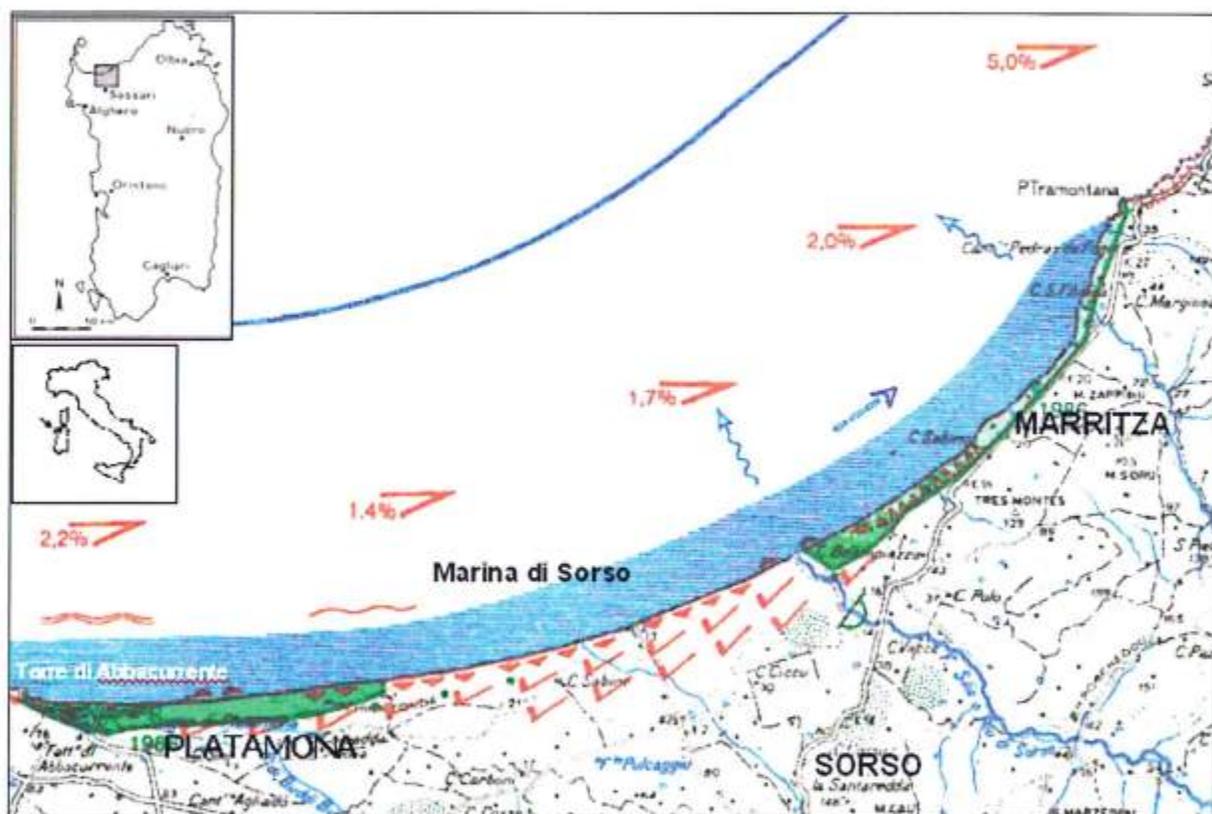


Figura 1 - Il litorale di Platamona-Marritza nell'Atlante delle Spiagge Italiane (dal Foglio n°180 - Sassarese, CNR-MURST, 1999).

La rete idrografica è costituita da piccoli corsi d'acqua a carattere torrentizio, con una scarsa portata durante la maggior parte dell'anno ed un regime essenzialmente legato agli apporti meteorici.

I depositi eolici si estendono per tutta la fascia costiera. Tra questi si possono distinguere le eolianiti pleistoceniche dalle sabbie oloceniche ed attuali: i depositi sabbiosi più antichi affiorano soprattutto sulla linea di riva ad ovest di Marritza, dove sono intagliati in una falesia di diversi metri di altezza. Il cordone di dune attuali, invece, orla la spiaggia per oltre 15 km; le dune longitudinali, che insieme a quelle paraboliche costituiscono il cordone di Platamona, sono orientate tra N-110 e N-140, con la media sita a N-125 circa, chiaramente legata all'azione del Maestrale (Ozer, 1976).

### Clima meteomarinario

Per la caratterizzazione climatica sono stati utilizzati i dati termo-pluviometrici delle stazioni di Porto Torres, Stintino e Alghero, che indicano un quantitativo medio annuo di precipitazioni attorno ai 519 mm, con un massimo di piogge in autunno e temperature medie annuali di 17.2° C, con un massimo nei mesi di luglio e agosto (28.5-28.9 °C) e un minimo nel mese di gennaio (7°C). L'applicazione dei metodi di Bagnouls e Gausson (Walter e Lieth, 1960) e Thornthwaite (1948), mette in evidenza un periodo di aridità estiva, con un deficit idrico da metà giugno a settembre. Dal punto di vista bioclimatico secondo la classificazione di Rivas-Martinez (1999) il territorio rientra nel macrobioclima mediterraneo, a termotipo termomediterraneo e ombrotipo subumido.

Il litorale in oggetto di studio si situa all'interno del Golfo dell'Asinara e, a causa della presenza della Corsica nel I quadrante e dell'Isola dell'Asinara nel IV quadrante, presenta un fetch di circa 50 miglia ed un settore di traversia assai limitato, sia per i venti dominanti sia per quelli regnanti.

Lungo la spiaggia di Platamona-Marritza i venti di maggiore importanza per la dinamica litorale sono quelli di Grecale e Maestrale, provenienti dal I e IV quadrante. Nonostante il Libeccio, che spirava con notevole frequenza ed intensità dal III quadrante, sono i venti provenienti dai settori marini che esplicano maggiormente l'azione modellante sul campo di dune litorali. Infatti l'atlante "*Winds and Waves Atlas of the Mediterranean Sea* (2004)" indica per questo settore che i venti del I e IV quadrante spirano con frequenze rispettivamente del 21% e 35% mentre quelli di terra, provenienti dai settori meridionali, hanno frequenze del 17% (II quadrante) e del 27% per il III. I venti di maggiore intensità (>6 Beaufort) spirano dal IV quadrante con una frequenza del 66% e dal III con frequenza del 20%, quelli con intensità compresa tra 4 e 5 gradi Beaufort provengono per il 36% dal IV quadrante e per il 30% dal III. Le brezze hanno frequenze che si distribuiscono uniformemente in tutti e quattro i quadranti.

Per quanto riguarda le correnti da moto ondoso il Foglio 180 dell'Atlante delle Spiagge Italiane indica per il settore in esame una deriva litoranea diretta prevalentemente verso nord-est.

### Evoluzione del litorale e dei campi dunari di Platamona-Marritza

Lo studio dell'evoluzione diacronica dei depositi dunari è stato condotto tramite l'analisi di fotografie aeree del 1955, 1977 e del 2002.

Per il 1955 è stato composto un mosaico di 6 fotografie aeree in emulsione bianco-nero ad una scala di 1:30000. Il mosaico del 1977 è stato assemblato con l'unione di 30 immagini in emulsione bianco-nero con una scala di 1:10000; per quello del 2002 sono state utilizzate 25 fotografie aeree in emulsione a colori, sempre alla scala di 1:10000.

Tutte le immagini sono state scannerizzate ad una risoluzione di 600 dpi e georeferite per mezzo del software ERDAS Imagine, utilizzando la proiezione UTM con un datum riferito al 32 Nord. I punti di controllo sono stati selezionati utilizzando come base di riferimento la cartografia IGM (1:25000) per realizzare la rettifica geometrica e minimizzare l'errore residuo tra il modello di trasformazione e le coordinate di riferimento.

L'esame delle foto aeree (Fig. 2) ha messo in evidenza come durante questo arco di tempo, la morfologia del territorio sia molto mutata: dal mosaico di fotografie del 1955 si può constatare che i depositi eolici si trovavano per ampie porzioni ad uno stato naturale, le dune presentavano ampie zone soggette a deflazione con un probabile importante flusso di sabbia verso l'entroterra che ha portato alla necessità di stabilizzazione delle dune mediante l'impianto di una pineta. Infatti il mosaico del 1977 mostra un territorio interamente piantumato a cura del Corpo Forestale dello Stato. Gli interventi antropici compiuti in quegli anni hanno mutato radicalmente l'aspetto del campo dunare: una fitta rete viaria ricopre il territorio, fino ai primi cordoni di dune, e l'attività edilizia è sempre più evidente in tutto il litorale.

Nel 2002 la situazione non appare mutata rispetto al 1977: l'impianto boschivo ricopre ancora tutto il campo dunare e la rete stradale è potenziata in alcune parti del territorio, soprattutto per servire le nuove strutture turistico-ricreative sorte negli anni '80-'90.

Le cause degli squilibri sedimentari che stanno interessando questo tratto di litorale sono da ricercare nello sviluppo urbanistico degli anni '70-'80-'90 che ha condizionato il delicato equilibrio dinamico che caratterizza il sistema duna-spiaggia.

L'analisi della evoluzione delle linee di riva tra il 1955 ed il 2002 mostra un litorale in generale arretramento; il processo erosivo si manifesta con gradi d'intensità differenti: ad Est, presso Marritza, le coste mostrano segni evidenti della rapidità dell'arretramento della costa, con fino a 25-35 metri di variazione nel periodo considerato. Questo fenomeno è in atto soprattutto in quella parte di litorale che presenta una falesia arretrata rispetto alla linea di riva, mentre nelle restanti aree il processo erosivo è meno attivo (Balduzzi et al., 2004; Balduzzi et al., 2005).

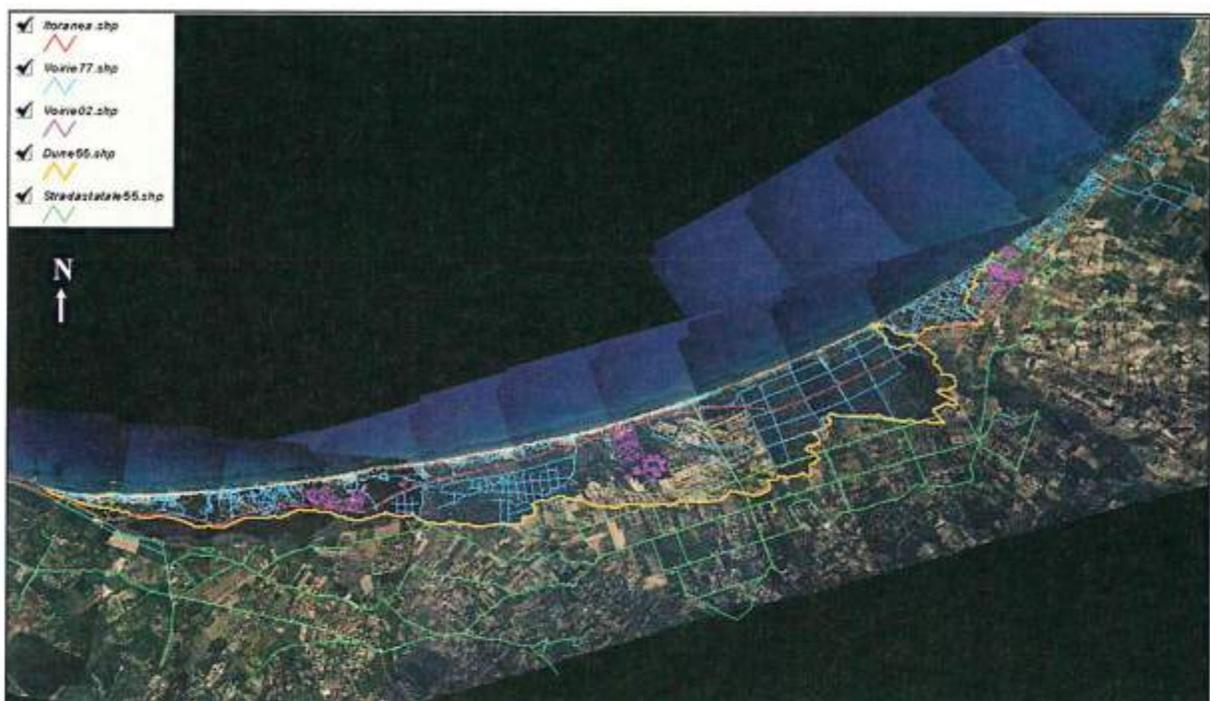


Figura 2 - Evoluzione antropica del campo dunare di Platamona- Marrizta tra il 1955 ed il 2002 (base fotografica: ortofoto a colori del 2002. Compagnia Generale Ripresearee S.p.A., scala approssimativa 1:100.000).

### Aspetti evolutivi dell'area di Marina di Sorso

#### *Materiali e metodi*

Per lo studio degli aspetti evolutivi dell'area, sono state condotte delle indagini di campo (Fig. 3) sull'area campione di Marina di Sorso, attraverso rilievi della spiaggia emersa, delle avandune e del campo di dune. Nel periodo Settembre-Ottobre 2003 e Giugno 2004, sono stati eseguiti:

- a) rilievo di profili morfologici secondo transetti con interasse medio di 70 metri, scelti in rapporto all'assetto morfologico;
- b) rilievo topografico dei campi dunari e restituzione dei dati con equidistanza di 0.5 m;
- b) rilievo della vegetazione presente lungo i cordoni dunari.

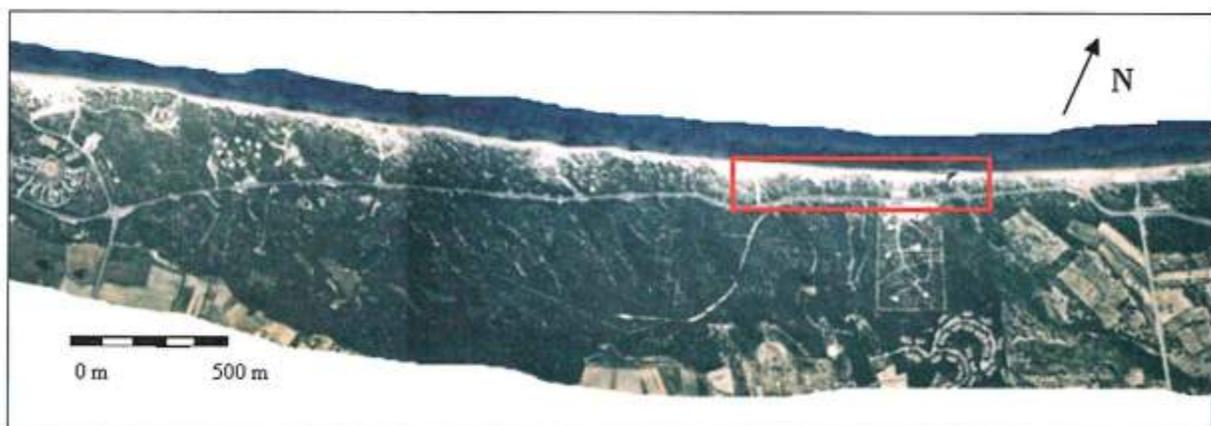


Figura 3 - Localizzazione dell'area campione (base fotografica: ortofoto a colori 2002. Compagnia Generale Ripresearee S.p.A.).

Lo studio della vegetazione per questo tratto di litorale è stato basato su rilevamenti realizzati con il metodo fitosociologico (Braun-Blanquet, 1964; Rivas-Martinez, 1987; Géhu, 1988; Géhu e Rivas-Martinez, 1981) con lo scopo di raccogliere informazioni dettagliate su campioni omogenei di vegetazione e di giungere alla descrizione delle associazioni vegetali presenti, della loro ecologia e della loro dinamica evolutiva. Tale metodologia, attraverso l'individuazione e la classificazione delle associazioni vegetali, permette di valutare la diversità fitocenotica (Biondi, 1996) e di fornire indicazioni sulla qualità ambientale. In Fitosociologia per associazione vegetale s'intende un insieme di organismi vegetali con composizione floristica statisticamente ripetitiva, alla quale corrisponde una serie di aspetti quali la struttura, l'ecologia e la qualità (seriale e/o catenale) dei rapporti che realizza con altre comunità. Particolarmente indicativa per la sua definizione è la composizione specifica caratteristica determinata dall'insieme delle piante preferenti, che sono ad essa particolarmente legate (Biondi *in verbis*).

I rilievi fitosociologici sono stati condotti nel periodo Settembre-Ottobre 2003 e Giugno 2004 congiuntamente alla campagna morfo-sedimentologica.

I rilievi sono stati riuniti in una unica matrice e, dopo la conversione dei codici fitosociologici di abbondanza-dominanza in valori quantitativi (Van der Maarel, 1979), sono stati classificati attraverso l'algoritmo del legame medio sulla base della matrice di somiglianza, *similarity ratio* rispetto alle coperture (Westhoff e Van der Maarel, 1978) che ha permesso di ottenere il dendrogramma (Fig. 10) in base al quale è stata ordinata la tabella fitosociologica elaborata. Per la elaborazione dei dati campionati è stato usato il software MATEDIT (Burba et al., 1992).

La nomenclatura delle singole entità floristiche, relative forme biologiche e i corotipi, è desunta da "Flora d'Italia" (Pignatti, 1982).

Il rilievo topografico è stato eseguito con l'ausilio di una *total station* (in particolare un SOKKIA SET6 Electronic Total Station).

I profili morfologici della spiaggia secondo i parametri morfometrici di Carobene e Brambati (1975) e la mappatura della vegetazione ha consentito di mettere in relazione la ripartizione delle specie vegetali con l'assetto attuale della spiaggia. La Figura 4 mostra le tracce dei transetti eseguiti e il rilievo topografico effettuato; l'equidistanza di restituzione della figura è stata scelta a 0.75 metri per meglio evidenziare le morfologie dunari.

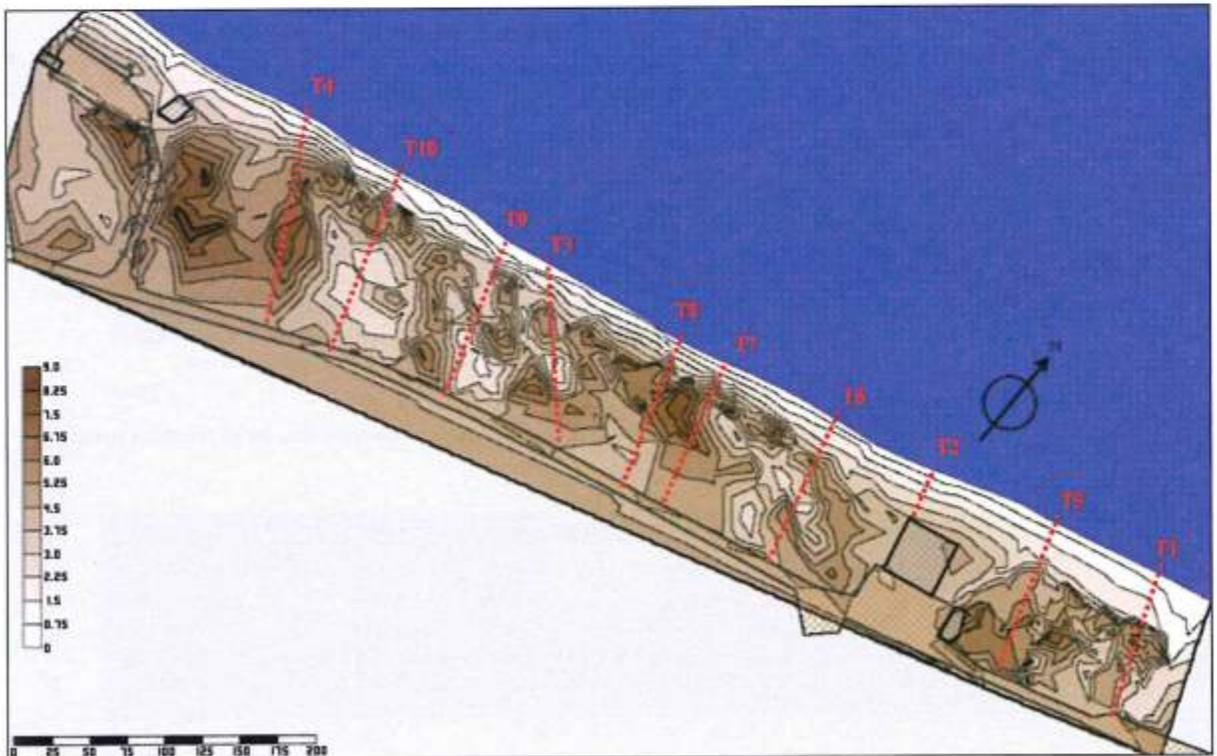


Figura 4 - Localizzazione dei transetti morfometrici su base topografica ricavata dalle indagini di campo.

### Caratterizzazione morfo-sedimentologica dei profili

In generale si è osservato come il primo cordone dunare presenti frequentemente una erosione al piede e possieda mediamente una pendenza del lato sopravvento del 44% (23°88). Quelle che presentano pendenze inferiori (T5, T2, T6, T4) risultano rimaneggiate per la frequentazione turistica dettata dalla vicinanza di strutture balneari o per la concomitanza di camminamenti (T3).

Le caratteristiche morfo-sedimentologiche di quattro profili (dei 10 totali) con interasse di circa 200 m, sono di seguito riportate e descrivono i diversi assetti del tratto di litorale esaminato; in particolare: il transetto T1 si trova presso un corso d'acqua, il T2 non ha retroduna perché interessato da strutture antropiche, il T3 segue un camminamento, il T4, infine presenta le caratteristiche più comuni dell'intero litorale.

La Figura 5 mostra il profilo T1 ed i siti di campionamento: depressione retrodunare (1) ed interdunare (6); versanti continentali delle dune (2) (4); creste delle dune (3), (5) e (7); battigia (Lb).

Le analisi granulometriche dei campioni delle dune hanno mostrato una buona uniformità granulometrica con un granulo medio  $Mz$  compreso tra 1.6 e 1.9  $\Phi$ ; solo i campioni (1) e (2) (settori retrodunari) presentano una diminuzione della classazione rispetto ai campioni di battigia.

Il profilo della sezione del T2, interessato a monte da strutture antropiche e intensamente rimaneggiato, mostra un andamento poco articolato (Fig. 6).

La distribuzione granulometrica dei campioni della sola spiaggia mostra uniformità con un granulo medio  $Mz$  compreso tra 1.6 e 1.8  $\Phi$  con una dispersione che si attesta ad un valore di  $\sigma = 0.4$  comune ai campioni di spiaggia degli altri transetti.

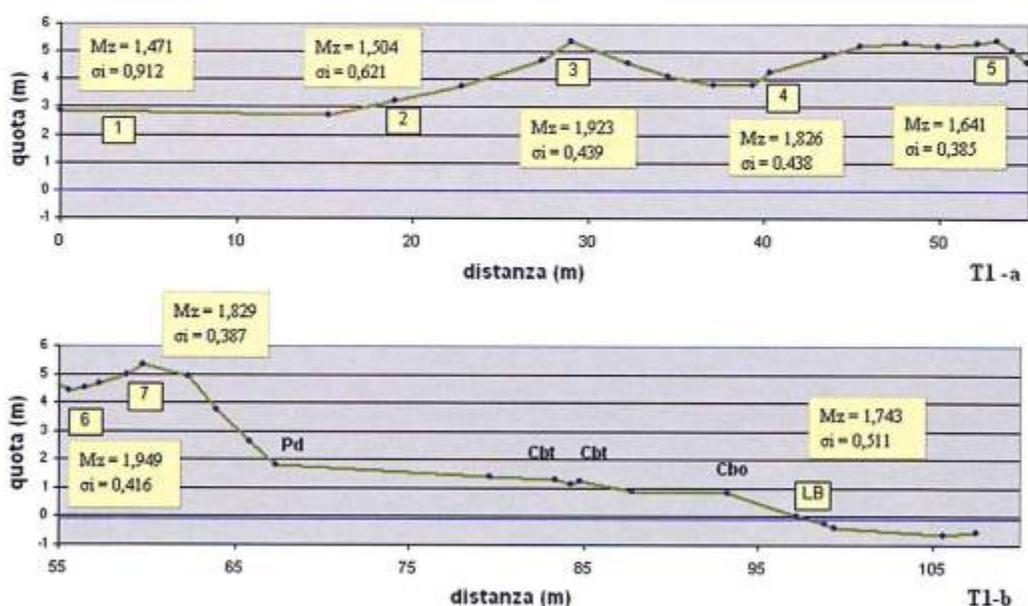


Figura 5 - Transetto 1: a) siti di campionamento lungo la sezione retrodunare; b) siti di campionamento lungo la sezione avandunare.

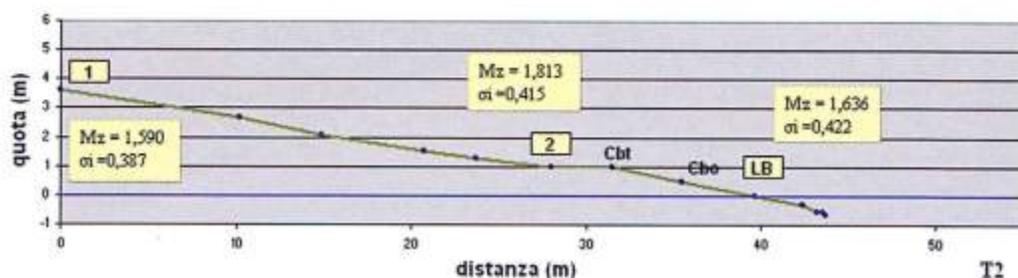


Figura 6 - Transetto 2 e siti di campionamento.

Il profilo del T3 (Fig. 7), scelto per mettere in evidenza le condizioni relative alla frequentazione, coincide con un camminamento. La localizzazione lungo un sentiero, comporta una generale omogeneizzazione dei sedimenti presumibilmente per cause antropiche, unitamente alla deflazione non contrastata dalla vegetazione. Presenta un grosso bacino interdunare (2) i cui sedimenti mostrano ancora una buona cernita tipica delle zone di massima deflazione (5) e (6). L'esistenza del varco potrebbe quindi avere effetti sulla distribuzione del sedimento nel retroduna.

Le creste sulla prima duna (3) e (4) mostrano i valori più bassi di dispersione a causa dell'effetto selezionatore operato dal vento. Anche questo profilo presenta un granulo medio  $Mz$  compreso tra 1.5 e 1.9  $\Phi$ .

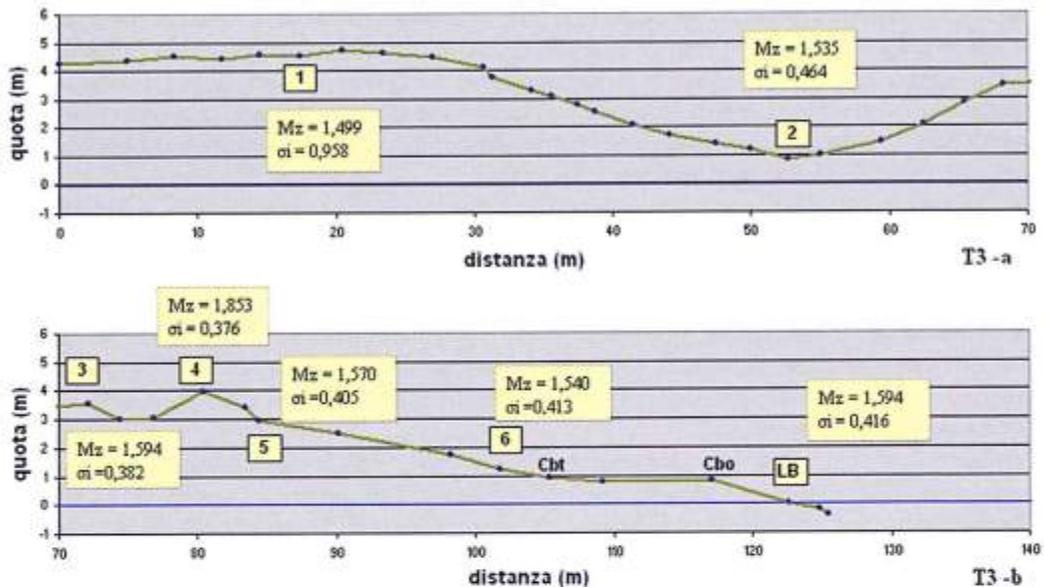


Figura 7 - Transetto 3: a) siti di campionamento lungo la sezione retrodunare; b) siti di campionamento lungo la sezione avandunare.

La morfologia del Profilo T4 (Fig. 8) è molto uniforme. I campioni dei siti sopravento (4) e (5) presentano un granulo medio  $Mz$  compreso tra 1.5 e 1.9  $\Phi$  e appaiono ben classificati, così come il (3). Nella retroduna, in accordo con quanto già osservato, si hanno depositi meno classificati.

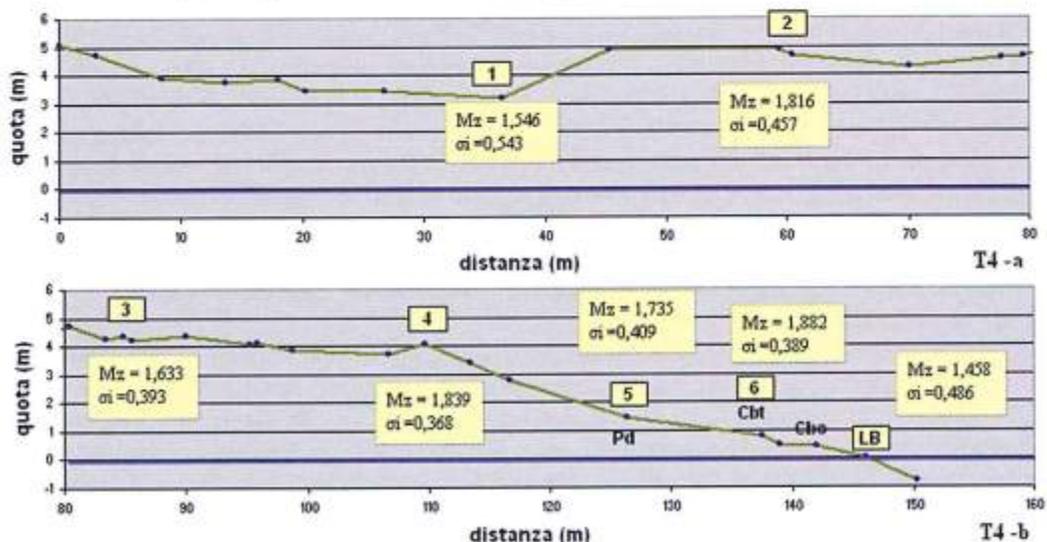


Figura 8 - Transetto 4: a) siti di campionamento lungo la sezione retrodunare; b) siti di campionamento lungo la sezione avandunare.

### Caratterizzazione vegetazionale dell'area

Il litorale di Platamona-Marritza presenta aspetti vegetazionali tipici dell'ambiente costiero: in prossimità della linea di riva si incontrano le formazioni che colonizzano gli ambienti sabbiosi, mentre, soprattutto verso l'entroterra oltre la statale litoranea n°81, il territorio presenta un fitto rimboscimento a *Pinus pinaster* risalente agli anni '60. Le fotografie aeree del 1955, antecedenti la colonizzazione boschiva, e le immagini del 1977 e 2002 in nostro possesso mostrano questi due differenti stadi: la conseguenza diretta è che i cordoni più interni di dune risultano del tutto stabilizzati.

### Risultati

In generale, nel caso di un litorale che presenta una serie di cordoni di dune, la ripartizione della vegetazione segue uno schema ben preciso dalla linea di riva verso l'interno (Gèhu e Biondi, 1994) e ciascun settore del campo di dune (avanduna, duna incipiente, duna consolidata), è contraddistinto da diverse associazioni vegetali. Si realizza una successione catenale di comunità, legata cioè allo spazio e non al tempo, che procede con regolarità dalla battigia fino alle più lontane dune consolidate, individuando zone differenti per condizioni ecologico-stazionali e quindi che ospitano differenti fitocenosi.

Nell'area di studio le associazioni riscontrate e la loro successione teorica è rappresentata in Figura 9 e viene di seguito descritta. Nella prima parte della spiaggia, l'azione delle onde e la tessitura grossolana del substrato non permettono la vita di nessuna specie vegetale. Segue la zona di riva dove le onde perdono energia e vi è accumulo di materiale organico; qui riescono a vivere specie alonitrofile, capaci di insediarsi su substrati grossolani, con tenore di sali elevato e notevole la presenza di nitrati provenienti dalla decomposizione dei depositi marini. Si forma una vegetazione frammentaria costituita da specie a ciclo annuale quali *Cakile maritima*, *Salsola kali* ed *Euphorbia pepelis*, riferibile all'associazione ampiamente diffusa su tutte le coste del Mediterraneo, *Salsola kali-Cakiletum maritimae* (Tab. 1).

Le dune embrionali presentano specie psammofile come, ad es. *Agropyron junceum* (= *Elytrigia juncea*), che mostrano particolari adattamenti morfologici, che permettono loro di sopportare, e addirittura opporsi, all'accumulo di sabbia portata dal vento. Sono infatti fornite di apparati radicali estesi lateralmente e verticalmente, che si accrescono attraverso la sabbia, formando una vasta e intricata rete e producendo porzioni verticali di rizomi che arrestano la loro crescita in prossimità della superficie, dove emettono nuove foglie, robuste e particolarmente adatte ad opporsi alla forte traspirazione indotta dalla ventosità; le parti aeree, molto meno sviluppate di quelle ipogee, trattengono i granelli di sabbia asciutti spinti verso l'interno dai venti marini e determinano un accumulo di sabbia fino a 5-7 metri in pochi anni. La crescita di questa graminacea tipicamente psammofila, è però limitata in altezza, le dune embrionali che si formano sono relativamente basse e la sabbia in eccesso viene trasportata verso l'interno. Le specie giuuda di questa zona sono: *Agropyron junceum*, *Otanthus maritimum*, *Medicago marina*, *Calystegia soldanella*, *Eryngium maritimum*.

La Tabella 2 riunisce rilievi effettuati in questa zona e riferibili all'associazione *Sileno corsicae-Elytrigetum juncae*, endemica sardo-corsa e presente anche sui vicini litorali della Nurra (Biondi et al., 2001). L'analisi della composizione floristica della Tabella 2, mostra alcune peculiarità, ad esempio la presenza di *Ammophila arenaria*, che come vedremo in seguito è specie caratteristica delle avandune, e che segnala l'erosione della avanduna preesistente, con conseguente riformazione delle dune embrionali in posizione più arretrata. Inoltre la copertura eccessiva in alcune stazioni di *Pancreatium maritimum*, segnala la tendenza ad un maggiore deposito di sabbia rispetto alle capacità edificatrici delle specie psammofile (il che comporterà, sul medio e lungo periodo, l'appiattimento delle dune embrionali a iniziare dalla linea di cresta, e il loro superamento da parte della sabbia trasportata dal vento, che andrà a depositarsi in posizione più arretrata alterando i processi di stabilizzazione della duna e le fitocenosi ivi presenti).

Seguono le avandune che costituiscono la seconda linea di dune, più interne rispetto a quelle embrionali e difficilmente raggiunte dagli spruzzi salati; anche queste dune sono piuttosto mobili, sviluppandosi in funzione delle specie vegetali che le colonizzano. La principale tra queste è sicuramente *Ammophila arenaria*, una graminacea psammofila capace di opporsi all'azione del vento ancora meglio di *Agropyron* grazie alla sua struttura: radici lunghe che sfruttano l'effimera falda freatica formata dall'acqua piovana percolante, foglie coriacee, fusto robusto e alto fino a un metro e mezzo. Tutto ciò, insieme alla tendenza a formare vaste coperture, costringe ancora di più la sabbia a depositarsi, alzando il livello della duna. Fusti e foglie, come quelle dell'*Agropyron*, rispondono, inoltre, efficacemente all'insabbiamento, emettendo nuovi fusti e foglie se coperti dalla sabbia. Le

specie guida di questa zona sono, oltre all'*Ammophila arenaria*, *Calystegia soldanella*, *Eryngium maritimum*, *Matthiola* sp. pl., *Echinophora spinosa*, *Pancratium maritimum*, *Euphorbia paralias*.

Purtroppo, nel tratto di spiaggia studiato, rimangono oramai sporadici lembi di vegetazione ad *Ammophila*, di cui il rilievo in Tabella 3 rappresenta l'unico esemplio; a dimostrazione dei forti processi erosivi che hanno colpito questo tratto di litorale. Le "vecchie avandune" sono del tutto erose e al loro posto si stanno riformando nuove dune embrionali. L'associazione cui si può riferire la Tabella 3 è il *Sileno corsicae-Ammophiletum arundinaceae*, endemica della Sardegna e della Corsica.

Proseguendo lungo la successione catenale si trova un tipo di vegetazione che si instaura su sabbie più consolidate che formano dune appiattite, di minor altezza rispetto alle avandune, che pertanto le riparano dai venti salsi. Le condizioni di vita per le piante sono migliori rispetto ai primi cordoni dunari, ma il substrato, nonostante non vi sia ormai più trasporto e deposizione, è ancora sabbioso, con i problemi di incoerenza, aridità e povertà in humus. Le specie indicatrici di questa zona sono soprattutto piccoli arbusti spesso a forma pulvinata, quali: *Crucianella maritima*, *Helichrysum* sp. pl., *Armeria pungens*, *Ephedra* sp. pl..

Nel tratto di litorale studiato, in questa zona, sono presenti formazioni di gariga rappresentate nelle Tabelle 4 e 5. In particolare il versante continentale delle dune secondarie e la base delle stesse, viene colonizzato da una gariga a *Crucianella maritima* ed *Helichrysum italicum* subsp. *microphyllum* (Tab. 4) riferibile all'associazione *Crucianello-Helichrysetum microphylli*, rinvenuta in ampi tratti del litorale sardo (Mossa, 1992; Bartolo et al. 1992; Biondi et al. 2001). Da notare la presenza invasiva della specie esotica sudafricana *Carpobrotus acinaciformis*, che diventa in molti casi l'essenza dominante e quasi esclusiva (vedi R11 di Tab. 4).

Le sabbie più compatte dei pianori retrostanti, ospitano, formazioni di gariga a *Ephedra distachya*, *Helichrysum italicum* subsp. *microphyllum* ed *Astragalus terracianoii* (Tab. 5) riferibili all'associazione *Ephedro-Helichrysetum microphylli*. Tale formazione entra spesso a contatto con l'associazione *Crucianello-Helichrysetum*, precedentemente descritta, come dimostra la presenza di *Crucianella* ad esempio nel rilievo R9; inoltre, spesso risulta invasa da *Carpobrotus acinaciformis*, specie sempre presente nei rilievi effettuati, tale da differenziare una variante a *Carpobrotus*.

Le zone più arretrate e antiche delle dune consolidate; presentano un suolo ancora sabbioso ma con un buon tenore di humus che permette la crescita di piccoli suffrutici, arbusti ed anche alberi. La stabilizzazione della duna è ormai completa e, in questa zona, si ha la presenza di formazioni arbustive di macchia mediterranea che evolveranno, dove le condizioni stazionali lo permetteranno, in formazioni forestali di sclerofille sempre verdi. Le specie guida di questa zona sono gli arbusti della macchia, quali: *Juniperus* sp. pl., *Pistacia lentiscus*, *Arbutus unedo*, *Phyllirea* sp. pl., *Rhamnus alaternus*, *Cistus* sp. pl. e alberi sempreverdi, quali *Quercus ilex*.

Nel tratto di costa studiato è presente una macchia a ginepro coccolone dominante (Tab. 6) riferibile all'associazione *Asparago acutifoli-Juniperetum macrocarpae*, rinvenuta in altri tratti costieri sardi (Biondi et al., 2001). Nella tabella fra le specie compagne si nota la presenza di *Ephedra distachya* che indica il contatto con le formazioni di gariga precedentemente descritte e la presenza di *Pinus pinaster* allo stadio giovanile, che si inserisce nella macchia quando si verificano diradamenti dovuti al fuoco o determinati dall'uomo per creare accessi al mare.

Questa zona subisce spesso pesanti interventi antropici: strade di fruizione della spiaggia, parcheggi, bar e capanni, campeggi e servizi turistici, che quantomeno interrompono la continuità della vegetazione, se non la distruggono totalmente. Questa zona è spesso interessata da incendi e, nel tentativo di offrire una copertura immediata al suolo nudo, è stato spesso piantumata con conifere. La pineta, seppure più funzionale da un punto di vista turistico (facilita gli accessi al mare e crea zone d'ombra apprezzate da bagnanti e turisti), in realtà è ancora più facilmente attaccabile dagli incendi, le essenze non autoctone impiegate per i rimboschimenti sono spesso vittime di attacchi parassitari e malattie, gli aghi di pino che si depositano sul terreno, acidificano il suolo e ne cambiano il chimismo, modificando il corteggio floristico.

Infine, nel tratto delle dune consolidate il profilo non risulta essere perfettamente pianeggiante, ma vi sono micro-depressioni, con suoli costantemente umidi, che presentano formazioni alotolleranti perenni ad *Holoschoenus romanus*, *Juncus maritimus* ed *Equisetum ramosissimum*, che sono presentate nella Tabella 7.

La serie teorica appena descritta è in realtà fortemente influenzata dall'assetto morfologico della zona di studio: il campo dunare di Marina di Sorso presenta una scarpata di erosione più o meno elevata che interessa la avanduna che si comporta, quindi, come una duna incipiente ospitando il *Sileno-Elymetum*, a scapito del *Sileno-Ammophiletum* ormai scomparso. Si viene quindi a creare un contatto anomalo fra *Sileno-Elymetum* e *Crucianelletum* o, nella peggiore delle ipotesi, laddove l'erosione è più spinta, fra *Sileno-Elymetum* e *Juniperetum*.

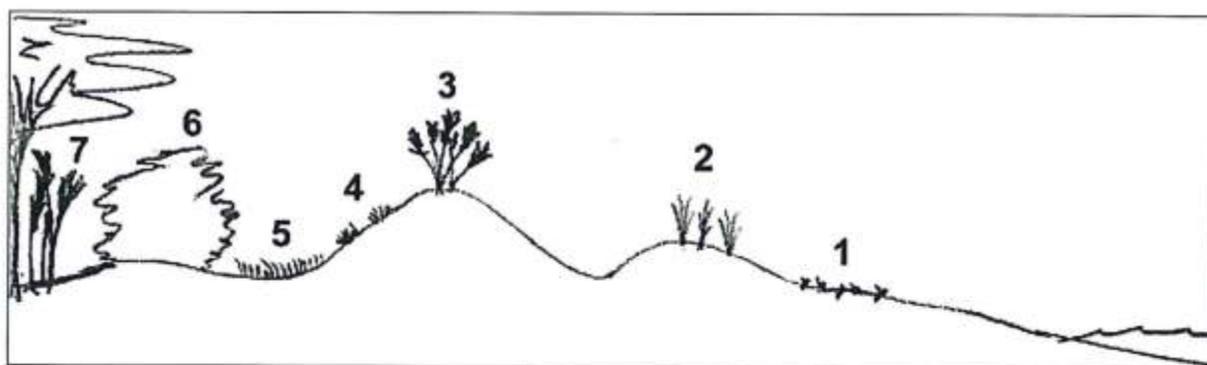


Figura 9 - Serie teorica per il tratto di litorale di Marina di Sorso. 1: *Salsolo kali-Cakiletum maritimae*; 2: *Sileno corsicae-Elytrigetum junceae*; 3: *Sileno corsicae-Ammophiletum arundinaceae*; 4: *Crucianello-Helichrysetum microphylli*; 5: *Ephedro-Helichrysetum microphylli*; 6: *Asparagus acutifolii-Juniperetum macrocarpa*; 7: formazioni alotolleranti perenni ad *Holoschoenus romanus*, *Juncus maritimus* ed *Equisetum ramosissimum* con rimboschimenti a *Pinus pinaster*.

Le associazioni e gli aggruppamenti descritti nei paragrafi precedenti vengono inquadrati in sintaxa superiori (suballeanza, alleanza, ordine, classe) secondo lo schema sintassonomico presentato di seguito, per il quale si fa ampio riferimento al lavoro sul paesaggio vegetale della Nurra di Biondi et al. (2001). L'inquadrimento sintassonomico trova valido riscontro anche nel dendrogramma dei rilievi (Fig. 10), dove si evidenziano 5 gruppi corrispondenti alle 5 classi di vegetazione presenti nel tratto di costa studiato: 1: *Quercetea ilicis*; 2: *Juncetea maritimi*; 3: *Helicryso-Crucianelletea*; 4: *Ammophiletea australis*; 5: *Cakiletea maritimae*.

#### CAKILETEA MARITIMAE Tüxen e Preising ex Br.-Bl. e Tüxen 1952

*CAKILETALIA INTEGRIFOLIAE* Tüxen in Br.-Bl. e Tüxen 1952 corr. Rivas-Martínez, Costa e Loidi 1992

*Cakilion maritimae* Pignatti 1953

*Salsolo kali-Cakiletum maritimae* Costa e Manz. 1981 corr. Rivas-Martínez et al. 1992

#### AMMOPHILETEA AUSTRALIS Br.-Bl. e Tüxen ex Westhoff, Dijk e Passchier 1946

*AMMOPHILETALIA* Br.-Bl. 1933

*Ammophilion australis* Br.-Bl. 1921 corr. Rivas-Martínez, Costa e Izco in Rivas-Martínez, Lousa, T.E. Díaz, Fernández-González e J.C. Costa 1990

*Sporobolo arenarii-Elytrigenion junceae* Géhu 1988 corr. Géhu 1996

*Sileno corsicae-Elytrigetum junceae* (Malcuit 1926) Bartolo, Brullo, De Marco, Dinelli, Signorello e Spampinato 1992 corr. Géhu 1996

*Medicagini marini-Ammophilenion australis* (Br.-Bl. 1921) Rivas-Martínez e Géhu 1980 em. Géhu e Biondi 1994

*Sileno corsicae-Ammophiletum arundinaceae* Bartolo, Brullo, De Marco, Dinelli, Signorello e Spampinato 1992

#### HELICHRYSO -CRUCIANELLETEA MARITIMAE Géhu, Rivas-Martínez e R. Tüxen 1973 in Géhu 1975

*Crucianelletalia maritimae* Sissingh 1974

*Crucianellion maritimae* Rivas-Goday e Rivas-Martínez 1963

*Crucianello-Helichrysetum microphylli* Bartolo, Brullo, De Marco, Dinelli, Signorello e Spampinato 1992

*Ephedro-Helichrysetum microphylli* Valsecchi e Bagella 1991

#### JUNCETEAE MARITIMI Br.-Bl. in Br.-Bl. e Roussine e Nègre 1952

*JUNCETALIA MARITIMI* Br.-Bl. ex Horvatic 1934

*Juncion maritimi* Br.-Bl. ex Horvatic 1934

Aggruppamento a *Holoschoenus romanus* e *Juncus maritimus*

QUERCETEA ILICIS Br.-Bl. ex A. e O. Bolos 1950

PISTACIO LENTISCI-RHAMNETALIA ALATERNI Rivas-Martínez 1975

*Juniperion turbinatae* Rivas-Martínez 1975 corr. 1987

*Asparago-Juniperetum macrocarpae* R. e R. Molinier ex O. Bolòs 1962

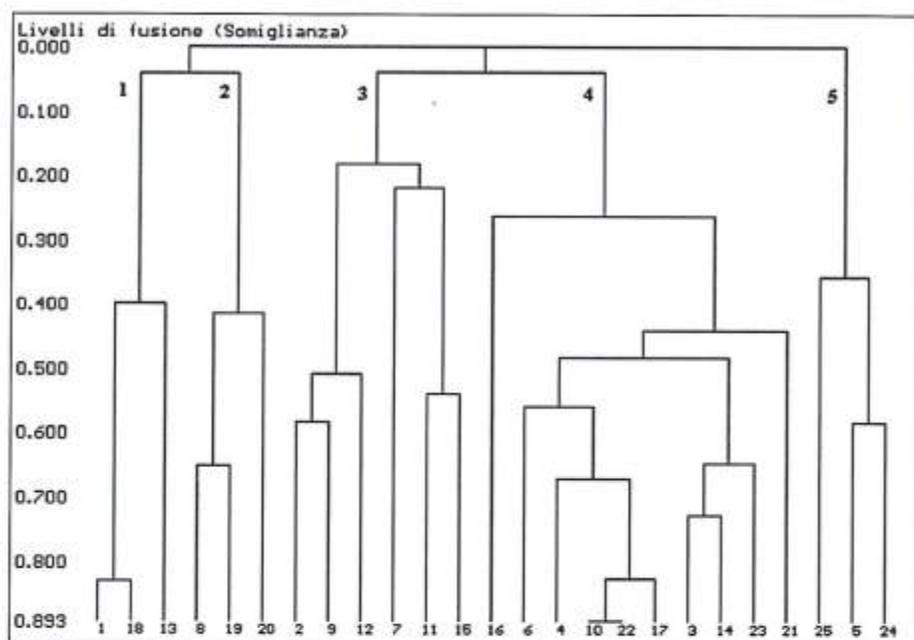


Figura 10 - Dendrogramma dei rilievi fitosociologici effettuati. 1: *Quercetea ilicis*; 2: *Juncetea maritimi*; 3: *Helicryso-Crucianelletea*; 4: *Ammophiletea australis*; 5: *Cakiletea maritimae*.

