



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN  
"SCIENZE DELLA TERRA"

CICLO XXI

COORDINATORE Prof. **Luigi Beccaluva**

**“Analisi Evolutiva del Sistema  
Spiaggia-Duna in Emilia-Romagna:  
Processi Morfodinamici e Trasporto Eolico”**

Settore Scientifico Disciplinare GEO/04

**Dottorando**

Dott. VALERIO BRUNELLI

**Tutore**

Prof. UMBERTO SIMEONI

**Co-Tutori**

Prof. ENRICO MICCADEI

Dott. UMBERTO TESSARI

Anno Accademico 2006/2008

# **– INDICE –**

## **1 INTRODUZIONE**

## **2 STORIA DELLA RICERCA**

## **3 LE DUNE COSTIERE**

### **3.1 ORIGINE e DEFINIZIONE DELLA DUNA COSTIERA**

### **3.2 UN MODELLO CONCETTUALE: IL SISTEMA SPIAGGIA-DUNA**

### **3.3 CLASSIFICAZIONE DELLE DUNE COSTIERE**

### **3.4 FATTORI DI CONDIZIONAMENTO (Agenti morfodinamici)**

#### **3.4.1 Fattori Geomorfologici**

- *Assetto Morfologico e Topografico della SPIAGGIA*
- *Assetto Morfologico e Topografico della DUNA*

#### **3.4.2 Fattori Energetici e Morfodinamici**

- *Azione del Vento*
- *Azione del Moto Ondoso*

#### **3.4.3 Fattori Biologici (Vegetazione) e Ambientali**

- *Aspetti fitosociologici*
- *Umidità*

#### **3.4.4 Fattori Sedimentologici**

#### **3.4.5 Fattori Antropici**

## **4 MATERIALI E METODI**

## **5 INQUADRAMENTO AREA DI STUDIO**

### **5.1 ASSETTO GEOLOGICO ED EVOLUZIONE GEOMORFOLOGICA DELLA PIANURA PADANA ORIENTALE E DEL DELTA DEL PO**

### **5.2 INQUADRAMENTO METEOMARINO**

### **5.3 EVOLUZIONE REGIONALE DEGLI APPARATI REGIONALI**

### **5.4 I SITI CAMPIONE**

## **6 CLASSIFICAZIONE**

### **6.1 LA CHIAVE DI LETTURA: IL CRITERIO MORFO-EVOLUTIVO**

### **6.2 DAL MODELLO CONCETTUALE AL MODELLO FISICO: PARAMETRIZZAZIONE E BANCADATI**

### **6.3 ANALISI GEOMORFOLOGICA**



- 6.3.1 Fotointerpretazione e Analisi Spettrale*
- 6.3.2 Filtri Morfologici (High-pass e Direction)*
- 6.3.3 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)*
- 6.3.4 Lidar*

#### **6.4 INDAGINI DI CAMPO**

#### **6.5 ANALISI MORFOMETRICA e MORFOLOGICO-EVOLUTIVA**

- 6.5.1 Costruzione dei Modelli 3d (TIN)*
- 6.5.2 Variazioni aree dunari (Modello di Psuty)*
- 6.5.3 Variazioni linea di riva*

#### **6.6 CARATTERI TESSITURALI**

#### **6.7 CLASSIFICAZIONE DELLE DUNE COSTIERE REGIONALI**

### **7 TRASPORTO EOLICO**

- 7.1 Dinamica eolica in campo dunare Processi eolici e meccanismi di trasporto**
- 7.2 Il trasporto eolico su superfici ideali: Modelli di Previsione**
- 7.3 Il trasporto eolico su superfici non-ideali: Fattori di Controllo**
- 7.4 Interazione Spiaggia-Duna: bilancio sedimentario**
- 7.5 Determinazione del Tasso di Trasporto**
  - 7.5.1 Storia della sperimentazione*
  - 7.5.2 Campagne sperimentali di cattura eolica*
  - 7.5.3 Determinazione dei fattori di Correzione*
- 7.6 Tasso di Trasporto Eolico Potenziale**
  - 7.6.1 Il Modello Calmet*
  - 7.6.2 Calcolo dei tassi di trasporto potenziali locali*

### **8 INSTABILITA' DEGLI APPARATI DUNARI:**

#### **LA TEORIA DEI SISTEMI**

- 8.1 SCELTA DELLO SCOPO E I PARAMETRI:  
LA MATRICE D'INTERAZIONE**
- 8.2 LA PARAMETRIZZAZIONE DELLA MATRICE B.I.M.**
- 8.3 CALCOLO DELL'INDICE DI INSTABILITA' "I.D.I."**

### **9 CONCLUSIONI**

### **BIBLIOGRAFIA**

**- APPENDICE 1 – Schede Fattori Influenza Teoria dei Sistemi**

# Cap 1\_INTRODUZIONE

**KEY WORDS** (dune e sistema costa; premessa e scopo del lavoro; obiettivi)

---

L'attenzione da parte della comunità scientifica nazionale e internazionale, degli enti regionali e locali verso le tematiche di gestione, protezione e pianificazione dei territori costieri è da sempre elevata, soprattutto a partire dagli anni '90, quando assume visibilità internazionale (1992, Agenda 21, cap.17) e legittimità politica (1993, *World Coast Conference*) la nuova etica della sostenibilità nella gestione delle aree costiere, quella che è conosciuta con l'acronimo ICZM (*Integrated Coastal Zone Management*). Si tratta di una serie di discipline, contestualizzazioni e obiettivi che stabiliscono a scala internazionale le regole da seguire per un'adeguata, corretta e continua programmazione, pianificazione e gestione di tutte le risorse che un territorio costiero mette a disposizione, tra cui appunto, le dune.

Gran parte delle dune che bordavano nel corso dell'ultimo secolo le coste alluvionali del territorio nazionale, risutano oggi smantellate, principalmente a causa di un'incontrollata opera di urbanizzazione degli spazi costieri, di un intenso sviluppo dell'agricoltura, e della pesante crisi erosiva che ha interessato il litorale e ridotto le aree di deflazione (Simeoni e Bondesan, 1997; Simeoni et alii, 2006).

L'importanza socioeconomica che l'ambiente costiero detiene nell'ambito del nostro paese è da sempre elevata. Anche se con il tempo è andata sensibilizzandosi la necessità di una politica gestionale corretta e accurata dal punto di vista ambientale, la configurazione attuale di gran parte di questi territori è generalmente quello di una crisi erosiva spinta, per cui l'intervento antropico ha svolto e svolge tutt'ora un ruolo di principale responsabilità, soprattutto perché ha spesso, e pesantemente, intaccato proprio lo sviluppo delle dune costiere. A titolo di esempio, secondo ricerche condotte alla fine degli anni '90 (AA.VV., 1997), l'intero litorale adriatico risulta solo per il 9.8% della sua estensione caratterizzato dalla presenza di dune, di cui oltre il 50% concentrato nella sola Regione Puglia (Simeoni et alii, 2006).

La riduzione degli apparati dunari naturali è stata generalmente perpetrata al fine di sviluppare massicci interventi urbanistici o addirittura d'agevolare l'accesso dei bagnanti al mare (i circa 45 mila ettari di dune presenti un secolo fa sul territorio nazionale, ai primi anni del 2000, si erano già ridotti dell'80%, e allo stesso tempo i 7 mila ettari di paludi e di stagni costieri, trasformati in appena 1000 ettari – La Monica, 2001). Altre volte l'uomo è intervenuto sui

cordoni dunari per aumentare il valore agricolo del territorio retrodunale, strappando via ogni specie di vegetazione e irrigidendo completamente queste morfologie. Tali pratiche hanno però, in molti casi, modificato pesantemente i caratteri naturali dell'ambiente litorale e determinato un aumento della vulnerabilità della costa, la quale risulta oggi più legata alla riduzione delle protezioni che all'aggravamento delle condizioni d'attacco da parte del mare.

Un altro esempio di impoverimento di questo importante patrimonio naturale è rappresentato dalla costruzione, avvenuta tra il 1960 e il 1970, di tutta la rete ferroviaria che oggi collega il nord con il sud Adriatico: ai numerosi aspetti socioeconomici, certamente positivi, si aggiunsero, di fatto, il depauperamento e la distruzione di gran parte dell'ambiente naturale che fino ad allora aveva caratterizzato il litorale adriatico. Inoltre, essa fu costruita, in più punti, direttamente sui cordoni di dune, a poche decine di metri dal mare, togliendo la possibilità alla spiaggia di migrare verso terra, aumentando fenomeni di impaludamento, con la formazione e lo sviluppo di estese aree di ristagno.

In tal senso, un altro esempio di causa di degrado degli apparati dunari è rappresentato anche da tutta la categoria di opere agettanti, quelle cioè che si sviluppano in direzione trasversale rispetto all'orientazione della costa. In alcuni casi, tali interventi difensivi finiscono per modificare la circolazione idrodinamica e sedimentaria ad una scala più grande di quella del singolo settore per il quale si è intervenuti, per cui altri settori (sottoflutto), in tempi più o meno brevi, si ritrovano a dover affrontare una crisi erosiva che prima non c'era. Oggi, quasi l'80% delle spiagge italiane (ARPA, 2007) risulta difeso da opere di tipo trasversale, longitudinale o aderente: tutte, ostacolano l'interscambio sedimentario tra la spiaggia sommersa e quella emersa, influenzando indirettamente anche l'alimentazione delle dune e, di conseguenza, il loro sviluppo.

La tipologia degli interventi antropici non è stata sempre e solo di tipo "diretto" (cioè realizzati su e/o in prossimità degli apparati dunari), ma, spesso anche di tipo "indiretto", tali cioè da far risentire la propria influenza anche a distanza rispetto al punto d'intervento. Un esempio è rappresentato dal prelievo diretto di inerti dagli alvei fluviali che priva i fiumi di una percentuale importante (oggi non più trascurabile) di sedimento diretto al mare, e attraverso le foci, costituire la principale naturale risorsa sedimentaria a disposizione delle spiagge. Specie negli ultimi 40 anni tale mancanza di materiale è risultata particolarmente importante, a tal punto che è oggi considerata una delle cause più importanti della crisi erosiva che investe la maggior parte dei litorali (Simeoni, 2005; Pranzini, 2004).

Ad onor del vero, va considerato che non è sempre e solo l'uomo a favorire i presupposti per l'istaurarsi di processi di erosione del sistema spiaggia-duna. Per la realtà nazionale, e ancor più per quella regionale dell'Emilia-Romagna, assume particolare importanza la presenza di numerosi bacini sedimentari quaternari particolarmente predisposti a fenomeni di subsidenza naturale. Tali processi favoriscono l'abbassamento progressivo e spesso differenziale di vaste porzioni di territorio alluvionale costiero, producendo in tal modo un aumento di tutti i rischi connessi al moto ondoso, all'innalzamento relativo del livello marino (sommersione) ed all'aumento della frequenza e dell'intensità delle mareggiate. Ovviamente l'uomo, nel tempo, è riuscito ad incidere in negativo anche su questi fenomeni: attraverso il depauperamento delle falde a vari livelli e l'emungimento sfrenato di fluidi dal sottosuolo (acqua e metano) ha contribuito ad estendere le porzioni di aree soggette a tali abbassamenti nonché ad aumentare la velocità per quelle che già presentavano il problema (ARPA, 2007).

Tutti gli scenari appena descritti hanno influenza anche e soprattutto sullo "stato" della duna: in alcuni casi i fenomeni erosivi che si innescano a causa di tali assetti naturali e/o modificazioni antropiche, possono risultare localmente molto intensi, produrre la scomparsa di ampie porzioni di spiaggia, fino a smantellare interi apparati dunari.

Per quanto detto, è chiaramente fondamentale avere una visione sinottica del problema delle condizioni di instabilità degli apparati dunari: questa ricerca si propone di arrivare a definire e descrivere le attuali dinamiche morfoevolutive degli sistemi dunari costieri regionali attraverso lo sviluppo di 2 obiettivi intermedi:

1. INDAGARE SUI COMPLESSI FENOMENI D'INTERAZIONE DINAMICA ESISTENTI TRA I SUBAMBIENTI DI SPIAGGIA E DUNA, da raggiungere attraverso:
  - a. La creazione di una classificazione "*ad hoc*", scelta e modificata a partire da quelle più conosciute in letteratura (McKee, 1979 a/b; Pye & Tsoar, 1990; Arens & Wiersma, 1994, Goldsmith, 2989; Hesp, 1989; Psuty, 1989) in funzione della scala di influenza dei principali elementi di condizionamento (sia interni che esterni al sistema), nella piena convinzione che un sistema spiaggia-duna rappresenti il risultato finale proprio dell'interazione sinergica di più fattori, tra cui dinamica costiera, morfologia della duna stessa, vegetazione, processi eolici e gestione antropica (Arens & Wiersma, 1994).

Verranno scelte scale di analisi spaziale diverse: dal singolo apparato, attraverso gruppi omogenei di apparati (settori), finanche a ciascuna unità fisiografica, si cercherà un'unica legenda "applicata" che non sia solo didattica, ma realmente di supporto eventuale alla gestione e pianificazione del territorio. In tal modo sarà possibile fornire una dettagliata mappatura delle aree dunari regionali ancora esistenti (CARTA GEOMORFOLOGICO-APPLICATA);

- b. La pianificazione e realizzazione di campagne sperimentali di cattura eolica, in corrispondenza di pochi siti (3), rappresentativi il più possibile della distribuzione a grande scala di tutti gli apparati considerati: si cercherà di correlare lo studio delle caratteristiche anemologiche locali (opportunamente registrate per mezzo di una stazione anemometrica) al campionamento contemporaneo e diretto del sedimento eolico trasportato (per mezzo di trappole di tipo "Rosen" modificate);
- c. In tal modo si cercherà di confrontare i tassi di trasporto deducibili dal campionamento diretto, con quelli che invece derivano dalla semplice applicazione delle equazioni più note in letteratura (Bagnold, 1941; Hsu, 1969; Kawamura, 1951; Zingg, 1953), in modo da estrapolare, se e ove possibile, fattori numerici di conversione, o relazioni di proporzionalità che permettano di correlare le formule teoriche al dato di campagna, a scala regionale (CARTA DEL TASSO DI TRASPORTO EOLICO).

2. CERCARE DI RIFORMULARE I PRINCIPI DI UNA POLITICA GESTIONALE REGIONALE CORRETTA sulla scorta della determinazione dello stato di instabilità locale dei singoli sistemi spiaggia-duna considerati. Lo sviluppo della Teoria dei Sistemi, con la definizione della Matrice d'Interazione Binaria (BIM) permetterà di sviscerare i complessi rapporti tra i fattori che maggiormente influenzano l'evoluzione del sistema spiaggia-duna in Emilia-Romagna; attraverso la definizione di un indice d'Instabilità (IDI – Instability beach-Dunes system Index), sarà quindi possibile valutare lo stato di equilibrio morfodinamico generale in cui essi si trovano oggi.

La visione sinottica a scala regionale derivante da un approccio di questo tipo fornirà gli strumenti per stabilire non solo le priorità di intervento, ma, essendo in grado di stabilire quale/i, tra i parametri che hanno maggiore influenza, riescono ad interagire maggiormente con tutti gli altri, sarà possibile anche suggerire eventuali interventi proprio in funzione di tali criticità, atti a coniugare i bisogni umani (sfruttamento economico e/o tutela ambientale), con quelli più naturali di conservazione delle nicchie ecologiche ancora esistenti.

Il vantaggio di un approccio e di uno studio di questo tipo risiede nel poter fornire un quadro conoscitivo completo a varie scale sulla morfodinamica globale che oggi condiziona pesantemente uno degli ultimi naturali elementi di difesa che la costa ha a disposizione, soprattutto in un contesto di assetto territoriale come quello dell'Emilia-Romagna, dove l'uomo di fatto rappresenta l'elemento più condizionante per la sopravvivenza e lo sviluppo di molti ambienti naturali. Inoltre, la gestione e la pianificazione della costa, oggi, tanto a scala locale quanto a scala regionale, non può non fare i conti con la necessità sempre più impellente di sviluppo e di crescita socio-economica globale, ma anche allo stesso tempo di difesa e mitigazione dei rischi naturali, particolarmente elevati in ambienti come questo.

## Cap 2 \_STORIA DELLA RICERCA

**KEY WORDS** (Principali studi, ricerche e lavori nazionali e internazionali sulle dune costiere; esempi d'intervento e gestione degli apparati dunari, locali e nazionali)

---

La necessità di approfondire la conoscenza sulle dune costiere, in particolare sui meccanismi e sui processi che ne regolano l'evoluzione a breve, medio e lungo termine, è andata con il tempo progressivamente aumentando, grazie soprattutto alla crescente consapevolezza che le dune assumono un'importanza enorme da più punti di vista (Psuty, 1989). Sotto l'aspetto geomorfologico sono fondamentali per l'equilibrio dinamico della spiaggia antistante, alla quale risultano connesse da un punto di vista morfodinamico e sedimentario in maniera così stretta, che in letteratura oggi si fa riferimento più che alla duna, al SISTEMA SPIAGGIA-DUNA (Psuty, 1988). Ricevono, immagazzinano e rilasciano il sedimento in funzione delle diverse condizioni meteo marine, agendo così, come barriera nei confronti delle mareggiate più intense e proteggendo le strutture e le infrastrutture poste alle loro spalle sia dall'azione del moto ondoso che dall'aerosol marino; regolano il rapporto tra la falda d'acqua dolce e quella salata (contrastando l'intrusione del cuneo salino), e non ultimo per importanza, rivestono un ruolo fondamentale per la salvaguardia di determinati ambienti (come nicchie ecologiche esclusive di sopravvivenza per specie vegetali ed animali), con i risvolti che tale aspetto può avere dal punto di vista turistico ed economico (Arens & Wiersma, 1994).

In realtà, fino agli inizi degli anni '40 lo studio sui meccanismi di evoluzione degli apparati dunari non è stato di particolare interesse per la comunità scientifica internazionale: gran parte di quello che si è trasmesso per più di 30 anni, è stato frutto di ricerche "pionieristiche", svolte da alcuni autori, su elementi e forme che però hanno ambienti di formazione molto diversi da quelli propriamente "costieri" (Bagnold, 1941).

I primi studi sulle dune riguardavano aspetti più ecologici che morfologici e/o morfodinamici: tra i più antichi c'è una ricerca di Steinheil (1835), ripresa poi da Van Der Maarel (1993a) che appunto cercava di approfondire le conoscenze sulla distribuzione e associazione delle specie vegetali in ambiente costiero, in particolare sulle dune. Nel 1899 Henry Chandler Cowles studia le associazioni vegetazionali sulle dune del Lago Michigan, ed estrapola, sulla base dell'assunzione che le variazioni spazio-temporali avvengono in maniera omologa e parallela, la prima successione "tipo" di specie e comunità vegetazionali in funzione delle forme sulle quali esse si sviluppano. Circa 30 anni dopo (1928) Frederic Clements sviluppa la "Successional Theory of plant dune Communities".

Per trovare i primi lavori sugli aspetti geologici delle forme, e fisici dei processi in atto, bisogna aspettare la metà degli anni '50: tra i più famosi ci sono i risultati di uno studio svolto sulle dune del deserto, e pubblicati da Bagnold sul volume *“The Physics of Blown Sand and Desert Dunes”* (1954), a cui poi di fatto tutti gli autori hanno fatto riferimento negli anni successivi (Van Der Meulen et alii, 1991; Carter et alii, 1992; Van der Maarel, 1993a/b; Garzia-Novo et alii, 1997; Grootjans et alii, 1997; Packham and Willis, 1997; Wiedemann et alii, 1999; Hesp, 2000; Bauer & Davidson-Arnott, 2002; Yang e Davidson-Arnott, 2005; Fitzsimmons K.E., 2007; Vespremeanu-Stroe A., Preoteasa L., 2007; Hesp P.A. et alii, 2009).

Per quanto riguarda la gestione degli apparati dunari, i primi tentativi a grande scala risalgono al XIX secolo nella regione di Landes (Gascony, Francia) laddove, tramite l'iniziativa di Bremon-tier, si cercò di stabilizzare le dune mediante rilevamento e modificazione artificiale del loro profilo allo scopo di proteggere la foresta retrostante. Nel tempo, anche sulla spinta della necessità di comprendere meglio i processi a cui sono soggette queste forme, al fine di impostare e programmare nel migliore dei modi interventi di tutela e di gestione, si è assistito ad un progressivo crescente interesse verso di esse, con lo sviluppo di modelli evolutivi basati su criteri morfodinamici (Short & Hesp, 1982), o sul calcolo di bilanci sedimentari (Psuty, 1992), con una nuova attenzione alle misure sul campo (Baurer et alii, 1990; Robertson-Rintoul, 1990) e/o all'organizzazione di congressi specifici (Carter, Curtis e Sheehy-Skeffington eds., 1992). In Europa molto lavoro sperimentale è stato svolto da Carter, mentre Van Der Meulen ha affrontato il problema delicato della gestione delle dune costiere, tenendo viva l'attenzione su queste tematiche anche attraverso il *Journal of Coastal Conservation*.

Tali ricerche hanno poi trovato giustificazione in numerosi interventi diretti e/o indiretti progettati e realizzati lungo numerosi tratti delle coste europee: a titolo di esempio si ricordano numerosi progetti di monitoraggio e di difesa in Francia (Meur et alii, 1992), o in Danimarca, dove ci si è preoccupato della difesa delle dune costiere riconoscendole, allo stato attuale, come parte vitale dell'ambiente e indicandone prioritario il mantenimento. In Inghilterra, un vasto programma di censimento e di classificazione è stato attuato e condotto dal Nature Conservancy Council, prima, e successivamente dal Joint Nature Conservation Committee e del Coast Management Scheme, avente come fine quello di organizzare possibili piani di intervento. Da ricordare anche i programmi di studio e di gestione attivati in Spagna (Sanjaume e Pardo, 1992; Sanjaume e Cruz, 1992), Grecia (Margaritoulis, 1992), Portogallo (Diaz et alii, 1994), Olanda (Arens e Wiersma, 1994), Stati Uniti (Psuty, 1989) ed Australia (Short & Hesp, 1982).



In Italia il problema sembra essere principalmente avvertito dalle associazioni ambientaliste, le quali spesso si sono impegnate nel recente passato in iniziative come progetti di protezione dei sistemi dunari costieri, mentre la comunità scientifica ha spesso considerato marginale questo problema e, salvo rare eccezioni, è poco presente nella letteratura internazionale. In assenza di una cartografia specifica dei depositi eolici delle coste italiane, rappresentati solo in modo simbolico dall'Atlante delle Spiagge Italiane (CNR-MURST, 1999) e di diffusi studi su tutto il territorio nazionale sulla dinamica morfosedimentaria delle dune costiere, anche in Italia, attraverso l'applicazione di modelli evolutivi costruiti "ad hoc", ripresi e modificati da quelli presenti nella letteratura internazionale, si è reso necessario avviare progetti di ricerca che consentissero un organico sviluppo degli aspetti cartografici, sperimentali di campo e una sintesi e diffusione dei risultati.

Nel 2002 il MIUR (Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca) finanzia un progetto di ricerca biennale, dal titolo "I DEPOSITI EOLICI DELLE COSTE ITALIANE E IL FLUSSO DI SEDIMENTI SPIAGGIA-DUNA", il quale si proponeva come obiettivo principale, quello di censire e classificare le dune costiere dell'intera costa nazionale, e secondariamente, quello di studiare localmente i meccanismi di interazione all'interno del sistema spiaggia-duna, in modo da riuscire a comprendere i fattori di controllo e sviluppo di morfologie di questo tipo.

Nel 2005, nell'ambito del programma INTERREG III C, una forma di finanziamento alla cooperazione interregionale della Comunità Europea finalizzata al rafforzamento della coesione socio-economica tra tutti gli stati membri, è stata presentata e approvata la seconda Operazione Quadro Regionale, denominata "Beachmed-e", finalizzata all'individuazione ed il perfezionamento dei mezzi tecnici ed amministrativi per una gestione strategica della difesa dei litorali, per uno sviluppo sostenibile delle zone costiere del Mediterraneo. Esso prevedeva lo sviluppo di 9 sottoprogetti con il coinvolgimento di 36 partners partecipanti tra Università, Istituti di Ricerca ed Amministrazioni, tra i quali la Regione Emilia-Romagna e proprio l'Università di Ferrara.

Tra i 9 sottoprogetti, la Misura 3.4, denominata "POSIDUNE", si proponeva lo scambio di esperienze e conoscenze tecniche proprio in materia di gestione del sistema spiaggia-duna, per consentire, tramite un'attività di monitoraggio, di descrivere le caratteristiche fisiche e biologiche dell'ambiente costiero, in particolare di valutare l'efficacia degli interventi di ricostruzione morfologica delle dune. Da sottolineare lo spirito con cui il progetto è stato messo in piedi e portato avanti dai vari partner: attraverso un forte approccio multidisciplinare

si cercò infatti di affrontare la tematica dal punto di vista morfologico, geochimico, botanico, idrogeologico e ovviamente gestionale.

In ambito regionale, infine, vanno menzionate importanti esperienze di collaborazione tra enti pubblici e di ricerca (Università) in materia di gestione e programmazione di interventi “alternativi” sulle dune. A tal proposito, vanno citati due casi, molto particolari, di ricostruzione di un’apparato dunare artificiale, ciascuno innovativo per un particolare aspetto:

1. La ricostruzione di una duna antropica per mezzo di strutture semibasculanti in corrispondenza del Faro di Gorino (2001), che ha visto la collaborazione tra il Dipartimento di Scienze della Terra dell’Università di Ferrara e la Provincia di Ferrara (Sezione Gestione Acque Costiere – Economia Ittica – Sacca di Goro);
2. La ricostruzione di una duna artificiale attraverso l’uso di sabbie provenienti dalla pulizia invernale delle spiagge in corrispondenza di Lido delle Nazioni, che invece ha visto la collaborazione tra il Dipartimento di Scienze della Terra dell’Università di Ferrara e la Regione Emilia-Romagna (Servizio Tecnico di Bacino, Po di Volano).

## Cap 3\_LE DUNE COSTIERE

### KEY WORDS (Definizione di duna costiera)

---

Le “*Coastal sand dunes*” sono forme eoliche che si sviluppano in ambienti costieri quando esistono condizioni per cui una discreta disponibilità di sedimento sabbioso può essere trasportato dal vento verso l’entroterra” (Martinez *et alii*, 2008).

Sono parte integrante di un tipico ambiente di transizione, al limite di passaggio tra il continentale/terrestre e il marino/acquatico, e di un sistema di tipo “*sand-sharing*”, i cui limiti spaziali teorici sono rappresentati da spiagge mobili (lato mare), e dune stabili e consolidate (lato terra). Si sviluppano, ciascuna con proprie peculiarità e caratteristiche in termini di estensione, forma e dimensioni, in funzione del subambiente all’interno del quale si formano, sia che si tratti di oceani e/o mari, o di laghi, e/o foci fluviali.

Le dune costiere risultano distribuite ovunque sul globo, sempre in associazione con spiagge sabbiose che producono morfologie eoliche variabili, in dimensioni e forma, in funzione del variazioni spazio-temporali degli input sedimentari e del regime anemologico a cui sono soggette (Gimingham *et alii*, 1989; Nordstrom *et alii*, 1990; Carter *et alii*, 1992; Pye, 1993; Hesp, 2000). Sebbene possano svilupparsi di fatto a tutte le latitudini, la loro massima distribuzione si registra sulla costa atlantica Europea, su quella pacifica nord-Americana e nel sud-ovest Africano, dove i venti risultano generalmente molto intensi, ma soprattutto molto persistenti, e la disponibilità di sedimento è notevole. (Carter *et alii*, 1990, Van der Maarel 1993a/b) (Figura 1).

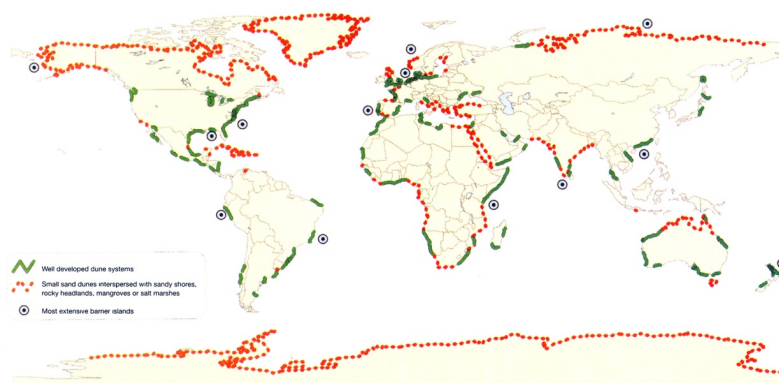


Figura 1 – L’ampia variabilità nella distribuzione delle dune costiere nel globo coincide con lo sviluppo di coste sabbiose di tipo “*wave-dominated*” (puntinato rosso), o con sistemi costieri protetti da barriere naturali (punti scuri); in ogni caso le condizioni prevalenti sono quelle di un elevato rifornimento di sabbia e un regime anemometrico costante e intenso (Van der Maarel, 1993a/b).

Va sottolineato che spesso le dune che si sviluppano all'interno di ecosistemi costieri risultano arealmente più ridotte rispetto a quelle presenti in altri ambienti, per esempio, di tipo continentale o arido. Questo dipende dal fatto che generalmente si tratta di territori meno estesi rispetto, per esempio, alle pianure litoranee o ai deserti aridi, e storicamente più soggetti allo sviluppo urbano e antropico; anche per questo motivo risultano inquadabili e cartografabili entro limiti maggiormente definibili.

### **3.1\_ ORIGINE E DEFINIZIONE DELLA DUNA COSTIERA**

**KEY WORDS** (Meccanismi erosione, trasporto e sedimentazione; *Aeolian bedforms*; *coastal sand dunes*; meccanismi di origine delle dune: teorie e generalità; descrizione degli elementi costituenti – sedimento e profilo – fattori di controllo della morfologia)

---

Da un punto di vista geologico e geomorfologico, le dune costiere rappresentano forme dinamiche, mobili e transienti, e per questo motivo, in generale, hanno una bassa probabilità di conservarsi all'interno di una colonna geologico-stratigrafica. Si tratta di depositi di tipo eolico (da "*Aeolus*", il Dio Greco dei venti), costituiti da sabbia sciolta, presa in carico dal vento in una regione limitrofa e, attraverso un processo fisico chiamato di "deflazione", deposta oltre, laddove il vento stesso, interagendo con la superficie su cui scorre, perde energia e quindi capacità di trasporto del sedimento. Pur trattandosi di una forma deposizionale, in realtà tutti i processi sopra elencati concorrono ai meccanismi di formazione di una duna costiera, in quanto la sabbia prima di essere deposta deve essere prelevata e trasportata, per cui, lungo la direzione teorica di movimentazione e trasporto del sedimento che andrà a costituire la duna è possibile individuare settori diversi, caratterizzati da meccanismi diversi, in particolare classificabili nelle 3 tipologie principali di **EROSIONE**, **TRASPORTO** e **SEDIMENTAZIONE** (Figura 1).

Rimandando l'approfondimento degli aspetti fisici di ciascuno di essi alla sezione di riferimento (Capitolo 8), è importante sottolineare fin da subito che i limiti definiti in figura in realtà non sono né fissi nello spazio, né stabili nel tempo, in quanto il sistema è fortemente dinamico e le forme prodotte si accrescono e migrano. I processi implicano transitorietà per definizione anche a più scale di osservazione: il meccanismo inizia con il trasferimento dell'energia del vento alla superficie su cui scorre, la quale per contro opporrà naturalmente una certa resistenza (evidente se si analizza la curva di distribuzione verticale delle velocità, Figura 2).

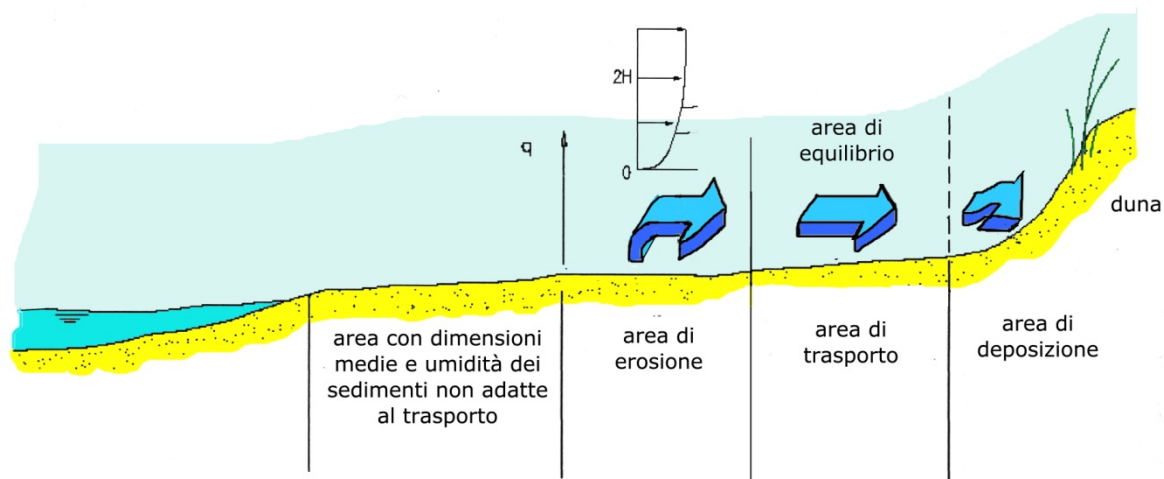


Figura 2 – Schema di distribuzione spaziale dei meccanismi di formazione di una duna sabbiosa, con il processo di erosione, che prende in carico il sedimento, lo trasporta per un determinato tratto e lo deposita successivamente in funzione della propria capacità di trasporto (curva di distribuzione logaritmica delle velocità);

Tale resistenza, alla scala dei singoli granuli, è una misura indiretta delle caratteristiche granulometriche e tessiturali del sedimento stesso, poiché dipende dalle dimensioni dei grani e dalla loro disposizione geometrica e del contenuto di umidità. Oltre una certa soglia però, la spinta esercitata dal vento riesce a superare tale resistenza, e mobilita il granulo (EROSIONE), il quale viene preso in carico (TRASPORTO) e spostato più avanti nella direzione di propagazione del flusso, fin tanto che l'intensità del vento è in grado di movimentarlo. A questo punto il sedimento viene inevitabilmente deposto (SEDIMENTAZIONE), e il meccanismo continua producendo a grande scala, quelle che vengono indicate con il termine di *bedforms* (forme di fondo); queste a loro volta, se il flusso è sufficientemente intenso e continuo, non sono fisse, bensì in grado di muoversi e migrare in avanti. Aumentando ancora una volta la scala di osservazione, il prodotto della migrazione delle *bedforms* altro non è che la duna stessa, la quale con lo stesso meccanismo, può a sua volta migrare e coalescere per costituire sistemi più complessi.

Per quello che si è detto fin ora una netta distinzione tra processi di trasporto e quelli di sedimentazione di fatto non può essere fatta, almeno fino a quando, durante le varie fasi di formazione di una *bedform*, l'alimentazione non finisce per coincidere con la sua migrazione (anche se di fatto è sempre parziale, perché dovuta ai meccanismi di crescita stessa della *bedform* – Es. la coalescenza di *foredunes* in cordoni dunari).

Secondo tale schema, descritto in termini estremamente semplificati per rendere più chiaro il legame tra il processo fisico e le forme prodotte (per approfondimenti si rimanda al Capitolo 8), a grande scala l'azione da parte del vento favorisce la formazione e la crescita di 4 principali categorie di forme eoliche, riassumibili, secondo Hesp (2000) in:

- STRATI SABBIOSI;
- CAMPI SABBIOSI (*Sand Sheets*);
- COPERTURE DI LOESS (*loess blankets*);
- DUNE SABBIOSE (*Sand Dunes*).

Tralasciando la prima categoria, evidentemente comprensiva di tutte le forme più semplici ed “embrionali” di deposito sabbioso, le *Sand Sheets* sono forme di accumulo caratterizzate solo da una leggera ondulazione della superficie risultante, per cui non si sviluppa una chiara topografia “dunare”, mentre le *Loess Blankets* sono depositi eolici caratterizzati da sedimento fine (silt e argilla) che ricopre a mantello una superficie di erosione pre-esistente; in questo caso l'ondulazione della copertura risultante dipenderà inevitabilmente dall'assetto della superficie “ricoperta”, per cui possono svilupparsi superfici piatte, leggermente ondulate o anche profondamente dissestate (Pye, 1987).

L'ultima categoria è quella delle DUNE SABBIOSE: nella più generale delle accezioni, essa può essere definita semplicemente come un monticello o cordone formato da sabbia sciolta depositata dal vento. Esiste una variabilità dimensionale delle forme che in tal modo si costituiscono: da piccoli accumuli (*hummocks*) alti appena 50cm a cordoni ben strutturati che possono superare anche i 100m di quota (Hesp, 2000). In ampiezza, la variabilità è compresa tra alcune decine di metri (per singoli apparati lineari e paralleli alla linea di costa), finanche ad alcune decine di chilometri verso l'entroterra, per sistemi più complessi. Possono evolvere singolarmente in cordoni, o raggrupparsi a costituire veri e propri campi dunari (*dunefields*), possono svilupparsi in diversi contesti e assetti ambientali, per cui si riconoscono dune di tipo (a) “*inland o continental dunes*”, (b) “*lake-shore dunes*”, (c) “*riverbank dunes*” o (d) “*coastal o sea-shore dunes*”; scopo principale di questo lavoro di ricerca sarà quello di approfondire proprio le dinamiche connesse a quest'ultima categoria di duna e di ambiente.

Le sabbie, che rappresentano il materiale di cui sono prevalentemente costituite, possono avere composizioni mineralogiche e parametri tessiturali estremamente variabili: in funzione delle caratteristiche geologiche e delle province petrografiche a cui sottende l'asta fluviale che rifornisce il litorale in esame, le tipologie (in termini di % degli elementi presenti), variano da

silicatici, a carbonatici, a vulcanici. Generalmente i sedimenti presentano un aspetto tessiturale molto maturo e i grani appaiono quasi sempre ben arrotondati, a causa dell'azione dei processi di collisione con gli altri granuli durante il trasporto eolico sulla spiaggia (Williams e Morgan, 1988).

Lo sviluppo di una duna costiera è determinato da una serie di fattori ambientali, tra i quali, a più ampia scala si riconoscono la disponibilità di sedimento, la variazione del livello del mare, le condizioni sia della spiaggia emersa che della zona sommersa antistante, e non ultima per importanza, anche l'assetto tettonico e strutturale dell'area; su scale spazio-temporali più brevi (mesi, anni, decenni e alla scala del singolo apparato), la disponibilità di sedimento è probabilmente il fattore di controllo più importante, mentre a livello regionale e su scale temporali più ampie (secoli e millenni) la variazione del livello del mare diventa il fattore discriminante (Carter, 1988).

La morfologia di una duna costiera (come si vedrà nello specifico nelle sezioni successive) è controllata principalmente da due fattori: il quantitativo di sabbia disponibile per i processi di deflazione (determinato dai processi agenti sulla spiaggia e funzione soprattutto del *Fetch Efficace*), e dal grado di interazione tra il piano campagna (comprese le sue irregolarità naturali in termini di *Roughness* – rugosità), e il vento. Tale combinazione favorisce, senza considerare fattori esterni di disturbo, la formazione un profilo tipico del sistema spiaggia-duna in equilibrio, il quale presenta la configurazione riportata in Figura 3.



Figura 3 – Schema di un profilo tipico di un sistema spiaggia-duna in equilibrio, dove è possibile individuare tutte le forme tipiche della sequenza morfoevolutiva, da quelle effimere che nascono nella parte alta della spiaggia (avanduna) a quelle più stabili e consolidate più interne (duna stabilizzata).

Lo studio sui processi di formazione, sviluppo ed evoluzione delle dune costiere ha da sempre prodotto contrasti e dicotomie nel modo della ricerca: nonostante i recenti contributi

scientificamente importanti (Gimingham *et alii*, 1989; Nordstrom *et alii*, 1990; Carter *et alii*, 1992; Pye, 1993; Favennec, 1997; Hesp, 2000; Hesp *et alii*, 2005), non si è riusciti ancora a stabilire una chiave di lettura che sia unica, completa, ed esaustiva per tutti gli ambienti (a scala locale) in cui esse si sviluppano. Tale difficoltà nasce dall'impossibilità di racchiudere processi, forme e grandezze entro schemi rigidi, prima di tutto perché, come si è detto in precedenza, l'ambiente in cui esse si formano è un ambiente di transizione, e come tale può assumere caratteri morfodinamici anche molto diversi da apparato ad apparato, in funzione dell'assetto geomorfologico locale; poi, perché i processi non agiscono nello spazio e nel tempo in maniera lineare, per cui gli effetti (forme) possono essere diversi molto spesso sovrainponendosi, in modo da creare forme complesse e poco classificabili.

Diverse in letteratura sono le teorie sviluppate per cercare di spiegare l'origine delle dune, ognuna con una chiave di lettura diversa: forme e dimensioni, vegetazione e meccanismi di deposizione tra le più avvalorate. Provando a riassumerne alcune tra le più importanti del secolo scorso, troviamo che nel 1958 McKenzie osservò che quelle che lui indicava con il termine di "*foredune*" crescevano solo dove la vegetazione riusciva a diffondersi in maniera cospicua, intrappolando la sabbia. Davies, nel 1975, osservò in Tasmania alcune berme che si sviluppavano oltremodo le dimensioni tipiche di queste forme, trasformandosi progressivamente prima in ondulazioni della spiaggia (*beach ridges*), e poi, una volta colonizzate dalla vegetazione psammofila, in vere e proprie "dune" parallele alla linea di riva; quindi Hesp (1984a) ampliò il concetto evidenziando come invece le *foredune* possono svilupparsi in diversi modi, purché sia presente vegetazione. Bird & Jones (1988), durante molti dei loro studi, ritrovarono sotto la sabbia fine e ben classata delle dune, frammenti di conchiglie disposti con giacitura molto simile a quella che si rinviene proprio nei depositi di berma. Si osservò anche che tali morfotipi poi, finivano per associarsi in "sistemi di morfotipi": l'alternanza tra processi deposizionali ed erosivi durante le mareggiate (*cut and fill*), generavano depressioni che separavano i diversi cordoni dunari lungo la direzione trasversale alla linea di riva; In tal modo il modello risultava pittuosto semplificato, ma di fatto si rivelò anche estremamente pratico ed efficace, per cui per anni ha rappresentato il riferimento per tutta la ricerca a seguire.

A prescindere dalla teoria che spiegherebbe il meccanismo di formazione, ciò che è stato da sempre, a tutti evidente, è che il vento e il moto ondoso appaiono essere due processi fondamentali e indiscindibili nella formazione delle dune costiere. Tra i due però è il primo ad essere da sempre considerato l'agente morfodinamico principale, in particolare i rapporti tra



processi di trasporto eolico e caratteri tessiturali del sedimento. I lavori che hanno fatto la storia della letteratura scientifica in questo campo (Bagnold, 1941; Hsu, 1949; Kauamura, 1951; Zingg, 1953, USA Army, 2002), prendono però in considerazione superfici di scorrimento di tipo “ideale”, per cui i modelli derivati non risultano efficaci nella determinazione della reale quantità di sabbia che si sposta lungo il profilo. Chi invece ha cercato di analizzare tali meccanismi su superfici reali, attraverso la sperimentazione diretta sul campo (Panairo & Piñeiro, 1997; Mikkelsen, 1989; Mitchell, 2000; Vespremeanu-Stroe & Preoteasa, 2007; Hesp *et alii*, 2009; Junaidi & Aoki, 2009), ha purtroppo spesso concluso che l’assetto locale non permetteva mai di estrapolare un modello che sia valido a scala globale. Come si vedrà in seguito, considerazioni simili sono emerse anche da una parte importante del lavoro di questa tesi, incentrata proprio sulla determinazione dei rapporti esistenti tra il trasporto eolico teorico (calcolato attraverso le formule) e quello determinato attraverso la cattura diretta del sedimento.

Il sistema è complesso, e da un punto di vista fisico-matematico è ascrivibile ad un sistema di tipo “aperto”, cioè in grado di scambiare ENERGIA (legata ai processi in atto) e MATERIA (legata al sedimento a disposizione) con tutto ciò che, nello spazio e nel tempo, è al di fuori di esso. Tale concetto (che verrà ripreso ed ampliato nei capitoli successivi) serve a giustificare la necessità da parte di tutta la ricerca di considerare la duna all’interno del più ampio concetto di sistema SPIAGGIA-DUNA (Psuty, 2004).

### **3.2\_ UN MODELLO CONCETTUALE: IL SISTEMA SPIAGGIA-DUNA**

**KEY WORDS** (Un sistema costituito da due sottoambienti; i processi morfodinamici che ne giustificano la suddivisione; fattori che condizionano l’evoluzione morfologica di entrambe)

---

Il concetto di legame tra “Spiaggia” e “Duna” trova giustificazione in termini di interazione continua tra processi in atto (morfodinamica) e interscambio sedimentario (morfo-sedimentario) tra i due sub-sistemi: sono questi gli elementi che necessariamente legano l’evoluzione dell’uno a quella dell’altro, a partire dalle forme più primitive (*Primary dunes* – Hesp, 2000), durante tutte le fasi di evoluzione, fino allo sviluppo in configurazioni più complesse e stabili (*Secondary dunes* – Hesp, 2000), quando, a seguito della nascita di nuove forme embrionali, quest’ultime verranno progressivamente isolate dal sistema e dai

processi naturali agenti. Sia la spiaggia che la duna sono forme di accumulo di sedimento: per la spiaggia, di quello proveniente principalmente dal mare, mentre per la duna, di quello proveniente dalla spiaggia. Entrambe rispondono alle variazioni a breve o lungo termine, sia del proprio bilancio sedimentario che di quello dell'altro, con evoluzioni morfologiche a grande, media e piccola scala (Psuty, 2004). In particolare, la spiaggia vedrà aumentare o diminuire la propria ampiezza in risposta alla dinamica marina, nello specifico alle variazioni a lungo termine della linea di riva (legate all'apporto sedimentario che le correnti e il moto ondoso riescono a garantire); la duna invece, in funzione delle perdite e/o del guadagno del sedimento portato dal vento (agente morfodinamico principale), si modificherà in termini di dimensioni e "strutturazione" della forma, di variazione nell'altezza e nel volume complessivo, associati ad una progressiva complessità anche delle stratificazioni e delle strutture sedimentarie interne.

L'output del modello che in tal modo ne deriva, è rappresentato dalla sequenza spaziale e/o temporale delle morfologie della duna (*foredunes*) lungo un "continuum" progressivo che ne descrive l'evoluzione morfologica. Il diagramma di Figura 4 (Psuty, 2004) rappresenta proprio uno schema semplificato di tale concetto, in particolare delle relazioni tra il budget sedimentario della duna e quello della spiaggia, con riferimento ai cambiamenti topografici connessi alle variazioni di ciascuno di esse per progressivo trasferimento della sabbia verso l'entroterra. Il gradiente della curva è determinato dai rapporti che legano le condizioni di massimo apporto di sedimento con quelle di minimo input e la diversa risposta della duna a tali presupposti. Come si vede dall'andamento della curva, man mano che la disponibilità di sedimento diminuisce e aumenta la frequenza e l'intensità dei processi erosivi, si sviluppano morfologie sempre meno stabili (budget negativo), partendo da semplici, spesso isolati, elementi di dissesto, attraverso forme di tipo trasgressivo (Es. "dune paraboliche" o le "*sandsheet*"), fino ad arrivare a vere e proprie forme erosive come i "*blowouts*", o i "*washover*" (corrispondenti alla parte più esterna del diagramma per cui il sistema appare completamente dissestato e si fa fatica a ricostruirne limiti ed estensioni originali).

L'elemento essenziale del modello è rappresentato dal concetto che con un rifornimento positivo di sedimento alla spiaggia, il tasso di accrescimento corrispondente della foredune è inversamente proporzionale al tasso di crescita della stessa; questo vuol dire che alti tassi di avanzamento della linea di riva (che corrispondono ad alti tassi di crescita di ampiezza della spiaggia) non permettono alla sabbia di alimentare con continuità la duna, la quale quindi non avrà mai la possibilità di accrescersi molto in altezza e volume.

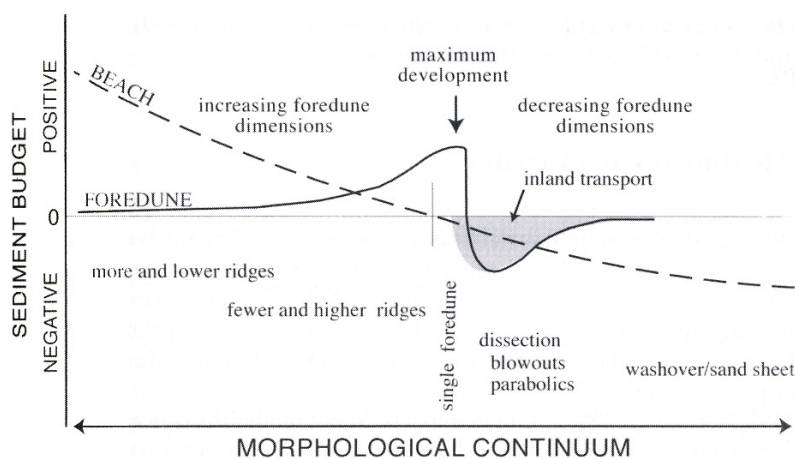


Figura 4 - Modello concettuale del rapporto tra il bilancio sedimentario della spiaggia e quello della duna, il trasferimento del sedimento verso l'entroterra e le morfologie risultanti dalla mobilitazione e dalla deposizione della sabbia nei vari punti del profilo del sistema spiaggia-duna. La linea più scura rappresenta le condizioni e i rapporti perché la duna si sviluppi al massimo, mentre la zona ombreggiata (in grigio) rappresentano le condizioni perché si riesca ad alimentare anche le dune secondarie e le forme trasgressive (paraboliche). Man mano che aumentano d'intensità i processi erosivi non c'è più accumulo di sabbia sulla foredune che supporti il trasferimento di sabbia verso l'entroterra e allora possono crearsi le condizioni per la formazioni di washover e sandsheet (corrispondenti ai valori minimi del budget sedimentario) (Psuty, 2004).

Nel momento in cui la progradazione rallenta, l'opportunità della sabbia di trasferirsi sulla stessa duna aumenta, e di conseguenza volumi e forme si accrescono nella sequenza descritta dal diagramma con rapporti di equilibrio dinamico e di proporzione diretta con il tasso reale di apporto sedimentario. Variazioni positive del bilancio, quando invece "importanti" dal punto di vista del tasso di trasferimento sedimentario, conducono di fatto ad un aumento progressivo della complessità dell'intero sistema: questo vuol dire che all'aumento dei volumi e delle dimensioni delle forme si accompagna spesso lo sviluppo ecologico di tutta una nicchia di sopravvivenza per specie vegetali tipiche di tali sub-ambienti.

La configurazione più problematica da interpretare e quindi da "classificare" è rappresentata dalla spiaggia che mostra un sostanziale equilibrio o un leggero budget negativo, poiché nel grafico si legge che ad essa corrisponde la fase di massimo sviluppo morfologico della duna, nonostante la spiaggia sia in leggera erosione. La dicotomia sta nella difficoltà, a volte, di non riuscire a distinguere la condizione tipica della stagione invernale e del dinamismo naturale dato dal succedersi delle mareggiate), in quanto anche loro producono breve termine condizioni simili, ma non per questo favoriscono la crescita della duna. Evidenze di campo (Psuty & Allen, 1993) e numerosi esempi di dune ben strutturate su tratti di costa in erosione, suggeriscono che tali condizioni vengono ad instaurarsi prevalentemente laddove il

trasferimento di sabbia dalla spiaggia verso, e sulla duna, uguaglia o diventa simile alla quantità di sabbia che viene da essa prelevata durante i vari episodi di erosione. Va specificato che tale dinamismo si giustifica perché, sia a breve termine (dopo le mareggiate), che a medio termine (nelle stagioni immediatamente successive a quelle invernali), la duna riesce di solito a recuperare naturalmente parte del volume di sedimento perso.

Il modello indica che esiste anche un settore nella curva (in grigio) che identifica le condizioni ideali per il trasferimento del materiale verso le regioni più interne: un aspetto, questo, che sarebbe di supporto concettuale ai meccanismi di sviluppo e di crescita delle dune a scala regionale (trasformazione, da singoli apparati in sistemi più continui e complessi, che si estendono lungo tratti di litorale più ampi – Hesp, 1999). Esiste sempre un certa differenza spazio-temporale tra una variazione del bilancio della spiaggia (sia che essa mostri un trend di tipo erosivo, sia di tipo progradazionale), e gli effetti morfologici che essa poi produce sulla duna (e viceversa), a meno che intervenga qualche fattore esterno ad accelerare i processi e a sbilanciare gli equilibri. Tale intervallo diventa fondamentale per la stabilità del sistema soprattutto quando questo è soggetto ad erosione: la duna ha bisogno di un certo periodo infatti per riuscire a rifornire la spiaggia del materiale eventualmente prelevato durante una mareggiata. Se ciò non avviene, l'erosione connessa al moto ondoso può arrivare sino alla duna, scalzarne il piede, e in alcuni casi anche creare dei varchi di accesso verso le zone retrostanti (*washover*) (Psuty, 2004).

In alcuni casi (e la regione Emilia-Romagna da questo punto di vista, ne rappresenta un triste esempio), a questi fattori “naturali” possono sostituirsi e/o sommarsi anche fattori di tipo “non-naturale”. L'uomo, quando interviene sull'ambiente costiero, può produrre conseguenze disastrose per la stabilità di un sistema dunare, sia a scala locale che regionale; può accelerare fenomeni erosivi a tal punto da condizionare pesantemente tutti i possibili scenari evolutivi, non solo delle prime centinaia di metri di ampiezza media del litorale, ma anche di diversi km del territorio retrostante, vista la particolare configurazione altimetrica di gran parte di quell'Emilia-Romagna che si affaccia sulla costa. In tal senso, i concetti di TEMPO e INTENSITÀ con i quali determinati processi agiscono nello spazio, rappresentano chiavi di lettura fondamentali: potrebbero essere di aiuto per creare modelli evolutivi che siano più completi e reali (anche se con validità più “locale” che generale), in grado di valutare in maniera più concreta lo stato di evoluzione di ciascun sistema spiaggia-duna, e di conseguenza essere utilizzati per fare scelte e programmare interventi in modo più oculato e certamente più efficace.

### **3.3 CLASSIFICAZIONE DELLE DUNE COSTIERE**

**KEY WORDS** (Principali classificazioni esistenti in letteratura; review bibliografico; descrizione dei parametri scelti per la classificazione adottata)

---

Come è stato descritto in parte nei capitoli precedenti, la possibilità di individuare gruppi entro cui i singoli apparati (o parti di essi), possono essere distinti, raggruppati e descritti, è un problema che la letteratura scientifica ha da tempo cercato di affrontare con coerenza e uniformità: spesso gli approcci però sono stati inevitabilmente assai diversi tra loro, a causa dell'elevato numero di fattori che possono, di fatto, condizionare l'evoluzione di tali sistemi.

La difficoltà di riuscire a definire una classificazione che sia completa ed esaustiva allo stesso tempo e da tutti i punti di vista, diventa ancora maggiore allorché si parte dalla necessità (come già più volte evidenziato) di considerare il concetto di "SISTEMA SPIAGGIA-DUNA" piuttosto che di duna a sé stante. In quest'ottica diventa fondamentale la corretta determinazione e parametrizzazione di tutti i FATTORI DI CONDIZIONAMENTO (Capitolo BB): l'individuazione e la caratterizzazione di tali elementi, in particolare i rapporti spaziotemporali, la velocità e l'intensità dei processi in atto, la congruenza e l'uniformità tra le forme che essi producono e/o modificano.

Le osservazioni dirette sul campo e le analisi in remoto (foto aeree e immagini satellitari) hanno permesso di individuare e descrivere aspetti evolutivi, forme e/o processi che non tengono conto solo degli aspetti "naturali" di evoluzione, ma anche di quelli "NON naturali", forse oggi più di ieri fondamentali per la sopravvivenza degli ultimi apparati ancora esistenti.

Di seguito, dopo un excursus sulle classificazioni più conosciute in letteratura, verranno approfonditi gli aspetti presi in considerazione per quella sviluppata in questo lavoro: partendo dalla consapevolezza che il sistema costiero dell'Emilia-Romagna ha evidentemente dinamiche evolutive a forte valenza locale, si è cercato di fondere criteri e classi degli autori più importanti, in funzione della variabilità che le dune mostrano sul territorio regionale, e applicando modifiche laddove si rendesse necessario per riuscire a caratterizzare un sistema che, in Emilia-Romagna, diventa sempre più di tipo antropomorfo.

#### ***3.3.1 Stato dell'arte (Review Bibliografico)***

In letteratura gran parte degli studi sulle dune hanno riguardato l'analisi morfologica e/o morfoevolutiva delle forme, e la classificazione che i vari autori hanno via via cercato di

sviluppare, ha assunto negli anni caratteri molto diversi l'una dall'altra, in funzione dell'aspetto caratterizzante che veniva preso in considerazione .

Melton (1940), Smith (1954) e Cooper (1958, 1967) introdussero, nei rispettivi lavori, i concetti di DUNE **PRIMARIE** e di DUNE **SECONDARIE** soprattutto per una prima, generale, distinzione delle forme eoliche alla mesoscala, mentre Davies, nel 1980, raggruppò, utilizzando il primo termine, solo gli apparati che risultano morfodinamicamente e sedimentologicamente connesse alla spiaggia, distinguendo le (a) **FREE DUNES** (libere di muoversi, di svilupparsi, e per questo definite anche “mobili” - Es. cordoni trasversali, barcane, cordoni obliqui, cordoni gravitativi), dalle (b) **IMPEDED DUNES** (in questo caso fissate, a partire generalmente dalla parte alta della spiaggia, da una variabilità di specie vegetali che ne determinano e ne fissano limiti ed estensioni - Es. dune frontali, *sand beach ridges*, piattaforme dunari). Seguendo lo schema proposto da Davies, le dune “Secondarie” (che derivano invece prevalentemente dall'erosione delle Impeded dunes), possono essere invece distinte in (c) **TRANSGRESSIVE DUNES** (Es. dune di blowout, dune paraboliche, dune longitudinali, *trasgressive sheet*) e (d) **REMNANT DUNES** (letteralmente “dune residuali”, derivanti dall'erosione di dune primarie vegetate).

McKee (1979a), in accordo con Pye&Tsoar (1990), separa le forme dunari “**SEMPLICI**”, da quelle “**COMPOSTE**”, e “**COMPLESSE**” (indicate anche con il termine di “megadune”). Le dune “Semplici” sono rappresentate da apparati che hanno uno sviluppo limitato, per le quali è possibile sempre distinguere e tracciare bene i contorni, per cui appaiono appunto come apparati SINGOLI. Quelle “Composte” sono dune dello stesso tipo, nate singolarmente, ma separate nello spazio, le quali finiscono da un certo momento in poi in associazione per fenomeni di coalescenza o di sovra-imposizione. Si definiscono, infine, dune di tipo “Complesso”, quelle forme, sempre singole, anch'esse che si aggregano per coalescenza o per sovra-imposizione, in fasi di crescita o di sviluppo che però sono diverse tra loro per cui, a differenza delle precedenti, non mostrano corrispondenza reciproca per tipologia o per stadio evolutivo.

Klijn nel 1981, non si limitò a separare semplicemente le dune naturali da quelle influenzate dall'uomo, ma provò a distinguere quelle in stato di progressivo sviluppo (*accretion dunes*), da dune in condizioni di stabilità (*stable dunes*), da dune in erosione (*erosion dunes with cliffs*).

Nel 1989 Psuty concentrò invece l'attenzione sulla forte diversificazione nella morfologia che alcuni apparati mostravano in relazione alla vegetazione e alla distribuzione granulometrica

del sedimento, dalla spiaggia verso la duna, per cui provò a creare delle classi separate di morfotipi dunari che descrivessero l'interazione tra la spiaggia e la duna in termini di budget sedimentario; distinse le dune cosiddette "PRIMARIE" da quelle definite "SECONDARIE", a cui aggiunse un gruppo di morfotipi che indicò con il termine di "SAND SHEET": le prime (uniche ad essere, secondo l'autore, realmente classificabili come dune "costiere" a causa della stretta interconnessione con i processi marini) sono caratterizzate da un attivo interscambio sedimentario con la spiaggia, mentre le seconde ne sono quasi completamente escluse; le terze, invece, rappresentano forme trasgressive ed erosive.

Tentativi di classificare le dune furono fatti anche alla scala del singolo affioramento, in funzione cioè di elementi morfologici o di parametri morfometrici quantificabili in remoto o direttamente sul campo, come ad esempio la forma, l'associazione di forme, il numero e l'orientazione delle "SLIP-FACES" (letteralmente "piani di pendenza" o superfici di raccordo morfologico tra il piede della duna e la cresta, i quali risultano connessi alla direzione risultante del trasporto sedimentario e dei venti prevalenti).

Lo stato di attività, il grado di mobilità della duna o dell'antropizzazione dell'intero sistema spiaggia-duna rappresentano altri classici esempi di parametri che sono stati utilizzati per classificare i sistemi dunari (Aufrère, 1931, 1933; Bryan, 1932; Hunter et alii, 1983; Melton, 1940; Smith, 1946, 1953, 1963; McKee, 1979b, 1983; Wasson & Hyde 1983a; Thomas 1989b). In linea con tale approccio sembra svilupparsi la seconda classificazione di McKee (1979b), nella quale egli suddivide gli apparati dunari proprio in base al numero e dell'orientazione di quelle che vengono indicate come *slip-faces*: le dune definite con il termine di "BARCANOIDI", corrispondono a tutte quelle forme che, spinte dall'azione di un solo vento prevalente (unica direzione), sviluppano un'unica superficie di raccordo; una sottoclassificazione di tale gruppo distingue le "Barcane", dai "Cordonì Barcanoidi", dalle "Dune Trasversali", in funzione di una corrispondente e crescente disponibilità di sabbia (Figure 5a, 5b e 5c). Se il vento mostra una distribuzione bimodale nella media delle direzioni di propagazione, allora si svilupperanno forme di tipo "LINEARE" (*Seif or Linear Dunes*) o dune di tipo "ROVESCIO" (*Reversing Dunes*), mentre se non è possibile distinguere delle direzioni prevalenti, saranno favorite forme di tipo "STELLARI" (*Star Dunes*) (Figure 1d/e/f).