A completamento dello studio vegetazionale, è stata redatta una carta della vegetazione sulla base di un'opportuna legenda (Figg. 11 e 12).

La carta mette in risalto le associazioni vegetali presenti ed, inoltre, le tracce dei camminamenti che creano marcate interruzioni nel continuum delle fitocenosi stesse.

Sigla	Tipo di associazione
SABBIA	zona afitoica
SK	<i>Salsolo kali</i> - <i>Cakiletum maritimae</i>
A	<i>Sileno corsicae</i> - <i>Elytrigium juncae</i>
AMM	<i>Sileno corsicae</i> - <i>Ammophiletum arundinaceae</i>
E	<i>Ephedro</i> - <i>Helichrysetum microphylli</i>
C	<i>Crucianello</i> - <i>Helichrysetum microphylli</i>
E + C	mosaico di E e C
Me	<i>Ephedro</i> - <i>Helichrysetum microphylli</i> variante a <i>Carpobrotus acinaciformis</i>
Mc	<i>Crucianello</i> - <i>Helichrysetum microphylli</i> var. a <i>Carpobrotus acinaciformis</i>
PANCR	<i>Ephedro</i> - <i>Helichrysetum microphylli</i> var. a <i>Pancratuim maritimum</i>
G	<i>Asparago acutifolii</i> - <i>Juniperus macrocarpae</i>
P	riboschimento a <i>Pinus pinaster</i>
J:	aggruppamento a <i>Juncus maritimus</i> e <i>Holoschoenus romanus</i>
ACACIA	aggruppamento ad <i>Acacia cyanophilla</i>
CANNETO	formazione a <i>Phragmites australis</i>
I	incolto

Figura 11 - Legenda delle associazioni vegetazionali.

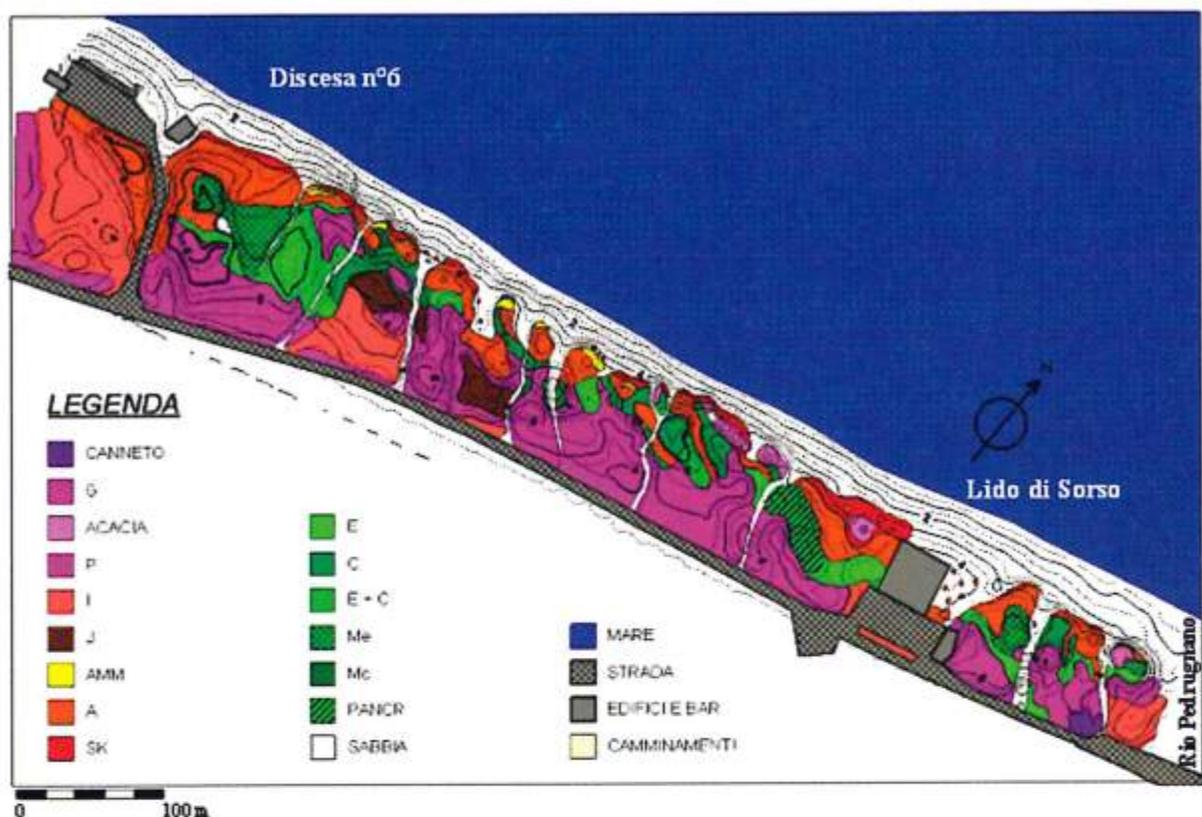


Figura 12 - Carta della distribuzione delle associazioni vegetali.

Il risultato immediato è la frammentazione di vaste superfici a copertura omogenea, in aree più piccole, che, presentando un maggiore rapporto tra perimetro e superficie, sono maggiormente soggette all'attacco del vento e delle specie competitori. L'effetto di tali percorsi, di origine antropica, ha come risultato che la sabbia penetra più all'interno interferendo con le associazioni colonizzatrici le fasce retrodunari e i versanti protetti delle prime dune. E', in particolare, l'associazione *Crucianello-Helichrysetum microphylli* (C) che subisce gli effetti dannosi maggiori, venendo progressivamente sepolta dalla sabbia, entrante dai varchi, e successivamente sostituita dalle specie pioniere dell'associazione *Sileno corsicae-Elytrigetum juncea*, tipica delle dune primarie.

Complessivamente, dalla carta delle associazioni vegetali, si possono distinguere tre differenti fasce, di diversa ampiezza e indicativamente parallele alla linea di riva, caratteristiche delle diverse condizioni ambientali.

Una prima fascia, in legenda indicata dai colori caldi del rosso, dell'arancione e del giallo si trova a ridosso della spiaggia emersa e comprende le fitocenosi responsabili della stabilizzazione e formazione della duna. Le coperture sono molto variabili, a seconda, soprattutto, dell'esposizione al vento. Si hanno, infatti, le maggiori estensioni presso la discesa 6 ed il Lido di Sorso, proprio perché la presenza di queste strutture ha comportato l'appiattimento del profilo di spiaggia e l'aumento dell'azione di trasporto eolico. Si noti, inoltre, come le maggiori intrusioni nel retroduna siano orientate secondo il vento di Maestrale.

Una seconda fascia, con i colori in gradazioni di verde, mostra la collocazione delle associazioni che prediligono un ambiente meno stressante, sviluppandosi quindi sul lato sottovento della duna, al riparo dagli effetti del mare. E' evidente l'elevata frammentarietà di quest'area, causata dai *blowouts*, che si spingono per molti metri verso l'interno, e dagli accessi al mare, così come la generale ridotta estensione. Fanno eccezione due zone che, però, mostrano caratteri misti per il tipo di associazioni presenti, costituendo quindi una copertura vegetale omogenea, ma costituita da un mosaico di fitocenosi diverse. Anche per alcuni popolamenti appartenenti a questa fascia si evince un orientamento NW - SE, in parte dovuto all'azione diretta del vento sulla comunità, in parte conseguenza dell'azione di ricoprimento operata dalla sabbia, trasportata verso l'interno, e dal *Sileno corsicae-Elytrigetum juncea* che vi si forma al di sopra.

La terza fascia, nelle sfumature del viola, comprende tutte le formazioni arboree ed arbustive, tipiche delle dune consolidate e stabili. Tali fitocenosi si trovano, di norma, lontano dalla linea di riva, laddove la protezione offerta dai primi ordini di dune e le variazioni del substrato riducono al minimo i fattori di stress. E' una fascia molto ampia, occupante una superficie che è circa la metà del campo dunare in esame; si presenta inoltre piuttosto omogenea, segno che in tempi pregressi le diverse associazioni, oggi osservate, facevano parte di un unico corpo. Ad oggi tale popolamento sembra andare incontro ad una fase di crisi, che si manifesta con evidenza soprattutto presso la discesa 6 e il Lido di Sorso: si ha un arretramento del limite verso mare della vegetazione retrodunare, con un profilo che mostra chiaramente il cuneo entrante delle specie sostitutive (pioniere).

Entrando nel dettaglio delle associazioni vegetali se ne possono tracciare le linee caratteristiche e la collocazione spaziale:

*Salsolo kali-Cakiletum maritimae* (SK): se ne osservano tracce lungo tutto il litorale, con variazioni che indicano le diverse dinamiche in atto. In generale si trova in fasce larghe non più di un paio di metri, eccezion fatta per un'ampia area a ponente del Lido di Sorso, dove la copertura diventa dell'ordine dei mq. Questa abbondanza è probabilmente dovuta alla presenza della foce del Rio Predugnano, che, con la sua estrema variabilità di posizione, da una parte impedisce la formazione di SK nei settori orientali e dall'altra aumenta il carico organico (fondamentale per lo sviluppo dell'associazione) nell'immediato settore occidentale. Il *Salsolo kali-Cakiletum maritimae* può essere dunque utilizzato, con le dovute precauzioni, come un grossolano indicatore della quantità di nutrienti e minerali lungo la spiaggia. Si deve infine annotare la sua totale assenza in prossimità di tutti gli accessi al mare (sbocchi in spiaggia dei sentieri, discesa 6, Lido di Sorso): in tali zone il calpestio e l'azione del vento, canalizzata quindi rafforzata, inibiscono lo sviluppo di vegetali di qualsiasi tipo; senza contare che l'azione del vento probabilmente limita il deposito di sostanza organica necessaria per la crescita delle specie alonitofile tipiche dell'associazione *Salsolo kali-Cakiletum maritimae*.

*Sileno corsicae-Elytrigetum juncea* (A): è una delle associazioni maggiormente rappresentata lungo il litorale. Il carattere fortemente pioniero ed estremamente specializzato delle specie che caratterizzano tale associazione, determina la colonizzazione delle dune primarie, contribuendo alla formazione e ad una certa stabilizzazione delle stesse. In pratica, l'associazione *Sileno corsicae-Elytrigetum juncea* si trova lungo ogni cresta di duna primaria e, laddove l'azione del vento provoca deviazioni dal normale andamento lineare, si osserva una corrispondente modificazione della distribuzione spaziale del popolamento. Tracce di questo, soprattutto davanti ai principali sbocchi a mare dei sentieri, indicano, inoltre, che risponde abbastanza bene agli stress (erosione, calpestio, ecc.), modificando e intervenendo sull'ambiente secondo le proprie necessità. In questo modo, tracciando una linea lungo i fronti a mare delle coperture dell'associazione *Sileno corsicae-Elytrigetum juncea*, si possono individuare i settori maggiormente sottoposti all'azione eolica. L'area a maggiore copertura risulta nei pressi della discesa 6 e lungo la strada che collega il parcheggio alla strada statale; una situazione di questo tipo era facilmente ipotizzabile considerando l'esposizione a NW e il continuo rimaneggiamento dei bordi della duna da parte dei mezzi meccanici per la pulitura delle strade dalla sabbia.

Infine, l'analisi della composizione floristica delle fitocenosi può fornire utilissime indicazioni su eventuali disturbi antropici e sui processi dinamici in atto; ad esempio la maggiore copertura di *Pancretium maritimum* indica una tendenza all'insabbiamento della cenosi (Gèhu e Biondi, 1994), nel senso che l'accumulo di sabbia trasportata dal vento è più rapido della capacità della vegetazione di stabilizzare la duna. E' il caso, ad esempio, delle formazioni prossime alla discesa 6, dove fra l'altro si nota una discreta presenza e copertura di specie, quali *Matthiola sinuata*, *Glaucium flavum*, *Anthemis maritima* e *Scolymus hispanicus* che indicano disturbo antropico e un aumento in sostanza organica nel substrato.

*Sileno corsicae-Ammophiletum arundinaceae* (AMM): l'*Ammophila arenaria* riveste una notevole importanza nel processo di intrappolamento del sedimento (capacità di ritenzione del sedimento stimata intorno al 97% per coperture fitte) e nella stabilizzazione della duna; purtroppo, nell'area in esame troviamo pochissime zone, con presenza di esemplari radi di quest'associazione, sulle creste delle più alte dune primarie. Tale collocazione non riflette però la reale preferenza di questa specie (e dell'associazione che caratterizza); si tratta al contrario della prova che il campo dunare si estendeva verso mare per molti metri ancora e che le dune, oggi in posizione avanzata, corrispondevano allora ai secondi o terzi ordini. La distruzione di questa comunità sulle creste comporterà un aumento stimato del trasporto di sedimento nell'ordine del 400% rispetto al piede della duna (Corrèa, 2002). Come atteso non si hanno tracce di *Ammophila* nei settori maggiormente interessati dal turismo balneare, restando soltanto in quello centrale e solo sulle creste più alte, quindi difficilmente sottoposte a calpestio.

**Crucianello-Helichrysetum microphylli** (C): le associazioni a *Crucianella maritima* (dell'alleanza *Crucianellion maritimae*) sono state dichiarate, nella direttiva 92/43 della CEE, *habitat prioritario* consistenti in: "dune fisse, stabilizzate e colonizzate più o meno completamente da vegetazione arbustiva del *Crucianellion maritimae* su suoli poveri in humus". Si tratta di un'associazione che predilige i versanti continentali delle dune, in parte protetta dai venti salsi e normalmente non raggiunta dall'acqua di mare. Lungo l'intero litorale non si hanno vaste coperture di tale associazione, a causa della generale erosione ed arretramento del fronte primario delle dune. Nell'area in esame si trovano dei corpi principali che resistono meglio di altri all'arretramento delle dune primarie ma tale condizione non sarà mantenuta a lungo: il progressivo disfacimento dell'avanduna porterà all'ingresso di sabbia con ricolonizzazione da parte delle specie pioniere.

**Ephedro-Helichrysetum microphylli** (E), *Ephedro-Helichrysetum microphylli* variante a *Carpobrotus acinaciformis* (M) e *Ephedro-Helichrysetum microphylli* variante a *Pancreatium maritimum* (PANCR): i tratti retrodunali, più o meno pianeggianti e con substrati abbastanza stabilizzati sono colonizzati da un'altra associazione dell'alleanza *Crucianellion maritimae*, caratterizzata da *Ephedra distachya* ed *Helichrysum italicum* subsp. *microphyllum*, denominata *Ephedro-Helichrysetum microphylli*. In queste zone si ha un notevole disturbo antropico, che porta spesso all'ingresso di specie nitrofile o esotiche invasive, quali il *Carpobrotus*.

**Asparago-Juniperetum macrocarpae** (G) e popolamenti ad *Acacia cyanophylla* (ACACIA): la vegetazione retrodunale è rappresentata da formazioni arbustive a dominanza di *Juniperus oxycedrus*, dell'associazione *Asparago-Juniperetum macrocarpae*. Queste formazioni si estendono dal limite continentale delle coperture delle associazioni dell'alleanza *Crucianellion maritimae*, fino alla frattura, nella vegetazione, segnata dalla strada statale. La grande diffusione e relativa omogeneità di tale fitocenosi (si hanno, in realtà, contaminazioni dell'associazione a *Juniperus* da parte di pini marittimi, riprodottisi spontaneamente da semi che provengono dalle pinete piantumate) mostra, con evidenza, l'azione particellatrice operata dagli accessi al mare: i camminamenti rappresentano, infatti, l'unico elemento in grado di settorializzare il grande ginepreto che, contrariamente, si estenderebbe praticamente ininterrotto.

**Incolto** (I) e **Aggr. a *Holoschoenus romanus* e *Juncus maritimus*** (J): le uniche variabili all'interno del ginepreto sono dovute alla presenza di alcune formazioni ad *Holoschoenus romanus* e *Juncus maritimus* nelle depressioni retrodunali, laddove la morfologia del terreno e la composizione, meno permeabile delle sabbie circostanti, permettono il ristagno di acqua. In queste zone le piante hanno la possibilità, affondando le radici in profondità, di raggiungere la falda freatica. Altre aree, alcune piuttosto ampie, sono state classificate come *incolto* in quanto presentano condizioni di forte *melange* e presenza di specie che poco hanno a che fare con il sistema spiaggia-duna. La presenza di queste aree è da imputare, con sufficiente certezza, ad attività umane (ad esempio l'asfaltatura della strada o la costruzione della discesa o del ponte), che hanno portato ad un degrado dell'habitat costiero. Tali spazi, vengono colonizzati da specie erbacee, ruderali e nitrofile, annuali, a ciclo primaverile-estivo, che formano pascoli terofitici effimeri.

**Rimboschimenti a *Pinus pinaster*** (P) e popolamento a *Phragmites australis* (canneto): in prossimità del bordo stradale e presso la foce del rio, dove le condizioni idriche sono favorevoli e molto diverse rispetto alla duna, troviamo alcuni esemplari di *Pinus pinaster*. La disposizione allineata lungo la strada rivela un tentativo di fornire protezione alla sede stradale dalla sabbia portata oltre le dune e dal sole. Una vasta pineta, piantumata per fornire protezione ai vigneti posti al limite delle dune oloceniche, si svolge per molti ettari sul lato a monte della strada. Una formazione a *Phragmites australis* di modesta estensione è osservabile presso il ponte sul rio e lungo i versanti stabili della foce, laddove sono presenti substrati costantemente umidi per apporto di acqua dolce dal rio.

## Conclusioni

Lo studio dei campi dunari di Platamona-Marrizza ed, in particolare, l'area di dettaglio di Marina di Sorso ha messo in evidenza come esistano strette correlazioni tra l'evoluzione morfo-sedimentaria della spiaggia e dei depositi eolici e lo sviluppo delle associazioni vegetali che colonizzano la spiaggia con le avandune, fino alle associazioni retrodunali.

L'evoluzione della linea di riva desunta dalle foto aeree relative al periodo 1955 - 2002 indica un litorale in erosione, in accordo con gli elaborati dell'Atlante delle Spiagge Italiane. La progressiva occupazione da parte dell'urbanizzazione della fascia costiera, che ha interessato soprattutto i depositi

dunari, ha condizionato il delicato equilibrio spiaggia-duna sia per gli aspetti sedimentologici, che mostrano settori in erosione, che vegetazionali dove associazioni pioniere, in equilibrio con le nuove condizioni morfo-sedimentarie della spiaggia in arretramento, si sovrimpongono a quelle tipiche delle avandune o di quelle secondarie.

Per quanto riguarda le caratteristiche sedimentologiche, l'omogeneità delle tessiture e la buona classificazione indicano una buona efficienza del trasporto colico, sia in area di deflazione che sulle dune attive o in quelle aree (ad esempio camminamenti e *blowouts*), dove la copertura vegetale è scarsa o assente. Le direttrici responsabili della costruzione delle dune sono da imputarsi principalmente ai venti del IV quadrante.

L'analisi vegetazionale ha portato alla conclusione che il vento di Maestrale è il maggiore agente influenzante le biocenosi di duna. La definizione delle aree occupate dalla vegetazione pioniera permette di seguire la dinamica dei sedimenti maggiormente trasportabili, mentre la presenza di specie invasive offre un'informazione importante sul livello di stress ambientale.

Quanto osservato dal punto di vista vegetazionale si accorda con i dati morfo-sedimentologici: la contrazione della superficie di deflazione relativa alla spiaggia porta ad un'accelerazione erosiva dei corpi dunari più avanzati con consistenti spostamenti di sabbia verso l'interno. In questo modo le specie pioniere trovano condizioni favorevoli per lo sviluppo a scapito dei popolamenti delle avandune e delle dune consolidate. Al momento, la vegetazione retroduna risente in maniera limitata degli effetti delle mutate condizioni, ma questi non tarderanno a manifestarsi secondo una scala temporale che dipende dai parametri ambientali (in particolare intensità delle mareggiate e dei venti).

L'interpretazione dei dati vegetazionali risulta ben supportata dalla carta della vegetazione, strumento utile non solo per una rappresentazione grafica delle fitocenosi, ma anche per l'analisi e la valutazione delle condizioni ecologico-ambientali. Sicuramente la realizzazione di una carta della vegetazione a questa scala risulta essere un lavoro molto impegnativo, soprattutto in termini di tempo, il che rende lo strumento di difficile applicazione ai fini di una indagine conoscitiva e di un monitoraggio successivo. Viceversa, la comparazione dei dati vegetazionali e di quelli morfo-sedimentologici lungo i transetti ha dimostrato che si può giungere ad analoghe conclusioni in maniera altrettanto efficace ma molto più speditiva.

A titolo d'esempio si riporta la sezione del Transetto 3 (Fig. 13), disposto lungo la direttrice del vento dominante e intersecante un camminamento, che rispecchia le caratteristiche vegetazionali di dune sottoposte ad erosione ed ampliamento delle zone di deflazione. Infatti, ad una modificazione della morfologia, si associa la sovrapposizione di specie pioniere su associazioni tipiche dei depositi retrostanti il primo cordone dunare. La sabbia messa in movimento tende a risalire il pendio debolmente inclinato, attraversare il varco e depositarsi sul versante continentale. La copertura vegetale mostra una distribuzione anomala delle componenti: la successione teorica inizia già in corrispondenza della linea di riva con SABBIA in transizione verso l'associazione SK. Quest'ultima si interrompe bruscamente laddove l'energia delle onde non porta più sostanza organica, ma soprattutto in corrispondenza del passaggio di persone e mezzi. Riprende poi una nuova successione a livello del varco che prevede SABBIA (in relazione allo sbocco a mare del varco) in transizione verso A in posizione esposta. L'assenza di un teorico SK immediatamente successivo alla SABBIA è dovuto all'assenza del moto ondoso e di sostanze nutritive. A colonizza le formazioni ad *Ammophila* (*Sileno corsicae-Ammophiletum arundinaceae*) e *Crucianella* (*Crucianello-Helichrysetum microphylli*) fino a sostituirle.

La presenza, sottovento alla duna, di un notevole deposito sabbioso comporta l'inizio di una nuova, ulteriore: successione SABBIA è portata dal vento attraverso il varco fino a ricoprire i ginepri (G) ed è destinata ad essere colonizzata da A, (presumibilmente lo stesso tipo di associazione che oggi sta sostituendo AMM e C). Segue una transizione verso Me, popolamento monospecifico a *Carpobrotus acinaciformis*, che sostituisce fitocenosi C ed E. Il transetto prosegue poi rilevando la presenza di G e di una zona rimboschita a *Pinus pinaster*.

L'analisi vegetazionale condotta su questo profilo mostra uno spostamento di sensibili quantità di sedimento incoerente nelle zone precedentemente riparate, mandando in crisi la successione teorica delle associazioni vegetali. La successione leggibile, ad oggi, presenta ancora tratti del precedente assetamento ma in molti settori dell'intero campo dunare l'equilibrio è stato definitivamente compromesso e la tendenza è verso un nuovo punto di equilibrio spostato di alcune decine di metri verso l'entroterra.

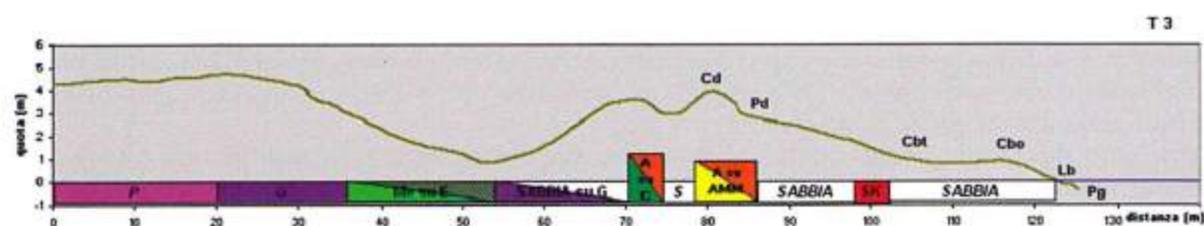


Figura 13 - Transetto 3. Profilo morfologico e vegetazionale.

Lo studio multidisciplinare ha quindi confermato che il campo di dune sta subendo un generale e marcato arretramento; tale tendenza è da imputare principalmente all'arretramento della linea di riva e, dove presenti, alla inibizione degli scambi duna-spiaggia dovuta a strutture antropiche che irrigidiscono il sistema naturale. L'evoluzione generale dell'area è dunque indirizzata verso una "banalizzazione" delle forme vegetali e dei depositi dunari correlati.

Alcune considerazioni, che potevano essere desunte solo su base geomorfologica, hanno trovato conferma nell'analisi degli adattamenti operati dalle specie vegetali.

L'arretramento della linea di riva, ben documentato dalla fotointerpretazione e dai rilievi morfometrici, ha trovato una ulteriore conferma a livello vegetazionale con la presenza di acacia e ginepro in relativa prossimità della spiaggia.

## APPENDICE – Tabelle fitosociologiche.

Tabella 1 - *Salsola kali-Cakiletum maritimae*.

		Codice ril.	R5	R24	R25	
		Sup. ril. mq	15	20	30	
		Cop. Tot. %	20	30	75	pres.
		n° sp.	3	3	6	
		Sp. car. e diff. di associazione				
T scap	Medit.Atl. (Euri)	<i>Cakile maritima</i> Scop.	2.3	3.3	3.4	3
T scap	Paleotemp.	<i>Salsola kali</i> L.	+2	-	-	1
		Sp. car. e diff. delle unità sup.				
T scap	Circumbor.	<i>Atriplex latifolia</i> Wahlenb.	-	1.2	-	1
H rept	Subcosmop.	<i>Polygonum maritimum</i> L.	-	+2	-	1
		Sp. compagne				
H scap	Medit.Atl.(Steno)	<i>Matthiola sinuata</i> (L.) R. Br.	+	-	-	1
NP	NW-Stenomedit.	<i>Ephedra distachya</i> L.	-	-	+	1
Ch suffr	Avv.	<i>Carpobrotus acinaciformis</i> (L.) L. Bolus	-	-	1.1	1
G rhiz	Eurimedit.	<i>Agropyron junceum</i> (L.) Beauv.	-	-	2.3	1
G bulb	Stenomedit.	<i>Pancreatium maritimum</i> L.	-	-	1.2	1
G rhiz	Subtrop.	<i>Sporobolus pungens</i> (Schreber) Kunth	-	-	+2	1

Tabella 2 - *Silene corsicae-Elytrigietum junceae*.

		Codice ril.	R3	R4	R10	R14	R17	R21	R22	R23	R6		
		Sup. ril. mq	40	20	35	30	30	30	20	30	20	pres.	classe di freq.
		Cop. Tot. %	70	75	70	85	80	70	55	70	75		
		n° sp.	10	8	10	7	9	24	24	24	12		
		Sp. car. e diff. di associazione											
		<i>Agropyron junceum</i> (L.)											
G rhiz	Eurimedit.	Beauv.	3.4	3.4	3.3	4.4	3.4	3.4	3.4	2.3	3.3	9	V
H scap	Endem.	<i>Silene corsica</i> DC	+	2.3	+	-	2.3	+	1.2	+	-	7	IV
		Sp. car. e diff. delle unità sup.											
G rhiz	Medit.Atl.(Steno)	<i>Eryngium maritimum</i> L.	2.3	1.2	2.3	3.3	2.2	2.2	1.1	3.3	2.3	9	V
G bulb	Stenomedit.	<i>Pancreatum maritimum</i> L.	2.4	1.1	1.1	+	1.1	-	1.1	2.2	1.1	8	V
H scap	Medit.Atl.(Steno)	<i>Matthiola sinuata</i> (L.) R. Br.	1.2	-	1.1	+2	+	1.1	+2	1.2	1.2	8	V
Ch rept	Eurimedit.	<i>Medicago marina</i> L.	2.3	2.2	+2	1.1	1.3	-	+	2.3	1.2	8	V
Ch suffr	Stenomedit.-Atl.	<i>Otanthus maritimus</i> (L.) Hoffmgg. et Link	-	3.3	2.4	1.2	1.3	1.3	2.3	+2	3.3	8	V
G rhiz	Cosmop.-litorale	<i>Calystegia soldanella</i> (L.) R. Br.	-	2.2	1.2	-	2.2	1.1	1.2	+2	-	6	IV
H scap	Eurimedit.	<i>Echinophora spinosa</i> L.	-	-	-	-	-	2.3	-	+	-	2	II
H scap	W-Medit.-Mont.	<i>Anthemis maritima</i> L.	-	+2	-	-	-	-	-	-	-	1	I
G rhiz	Eurimedit.	<i>Ammophila littoralis</i> (Beauv.) Rothm.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.2	1	I
		Sp. compagne											
Ch suffr	Stenomedit.	<i>Lotus cytisoides</i> L.	-	-	-	-	+	1.2	-	1.2	+2	4	III
G bulb	Stenomedit.	<i>Aetheorrhiza bulbosa</i> (L.) Cass.	-	-	+	+	-	+	-	-	-	3	II
T scap	Medit.Atl. (Euri)	<i>Cakile maritima</i> Scop.	-	-	+	-	-	+	+	-	-	3	II
Ch frut	Endem.	<i>Astragalus terracianoii</i> Valsecchi	+	-	-	-	-	-	-	+2	-	2	II
T scap	Eurimedit.	<i>Lagurus ovatus</i> L.	+	-	-	-	-	-	-	+	-	2	II
Ch suffr	Avv.	<i>Carpobrotus acinaciformis</i> (L.) L. Bolus	-	-	-	-	-	-	-	+	1.2	2	II
H bienne	Eurimedit.	<i>Scolymus hispanicus</i> L.	+	-	-	-	-	-	-	-	-	1	I
NP	NW-Stenomedit.	<i>Ephedra distachya</i> L.	+	-	-	-	-	-	-	-	-	1	I
H scap	Eurimedit.	<i>Glaucium flavum</i> Crantz	-	-	-	-	-	-	-	+	-	1	I
T scap	Stenomedit.	<i>Silene nicaeensis</i> All.	-	-	-	-	-	-	-	+	-	1	I
Ch suffr	Stenomedit.	<i>Crucianella maritima</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	+	1	I
H scap	S-Europ.-Sudsib.	<i>Chondrilla juncea</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	+	1	I
Ch frut	Endem.	<i>Centaurea horrida</i> Bad.	-	-	-	-	-	-	-	-	+	1	I

Tabella 3 - *Silene corsicae-Ammophiletum arundinaceae*.

		Codice ril	R16
		Sup. ril. mq	5
		Cop. Tot. %	60
		n° sp.	10
		Sp. car. e diff. di associazione	
G rhiz	Eurimedit.	<i>Ammophila littoralis</i> (Beauv.) Rothm.	3.4
G rhiz	Eurimedit.	<i>Agropyron junceum</i> (L.) Beauv.	1.2
H scap	Endem.	<i>Silene corsica</i> DC	+
		Sp. car. e diff. delle unità sup.	
G bulb	Stenomedit.	<i>Pancratium maritimum</i> L.	+
G rhiz	Medit.Atl.(Steno)	<i>Eryngium maritimum</i> L.	+2
Ch rept	Eurimedit.	<i>Medicago marina</i> L.	1.1
Ch suffr	Stenomedit.-Atl.	<i>Otanthus maritimus</i> (L.) Hoffm. et Link	1.2
G rhiz	Cosmop.-litorale	<i>Calystegia soldanella</i> (L.) R. Br.	1.2
H scap	W-Medit.-Mont.	<i>Anthemis maritima</i> L.	2.2
		Sp. compagne	
G bulb	Stenomedit.	<i>Aetheorrhiza bulbosa</i> (L.) Cass.	+

Tabella 4 - *Crucianello-Helichrysetum microphylli*.

		Codice ril	R7	R15	R11	
		Sup. ril. mq	10	25	30	
		Cop. Tot. %	65	90	100	pres.
		n° sp.	14	8	5	
		Sp. car. e diff. di associazione				
Ch suffr	Stenomedit.	<i>Crucianella maritima</i> L.	3.4	4.4	+	3
		<i>microphyllum</i> (Willd.) Nyman				
Ch suffr	W.-Medit. nescicola	<i>Helichrysum italicum</i> (Roth) Don subsp.	1.3	-	-	1
		Sp. diff. variante a				
		<i>Carpobrotus acinaciformis</i>				
Ch suffr	Avv.	<i>Carpobrotus acinaciformis</i> (L.) L. Bolus	-	2.2	5.5	2
		Sp. car. e diff. delle unità sup.				
NP	NW-Stenomedit.	<i>Ephedra distachya</i> L.	+	+2	-	2
H caesp	Eurimedit.	<i>Ononis natrix</i> L. subsp. <i>ramosissima</i> (Desf.) Batt. et Trab.	+	-	-	1
		Sp. compagne				
G rhiz	Eurimedit.	<i>Agropyron junceum</i> (L.) Beauv.	1.2	1.2	1.2	3
Ch rept	Eurimedit.	<i>Medicago marina</i> L.	1.2	+	1.2	3
H scap	Endem.	<i>Silene corsica</i> DC	+	+2	-	2
H scap	Medit.Atl.(Steno)	<i>Matthiola sinuata</i> (L.) R. Br.	+	+	-	2
G bulb	Stenomedit.	<i>Pancratium maritimum</i> L.	1.1	-	+	2
G rhiz	Medit.Atl.(Steno)	<i>Eryngium maritimum</i> L.	-	+	1.1	2
G rhiz	Eurimedit.	<i>Ammophila littoralis</i> (Beauv.) Rothm.	+2	-	-	1
G rhiz	Subtrop.	<i>Sporobolus pungens</i> (Schreber) Kunth	+2	-	-	1
Ch frut	Endem.	<i>Astragalus ternacianoi</i> Valsecchi	1.2	-	-	1
Ch suffr	Stenomedit.	<i>Lotus cytisoides</i> L.	+2	-	-	1
P lian	Stenomedit.	<i>Rubia peregrina</i> L.	+	-	-	1

Tabella 5 - *Ephedro-Helicbrysetum microphylli*.

		Codice ril	R2	R12	R9	
		Sup. ril. mq	30	30	30	
		Cop. Tot. %	100	95	85	pres.
		n° sp.	7	12	10	
		Sp. car. e diff. di associazione				
NP	NW-Stenomedit.	<i>Ephedra distachya</i> L.	5.5	4.4	4.4	3
Ch suffr	W.-Medit. nescicola	<i>Helicbrysum italicum</i> (Roth) Don subsp. <i>microphyllum</i> (Willd.) Nyman	-	1.2	-	1
Ch frut	Endem.	<i>Astragalus terracianoii</i> Valsecchi	-	3.3	+2	2
		Sp. diff. variante a <i>Carpobrotus acinaciformis</i>				
Ch suffr	Avv.	<i>Carpobrotus acinaciformis</i> (L.) L. Bolus	2.2	2.3	2.3	3
		Sp. car. e diff. delle unità sup.				
Ch suffr	Stenomedit.	<i>Crucianella maritima</i> L.	-	-	2.2	1
		Sp. compagne				
G bulb	Stenomedit.	<i>Pancreatium maritimum</i> L.	1.2	+	1.1	3
H scap	Medit.Atl.(Steno)	<i>Matthiola sinuata</i> (L.) R. Br.	1.3	+	+	3
G bulb	Stenomedit.	<i>Aetheorrhiza bulbosa</i> (L.) Cass.	-	+	+	2
Ch rept	Eurimedit.	<i>Medicago marina</i> L.	+2	-	-	1
G rhiz	Medit.Atl.(Steno)	<i>Eryngium maritimum</i> L.	+	-	-	1
G rhiz	Cosmop.-litorale	<i>Calystegia soldanella</i> (L.) R. Br.	+	-	-	1
P lian	Stenomedit.	<i>Rubia peregrina</i> L.	-	+2	-	1
H scap	Endem.	<i>Silene corsica</i> DC	-	+	-	1
H scap	Stenomedit.	<i>Lobularia maritima</i> (L.) Desv.	-	+2	-	1
T scap	Stenomedit.	<i>Silene colonata</i> Poir.	-	+	-	1
T scap	Eurimedit.	<i>Lagurus ovatus</i> L.	-	+	-	1
G rhiz	Eurimedit.	<i>Agropyron junceum</i> (L.) Beauv.	-	-	2.2	1
P lian	Stenomedit.	<i>Clematis cirrhosa</i> L.	-	-	+	1
H bienne	Eurimedit.	<i>Scolymus hispanicus</i> L.	-	-	+	1

Tabella 6 - *Asparago-Juniperetum macrocarpae*

		Codice ril	R1	R13	R18	
		Sup. ril. mq	40	50	40	pres.
		Cop. Tot. %	100	100	100	
		Altezza veg. M	1,5	1,6	1,5	
		n° sp.	8	9	8	
		Sp. car. e diff. di associazione				
P caesp	Eurimedit.	<i>Juniperus oxycedrus</i> L. subsp. <i>macrocarpa</i> (S. et S.) Ball	5.5	3.4	4.4	3
NP	Stenomedit.	<i>Asparagus acutifolius</i> L.	1.2	+2	1.1	3
		Sp. car. e diff. delle unità sup.				
P lian	Stenomedit.	<i>Rubia peregrina</i> L.	-	1.1	1.2	2
P lian	Stenomedit.	<i>Clematis cirrhosa</i> L.	3.4	-	2.3	2
Ch frut	Stenomedit.	<i>Prasium majus</i> L.	+	1.1	1.2	3
P caesp	S-Stenomedit.	<i>Pistacia lentiscus</i> L.	-	2.2	-	1
		Sp. compagne				
NP	NW-Stenomedit.	<i>Ephedra distachya</i> L.	+2	+	+	3
P scap	W-Stenomedit.	<i>Pinus pinaster</i> Aiton	+	3.3	2.3	3
Ch suffr	Avv.	<i>Carpobrotus acinaciformis</i> (L.) L. Bolus	1.3	-	+2	2
G rhiz	Eurimedit.	<i>Anmophila littonalis</i> (Beauv.) Rothm.	+2	-	-	1
Ch frut	Endem.	<i>Astragalus terracianoii</i> Valsecchi	-	+	-	1
P caesp	Avv.	<i>Myriophorum insulare</i> R. Br.	-	1.2	-	1

Tabella 7 - Aggr. ad *Holoschoenus romanus* e *Juncus maritimus*.

		Codice ril	R8	R19	R20	
		Sup. ril. mq	20	30	40	pres.
		Cop. Tot. %	90	100	100	
		n° sp.		9	13	
G rhiz	Stenomedit.	<i>Holoschoenus romanus</i> (L.) Fritsch	4.4	2.2	3.4	3
G rhiz	Circumbor.	<i>Equisetum ramosissimum</i> Desf.	1.1	1.3	3.3	3
G rhiz	Subcosmop.	<i>Juncus maritimus</i> Lam.	2.3	4.4	+	3
		Sp. compagne				
NP	Stenomedit.	<i>Asparagus acutifolius</i> L.	+	+	+	3
P lian	Stenomedit.	<i>Rubia peregrina</i> L.	1.1	2.2	1.3	3
P lian	Stenomedit.	<i>Clematis cirrhosa</i> L.	+2	1.2	+2	3
		<i>Ononis natrix</i> L. subsp. <i>ramosissima</i> (Desf.) Batt. et Trab.	1.2	-	+2	2
G bulb	Stenomedit.	<i>Aetheorrhiza bulbosa</i> (L.) Cass.	+	-	+	2
T scap	Eurimedit.	<i>Lagurus ovatus</i> L.	1.2	-	1.1	2
H bienne	Eurimedit.	<i>Daucus carota</i> L. subsp. <i>maximus</i> (Desf.) Ball	-	+	1.2	2
Ch suffr	W.-Medit. nescicola	<i>Helichrysum italicum</i> (Roth) Don subsp. <i>microphyllum</i> - (Willd.) Nyman	+	+	2	
T scap	Eurimedit.	<i>Bellardia trixago</i> (L.) All.	+	-	-	1
Ch frut	Endem.	<i>Astragalus ternacianoii</i> Valsecchi	-	+	-	1
Ch suffr	Stenomedit.	<i>Crucianella maritima</i> L.	-	-	+	1
Ch suffr	Avv.	<i>Carpobrotus acinaciformis</i> (L.) L. Bolus	-	-	1.1	1
Ch suffr	Stenomedit.	<i>Lotus cytisoides</i> L.	-	-	+	1

## Bibliografia

- Athanassoullis G.A., Bertotti L., Cavalieri L., Dentone L., Gaillard P., Gerostathis Th.P., Kontolios Ch., Lefèvre J. M., Noel C., Ramieri E., Ravazzola P., Sclavo M., Stefanakos Ch.N., Viala C. (2004) - *Wind and Waves Atlas of the Mediterranean Sea*. Ed. Western European Armaments organisation Research Cell. Pp 420.
- Balduzzi I., Bozzano A., Corradi N., Ivaldi R. (2005) - *The use of a GIS for analyse dune systems: the case of Platamona-Marritza (Northern Sardinia, Italy)*. Atti della XXII Conferenza Internazionale di Cartografia, 9-15 luglio 2005, La Coruña, ES, ISBN: 0-958-46093-0.
- Balduzzi I., Bozzano A., Corradi N., Mariotti L.M., Vagge I. (2004) - *The evolution of the dune fields of Platamona-Marritza (Northern Sardinia) using remote sensing and aerial imagery*. Chemistry & Ecology, Taylor & Francis Ed. In press.
- Bartolo G., Brullo S., De Marco G., Dinelli A., Signorello P., Spampinato G. (1992) - *Studio fitosociologico sulla vegetazione psammofila della Sardegna meridionale*. Coll. Phytosoc. 19: 251-273.
- Biondi E. (1996) - *La Geobotanica nello studio ecologico del paesaggio*. Ann. Acc. It. Sc. Forestali XLV: 3-39.
- Biondi E., Filigheddu R., Farris E. (2001) - *Il paesaggio vegetale della Nurra*. Fitosociologia 38 (2), Suppl. 2.
- Braun-Blanquet J. (1964) - *Pflanzensoziologie* - Wien, Springer Verl.
- Burba N., Feoli E., Malaroda M., Zuccarello V. (1992) - *Un sistema informativo per la vegetazione. Manuale d'utilizzo dei programmi*. Collana Quaderni CETA, n° 2, Gorizia.
- Carobene L., Brambati A. (1975) - *Metodo per l'analisi morfologica quantitativa delle spiagge*. Boll.Soc.Geol.It. 94, fasc. 3: 479-493.
- CNR, MURST (1999) - *Atlante delle Spiagge Italiane, Foglio n°180 - Sassari*. Scala 1: 100000.
- Federici P.R., Ginesu S., Oggiano G. (1987-1988) - *Genesi ed evoluzione della pianura costiera turritana (Sardegna Settentrionale)*. Da "Geografia fisica e dinamica quaternaria" Vol. 10-11.
- Gèhu J.M., Biondi E. (1994) - *Antropizzazione delle dune del mediterraneo*. In "Alterazioni ambientali ed effetti sulle piante", Edagricole ed.

- Géhu J.M., Rivas-Martínez S. (1981) - *Notions fondamentales de phytosociologie*. Ber. Int. Simp. Int. Vereinigung Vegetationskde. Pp. 5-33.
- Géhu J.M. (1988) - *L'analyse symphytosociologique et géosymphytosociologique de l'espace. Théorie et méthodologie*. Coll. Phytosoc., XVII: 11-46.
- Mossa L. (1992) - *Su una associazione a Helichrysum italicum (Roth) Don subsp. microphyllum (Willd.) Nyman e Crucianella maritima L. della Sardegna orientale*. Coll. Phytosoc. 19: 225-231.
- Mossa L. (1992) - *Su una associazione a Helichrysum italicum (Roth) Don subsp. microphyllum (Willd.) Nyman e Crucianella maritima L. della Sardegna orientale*. Coll. Phytosoc. 19: 225-231.
- Ozer A. (1976) - *Geomorphologie du versant septentrional de la Sardaigne*. Tesi di dottorato. Université de Liège. II<sup>ème</sup> Partie, pp. 28-49.
- Pignatti S. (1982) - *La Flora d'Italia*. Vol. I, II, III Edagricole, Bologna.
- Rivas-Martínez S. (1987) - *Nociones sobre Fitosociología, Biogeografía e Bioclimatología*. In "La vegetation de España" Universidad de Alcalá de Henares. Pp. 19-45.
- Rivas-Martínez S. (1999) - *Global bioclimatics (Clasificación bioclimática de la Tierra)*. Centro de Investigaciones Fitosociológicas (CIF), Madrid.
- Thornthwaite C.W. (1948) - *An approach toward a rational classification of climate*. Geogr. Rev. 38 (1): 55-94
- Van Deer Maarel E. (1979) - *Transformation of cover-abundance values in phytosociology and its effects on community similarity*. Vegetatio 39: 97-114.
- Walter H., Lieth H. (1960) - *Klimadiagramm-Weltatlas*. Fischer, Jena.
- Westhoff V., Van deer Maarel E. (1978) - *The Braun-Blanquet approach*. 2nd. Ed. In: R.H. Whittaker ed., *Classification of plant communities*.

Manoscritto ricevuto il 19/05/2006; accettato il 13/9/2006.

## Prime osservazioni sugli aspetti morfosedimentologici e vegetazionali dei campi di dune costiere tra Punta Secca e Punta d'Aliga (Sicilia sud-orientale)

Concetto Amore <sup>1</sup>, Eugenio Giuffrida <sup>1</sup>, Elena Amore <sup>1</sup>, Marcella Ruta <sup>2</sup>, Angiola Zanini <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze Geologiche, Università degli Studi, Catania, Italia.

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze Ambientali, Università degli Studi, Siena, Italia.

### Riassunto

Lo studio dei *campi di dune costiere* lungo il tratto di litorale ragusano esteso circa 20 km, tra Punta Secca e Punta d'Aliga, ha permesso di definire la relazione tra caratteri morfosedimentologici ed aspetti vegetazionali di una costa fortemente modificata dall'erosione marina e da processi di urbanizzazione.