In verità le relazioni tra il regime del vento, l'orientazione di tali superfici, e la direzione di movimento progressivo degli apparati dunari è estremamente complesso: in tal senso ne deriva che termini descrittivi come "longitudinale" e/o "trasversale", i quali possiedono oltre

ad un significato geometrico (relativo all'orientazione reciproca tra assi di sviluppo di cordoni dunari e assi di propagazione del vento o di sviluppo della linea di riva), implica chiaramente anche una connotazione genetica, per cui, spesso, finiscono per essere utilizzati in maniera non perfettamente appropriata.

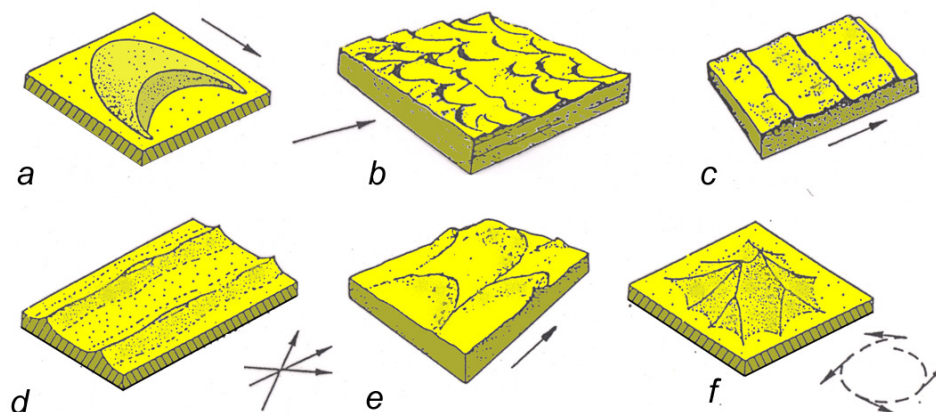


Figura 5 – Schemi delle principali tipologie di duna secondo la classificazione di McKee (1979b).

A tal proposito esistono anche classificazioni (Hack, 1941) che prendono in esame il rapporto tra la distribuzione della vegetazione e le forme connesse a tali direzioni di sviluppo, in relazione all'apporto di sabbia accumulata per opposizione da parte delle varie specie vegetali (Figura 6): accade che tale accumulo, quando eccessivamente abbondante, può favorire la sepoltura progressiva della stessa vegetazione, provocandone la scomparsa totale o parziale (proprio in termini di densità e distribuzione). In questo caso, i termini “longitudinali” (Figura 6a) e “trasversali” (Figura 6b) identificano, rispettivamente, dune con una vegetazione rigogliosa (che quindi si accresce per un apporto non eccessivo di sabbia) e dune con vegetazione quasi assente (per le quali invece è abbondante il contributo sedimentario proveniente dalla spiaggia); a queste, si aggiunge il gruppo delle dune “Paraboliche” (da non confondersi con le dune paraboliche della classificazione di Hesp, Figura 6c), le quali rappresentano evidentemente tutte le situazioni intermedie.

Hunter *et alii* (1983) suggerisce che tali termini andrebbero utilizzati secondo il loro puro e semplice significato geometrico, per cui quello di duna “longitudinale” va usato solo quando l'angolo tra la direzione di massimo sviluppo della duna e quella di massimo trasporto del sedimento è inferiore ai 15°, mentre una duna “trasversale” è quella per cui i 15°



rappresentano il limite massimo rispetto alla normale del trasporto; le forme che non soddisfano tali condizioni vengono definite dune “oblique” (Figura 7).

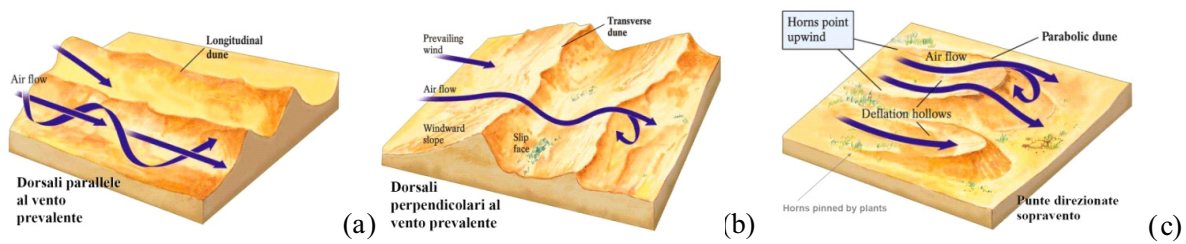


Figura 6 – Schemi delle tre principali tipologie di dune (Hack, 1941).

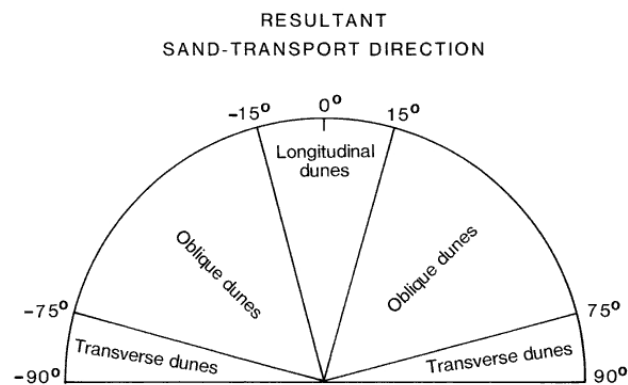


Figura 7 – Classificazione morfodinamica di dune lineari in termini di differenza angolare tra la direzione media dell’asse della duna, e quella di trasporto eolico a lungo termine (Hunter et alii, 1983).

Esistono alcune forme con una struttura che è una via di mezzo tra le dune trasversali e quelle longitudinali, sviluppano cioè tratti trasversali che si alternano a zone chiaramente longitudinali: a queste particolari configurazioni, Carson & MacLean (1985a,b, 1986) hanno dato il nome di forme IBRIDE, anche se il termine non è stato molto accettato in letteratura (Hunter et alii, 1985). Goldsmith (1989) suddivide le dune in base al ruolo della vegetazione, distinguendo le (a) DUNE VEGETATE, (b) DUNE PARABOLICHE, (c) DUNE tipo “MEDANOS” (grossi accumuli collinari di sabbia priva di vegetazione), (d) DUNE ARTIFICIALI (inseminate).

Il gruppo (a) e quello (c) rappresentano i due estremi di configurazione naturale entro cui possono convergere tutte le forme dunari che spinte dal vento (unico agente morfogenetico,

considerato valido per tutte le classi) evolvono attraverso il gruppo intermedio delle dune paraboliche, secondo uno schema classico che, per l'autore, è quello che porta le forme più semplici (c-Medanos) verso quelle più complesse (a-Vegetate). Ancora, Arens & Wiersma (1994) classificarono le dune in funzione della distribuzione geografica di tipologie differenti, del loro grado di naturalità e dell'incidenza che il trasporto eolico ha sull'evoluzione di ciascun apparato (Figura 8). La distinzione che ne derivò, si basava sul (a) **GRADO DI SVILUPPO** (intesa in termini di risposta ai processi deposizionali o erosivi), per cui è possibile distinguere *FOREDUNE PROGRADANTI*, *FOREDUNE STABILI* e *FOREDUNE EROSIVE* in funzione delle variazioni volumetriche).

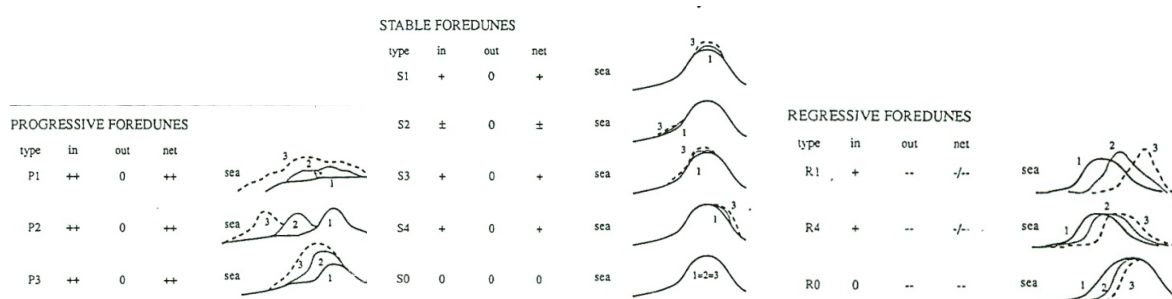


Figura 8 – Schema di classificazione morfodinamica delle dune in base alle variazioni volumetriche che si registrano come risposta ai processi di deposizionali e erosivi (Arens & Wiersma, 1994).

Tale approccio e tale suddivisione verrà più approfonditamente ripresa nella sezione descrittiva della classificazione adottata in questo lavoro (Capitolo 6), in quanto gli stessi autori, nello stesso lavoro hanno sviluppato anche un modello concettuale di relazioni esistenti tra i diversi fattori che condizionano la forma di una duna.

Infine, Nordstrom & Jackson (2003) individuano 6 diversi gradienti (configurazioni) del sistema spiaggia-duna in grado di descrivere lo stato antropico in cui si può trovare una duna. Il passaggio tra i vari gradienti avviene in maniera naturale, dall'alto verso il basso, man mano che aumenta l'erosione, mentre dal basso verso l'alto, il ripristino può avvenire solo tramite un intervento diretto dell'uomo (Es. ripascimento).

### 3.3.2 Il modello di riferimento

Hesp and Short (1980), e ancora Hesp (1984; 1989), proposero una classificazione degli apparati dunari che, a differenza delle precedenti (Aufrère 1931; 1933; Bryan, 1932; Melton

1940; Hack, 1941; Smith 1946, 1953, 1954, 1963; Cooper 1958, 1967; Klijn nel 1981; Hunter et alii, 1983; McKee 1979a/b, 1983; Wasson & Hyde 1983a; Hunter et alii, 1983; Carson & MacLean, 1985a,b, 1986; Goldsmith, 1989; Psuty, 1989; Thomas 1989b; Pye&Tsoar, 1990; Arens & Wiersma, 1994; Nordstrom & Jackson, 2003) permette di distinguere le dune sulla base delle diverse caratteristiche ecologiche e geomorfologiche. Come si vedrà meglio in seguito, tali classificazioni permettono di individuare e descrivere caratteri morfologici ed ecologici appunto tanto peculiari, secondo l'autore, da risultare essere diagnostici per i diversi stadi di "maturità" morfologica che un sistema dunare attraversa durante il corso della sua evoluzione. L'analisi parte dalla generale distinzione tra dune **ESTERNE** (*foredunes*), dune **PARABOLICHE** (*parabolic dunes*), **CAMPI DUNARI TRASGRESSIVI** (*dune fields*), dune in **COSTA ALTA** (*cliff-top dunes*) (Figura 9).

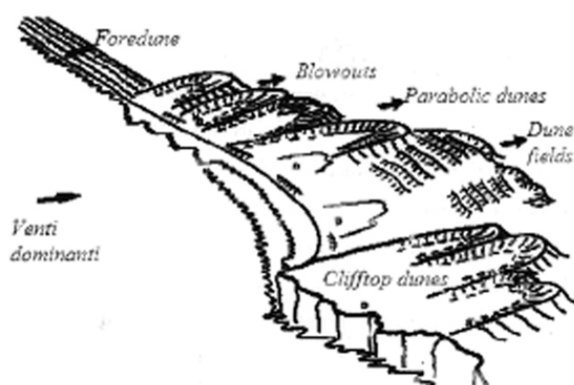


Figura 9 – Schema di classificazione delle diverse tipologie di dune costiere (Short, 1988).

Tale generale e grossolana differenziazione è sembrata essere, nell'ambito del presente lavoro, il punto di partenza migliore per arrivare a definire un criterio morfologico di analisi che rispecchiasse le finalità della ricerca e che fosse omogeneo e congruente alla scala di lavoro, non solo per la classificazione, ma anche per la parte di fotointerpretazione e interpretazione spettrale, per la determinazione dei tassi eolici teorici e reali (sperimentazione eolica), fino alla parametrizzazione, definizione, e applicazione delle matrici d'interazione binaria (Teoria dei Sistemi) e di derivazione degli indici di stabilità, si è cercato di stabilire una chiave di lettura che fosse la più adatta per tutti gli aspetti da analizzare. Per tale motivo di seguito si cercherà di descrivere nel dettaglio le entità principali che poi saranno rappresentate (in codice) all'interno della classificazione adottata.

### a. LA DUNA ESTERNA (*FOREDUNE*)

Una *foredune* per definizione è un deposito eolico che si sviluppa parallelamente alla linea di riva, immediatamente alle spalle della spiaggia alla quale risulta dinamicamente collegata, che evolve in risposta sia alle interazioni tra il trasporto di sedimento e lo sviluppo della vegetazione, che ai principali processi di dinamica litorale (moto ondoso). Generalmente presenta in sezione un profilo di tipo convesso, leggermente asimmetrico e con il lato verso mare (sopravento o “*stoss-side*”) più ampio e meno inclinato rispetto al lato verso terra (sottovento o “*lee-side*”).

La duna esterna è stata nel tempo indicata e descritta utilizzando varie definizioni e terminologie: da DUNE EMBRIONALI (*embryo dunes*) (Salisbury, 1952), si è passati alle DUNE FRONTALI (*frontal dunes*) (Guilcher, 1958), alle PRO-DUNE (*pro-dunes*), alle ONDULAZIONI SULLA SPIAGGIA (*beach-ridge dunes*) (Bigarella et alii, 1969) fino alle cosiddette DUNE DI RITENZIONE (*retention ridges*) (McKee, 1979); all’interno della classificazione di Davies (1980), così come descritta nei paragrafi precedenti, le foredune (o dune esterne) sarebbero classificabili come DUNE PRIMARIE (derivate cioè direttamente dai sedimenti di spiaggia), mentre in quella di Tinley (1985) come DUNE VEGETATE.

Questa vasta terminologia in letteratura è stata riassunta e minuziosamente trattata da Hesp (1983, 1984a, 1984b, 1988a), per il quale è possibile distinguere le foredune in ulteriori 2 sottotipi principali: la DUNA ESTERNA **INCIPIENTE** (*incipient foredune*) e la DUNA ESTERNA **STABILIZZATA** (*established foredune*) (Figura 10). Nel primo caso, egli fa riferimento a quei depositi embrionali (mobili e di prima formazione) che vengono colonizzati da specie vegetali pioniere (in grado cioè di attecchire, per caratteristiche biologiche, anche su accumuli sabbiosi non stabili), che si possono sviluppare fin anche alla zona più alta della spiaggia emersa (*backshore*).

Per alcuni di essi, la colonizzazione può avvenire anche da parte di specie diverse, di tipo non “pioniere”, le quali provviste di fitti cespi e rizomi ramificati (*Ammophila arenaria*), riescono a stabilizzare l’accumulo e a favorire un ulteriore incremento nei processi di deposito della sabbia trasportata dal vento; in questo modo, la duna diventa ancora più stabile e complessa da un punto di vista sia ecologico che morfologico-topografico, trasformandosi cioè in quella che viene appunto definita “duna esterna stabilizzata”.



Figura 10 – Esempio di duna esterna *INCIPIENTE* (a) e duna esterna *STABILIZZATA* (b) (Lido degli Estensi, Ferrara).

In tal senso è possibile individuare una serie temporale e spaziale comune a tutti i sistemi dunari, naturalmente valida a scala locale (si vedrà poi, per le dune in esame, anche a scala regionale), per cui sia proseguendo verso l'entroterra, che con i processi di accumulo e di sviluppo vegetale, durante un ciclo normale di sviluppo del sistema, la duna viene progressivamente consolidata da una vegetazione sempre più folta e rigogliosa, dapprima con sviluppo a macchia, quindi, quando le condizioni diventano favorevoli, da specie legnose ad alto fusto (Pignatti, 2002).

La morfologia di una *foredune* dipende da un gran numero di fattori tra cui la disponibilità di sedimento, il grado e il tipo di copertura vegetale, il tasso di trasporto eolico, il grado di umettamento della spiaggia e la frequenza e l'intensità delle forze del mare e del vento. In funzione della potenziale variabilità di tali fattori, è facilmente intuibile come possa esistere un'ampia gamma di forme corrispondenti: è proprio su tale concetto (criterio morfo-ecologici) che si basa la classificazione proposta da Hesp (1988a). Tale suddivisione identifica 5 fasi distinte, le quali corrispondono a 5 possibili categorie e/o classi, sulla base principalmente delle caratteristiche morfologiche (prodotte principalmente dal vento) e di copertura vegetazionale dei singoli apparati, ciascuna comprendenti morfologie tanto dominate dalla vegetazione (fase 1) quanto appunto dal vento (fase 5).

- **FASE 1**

Le dune appaiono topograficamente semplici, ondulate e ben vegetate (Figura 11). Sono composte da un singolo cordone dunare esterno stabilizzato, che presenta una

rilevante continuità laterale ed è accompagnato da uno e più cordoni dunari esterni incipienti. Generalmente mostrano un profilo a bassa asimmetria con pendenze massime che non superano i 20° sul lato sottovento e presentano una zonazione vegetale completa con una copertura compresa tra il 90 e il 100%.

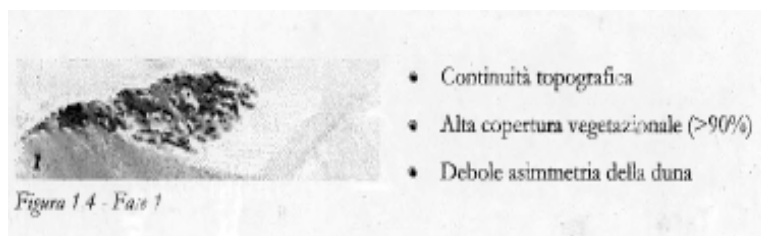


Figura 11 – fase 1 del modello morfoevolutivo: a lato le caratteristiche morfologiche, ecologiche e morfometriche caratteristiche (Hesp, 1988).

Osservazioni a lungo termine indicano come la maggiore densità della copertura vegetale e la maggiore altezza della duna esterna stabilizzata limitino i processi di trasporto e di deposizione nel settore più basso del lato sopravvento. I processi di erosione indotti dal moto ondoso sono molto improbabili, e comunque sempre limitati nell'estensione.

- **FASE 2**

In questa fase (Figura 12) la duna presenta la stessa morfologia generale della fase 1, ma è minore il grado di copertura vegetazionale (75-90%). Sono forme caratterizzate da alcune zone di deflazione canalizzate (Through blowouts) di piccole dimensioni (<4m<sup>2</sup>) e da locali fenomeni di instabilità sulla cresta.

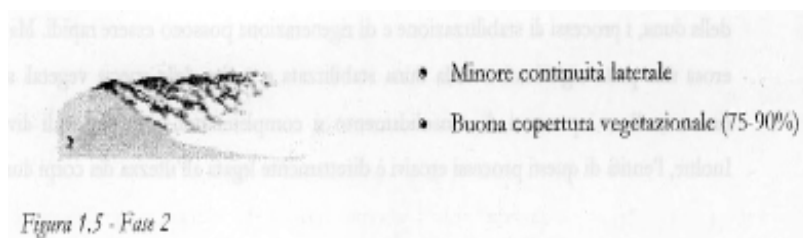


Figura 12 – fase 2 del modello morfoevolutivo: a lato le caratteristiche morfologiche, ecologiche e morfometriche caratteristiche (Hesp, 1988).

Tuttavia, l'alto grado di copertura vegetazionale limita la possibilità che si inneschino ulteriori fenomeni erosivi. In questa fase, la maggiore zona di accumulo è situata sia sul lato sopravvento della duna che sulla cresta. In relazione ai fenomeni erosivi causati dalle forti mareggiate, la duna è in grado di rimanere relativamente stabile fintanto che la vegetazione lungo la cresta della scarpata sia sana e che il vento non acceleri lungo di essa. Dopo la mareggiata, i processi di deposizione avverranno prima di tutto a colmare lo scalino prodotto dalla scarpata e poi nuovamente ridiventerà predominante la deposizione lungo il fianco sopravvento e la cresta.

- **FASE 3**

Rappresenta lo stato più comune (Figura 13): le dune sono caratterizzate dall'andamento tipico a monticelli (Hummocky), da creste irregolari, da una parziale copertura vegetale (45-75%), da zone di deflazione, da modeste (< 10m di ampiezza) a medie (< 30-40m di ampiezza), che però tendono ad aumentare progressivamente da questa fase in poi. Il grado di asimmetria del profilo tende ad aumentare in maniera proporzionale alla copertura vegetazionale. È quindi possibile delinearne un aumento progressivo dalla fase 1 alla fase 4, con fianchi sopravvento sempre più ampi e a basso angolo, con fianchi sottovento sempre più ripidi.

Un fenomeno molto comune è la presenza di forme di erosione legate all'azione delle mareggiate: se la scarpata che si viene a formare è modesta e sulla cresta permangono un numero sufficientemente elevato di specie vegetali pioniere e/o rizomatose, allora i processi di stabilizzazione e di rigenerazione possono essere anche molto rapidi; ma se è stata erosa una parte cospicua della duna e molte specie sono state rimosse, allora i processi di consolidamento si completeranno non prima di alcuni anni. L'entità di tali processi erosivi è direttamente proporzionale all'ampiezza della duna.

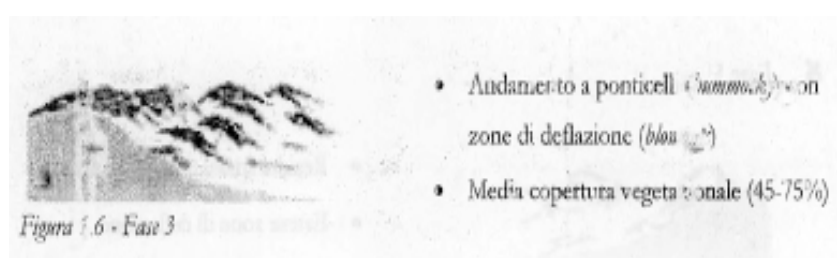


Figura 13 – fase 3 del modello morfoevolutivo: a lato le caratteristiche morfologiche, ecologiche e morfometriche caratteristiche (Hesp, 1988).

- **FASE 4**

È caratterizzata da zone di deflazione da moderate a estese, alternate a cordoni dunari debolmente vegetati (20-45%). Queste dune esterne possono mostrare una grande varietà nell'estensione e nella morfologia (Figura 14).

È infatti possibile osservare cordoni dunari lateralmente continui per diverse centinaia di metri, e in questo caso caratterizzati da un versante sopravento scarsamente vegetato e concavo in sezione, o altri interrotti in più unità da zone di deflazione. In entrambi i casi l'asimmetria dei corpi è elevata e il trasporto è maggiore verso il settore di retroduna.

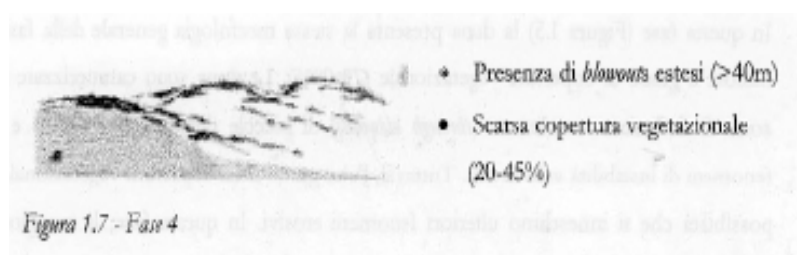


Figura 14 – fase 4 del modello morfoevolutivo: a lato le caratteristiche morfologiche, ecologiche e morfometriche caratteristiche (Hesp, 1988).

- **FASE 5**

In questa fase si possono riconoscere solamente alcuni residui di cordoni dunari poco vegetati (5-20%) con ampie zone di deflazione (Figura 15). L'evoluzione di tali aree è legata principalmente all'azione del vento in funzione dell'estensione e del tipo di specie vegetali dominanti.

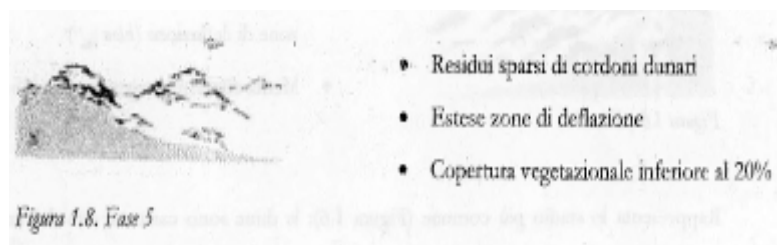


Figura 15 – fase 5 del modello morfoevolutivo: a lato le caratteristiche morfologiche, ecologiche e morfometriche caratteristiche (Hesp, 1988).



Nel 2002 Hesp propose e sviluppò un modello integrato per l'evoluzione della duna esterna stabilizzata che si può riassumere nello schema riportato in Figura 16. Secondo tale modello i vari stadi (dalla fase 1 alla fase 5) indicano che una duna esterna può permanere stabile nel tempo, collocandosi in una ben determinata fase, oppure evolvere secondo un ciclo erosivo/deposizionale tra i diversi livelli evolutivi, in risposta ai vari processi esterni che interagiscono con il sistema, in maniera diretta, come ad esempio l'erosione eolica o marina, o indiretta come una brusca riduzione della copertura vegetale.

In certe condizioni possono innescarsi fenomeni di ri-vegetazione o riduzione dei processi erosivi, per cui si può interrompere la sequenza, innescando la formazione di nuovi depositi e la colonizzazione di nuove specie su aree di spiaggia ormai in uno stato di avanzato degrado; in questo caso, gli stadi 3, 4 e 5 tenderanno verso gli stadi 3h, 5b. A tal proposito i riquadri A, B e C forniscono la descrizione visiva dei possibili scenari evolutivi a lungo termine a cui la duna può andare incontro dai diversi stadi.

Il riquadro C descrive i possibili scenari evolutivi per i primi tre stadi (1, 2 e 3), rispettivamente su spiagge stabili, in corrispondenza delle quali si assiste ad un aumento volumetrico del corpo dunare sul lato sopravvento senza una migrazione apprezzabile del piede della duna, su spiagge stabili e debolmente progradanti, per cui la duna esterna stessa si amplierà e migrerà verso mare, e su spiagge decisamente progradanti in corrispondenza delle quali si assiste alla formazione di corpi man mano sempre nuovi lungo la direzione verso mare. Il riquadro C mostra anche il modellamento a cui può andare incontro una morfologia residuale (per esempio uno "knob"), a ripetuti eventi erosivi: come si evince chiaramente dalla figura, il destino finale di tale forma è rappresentato dal suo completo e progressivo smantellamento.

Il riquadro B, d'interesse per gli stadi 3 e 4, mostra tre possibili scenari evolutivi in funzione del maggiore grado di erosione (dall'alto verso il basso) della spiaggia antistante, mentre il riquadro D presenta le dinamiche a cui tutte le cinque fasi possono andare incontro a seguito di un evento di mareggiata più o meno intenso, che può manifestarsi o tramite la realizzazione di una scarpata o di un washover.

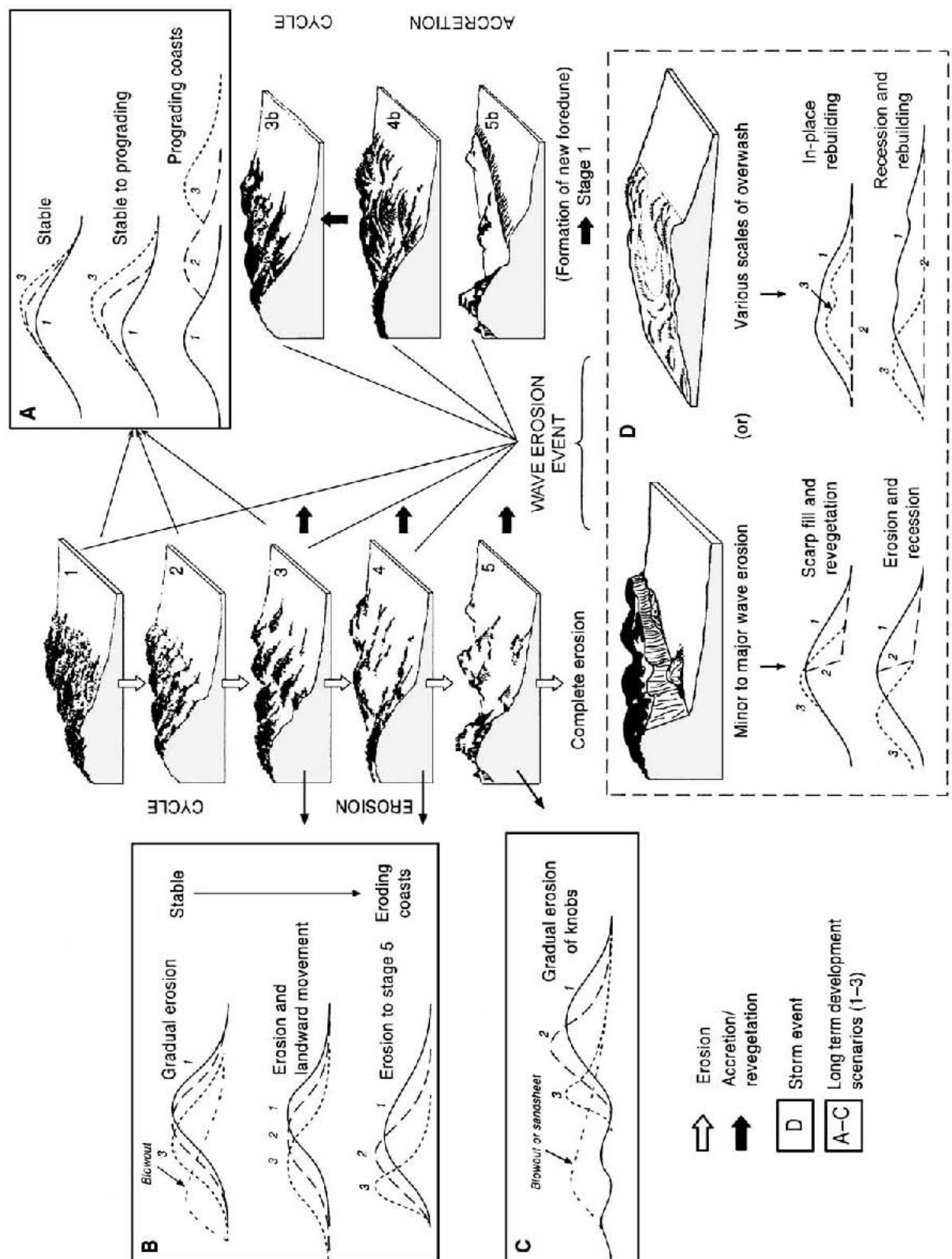


Figura 16 – Schema di evoluzione di una duna esterna (foredune) attraverso le 5 fasi evolutive secondo un ciclo di tipo EROSIVO (a) o DEPOSIZIONALE (b). Nel modello vengono prese in considerazione anche evoluzioni alternative, legate a variazioni delle condizioni a contorno in corrispondenza di ciascuna fase (estesa a lungo termine)(riquadri A, B e C) o a seguito dell'erosione prodotta dal mare (D) (Hesp, 2002).

## **b. LA DUNA PARABOLICA**

Le dune paraboliche sono dune a forma di U o V caratterizzate da cordoni laterali ancorati dalla vegetazione e da un'ampia zona centrale di deflazione, priva di vegetazione, che tende a migrare lungo la direzione prevalente del vento. Morfologicamente queste dune possiedono un lato verso terra ripido e ben vegetato, mentre il lato verso mare risulta privo di vegetazione e piuttosto blando. (Robertson-Rintoul, 1990, Figura 17).



*Figura 17 – Esempio di duna parabolica in Nuova Zelanda (loc. Manawatu)*

L'origine di tali forme è spesso legata a fenomeni erosivi concentrati, per i quali in uno o più punti del cordone possono verificarsi dei cedimenti: in corrispondenza di tali punti, se l'alimentazione da parte del vento è continua, e gli spazi, nelle zone di retroduna, risultano sufficientemente ampi, il trasporto sedimentario può favorire il progressivo allungamento dei depositi eolici corrispondenti, e lo sviluppo di una forte zonizzazione delle specie vegetali dal centro verso l'esterno e lungo l'asse di trasporto; a tal proposito l'angolo formato con quello di sviluppo del cordone dunare fornisce importanti indicazioni sulla direzione preferenziale di propagazione dei venti prevalenti.

## **c. I CAMPI DUNARI TRASGRESSIVI (*trasgressive dunefields*)**

Queste forme sono rappresentate da ampi depositi sabbiosi che sono completamente liberi di migrare verso l'entroterra o lungo riva, su superfici diverse più o meno ampie (boschi, paludi o lagune, da circa 100m<sup>2</sup> a diversi km<sup>2</sup>), a causa di forti venti dal mare; per tale motivo spesso si rinvengono laddove sia l'energia del vento che l'apporto di sabbia è elevato (Hesp e Thom, 1990).

La loro formazione può dipendere da nuovi, e più o meno improvvisi, input sedimentari a disposizione del trasporto eolico, sia dalla riattivazione (spesso per fenomeni di erosione marina) di dune vegetate e consolidate (Davies, 1980). Il termine *trasgressive dunefields* fu coniato da Gardner nel 1955 in Australia riferendosi a depositi sabbiosi sia attivi che ormai stabilizzati dalla vegetazione: erano quindi inclusi nel gruppo le zone di deflazione, le dune paraboliche, i cordoni allungati trasgressivi (*long-walled trasgressive ridges*) e i cordoni gravitativi (*precipitation ridges*).

Nel tempo, altre classificazioni (Goldsmith, 1978; Davies, 1980; Pye, 1983, Hesp & Thom, 1990) inglobarono i diversi morfotipi all'interno di questo ampio termine: in questi casi esso viene però utilizzato in senso più specifico, includendo solo vaste forme non vegetate (ed escludendo quindi le zone di deflazione, le dune paraboliche e le dune in costa alta, le quali per motivi di genesi ed evoluzione verranno descritte in dettaglio nel paragrafo seguente), all'interno dei quali è possibile distinguere morfotipi propri come le **dune trasversali** ed **oblique** (*Trasverse dunes* e *Oblique dunes*), i **cordoni allungati trasgressivi** (*Long-walled trasgressive ridges*).

- ***Campi dunari trasgressivi attivi (Active trasgressive dunefields)***

Da un punto di vista geomorfologico si possono distinguere due forme principali: **campi dunari tabulari** (*tabular trasgressive dunefields*) e **campi dunari a rampa** (*buttress trasgressive dunefields*). I primi si distinguono per la superficie ampia, piana o a monticelli, con un margine verso terra più o meno continuo. I secondi sono caratterizzati da corpi a forma triangolare a costituire una sorta di rampa sabbiosa diretta verso l'entroterra. Queste ultime forme sono maggiormente comuni nelle aree in cui il vento deve trasportare la sabbia disponibile lungo versanti ripidi (Hesp e Thom, 1990).

- ***Dune traversali (Trasverse dunes) ed oblique (Oblique dunes)***

Le dune **traversali** (Figura 18), come definite da Cooper (1958), sono dei cordoni dunari che si sviluppano, in linea con la morfogenesi di tutte le dune, in direzione prevalentemente perpendicolare alla direzione del vento, ma a differenza degli altri

morfotipi, si muovono con esso. Va da sé che affinché possano muoversi sotto la spinta del vento, è necessario che ci sia una discreta disponibilità di territorio sul quale scorrere. Il profilo, in sezione, è chiaramente asimmetrico, con il lato sopravvento dolce e quello sottovento piuttosto ripido. In pianta, possono invece variare forma e distribuzione, con creste dalla configurazione semplice e quasi rettilinea, o con forme sinuose sempre più complesse; possono raggiungere altezze considerevoli (anche fino a 100 m), la loro lunghezza d'onda generalmente aumenta con l'altezza (Matsukura, 1977) e il grado di asimmetria cresce all'aumentare della velocità dei venti (Wipperman e Gross, 1986). Per venti unidirezionali e costanti, le dune trasversali tendono a migrare in un'unica direzione, mantenendo la stessa lunghezza d'onda.

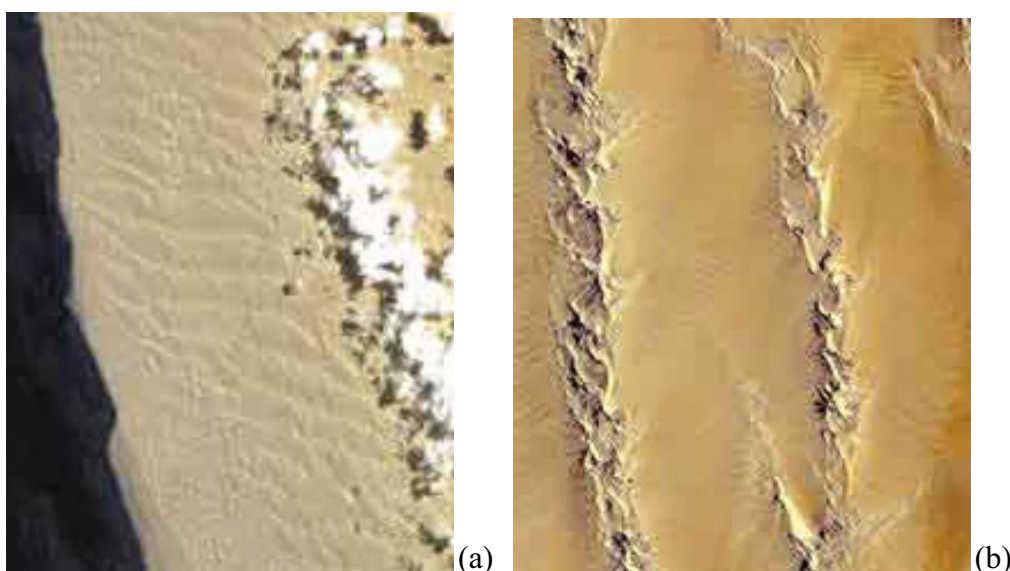


Figura 18 – Esempi di dune trasversali alle estremità del deserto del Sahara (Immagini Aster, [www.sahara.it](http://www.sahara.it)).

- ***Cordoni allungati trasgressivi (long-walled trasgressive ridges)***

Laddove i margini esterni del campo dunare formano un cordone isolato e distinto, è possibile distinguere una forma che a differenza delle dune paraboliche assume un andamento più lineare e allungato, quasi parallela a riva (piuttosto che perpendicolare, come avviene per gli altri morfotipi). La vegetazione non svolge più un ruolo attivo nel trattenere e nel filtrare il sedimento, piuttosto rappresenta un semplice ostacolo contro cui la sabbia può accumularsi indistintamente. Laddove i tassi di avanzamento

dei cordoni risultano minimi ( $< 1\text{m/anno}$ ), questi possono raggiungere anche altezze considerevoli (fin oltre 100m) e, se sono isolati dalla vegetazione, possono anche evolvere in forme strette, allungate, con versanti molto asimmetrici.

### ***Morfotipi residuali a piccola scala***

Sebbene per i campi dunari sia prevalente lo sviluppo di forme a media e a grande scala, morfologie residuali di questo tipo possono svilupparsi anche a piccola scala, come i cordoni di deflazione (*deflative ridges*) e/o le dune residuali (*Knobs*). I cordoni di deflazione sono forme di piccola ampiezza (da 0,5m a 1m), dall'altezza limitata (circa 0,5m) e lunghi non oltre 15m in direzione prevalente parallela alla costa. Questi corpi rappresentano il risultato dell'interazione tra i sedimenti sabbiosi residui all'interno di bacini di deflazione e i sedimenti depositi dal moto ondoso sulla spiaggia; questi ultimi si comportano come un deposito residuale (*lag-deposit*) perché proteggono dall'erosione i sedimenti sabbiosi sottostanti.

I processi di erosione di una duna esterna spesso non sono uniformi nello spazio e nel tempo, per cui può capitare che se ne preservi una porzione: tali morfotipi residuali sono conosciuti in letteratura (Goldsmith, 1978; Davies, 1980; Pye, 1983) con il termine di *knobs* (Figura 19). Va specificato che nei meccanismi di preservazione di tali forme, le specie vegetali e la tipologia degli apparati radicali corrispondenti giocano un ruolo fondamentale.

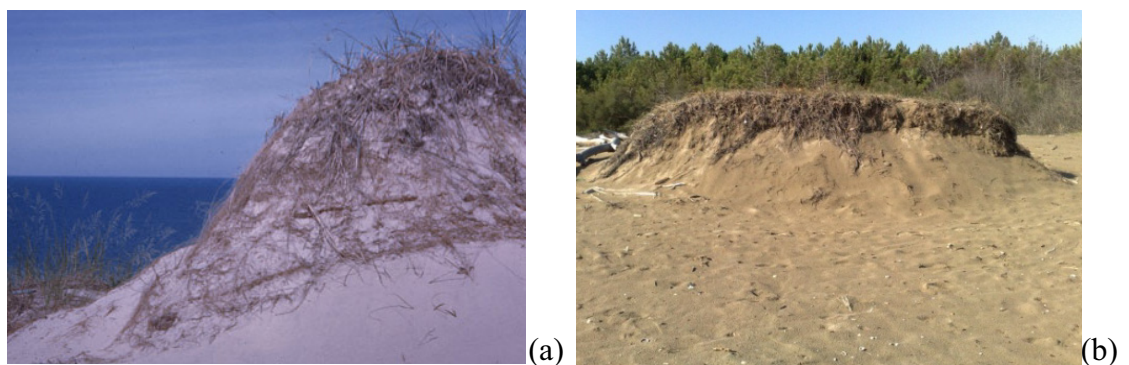


Figura 19 – Esempi di forme erosive residuali (*Knobs*): (a) dune lago Michigan (USA); (b) Lido di Dante.

## ***Morfotipi deposizionali***

Nei bacini di deflazione ormai sviluppati, possono avvenire variazioni geomorfologiche ed ecologiche, per cui la vegetazione può favorire l'intrappolamento di materiale sabbioso e la costituzione di dune; nel caso siano presenti specie pioniere queste possono disperdersi creando quelle che vengono chiamate **Dune a macchia** (*Coppice dunes*) (Goldsmith, 1978; Pye, 1983) dalla forma semicircolare conica. Un'altra forma è quella della **Duna d'ombra** (*Shadow dunes*) (Goldsmith, 1978; Pye, 1983) che si sviluppa alle spalle della duna a macchia o delle dune residuali, dove la sabbia tende ad accumularsi originando depositi a forma piramidale o lobata.

### **d. DUNE IN COSTA ALTA (*clifftop dunes*)**

Le dune in costa alta possono essere definite semplicemente come quelle dune che si sviluppano sulla sommità di falesie incise in formazioni geologiche preesistenti (Saye et alii, 2006). Il tentativo di classificazione delle dune in costa alta che, in letteratura, sembra essere più semplice e completo, è quello di Jennings (1967), il quale propone quattro possibili modelli evolutivi per la loro formazione: Il primo prevede che i cordoni dunari avanzino verso mare a partire da una laguna, baia o qualsiasi altro ambiente, fino a raggiungere una falesia preesistente (Figura 20A).

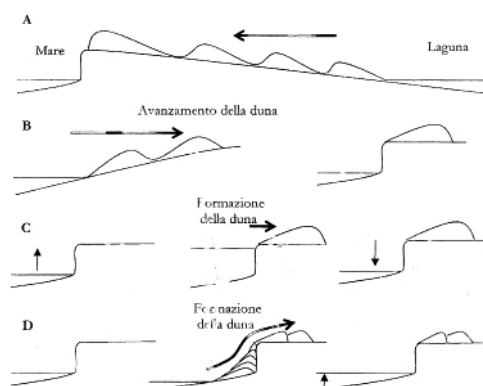


Figura 20 – Esempi di dune che si accrescono in corrispondenza di una falesia (Jennings, 1967).

Altra soluzione è quella di una duna che avanza verso terra su una piattaforma in pendenza, successivamente erosa, lasciando la duna sulla sommità della falesia che si viene inevitabilmente in questo modo a costituire (dune sospese o *perched dunes*, Figura 20B).

È possibile poi che una duna si formi anche durante un periodo di alto stazionamento eustatico, e che poi, per un successivo e relativo abbassamento del livello del mare (o sollevamento tettonico) si venga a trovare “sospesa” (Figura 20C). Infine, a seguito di un abbassamento del livello del mare, è possibile che una ristretta fascia costiera si ritrovi ad essere esposta all’intensa azione del vento (costa di emersione) costruendo una duna la quale, accrescendosi, è in grado di raggiungere la cima della falesia depositando sedimento fin’anche alla sua sommità (Figura 20D).

#### **e. FORME EROSIVE ALLA MESOSCALA**

Va specificato che nel complesso, la maggior parte dei sistemi dunari vanno inquadrati come il risultato di un mosaico intrecciato di forme, sia deposizionali che erosive, in cui, spesso, sono quest’ultime a controllare le prime, e non viceversa. Come si è detto già in precedenza, i processi morfogenetici che agiscono sul sistema spiaggia-duna non sono lineari né nello spazio, né tantomeno nel tempo, per cui quello che si osserva è spesso il risultato dell’azione combinata e sovrainposta di processi che hanno accumulato, costruito, sovrainposto e/o completamente smantellato porzioni più o meno grandi di duna senza uno schema temporale ben preciso. Ciò nonostante tutto, è possibile, a volte, distinguere chiaramente forme diverse di tipo erosivo, di seguito descritte nelle 3 principali tipologie: forme indotte dal moto ondoso, forme legate all’azione erosiva da parte del vento (superfici e/o piane di deflazione), e blowouts.

##### ***Forme legate all’erosione indotta dal moto ondoso***

I fattori essenziali che determinano l’entità dell’erosione, sono le altezze d’onda maggiori in occasioni delle mareggiate più intense (la variabile più importante, pari all’82,8%, secondo Van de Graaf’s, 1986), la granulometria dei sedimenti di spiaggia (pari, per incidenza al 7,3%), la durata della mareggiata (il 2,6%) e infine, il profilo iniziale della spiaggia (con solo l’1,3%). Durante una mareggiata, il tasso di erosione generalmente decade in maniera esponenziale, agendo fin tanto che lo scambio sedimentario tra la spiaggia e la duna mantiene un valore di equilibrio: la duna infatti viene erosa prima che la mareggiata raggiunga il suo picco d’intensità (Houges e Chui, 1981). Lo scalzamento operato dal moto ondoso, quando tale equilibrio non è più soddisfatto, produce una scarpata (Figure 21 a/b), il cui profilo (pendenza) è funzione



del grado di coesione dei sedimenti e dell'eventuale presenza di una componente di cemento: maggiore sarà il valore di tali parametri, maggiore sarà la pendenza della scarpata.

Man mano che avanza l'erosione e la scarpata cresce in altezza e pendenza, i fenomeni di crollo possono avvenire di continuo e/o per piccoli fenomeni isolati; per sedimenti sciolti, o poco consolidati, i processi di crollo avvengono con maggiore frequenza, e ciò produce delle superfici di raccordo più blande, con pendenze che si avvicinano all'angolo di riposo tipico dei sedimenti sabbiosi (pari a  $32^{\circ}$ - $34^{\circ}$ ).



(a)



(b)

*Figura 21 – (a) Esempio di scarpata prodotta dall'erosione marina in corrispondenza di una parato durante in località Lido di Volano (Fe); (b) Quando lo scalzamento al piede è particolarmente intenso possono verificarsi fenomeni di crollo parziale della scarpata (stesso sito).*

Terminata la mareggiata, come parte del processo ciclico di recupero del sistema spiaggia/duna, i sedimenti prelevati dalle onde sono in parte restituiti alla spiaggia e accumulati al piede della scarpata (la quale mostra comunque, ancora, una chiara rottura di pendio); tali forme iniziali sono conosciute in letteratura con il termine di *Echo dunes* (Tsoar, 1983, Figura 22). Successivamente i sedimenti trasportati dal vento potranno ri-accumularsi progressivamente alla base della scarpata, e se i processi risulteranno sufficientemente intensi e il sedimento abbondante, in tempi brevi si potrà anche ricostituire il profilo originario.



Figura 22 – (a) Esempio di accumulo che il mare può creare alla base della scarpata come restituzione parziale del materiale prelevato durante una mareggiata: forme di questo genere rappresentano la prima fase di ricostruzione naturale del profilo originario (Lido Adriano, Ra).

### ***Forme legate all'erosione indotta dal vento***

Quando le superfici sono piatte o debolmente inclinate, o per determinati valori di intensità del vento, i processi eolici possono essere in grado di prendere solo la porzione più fine del sedimento, lasciando un deposito definito “residuale”, costituito solo dalla frazione più grossolana (Carter, 1976). Tale superficie ha importanza soprattutto dal punto di vista fisico, poiché rappresenta di fatto, lo strato limite che fissa l'intervallo di competenza “utile” (anche in termini di granulometria del sedimento) nei processi di trasporto eolico del vento su tali aree.

Tali depositi sono molto comuni negli ambienti costieri, sia in sistemi dunari in erosione che in quelli in progradazione (Hesp, 2002), per questo motivo non derivano necessariamente da processi di tipo erosivo: possono essere aree non deposizionali, per esempio, che si sviluppano tra cordoni dunari mobili (Gares e Nordstrom, 1987), o aree all'interno di dune esterne incipienti che rimangono prive di sedimento, mentre attorno a loro le dune si accrescono in volume e in altezza (Hesp, 1984a).

Il loro orientamento può dipendere da diversi fattori, come ad esempio la morfologia antecedente l'erosione, o la direzione prevalente dei venti, la direzione delle mareggiate dominanti o l'attività di calpestio da parte dell'uomo (Gares e Nordstrom, 1987). In tal senso è possibile distinguere 2 morfotipi principali: i **bacini** e le **piane di deflazione**, entrambi che si rinvengono spesso lungo il margine verso mare di campi dunari trasgressivi che migrano verso l'entroterra. I bacini sono depressioni semicircolari erose dal vento mentre le piane hanno una forma maggiormente allungata e sono generalmente piatte e più estese. Si formano di solito secondo una sequenza temporale ben precisa, nella quale, inizialmente, le dune esterne stabilizzate sono erose dal moto ondoso, con la formazione di una scarpata; quando si raggiungono condizioni di forte instabilità, coincidenti di solito con la progressiva diminuzione della vegetazione, l'erosione operata dal vento agisce sul tratto dunare non più vegetato, provocando la formazione di blowouts e provocando un'ulteriore accelerazione dei processi erosivi. Nel momento in cui la duna esterna comincia ad essere erosa, può costituirsi una prima superficie di deflazione, la quale si amplia man mano che i processi di erosione continuano ad agire; la sabbia, così prelevata, viene trasportata verso l'interno e depositata lungo un corpo tabulare ad andamento leggermente ondulato, che fa da raccordo con le zone di retroduna, accrescendosi e sviluppandosi in ampiezza anche fino alla completa scomparsa del cordone dunare stesso (Hesp e Thom, 1990). Esiste un limite al loro sviluppo e approfondimento, legato alla formazione di un deposito residuale che, per caratteristiche il più delle volte granulometriche, impedisce la presa in carico da parte dello stesso vento che ha prodotto e guidato l'erosione; esse tendono a frenare il loro sviluppo anche quando si intercetta la falda. Una superficie di deflazione può formarsi anche per altri motivi: la presenza di sedimenti grossolani sulla superficie sabbiosa (Davidson-Arnott, 1997), l'eccessiva erosione marina che mette a giorno il substrato argilloso (Figura 23a), o la presenza di residui vegetali (Figura 23b).



(a)



(b)

Figura 23 – Esempi di come l’erosione intensa da parte del mare può creare superfici di deflazione, o ponendo a giorno il substrato argiloso (a), o depositando un gran numero di residui vegetali sulla spiaggia (Ancone di Bellocchio, Fe).

### ***Blowouts***

Le forme erosive più classiche e conosciute in letteratura, per definizione sono quelle che vengono identificate con il termine di “*blowouts*”, di solito utilizzato per descrivere un corridoio o una depressione all’interno di un sistema dunare; fu con il lavoro di Bagnold (1941) che il termine acquisì definitivamente tale significato, in quanto prima veniva usato per descrivere semplici forme paraboliche legate a superfici di deflazione (Melton, 1940). Secondo Cooper (1958), si possono distinguere 2 forme principali: con andamento **a scodella** (*soucer blowouts*) e **a canale** (*through blowouts*) (Figura 24 a/b/c).



Le prime sono depressioni che si ritrovano normalmente sul lato sopravvento della duna, con un lobo deposizionale sul margine esterno, mentre i secondi sono corridoi relativamente stretti e con pareti assai ripide, con un lobo particolarmente pronunciato sul lato sottovento e un'ampia superficie di deflazione al suo centro.



Figura 24 – Esempi di blowouts in corrispondenza di apparati dunari in località Lido di Pomposa - Fe (a), Lido di Spina - Fe (b) e Lido Adriano - Ra (c).

I processi che possono favorire lo sviluppo di tali forme possono essere diversi:

- L'incremento d'intensità di tutti processi eolici in seguito alla formazione di un cedimento del cordone dunare durante una mareggiata (in questi casi spesso poi l'evoluzione si imposta su forme di tipo "washover", o ventaglii di rotta, i quali a differenza dei blowots hanno una dinamica evolutiva legata principalmente all'azione dal mare)
- Una topografia irregolare del sistema dunare;
- Cambiamenti climatici, con l'alternarsi di periodi più ventosi, o di fasi climatiche più aride prima, in cui la zona di deflazione può formarsi, e fasi più

umide successive, in cui viene favorito invece lo sviluppo della vegetazione, con la conseguente stabilizzazione del blowouts (Gutiérrez-Elorza, 2005).

- La vegetazione che diminuisce per progressivo depauperamento dei costituenti nutritivi del suolo (Jungerius et alii, 1981);
- Attività di animali (Ritchie, 1972);
- Aridità localizzata, legata a particolari condizioni morfologiche che producono accelerazioni localizzate del vento su porzioni limitate di duna (cresta);
- Attività antropiche (dal calpestio, all'estrazione delle sabbie, alle esercitazioni militari).

Di conseguenza tali forme possono inevitabilmente evolvere in maniera estremamente variabile, a seconda dei regimi dei venti, della copertura vegetazionale e dei singoli episodi di tempesta. Tali fattori possono ampliare tali superfici (evoluzione in dune paraboliche) o innescare fenomeni di colonizzazione da parte di specie psammofile, con conseguente arresto dei processi erosivi (Hesp, 2002).

### **3.4\_FATTORI DI CONDIZIONAMENTO**

**KEY WORDS.** (Principali chiavi di lettura dello stato morfoevolutivo del sistema spiaggia-duna; fattori di condizionamento dell'evoluzione morfologica delle dune costiere)

---

In termini di processi in atto, i rapporti tra i vari parametri variano sia nello spazio che nel tempo: ogni fattore può condizionare l'altro, e tale interazione può essere di tipo "diretta" (ogni variazione dell'uno produce un effetto diretto sull'altro) o di tipo "indiretta" (agire cioè attraverso un terzo, diverso, fattore – A agisce su C attraverso B). Ogni percorso d'interazione ha un inizio, un verso e una fine, ed è diverso dal possibile effetto (denominato di "*feedback*") che quest'ultimo può riproporre sul primo in conseguenza della sua variazione.

Tale approccio metodologico sarà ripreso ed approfondito successivamente nella sezione dedicata alla Teoria dei Sistemi (Capitolo 9), alla base della quale c'è proprio l'identificazione e la parametrizzazione delle grandezze associate ai fattori di condizionamento: la descrizione e la codifica della variabilità regionale di ciascuna di esse permetterà di pesare l'influenza che i vari parametri hanno sullo stato di instabilità in cui si trovano le dune oggi.

Di seguito verranno passati in rassegna tutti i principali aspetti sotto cui può essere analizzato il sistema spiaggia-duna, descrivendo gli elementi che lo costituiscono, indicando se appartenenti al sistema (I - Interni) o esterni ad esso (E - Esterni).

Per riuscire a tradurre lo “stato di salute” attuale delle dune costiere regionali, identificando e classificando i vari apparati sulla base di un modello morfoevolutivo di riferimento (creato *ad hoc* sulla scorta dei più noti in letteratura), è fondamentale avere un quadro conoscitivo del sistema spiaggia-duna, a scala regionale, che sia il più chiaro e completo possibile. È necessario che esso sia sviscerato in tutte le sue componenti, in altre parole, riuscire ad identificare e separare, descrivere e pesare, tutti i parametri e le grandezze che agiscono su di esso, ognuno secondo il proprio ruolo, e ognuno secondo il tipo e il grado di interazione che ha con gli altri.

### ***3.4.1\_Fattori Geomorfologici (I)***

L’assetto morfologico e morfometrico del sistema è importante perché rappresenta, quando non intervengono fattori esterni, il risultato in termini di intensità, direzione e verso, dell’azione dei processi morfodinamici in atto. La misura delle grandezze di determinati parametri può fornire importanti indicazioni non solo sullo stato morfodinamico (Hesp, 2002) in cui si trova in quel momento il sistema (anche quando duna e spiaggia mostrano configurazioni apparentemente svincolate e opposte) ma anche sui possibili scenari di sviluppo a cui esso può andare incontro (Psuty, 1986).

#### ***a. Assetto Morfologico e Topografico della SPIAGGIA***

La spiaggia rappresenta un elemento fondamentale nella dinamica evolutiva di un apparato dunare, in quanto ad essa è legata la quantità di sedimento che potenzialmente è a disposizione del vento e che quindi potrebbe alimentare la duna, favorendo la sua crescita e/o consolidamento piuttosto che il suo smantellamento/erosione.

Tra i parametri più importanti ci sono l’estensione longitudinale e quella trasversale, in particolare quest’ultima: l’ampiezza di spiaggia è importante perché incide in termini di difesa contro l’azione erosiva del moto ondoso, in quanto attutisce l’energia delle onde, tenendole lontano dalla duna. Spiagge molto ampie inoltre denotano generalmente una tendenza alla progradazione o alla stabilità (Figura 25a), per cui la duna risulta più stabile rispetto ad

apparati che invece vengono erosi a causa della mancanza parziale, o in alcuni casi totale, della spiaggia antistante (Figura 25b). L'ampiezza di spiaggia è correlata alla stabilità della duna perché, in termini di alimentazione sedimentaria, può condizionare il trasporto di materiale ad opera del vento: in relazione alle varie direzioni di provenienza che si prendono in considerazione, a parità di altri fattori, più spiaggia è "spazzata" dal vento, maggiore sarà la quantità di sedimento che può finire sulla duna (cfr. fetch efficace ed equazione di continuità - *Coastal Engineering Manual*, 2002).



(a)



(b)

Figura 25 – (a) Esempio di duna con una spiaggia antistante ampia (Lido di Pomposa, Fe); Esempio di duna con una spiaggia antistante praticamente inesistente (Lidodi Spina, Fe).



Anche la PENDENZA della spiaggia è importante per determinare la stabilità del sistema, in quanto condiziona l'energia con la quale il moto ondoso esercita la propria azione erosiva o deposizionale. Il rapporto con il parametro di ampiezza è stretto: spiagge “poco pendenti” sono generalmente anche spiagge estese, per cui per quanto detto prima, ad esse si associano il più delle volte sistemi stabili; più invece l'erosione da parte del mare è intensa, più spiaggia viene consumata, e maggiori saranno le pendenze della porzione “residua” (Figura 26). Proprio per questo motivo, l'analisi non può limitarsi solo alla parte emersa: lo scambio sedimentario avviene tra i vari settori e lungo tutto il profilo trasversale, fin dove il moto ondoso riesce a trasmettere sul fondo la propria energia (profondità di chiusura), per cui è importante considerare anche la geometria della porzione sommersa della spiaggia (pendenza e ampiezza). Infine c'è anche la linea di riva da tener presente, la cui variabilità spaziotemporale fornisce un'ulteriore indicazione sulla stabilità del sistema (avanzamento/arretramento come sinonimo di progradazione/erosione).



Figura 26 – Esempio di duna con una spiaggia antistante molto pendente (Lido di Classe, Ra)

### ***b. Assetto Morfologico e Topografico della DUNA***

Per quanto riguarda la duna, sono soprattutto la QUOTA MEDIA s.l.m. della cresta, e la PENDENZA DEL FIANCO LATO MARE che possono condizionarne la stabilità. Il primo, indirettamente, fornisce indicazioni sulla maturità morfologica dell'apparato, per cui, a parità di altre condizioni, quote in cresta mediamente elevate, rappresentano dune più strutturate e quindi potenzialmente più stabili e resistenti rispetto a dune con un basso dislivello (probabilmente invece coincidenti con forme di tipo più embrionale, Figura 27 a/b).