Lo studio effettuato tende a definire le variazioni intervenute nell'ultimo secolo (1897-2003) sul sistema litorale, ricavando dalla fotointerpretazione e dalle misure dirette in campo i tematismi relativi a cordoni dunari, vegetazione e infrastrutture antropiche.

Il confronto fra le aree occupate dai campi di dune nei diversi periodi ne evidenzia la progressiva riduzione, derivante dalla distruzione della *Macchia mediterranea*, dalla necessità di creare nuovi spazi per agricoltura e serricoltura, e soprattutto dalla nuova concezione della spiaggia come meta turistica: si è passati così da 230.000 mq del 1897 a 40.624 mq nel 1967, fino ad arrivare ai 3.918 mq del 2003, con una riduzione prima dell'82% (in 70 anni), poi del 90% (in 36 anni); lembi dell'originario sistema dunare si conservano a Punta Secca, Caucana, Casuzze, alla foce del Fiume Irminio, a Playa Grande, a Donnalucata, Spinasanta e Lido Arizza.

In questo contesto la vegetazione svolge un ruolo di notevole importanza nella formazione e stabilizzazione dei cordoni dunari, costituita da specie psammofile ed alofile fortemente specializzate, inserite, procedendo dalla battigia verso i cordoni dunari, in una successione data da *Cakileto*, *Agropireto*, *Ammofileto* e *Macchia mediterranea*.

**Parole chiave:** ambiente costiero, cordoni dunari, morfosedimentologia, zonazione vegetazionale, Sicilia sud-orientale.

### Abstract

*The study of coastal dune fields, a main feature of the littoral belt between Punta Secca and Punta d'Aliga, province of Ragusa, extending for circa 20 km in length, allowed morphosedimentologic and vegetational aspects to be defined and correlated with each other.*

*Here the coast has been severely modified by marine erosion and greenhouses that reach even the shoreline.*

*A gradual retreat of the dune fields is observed by comparing the areas at different times; this depends on urban development processes, destruction of the mediterranean bush, gradually increased of intensive agricultural practices, area needed for new housing, and especially the recent views of beaches as a tourist resource: this led to a reduction from 230.000 m<sup>2</sup> in 1897, to 40.624 m<sup>2</sup> in 1967 (82% in 70 years) and finally 3.918 m<sup>2</sup> at present (90% in 36 years). Remnants of the original dune-system may be found at Punta Secca, Caucana, Casuzze, the R. Irminio mouth, Playa Grande, Donnalucata, Spinasanta and Arizza beach.*

*In this context vegetation has a fundamental role in forming and stabilising the dune ridges, being composed of a few highly specialised psammophile and halophile species, fit to a harsh environment exposed to an intense and frequent wind action.*

*The vegetational sequence from the beach to the dune system is formed by Cakileto, Agropireto, Ammofileto and Mediterranean bush.*

**Keywords:** coastal environment, aeolian dune belt, morphosedimentology, vegetational zonation, south-eastern Sicily.

### Premessa

Nel presente lavoro, eseguito nell'ambito del Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale *I depositi eolici delle coste italiane ed il flusso di sedimenti spiaggia - duna*, vengono riportati i primi risultati delle indagini sui rapporti tra dinamica dei sedimenti ed aspetti vegetazionali, con particolare attenzione ai campi di dune, elementi fondamentali per l'equilibrio del sistema litorale, per la conservazione ed il ripristino delle condizioni naturali, per la difesa dal mare e per l'interesse ai fini turistici.

Gli ecosistemi costieri costituiscono entità rese dinamicamente complesse dalla concomitanza di componenti biotiche ed abiotiche, marine e terrestri, economiche e culturali. Questi ambienti, estremamente fragili e sensibili, sottoposti ad una pressione antropica eccessiva sia nella spiaggia emersa che in quella sommersa, vanno incontro a pesanti alterazioni derivanti dall'erosione e dall'arretramento della linea di riva e dal danneggiamento delle dune litoranee.

In Italia l'antropizzazione della fascia costiera ne ha condizionato la tendenza evolutiva, rendendo sempre più negative le "entrate" del bilancio sedimentario ed innescando la perdita di notevoli porzioni di litorale. In Sicilia il 27% delle spiagge in erosione (GNRAC, 2006), presenta situazioni di rischio ambientale da elevato a molto elevato, il 49 % può essere considerato in equilibrio, mentre solamente il 20 % tende all'avanzamento (4 % non valutabile). Nei cordoni dunari, laddove conservati, le fasce vegetazionali con le diverse biocenosi fungono da indicatori del loro stato di conservazione per cui, valutandone le estensioni superficiali, strutture e composizione, è possibile stimare in tempi reali l'entità del degrado e intervenire adeguatamente ai fini della conservazione e corretta gestione dell'ambiente psammofilo.

### Aspetti morfosedimentologici

Come esempio rappresentativo delle diverse situazioni è stata individuata l'area dei campi di dune recenti, parte integrante della fascia litorale ragusana che si estende per circa 20 km da Punta Secca a Punta d'Aliga, costituita da una successione di spiagge sabbiose, interrotte da promontori rocciosi e dagli apparati focali dei fiumi Biddemi ed Irminio e del torrente di Modica (Fig. 1).

Dal punto di vista geologico, il litorale si colloca presso le propaggini meridionali del Plateau ibleo, in cui le successioni affioranti nei bacini idrografici sottesi sono date da: sedimenti prevalentemente carbonatici, con intercalate vulcaniti basiche submarine e subaeree, di età compresa tra Cretaceo inferiore e Pleistocene; depositi marini terrazzati pleistocenici; depositi fluviali, dunari e litorali attuali.

Dal punto di vista morfologico prevalgono le coste rocciose, con *pocket beaches* frequentemente ubicate in corrispondenza degli apparati focali. I fondali sottocosta sono prevalentemente rocciosi o biocostruiti, mentre in corrispondenza delle spiagge si hanno sabbie medie ben classate, poggianti con spessori limitati su substrati rocciosi ad andamento irregolare, localmente affioranti fin sulla battigia (Amore et al., 1988, 1998).

Il litorale, confinante con la piana costiera di Gela, è stato pesantemente modificato dall'erosione marina e da impianti di sericoltura, mentre cordoni di dune relativamente integri si riscontrano ancora a Punta Secca, Caucana, Casuzze, alla foce del Fiume Irminio, a Playa Grande, a Donnalucata, nella spiaggia di Spinasantà e a Lido Arizza.



Figura 1 - Distribuzione areale dei campi di dune costiere nei diversi anni (Ortofotocarta IGM 2001; cartografia IGM 1897 e 1967; rilievi sul campo 2003).

Analizzando nei particolari il tratto di costa in esame si rileva come, pur in un ambito costiero estremamente limitato, si ritrovi una grande variabilità di forme e di fattori di impatto antropico.

A Punta Secca la duna, alta 4 m e distante dalla linea di riva 18 m circa, è stata aggredita da lottizzazioni abusive (Fig. 2).



Figura 2 - Punta Secca: campi di dune antropizzate.



Figura 3 - Caucana: cordone dunare alto mediamente 3 m.

A Caucana, in una spiaggia ampia da 23 a 30 m, sono stati rilevati due cordoni dunari alti mediamente 3 m (Fig. 3); il litorale in erosione è oggetto di un intervento di protezione e ripascimento artificiale.

La spiaggia di Casuzze è orlata da una duna alta 3 m e ben conservata (Fig. 4) anche se la spiaggia è ampia solo circa 5 m.

Nella Riserva Naturale del Fiume Irminio, i cordoni dunari sono a rischio di erosione, alti da 1.5 a 3 m e distano dalla linea di riva da 2 a 10 m (Fig. 5).

A Playa Grande è in via di formazione un cordone dunare distante dalla linea di riva 15 m circa e con altezze da 1 a 2 m (Fig. 6).

A Donnalucata, a ridosso del molo del porticciolo, vi è la tendenza alla formazione di un cordone dunare che viene spianato durante la stagione balneare.

A Spinasanta il cordone dunare è alto circa 11 m (Fig. 7) e distante dalla linea di riva circa 22 m.

Al Lido Arizza il cordone dunare dista dalla linea di riva 18 m circa, con altezze variabili fra 4 e 12 m.

L'ampiezza delle spiagge prese in esame risulta compresa tra 2 m della Riserva Naturale del Fiume Irminio e 30 m circa di Caucana, con processi di erosione conseguenti a mareggiate di particolare intensità in spiagge caratterizzate da diversi ordini di barre che tendono a ridurne l'energia.

Sul drift litoraneo incidono in maggiore misura il pennello in blocchi naturali ad Est della foce del Biddemi ed il molo del costruendo porto di Marina di Ragusa, strutture che tendono a bloccare il trasporto utile, tagliando fuori dall'alimentazione dei grandi fiumi occidentali tutto il sistema delle spiagge sottoflutto (Amore e Randazzo, 1998); altri ostacoli sono determinati dalle scogliere di Viale Doria a Marina di Ragusa e dal Porto di Donnalucata, soggetto ad interventi di dragaggio.

I sedimenti sono costituiti in linea generale da granuli di quarzo opaco e ialino per lo più arrotondati, a granulometria rientrante nel campo delle sabbie fini molto ben classate (Fig. 8; Tab. 1); si discostano da questo quadro le sabbie medie di Casuzze per battigia e duna e di Spinasanta per battigia, caratteristiche queste che si sono mantenute costanti negli anni, ad eccezione che alla foce (Tab. 2).



Figura 4 - Casuzze: dune ben conservate con Cakileto e Agropireto.



Figura 5 - Foce del Fiume Irminio: cordone dunare in erosione.



Figura 6 - Playa Grande: campi di dune in formazione.



Figura 7 - C. da Spinasanta: dune in erosione.

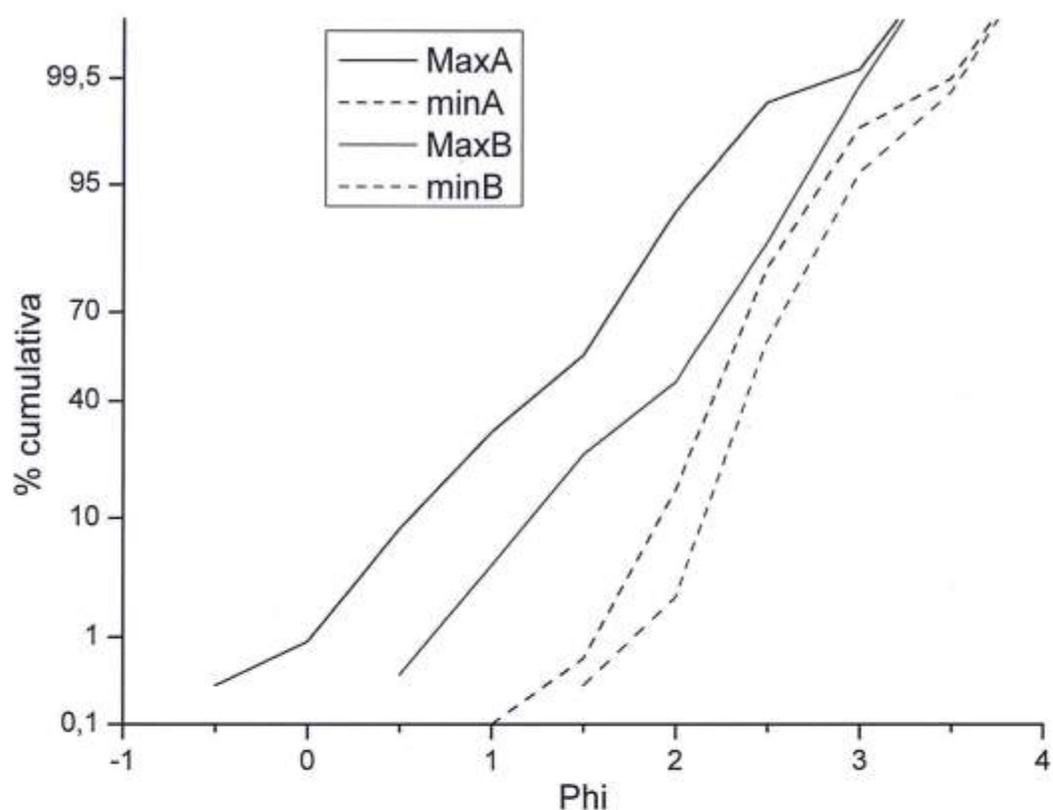


Figura 8 - Campi di distribuzione dei sedimenti di battigia (A) e di duna (B).

Tabella 1 - Diametro medio e classazione dei sedimenti in alcuni tratti del litorale.

Ubicazione del prelievo	Diametro medio (Mz)		Classazione ( $\sigma_t$ )	
	battigia	duna	battigia	duna
Punta Secca	2.23	2.24	0.31	0.28
Caucana	2.13	2.44	0.41	0.27
Casuzze	1.79	1.94	0.34	0.61
Foce Irminio	2.50	2.44	0.28	0.27
Playa grande	2.25	2.08	0.34	0.21
Donnalucata	2.36	2.40	0.23	0.23
Spinasanta	1.66	2.49	0.64	0.24
Arizza	2.34	2.41	0.24	0.30

I campi di dune sono stati mappati, classificati e monitorati nel periodo Marzo-Settembre 2003, riferiti alle situazioni degli anni 1897, 1967 e 2001, ricostruendone la progressiva riduzione, derivante da processi di urbanizzazione, distruzione della macchia mediterranea, forme di agricoltura sempre più intensive, e soprattutto dalla nuova concezione della spiaggia-meta turistica: si è passati così da 230.000 mq del 1897 a 40.624 mq nel 1967 fino ad arrivare ai 3.918 mq del 2003. Spostamenti locali dei contorni dei campi, inoltre, sono da collegare oltre che con gli interventi antropici, anche con la migrazione degli apparati focali delle diverse incisioni fluviali e con la neoformazione di cordoni dunari.

Attualmente buona parte delle avandune sono stabili, grazie anche alla fitta vegetazione che si contrappone ad una attività eolica data da venti regnanti provenienti dal II e III quadrante e da venti dominanti provenienti da tutto l'arco SSW - W; poco influenti e con caratteristiche di venti di terra sono i venti provenienti dal IV e dal I quadrante.

Tabella 2 - Diametro medio e classazione dei sedimenti di battigia in alcuni tratti del litorale nel 1991 e nel 2003.

Ubicazione del prelievo	Diametro medio (Mz)		Classazione ( $\sigma_1$ )	
	1991	2003	1991	2003
Punta Secca	2,26	2,23	0,20	0,31
Caucana	2,10	2,13	0,28	0,41
Casuzze	1,58	1,79	0,30	0,34
Foce Irminio	1,70	2,50	0,27	0,28

### Aspetti vegetazionali

Nel contesto dei campi dunari la vegetazione svolge un ruolo di notevole importanza ed è costituita da poche specie psammofile ed alofile fortemente specializzate in quanto esposte ad un'intensa e frequente ventosità e ad un'alta salinità del substrato. L'ambiente dunare, però, sebbene alterato dagli interventi antropici, conserva una seriazione vegetazionale organizzata secondo fasce parallele alla costa e caratterizzata da associazioni sempre più complesse via via che ci si allontana dal mare (Fig. 9).

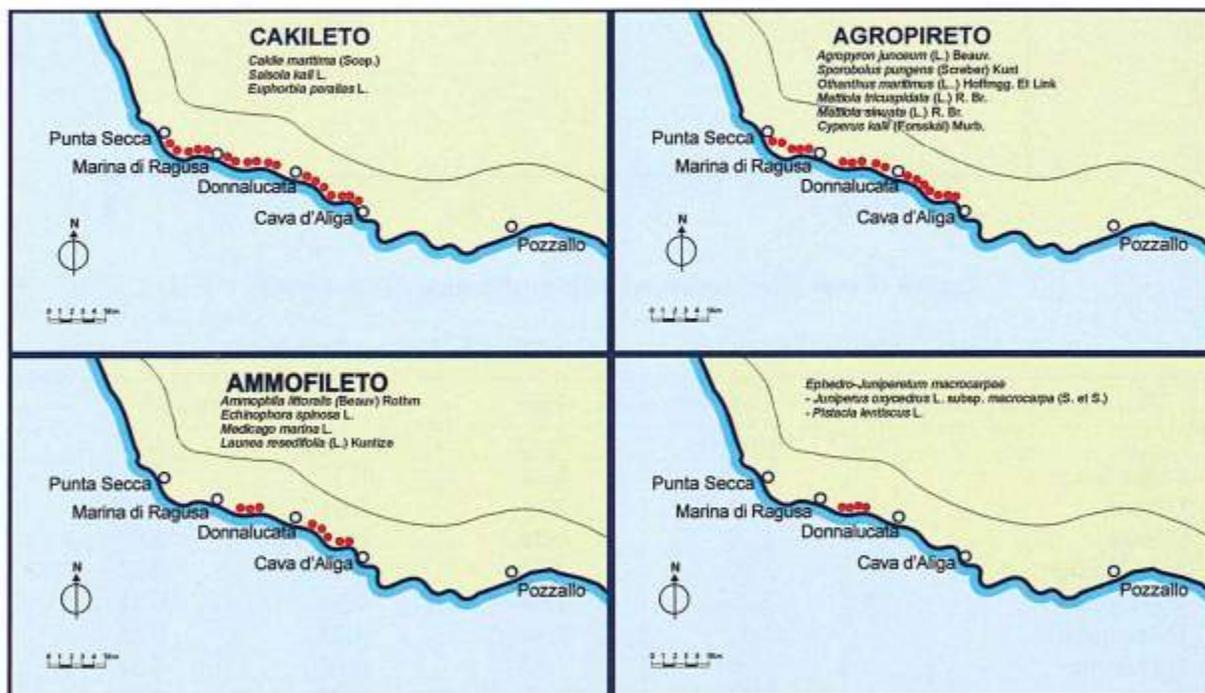


Figura 9 – Distribuzione delle fasce vegetazionali lungo il litorale.

A ridosso della battigia è presente il *Cakileto* (Fig. 10), vegetazione pioniera ed alonitrofila favorita dalla salsedine e dai detriti organici spiaggiati, costituita dalle associazioni effimere a *Cakiletea maritima*, *Atriplicetum hastato-tornabeni* e *Salsolo-Euphorbietum*, vegetazione a ciclo estivo caratterizzata da varie terofite come *Salsola kali* (L.) (*Salsola* erbe calì) e *Cakile maritima* (Scop.) (*Ravastrello* marittimo) e da una specie perenne abbastanza appariscente, *Euphorbia paralias* (L.) (*Euforbia* marittima). Nei tratti più vicini al mare il *Salsolo Euphorbietum* è sostituito da *Atriplicetum hastato-tornabeni*, vegetazione sempre effimera ma con più marcati caratteri alonitrofilici.



Figura 10 - *Cakile maritima* (Scop.) Ravastrello marittimo.



Figura 11 - *Otanthus maritimus* (L.) Santolina delle spiagge.

mullo della sabbia. Allo sparto pungente si accompagnano varie specie dell'associazione precedente ed ancora *Echinophora spinosa* L. (Finocchio litorale), ombrellifera con foglie ispessite e spinescenti e *Launea resedifolia* (L.) Kuntze, *Medicago marina* L., che hanno il loro optimum in questa associazione.

Sulla cresta delle dune, infine, si insediano le piante tipiche della *Macchia mediterranea*, in alcuni tratti distrutta dall'urbanizzazione che ha portato a sostituire la vegetazione autoctona con *Eucaliptus* sp., *Acacia cyanophylla* Lindley e con oliveti. La prima forma di vegetazione legnosa è la macchia ad *Juniperus oxycedrus* L. subsp. *macrocarpa* (S. et S.) Ball, fanerofita psammofila particolarmente frequente nei litorali sabbiosi del Mediterraneo.

Figura 12 - *Ammophila littoralis* (Beauv.) Rothm (Sparto pungente).

Segue l'*Agropyreto* (Fig. 11), vegetazione psammofila costituita dall'associazione *Agropyretum mediterranei*, piuttosto frammentaria e impoverita floristicamente; sono presenti con una certa frequenza solo *Agropyron junceum* (L.) Beauv. (Gramigna delle spiagge), graminacea stolonifera che inizia l'opera di stabilizzazione delle dune, ed ancora *Sporobolus pungens* (Schreber) Kunth, *Otanthus maritimus* (L.) Hoffmgg. et Link, mentre *Matthiola tricuspidata* (L.) R. Br., *Matthiola sinuata* (L.) R. Br. e *Cyperus kalli* (Forsskål) Murb. sono sporadiche. Nell'*Agropyretum mediterranei*, prima forma di vegetazione perenne colonizzatrice delle dune costiere, si distinguono due subassociazioni (Bartolo et al., 1982; Brullo e Furnari, 1970) caratterizzate entrambe dalla dominanza di *Sporobolus pungens* (Schreber) Kunth:

- *Typicum* aspetto ottimale dell'associazione nelle dune iniziali prossime alla riva;
- *Sporoboletosum* aspetto iniziale dell'associazione, frequente nelle depressioni dunari.

Altra graminacea stolonifera con portamento più basso, che spesso si associa alla gramigna delle spiagge, è *Sporobolus pungens* (Schreber) Kunth (Gramigna pungente), insieme a *Otanthus maritimus* (L.) Hoffmgg. et Link (Santolina delle spiagge) tipica psammofita ricoperta da una densa peluria biancastra, *Erygium maritimum* (L.) (calcatreppola marittima), ombrellifera con foglie glauche e spinescenti e *Pancratium maritimum* (L.) (Giglio di mare), bulbosa che in estate ha una vistosa fioritura bianca.

Procedendo verso le dune più interne che in questo tratto di litorale sono più basse e consolidate, segue l'*Ammofileto* (Fig. 12), associazione costituita da *Ammophiletum arundinaceae*, in cui la specie dominante è *Ammophila littoralis* (Beauv.) Rothm (Sparto pungente), grossa graminacea cespitosa che svolge un ruolo di grande importanza favorendo l'accumulo della sabbia.



Per quanto riguarda l'inquadramento fitosociologico, secondo Rivas Martinez (1975) le formazioni arbustivo-arboree, legate a substrati sabbiosi costieri, vengono riunite nello *Juniperion lyciae*, alleanza dei *Pistacio-Rhamnetalia alaterni* caratterizzata da *Juniperus oxycedrus* L. subsp. *macrocarpa* (S. et S.) Ball e *Juniperus oophora* (Willk) Kunze (= *J. phoenicea* L. subsp. *lycia* Molinier et Bolòs). Nell'associazione ad *Ephedro-Juniperetum macrocarpae*, inoltre, si distingue un aspetto tipico in cui domina *Juniperus oxycedrus* L. subsp. *macrocarpa* (S. et S.) Ball e un aspetto più maturo, rappresentato da una facies a *Pistacia lentiscus* L. che occupa le stazioni più distanti dal mare.

#### QUADRO SINTASSONOMICO

CAKILETEA MARITIMAE R. Tx. e Preising in R. Tx. 1950

EUPHORBIETALIA PEPLIS R. Tx. 1950

EUPHORBION PEPLIS R. Tx. 1950

*Salsolo-Euphorbietum* Pignatti 1952

*Atriplicetum hastato-tornabeni* O. Bolòs 1962

AMMOPHILETEA Br.- Bl. e Tx. 1934

AMMOPHILETALIA Br.- Bl. 1933

AMMOPHILION Br.- Bl. 1933 em. Rivas Goday e Rivas Martinez 1963

*Agropyretum mediterranei* Kühnh ex Br.- Bl. 1933

*Ammophiletum arundinaceae* Br.- Bl. (1921) 1933

QUERCETEALIA ILICIS Br.-Bl. 1947

PISTACIO-RHAMNETALIA ALATERNI Rivas Martinez 1975

OLEO-CERATONION Br.- Bl. 1936 em. Rivas Martinez 1975

JUNIPERION LYCIAE Rivas Martinez 1975

*Ephedro-Juniperetum macrocarpae* Bartolo, Brullo e Marcenò ass. nov.

#### Considerazioni conclusive

L'indagine multitemporale ha permesso di individuare una correlazione tra progressione delle infrastrutture antropiche e riduzione areale dei cordoni dunari, inseriti in un contesto in cui la vegetazione gioca un ruolo significativo nella conservazione di un substrato costituito da sabbie medio-fini da molto ben classate a moderatamente classate.

I campi di dune si sono ridotti dai 230.000 mq del 1897 ai 4000 mq circa del 2003, in risposta a processi erosivi innescati o incrementati da un'urbanizzazione estesa localmente fin sulla battigia.

La vegetazione è distribuita in linea generale secondo la successione *Cakileto*, *Agropireto*, *Ammofileto* e macchia mediterranea, in fasce parallele sempre più complesse procedendo verso l'entroterra. Localmente, in condizioni di disturbo e di erosione, si determina un arretramento della linea di costa ed una migrazione verso terra delle serie psammofile, con un'elevata compenetrazione tra specie appartenenti ai diversi sintaxa, una frammentazione degli ambienti originari ed un pesante impatto sulla distribuzione della vegetazione.

Correlando composizione e granulometria del substrato, morfologia della spiaggia emersa e tipologie vegetazionali, procedendo verso l'entroterra, possono essere grossolanamente distinte le facies a:

- sabbia, con dune embrionali mobili, prive di vegetazione e/o con vegetazione effimera dominata da *Cakile maritima* ssp. *maritima*;
- vegetazione psammofila, con dune mobili e vegetazione erbacea emicriptofita a copertura bassa, dominata da *Ammophila littoralis*;
- macchia bassa, con dune stabili e vegetazione nanofanerofitica e fanerofitica a copertura media, con *Cistus* sp. e *Rosmarinus officinalis*;
- macchia alta, con dune stabili e vegetazione nanofanerofitica e fanerofitica a copertura elevata dominata da *Juniperus* sp. e *Pistacia* sp..

I risultati ottenuti dall'elaborazione delle immagini mostrano infine come le strutture dunari recenti siano agevolmente confrontabili con quelle degli anni precedenti, permettendo di ricostruire le tendenze evolutive del sistema e di valutare la vulnerabilità ed il rischio di degrado del litorale, fornendo così un supporto indispensabile alla progettazione degli interventi di protezione e di tutela dell'ecosistema dunare.

**Bibliografia**

- Amore C., Brambati A., Di Geronimo S., Finocchiaro E., Giuffrida E., Randazzo G. (1988) - *Atlante delle spiagge italiane, Foglio 276 (Ragusa)*. C.N.R., P.F. Conservazione del suolo, Sottopr. Dinamica dei litorali, Roma.
- Amore C., Randazzo G. (1998) - *Problematiche ambientali del bacino idrografico del F. Irminio (Sicilia meridionale)*. Atti Convegno su "Aspetti geologici e geomorfologici degli Iblei". Noto 12-14 Dicembre 1997.
- Amore C., Giuffrida E., Randazzo E. (2006) - *Lo stato dei litorali italiani - Le spiagge della Sicilia*. GNRAC, 10: 39-44.
- Bartolo G., Brullo S., Marcenò C. (1982) - *La vegetazione costiera della Sicilia sud-orientale*. C.N.R.
- Brullo S., Furnari F. (1970) - *Vegetazione psammofila presso il Capo Isola delle Correnti (Sicilia sud-orientale)*. Pubbl. Ist. Bot. Univ. Catania.
- Rivas Martinez S. (1975) - *La vegetacion de la Clase Quercetalia ilicis en Espagna y Portugal*. Anal. Inst. Bot. A. J. Cavanilles, 17: 285-306.

Manoscritto ricevuto il 19/07/2005; accettato il 02/08/2005.

## Dune recenti lungo la costa pugliese

Giuseppe Cacciapaglia, Vincenzo De Santis e Giovanni Palmentola

Dipartimento di Geologia e Geofisica - Università degli studi di Bari, Campus universitario,  
via E. Orabona 4, Bari. Tel.: +39-0805442562, Fax: +39-0805442625,  
E-mail: g.cacciapaglia@geo.uniba.it, vdesantis@geo.uniba.it, g.palmentola@geo.uniba.it

### Riassunto

Nel corso di studi della dinamica della costa in Puglia, sono state individuate due situazioni interessanti e inattese inerenti alcuni apparati di dune costiere; queste situazioni suggeriscono nuovi schemi interpretativi della dinamica erosivo-sedimentaria lungo la fascia litorale.

In questa nota vengono descritte due località dove sono presenti corpi dunali costruiti nel corso degli ultimi decenni: la Marina di Ugento, lungo la costa pugliese del Golfo di Taranto, e la località di Punta Penna Grossa, nella Riserva Naturale Statale di Torre Guaceto, lungo la costa adriatica. Nella prima località le indagini hanno permesso di individuare la presenza di due sistemi di dune giustapposti: un primo sistema di età medievale (età ottenuta con datazioni radiometriche), un secondo sistema edificatosi nel corso degli ultimi 70 anni. Nella seconda località, le indagini hanno permesso di individuare un cordone dunale costituitosi negli ultimi 30 anni come conseguenza indiretta di interventi antropici. A Marina di Ugento, inoltre, si è potuto verificare che la costituzione del sistema dunale avvenuto negli ultimi 70 anni rientra nell'ambito di una complessiva redistribuzione del sedimento nell'ambito del sistema, avvenuta senza modificarne sostanzialmente il bilancio complessivo.

**Parole chiave:** quaternario, dinamica costiera, dune, Puglia, Italia.

### Abstract

*Dune ridges built after the 1930's were found along the Apulia coastline, at Marina di Ugento, in the Gulf of Taranto, and at Punta Penna Grossa, along the coast of the Adriatic sea.*

*These aeolian landforms seem to be particularly important both because they were built on the back of beaches which do not receive any sediment contribution from the hinterland, and because their formation, dated by radiometry, indicates a time when sea level is believed to have risen slowly (Dai Pra, Hearty, 1988; Pirazzoli, 1998; Dini et al., 2000; Auriemma, Mastronuzzi, Sansò, 2004).*

*On the Marina di Ugento sandy beach, sea conditions during the past 70 years caused remarkable beach widening, and consequently the construction of a new dune ridge system, leant parallel to the aeolian system dated back to the Middle Ages. At Punta Penna Grossa, half of a long foredune ridge was formed, at least partially, due to natural processes in the past 30 years after the anthropogenic planishing of part of a Greek-Roman dune, exposed as frontline dune due to the retreat of the shoreline.*

**Keywords:** *quaternary, coastal dynamics, dunes, Apulia, Italy*

### La Marina di Ugento

L'arenile della Marina di Ugento è lungo circa 6 km ed è costituito da due falcate sabbiose poco accentuate, la cosiddetta spiaggia di Torre S. Giovanni e quella di Torre Mozza, separate dalla prominenza del Gomito di Rottacapozza, anch'essa bordata da una spiaggia sabbiosa (Figg. 2 e 3).

La suddivisione della spiaggia in questi tre tratti (da N a S: spiaggia di Torre San Giovanni, Gomito di Rottacapozza, spiaggia di Torre Mozza) trova riscontro solo nella toponomastica locale e non nella cartografia ufficiale disponibile, per cui, nella definizione dei limiti tra questi tre tratti, vi è una certa soggettività.

Il corredo di dune dell'intero arenile si presenta con organizzazione e configurazione diversa, a causa delle diverse vicende attraverso cui si è evoluto ciascuno dei tratti di spiaggia associati.

Nella zona meridionale, lungo la spiaggia di Torre Mozza, è presente un solo cordone (il n. 8 della Fig. 3), mentre in quella settentrionale, la spiaggia di Torre San Giovanni, è presente un articolato sistema di cordoni (i numeri dall'1 al 7, nella Fig. 3) che raggiunge la massima ampiezza grosso modo nella parte mediana di quel tratto. Nel corso dei rilievi sul campo è stato riscontrato che le dune presenti lungo l'arenile di Torre San Giovanni hanno caratteri sedimentologici e di mantello vegetale che ne indicano l'appartenenza a due gruppi distinti, di età diversa.



Figura 1 - Ubicazione geografica dei due siti con dune recenti.

Quello più interno (cordoni n. 1, 2, 3 nella Fig. 3) è costituito da sabbie grigio-brune intervallate da sporadici livelli di suolo e colonizzate da specie vegetali appartenenti all'associazione fitosociologica *Juniperetum* e *Quercetum Ilicis* (con *Juniperus oxycedrus macrocarpa*, *Phillyrea angustifolia*, *Rosmarinus officinalis*, *Pistacia lentiscus*). I cordoni dunali esterni (n. 4, 5, 6, 7) sono costituiti da sabbie di colore dal bianco all'avana, coperte da specie vegetali (Fig. 4) della associazione fitosociologica *Ammophiletum* (con *Ammophila arenaria*, *Pancreatium maritimum*, *Otanthus maritimus*, *Euphorbia paralias*, *Calistegia soldanella*, *Mathiola sinuata*).

Lungo la spiaggia di Torre Mozza, come si è già detto, è presente un unico cordone (il n. 8 della Fig. 3) che, per natura della sabbia e per copertura vegetale, è del tutto analogo a quelli della fascia più esterna di Torre S. Giovanni. L'esame dei documenti cartografici e aerofotografici disponibili, insieme con i dati riportati in letteratura (Palmentola et al., 2003), con il rilevamento geomorfologico e con le notizie fornite dagli abitanti della Marina ha poi consentito di ricostruire le principali modificazioni della linea di riva e della configurazione della spiaggia, come anche la cadenza dei principali episodi di costruzione e di erosione degli apparati dunali avvenuti nel corso degli ultimi 70 anni (Fig. 5).

Per quel che riguarda i cordoni dunali, le principali indicazioni di ordine cronologico sono state ricavate da foto aeree (del 1955, 1974 e 2002) e soprattutto dal confronto fra carte topografiche (del 1874, 1933, 1948, 1977, 1988 e 1997). Particolarmente significativa è risultata, fra queste ultime, quella in scala 1:5000, redatta nel 1933 dal Consorzio di Bonifica "Ugento-Li Foggia" per effettuare studi preliminari ad un progetto di risanamento delle paludi costiere di quell'area (successivamente realizzato solo in parte e di cui ancora oggi è possibile vedere alcune opere).

#### *Spiaggia di Torre S. Giovanni*

Secondo la carta topografica del 1933, i tre cordoni dunali più recenti di questo tratto (n. 5, 6, 7 nella Fig. 3) all'epoca non esistevano: occupano oggi un'area che nel 1933 era ancora sommersa; il cordone n. 4 era



Figura 2 - Schizzo geomorfologico della Marina di Ugento.

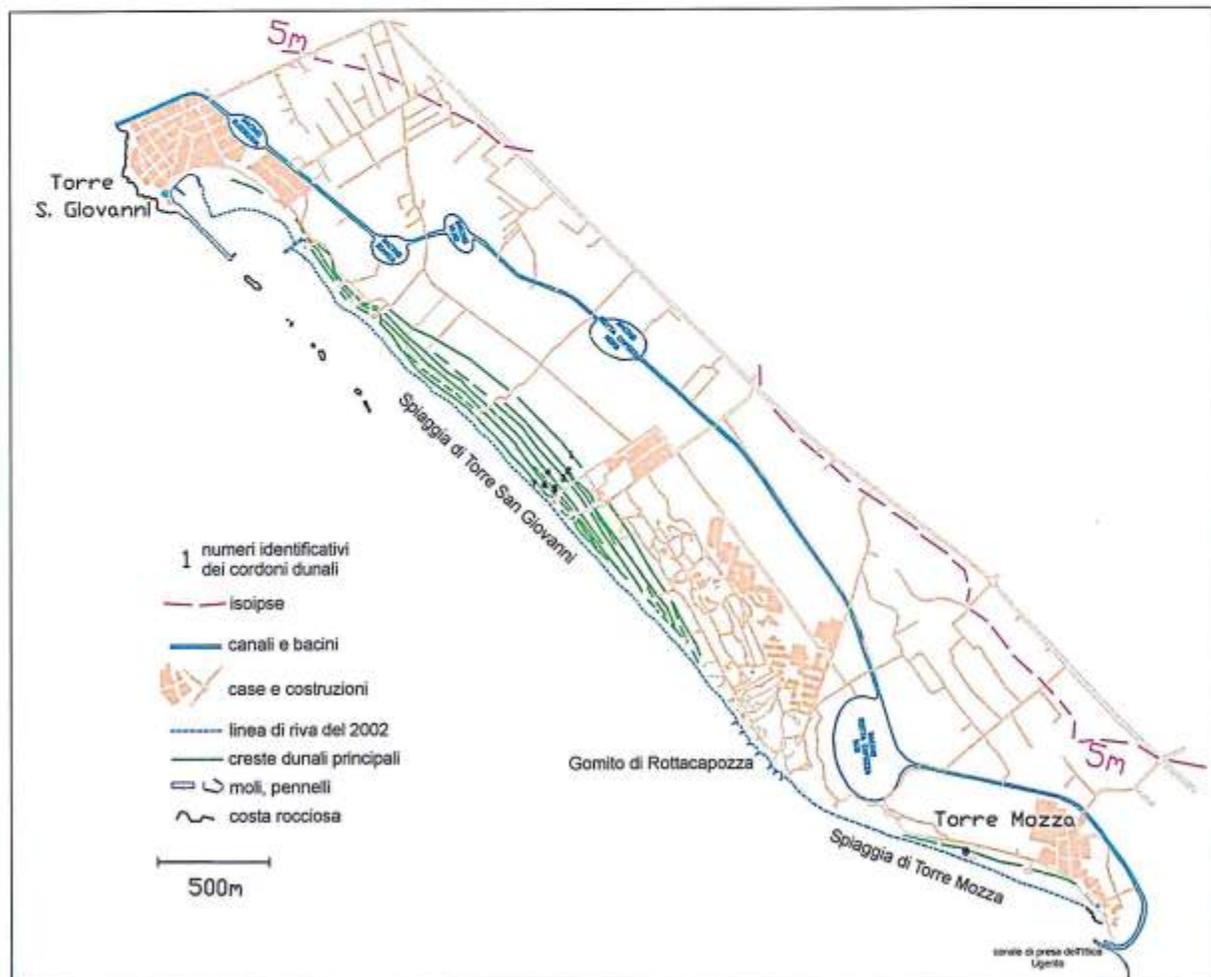


Figura 3 - La Marina di Ugento con le creste dunali presenti nel 2002.



Figura 4 - Marina di Ugento, spiaggia di Torre San Giovanni. Panoramica dei cordoni dunali esterni (Marzo 2003).

prospiciente la linea di battigia o in fase di costruzione (si veda la Fig. 6). In foto aeree più recenti, quelle levate nel 1974, l'attuale foredune, il cordone n. 7, appare ancora discontinuo e poco sviluppato, probabilmente perché in fase di crescita.

Secondo questi dati, quindi, i quattro cordoni più esterni, i quali nel complesso occupano un'area di 135.000 m<sup>2</sup>, costituiscono un sistema edificato fra il 1933 ed oggi a ridosso dei cordoni esistenti nel 1933.

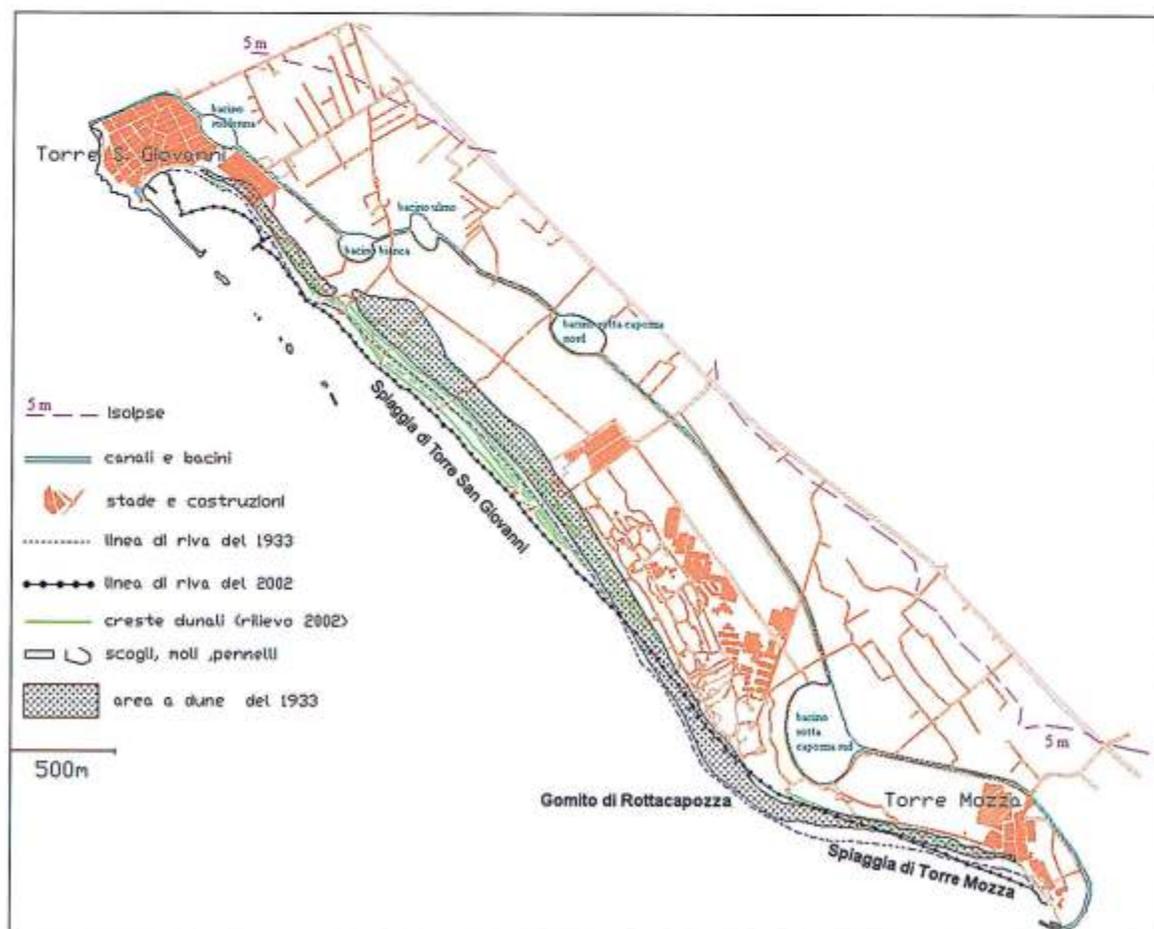


Figura 5 - Evoluzione della linea di riva della Marina di Ugento.

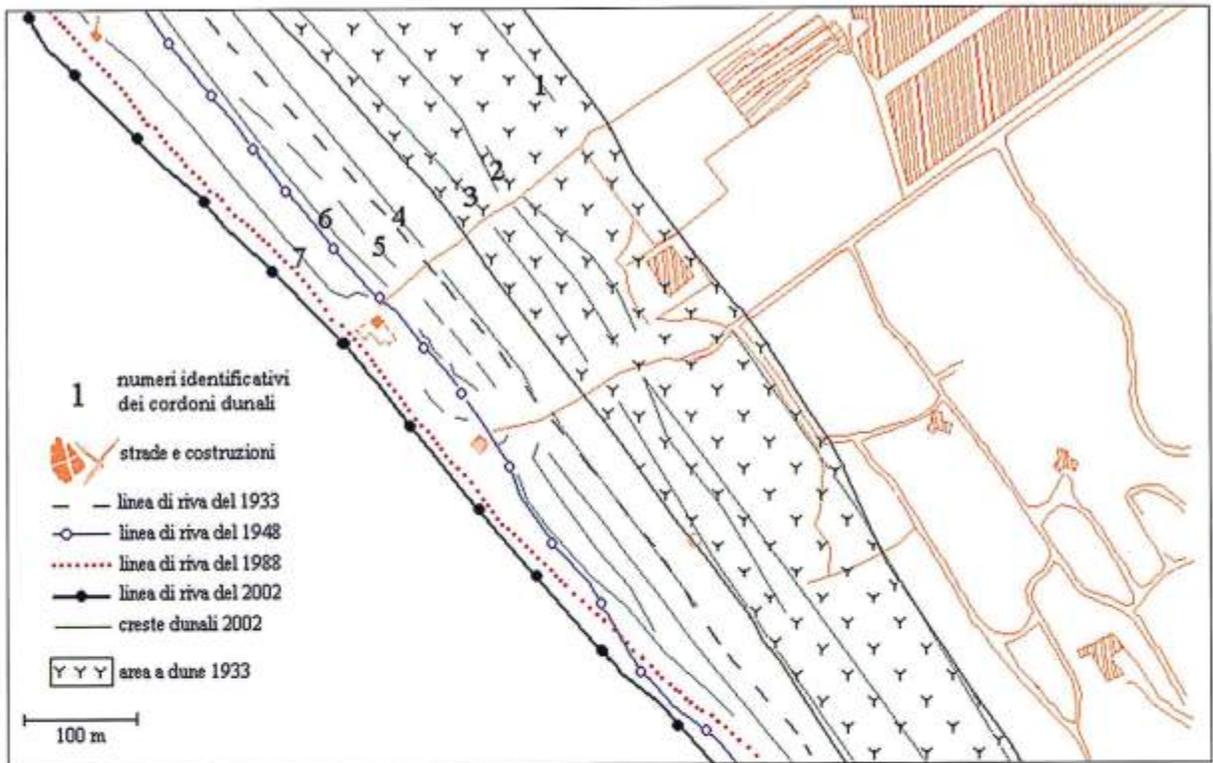


Figura 6 - Marina di Ugento. Variazioni della linea di riva del tratto mediano della spiaggia di Torre San Giovanni. Nella numerazione dei cordoni dunali non sono state considerate alcune diramazioni secondarie; i cordoni dunali riportati in tratteggio rappresentano tratti in cui essi si presentano discontinui.

Una indiretta conferma della indicazione di tempi ricavata da carte topografiche e da foto aeree, è rappresentata da una casamatta (Fig. 7) della II guerra mondiale presente presso la cresta del cordone n. 3, nella parte mediana dell'arenile. L'opera militare, costruita per tenere sotto tiro la spiaggia nell'eventualità di uno sbarco, in origine doveva essere vicina alla riva e in posizione che consentisse la piena e libera osservazione della spiaggia e dello specchio d'acqua antistante. Oggi essa dista oltre 100 metri dalla battigia;



feritoie la spiaggia e il mare non sono più visibili a causa di interposti cordoni dunali, presumibilmente formatisi successivamente, cioè dopo la seconda guerra mondiale.

Figura 7 - Casamatta nel tratto mediano della spiaggia di Torre San Giovanni: la visuale verso la battigia è impedita dalle dune interposte fra la casamatta e la battigia (Febbraio 2003).

### Gomito di Rottacapoza

Per quanto concerne il Gomito di Rottacapoza, la carta topografica del 1933 mostra che all'epoca esso era caratterizzato da una spiaggia bordata nell'entroterra da un solo cordone dunale, che arrivava a superare i 5 metri d'altezza. La situazione del Gomito risulta essersi radicalmente modificata a partire dagli anni '50 del secolo scorso, quando a più riprese fu asportata l'intera spiaggia e il suo cordone dunale, i cui lembi residui erano ancora osservabili nelle foto aeree del 1974. L'arretramento lungo il Gomito continua ancor oggi e nessuna duna si è più formata (Fig. 8).