(a)



(b)

*Figura 27 – (a) Esempio di duna ben strutturata con quote mediamente elevate (Lido di Classe, Ra); (b) Esempio di forme (campi dunari) appena al di sopra del livello del mare (in prossimità della foce del Fiume Reno, Fe)*

Si ricordi che secondo il modello di evoluzione sviluppato da Psuty (1986), la quota in cresta della duna è anche funzione della velocità con cui il sistema spiaggia prograda o arretra, per cui dune con quote relativamente basse potrebbero indicare anche un sistema in forte avanzamento, e non in crisi. Per tale motivo, è fondamentale analizzare il sistema nella sua complessità, contestualizzando ogni misura e ogni osservazione, per esempio, andando ad analizzare anche il numero e l'ampiezza dei vari cordoni dunari che evidentemente dovrebbero essere presenti lungo il profilo. La pendenza del raccordo morfologico tra la parte alta della spiaggia e la cresta della duna rappresenta invece il parametro di stabilità “per definizione”: dune attaccate dall'erosione marina presentano sempre pendii mediamente elevati, al limite, coincidenti con vere e proprie scarpate di erosione, le quali in alcuni casi, possono raggiungere anche 1,5 metri di dislivello (Figura 28). Per spiagge che invece mostrano stabilità o una leggera tendenza all'avanzamento, il raccordo tenderà ad assumere un'inclinazione generalmente corrispondente all'angolo di riposo delle sabbie sciolte (intorno ai 32°, Figura 29).



*Figura 28 – Scarpata di erosione alta più di 1,5 m in corrispondenza di un tratto della duna di Lido delle Nazioni (prima della ricostruzione artificiale avvenuta nel 2007)*



*Figura 29 – Quando la spiaggia antistante è sufficientemente ampia e non mostra trend erosivi, il raccordo con la spiaggia diventa più blando e prossimo all'angolo di riposo delle sabbie (Lido Adriano, Ra).*

Infine, se invece la spiaggia mostra un trend di rapido avanzamento (Psuty, 1986), i raccordi tenderanno ad essere più blandi, al limite confondendosi tra loro per sovrapposizione parziale dei vari cordoni in successione. Va ricordato che gli scambi sedimentari tra la spiaggia e la duna (e viceversa) sono continui nello spazio e nel tempo: durante le stagioni, il profilo cambia perché cambiano le condizioni meteomarine a cui è soggetta il sistema, per cui non sempre pendenze moderatamente elevate sono sinonimo di instabilità (Figura 30). In questi periodi, la duna svolge il ruolo soprattutto di riserva sedimentaria, per cui, se le condizioni lo permettono (cioè, se le mareggiate non risultano troppo intense e/o troppo frequenti), essa riesce a sostenere la spiaggia rifornendola del materiale perso durante le ondate.





Figura 30 – Esempio di duna con raccordo fianco mare molto pendente, non dovuto all’erosione spinta da parte del mare, ma probabilmente al profilo invernale che la spiaggia assume naturalmente durante una stagione nella quale l’energia del moto ondoso è mediamente maggiore (Lido di Scacchi, Fe)

### 3.4.2\_ Fattori Energetici e Morfodinamici (E)

I fattori energetici e morfodinamici rappresentano gli agenti esterni che agiscono sul sistema, modificandone la morfologia, in funzione delle caratteristiche fisiche dell’evento in esame (Psuty, 1986; Hudson, 1992).

Le variazioni prodotte in termini di forme e dimensioni sono diverse a seconda del fattore energetico considerato e della scala alla quale viene condotta l’analisi: da una parte il **VENTO**, la cui azione morfodinamica si espleta soprattutto nella modellazione (cicli di deposizione ed erosione) delle forme emerse, in particolare delle dune e della parte alta della spiaggia; dall’altra il **MARE**, che invece agisce soprattutto sulla morfologia della spiaggia, anche se, nelle situazioni di maggiore crisi, può riuscire ad intaccare anche il cordone principale finendo localmente anche oltre (Es. *ventagli di washover*, Figura 31).



Figura 31 – Esempio di ventaglio di washover che si è formato per l’azione d’ingressione del mare oltre il cordone di dune ricostruite artificialmente (riplantumazione) in prossimità della foce del torrente Bevano (Ra).

### *a. Azione del Vento*

Il vento rappresenta il fattore più importante nella morfogenesi delle dune costiere. È l'agente alla base del processo di mobilitazione, trasporto e deposizione del sedimento, dalla spiaggia verso duna. In funzione dell'intensità e della direzione di provenienza, a parità di altri fattori, la duna si accrescerà tanto più in ampiezza e in quota, quanto più intenso sarà il vento che spira al di sopra della superficie di spiaggia antistante. La classificazione più utilizzata e ufficialmente riconosciuta è la classificazione di Beaufort (Tabella 1), secondo cui:

GRADI	DESCRIZ.	VELOCITÀ		OSSERVAZIONI IN MARE	ALTEZZA ONDE (m)
		(m/s)	NODI		
0	CALMA	0 - 0.2	0 - 0.5	Mare calmo (olio)	-
1	BAVA DI VENTO	0.3 - 1.5	0.6 - 3	Mare increspato senza creste bianche di spuma	0.1
2	BREZZA LEGGERA	1.6 - 3.3	4 - 6	Ondicelle minute, corte, evidenti, che non si rompono	0.2 - 0.3
3	BREZZA TESA	3.4 - 5.4	7 - 10	Ondicelle grosse, pecorelle dalla cresta biancheggiante di schiuma	0.4 - 1.0
4	VENTO MODERATO	5.5 - 7.9	11 - 16	Onde piccole	1.1 - 1.5
5	VENTO TESO	8.0 - 10.7	17 - 21	Onde moderate di forma allungata	2.0 - 2.5
6	VENTO FRESCO	10.8 - 13.8	22 - 27	Onde grosse o cavalloni, creste di schiuma bianche più estese	3.0 - 4.0
7	VENTO FORTE	13.9 - 17.1	28 - 33	Mare grosso; la schiuma comincia a rompersi e a essere soffiata in strisce	4.0 - 5.5
8	BURRASCA	17.2 - 20.7	34 - 40	Onde moderatamente alte e di maggior lunghezza; la sommità si rompe in spruzzi vorticosi risucchiati dal vento	5.5 - 7.5
9	BURRASCA FORTE	20.8 - 24.4	41 - 47	Onde alte, le creste si arrotolano	7.0 - 10.0
10	TEMPESTA	24.5 - 28.4	48 - 55	Onde molto alte sovrastate da lunghe creste (marosi); il mare appare biancastro. Il rotolare delle onde è intenso e molto violento	9.0 - 12.5
11	TEMPESTA VIOLENTA	28.5 - 36.6	56 - 63	Onde eccezionalmente alte; il mare è completamente coperto da banchi di schiuma; la cresta delle onde viene polverizzata dal vento	11.5 - 16.0
12	URAGANO	> 32.7	> 64	Onde altissime; aria piena di schiuma e spruzzi, mare completamente bianco	14 - >18

Tabella 1 – Classificazione delle velocità del vento in funzione degli effetti che esso produce sul moto ondoso (Scala di Beaufort).

Come si evince dalla Tabella, la suddivisione in intervalli è funzione degli effetti associati in termini di moto ondoso; in realtà non esiste un equivalente “ufficiale” per ciascuna classe in termini di forme morfologiche prodotte sulla spiaggia, in quanto queste ultime rappresentano in realtà il risultato congiunto di più fattori (Hudson, 1982).

In tutte le formulazioni che aiutano a determinare i tassi di trasporto eolico potenziale per i processi di costruzione, viene presa in considerazione una velocità del vento definita “limite di taglio” ( $\mu_t$ ): essa rappresenta la velocità minima al di sotto della quale, per caratteristiche tessiturali del sedimento presente, il vento non riesce a mobilitare alcun granulo. Così come esiste un limite inferiore, esiste anche una velocità del vento oltre la quale la sua azione è addirittura “distruttiva”: l’abrasione sulla superficie su cui scorre il flusso produce forme di tipo erosivo, asportando più materiale di quanto è necessario, e rischiando in alcuni casi, e/o in alcuni punti, anche di mettere in crisi l’intero apparato.

In tal senso, le forme più frequenti sono rappresentati dai *blowouts*, depositi “erosivi” che si formano in corrispondenza dei varchi, nell’immediato retroduna: il flusso, per effetto Bernoulli, s’incanala all’interno dei varchi aumentando velocità e capacità di trasporto, ma purtroppo la sabbia presa in carico, invece di alimentare la duna, rischia di essere persa definitivamente al di fuori del sistema (Figura 32).



*Figura 32 – Esempio di un varco attraverso il quale il vento scorre ed erode le pareti laterali, depositando il materiale così prelevato, ben oltre la duna, in corrispondenza delle zone retrodunari (Loc. Lido di Spina, Fe),*

Anche la direzione del vento assume un peso altrettanto importante, in quanto, venti provenienti da mare contribuiscono alla costruzione della duna, mentre venti da terra, trasportando la sabbia in senso opposto, favoriscono piuttosto il suo smantellamento. In più, in funzione dell'orientazione (angolo compreso) rispetto all'asse del cordone dunare o di sviluppo prevalente degli apparati embrionali, la stessa azione di costruzione potrà risultare più o meno efficace.

Come si vedrà nel capitolo dedicato alla determinazione del tasso di trasporto eolico, esistono delle formulazioni finalizzate proprio a tener conto di questo aspetto, correggendo il tasso risultante in funzione di tale angolo e partendo dal presupposto che le direzioni più efficaci risultano essere quelle normali alla direzione dell'asse dunare. Una volta individuate tali direzioni, "più costruttive di altre", sarà fondamentale per la sopravvivenza e/o lo sviluppo della duna, che lungo tali direttrici si distribuiscano non solo i venti *Dominanti* (maggiore intensità) ma anche e soprattutto quelli *Regnanti* (maggiore frequenza), in modo che venga assicurato un apporto costante e intenso del sedimento verso la duna.

### ***b. Azione del Moto ondoso***

Come si può dedurre facilmente dallo schema classico di suddivisione delle morfologie associate ad un profilo tipico di spiaggia (Figura 33), generalmente l'azione del moto ondoso agisce principalmente solo sul modellamento della geometria del fondale (spiaggia sommersa) e di una parte della spiaggia emersa (fino alla berma di tempesta), raggiungendo la duna solo in concomitanza di eventi eccezionali.

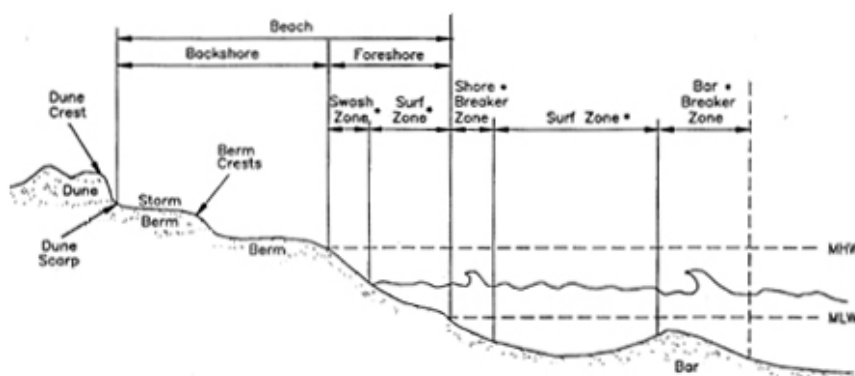
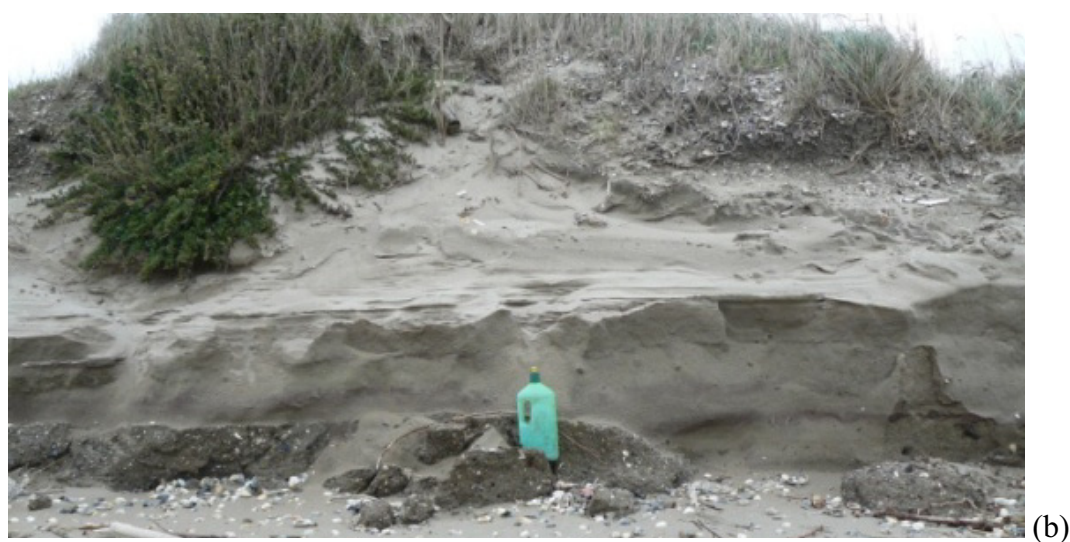


Figura 33 – Schema di identificazione dei vari tratti lungo un profilo trasversale di spiaggia, dalla profondità di chiusura, fino alle pinete retrodunari.



Se il sistema mostra un trend di avanzamento, il mare probabilmente intaccherà la spiaggia solo durante le mareggiate, finendo per modellarne la forma, o cercando di arginarne l'espansione, in caso di progradazione della linea di riva. Il mare arriva invece alla duna solo quando il trend della spiaggia antistante è di tipo erosivo: in questo caso il moto ondoso riesce ad erodere anche il piede della duna, producendo scarpate e fenomeni gravitativi (Figura 34 a/b) di varie dimensioni ed entità; il conseguente arretramento del piede della duna rappresenta un segno, parzialmente irreversibile, della perdita di stabilità del sistema, nonché un potenziale pericolo per tutti i territori retrostanti (Hesp, 2005).



*Figura 34 – (a) Esempio dell'azione erosiva da parte del mare direttamente sulla duna: da notare la mancanza quasi totale della superficie di spiaggia antistante, la quale risulta quasi completamente erosa (Loc. Lido di Spina, Fe); (b) Esempio di fenomeni gravitativi alla base della scarpata per azione di scalzamento al piede (Lido Adriano, Ra).*



Sono soprattutto le frequenze, le direzioni e le altezze d'onda max ( $H_s$  max) registrate durante le mareggiate a determinare la reale influenza di tale fattore sull'evoluzione e la stabilità del sistema. In letteratura esistono vari **MODELLI di EROSIONE**, legati principalmente ai tempi di ritorno di questi fenomeni e all'analisi per profili degli effetti che le diverse classi di mareggiata possono produrre in termini di materiale asportato e/o deposto. Di seguito, tali modelli verranno esaminati in maniera separata, in modo da creare già da ora una bozza del criterio di classificazione dei vari apparati che tenga conto anche dell'erosione marina.

### *a. Fluttuazioni stagionali*

Fluttuazioni stagionali coinvolgono l'intera larghezza della spiaggia durante le tempeste. Le onde sono provocate dal vento, che trasmette all'acqua superficiale una parte della propria energia, spingendola sotto forma di moto ondoso che si trasmette orizzontalmente secondo determinate direzioni di propagazione, ortogonali alle creste delle onde stesse. Durante le mareggiate più forti le onde frangono molto al largo e non perdono tutta l'energia; dopo il frangimento le onde si riformano e procedono verso costa per generare poi un nuovo frangente. In vicinanza della costa, le onde possono subire cambiamenti di direzione, forma ed energia, in funzione della natura, della pendenza e dell'orientamento dei fondali e della costa stessa. Particolare importanza riveste la formazione dei cosiddetti frangenti di spiaggia, quando l'acqua sospinta sulla cresta dell'onda supera la velocità di propagazione dell'onda stessa, ricade formando un frangente, e con più o meno marcata turbolenza sfrutta la propria energia cinetica, risalendo la spiaggia come flutto montante, fino all'esaurimento dell'energia cinetica. A questo punto per gravità l'onda recede sotto forma di risacca.

Questa situazione muta di intensità nelle diverse stagioni: durante le forti mareggiate invernali la forza dei frangenti è maggiore e parte della sabbia che costituisce la battigia può essere ripresa in carico dal moto ondoso e può formare una o più barre nel tratto di spiaggia sommersa o essere trasportata verso il mare aperto. In estate questa situazione si inverte e le deboli onde della bella stagione fanno sì che questo materiale venga gradualmente ri-trasportato verso la linea di costa. Esiste quindi una differenza fra la morfologia di una spiaggia sabbiosa nelle diverse stagioni: nel periodo estivo essa risulta generalmente più ampia per una maggior disponibilità di materiale sabbioso che, in inverno, è depositato nel tratto sommerso sotto forma di barre più accentuate.

Durante l'inverno, le mareggiate che inducono le maggiori ondate e le *storm surges*, possono attaccare la berma (Figura 35) fino a prelevarne gran parte del materiale; questa, durante i periodi compresi tra le tempeste, non ha il tempo di recuperare, per cui il profilo appare più pendente. Durante la stagione estiva invece generalmente le ondate sono meno intense, per cui la berma, che solitamente è anche più larga, addolcisce il profilo, aumentando anche l'ampiezza della spiaggia.

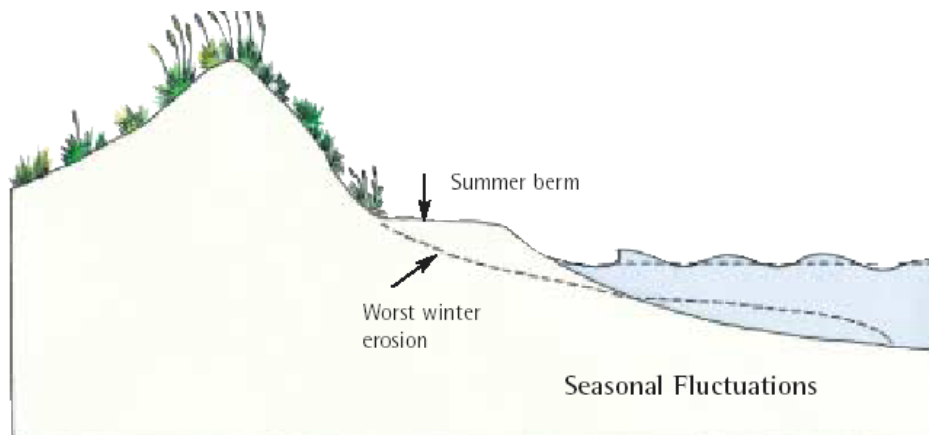


Figura 35– Schema dei meccanismi di erosione della duna da parte delle mareggiate: la parte di materiale che viene prelevata dal mare durante il periodo invernale (per cui il profilo è rappresentato dal tratto puntinato), viene poi di solito restituito durante la stagione estiva successiva, per cui si recupera tutto il materiale e il profilo torna ad essere quello di prima (tratto continuo)

Durante l'estate sulla berma possono svilupparsi anche piccole piante pioniere associabili all'ambiente tipico della duna, mentre durante il periodo invernale, l'erosione non solo distrugge queste forme effimere, ma spesso arriva fino alla duna riuscendone a prelevare anche una parte della vegetazione che la stagione precedente era riuscita a crescere su di essa. Di conseguenza, la linea di vegetazione può essere chiaramente rappresentativa del limite (verso terra) dell'erosione indotta dalle onde durante tutte le stagioni. Anche se agiscono a grande scala, le fluttuazioni stagionali non sono considerate erosione in senso stretto. Finché la sabbia ritorna durante l'estate, il bilancio sedimentario è nullo, per cui si tratta solo di un ciclo dinamico che non sottrae né sedimento, né ampiezze al sistema. Tuttavia riuscendo a percepire le perdite che avvengono durante il periodo invernale è possibile individuare i limiti massimi di progradazione dell'apparato dunare, quelli oltre i quali naturalmente la duna non si spingerà mai.

## ***b. Erosione Indotta dalle Tempeste***

L'erosione indotta dalla tempeste è definita come l'erosione che si abbatte sul sistema durante le mareggiate più violente, ma per questo, anche statisticamente più rare. Le ondatazioni che vengono generate sono mediamente molto alte, e sono spesso accompagnate anche da un relativo aumento locale del livello del mare (*storm surge*); uno schema delle variazioni morfologiche indotte sulla spiaggia emersa è rappresentato in Figura 36. Così come per le fluttuazioni stagionali, anche la tempesta preleva sabbia dalla spiaggia, ma in quantità maggiore, per cui il rischio è che il profilo originario (puntinato) non sia più del tutto recuperabile (profilo continuo); il mare spesso arriva fino alla duna per prelevarne una parte che difficilmente restituirà in tempi brevi.

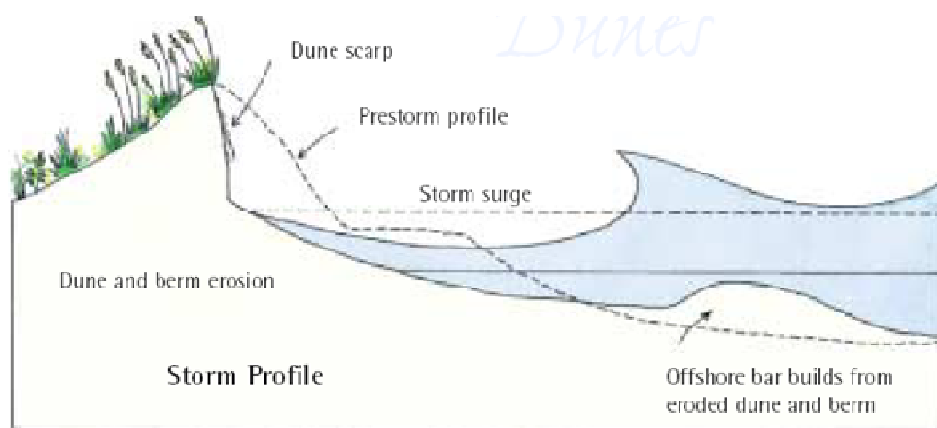


Figura 36 – Schema dei meccanismi di erosione della duna da parte di un evento di tempesta: il puntinato rappresenta il vecchio profilo, sostituito dal tratto in continuo.

La tempesta forma frequentemente anche delle barre sabbiose *offshore*. Come le onde arrivano in acque meno profonde, vengono generate correnti di fondo che si muovono in direzioni opposte; in questo modo la sabbia è spinta verso la cresta della barra da entrambi i sensi e la barra si accresce. Più grandi sono le onde, più grande diventerà la barra, e più lontana tenderà a formarsi. Molte spiagge risultano avere una o più ordini di barre sommerse durante tutto l'anno; in quelle zone la tempesta sposta le barre più verso l'esterno, in quanto la sabbia viene erosa dalla duna e portata sulla berma, con l'effetto che aumenta la taglia granulometrica della barra. A tal proposito è possibile definire una serie morfotemporale di eventi tipici dell'erosione del fianco lato mare delle dune a causa di eventi di tempesta:

- ✓ I profili della spiaggia antistanti le dune diventano più suborizzontali come conseguenza dell'azione distruttiva dell'onda (grandi onde generate dai venti terrestri locali);
- ✓ L'ampiezza della spiaggia si riduce con la conseguenza che si sposta progressivamente verso terra il limite di alta marea (verso il piede della duna);
- ✓ Le onde hanno a questo punto un effetto diretto sul piede della duna, causando la rimozione progressiva della sabbia e lo scalzamento (al piede) della fianco della duna (*dune shoreface*);
- ✓ Si crea una scarpata di erosione, la quale oltre un certo grado di scalzamento non riesce a sopportare la forza di gravità alla quale si trova soggetta, per cui si verificano fenomeni di crollo: il materiale che in questo modo si deposita alla base della scarpata è successivamente ripreso in carico dal mare che lo restituirà in parte durante le stagioni estive successive.

### *Post-Storm Recovery*

Dopo la tempesta, man mano che le ondate e lo *storm-surge* si placano, la forma della spiaggia non è ancora in equilibrio. Tuttavia, le onde più piccole inducono sul profilo di spiaggia *post-storm* correnti di fondo che spingono la sabbia verso riva: la cresta della barra si sposta verso terra e la berma comincia a riformarsi. Con il tempo, se non si verificano altre mareggiate e la configurazione del profilo di spiaggia non espone troppo la duna all'attacco da parte delle ondate (anche quelle meno intense), anche la duna inizia il percorso di recupero del profilo, prima attraverso fenomeni di crollo (il cui numero dipenderà dalla pendenza della scarpata di erosione) e poi con il rifornimento di materiale sabbioso da parte della spiaggia antistante (Figura 37).

Una berma è la tipica evidenza morfologica del processo di recupero della spiaggia dopo una mareggiata. La sabbia è spinta verso l'alto sullo *beach face* dal *runup* delle onde, viene depositata e così procede fino al recupero del profilo originario (linea continua, Figura 33)

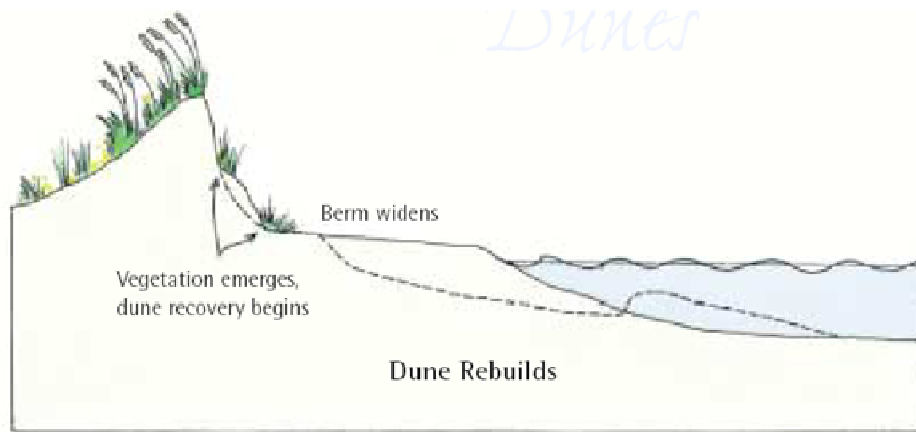


Figura 37 – Schema dei meccanismi di erosione della duna da parte di un evento di tempesta: in questo caso la ricostruzione naturale inizia con la rivegetazione degli accumuli alla base della duna e con il recupero delle ampiezze di spiaggia e delle pendenze naturali.

### c. Long-Term Erosion

Si tratta dell'erosione a lungo termine: mentre agisce l'erosione, la larghezza della berma e l'intensità delle fluttuazioni stagionali della spiaggia rimangono quasi uguali, la duna è erosa e tende ad arretrare verso terra (Figura 38). Per definizione, l'erosione a lungo termine è un'erosione che difficilmente è eliminabile, ma che fa risentire i propri effetti in periodi più lunghi di tempo.

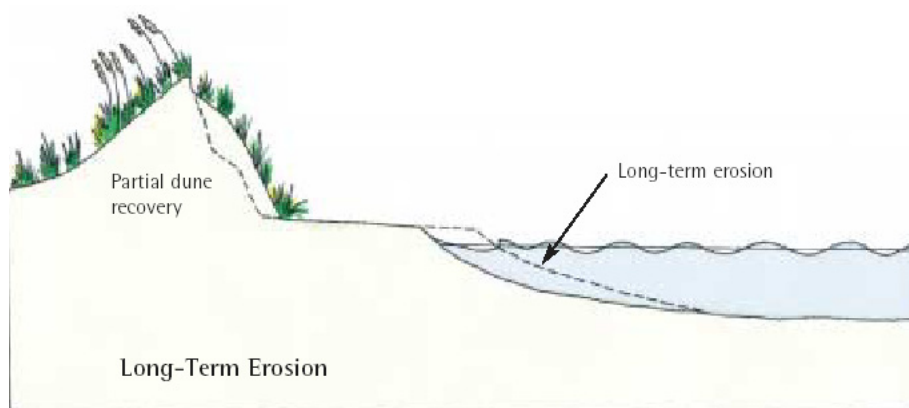


Figura 38– Schema dei meccanismi di erosione della duna a lungo termine: anche in questo caso la ricostruzione naturale inizia con la rivegetazione degli accumuli alla base della duna ma le ampiezze di spiaggia e le pendenze naturali evolvono verso equilibri nuovi, per cui non si riesce a ristabilire il profilo originario.

Una delle cause di erosione a lunga durata più evidente ed eclatante è costituita dall'aumento del dislivello esistente tra la superficie del mare e le quote medie di alcune porzioni del territorio costiero: il primo aspetto fa riferimento al ben noto fenomeno di *INNALZAMENTO DEL LIVELLO MEDIO DEL MARE*, legato in gran parte all'effetto *serra* che alcuni gas producono sullo strato di ozono dell'atmosfera terrestre; l'altro invece è legato al fenomeno della *SUBSIDENZA*, che per terreni alluvionali che passano a facies litorali come ad esempio quelli che si alternano lungo la costa dell'Emilia-Romagna, rappresenta un pericolo estremamente serio, in quanto nel tempo ha dislocato al di sotto del livello del mare estese porzioni di territorio costiero, tutto potenzialmente “annegabile”.

Il gruppo di lavoro del CNR che si occupa di studiare la dinamica dei litorali (Fierro, 1990), ha ricavato che nell'ultimo secolo si è innescato un innalzamento del livello marino, valutabile attorno ai 20 cm; tale processo ha indubbiamente una fortissima influenza sulla evoluzione delle coste basse, in quanto per bassi dislivelli, a parità di innalzamento la copertura garantita del territorio è molto maggiore. Il dato diventa ancora più preoccupante quando si considerano studi che (Bird 1985; Fierro 1990; Bird 1993) hanno dimostrato, a prescindere dalle situazioni locali, che il 70% dei litorali sabbiosi del globo è in fase di erosione, il 20% è stabile anche grazie ad opere di difesa, e solo il 10% è in protendimento.

### ***3.4.3\_Fattori Biologici (Vegetazione) e Ambientali (I)***

La vegetazione è un altro elemento importantissimo nella morfodinamica che presiede allo sviluppo degli apparati dunari. Come già descritto precedentemente, uno degli aspetti più importanti del valore ambientale di una duna, è quello che essa costituisce un delicato sistema ecologico, in particolare “ospitando” tutta una serie di specie e associazioni vegetali tipiche ed esclusive solo di questo tipo di ambienti.

Nei meccanismi di trasporto e deposizione del sedimento, inizialmente la funzione della vegetazione non è diversa da qualsiasi altro tipo di ostacolo. Nell'aggirare l'ostacolo, il flusso si deforma (Figura 39a), perde una parte dell'energia, e da un certo punto in poi (sul lato sottovento), non è più in grado di trasportare il sedimento (Figura 39b); se l'azione del vento è intensa e la disponibilità di sedimento elevata, l'accumulo cresce in fretta, sviluppandosi “a

coda” nella direzione del flusso dietro l’ostacolo (Figura 35b), e finendo per costituire quelle che vengono indicate generalmente come “*Shadow Dunes*” (Figura 35c).

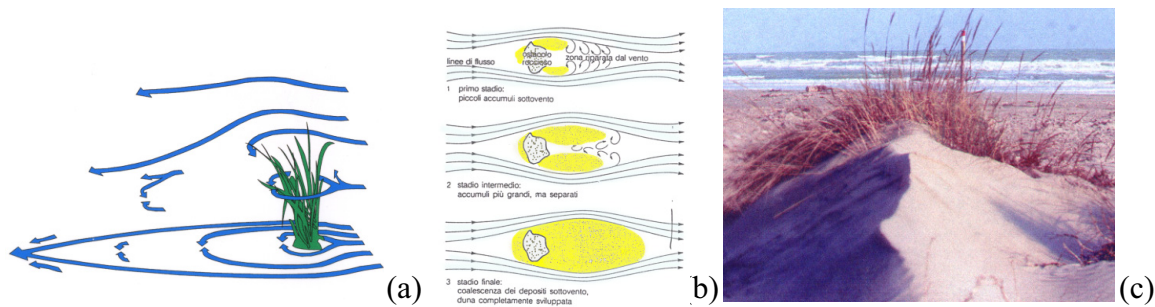


Figura 39 – Formazione di un accumulo di sabbia nel lato sottovento di un ostacolo (ad esempio, un pezzo di fusto vegetale o una pianta). Questo, deviando le linee di flusso, crea una zona protetta dal vento (1), dove i vortici sono più deboli, che consente la deposizione dei granuli trasportati per saltazione e la costruzione di un deposito di sabbia (2); man mano che cresce, l’accumulo si sviluppa allungato nella direzione della corrente (3) (Bagnold, 1941).

Se l’alimentazione non è continua e intensa, l’accumulo cresce in altezza più lentamente, e la pianta si sviluppa con lui: compaiono e s’infittiscono nel terreno appendici radicali sempre più profonde, mentre in superficie nascono nuovi germogli e nuove piante (specie pioniera – Es. *Cakiletum maritimae*) (Figure 40 a/b/c). La densità con la quale la vegetazione ricopre un apparato dunare è sintomo di maturità morfologica e strutturale: come si è visto nell’analisi del modello morfologico-evolutivo del sistema spiaggia-duna, le forme più consolidate sono anche quelle che presentano la copertura vegetale maggiore, proprio a causa dell’azione stabilizzatrice appena descritta, per cui diventano fondamentali per la crescita dell’apparato (Figura 41).

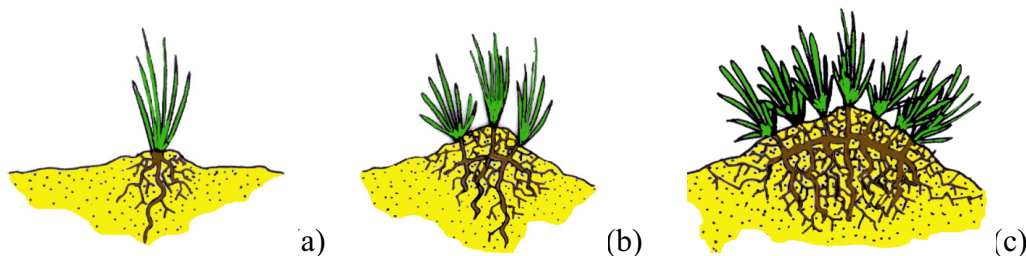


Figura 40 – Esempio di come l’attecchimento iniziale di una specie vegetale (*Ammophila*) (a) possa favorire la crescita in altezza, e il consolidamento dell’accumulo sabbioso (per lo sviluppo dell’apparato radicale della pianta stessa) (b), il quale a sua volta è favorevole per lo sviluppo completo di tutto l’apparato vegetale (c).



Figura 41– Esempio di sezione naturale di un apparato dunare, dalla spiaggia fino alla pineta retrostante: la densità di copertura vegetale appare molto elevata, e il risultato è che l'intero sistema risulta stabile e piuttosto sviluppato in ampiezza (Lido degli Scacchi, Fe).

### **a. Aspetti Fitosociologici**

Sebbene in misura minore rispetto al precedente, anche l'aspetto fitosociologico delle piante che crescono sulle dune possono influire sulla stabilità delle stesse, soprattutto in termini di forma ed estensione di quelle che poi diventeranno le eventuali forme consolidate. Il meccanismo è dinamico e autoalimentato, poichè la vegetazione, a sua volta, comincia ad attecchire e si sviluppa allorquando l'accumulo sabbioso comincia ad avere una certa consistenza (avandune).

Il prodotto finale è una vera e propria sezione morfologico-vegetazionale “tipo”, la quale, sebbene a volte possa assumere caratteri biologici fortemente locali, può essere descritta come segue (Figura 42): dalla spiaggia “nuda”, le prime forme embrionali (avandune) sono caratterizzate da specie pioniere ed effimere (Es. *Cakiletum maritimae*), le quali se ci sono le condizioni perché riescano ad attecchire e crescere, quando l'accumulo raggiunge una certa consistenza, cedono il passo a specie più stabili (*Agrophiletum* e successivamente *Ammophiletum*).

Dal punto di vista morfologico l'apparato a questo punto è ben consolidato, ed è possibile distinguere anche un settore “retrodunare” e “interdunare” tra apparati successivi, dove crescono rispettivamente specie vegetali *Tortulo-Scambiosetum* e *Juncus littoralis*. Spostandosi verso l'interno, l'ultimo stadio morfologico è quello delle dune “brune” o stabilizzate, le quali sono caratterizzate da associazioni boschive delle specie *Junipero-Hippophaetum fluviatilis*, *Eriantho-Schoenetum nigricantis*.



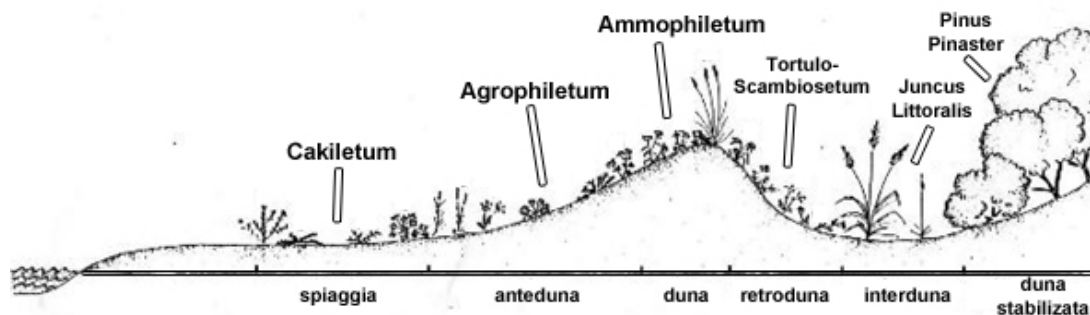


Figura 42 – Schema generale della distribuzione delle varie specie vegetali lungo la sezione classica di un sistema spiaggia-duna, dalle forme embrionali sulla spiaggia con l'associazione di specie pioniere (Es. *Cakiletum maritimae*), a quelle più consolidate e stabili su cui da tempo si sviluppa una folta pineta di specie boschive (Es. *Pinus Pinaster*).

### **b. Umidità**

L'umidità svolge un ruolo secondario sui meccanismi di accrescimento degli apparati dunari, ma è altrettanto importante, in quanto condiziona le prime fasi del trasporto, e cioè la mobilitazione del sedimento. A parità di caratteristiche tessiturali, in generale, più la spiaggia risulta essere bagnata (il terreno presenta un'elevato contenuto di umidità), più la coesione tra i grani che costituiscono il sedimento aumenta e finisce per ostacolare la presa in carico da parte del vento. Come si vedrà nella sezione dedicata all'analisi dei fattori di controllo del flusso eolico sulle superfici non reali (Capitolo 8), anche per l' "umettamento", così come per la direzione, la pendenza e la rugosità, esistono formulazioni nel calcolo del tasso di trasporto eolico, che correggono tale valore in funzione del contenuto medio di umidità del terreno (misurata nei primi cm di spessore, visto che è su di essi che il vento esercita la propria azione).

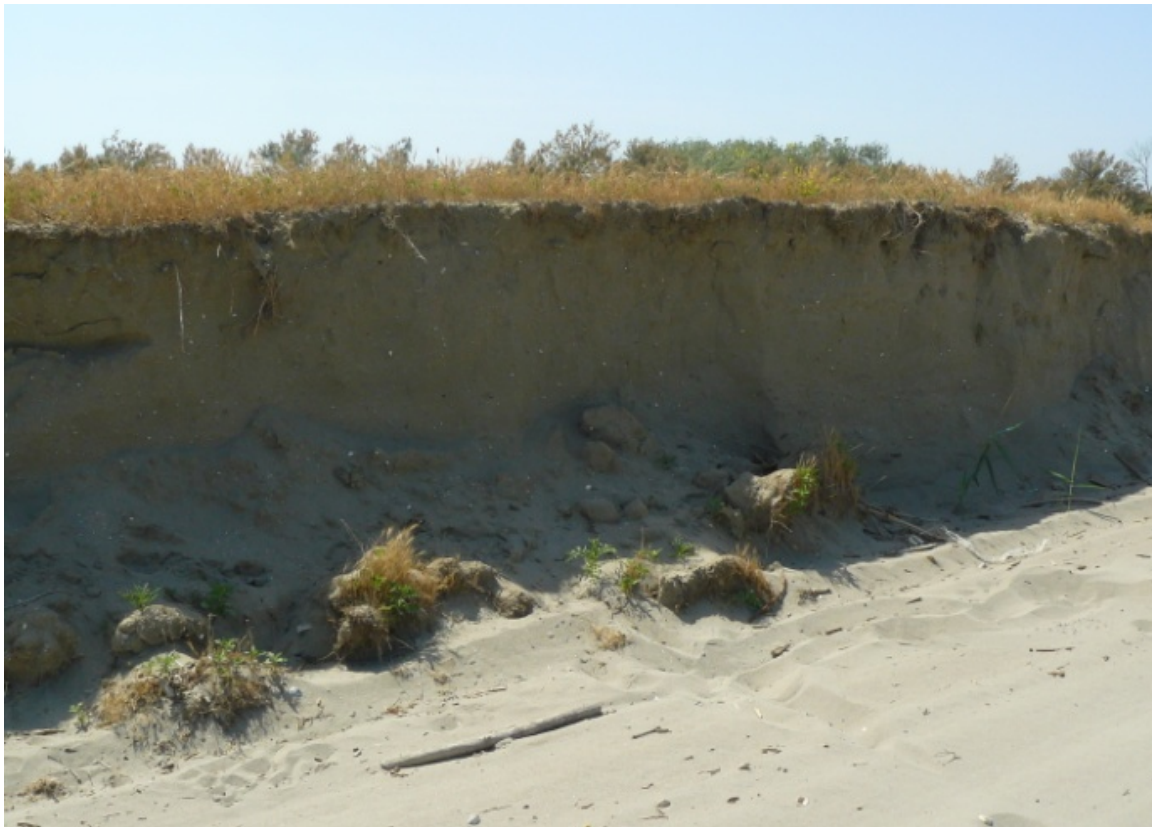
### **3.4.4\_Fattori Sedimentologici (I)**

Le caratteristiche tessiturali del sedimento sono fondamentali per la nascita e lo sviluppo di una duna: in generale, a parità di altre condizioni, più il sedimento della spiaggia è fine, maggiore è la capacità da parte del vento di prenderlo a carico. Il trasporto eolico è un meccanismo selettivo, la classazione del sedimento caratteristico della duna sarà sempre maggiore di quella dell'area di alimentazione. L'azione da parte del vento però non è

vincolata ad una sola classe granulometrica, e le spiagge sono costituite da un'ampia rappresentanza dimensionale; da ciò ne deriva che le caratteristiche tessiturali del sedimento della duna non sono legate solo a quelle del sedimento che caratterizza la spiaggia antistante, ma anche al regime anemometrico, in quanto oltre una certa soglia (velocità limite di taglio,  $\mu_t$ ), la velocità del vento determina non solo la quantità di materiale che viene trasportato, ma anche e soprattutto quali sono le dimensioni del sedimento potenzialmente mobilitabile.

Questo vuol dire che, se lo spettro dei venti dominanti e delle loro velocità è ampio, il sedimento della duna, pur essendo il vento un'agente fortemente selettivo, sarà probabilmente caratterizzato da una curva granulometrica simile a quella dell'area di alimentazione.

La tessitura del sedimento è importante anche per il grado di resistenza della duna, in quanto la coesione tra i grani che costituiscono le forme più consolidate, potrebbe determinare (a parità di altre condizioni – Es. pendenza del raccordo fianco mare) una maggiore o minore predisposizione a costituire scarpate di erosione, quando il mare arriva ad intaccare il piede della duna (Figure 43a/b).



(a)



(b)

*Figura 43 – Esempio di come le caratteristiche tessiturali del sedimento costituente le dune consolidate, possano condizionare la resistenza alle elevate pendenze (scarpate di erosione) quando il mare arriva ad erodere il piede della duna: in entrambi i casi, (a) Lido di Spina (Fe) e (b) Lido Adriano (Ra), le pareti della scarpata appaiono sub verticali, sintomo che dal punto di vista della tessitura i sedimenti appaiono certamente più fini.*

### **3.4.5\_Fattori Antropici (E)**

L'incidenza antropica, tra tutti, è certamente il fattore che produce gli effetti peggiori, quelle modificazioni che il sistema spesso non riesce a riequilibrare naturalmente, e per le quali può ritrovarsi in condizioni di forte instabilità. Attualmente, gran parte del territorio costiero nazionale (più dell'80%) è fortemente condizionato dallo sviluppo di un'economia turistica che in pochi decenni ha progressivamente irrigidito il sistema costa, preferendo nuclei urbani e infrastrutture agli spazi liberi che caratterizzavano questi ambienti fino agli anni '50.

L'evoluzione di questi territori sembra aver perso oggi tutta la naturalità che l'ha sempre contraddistinta: la gestione degli spazi e la programmazione degli interventi è affidata alla sola filosofia dell' "emergenza", della continua rincorsa verso la crisi più imminente, e la

costruzione di nuove strutture turistiche, porti marittimi, o nuclei abitativi ha ridotto sempre più il “buffer” (ampiezza di territorio costiero) di cui il mare ha naturalmente bisogno per scaricare la propria energia e modellare questi ambienti senza produrre danni a cose o a persone. Ogni elemento inserito all’interno del sistema, ne diventa inevitabilmente parte integrante, e come tale, può subire l’azione dei processi morfologici in atto: il problema sta nel fatto che strutture e infrastrutture non sono “mobili”, ma si oppongono a tali processi in maniera rigida, per cui l’energia associata a tali processi può “abbattersi” su di esse procurando danni estremamente seri.

Per quanto riguarda la duna, il pericolo più grande per la loro sopravvivenza viene dalla presenza e dallo sviluppo delle strutture balneari: spesso è proprio la duna a rimetterci, i bagni crescono ogni anno in numero ed in estensione, per cui gli spazi a disposizione sembrano essere solo quelli tra una duna e l’altra. In Figura 44 viene riportato un esempio di come, nel Ravennate, le strutture balneari sorgano proprio tra lembi “residuali” di dune, laddove una volta è presumibile pensare che essa si sviluppasse in direzione laterale costituendo un unico cordone. L’azione dell’uomo è importante non solo dal punto di vista della gestione economica degli spazi costieri, ma a volte, anche dal punto di vista degli interventi di difesa. È importante tener presente che il sistema spiaggia-duna non è un sistema “chiuso”, dove i processi e gli scambi sedimentari avvengono solo in direzione trasversale, dalla duna al mare; esiste una continuità morfodinamica anche di tipo “longitudinale”, per cui tra diversi settori di spiaggia, non necessariamente adiacenti tra loro, esiste un legame morfosedimentario connesso alle correnti di deriva litoranea (*longshore current*).



*Figura 44 – Esempio di come a volte l’inteso sfruttamento degli spazi costieri sia particolarmente dannoso per gli apparati dunari, i quali, non solo vengono fortemente ridotti in estensione (vincolati tra le strutture turistiche), ma vedono praticamente annullarsi ogni possibilità di alimentazione naturale (vento): cabine e magazzini posti lateralmente e in prossimità del piede della duna, impediscono ogni forma di trasferimento di sabbia dalla spiaggia antistante (Marina di Ravenna).*

Tale legame può essere interrotto da opere difensive che di fatto impediscono il transito dei sedimenti lungo costa. L'effetto diretto di tali interruzioni è l'instaurarsi di una crisi sedimentaria nelle aree sottoflutto che vedono sottrarsi dal proprio bilancio il sedimento intercettato dalle opere. Ciò può avere conseguenze negative anche sugli eventuali apparati dunari presenti per la progressiva riduzione delle spiagge antistanti.



## Cap 4 MATERIALI e METODI

**KEY WORDS** (Set di materiale utilizzato, e descrizione generale delle principali fasi operative del lavoro di acquisizione dati)

---

Il materiale su cui è stata condotta l'analisi a grande scala, sia durante le fasi preliminari (analisi fotogeologica e spettrale), che in quelle di dettaglio (analisi spaziale e GIS) è costituita da immagini satellitari e foto aeree in formato digitale, in particolare:

- ✓ **Quickbird (2003) solo di alcune aree**  
(Proprietà dell'Università di Ferrara – Dipartimento di Scienze della Terra);
- ✓ **Volo COSTA (2005/06)**  
(Proprietà della Regione Emilia-Romagna – Servizio Difesa Costa)
- ✓ **Quickbird (2006) solo di alcune aree**  
(Proprietà dell'Università di Ferrara – Dipartimento di Scienze della Terra);
- ✓ **Ikonos (2008) Provincia di Ferrara**  
(Proprietà della Provincia di Ferrara – Servizio Risorse Idriche e Tutela Ambientale);
- ✓ **Lidar (2005)**  
(Proprietà della Regione Emilia-Romagna – Servizio Difesa Costa).

Ciascuna di esse, prima di essere utilizzata, è stata opportunamente corretta dal punto di vista geometrico (registrazione e/o ortorettifica) e georiferita nel sistema di riferimento ED50F32A (di norma utilizzato dalla Regione Emilia-Romagna). Quindi, all'interno di software specifici (ESRI -ArcMapTM 9.3 e ITTVIS - ENVI 4.4) è stato possibile condurre analisi di tipo spaziale e spettrale, le cui peculiarità e aspetti procedurali verranno presentate successivamente nelle sezioni di riferimento.

La ricerca è stata portata avanti su piani paralleli e differenti da più punti di vista, sviluppando procedure e metodologie di volta in volta funzionali al tipo di obiettivo da raggiungere e del tipo di dato necessario. Lo scopo finale è il punto di partenza: testare una metodologia che si renda utile, funzionale ed efficace per la determinazione dello stato morfoevolutivo degli apparati su scala regionale, vuol dire certamente comprendere i meccanismi con cui evolvono le dune lungo la costa. Per raggiungere tale risultato è necessario prima di tutto condurre un'analisi sullo stato attuale dei principali apparati dunari ancora presenti sul territorio, per cui, una prima fase importante del lavoro, è stata proprio quella di acquisire dati aggiornati.

La comprensione dei meccanismi evolutivi passa poi attraverso la definizione di una corretta chiave di lettura: una seconda fase di lavoro è coicisa infatti con la descrizione di una classificazione associata (la quale va plasmata anche proprio in base al set di dati acquisiti durante la prima fase) e la definizione di un modello concettuale di riferimento. Questo tipo di approccio ha permesso di creare un prodotto finale (Bancadati e Carta geomorfologica degli Sistemi Spiaggia-Duna dell'Emilia-Romagna), utile, per come è stata ricavata, soprattutto alla programmazione degli interventi.

Parallelamente, la fase di sviluppo della Matrice d'Interazione Binaria (BIM) a sua volta passa attraverso la determinazione dei processi di alimentazione e costruzione della duna ad opera del vento, per cui una terza fase di lavoro importante è connessa alla sperimentazione eolica finalizzata alla determinazione dei tassi di trasporto eolico potenziale "regionale"; il prodotto connesso è la Carta Regionale del tasso di Trasporto Eolico Potenziale. L'azione costruttiva del vento è però solo uno dei diversi fattori di condizionamento evolutivo a cui è soggetto un sistema spiaggia-duna, per cui la costruzione della matrice BIM e la successiva determinazione dell'Indice d'Instabilità (IDI) rappresentano la quarta, corposa, fase finale del lavoro.

## Cap 5\_INQUADRAMENTO AREA DI STUDIO

**KEY WORDS** (Inquadramento geografico, geomorfologico e climatico della costa della Regione Emilia-Romagna, evoluzione storica degli apparati dunari)

---

La pesante crisi che ha investito la duna costiera a scala nazionale non ha risparmiato nel tempo neanche la costa emiliano-romagnola, la quale fisiograficamente, si estende per circa 130 km, tra l'apparato deltizio del Po (in corrispondenza della foce del Po di Goro) e la località di Cattolica (Figura 45).



Figura 45 – Inquadramento area di studio (a);

Il paraggio è costituito essenzialmente da coste basse e di tipo sabbioso, interrotte da vaste aree lagunari (gran parte delle quali si trovano al di sotto del livello del mare, Simeoni et alii - 2006), ma soprattutto dalla presenza di numerose opere antropiche (ARPA, 2007), tra cui spiccano moli portuali aggettanti e opere di difesa (sia longitudinali che trasversali). La configurazione che ne deriva è quella di un litorale estremamente articolato (Figura 46), nel quale si sono istaurati localmente intensi processi di smantellamento, tanto della spiaggia quanto soprattutto della duna. Proprio le opere di difesa hanno nel tempo pesantemente contribuito all'irrigidimento del sistema costiero, e snaturato la dinamica evolutiva di gran parte della costa; la realizzazione di ognuna di esse trova giustificazione però nella necessità storica di contrastare i fenomeni erosivi che hanno iniziato a coinvolgere il litorale regionale a



partire dalla prima metà del XX secolo, quando è iniziata l'intensa opera di occupazione degli spazi costieri ad opera delle attività turistiche e residenziali.

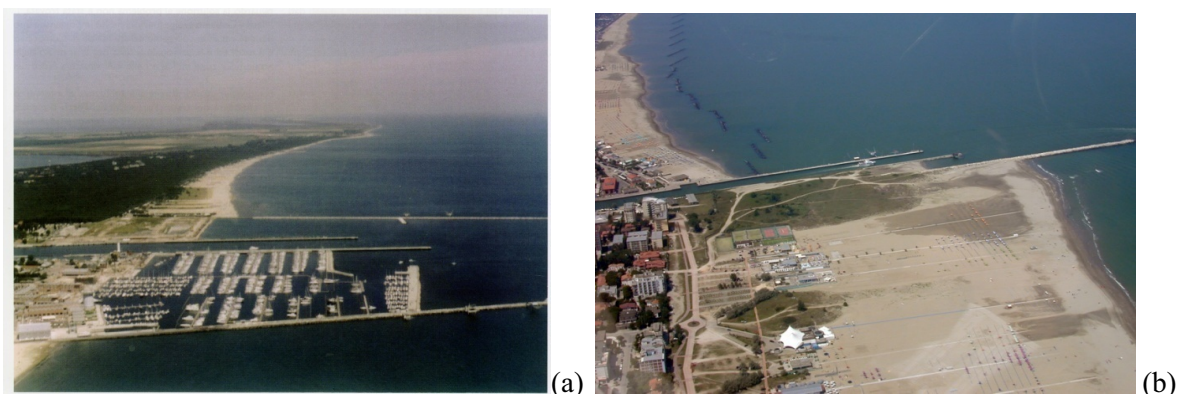


Figura 46 – Esempio di frammentazione della costa determinata dalla costruzione dei moli portuali aggettanti di Porto Corsini (Ra) (a) e di Porto Garibaldi (Fe) (b).

Oggi la lunghezza complessiva del paraggio che risulta protetto da opere di difesa è circa il 57% della totalità, equivalenti a 74 sui 130 km di estensione; 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.

## 5.1\_ ASSETTO GEOLOGICO ED EVOLUZIONE GEOMORFOLOGICA DELLA PIANURA PADANA ORIENTALE E DEL DELTA DEL PO

**KEY WORDS** (Aspetti fisiografici e geomorfologici della costa della Regione Emilia-Romagna)

---

La regione Alpino-Mediterranea costituisce l'area di transizione tra la placca Africana e quella Europea; il suo attuale assetto strutturale è il risultato della complessa evoluzione del relativo margine collisionale (Faccenna *et alii*, 2001). I risultati di studi sulla sismo-tettonica hanno permesso di tracciare i limiti dei domini, (quasi asismici, come l'area dell'Adriatico) in cui è suddivisa l'area. Essa è costituita da un mosaico di microplacche separate tra loro da strutture tettoniche a scala litosferica (Dewey *et alii* 1989; Reuther *et alii* 1993).

La microplacca Adriatica, di cui fanno parte la Pianura Padana ed il bacino del mare Adriatico, è delimitata a nord dal fronte meridionale delle falde sud-vergenti delle Alpi Meridionali, ad est dalle Dinaridi e dalle Albanidi, a sud dalla faglia di Kephallinia e dalla scarpata Apulia ed a ovest dal limite esterno degli Appennini. Essa risulta avere un movimento in senso antiorario rispetto alla placca Eurasiatica, con polo di rotazione posto nelle Alpi occidentali (Babbucci et al., 2004; Jarosiński et al., 2006; Serpelloni et al., 2005). L'orogenesi alpina, iniziata nel Cretaceo, è dovuta alla collisione tra la placca africana e quella europea che comportò la definitiva scomparsa della Tetide, oceano che prima le separava.

La litosfera oceanica, parte della placca europea (margine passivo), entrò in subduzione sotto il margine attivo africano (fase Eo-Alpina, Cretaceo superiore) e la successiva fase di impatto continentale (fase Meso-Alpina, Eocene) causò la sovrapposizione del fronte continentale africano (Australpino) su quello europeo (Pennidico, Elvetico). Si produsse così il prisma di accrezione collisionale, formato da sottili lembi di crosta continentale europea e africana-adriatica e da residui di crosta oceanica, che costituisce il cuore delle Alpi. Il prisma è punzonato dal fronte attuale della placca africana (Alpi Meridionali) e “galleggia” sulla litosfera europea (Dal Piaz et al., 2003).

Le Alpi Meridionali si evolvono secondo due sistemi strutturali ad andamento arcuato: uno occidentale, lombardo, con polarità verso sud ed uno orientale, veneto, con polarità sudest. Durante la fase eo-alpina, si sviluppa la parte più settentrionale dell'arco occidentale, a ridosso della linea Insubrica. Dall'Oligocene al Tortoniano si sviluppano la parte meridionale esterna dell'arco occidentale e quella settentrionale dell'arco orientale. Quest'ultimo si completa della parte meridionale tra il Messiniano al Plio-Pleistocene.

La formazione dell'Appennino settentrionale è avvenuta attraverso movimenti tettonici al margine continentale della microplacca Adriatica a partire dal Cretaceo superiore fino al Plio-Pleistocene (Pieri & Groppi, 1981). Gli archi frontali dell'Appennino, rivolti sulla Pianura Padana si sviluppano tra il Pliocene e il Pleistocene, contemporaneamente all'arco orientale. Durante il Mesozoico, l'area dell'attuale Pianura Padana viene a costituire l'avampaese comune delle due catene in formazione. In particolare, il bacino Veneto, separato da quello Lombardo dal cuneo dei Lessini, fu oggetto di deposizione di flysh dal cretaceo superiore al Terziario inferiore (Massari et al. 1986). Poi, dal Paleocene al Miocene esso costituisce l'avanfossa della catena dinarica che con le sue estreme propaggini sudovest vergenti delimita ad est la pianura stessa (Massari, 1990). Dall'Oligocene, l'intero bacino padano si evolve in

avanfossa per il Sudalpino e, dal Messiniano, per l'Appennino (Boccaletti et al., 1990). Dal punto di vista strutturale, l'area di studio è collocata al confine tra la monoclinale pedealpina e la parte più settentrionale della monoclinale adriatica (Pieri & Groppi, 1981). A segnare il limite tra queste due strutture vi è la faglia trascorrente Schio-Vicenza, che rappresenta il margine nordorientale dei Berici-Euganei (Pieri & Groppi, 1981; Zanferrari et al., 1982) e che costituisce un importante elemento attivo per quanto concerne la neotettonica della Pianura Veneta. Zanferrari et al. (1982) definiscono 8 "unità neotettoniche" per l'Italia nordorientale. In particolare, l'area di studio si collocherebbe tra le unità neotettoniche della "Pianura veronese e mantovana, Polesine", la "Pianura veneta orientale e friulana occidentale" e la "Lessini, Berici ed Euganei".

Dal Pliocene, l'area di studio è interessata da una subsidenza generalizzata che crea spazio di accomodamento per la deposizione di molte centinaia di metri di sedimenti fluviali. In particolare per l'area circostante la laguna di Venezia, l'abbassamento relativo funge da richiamo del reticolo idrografico (Zanferrari et al., 1982). Il risultato di questa subsidenza pressochè continua e generalizzata fa sì, come si può vedere in Figura 47, che la pianura Padano-Atesina sia costituita da una spessa serie di sedimenti quaternari: la base del Quaternario si colloca, infatti, ad una profondità compresa tra i 700 e i 1000 metri (Pieri & Groppi, 1981).

La faglia Schio-Vicenza, che segna il confine tra le unità "Pianura veneta orientale e friulana occidentale" e "Lessini, Berici ed Euganei", viene riconosciuta, verso sud, fino a Conselve (Pieri & Groppi, 1981). Tuttavia, alcuni autori, la prolungano fino quasi a lambire il delta padano (Slejko et al., 1987), passando in corrispondenza dell'area di Pettorazza Grimani (Rovigo), dove si ha una delle più grandi paleoanse del fiume Adige.

Come fanno notare Bondesan et al. (2002), richiamando Norinelli (1979) e Ogniben (1986), alcuni "indizi", non supportati però da prove, potrebbero far ipotizzare un collegamento tra la geometria del corso fluviale e la faglia in profondità. Bondesan et al. (2002) fanno notare come il paleomeandro di Pettorazza Grimani sia, infatti, costituito da due tratti distinti: una prima paleoansa, più piccola, interrotta, all'altezza di Contea, dalla paleoansa maggiore, probabilmente dovuta alla ripresa di un canale di rotta più antico o ad un basculamento NO-SE dell'area.