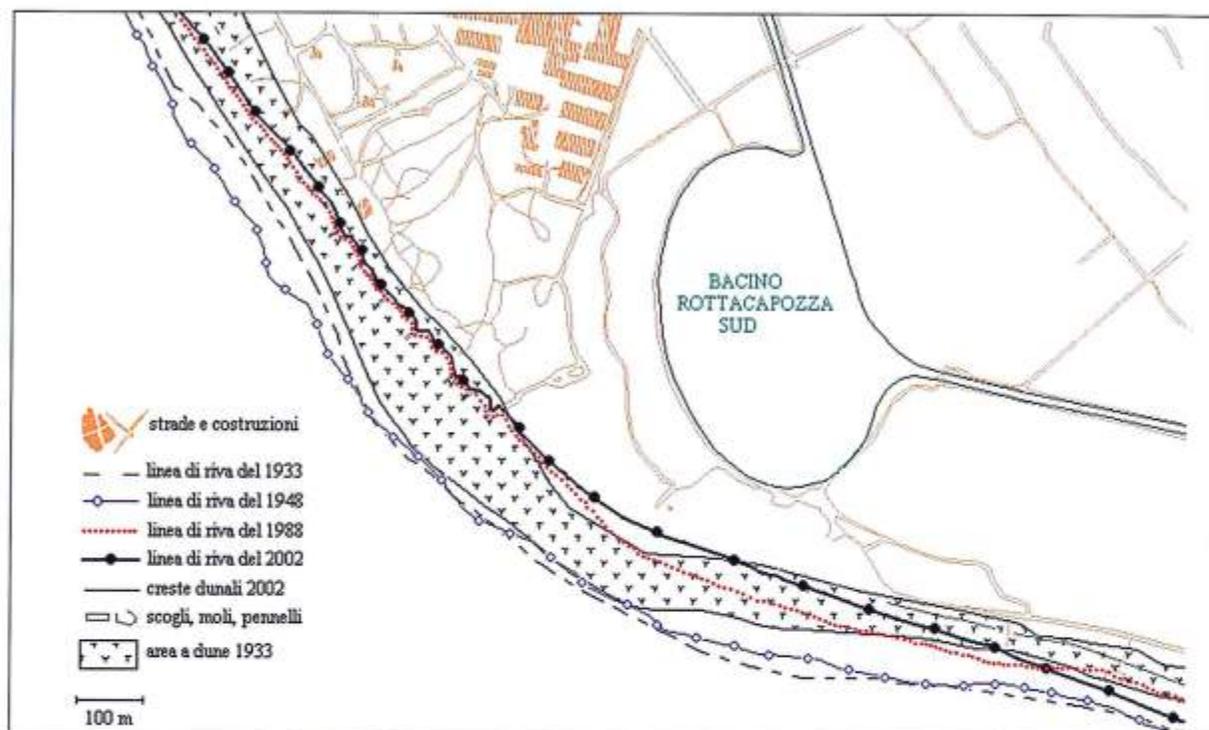


Figura 8 - Marina di Ugento. Variazioni della linea di riva al Gomito di Rottacapoza.

### Spiaggia di Torre Mozza

Come s'è detto in precedenza, ancor oggi, come già nel 1933 (Fig. 9), l'arenile della spiaggia di Torre Mozza è bordato da un unico cordone dunale, sempre all'incirca nella medesima posizione. Però mentre la duna del 1933 superava i 4 metri di altezza, l'attuale cordone solo in alcuni punti raggiunge i 3 metri; ancora e più importante, il grado di alterazione della sua sabbia e il tipo di copertura vegetale, identici a quelli dei cordoni dunali 4, 5, 6, 7 della Spiaggia di Torre San Giovanni, indicano che si tratta indubbiamente di una duna costruita più di recente, anche se forse in più punti a ridosso di lembi residui di quella antica. Questa osservazione è suffragata anche dalla posizione di una casamatta risalente alla II Guerra Mondiale, oggi ubicata in una sella del cordone dunale (Fig. 10), inclinata rispetto alla sua posizione originaria. Gli abitanti del luogo ricordano che la sua dislocazione si verificò in occasione di ripetute, intense mareggiate nel corso degli anni 1984 e 1985, quando il mare raggiunse la casamatta, ne scalzò la base asportando completamente il cordone di duna sul quale era poggiata, e si aprì in più punti ampi varchi verso il retroduna. Oggi davanti alla casamatta ci sono circa 80 metri di spiaggia.

In conformità con questi dati e con queste informazioni, confermate dalla ricostruzione delle linee di riva, si deve concludere che la spiaggia di Torre Mozza, nel periodo dal 1948 al 1988, ha subito una fase di arretramento che ha comportato anche la distruzione della duna riportata nella carta topografica del 1933. Successivamente, dal 1988 al 2002, ha subito una evidente rotazione: nella metà meridionale si è di molto ampliata, mentre in quella settentrionale, corrispondente in parte al Gomito di Rottacapoza, è arretrata profondamente. Ciò conferma che la duna attualmente presente è stata edificata, in gran parte, dopo gli ultimi eventi erosivi degli anni 1984 e 1985, durante la fase di progradazione della spiaggia.

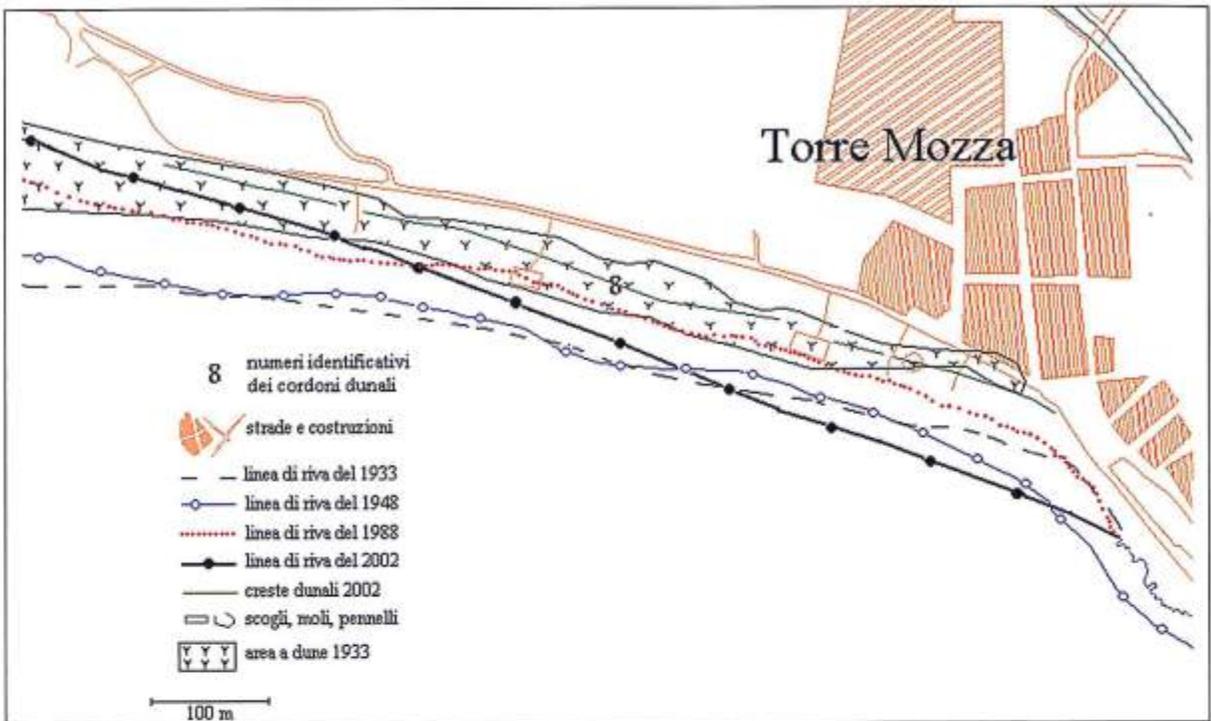


Figura 9 - Marina di Ugento. Variazioni della linea di riva della spiaggia di Torre Mozza.

#### *L'età radiometrica delle dune della spiaggia di Torre San Giovanni*

Le ricostruzioni riportate nelle pagine precedenti, basate su linee di riva rilevate anche oltre 73 anni fa (ad esempio quella del 1933), e che pertanto potrebbero essere non completamente attendibili, hanno richiesto una verifica ulteriore: è stata quindi commissionata la determinazione dell'età radiometrica  $^{14}\text{C}$  (con metodo AMS) di gusci di *Helix* sp. sistematicamente prelevati dalle parti più interne dei corpi di duna del tratto mediano della spiaggia di Torre San Giovanni. I risultati di queste determinazioni, eseguite dai laboratori Geochron del Massachusetts (U.S.A.), sono riportati in Tabella 1 ed in Figura 11.



Figura 10 - La casamatta basculata sulla piccola duna della spiaggia di Torre Mozza (Febbraio 2003).

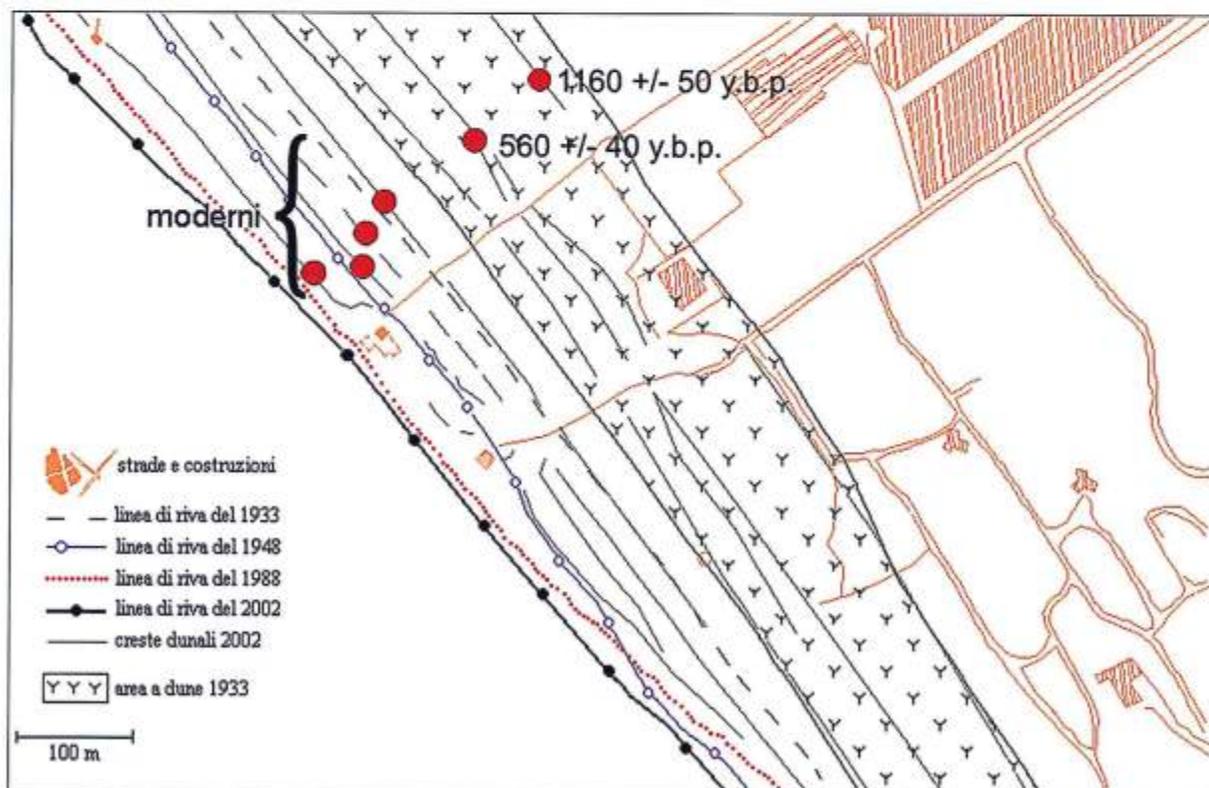
Tabella 1 - Età radiometriche dei cordoni dunali della spiaggia di Torre San Giovanni.

N. campione (n. cordone dunale della spiaggia di Torre San Giovanni)	tipo	$\Delta^{13}\text{C}$	Età non calibrata (y.b.p.)	Età calibrata (Reimer et al., 2004; y.b.p.)
1	Helix	-6.6	1160 ± 50	1051 - 1144
2	Helix	-8	560 ± 40	599 - 631
4+7	Helix	-7.1	moderna	moderna

In sintesi, le età radiometriche indicano: che il cordone dunale più interno, il n. 1 della Fig. 3, è riferibile a 1160±50 anni fa (età non calibrata), cioè alla fase di dunazione di età medievale già individuata in altri siti costieri della Puglia (Mastronuzzi e Sansò, 2002); il n. 2, datato 560±40 anni (età non calibrata) e probabilmente anche il n.3, del tutto simile al precedente, sono riferibili ad una fase di dunazione tardo-medievale, che finora ha trovato pochi altri riscontri lungo la costa pugliese (Mastronuzzi e Sansò, 2002).

I quattro cordoni più esterni (n. 4, 5, 6, 7) sono risultati "moderni", in accordo con i dati ricavati dallo studio sul campo e dall'esame dei documenti cartografici e fotografici. Tutti gli elementi raccolti permettono di affermare con ragionevole sicurezza che quei cordoni, come anche quello della spiaggia di T.re Mozza (n. 8), si sono formati nel corso degli ultimi 70 anni.

La configurazione dei cordoni "moderni", sub paralleli alla linea di riva e di modesta altezza, (solo l'attuale foredune sfiora in qualche punto i 4 metri s.l.m.) testimonia, fra l'altro, che essi sono stati edificati in condizioni di rapido accrescimento della spiaggia, quando il punto di recapito dei maggiori volumi di sedimento trasportato dal vento si sposta verso mare seguendo la migrazione della linea di riva e pertanto ciascun cordone non è alimentato sufficientemente a lungo per raggiungere altezze cospicue (Psuty, 1992).

Figura 11 - Spiaggia di Torre San Giovanni: punti di prelievo di *Helix* sp. e relative datazioni radiometriche.

### Bilancio sedimentario recente della Marina di Ugento

Per quanto attiene il bilancio sedimentario, i dati riportati nelle pagine precedenti hanno indicato che lungo l'arenile della Marina due eventi importanti si sono verificati dopo il 1933: la distruzione pressoché totale della grande duna lungo il Gomito di Rottacapozza e la edificazione dei quattro cordoni esterni lungo la spiaggia di T.re S. Giovanni; mentre la situazione della spiaggia di T.re Mozza, pur attraverso varie modificazioni, è recentemente tornata decisamente simile a quella del 1933. Con queste premesse, è stato possibile effettuare un calcolo dei volumi rimossi e del bilancio sedimentario della Marina.

Il volume dello scomparso cordone dunale di Rottacapozza, calcolato ricostruendo quel cordone con l'ausilio della carta topografica al 5.000 del '33 (vedi Fig. 13), è risultato pari a circa 450.000 m<sup>3</sup>; quello delle dune edificate dopo il 1933 lungo la spiaggia di T.re S. Giovanni, ricavato mediante il rilevamento topografico dettagliato (vedi Fig. 12), è risultato pari a 340.000 m<sup>3</sup>; infine, il volume della duna della spiaggia di Torre Mozza (edificata nel periodo dal 1988 al 2002), ricavato da rilievo topografico dettagliato, è risultato di 67.000 m<sup>3</sup>.

A questi va aggiunto il volume di sedimento prelevato dal porticciolo di T.re S. Giovanni dove si era accumulato dalla seconda metà degli anni '80 durante l'ultima fase di drammatico arretramento del litorale di Rottacapozza (Palmentola, Cacciapaglia, De Santis, 2003), risultato pari a 110.000 m<sup>3</sup>, che è stato calcolato considerando i volumi utilizzati per effettuare un intervento di ripascimento artificiale, proprio nella zona del Gomito.

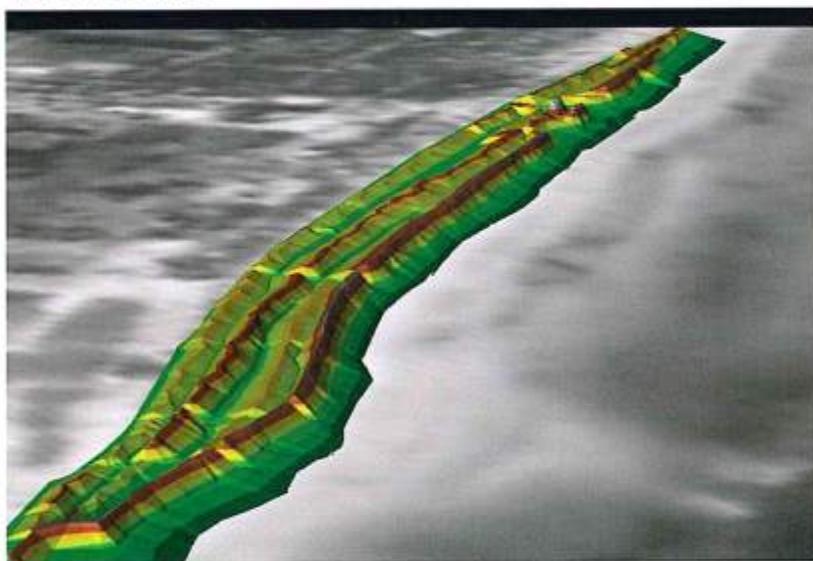


Figura 12 - Ricostruzione tridimensionale delle dune della spiaggia di Torre San Giovanni (Marina di Ugento) formatesi dal 1933 ad oggi. Vista verso sud; fattore di esagerazione verticale 5. I colori indicano le diverse fasce altimetriche del corpo duna (0,50 m).

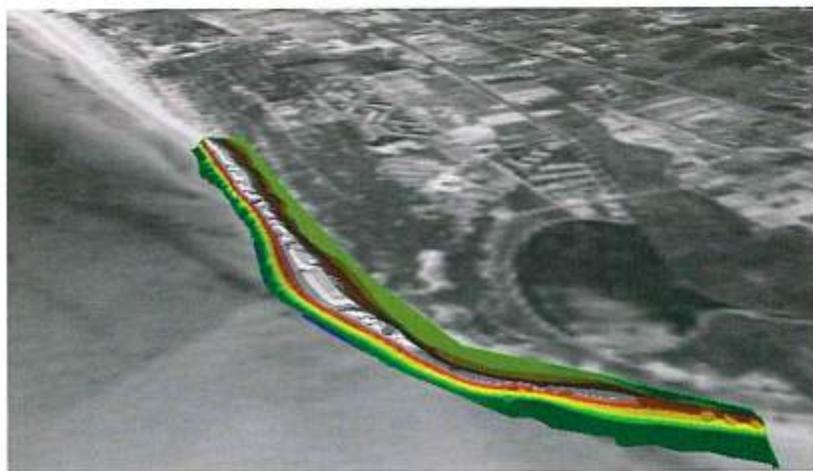


Figura 13 - Ricostruzione tridimensionale della duna del Gomito di Rottacapozza (Marina di Ugento) presente nel 1933 ed oggi scomparsa. Vista da sud-est; fattore di esagerazione verticale 5. I colori indicano le diverse fasce altimetriche del corpo duna (0,50 m).

Con queste operazioni è stato possibile stimare che, dal 1933 all'estate del 2004, è stato asportato un volume di circa 450.000 m<sup>3</sup> dal Gomito, e ne sono stati accumulati circa 517.000 lungo la spiaggia di Torre Mozza, di Torre San Giovanni e all'interno del porto della medesima località.

È parso opportuno verificare oltre i volumi complessivi rimossi e deposti (sabbia + vuoti), anche la quantità effettiva di sabbia, al netto dei vuoti, anche se il calcolo della porosità di una sabbia sciolta è difficile da effettuare. In questo studio, la porosità è stata determinata versando una quantità nota di sabbia asciutta della spiaggia di Ugento in un cilindro graduato, precedentemente riempito con un volume noto di acqua (Vat); nel cilindro la quantità nota di sabbia occupa un volume V<sub>s</sub>. L'acqua presente nei vuoti della sabbia (V<sub>as</sub>) è pari al volume totale di acqua versata nel cilindro meno il volume di acqua presente al di sopra della superficie della sabbia (V<sub>ass</sub>):

$$V_{as} = V_{at} - V_{ass}$$

Pertanto la porosità percentuale P della sabbia è data dal volume di acqua presente nella sabbia diviso il volume occupato nel cilindro dalla sabbia, moltiplicato 100:

$$P = V_{as} / V_s \cdot 100 \quad (1)$$

Lo stesso cilindro con la stessa sabbia è stato poi sottoposto a vibrazione (addensamento della sabbia) per dieci minuti, cioè fin quando non si sono più verificati assestamenti e addensamenti. La porosità è stata rimisurata in queste nuove condizioni addensate riapplicando la (1). Questo secondo valore della porosità è stato assunto come il valore della porosità della sabbia sciolta dei corpi dunali.

L'operazione è stata eseguita con la sabbia del cordone n. 3 della Marina di Ugento, che in passato si continuava verso Sud nella duna scomparsa del Gomito di Rottacapozza, ed è stata eseguita proprio per calcolare i volumi di sabbia asportati dal Gomito. La porosità media è risultata pari al 42%, sicché la quantità di sabbia asportata fin al 2004 dal litorale del Gomito dovrebbe corrispondere a circa 260.000 m<sup>3</sup>. Analoga operazione è stata eseguita su campioni di sabbia prelevati dai quattro cordoni di dune costruiti dopo il 1933 lungo la spiaggia di Torre San Giovanni: ne è risultata una porosità media pari al 43.6%; sicché si può valutare in 192.000 m<sup>3</sup> circa la sabbia che costituisce quei cordoni. Analogamente, la sabbia che costituisce la duna di Torre Mozza è risultata avere una porosità del 43%, sicché la quantità effettivamente lì accumulata dal 1988 al 2002 è valutabile in 38.200 m<sup>3</sup> circa. Un'ultima campionatura, effettuata sulle sabbie intrappolate nel porticciolo di Torre San Giovanni, ha permesso di determinarne la porosità in circa il 47%, il che permette di calcolare che, al volume di circa 110.000 m<sup>3</sup> lì accumulato a più riprese, corrisponde una quantità netta di sabbia pari a circa 58.000 m<sup>3</sup>.

La sabbia accumulata nel porticciolo e quella che costituisce le dune nuove delle spiagge di Torre San Giovanni e Torre Mozza sommano, quindi, una quantità di sedimento pari a circa 288.200 m<sup>3</sup>, a fronte dei 260.000 asportati dal Gomito. La differenza, circa 28.200 m<sup>3</sup>, dovrebbe rappresentare un'acquisizione, cioè un segno positivo nel bilancio. Si tratta di una quantità abbastanza trascurabile se si tiene presente la sabbia ancora in movimento lungo la riva e quella che costituisce le barre mobili allungate circa parallelamente a quest'ultima.

Si può concludere che, sostanzialmente, il bilancio sedimentario della Marina di Ugento è in pareggio: nell'ambito di quel sistema costiero, il sedimento si muove e si distribuisce in relazione al mutare delle condizioni meteo-marine, senza significative perdite, ma, forse, addirittura con qualche apporto dal mare, che può bilanciare la sabbia deflata e quella prelevata dall'uomo fino a qualche anno fa e allontanata definitivamente dal sistema.

### La duna di Punta Penna Grossa

Lungo la costa adriatica della Puglia, in località Punta Penna Grossa, situata circa 15 km a Nord di Brindisi, sono state rilevate profonde differenze nell'ambito di parti diverse del cordone di duna più esterno che margina attualmente l'arenile.

Lo studio sedimentologico, insieme con l'esame di documenti cartografici e di foto aeree del 1955, 1972 e 2002, hanno consentito di ricostruire la storia recente di quella fascia costiera, di risalire alle cause di quelle differenze e ai tempi in cui si sono realizzate.

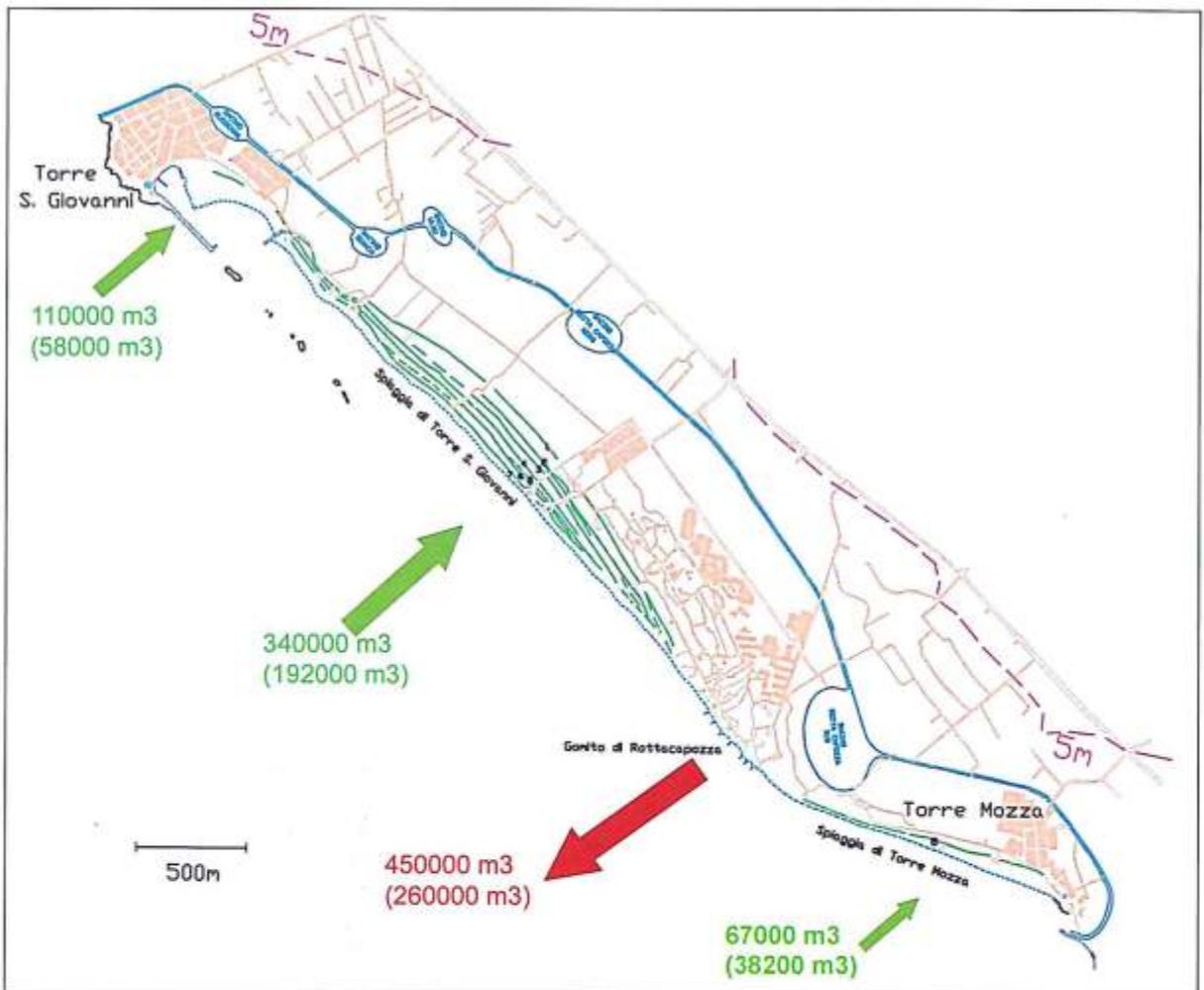


Figura 14 - Apporti ed rimozioni di sabbia dalla Marina di Ugento dal 1933 ad oggi. Le cifre tra parentesi indicano la sola sabbia, le altre indicano i volumi di spazio occupato.

La fascia costiera di Punta Penna Grossa (vedi Fig. 20) è costituita da una spiaggia allungata da ONO a ESE e limitata da un cordone di duna.

La metà sud - orientale di quel cordone (Figg. 15 e 20), lunga poco più di 500 metri e alta fino a 12 m, ha il versante esterno profondamente inciso dal mare, ed è costituita da alternanze di orizzonti di sabbia di colore marroncino chiaro e di livelli decimetrici di suolo bruno contenenti numerosi gusci di gasteropodi del genere *Helix*. Determinazioni di età assoluta con il metodo del radiocarbonio su alcuni di questi hanno rivelato (Mastronuzzi e Sansò, 2002) un'età di  $2910 \pm 50$  anni (età non calibrata); sicché si tratta di un deposito di età greco - romana, oggi in via di smantellamento ad opera del mare. Che questa metà del cordone dunale di Punta Penna Grossa sia abbastanza "vecchia", esposta in prima linea solo recentemente, è confermato dalla associazione fitosociologica che lo riveste: si tratta di "Juniperetum" che, sulle coste del Mediterraneo, colonizza le aree retrodunali e i cordoni di dune più interni. Concludendo, vi è una duna con copertura vegetale tipica delle dune più interne, ma oggi esposta direttamente sul mare. Ciò significa che molto probabilmente sono state asportate una o più dune antistanti con la relativa spiaggia.

La metà nord - occidentale del medesimo cordone (Figg. 16 e 20) si allunga per poco meno di 500 metri, è elevata fin oltre 7.50 m ed è costituita da sabbia di colore avana, colonizzata da specie vegetali riferibili all'associazione fitosociologica "Ammophiletum", tipica delle foredunes nel Mediterraneo e rappresentata da

specie erbacee quali *Ammophila arenaria*, il *Pancreatium maritimum*, l'*Otanthus maritimus*, l'*Euphorbia paralias*, la *Calistegia soldanella*, la *Mathiola sinuata*, indicatrici di un ambiente estremo, caratterizzato da forte mobilità del sedimento.

Questo tratto di duna, con caratteristiche profondamente diverse da quelle del tratto descritto precedentemente, partecipa anche attivamente ai processi di scambio sedimentario colico con la spiaggia antistante. Le osservazioni fin qui descritte indicano che, benché i due lembi siano abbastanza ben giustapposti, diversa dev'essere stata la loro storia.



Figura 15 - Spiaggia di Punta Penna Grossa; parte sud-orientale del cordone dunale (Settembre 2004).



Figura 16 - Spiaggia di Punta Penna Grossa; parte nord-occidentale del cordone dunale (Settembre 2004).

#### L'evoluzione della spiaggia di Punta Penna Grossa

Per verificare le ragioni di questa "stranezza", quindi, sono state esaminate foto aeree di epoche diverse, è stata studiata la natura e la composizione del sedimento e sono state ricostruite le vicende meteo-marine di quel tratto di litorale.

Fra le foto aeree disponibili, si sono rivelate di particolare importanza quelle del 1955 e quelle del 1972; dal loro esame si ricava che nel 1955 il sito di Punta Penna Grossa era caratterizzato da un'unica duna di prima linea lunga circa 960 metri (Fig. 17).

Le carte topografiche IGM in scala 1:25.000 risalenti al 1955 riportano per quella duna altezze fra i 10 e i 12 m sufficienti per consentirne la rappresentazione mediante le isoipse ausiliarie. Particolare di rilievo, che tornerà utile nel confronto con foto aeree più recenti: sia le foto aeree sia le carte topografiche mostrano che tutta la fascia costiera era interessata da una rete di sentieri.

Nelle foto del 1972 (Fig. 18), la rete dei sentieri appare più densa e compaiono anche alcune larghe piste, le quali suggeriscono il transito di mezzi pesanti; inoltre, al posto della metà nord - occidentale del cordone dunale compare uno sventramento per l'apertura di una cava. Un'altra cava ampia più di due ettari appare alle spalle della metà sud - orientale del cordone di duna, che è stato risparmiato.

Informazioni raccolte in loco segnalano che, in seguito all'intervento delle autorità preposte alla conservazione dei beni ambientali e del demanio, in un momento non precisato fra il 1965 e il 1970 l'asportazione di sabbia venne sospesa. Le medesime fonti, a momenti apparse reticenti, riportano che, successivamente, non sarebbe stato eseguito alcun intervento di rimodellamento del paesaggio e, in particolare, del cordone di duna.

Tuttavia, oggi, e già nelle foto aeree levate nel 2002, al posto dello sventramento di cava, all'incirca nello stesso luogo occupato dalla duna asportata, è presente una nuova duna (vedi Fig. 16) di sabbia complessivamente "fresca" e con attivo scambio sedimentario con l'arenile antistante: la duna ad *Ammophylletum*, (Figg. 19 e 20). Il confronto fra i documenti cartografici di epoche diverse indica che, nel tempo durante il quale si è formata la nuova duna, si è verificato un arretramento medio della linea di riva, uniforme per tutto il tratto di costa in esame, di circa 10 metri (Fig. 20).

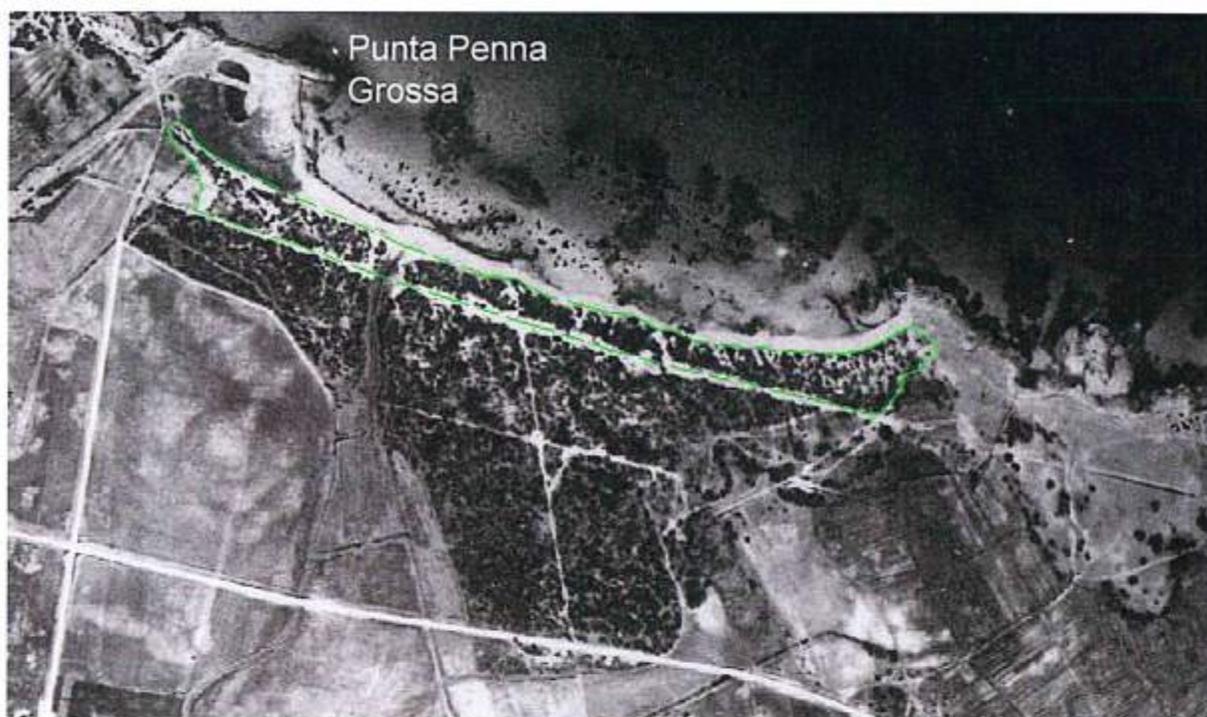


Figura 17 - Punta Penna Grossa nel 1955. Esiste un solo integro cordone dunale in prima linea, contornato nella foto. (Foto IGMI; autorizzazione alla pubblicazione n.6068 del 14/07/2005).



Figura 18 - Punta Penna Grossa nel 1972. La parte nord - occidentale del cordone dunale visibile nella foto del 1955 è stata asportata. Si noti anche la cava aperta subito dietro la parte sud - orientale dello stesso cordone, contornato nella foto (Foto IGMI; autorizzazione alla pubblicazione n. 6068 del 14/07/2005).

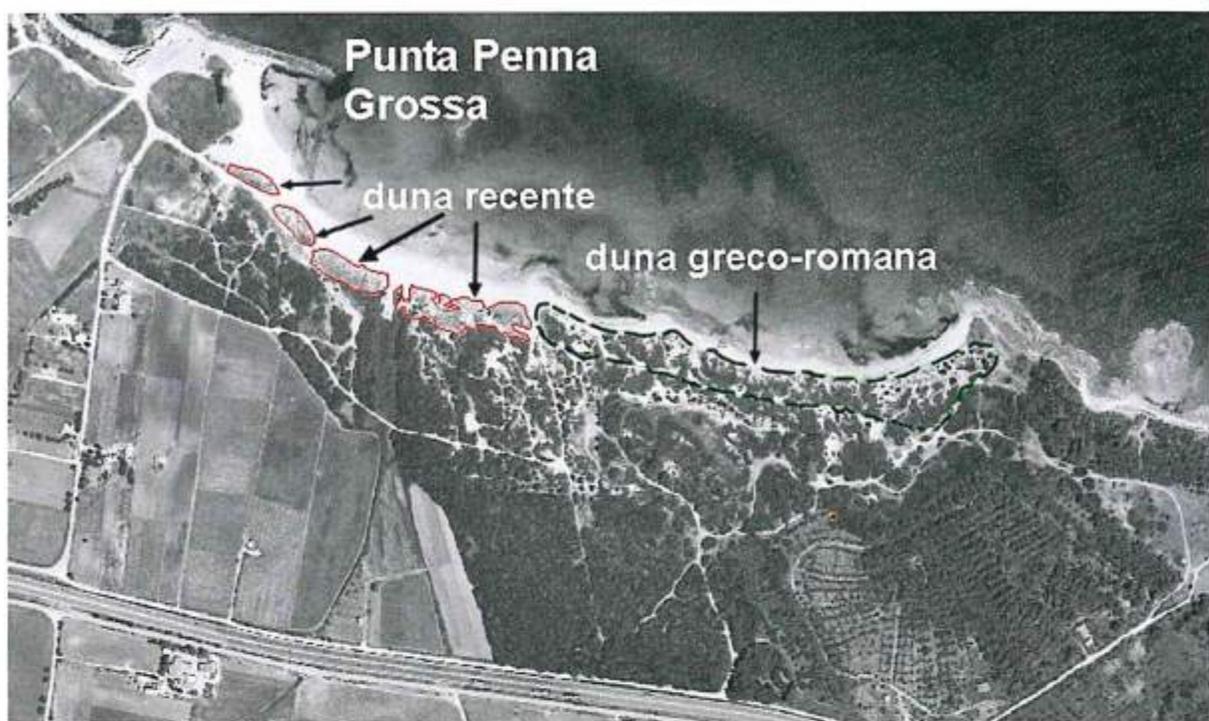


Figura 19 - Punta Penna Grossa nel 2002. Si noti la duna recente cresciuta al posto di quella asportata dall'uomo (foto AGEA, Italia). Il contorno in tratteggio delimita la parte superstita della duna greco-romana.

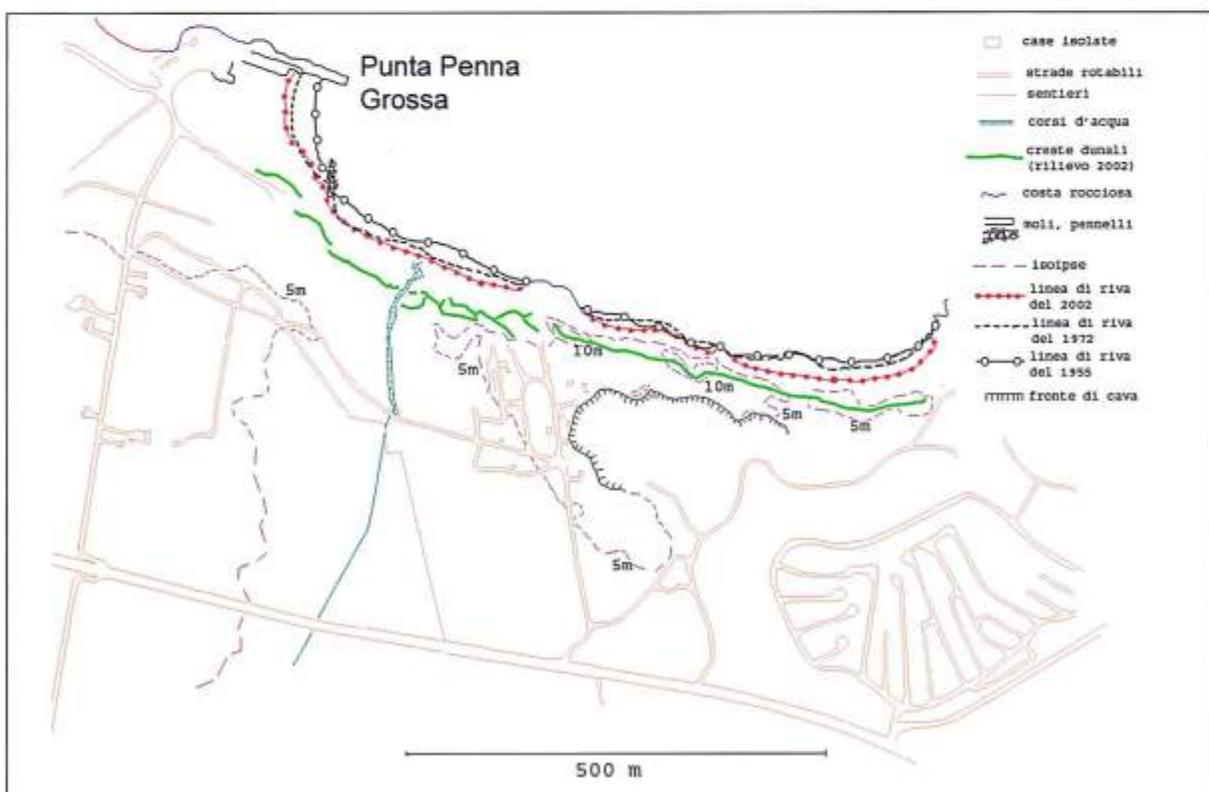


Figura 20 - Punta Penna Grossa: evoluzione della linea di riva e cordoni dunali come rilevati nel 2002.

In mancanza di documenti ufficiali e certi, si è posto il problema se la duna sia stata ricostituita artificialmente, in parte o *in toto*, oppure se essa si sia ricostituita in modo naturale. In quest'ultimo caso, essa sarebbe stata formata in un intervallo di tempo compreso tra un massimo di 37 (attività di cava cessata nel 1965) ed un minimo di 32 anni (attività di cava cessata nel 1970).

Per comprendere cosa possa essere accaduto e cosa sia possibile e compatibile con i fattori che controllano la dinamica del sito, si è deciso di verificare se, data la posizione, la configurazione del sito e le vicende meteo-marine che lo hanno interessato, la costruzione "naturale" di una simile duna sia da considerarsi un evento possibile, e quale sarebbe dovuto essere il tasso medio annuo di crescita del corpo sedimentario.

Per effettuare il calcolo del tasso sedimentario medio del nuovo cordone, ne è stato realizzato il rilievo topografico: questo ha permesso di calcolarne il volume in circa 21000 m<sup>3</sup> e, pertanto, di dedurre che per la sua costruzione naturale è stato necessario un tasso medio annuo di crescita compreso fra un minimo annuo di 1.45 m<sup>3</sup>/m lineare (37 anni dalla definitiva sospensione dell'attività di prelievo) e un massimo di 1.67 m<sup>3</sup>/m lineare (32 anni dalla sospensione).

E' stata quindi eseguita l'analisi dei dati anemometrici registrati fra il 1951 e il 1998 dalla stazione meteorologica di Brindisi-Casale, situata 15 km a sud di Punta Penna Grossa; la loro elaborazione ha permesso di stabilire le frequenze dei venti e, per ciascuna direzione di provenienza, la distribuzione delle velocità secondo 4 classi (classi Beaufort 1-2, 3-4, 5-6, 7-12). I dati ricavati sono riportati nella Tabella 2.

Tabella 2 - Distribuzione percentuale dei venti e, per ciascuna direzione, distribuzione percentuale nelle diverse classi di forza Beaufort. Elaborazione dei dati anemometrici registrati dalla stazione di Brindisi - Casale (da Schinaia, 2000).

Provenienza	Frequenza media annua	Classi Beaufort			
		1-2	3-4	5-6	7-12
N	14.8%	25.1	56.3	17.3	1.3
NE	6.4%	42.4	45.6	10.9	1.1
E	4.3%	43.3	50.9	5.5	0.3
SE	7.2%	31.4	55.2	12.5	0.9
S	15.2%	30.6	55.6	13.3	0.5
SO	6.7%	48.2	45.6	6	0.2
O	8.1%	47.8	45.6	6.3	0.3
NO	20.1%	21.1	62	16.2	0.6

Escludendo le calme, che rappresentano il 17.2% del tempo, nel periodo 1951-1998 il vento regnante proveniva da NO con frequenza del 20.1%, seguito dal vento da Sud (15.2%) e da quello da Nord (14.8%). I venti da N e da NO sono risultati anche i più intensi e sono ai primi due posti nelle classi di forza Beaufort 3-4 e 5-6, seguiti al terzo posto dai venti da S. I venti da N, poi, sono i più frequenti anche nella classe 7-12. Rispetto all'orientazione del tratto di costa in esame, i venti con il maggiore fetch di spiaggia sono, in ordine decrescente, quelli da NO, N e NE. Data la forma della duna nuova di punta penna Grossa, che è infatti costituita da quattro lembi di altezza e massa crescenti procedendo da ONO a ESE, si ritiene che i venti più efficaci nel processo di costruzione di questa duna siano stati quelli provenienti da NO e, in subordine, da N, che occupano anche posizioni significative nelle classi di velocità Beaufort 5-6 e 7-12. Resta comunque il dubbio connesso con la mancanza di un sufficientemente ampio bacino di prestito dal quale quei venti, pur capaci, possano aver prelevato la quantità di sedimento necessaria.

## Conclusioni

Gli studi effettuati su due siti costieri pugliesi caratterizzati dalla presenza di cordoni di duna con sedimenti non alterati e con copertura vegetale ed *Ammophyllum*, hanno messo in evidenza che essi si sono formati in età molto recente, negli ultimi 70 anni per il sito di Marina di Ugento, negli ultimi 30 anni per il sito di Punta Penna Grossa. Le cause di questo recente sviluppo di apparati dunali sono alquanto diverse per i due siti. A Marina di Ugento esso è dovuto a processi naturali di evoluzione della linea di riva che hanno causato la redistribuzione del sedimento, la progradazione del tratto settentrionale di quella spiaggia (Spiaggia di Torre San Giovanni) e, quindi, la formazione di un intero nuovo sistema di dune. Sull'Adriatico, a Punta Penna Grossa, la duna recente, forse anche in parte artificiale, risulta compatibile con le condizioni anemometriche del paraggio.

Alcune considerazioni particolari circa le dune della Marina di Ugento sembrano interessanti e possono costituire elementi di riflessione e spunto per ulteriori ricerche. Come si è visto, l'intero corredo di dune oggi presente lungo quella Marina è stato costruito nel corso di due fasi. La prima e più antica è rappresentata da tre cordoni di età medievale, fatto raro lungo la costa pugliese dove molto più diffusi sono gli apparati di dune di età medio-olocenica e greco-romana (Mastronuzzi e Sansò, 2002). La seconda fase, verificatasi nel corso degli ultimi 70 anni circa, ha consentito la costruzione di 4 estesi cordoni, di cui finora si ignorava l'età.

L'intero apparato di dune della Marina di Ugento, riferito ad un lasso di tempo esteso tra  $1160 \pm 50$  anni da oggi e i giorni nostri, risulta edificato in un periodo di complessiva e generalizzata risalita del livello del mare (Dai Pra ed Hearty, 1988; Pirazzoli, 1998; Dini et al., 2000, Fig. 21; Auriemma, Mastronuzzi, Sansò, 2004;) e per di più lungo un litorale privo di significativi apporti solidi dall'entroterra. Questa situazione è ben diversa da quelle accertate lungo la costa pugliese, dove le dune finora studiate sono risultate tutte riferibili a fasi di stazionamento del livello del mare: alto per le dune medio-oloceniche, basso per quelle di età greco-romana (Fig. 21).

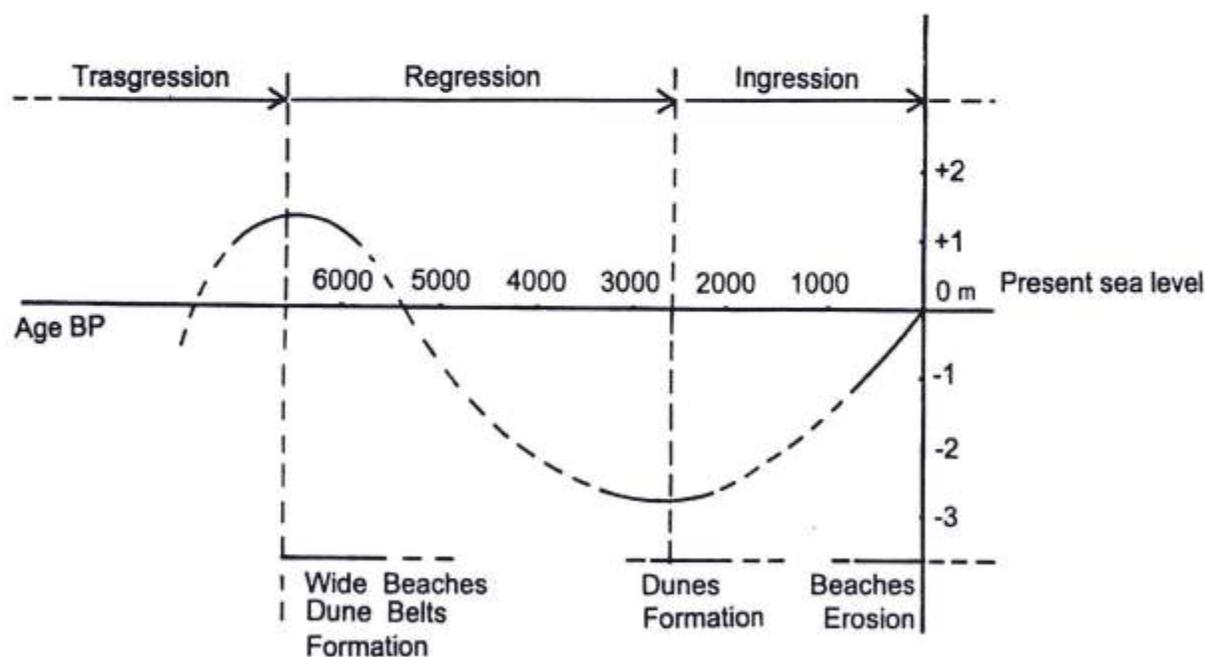


Figura 21 - Variazioni relative del livello marino e fasi di dunazione riconosciute lungo le coste adriatiche della Puglia (da Dini et al., 2000).

La dinamica complessivamente anomala del litorale della Marina è probabilmente dovuta alla sua particolare conformazione: il litorale sabbioso è infatti delimitato alle estremità da due brevi promontori rocciosi; il basso fondale antistante, esteso per oltre 3 km dalla linea di riva, conserva una riserva di sabbia ("Secche di Ugento") che, a seconda delle condizioni meteo-marine, può alimentare la spiaggia. Quest'ultima infine, a causa della sua posizione rispetto al "corridoio" del Golfo di Taranto, vede i suoi sedimenti "oscillare" alternativamente verso NO o verso SE, a seconda del vento, senza che, di norma, quantità importanti di sabbia arrivino a uscire dal sistema.

## Ringraziamenti

Lavoro eseguito e stampato nell'ambito del progetto COFIN 2002: "I depositi eolici delle spiagge italiane e il flusso di sedimenti spiaggia - dune" (coordinatore Scientifico Nazionale del Programma di Ricerca: prof. Giuliano Fierro; Responsabile Scientifico dell'Unità Operativa dell'Università di Bari: prof. Giovanni Palmentola) e con i contributi dell'Università degli Studi di Bari (Fondo di ateneo per la ricerca e Contributo straordinario) e del Dottorato di ricerca in Geomorfologia e Dinamica Ambientale dell'Università degli Studi di Bari.

Si ringraziano sentitamente il prof. Nicola Walsh, per l'assistenza durante le prove di laboratorio, e i referee, prof. Giovanni Battista La Monica e prof. Leandro D'Alessandro, per gli utili suggerimenti anche in merito alla leggibilità del lavoro.

## Bibliografia

- Arens S.M., Wiersma J. (1994) - *The Dutch foredunes: inventory and classification*. J. of Coastal Research, 10: 189-202.
- Auriemma R., Mastronuzzi G., Sansò P. (2004) - *Middle to late Holocene relative sea-level changes recorded on the coast of Apulia (Italy)*. Geomorphologie: relief, processus, environment, 1: 19-34.
- Carter R.W.G. (1988) - *Coastal environments*. Academic Press, London, 671 pp.
- Dai Pra G., Hearty P.J. (1988) - *I livelli marini pleistocenici del Golfo di Taranto. Sintesi Geocronostratigrafica e tettonica*. Mem. Soc. Geol. It. 41: 637-644.
- Dal Cin R., Simeoni U. (1988) - *Processi erosivi e trasporto dei sedimenti nelle spiagge pugliesi fra S.M. di Leuca e Taranto (Mare Ionio). Possibili strategie di intervento*. Boll. Soc. Geol. It., 108: 768-783.
- De Santis V. (2005) - *Stato ed evoluzione di alcuni apparati dunali della costa pugliese*. Tesi di Dottorato in Geomorfologia e Dinamica Ambientale. Dipartimento di Geologia e Geofisica, Università degli Studi di Bari.
- De Santis V., Palmentola G. (2003) - *The Penna Grossa Point dune ridge (Adriatic Apulia, Southern Italy)*. Proceedings of Medcoast 03 Conference, Ravenna, Italy; pp. 1435-1444.
- Dini M., Mastronuzzi G., Sansò P. (2000) - *The effects of relative sea level changes on the coastal morphology of southern Apulia (Italy) during the Holocene*. In Slaymaker O. ed.: *Geomorphology, human activity and global environmental change*, Wiley, Chichester, UK, pp. 43-65.
- Kenneth P., Tsoar H. (1990) - *Aeolian sand and sand dunes*. Cambridge University press, 396 pp.
- Mastronuzzi G., Palmentola G., Ricchetti G. (1989) - *Aspetti della evoluzione olocenica della costa pugliese*. Mem. Soc. Geol. Ital., 42: 287-300.
- Mastronuzzi G., Palmentola G., Sansò P. (2001) - *Evoluzione morfologica della fascia costiera di Torre Canne (costa adriatica, Puglia)*. Studi Costieri, 4: 287-300.
- Mastronuzzi G., Sansò P. (2002) - *Holocene coastal dune development and environmental changes in Apulia (southern Italy)*. Sedimentary Geology, 50: 139-152.
- Nordstrom K.F. (2000) - *Beaches and dunes of developed coasts*. Cambridge University press, pp. 352.
- Palmentola G., Cacciapaglia G., De Santis V. (2003) - *Some data about the Marina di Ugento sand beach dynamics (Apulia, Southern Italy)*. Proceedings of Medcoast 03 Conference, Ravenna, Italy, pp. 1537-1546.
- Pirazzoli P.A. (1998) - *A comparison between postglacial isostatic prediction and late Holocene sea-level field data from Mediterranean and Iranian coastal areas*. GeoResearch Forum, 3 e 4: 401-420.
- Psuty N.P. (1992) - *Spatial variation in Coastal foredune development*. In Carter R.W.G. et al.: *Coastal dunes: geomorphology, ecology and management for conservation*. Balkema, Rotterdam, pp. 3-13.
- Schinaia S. (2000) - *Dinamica morfologica e analisi dei sedimenti della spiaggia compresa tra Torre San Leonardo e Torre Canne (Brindisi)*. Tesi di laurea inedita, Dip. di Geologia e Geofisica, Università degli Studi di Bari.
- Sherman D.J., Jackson D.W.T., Namikas S.L., Jinkang W. (1998) - *Wind-blown sand on beaches: an evaluation of models*. Geomorphology, 22: 113-133.

## Le dune costiere dell'Emilia-Romagna

Umberto Simeoni<sup>1</sup>, Edi Valpreda<sup>2</sup>, Cecilia Schiavi<sup>1</sup>, Corinne Corbau<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara, via G. Saragat, 1 - 44100 Ferrara. E-mail: g23@unife.it

<sup>2</sup> ENEA - Ente Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Via Martiri di Monte Sole, 2 - 40128 Bologna. E-mail: valpreda@bologna.enea.it

### Riassunto

Nell'ambito di un progetto a scala nazionale è stato condotto uno studio sullo stato delle dune costiere analizzando diversi parametri morfo-evolutivi ed ambientali del sistema spiaggia-duna. In questo lavoro sono presentati alcuni risultati delle ricerche svolte nell'ambito della Regione Emilia-Romagna.

Nell'ottocento quasi tutto il litorale regionale era bordato da una serie di cordoni dunari, che presentavano un andamento prevalentemente rettilineo o debolmente arcuato in ampie falcature, appoggiate alle foci fluviali ed ai moli portuali. Oggi, per lo smantellamento perpetrato dall'uomo e per l'acuta crisi regressiva della costa, su circa 130 km di litorale solo 37 km sono bordati da rilievi dunari di cui circa 12 km afferiscono alla provincia di Ferrara, 23 km a quella di Ravenna ed i rimanenti 2 km sono distribuiti nel tratto costiero più meridionale.

Nell'ambito dello studio sono stati individuati 43 tratti costieri in cui ancora sopravvivono dei cordoni dunari. Il 25 % di questi si trovano in corrispondenza di litorali stabili, il 29 % di spiagge in avanzamento ed il 46 % di litorali in arretramento. Molti cordoni dunari presentano uno stato di conservazione assai preoccupante e numerosi scalzamenti alla base e varchi d'esondazione.

Oggi l'"antico paesaggio" si conserva ormai solo in lembi, nella Riserva Naturale della foce Bevano e nell'area naturale delle Vene ed Ancone di Bellocchio, ove ancora si trovano tratti di alcuni chilometri con dune costiere ben sviluppate e vegetate.

I dati raccolti nell'ambito del progetto, oltre a fornire elementi qualitativi e quantitativi dell'estensione e dello stato di conservazione dei cordoni dunari, potranno contribuire, attraverso opportune analisi spaziali, alla definizione del rischio delle spiagge nazionali.

**Parole chiave:** dune costiere, ambiente costiero, GIS, metainformazione, Adriatico settentrionale, Italia.

### Abstract

*A study on coastal dune status was developed within the framework of a national programme, analysing several morpho-evolutionary and environmental parameters of the beach-dune system. In this paper, some results of the research carried out in the Emilia-Romagna region are presented.*

*In the 19th century, almost all the littoral of Region Emilia-Romagna was bordered by a series of coastal dunes with a pattern that was predominantly rectilinear or weakly arcuate in wide crescent at the fluvial mouths and harbour jetties. Presently, due to repeated human interventions and the actual expressive "crisis" of coastal regression, only 37 km of the 130 km long of littoral are bordered by coastal dunes, from which 12 km belong to the Ferrara province, 23 km to the Ravenna one and the 2 remaining kilometers are distributed.*

*This study allowed to identify 43 coastal stretches with coastal dunes: 25% are located on stable littoral, 29% are on beaches in accretion and 46% on beaches in erosion. Most of the coastal dunes present a worrying conservation status, numerous toe scarps and washover.*

*A landscape, almost integral, of some kilometers of active and well-vegetated dunes are preserved in the Public Natural Reserve of the Bevano River mouth and in the natural area of Vene and Ancone di Bellocchio.*

*The data collected during this project, in addition to providing qualitative and quantitative information con-*

*cerning the extension and the conservation status of the coastal dunes, will be helpful for the risk assessment of the national beaches through due spatial analysis.*

*Keywords: coastal dunes, coastal environment, GIS, metadata, northern Adriatic, Italy.*

## Introduzione

Oltre ad una rilevante importanza ecologico-ambientale, il sistema dunare costituisce un elemento essenziale per l'equilibrio dinamico della spiaggia per la quale rappresenta un'insostituibile riserva di sabbia. Nel "sistema costa" le dune si sviluppano, oltre che in funzione della disponibilità di sabbie con caratteristiche tessiturali adatte, in base all'orientazione della spiaggia rispetto ai venti dominanti ed alla loro velocità. Lungo la costa non si possono sviluppare consistenti campi di avandune se, di fronte ad esse, non vi è una spiaggia sufficientemente ampia da costituire un'adeguata area d'alimentazione.

Le dune costiere rappresentano un ambiente dove anche modeste modificazioni, naturali e/o antropiche, possono alterare e, a volte, distruggere l'intero corpo dunare. Se le dune retrostanti, spesso fissate dalla vegetazione, si possono considerare stabili sul medio-lungo periodo, lo sviluppo delle avandune è funzione dell'estensione della spiaggia antistante. Ad ogni cambiamento di quest'ultima corrisponde una variazione morfologica nei depositi eolici.

Queste prime dune sono dunque vive e mobili e, pur essendo strettamente collegate alle variazioni delle geometrie dell'arenile, possono presentare tendenze evolutive contraddittorie con quest'ultimo (Psuty, 1992): bilancio positivo della spiaggia e negativo delle avandune o viceversa.

Una parziale distruzione del primo cordone si ripercuote a catena anche su quelli retrostanti. Si hanno, infatti, vistosi fenomeni di deperimento della vegetazione interna quando essa è direttamente investita dal vento di mare carico di sabbia, salsedine e di sostanze inquinanti.

Nel nostro Paese questi allineamenti dunari sono stati in larga parte distrutti. Lungo le coste adriatiche nell'ultimo secolo vi è stata una progressiva riduzione della loro presenza (Simeoni e Bondesan, 1997) per una dissennata urbanizzazione degli spazi costieri, per un intenso sviluppo dell'agricoltura e per la pesante crisi erosiva che ha interessato la costa ed ha ridotto l'estensione delle aree di deflazione.

Oggi estesi tratti di litorale sono fortemente condizionati dalla presenza di numerose opere di difesa che, a seconda della tipologia, possono più o meno interferire nell'interscambio di materiale tra la spiaggia e la duna.

Sui litorali adriatici restano ben poche aree ove i cordoni dunari non siano stati pesantemente intaccati. Alla fine degli anni '90 ciò fu posto in evidenza dall'Atlante delle spiagge italiane (AA.VV., 1997) dove emergeva come le dune fossero presenti solo sul 9.8 % (123 km) della costa adriatica, di cui più del 50 % nella sola Puglia. La situazione era assai più grave considerando che il 20.3 % dei cordoni dunari aveva subito delle modificazioni antropiche ed il 57.7 % era interessato da fenomeni erosivi della spiaggia.

La scomparsa di vaste aree di dune costiere ha di fatto privato la costa ed il territorio retrostante di una valida difesa naturale, in particolare modo lungo quelle spiagge interessate da intensi abbassamenti subsidenziali. A tal proposito significative indicazioni possono essere tratte da studi condotti sul litorale emiliano-romagnolo, estrapolando le quote dalla Carta Tecnica Regionale e dei successivi rilievi altimetrici condotti dalla Regione e proiettandole all'anno 2050 (Simeoni et al., 2003). Il territorio costiero, che già oggi si trova in buona parte a quote inferiori del livello medio mare, continuerà progressivamente ad abbassarsi determinando, così, conseguenze particolarmente nefaste. Infatti, è ipotizzabile un incremento, per eventi di tempesta ed acqua alta, d'allagamenti delle aree di retrospiaggia non più protette da cordoni dunari.

Quanto sopra evidenzia l'esigenza di un censimento e di un'approfondita conoscenza dello stato delle dune costiere a scala nazionale. Tale bisogno è stato recepito da un Progetto di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN 2002 - I depositi eolici delle coste italiane ed il flusso di sedimenti spiaggia-duna) a cui hanno partecipato 11 unità di ricerca, distribuite in tutto il territorio italiano. Ciò ha consentito di raccogliere, in un comune geodatabase, tutti quegli elementi ritenuti fondamentali per un'analisi delle criticità e dello sviluppo delle dune costiere. Il presente lavoro espone parte degli studi condotti lungo i litorali dell'Alto Adriatico (Friuli, Veneto ed Emilia-Romagna) dall'unità operativa dell'Università di Ferrara, a cui afferivano ricercatori dell'ENEA di Bologna e dell'Università di Trieste.

### Inquadramento geografico

La costa emiliano-romagnola (Fig. 1a) è caratterizzata da spiagge sabbiose interrotte da sviluppate aree lagunari, aggettanti moli portuali e dalla presenza di numerose opere di difesa che hanno reso estremamente articolato il sistema spiaggia. La frammentazione indotta dall'uomo (Figg. 1b, 1c) ha determinato l'insorgere di dinamiche idro-sedimentarie che, talora, sono molto diverse anche tra tratti litorali contigui.

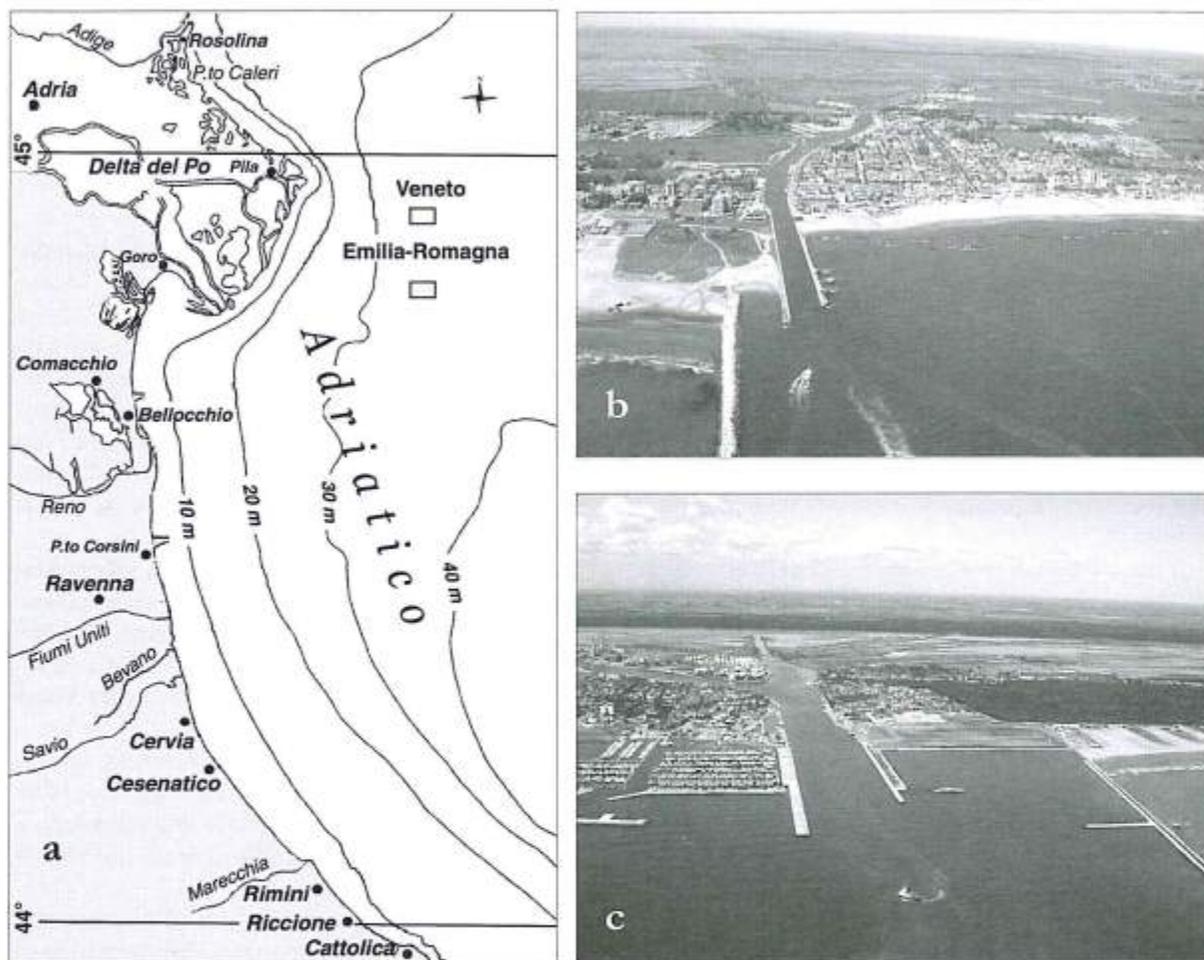


Figura 1 - Ubicazione dell'area di studio (a) ed esempi della frammentazione della costa determinata dalla costruzione dei moli portuali di Porto Garibaldi (b) e di Porto Corsini (c).

La costa emiliano-romagnola si estende per circa 130 km tra l'apparato deltizio del Po (foce del Po di Goro) sino a Cattolica. In generale, secondo la classificazione proposta da Wright et al. (1979), la costa (fondali con debole pendenza ed un'ampia zona di frangimento) può essere considerata di tipo dissipativo.

Su di essa dominano (Idroser, 1981) i venti compresi tra NNE ed E (Bora), tra ESE e SSE (Scirocco) e quelli di NW (Maestrale), anche se durante la stagione estiva raggiungono intensità non trascurabile i venti termici, con massimi in prossimità di Cervia per la presenza delle saline.

Data l'estensione, la diversa orientazione e morfologia della costa vi è una notevole variabilità del regime anemologico. A tal riguardo risulta interessante confrontare le velocità medie del vento registrate dall'Arpa regionale da Dicembre 2002 a Dicembre 2003 (Arpa, 2004) in tre stazioni (Fig. 2) poste in prossimità del mare ed ubicate la prima nel settore settentrionale del litorale (Lido di Volano - FE), la seconda in quello centrale (Punta Marina - RA) e l'ultima in quello meridionale (Rimini).

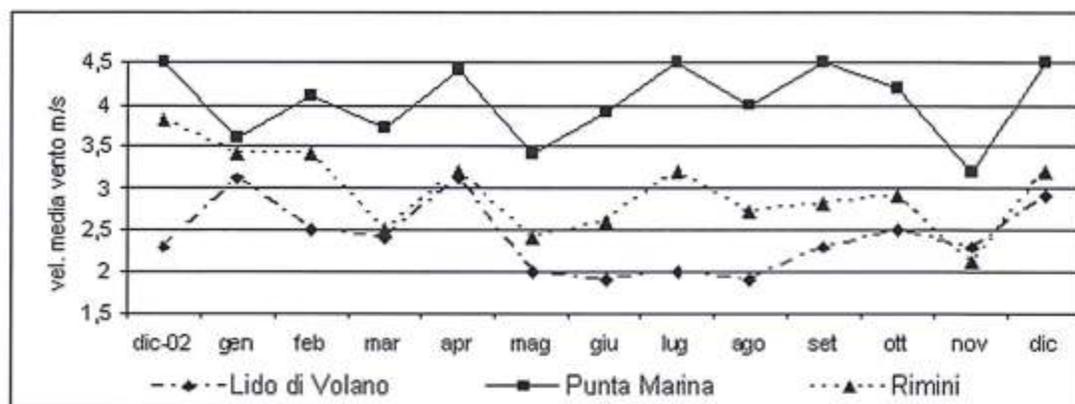


Figura 2 - Velocità media mensile del vento rilevata dal servizio meteorologico regionale dell'Emilia-Romagna dal Dicembre 2002 al Dicembre 2003 a Lido di Volano, Punta Marina e Rimini.

Anche se il periodo considerato risulta limitato per essere significativo, è evidente che nel 2003 le velocità dei venti sono state molto più intense nell'area ravennate (media annuale 4.0 m/s) seguite da quella riminese (2.9 m/s) e ferrarese (2.4 m/s). Per quanto concerne le velocità medie stagionali risulta che le maggiori velocità sono state misurate in inverno a Lido di Volano e Rimini (2.6 e 3.5 m/s), ed in inverno ed estate a Punta Marina (4.1 m/s). Dall'analisi dei dati risulta inoltre che la media stagionale più bassa delle velocità si è avuta in primavera nel ravennate (3.8 m/s), estate nel ferrarese (1.9 m/s) ed autunno nel riminese (2.6 m/s).

Il clima medio del mare (Idroser, 1981), che investe la costa emiliano-romagnola, è definito da una predominanza delle onde provenienti WNW ed in minor misura da ESE, tuttavia i valori massimi d'altezza d'onda sono riferibili al settore ENE ed E. Le tempeste più frequenti provengono dai settori compresi tra i 60° ed i 120° N, mentre le più violente interessano i settori di Bora. Nel tratto più settentrionale della costa, presso la Sacca di Goro, il mare proveniente dal primo quadrante è fortemente ridotto per la protezione offerta dalla prominente del delta del Po e la maggioranza degli eventi provengono da ESE.

La necessità di contrastare i fenomeni erosivi della costa, innescatisi nella prima metà del XX secolo, ha reso necessaria la costruzione di numerose opere di difesa, che hanno irrigidito il sistema litorale e snaturato fortemente la sua dinamica evolutiva. Gli interventi, sebbene abbiano in parte controllato e/o rallentato il fenomeno erosivo, non hanno né risolto il problema né contribuito in modo significativo ad invertire il trend negativo che ancor oggi domina tutta la costa regionale.

Con la diminuzione della superficie di spiaggia si riduce anche l'area di deflazione e ciò va ad incidere nell'alimentazione delle dune. Questa sottrazione di sedimento è ulteriormente accentuata dalla presenza di opere difensive aderenti (circa 8 km di sviluppo), dalle strutture balneari che intercettano le sabbie trasportate dal vento, dal continuo rimodellamento antropico della spiaggia per favorire la balneazione e per proteggere, con argini sabbiosi, le infrastrutture dalle più intense mareggiate invernali (Fig. 3).

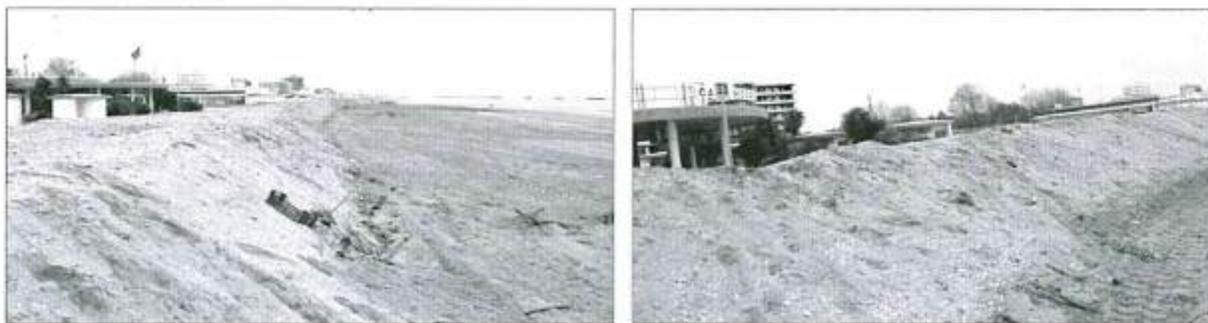


Figura 3 - Argini, alti circa 1.5 m e larghi 12 m, costruiti nell'inverno 2004, a difesa degli stabilimenti balneari del litorale del Lido delle Nazioni (FE), prelevando sabbia dalla spiaggia antistante.

### Evoluzione storica delle dune costiere

Nell'ottocento quasi tutto il litorale emiliano-romagnolo era bordato da una serie di cordoni dunari, con andamento prevalentemente rettilineo o debolmente arcuato in ampie falcature appoggiate sia alle foci fluviali del Reno, Fiumi Uniti e Savio sia ai moli portuali di Porto Corsini e Rimini (Cencini, 1980). Questi cordoni, lunghi anche qualche chilometro, si estendevano in ampiezza dai 100 m nel riminese ad oltre 700-800 m nel ravennate. Lo sviluppo del sistema dunare è ben documentato dalle carte storiche del XIX secolo. Le immagini della Figura 4 mostrano come i cordoni dunari, che bordavano la foce fluviale del Primaro allora ancora ben pronunciata, erano ben sviluppati, estesi ed allineati lungo fasce sub parallele.

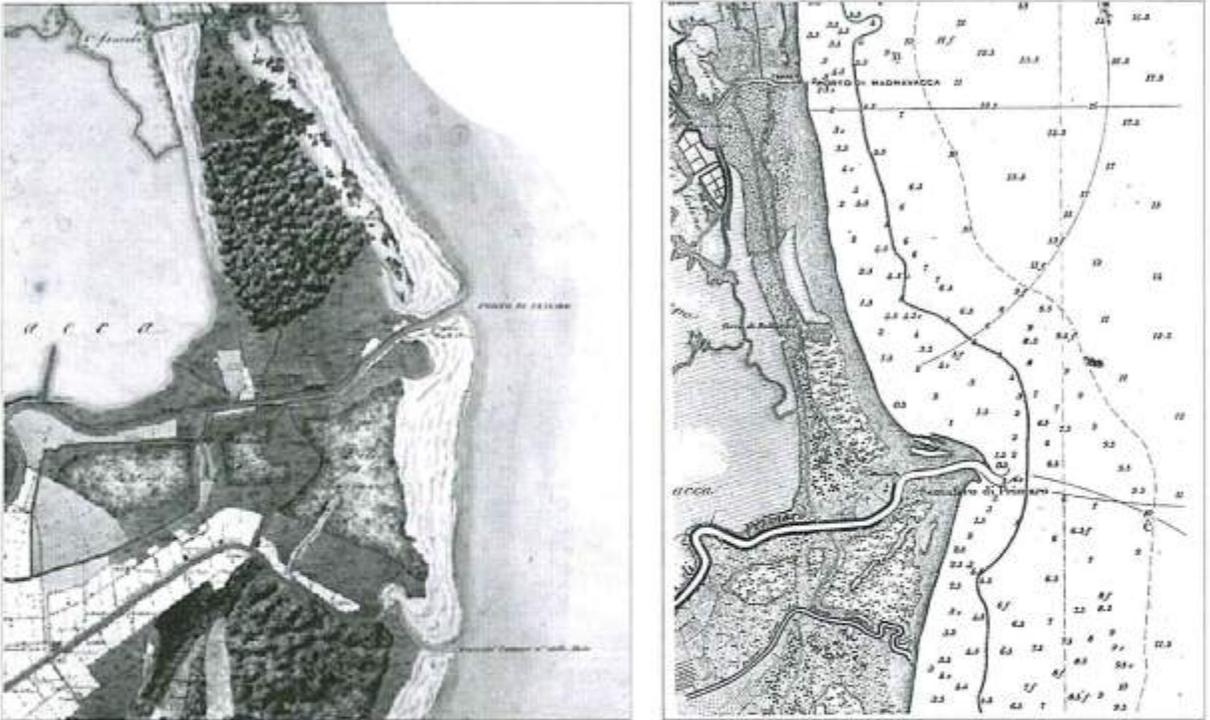


Figura 4 - Stralci della carta napoleonica del 1814 (a sinistra) e della "Carta costiera dal Faro di Goro a Fiumi Uniti", edita dall'Ufficio Idrografico della Marina nel 1869, che evidenziano il notevole sviluppo dei cordoni dunari lungo le coste ferraresi.

Altre indicazioni sullo sviluppo delle aree dunari provengono da ricerche storiche (Borghesi, 1938) che riportano come, alla fine del XIX secolo, sul litorale di Misano vi fossero dune alte 3-5 m, ampie 10-15 m e lunghe 20-30 m.

Proprio sul finire di questo secolo e l'inizio del successivo furono effettuati i primi interventi che apportarono grandi modificazioni alla loro evoluzione naturale. In Emilia-Romagna, come in molti altri tratti del litorale italiano, per salvaguardare il valore agricolo del territorio costiero furono forestate estese aree dunari. Nel 1935 la piantumazione era giunta quasi al termine e rimanevano scoperti solo piccoli tratti della costa in corrispondenza d'aree edificate (Porto Corsini, Casal Borsetti, ecc.) e del litorale compreso tra Lido Adriano e la foce del Bevano. Questi interventi se da un lato stabilizzarono le paleodune, alterandone le sezioni naturali e degradando le comunità vegetali retrodunari, hanno concorso alla loro conservazione anche perchè i rilievi dunari non forestati furono, in pochi decenni, spianati per apprestare nuove colture od edificati.

Nel litorale emiliano-romagnolo la maggior contrazione dei cordoni dunari costieri fu però determinata dalla crescita dell'edificato turistico-balneare, sviluppatosi con tempi e modi differenti lungo i litorali provinciali. Negli anni '30, ad esempio, lo sviluppo urbano distrusse i cordoni dunari forlivesi e, negli anni cinquanta, determinò la scomparsa delle sporadiche dune costiere rimaste tra Cattolica e Cesenatico (Fig. 5). Nei litorali di Ravenna e Ferrara, invece, lo sviluppo più discontinuo di nuovi lidi e marine, iniziato negli anni '50, consentì una maggiore conservazione di questi depositi eolici (Fig. 6).



Figura 5 - Scorcio dell'attuale sviluppo urbano del litorale di Cesenatico.

Ciò pone in evidenza come l'uso intensivo degli arenili a scopo turistico-balneare sia stato la causa principale della scomparsa di queste morfologie eoliche, anche se i prelievi di sabbia a scopo edilizio e l'espansione delle colture hanno determinato alcune riduzioni localizzate.

Tra il 1955 ed il 1980 sul litorale emiliano-romagnolo, con l'esclusione del tratto afferente alla Sacca di Goro, vi è stato quasi un dimezzamento delle superfici dunari (Idroser, 1981) che sono passate da 940 ettari, considerando anche quelle stabilizzate della pineta, a 420 ha. In particolare, negli anni '50 le aree dunari si estendevano per circa 35 ettari sulla costa forlivese, 560 ha su quella ravennate e 345 ha sul litorale ferrarese. Dopo poco più di due decenni nel forlivese queste aree dunari furono quasi completamente distrutte, mentre nel ravennate si ridussero a 260 ha ed a 160 ha nel ferrarese.

Ancora più evidente risulta questa distruzione ricordando come dei 60 km di spiaggia bordati da apparati dunari presenti nel 1955 ne rimanevano solo 21 km nel 1980. Nello stesso studio (Idroser, 1981) s'ipotizza che questa riduzione abbia comportato una perdita approssimata di circa 9.5 milioni di m<sup>3</sup> di sabbia, corrispondenti all'incirca al volume di un argine largo 40 m ed alto 2 m e lungo 110 km.



Figura 6 - In alto immagini delle dune di Lido di Dante ben conservate (a sinistra) ed incise dall'erosione marina (a destra); in basso la loro difficile convivenza con l'urbanizzazione di Lido degli Scacchi.

Assai esemplificativa è l'evoluzione del sistema delle dune litorali del Comune di Ravenna (Fabbri, 2001) che nel 1982 si estendeva per circa 38.2 km e, nel 2001, si era ridotto a soli 11.2 km, di cui 9.2 km in buono stato di conservazione e 2 km in situazione precaria. Dallo studio è inoltre emerso che 12.3 km scomparvero a seguito della regressione della costa (ad esempio per l'erosione degli apparati di foce del Reno, Lamone e Fiumi Uniti), 9.5 km a causa dell'edificazione (Casal Borsetti, Lido Adriano, Lidi di Dante, Classe e di Savio) e circa 7 km erano fittamente intaccati e frammentati dagli stabilimenti balneari.

Oggi le dune rimaste sono ben poca cosa rispetto agli apparati dunari del secolo scorso, distrutti da attacchi che, con tempi ed intensità differenti, sono giunti da mare (erosione della costa), da terra (estensione delle aree agricole, spianamento delle dune) ma soprattutto dall'uomo (sviluppo urbanistico, uso della spiaggia a scopo balneare).

#### Analisi dello stato di conservazione delle dune costiere attraverso l'uso della banca dati

La scala nazionale del progetto PRIN 2002, nell'ambito del quale è stata svolta questa ricerca, ha reso necessaria la creazione di una banca dati geografica rispondente alle direttive emerse a livello europeo e contenente dati geografici omogenei, aggiornati e con dettaglio adeguato alla programmazione integrata dell'area costiera. A tal fine è stata progettata una base di dati geografico-vettoriali in grado di raccogliere le parametrizzazioni necessarie alla descrizione dello stato morfo-ambientale delle dune costiere (Simeoni et al., 2005; Valpreda, 2005). In accordo con il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio è stato possibile utilizzare, come riferimento unico per l'intero progetto, i contenuti cartografici del Portale Cartografico Nazionale attraverso connessione remota.

La banca dati si compone di tre ambiti interconnessi: la componente geometrica, la componente alfanumerica informativa e la metainformazione. Le tipologie delle informazioni raccolte consentono di descrivere le caratteristiche principali delle dune, della spiaggia antistante e d'alcuni parametri fisici che concorrono alla loro evoluzione (il vento, la tendenza evolutiva della linea di riva, ecc.). La struttura dei dati e delle informazioni codificate sono state suddivise in ambiti principali, riassunti schematicamente nella Tabella 1.

La banca dati presenta un'enorme potenzialità per rappresentazioni semplici dei temi inseriti, consente operazioni d'interrogazione complesse e rende possibile lo sviluppo d'analisi integrate tra i diversi contenuti informativi. Utilizzando queste possibilità di seguito sarà sviluppata un'analisi dell'attuale sviluppo e stato ambientale del sistema dunare del litorale emiliano romagnolo.

I risultati dei reiterati attacchi portati dall'uomo all'integrità dell'apparato dunare sono particolarmente evidenti nel litorale emiliano-romagnolo dove, su circa 130 km di costa, solo 37 km sono oggi bordati da rilievi dunari; di questi circa 12 km afferiscono alla provincia di Ferrara, 23 km a quella di Ravenna e i rimanenti 2 km sono distribuiti nel tratto costiero più meridionale.

Limitati cordoni dunari, generalmente mal conservati e frammentati da edifici e strutture turistico-balneari, sono rimasti al Lido degli Scacchi, a nord del Lamone, tra Marina di Ravenna e Punta Marina, tra i lidi di Dante e di Classe (Fig. 7a), a nord della foce del Reno. Singole dune sono invece presenti al Lido di Volano (Fig. 7b), a sud del Lido di Spina, tra Lido Adriano (Fig. 7c) e la foce Fiumi Uniti.



Figura 7 - Frammentazione e smantellamento dei cordoni dunari operati per l'inserimento di strutture turistico-balneari lungo le spiagge del Lido di Classe (a) e del Lido di Volano (b); isolato lembo del cordone dunare che bordava il litorale del Lido Adriano (c).

Complessivamente le aree dunari analizzate si estendono su una superficie di 19 km<sup>2</sup>, ma solo il 3 % di questa è occupata da dune attive, quelle più prossime a riva ed alimentate dai sedimenti della spiaggia antistante; sul rimanente territorio si sviluppano dune inattive, ubicate in posizioni retrostanti alle precedenti, spesso piantumate o fissate dalla vegetazione spontanea.

Tratti di dune attive presentano uno stato di conservazione assai preoccupante per la presenza d'evidenti scalzamenti alla base e varchi d'erosione. Ciò è particolarmente evidente lungo alcuni tratti della costa ferrarese, come in prossimità dei lidi di Volano e di Spina e del Canale Bellocchio (Fig. 8), dove vi è una limitata estensione degli arenili (inferiori a 20 m) e le dimensioni delle dune sono particolarmente ridotte (2.9 m di quota media).

Nell'ambito dello studio sono stati individuati 43 tratti costieri in cui ancora sopravvivono cordoni dunari; di questi il 25 % si trovano in corrispondenza di litorali stabili, il 29 % in avanzamento ed il 46 % in arretramento. Considerando le sole dune attive, risulta che il 25 % sono prospicienti ad arenili con un'ampiezza minore di 20 m e, dunque, costantemente sottoposte all'azione demolitrice delle onde; il 35 % di queste dune è, invece, protetto da una spiaggia ampia 20-60 m e solo durante gli eventi di tempesta sono raggiunte dalle onde. Il rimanente 40 % è ubicato in litorali con spiagge ampie più di 60 m, solo sporadicamente e durante le mareggiate più intense sono intaccate dal moto ondoso. La situazione risulta maggiormente critica se si considera la tendenza evolutiva della spiaggia perché, dei 43 tratti, il 46 % è interessato da evidenti fenomeni erosivi.



Figura 8 - Varchi d'erosione sulle dune costiere dell'Ancona di Bellocchio (FE).

Lo stato di conservazione delle dune è fortemente correlato anche con lo sviluppo delle aree urbane. L'interrogazione della banca dati consente di evidenziare come le aree dunari presentino per il 91% uno sviluppo naturale, mentre il 4 % è in parte condizionato dalla pressione antropica. Le aree del rimanente 5 % sono ormai inserite in un tessuto d'urbanizzato sparso (3 %) o in vere e proprie aree urbane (2 %). È inoltre interessante evidenziare come l'alimentazione di circa l'11 % dei cordoni dunari rilevati sia limitata dalla presenza d'opere di difesa aderenti.

È altresì evidente che la frammentazione dei cordoni dunari rimasti è anche dovuta alla presenza di numerosi varchi antropici operati per facilitare l'accesso al mare ai bagnanti. Tali incisioni (Fig. 9) rappresentano, specialmente quando sono di grandi dimensioni, un punto di fragilità del sistema e d'attacco alla stabilità delle eventuali retrodune. Lungo tali solchi, infatti, sono trasferite grandi quantità di sabbia nell'entroterra, si accentua l'erosione eolica e sono destabilizzati i profili morfologici delle dune dal calpestio e dalla frequentazione dei bagnanti. A ciò va aggiunto che in territori costieri altimetricamente depressi, come quelli emiliano-romagnoli, questi varchi rappresentano vie preferenziali per l'ingressione del mare durante le mareggiate o gli eventi d'acqua alta.

Il rilevamento della copertura vegetale delle dune, anche se condotto con metodi speditivi, ha consentito una mappatura della vegetazione che è stata suddivisa in sei categorie (Tab.1). L'intensa frequentazione a cui sono sottoposte le spiagge con spiccata valenza turistica non favorisce la colonizzazione della vegetazione o, dove presente, la sua conservazione. Con l'assenza della copertura vegetale vengono meno le azioni d'intrappolamento e di stabilizzazione che essa esercita nei confronti dei depositi di sabbie eoliche. Ciò determina una minore alimentazione di queste morfologie dei sedimenti provenienti dalla spiaggia e favorisce l'azione erosiva del vento. In ambito regionale il 3 % delle dune attive è privo di una significativa copertura vegetale, il 58 % ha una copertura erbacea, il 12 % è coperto da arbusti, il 2 % ha vegetazione arbustiva rada ed infine il 25 % è ricoperto da alberi.

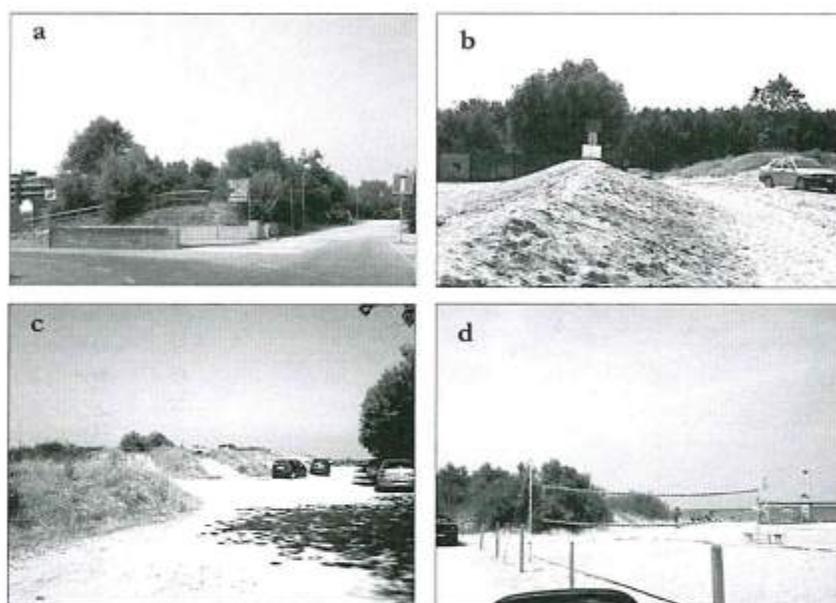


Figura 9 - Esempi di varchi antropici operati lungo i litorali emiliano-romagnoli per facilitare l'accesso al mare ai veicoli a Lido Adriano (a) ed al Lido degli Scacchi (b,c) o per ricavare aree dedicate ad attività ludiche al Lido Adriano (d).

Quest'ultima categoria, se confrontata con l'ampiezza della spiaggia, può essere un elemento indicativo dell'evoluzione della costa. Infatti, la presenza di vegetazione retrodunare in una posizione così avanzata denota una pesante crisi erosiva della costa che ha raggiunto e riattivato retrodune stabilizzate, come nel caso del tratto di litorale di Bellocchio e dello Scanno di Goro.

Le potenzialità della banca dati possono essere maggiormente apprezzate analizzando in dettaglio i 6.6 km del litorale della riserva naturale di Bellocchio (Fig. 10a), che si sviluppa a settentrione della foce del Reno. Qui le dune, ridottesi notevolmente nell'ultimo decennio, si estendono per circa 4.6 km di costa, presentano una quota compresa tra 1-7 m ed una larghezza dei cordoni che varia tra 100 e 650 m circa.

Tabella 1 - Sintesi della parametrizzazione utilizzata per la Banca dati dune del progetto PRIN 2002.

<b>DUNA</b>	GRADO D'ATTIVITÀ (2 classi): attive, inattive COPERTURA VEGETALE (6 classi): assente, erbaceo, arbustivo, arboreo, arboreo rado, arbustivo rado ALTEZZA DIREZIONE CRESTA VARCHI (3 classi): sentieri, strade con sbocco al mare, sentieri e strade lungo cresta ANTROPIZZAZIONE (3 classi): urbanizzato, case sparse, antropizzato
<b>SPIAGGIA</b>	AMPIEZZA (3 classi): 0-20/20-60/>60 m TENDENZA EVOLUTIVA (3 classi): avanzamento, arretramento, stabile OPERE DI DIFESA (3 classi): ripascimenti, opere radenti, ripascimenti ed opere radenti USO (2 classi): balneazione temporanea, balneazione permanente
<b>VENTO</b>	UBICAZIONE E CARATTERISTICHE STAZIONI ANEMOLOGICHE

E' possibile, ancor oggi, ammirare un paesaggio pressoché integro d'alcuni chilometri di dune vive e ben vegetate, poste a ridosso di un'estesa pineta, nel litorale compreso tra Ravenna e Cervia. La loro conservazione è, in parte, garantita dall'appartenenza alla Riserva Naturale Statale della foce Bevano.

Nella Figura 10b è riportata, come esempio, una mappa con numerosi tematismi dell'area di foce Bevano dove si evidenzia come le dune attive, di dimensioni contenute (larghezze tra 10 e 90 m e quote della cresta comprese tra 1.2 e 4.8 m), si estendono su circa 21 ettari, di cui 1 ha è occupato da dune attive distribuito su un tratto costiero di circa 6.2 km. Circa il 26 % di esse presenta un'elevata possibilità di essere, in breve tempo, smantellate dal mare perché protette da spiagge con ampiezze molto ridotte (<20 m).