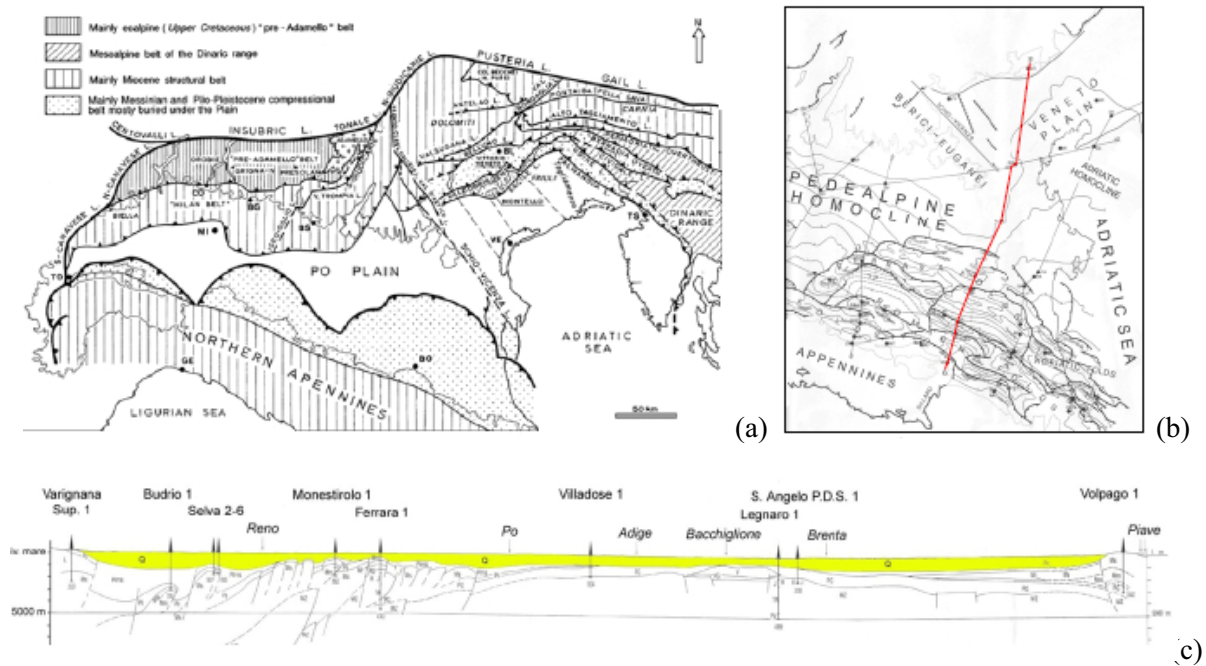


Figura 47 – Inquadramento strutturale dell’area di studio. (a) Schema tettonico dell’area sudalpina e dell’avanfossa della Pianura Padana (Castellarin et al., 2005). (b) Schema strutturale di dettaglio dell’area compresa tra gli archi appenninici N-vergenti e la monoclinale adriatica. In rosso, il tracciato della sezione c) passante per Villadose (Rovigo) tracciata grazie ai sondaggi profondi AGIP degli anni ’70-’80 (modif. da Pieri & Groppi, 1981).

### ***Ricostruzione paleogeografica e assetto-sedimentario dell’area centro settentrionale della Pianura Padana***

Durante l’ultimo massimo glaciale, (LGM – *Last Glacial Maximum*), la Pianura Padana orientale era caratterizzata da un clima freddo e semi-arido (Paganelli, 1996; Miola et al. 2006). Il livello marino era circa 120 m più basso dell’attuale e la linea di costa si trovava alla latitudine dell’attuale città di Ancona (Correggiari et al., 1996). Questa posizione della linea di costa fu raggiunta durante l’ultima fase di stazionamento basso (lowstand) del livello relativo del mare, dovuta all’abbassamento glacio-eustatico dell’LGM. I grandi ghiacciai che ricoprivano le Alpi e che avevano il loro sbocco in pianura (Castiglioni, 2001), alimentavano una rete idrografica molto più ricca e con portate molto più abbondanti rispetto a quelle odierne. In questa fase sedimentaria si hanno evidenze di un sistema fluviale dominato da corsi d’acqua di tipo pensile che con le loro frequenti avulsioni avrebbero portato spessi depositi di piana di esondazione, caratterizzati da abbondanti, estesi ma sottili strati di torba,

deposti nelle depressioni interdossive. Il ridotto spessore di questi strati di torba sarebbe dovuto ai continui eventi di esondazione che ne avrebbero interrotto la deposizione (Miola et al. 2006). Studi dettagliati riguardo all'architettura stratigrafica del sottosuolo dell'area deltizia (Bondesan, et al. 1995; Amorosi et al. 1999, 2003, 2005; Stefani & Vincenzi, 2005) mostrano come la successione olocenica, spesso fino a poche decine di metri, sia separata dalla sottostante sequenza alluvionale datata LGM da una superficie di discordanza. Questa discontinuità ha come conseguenza l'assenza di dati cronostatigrafici in particolare per il periodo compreso tra 14.500 e 8.000 BP. Come riportano Fontana et al. (in stampa), questa mancanza di dati sarebbe imputabile ad uno hiatus sedimentario dovuto all'attività fluviale limitata entro canali incisi, che non avrebbe portato sedimentazione nella piana di esondazione. Le cause della scarsità di apporto sedimentario al sistema fluviale sono da ricercarsi in due principali fattori.

Il progressivo ritiro dei ghiacciai alpini nelle fasi finali dell'LGM, iniziato col brusco cambiamento climatico avvenuto tra 18000 e 16000 anni BP (Orombelli & Ravazzi, 1996) e protrattosi fino al Tardiglaciale (15000-11500 BP) (Pellegrini et al., 2005) e la formazione di laghi temporanei a monte di depositi morenici e/o di frane post-glaciali, avrebbero causato il trattenimento di importanti quantità di sedimenti (Castiglioni, 2001). Inoltre, la ricolonizzazione delle aree montane da parte della vegetazione, avrebbe ridotto il tasso di erosione e quindi portato a una diminuzione nell'apporto sedimentario.

Attorno a 11500 anni BP, in seguito alla deglaciazione, iniziò una fase trasgressiva in cui il livello marino si innalzò fino a raggiungere circa i valori attuali. Questo causò un'aggradazione dei sistemi fluviali e una retrogradazione di tutto il sistema costiero che durò dallo "Younger Dryas", periodo caratterizzato, nell'area padana, da un clima secco e relativamente più fresco e dalla presenza di foreste di pino, per tutto il Boreale e fino all'inizio dell'Atlantico. Quest'ultimo periodo sarebbe stato caratterizzato dalle temperature più alte di tutto l'Olocene (Accorsi et al. 1996).

Durante l'Atlantico, attorno a 6000-5500 anni B.P., si ebbe una trasgressione marina che, nella Pianura Padana, portò la linea di costa 20-30 km più ad ovest rispetto a quella attuale (Figura 5) (Amorosi et al., 2005). Negli ultimi 2400 anni della storia del delta, la linea di costa ha progradato per 11 km, lungo una fascia costiera che si estende per circa 80 km (Cremonini, 2007). I delta sono caratterizzati da una forma arcuata, dovuta all'azione del modellamento da parte delle onde e dalla presenza di fasce dunose costiere che, con la progradazione del sistema, hanno lasciato traccia "fossile" delle antiche linee di costa (Figura

48). I cordoni dunosi più interni e più antichi rilevati, sono stati datati XII-XI sec. a.C. e si collocano nella fascia longitudinale che comprende gli attuali centri di Loreo e San Pietro di Cavarzere (Marcolongo, 1987). Spostandosi verso la costa attuale, si trovano le fasce dunose datate VII sec. a.C., corrispondenti, secondo Bondesan et al. 1995, alla transizione Sub-boreale – Sub-atlantico, quelli formati tra il V ed il II sec. a. C., tra il VI ed il X sec. d.C. ed infine quelli corrispondenti al XV-XVI sec. d.C (Marcolongo, 1987; Bondesan et al., 1995; Stefani & Vincenzi, 2005, Cremonini, 2007). Amorosi et al. (2005) osservano, all'interno dei depositi di highstand, l'estesa continuità laterale di strati di torba, datati circa 4.000 BP, in tutta l'area a nordovest di Comacchio, che proverebbero, in questo periodo, lo sviluppo di bacini palustri tra i canali tributari del delta in cui avveniva la deposizione di sedimenti organici.

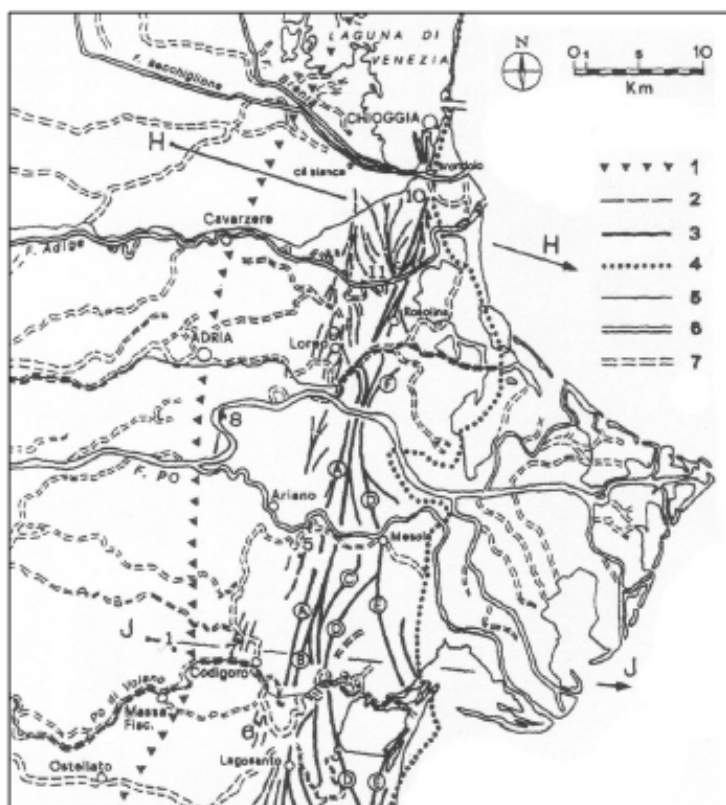


Figura 48 – Schema geomorfologico dell'area del delta del Po, con riportate le tracce delle sezioni stratigrafiche H e J, illustrate in Figura 7 (1) possibile posizione della linea di costa durante la trasgressione post-glaciale; (2) cordoni dunosi sepolti; (3) corpi dunosi in superficie, di età: A = transizione subboreale-subatlantico; B = VI-IV sec. a.C.; C = I-II sec.; D = V sec. a.C. circa; E = V sec. d.C. circa (modif. da Bondesan, 1995)

In un profilo tracciato da Bondesan et al. (1995) che attraversa la parte più orientale della Pianura Padano-Atesina, si nota che ad ovest del limite raggiunto dalla massima ingressione marina,

ovvero in prossimità dell'area studiata in questa tesi, i depositi olocenici sono caratterizzati da limi e argille di facies fluviale-palustre e torba (Figura 6, sez. HH) in eteropia, verso est, con sabbie deposte in ambiente litoraneo. Sedimenti torbosi analoghi, provenienti da livelli radiodati tra circa 6 e 12 metri di profondità dal sondaggio di Massafiscaglia (entroterra del delta padano), hanno dato valori compresi tra 3900-3700 B.P. e 7200-6950 B.P (Figura 49, sez. JJ, sondaggio 1).

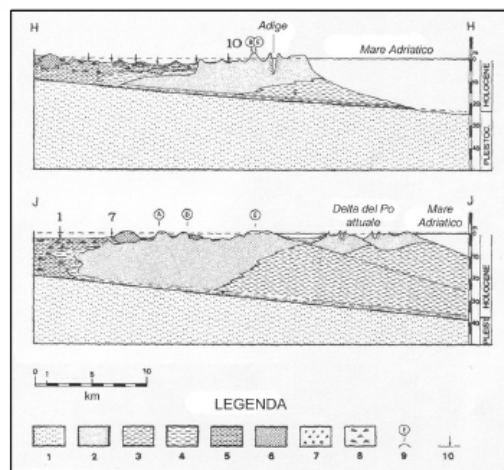


Figura 49 – Profili stratigrafici delle sezioni HH e JJ attraverso il sistema deposizionale del delta padano. Pleistocene: (1) sabbie e limi continentali; Olocene: (2) sabbie di facies costiera; (3) limi e argille marine; (4) limi e argille lagunari; (5) argille e limi continentali; (6) sabbie fluviali; (8) ghiaie; (8) torbe; (9) principali cordoni dunosi in superficie (10) sondaggi; (modif. da Bondesan et al., 1995).

Durante il Sub-boreale, ed in particolare a circa 3000-2900 B.P., si ebbero condizioni climatiche più fredde rispetto al periodo precedente. In questo periodo dovevano essere attivi il Po di Adria ed il ramo più settentrionale del Po. Quest'ultimo, che doveva avere il suo sbocco in Adriatico tra Adria e Chioggia, avrebbe contribuito, con il suo apporto sedimentario, alla costruzione del lido che racchiudeva la laguna di Venezia (Stefani & Vincenzi, 2005; Cremonini, 2007). Come suggerito da Cremonini (2007), in quest'epoca, e fino al Medioevo (XI sec. d.C.) la pianura Padano-Atesina, doveva essere solcata da un reticolo idrografico caratterizzato da numerosi canali secondari, che farebbe ipotizzare un modello fluviale di tipo anabranching. Una situazione simile, è stata descritta nel delta dei fiumi Reno e Mosa, nei Paesi Bassi. Makaske (1998), Berendsen & Stouthamer (2002), Berendsen & Stouthamer (2002) descrivono, infatti, l'evoluzione paleogeografica e paleoidrografica del delta formato dal sistema fluviale a canali anastomizzati dei fiumi



suddetti. Tra 2500 e 1500 BP, periodo caratterizzato da un clima fondamentalmente caldo, la struttura idrografica rimase relativamente stabile (Veggiani, 1985 in Stefani & Vincenzi, 2005.). A seguito di lunghi periodi di piogge che determinarono serie di importanti rotte fluviali con inondazioni ed alluvionamenti di vasti territori, molti corsi d'acqua però abbandonarono i loro antichi alvei pensili verso aree più depresse (Figura 50).

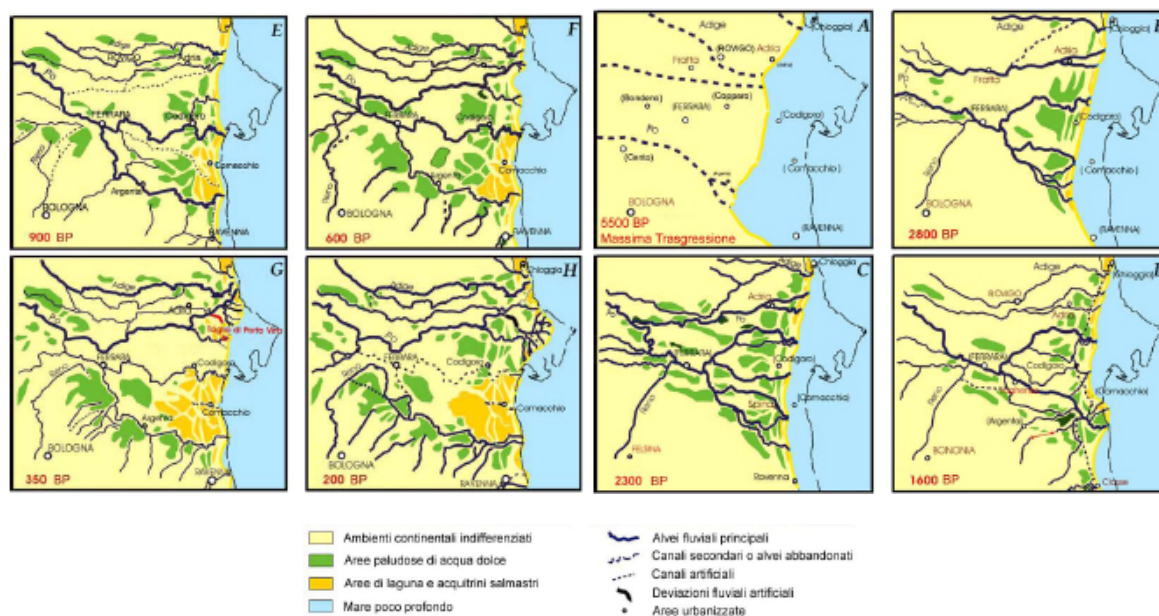


Figura 50 – Progradazione dell'area del delta padano ed evoluzione della rete idrografica a partire all'ultima trasgressione marina avvenuta circa 5500 BP (modificato da Stefani & Vincenzi, 2005).

Tra gli effetti di tali eventi alluvionali, molte tra le aree più depresse della pianura Padano-Atesina rimasero a lungo caratterizzate dalla presenza di specchi lacustri, che lentamente si trasformarono in bacini palustri. Si ricorda a tale proposito la formazione degli antichi laghi di Piacenza, Spialfredo, Vighizzolo ed Anguillara (Marcolongo & Zaffanella, 1987).

Con l'epoca Tardo Antica – Alto Medievale (in particolare tra 1500 e 1300 BP) si assiste ad un significativo cambiamento sia climatico che di gestione antropica delle acque. Secondo diversi autori (Bertolani Marchetti, 1966; Panizza 1985; Veggiani, 1994) si ebbe un deterioramento delle condizioni climatiche, che produsse, in coincidenza con il progressivo abbandono delle terre dopo il declino della romanità (caduta dell'Impero Romano d'Occidente e invasioni barbariche, disastrosi effetti nella pianura veneta meridionale e romagnola (Cremaschi & Gasperi, 1989). Ortolani & Pagliuca (1994) definiscono, in



particolare, il periodo compreso tra il VI e l’VIII sec. d.C. “Piccola Età Glaciale Alto Medievale”, sulla base di dati paleoambientali e geoarcheologici (Figura 51).

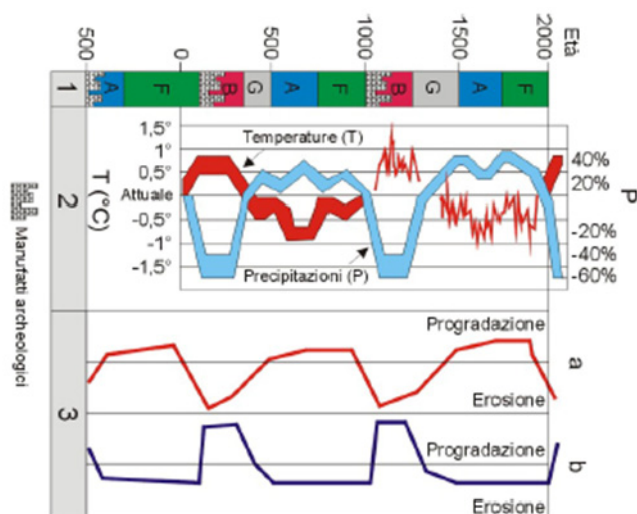


Figura 51 – Correlazione tra: la stratigrafia geoarcheologico-ambientale (colonna 1), l’evoluzione delle temperature e delle precipitazioni (colonna 2), evoluzione delle spiagge con sabbia silicoclastica (a) e organogena (b) (colonna 3). Per la colonna 1: Periodi freddo-umidi (inazzurro) E = Piccola Età Glaciale; C = Piccola Età Glaciale Alto Medioevale; A = Piccola Età Glaciale Arcaica. Periodi caldo-aridi: D = Periodo Caldo Medioevale; B = Periodo Caldo Romano. Periodi di transizione: F = Transizione da freddo-umido a caldo-arido; G = Transizione da caldo-arido a freddo-umido (ridisegnato da Ortolani & Pagliuca, 2007).

## ***Evoluzione geomorfologica recente***

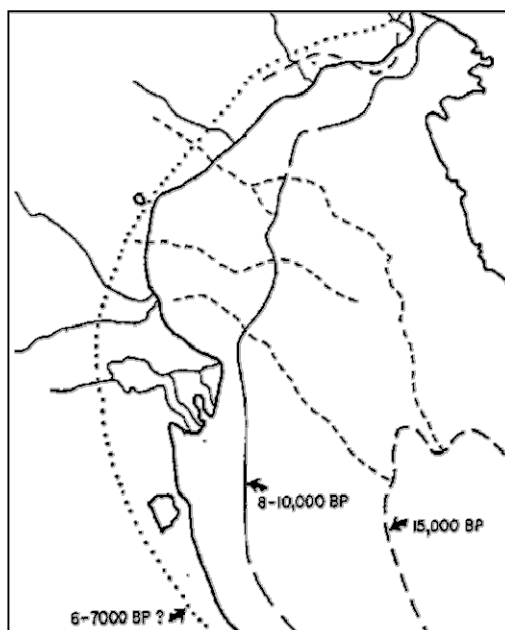
Dal punto di vista geomorfologico, l’intera fascia litorale regionale è costituita da coste basse e sabbiose, d’origine prevalentemente alluvionale. Il litorale risulta interrotto da foci fluviali ed agetti portuali che identificano diverse unità fisiografiche i cui comportamenti e trend evolutivi possono essere assai diversi. Quest’ultimo aspetto è da imputarsi anche alla notevole pressione antropica espletata non solo a livello territoriale ma anche a scopo difensivo. L’attuale assetto morfologico, di fatto, non può essere solo il frutto di un’evoluzione naturale, ma trova spiegazione anche nella presenza e distribuzione delle numerose infrastrutture edificate, nel corso degli ultimi decenni, a difesa dall’erosione. Esse hanno contribuito a frammentare la costa regionale e ad instaurare dinamiche locali molto complesse.

Ciò nonostante, a livello generale, secondo la classificazione proposta da Wright *et alii* (1979), quella emiliano-romagnola è una costa di tipo “dissipativo”, essendo costituita da fondali a debole pendenza, con ampie zone di frangimento. In realtà, questo aspetto sembra non trovare molto riscontro a scala locale: come si vedrà in seguito nella parte di analisi morfometrica dei profili, gran parte delle dune che oggi si trovano in uno stato di intensa crisi erosiva, hanno di fronte una spiaggia emersa fortemente ridotta in ampiezza, e una spiaggia sommersa con pendenze moderatamente elevate (anche superiore ai 5°). D’altro canto la tendenza all’aumento delle pendenze dei fondali, soprattutto nella fascia compresa tra 0 e 5 metri è stata evidenziata da tempo in letteratura: fin dagli anni ’60 (Marabini & Merzani, 2003), è stata considerata uno dei principali sintomi dell’assetto erosivo che iniziava ad insistere in maniera costante e intensa su buona parte della costa regionale.

#### ***a. La Pianura Padana Orientale e il Delta del Po***

Le indagini effettuate durante la fine degli anni ’90, permettono il confronto di una quantità di dati sufficiente per la ricostruzione ed evoluzione tardo pleistocenico-olocenica della bassa Pianura Padana e dell’adiacente area marina. I dati disponibili evidenziano come, in rapporto all’ultimo ciclo glacio-eustatico, si passi da una fase di prolungata emersione (*low-stand*), comprendente l’ultimo massimo glaciale ed in cui si è sviluppato un sistema di piana alluvionale, alla formazione di un sistema barriera – laguna, dovuto all’innalzamento del livello del mare, che ha subito rapidi spostamenti durante la successiva fase trasgressiva.

Durante quest’ultima si è avuta la deposizione di sabbie, da siltose a molto fini, con intercalazioni di argilla siltosa, ricche di resti biogenici marini. Questi depositi hanno avuto luogo in un ambiente litorale di alta energia a cui, all’incirca tra gli 8000 e i 6000 anni fa (Optimum Climatico Olocenico), è seguita l’attuale fase di high – stand del livello marino che, in particolare, ha portato la linea di costa molti chilometri all’interno rispetto all’attuale (Figura 52). In questa fase si è avuta la costruzione del paleo - delta del Po ai lati del quale si sono sviluppate piane costiere, migrate in direzione W-E durante la progradazione deltizia determinando l’isolamento di lagune poco profonde allungate e di paludi nell’entro terra. L’ultima facies che si trova nei depositi dell’area è infatti quella relativa alla piana alluvionale Olocenica che corrisponde all’attuale pianura (Amorosi *et alii*, 1999).



*Figura 52 - Ubicazione delle probabili linee di costa succedutesi durante l'ultima trasgressione glacioeustatica (Sestini, 1992).*

Scavi archeologici hanno poi dimostrato che dalla fine dell'Età del Bronzo (1200-1250 a.C.) alla prima Età del Ferro (900-700 a.C.) si sono verificate significative, anche se meno intense, fluttuazioni climatiche che, specie durante i periodi di piovosità, hanno portato a modificazioni sostanziali dell'ambiente: variazioni idrografiche a causa di rotte fluviali, notevole apporto a mare di materiale terrigeno da parte dei fiumi poi ridistribuito dalle correnti marine che hanno portato a nuove situazioni di equilibrio dei diversi tratti di litorale adriatico (Figura 53).

In generale comunque, nonostante le fasi alterne di avanzamento e di arretramento negli ultimi millenni si è avuta una generale tendenza progradazionale che, con la formazione di una serie di cordoni litorali sabbiosi, ha portato la linea di costa a stabilizzarsi nella posizione attuale. Tali cordoni, composti prevalentemente da sabbia di spiaggia e di duna rappresentano la "traccia" sedimentaria e paleomorfologica delle numerose linee di costa formatesi in tale processo di avanzamento.

Tutta l'area è interessata da sistemi lineari costituiti da fasci di cordoni dunali appartenenti agli apparati deltizi del Po. In particolare, l'area in esame è occupata da cordoni progradanti del delta del Po di Volano (Amm.ne Prov.le di Ferrara, 2000). In questa zona la litologia prevalente è rappresentata dalla sabbia che presenta un litosoma, continuo in tutta l'area, dello spessore medio di circa 15m. Questo litosoma,

non del tutto omogeneo, presenta, al suo interno, intercalazioni di limi sabbiosi, torbe e argille (Amm.ne Prov.le di Ferrara, 2000).

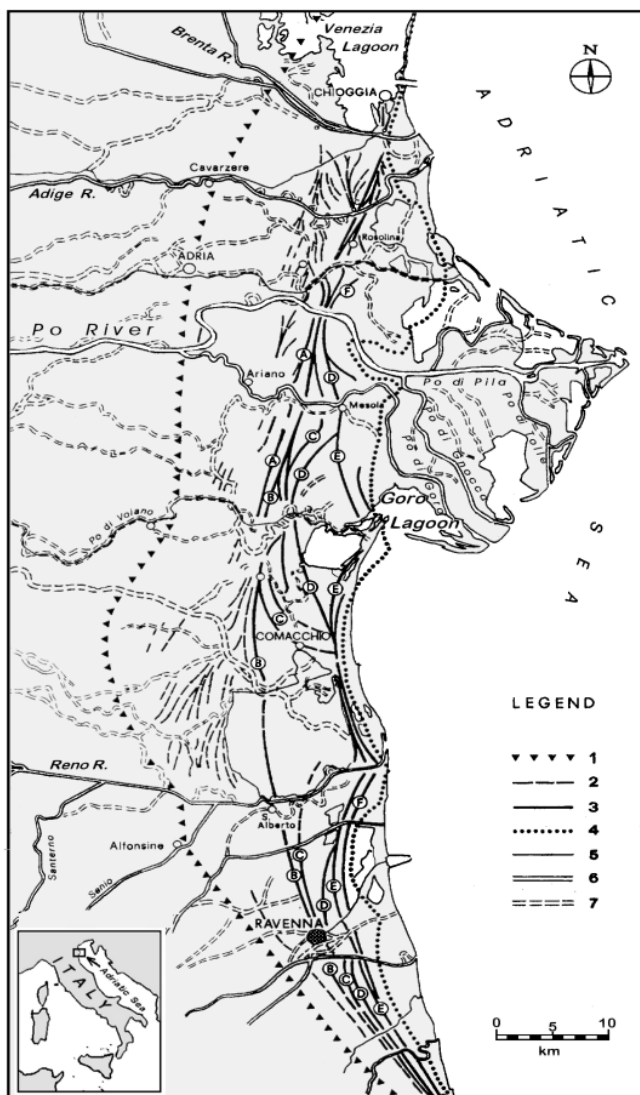


Figura 53 - Assetto geomorfologico dell'area deltizia del Po. Legenda: 1) possibile ubicazione della linea di costa durante la massima fase trasgressiva olocenica; 2) cordoni di spiaggia sepolti; 3) cordoni esposti; 4) linea di costa alla fine del 16° sec.; 5) linea di costa attuale; 6) corsi fluviali attuali; 7) paleoalvei fluviali (da Bondesan et al., 1995; modificata).

L'evoluzione recente del territorio costiero è caratterizzata dalla successione e sovrapposizione d'eventi ambientali complessi cui va sommata, soprattutto negli ultimi secoli, l'azione modificatrice dell'uomo. La linea di costa olocenica spostandosi progressivamente verso est, ha assunto conformazioni via via differenti in funzione dell'efficienza delle foci fluviali e dell'azione del mare (Bondesan, 1990).

Dalla fine dell'Età del Bronzo fino al VII sec. a.C. (Figura 54a) predomina il cosiddetto Po di Spina, la cui foce era localizzata ad occidente dell'attuale centro abitato di Comacchio, presso l'omonimo insediamento etrusco (Figura 54b). Tale ramo, il cui nome diventa Eridano nell'Alto Medioevo, rappresenta il maggior collettore dell'antico apparato deltizio del Po sino al VII sec. d.C., dando origine al delta dell'Eridano, smantellato subito dopo l'Età romana (Figura 54c). Ad esso si sostituisce il Po di Volano (Figura 54d) che costruisce il delta di Pomposa-Volano e caratterizza lo sviluppo dell'area litorale fino al XII secolo. Successivamente ad una serie di rotte fluviali, avvenute presso Ficarolo nel XII secolo, la maggior parte delle acque del Po s'incanala a nord dando origine ad un'ampia piattaforma deltizia, la cui conformazione attuale si deve al Taglio di Porto Viro (1599-1604). Tra il XV ed il XVII secolo (Figure 54e e 54f) numerosi interventi antropici resero il Po di Primaro principale distributore dell'area deltizia e modificarono sostanzialmente l'efficienza del Po delle Fornaci.

Le rappresentazioni cartografiche disponibili per gli ultimi secoli evidenziano come, per il sempre minor apporto solido a mare legato al concludersi della "Piccola Età del Ghiaccio", si assista ad una netta riduzione dei tassi d'avanzamento delle foci in tutto il sistema deltizio ed, in particolare, di quelle del Po di Goro e di Donzella (Figura 55a). Per queste ultime, per altro, la cartografia di fine ottocento, ormai di buona precisione geodetica, indica non solo che barre centrali, talora arcuate, tendono a sostituire quelle distribuite radialmente alle foci ma, soprattutto, come in corrispondenza del lato sottocorrente di queste ultime inizino a svilupparsi delle frecce litorali (Figura 55b). Nel frattempo, in corrispondenza della foce del Po di Volano, inizia a prodursi quell'allungamento verso nord del bordo meridionale, sovracorrente, che, progressivamente, gli conferirà quella tipica "falciatura" ancor oggi visibile (Figura 55b). Una simile variazione, a testimonianza del complessivo cambiamento intervenuto nei regimi sedimentari, si registra anche nella vicina foce del fiume Reno (Bondesan, 1990).

L'integrazione e la correlazione d'informazioni della più diversa tipologia ed origine hanno evidenziato come, a macroscale, l'attuale configurazione del moderno sistema deltizio del Po sia stata sostanzialmente condizionata dalle attività antropiche di regimentazione, attività che si sono sovrapposte agli effetti delle variazioni naturali connesse alla "Piccola Età del Ghiaccio". Quest'ultime hanno influenzato

sensibilmente il regime fluviale e la quantità di input sedimentari distribuiti sui fondali, che nell'Adriatico presentano bassa profondità e debole pendenza.

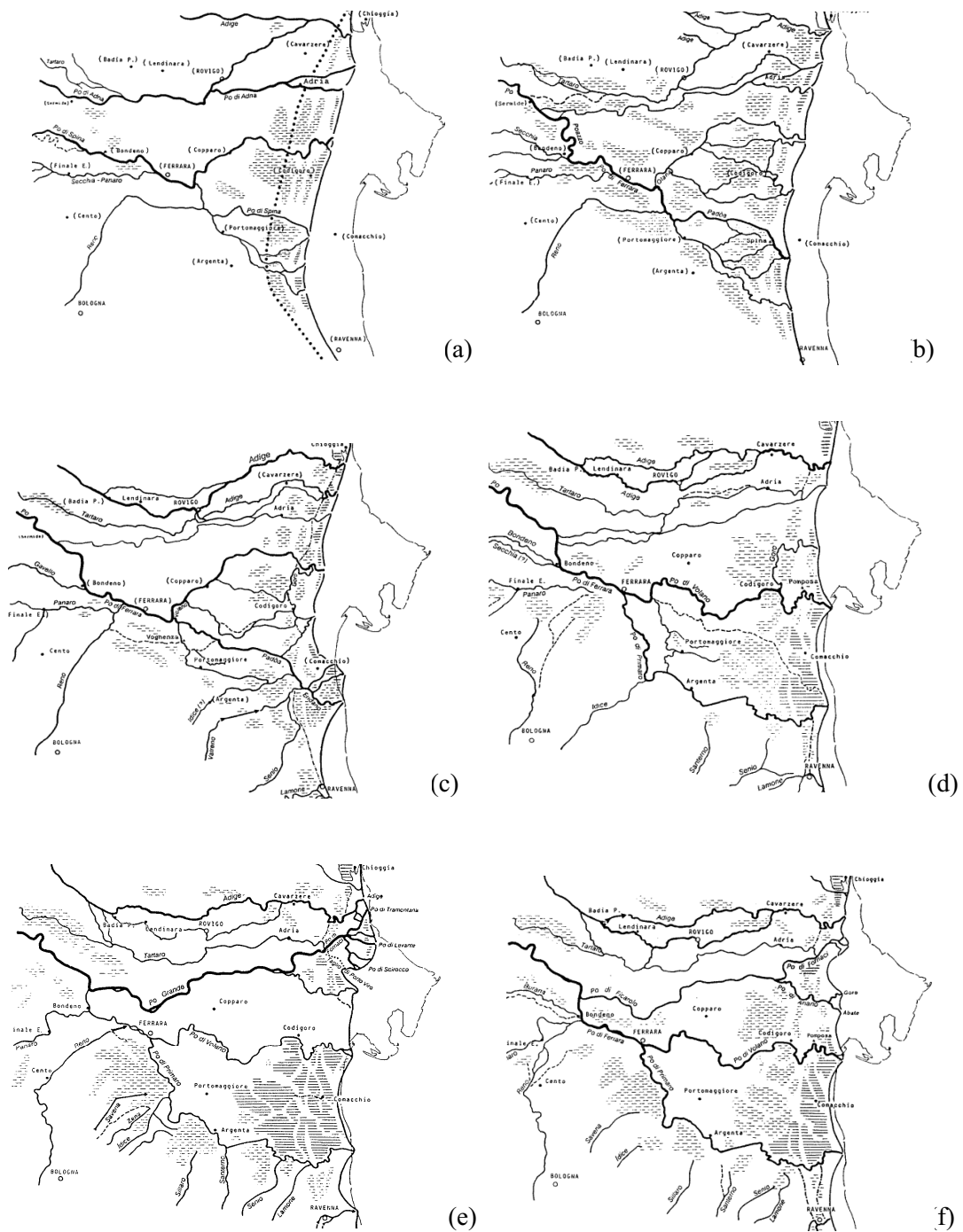


Figura 54 – (a) Il territorio alla fine dell'età del Bronzo, circa X sec. a.C. (da Bondesan, 1990); (b) Il territorio in Età Etrusca, VI-IV sec. a.C. (da Bondesan, 1990); (c) Il territorio nella tarda Età Romana, fine III secolo d.C. (da Bondesan, 1990); (d) Il territorio intorno al IX - X secolo (da Bondesan, 1990); (e) Il territorio alla metà del XIV secolo (da Bondesan, 1990); (f) Il territorio alla fine del XVI secolo (da Bondesan, 1990).

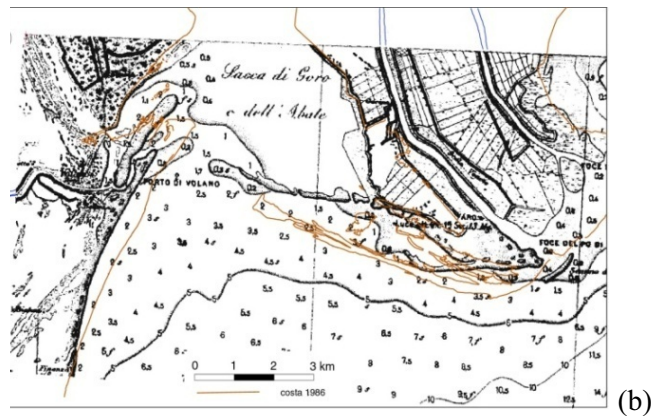
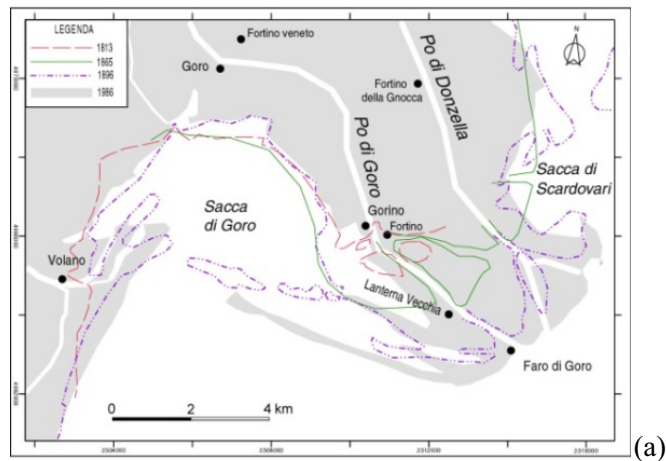


Figura 55 – (a) Ricostruzione schematica delle principali linee di costa succedutesi nell’area di Goro tra il 1813 e il 1896. Ben evidente l’articolato sistema di frecce litorali che già a fine secolo occluderà parzialmente la Sacca; (b) Carta nautica basata su rilievi di fine ‘800, che mostra lo sviluppo del sistema di frecce litorali. Evidente la crescita di una barra arcuata di fronte alla foce del Po di Goro, mentre la foce del Po di Volano presenta ormai un marcato sviluppo verso nord del suo lato sopracorrente.

Infatti, è indubbio che le geometrie deltizie, se correlate con i numerosi modelli presenti in letteratura (Wright, 1977, 1985; Galloway, 1975; U.S Army Corps, 1995; Reading e Collinson, 1996), siano passate negli ultimi cinque secoli da dinamiche tipicamente “costruttive”, dominate da un’elevata efficienza fluviale, a situazioni “distruttive” controllate dal moto ondoso e dalle correnti litoranee. Il passaggio tra le due condizioni si è, all’incirca, determinato con la netta caduta degli apporti solidi a mare conseguenti sempre alla fine della “Piccola Età del Ghiaccio”. Il controllo da parte degli agenti meteomarini si è poi consolidato progressivamente, sino a prevalere

dopo la notevole riduzione degli apporti sedimentari a mare registrati nella seconda metà del '900.

### ***b. La Subsidenza***

La subsidenza si è rivelata nel corso degli ultimi decenni come la più seria minaccia alla stabilità del litorale emiliano-romagnolo. Un sistema ambientale già di per se molto fragile perchè costituito da un sottile rilevato sabbioso, la spiaggia emersa, ormai priva del sistema dunale retrostante, di separa il mare da una vasta pianura in parte al di sopra del livello del mare di pochi metri e in parte, nel centr nord, al di sotto di alcuni metri. L'area costiera dell'Emilia-Romagna si abbassa, fondamentalemente per due motivi:

- *Per la compattazione dei terreni, quindi per ragioni naturali a cui non si può porre rimedio;*
- *Per l'estrazione di fluidi dal sottosuolo (acqua e metano), quindi per cause antropiche.*

La subsidenza naturale varia nell'area costiera regionale fra 0,5 e 3 mm/anno in ragione diretta alla potenza degli strati di deposizione geologicamente "recenti". I valori minori si riscontrano a sud di Rimini e i valori maggiori nell'area deltizia del Po.

Per quantificare la variazione complessiva del livello del mare rispetto a quello del terreno, alla subsidenza naturale va aggiunto l'eustatismo, poco più di 1 mm/anno nell'ultimo secolo. Pertanto, per sole cause naturali le velocità di abbassamento variano tra 1,5 mm nell'area più a sud e 4 mm nell'area prossima al Delta del Po. Si tratta di valori non trascurabili, soprattutto se rapportati a scale temporali di uno o più secoli, ma del tutto insignificanti se riferiti a quanto avvenuto a partire dal 1950 a causa del massiccio sfruttamento di giacimenti metaniferi, della bonifiche di vaste aree vallive, dello sviluppo edilizio e dell'affermarsi, nell'entroterra, di un modello d'agricoltura fortemente idroesigente. In questo caso infatti gli abbassamenti hanno raggiunto punte di 40 mm/anno a Codigoro negli anni '50 -'70 e di 50 mm/anno a Cesenatico negli anni '80.

Sempre a partire dagli anni '80, e fino ad oggi IDROSER (oggi ARPA) mise in piedi e sviluppò una rete di monitoraggio della subsidenza (livellazione ad alta precisione)



che tra il 1984 e il 2005 è stata rilevata 5 volte, fornendo una notevole mole di dati e informazioni circa gli abbassamenti differenziali di punti dislocati su tutta la pianura padana e in particolare sulla costa: con il tempo la rete è andata sempre più infittendosi e oggi assume una configurazione come quella di Figura 56.

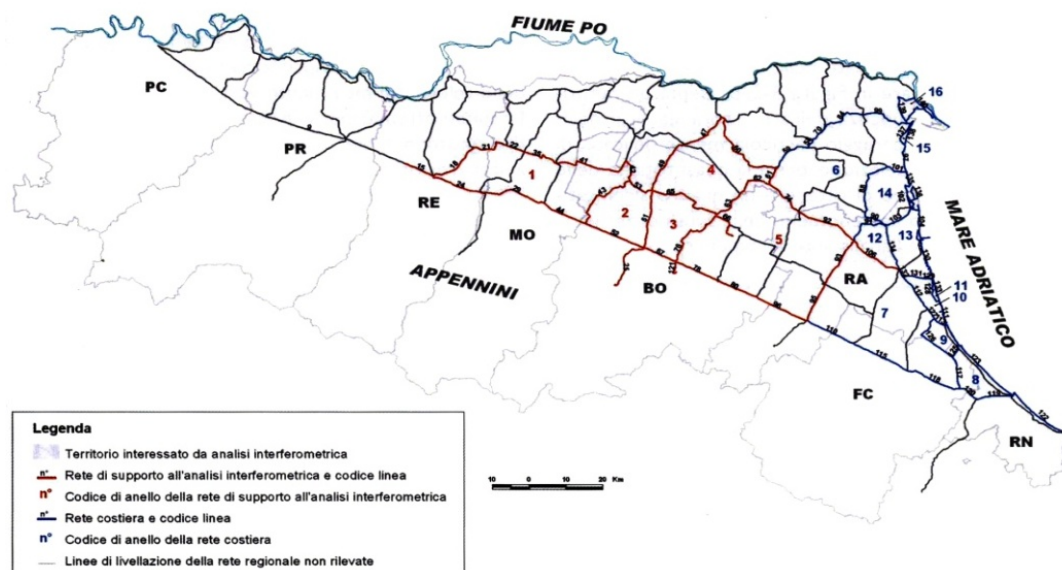


Figura 56 – Linee di livellazione ad alta precisione (Arpa, 2007)

Dalla pubblicazione del 1° Piano Costa (Idroser, 1981) ad oggi, si può affermare che il quadro conoscitivo relativo a entità e cause del fenomeno è migliorato moltissimo: l'entità dei processi in atto, l'individuazione delle cause e la fragilità del sistema litoraneo regionale hanno spinto nell'ultimo decennio vari Enti e Istituti Universitari ad occuparsi del fenomeno anche mediante l'istallazione di strumenti di misura molto sofisticati. Già nel "Piano Costa 1996" (Idroser, 1996), e nello "Stato del litorale emiliano-romagnolo dell'anno 2000" (Arpa, 2000), gli andamenti della subsidenza ed i conseguenti abbassamenti di 70-100 cm di quasi tutto l'arco costiero regionale erano già stati descritti abbondantemente; tali studi contenevano anche le prime analisi per discriminare tra loro i contributi delle due principali cause della subsidenza di origine antropica e cioè l'estrazione di acqua da falde profonde alcune centinaia di metri e l'estrazione di gas metano da giacimenti profondi alcuni chilometri. Le novità emerse dal rilievo più recente (2005) della rete dei capisaldi lungo la costa, e dalla successiva verifica e integrazione con il sistema dell'interferometria differenziale (2006) non sono

di poco conto, considerato che tra il 2000 e il 2006 la subsidenza media dell'intera fascia costiera, per una larghezza di 5 km dalla battigia, è risultata pari a circa 8 mm/anno, corrisponde allo stesso valore del periodo 1992 – 2000 (Figure 57 e Figura 58 a/b).

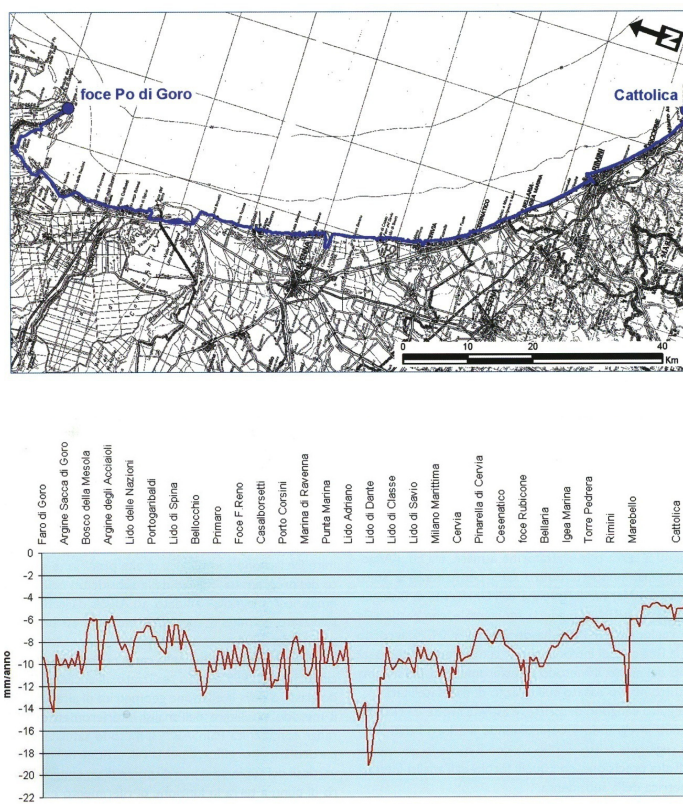


Figura 57 – Nella mappa in alto è riportata, in blu, la rete di misura della subsidenza lungo la fascia costiera; in basso le velocità di abbassamento, ottenute mediante rilievo diretto, nel periodo 1992-2005 (Arpa, 2007)

Ciò sta a significare che, dopo le sensibili riduzioni del fenomeno avvenute tra il 1988 e il 1992, quando quasi tutti gli acquedotti comunali tra Ravenna e Cattolica sono stati allacciati con l'acquedotto di Romagna, quindi con il bacino di Ridracoli, non sono stati fatti altri interventi significativi per ridurre la subsidenza antropica. Mentre a Ravenna la subsidenza è ulteriormente diminuita, a Rimini è aumentata. Il che farebbe supporre che anche i prelievi da falda siano aumentati. Ciò è molto grave perché la città di Rimini negli ultimi 55 anni si è abbassata rispetto al livello del mare di 70 cm.

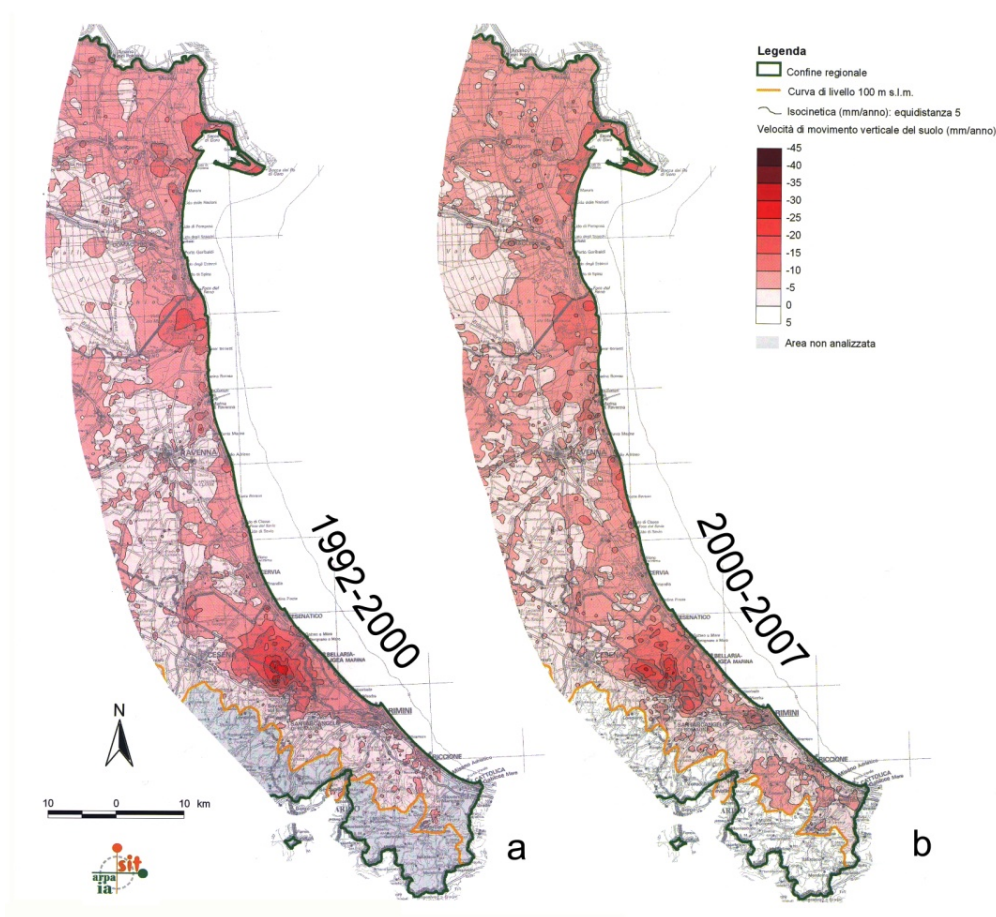


Figura 58 – Carta delle velocità di movimento verticale del suolo, ottenute mediante interferometria, lungo la costa dell’Emilia-Romagna nel periodo 1992-2000 (a) e 2002-2006 (b) (Arpa, 2007)

Un dato che lascia tutti increduli, ma di cui nessuno sembra tenere conto. Un'altra vasta area con diversi "crateri" causati dagli emungimenti di acqua, e i cui effetti si estendono ad un lungo tratto di costa, e il quadrilatero Cesena Cesenatico - Torre Pedrera - Sant'Arcangelo di Romagna. Gli emungimenti sembrano in questo caso da imputare agli usi industriali e agricoli, in relazione alla presenza di numerose fabbriche e per la vasta superficie dedicata a coltivazioni orticole e frutticole.

Per quanto riguarda gli effetti indotti dall'estrazione di metano dai due giacimenti già descritti nel "Piano Costa 1996" ("Angela-Angelina" e "Dosso degli Angeli"), in quanto prossimi alle linee della rete di livellazione, risulta che il trend della subsidenza è decisamente aumentato (2-5 mm/anno), nei circa 10 km di litorale che risentono degli effetti indotti dalla coltivazione del giacimento "Angela-Angelina". Questo è stato oggetto di una nuova riperforazione nel 1998, che ha portato allo sfruttamento di una successione di circa 30 strati e ad un aumento della produzione.

In sintesi, il litorale emiliano-romagnolo risulta affetto, da più di 50 anni, da un vero e proprio "tarlo" che a lungo andare ne ha minato la stabilità e che comporta costi altissimi. Si può stimare infatti in circa 100 milioni di m<sup>3</sup> il quantitativo di materiale sottratto dalla subsidenza in passato lungo tutto il litorale e in poco meno di 1 milione di m<sup>3</sup> la sottrazione annuale dell'ultimo periodo (2000-2005). Il costo del materiale da ripascimento che ogni anno occorrerebbe portare per compensare il quantitativo sottratto dagli abbassamenti del suolo è pertanto stimabile in circa 15 milioni di euro (Arpa, 2007). A questi costi vanno sommati quelli derivanti dalla necessità di rialzare decine di chilometri di argini, banchine e moli portuali e quelli per la protezione degli abitati sempre più esposti all'azione del mare

## **5.2\_CLIMA METEO-MARINO**

**KEY WORDS** (aspetti e caratteristiche del clima medio del mare e del vento, i principali agenti morfodinamici naturali che agiscono sul sistema spiaggia-duna)

---

Per riuscire ad analizzare la dinamica litoranea e, di conseguenza, le modificazioni occorse all'assetto morfologico del sistema spiaggia-duna sino ad oggi, è fondamentale avere un quadro sinottico di tutte le condizioni al contorno, sia alla scala del singolo apparato, che a scala regionale. L'analisi parte dalla determinazione del clima medio meteo-marino, e cioè delle caratteristiche fisiche a lungo termine, dei principali agenti morfodinamici che agiscono su di esso: il vento e il mare. L'analisi statistica sulla distribuzione delle frequenze e intensità del clima eolico è stata svolta sulla base delle registrazioni di velocità e direzione, effettuate in corrispondenza delle 3 stazioni fisse della rete regionale ARPA (ARPA SIMC - *Servizio Idro Meteo Clima*) distribuiti lungo la costa emiliano-romagnola (loc. Lido di Volano, loc. Marina di Ravenna e loc. Cesenatico, Figura 59).

Il clima medio marino sarà invece derivato attraverso l'analisi delle altezze d'onda significativa ( $H_s$ ) e delle direzioni del moto ondoso (compreso gli eventi estremi). Fino al 1983 i dati sull'altezza d'onda e sulla direzione del moto ondoso erano registrati manualmente sulla piattaforma AGIP PCB (Arpa SIMC, 2007); dopo il 1983, e fino al 1999, non esistono serie continue e affidabili per cui non è possibile ricavare alcuna considerazione.



Figura 59 – Localizzazione delle tre stazioni meteo (Lido di Volano, Marina di Ravenna e Cesenatico) della rete ARPA sul territorio costiero della regione Emilia-Romagna.

Tra il 1999 e il 2006 si è proceduto per trasposizione del moto a mezzo di modelli numerici, partendo dalle misurazioni registrate alle boe Ondametriche della Rete Nazionale (RON) di Ancona e Punta della Maestra, le uniche a riuscire ad assicurare un numero statisticamente rappresentativo di dati; pur con i dovuti limiti legati alla diversità dei fetch geografici da considerare, il clima medio che in tal modo si riesce a derivare, rappresenta oggi, l'unico dato a disposizione che possa essere ritenuto attendibile.

Successivamente, verranno presentate in una sezione a parte (Capitolo Trasporto eolico), anche le frequenze di velocità e direzione del vento relative a ciascun sistema spiaggia-duna considerato: attraverso la collaborazione con il servizio meteo della regione Emilia-Romagna (Arpa-SIM) è stato possibile applicare un modello numerico (CALMET, Scire *et alii*, 2000) in grado di derivare, sulla base di dati registrati alle 3 stazioni fisse sopra citate, il clima medio in corrispondenza delle singole dune (con buffer di 5km); tali valori, opportunamente elaborati e filtrati, hanno permesso il calcolo di un tasso di trasporto eolico potenziale per ogni apparato dunare esaminato.

## ***Il vento***

Per la corretta caratterizzazione del clima eolico del litorale in questione, sono stati presi in considerazione i dati registrati alle stazioni meteo di Lido di Volano (Fe) Marina di Ravenna (Ra) e Cesenatico (FC) per l'intervallo temporale, dal 2001 al 2005.



Le direzioni di provenienza di ciascun vento sono state divise in ottanti, in modo da riuscire a determinare sia le frequenze REGNANTI che quelle DOMINANTI, secondo le classi di intensità riconosciute nella scala di Beaufort. Sono state anche analizzate le distribuzioni dei venti divise per periodi stagionali, in modo da individuare i periodi dell'anno più favorevoli alla mobilitazione del sedimento, in particolare per quei venti provenienti dalle sole direzioni utili alla costruzione della duna. Data l'estensione, la diversa orientazione e morfologia della costa regionale, è facile aspettarsi in tal senso una notevole variabilità dei regimi derivati.

I dati a disposizione mostrano, per alcuni anni e per alcune stazioni, una certa disomogeneità nel formato, in particolare delle direzioni medie relative a ciascuna registrazione; come si vedrà in seguito questo aspetto va tenuto seriamente in conto poichè condiziona la distribuzione delle direttrici di provenienza, le quali finendo per coincidere tra loro, quando si sommano i contributi, si rischia non fornire un quadro non sufficientemente dettagliato delle reali frequenze regnanti e dominanti.

#### ***a. MACROAREA 1 (foce Po di Goro - Vene e Ancone di Bellocchio)***

Per tale Macroarea si sono considerati i dati relativi alla stazione meteo di Lido di Volano. Essa è installata nell'ambito di una rete locale nel comune di Codigoro (Fe), di coordinate Long. 12°25 e Lat. 44°81, a 3 m di quota s.l.m., e acquisisce dati anemometrici di direzione e velocità del vento mediando le registrazioni effettuate nell'arco di un'ora (misurazioni comprese tra il 1996 e il 2006).

Di seguito verranno analizzati separatamente le distribuzioni dei dati di velocità e direzione per le registrazioni effettuate tra il 1996 e il 2005. I dati relativi alle registrazioni effettuate tra il 2001 e il 2005 sono costituiti da 22.658 misurazioni, comprese tra il 24 Luglio 2001 e il 4 Giugno 2005. L'analisi statistica (Figura 60) indica una velocità media di 2,31 m/s (dev.Std 1,691), con venti che tendono a distribuirsi entro tre domini principali, corrispondono ai quadranti di Grecale (venti di Bora), Maestrale, e Scirocco. La suddivisione in ottanti permette un'ulteriore classificazione degli eventi entro intervalli ampi 45°, in cui però le direzioni principali rappresentano le bisettrici degli intervalli (Figura 60): in tal modo i venti risultano distribuiti da una parte tra gli ottanti II, III, IV e V (22,5°-202,5°) e dall'altra tra gli ottanti VII e VIII (247,5°-337,5°).

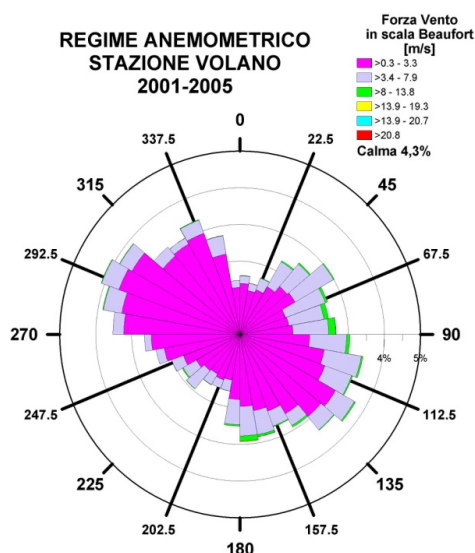


Figura 60 – Frequenze percentuali per tutte le direzioni relative alle registrazioni relative al periodo 2001-2005, delle diverse classi di intensità classificate secondo la scala di Beaufort; a parte sono anche evidenziate le percentuali assolute delle calme ( $v < 0,3 \text{ m/s}$ ).

Le velocità sono prevalentemente comprese tra 0,3 e 3,3 m/s (76,2%) seguiti da venti la cui velocità è compresa tra 3,4 e 7,9 m/s (18,8%) e da appena l'1,2% di eventi più intensi (velocità superiori agli 8 m/s). La percentuale di calma è pari appena al 4,3%. Da notare come proprio le frequenze di tali intensità tendano a distribuirsi lungo le direzioni tipiche dei settori di grecale, di levante e di scirocco; sono queste infatti le maggiori direttrici lungo le quali si muovono venti potenzialmente più “costruttivi” per le dune che si sviluppano lungo i 130km di litorale Emiliano-Romagnolo, ciò in relazione sia alla generale orientazione a grande scala dei vari settori, sia alla piccola scala dei singoli apparati dunari.

Non è stata evidenziata nel grafico né la linea di riva né la direzione prevalente di sviluppo dei singoli sottosistemi SPIAGGIA-DUNA: la scelta è legata all'estrema variabilità con la quale essi si distribuiscono sui tratti di paraggo considerati all'interno dell'area di influenza per le registrazioni di questa stazione (variabili tra i 3°N delle spiagge di Volano e i 93°N dello scanno di Goro).

### **PRIMAVERA-ESTATE**

Se si analizza la distribuzione delle velocità relativa alla sola stagione Primavera (21 Marzo - 20 Giugno, Figura 61a) si noterà che i venti tendono a provenire prevalentemente dai quadranti sud orientali (Scirocco) per tutte le classi di velocità



comprese tra 0,3 m/s (toni del rosa) e 19,3 m/s (toni del giallo), questi ultimi, in particolare nettamente localizzati lungo la direttrice NS.

La velocità media, calcolata su un set filtrato di 5397 dati è di 2,47 m/s (dev.Std 1,703) con il 73% relativo all'intervallo 0,3-3,3 m/s, il 21,4% corrispondente all'intervallo 3,4-7,9 m/s e il restante 1,1% che si riferisce alla frequenza di venti la cui velocità supera gli 8 m/s. Durante il periodo estivo i venti tendono ad avere una distribuzione molto simile a quella del periodo primaverile, con fenomeni prevalenti che provengono dai quadranti sud-orientali (Scirocco, Figura 61b). Nonostante questa netta predominanza, è possibile distinguere anche una piccola percentuale di venti che provengono chiaramente dai settori di Maestrale (NW - 11,5%) e da settori di Grecale (Bora, NE - 9,6%). La velocità media è di 2 m/s (dev.Std 1,320).

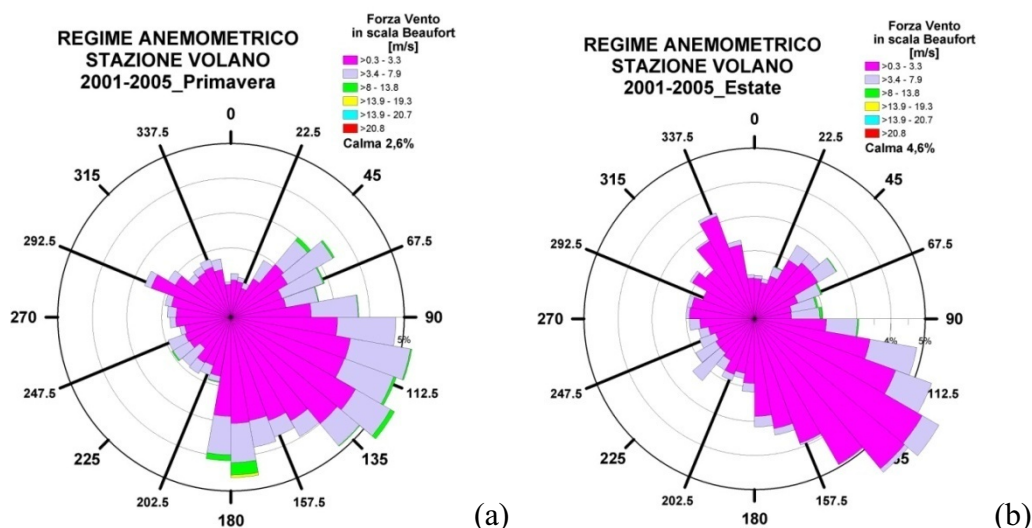


Figura 61 – Frequenze percentuali per tutte le direzioni relative alle registrazioni relative al periodo 2001-2005, relativamente alla stagione primaverile (a) ed estiva (b), delle diverse classi di intensità, classificate secondo la scala di Beaufort; a parte sono anche evidenziate le percentuali assolute delle calme ( $v < 0,3 \text{ m/s}$ ).

## AUTUNNO - INVERNO

In Autunno le frequenze maggiori sono sempre relative agli intervalli di velocità comprese tra 0,3 e 3,3 m/s (78%), ma come si vede in Figura 62a, è interessante notare come ci sia una chiara distribuzione degli eventi relativamente più intensi (velocità comprese tra 8 e 13,8 m/s) nei quadranti di NE (Bora), E (Levante) e SE (Scirocco).

Questi, limitati solo al 1,5% del totale, rappresentano gli eventi più importanti perché quelli potenzialmente più in grado di mobilitare la sabbia verso la duna. La velocità media è di 2,19 m/s (dev.Std 1,762). In Inverno la distribuzione delle frequenze resta sostanzialmente quella dell'autunno (Figura 62b), con la differenza che aumenta la percentuale dei venti che hanno mostrato velocità maggiori (1,9 %), com'era tra l'altro anche lecito aspettarsi dal periodo preso in considerazione.

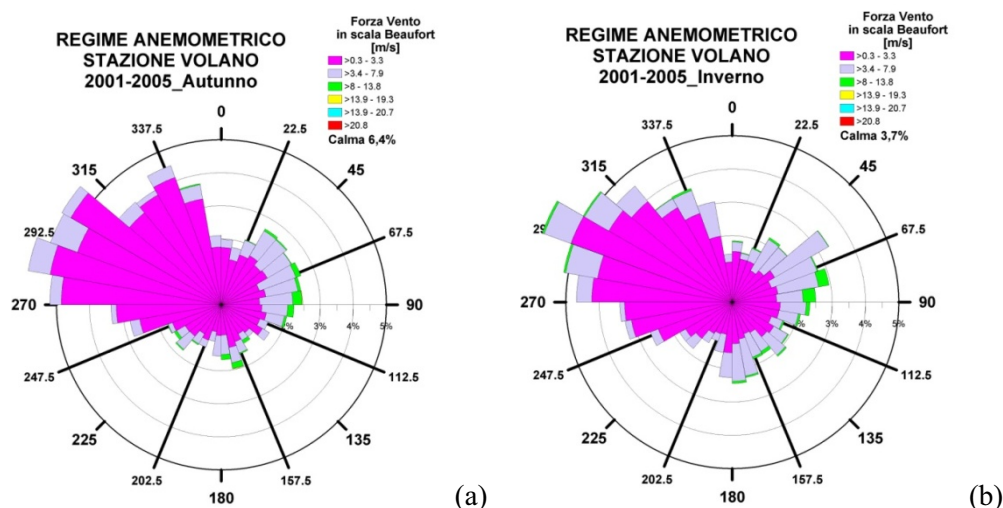


Figura 62 – Frequenze percentuali per tutte le direzioni relative alle registrazioni relative al periodo 2001-2005, per la stagione autunnale (a) e invernale (b), delle diverse classi di intensità classificate secondo la scala di Beaufort; a parte sono anche evidenziate le percentuali assolute delle calme ( $v < 0,3 \text{ m/s}$ ).

### **b. MACROAREA 2 (dalla foce Fiume Reno – a Lido di Classe)**

La stazione meteo di Marina di Ravenna è installata nell'ambito di una rete urbana, nel comune di Ravenna (Ra), di coordinate Long.  $12^{\circ}3$  e Lat.  $44^{\circ}45$ , a 2 m di quota s.l.m., e acquisisce dati anemometrici di direzione e velocità del vento mediando le registrazioni effettuate nell'arco di tre ore (misurazioni comprese tra il 1996 e il 2006). Di seguito verranno analizzati le distribuzioni dei dati di velocità e direzione registrati tra il 2001 e il 2005, con lo scopo di caratterizzare il clima anemologico della Macroarea 2, e cioè il settore di costa che si estende indicativamente dalla foce del Fiume Reno al paraggio immediatamente a sud rispetto alla foce del torrente Bevano.

Tra il 2001 e il 2005 sono state registrate 9.632 misurazioni, comprese tra il 1 Gennaio 2001 e il 30 Novembre 2005. L'analisi statistica dei dati (Figura 63) indica una velocità media di 3,88 m/s (dev.Std 2,460), con venti che tendono a distribuirsi chiaramente entro due intervalli angolari principali, corrispondenti alle direzioni di Levante (III Ottante) e Ponente (IV Ottante).

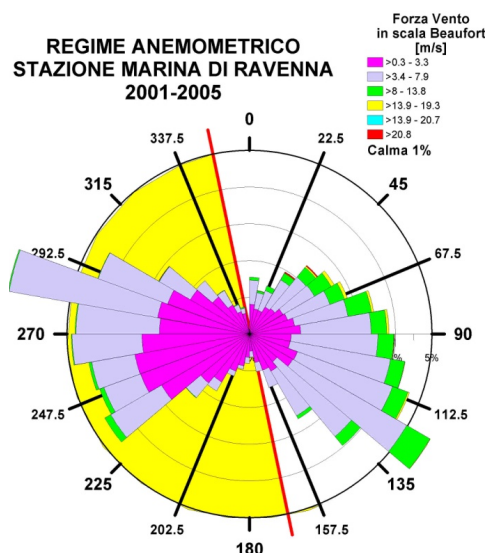


Figura 63 – Frequenze percentuali per tutte le direzioni relative alle registrazioni relative al periodo 2001-2005, delle diverse classi di intensità classificate secondo la scala di Beaufort; a parte sono anche evidenziate le percentuali assolute delle calme ( $v < 0,3 \text{ m/s}$ ).

Le velocità si distribuiscono con una frequenza variabile entro gli intervalli di classificazione della scala di Beaufort: tra 0,3 e 3,3 m/s ricade il 49,5% degli eventi, mentre le velocità comprese tra 3,4 e 7,9 m/s rappresentano circa un altro 44%.

Il restante 6% è invece rappresentativo di venti con velocità superiori a 8m/s. Come si può facilmente intuire dalla diagramma rappresentato in figura, questi provengono per lo più dai settori di Levante, con gli eventi più intensi che hanno direttrici da NE (Bora). Gli eventi di calma nell'arco del quinquennio in esame è molto basso (circa l'1%), a testimonianza di una costante attività eolica in questo settore. A differenza dei dati analizzati per la Stazione di Volano, nel diagramma di Figura 63 è stata evidenziata anche la direzione prevalente della linea di riva di questo settore, che si aggira attorno ai  $350^\circ \text{N} \pm 10^\circ$ , ad indicare la sostanziale omogeneità con cui si può ritenere i venti agiscano su questi territori.

## PRIMAVERA-ESTATE

Nella stagione Primavera (Figura 64a) la distribuzione delle velocità rispecchia per gran parte quella generale, con le velocità maggiori (oltre gli 8 m/s, per un totale di 6,6%) che si raggruppano entro il quadrante di Scirocco (SE). Un'altra importante rappresentanza di venti caratterizzati dalla stessa intensità si raggruppa lungo la direttrice di Libeccio (SW), che per l'orientazione di questi tratti di costa certamente non rappresenta contributi potenzialmente positivi per l'accrescimento della duna. La classe di eventi con velocità comprese tra 0,3 e 3,3 m/s (brezze) raggiunge una percentuale complessiva del 45%, dividendosi anch'essa tra direzioni di SE e di SW. Il restante 48% è costituito da venti la cui intensità è compresa tra 3,4 e 7,9 m/s. La velocità media per questo intervallo temporale è di 4,05 m/s (dev.Std 2,268). Durante il periodo estivo sia le frequenze che le intensità dei venti tendono ad avere valori molto simili a quella del periodo primaverile, con fenomeni prevalenti che provengono dai quadranti sud-orientali (Scirocco, Figura 64b).

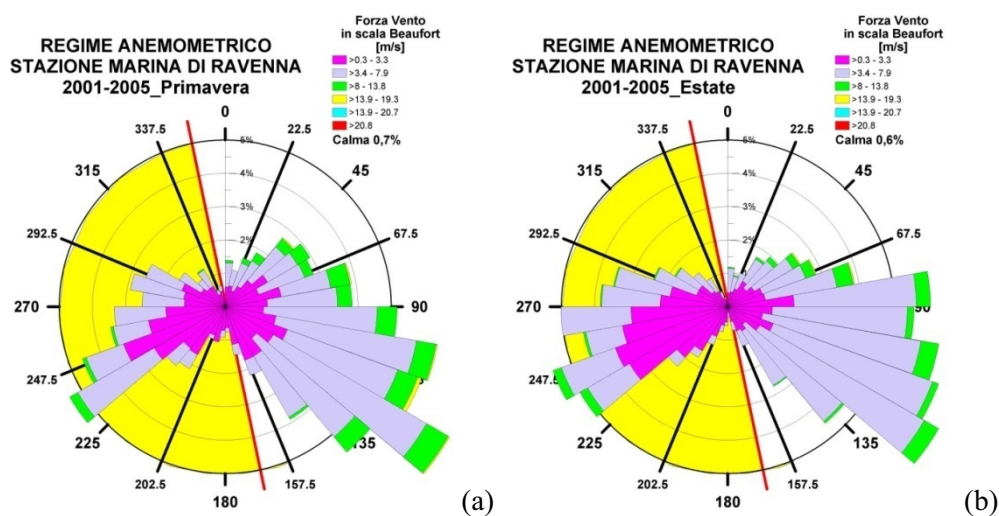


Figura 64 – Frequenze percentuali per tutte le direzioni relative alle registrazioni relative al periodo 2001-2005, relativamente alla stagione primaverile (a) ed estiva (b), delle diverse classi di intensità, classificate secondo la scala di Beaufort; a parte sono anche evidenziate le percentuali assolute delle calme ( $v < 0,3 \text{ m/s}$ ).

## AUTUNNO-INVERNO

In Autunno i venti tendono ad aumentare di frequenza lungo le direzioni di ponente (Figura 65a), anche se gli eventi più intensi (con velocità che in questo periodo

salgono anche oltre i 20 m/s) continuano a provenire dai settori di Levante (Bora e Levante s.s. su tutte). La percentuale dei venti potenzialmente utili alla mobilitazione della sabbia sale al 7,13% del totale, la maggior parte della quale si distribuisce proprio lungo le direttrici comprese tra 22,5° e 157,5°. La velocità media calcolata per questo periodo è di 3,75 m/s (dev.Std 2,828). Nella stagione invernale i venti tendono naturalmente ad aumentare di intensità e frequenza ancora lungo le direzioni di Ponente (Figura 65b). Gli eventi più intensi continuano a provenire dai settori di Levante (Bora su tutte). La percentuale di frequenza per eventi la cui intensità è compresa tra 0,3 e 3,3 m/s è di circa il 56%, quella corrispondente a venti con velocità compresa tra 3,4 e 7,9 è di 36,5%, mentre i contributi potenzialmente positivi arrivano dal 7,5 degli eventi (con velocità > 8 m/s).

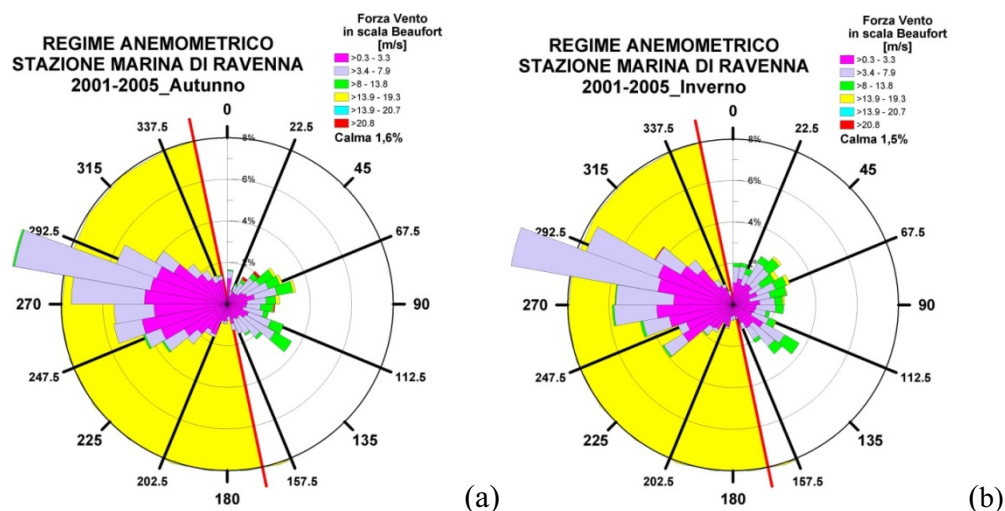


Figura 65 – Frequenze percentuali per tutte le direzioni relative alle registrazioni relative al periodo 2001-2005, per la stagione autunnale (a) e invernale (b), delle diverse classi di intensità classificate secondo la scala di Beaufort; a parte sono anche evidenziate le percentuali assolute delle calme ( $v < 0,3 \text{ m/s}$ ).

### c. MACROAREA 3 (Lido di Savio – Rimini)

La stazione meteo di Cesenatico è installata nel comune omonimo, ed è posizionata in un punto di coordinate Long. 12°40 e Lat. 44°20, a 1 m di quota s.l.m., e acquisisce dati anemometrici di direzione e velocità del vento mediando le registrazioni effettuate nell'arco di un'ora (misurazioni comprese tra il 1996 e il 2006). Delle tre, quella di

Cesenatico rappresenta la stazione localizzata più a sud, rappresentativa di un paraggio, al contrario delle altre, certamente condizionato in maniera più pesante dall'attività antropica, la quale ha quasi definitivamente cancellato ogni traccia di apparato dunare e quelli che ancora resistono, si trovano in uno stato di forte degrado. Di seguito verranno analizzate le distribuzioni dei dati di velocità e direzione per le registrazioni effettuate tra il 1996 e il 2005, per la Macroarea 3, equivalente al settore di costa che si estende indicativamente dal paraggio in corrispondenza di Lido di Savio, fino all'abitato di Rimini (RN). Tra il 2001 e il 2005 sono state archiviate 42356 misurazioni, comprese tra il 1 Gennaio 2001 e il 30 Novembre 2005. Se si osserva il diagramma riassuntivo per l'intero quinquennio delle distribuzioni delle velocità (Figura 66), si nota una chiara concentrazione della quasi totalità degli eventi entro due domini principali, il primo relativo ai settori di Levante (comprese tra le direzioni di Bora – NE e di Scirocco – SE) e il secondo corrispondente al settore di Ponente.

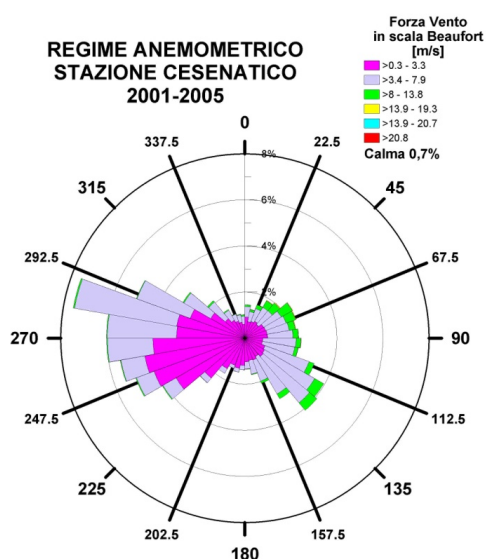


Figura 66 – Frequenze percentuali per tutte le direzioni relative alle registrazioni relative al periodo 2001-2005, stagione estiva, delle diverse classi di intensità classificate secondo la scala di Beaufort; a parte sono anche evidenziate le percentuali assolute delle calme ( $v < 0,3 \text{ m/s}$ ).

Gli angoli compresi tra i  $22,5^\circ \text{N}$  e i  $157,5^\circ \text{N}$  (II, III e IV ottante) raggruppano tutti gli eventi di maggiore intensità, con velocità che superano mediamente gli  $8 \text{ m/s}$  (4,5%), e che in diversi momenti hanno raggiunto anche i  $20 \text{ m/s}$  (come quando ad esempio il



24/09/04, tra le 16,00 e le 17,00 con velocità superiori ai 21 m/s). L'analisi statistica dei dati indica una velocità media di 3,88 m/s (dev.Std 2,146)

## **PRIMAVERA-ESTATE**

Le velocità rispecchiano per gran parte la distribuzione totale, con le intensità maggiori (oltre gli 8 m/s, corrispondente al 4% del totale) che si raggruppano chiaramente entro il settore di Scirocco (SE). I Venti di moderata intensità al contrario sembrano provenire prevalentemente dai settori di WSW, con una percentuale relativa totale tra le prime IV classi di suddivisione nella scala di Beaufort di circa il 33% (Figura 67a).

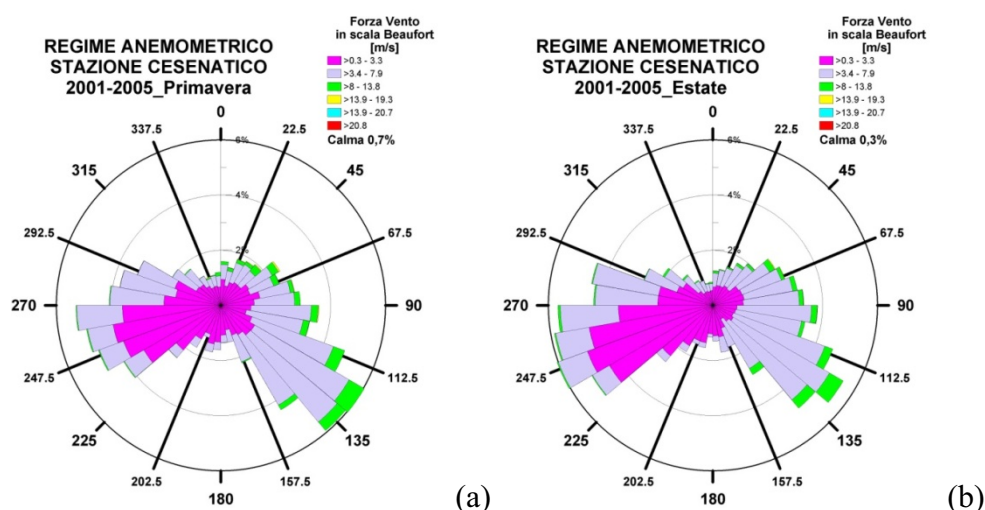


Figura 67 – Frequenze percentuali per tutte le direzioni relative alle registrazioni relative al periodo 2001-2005, relativamente alla stagione primaverile (a) ed estiva (b), delle diverse classi di intensità, classificate secondo la scala di Beaufort; a parte sono anche evidenziate le percentuali assolute delle calme ( $v < 0,3 \text{ m/s}$ ).

## **AUTUNNO-INVERNO**

In Autunno il trend evolve verso una distribuzione più sbilanciata verso le direzioni di Ponente (Figura 68a). Come si vede dalla figura le frequenze maggiori sono relative a venti la cui direzione ricade all'interno del VII ottante, con una frequenza di oltre il 40%, ma si tratta di velocità relativamente basse e non sufficienti alla movimentazione della sabbia. Anzi, tali direttrici rappresenterebbero proprio i contributi negativi alla



crescita dell'apparato. Le intensità maggiori restano dipendenti della frequenza con cui venti di Bora, Levante e Scirocco scaricano la loro forza durante il corso dell'anno: nel complesso si aggirano attorno al 96,5% della totalità. Nella stagione invernale si evidenzia una stessa distribuzione della stagione autunnale, e nel complesso, di tutti i dati relativi al quinquennio considerato (Figura 33b). In questo caso le direzioni preferenziali sono quelle di Scirocco e da Maestrale, divise abbastanza nettamente in questa occasione rispetto alle velocità che provengono dai settori di Bora.

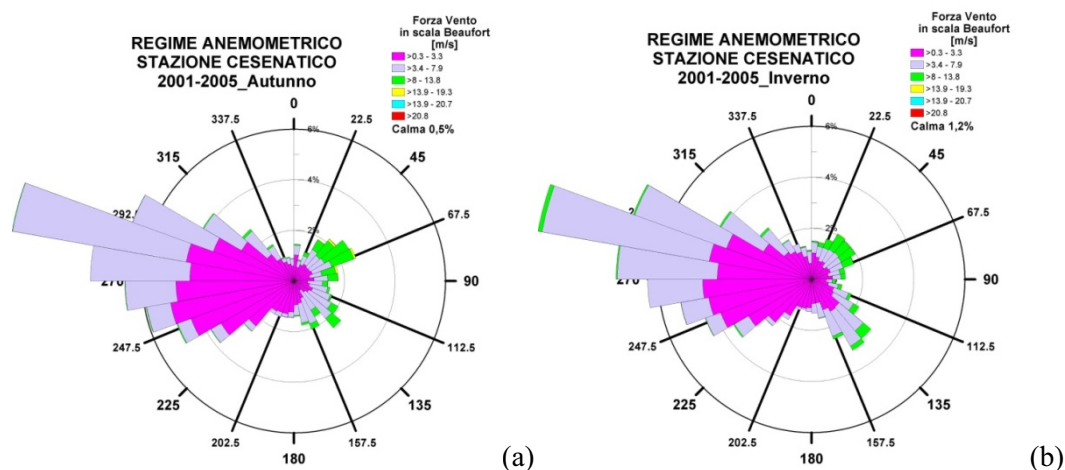


Figura 68 – Frequenze percentuali per tutte le direzioni relative alle registrazioni relative al periodo 2001-2005, per la stagione autunnale (a) e invernale (b), delle diverse classi di intensità classificate secondo la scala di Beaufort; a parte sono anche evidenziate le percentuali assolute delle calme ( $v < 0,3 \text{ m/s}$ ).

## ***Il moto ondoso***

Il clima medio del mare che investe la costa emiliano-romagnola, come anticipato in precedenza, è ricavato dall'applicazione di modelli matematici (COSMO17-LAMA, AdriaROMS e SWAN – Arpa SIMC, 2007), i quali combinando i dati registrati alle boe RON di Ancona e Punta della Maestra, trasferiscono poi il dato nei vari settori lungo il litorale regionale. Purtroppo tale soluzione sembra essere l'unica possibile visto che, dal 1983, non sono più disponibili le misure dirette che venivano effettuate giornalmente sulla piattaforma AGIP PBC.

### a. CLIMA ONDOSO ALLA BOA DI ANCONA

La boa di Ancona è entrata a far parte della RON nel Marzo del 1999; le coordinate geografiche dell'esatta posizione della boa sono Lat.43°41'5'' – Long.13°46'11'' (Figura 69a), in corrispondenza della quale è possibile ricavare un fetch geografico evidenziato in Figura 69b, nella quale si vede che le direzioni in cui sono maggiori le lunghezze del fetch sono quella da sud-est e quella da nord-est.

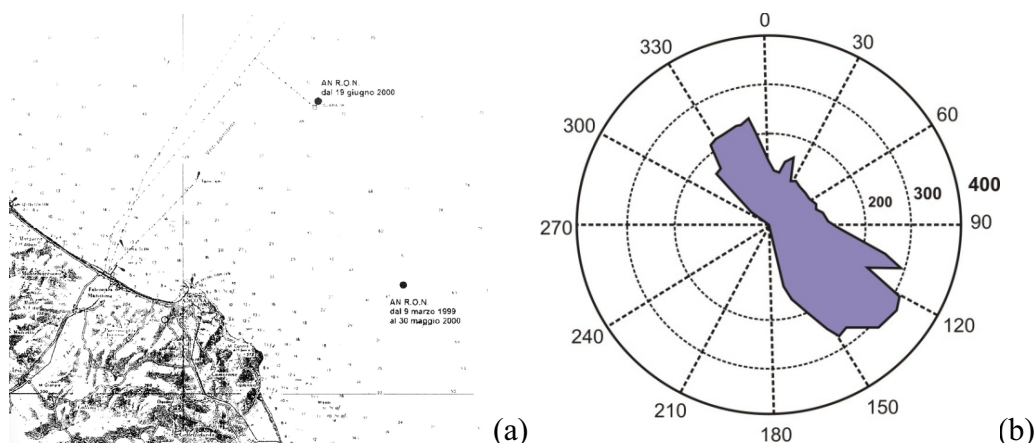


Figura 69 – (a) Posizione geografica della boa RON di Ancona; (b) Fetch geografico relativo alla boa RON di Ancona.

I dati messi a disposizione dal sito ufficiale della RON partono da Marzo 1999 ai primi mesi del 2006. Le elaborazioni per determinare le caratteristiche del clima medio annuo hanno preso come riferimento il periodo 2000-2005, durante il quale si è avuta una buona continuità temporale delle registrazioni (Tabella 2).

Dir (°)	Hs (m)	Hs (m)										Totale %				
		Hs < 0,25	0,25 ≤ Hs < 0,5	0,5 ≤ Hs < 1,0	1,0 ≤ Hs < 1,5	1,5 ≤ Hs < 2,0	2,0 ≤ Hs < 2,5	2,5 ≤ Hs < 3,0	3,0 ≤ Hs < 3,5	3,5 ≤ Hs < 4,0	4,0 ≤ Hs < 4,5		4,5 ≤ Hs < 5,0	Hs ≥ 5,0		
0° ≤ "N < 30		2,13	3,39	1,98	0,99	0,38	0,22	0,09	0,02	0,01						9,22
30° ≤ "N < 60		1,60	3,10	1,89	1,12	0,64	0,24	0,05	0,01	0,01						8,66
60° ≤ "N < 90		1,76	2,15	0,92	0,52	0,20	0,08	0,05	0,01							5,71
90° ≤ "N < 120		2,42	3,66	1,76	0,89	0,33	0,13	0,09	0,04							9,31
120° ≤ "N < 150		4,69	4,31	1,01	0,40	0,18	0,05	0,04	0,01							10,68
150° ≤ "N < 180		2,87	2,51	0,60	0,17	0,10	0,04	0,03	0,02							6,36
180° ≤ "N < 210		1,45	1,44	0,47	0,21	0,09	0,08	0,04	0,01	0,01						3,79
210° ≤ "N < 240		1,49	1,67	0,46	0,15	0,08	0,03	0,05		0,01						3,94
240° ≤ "N < 270		1,70	1,82	0,54	0,14	0,08	0,04	0,03								4,36
270° ≤ "N < 300		2,36	2,34	1,04	0,38	0,11	0,04	0,03	0,01							6,31
300° ≤ "N < 330		3,01	3,36	1,21	0,32	0,10	0,04	0,01								8,06
330° ≤ "N < 360		2,41	2,73	1,08	0,43	0,13	0,05	0,03	0,01							6,87
<b>Totale %</b>		<b>16,73</b>	<b>27,90</b>	<b>32,47</b>	<b>12,97</b>	<b>5,73</b>	<b>2,42</b>	<b>1,05</b>	<b>0,54</b>	<b>0,13</b>	<b>0,04</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>			

Tabella 2-3 Boa ondamentrica di Ancona - Frequenza (%) dell'altezza d'onda per direzione nel periodo 2000-2005

Tabella 2 – Boa ondamentrica di Ancona – Frequenza dell'altezza d'onda per direzione nel periodo 200-2005 (Arpa SIMC, 2007).

Come si vede dalla tabella le frequenze maggiori (circa l'11%) sono quelle provenienti dal I Quadrante, in particolare dall'intervallo angolare  $120^{\circ} \leq N \leq 150$ . Le ondate più intense ( $H_s \geq 3m$ ) invece provengono generalmente sia dal I che dal II Quadrante ( $30^{\circ} \leq N \leq 150$ ).

#### b. CLIMA ONDOSO ALLA BOA DI PUNTA DELLA MAESTRA

La boa di Ancona è collocata di fronte al delta del Po, a poco più di una ventina di chilometri dalla costa, in corrispondenza di un fondale di circa 30m; le coordinate geografiche dell'esatta posizione della boa sono Lat.  $44^{\circ}58'3''$  – Long.  $12^{\circ}50'0''$  (Figura 70a), in corrispondenza della quale è possibile ricavare un fetch geografico evidenziato in Figura 70b. Dall'immagine si vede che la direzione di sud-est è di gran lunga quella più grande. La boa è entrata a far parte della rete RON a partire dal 2002, ma sono a disposizione dati solo per il periodo compreso tra gennaio e novembre 2004 (Tabella 3). Come si vede dalla tabella anche questa volta le frequenze maggiori (circa l'22%) sono quelle provenienti dal I Quadrante, in particolare dall'intervallo angolare  $120^{\circ} \leq N \leq 150$ . Quasi la metà (0,23%) delle ondate più intense ( $H_s \geq 3m$ ) si concentrano lungo direzioni appartenenti al I Quadrante ( $60^{\circ} \leq N \leq 90$ ).

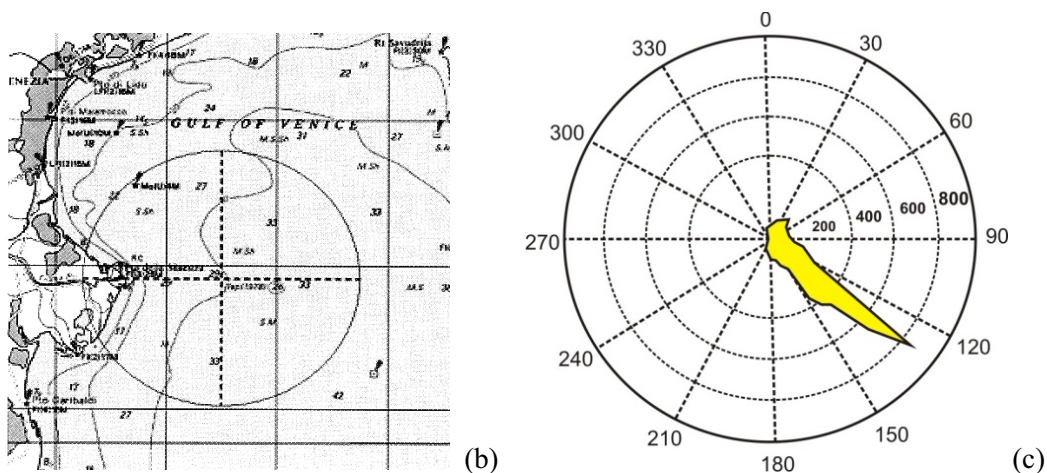


Figura 70 – (a) Localizzazione della Boa di Punta della Maestra (Arpa SIM – Prog. CADSES, InterregIIIB); (b) Fetch geografico corrispondente (Arpa SIMC, 2007).

Combinando i dati alle due boe RON appena descritte, ed estrapolando un clima medio per la costa regionale, è possibile fare le seguenti considerazioni sintetiche: il regime che ne deriva è caratterizzato, nel complesso, da una predominanza (oltre il 26%) delle onde misurate provenienti da ESE (II Quadrante, intervallo  $90^{\circ} \leq N \leq 180^{\circ}$ ) ed in minor misura (circa il 24%) da ENE (I QUADRANTE, intervallo  $0^{\circ} \leq N \leq 90^{\circ}$ ) (ARPA, 2007). Scendendo nel particolare

dei singoli settori di provenienza, quella di Scirocco (mediamente intorno ai 135°N) è la direzione che presenta le frequenze più alte (circa il 10% del totale) (Figure 71 a/b/c).

Dir (°)	Hs (m)											Totale %	
	Hs < 0,25	0,25 ≤ Hs < 0,5	0,5 ≤ Hs < 1,0	1,0 ≤ Hs < 1,5	1,5 ≤ Hs < 2,0	2,0 ≤ Hs < 2,5	2,5 ≤ Hs < 3,0	3,0 ≤ Hs < 3,5	3,5 ≤ Hs < 4,0	4,0 ≤ Hs < 4,5	4,5 ≤ Hs < 5,0		Hs ≥ 5,0
0° ≤ °N < 30		1,14	0,84	0,30	0,17	0,08							2,54
30° ≤ °N < 60		2,05	3,98	2,90	1,54	0,15	0,19	0,01		0,01	0,01	0,01	10,84
60° ≤ °N < 90		2,20	4,10	2,81	1,02	0,49	0,34	0,18	0,02	0,01	0,01	0,01	11,20
90° ≤ °N < 120		5,26	5,28	1,41	0,98	0,42	0,53	0,04	0,01	0,02	0,01		13,94
120° ≤ °N < 150		10,16	8,98	2,20	0,49	0,36	0,01	0,01	0,01				22,22
150° ≤ °N < 180		6,14	2,56	0,58	0,05			0,01		0,01			9,35
180° ≤ °N < 210		1,38	0,47	0,07			0,03						1,94
210° ≤ °N < 240		1,51	0,14		0,01			0,03					1,69
240° ≤ °N < 270		0,73	0,08					0,01					0,82
270° ≤ °N < 300		0,29	0,06	0,02		0,01		0,01			0,01	0,01	0,42
300° ≤ °N < 330		0,21	0,11	0,10	0,03	0,01		0,01	0,01	0,01	0,01		0,51
330° ≤ °N < 360		0,45	0,71	0,29	0,07	0,02	0,01	0,01					1,56
<b>Totale %</b>	<b>22,97</b>	<b>31,50</b>	<b>27,31</b>	<b>10,68</b>	<b>4,36</b>	<b>1,54</b>	<b>1,11</b>	<b>0,32</b>	<b>0,05</b>	<b>0,06</b>	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>	

Tabella 3 – Boa ondometrica di Punta della Maestra: Frequenza dell'altezza d'onda per direzione nel periodo gennaio-novembre 2004 (Arpa SIMC, 2007).

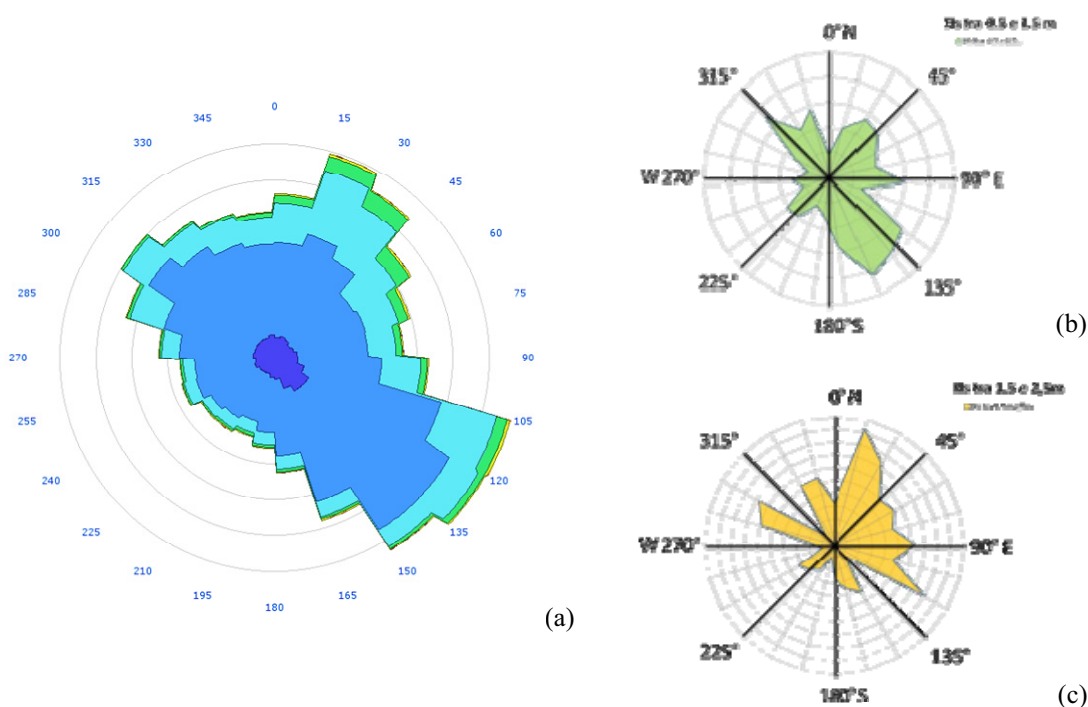


Figura 71 – (a) Esempio di diagramma di distribuzione delle frequenze delle ondazioni ricavate alla boa RON di Ancona per il periodo compreso tra il 2000 e il 2005 (ISPRA, [www.idromare.it](http://www.idromare.it)); (b) Diagramma per le ondazioni comprese tra 0,5 e 1,5m; (c) diagramma per le ondazioni comprese tra 1,5m e 2,5m.

Il resto dei dati (pari circa al 21%) descrive una direzione prevalente di provenienza delle onde dal IV Quadrante, ma nella determinazione del regime complessivo in realtà questa parte del dataset non è stata presa in considerazione, visto che per la configurazione fisiografica del

territorio costiero regionale, ondate di questo tipo non possono influenzare la dinamica del litorale. Per quanto riguarda le mareggiate la metodologia è la stessa, con le boe RON che hanno fatto da unico punto di riferimento per la derivazione anche delle altezze d'onda massima ( $H_s$  max). Partendo dai dati registrati alla boa di Ancona, tra Gennaio 2000 e Marzo 2006, sono stati classificati tutti gli eventi che possono essere classificati come mareggiate secondo la definizione riportata nell'Atlante delle onde (APAT, 2004): successione di stati ondosi in cui l'altezza d'onda è stata maggiore a 1m per almeno 12 ore, eventuali periodi di attenuazione dell'onda sotto questa soglia lunghi non più di 6 ore, direzione di provenienza dei vari stadi ondosi ricompresi all'interno di un range di più o meno  $30^\circ$  rispetto alla direzione d'origine. Dall'analisi delle registrazioni emerge che nel periodo considerato (2000-2006), in tutto si sono verificati 218 eventi classificabili come mareggiate, per un periodo complessivo di circa 340 giorni di mare mosso. In particolare su un totale di 160 mareggiate proveniente dal I e dal II Quadrante (Figure 72 a/b), nel I Q., gli eventi sono stati 117, mentre nel II Q. sono ricaduti circa 43 burrasche. I due quadranti sono stati interessati da quasi 280 giorni con condizioni di mareggiata, che, per circa il 77% dei casi (213 giorni) sono stati di pertinenza del I Quadrante (ARPA, 2007).

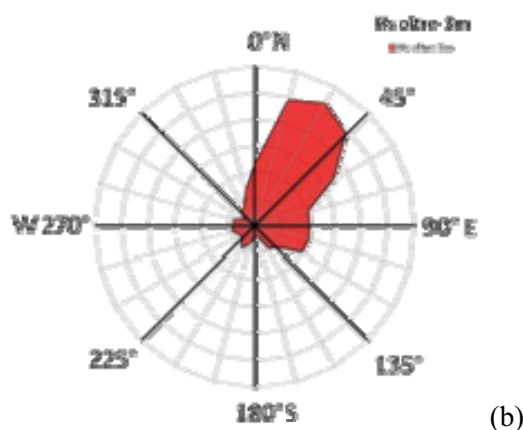


Figura 72 – Esempio di registrazione degli eventi di mareggiate ( $H_s > 3m$ ) registrate alla boa di Ancona nell'anno 2005 (Arpa SIMC, 2007).

## 5.3\_EVOLUZIONE REGIONALE DEGLI APPARATI DUNARI

**KEY WORDS** (Excursus sullo stato delle dune regionali storico e recente)

---

Durante il XIX secolo 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, raggiungendo localmente altezze che mediamente si aggiravano tra i 3 e i 5 m (Borghi, 1938; Cencini, 1980). Tale importante sviluppo degli apparati dunari è ben documentato dalle carte storiche del XIX secolo (Figura 73). Come si vede dalle immagini, pur rappresentando dei semplici stralci, mostrano come i cordoni dunari che bordavano la foce fluviale del Po di Primaro, a quei tempi ancora ben pronunciata, erano ben sviluppati, estesi ed allineati lungo estese fasce sub parallele.



*Figura 73 - Stralci della carta napoleonica del 1814 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 come, ad esempio, quella del Borghi (1938) che riporta 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 regionale 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 '50, determinò la scomparsa delle sporadiche dune costiere rimaste tra Cattolica e Cesenatico (Figura 74).

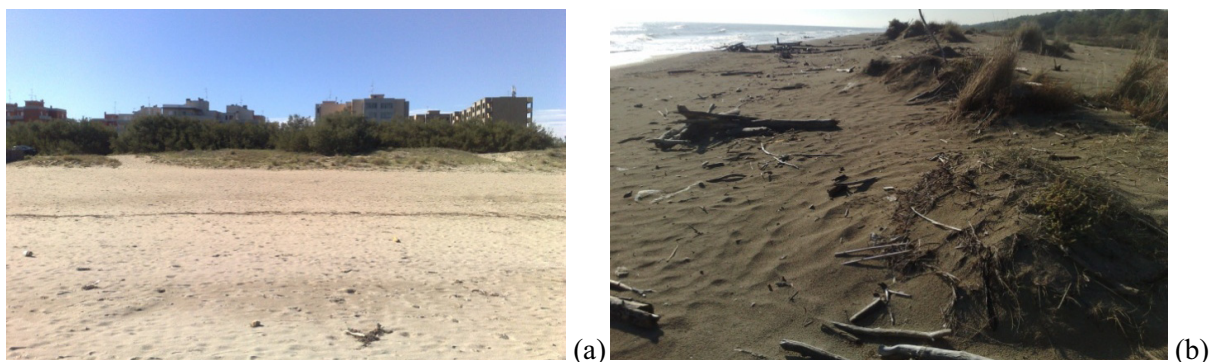


*Figura 74 - Scorcio dell'attuale sviluppo urbano del litorale di Cesenatico*

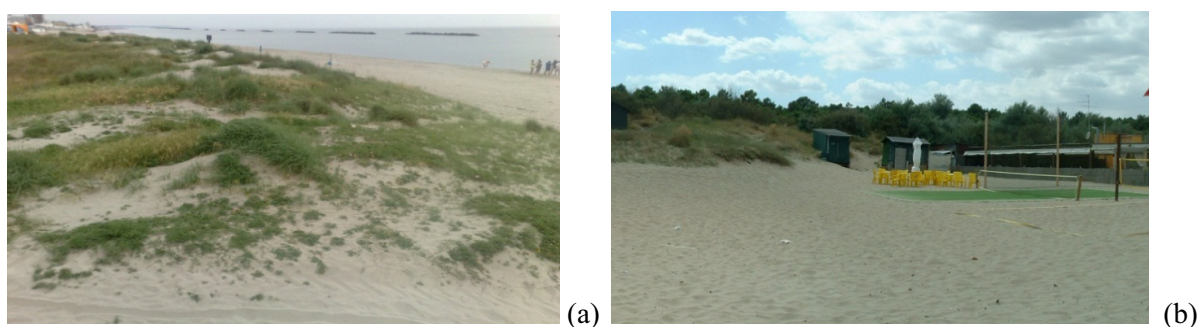
Nei litorali delle Province di Ravenna (Figure 75 a/b) e Ferrara (Figure 76 a/b), invece, lo sviluppo più discontinuo di nuovi lidi e marine, iniziato negli anni '50, consentì una maggiore conservazione di questi depositi eolici. Ciò pone in evidenza come l'uso intensivo degli arenili a scopo turistico-balneare sia stato la causa principale della scomparsa di queste morfologie, 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 le aree dunari furono quasi completamente distrutte, mentre nel ravennate si ridussero a 260 ha ed nel ferrarese a 160 ha.



*Figura 75 - (a) Dune di Lido Adriano ancora ben conservate; (b) Dune di Lido di Dante incise dall'erosione marina*



*Figura 76 - Dune di Lido degli Scacchi, in uno stato di modesta conservazione naturale (a) e di notevole urbanizzazione (b)*

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.

Nel 2000, un Progetto di Ricerca d'Interesse Nazionale (PRIN, 2000) lancia un campanello d'allarme sullo stato morfoevolutivo delle dune regionali: lo studio mise in risalto che

l'assetto morfoevolutivo regionale rifletteva a pieno la tendenza generale di tutto il Paese, mostrando debolezze e fragilità importanti: gran parte della costa dell'Emilia-Romagna risultava bordata da cordoni dunari mal conservati e fortemente frammentati da edifici e strutture turistico-balneari. Assai esemplificativa, già allora, era lo stato di salute delle dune litorali del Comune di Ravenna (Fabbri, 2001), le quali nel 1982 si estendevano per circa 38,2 km, mentre nel 2001, si erano ridotte a soli 11,2 km, di cui 9,2 km in buono stato di conservazione e 2 km in situazione precaria. Dallo studio emerse anche 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 furono fittamente intaccati e frammentati dallo sviluppo degli stabilimenti balneari.

Complessivamente le aree dunari si estendevano su una superficie complessiva di 19 km<sup>2</sup>, con solo il 3% occupata da dune attive, quelle cioè più prossime a riva ed alimentate dai sedimenti di spiaggia antistante; sul rimanente territorio si sviluppavano dune ubicate in posizioni retrostanti rispetto alle precedenti, spesso piantumate o fissate dalla vegetazione spontanea, e per questo più stabili e conservate. Diversi, tra gli apparati riconosciuti come "attivi", presentavano settori in disequilibrio con la spiaggia antistante, per cui in vari tratti della costa, era possibile trovare scarpate di erosione che si estendessero in lunghezza e presenza ben oltre le tipiche forme erosive che la morfodinamica stagionale (inverno) può produrre su di esse (circa il 35% dell'estensione lineare totale delle dune della Provincia di Ferrara, per esempio, mostrava una pendenza compresa tra il 45° e 60°, il 12%, oltre i 60°).

I risultati dei reiterati attacchi portati dall'uomo all'integrità dell'apparato dunare nell'ultimo decennio, continuarono negli anni a seguire: un progetto su scala europea che vede la partecipazione di enti e centri di ricerca nazionali (Beachmed-e, 2005) pone in evidenza che, nel 2005, i km di costa che risultavano bordati da rilievi dunari scesero a 37 km. Di questi, circa 12 km si sviluppavano all'interno della provincia di Ferrara, 23 km in quella di Ravenna ed i rimanenti 2 km erano distribuiti nel tratto costiero più meridionale. Lido degli Scacchi, tra Marina di Ravenna e Punta Marina, tra i lidi di Dante e di Classe (Figura 77), e a nord della foce del Reno, rappresentano le località dove più evidenti si presentavano i risultati di tale frammentazione. Dune isolate, ma con ancora una certa continuità laterale erano invece presenti al Lido di Volano, a sud del Lido di Spina, e tra Lido Adriano e la foce di Fiumi Uniti.



*Figura 77 – Frammentazione e smantellamento dei cordoni dunari operati per l’inserimento di strutture turistico-balneari lungo la spiaggia del Lido di Classe.*

Come si vedrà nella sezione dedicata all’analisi dello stato attuale (Capitolo XX) oggi le dune rimaste sono ben poca cosa rispetto a quelle presenti del secolo scorso: la situazione è seriamente preoccupante soprattutto perché c’è la consapevolezza che gran parte degli apparati sono stati distrutti da attacchi, che con tempi ed intensità differenti, non sono giunti solo da mare (erosione della costa), o da terra (estensione delle aree agricole, spianamento delle dune); l’uomo, attraverso lo sviluppo urbanistico, l’uso della spiaggia a scopo balneare e gli interventi di difesa ha modificato drasticamente le dinamiche naturali, instaurando processi la cui variabilità in termini di velocità e intensità, rappresentano uno dei maggiori pericoli per la sopravvivenza degli apparati dunari.

## **5.4\_AREE DI STUDIO**

**WORD KEY.** (Apparati dunari presi in considerazione, divisi per codici ID)

---

Come accennato nella prima parte del capitolo, il numero complessivo degli apparati dunari è 40. Visto il numero elevato di dati che si sarebbe dovuto gestire, durante tutte le fasi di lavoro si è reso necessario attribuire un “ID” (Codice Identificativo) ad ogni apparato.

Per semplicità di lavoro e di archiviazione delle varie informazioni, si è deciso inoltre di gestire il codice alfanumerico in questo modo: esso risulta costituito da una lettera e da un numero, la prima si è scelta in modo che fosse di facile intuizione, che identificasse immediatamente la località geografica nella quale l’apparato si trova, mentre il numero è solo un progressivo che indica come ordine semplicemente la direzione da nord verso sud. Alcune località, pur essendo sullo stesso piano di altre (per denominazione toponomastica) sono state accorpate in gruppi, in quanto il paraggio in esame, osservato alla scala dell’apparato dunare,

dal punto di vista fisiografico non mostrava elementi chiari di separazione (Es. moli portuali, strutture di difesa, foci fluviali..). Secondo questo schema di partenza è possibile identificare n.6 apparati dunari lungo lo “Scanno di Goro” (Prefisso “G”), n.3 presso Lido di Volano (Prefisso “V”), n.6 lungo il paraggio antistante i lidi di Nazioni, di Pomposa, e di Scacchi (Prefisso “NPS”). Sia a Lido degli Estensi che a Lido di Spina sono presenti rispettivamente n.2 e n.6 apparati per località (Prefisso “E” per la prima ed “S” per la seconda), fino alla foce del Reno. Anche presso Casal Borsetti (Prefisso “Cb”) sono n.5 le dune ancora in piedi, mentre nel Ravennate (Prefisso “R”) è possibile ritrovare ben n.10 sistemi dunari. Oltre Ravenna, gli unici n.2 apparati rimasti si trovano in prossimità di Cesenatico (Prefisso “Fc”). Una localizzazione globale degli apparati lungo la costa è rappresentata in Figura 78.

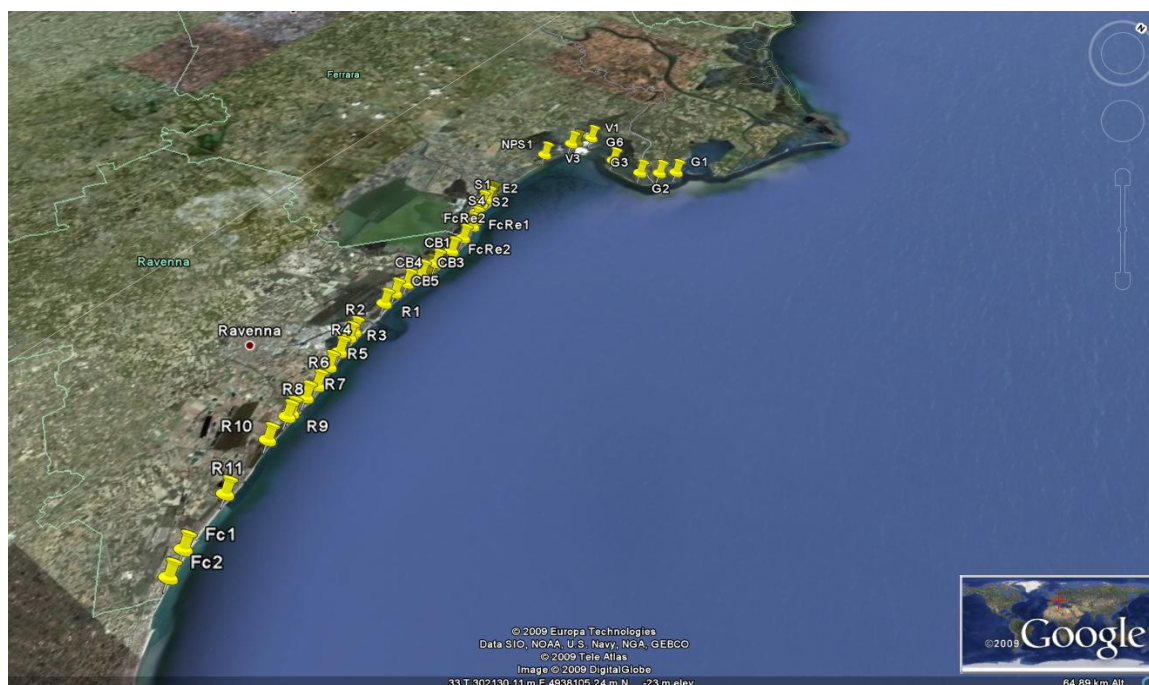


Figura 78 – Distribuzione lungo il territorio regionale dei 40 siti dunari analizzati in questo lavoro.

Va ribadito che, come si è detto più volte fin’ora, per lo stato in cui oggi si trova la maggior parte delle dune costiere regionali, anche se sono stati individuati 40 apparati, in realtà ben pochi di questi hanno un’estensione e una consistenza morfologica tale da poter essere considerati ancora un sistema dunare. Durante la fase di analisi geomorfologica si è andati alla ricerca di quei fattori (descritti nella sezione di classificazione) che caratterizzano una duna, ma, come si vedrà meglio nella sezione successiva, il rimaneggiamento o l’antropizzazione si sono spinte spesso a tal punto da dover andare oltre il dato misurato e avvalersi della propria personale esperienza di campo per ricavare direzioni di sviluppo o limiti morfologici.



## ***SCANNO DI GORO*** ***(Cod. "G")***

Lungo lo Scanno di Goro è possibile individuare n.6 apparati dunari (Figura 79). L'evoluzione fisiografica e geomorfologica dello Scanno è strettamente connessa ai rifornimenti sedimentari da parte dei rami più meridionali del Po: il processo è ad intermittenza, diversi settori di paraggio dello spit si sono trovati nel tempo a subire cicli di erosione e sedimentazione (teoria delle geminazioni, Simeoni, 2006; 2007), per cui diversi tratti di duna (soprattutto gli apparati più ad est) sono stati smantellati e si trovano oggi in condizioni di rimaneggiamento.



*Figura 79 – Distribuzione lungo lo Scanno di Goro dei 6 apparati dunari analizzati in questo lavoro.*

Più ad ovest la crescita dello scanno ha progressivamente messo a disposizione diverse porzioni di spiaggia, anche se limitate in estensione longitudinale; nel tempo, vista l'elevata naturalità che caratterizza questa parte di territorio regionale (Parco del Delta del Po), si sono costituite forme dunari embrionali, le quali, nonostante siano facilmente vulnerabili, è possibile riconoscere ancora oggi (Figura 80).

Spostandosi da E verso W, il primo apparato che è possibile individuare e cartografare è la duna antropica al Faro di Gorino, in corrispondenza della foce del po di Goro (Figura 81 a/b). La sua storia evolutiva è lunga e complessa: senza entrare nel dettaglio, per cui si rimanda alla parte di analisi geomorfologica, è stata costruita nel 2001 con una tecnica, innovativa a quei

tempi, che le permetteva di riuscire a proteggere il faro retrostante in maniera più efficace, essendo in grado di adattarsi progressivamente al profilo morfologico imposto dal moto ondoso. Ciò nonostante, pur resistendo, ha subito nel tempo un processo di smantellamento continuo, che l'ha portata oggi, a non esistere praticamente più, in quanto dopo una forte mareggiata avvenuta nei primi mesi del 2009 gran parte della struttura è stata completamente divelta dal terreno.



*Figura 80 – Forme embrionali nella porzione più ad ovest dello Scanno di Goro (Fe).*



(a)



(b)

*Figura 81 –Duna ricostruita al faro di Gorino (Fe); come appariva l'area e la duna al momento della sua realizzazione (2001) (a) e al momento dello smantellamento finale – Gennaio 2009 (b).*

## **LIDO DI VOLANO (COD. "V")**

In corrispondenza della parte terminale dello spit di Volano (Fe) esistono ancora apparati dunari ben consolidati (n.3), gran parte dei quali però non è attuale (si tratta di paleodune ricoperte da vegetazione arbustiva, Figura 82), per cui la parte realmente attiva (quella cioè che scambia sedimento con la spiaggia antistante), è limitata (Figura 6). Anche questo settore

di paraggo riesce a mantenere un certo grado di naturalità, nonostante la presenza antropica, con le attività turistico-balneari, durante il periodo estivo.

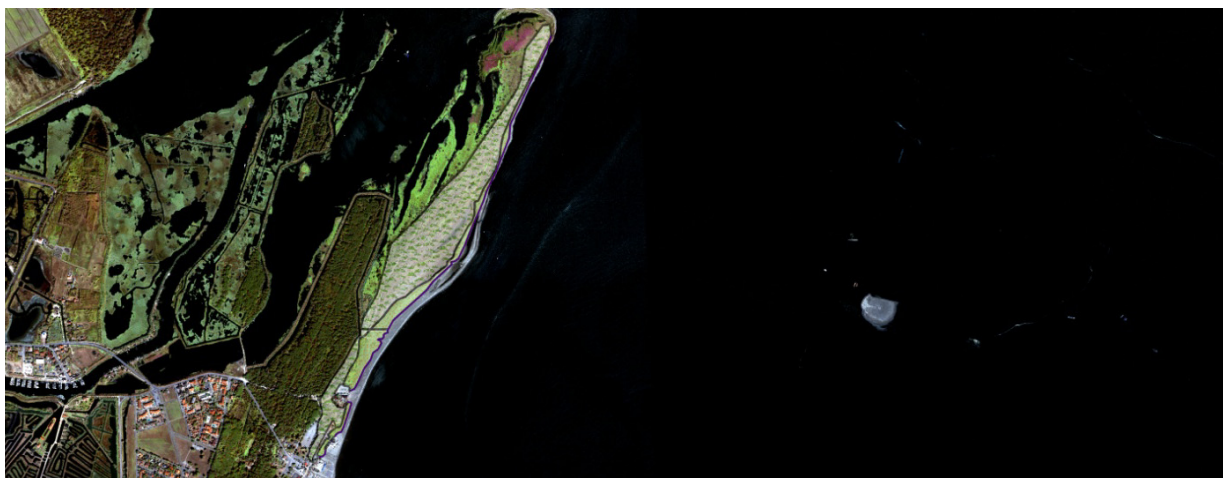


Figura 82 – Esempio di Apparati dunari in corrispondenza dello spit di Volano (Fe).

### ***LIDO DELLE NAZIONI-POMPOSA-SCACCHI (COD. “NPS”)***

Tutte le dune (n.3) che si sviluppano lungo il tratto compreso tra Lido delle Nazioni e Lido degli Scacchi (Fe) sono state accorpate in un unico codice identificativo (NPS) in quanto, a parte l'estensione limitata di gran parte di esse, questo tratto di paraggo può essere considerato unico, per la geometria della linea di costa (orientazione °N) e la morfodinamica che lo caratterizza (Figura 83).

Sebbene la presenza, lungo l'intero settore, di circa 40 opere di difesa longitudinale (scogliere), frammenti la circolazione idrodinamica sottocosta producendo effetti locali fortemente discordanti anche per tratti contigui (Simeoni, 2005), non è l'energia connessa al moto ondoso a rappresentare il maggiore pericolo per le dune ancora esistenti. La forte urbanizzazione che caratterizza questo tratto di costa regionale, ha frammentato i pochi apparati ancora esistenti, tant'è che per ciascuno di essi, dopo un attenta analisi di campo e di tipo fotointerpretativa, si è deciso di accorpate più affioramenti in un unico codice (Figura 84), poiché evidenze morfologiche e antropiche (Es. la presenza di bagni tra di essi) facevano intuire la connessione tra di essi.





Figura 83 – Ubicazione degli apparati dunari lungo il tratto Lido delle Nazioni – Lido degli Scacchi.



Figura 84 – Esempio di come, a causa delle forte antropizzazione, alcune dune possano apparire come due apparati diversi, pur non essendolo in realtà – NPS2 e NPS2a – Lido degli Scacchi (Ferrara).

## **LIDO DEGLI ESTENSI (COD. “E”)**

Dopo Porto Garibaldi e fino a Lido di Spina (foce canale Logonovo) si sviluppano 2 apparati dunari ben sviluppati, il primo proprio a ridosso del molo portuale sud, e il secondo qualche centinaia di metri più a sud. Come si vede dalla Figura 85, entrambe appaiono ben strutturate: in questo settore della costa regionale la spiaggia raggiunge ampiezze considerevoli, per cui,

nonostante la pressione antropica sia notevole (a causa delle attività turistico-balneari), le dune hanno spazio e modo di sopravvivere (Figura 86).



*Figura 85 – Dune a Lido degli Estensi (Fe).*



*Figura 86 – Nonostante la spiaggia antistante sia continuamente appiattita artificialmente, le dune a Lido degli Estensi (Ferrara) appaiono ben consolidate.*

## ***LIDO DI SPINA - FOCE FIUME RENO (COD. “S” e COD. “FcRe”)***

Per quanto riguarda Lido di Spina, le dune che si sviluppano fino a foce Reno sono 6. Lungo questo tratto il paraggio mostra tendenze assai diverse: dalla stabilità sostanziale nel settore più a nord si passa progressivamente ad una condizione di erosione sempre più spinta, in



corrispondenza del Bagno Jamaica, fino a situazioni di forme residuali e/o altamente trasgressive nel settore più a sud, fino alla foce del Reno (Figura 87).



*Figura 87 – Nonostante la spiaggia antistante sia continuamente spianata artificialmente, le dune a Lido degli Estensi (Ferrara) appaiono ben consolidate.*

Le dune che si sviluppano nella parte più meridionale di questo tratto (Ancone e Vene di Bellocchio) sono abbandonate ad un'evoluzione completamente naturale, in quanto è area protetta (Zona Parco) ed è frequentata solo saltuariamente, per cui anche il paesaggio appare rude (Figura 88).