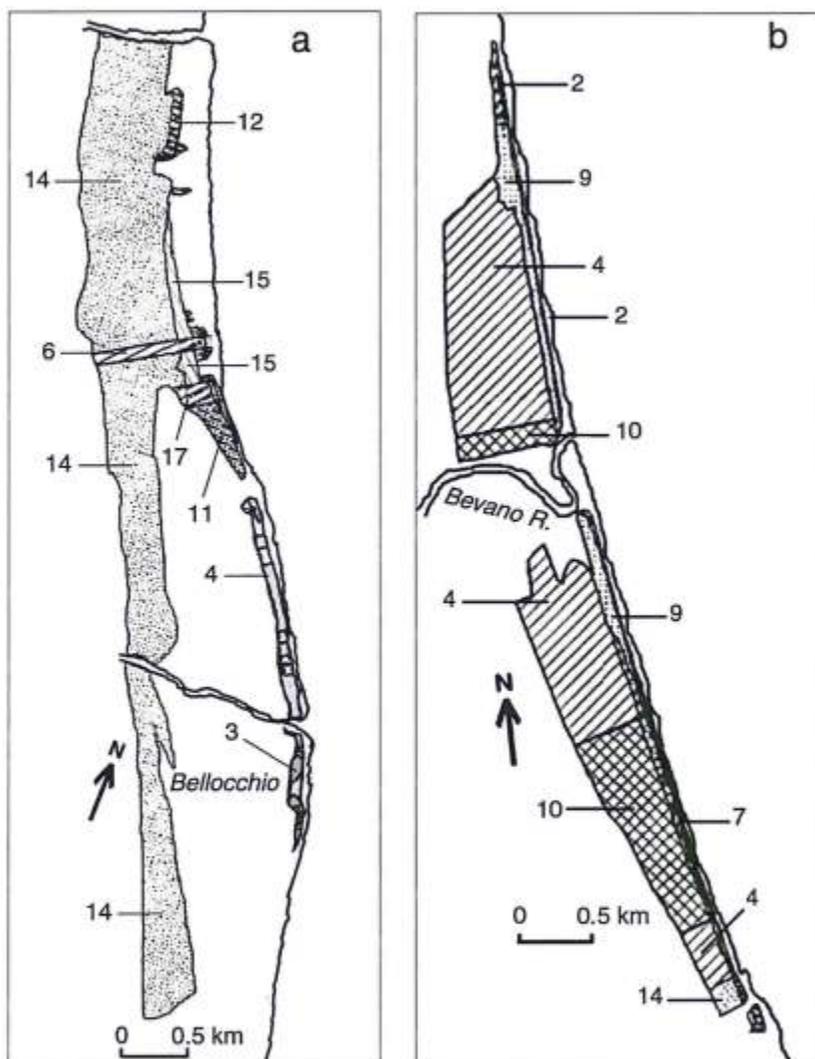


Figura 10 - Rappresentazioni d'analisi spaziali complesse delle aree dunari di Bellocchio (a) e di foce Bevano (b). I simboli utilizzati si riferiscono alle seguenti codifiche: dune attiva (A) ed inattiva (I); copertura vegetale con alberi (al), arbusti (ar), erbaceo (er) oppure assente (as); ampiezza spiaggia < 20 m (S1), tra 20-60 m (S2), >60m (S3). I numeri nelle figure rappresentano le seguenti situazioni:

- 2= A(er)/S2;
- 3= A(ar)/S1;
- 4= A(er)/S1;
- 6= I(al)/S3;
- 9= I(er)/S2;
- 10= I(al)/S1;
- 12= I(as)/S1;
- 13= I(er)/S1;
- 14= I(al)/S3;
- 15= I(ar)/S3;
- 16= I(as)/S3;
- 17= I(er)/S3.

### Considerazioni conclusive

Nel nostro Paese l'assenza di una percezione del valore ecologico, paesaggistico e difensivo delle dune costiere ha favorito la loro distruzione soprattutto, come nel caso dell'Emilia-Romagna, per fini turistico-balneari. In questa Regione poco più del 28 % dei sui 130 km di costa, è oggi bordato da cordoni dunari non particolarmente rilevati (altezza media di 2.5 m) che si sviluppano, considerando anche quelli stabilizzati dalla pineta, su una superficie di circa 19 km<sup>2</sup>. Di quest'area solo 0.6 km<sup>2</sup> (3 %) è occupata da dune attive la cui evoluzione è stata ed è in buona parte (circa 59 %) compromessa dalle attività antropiche sviluppatesi lungo la costa. Se a ciò si aggiunge che il 60 % delle dune attive si sviluppano su litorali interessati da fenomeni erosivi, risulta evidente come la conservazione di queste morfologie sia fortemente a rischio.

La situazione altimetrica del territorio costiero emiliano-romagnolo, interessato da intensi abbassamenti subsidenza, pone ancor più in rilievo la necessità di proteggere e conservare i cordoni dunari rimasti. Essi, infatti, rappresentano uno degli elementi naturali più importanti per la difesa dei territori retrostanti la spiaggia dalla sommersione per eventi di tempesta ed acqua alta.

Già nel "Piano di Azione" del 2001 la Regione Emilia-Romagna individuava tra i problemi ambientali quello relativo alla stabilità della costa quale ambito caratterizzato da elevata fragilità e forti problematiche per la presenza d'intensi fenomeni erosivi e per il rischio di ingressione marina. Fissava, inoltre, criteri e linee d'indirizzo per un approccio integrato alla gestione delle zone costiere, individuando diverse linee d'intervento tra cui quello mantenere e ripristinare la continuità delle dune costiere. Con la predisposizione nel 2003 del progetto di "Piano di Gestione Integrata delle Zone Costiere" e l'approvazione nel 2005 delle "Linee guida per la Gestione Integrata delle Zone Costiere (GIZC)" tale concetto è stato ribadito e rinforzato. Ciò, unitamente alla maggiore e più diffusa conoscenza della popolazione sull'importanza della duna nel naturale equilibrio della costa, fa ben sperare per la conservazione dei pochi cordoni rimasti, sempre che non prevalga l'azione demolitrice del mare.

La gestione futura della costa, anche in termini d'erosione, dovrà tenere nella giusta considerazione che la conservazione delle aree dunari non è conflittuale con l'uso e lo sfruttamento economico del territorio costiero. La loro presenza non rappresenta, infatti, una sottrazione d'aree potenzialmente utilizzabili per l'industria turistico-balneare, ma un valore aggiunto per queste attività. Come tale deve essere salvaguardato e, dove possibile, ripristinato utilizzando metodologie e tecniche che favoriscano l'attivazione del naturale rapporto spiaggia-duna.

E' indubbio che la creazione di una banca dati nazionale delle dune (progetto PRIN 2002), oltre a fornire elementi qualitativi e quantitativi della loro estensione e stato di conservazione, potrà dare avvio ad iniziative di studio e monitoraggio rivolte ad una maggiore comprensione della loro evoluzione futura. Inoltre, i dati raccolti e le molte complesse analisi spaziali con essa eseguibili presentano una gran potenzialità per una migliore definizione del rischio costiero per le spiagge nazionali.

### Ringraziamenti

Si ringraziano il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio ed il Prof. G. Fierro, coordinatore nazionale del progetto PRIN 2002, per il supporto fornito. Un particolare ringraziamento è rivolto alla Dott.ssa A. Minardi per il contributo dato all'informatizzazione ed elaborazione dei dati, ed ai Dott. A. Zamariolo e N. Bonora per la partecipazione ai rilievi di campagna.

A tutti i ricercatori delle Unità Operative del progetto PRIN 2002 un sentito grazie per le proficue discussioni. Parte dello studio è stato condotto nell'ambito del progetto Beachmed-e (misura 3-4 POSIDONE).

### Bibliografia

- AA.VV. (1997) - *Atlante delle spiagge italiane*. MURST e CNR, Selca, Firenze.
- Arpa (2004) - *Riepilogo meteorologico 2003*. ArpaRivista, Supplemento al n° 5, Anno VII, Settembre-Ottobre 2004, Bologna. 32 pp.
- Borghi G. (1938) - *Le spiagge romagnole da Cervia a Punta Gabicce*. In: *Le spiagge Padane*, a cura di Vicentini M., C.N.R., Roma. 73 pp.
- Cencini C. (1980) - *L'evoluzione delle dune del litorale romagnolo nell'ultimo secolo*. Rassegna Economica, Camera di Commercio, Forlì: pp. 6-7.
- Fabbi P. (2001) - *Studio sul sistema costiero del Comune di Ravenna*. Comune di Ravenna, Rapporto interno. 146 pp.
- Idroser (1981) - *Piano progettuale per la difesa della costa emiliano-romagnola. Relazione Generale*. Regione Emilia-Romagna, Bologna. 388 pp.
- Psuty N.P. (1992) - *Spatial variation in coastal foredune development*. In: Carter R.W.G., Curtis T.G.F e Sheely-Skeffington M.J. (eds), *Coastal dunes: Geomorphology, Ecology and Management*. A. Balkema, Rotterdam, pp. 3-13.
- Simeoni U. e Bondesan M. (1997) - *The role and responsibility of man in the evolution of the Adriatic alluvial coasts of Italy*. In: Briand F. e Maldonado A. (eds), *Transformations and evolution of the Mediterranean coastline*. Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée (CIESM), Science Series, 18: 111-132.

- Simeoni U., Del Grande C. e Gabbianelli G. (2003) – *Variazioni ed ipotesi evolutive dell'assetto altimetrico del litorale emiliano-romagnolo*. Studi Costieri, 7: 81-93.
- Simeoni U., Valpreda E., Schiavi C. e Corbau C. (2005) - *A national database on coastal dunes: Emilia-Romagna and southern Veneto littorals (Italy)*. Proceedings 6th Int. Symp. on GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management, July 2005, Aberdeen, Scotland (UK). In press.
- Valpreda E. (2005) – *Una banca dati geografica per la classificazione delle dune costiere a scala nazionale*. Atti del workshop "I depositi eolici delle coste italiane ed il flusso di sedimenti spiaggia-duna". Aprile 2005, Piscinas (CA). Pp 7-11.
- Wright L.D., Chappell J., Thom B.G., Bradshaw M.P. e Cowell P. (1979) - *Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia*. Mar. Geol., 32: 105-140.

Manoscritto ricevuto il 16/09/2006; accettato il 25/06/2006.

## Risposta di una spiaggia all'applicazione di un drenaggio artificiale: il BMS di Alassio

Dan Bowman <sup>1</sup>, Deborah Bresci <sup>2</sup>, Chiara Danese <sup>2</sup>, Serena Ferri <sup>2</sup>, Enzo Pranzini <sup>2</sup> e Lorenzo Rossi <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Geography, Ben-Gurion University of the Negev, P.O. Box 653, Beer Sheva - 84105, Israele.

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, Borgo Albizi, 28 - 50132 Firenze. E-mail: epranzini@unifi.it

### Riassunto

Un sistema di drenaggio artificiale (BMS) è stato in funzione, dal Marzo 2004 al Marzo 2005, su di un tratto di spiaggia lungo circa 200 m del litorale di Alassio. In questo periodo il settore drenato ed un tratto adiacente di controllo sono stati oggetto di un monitoraggio effettuato con rilievi topografici e con videocamera. I rilievi topografici della spiaggia emersa e sommersa sono stati eseguiti nel Febbraio e nel Novembre 2004 e nel Marzo 2005; mentre due telecamere acquisivano 3 immagini al giorno per ciascun tratto.

Per il periodo di monitoraggio sono stati acquisiti i dati ondometrici della boa Cote d'Azur di Meteo-France, posta al largo di Mentone su di un fondale di 2300 m e ad una distanza di 73 km da Alassio in direzione SW.

Dai dati topografici sono stati generati 3 modelli digitali del terreno il cui confronto ha consentito la valutazione dell'evoluzione volumetrica della spiaggia. Le immagini acquisite dalle telecamere sono state ortorettificate e, tramite fotointerpretazione a video, sono state tracciate le linee di riva di 5 giorni consecutivi di mare calmo per ogni mese e confrontate le loro posizioni medie fra i due settori.

Il confronto fra i rilievi topografici diretti indica che alla fine del periodo di studio (fine Marzo 2005) la linea di riva del tratto sperimentale era avanzata di 1.2 m rispetto al momento iniziale (Febbraio 2004), mentre quella del tratto di controllo era arretrata di 1.3 m. Il tratto sperimentale ha subito un innalzamento medio del profilo di 28 cm, mentre quello di controllo è rimasto praticamente stabile (-3 cm).

L'analisi delle variazioni mensili della linea di riva produce risultati assai più contrastanti e tali da ridurre la significatività dei confronti effettuati fra l'inizio e la fine del monitoraggio.

Le variazioni mensili della linea di riva sono risultate assai maggiori, sia in senso positivo che negativo, di quelle verificatesi fra l'inizio e la fine dell'esperimento. Comunque, in quasi tutti i casi la spiaggia sperimentale avanzava di più di quella di controllo nelle fasi accretive e arretrava di meno in quelle erosive, fatta eccezione per il periodo Novembre - Dicembre, caratterizzato da intense mareggiate, quando la spiaggia sperimentale arretrò di 4.1 m, mentre quella di controllo avanzò di 3.9 m.

La minore ampiezza della spiaggia sperimentale può essere stata responsabile della forte perdita di sabbia avvenuta durante questi eventi meteomarini, quando le onde arrivavano a lambire il muro della passeggiata.

Questo divario venne immediatamente recuperato nel Gennaio 2005, relativamente calmo, ed anche gli eventi erosivi successivi videro la spiaggia sperimentale arretrare meno di quella di controllo.

I risultati, nel loro complesso, indicano che il BMS ha esercitato una sensibile funzione di stabilizzazione del litorale, dato che la posizione media della linea di riva sulle 14 misure effettuate risulta avanzata, nel tratto sperimentale, di 0.9 m, mentre nel tratto di controllo si colloca 3.4 m più indietro della posizione di partenza. Comunque, la variabilità intrinseca della risposta ai vari eventi meteomarini non consente di formulare una valutazione definitiva dell'efficacia di questo sistema.

**Parole chiave:** spiagge drenate, Beach Management System, Alassio.

### Abstract

*A BMS/Beach Management System (artificial beach draining system) has been operative on a 200 m long beach section in the coast of Alassio, from March 2004 to March 2005. During this period, both the drained sector and an adjacent control beach have been monitored by means of topographic surveys and videocamera stations.*

*Topographic surveys were performed on the emerged and submerged beach in February 2004, November 2004 and March 2005, and two videocameras took 3 images daily at each sector. Hourly wave and tidal data were obtained during the monitoring period from the buoy of Côte d'Azur/Meteo-France, placed at a 2300 m deep sea, offshore Mentone, 73 km SW from the shore of Alassio.*

*Beach and nearshore topographical data were elaborated into three Digital Terrain Models, and the volumetric evolution of the beach was evaluated. Images acquired from the videocameras were orthorectified; the shoreline position on 4 consecutive calm days was identified each month by means of video photointerpretation, and the average monthly position of the shoreline was compared between the drained and the control sectors.*

*The comparison between the topographical surveys indicates that at the end of the study (end of March 2005) the shoreline in the experimental sector advanced 1.2 m from its initial position (February 2004), whereas the shoreline of the control sector remained practically stable (-3 cm).*

*The analysis of monthly variations of the shoreline position shows rather contrasting results, reducing the significance of comparisons between the beginning and the end of the monitoring period.*

*Monthly variations of the shoreline position were larger, both negative and positive, than those observed between the beginning and the end of the experiment. However, in almost all the cases, the experimental beach accreted more than the control sector in the accreting phases, and retreated less in the erosive phases, except for the period November-December 2004 (characterized by extreme storm events) when the drained beach retreated 4.1 m whereas the control sector accreted 3.9 m. This gap was immediately recovered in January 2005, when relative calm weather was recorded. In the successive erosive events the experimental beach retreated less than the control sector.*

*The narrow experimental sector could have been responsible for the large loss of sand during storms, when waves reached at the sidewalk walls.*

*The results indicate that the BMS performed the role of stabilizing the beach: within the 14 measurements taken, the mean shoreline position advanced 0.9 m on the experimental sector whereas it retreated 3.4 m on the control sector. However, the variability of the responses to storm events does not allow to evaluate the efficacy of the draining system.*

**Keywords:** *drained beaches, Beach Management System, Alassio.*

## Introduzione

Il progredire dell'erosione dei litorali in aree di rilevante valore paesaggistico e lo scarso consenso che ricevono oggi i sistemi di difesa basati su opere rigide hanno spinto i ricercatori a sperimentare interventi "morbidi" di protezione del litorali (Goudas et al., 2003). Fra questi rientrano i sistemi di drenaggio artificiale della spiaggia, che, dopo numerosi test effettuati sia in natura che in canale, hanno visto numerose applicazioni in Nord Europa, Nord America ed in Australia.

L'esistenza di una correlazione fra livello della falda ed erosione della spiaggia era già stata messa in evidenza da Bagnold nel 1940, ma è solo negli anni '90 che inizia una sperimentazione per valutare le potenzialità di questi concetti nello sviluppo di sistemi di difesa dei litorali.

L'infiltrazione dell'acqua di *run-up* sulla battigia riduce il flusso di ritorno e quindi le possibilità di trasporto dei singoli granuli verso mare (Waddell, 1976). L'incremento di questa infiltrazione può essere ottenuto con sistemi di drenaggio posti in profondità in corrispondenza della battigia, come sperimentato a Hirtshal, Danimarca, (Vesterby, 1994), a Sailfish Point, Florida, (Terchunian, 1990) e a Sidney, Australia (Davis et al., 1992).

Anche se in molti casi una risposta della spiaggia all'installazione del drenaggio è stata sensibile, con un incremento di volume della spiaggia emersa, una progradazione della linea di riva ed un aumento della pendenza della battigia, Turner e Leatherman (1997), analizzando i diversi impianti realizzati nel mondo, concludono che *the early promise of the beach dewatering concept is yet to be adequately demonstrated at the prototype scale.*

Nei sistemi commerciali oggi in funzione il tubo drenante viene posto in corrispondenza della battigia ad una profondità compresa fra 1.5 e 2.5 m sotto al livello del medio mare e il suo svuotamento effettuato grazie ad una pompa posta nel pozzetto di raccolta. Si ha notizia anche di un test effettuato in Giappone con tubi drenanti ortogonali a riva che si svuotano grazie al gradiente idraulico che si sviluppa fra la *nearshore*, dove si ha il *set-up* e la zona *offshore*, soggetta a *set-down* (Katoh et al., 2001).

Il drenaggio dello strato superficiale lo si può ottenere anche favorendo la circolazione idrica fra i vari livelli che costituiscono la spiaggia, con tubi drenanti verticali infissi nel corpo sedimentario (Pressure Equalization Module), sistema impiegato in alcune spiagge della Danimarca (Burcharth, 2003), Svezia e Malesia.

In Italia, negli ultimi anni, sono stati realizzati alcuni impianti con tubi drenanti del tipo tradizionale e commercializzati con il nome di Beach Managing System (BMS): Ostia, Procida, Fiumi Uniti e Alassio. Al momento, nessun monitoraggio indipendente è stato pubblicato su questi interventi, anche se esso è in corso da parte di numerose università.

In questo lavoro si presentano i risultati di un anno di osservazioni effettuate sulle spiagge di Alassio a seguito dell'installazione del BMS, che è stato operativo dal Marzo 2004 al Marzo 2005; in particolare viene analizzata la risposta morfologica della spiaggia in termini di spostamento della linea di riva e di variazioni di volume della spiaggia emersa. Un'altro approccio alla valutazione dell'efficacia del BMS si basa sullo studio della morfodinamica del tratto sperimentale in confronto con quella che caratterizza il tratto di controllo, argomento questo oggetto di una pubblicazione in corso di stampa (Bowman et al., in prep.).

### L'area di studio

Il litorale di Alassio si estende per circa 3 km a sud di Capo Santa Croce e presenta un'orientazione NE-SW (Fig. 1). Il profilo batimetrico è caratterizzato da pendenze modeste fino agli 8 - 10 m di profondità, dove inizia una scarpata che porta rapidamente il fondale oltre i 20 m (Fig. 2).

La costa è esposta direttamente ai mari di Libeccio, che però, sulla base dei dati del KMNI, risultano essere poco frequenti (Fig. 1). Le mareggiate più frequenti ed intense provengono da NE e da SW, direzioni per le quali la spiaggia di Alassio è protetta dal delta del Centa e dall'Isola Gallinara, da un lato, e da Capo Mele, dall'altro. Le onde subiscono quindi una intensa diffrazione e giungono a riva assai attenuate, come mostra la scarsa quota della berma, che solo raramente supera 1.7 m. Questa modesta elevazione della berma è anche il risultato del fatto che la spiaggia è estremamente stretta e bordata per tutta la sua estensione da edifici o dalla passeggiata a mare, tanto che durante gli eventi estremi le onde raggiungono le pareti riflettenti determinando così il troncamento del profilo. Le foto storiche mostrano un arenile più ampio, ma la ricostruzione della linea di riva, almeno per il dopoguerra, indica una sostanziale stabilità ed è probabile che parte della spiaggia sia stata occupata dalle costruzioni. Indagini sedimentologiche condotte nel Febbraio e nel Novembre 2004 mostrano una notevole variabilità temporale dei sedimenti di questo litorale, in particolare di quelli presenti sui fondali. La spiaggia emersa è costituita in prevalenza da sabbia fine, con dimensioni medie ( $M_z$ ) quasi ovunque comprese fra 2.0 e 2.5 phi (0.25 ÷ 0.17 mm), anche se localmente si ritrovano elementi ghiaiosi che fanno innalzare i valori di  $M_z$  fino a 0 phi (1 mm), mentre quelli del 1° percentile raggiungono anche i -4 phi (16 mm). La Classazione ( $\sigma$ ), generalmente inferiore a 1, può superare in questi casi il valore di 2.5 phi.

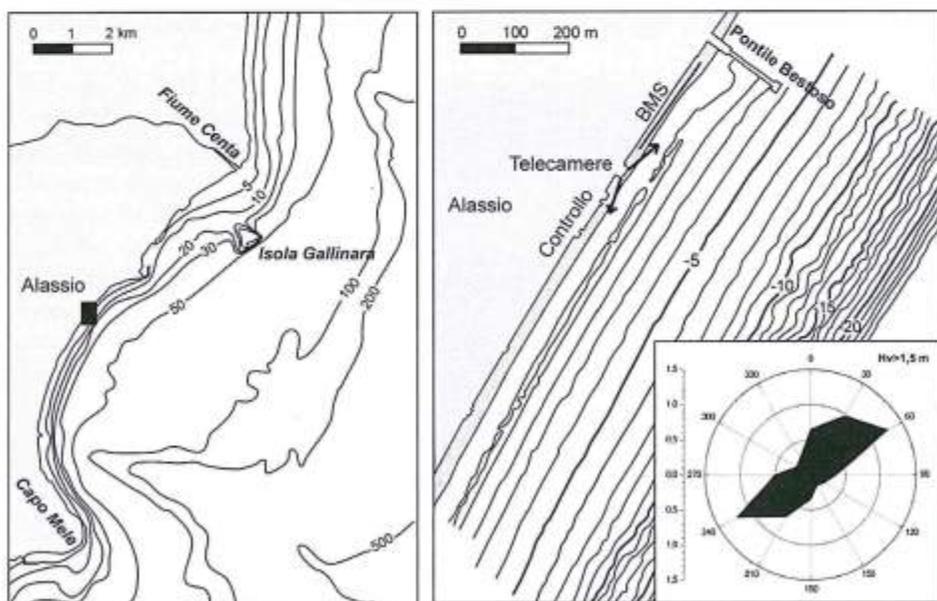


Figura 1 - Posizione dell'area di studio e, nel riquadro in basso a destra, distribuzione direzionale delle onde con  $H_v > 1.5$  m ( $H_s > 1.7$  m) al largo di Alassio dai dati KMNI del periodo 1961 + 1980.

I sedimenti campionati nel Febbraio sui fondali antistanti mostrano una notevole eterogeneità, con una fascia di sabbia molto grossolana, con valori di  $M_z$  che raggiungono  $-0.5 \phi$ , e poco classata ( $\sigma_1 > 2.5 \phi$ ) in corrispondenza di una barra, in realtà appena pronunciata; mentre nel Novembre successivo si ritrovavano solo sabbie molto fini ben classate.

L'arco sabbioso è interrotto dal Pontile Bestoso, con una radice impermeabile lunga una ventina di metri che sporge leggermente dalla linea di riva e che prosegue poi per circa 120 m su pali. A nord di questo, in anni recentissimi, è stata costruita una difesa parallela sommersa in tubi di geotessile riempiti di sabbia, ma non si hanno dati sulla risposta che ha avuto la spiaggia a questo intervento.

Per ampliare l'arenile, e dare così risposta ad una crescente necessità dell'industria turistica, l'Amministrazione Comunale ha recentemente intrapreso una sperimentazione con il Beach Management System (BMS) ed ha chiesto all'Università di Firenze di effettuare il monitoraggio su di un primo breve tratto sperimentale per valutarne l'efficacia.

Il BMS è stato installato a sud Pontile Bestoso (Fig. 2) per una lunghezza di 197 m e posto ad una profondità di circa 1.5 m (Fig. 3). I tubi drenanti, del diametro di 160 mm, sono immersi in un livello di ghiaietto e si raccordano con un pozzetto posto all'estremità interna della spiaggia; da qui l'acqua, superato un certo livello, viene pompata in una condotta preesistente e scaricata in mare in corrispondenza del pontile. Il pozzetto è posto nella parte centrale del tratto e due coppie di tubi, distanziati circa 1 m l'uno dall'altro, lo raggiungono drenando ciascuna metà del settore interessato.

Le mareggiate che si sono susseguite nell'autunno 2003 - inverno 2004 hanno ritardato l'installazione del BMS, prevista per l'Ottobre 2003, e, alla fine, hanno costretto ad una ubicazione non ottimale, con una spiaggia estremamente ridotta e non lontano dal muro di retta della passeggiata, che, in occasione di eventi estremi, è stato lambito dalle onde. Ciò, come vedremo, può aver influenzato l'efficacia dell'opera.

### Materiali e metodi

Lo studio della risposta della spiaggia di Alassio all'installazione del BMS è avvenuta effettuando rilievi sul settore interessato (sperimentale) e su di un settore adiacente (di controllo) esposto in ugual modo al moto ondoso. I due settori sono separati da una zona di *buffer* lunga 220 m, in modo che gli effetti laterali del BMS, siano essi positivi che negativi, non arrivino ad influenzare il comportamento del settore di controllo. L'unica differenza fra i due settori è legata all'ampiezza dell'arenile: al momento dell'installazione (Febbraio 2004) il settore sperimentale era ampio in media 18.5 m contro i 25.7 m del settore di controllo.

Tutto il tratto di litorale è stato oggetto di tre rilievi batimetrici (Febbraio 2004, Novembre 2004 e Marzo 2005) effettuati con GPS in modalità RTK fino ad una profondità di 2.5 m ed estesi a terra con Stazione Totale Wild TC2000.



Nel Gennaio 2004 sono state installate due telecamere del sistema DigiMapper 500 sulla terrazza di un albergo posto nella zona di *buffer* in modo da poter osservare entrambi i settori (Fig. 4). Le immagini acquisite ogni giorno alle 8.00, 12.00 e 17.00 sono state ortorettificate ed inserite nel sistema di coordinate WGS84 Roma 40. La fotointerpretazione a monitor delle varie immagini ortorettificate ha consentito l'estrazione della linea di riva che, tramite un confronto effettuato con 9 linee di riva acquisite in contemporanea con DGPS, ha mostrato un'accuratezza di circa 0.6 m (Beachmed, 2004).

Figura 2 - Schema del BMS installato sulla spiaggia di Alassio. La posizione effettiva del pozzetto è al centro del tratto drenato ed è stata qui modificata per una più semplice rappresentazione dei particolari costruttivi.



Figura 3 - Posizionamento dei tubi drenanti. Sulla destra si vedono i *well points* che consentono di tenere basso il livello della falda durante l'installazione.



Figura 4 - Il tratto sperimentale (a sinistra) e il tratto di controllo (a destra) visti dalla posizione delle due telecamere (Luglio 2004).

Per lo studio dell'evoluzione planimetrica della spiaggia emersa nell'anno di sperimentazione si sono estratte le linee di riva di cinque giorni di calma consecutivi per ciascun mese e, tramite un software appositamente sviluppato, ottenuta una linea di riva media che è stata considerata rappresentativa di quel periodo. La costanza dell'ora di acquisizione delle immagini e la deriva temporale delle maree dovuta alla maggiore durata del giorno lunare (24 h 50 m), unite all'esiguità dell'escursione della marea astronomica in questo settore del Mediterraneo (max. 30 cm) fanno sì che la linea di riva media ottenuta su 5 giorni possa essere riferita al livello medio del mare. Diverso è il discorso per la componente meteorologica, che sommandosi

a quella astronomica ha portato la variazione totale del livello marino nel periodo studiato nel range  $\pm 40$  cm (mareografo di Imperia). Episodi di *run-up* eccezionale sono da correlare con eventi meteomarinari estremi avvenuti in condizioni di bassa pressione, ma non certamente nei giorni da noi considerati per il tracciamento della linea di riva.

L'analisi dell'evoluzione morfologica della spiaggia emersa e sommersa fino a 2 m di profondità è stata effettuata sulla base dei rilievi batimetrici effettuati nel Febbraio 2004, Novembre 2004 e Marzo 2005. Dalle coordinate x, y, z sono stati prodotti dei Modelli Digitali del Terreno (DTM) tramite la costruzione di un grid a risoluzione di un metro con il programma Surfer Rel. 6. Si è quindi proceduto al confronto fra coppie successive di griglie per mezzo del calcolo delle differenze di quota su ciascuna maglia. L'insieme dei punti così generati ha portato alla costruzione di una carta delle isovariations con equidistanza di 10 cm. Si fa notare che i punti utilizzati sono stati acquisiti tutti con metodo topografico diretto ed hanno quindi una accuratezza più che idonea alla produzione di elaborati con equidistanza di 10 cm.

Per tutto il periodo di osservazione sono stati acquisiti i dati orari di Hs dell'ondametro Cote d'Azur di Meteo-France posizionato al largo di Mentone ( $43^{\circ}22.89'N / 07^{\circ}49.68'E$ ) su di un fondale di 2300 m e posto a 73 km a SW di Alassio (Fig. 5).

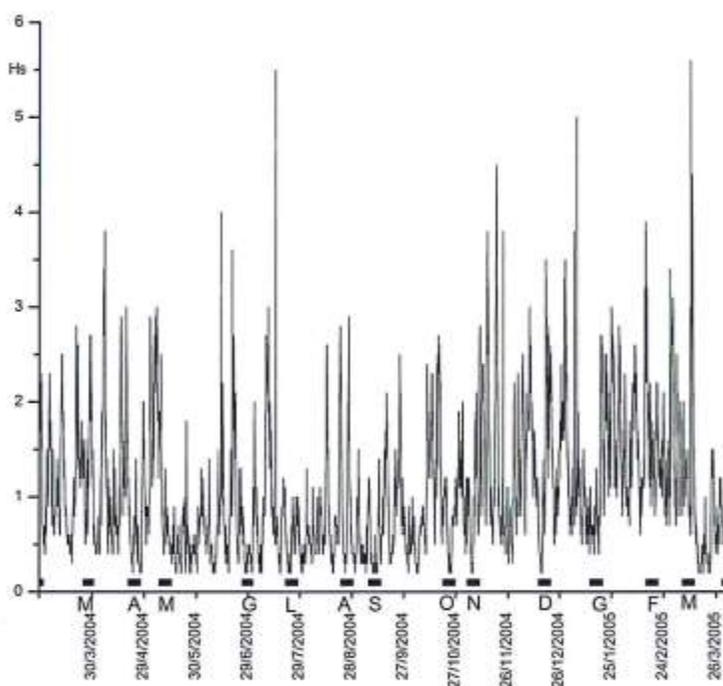


Figura 5 - Altezza d'onda significativa (Hs) misurata dall'ondametro Cote d'Azur nel periodo di monitoraggio (dati orari).

#### Evoluzione mensile della linea di riva

L'evoluzione mensile della linea di riva media nel settore BMS (sperimentale) ed in quello di controllo è riportata in Figura 6 (pag. prec.), dove tutti i dati sono normalizzati alla posizione della linea di riva di Febbraio 2004, ossia di quella precedente l'installazione del sistema.

Come si può osservare, da Marzo 2004 a Novembre 2004 i due tratti mostrano un andamento quasi parallelo, con la spiaggia BMS più avanzata di quella di controllo in tutte le fasi accretive e meno arretrata in quelle erosive, analogamente a quanto osservato da Kawata e Tsuchiya (1986) su modello fisico con onde di diversa ripidità. La distanza massima fra le due posizioni si registra nel momento di maggiore erosione, che avviene in Giugno dopo un periodo di forti mareggiate, quanto la spiaggia BMS si trovò arretrata di 3.4 m rispetto alla posizione di partenza e la spiaggia di controllo di ben 12.1 m.

Questo divario si ridusse solo leggermente nei mesi successivi caratterizzati da una crescita di entrambe le spiagge dovuta al lungo periodo di mare piuttosto calmo. Alla fine di Ottobre riprende il processo erosi-

vo, con un primo arretramento parallelo di entrambi i settori, ma le continue mareggiate che avvengono fra il rilievo di Novembre e quello di Dicembre portano ad una inversione della situazione: la spiaggia sperimentale si trova arretrata di 4.1 m, mentre quella di controllo avanzata di 3.9 m rispetto alla posizione di Novembre.

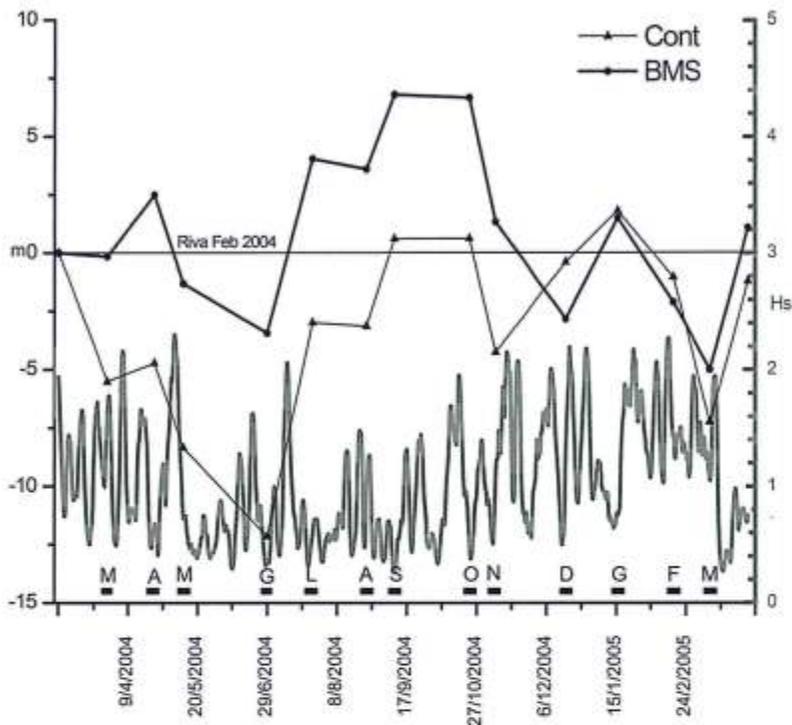


Figura 6 - Posizione media della linea di riva rispetto a quella del Febbraio 2004 nei due settori considerati nei vari momenti del monitoraggio. In grigio il valore di Hs all'ondametro Côte d'Azur (media mobile su 72 ore).

Questo comportamento anomalo può essere imputato alla minore ampiezza della spiaggia BMS, dove le immagini acquisite giornalmente mostrano che si è verificato il raggiungimento del muro di retta della passeggiata da parte delle onde con un conseguente forte abbassamento del profilo. Sulla coda della mareggiata, la spiaggia di controllo ha potuto ricostituirsi quasi completamente, mentre quella sperimentale è rimasta in posizione assai arretrata.

Questo divario venne quasi completamente recuperato già nel Gennaio 2005, relativamente calmo, ed anche gli eventi erosivi successivi videro la spiaggia sperimentale arretrare meno di quella di controllo. Alla fine del periodo di monitoraggio la spiaggia in cui aveva operato il BMS registrava un'ampiezza di 1.2 m maggiore che nel Febbraio 2004, mentre quella di controllo era arretrata di 1.3 m.

I risultati, nel loro complesso, indicano che il BMS ha esercitato una sensibile funzione di stabilizzazione del litorale, dato che la posizione media della linea di riva sulle 14 misure effettuate risulta avanzata, nel tratto sperimentale, di 0.9 m, mentre nel tratto di controllo si colloca 3.4 m più indietro della posizione di partenza. Comunque, il confronto fra gli spostamenti assoluti registrati nei vari periodi non mostra una correlazione significativa, cosa in gran parte dovuta al dato di Dicembre (Fig. 7).

E' comunque opportuno segnalare che la continuità morfologica del litorale impedisce l'accumulo delle performance positive, che porterebbero ad una rotazione del fronte della spiaggia e quindi ad un flusso di sedimenti dalla spiaggia più avanzata verso quella più arretrata. Inoltre, un forte avanzamento della linea di riva porta ad una perdita di efficacia del BMS che si verrebbe a trovare arretrato rispetto alla fascia di *run-up*; analogamente un forte arretramento, quale quello avvenuto fra Novembre e Dicembre, colloca il tubo drenante sotto al profilo costantemente sommerso impedendo ogni sua funzione di drenaggio della battigia.

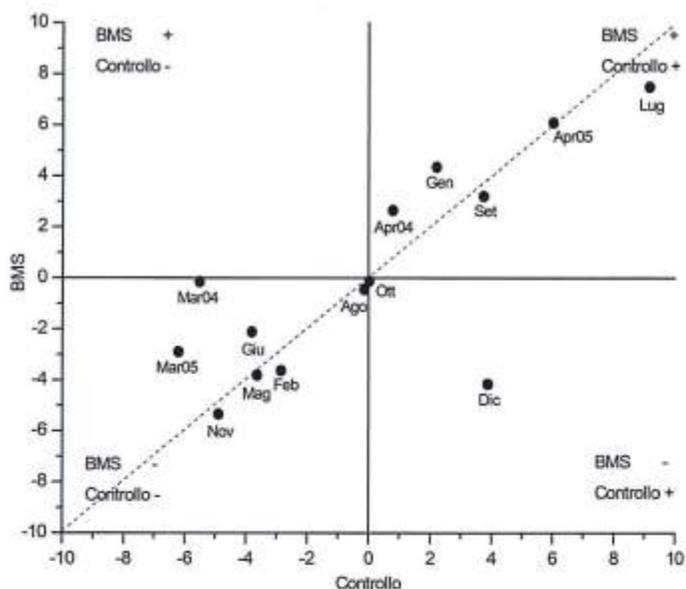


Figura 7 - Confronto fra lo spostamento medio della linea di riva nei vari periodi nel settore BMS e nel settore di Controllo. I punti sopra la diagonale indicano una performance migliore della spiaggia BMS rispetto a quella di controllo.

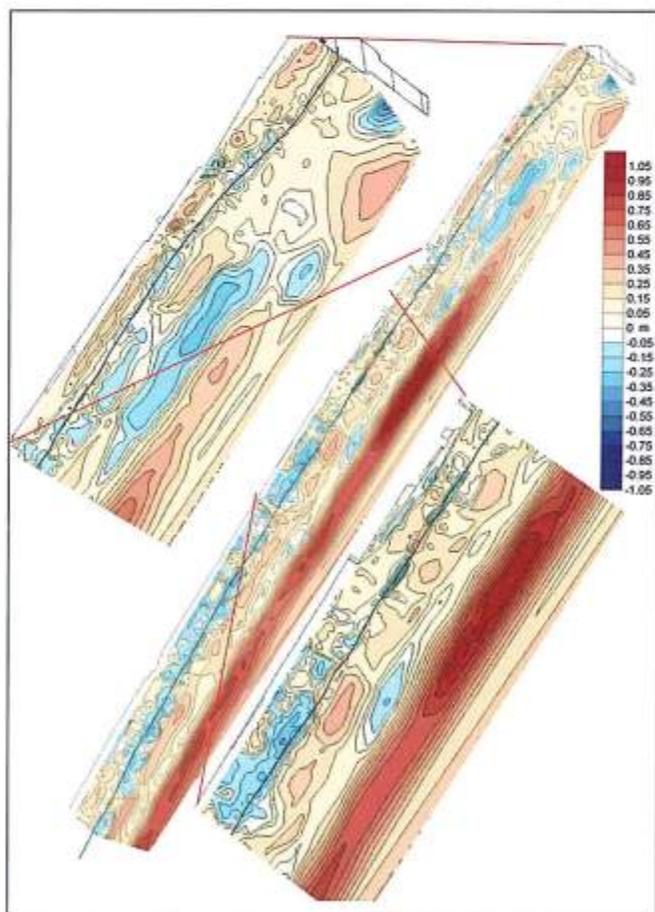


Figura 8 - Evoluzione della spiaggia emersa e sommersa fino ai 2 m di profondità fra il Febbraio 2004 e il Novembre 2004.

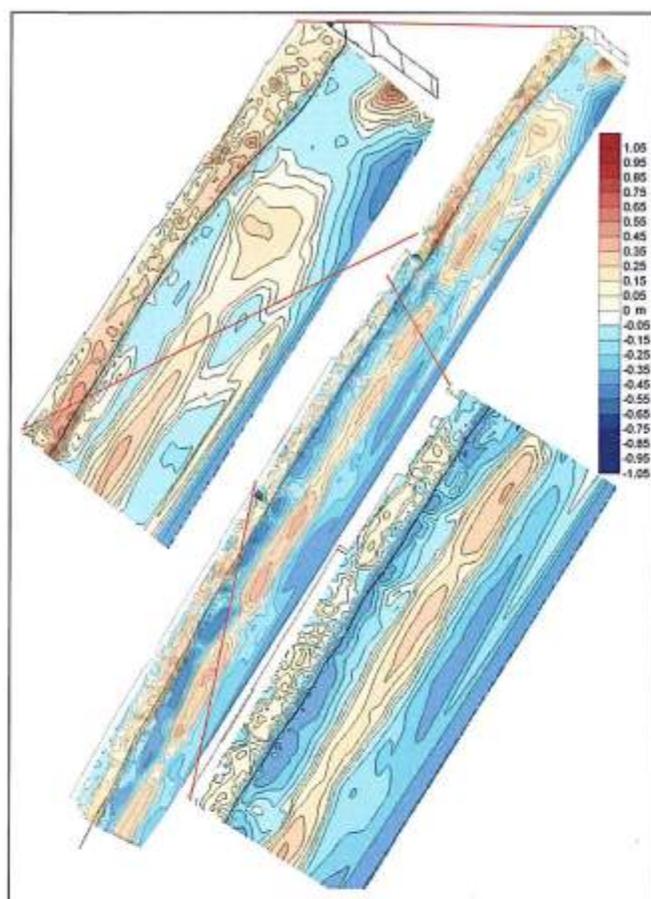


Figura 9 - Evoluzione della spiaggia emersa e sommersa fino ai 2 m di profondità fra il Novembre 2004 e il Marzo 2005.

#### Evolutione della spiaggia emersa e dei fondali immediatamente antistanti

L'evoluzione della spiaggia emersa e dei fondali immediatamente antistanti è rappresentata nelle Figure 8, 9 e 10 dopo l'applicazione di una filtratura "passa basso" 3 x 3 per rendere più leggibile il risultato.

Il confronto fra i rilievi topografici (Tab. 1) permette di calcolare, per il primo periodo considerato (Febbraio 2004 - Novembre 2004), un leggero incremento di volume sulla spiaggia emersa (+222 m<sup>3</sup>) nel tratto centrale di 140 m del settore in cui è stato installato il BMS, con un innalzamento medio (dh) del profilo di 0.09 m, mentre il tratto di controllo mostra variazioni positive e negative che tendono a compensarsi (dV = -79 m<sup>3</sup>; dh = -0.02).

Nel secondo periodo (Novembre 2004 - Marzo 2005) la spiaggia del BMS si innalza di quota per altri 0.35 m (dV = 826 m<sup>3</sup>) e quella di controllo subisce modeste variazioni (dV = +301 m<sup>3</sup>; dh = +0.09 m).

Nell'intero periodo considerato (Febbraio 2004 - Marzo 2005) la spiaggia del BMS ha un innalzamento medio del profilo di 0.44 m /dV = +1048), mentre quella di controllo rimane praticamente stabile (dV = +221; dh = +0.07 m).

Ciò si riflette anche in una maggiore pendenza della battigia, fatto osservato in quasi tutti i test effettuati anche in altri paesi (Turner e Leatherman, 1997).

Nei fondali antistanti, circa fino all'isobata dei 2 m, la spiaggia del BMS guadagna prima 0.03 m, poi 0.02 e chiude il periodo di osservazione con un innalzamento medio di 0.05 m.

La spiaggia di controllo chiude il periodo con un incremento di 0.24 m, dovuto essenzialmente ad un innalzamento del fondale di 0.35 del primo periodo a cui fa seguito una erosione di 0.11 m.

L'analisi delle immagini rilevate dalle telecamere ha messo in evidenza un diverso comportamento

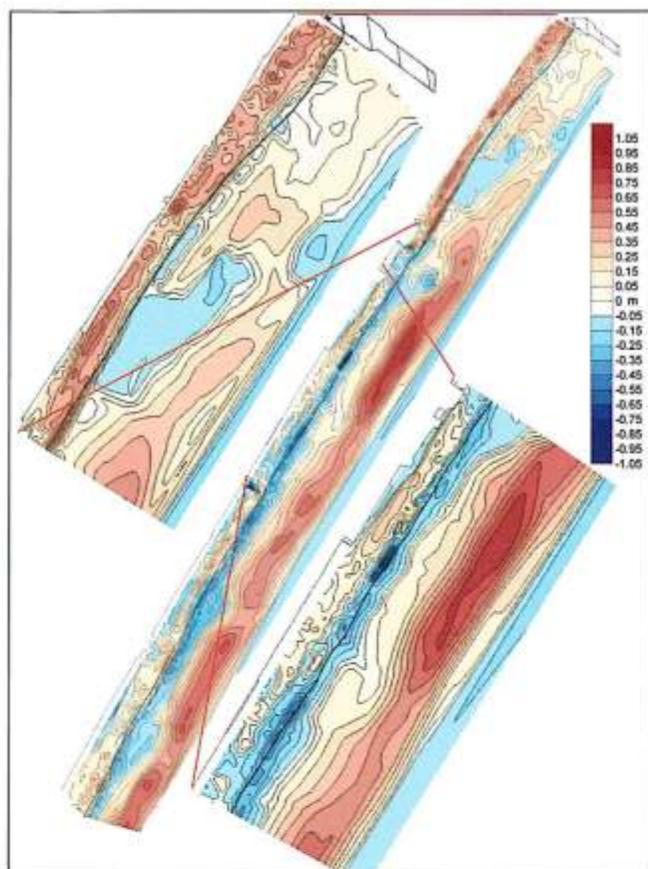


Figura 10 - Evoluzione della spiaggia emersa e sommersa fino ai 2 m di profondità fra il Febbraio 2004 e il Marzo 2005.

morfo-dinamico dei due tratti di litorale che è stato studiato in dettaglio da Bowman et al. (2006). I risultati di questo studio indicano che nel tratto drenato si formava sistematicamente una cresta di berma ben marcata e lineare ed una battigia stretta e ripida, mentre le cuspidi caratterizzavano quasi esclusivamente il settore di controllo nelle fasi di arretramento, confermando fra l'altro la genesi erosiva di queste morfologie (Miller et al., 1989; Inman e Guza, 1982).

Altra risposta della spiaggia all'attività del BMS sono i densissimi fori che si formano sulla battigia nei momenti di massima infiltrazione e dai quali esce aria con formazione di bolle alla superficie (Fig. 11), fenomeno questo descritto anche da Chappell et al. (1979; in Turner e Leatherman, 1997).



Figura 11 - Battigia forellata dall'uscita dell'aria durante le fasi di massima efficacia del BMS.

Tabella 1 - Variazione di volume (colonna 5) e variazione media di quota (colonna 6) registrata nei vari intervalli di tempo sulla spiaggia con BMS e su quella di controllo nella parte emersa e fino ai 2 m di fondale.

		Periodo	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	dh
BMS	Emersa	Feb 04 - Nov 04	3457	377	0.11
		Nov 04 - Mar 05	3485	834	0.24
		Feb 04 - Mar 05	3494	1221	0.35
	Sommersa	Feb 04 - Nov 04	11562	841	0.07
		Nov 04 - Mar 05	11650	-97	-0.01
		Feb 04 - Mar 05	11431	712	0.06
Controllo	Emersa	Feb 04 - Nov 04	4618	-10	0.00
		Nov 04 - Mar 05	4764	-88	-0.02
		Feb 04 - Mar 05	4578	-66	-0.01
	Sommersa	Feb 04 - Nov 04	13561	4506	0.33
		Nov 04 - Mar 05	15043	-1801	-0.12
		Feb 04 - Mar 05	13383	3105	0.23

Modeste discrepanze fra il dato relativo al periodo Feb '04 - Mar '05 e la somma delle variazioni riferite ai due sottoperiodi separati (Feb '04 - Nov '04 e Nov '04 - Mar '05) sono dovute a piccoli cambiamenti della superficie entro la quale vengono calcolate le differenze di quota, come risulta dalla terza colonna.

### Conclusioni

Il monitoraggio della spiaggia di Alassio, nel tratto in cui è stato operativo il BMS e in un tratto adiacente di controllo, consente di trarre solo alcune considerazioni preliminari sull'efficacia di questo sistema nella stabilizzazione dei litorali.

Il confronto fra la morfologia della spiaggia prima e dopo un anno di funzionamento indica che nel tratto sperimentale vi è stata una modesta espansione dell'arenile (+1.1 m) con un altrettanto modesto incremento della quota media (+0.35 m), mentre la spiaggia di controllo è arretrata leggermente (-1.2 m) senza significative variazioni di quota (-0.01 m).

L'evoluzione mensile derivata dalle immagini riprese dalla telecamera indica che in 11 casi su 12 la spiaggia sperimentale è avanzata di più di quella di controllo nelle fasi accretive o arretrata di meno in quelle erosive. Questo risultato decisamente positivo contrasta quanto avvenuto fra Novembre e Dicembre, un periodo caratterizzato da intense mareggiate, quando la spiaggia sperimentale arretrò di 4.1 m, mentre quella di controllo avanzò di 3.9 m. Essendo il confronto basato sulle linee di riva di un periodo di 5 giorni calmi consecutivi, si può pensare che la spiaggia sperimentale abbia avuto un recupero post-mareggiata più lento e più limitato rispetto a quello che ha interessato la spiaggia di controllo. Ciò può essere imputato alla minore ampiezza della spiaggia BMS, dove si è verificato il raggiungimento del muro di retta della passeggiata da parte delle onde con un conseguente forte abbassamento del profilo.

### Ringraziamenti

La ricerca è stata effettuata nell'ambito di una convenzione fra l'Università di Firenze e il Comune di Alassio. Le telecamere sono state installate nell'ambito del Progetto INTERREG IIIB BEACHMED. I rilievi batimetrici sono stati effettuati da GAIT s.r.l. - Geofisica Applicata all'Ingegneria del Territorio.

### Bibliografia

- Beachmed (2004) - *Tecniche di monitoraggio dell'evoluzione delle spiagge*. Quaderno tecnico 3: 21-82.  
 Bowman D., Ferri S. e Pranzini E. (2006) - *Morphodynamics and efficiency of beach draining. Alassio, Italy*. In prep.  
 Burcharth H.F. (2003) - *Report on test with vertical drainage modules as a coastal stabilizing method*. Aalborg University unpublished report, 23 pp.

- Chappell J., Eliot I.G., Bradshaw M. P. e Lonsdale E. (1979) - *Experimental control of beach face dynamics by water table pumping*. Eng. Geol., 14: 29 - 41.
- Davis G.A., Hanslow D.J., Hibbert, K e Nielsen P. (1992) - *Gravity drainage: a new method of beach stabilization through drainage of the watertable*. Proc. Int. Conf. Coastal Engineering, Venice.
- Goudas C., Katsiaris G., May V. e Karambas T. (eds.) (2003) - *Soft Shore Protection, An Environmental Innovation in Coastal Engineering*. Coastal Systems and Continental Margins Volume 7, Kluwer Academic Publishers, pp. 398.
- Inman D.L. e Guza R.T. (1982) - *The origin of swash cusps on beaches*. Marine Geology, 49: 133-148.
- Katoh K., Yanagishima S., Hasegawa I. e Katano A. (2001) - *Field experiment in relation to a gravity-drained system as a soft shore protection measure*. In *Soft Shore Protection*, a cura di C. Goudas, G. Katsiaris, V. May e T. Karambas. Kluwer Academic Pub., Dordrecht, Olanda, pp. 157-170.
- Kawata Y. e Tsuchiya Y. (1986) - *Applicability of sub-sand filter system to beach erosion control*. Proc. 20<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Eng., pp. 189-190.
- Miller J.R., Miller S.M.O., Torzynski C.A. e Kochel R.C. (1989) - *Beach cusp destruction, formation and evolution during and subsequent to an extratropical storm, Duck, North Carolina*. Journ. of Geology, 97: 749-760.
- Terchunian A.V (1990) - *Performance of beachface dewatering: the Stabeach System ai Sailfish Point (Stuart), Florida*. Proc. Nat. Conf. On Beach Preservation Technology. Florida Shore and Beach Preservation Ass., pp.185-201.
- Turner I. L. e Leatherman S.P. (1997) - *Beach dewatering as a "soft" engineering solution to coastal erosion- a history and critical review*. J. Coast. Research, 13: 1050-1063.
- Vesterby H. (1994) - *Beach face dewatering - the European experience. Alternative technologies in beach preservation*. Proceedings of the 1994 National Conference on Beach Preservation Technology, St. Petersburg, FL, pp. 53 - 68.
- Waddell E. (1976) - *Swash - groundwater - beach profile interaction*. In: Davis, R.A., Etherington, L.(Eds.), *Beach and nearshore sedimentation*. SEPM Spec. Pub. 24: 115-125.

Manoscritto ricevuto il 5/4/2006; accettato il 26/5/2006.

## Ortorettifica di immagini satellitari ad alta risoluzione finalizzata al monitoraggio costiero a scala regionale

Donatella Dominici <sup>1</sup>, Gian Mario Beltrami <sup>2</sup>, Paolo De Girolamo <sup>2</sup>

<sup>1</sup> DAU, Università di L'Aquila, 60790 Montelucio di Roio, L'Aquila.

<sup>2</sup> LIAM-DISAT, Università di L'Aquila, 60790 Montelucio di Roio, L'Aquila.

### Riassunto

La presente memoria descrive la procedura messa a punto per effettuare l'ortorettifica di immagini satellitari ad alta risoluzione finalizzata ad un loro utilizzo quale strumento di monitoraggio geometrico della costa della Regione Abruzzo. La memoria si concentra sulle ragioni che hanno portato a prediligere – in relazione a requisiti quali la limitazione dell'intervallo temporale di esecuzione della misura e la precisione delle stessa – le immagini da satellite a elevata risoluzione spaziale quale strumento di monitoraggio. Vengono descritte le tecniche utilizzate per georeferenziare tali immagini, illustrando i risultati di una applicazione effettuata su un'area campione. Le specifiche fornite alle autorità regionali per la messa a regime – con cadenza annuale - del monitoraggio della costa mediante immagini satellitari concludono la memoria.

**Parole chiave:** monitoraggio della costa, immagini satellitari, georeferenziazione, scala regionale.

### Abstract

*The present paper illustrates the procedure developed in order to orthorectify high resolution satellite images with the aim of using them as a tool for monitoring the coast of the Regione Abruzzo. The paper concentrates on the reason for choosing high resolution satellite images as a basic coastal survey tool in the light of monitoring requirements such as measurement repeatability and efficiency. The procedure developed for georeferencing these images is described, and the results of an application to the chosen test area are shown. Guidelines for annual coastal monitoring using satellite images, suggested to the Regione Abruzzo authority, are presented.*

**Keywords:** coast monitoring, satellite images, georeferencing, administrative region scale.

### Introduzione

Con il passaggio alle regioni delle competenze in materia di difesa delle coste, la Regione Abruzzo è stata tra le prime ad aderire agli indirizzi comunitari riguardanti la gestione integrata della fascia costiera (Integrated Coastal Zone Management – ICZM). Proprio allo scopo di definire procedure di gestione rispondenti ai citati indirizzi, la Regione Abruzzo ha finanziato diversi progetti specifici, tra i quali sono da ricordare il progetto RICAMA (Rationale for Integrated Coastal Area Management, <http://www.regione.abruzzo.it/ricama>) cofinanziato dalla Comunità Economica Europea nell'ambito del programma LIFE, e il progetto SICORA (Supporto Informativo per la gestione della zona COstiera della Regione Abruzzo, <http://ing.univaq.it/sicora/home.htm>), da considerarsi quale naturale continuazione del progetto RICAMA.

Assunto di una efficace gestione della costa è la possibilità di controllare con continuità il suo stato. A tal fine occorre definire e quindi 'misurare' opportuni parametri quantitativi che possano rispondere al ruolo di indicatori di stato (Belfiore et al., 2003). In altre parole, risulta indispensabile la preventiva pianificazione e la successiva messa a regime di un sistema di monitoraggio geometrico-quantitativo atto a fornire alle amministrazioni e ai portatori di interesse (*stakeholders*) le informazioni necessarie all'esercizio di tale controllo.

Proprio seguendo una logica di pianificazione, nell'ambito del progetto RICAMA, si è innanzitutto cercato di identificare i parametri che, risultando maggiormente rispondenti al ruolo di indicatori di stato per la costa abruzzese, potessero essere oggetto di monitoraggio (Consorti et al., 1998; De Girolamo et al., 1999; Università degli Studi di L'Aquila, 1998). L'operazione di identificazione è stata effettuata non solo tenendo conto delle diverse scale di interesse (regionale o locale), ma anche stabilendo a priori i requisiti da soddisfare (significatività statistica, economica, etc.).

Tra i vari parametri individuati, quello che è apparso di maggiore efficacia per la rappresentazione - a scala regionale - dello stato della costa da un punto di vista morfologico è risultato la posizione assunta dalla linea di riva in funzione del tempo. Si è infatti riconosciuto come la conoscenza delle variazioni diacroniche di tale linea, oltre a consentire l'individuazione delle tendenze evolutive di un litorale (erosione/deposizione), permetta una valutazione quantitativa dei gradienti del trasporto solido longitudinale - ovvero del trasporto da cui dipende il bilancio solido litoraneo - risultando quindi fondamentale per l'identificazione dei fenomeni evolutivi in atto e la verifica dei diversi scenari di intervento.

Una volta identificato nella linea di riva il parametro di monitoraggio morfologico più efficace, si è reso necessario definire una procedura 'standard' di rilievo a scala regionale che rispondesse a requisiti quali la 'sinotticità' e precisione della misura, consentendo inoltre il contenimento dei costi, al fine di rendere praticabile la ripetizione annuale dell'osservazione. Riguardo i requisiti, occorre osservare come le tecniche di rilievo tradizionali, non potendo garantire l'esecuzione della misura su vaste aree in intervalli di tempo limitati, non siano implicitamente in grado di rispondere al requisito fondamentale di 'sinotticità' della misura. In base alla metodologia di rilievo scelta, in particolare il telerilevamento mediante immagini satellitari ad alta risoluzione, si sono in seguito dovuti definire le metodologie di individuazione della linea di riva.

La presente memoria si concentra essenzialmente sulle scelte innovative operate nella definizione di tale procedura, lasciando a una successiva memoria il compito di mostrare i criteri individuati per la definizione e quindi il monitoraggio della linea di riva vera e propria. In particolare, dopo aver illustrato i criteri che hanno portato a preferire l'immagine satellitare ad alta risoluzione quale strumento operativo per l'esecuzione del rilievo a scala regionale, vengono presentate nel dettaglio le problematiche che emergono, le scelte operate, le tecniche nonché le modellazioni utilizzate per ortorettificare e georeferenziare le immagini satellitari utilizzate. Le varie fasi della procedura elaborata vengono illustrate facendo riferimento all'applicazione operata utilizzando l'area campione del litorale di Pescara, che ha peraltro permesso di redigere le specifiche - anch'esse presentate - utilizzate dalle autorità regionali per la messa a regime del monitoraggio della costa con cadenza annuale.

L'attività di ricerca di seguito illustrata è stata svolta nell'ambito del progetto SICORA (De Girolamo et al., 2005), per il quale la Regione Abruzzo si è avvalsa del coordinamento scientifico del LIAM (Laboratorio di Idraulica Ambientale e Marittima), afferente al DISAT (Dipartimento di Ingegneria delle Strutture delle Acque e del Terreno) dell'Università degli Studi di L'Aquila.

### Tecniche operative per il controllo geodetico-topografico

L'informazione richiesta per studiare il territorio che ci circonda può distinguersi in due grandi tipologie. Da una parte vi è una informazione a carattere qualitativo, relativa alla tipologia di copertura (acque, boschi, minerali, terreno coltivato, terreno edificato ecc.), dall'altra vi è una informazione a carattere geometrico-quantitativo, relativa alla posizione e ai contorni delle diverse 'qualità' identificate.

La necessità di reperire una informazione a carattere geometrico ha portato negli anni all'emergere di metodologie di rilievo sempre più avanzate. In particolare, i sistemi di rilevamento fotogrammetrico o basati sullo studio della radiazione elettromagnetica emessa o riflessa dagli oggetti a terra e rilevata da sensori remoti (*remote sensing*) hanno portato allo sviluppo di metodologie di analisi che hanno vissuto e continuano a vivere forti evoluzioni, passando dalla fotogrammetria analitica a quella digitale, fino a giungere alle tecniche di analisi delle immagini satellitari a fini metrici. Al riguardo, occorre precisare che, se l'utilizzo di tali immagini quale strumento di reperimento dell'informazione qualitativa ha circa 30 anni, solo la recente disponibilità di immagini satellitari ad alta risoluzione ha portato a considerare tale forma di telerilevamento uno strumento utile anche al reperimento dell'informazione geometrico-quantitativa (AA.VV., 2001).

### *Rilevamento mediante foto aeree*

Il rilevamento del territorio mediante foto aeree realizzate in forma di stereocoppie durante voli opportunamente progettati costituisce il principio base della fotogrammetria classica o analitica la quale, tramite procedimenti di restituzione e ortofotoproiezione, consente la costruzione di modelli tridimensionali delle aree di interesse attraverso l'unione di sequenze di stereocoppie adiacenti (Kraus, 1994). Sullo stesso principio si fonda anche la fotogrammetria digitale, sviluppatasi in seguito all'emergere delle moderne tecnologie informatiche di acquisizione e trattamento delle immagini. La costruzione del modello tridimensionale richiede comunque - in entrambi i casi - una accurata determinazione di quei punti a coordinate note conosciuti come punti di controllo a terra (GCPs - *Ground Control Points*). L'emergere dei sistemi di posizionamento globale (GPS - *Global Positioning System*), consentendo la copertura di vaste aree in poco tempo e con ottime precisioni, ha dunque permesso un considerevole sviluppo anche in questo campo, ovvero il superamento delle tradizionali tecniche di rilievo plano-altimetrico. Il lettore interessato è rimandato a Kraus (1994) per i necessari approfondimenti.

In questa sede preme tuttavia osservare come la necessità di progettare uno specifico volo aereo per lo studio di ciascuna area di interesse, limitando di fatto la regolarità dell'acquisizione e quindi la ripetibilità delle prese fotografiche, costituisca una limitazione di questa tecnica (Sylos Labini, 2003).

### *Telerilevamento mediante immagini satellitari*

Le immagini satellitari provengono da sensori posizionati su satelliti che percorrono orbite ottimali in funzione dello scopo. Ad esempio, le orbite sono quasi circolari in modo da garantire una distanza costante del satellite dalla superficie terrestre, mentre i piani orbitali sono quasi polari in modo da garantire una operatività sincrona al sole. Il periodo dell'orbita dipende ovviamente dalla sua quota, cui è anche legata la risoluzione spaziale della presa (decrecente al crescere della quota stessa). A causa della rotazione della terra, il satellite percorre a ogni rivoluzione una nuova traccia, posta a Ovest della precedente. Questa caratteristica viene utilizzata per tarare l'orbita in modo da garantire il tracciamento di tutto il pianeta (con eccezione delle calotte polari) in un certo numero di giorni. Tale intervallo di tempo definisce il ciclo di ripetizione (*repeat cycle*) e determina la risoluzione temporale (*temporal resolution*) dei dati registrati. Il sensore, inteso come lo strumento che acquisisce le immagini, non registra in modo omogeneo la radiazione in arrivo dal corrispondente *pixel quadrato* al suolo, risultando spesso più sensibile in corrispondenza del centro del pixel. Ciò porta a definire la sua risoluzione spaziale (*spatial resolution*) come l'estensione dell'area circolare ove la sensibilità dell'elemento del sensore è superiore al 50% della sensibilità massima. Come risoluzione radiometrica (*radiometric resolution*) si definisce invece il dettaglio adottato nella registrazione della quantità di radiazione incidente sul sensore.

Occorre osservare come, almeno fino all'avvento dei nuovi sensori ad alta risoluzione, l'utilizzo dei dati telerilevati da satellite per il reperimento di informazioni geometrico-quantitative abbia trovato nella scarsa risoluzione geometrica delle immagini, nell'indeterminazione della posizione e dell'assetto del sensore e nella complessità della geometria della presa elementi di oggettiva difficoltà, risultando estremamente complesso collocare sul terreno, con sufficiente accuratezza, le informazioni derivanti dai dati telerilevati (operazione necessaria per ottenere una rappresentazione cartografica metricamente corretta).

L'introduzione di nuovi sensori ad alta risoluzione, consentendo l'utilizzo della stessa immagine quale fonte d'informazione radiometrica e geometrica, ha permesso di ridurre se non eliminare il preesistente scollamento tra le due tipologie di informazione, rendendo possibile un approccio capace di fornire le informazioni metriche e fisiche richieste in un unico sistema di riferimento (*Datum*) e con un unico livello di precisione. In particolare, la disponibilità di immagini satellitari ad alta risoluzione quali ad esempio QuickBird (QB), generate da un sensore pancromatico e un sensore multispettrale rispettivamente con risoluzioni di 0.61 m e 2.5 m (Toutin e Cheng, 2002), hanno aperto interessanti prospettive per l'impiego dell'immagine satellitare nel campo della descrizione metrica del territorio (cartografia a grande e media scala), ovvero per il reperimento di una informazione geometrico-quantitativa. Il lettore interessato è rimandato ai già citati atti del PRIN (Progetto di Rilevante Interesse Nazionale) dal titolo "L'uso di immagini satellitari ad alta risoluzione per le analisi territoriali" per dettagliate informazioni (AA.VV., 2001).

I vantaggi rispetto alla tradizionale presa fotogrammetrica non sono solo legati alla relativamente alta ripetibilità della presa, ma anche all'estensione della scena ripresa, ovvero alla capacità di visione 'sinottica', non-

ché alle potenzialità di acquisire immagini con la medesima facilità in qualunque zona. Ulteriore aspetto da considerare è l'effettiva riconoscibilità degli oggetti relativi ai dati da analizzare. La possibilità di reperire periodicamente immagini di aree territoriali senza la necessità di progettare appositi voli ha quindi portato a un crescente utilizzo delle prese da satellite, elaborate mediante metodologie operative proprie della fotogrammetria (Boccardo et al., 2003, 2004; Kraus, 1994; AA.VV., 2001). I costi dipendono dalla politica dei fornitori, ovvero dalla concorrenzialità tra gli stessi, e rappresentano un elemento destinato a condizionare l'uso di tali immagini.

### *Il problema della correzione geometrica*

Qualunque immagine ad alta risoluzione, al momento della presa, risulta affetta da distorsioni geometriche e radiometriche, ovvero da distorsioni dell'energia raggiante rilevata, che ne impediscono il corretto utilizzo, particolarmente nelle applicazioni cartografiche. Tali distorsioni sono essenzialmente dovute al sistema di acquisizione (piattaforma e sensore), al mezzo di propagazione del segnale (atmosfera), all'angolo di ripresa rispetto al Nadir e all'effetto della curvatura terrestre. Prima del rilascio quindi, l'immagine deve essere corretta geometricamente. I differenti livelli di correzione geometrica e radiometrica caratterizzano le diverse tipologie di prodotto e, ovviamente, il rapporto tra costo e ampiezza dell'area rilevata.

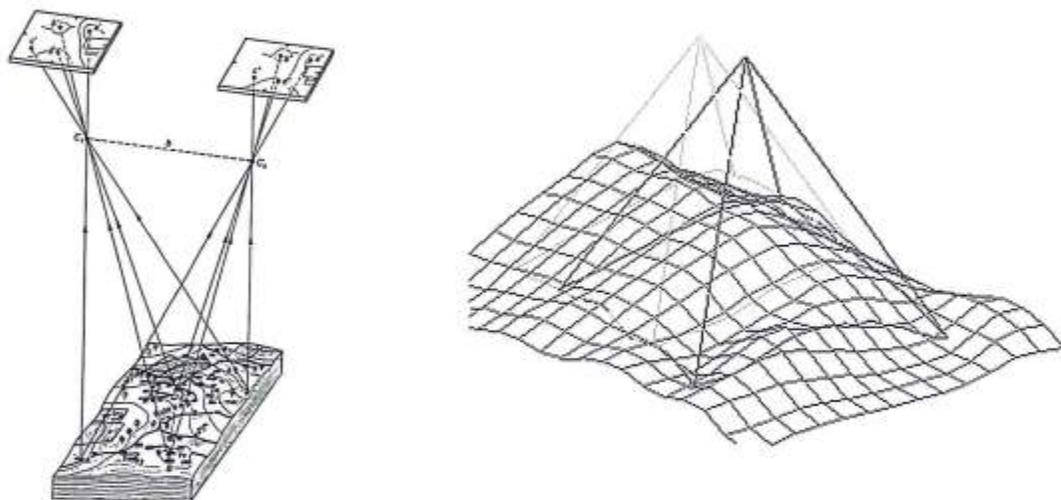


Figura 1 - Equazioni di collinearità (a sinistra) e utilizzo del DTM per la ortofotoproiezione (a destra).

L'applicazione di procedimenti di ortofotoproiezione, nonché l'eventuale ricostruzione di modelli stereoscopici, richiedono la conoscenza di modelli fisico-geometrici - quali le equazioni di collinearità (Fig.1 sx) - in grado di mettere in relazione lo spazio immagine con lo spazio oggetto (Kraus, 1994). Tali modelli richiedono a loro volta la conoscenza dei parametri di presa, ovvero dei parametri di posizione e assetto della piattaforma, nonché dei parametri ottico-geometrici del sensore. A differenza del rilevamento mediante foto aeree, il rilevamento tramite immagini satellitari non prevede la diffusione di tali parametri, rientrando questi ultimi nel novero delle informazioni mantenute riservate dai gestori delle piattaforme. In questo caso quindi, risulta necessario ricorrere a criteri alternativi di definizione della corrispondenza tra immagine e terreno. Un criterio comunemente applicato consiste nell'istituire tale corrispondenza tramite punti noti sull'oggetto, ovvero punti di controllo a terra (GCPs), utilizzando modelli di tipo puramente analitico, quali funzioni polinomiali, razionali o 'spline', ovvero modelli che, non riferendosi a un particolare tipo di coppia sensore-piattaforma, risultano applicabili in maniera generalizzata. Si noti come i GCPs scelti, determinabili mediante un sistema di posizionamento globale (GPS), debbano essere facilmente 'riconoscibili' sia sull'immagine sia sul terreno, e come l'accuratezza delle loro coordinate influenzi in maniera determinante la corrispondenza istituita.

Occorre inoltre osservare come le immagini satellitari ad alta risoluzione geometrica quali le immagini QB non siano disponibili in forma di stereocopie. Per produrre immagini ortoproiettate con caratteristiche tali

da poter essere utilizzate per l'aggiornamento cartografico occorre quindi utilizzare un modello digitale del terreno (DTM - *Digital Terrain Model* - Fig.1 dx), risultando necessario disporre di informazioni tridimensionali sulla morfologia del terreno (Caprioli et al., 2003; Cheng et al., 2003; Dardanelli et al., 2003; Dermanis e Biagi, 2002; Kraus, 1994). Il DTM adottato dovrà ovviamente avere caratteristiche di precisione e di passo di griglia idonei al raggiungimento della precisione prefissata per l'ortofotoproiezione, ovvero dipendenti dalla scala della carta. Inoltre, la sovrapposizione tra immagine e DTM dovrà essere operata all'interno dello stesso *datum*. Piccoli errori nella posizione relativa tra i punti sull'immagine e sul DTM possono infatti comportare errori consistenti nella ortofotoproiezione (Coppola et al., 2001).



Figura 2 - Zona costiera nei pressi di Pescara (sx) e dettaglio del porto turistico di Pescara (dx). (Immagine ripresa dalla piattaforma Quickbird).

### La procedura di georeferenziazione elaborata

Come evidenziato, lo scopo principale del lavoro qui presentato è stato quello di elaborare una procedura di georeferenziazione delle immagini satellitari la quale, dipendentemente dal materiale e dagli strumenti disponibili, risultasse la più efficiente da un punto di vista del rapporto tra i costi e i tempi di realizzazione. L'efficienza di tale rapporto appare infatti elemento fondamentale per la ripetibilità insieme dell'acquisizione e dell'analisi di tali immagini e, quindi, per un loro concreto utilizzo a fini di monitoraggio dell'evoluzione della linea di costa. Tenuto conto di questo fine ultimo, allo scopo di elaborare e verificare preventivamente la procedura di georeferenziazione, si è provveduto a limitare l'area di prova alla sola zona circostante il Porto di Pescara (Fig. 2 sx).

### Analisi e scelta della piattaforma e del formato dell'immagine

Le immagini acquisite nell'ambito del progetto sono quelle riprese dalla piattaforma QuickBird (QB), rilasciate nel formato 'Standard'. Tale scelta è legata al fatto che le immagini QB sono attualmente le uniche a raggiungere, nel pancromatico, risoluzioni submetriche (0.61 m).

Le immagini QB hanno dimensioni dell'area ripresa variabili tra 16.5x16.5 km<sup>2</sup> e 20.8x20.8 km<sup>2</sup> e sono rese disponibili in differenti formati, differenziati dal grado di elaborazione geometrica e radiometrica cui sono sottoposte. Tra i formati più utilizzati ci sono le predette 'Standard', le 'Standard orthoready' e le 'Basic'. Le immagini 'Basic' sono da considerarsi immagini 'grezze', ovvero prive di qualunque correzione geometrica. Tali immagini sono comunemente preferite da utenti che, intendendo fare un uso metrico di esse, preferiscono avere il controllo dell'intero processo di ortorettificazione. Le 'Standard' e le 'Standard orthoready' sono invece immagini 'ortorettificate' rispettivamente tramite un modello digitale del terreno (DTM) a bassa risoluzione, in particolare il GTOPO30, e tramite l'ellissoide come superficie di riferimento per la quota. Tale trattamento rende i formati 'Standard' e le 'Standard orthoready' meno adatti per una successiva ortorettificazione, risultando ovviamente più complessa la ricostruzione della proiettività originale (si veda al riguardo: AA.VV., 2001).

Un considerevole vantaggio delle immagini 'ortorettificate' consiste nel fatto di essere fornite anche 'tagliate' specificatamente secondo l'area di interesse richiesta, risultando vincolante il solo minimo dell'area da acquistare (circa 64 km<sup>2</sup> per immagine). Quindi, per quanto le immagini 'Basic' abbiano un costo per km<sup>2</sup> minore delle immagini 'Standard' e 'Standard orthoready' (a tutto il 2003, circa 19 €/km<sup>2</sup> contro 22 €/km<sup>2</sup> per le immagini pancromatiche), tenuto conto che i formati delle immagini QB non risultano vincolati all'utilizzo di un prescritto modello fisico-geometrico di ortorettificazione, appare evidente come la scelta delle immagini 'Standard' abbia rappresentato il compromesso tecnico-economico più vantaggioso in relazione al fine di realizzare il monitoraggio metrico dell'area costiera abruzzese, particolarmente in virtù della ristrettezza della fascia di interesse (circa 5 km per una lunghezza complessiva di circa 135 km). La Figura 2 mostra la fascia dell'area di interesse mostrata dall'immagine QB in formato 'Standard' (sx) e un suo particolare (dx - dettaglio del porto turistico di Pescara).

### *Il modello di ortorettificazione*

Non è questa la sede per una completa esposizione delle caratteristiche e delle problematiche connesse con l'uso dei vari modelli di ortorettificazione. Nel seguito verranno quindi ricordati solo alcuni punti principali. Per i necessari approfondimenti si rimanda ai riferimenti bibliografici (Kraus, 1994).

Allo stato attuale l'ortorettificazione di un'immagine satellitare può essere effettuata tramite:

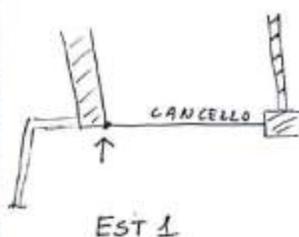
1) modelli rigorosi - quali le equazioni di collinearità - che portano alla descrizione del processo fisico geometrico relativo all'acquisizione dell'immagine attraverso la conoscenza dei parametri di orientamento interno del sensore, nonché di posizionamento e orientamento spaziale (Robertson, 2003; Toutin, 2004);

2) le funzioni polinomiali razionali (RPFs - *Rational Polynomial Functions*) che non tengono conto del processo fisico-geometrico di generazione dell'immagine (Borgogno Mondino et al., 2003) e richiedono la conoscenza di punti di controllo a terra (GCPs). Queste funzioni si dividono in RPFs basate esclusivamente su punti di controllo a terra e in RPFs calcolate anche in base a coefficienti forniti insieme alle immagini satellitari stesse tramite chiamata a un processo remoto (RPC - *Remote Process Call*). Sebbene nel primo caso si parli di RPFs senza RPC e nel secondo di RPFs con RPC, la distinzione appare puramente formale, trattandosi soltanto di avere o non avere a disposizione dei parametri forniti in un file di meta-data in formato testo (txt). In entrambi i casi occorre comunque distinguere i punti di controllo a terra (GCPs), ovvero i punti di coordinate note collimabili sull'immagine e in base ai quali viene stimato il modello, dai punti di controllo (CPs - *Check Points*), ovvero i punti utilizzati solo per il controllo dell'accuratezza dei risultati (Di et al., 2003a; Grodecki e Dial, 2003; Fraser e Hanley, 2003; Toutin, 2003).

Il confronto tra le due tipologie di modellazioni (Baiocchi et al., 2004; Toutin, 2004) mostra come l'approccio mediante modelli rigorosi risulti il più corretto da un punto di vista fotogrammetrico. Tali modelli tuttavia, pur risultando in assoluto più robusti, richiedono l'utilizzo di software specializzati, nonché specificamente adattati alla piattaforma satellitare considerata. Al contrario, l'approccio RPFs con RPC - più robusto di quello RPFs senza RPC e più semplice da implementare rispetto ai modelli rigorosi - è sempre più diffuso a livello di software commerciali (a esempio ENVI). Il conseguente favorevole rapporto tra costi e benefici ha orientato la scelta del modello di ortorettificazione da utilizzare verso la tipologia RPFs con RPC, tenuto conto peraltro che tali modelli possiedono già, seppur approssimati, tutti i coefficienti necessari e richiedono quindi un minor numero di punti di controllo.

### *Rilievo GPS per determinazione dei punti di controllo a terra*

Tenuto conto dell'area campione scelta (Fig. 2), il rilievo GPS effettuato per la determinazione sia dei GCPs che dei CPs si è svolto su un'area rappresentata da una fascia della larghezza di circa 4 km che, interessando una superficie complessiva di circa 80 km<sup>2</sup>, si estende in direzione Sud - Est, Nord - Ovest fra i comuni di Francavilla al Mare e di Città S. Angelo.



**Coordinate Immagine**  
**WGS 84 UTM 33N**  
**Geografiche**  
 LAT. N 42°31'26,19482"  
 LON. E 14°08'22,57627"  
**Cartesiane**  
 E 429331,3750  
 N 4708310,3320  
**Quota Ellissoidica**  
 49,324 m

Figura 3 - Estratto immagine: esempio di quadrante della griglia tracciata sull'immagine originale e di monografia del punto scelto all'interno di esso.

La posizione generica dei punti è stata individuata utilizzando una griglia tracciata sull'immagine originale. In particolare, partendo dalla linea che segue la costa, parallelamente a questa e distanziata di circa 1.5 km, si sono individuate 57 intersezioni. Utilizzando tale griglia si sono individuati, nell'intorno di ciascuna intersezione, i punti da rilevare, scegliendo spigoli di recinzioni o di manufatti che fossero ben distinguibili nell'immagine originale, ovvero che presentassero una netta separazione delle zone chiare (illuminate) da quelle scure (in ombra). Altre caratteristiche richieste ai punti scelti sono state la lontananza da ostacoli di qualsiasi natura in grado di creare problemi di ricezione del segnale GPS, nonché la raggiungibilità per lo stazionamento. Il progetto del rilievo è stato completato con la redazione delle monografie di ciascuno dei singoli punti sulle quali è stato riportato un estratto dell'immagine satellitare su cui si individua il punto di interesse (Fig. 3), le sue coordinate nel sistema WGS84 (World Geodetic System 1984) estratte dall'immagine stessa, le necessarie annotazioni, nonché uno schizzo planimetrico della zona del punto rilevato. Ciò rende tra l'altro possibile l'eventuale utilizzazione di navigatori satellitari per rendere più agevole il raggiungimento dello stesso punto in caso di necessità.

Data l'estensione e l'orografia del territorio in esame, caratterizzato da alternanza di zone pianeggianti a zone collinari, il rilievo dei punti è stato effettuato in quattro sessioni ognuna della durata di circa 10 ore. In particolare, sono state impiegate due squadre ciascuna dotata di una base fissa (ricevitore Trimble 5700) e due stazioni mobili (ricevitori Trimble 5700 e Trimble 4700). Il rilievo è stato eseguito nella modalità *rapido-statica*, individuando due punti come origine – rispettivamente denominati *Madonnina* e *Francavilla* - in modo che ognuno dei vettori non avesse una lunghezza superiore ai 15 km. La scelta dei punti origine è stata obbligata, non essendo risultato possibile utilizzare i vertici della rete IGM95 presenti nelle vicinanze. La collocazione dei punti rilevati è quella schematizzata in Figura 4.

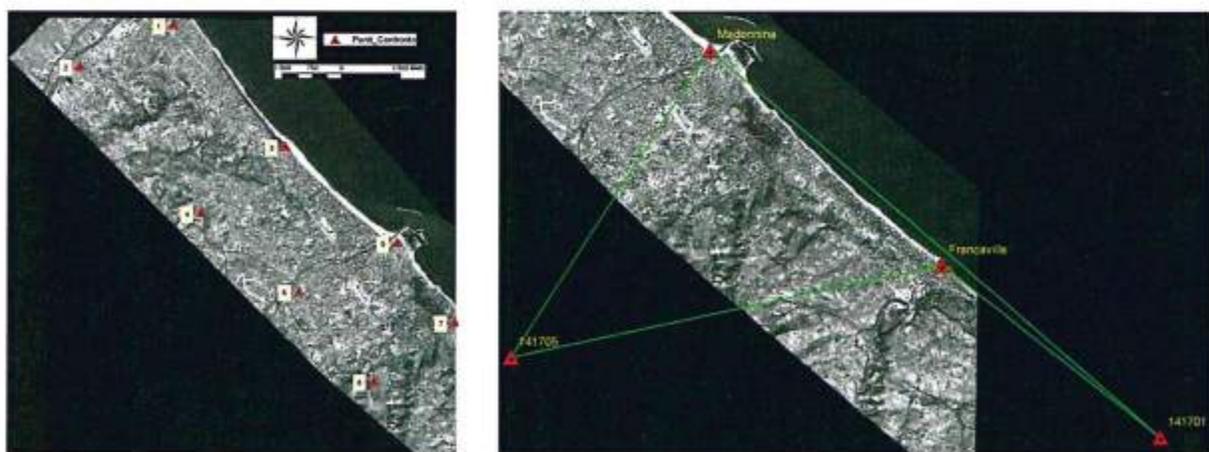


Figura 4 - Dislocazione dei punti rilevati e schema dell'inquadramento del rilievo nella rete IGM95.

L'intero rilievo è stato comunque inquadrato nella rete nazionale IGM95. Per questo inquadramento sono stati utilizzati due ricevitori fissi posizionati in corrispondenza dei vertici 141705 e 141701, con un terzo ricevitore è stata fatta stazione in modalità statica per circa un'ora e trenta minuti sui due punti origine (Fig. 4). L'elaborazione dei dati è stata eseguita utilizzando il software 'Trimble Geomatics Office v1.50' con effemeridi trasmesse. Le precisioni finali - orizzontali e verticali - delle coordinate dei punti risultano essere dell'ordine del centimetro sia in planimetria che in quota. Unica eccezione è risultata il punto OVEST\_09 le coordinate del quale sono risultate avere una precisione di 3.3 cm in planimetria e 4.6 cm in quota.

### Verifica della procedura di ortorettificazione

Condizione sicuramente sfavorevole della procedura elaborata risulta la ristrettezza della fascia di distribuzione dei GCPs. Il fatto che gran parte dell'immagine sia coperta dal mare può infatti portare il software utilizzato per la ortorettificazione a non sfruttare al massimo le potenzialità dei suoi algoritmi, pur avendo a disposizione GCPs rilevati con precisione ottimale. Ulteriore elemento sfavorevole è costituito dall'utilizzo di immagini in formato 'Standard', ovvero già corrette mediante un DTM a bassa risoluzione.

Per quanto riguarda il primo fattore - sicuramente vero dal punto di vista della fotogrammetria - si deve tuttavia tenere presente che la zona di interesse coincide con la stessa fascia di distribuzione, risultando quindi ben coperta di GCPs. Per quanto riguarda l'utilizzazione di immagini QB in formato 'Standard', l'effetto del DTM a bassa risoluzione, che in zone con notevoli variazioni altimetriche può comportare significative deformazioni planimetriche, non è apparso influire significativamente sulla linea di costa bassa - principale oggetto dello studio - sulla quale anche tale tipologia di DTM appare garantire indicazioni sufficienti. Una qualche deformazione si è invece manifestata nelle zone caratterizzate da versanti collinari.

La procedura di ortorettificazione mediante modello RPFs con RCP ha comunque previsto l'utilizzo di un DTM con una risoluzione spaziale di 5 m, ricavato dalla nuova Carta Tecnica Regionale Numerica della Regione Abruzzo (CTRN 1:5000) e riproiettato nel sistema UTM, Zona 33 Nord nel datum WGS84.

Particolare interesse è stato riservato all'analisi dei risultati ottenibili utilizzando - con i modelli RPFs con RPC - un differente numero di punti di controllo a terra, ovvero di GCPs. I diversi insiemi di punti considerati sono stati scelti in maniera di garantire una copertura comunque omogenea dell'immagine, seppure con una densità di distribuzione maggiore o minore. I risultati sono stati valutati in termini di radice quadrata della media (RMS - *Root Mean Square*) degli scarti sia dei punti di controllo a terra (GCPs), che dei punti di controllo (CP) dell'accuratezza. Ciò si è reso necessario in quanto mentre i residui dei GCPs sono funzione della precisione del modello, gli scarti sui CPs riflettono l'accuratezza estraibile da ogni singola immagine. In Figura 5 è illustrata la variabilità di entrambi i residui - nel modello RPFs con RPC utilizzato - al variare del numero dei GCPs. Come è possibile osservare, all'aumentare del numero di punti di controllo a terra non corrisponde un sensibile aumento della precisione e dell'accuratezza del modello, rispetto alle coordinate Est e Nord UTM. Un numero non elevato di GCPs risulta quindi sufficiente al raggiungimento di un'ortorettifica dell'immagine con una precisione perfettamente idonea. Si osserva come, in termini di precisione e accuratezza, i risultati ottenuti appaiano non solo perfettamente compatibili con quanto riportato in letteratura relativamente a simili sperimentazioni (Radicioni et al., 2003), ma anche leggermente più precisi. Tale maggiore precisione è imputabile alle favorevoli condizioni morfologiche della zona di interesse, ovvero una fascia costiera bassa caratterizzata da variazioni orografiche estremamente esigue. Infine, per quanto riguarda la possibilità di attuare delle indagini dettagliate nella zona costiera, si può notare come il grado di dettaglio (Fig. 2 dx) sia assolutamente idoneo a evidenziare anche evoluzioni della linea di costa.

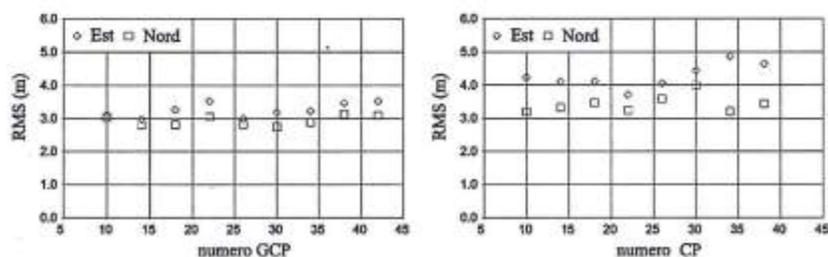


Figura 5 - Precisione (RMS dei GCP) del modello (sx) e accuratezza (RMS dei CP) delle immagini (dx) al variare dei GCP.

### Considerazioni in merito ad altre procedure di georeferenziazione

La procedura di georeferenziazione esposta si fonda sull'utilizzo di una distribuzione di densità nota di GCPs e CPs, rilevati utilizzando la tecnica GPS in modalità rapido-statica, ovvero rilevati utilizzando una tecnica in grado di garantire una precisione del rilievo *sub-metrica*, nonché la possibilità di eseguire velocemente periodici controlli.

Una possibile alternativa può essere costituita dall'individuazione ed estrazione dei GCPs e CPs da Cartografia Tecnica Regionale (CTRN) a scala 1:5000, ovvero 1:10000. Al riguardo tuttavia, occorre notare come - nei casi più aggiornati - la formazione di tale cartografia (Fondelli, 2004) prescrive, per gli elaborati prodotti alla scala 1:5000, un errore massimo planimetrico dell'ordine di 2.0 m e un errore massimo altimetrico di 1.2 m. La formazione della stessa cartografia alla scala 1:10000 prevede invece un'approssimazione metrica espressa da errori massimi in planimetria dell'ordine di 4.0 m e in altimetria di 1.8 m, con tolleranze altimetriche per le curve di livello pari a 3.5 m. Il collaudo dei lavori per la formazione di queste cartografie tecniche viene effettuato *a campione* - direttamente sul terreno - e gli elaborati vengono dichiarati accettabili soltanto quando non più del 3% di quelli esaminati risulta fuori tolleranza. Costituiscono una eccezione i vertici delle reti di raffittimento, nonché dei punti di appoggio, per i quali tutti gli elementi debbono essere rigorosamente in tolleranza, essendo stata riconosciuta e condivisa in questo limite fiduciario la possibilità di coprire gli inevitabili errori grossolani che - nell'insieme delle informazioni qualitative e quantitative costituenti gli elaborati tecnici cartografici - possono spesso verificarsi. E' inoltre da considerare come tali precisioni possono essere ritenute effettive solo nel caso di utilizzo, per la georeferenziazione di immagini satellitari, di una cartografia CTRN in formato *vettoriale*, risultando gli inevitabili processi di rettificazione cui deve soggiacere una cartografia *raster* ulteriore fonte di errore. L'eventuale scelta di tale metodologia deve quindi essere necessariamente preceduto da un esame critico delle caratteristiche della cartografia utilizzata relativamente agli scopi prefissati.

Nello caso specifico della costa abruzzese, la Regione ha provveduto a dotarsi recentemente di una cartografia in scala 1:5000 in grado di coprire l'intero suo sviluppo. In linea di principio quindi, l'aggiornamento degli elaborati prodotti avrebbe consentito l'utilizzo di tale strumento quale mezzo di georeferenziazione, ovviamente accettando gli errori plano-altimetrici indicati in precedenza. A titolo di esempio, la Figura 6 riporta il minimo e massimo scostamento rilevato tra GCPs localizzati sull'immagine satellitare originale e i loro corrispondenti individuati sia sulla CTRN che mediante rilievo GPS. Si osservi come - a rigore - la figura fornisca solamente una indicazione relativa all'ordine di grandezza della rettifica operata sull'immagine satellitare nei due casi. Il desiderio, da una parte, di ottenere una precisione sub-metrica dei punti di controllo e, dall'altra, di possedere il complessivo controllo dell'intero processo, ovvero una esatta conoscenza sulla distribuzione e sulla densità degli stessi punti, ha tuttavia portato a preferire la metodologia fondata sull'utilizzo di GCPs e CPs rilevati mediante GPS.



Figura 6 - Minimo e massimo scostamento rilevato tra punti (GCPs) localizzati sull'immagine satellitare originale e i loro corrispondenti individuati [(a), (b)] sulla Carta Tecnica Regionale (CTRN - 1:5000), ovvero [(c), (d)] mediante rilievo GPS.

### Specifiche per la messa a regime del monitoraggio della costa

Come osservato, le varie fasi della procedura presentata, elaborata facendo riferimento all'area campione del litorale di Pescara, hanno permesso di redigere le specifiche fornite alle autorità della Regione Abruzzo per una corretta georeferenziazione delle immagini satellitari QB e, conseguentemente, per la messa a regime del monitoraggio geometrico dell'intero sviluppo della costa regionale.

Tali specifiche prevedono innanzitutto che il rilevamento dei punti di controllo a terra (GCP) sia realizzato utilizzando la tecnica GPS in modalità statica, con tempi minimi di stazionamento sul singolo punto di circa 1 ora. L'ottenimento di una densità di punti ottimale viene condizionato al posizionamento di almeno un GCP ogni 2 – 4 km<sup>2</sup>, in dipendenza della morfologia del terreno. Per la scelta dei punti, le specifiche prescrivono di preferire spigoli di recinzioni o di fabbricati ben distinguibili nell'immagine considerata, nonché di evitare locazioni in prossimità delle quali siano presenti ostacoli in grado di compromettere una buona ricezione del segnale GPS. Ovviamente, si prescrive di segnalare i punti scelti attraverso opportune materializzazioni (chiodi, etc.). Per ciascun punto è poi richiesta la compilazione di una apposita monografia indicante le coordinate del punto in datum WGS84, le corrispondenti coordinate nel sistema Gauss-Boaga Fuso Est, nonché l'indicazione della porzione di immagine ove il punto è localizzato e uno schizzo planimetrico in scala opportuna. Particolare risalto viene infine dato alla valutazione della quota *ortometrica* dei punti individuati. Quest'ultima deve essere determinata tramite utilizzo di caposaldi della rete di livellazione IGM, ovvero collegando i caposaldi posti in prossimità dei vertici della rete GPS ai vertici stessi tramite livellazione geometrica di precisione. Come noto infatti, i vertici della rete GPS sono dati in coordinate ellissoidiche (*datum* WGS84) e solo tramite livellazione geometrica di precisione è possibile determinare la loro quota ortometrica, ovvero calcolare puntualmente l'effettiva *ondulazione geoidica*.