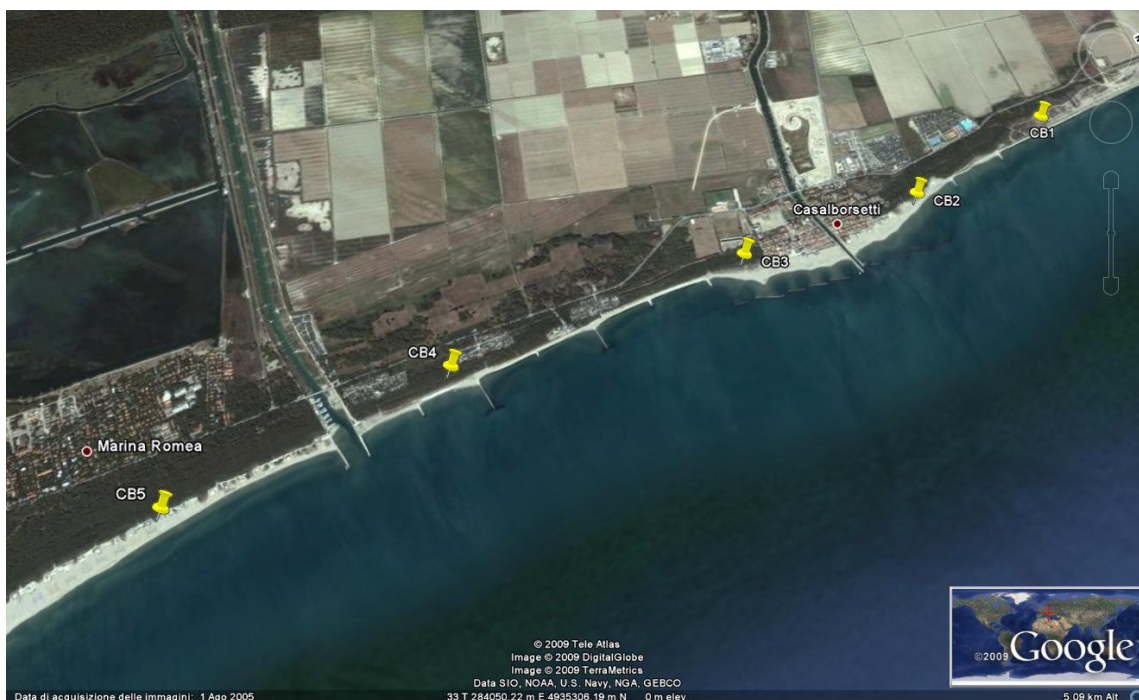
*Figura 88 – Ambiente completamente naturale, privo di alcun disturbo antropico (Vene di Bellocchio, Ferrara).*

Nonostante il disturbo da parte dell'uomo sia praticamente assente, qui le dune appaiono poco sviluppate e in forme embrionali solo durante certi periodi dell'anno: essendo quasi tutto il

territorio (compreso quello retrostante) in prossimità o al di sotto del del livello medio del mare, pur volendo, non ci sono le condizioni per uno sviluppo in quota, in quanto il, mare fa presto a smantellare tutto.

## ***CASAL BORSETTI (COD. “CB”)***

Gli apparati dunari che si sviluppano sul litorale di Casal Borsetti sono 5 e si rinvergono dalla foce del Fiume Lamone fino a Marina di Romea (Figura 89). Anche in questo caso, come per Volano, le dune che appaiono meglio strutturate sono quelle antiche, ricoperte da una folta vegetazione arbustiva e boschiva (Figura 89).



*Figura 89 –Ubicazione delgi apparati dunari di Casal Borsetti (Ravenna).*



*Figura 90 – Nonostante la spiaggia antistante sia continuamente spianata artificialmente, le dune a Lido degli Estensi (Ferrara) appaiono ben consolidate.*



## ***RAVENNA*** ***(COD. "R")***

Lungo il litorale Ravennate, da punta Marina fino a Lido di Classe (Figura 91), le dune (n.10) mostrano tutte una consistenza morfologica importante, quote elevate, ma allo stesso tempo, una condizione di frammentarietà così elevata da non riuscire, in diversi casi, a collegare morfologicamente i diversi lembi tra loro (Figura 92).



*Figura 91 – Apparati dunari lungo il tratto di litorale compreso tra Porto Corsini e Lido di Classe (Ra).*



*Figura 92 – Particolare di duna a Punta Marina (Ravenna) che mette in risalto come gran parte di quelle che si sviluppano in questo settore, risultino oggi estremamente frammentata, a causa dei numerose strutture che ne frammentano di netto l'estensione longitudinale - Lido di Classe (Ra).*

Soprattutto la parte più a nord risulta estremamente antropizzata, con una pineta alle spalle, e diverse decine di bagni e stabilimenti che hanno nel tempo ridotto a piccolissimi lembi quelle che, fino agli anni 50, erano cordoni dunari lunghi anche diversi km (Borghi, 1938; Cencini, 1980). Fa eccezione a questo tipo di configurazione tutta l'area a ridosso della foce del torrente Bevano, all'interno della quale le dune godono di una certa "libertà" evolutiva (Parco del Delta del Po e delle aree dunari del Torrente Bevano) e quindi risultano per lunghi tratti continue e ben strutturate (Figura 93), senza essere soggette ai disturbi dell'antropizzazione.



*Figura 93 – Tratto di dunai lungo il litorale a sud della foce del Torrente Bevano (Ra).*

## ***CESENATICO (COD. "FC")***

La parte più meridionale della costa emilia-romagnola, come più volte sottolineato, è sostanzialmente priva di cordoni dunari. L'eccezione è rappresentata da 2 piccoli lembi di duna a ridosso del molo portuale di Cesenatico (Località Zadina), le quali sono conservate artificialmente con staccionature e protezioni, per non rischiare di perderle del tutto. Sostanzialmente non hanno più alcun tipo di scambio con la spiaggia antistante (del tutto antropizzata tutto il periodo dell'anno), per cui sono state inserite nell'analisi più per criterio metodologico (da riferimento e confronto come stadio ultimo di degrado di un apparato) che per un significato realmente morfodinamico e ambientale.

## **6\_ LA CLASSIFICAZIONE**

**WORD KEY.** (Modello Concettuale, Fisico e Classificazione)

---

Nell'approccio alla scelta dei parametri su cui costruire una classificazione corretta, lo "scopo" (finalità) diventa fondamentale, poiché in base ad esso, alcune chiavi di lettura assumono più importanza di altre, per cui è necessario avere chiaro l'obiettivo per cui si cerca una classificazione.

La scelta della giusta chiave di lettura è il primo passo: l'approccio metodologico è quello di partire dall'analisi critica delle principali classificazioni, e poi, di volta in volta, dopo aver scelto quelle in cui il sistema costiero regionale sembra rispecchiarsi di più, provare, se necessario, ad introdurre delle integrazioni e/o modifiche.

La definizione delle varie classi o categorie si baserà sulla possibilità di parametrizzare i fattori che le definiscono, in particolare di ricavare la variabilità spazio-temporale delle grandezze (misurabili) nelle quali esse vanno trasformate. Successivamente vanno individuati i parametri che permettono di descrivere le categorie definite nella classificazione, quelle grandezze (misurabili) la cui analisi spaziale aiuta a identificare gli intervalli di variabilità e il passaggio (quantitativo) tra una classe e l'altra. L'ultima fase è quella di costruzione del modello fisico e la strutturazione della banca dati associata.

### **6.1\_ LA CHIAVE DI LETTURA: CRITERIO MORFOEVOLUTIVO**

**WORD KEY.** (Descrizione della classificazione proposta)

---

La scelta dei giusti criteri di classificazione è certamente la fase più delicata: tra i primi e più validi tentativi fin qui cercati dai vari studiosi, c'è sicuramente quello di Arens & Wiersma (1990; 1994), i quali posero l'attenzione non solo sulla complessità del sistema in termini di concomitanza di diversi fattori agenti, ma anche sulle tipologie delle relazioni tra i processi.

Si parte dal presupposto che la morfologia della duna (FORMA) può essere considerata come il risultato dell'interazione tra DINAMICA COSTIERA, PROCESSI EOLICI e GESTIONE ANTROPICA e che, tra questi diversi fattori, esistono diverse tipologie di influenza:



- INFLUENZA DIRETTA
- INFLUENZA INDIRETTA
- MECCANISMO DI FEEDBACK O DI INFLUENZA DI “RETROAZIONE”
- INTERFERENZA

Tali relazioni vengono opportunamente descritte con la Figura 94 dove ognuna è rappresentata con un diverso tratteggio. In questa parte verrà tralasciato il discorso sui rapporti tra le diverse influenze, visto che nella classificazione l’analisi è condotta sui piani separati di ciascuna classe: Il concetto verrà invece ripreso, e ampiamente trattato, nella sezione dedicata alla Teoria dei Sistemi, dove lo stato morfodinamico del sistema spiaggia-duna verrà descritto da un altro punto di vista, quello della stabilità/instabilità, proprio con la parametrizzazione e quantificazione di tali “interazioni”.

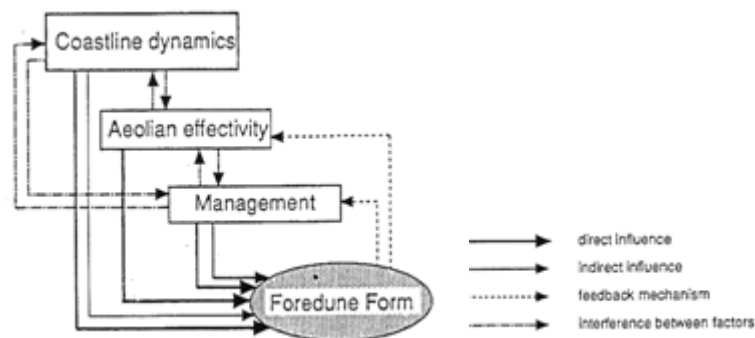


Figura 94 – Schema delle relazioni tra dinamica costiera, gestione antropica, attività eolica e forma delle dune (Arens, Wiersma, 1990).

Tale schema rappresenta la base di partenza per la classificazione adottata in questo lavoro. Sebbene sia, per molti aspetti, già sufficientemente esaustiva, si è ritenuto necessario integrare il criterio: viene introdotta la VEGETAZIONE tra i fattori d’interazione, e la MORFOLOGIA DELLA DUNA (che si trasforma nel più generale ASSETTO MORFOLOGICO DEL SISTEMA spiaggia-duna), da “target finale”, si trasforma in fattore d’interazione, con il concetto di “STATO MORFOEVOLUTIVO” che diventa così il criterio finale della classificazione adottata: nella Figura 95 si è cercato di rappresentare i rapporti tra questi fattori, descrivendone in sintesi l’essenza del significato per il quale sono stati presi in considerazione.



Figura 95 – Schema dei rapporti tra i diversi aspetti che condizionano l'evoluzione di un sistema spiaggia-duna;

In questo modo l'analisi è stata suddivisa e ripartita su piani differenti: nonostante ciascuno di essi sia sviluppabile separatamente, il metro di riferimento per la scelta dei parametri e delle classi di ciascun fattore, resta unico, e coincidente proprio con la descrizione dei vari stadi morfoevolutivi del sistema.

La **DINAMICA COSTIERA** (n.1) descrive l'incidenza sullo stato evolutivo del sistema sia da parte dei processi naturali (vento e moto ondoso) che di quelli non naturali (interventi diretti o indiretti). Va specificato fin da subito che, per come è stato descritto l'approccio interpretativo al modello concettuale, in questo lavoro il fattore di dinamica costiera traduce gli effetti che vengono prodotti dal vento e dal moto ondoso solo dal punto di vista spaziale, e cioè prendendo in considerazione solo quelle grandezze che esprimono erosione o progradazione dal punto di vista geometrico, rimandando l'analisi del budget sedimentario (che pur rappresenta un aspetto importante di tali fenomenologie) all'influenza dei **PROCESSI EOLICI**.

La classificazione da cui si è ritenuto poter prendere spunto è quella di Klijn (1981) il quale suddivide le dune, in apparati in **ACCREZIONE**, **STABILI** e in **EROSIONE** in funzione della variabilità spazio-temporale di alcuni parametri che descrivono l'azione del vento e del moto ondoso sullo sviluppo naturale del sistema. Tale suddivisione, pur essendo chiara e immediata, per lo scopo della ricerca appare incompleta, e non solo per il concetto a cui essa

deve essere applicata (sistema spiaggia-duna); l'osservazione diretta sul campo ha infatti indirettamente imposto l'identificazione di una ulteriore classe, quella che verrà indicata con il termine di sistemi **PSEUDO-STABILI**: all'interno di tale categoria si ritiene possano ricadere tutti quei casi la cui stabilità non è reale, ma "camuffata" dai periodici interventi di ripristino che l'uomo effettua per cercare di contrastare l'erosione: agendo ad esempio sulle ampiezze di spiaggia (ripascimento), o direttamente sulle volumetrie e pendenze della duna (ricostruzione artificiale).

Il concetto di **ASSETTO MORFOLOGICO** (n.2) incide sull'evoluzione del sistema poiché è in grado di rispondere (pur con tempi e modalità assai variabili) alle diverse condizioni morfodinamiche in cui il sistema stesso può trovarsi. Tale risposta si traduce in adattamenti morfologici, sia della duna che della spiaggia, per cui le forme nascono, si modificano o vengono smantellate in funzione dell'intensità e delle velocità con cui agiscono gli input che provengono dall'esterno. L'assetto morfometrico descrive proprio l'entità di tale adattamento, per cui nell'ambito del modello di riferimento che si sta cercando, l'insieme delle caratteristiche geometriche della spiaggia e della duna, può essere un aspetto fondamentale per definire il grado di maturità del sistema.

Quasi tutte le classificazioni presenti in letteratura prendono in considerazione l'assetto morfologico della duna; cercando quella che potesse fornire le indicazioni giuste da questo punto di vista per riuscire a suddividere anche gli apparati regionali, purtroppo non se n'è trovata una che fosse sufficientemente esaustiva; gran parte di esse è infatti già il risultato dell'insieme di più chiavi di lettura (molto spesso la vegetazione), per cui si è cercato di modificare gli aspetti di quelle più rappresentative, in modo da tirar fuori una classificazione (prettamente morfologica) che riesca a rappresentare bene la realtà regionale. Gli approcci di Hesp&Short (1982) e di Hesp (1982; 1988) sembrano, da questo punto di vista, poter essere quelli di riferimento: sebbene non esistano termini rappresentativi, poiché si tratta più che altro di classificazioni che di per sé sono evolutive (per cui le classi sono di "stabilità", più che di "assetto"), i vari stadi descrivono bene le diverse geometrie che un sistema dunare può adottare durante un classico ciclo erosivo. Cinque sono le configurazioni morfologiche: si va dal I° che rappresenta quello più stabile, al V° che invece descrive le forme residuali (per i dettagli si veda anche il paragrafo "un modello di riferimento", Capitolo 3).

Partendo da questa classificazione sono state individuate le seguenti categorie, per cui, dal punto di vista morfologico, le dune regionali sono suddivisibili in:

- ***DUNE SENSO LATO***

Comprehensive di tutte le forme dunari che, in termini di dimensioni e assetto morfologico, si presentano in dimensioni ridotte perché in fase embrionale o perché rappresentano piccoli residui fortemente smantellati dalle'erosione (Es. quelle che Psuty - 1968 - definisce "*SandSheets*"). In tali condizioni non è possibile ricavare alcun parametro morfometrico significativo: il passaggio tra la spiaggia (che solitamente è poco pendente) e la duna è difficile da tracciare poiché quest'ultima presenta una morfologia incoerente e non ben definita;

- ***DUNE CONSOLIDATE***

Comprehensive di tutte quelle forme dunari che hanno raggiunto una consistenza morfologica tale da riuscire, lateralmente, ad estendersi in cordoni ben sviluppati, lineari e continui, anche per qualche chilometro; trasversalmente si tratta di sistemi nei quali, sia la duna che la spiaggia, mostrano ampiezze e pendenze tali da riuscire a riconoscere tutte quelle morfologie tipiche di un sistema spiaggia-duna (Es. cresta della duna, piede della duna, berma di tempesta, berma ordinaria..);

- ***DUNE FRAMMENTATE***

Comprehensive di tutte quelle forme dunari in corrispondenza delle quali, nonostante una certa consistenza, lateralmente è possibile individuare punti di rottura morfologica, punti in prossimità dei quali la teorica linea di cresta sembra interrompersi: si tratta di possibili cedimenti od piccoli varchi, in ogni caso, punti in corrispondenza dei quali la duna comincia a mostrare i primi sintomi di cedimento. Lungo il profilo trasversale, il sistema mostra le caratteristiche del gruppo precedente, a differenza delle pendenze, che in questo caso si presentano moderatamente più elevate. Da questa categoria in poi il numero e la dimensione dei varchi saranno gli elementi più importanti nella determinazione dell'assetto morfologico risultante);

- ***DUNE RIMANEGGIATE***

Comprehensive di tutte quelle forme dunari, sempre di una certa consistenza, per le quali però, lateralmente, si fa fatica a seguire la direzione di sviluppo. Si sviluppa quella che in letteratura è conosciuta come morfologia "a monticelli" (Hummocky): il numero e le dimensioni dei varchi sono elevate, ma nonostante la continuità laterale sia quasi compromessa, è comunque possibile continuare a identificare l'effettiva

estensione laterale della duna, la quale non appare più nell'aspetto di cordone uniforme, ma con continui cambi di pendenza. Lungo il profilo trasversale, il sistema mostra morfologie e morfometrie tipicamente erosive, con pendenze elevate, sia del fianco lato mare della duna, sia della spiaggia, la quale si presenta spesso mediamente ristretta. Lungo i profili coincidenti con i varchi le pendenze si addolciscono, ma non è più possibile identificare né la cresta, né il piede della duna, mentre nell'immediato retroduna si sviluppano morfologie di tipo *blowouts*, corrispondenti a depositi sabbiosi in superfici suborizzontali – a volte in contropendenza – determinati dal trasferimento di materiale da parte del vento oltre la duna);

- ***DUNE RESIDUALI***

Comprehensive di tutte quelle forme dunari per le quali i varchi hanno raggiunto numero e dimensioni tali da diventare vere e proprie interruzioni. La frammentazione è così spinta da suddividere il cordone originario in tanti piccoli lembi isolati, per i quali risulta difficile anche la collocazione morfogenetica: non si riesce cioè a capire come siano morfologicamente correlabili tra di loro, e di conseguenza non si riesce a definire neanche quale sia l'estensione laterale complessiva. Lungo il profilo trasversale i caratteri morfologici e morfometrici mostrano un'elevata variabilità, in quanto ogni lembo sembra seguire un'evoluzione separata, e potenzialmente diversa da quella degli altri. Le forme erosive non mancano, generalmente le pendenze del fianco lato mare aumentano, mentre quelle della spiaggia antistante mediamente diminuiscono, in quanto, questo tipo di configurazione spesso si ritrova sul territorio regionale in corrispondenza di tratti di litorale fortemente urbanizzato, dove l'attività turistica spiana le spiagge e ne aumenta artificialmente le ampiezze, a discapito degli spazi a disposizione della duna);

Anche per quanto riguarda il rapporto tra **VEGETAZIONE** (n.3) e stadio morfoevolutivo si è partiti dalla classificazione di Hesp (1988): l'azione stabilizzante e protettiva della vegetazione è fondamentale per la stabilità di un sistema dunare, per cui la densità con cui si sviluppa al di sopra e nei pressi di esso ne descrivono perfettamente lo stadio morfoevolutivo. Le classi descritte da Hesp (1988) sono perfettamente in armonia con la realtà regionale: visto che però, come si vedrà nella sezione successiva (dedicata agli aspetti di parametrizzazione), è possibile misurare anche il grado di stress che vive la vegetazione al di sopra della duna, si è cercato di

integrare la classificazione anche con questo tipo di parametro. In tal modo, le dune risultano suddivise in base a 4 “classi di copertura”:

- ***DUNE con VEGETAZIONE DENSA e CONFORME***

Comprehensive di tutte quelle forme dunari caratterizzate da una copertura vegetale densa (>90%). Lungo il profilo trasversale è infatti possibile riconoscere una distribuzione delle varie fitocenosi in passaggi chiari, netti e paralleli alla direzione di sviluppo dell'apparato dunare.

- ***DUNE con VEGETAZIONE PARZIALE ma CONFORME***

Comprehensive di tutte quelle forme dunari caratterizzate da una copertura vegetale media (75-90%) ma, come nel caso precedente, ancora con una generale, buona corrispondenza tra specie vegetale e morfologia.

- ***DUNE con VEGETAZIONE PARZIALE e DIFFORME***

Comprehensive di tutte quelle forme dunari caratterizzate da una copertura vegetale media (45-75%), ma con un grado di “stress” che inizia ad essere sintomatico di una certa instabilità. La distribuzione difforme delle varie specie vegetali è causata dalla sovrimposizione di fitocenosi effimere su quelle più stabili. Ciò è dovuto allo sviluppo di forme erosive (*blowouts*) che, trasportando materiale sabbioso oltre la cresta della duna, spostano verso l'interno anche i meccanismi di crescita biologica di specie vegetali che invece dovrebbero trovarsi in posizione più avanzata.

- ***DUNE con VEGETAZIONE RADA e DIFFORME***

Comprehensive di tutte quelle forme dunari caratterizzate da una copertura vegetale rada (20-45%), e con un grado molto elevato di stress; il meccanismo è quello descritto nella classe precedente, ma presenta un grado di intensità maggiore, per cui la densità delle specie effimere cresce finanche (in alcuni casi) a superare quelle più stabili.

- ***DUNE con VEGETAZIONE SCARSA***

Comprehensive di tutte quelle forme dunari caratterizzate da una copertura vegetale mediamente scarsa (5-20%), per cui non esistono limiti e passaggi ben definiti.



- ***DUNE con ASSENZA DI VEGETAZIONE (NO COVER)***

Comprehensive di tutte quelle forme dunari caratterizzate da una copertura vegetale praticamente assente (<5%), in corrispondenza delle quali l'erosione, il calpestio o interventi di spianamento hanno reso il suolo al di sopra della duna praticamente nudo e impedito ogni forma di attaccamento e crescita vegetale.

Per quanto riguarda l'analisi dei **PROCESSI EOLICI** (n.4), l'obiettivo è quello di suddividere gli apparati dunari in funzione degli effetti morfologici (forme e/o associazioni di forme) che i processi eolici (vento) producono sul sistema in termini di interscambio sedimentario (Psuty, 1989). A tale scopo è stata ripresa in gran parte proprio la suddivisione in stadi evolutivi derivante dal modello di Psuty (Psuty, 1969), alla quale però sono state apportate alcune modifiche, in funzione dei caratteri peculiari delle dune regionali; in questo modo le classi corripondono alle configurazioni morfologiche descritte all'interno dei IV quadranti del modello di evoluzione. Così come è capitato per il criterio precedente, anche per quanto riguarda il modello di Psuty, non essendoci termini di riferimento "ufficiali", si è cercato di adattare la terminologia alla chiave di lettura:

- ***SISTEMI PROGRADANTI CON FORME EMBRIONALI***

In cui vi è assenza di accumuli dunosi ben definiti e coerenti, la formazione di accumuli sabbiosi è spesso associata alla presenza di ostacoli presenti sulla superficie di spiaggia (*shadow dunes*), e quindi in generale a tale categoria appartengono tutte le forme embrionali nei primi stadi di formazione (bilancio positivo di duna, positivo anche di spiaggia: I Quadrante Modello di Psuty).

- ***SISTEMI STABILI CON DUNE CONSOLIDATE***

Caratterizzate da un intenso rifornimento sedimentario dalla spiaggia antistante, per cui l'apparato ha materiale a sufficienza per svilupparsi, progradare o crescere in altezza, in funzione del trend che mostra la spiaggia antistante (rispettivamente stabilità o leggero arretramento): in questo caso, il bilancio della duna registra un incremento, e le morfologie, pur non raggiungendo necessariamente una certa consistenza in altezza e volume, sono contraddistinte spesso da creste coerenti e lineari (bilancio positivo di duna, nullo o leggermente negativo quello di spiaggia: II Quadrante Modello di Psuty).

- ***SISTEMI IN EROSIONE CON DUNE RIMANEGGIATE***

Caratterizzate da una certa consistenza ma anche dalla presenza di morfologie meno definite e coerenti (Es. raccordi fianco mare pendenti e accumuli alla base degli stessi), la cui morfogenesi è legata al trasporto di materiale verso la spiaggia (Bilancio positivo di duna, e negativo di spiaggia: III Quadrante Modello di Psuty).

- ***SISTEMI IN CRISI CON DUNE RESIDUALI***

Si tratta di dune già consolidate, ma sulle quali l'azione erosiva ha agito pesantemente a tal punto da costituire forme erosive che permettono la fuoriuscita dal sistema di materiale sabbioso, per cui attraverso *blowouts* e/o *varchi di esondazione (washover)*, sia la duna che la spiaggia, mostrano una variazione negativa del bilancio sedimentario (bilancio negativo di duna, negativo anche di spiaggia: IV Quadrante Modello di Psuty).

- ***SISTEMI "PSEUDO STABILI" CON DUNE RESIDUALI***

Si tratta di dune in condizioni residuali non per motivi naturali ma legati all'influenza dell'uomo, per cui, a causa della presenza di strutture che fissano la duna, l'alimentazione diretta da parte del vento è estremamente limitata. Di conseguenza, il bilancio è negativo, o al massimo leggermente in equilibrio, visto che spesso è ostacolato anche il rifornimento in senso opposto. Le spiagge antistanti mostrano un sostanziale equilibrio nel bilancio, anche in questo caso non per motivi naturali, ma semplicemente perché l'uomo interviene per mantenere le ampiezze, per cui sedimento a disposizione de vento ce n'è. Il sistema ciò nonostante è in disequilibrio, poiché a causa della mancanza di una continuità laterale della duna sufficiente, gran parte della sabbia movimentata dal vento, rischia di finire al di fuori del sistema, tra strade e in prossimità degli abitati (bilancio negativo o leggermente nullo di duna, positivo o leggermente nullo anche di spiaggia: tra il IV e il III Quadrante Modello di Psuty):

Per quanto riguarda infine l'ultimo aspetto (**INCIDENZA ANTROPICA**, n.5), ci si è basati sulla classificazione adottata da Arens e Wiersma (1994), la quale, come si è visto nella parte iniziale del capitolo, è una delle poche che prova a discernere le forme naturali da quelle in cui l'influenza antropica diventa fondamentale. In questo caso l'incidenza riguarda soprattutto la duna, in quanto gli effetti morfologici dell'azione antropica sulla spiaggia sono state prese

in considerazione nella prima categoria, quella della più ampia dinamica costiera. Ancora una volta la classificazione, presa e modellata sulle forme che si sviluppano lungo la regione emilia-romagna, si modifica e prende in considerazione 4 categorie principali di dune:

- ***DUNE DINAMICHE A SVILUPPO NATURALE***

Caratterizzate da un'elevata variabilità di forme e dimensioni, in funzione del "momento" evolutivo in cui si trova il sistema: esso però non ha vincoli esterni che agiscono su di esso, per cui la duna è libera di svilupparsi sotto la sola azione di processi morfodinamici di tipo naturale.

- ***DUNE DINAMICHE A SVILUPPO CONTROLLATO***

Caratterizzate da un'evoluzione condizionata "in senso lato", perché l'uomo non interviene direttamente su di essa, ma sulle condizioni al contorno, per far sì che poi il sistema "naturalmente" reagisca in un certo modo. Ad esempio, stimolando la crescita della vegetazione (Es. Ripiantumazione), o installando strutture di protezione da agenti esterni (Es. staccionature contro il calpestio). In questo modo, gli apparati dunari crescono in forme molto regolari, e si presentano ben strutturate; benché lo sviluppo libero sia in qualche condizionato, i processi morfodinamici naturali continuano ad avere ancora un ruolo fondamentale nell'evoluzione.

- ***DUNE STATICHE***

Corrispondono a sistemi dunari che, a causa dell'intenso sfruttamento degli spazi costieri, risultano vincolate all'interno di strutture antropiche.

Possono essere di tipo "fisso" (Es. stabilimenti balneari), o "mobile" (Es. magazzini o recinzioni), la loro evoluzione naturale è praticamente inibita, e lo scambio sedimentario con la spiaggia antistante si riduce a brevi ed isolati periodi invernali, quando la spiaggia non è frequentata dai bagnanti e dai proprietari delle strutture stesse.

Dal punto di vista morfologico si tratta di dune consolidate (anche se si presentano spesso in forma di lembi) e sono quasi sempre ben strutturate; al di sopra di esse è sempre presente la vegetazione, anche se spesso in condizioni di stress, a causa della fruizione (diretta o indiretta) che l'uomo inevitabilmente fa di essa (soprattutto calpestio).

- ***DUNE ARTIFICIALI***

Coincidenti con quegli apparati sui quali l'uomo interviene direttamente, allorquando, in aree interessate da forte e continua erosione, si verifica un decremento volumetrico della duna così intenso, che la sua stabilità è seriamente compromessa. Si tratta di azioni di difesa finalizzati al ripristino delle morfologie originali, spesso necessari non solo per la sopravvivenza dell'apparato, ma anche per la salvaguardia dei territori retrostanti. Esempi di soluzioni operative sono rappresentate da interventi di ricostruzione artificiale (utilizzando sabbie prelevate dalla zona di offshore) o da ripascimenti "controllati", mirati cioè al ripristino soprattutto delle pendenze (in particolare del fianco lato mare della duna). In entrambi i casi le dune originarie risultano completamente distrutte, e le nuove (artificiali), mancano totalmente di caratteri naturali

## **6.2\_ DAL MODELLO CONCETTUALE AL MODELLO FISICO: PARAMETRIZZAZIONE E BANCADATI**

**WORD KEY.** (identificazione dei parametri che descrivono la classificazione, definizione delle entità spaziali che rappresentano le grandezze e i parametri definiti nel modello concettuale; struttura della bancadati associata)

---

Da quanto descritto fin ora, appare evidente che la scelta di ogni criterio, la modifica e l'integrazione delle varie classificazioni, è giustificata soprattutto dalla possibilità di parametrizzare le grandezze che li definiscono, in particolare dal punto di vista spaziale, poiché la classificazione finale è legata, sia concettualmente che operativamente, ad un meccanismo di overlay (sovrapposizione) delle classi stabilite per ciascun layer (chiave di lettura).

L'analisi geomorfologica (identificazione e descrizione delle forme) è stata condotta attraverso strumenti informatizzati, costruendo prima un modello fisico (per cui ogni grandezza deve essere rappresentabile attraverso un'entità vettoriale - punti, linee o poligoni), e poi associando ad esso, attraverso la costruzione operativa del modello topologico, una bancadati relazionale. In questo complicato processo di trasformazione del dato, però, diventa fondamentale la fase di costruzione di quello che viene chiamato Modello Concettuale, il quale in questo caso, coincide proprio con la parametrizzazione dei criteri di classificazione

prima descritti, individuando e caratterizzando quelle grandezze (misurabili) che riescono a rappresentare i passaggi e le differenze tra le varie classi. Di seguito verranno elencati per criterio quelli prescelti.

- **CRITERIO DINAMICA COSTIERA**

La parametrizzazione del criterio di dinamica costiera riguarda tutte quelle grandezze che descrivono lo stato morfodinamico del sistema come il prodotto dell'azione di processi erosivi o deposizionali. Teoricamente assumerebbero importanza sia il concetto di presenza/assenza di morfologie (chiaramente deposizionali o erosive), sia quello di "variabilità morfologica". In tal modo però si creerebbe sovrapposizione di "competenze" con il criterio successivo (SETTING MORFOLOGICO), in quanto l'assetto morfologico altro non è che il prodotto finale a grande scala dell'azione di tali agenti, per cui si è preferito basare la parametrizzazione delle classi definite in questo criterio esclusivamente sul concetto di variabilità. La scelta si traduce, in termini di grandezze misurabili, nella variazione della **LINEA DI RIVA** e del **PIEDE DELLA DUNA**.

- **CRITERIO SETTING MORFOLOGICO**

Vanno identificate tutte le grandezze necessarie a descrivere l'assetto geometrico del sistema: le varie classi morfologiche in questo modo andranno delineandosi in funzione della loro variabilità spazio-temporale, definita attraverso "Indici adimensionali", determinati a loro volta da rapporti spaziali tra le diverse grandezze (Tanner, 1964 e 1967; Garcia-Mora et alii, 2001):

- SIMMETRIA/ASIMMETRIA del profilo, espresso in termini di un **Indice di Simmetria "SI"**, definito dal rapporto fra le distanze orizzontali ( $\Delta x$ ) misurate tra cresta e cavo ( $L_m$ ) e tra cresta e piede della duna ( $L_v$ ).
- CONTINUITÀ LATERALE della linea di cresta, espresso in termini di **Indice di Discontinuità "DI"**, definito invece come rapporto tra sommatoria delle ampiezze dei varchi ( $\sum a$ ) (misurata in direzione perpendicolare all'asse del varco) e la lunghezza totale ( $L$ ) della duna;
- Curvatura LONGITUDINALE della linea di cresta, espresso in termini di **Indice di Ondulazione "OI"**, definito dal rapporto tra l'altezza massima ( $H$

- MAX) e quella minima (H min), su quella media (H Media), ciascuna moltiplicata per la lunghezza del tratto (L) entro cui è stata calcolata;
- Uniformità di raccordo FIANCO MARE della duna, espresso in termini di **Indice di Raccordo “RI”**, definito dal rapporto tra la pendenza massima (% MAX) e quella minima (% min), su quella media (% Media), ciascuna moltiplicata per la lunghezza del tratto (L) entro cui è stata calcolata;
  - Parallelismo tra linea di riva e direzione dell’asse della duna (misura del GRADO DI ESPOSIZIONE), espresso in termini di **Indice di Esposizione “EI”**, definito dal rapporto tra l’ampiezza massima (AS MAX) e quella minima (AS min), su quella media (AS Media), ciascuna moltiplicata per la lunghezza del tratto (L) entro cui è stata calcolata;

A corredo degli indici per una corretta valutazione della classe di appartenenza sono state estrapolate anche le seguenti grandezze, i cui intervalli di variabilità non sono stati normalizzati:

- Ampiezza complessiva dell’apparato dunare (**ACD**);
- Ampiezza avanduna attiva (**AD**);
- Estensione lineare dell’apparato dunare (**LD**);
- Quota media cresta avanduna (**QD**);

La morfologia delle duna è un parametro fondamentale dal quale è possibile trarre informazioni non solo dal punto di vista evolutivo della duna stessa, ma indirettamente anche sulla condizione di conservazione del litorale su cui gli apparati dunari si sviluppano. L’indice di simmetria (IS), quello di Discontinuità (DI), di Ondulazione (IO), di Raccordo (RI) e quello di Esposizione (EI) rappresentano parametri importanti poiché, per come sono stati definiti (vedi Capitolo Classificazione Parametrizzazione), definendo rapporti geometrici tra elementi morfologici, descrivono la strutturazione della duna e quindi forniscono quelle informazioni evolutive che rendono l’apparato più antico (consolidato) o più giovane (embrionale).

In relazione all’assetto che ne viene fuori si potrà ricavare anche informazioni sulla capacità dello stesso di opporsi all’azione distruttiva da parte degli agenti morfodinamici (mare e vento), in quanto apparati ben strutturati certamente sono più resistenti di morfotipi frammentati o rimaneggiati.



A corredo di questi indici c'è poi una serie di parametri (Es. quota media della cresta, l'estensione lineare dell'apparato, pendenza del fianco lato mare..), che pur essendo in parte contemplati già nella determinazione degli indici stessi, rappresentano grandezze che descrivono la parte più attiva della duna, quella più esposta all'evoluzione, e per questo si è ritenuto comunque utile inserirle per eventuali considerazioni di variabilità statistica tra i diversi apparati. Valgono le stesse considerazioni anche per gli elementi "cresta" e "piede della duna", per i quali si è scelto di suddividere l'analisi topologica, solo per il semplice fatto che sono informazioni rappresentabili nello spazio in modo diverso (rispettivamente polilinee e poligoni).

Anche la spiaggia è parte integrante del sistema, per cui tutte le informazioni a riguardo, quelle che ne descrivono sia l'assetto morfologico (ampiezza, pendenza..), sia il trend evolutivo (linea di riva), così come è valso per la duna, ne esprimono indirettamente anche lo stato di conservazione (anche se spesso non si usa questo tipo di terminologia), per cui è fondamentale acquisire e analizzare l'entità e la variabilità spazio-temporale di tali grandezze. Anche in questo caso, la scelta di separare la linea di riva su un piano (*layer*) diverso, è legato alla semplice rappresentatività spaziale del dato.

- **CRITERIO VEGETAZIONE**

Per quanto riguarda la parametrizzazione dei fattori che descrivono l'influenza della vegetazione sull'evoluzione morfodinamica del sistema, così come l'analisi, va divisa su due piani: la prima (**DENSITÀ DI COPERTURA**), è quantificabile in % attraverso la semplice digitalizzazione manuale o automatica, da analisi spaziale o spettrale. La seconda invece è parametrizzabile attraverso la definizione di un parametro spettrale, un indice adimensionale detto **INDICE DI VEGETAZIONE** (o **NDVI**, *Normalized Difference Vegetation Index*), il quale mette in relazione le diverse risposte spettrali che la copertura vegetale fornisce alle diverse bande di un segnale elettromagnetico registrato all'interno delle immagini satellitari. Tale indice è stato scelto ad integrazione della densità di copertura perchè è dimostrato (Immordino, 2002) essere in stretta relazione con lo "stato di salute" della vegetazione (intesa come biomassa e area fogliare), ed ai processi biochimici ad essa correlati (attività fotosintetica). Ciò si traduce, in termini di analisi fitosociologica, nella concreta possibilità di individuare e quantificare fenomeni di interferenza (sovraimposizione)

tra le diverse specie vegetali di un sistema dunare, quando questo è in erosione e su di esso iniziano a comparire forme erosive.

Per quanto riguarda la vegetazione, tralasciando l'importanza che essa svolge in termini di stato ed evoluzione della duna (per cui si rimanda ai paragrafi precedenti), tra gli elementi caratterizzanti e misurabili da inserire all'interno della bancadati, ci sono, la densità di copertura, che ne esprime il grado di sviluppo al di sopra delle dune, e un parametro, l'*NDVI*, dal quale è invece possibile trarre informazioni sullo stato di stress e di salute della vegetazione. Distribuzioni spaziali (*pattern*) caotiche e non uniformi sono il sintomo di uno scarso stato di conservazione, associabile il più delle volte ad una condizione d'instabilità della duna, mentre una vegetazione rigogliosa (alta densità), e con *NDVI* elevati, sono chiari segni di una strutturazione completa e di un apparato "in salute".

- ***CRITERIO PROCESSI EOLICI***

Non potendo avere misure dirette delle variazioni volumetriche complessive per ciascun apparato dunare si è scelto di prendere in considerazione, per il calcolo del bilancio di duna e quello di spiaggia, la **VARIAZIONE AREALE** dell'una e dell'altra. La parametrizzazione in questo caso è semplice, poiché si tratta di individuare i limiti di estensione della duna e quelli della spiaggia, e quantificare la superficie compresa all'interno di tali limiti, naturalmente riferiti all'intervallo temporale considerato.

Per quanto riguarda il vento e i processi eolici attraverso cui esso crea, modifica e distrugge le forme all'interno del sistema spiaggia-duna, si è ritenuto utile creare un layer a parte, in quanto una delle finalità del lavoro di tesi è quello di creare una carta del Trasporto Eolico regionale, per cui era necessario avere una distribuzione areale dei valori di tasso di trasporto associato ad ogni apparato, che fosse in più rappresentabile non solo con un punto (visto che, nonostante se ne siano calcolati diversi, ogni valore è riferito ad un'unica duna), ma anche attraverso linee (polilinee) in quanto ogni tasso calcolato esprime una grandezza che dipende anche, e in gran parte, da una direzionalità, quella del vento che muove la sabbia. Le informazioni che sono state inserite all'interno della tabella degli attributi è funzione dei valori che sono stati presi in considerazione per il calcolo dei tassi di trasporto.

- **CRITERIO GESTIONE ANTROPICA**

La parametrizzazione del criterio GESTIONE ANTROPICA avviene attraverso l'identificazione delle forme di gestione del territorio costiero, all'interno o in prossimità del sistema spiaggia-duna, e in particolare sulla duna. Sono considerate in questa sezione anche le opere di difesa (pennelli, scogliere, e strutture armate). La misura delle grandezze avviene quindi attraverso:

- la determinazione dell'estensione areale (%) delle strutture (sia fisse che temporanee) presenti lateralmente e al di sopra della duna, all'interno di un'area di rispetto (BUFFER) di 150m dai limiti morfologici dell'apparato dunare;
- la determinazione dell'estensione areale (%) delle opere di difesa, frontalmente e lateralmente alla duna, all'interno di un'area di rispetto (BUFFER) di 200m dai limiti morfologici dell'apparato dunare;
- In questo caso oltre al numero di varchi antropici presenti sulla duna, vengono misurati gli accessi diretti o indiretti alla spiaggia al di fuori dell'area dunare, individuati lungo il tratto di estensione lineare dell'apparato, spingendosi oltre (lateralmente) per un'area di rispetto (BUFFER) di 100m;
- Anche questa volta l'NDVI può essere utile, in particolare per capire l'entità del disturbo antropico (accesso e calpestio) fino ai possibili interventi antropici direttamente sulla duna, in quanto l'analisi del pattern della vegetazione può fornire indicazioni sulla disposizione più o meno organizzata della vegetazione (ripiantumazione).

La scelta delle diverse aree di rispetto è dettata dalla diversa distanza di ciascun elemento dall'apparato dunare e quindi dall'influenza che i processi morfoevolutivi associati hanno sul territorio circostante. La presenza e l'estensione non solo sull'apparato, ma anche nelle aree limitrofe, di strutture e attività antropiche, condizionano pesantemente l'evoluzione di un apparato dunare: l'analisi spaziale sulla densità di copertura e sulla tipologia di strutture esistenti, allargata ad un'area di rispetto (Buffer) oltre i limiti morfologici (naturali e non-) della duna, aiuta a determinare l'entità di tale condizionamento e quindi a ricavarne, per il singolo apparato, un grado di stabilità residua. Nel campo informativo "Tipologia", sono state incluse anche le opere di difesa, pur non trovando nell'ambito di questo studio la necessità di separarla in un gruppo a parte: nonostante siano spesso installate lontano

dall'apparato, possono far risentire comunque una propria influenza, in quanto agendo direttamente sulla spiaggia, possono indurre modificazioni in termini di ampiezza e pendenza, per cui ne risente anche l'evoluzione della duna (Es. riduzione delle distanze dal mare, per cui l'apparato si trova direttamente esposto all'azione erosiva del moto ondoso).

La Tabella 4 riassume schematicamente tutti i criteri e i parametri fin'ora descritti.

	CRITERIO	CLASSI	PARAMETRI	CODICI	
1	DINAMICA COSTIERA	SISTEMA	ACCREZIONE	Σ VARIAZIONI LINEA DI RIVA/PIEDE DUNA	Acc
			STABILI		St
			IN EROSIONE		Er
			"Pseudo STABILI"		PSt
2	SETTING MORFOLOGICO	DUNE	SENSO LATO	SI (Indice di Simmetria)	SI
			CONSOLIDATE	DI (Indice di Discontinuità)	Cns
			FRAMMENTATE	OI (Indice di Ondulazione)	Frm
			RIMANEGGIATE	RI (Indice di Raccordo)	Rmn
			RESIDUALI	EI (Indice di Esposizione)	Rsd
3	VEGETAZIONE	DUNE	DENSA E CONFORME	DENSITA' AREALE DI COPERTURA	Dc
			PARZIALE MA CONFORME		Pc
			PARZIALE E DIFFORME		Pd
			RADA E DIFFORME	NDVI ( <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> )	Rd
			SCARSA		S
			ASSENZA DI VEGETAZIONE		NO
4	PROCESSI EOLICI	SISTEMI	PROGRADANTI CON DUNE EMBRIONALI	TASSO DI VARIAZIONE AREALE DELLA SPIAGGIA	PgrDE
			STABILI CON DUNE CONSOLIDATE		StDC
			IN EROSIONE CON DUNE RIMANEGGIATE		ErDRmn
			IN CRISI CON DUNE RESIDUALI	TASSO DI VARIAZIONE AREALE DELLA DUNA	CrDRsd
			"Pseudo-STABILI" CON DUNE RESIDUALI		CrDRsd
			5	GESTIONE ANTROPICA	DUNE
DINAMICHE A SVILUPPO CONTROLLATO	ESTENSIONE AREALE OPERE DI DIFESA (Buffer 200m)	DSCn			
STATICHE	NUMERO ACCESSI ALLA SPIAGGIA (Buffer 100m)	Stc			
ARTIFICIALI	NDVI ( <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> )	A			

Tabella 4 – Schema riassuntivo della classificazione parametrizzata nei codici e nelle grandezze che poi, attraverso il modello fisico e topologico, saranno quantificate all'interno del GIS e inserite nella banca dati associata; in neretto, le classi aggiunte alle classificazioni originali.

## ***La bancadati***

Il modello fisico e quindi la bancadati associata viene sviluppato allo scopo di classificare un'insieme di dati all'interno di tipologie di oggetti geografici che permettano una migliore capacità di rispondere alle esigenze di elaborazione ed interrogazione da parte del software utilizzato (ESRI<sup>TM</sup> ArcGis). La struttura del modello coincide con l'individuazione dei principali elementi che vanno poi manipolati all'interno del GIS, e che saranno la rappresentazione grafica delle classi prima descritte: quali sono gli attributi che li descrivono, come questi elementi sono composti e come sono in relazione spaziale tra loro.

Tale metodologia 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 (proprie del GIS) attraverso cui un'informazione semplice associata ad un oggetto del database, può essere successivamente confrontata con tutte le altre informazioni disponibili nella stessa bancadati, e che fanno riferimento alla stessa ubicazione geografica. Questo tipo di analisi consente la realizzazione di procedure di confronto spaziale anche di tipo complesso, indispensabili nella valutazione dei fenomeni che interagiscono nell'ambiente e nella progettazione del territorio.

L'organizzazione logica delle informazioni all'interno della bancadati ha previsto un unico comune ambito (Personal Geodatabase), in cui tutti i dati acquisiti sono stati raggruppati in Features data set, (gruppi omologhi di elementi vettoriali), uno per ogni parametro (Es. DUNA, SPIAGGIA, ANTROPICO VEGETAZIONE etc., vedi Tabella 5), rappresentato dallo stesso elemento vettoriale (poligono, linea o punto). La tabella sintetizza la struttura del modello fisico, che associa ad ogni campo (*field*) le classi del modello concettuale da cui è stato derivato (*attributes*), e l'entità vettoriale che è stata scelta per la rappresentazione della sua variabilità nello spazio.

Perché la bancadati possa essere integrata con informazioni di tipo spaziale è necessario definire un modello fisico attraverso cui poter rappresentare, all'interno del GIS, i dati contenuti nel database: in questa fase, ogni campo della bancadati, non solo è un elemento del modello concettuale (sistema spiaggia-duna) ma è anche, per come è stato definito, una grandezza misurabile nello spazio e quindi un oggetto all'interno del modello fisico. Le varie tipologie di oggetti vengono definite più propriamente "entità" di tipo vettoriale e che rappresentano le astrazioni geometriche di elementi reali: la struttura sulla quale si basa il software con cui si è lavorato (ESRI<sup>TM</sup> ArcGis 9.x) impone la scelta di un'unica entità

vettoriale per ciascun elemento che si vuole rappresentare. In altre parole, tutto ciò che è rappresentabile con un PUNTO è separato da ciò che ha un'estensione lineare (LINEE), la quale a sua volta è diverso da ciò che invece ha anche una valenza areale e quindi può essere rappresentato con un POLIGONO. Affianco alle proprietà spaziali dell'elemento, che in tal modo vengono rappresentate graficamente, può esserci una serie di "attributi", i quali, sottoforma di tabelle informative, vengono associate ad ogni entità, descrivendone caratteristiche aggiuntive (spaziali e non).

ELEMENTO	TIPOLOGIA	ATTRIBUTI	CODICE	FORMATO
Duna	poligono	REGIONE	REGIONE	text
		Località	Loc	text
		CODICE ID	COD_ID	text
		ANNO AGGIORNAMENTO	Aggiornmt	integer
		Descrizione	DESCR	text
		COD_CLASS_1	COD_1	text
		SI (Indice di Simmetria)	SI	float
		DI (Indice di Discontinuità)	DI	float
		OI (Indice di Ondulazione)	OI	float
		RI (Indice di Raccordo)	RI	float
		EI (Indice di Esposizione)	EI	float
		COD_CLASS_2	COD_2	text
		Granulometria (phi) DUNA	D50d	double
		AcD (Ampiezza complessiva della duna)	AcD	float
		AD (Ampiezza AvanDuna attiva)	AD	double
		LD (Estensione lineare della duna)	LD	double
		QD (Quota media cresta Duna Attiva)	QD	double
		AREA	Surface	double
		PENDENZA LATO MARE	Plm	text
		COD_CLASS_3	COD_3	text
COD_CLASS_4	COD_4	text		
Piede della duna	polilinea	REGIONE	REGIONE	text
		Località	Loc	text
		CODICE ID	COD_ID	text
		ANNO AGGIORNAMENTO	Aggiornmt	integer
		Descrizione	DESCR	text
		LUNGHEZZA	Lenght	double
		PERIODO VARIAZIONE	Interv_Variaz	text
		ENTITA' SPOSTAMENTO	Spostam	text
		COD_CLASS_1	COD_1	text
		COD_CLASS_2	COD_2	text
Cresta della duna	polilinea	REGIONE	REGIONE	text
		Località	Loc	text
		CODICE ID	COD_ID	text
		ANNO AGGIORNAMENTO	Aggiornmt	integer
		Descrizione	DESCR	text
		DI (Indice di Discontinuità)	DI	float
		OI (Indice di Ondulazione)	OI	float
ORIENTAZIONE PREFERENZIALE	OrientN°	integer		
Spiaggia	poligono	REGIONE	REGIONE	text
		Località	Loc	text
		CODICE ID	COD_ID	text
		ANNO AGGIORNAMENTO	AGGIORNMT	Date
		Descrizione	NOTE	text
		Granulometria (phi) SPIAGGIA	D50sp	text
		AREA	Surface	double
		AMPIEZZA MEDIA	Ampz	text
		USO	USO	text
		PENDENZA MEDIA SE (°)	PSpEm	text
		PENDENZA MEDIA SS (°)	PSpSm	text
		TENDENZA	Trend	text
		COD_CLASS_1	COD_1	text



Linea di riva	polilinea	REGIONE	REGIONE	text
		Località	Loc	text
		CODICE ID	COD_ID	text
		ANNO AGGIORNAMENTO	Aggiornmt	integer
		Descrizione	DESCR	text
		METODO ESTRAPOLAZIONE	ORIGINE	text
		PERIODO VARIAZIONE		date
		ENTITA' VARIAZIONE	deltaX	text
	COD_CLASS_1	COD_1	text	
Vegetazione	poligono	REGIONE	REGIONE	text
		Località	Loc	text
		CODICE ID	COD_ID	text
		ANNO AGGIORNAMENTO	Aggiornmt	integer
		Descrizione	DESCR	text
		AREA	Surface	double
		DENSITA' (%)	DensPercent	float
		NDVI	NDVI	double
	COD_CLASS_3	COD_3	text	
Antropico	poligono	REGIONE	REGIONE	text
		Località	Loc	text
		CODICE ID	COD_ID	text
		ANNO AGGIORNAMENTO	Aggiornmt	integer
		Descrizione	DESCR	text
		TIPOLOGIA	TIPO	text
		NDVI	NDVI	double
		AREA	Surface	double
	COD_CLASS_5	COD_5	text	
Varchi	punti / polilinea	REGIONE	REGIONE	text
		Località	Loc	text
		CODICE ID	COD_ID	text
		ANNO AGGIORNAMENTO	Aggiornmt	integer
		Descrizione	DESCR	text
	ORIGINE	ORIGINE	text	
Vento	punto / polilinea	REGIONE	REGIONE	text
		Località	Loc	text
		CODICE ID	COD_ID	text
		ANNO AGGIORNAMENTO	Aggiornmt	integer
		Descrizione	DESCR	text
		Direzione Dominante	Dir_Domnt	float
		Velocità Media	Vmedia	double
		Intervallo di riferimento	Intervallo	date
		Trasporto Eolico Pot. (B)	TrspEoP(B)	double
		Trasporto Eolico Pot. (K)	TrspEoP(K)	double
Trasporto Eolico Pot. (Z)	TrspEoP(Z)	double		
Trasporto Eolico Pot. (H)	TrspEoP(H)	double		

Tabella 5 – Tabella riassuntiva della struttura del database con il modello fisico di rappresentazione vettoriale di ogni elemento rappresentabile.

Tutte sono utili per comprendere dal punto di vista spaziale l'entità dei processi in atto e le relazioni che questi hanno con le configurazioni e gli assetti che oggi si ritrovano sul territorio. L'elaborazione del modello toponomico è stata svolta in ambiente GIS (Esri, ArcMap 9.3), attraverso cui si è proceduto ad uniformare legende e simbologie in modo da rispettare il più possibile anche i dettami proposti nel 1960 dal XIX Congresso Internazionale Geomorfologico dell'IGU, e istituiti con la pubblicazione del documento finale, tra il 1968 e il 1971 (Bashenina et alii, 1968). Le stesse indicazioni sono state poi riprese e integrate anche dall'ISPRA, in concomitanza della realizzazione della Carta Geomorfologica d'Italia

(Quaderni Serie III, Volume 10/2007), in merito proprio a contenuti e tecniche di rappresentazione delle forme geomorfologiche di dettaglio (scala 1:50.000).

Dal punto di vista operativo, tutte le procedure e le elaborazioni spaziali/spettrali connesse all'archiviazione delle informazioni ricavate, sono state eseguite utilizzando prodotti a scala nominale variabile tra 1:10.000 e 1:500, in funzione della risoluzione del prodotto a disposizione (foto aeree o immagini satellitari) e del tipo/finalità della procedura operativa: ad esempio, il tracciamento manuale dei limiti morfologici della duna è stato effettuato ad una scala nominale variabile tra 1:2000 e 1:5000 (in funzione del tipo di immagine); la ricostruzione semiautomatica (ragionata) delle isoipse da rilievi GPS eseguiti sul campo (Surfer 8.0), ad una scala variabile tra 1:2000 e 1:5000, mentre per l'estrazione automatizzata della vegetazione e dell'antropizzato – Classificazione di tipo *Supervised* – nella fase di identificazione delle *Region of Interest*, una scala di 1:500, mentre per quella di estrazione vera e propria, la qualità del prodotto è dipesa solo dalla risoluzione spaziale e spettrale dell'immagine satellitare. In tutte le fasi operative e per tutte le procedure è stato utilizzato il Sistema di Proiezione Universale di Mercatore (UTM) con *Datum European 1950* (ED50) Fuso 32N, successivamente modificato dalla Regione Emilia-Romagna, in Fuso 32NA (-4.000.000 sulla coordinata Nord) per necessità propria di uniformità di dati.

In fine, ogni *feature class* è stato corredato anche di una serie di metainformazioni sia sui parametri e le procedure realizzate, che su tutte quelle informazioni a corredo (anno, progetto di riferimento, struttura di ricerca, etc..) che spesso non accompagnando il dato, lo rendono più difficile da utilizzare. Parte di queste informazioni sono state inserite come campi informativi (*fields*) anche all'interno della tabella degli attributi di ogni *feature class* (in grigio, Tabella 4), in modo da essere facilmente identificabili anche durante la semplice consultazione all'interno di ArcGis.

## 6.3\_ANALISI GEOMORFOLOGICA

**KEY WORDS** (Analisi dello stato attuale delle dune costiere analizzando i singoli aspetti dell'analisi condotta)

---

L'analisi spaziale sui dati raccolti nel database è stata condotta su vari livelli e varie scale: mediante l'utilizzo di foto aeree e immagini satellitari (attraverso tecniche di fotointerpretazione e analisi spettrale) o direttamente sul campo con indagini dirette alla scala del singolo apparato. Tralasciando la descrizione della parte operativa di correzione e pre-elaborazione del dato (ugualmente importante ai fini della qualità del lavoro) di seguito verranno descritti i principali risultati a cui si è giunti cercando di condurre un'analisi geomorfologica sia in remoto, sia utilizzando i dati raccolti direttamente in campagna.

### 7.1\_Fotointerpretazione e analisi spettrale

Come si è detto più volte la fotointerpretazione e l'analisi spettrale hanno caratterizzato il lavoro di tesi soprattutto durante le fasi iniziali, dall'inquadramento dell'area, attraverso l'identificazione delle aree d'interesse, fino alla caratterizzazione geomorfologica delle forme e la definizione dei limiti di estensione delle singole aree d'interesse. In questa fase, la risoluzione dei prodotti e la disponibilità di una copertura adeguata e conforme alla scala di analisi (visto che i siti si estendono lungo l'intera costa emiliano-romagnola) sono aspetti importanti per garantire lo stesso ordine di attendibilità del dato estrapolato.

Dal punto di vista operativo, l'analisi si è incentrata sull'individuazione, delimitazione e caratterizzazione di tutti gli apparati dunari che si sviluppano lungo il litorale regionale. Le tecniche attraverso le quali è stato possibile cartografare ogni elemento morfologico sono diverse in funzione dell'obiettivo di ciascuna procedura, e soprattutto del formato su cui si è lavorato. L'analisi fotogeologica per esempio è stata finalizzata soprattutto all'individuazione dei limiti morfologici (PIEDE della duna e LINEA DI RIVA), in modo da poter stabilire tracciare il numero e la posizione dei profili da seguire successivamente durante il rilievo di campo (Figura 96).

L'utilizzo di particolari filtri di convoluzione ha permesso di isolare e rendere più "visibili" forme le cui dimensioni sul campo, spesso, non permettono la loro immediata rilevabilità (es. scarpate di erosione, piede della duna, forme embrionali o di tipo erosivo). L'obiettivo dell'analisi spettrale è stato invece quello di caratterizzare soprattutto la vegetazione e le

forme a grande scala: dopo aver pre-processato le immagini dal punto di vista spettrale (attraverso l'Analisi per Componenti Principali - PCA), le stesse sono state utilizzate per estrapolare informazioni circa lo stato di salute, o "stress" (NDVI) in cui la vegetazione si trova (fitosociologia). Avendo a disposizione immagini Quickbird e Ikonos, l'elevata risoluzione spettrale e spaziale ha permesso di ottenere ottimi risultati: si ricorda a tal proposito che all'interno delle immagini (preprocessate), 1 pixel, per quattro bande spettrali, equivale ad una cella di risoluzione a terra, rispettivamente, di 0.4m e 0.8 m). In questa parte della tesi non verranno descritte le procedure operative, ma si faranno semplici riferimenti ai casi più rappresentativi emersi da tale indagine.

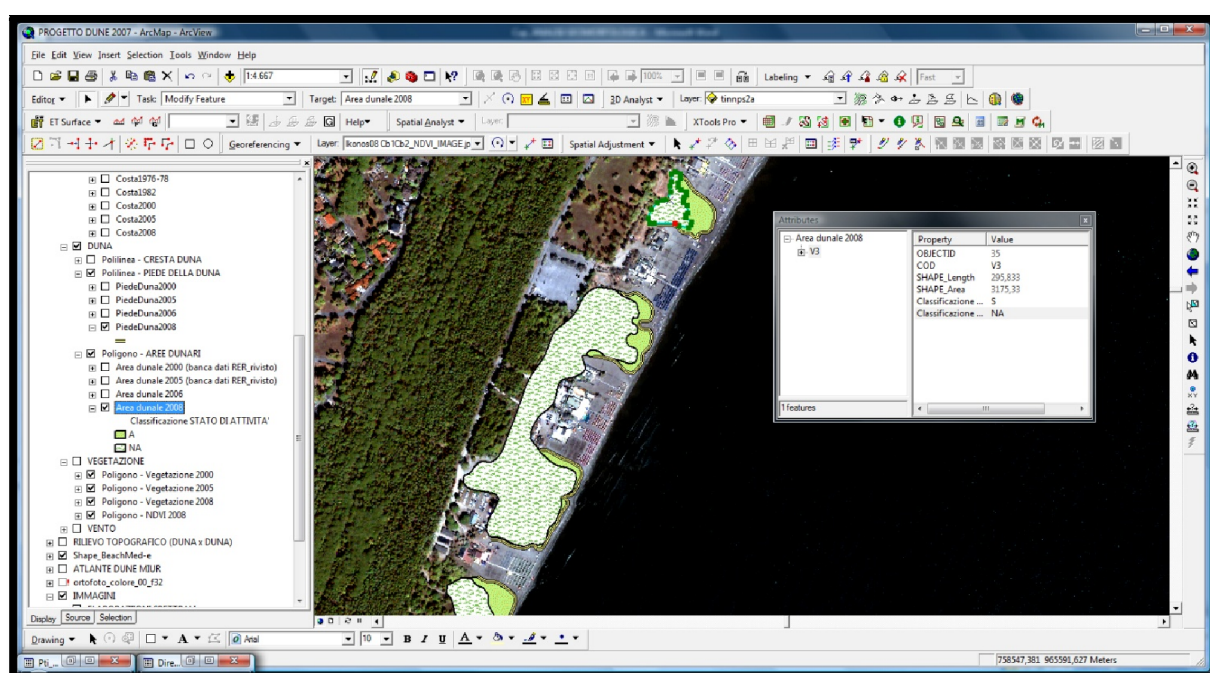


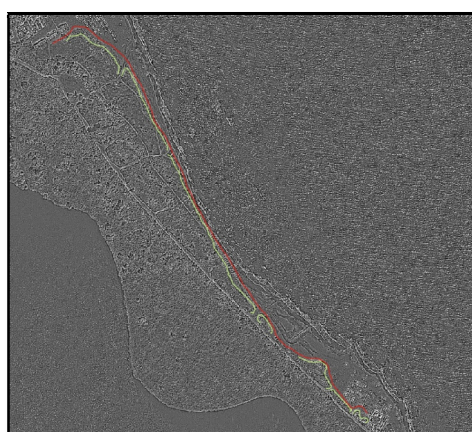
Figura 96 – Esempio di fotointerpretazione preliminare con la traccia degli elementi morfologici principali (piede della duna, area dunare attiva e linea di riva).

Grazie alla disponibilità della Regione Emilia-Romagna, sezione Difesa del Suolo, si è avuta la possibilità anche di studiare e utilizzare un volo Lidar (detecting airborne radar, realizzato proprio dalla Regione nel 2005 lungo tutta la costa emiliano-romagnola).

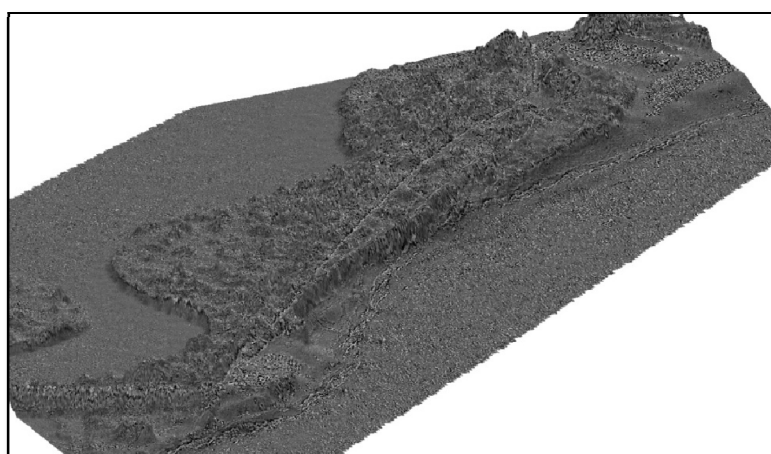
### ***Filtri morfologici (high-pass/direction)***

Applicando un filtro di convoluzione di tipo *High-pass* o *Direction* si è in grado di esasperare il contrasto tra pixel adiacenti che mostrano valori diversi di DN (*Digital*

*Number*), in modo da evidenziare lineazioni o elementi più o meno lineari, che proprio per tale carattere geometrico finiscono per comparire all'interno dell'immagine. Sono stati applicati filtri con matrice 3x3 e 5x5, e con direzioni variabili in funzione dell'orientazione dei singoli apparati, in modo da esasperare le differenze ad una scala adeguata agli elementi cercati (scarpate, piede di duna, forme erosive in genere). Le immagini di Figura 97a/b rappresentano un esempio di tale applicazione. La visualizzazione prospettica (sovrapponendo l'immagine così elaborata a modelli 3d associati) aiuta la comprensione dell'assetto generale dell'area: ad esempio, in rosso è evidenziato l'andamento del piede della duna, mentre in verde quello della cresta. L'esagerazione verticale poi è in grado di esaltarne le differenze in quota (Figura 97b). Anche se la base è in scala di grigi, osservando le figure ci si rende conto subito come sia facilmente intuibile l'andamento di determinate lineazioni (di nuovo, andamento della cresta e piede della duna).



(a)



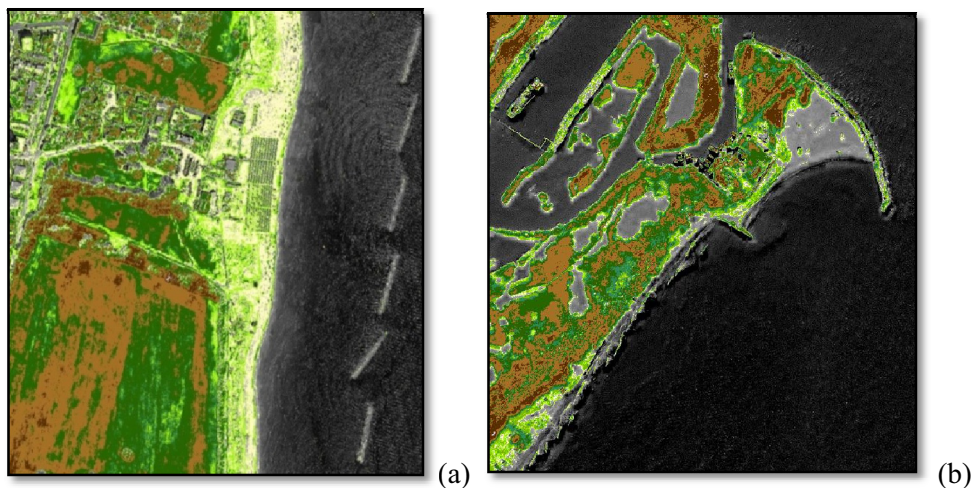
(b)

*Figura 97– Esempio di estrapolazione di informazioni morfologiche attraverso l'applicazione di filtri di convoluzione (High-pass): l'immagine è in pianta (a) e in prospettiva (b).*



## ***NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)***

L'Indice di Vegetazione, nella sua formulazione come NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), sfrutta la diversa risposta della copertura vegetale alle bande spettrali del visibile (rosso) e del vicino infrarosso, e fornisce un valore numerico adimensionale, compreso tra -1 e +1. Tale valore è stato dimostrato essere in stretta relazione con lo stato di salute della vegetazione (Immordino, 2002), ed ai processi biochimici ad essa correlati (attività fotosintetica). La caratteristica del comportamento dei pigmenti delle foglie non sottoposte a stress è infatti quella di riflettere soltanto circa il 10% della radiazione ricevuta nella regione spettrale della luce visibile (rosso), ed allo stesso tempo di riflettere oltre il 40% di quella ricevuta nell'infrarosso vicino. Nelle mappe elaborate (Figure 98 a/b), valori bassi di NDVI si verificano in aree a bassa o assente copertura vegetale o dove la vegetazione presente è senescente o sofferente, (nelle figure in realtà le tonalità corrispondenti a tali valori sono stati eliminati per rendere le immagini più chiare), mentre gli alti valori dell'indice rispecchiano una situazione di forte attività fotosintetica e quindi elevata presenza di biomassa. Nella realtà osservata i valori di NDVI variano prevalentemente in un range compreso tra -0.2 e +0.6 sulle terre emerse (i corpi d'acqua, o i terreni con un alto contenuto d'acqua, mostrano valori vicini allo zero o leggermente negativi).



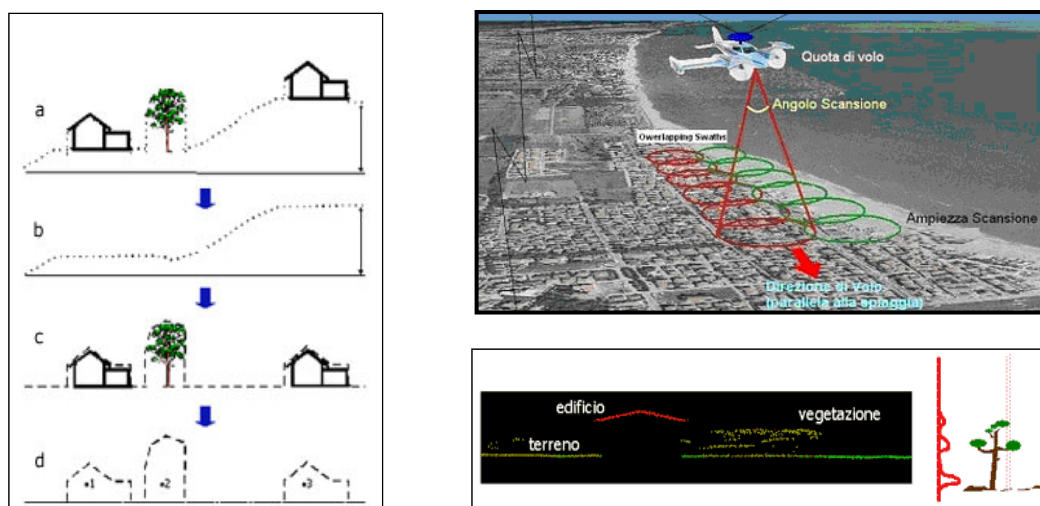
*Figura 98 – Esempio di mappa dei valori di NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) all'interno delle aree coperte dalle Immagini Multispettrali (Lido degli Scacchi, parte N (a) e Faro di Gorino (b) – FE – Immagini Ikonos). I toni di NDVI più bassi (assenza di vegetazione) sono stato opportunamente elisi dalle immagini per permettere una migliore riscontro tra il dato spettrale e la distribuzione della vegetazione.*



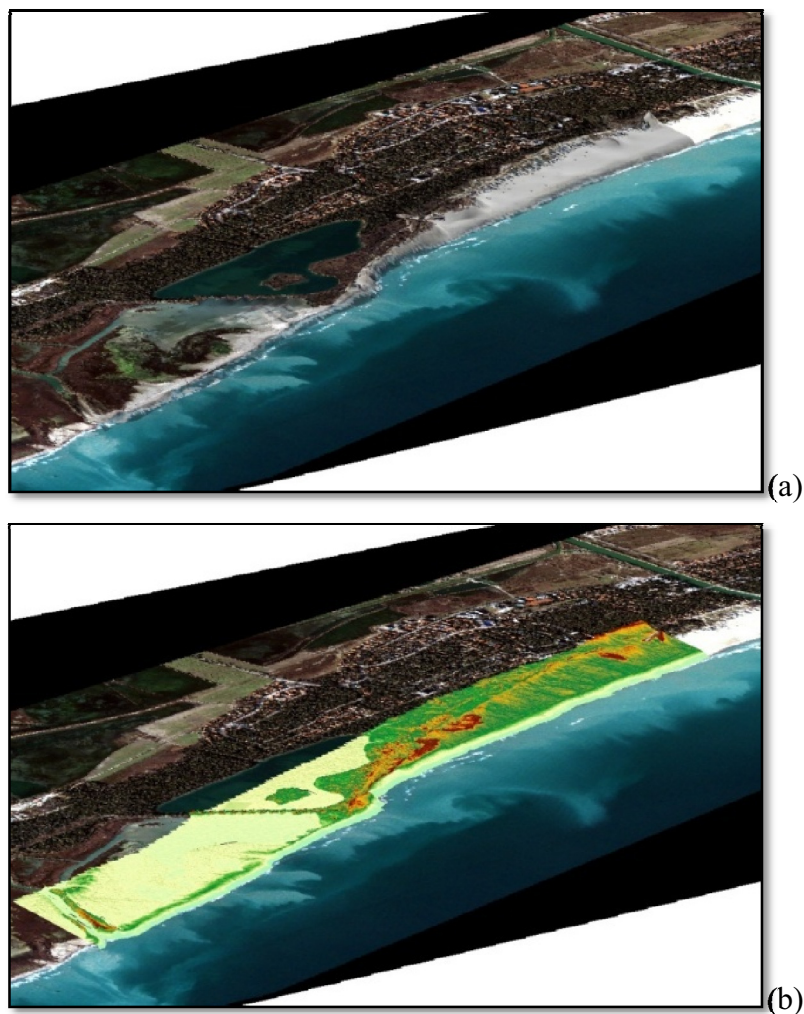
## ***LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging)***

Il LiDAR rappresenta una tecnica di telerilevamento in remoto di tipo “attivo”, utilizzata soprattutto per l’esecuzione di rilievi topografici ad alta risoluzione. Il rilievo viene effettuato su di un mezzo aereo munito di un laserscanner composto da un trasmettitore (laser), un ricevitore (telescopio) e di un sistema di acquisizione dati. Il segnale viene prodotto dal trasmettitore ad una data frequenza e con un definito angolo di apertura (di solito l’angolo di apertura del laser è di 10°, Figura 99). Il segnale, intercettata la superficie terrestre, darà origine ad una serie di segnali; tra quelli di ritorno, il primo verrà intercettato dal sistema di acquisizione che calcola la distanza tra aereo e punto sulla superficie terrestre che ha generato il segnale. Con algoritmi di trasformazione predeterminati, le quote relative dei vari punti risultano facilmente estrapolabili; un sistema di posizionamento GPS associato al sistema permette di risalire alla posizione nonché la quota assoluta di ciascuno di essi.

Dalla nuvola di punti caotici rilevata (dato raw) si ottengono, per elaborazioni successive (filtraggi automatici e manuali), isoipse (con passo di elevazione variabile), modelli digitali di terreno (DTM) e/o di elevazione (DEM). Questi ultimi si differenziano dai DTM per il filtraggio che li priva di oggetti (first pulse) come vegetazione e case (Figura 100) (Ahokas et al., 2005; Hyppa et al., 2005).



*Figura 99 - Modello digitale di superficie DEM; (b) Modello digitale del terreno DTM; (c) DEM - DTM = DEM normalizzato (cioè riferito ad una superficie orizzontale); (d) Modello degli oggetti (vettoriale)*



*Figura 100 – Esempio di visualizzazione del dato 3d associato al lidar: nel primo caso (a) i toni di colore identificano le quote più elevate (da notare come sia evidente una lineazione piuttosto marcata, coincidente con l’asse del cordone dunare), mentre nel secondo (b) è direttamente l’immagine satellitare (Quickbird) ad essere sovrapposta sul DTM.*

## **7.2\_Indagini dirette (campagne gps)**

Per validare le informazioni estrapolate dalle immagini, e per coprire la mancanza di dati, si è resa necessaria una cospicua indagine diretta, in corrispondenza di tutti i siti in esame. Sono state condotte campagne di misure GPS, eseguite lungo profili trasversali e longitudinali prestabiliti, in modo da riuscire a coprire, con un numero sufficiente di punti, l’intera area occupata dal sistema spiaggia-duna.

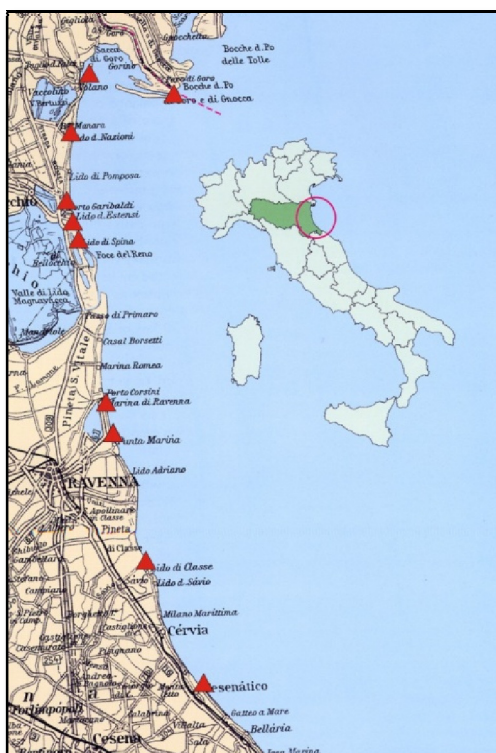
Tra la fine del 2007 e tutto il 2008 sono stati rilevati 40 apparati dunari, con lo scopo di: A. caratterizzare le forme in funzione delle categorie adottate nella classificazione; B. indagare più a fondo gli aspetti morfologici individuati durante l'analisi fotogrammetrica (foto aeree) e spettrale (Immagine da satellite); C. ricavare quei parametri morfometrici fondamentali (sia della spiaggia che della duna – La Cock et al., 1992; Ruz e Allard, 1994) da inserire successivamente nella matrice d'interazione binaria (BIM) per determinare il grado di instabilità morfologica (IDI) dell'apparato stesso (Teoria dei Sistemi).

Le misure GPS sono state eseguite su griglie regolari di profili, perpendicolari alla linea di riva e paralleli al cordone dunare (ove riconoscibile), con interasse variabile da un minimo di 30m e un massimo di 50m, a causa della forte disomogeneità delle dune in termini di estensione lineare. La strumentazione utilizzata è rappresentata da un sistema GPS (Global Position System) differenziale, utilizzato in modalità RTK (Real Time Kinematics), costituito da due ricevitori GPS (in doppia frequenza L1/L2), in comunicazione tra loro tramite un modem GSM per ridurre al minimo l'errore di posizionamento (Figura 101). Uno dei due (TrimbleR Mod. 5700) viene utilizzato come STAZIONE BASE, posizionata su un punto di coordinate note (caposaldo), mentre l'altro (TrimbleR Mod. 5800) funge da ROVER: è cioè in grado di acquisire i punti con la correzione in tempo reale proveniente dalla base. Tale metodologia d'indagine permette di riuscire ad ottenere una precisione sub decimetrica ( $\pm$ cm) del punto acquisito.

Utilizzando il controller del rover come navigatore e supporto per la memorizzazione dei dati, sono stati battuti tutti i profili topografici entro le griglie di rilievo, con un passo di volta in volta diverso in funzione delle variazioni morfologiche più evidenti sul campo, comunque sempre in numero tale da riuscire a rappresentare in modo coerente la morfologia sia della duna che della spiaggia. Per poter operare in modalità RTK all'interno di tutti i tratti presi in esame, si è reso necessario la realizzazione di una propria rete di punti GPS (materializzati a partire da vertici della rete IGM95) da utilizzare come capisaldi in relazione alla vicinanza relativa del sito da indagare. Partendo da nord (Figura 101), i punti sono situati in corrispondenza: Ogni rilievo topografico è stato realizzato alla scala di massimo dettaglio utile per lo scopo da raggiungere, e cioè quello di identificare l'attuale profilo topografico del sistema spiaggia-duna fin oltre lo -0,5 m di profondità (Figura 102).

Durante ciascuna campagna di misura si è cercato di porre particolare attenzione alla caratterizzazione dei rapporti geometrici e spaziali tra le diverse unità morfo-ecologiche, in particolare alla mappatura dei passaggi (ove cartografabili) tra una specie/associazione

vegetazionale e l'altra, in modo da rendere più immediata e speditiva anche l'analisi spettrale e fotointerpretativa (condotta in contemporanea).



- **FARO DI GORINO**  
(Sacca di Goro – FE)  
Lat. 44°48'xx.xxx'' Long. 12°20'xx.xxx'';
- **BAGNO IPANEMA**  
(Lido di Volano – FE)  
Lat. 44°47'xx.xxx'' Long. 12°16'xx.xxx'';
- **BAGNO “ALOHA”**  
(Lido degli Scacchi – FE)  
Lat. 44°44'xx.xxx'' Long. 12°14'xx.xxx'';
- **LEGA NAVALE ITALIANA**  
(Lido degli Estensi – FE)  
Lat. 44°40'xx.xxx'' Long. 12°14'xx.xxx'';
- **BAGNO HONOLULU**  
(Lido di Spina – FE)  
Lat. 44°39'xx.xxx'' Long. 12°15'xx.xxx'';
- **BAGNO “SABBIA D'ORO”**  
(Lido di Spina – FE)  
Lat. 44°38'xx.xxx'' Long. 12°15'xx.xxx'';
- **CENTRO CRSA**  
(Marina di Ravenna – RA)  
Lat. 44°28' xx.xxx'' Long. 12°16'xx.xxx'';
- **BAGNO 22**  
(Punta Marina – RA)  
Lat. 44°27'xx.xxx'' Long. 12°17'xx.xxx'';
- **BAGNO “IL CORMORANO”**  
(Lido di Classe – RA)  
Lat. 44°18'xx.xxx'' Long. 12°21'xx.xxx'';
- **BAGNO “CONTI”**  
(Cesenatico – FC)  
Lat. 44°11'xx.xxx'' Long. 12°24'xx.xxx'';

Figura 101 – (in alto) Mappa dei capisaldi materializzati lungo la costa regionale; (in basso) Stazione fissa (base) GPS con punto materializzato come caposaldo.

Come ulteriore approfondimento qualitativo, si è cercato di integrare l'indagine di campo con osservazioni sulle forme di fondo (principalmente eoliche ed “effimere”) presenti sulla superficie di deflazione, sia di tipo erosivo (*blowouts*, ventagli di esondazione, etc..) che deposizionale (Es. *shadow dunes*); tali elementi, laddove è stato possibile individuarle e cartografarle, possono fornire importanti indicazioni sia sull'energia esercitata dagli agenti



morfodinamici (condizioni meteomarine), che sullo stadio di instabilità/stabilità in cui si trova la duna in quel momento (Goldsmith, 1985; Wal e McManus, 1993).

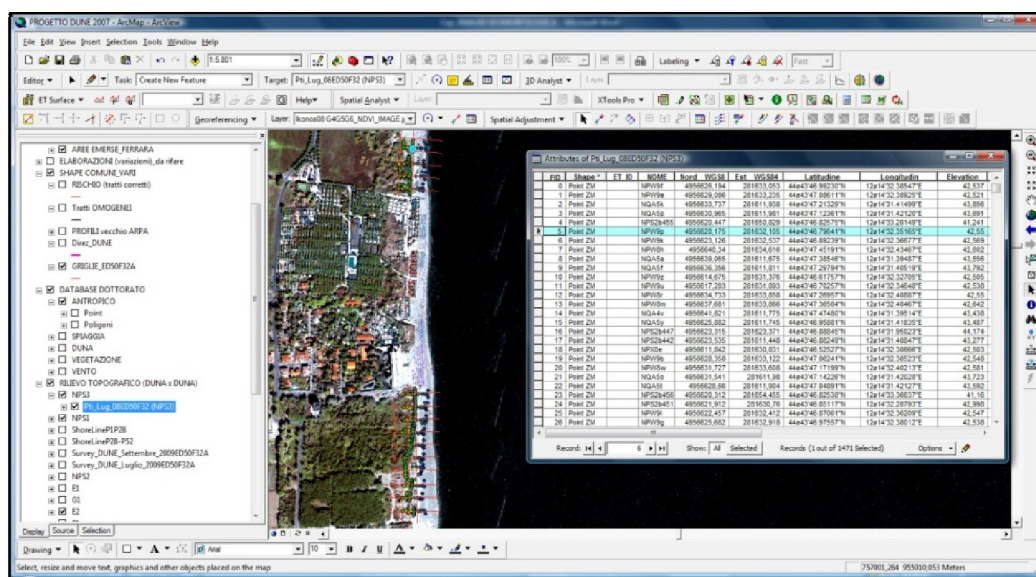


Figura 102 – Esempio di rilievo topografico lungo i profili longitudinali e trasversali in corrispondenza dell'apparato dunare a Lido degli Scacchi (Ferrara);

### 7.3\_Analisi morfometrica e morfologico-evolutiva

L'analisi morfometrica è stata condotta ricostruendo i profili battuti durante l'indagine di campo, in modo da stabilire i principali parametri morfometrici (Figura 103). Si è proceduto, per quei rilievi che garantivano una copertura di misure sufficiente a ricostruire modelli 3d (TIN) in modo da estrapolare altri parametri utili (ASPETTO e PENDENZA delle SUPERFICI). Successivamente i dati sono stati utilizzati anche per un'analisi di tipo morfologico - evolutiva andando ad esaminare la variazione su due piani differenti: da un lato è stata valutata la comparsa e la scomparsa delle aree connesse all'erosione dell'apparato dunare e della spiaggia antistante, dall'altro sono stati misurati gli spostamenti trasversali della linea di riva lungo i profili stabiliti durante il rilievo.

Per inevitabile connessione con lo sviluppo della matrice d'interazione (Teoria dei Sistemi), i dati raccolti non saranno discussi in questa sezione: per uniformità nella presentazione dei risultati si è preferito approfondire l'analisi nel Capitolo 8, dove sarà analizzata anche la distribuzione di altri parametri ricavati e archiviati nella bancadati.

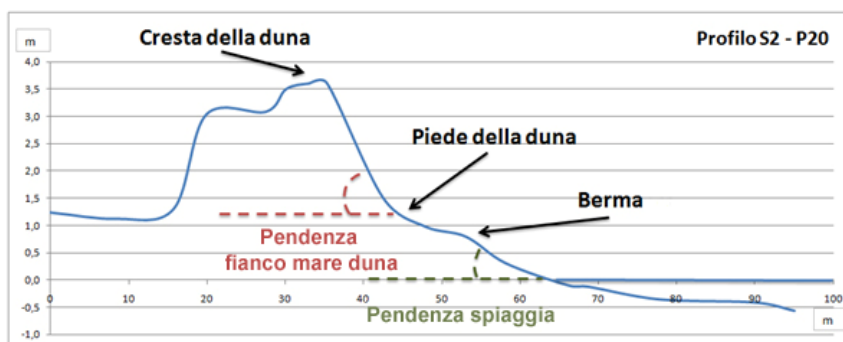


Figura 103 – Esempio di ricostruzione di dei profili con determinazione e interpretazione dei principali parametri morfometrici e morfologici.

### ***Costruzione dei Modelli 3d (TIN)***

La costruzione dei modelli digitali del terreno (DTM) relativi alle campagne di misura effettuate passa attraverso la correzione delle quote sul livello del mare (ItalGeo 2005), la ricostruzione delle isoipse attraverso l'interpolazione semi-automatica e ragionata e l'elaborazione finale delle differenze di quota con la ricostruzione del modello 3d in formato TIN (*Triangulated Irregular Network*). Nelle Figure 104 a/b/c sono rappresentati alcuni esempi di tale elaborazione: l'esagerazione verticale di 5x applicata alle visualizzazioni 3D aiuta a comprendere meglio l'andamento della morfologia e lo sviluppo di determinati elementi morfologici (Es. Scarpate di erosione).

Il vantaggio derivante di una ricostruzione tridimensionale del rilievo sta nella possibilità di ricavare da esse mappe tematiche secondarie, in particolare, quelle legate alla pendenza e all'orientazione delle superfici (*SLOPE* e *ASPECT*). Come si vede dalle Figure 105 e 106 diverse sono le informazioni che possono essere ricavate: nel primo caso, la pendenza delle superfici (in particolare della spiaggia e del fianco mare della duna), aiuta a comprendere lo stato di stabilità dell'apparato e indirettamente quello di equilibrio del sistema spiaggia-duna. Nel secondo caso, invece l'orientazione delle superfici aiuta a comprendere meglio i meccanismi di accrescimento degli apparati in termini di trasporto eolico: come si vedrà nel capitolo del calcolo del tasso di trasporto potenziale, la quantità di materiale che può finire sulla duna è funzione dell'orientazione relativa del vento e dell'asse del cordone dunare, ma avere la



possibilità di ricavare nel dettaglio l'orientazione delle singole porzioni di superficie del raccordo, aiuta ad approfondire l'analisi.

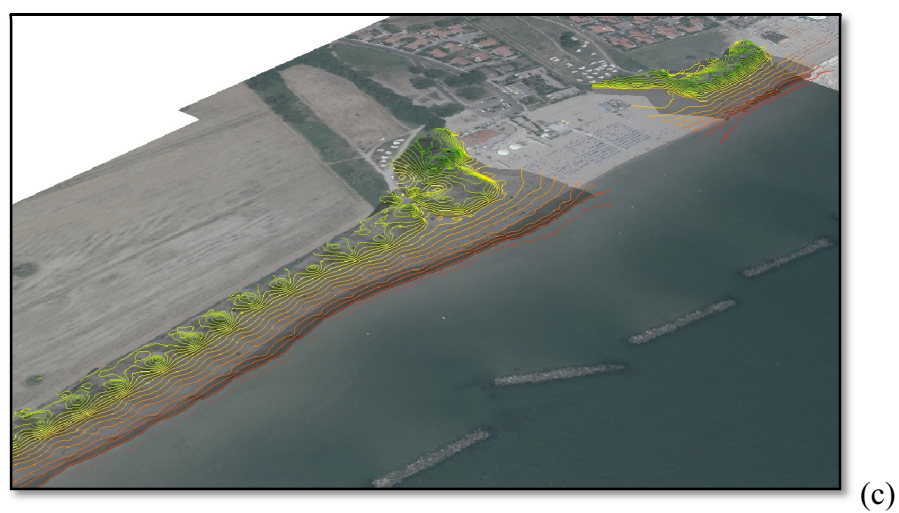
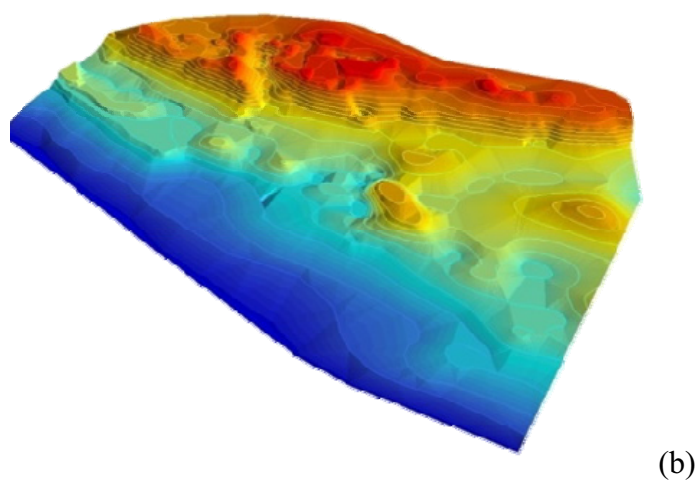
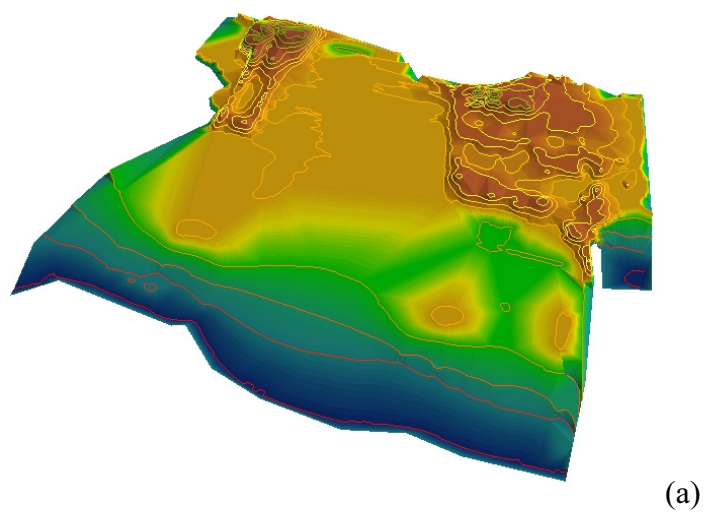


Figura 104 – Esempi di ricostruzione di modelli 3d (TIN): (a) Lido degli Estensi (FE); Lido di Spina (FE); Lido delle Nazioni (FE).

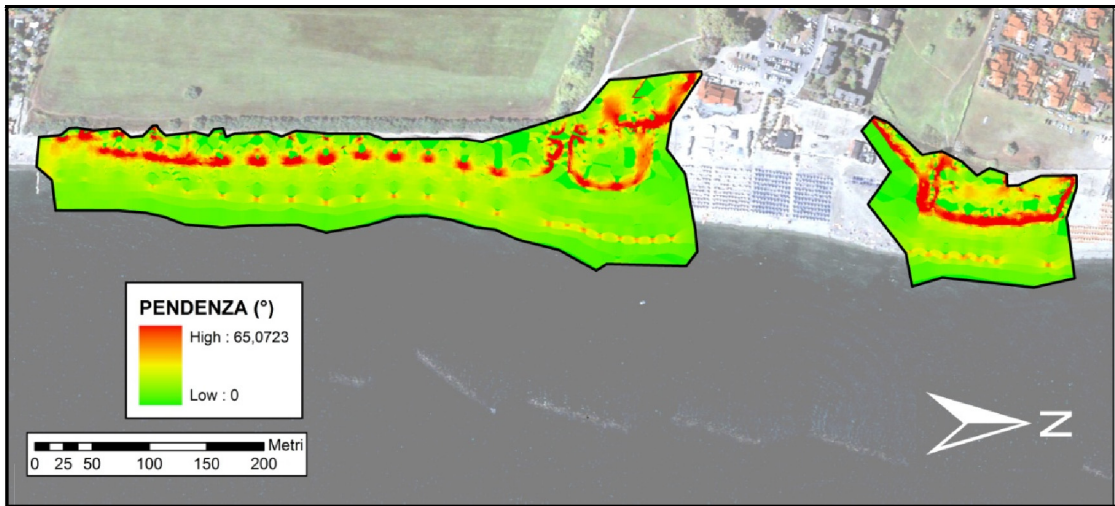


Figura 105 – Esempi di risultato di elaborazione spaziale finalizzata all'estrazione della mappa delle pendenze (slope) delle superfici del modello 3d. I toni del rosso indicano le superfici a maggiore pendenza, mentre quelle del verde le superfici più orizzontali;



Figura 106 – Esempi di risultato di elaborazione spaziale finalizzata all'estrazione della mappa dell'orientazione delle superfici (aspect) del modello 3d. Dai toni dell'arancio verso quelli del verde l'orientazione si fa sempre più perpendicolare all'asse della duna (essendo questa orientata all'incirca in direzione NS);

## Variazione areale delle dune

Dal punto di vista operativo, si sono tracciati in maniera semiautomatica i dati derivanti da elaborazioni spettrali (NDVI e Classificazione) e vettoriali (*Autovectorize*), controllando poi manualmente i risultati in modo che fossero coerenti con i limiti intuiti e tracciati dalla fotointerpretazione; tali limiti corrispondono alla linea di riva e al piede della duna. L'estensione areale per l'anno 2008 sono state invece ricavate in maniera manuale direttamente dai rilievi, poiché durante la misura dei punti sul terreno, oltre i profili, sono stati tracciati anche l'andamento del piede della duna e quello della linea di riva (Figura 107).

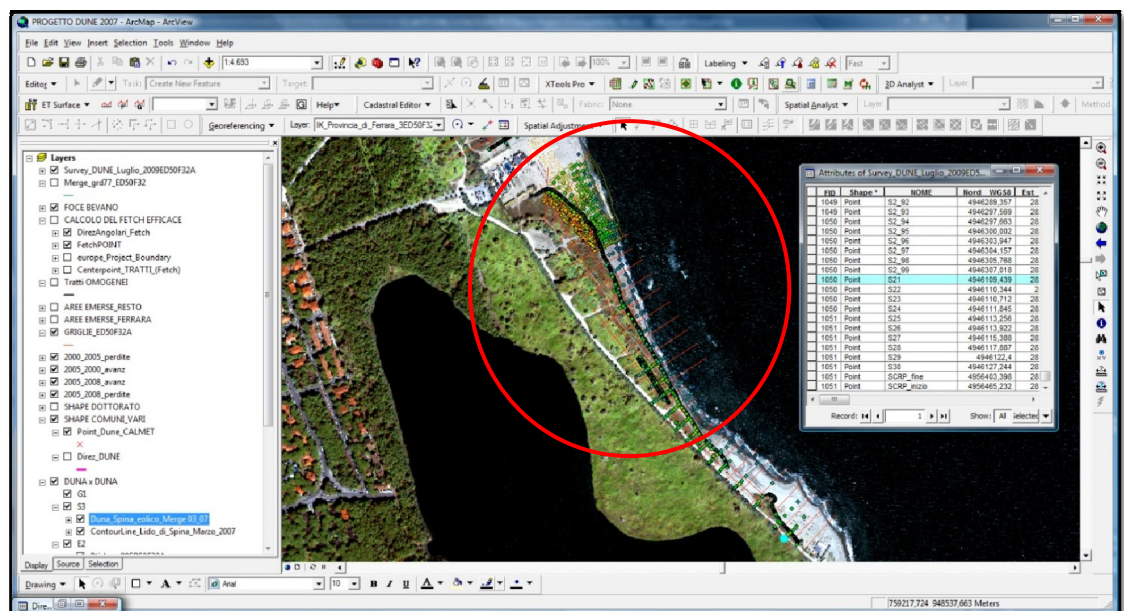


Figura 107 – All'interno del cerchio rosso i punti più densi rappresentano l'andamento del piede della duna e della linea di riva rilevato durante le campagne di misura GPS.

Il computo è stato ricavato dalla sovrapposizione vettoriale delle aree occupate nei due anni, quindi la somma algebrica tra quelle comparse e quelle scomparse fornisce l'indicazione sul bilancio netto. Le Figure 108 a/b rappresentano un esempio di tale elaborazione: le aree nei toni di rosso e di verde rappresentano rispettivamente porzioni di duna scomparse e comparse tra il 2000 e il 2008 (Lido degli Scacchi, FE); in rosso e in blu sono inoltre rappresentate le linee di riva rispettivamente del 2000 e 2008.





Figura 108 – Esempi di come la sovrapposizione di aree ricavate per un anno e per l'altro fornisca indicazioni sull'entità dell'avanzamento o dell'arretramento dei sistemi dunari. Per motivi di chiarezza dell'immagine, per entrambi i casi non si è riportato il confronto tra le aree di spiaggia, ricavate nello stesso identico modo.

Successivamente i dati sono stati plottati all'interno di un diagramma di dispersione (Figura 109), per cercare di ragionare sulle relazioni tra i diversi apparati proprio in funzione dei rapporti tra il bilancio areale di duna e quello di spiaggia (Modello evolutivo di Psuty). Come si vede dalla distribuzione dei punti, gli apparati appartenenti al I Quadrante rappresentano sistemi che registrano tra il 2000 e il 2008 un incremento della superficie di spiaggia a discapito di quella della duna: su 8 casi, 6 appartengono alla provincia di Ferrara, 2 a quella di Ravenna, e 0 alla Provincia di Forlì-Cesena. Nel II Quadrante, su 11 casi, 5 sono afferenti a Ferrara, 6 a Ravenna e ancora 0 per la Provincia di FC. Il III Quadrante (bilancio positivo sia di duna che di spiaggia) ha solo

sistemi che si sviluppano nella Provincia di Ravenna (3 su 16), mentre all'interno del IV Quadrante, corrispondente alla configurazione più critica (bilancio negativo sia di duna che di spiaggia), cadono ben 17 sistemi spiaggia-duna: 10 sono della Provincia di FE, 5 di quella di RA, 2 di FC.

Nel diagramma di dispersione, in rosso, sono evidenziati i sistemi evidentemente più in crisi, la maggior parte dei quali si trova o sullo Scanno di Goro (COD."G") o presso il Lido di Spina (COD."S"). Questo dato fornisce indicazioni importanti circa lo stato evidentemente di erosione in cui si trovano sia la duna che la spiaggia: nella parte di Teoria dei Sistemi (Capitolo RR) questo aspetto verrà ripreso, con il "Bilancio Evolutivo" che sarà tra i fattori d'influenza all'interno della matrice.

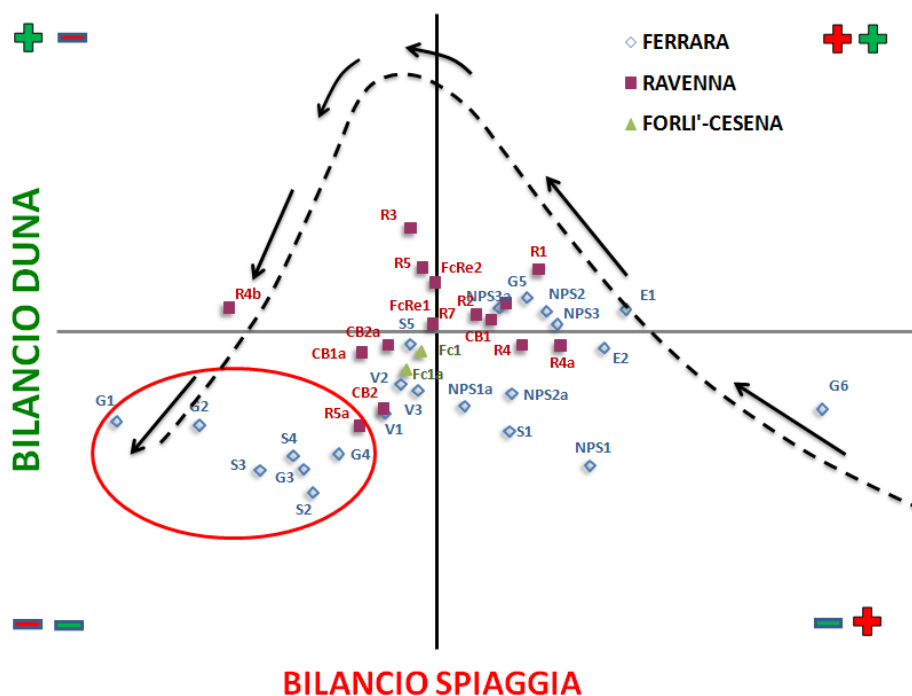


Figura 109 – Diagramma di bilancio evolutivo (variazioni areali) della duna e della spiaggia (Modello di Psuty, 1968): in rosso sono evidenziati i casi più in crisi.

### ***Variazione della linea di riva***

L'analisi della variazione della linea di riva ha riguardato gli anni 2000 e 2008. Nell'analisi sono stati considerati solo questi anni poiché lo scopo è quello di avere un riferimento a grande scala temporale da contestualizzare e inserire, con la Teoria dei

Sistemi, all'interno della matrice d'interazione (BIM). Durante le campagne di rilievo, sono stati misurati i punti in prossimità della linea di riva, in modo da ricavare in fase di post-processing l'andamento della stessa.

La linea di riva relativa al 2000 è stata invece fornita dalla Regione Emilia-Romagna (bancadati RER) a sua volta ricostruita da rilievi diretti. La misura delle variazioni lineari è stata computata in corrispondenza dei singoli profili attraverso l'utilizzo di un tool di ArcMap (DSAS) in grado di ricavare tali valori in maniera precisa e automatica. Il tasso di variazione finale (nell'intervallo dell'estensione lineare dei sistemi spiaggia-duna considerati) è stato ricavato dalla media delle variazioni ai singoli profili. Anche in questo caso, per i dettagli sui dati ricavati per ciascun sistema spiaggia-duna considerato, si faccia riferimento al capitolo sulla Teoria dei Sistemi, nel quale questo parametro è tra i fattori di condizionamento all'interno della Matrice BIM.

#### ***7.4\_ Caratteri tessiturali dei sedimenti***

La caratterizzazione tessiturale ha rappresentato una fase molto importante del lavoro, in quanto fornisce una serie di informazioni utili alla classificazione dinamica della duna, in quanto strettamente connesse ai regimi energetico-ambientali locali (Barndorff e Nielsen, 1989; Wyrroll, 1985), sia della spiaggia che della duna. In corrispondenza delle sezioni trasversali lungo le quali sono state condotte le campagne topografiche, si è proceduto anche alla campionatura dei sedimenti superficiali.

È stato prelevato un campione per ogni settore morfologico caratterizzante il profilo, in particolare sulla spiaggia emersa e sopra la duna, in posizioni sistematicamente prestabilite, e in numero sufficientemente rappresentativo per ciascun apparato (variabile in funzione del numero e della lunghezza dei profili).

Dopo il trattamento preliminare, l'analisi in laboratorio è stata eseguita mediante bilancia di sedimentazione, quest'ultima preferibile rispetto ad altre tecniche di analisi, in quanto progettata sulla base di processi fisici che meglio approssimano quelli naturali. La scelta di utilizzare tale metodologia deriva dalla volontà di caratterizzare esclusivamente la frazione sabbiosa del sedimento, e questo per due motivi principali: la rappresentatività tessiturale dei campioni analizzati (sia prelevati in situ che campionati durante la sperimentazione eolica), i



quali risultano costituiti per gran parte da sedimenti con gli intervalli di phi tipici delle sabbie (da 2.0 a 4.0  $\phi$ ), per cui è la sabbia che contribuisce maggiormente all'evoluzione morfodinamica delle spiagge e a maggior ragione delle dune. Inoltre, in tutte le analisi effettuate il contenuto della frazione più fine è risultata sempre al di sotto del 5% in massa dei campioni prelevati, per cui si è concluso che finiscono per non incidere nella determinazione dei parametri tessiturali (secondo il metodo di Folk & Ward, 1957).

Sono stati quindi estrapolati: Diametro medio, Mediana, Moda, , Classazione, Asimmetria. Di seguito verrà fornita una breve descrizione dei parametri statistici considerati:

**DIAMETRO MEDIO:** è una media della dimensione dei granuli che costituiscono il campione in esame; nella formula di Folk e Ward (1957) sono utilizzati 3 percentili (16, 50, 84); utilizzando più percentili il valore numerico ottenuto si avvicina al valore reale del diametro medio. Rappresenta un parametro importante ai fini del lavoro, in quanto nelle formulazioni del calcolo del tasso di trasporto eolico (Capitolo 8). è l'unico (comuni a tutte le formulazioni) che rappresenta le caratteristiche granulometriche del sedimento trasportato dal vento.

**MEDIANA ( $D_{50}$ ):** è la dimensione delle particelle al centro della distribuzione, ovvero il diametro corrispondente al 50 % della curva cumulativa. Come si vedrà in seguito, proprio tale valore è stato scelto per la rappresentatività tessiturale generale del sistema all'interno della matrice d'interazione BIM, sia della duna che della spiaggia emersa; per tale motivo l'analisi è stata concentrata solo sulla variabilità spaziale del  $D_{50}$ , per la discussione sulla quale, si rimanda al Capitolo 8 (Paragrafo Parametrizzazione della matrice BIM). Le ragioni sono le stesse indicate ad inizio paragrafo: cercare di uniformare l'analisi e la presentazione dei risultati allo scopo principale del lavoro, visto che tutti i dati raccolti ed esaminati sono serviti a implementare la matrice d'interazione.

**MODA:** è il diametro particellare più frequente, indicato dal punto più ripido della curva cumulativa o dal punto più alto della curva di frequenza.

**CLASSAZIONE o DEVIAZIONE STANDARD o SORTING:** è la diffusione della distribuzione intorno alla media, indica cioè quanto la distribuzione granulometrica differisce dal valore del diametro medio; è indipendente dalla grana media ed indica, in generale, il grado di elaborazione a cui è stato sottoposto un sedimento. La classazione esprime la capacità selettiva del mezzo di trasporto, cioè la sua capacità di prelevare e/o depositare i

granuli: abbandonando quelli più grossolani e prendendo in carico quelli più sottili. Come si I sedimenti eolici e di spiaggia, ad esempio, sono tra i più classati in natura (Bosellini et al., 1989; Ricci Lucchi, 1980).

**ASIMMETRIA o SKEWNESS:** evidenzia l'omogeneità della popolazione granulometrica, cioè se i valori sono distribuiti equamente da una parte all'altra della posizione centrale, o baricentro della curva. Essa ha un segno positivo (+) se la curva ha una coda verso diametri sottili e un segno negativo (-) se la curva ha una coda verso diametri grossolani; una curva perfettamente simmetrica è definita con asimmetria zero. L'asimmetria è dovuta ad aggiunte o sottrazioni di materiale nelle code della curva granulometrica originaria. Nelle sabbie di duna l'asimmetria è generalmente positiva (coda di materiale fine): il mezzo di trasporto (vento) è generalmente in grado di trasportare sedimenti che vanno dalla sabbia media alla sabbia fine/molto fine (comunque al di sotto dei  $2\phi$ ); nelle sabbie di spiaggia invece l'asimmetria è generalmente negativa (coda di materiale grossolano) per l'allontanamento delle frazioni sottili, sia da parte del vento che del moto ondoso (Bosellini et al., 1989; Ricci Lucchi, 1980).

Per motivi di uniformità nella presentazione dei risultati, come per gli altri parametri, anche per la caratterizzazione tessiturale, si rimanda alla sezione dedicata all'applicazione della matrice d'interazione (Capitolo 8).

## **6.3\_ CLASSIFICAZIONE DELLE DUNE COSTIERE REGIONALI**

**WORD KEY.** (Descrizione della classificazione proposta)

---

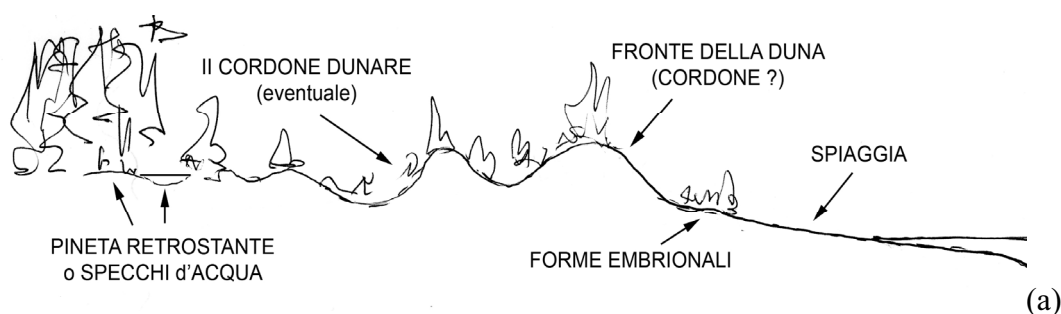
Dall'analisi congiunta delle varie classi di appartenenza è stato quindi possibile estrapolare 4 configurazioni morfoevolutive in cui ogni sistema spiaggia-duna dell'Emilia-Romagna può riconoscersi ed essere classificato:

### ***A. SISTEMI con TENDENZA a CRESCITA NATURALE***

Il sistema si presenta completo di tutti gli elementi morfologici, vegetazionali e antropici tipici di un ambiente che gode di "buona salute" (caratterizzato cioè da un sostanziale equilibrio tra spiaggia e duna). Dal punto di vista morfodinamico la spiaggia antistante mostra una sostanziale stabilità, con tassi di variazione non

superiori ai  $\pm 15\text{cm/anno}$ , mentre il piede della duna, in funzione dell'assetto morfologico (altezza duna e ampiezza spiaggia) può mostrare anche tassi di avanzamento moderatamente elevati ( $>1\text{m/anno}$ ). I processi di erosione indotti dal moto ondoso sono molto improbabili, e comunque sempre limitati nell'estensione. La spiaggia è sempre mediamente ampia ( $A_{\text{min}} > 50\text{m}$ ), mentre le dune si presentano in forme di cordoni lineari ben sviluppati e stabilizzati, continue e leggermente ondulate.; spesso presentano una rilevante continuità laterale ma ciò che li caratterizza di più è lo sviluppo di una fascia più o meno ampia di forme dunari esterne incipienti, la cui ampiezza e quota, sono funzione non solo dell'ampiezza della spiaggia, ma anche del *fetch efficace*. Sono forme quasi sempre ben vegetate ( $D_c > 50\%$ ), e in più, presentano una distribuzione delle varie fitocenosi sostanzialmente uniforme e ben ordinata ( $\text{NDVI} > 0.7$ ). A volte può accadere che la maggiore densità della copertura vegetale, unita spesso ad una maggiore altezza della cresta della duna, finisce per condizionare i processi di trasporto e limitare la deposizione nel settore più basso del lato sopravvento, per cui la morfodinamica tende progressivamente a coinvolgere solo la parte anteriore può prospiciente la spiaggia, e a favorire una leggera asimmetria del profilo topografico risultante. Generalmente questo si presenta con pendenze massime che non superano i  $20^\circ$  sul lato sottovento e verso mare, con un raccordo ampio e leggermente ondulato (dovuto allo sviluppo delle forme embrionali).

Dal punto di vista antropico, l'incidenza è bassa o del tutto assente: il sistema spesso si trova in aree protette (Parchi o Riserve), le uniche oggi sul territorio regionale a poter garantire un certo grado di naturalità; ciò nonostante possono essere presenti opere di difesa a mare (aderenti, Es. Pennelli o tubi longard) realizzate per mitigare l'erosione, sempre intensa su gran parte del litorale. Lo schema appena descritto si sintetizza con un profilo rappresentativo (disegno), che mostra un andamento come quello mostrato in Figura 110.



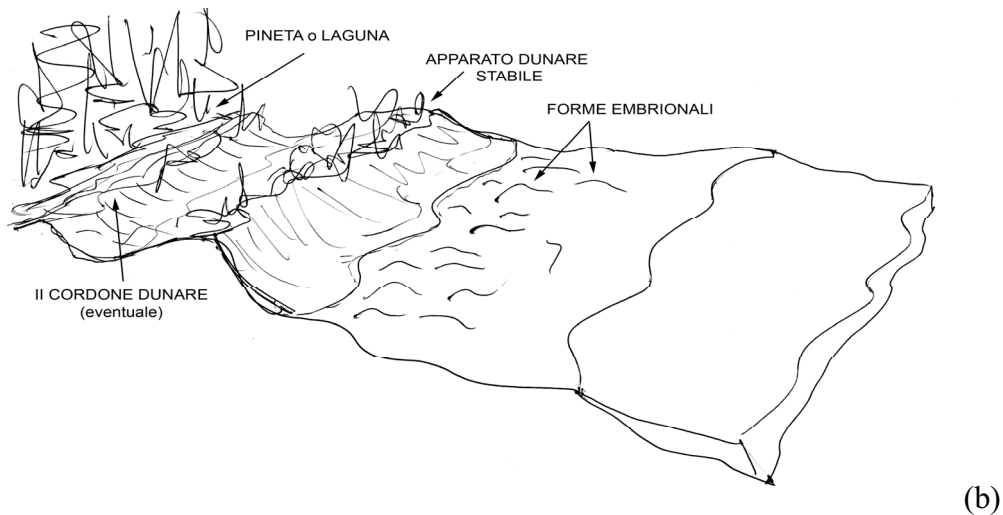


Figura 110 – Esempio di schemi semplificati, in sezione (a) e in prospettiva (b) della configurazione tipica di sistemi spiaggia duna in equilibrio e la cui evoluzione è libera da condizionamenti umani.

## B. SISTEMI con TENDENZA ad EROSIONE

Il sistema si presenta completamente in disequilibrio: la spiaggia antistante è praticamente assente ( $Amp < 10m$ ), mentre il piede della duna è segnato dalla presenza e sviluppo di una scarpata di erosione. Questa si presenta molto pronunciata ( $h > 1,5m$ ), e con pendenze che superano i  $60^\circ$ : si tratta di dune residuali, riattivate in più punti dal moto ondoso che arriva a incidere il cordone, provocando frequenti fenomeni di crollo ed instabilità. La continuità laterale è seriamente compromessa: gli attacchi da parte del mare durante le mareggiate più violente producono fenomeni di sovrizzo oltre la cresta, per cui nell'immediato retroduna sono frequenti ed evidenti i segni di tali attacchi (*washover*). L'assetto è così compromesso che anche durante le stagioni calde, la duna non ha il tempo di riequilibrarsi con la spiaggia, per cui le pendenze e le evidenze morfologiche erosive (*blowouts*) restano durante tutto l'arco dell'anno e non vi sono possibilità di recupero naturale (almeno a breve-medio termine).

Essendo dune riattivate, è comunque presente una copertura vegetazionale buona ( $DC > 20\%$ ), ma la distribuzione delle varie specie è fortemente in disequilibrio per cui lo stress a cui sono soggette le piante è particolarmente elevato ( $NDVI < 0.3$ ). L'azione da parte del moto ondoso, squilibria l'assetto in termini di simmetria e ondulazione, per cui lungo una sezione longitudinale è evidente solo l'allineamento corrispondente alla scarpata di erosione.

I processi eolici sono principalmente di tipo erosivo: non essendoci disponibilità di materiale (la spiaggia è mediamente troppo ristretta), il vento agisce direttamente entro i varchi prodotti dal mare, aumenta la sua velocità ed erode le superfici dunari con maggiore intensità, accelerandone il processo di smantellamento. Anche in questo caso l'incidenza antropica è generalmente bassa: il sistema spesso si trova al bordo dei tratti di costa più urbanizzati, o all'interno di siti protetti (Aree Parco), e come nel precedente, possono essere presenti opere di difesa a mare (Pennelli o tubi longard), installate per mitigare l'erosione. Lo schema appena descritto si sintetizza con un profilo rappresentativo (disegno), che mostra un andamento come quello mostrato in Figura 111.

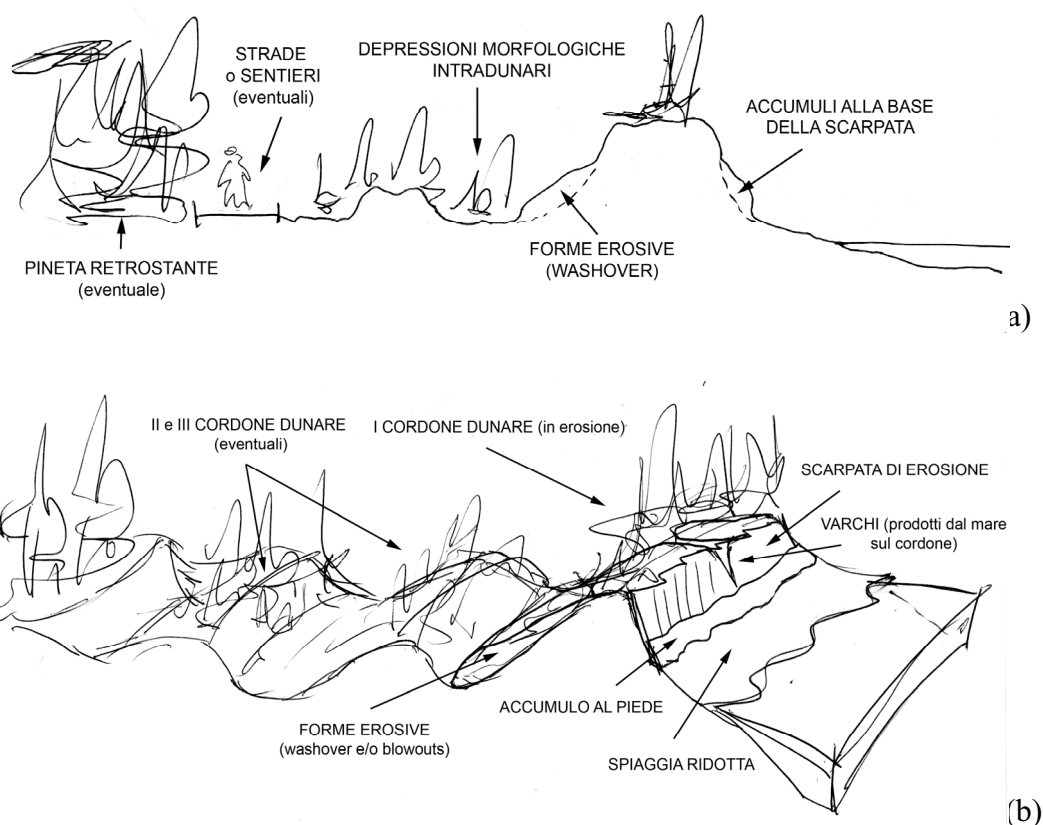


Figura 111 – Esempio di schemi semplificati, in sezione (a) e in prospettiva (b) della configurazione tipica di sistemi spiaggia-duna soggetti ad erosione naturale.

### C. SISTEMI a SVILUPPO CONTROLLATO

Il sistema spiaggia-duna è parte integrante di quello urbano-costiero, poiché l'incidenza antropica è talmente elevata da non poter più parlare di sistema naturale.

Anche in questo caso si tratta di dune preesistenti e riattivate: a differenza del gruppo precedente però, la dinamica che regola la loro evoluzione non è più di tipo naturale, ma esclusivamente antropica. Dal punto di vista morfologico restano le caratteristiche critiche di un assetto molto fragile, costituito da pendenze elevate del raccordo tra cresta e piede della duna (mediamente  $>40^\circ$ ), e da valori elevati dell'indice di discontinuità ( $>0.4$ ) per cui non è neanche più possibile parlare di “apparato dunare”, ma di pure e semplici “dune”: si tratta di lembi isolati e chiusi spesso entro barriere (fisse o mobili), che si fa fatica a correlare tra loro per stabilire il passaggio da un sistema ad un altro.

L'assetto morfologico fortemente frammentato condiziona anche i processi eolici per cui il materiale prelevato dalla spiaggia spesso finisce al di fuori del sistema proprio per la mancanza della una barriera morfologica costituita dall'apparato. La spiaggia si presenta molto variabile in ampiezza (mai al di sotto dei 30m), e quasi sempre con pendenze molto basse ( $<3^\circ$ ), a causa dell'intenso rimaneggiamento da parte dell'uomo (connesso alle attività turistiche durante il periodo estivo).

La copertura vegetazionale è mediamente elevata, ma mostra una certa variabilità di intervallo ( $30\% < DC < 70\%$ ): al di sopra della duna, la vegetazione resiste, ma alla base è praticamente inisistente, per cui è possibile tracciare il limite morfologico di passaggio dalla duna alla spiaggia, proprio in corrispondenza del bordo della copertura vegetale; anche in questo caso la distribuzione delle varie specie è generalmente in disequilibrio ( $NDVI < 0.35$ ), anche e soprattutto a causa dell'azione dell'uomo che non disdegna l'istallazione di strutture (mobili) anche al di sopra della duna (Figura 112).

Il mare gioca un ruolo minimo e secondario nell'evoluzione di questi sistemi, soprattutto della duna: la forte urbanizzazione delle aree in cui essi si rinvergono è caratterizzata spesso da numerose opere di difesa (non solo di tipo aderente come nei due casi precedenti) e frequenti sono gli interventi in forma di ripascimento che mirano a salvaguardare le ampiezze di spiaggia, per cui il mare difficilmente arriva a lambire la duna.





Figura 112 – Esempio di antropizzazione al di sopra dell'apparato dunare, con strutture mobili che vengono utilizzate dai turisti durante i periodi estivi (Lido Adriano, RA).

Lo schema appena descritto si sintetizza con un profilo rappresentativo (disegno), che mostra un andamento come quello mostrato in Figura 113.