### Conclusioni

Una effettiva ed efficace gestione della costa presuppone il continuo controllo del suo stato, ovvero la pianificazione e la messa a regime di un sistema di monitoraggio atto a fornire i dati necessari all'esercizio di tale controllo. La pianificazione di un tale sistema implica l'identificazione – sulla base delle scale di interesse e dei requisiti da soddisfare – dei parametri oggetto di monitoraggio maggiormente rispondenti al ruolo di indicatori di stato. Nell'ambito di diversi progetti finanziati dalla Regione Abruzzo, e intesi a definire procedure di gestione rispondenti agli indirizzi della Comunità Economica Europea riguardanti la gestione integrata della fascia costiera, è emerso che il parametro di maggiore efficacia per la rappresentazione - a scala regionale - dello stato della costa da un punto di vista morfologico risulta la localizzazione spazio-temporale della linea di riva. È stata quindi definita una procedura 'standard' di rilievo a scala regionale che, rispondendo a requisiti quali la limitazione dell'intervallo temporale di esecuzione della misura e la precisione delle stessa, consentisse il contenimento dei costi, al fine di rendere praticabile la ripetizione annuale dell'osservazione. L'elaborazione di tale procedura, fondandosi sull'utilizzo di immagine satellitare ad alta risoluzione, ha reso necessario affrontare problematiche quali la scelta delle immagini e la georeferenziazione delle stesse. In merito alla scelta, l'analisi delle varie offerte del mercato ha portato a individuare nelle immagini riprese dalla piattaforma QB - e rilasciate nel formato 'Standard' - le immagini tecnicamente ed economicamente più rispondenti alle necessità di monitoraggio. Occorre osservare come tale scelta, maturata nel 2003, sia intrinsecamente legata alle variazioni di un mercato in continuo e repentino sviluppo. Ad esempio, la possibilità recentemente emersa di acquistare immagini 'tagliate' (vedi par. 3.1) anche in formato 'Basic' rende queste ultime maggiormente vantaggiose non solo dal punto di vista tecnico ma anche economico. Per quanto riguarda le tecniche di georeferenziazione, l'approccio RPFs con RPC si è dimostrato più robusto e più semplicemente implementabile rispetto ai modelli rigorosi, risultando inoltre determinante, nel rapporto costi-benefici, la sua larga diffusione a livello di software commerciali. Fondamentale è infine apparsa l'individuazione dei GCPs e CPs mediante tecniche di rilievo GPS, essendo risultata l'alternativa individuazione mediante utilizzo di CTRN fortemente condizionata, non solo dalla scala, ma anche dal grado di aggiornamento della cartografia utilizzata.

### Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto SICORA (Supporto Informativo per la gestione della zona COstiera della Regione Abruzzo) finanziato dalla Regione Abruzzo. Gli autori intendono ringraziare il personale del Laboratorio di Topografia dell'Università degli Studi di Perugia per i preziosi consigli e delucidazioni, nonché la Dott. Francesca Giannone dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" per il paziente supporto nelle varie prove necessarie. Si ringrazia inoltre la "Digitalglobe" per la rapidità e la precisione del supporto tecnico.

## Bibliografia

- AA.VV. (2001) - *COFIN 2001: Uso di immagini satellitari ad alta risoluzione per le analisi territoriali*. Atti a cura di Sergio Dequal. A.I.T – A.S.I.T.A. – S.I.F.E.T.
- Baiocchi V., Crespi M., De Vendictis L., Giannone F. (2004) - *Ortorettificazione di immagini satellitari ad alta risoluzione per scopi cartografici: metodologie ed implementazione di un nuovo software*. Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia, SIFET, 2.
- Belfiore S., Balgos M., McLean B., Galofre J., Blydes M., Tesh D. (2003) - *A reference guide on the use of indicators for integrated coastal area management*. UNSCO-IOC, Manuals and Guides n.45.
- Boccardo P., Borgogno Mondino E., Giulio Tonolo F. (2003) - *High resolution satellite images position accuracy tests*. Atti IEEE International geoscience and remote sensing symposium, Toulouse.
- Boccardo P., Borgogno Mondino E., Giulio Tonolo F., Lingua A. (2004) - *Orthorectification of high resolution satellite images*. Atti XX ISPRS Congress, Istanbul.
- Borgogno Mondino E., Giulio Tomolo F., Rinaudo F. (2003) - *Calibrazione di immagini satellitari ad alta risoluzione. Il metodo dei rapporti polinomiali*. Atti 7 Conferenza Nazionale ASITA, Verona.
- Caprioli M., Scognamiglio A., Strisciuglio G., Tarantino E. (2003) - *Verifica dell'accuratezza nella generazione di ortoimmagini da dati satellitari Quickbird*. Atti 7 Conferenza Nazionale ASITA, Verona.
- Cheng P., Toutin T., Zhang Y., Wood M. (2003) - *Quickbird - geometric correction, path and block processing and data fusion*. Earth Observation Magazine, 3: 24-30.
- Cina A. (2000) - *GPS: Principi, modalità e tecniche di posizionamento*. Ed. CELID.
- Consorti V., Caputi P., De Girolamo P. (1999) - *La gestione integrata delle aree costiere con tecnologie GIS*. Atti III Conferenza Nazionale ASITA, Napoli.
- Coppola F., Lo Brutto M., Villa B. (2001) - *Proposte metodologiche per il controllo di qualità di un DTM*. Rivista dell'Agenzia del Territorio, 1: 129-143.
- Dardanelli G., Emmolo D., Franco V., Lo Brutto M., Midolla P., Orlando P., Villa B. (2003) - *Uso di immagini Quickbird per la formazione di ortofotocarte a scala 1:5000*. Atti 7 Conferenza Nazionale ASITA, Verona.
- De Girolamo P., Contini P., Mondini F. (1999) - *Proposta di pianificazione e coordinamento dei monitoraggi delle spiagge*. Atti del ciclo di seminari sulle opere portuali e di difesa delle coste, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - Sezione Italiana AIPCN-PIANC.
- De Girolamo P., Caputi P., Visca C., Beltrami G.M., Venturini G., Bobbio V. (2005) - *L'esperienza di gestione integrata della costa dell'Abruzzo: il progetto S.I.Co.R.A*. Regioni & Ambiente, 7: 20-23.
- Dermanis A. e Biagi L. (2002) - *Telerilevamento - Informazione territoriale mediante immagine da satellite*. Casa Editrice Ambrosiana.
- Di K., Ma R., Li R. (2003a) - *Rational functions and potential for rigorous sensor model recovery*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS) 69: 33-41.
- Di K., Ma R., Li R. (2001) - *Deriving 3D shorelines from high resolution IKONOS satellite images with rational functions*. Proceedings of 2001 ASPRS Annual Convention, St Louis.
- Di K., Wang J., Ma R., Li R. (2003b) - *Automatic shoreline extraction from high-resolution IKONOS satellite imagery*. Proceedings of 2003 ASPRS Annual Convention, Anchorage.
- Digitalglobe (2005) - *QuickBird Imagery Products: Product Guide*. <http://www.digitalglobe.com>
- Fiani M. e Pistillo P. (2004) - *Test di georeferenziazione di immagini satellitari ad alta risoluzione: L'uso delle immagini satellitari ad alta risoluzione per le analisi territoriali*. Atti del COFIN 2001 dal titolo: "Uso di immagini satellitari ad alta risoluzione per le analisi territoriali". A.I.T – A.S.I.T.A. – S.I.F.E.T.
- Fondelli M. (2004) - *Cartografia tecnica regionale*. In Italia - Atlante dei tipi geografici, Istituto Geografico Militare, pp. 62-66.
- Fraser C.S. e Hanley H.B. (2003) - *Bias Compensation in Rational Functions for Ikonos Satellite Imagery*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS) 69: 53-57.
- Grassi S., Radicioni F., Stoppini A. (2003) - *Immagini QuickBird-2 ad alta risoluzione: comparazione qualitativa e metrica tra diversi formati commerciali*. Atti della VII Conferenza Nazionale ASITA, Verona.
- Grodecki J. e Dial G. (2003) - *Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Functions*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS), 69: 59-68.
- Kraus K. (1994) - *Fotogrammetria*. Levrotto & Bella, Torino.

- Li R., Di K., Ma R. (2003) - *3D shorelines extraction from IKONOS satellite imagery*. Marine Geodesy, 26: 107-115.
- Radicioni F., Grassi S., Mancini F. (2002) - *Utilizzazione di immagini satellitari ad alta risoluzione ai fini cartografici*. Atti VI Conferenza Nazionale ASITA. Perugia.
- Robertson B.C. (2003) - *Rigorous geometric modeling and correction of Quickbird imagery*. Atti IEEE International geoscience and remote sensing symposium, Toulouse.
- Rondella R., Forlani G., Remondino F. (2005) - *Photogrammetry for geological applications: automatic retrieval of discontinuity orientation in rock slopes*. Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging SPIE. 5665: 17-27.
- Sylos Labini, G. (2003) - *Aereo vs satellite*. Cartographica, 2.
- Toutin T. (2003) - *Error Tracking in Ikonos Geometric Processing Using a 3D Parametric Model*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS), 69: 43-51.
- Toutin T. (2004) - *Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods*. International Journal of Remote Sensing, 25: 1893-1924.
- Toutin T. e Cheng P. (2002) - *Quickbird - A milestone for high resolution mapping*. Earth Observation Magazine, 4: 14-18.
- Università degli Studi di L'Aquila (1998) - *Rapporto N. 1 – Stato della zona costiera abruzzese*, Progetto RICAMA.

Manoscritto ricevuto il 29/3/2006; accettato il 24/7/2006.

## Repertorio bibliografico delle pubblicazioni di dinamica dei litorali relative alle coste marchigiane 1982 - 2005<sup>1</sup>

- Ardizzone G. D., Belluscio A. e Fabi G. (2003) - *Caratterizzazione batimetrica e geomorfologica dei fondali antistanti il promontorio del Monte Conero*. Quad. Ist. Ric. Pesca Marittima, 1: 19-32.
- Aringoli D., Bisci C., Cantalamessa G., Di Celma C., Farabollini P., Fazzini M., Gentili B., Materazzi M. e Pambianchi G. (2003) - *Recent Variations of Italian Central Adriatic Coastline*. In: Castaldini D., Gentili B., Materazzi M. e Pambianchi G. (Eds). Proceedings Workshop on "Geomorphological Sensitivity And System Response". International Association of Geomorphologists-Iag. VIII Italian-Romanian Workshop on Geomorphology (With The Participation of French and Belgian Delegations). Camerino-Modena Apennine (Italy), 4<sup>th</sup>-9<sup>th</sup> July 2003, pp. 13-20.
- Aringoli D., Calista M., Crescenti U., Gentili B., Pambianchi G. e Sciarra N. (2002) - *Modelling of two complex gravitational phenomena in marchean coastal areas (Central Italy)*. In: "Instability - Planning and Management". Thomas Telford, London, pp. 195-202.
- Basili R., Valensise G., Vannoli P. e Guidoboni E. (2002) - *The Ancona-Rimini Coastal Belt (Central Italy): Blind To Faults, Deaf To Earthquakes*. Esc Meeting, Genoa (Italy), Abstract Volume.
- Borocci M.C., Fruzzetti M.E., Mobbili E., Paccapelo A., Polonara L. (2001) - *Convivere con le frane: la baia di S. Michele - Sassi Neri*. Accademia Nazionale Dei Lincei, XIX Giornata dell'Ambiente, Convegno "Il Dissesto Idrogeologico: Inventario e Prospettive", 5 Giugno 2001.
- Borocci M.C., Fruzzetti M.E., Mobbili E., Paccapelo A. e Polonara L. (2002) - *Instability in an area park: naturalistic protection and safeguarding tourism-economic productivity*. Conference Proc. International Geotechnical Conference "Instability - Planning & Management", May 20-23, 2002, Isle of Wight, UK.
- Borraccini F., De Donatis M., Di Bucci D., Mazzoli S., Megna A., Nesci O., Santini S., Savelli D., Tramontana M. e Triggiani P. (2002) - *Analisi della tettonica quaternaria nel basso bacino del Metauro e nell'offshore Adriatico (Area Nord-Marchigiana esterna) attraverso l'integrazione di dati sismici, geomorfologici, stratigrafici e strutturali*. Studi Geologici Camerti, 2: 29-43.
- Cancelli A., Marabini F., Pellegrini M. e Tonnetti G. (1986) - *Incidenza delle frane sull'evoluzione della costa adriatica da Pesaro a Vasto*. Mem. Soc. Geol. It., 27: 555-568.
- Cantalamessa G. e Di Celma C. (2004) - *Sequence response to syndepositional regional uplift: insights from high-resolution sequence stratigraphy of late early Pleistocene strata, Periadriatic Basin, central Italy*. Sedimentary Geology, 164: 283-309.
- Carbognin L., Cipriani M. e Marabini F. (1989) - *First results of a new shore protective work installed along the eastern Italian coast*. The Sixth Symposium on coastal and ocean management, Coastal Zone '89. Charleston, U.S.A. Volume Coastline of Italy, pp. 170-176.
- Carnevali L. e Nesci O. (2005) - *Il Paesaggio Marchigiano, Esercizi di Lettura*. Quattro Venti Ed., 87 pp.
- Cessari A., Marabini F. e Morigi C. (1997) - *Caratteri evolutivi della costa adriatica da Pesaro a Vasto*. Atti 1<sup>a</sup> Conferenza Nazionale Asita. Parma, pp. 272-277.
- Ciabatti M. e Curzi P.V. (2003) - *Caratteri geologici, geomorfologici e sedimentologici dell'area costiera del Monte Conero*. Quad. Ist. Ric. Pesca Marittima, 1: 3-18.
- Coccioni R. (a cura di) (2003) - *Verso la gestione integrata della costa del Monte San Bartolo: risultati di un progetto pilota*. Quaderni del Centro di Geobiologia, Arti Grafiche Stibu, Urbani, 1, 163 pp.

<sup>1</sup> Per un errore di impaginazione, nel Repertorio Bibliografico pubblicato nel n. 10 di Studi costieri mancano i più recenti titoli relativi alle Marche. Pubblichiamo qui l'elenco completo quale risulta dalle segnalazioni effettuate dai vari collaboratori.

- Coccioni R. (a cura di) (2005) - *La dinamica evolutiva della fascia costiera tra le foci dei fiumi Foglia e Metauro: verso la gestione integrata di una costa di elevato pregio ambientale*. Quaderni del Centro di Geobiologia, Università Degli Studi di Urbino "Carlo Bo", Arti Grafiche Stibu, Urbani, 3, 95 pp.
- Coccioni R., Balsamo M., Colantoni P., Covazzi A., Moretti E., Nesci O., Brugiapaglia E., Mencucci D., Mosci D., Venturati A., Bernardini S., Corso S., De Marchi D., Pongetti T., Bittoni P., Baldelli G. e Bucci C. (2003) - *La dinamica evolutiva della costiera del Monte San Bartolo: un progetto pilota per lo studio e la programmazione strategica finalizzata alla conservazione e alla sostenibilità della pianificazione ambientale su coste di elevato pregio*. Progetto Coste Italiane Protette, La Gestione Integrata delle coste nell'esperienza marchigiana. Quaderni Coste Italiane Protette, 3: 91-112.
- Colantoni P., Mencucci D. e Nesci O. (2004) - *Coastal processes and cliff recession between Gabicce and Pesaro (Northern Adriatic Sea): A case history*. *Geomorphology*, 62: 257-268.
- Coltorti M. e Principi M. (2003) - *Primo rapporto sullo stato dell'ambiente, Report, Settore geologico ambientale*. Comune di Senigallia, Servizio Urbanistica, pp. 114-141.
- Cushman-Roisin B., Miroslav G. Poulain P.M. e Artegiani A. (Eds) (2001) - *Physical Oceanography of the Adriatic Sea. Past, Present and Future*. Kluwer Academic Publishers, pp. 304.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1987) - *Analisi ambientale quantitativa dei litorali marchigiani fra Gabicce e Ancona. Livello del rischio naturale e del degrado, distribuzione dei sedimenti e loro possibile impiego per ripascimenti artificiali*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 106: 377-423.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1993) - *The distribution of sediments and the identification of residual materials on the seabottom Southern Marches (Italy)*. *Mar. Geol.*, 113: 273-281.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1994) - *A model for determining the classification, vulnerability and risk in the southern coastal zone of the Marche (Italy)*. *Journal Coastal Research*, 10: 18-29.
- Dal Cin R. e Simeoni U. (1994) - *Degrado, ricerche di sabbie in mare e possibili interventi nei litorali fra Ancona e San Benedetto del Tronto (Mare Adriatico)*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 113: 95-104.
- Dal Cin R., Pedone F. e Simeoni U. (1984) - *Evolution morphologique et distribution des sédiments dans les littoraux des Marches (Adriatique Centrale, Italie)*. In: XVIII Journées de l'Hydraulique, Question n° III, rapport 8, Marseille. Pp. 1-8.
- Dall'Aglio P.L. e Nesci O. (2004) - *La foce dell'Arzilla e il problema del porto romano di Fano*. V Congresso di Topografia Antica. I porti del Mediterraneo in età classica. Roma, Cnr, 5-6 Ottobre 2004.
- Della Seta M., Fredi P., Lupia Palmieri E., Nesci O., Savelli D. e Troiani F. (2005) - *Quantitative assessment of the relationships between quaternary fluvial and marine terraces in the northern adriatic coast of Marche Region (Italy)*. Sixth International Conference On Geomorphology, Saragoza, Sept. 7-11, 2005. (Abstract).
- Di Bucci D., Mazzoli S., Nesci O., Savelli D., Tramontana M., De Donatis M. e Borraccini F. (2003) - *Active deformation in the frontal part of the northern Apennines: insights from the lower Metauro river basin area (northern Marche, Italy) and adjacent adriatic off-shore*. *Journal of Geodinamics*, 36: 213-238.
- Elmi C., Colantoni C., Gabbianelli G. e Nesci O. (2002) - *Holocene shorelines along the central adriatic coast (Italy)*. *Geoacta*, 1: 27-36.
- Elmi C., Fanucci F., Nesci O., Beer P. e Pignocchi A. (1994) - *Evoluzione olocenica della linea di riva dal F. Reno al F. Potenza*. *Il Quaternario*, 7: 305-309.
- Elmi C., Nesci O. e Tentoni L. (1992) - *La piana del T. Conca e le pianure minori nord-marchigiane: forme, depositi ed evoluzione*. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 14 (1991), 1: 113-117.
- Farabollini P., Gentili B. e Pambianchi G. (2000) - *Impatto antropico e dinamica fluviale nei bassi fondovalle delle Marche centro-meridionali e dell'Abruzzo settentrionale*. Atti conv. "Le pianure. conoscenza e salvaguardia", Ferrara, 9-11 Novembre 1999, pp. 51-55.
- Farabollini P. e Tarli A., (2002) - *The Portonovo landslide: example of mass movement affecting Adriatic sea cliff*. in: Gentili et al., eds, 2002. *Natural hazard on built-up areas*. Proc. Intensive Course, September 2000, pp. 111-116.
- Giorgi G. e Marabini F. (1986) - *Characters of the coast from the Gabicce promontory to the mouth of the Tronto river*. Atti XXII Congresso A.I.C., Mantova. Pp. 39-45.
- Marabini F. (1984) - *Tendenza evolutiva della costa pesarese*. Convegno sui problemi ambientali della costa. Pesaro. Pp. 1-13.
- Marabini F. e Santaniello A. (1992) - *Risultati sperimentali di un nuovo tipo di difesa contro l'erosione costiera*. Atti del XXVIII Congresso A.I.C. Fabriano. *Boll. A.I.C.* 84-85, pp. 135-139.

- Marini M., Fornasiero P. e Artegiani A. (2003) - *Principali parametri fisici e chimici della fascia costiera del promontorio del Conero*. Quad. Ist. Ric. Pesca Marittima, 1: 33-46.
- Mencucci D., Colantoni P. e Nesci O. (2003) - *Late quaternary evolution of the Foglia River delta system (Northern Marche - Italy)*. Il Quaternario Italian Journal of Quaternary Sciences, 16: 35-42.
- Moschini R. (a cura di) (2003) - *La gestione integrata delle coste nell'esperienza marchigiana*. I quaderni di Progetto Coste Italiane Protette, 3, 150 pp.
- Nesci O. (2003) - *Evoluzione geomorfologica della falesia costiera del Monte San Bartolo (Marche Settentrionali)*. In: Verso la gestione integrata della costa del Monte San Bartolo: risultati di un progetto pilota. A cura di R. Coccioni. Quaderni del Centro Di Geobiologia, Arti Grafiche Stibu, Urbania, 1: 41-53.
- Nesci O. e Corso S. (2004) - *La cartografia geomorfologica come base per la gestione integrata dell'ambiente costiero: il caso di Monte San Bartolo (Marche Settentrionali)*. In: Bartolini C., Bosi C., Carobene L., Catani F., Cavarretta N., Ciaranfi N. e Coltorti M., Eds., "La Geologia Del Quaternario In Italia: Temi Emergenti E Zone D'ombra", Abstracts comunicazioni orali e poster convegno nazionale Aiqua - C.N.R., Istituto Di Geologia Ambientale e Geoingegneria, Roma, 16-18 Febbraio 2004.
- Nesci O. e Savini C. (2005) - *Analisi geomorfologica del Colle Ardizio ed evoluzione della linea di riva tra Pesaro e Fano*. In: Coccioni R. (a cura di), "La dinamica evolutiva della fascia costiera tra le foci dei fiumi Foglia e Metauro: Verso la gestione integrata di una costa di elevato pregio ambientale". Quaderni Del Centro Di Geobiologia, Università Degli Studi Di Urbino "Carlo Bo", Arti Grafiche Stibu, Urbania, 3: 29-39.
- Nesci O. e Veneri F. In AA. VV. (2001) - *Guide Geologiche Regionali a piedi. Appennino Umbro-Marchigiano. Il Parco Naturale di S. Bartolo*. A Cura Della Società Geologica Italiana. Be-Ma Ed. Milano, pp. 11-18.
- Primavera E. e Zanuttigh B. (2004) - *Ipotesi di rinaturalizzazione della spiaggia di Gabicce Mare*. Studi Costieri, 8: 89-109.
- Regione Marche (1982) - *Studio generale per la difesa delle coste: prima fase*. Rapporti di settore, volume II°, Ed. AQUATER, S. Lorenzo in Campo (PS), 706 pp.
- Regione Marche (2004) - *Piano di gestione integrata delle aree costiere*. Servizio Progettazione DO.PP. V.I.A. Gestione Integrata Aree Costiere.
- Sarti M. e Fraboni R. (2003) - *La dinamica evolutiva della costiera del Conero: programma di indagine in aree campione per la gestione integrata di coste di pregio*. Progetto Coste Italiane Protette, La Gestione Integrata delle coste nell'esperienza marchigiana. Quaderni Coste Italiane Protette, 3: 113-125.
- Savini C., Moretti E., Nesci O., Savelli D., Teodori S. e Troiani F. (2006) - *Il parco naturale del monte San Bartolo. Mostra "Viaggio nella Geologia d'Italia"*. Convegno Nazionale dell'associazione italiana di Geologia e Turismo, Bergamo, 26-27 Maggio 2006.

## Studio dell'evoluzione del litorale molisano meridionale attraverso un'applicazione GIS

*Tesi di Laurea di:* Stefano Cardinali

*Relatore:* Claudia Romagnoli

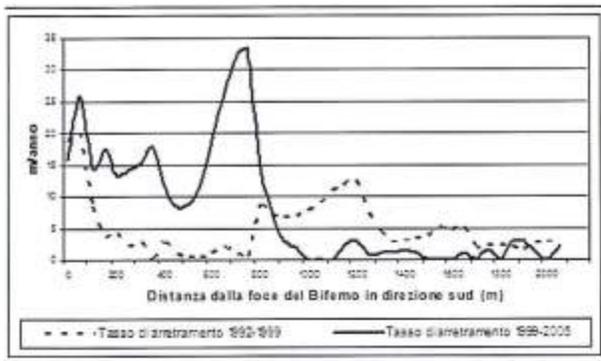
*Correlatore:* Edi Valpreda

Università degli Studi di Bologna, Facoltà di Scienze MFN, Corso di Laurea in Scienze Geologiche, Anno Accademico 2004-2005.

Il presente lavoro di tesi è rivolto all'analisi dell'evoluzione del settore meridionale del litorale molisano, in relazione agli effetti naturali ed antropici degli ultimi 50 anni, influenzandone la vulnerabilità ai fenomeni di rischio geologico. Il tratto di costa oggetto di questo studio si estende nell'Adriatico centro-meridionale per una lunghezza di circa 15 km, tra il porto di Termoli e la foce del torrente Saccione; esso è caratterizzato, ad eccezione del promontorio su cui sorge il centro abitato di Termoli, da una costa bassa e sabbiosa ed una piana costiera delimitata, verso l'interno, da rilievi collinari debolmente degradanti verso mare (Aucelli et al., 2004). L'arenile presenta un'ampiezza media di circa 20 m e una duna sabbiosa discontinua a ridosso; per quanto riguarda il regime meteomarinico il vento prevalente è rappresentato dal Maestrale, mentre un ruolo secondario è rivestito dai venti di Scirocco.

Se il tratto di litorale preso in esame si poteva considerare originariamente far parte di un'unica Unità Fisiografica naturale, che si estendeva dalla zona di "Punta Penna" di Vasto (Abruzzo), a nord, al promontorio "Pietre Nere" (Gargano), a sud, oggi, a controllare la dinamica costiera dell'area considerata, oltre alle morfologie naturali, concorrono anche le opere di ingegneria idraulica, le quali hanno creato una serie di Sub-Unità Fisiografiche (SUF). Lo scambio di sedimenti tra queste SUF è fortemente impedito dalle opere trasversali, che ostacolano il trasporto solido lungo riva, cosicché dal punto di vista del bilancio sedimentario, ciascuna SUF si presenta come un sistema a sé stante. L'analisi dei dati è stata pertanto articolata all'interno di ogni singola SUF e su diversi intervalli temporali, allo scopo di ricostruire in dettaglio l'evoluzione della costa ad una scala spazio-temporale di maggiore definizione.

Lo studio è stato sviluppato in modo da sfruttare le più idonee ed innovative tecniche di acquisizione, trattamento ed elaborazione dei dati, al fine di valutare in modo quantitativo la mobilità della linea di riva. Il lavoro si è basato sul reperimento, adeguamento (in termini di formato, sistemi di proiezione e Datum) ed analisi di tutti i dati pregressi disponibili (cartografia su supporto cartaceo e numerico, documentazioni aerofotogrammetriche, ecc.) integrati con nuovi rilievi della linea di riva, effettuati con tecniche di posizionamento DGPS. Sulla base dei documenti reperiti e dei dati rilevati è stata quantificata entro GIS (ArcGIS 9.2) la variabilità della linea di riva lungo il litorale considerato, nel "medio" termine (1954-99) e negli intervalli temporali intermedi (1954-75; 1975-92; 1992-99; 1999-2005). Le elaborazioni, effettuate con tecniche di analisi spaziale, hanno consentito di analizzare la variabilità di uno o più set di dati rispetto alla posizione dei dati stessi nello spazio; in particolare sono state calcolate le entità degli spostamenti (ed i relativi tassi) della linea di riva, attraverso transetti disposti lungo la costa ad una distanza reciproca di 50 m, utilizzando un applicativo sviluppato dall'USGS (*U.S. Geological Survey*), chiamato DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*, Thieler et al., 2005). Oltre al confronto delle posizioni relative della linea di riva con elementi lineari, per ogni coppia di linee di costa considerata, è stata calcolata l'entità delle variazioni areali dell'arenile. Inoltre è stato creato un archivio geografico delle opere a mare (di difesa e porti), inserite come oggetti grafici e caratterizzate da informazioni, quali la tipologia, la lunghezza, l'anno di costruzione, l'Ente attuatore, gli interventi di manutenzione ecc. Tali dati, di cui non esisteva sinora neppure un archivio cartaceo, integrati con le variazioni lineari e areali del litorale, sono stati organizzati in una banca dati relazionale che ha permesso di valutare le tendenze osservate e di confrontarle con la crescente antropizzazione del litorale; la banca dati realizzata, proponendosi come un modulo operativo aperto con possibilità di aggiornamento ed ulteriore sviluppo dei contenuti informativi, rappresenta un potente e moderno strumento per il controllo e il monitoraggio dello stato della costa e dell'efficacia delle politiche di difesa.



Confronto fra i tassi di arretramento registrati nel periodo 1992-99 e 1999-2005 lungo il tratto di litorale sottoflutto alla foce del Fiume Biferno.

A partire dagli anni '70, il tratto costiero in esame è stato soggetto ad un susseguirsi di interventi di difesa, essenzialmente mediante strutture di tipo rigido; in seguito si assiste ad un calo degli interventi di edificazione di scogliere frangiflutto longitudinali a favore di quelle trasversali (sia soffolte che emergenti). Tuttora inoltre, si osserva come le scogliere aderenti rappresentino una tipologia di difesa ancora piuttosto diffusa e come siano ancora ampiamente adottati interventi di armatura delle foci fluviali, nonostante questi inducano delle alterazioni nel naturale pattern di trasporto dei sedimenti lungo costa. Lungo il litorale investigato non solo sono presenti numerosissime opere, ma nel corso degli anni si sono susseguiti interventi che, nel tentativo di recuperarne l'efficacia, ne hanno profondamente modificato dimensioni, posizione e tipologia, conducendo spesso ad una situazione caotica dal punto di vista progettuale e dell'impatto sulla costa, contribuendo al diffondersi dei fenomeni erosivi stessi. La mancanza di adeguati apporti fluviali è probabilmente il fattore che maggiormente ha influito sull'evoluzione della costa, dato che i fenomeni erosivi hanno inizio e risultano più accentuati proprio in corrispondenza delle foci dei maggiori corsi d'acqua, che vengono progressivamente smantellate. Dall'analisi dei dati meteorologici, pare che la diminuzione dell'apporto fluviale sia da imputarsi maggiormente ad interventi antropici sul reticolo idrografico superficiale (bonifiche, estrazioni in alveo, realizzazione di invasi, regimazione delle portate, ecc.). Bruschi mutamenti morfologici dell'area costiera sono avvenuti in relazione ad eventi meteorologici "estremi" (es. Gennaio 2003) che evidenziano un'eccessiva vulnerabilità del litorale, sottolineata, ad esempio, dall'elevata pendenza dei fondali. La ridotta resilienza del litorale deriva anche dallo sbancamento delle dune costiere, così come dall' "irrigidimento" della spiaggia, a seguito della realizzazione di infrastrutture viarie, di edifici e delle opere di difesa costiera.

Dai dati risulta che i fenomeni erosivi appaiono ampiamente diffusi e riconoscibili nell'intera area in esame, già nel periodo '54 e '75, interessando il 78% della SUF che comprende la foce del principale corso d'acqua dell'area, il fiume Biferno; un ulteriore incremento dei tratti affetti da erosione caratterizza tutto il litorale considerato fino ai primi anni '90, seguito da una relativa decelerazione nel periodo 1992-99.

Dai dati rilevati con tecniche DGPS (2003 - 2005), si conferma una generale tendenza all'arretramento della linea di riva; le manifestazioni erosive, in particolare, risultano estremamente rilevanti per il tratto immediatamente sottoflutto alla foce del Biferno, dove si registra, negli ultimi 6 anni, un arretramento massimo di circa 200 metri (Fig. 1).

## Risposta di una pocket beach ad input sedimentari di alta intensità e bassa frequenza

Tesi di laurea di: **Valentina Rosas**

Relatore: **Enzo Pranzini**

Università degli Studi di Firenze, Corso di Laurea in Scienze Naturali, Anno Accademico 2004 - 2005.

Obiettivo del presente lavoro è stato l'analisi della risposta di una *pocket beach* ad input sedimentari ad alta intensità e bassa frequenza, ovvero all'immissione consistente di materiali dovuta ad una piena con elevato tempo di ritorno.

L'area di studio è la spiaggia di Procchio, ubicata sulla costa settentrionale dell'Isola d'Elba, che, in seguito all'alluvione del 4 settembre 2002, ha subito cambiamenti consistenti di carattere sia morfologico che sedimentologico. I cambiamenti morfologici di maggiore rilievo consistono in un generale avanzamento della linea di riva, quelli sedimentologici in un aumento delle dimensioni medie dei sedimenti, delle Dimensioni del primo percentile e della Percentuale di frazione fine; tutto ciò si traduce in una diminuzione della Classazione dei materiali costituenti la spiaggia.

Per comprendere i cambiamenti che hanno interessato il Golfo in esame, dobbiamo tener conto che l'Isola d'Elba ha un carattere prevalentemente montuoso ed è perciò contraddistinta da bacini idrografici di modeste dimensioni e dall'abbondanza di corsi d'acqua a carattere torrentizio.

Durante l'alluvione del settembre 2002 in otto ore è piovuta una quantità di acqua superiore alla media mensile ed i piccoli torrenti presenti, normalmente in secca durante questo periodo dell'anno, hanno raggiunto una portata eccezionalmente elevata.

A causa del forte dislivello del bacino idrografico, la piena, con un tempo di ritorno stimato di circa 100 anni, ha assunto una potente forza erosiva e distruttiva, provocando gravi danni. Il principale corso d'acqua con



La spiaggia di Procchio il giorno seguente l'alluvione.

## Norme per gli Autori

**Studi costieri** pubblica articoli scientifici originali in lingua italiana su argomenti relativi alla dinamica e difesa dei litorali ed alla gestione integrata della fascia costiera. Gli articoli scientifici sono sottoposti a revisione da parte di due esperti indicati dal Comitato scientifico.

**Studi costieri** pubblica anche Note tecniche e Riassunti di tesi di Laurea e di Dottorato di ricerca inerenti gli stessi temi. **Studi costieri** ospita inoltre rapporti sull'attività svolta da Amministrazioni pubbliche in materia di gestione integrata della fascia costiera. Questi ultimi due tipi di contributi sono soggetti solo ad una revisione di tipo redazionale.

Gli Autori degli articoli sono pregati di rispettare le seguenti norme. Gli articoli non redatti in piena conformità con esse non potranno essere presi in considerazione per la pubblicazione.

I manoscritti devono essere inviati in triplice copia con allegate figure e tabelle. Dopo l'accettazione deve essere inviata la copia definitiva su dischetto o per posta elettronica secondo le istruzioni riportate in seguito.

**Titolo** - Massimo 150 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

**Titolo corrente** - Massimo 80 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

**Autore/i** - Nome e Cognome per esteso, seguito da un numero in apice per indicare l'eventuale Istituto di appartenenza ed il relativo indirizzo.

**Riassunto** - Non più di 2.000 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

**Parole chiave** - Inserire 5 - 8 parole chiave, possibilmente non già comprese nel titolo.

**Abstract** - Riassunto, anche esteso, in lingua inglese di non più di 5.000 caratteri.

**Keywords** - In questo caso le parole chiave possono anche essere la traduzione di termini compresi nel titolo.

**Stile** - Adeguarsi allo stile dei lavori pubblicati su questo numero. Tutti i testi, compreso il titolo generale e quello dei paragrafi, devono essere scritti in Maiuscolo e minuscolo. Non inserire caratteri strani, di formato diverso o sottolineati. Il neretto è utilizzato solo per il titolo dei paragrafi. Eventuali sottoparagrafi possono portare un titolo in corsivo neretto. Non inserire righe bianche nel testo se non alla fine dei paragrafi e dei sottoparagrafi.

Evitare il più possibile i rientri e, comunque, farne di un solo ordine. Gli elenchi puntati sono identificati da -, 1) oppure a); ogni elemento dell'elenco è chiuso con ; salvo l'ultimo che chiude con un punto.

**Formule** - Se possibile utilizzare il formato testo; in alternativa l'editore di formule di Word impostando il carattere Garamond corpo 11 chiaro (copro 9 nero se le formule sono incluse in una didascalia di figure o di tabella). Utilizzare caratteri in neretto e corsivo solo se imposto dalla nomenclatura internazionale.

**Tabelle** - I caratteri alfabetici/numerici per le tabelle sono in stile Garamond corpo 11. Le Tabelle sono identificate con Tabella n, oppure (Tab. n) se fra parentesi. Devono essere precedute da una didascalia. Non inserire tabelle in forma di immagini.

**Figure (fotografie, schemi, diagrammi)** - Salvo accordi specifici con la Redazione, vengono pubblicate solo figure in bianco e nero. Le Figure sono identificate con Figura n, oppure (Fig. n) se fra parentesi. Tutte le figure devono avere una didascalia. La larghezza massima a stampa delle figure è 15 cm. Ad eccezione delle figure stampate a giustezza piena, tutte le altre non potranno avere una base superiore a 10 cm. La Redazione è a disposizione per discutere aspetti tecnici relativi a questo punto.

**Note a piè di pagina** - Sono da evitare il più possibile e, se lunghe o numerose, verranno riportate in corpo minore in fondo all'ultima pagina dell'articolo con richiami numerici nel testo. Indicazioni di Progetti e Finanziamenti verranno inserite prima della Bibliografia con gli eventuali Ringraziamenti.

sbocco nel Golfo ha dato luogo alla formazione di un fan delta a cui le onde hanno subito conferito una forma anulare.

Lo studio ha contemplato la ricostituzione dell'evoluzione della linea di riva sul medio e breve termine e l'analisi dei sedimenti di spiaggia confrontando le loro caratteristiche tessiturali prima e dopo l'evento. Si è potuto così dimostrare che il litorale del Golfo di Procchio era soggetto ad una modesta ma costante erosione, interrotta solo da un ripascimento artificiale effettuato nel 1999. In termini di bilancio sedimentario complessivo, dal 1881 al 2002 viene persa una superficie di spiaggia pari a 45.000 m<sup>2</sup>, che l'evento alluvionale non è stato in grado di riequilibrare, in quanto ha portato soltanto ad un aumento di spiaggia di circa 15.000 m<sup>2</sup>.

Per quanto riguarda le caratteristiche granulometriche, si è potuto osservare che nel 1999 il Golfo era caratterizzato da *sabbie medio-grossolane* generalmente *ben classate*, con una Percentuale di frazione fine che non superava mai il 3%. Era comunque presente un'anomalia in corrispondenza della foce del Fosso del Gualdarone, dove vi era una piattaforma costiera costituita da ciottoli.

Subito dopo l'alluvione del 2002, si ritrovano anche sedimenti *molto poco classati*, con dimensioni medie comprese fra quelle delle *sabbie fini*, sui fondali, a quelle dei *ciottoli grossolani*, in prossimità della battigia; la percentuale di frazione fine arriva a superare il 20%.

Nel 2004 si osserva una tendenza al ritorno alle condizioni pre-evento, in particolare sui fondali, dove si ha una perdita della frazione fine (che supera solo in un caso il 10%) che comporta un miglioramento della Classazione. Sulla battigia, al contrario, si registra un aumento delle dimensioni medie, dovuto ad un accumulo della frazione ciottolosa.

Tutto ciò porta a considerare la spiaggia in una sorta di equilibrio; in cui i periodi di alimentazione sono legati agli eventi alluvionali; ipotesi non facilmente dimostrabile a causa della mancanza di linee di riva attendibili precedenti il 1881.

L'osservazione del comportamento della spiaggia di Procchio in risposta al fenomeno alluvionale ci ha fatto pensare che tale Golfo subisca periodicamente un ingente ripascimento con conseguente avanzamento della linea di riva. Successivamente, il moto ondoso rimodella e in parte asporta tali materiali, con un ciclo che supponiamo oscillare attorno a un punto di equilibrio.

Ciò che appariva come un'erosione potrebbe essere un ritorno alle condizioni di inizio del ciclo crescita – erosione, in cui gli avanzamenti della linea di riva sono associati ad input sedimentari di alta intensità e bassa frequenza, mentre gli arretramenti sono imputabili all'asportazione dei materiali da parte del moto ondoso. Complessivamente si può pensare ad un trend evolutivo con un equilibrio spostato verso l'erosione della pocket beach, in cui le alluvioni corrispondono ad eventi puntuali positivi per il bilancio, ma non sufficienti ad invertire la tendenza.

Infatti, la modificazione dell'uso del suolo dell'ultimo secolo, con i rimboschimenti delle aree un tempo dedicate all'agricoltura e la conseguente diminuzione dell'erosione del suolo, potrebbe aver contribuito a spostare l'equilibrio verso l'erosione della spiaggia, inteso in termini di mancato apporto sedimentario.

## Norme per gli Autori

**Studi costieri** pubblica articoli scientifici originali in lingua italiana su argomenti relativi alla dinamica e difesa dei litorali ed alla gestione integrata della fascia costiera. Gli articoli scientifici sono sottoposti a revisione da parte di due esperti indicati dal Comitato scientifico.

**Studi costieri** pubblica anche Note tecniche e Riassunti di tesi di Laurea e di Dottorato di ricerca inerenti gli stessi temi. **Studi costieri** ospita inoltre rapporti sull'attività svolta da Amministrazioni pubbliche in materia di gestione integrata della fascia costiera. Questi ultimi due tipi di contributi sono soggetti solo ad una revisione di tipo redazionale.

Gli Autori degli articoli sono pregati di rispettare le seguenti norme. Gli articoli non redatti in piena conformità con esse non potranno essere presi in considerazione per la pubblicazione.

I manoscritti devono essere inviati in triplice copia con allegate figure e tabelle. Dopo l'accettazione deve essere inviata la copia definitiva su dischetto o per posta elettronica secondo le istruzioni riportate in seguito.

**Titolo** - Massimo 150 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

**Titolo corrente** - Massimo 80 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

**Autore/i** - Nome e Cognome per esteso, seguito da un numero in apice per indicare l'eventuale Istituto di appartenenza ed il relativo indirizzo.

**Riassunto** - Non più di 2.000 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

**Parole chiave** - Inserire 5 - 8 parole chiave, possibilmente non già comprese nel titolo.

**Abstract** - Riassunto, anche esteso, in lingua inglese di non più di 5.000 caratteri.

**Keywords** - In questo caso le parole chiave possono anche essere la traduzione di termini compresi nel titolo.

**Stile** - Adeguarsi allo stile dei lavori pubblicati su questo numero. Tutti i testi, compreso il titolo generale e quello dei paragrafi, devono essere scritti in Maiuscolo e minuscolo. Non inserire caratteri strani, di formato diverso o sottolineati. Il neretto è utilizzato solo per il titolo dei paragrafi. Eventuali sottoparagrafi possono portare un titolo in corsivo neretto. Non inserire righe bianche nel testo se non alla fine dei paragrafi e dei sottoparagrafi.

Evitare il più possibile i rientri e, comunque, farne di un solo ordine. Gli elenchi puntati sono identificati da -, 1) oppure a); ogni elemento dell'elenco è chiuso con ; salvo l'ultimo che chiude con un punto.

**Formule** - Se possibile utilizzare il formato testo; in alternativa l'editore di formule di Word impostando il carattere Garamond corpo 11 chiaro (copro 9 nero se le formule sono incluse in una didascalia di figure o di tabella). Utilizzare caratteri in neretto e corsivo solo se imposto dalla nomenclatura internazionale.

**Tabelle** - I caratteri alfabetici/numerici per le tabelle sono in stile Garamond corpo 11. Le Tabelle sono identificate con Tabella n, oppure (Tab. n) se fra parentesi. Devono essere precedute da una didascalia. Non inserire tabelle in forma di immagini.

**Figure (fotografie, schemi, diagrammi)** - Salvo accordi specifici con la Redazione, vengono pubblicate solo figure in bianco e nero. Le Figure sono identificate con Figura n, oppure (Fig. n) se fra parentesi. Tutte le figure devono avere una didascalia. La larghezza massima a stampa delle figure è 15 cm. Ad eccezione delle figure stampate a giustezza piena, tutte le altre non potranno avere una base superiore a 10 cm. La Redazione è a disposizione per discutere aspetti tecnici relativi a questo punto.

**Note a piè di pagina** - Sono da evitare il più possibile e, se lunghe o numerose, verranno riportate in corpo minore in fondo all'ultima pagina dell'articolo con richiami numerici nel testo. Indicazioni di Progetti e Finanziamenti verranno inserite prima della Bibliografia con gli eventuali Ringraziamenti.

sbocco nel Golfo ha dato luogo alla formazione di un fan delta a cui le onde hanno subito conferito una forma anulare.

Lo studio ha contemplato la ricostituzione dell'evoluzione della linea di riva sul medio e breve termine e l'analisi dei sedimenti di spiaggia confrontando le loro caratteristiche tessiturali prima e dopo l'evento. Si è potuto così dimostrare che il litorale del Golfo di Procchio era soggetto ad una modesta ma costante erosione, interrotta solo da un ripascimento artificiale effettuato nel 1999. In termini di bilancio sedimentario complessivo, dal 1881 al 2002 viene persa una superficie di spiaggia pari a 45.000 m<sup>2</sup>, che l'evento alluvionale non è stato in grado di riequilibrare, in quanto ha portato soltanto ad un aumento di spiaggia di circa 15.000 m<sup>2</sup>.

Per quanto riguarda le caratteristiche granulometriche, si è potuto osservare che nel 1999 il Golfo era caratterizzato da *sabbie medio-grossolane* generalmente *ben classate*, con una Percentuale di frazione fine che non superava mai il 3%. Era comunque presente un'anomalia in corrispondenza della foce del Fosso del Gualdarone, dove vi era una piattaforma costiera costituita da ciottoli.

Subito dopo l'alluvione del 2002, si ritrovano anche sedimenti *molto poco classati*, con dimensioni medie comprese fra quelle delle *sabbie fini*, sui fondali, a quelle dei *ciottoli grossolani*, in prossimità della battigia; la percentuale di frazione fine arriva a superare il 20%.

Nel 2004 si osserva una tendenza al ritorno alle condizioni pre-evento, in particolare sui fondali, dove si ha una perdita della frazione fine (che supera solo in un caso il 10%) che comporta un miglioramento della Classazione. Sulla battigia, al contrario, si registra un aumento delle dimensioni medie, dovuto ad un accumulo della frazione ciottolosa.

Tutto ciò porta a considerare la spiaggia in una sorta di equilibrio; in cui i periodi di alimentazione sono legati agli eventi alluvionali; ipotesi non facilmente dimostrabile a causa della mancanza di linee di riva attendibili precedenti il 1881.

L'osservazione del comportamento della spiaggia di Procchio in risposta al fenomeno alluvionale ci ha fatto pensare che tale Golfo subisca periodicamente un ingente ripascimento con conseguente avanzamento della linea di riva. Successivamente, il moto ondoso rimodella e in parte asporta tali materiali, con un ciclo che supponiamo oscillare attorno a un punto di equilibrio.

Ciò che appariva come un'erosione potrebbe essere un ritorno alle condizioni di inizio del ciclo crescita – erosione, in cui gli avanzamenti della linea di riva sono associati ad input sedimentari di alta intensità e bassa frequenza, mentre gli arretramenti sono imputabili all'asportazione dei materiali da parte del moto ondoso. Complessivamente si può pensare ad un trend evolutivo con un equilibrio spostato verso l'erosione della pocket beach, in cui le alluvioni corrispondono ad eventi puntuali positivi per il bilancio, ma non sufficienti ad invertire la tendenza.

Infatti, la modificazione dell'uso del suolo dell'ultimo secolo, con i rimboschimenti delle aree un tempo dedicate all'agricoltura e la conseguente diminuzione dell'erosione del suolo, potrebbe aver contribuito a spostare l'equilibrio verso l'erosione della spiaggia, inteso in termini di mancato apporto sedimentario.