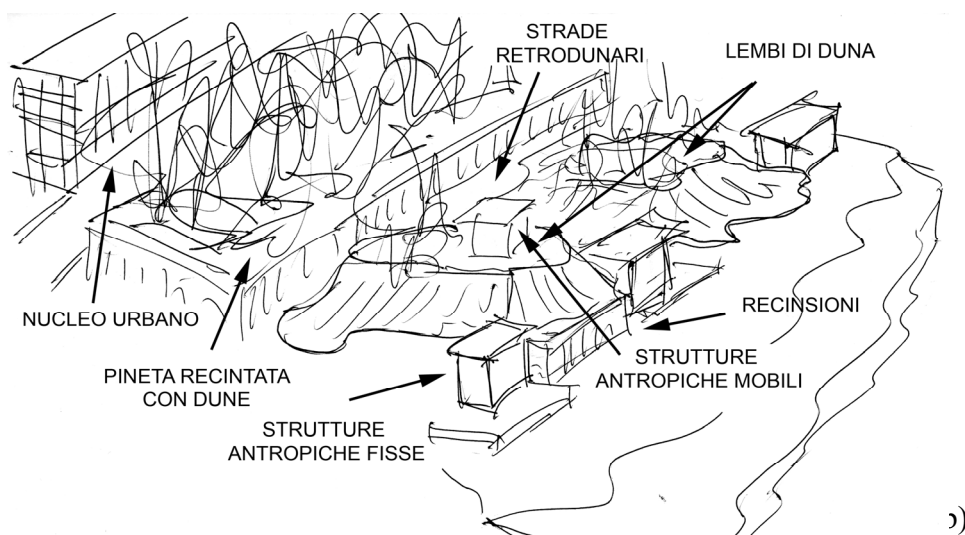
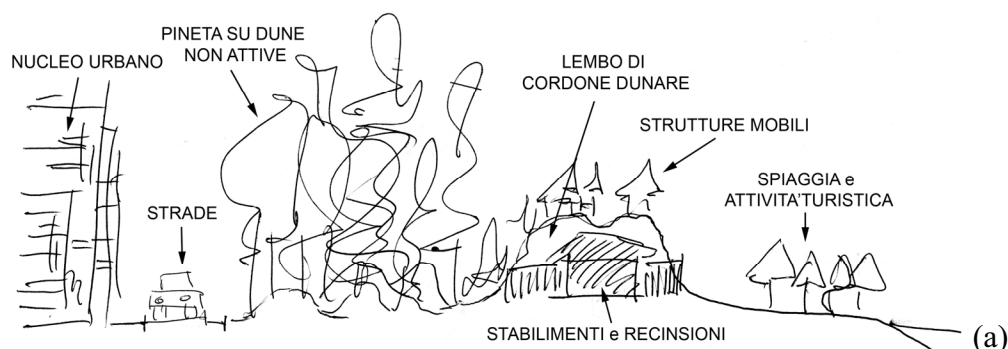


Figura 113 – Esempio di schemi semplificati, in sezione (a) e in prospettiva (b) della configurazione tipica di sistemi spiaggia-duna la cui evoluzione è controllata esclusivamente dalla gestione antropica del territorio.

#### **D. SISTEMI a SVILUPPO MISTO**

A tale categoria appartengono tutti quei sistemi che mostrano una configurazione intermedia tra le categorie sopra elencate (Stadio 2 e 3), per cui non si riesce ad inquadrarli in maniera netta in nessuno di essi. In realtà la difficoltà nasce dall'estensione longitudinale degli apparati dunari coinvolti (in generale > 700m), e la variabilità degli assetti morfologici fanno sì che il cordone dunare per alcuni tratti si configura secondo le caratteristiche dello stadio 2, mentre in altri mostra evidenze evolutive più vicine allo stadio 3. L'apparato dunare è consolidato, anche in questo caso spesso "riattivato" dalle dinamiche costiere per cui l'erosione arriva a coinvolgere parte del loro sviluppo.

L'ampiezza della spiaggia antistante e le pendenze del raccordo fianco mare della duna variano dalle condizioni tipiche di un'erosione naturale spinta, ad assetti pseudo-stabili di equilibrio: in molti di questi casi il controllo da parte dell'uomo può rappresentarne la causa principale, in quanto, intervenendo su un tratto di paraggio per modificarne il trend erosivo (Es. con l'installazione di opere di difesa trasversali), finisce per condizionare anche la morfodinamica del tratto limitrofo, per cui in poco tempo la duna si trova in erosione. La variabilità longitudinale dei processi, e quindi dell'assetto morfologico che ne deriva, può anche essere legato a condizioni naturali: se il sistema si sviluppa in prossimità di una foce fluviale o di variazioni naturali importanti dell'andamento della linea di costa, si possono produrre gli stessi effetti. L'integrità dell'apparato dunare è sempre tale da riuscire a seguire comunque tutto il suo sviluppo: ciò nonostante, nei tratti in erosione non mancano forme trasgressive come blowouts, e più spesso washover.

La vegetazione rispecchia il trend del sistema: pur rimanendo sempre su soglie elevate per densità di copertura ( $DC > 50\%$ ), in alcuni tratti si sviluppa con una distribuzione più ordinata e conforme al profilo tipico di un'ambiente di duna ( $NDVI \approx 0.5$ ), mentre in altri può presentare un moderato livello stress a causa della sovrimposizione tra le diverse fitocenosi per l'incedere dell'erosione ( $NDVI < 0.3$ ). Lo schema appena descritto si sintetizza con un profilo rappresentativo (disegno) , che mostra un andamento come quello mostrato in Figura 114.

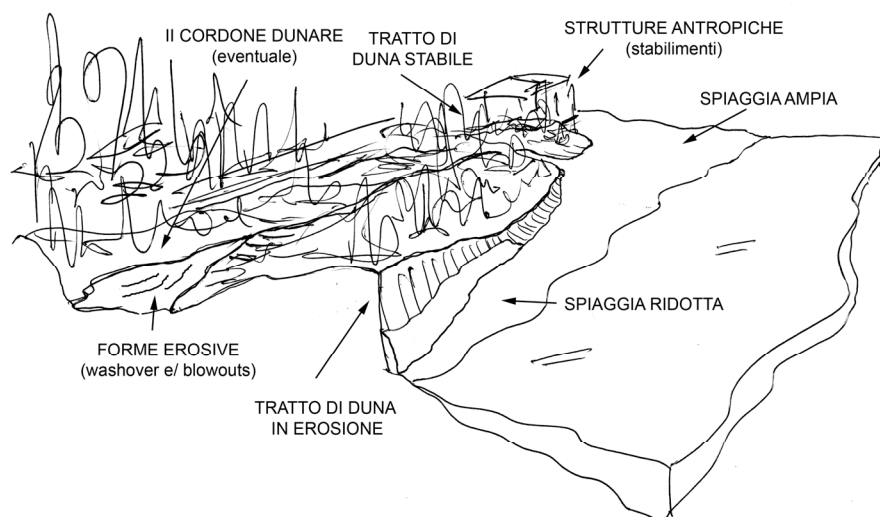


Figura 114 – Esempio di schemi semplificati, in prospettiva, della configurazione tipica di sistemi spiaggia-duna la cui evoluzione è mista tra le prime due categorie, con tratto in erosione e uno in sostanziale equilibrio.

Dall'applicazione della classificazione (così definita) ai 40 tratti considerati in questo lavoro, emerge che il 35% (14 su 40) dei sistemi spiaggia-duna è classificabile come sistemi con *tendenza ad erosione (B)*, il 30% (12 su 40) presenta uno *sviluppo controllato (C)*, il 25% (10 su 40) sono caratterizzati da *sviluppo misto (D)*, e solo il 10% (4 su 40) mostra una tendenza alla *stabilità/crescita (A)* (Figura 115).

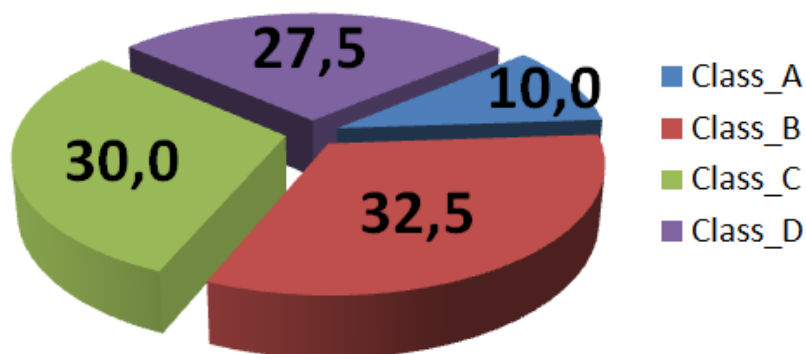


Figura 115 – Diagramma a torta della distribuzione percentuale ricavata dall'applicazione della classificazione proposta ai 40 sistemi spiaggia-duna esaminati;

Come si evince chiaramente dalla distribuzione delle percentuali del diagramma, la classificazione mette in risalto una situazione generale non certo positiva: gran parte dei sistemi analizzati (il 60%) è in condizioni di erosione totale (B) o parziale (D), e del restante 40%, il 30% è in condizioni di avere scarse probabilità di evolvere (crescere) in maniera



naturale, visto che risulta fortemente condizionata (in molti casi vincolata) da strutture antropiche più o meno adiacenti. Nelle Figure 116, 117, 118, 119 sono rappresentati esempi di sistemi classificabili rispettivamente secondo le classi A, B, C, D.



*Figura 116 – Esempio di sistema spiaggia-duna classificabile secondo la classe A (Sistemi con tendenza a crescita naturale) Lido degli Estensi (Ferrara);*



*Figura 117– Esempio di sistema spiaggia-duna classificabile secondo la classe B (Sistemi con tendenza ad erosione) Scanno di Goro (Ferrara);*



*Figura 118 – Esempio di sistema spiaggia-duna classificabile secondo la classe C (Sistemi a sviluppo controllato) Marina di Ravenna (Ravenna);*



*Figura 119 – Esempio di sistema spiaggia-duna classificabile secondo la classe D (Sistemi a sviluppo misto) Lido di Spina (Ferrara);*

In Figura 120 è rappresentata la distribuzione delle tipologie di sistemi così definiti lungo la costa regionale: i sistemi in crisi si trovano localizzati un pò ovunque, ma nella parte più a nord (Scanno di Goro) e in corrispondenza del tratto più a sud di Lido di Spina (fino a Casal Borsetti) sembrano aggregarsi e costituire dei settori ben definiti. Anche i sistemi classificati come MISTI (Class\_D) mostrano evidenze erosive, e quindi di instabilità, ma sviluppandosi sia tra quelli in erosione, che tra quelli classificabili come “A SVILUPPO CONTROLLATO” (Class\_C) è difficile estrapolare considerazioni valide a livello generale. I sistemi a sviluppo controllato si ritrovano naturalmente in corrispondenza del tratto compreso tra Lido di Volano (Ferrara) e Porto Garibaldi (Ferrara) e nel Ravennate, laddove il turismo ha intaccato maggiormente e la presenza di strutture turistiche ha contribuito a fissare le dune entro spazi ben definiti.



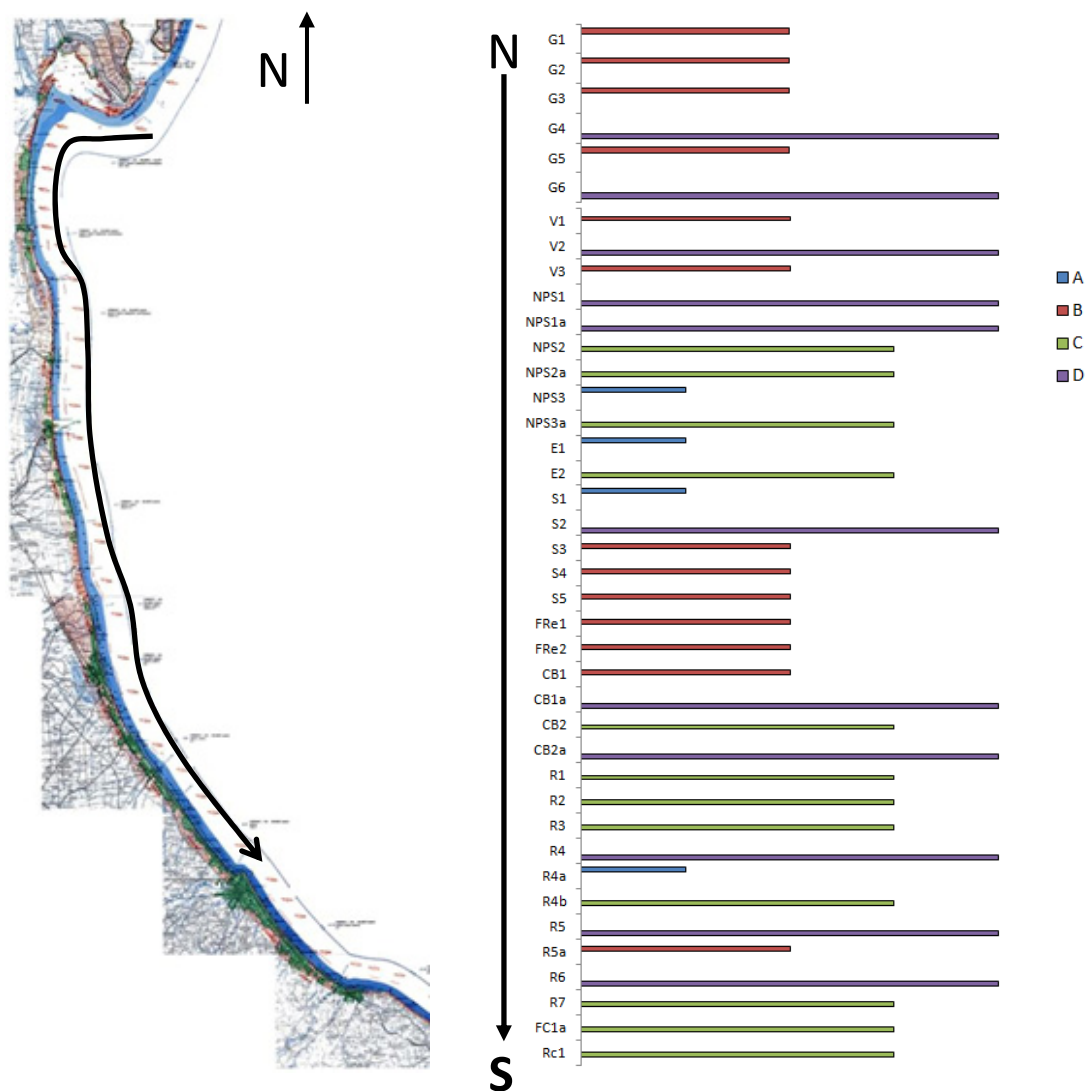


Figura 120 – Distribuzione lungo la costa emiliano-romagnola dei sistemi spiaggia-duna analizzati, suddivisi per classe di appartenenza;



## Cap 7\_ TRASPORTO EOLICO

**KEY WORDS** (descrizione dei processi fisici che presiedono alla formazione/sviluppo delle dune costiere)

---

Le dune costiere sono sistemi estremamente dinamici, i cui tassi di evoluzione, in termini di morfologie che i processi generano e/o modificano, sono sempre incerti, poichè associati a fattori complessi che hanno un ruolo importante nel modificare il trasporto eolico sedimentario (Nordstrom et alii, 1996; Bauer & Davidson-Arnoot, 2002).

### 7.1\_ DINAMICA EOLICA IN CAMPO DUNARE: PROCESSI EOLICI E MECCANISMI DI TRASPORTO

**KEY WORDS** (generalità e descrizione dei processi fisici di trasporto)

---

Si definisce processo eolico qualsiasi azione operata dal vento (Gary et alii, 1972). Al di sopra di una superficie sabbiosa, le forze che agiscono sui sedimenti sono due: la forza di trascinamento (drag force), legata alla generazione degli sforzi prodotti dall'azione del vento a livello superficiale, e la forza di sollevamento (lift force), legata alla diminuzione di pressione al di sopra dei singoli granuli a causa dell'incremento della velocità per effetto Bernoulli.

La forza di sollevamento decresce rapidamente in funzione della distanza percorsa dal sedimento, contrariamente alla forza di trascinamento, che continua ad aumentare all'incrementare della quantità dei sedimenti erosi dalla superficie. La risultante di queste due forze è positiva e in grado di vincere la forza peso determinando la presa in carico e, quindi, il trasporto dei sedimenti costituenti la spiaggia (Figura 121).

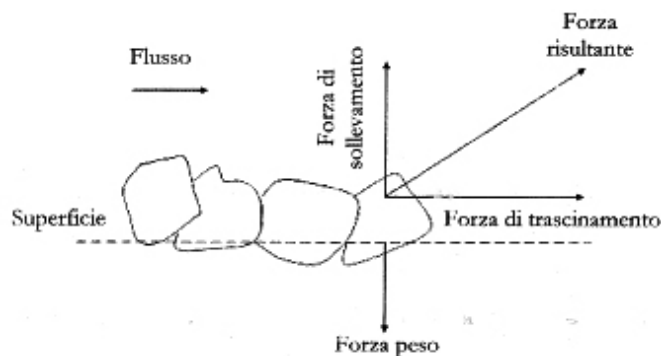


Figura 121 - Diagramma schematico delle diverse forze agenti sui sedimenti.

Come riassunto da Raudkivi (1976) si possono distinguere tre meccanismi principali di trasporto eolico (Figura 122):

1. **SOSPENSIONE** (*suspension*)
2. **SALTAZIONE** (*saltation*)
3. **TRASCINAMENTO** (*surface creep*)

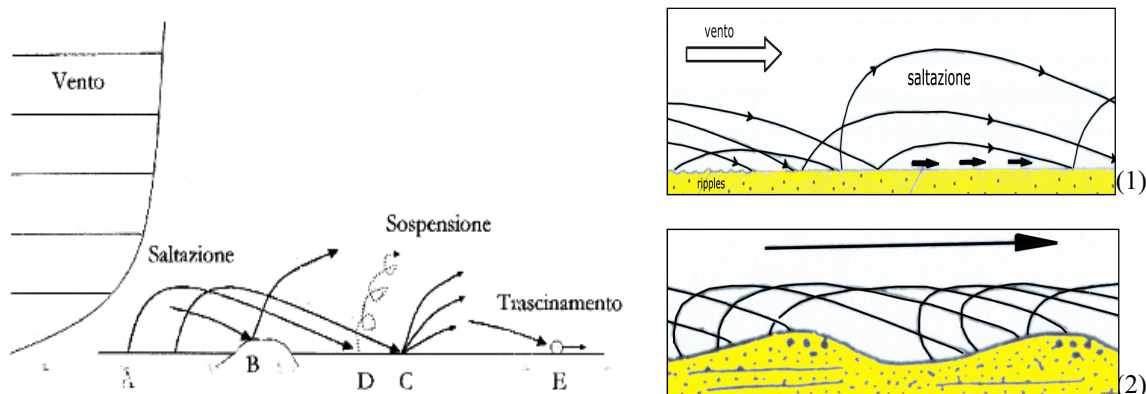


Figura 122 – (sx), diagramma delle 3 principali modalità di trasporto eolico: lo sforzo di taglio esercitato dal vento determina il sollevamento dei granuli per saltazione (A). Questi, ricadendo al suolo, possono colpire rocce o sedimenti consolidati (B), causandone eventualmente un'erosione, e continuando nel loro movimento per saltazione. In (C) alcuni granuli sono messi in movimento a seguito dell'impatto con un granulo in saltazione. In (D) è rappresentato il processo di diffusione delle particelle più fini. Infine, in (E) è evidenziato il trasporto per trascinamento (modificato da Greeley Iversen, 1985); (dx), schema semplificato delle relazioni esistenti tra gli aspetti fisici dei meccanismi appena descritti (traiettorie), e le forme che poi vengono prodotte: dai ripples (1) fino alle dune (2) (Raudkivi, 1976).

Il contributo del sedimento portato in carico dal vento per sospensione è del tutto trascurabile nell'ambito della formazione e dell'evoluzione delle dune costiere (Svasek & Terwindt, 1974). Nella seconda modalità di trasporto i granuli, messi in movimento dal vento, vengono sollevati e immessi nello strato turbolento del flusso d'aria, dove si distribuiscono in funzione del loro peso. Vengono poi sospinti in avanti fintanto che non cadono nuovamente verso il basso a causa dell'azione della forza di gravità. Nell'aria i granuli compiono traiettorie molto diverse tra loro a seconda della velocità del vento, della dimensione e della densità del granulo. Owen (1980) calcola l'altezza e la lunghezza di una traiettoria in funzione della

velocità verticale iniziale che un granulo assume nel movimento per saltazione e che Bagnold (1941) stimò simile alla velocità di taglio,  $\mu^*$ . Queste grandezze sono pari rispettivamente a  $0,81 \mu^*/g$  e  $10,3 \mu^*/g$  con  $g$  l'accelerazione di gravità in  $m/s^2$  e  $\mu^*$  la velocità di taglio in  $m/s$ , valori che concordano con quelli proposti da White & Schultz (1977).

Tendenzialmente l'altezza della traiettoria è inferiore ad un decimetro mentre la lunghezza è dell'ordine di diversi decimetri a seconda della velocità del vento (Svasek & Terwindt, 1974). Una tipica traiettoria di una particella in moto per saltazione è evidenziata nella Figura 123.

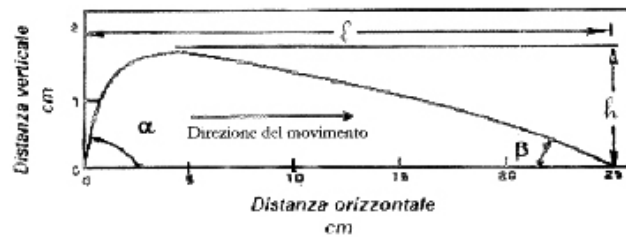


Figura 123 - Tipica traiettoria di una particella in saltazione: il movimento si compie verso destra,  $\alpha$  è l'angolo di sollevamento e  $\beta$  l'angolo di impatto. La scala verticale è esagerata (Modificato da Greeley Iversen, 1985).

L'angolo con cui i granuli colpiscono il suolo è pari a (Greeley Iversen, 1985):

$$\tan \beta = \frac{\text{velocità di impatto del granulo al suolo}}{\text{velocità del vento}} \quad (7.1)$$

Osservazioni sperimentali hanno mostrato come questo angolo rimanga significativamente costante per una vasta gamma di condizioni, con valori compresi fra i  $10^\circ$  ed i  $16^\circ$  (Raudkivi, 1976). Ridiscendendo i granuli possono sia proseguire nel loro movimento per saltazione sia innescarlo ai granuli su cui impattano.

Questa modalità di trasporto rappresenta il processo di trasporto principale dei granuli di sabbia da parte del vento. Il carico di sedimento per saltazione è a (Bagnold, 1941):

$$q_s = c_1 \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \quad (7.2)$$

in cui  $q_s$  è la quantità del trasporto per saltazione espresso in kg/s per metro percorso dal vento,  $c_1$  è una costante empirica,  $d$  è la dimensione media ( $d_{50}$ ) dei granuli, espressa in  $D$  è il diametro di riferimento (quello di un sedimento sabbioso) pari a  $25 \times 10^{-5}$  m,  $\rho_a$  è la densità dell'aria in kg/m<sup>3</sup>,  $g$  è l'accelerazione di gravità in m/s<sup>2</sup> e  $u^*$  è la velocità di taglio in m/s (Svasek & Terwindt, 1974).

Non sempre il vento è efficace nel sostenere questo tipo di trasporto. Il vento, infatti, deve avere una velocità maggiore della velocità di soglia fluida (fluid threshold,  $\mu^*$ ) definita da Bagnold (1941) come "la velocità necessaria per innescare il movimento dei granuli". Questo parametro varia in modo direttamente proporzionale alla granulometria del sedimento. Si definisce, inoltre, velocità di soglia per impatto (impact threshold) la velocità necessaria a mantenere attivo il processo di saltazione, ovvero come definito da Bagnold (1941) "la velocità per cui l'energia che viene trasmessa ai granuli in saltazione è uguale a quella che questi perdono per impatto con altri granuli". Come per la soglia fluida, questo parametro aumenta all'aumentare della dimensione dei granuli. A causa dell'elevato valore di velocità che deve avere il vento per raggiungere la soglia fluida, i granuli più grossolani raramente vengono messi in moto direttamente dall'azione del vento. Generalmente i granuli di dimensioni maggiori di 1 mm sono mossi per trascinamento "indiretto": i granuli in saltazione quando colpiscono i granuli più grossolani non hanno l'energia sufficiente ad innalzarli ma sono in grado di fornire una leggera spinta nel senso della direzione del vento. In questo modo un granulo in saltazione può agire su di un granulo fino 200 volte la sua massa o fino 6 volte il suo diametro (Bagnold, 1941).

Pertanto in questo processo di trascinamento i granuli non vengono direttamente sospinti dal vento, ma ricevono energia dai granuli in saltazione. Questo tipo di trasporto copre circa 1/4 del trasporto totale. Il limite tra le diverse modalità di trasporto (sospensione e saltazione) può essere definito tramite la velocità terminale di caduta libera (terminal velocity,  $U_f$ ) e la velocità di taglio limite (threshold friction speed,  $\mu^*$ ). La velocità terminale (terminal velocity,  $U_f$ ) si ottiene eguagliando le due forze che agiscono su di una particella che cade lungo la verticale: la forza di gravità e la resistenza aerodinamica del corpo:

$$U_f = \sqrt{\frac{4\rho_p g d}{3\rho_a C_d}} \quad (7.3)$$

dove  $\rho_p$  è la densità della particella,  $d$  è il diametro della particella,  $\rho$ , è la densità dell'atmosfera e  $C_d$  è il coefficiente d'attrito, funzione del numero di Reynolds. Il valore della componente verticale della velocità del moto turbolento vicino la superficie è quasi uguale alla velocità di taglio  $u^*$ . Se la velocità terminale  $U_f$  è minore della componente verticale della turbolenza, i vortici del moto turbolento sono in grado di portare le particelle verso l'alto in sospensione mentre, se la velocità terminale è significativamente più elevata della componente verticale del moto turbolento, la traiettoria della particella non viene influenzata dalla turbolenza; si avrà allora il moto per saltazione.

Si può osservare come il movimento per sospensione sfumi gradualmente in quello per saltazione. Un limite tra i due processi può essere comunque posto (Iversen et al., 1976).

$$\frac{U_f}{u_*} = 1 \quad (7.4)$$

L'equazione 3.4 può essere espressa, come detto, esprimendo la velocità di soglia d'attrito (threshold friction speed, definita da Bagnold (1941) pari a:

$$u_{*t} = A_t \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a) g d}{\rho_a}} \quad (7.5)$$

dove  $A_t$  è una costante adimensionale (0,118),  $\rho_s$  è la densità del sedimento (g/cm<sup>3</sup>),  $\rho_a$  è la densità dell'aria (g/cm<sup>3</sup>),  $g$  l'accelerazione di gravità (980 cm/s<sup>2</sup>) e  $d$  è il diametro medio del sedimento, in millimetri.

La determinazione di tale valore è, tuttavia, complessa dato che, come dimostrato da Wiggs et al. (2004), una popolazione di sedimenti di spiaggia possiede, piuttosto che un unico valore, un intervallo di valori variabili da momento a momento in funzione della distribuzione granulometrica dei sedimenti sulla superficie in risposta alle dinamiche eoliche in atto. Il limite dell'equazione (8.4) può pertanto essere riscritto come:

$$\frac{U_f}{u_*} = \frac{U_f}{u_{*t}} = \frac{u_*}{u_{*t}} = 1 \quad (7.6)$$

Il limite tra sospensione e saltazione, pertanto, può esprimersi sia mediante la velocità terminale sia in funzione della velocità di soglia d'attrito.

La morfogenesi delle dune inizia, attraverso i meccanismi sopra descritti, in forme di ripples: quando i granuli tendono a cadere sul lato sopravvento di una piccola depressione, a causa del basso angolo con cui solitamente colpiscono il terreno, formano una superficie obliqua, che varia tra i 10° e i 16° rispetto alla giacitura del terreno stesso. Questi piccoli accumuli (ripples) possono poi crescere fino a diventare dune, raggiungendo un'altezza e una estensione massima, che è funzione dell'intensità prevalente del vento (Figura 124). Una volta formate e stabilizzate le dune sono sufficientemente larghe da determinare un'alterazione del pattern del vento e da produrre una zona d'ombra nel lato sottovento, ciò contribuisce all'ulteriore accrescimento della duna stessa.

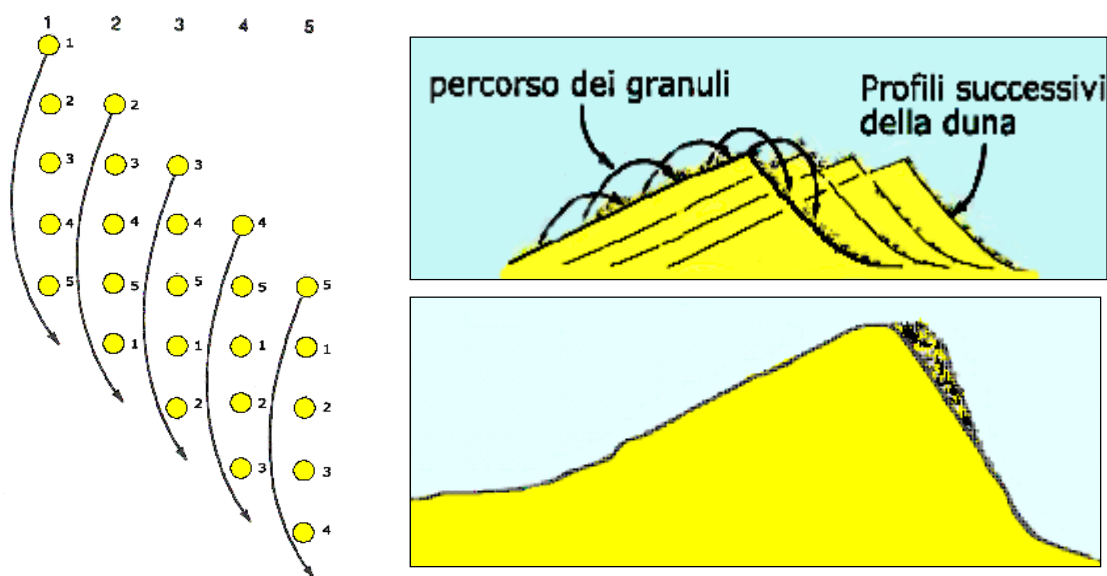


Figura 124 – A sinistra traccia del movimento progressivo dei granuli e, a destra, due schemi della creazione dei nuovi profili della duna.

La presenza della duna determina la formazione di almeno tre diverse zone di trasporto eolico. Sia nella zona sopravvento che in quella sottovento la distribuzione della velocità del flusso eolico, al variare della quota, non ha più il tipico andamento logaritmico (Figura 125).

Se il vento soffia verso terra, si avrà sul lato mare della duna una zona di stagnazione, ampia da due a tre volte l'altezza della duna stessa: qui la velocità del vento è inferiore rispetto a quella del flusso libero che agisce su un terreno pianeggiante (zona di unspread). In prossimità del suolo si può arrivare ad avere anche un'inversione del flusso e lo stesso fenomeno si



registra anche sul lato terra per un'ampiezza che può arrivare a 10 volte l'altezza dell'apparato dunare. Sopra la cresta della duna, invece, la velocità del vento è maggiore rispetto a quella del flusso libero a causa della contrazione delle linee di flusso.

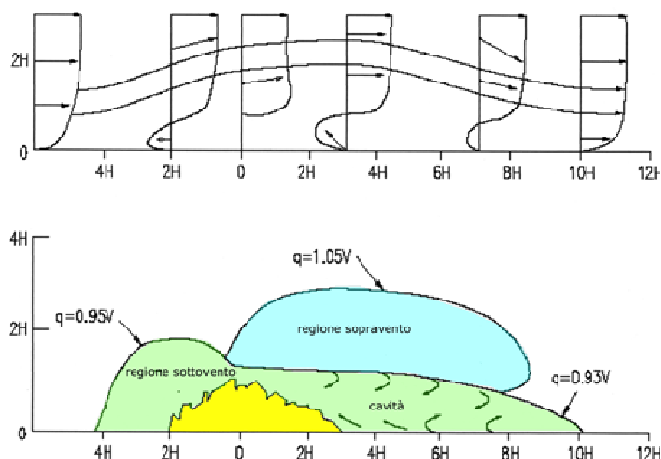


Figura 125 – Campo di vento in prossimità di una duna costiera ( $q$  = velocità media locale del vento,  $v$  = velocità di riferimento in un flusso uniforme sopra la duna). (Hsu, 1988).

## 7.2\_IL TRASPORTO EOLICO SU SUPERFICI IDEALI: MODELLI DI PREVISIONE

**KEY WORDS** (generalità e descrizione dei processi fisici di trasporto)

Nel tempo sono stati sviluppati molti modelli teorici per la determinazione del tasso di trasporto. Tuttavia, i risultati emersi da diverse prove sperimentali mostrano una scarsa correlazione tra il tasso di trasporto reale e quello teorico dedotto dai modelli matematici; questa difformità è da ricercarsi nella carenza stessa dei modelli o degli strumenti utilizzati sul campo per la definizione del tasso reale di trasporto. In ogni modo, a causa delle condizioni al contorno su cui si è sviluppato un determinato modello (per esempio nella definizione dei coefficienti sperimentali), la scelta di un particolare modello ha una importanza fondamentale per l'estrapolazione alla macro e mesoscala dei tassi di trasporto (Sherman et alii, 1998) (Figura 126). Nel paragrafo successivo saranno descritti i principali modelli matematici, in ordine cronologico, utilizzati per la determinazione dei tassi di trasporto eolico. Questi modelli suppongono che il trasporto avvenga su superfici ideali ovvero orizzontali, asciutte, prive d'ostacoli e di vegetazione. Successivamente saranno presi in considerazione i principali

fattori naturali, presenti nei sistemi spiaggia/duna, che appare opportuno analizzare, e quindi utilizzare, al fine di correggere i tassi di trasporto teorici.

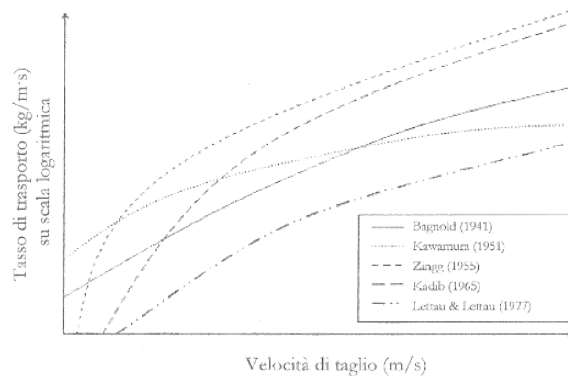


Figura 126 - Confronto teorico tra diversi modelli teorici per il calcolo del tasso di trasporto teorico (Modificato da Sherman et alii, 1988).

Quasi tutti i lavori sperimentali permisero la derivazione di formulazioni basate essenzialmente su sei principi (Ni, Li e Mendoza, 2004):

- Pura correlazione dei dati sperimentali (O'Brien e Rindlaub, 1936).
- Analisi delle relazioni tra lo sforzo di taglio agente alla superficie, la granulometria del sedimento e la perdita energetica del trasporto durante i processi di saltazione (per esempio Bagnold, 1941; Kawamura, 1951; Zingg, 1953; Lettau e Lettau, 1978);
- Analisi tra il numero di particelle interessate dal trasporto e loro traiettoria (Owen, 1964);
- Collegamento tra la traiettoria dei granuli, i processi di collisione con i granuli in riposo sulla superficie e adattamento del profilo della velocità in funzione del sedimento trasportato (Sórensen, 1991);
- Analogia con i processi di trasporto nei fiumi (Kadib, 1965);
- Correlazione tra i dati raccolti sul campo e analisi teorica (Hsu, 1971);

In ogni caso tutte le formule riportate sono costituite da quattro parametri fondamentali: caratteristiche del flusso, granulometria del sedimento ( $d$ ), sforzo di taglio, ( $\mu^*$ ) e sforzo di taglio limite ( $\mu^*_l$ ), legate con il tasso di trasporto  $q$  da equazioni di forma  $q \approx \mu^{*3}$ . Solo nell'equazione di Kadib  $\mu^*$  è collegato ad una funzione probabilistica di tipo Gaussiano. E' da sottolineare anche che le diverse equazioni proposte derivano da osservazioni condotte su

ambienti non omogenei, di tipo “arido” come nel caso di Bagnold o “costiero” in quello di Kadib; questa ulteriore disomogeneità condiziona ulteriormente gli elaborati teorici finali sui tassi totali di trasporto.

### ***Bagnold (1941)***

Il modello di Bagnold, basato su modelli di laboratorio e su principi fisici generali, è probabilmente il più utilizzato. L'utilizzo di questo modello permette una facile correlazione con molte altre ricerche e fornisce una stima intermedia dei tassi di trasporto eolico calcolati da diversi Autori, come mostrato in Figura 6. L'equazione di Bagnold è:

$$q = C_B \frac{\rho_a}{g} \sqrt{\frac{d}{D}} u_*^3 \quad (7.7)$$

dove  $q$  è il tasso di trasporto (g/cm•s),  $C_B$  è un coefficiente numerico empirico, legato alla distribuzione granulometrica della sabbia e variabile da 1.5 a 3.5 (per sedimenti di dune sabbiose naturali il coefficiente è normalmente pari a 1.8),  $\rho_a$  è la densità dell'aria,  $D$  è il diametro medio di riferimento dei granuli di sabbia (pali a 0.25 mm),  $d$  è il diametro medio della sabbia considerata e infine  $u_*$  è la velocità di taglio in cm/s.

### ***Kawamura (1951)***

Kawamura fu il primo ad utilizzare esplicitamente il termine di velocità di taglio limite  $u_*^t$ :

$$q = C_K \frac{\rho_a}{g} (u_* - u_*^t)(u_* + u_*^t)^2 \quad (7.8)$$

in cui  $C_K$  è un coefficiente numerico empirico pari a 2,78; per alcuni ambienti è stato dimostrato che questo coefficiente è più vicino a 1.0 (Horikawa et al., 1984). Ad elevate velocità di taglio, questo modello predice in maniera efficace i tassi di trasporto eolico.

### ***Zingg (1953)***

L'equazione proposta da Zingg segue idealmente il modello proposto da Bagnold (1941):

$$q = C_z \left( \frac{d}{D} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \quad (7.9)$$

dove il coefficiente  $C_z$  è pari a 0,83. Gli altri parametri sono gli stessi descritti per le equazioni precedenti.

### ***Kadib (1965)***

Nel suo lavoro Kadib assunse che parte del trasferimento di energia dal vento al sedimento fosse dovuto all'impatto causato sulla superficie dai granuli in saltazione. Secondo Berg (1983) questo modello è il più efficace nel predire i tassi di trasporto eolico su complessi dunari costieri caratterizzati da sabbia media-grossolana (diametro medio pari a 0,653 mm).

L'espressione di Kadib è:

$$q = \Phi_e \rho_s g \sqrt{g d^3 \frac{(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a}} \quad (7.10)$$

in cui  $\Phi_e$ , è una funzione che identifica l'intensità del trasporto basata sul modello di trasporto proposto da Einstein (1950). Il parametro  $\Phi_e$ , comprende due parametri relativi al flusso stesso,  $\Psi$  e  $\Psi^*$ , e due associati con i sedimenti costituenti la spiaggia,  $I$  concernente al fenomeno di impatto e  $\varepsilon$  alla granulometria dei sedimenti. In questo modello:

$$\Psi = \left( \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \right) \left( \frac{g \cdot d_{CM}}{u_*^2} \right) \quad (7.11)$$

in cui  $d_{CM}$  è in cm, e:

$$\Psi^* = \frac{\varepsilon}{I} \Psi \quad (7.12)$$

Kadib, nel suo lavoro del 1965, fornisce delle tecniche per identificare i fattori  $I$  e  $\varepsilon$  e correlare  $\Psi$  e  $\Psi^*$  con  $\Phi_e$ .

### ***Lettau e Lettau (1977)***

Questo modello è stato sviluppato tramite esperimenti condotti in ambienti aridi ed è in grado di dedurre tassi di trasporto intermedi, rispetto agli altri modelli, e per diverse velocità di soglia utilizzate. La formula è:

$$q = C_L \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho_a}{g} (u_* - u_{*t}) u_*^2 \quad (7.13)$$

in cui il parametro  $C_L$  è pari a 4.2.

### ***Hsu (1986)***

Hsu suggerì invece:

$$q = K \left[ \frac{u_*}{\sqrt{gD}} \right]^3 \quad (7.14)$$

dove  $K$  rappresenta un coefficiente adimensionale del trasporto eolico di sabbia. Gli altri parametri sono analoghi a quelli indicati in precedenza.  $K$  è in funzione del diametro granulometrico dei sedimenti e può essere dedotto dalla seguente equazione:

$$\ln K = -9,63 + 4,91d \quad (7.15)$$

Da cui:

$$K = e^{-9,63+4,91d} \quad (7.16)$$

in cui  $d$  è il diametro medio in millimetri, e  $K$  in g/cm-s.

### ***Sørensen (1991)***

Il cui modello analitico prevede:

$$q = S_S \rho_a u_* (u_* - u_{*t}) (u_* + 7,6u_{*t} + 205) \quad (7.17)$$

dove  $S_S$  è pari a 0.0004.

### *Ni et alii (2004)*

Ni, Li e Mendoza (2004) collegarono al concetto di tasso di trasporto eolico, quello di funzione probabilistica delle resistenze legate agli sforzi di taglio, estrapolando, da sperimentazioni compiute su modelli fisici, il valore  $q$  come:

$$q = 0.023 \left( \frac{P}{1-P} \right) \rho_s \sqrt{\left[ \frac{(\rho_s - \rho_a) g d^3}{\rho_a} \right]} \quad (7.18)$$

in cui  $P$  corrisponde proprio alla distribuzione probabilistica dello sforzo di taglio,  $u^*$ .

## **7.3\_IL TRASPORTO EOLICO SU SUPERFICI NON-IDEALI: FATTORI DI CONTROLLO**

**KEY WORDS** (generalità e descrizione dei processi fisici di trasporto)

---

Tutte le equazioni prima esposte assumono che il trasporto avvenga su superfici ideali. Quando quest'ipotesi non può essere accettata, i tassi di trasporto reali deviano significativamente da quelli presunti.

E' pertanto opportuno analizzare i fattori ambientali locali al fine di correggere i tassi di trasporto teorici. In più, ogni equazione è elaborata a partire dalle specifiche caratteristiche morfosedimentologiche dello sito di studio e pertanto nessuna equazione appare, ad oggi, essere utilizzabile universalmente. A fronte di ciò l'analisi dei vari parametri ambientali naturali, di seguito elencati, assume un ulteriore interesse per raffinare il modello teorico predittivo al fine di ottenere un modello il più approssimato possibile alle dinamiche naturali.

### *a. Umettamento della superficie*

Il contenuto d'acqua nei sedimenti è un importante fattore di controllo nella riduzione dei tassi di trasporto eolico. Difatti, sia le forze adesive, di natura elettrostatica, che quelle tensionali contribuiscono enormemente a trattenere le particelle impedendo il loro trasporto, cosicché la



velocità minima per innescare i processi di saltazione aumenta considerevolmente (Van Dijk et al., 1996).

In letteratura sono riportati molti modelli per la predizione degli effetti del contenuto d'acqua (surface moisture content) e sulle velocità di soglia critiche necessarie per il dislocamento delle particelle (Chepil, 1956; Belly, 1964; Hotta et al., 1984; McKenna-Neumann e Niclding, 1989; Gregory e Darwish, 1990; Saleh e Fryrear, 1995; Shao et al., 1996; Fécan et al., 1999). La maggior parte di questi modelli prevede la seguente formulazione:

$$u_{*tw} = u_{*f} f(\text{umidità}) \quad (7.19)$$

in cui  $u_{*tw}$  è la velocità di soglia (m/s) in presenza di umidità;  $u_{*f}$ , in condizioni asciutte;  $f$  è una funzione che caratterizza l'umidità del sedimento espressa in termini di percentuale d'acqua,  $w$  (kg/kg) o  $\theta$  (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), o di potenziale di capillarità  $\Psi_i$ , (Pa). In caso sia disponibile un valore medio di umidità su di un campione superficiale i dati ottenuti da Corneils e Gabriels (2003) evidenziano come il modello proposto da Hotta et al. (1984) sia il migliore; al contrario, laddove la determinazione della velocità di soglia critica sia determinata da una corretta misurazione del contenuto in acqua, i modelli empirici di Chepil (1965) e Saleh e Fryrear (1995) sono le migliori alternative. In ogni caso, a discapito dei molti modelli proposti, esiste ancora una discordanza nei risultati legata sia alle diverse metodologie utilizzate per la determinazione del contenuto in acqua, sia per le differenti scale temporali di investigazione. Difatti, i dati collezionati su lunghi periodi (giorni o mesi) mascherano gli effetti a breve termine di specifiche giornate piovose. Ugualmente, su analisi a piccola scala temporale, cambiamenti di velocità o di direzione nel vento influenzano i contributi locali delle precipitazioni sul trasporto sedimentario (Jackson e Nordstrom, 1998).

Le misurazioni possono essere effettuate o manualmente, campionando una porzione di sedimento di diverso spessore (da millimetrico a centimetrico) definendo, per differenza di peso, il contenuto in acqua, o attraverso elementi piezoresistivi o strumenti appositi come il M12x Delta T (Yang e Davidson-Arnott, 2005). La maggior parte delle ricerche si riferiscono ad un'analisi dell'umettamento il più delle volte su misure condotte sulla spiaggia. Tuttavia, come dimostrato da Yang e Davidson-Arnott (2005) esiste una forte variabilità spaziale e temporale sul contenuto in acqua dei sedimenti, controllata da diversi fattori quali la

morfologia della spiaggia, le condizioni di marea e del moto ondoso, i tassi di precipitazione e, non meno importante, le caratteristiche granulometriche e di porosità dei sedimenti.

In base a questa analisi è possibile individuare tre differenti zone: la prima, prossima alla battigia, rappresenta la zona più dinamica in termini di umettamento, essendo influenzata sia dalle precipitazioni che dall'azione delle onde e delle oscillazioni di marea; la seconda è la zona di retrospiaggia, generalmente quella che presenta i valori più bassi con contenuti inferiori all'1% in giorni assolati, eccetto alcune aree colonizzate da specie pioniere in cui la percentuale può essere maggiore; la terza, posta alla base del corpo dunare stabilizzato, è una regione caratterizzata da valori assai variabili in funzione della distribuzione della vegetazione. La rapidità, inoltre, con cui questi valori variano, sia nello spazio che nel tempo, hanno importanti implicazioni sui tassi di trasposto eolico poiché, come è noto, minime riduzioni nella percentuale d'acqua si traducono in grandi variazioni nel valore della velocità di soglia critica. Per una corretta realizzazione di un modello generale di scambio sedimentario tra la spiaggia e la duna, occorrerebbe analizzare dettagliatamente le variazioni areali e temporali di umettamento e, comunque, data l'estrema variabilità di questo parametro, anche qualora si voglia ottenere un solo valore si dovrebbe ripetere la misura in più punti vicini, mediandone poi i valori.

Infine, va considerato che l'effetto dell'umettamento nei processi di presa in carico si svolge secondo un meccanismo che si ripete ciclicamente. I sedimenti più superficiali, una volta asciugati dal vento, sono resi disponibili alla deflazione; una volta asportati, emergerà nuovamente un livello umettato che dovrà essere nuovamente asciugato prima di essere preso in carico. La ciclicità di questo fenomeno è, però, ancora non definita essendo influenzata contemporaneamente da diversi parametri quali la velocità del vento e la granulometria dei sedimenti (Corneils & Gabriels, 2003).

### ***Vegetazione***

La presenza di vegetazione gioca un ruolo fondamentale nella determinazione del trasporto eolico riducendo la presa in carico secondo tre processi distinti. Come mostrato in Figura 126, la vegetazione preserva la spiaggia coprendo una porzione più o meno vasta in funzione delle diverse essenze vegetali e riduce l'energia esercitata dal vento e agisce come trappola sedimentaria (Van De Ven et al., 1989).

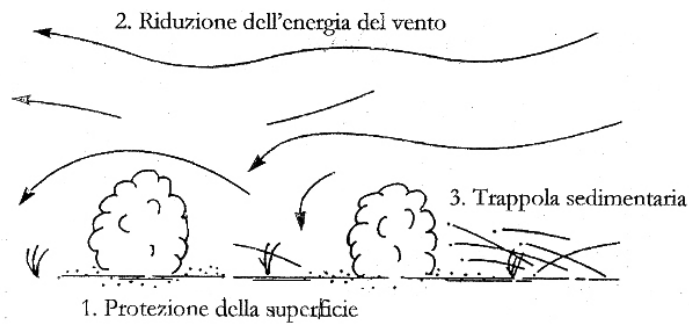


Figura 126 — Il ruolo stabilizzante della vegetazione.

In presenza di vegetazione, la velocità verticale del vento tende a zero non più in prossimità del terreno ma ad una determinata altezza definita che, quindi, rappresenta una nuova superficie di base. Per una vegetazione densa, tale altezza ( $z_0$ ) è localizzata a circa  $2/3$  dell'altezza media  $h$  delle piante. (Carter, 1988). Il ruolo della vegetazione è pertanto quello di incrementare l'altezza dove inizia ad agire lo sforzo di taglio, diminuendo la presa in carico e facilitando l'accumulo di sedimento in movimento nello strato "d" (Figura 126).

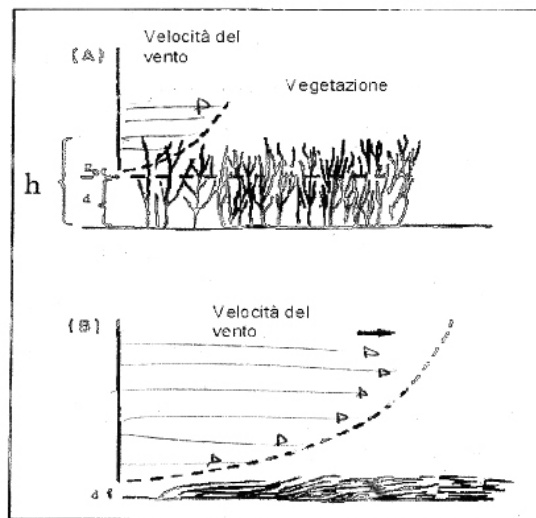


Figura 126 - Il profilo della velocità del vento su vegetazione densa a velocità normale (A), e a velocità estreme (B): da notare come in (B) il valore di  $d$  si riduca considerevolmente (Carter, 1988).

All'aumentare della densità vegetazionale, la superficie di spiaggia protetta aumenta. Wolfe e Nickling (1993) hanno identificato 3 tipi di regimi di flusso in funzione della copertura vegetazionale (Figura 127a). Il flusso che si sviluppa su di un'area in cui i diversi elementi sono ampiamente distanziati è definito flusso "isolato" (isolated-roughness flow). Ad un aumento della copertura, il punto di riattacco si può trovare in coincidenza di un secondo

elemento; questo flusso è definito flusso di “sovrapposizione” (wake interference flow). Ad un nuovo aumento della copertura, la spiaggia si trova ad essere completamente immersa nell’unione dei coni d’ombra sviluppati dai singoli elementi; il flusso, allora, si definisce “riparato” (skimmed flow). Questo concetto è fondamentale per il ruolo della vegetazione nell’intervenire efficacemente contro i processi erosivi e per la tipologia delle forme che in tal modo vengono prodotte (Es. campi dunari): in aree dove agisce un flusso riparato lo sforzo di taglio agente alla superficie è nullo o quasi nullo e, conseguentemente, sono nulli i processi erosivi a dimostrazione che il grado di copertura vegetazionale sia più determinante (Hesp, 1983) rispetto al diverso tipo di essenza vegetazionale (Figura 127b).

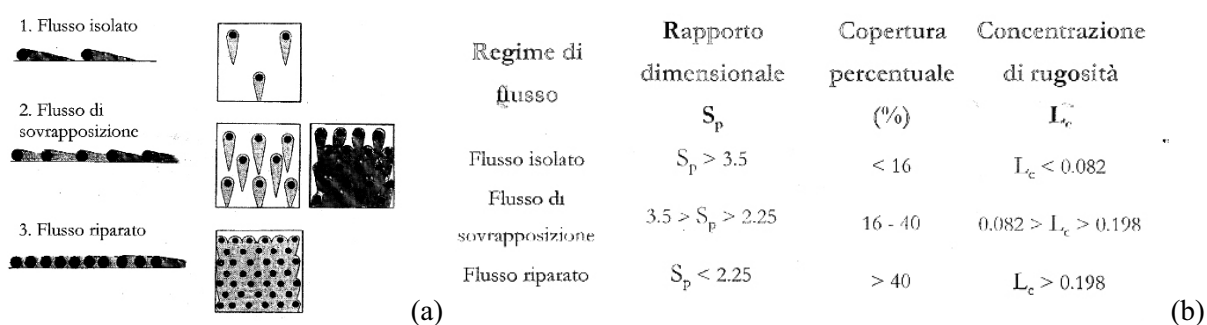


Figura 127 – (a) schema dei tre regimi di flusso con le relative "zone d'ombra" (in scuro); (b) Valori ricavati da Lee e Soliman (1977) e riportati da Wolfe e Nickling (1993) sui tre parametri caratteri anti i diversi tipi di flussi.  $S_p$  rappresenta il rapporto tra l'interdistanza tra gli elementi e la loro altezza media, mentre  $L_c$  è la concentrazione di tali elementi, e viene definita come  $L_c = (n \cdot A) / S$ , incui  $n$  è il numero degli elementi all'interno dell'area  $S$ , e  $A$  è l'area pari alla proiezione frontale, equivalente al prodotto tra l'altezza media per il diametro dell'elemento vegetazionale.

### Fattori sedimentologici

I lavori di Willets et al. (1982) e Willets (1983) hanno evidenziato come la forma dei granuli sia un fattore significativo all'interno delle dinamiche eoliche. In particolare, valori di sfericità bassi riducono il tasso di trasporto, specialmente a velocità del vento elevate. La distribuzione granulometrica della sabbia di spiaggia, invece, influenza in maniera apprezzabile i tassi di trasporto eolico. Idealmente ogni singola classe granulometrica dovrebbe essere considerata separatamente poiché ognuna di esse possiede una propria velocità critica. Difatti la sabbia fine può più facilmente essere trasportata da venti deboli che non quella grossolana. Inoltre, una volta che la sabbia più fine sia stata rimossa, la parte più grossolana blinda la superficie,

rendendo notevolmente più difficile ogni eventuale presa in carica. La Figura 128 mostra le possibili configurazioni con le quali i granuli possono disporsi in risposta all'azione del vento: (a) la distribuzione granulometrica è relativamente uniforme con tutti i granuli che presentano le medesime velocità critiche; in (b) una superficie con sedimento mal classato prima dell'azione del vento; in (c) la stessa superficie blindata in seguito alla presa in carico delle particelle più fini ad opera del vento.

Venti molto intensi sono pertanto necessari affinché la presa in carico prosegua. Qualsiasi processo in grado di muovere la sabbia, come il calpestio umano od animale, esponendo in superficie nuovo sedimento fine, comporta una ripresa dell'erosione e quindi del trasporto (Coastal Engineering Manual, 2002).

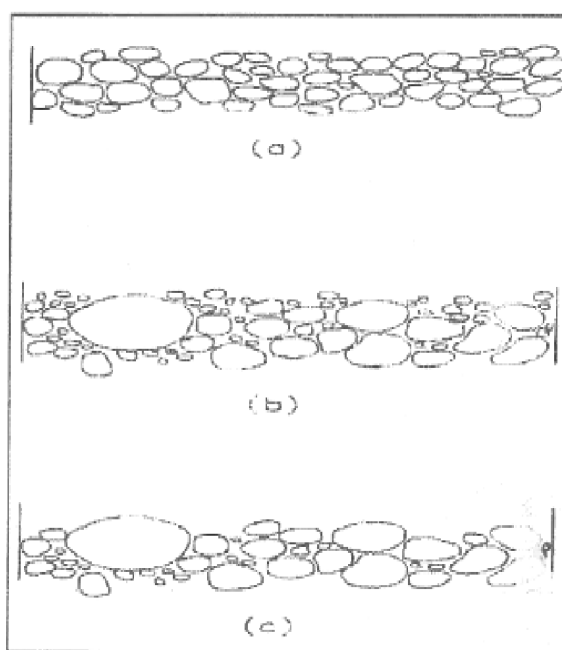


Figura 128 - Schema del classamento su di un deposito di sabbia. (Coastal Engineering Manual, 2002).

### ***Disponibilità di sedimento***

Anche la presenza di una sorgente di sedimento adeguata è di fondamentale importanza. Difatti, una spiaggia ampia solitamente fornisce un adeguato rifornimento, mentre se è stretta, è possibile che i tassi di trasporto calcolati risultino sovrastimati.

Misurazioni sul campo hanno dimostrato come i tassi di trasporto incrementino da 0, nelle vicinanze della battigia, ad un valore massimo posto sulla spiaggia nella direzione del vento.

Questa transizione è denominata “fetch effect” o più semplicemente, “*fetch*” (Gillette et alii, 1996). Questo effetto è una manifestazione dei processi di saltazione attraverso cui, o per fenomeni di auto alimentazione o per una riduzione generale della crosta salina allontanandosi dalla battigia, il numero di particelle attivate aumentano esponenzialmente fino al raggiungimento di un valore massimo, presumendo uno sforzo di taglio costante e un numero fisso di particelle dislocate da un singolo granulo impattante sulla superficie sabbiosa.

Per sabbia asciutta e di diametro uniforme, la distanza di saturazione (corrispondente al massimo della presa in carica) è funzione dello sforzo di taglio, della lunghezza della traiettoria delle particelle in saltazione e dal numero medio di granuli interessati dai rocessi d'impatto. Il grado di saturazione è ovviamente raggiunto più velocemente in presenza di una superficie umettata dato che il numero dei granuli erodibili per impatto tende a ridursi (Bauer & Davidson-Arnett, 2002).

Consideriamo un tratto di spiaggia rettangolare e piatto di lunghezza  $l$  e ampiezza  $w$ , limitato verso mare dalla linea di riva e verso terra dalla base dei primi cordoni dunari (Figura 129). La direzione del vento,  $\alpha$ , può variare da  $0^\circ$  (parallelo a riva) a  $90^\circ$  (perpendicolare a riva). Si definisce come fetch,  $F$ , la distanza tra un qualsiasi punto di partenza (per esempio la linea di riva.) a un punto generale posto sulla spiaggia. Il fetch massimo (**Fm**) si estende dalla linea di riva ai primi cordoni dunari ed è funzione dell'angolo  $\alpha$  e della geometria della spiaggia ( $l/w$ ). Il fetch critico (**Fc**) rappresenta invece la distanza minima dalla linea di riva al punto necessario per raggiungere la saturazione del flusso.

A tal proposito è possibile identificare due distinti sistemi eolici: a trasporto limitati ( $F \geq F_c$ , transport limited system), su spiagge ampie in cui la disponibilità di sedimento è abbondante, il tasso di trasporto è massimo e determinato solamente dall'intensità del vento, e sistemi a rifornimento limitati ( $F < F_c$ , supply-limited system), in cui l'esiguità della spiaggia non garantisce la presa in carico di tutto il sedimento potenzialmente erodibile.

E' proprio in questi ultimi sistemi che la diversa geometria della spiaggia gioca un ruolo determinante nella riduzione dei tassi di trasporto. Contrariamente al fetch massimo che può essere fisicamente e in modo semplice misurato sul campo, il fetch critico deve essere per forza calcolato sul campo, ad esempio, tramite l'ausilio di trappole eoliche: a tal proposito, Il *Coastal Engineering Manual* (2002) considera una spiaggia di 60 metri, “sufficientemente ampia” da riuscire a garantire un adeguato rifornimento al sistema dunare.



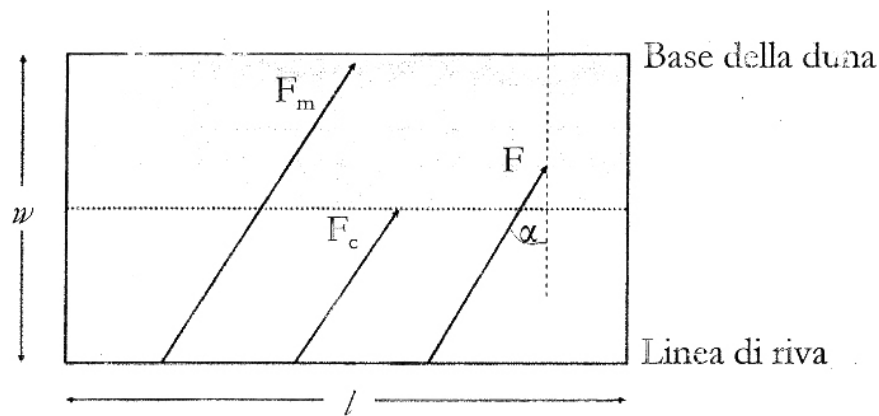


Figura 129 - Terminologia base per la definizione di fetch su una spiaggia rettangolare di base  $l$  e ampiezza  $w$ . La zona ombreggiata rappresenta il tratto di spiaggia in cui il fetch è superiore a quello critico e in cui il trasporto eolico è massimo (modificato da Bauer & Davidson-Arnett, 2002).

### ***Pendenza della spiaggia***

Bagnold (1973) introdusse il parametro  $G$  per correggere i tassi di trasporto dedotti matematicamente secondo la seguente formula:

$$q' = G \cdot q \quad (7.20)$$

dove  $G$  è definita come:

$$G = \frac{\tan \alpha_r}{\cos \theta (\tan \alpha_r + \tan \theta)} \quad (7.21)$$

dove  $\alpha_r$ , è l'angolo di riposo per sedimenti di spiaggia (assunto pari a  $32^\circ$ ) e  $\theta$  è la pendenza della spiaggia. Sebbene esistano altri modelli (Dyer, 1986; Iversen e Rasmussen, 1994), per pendenze inferiori a circa  $15^\circ$ , i tassi potenziali calcolati per diverse vie non differiscono di molto tra loro. In ogni caso, pendenze superiori a  $15^\circ$  sono relativamente inusuali per le spiagge naturali, se si escludono le scarpate indotte dall'azione del moto ondoso (Sherman et al., 1998).

### ***Direzione del vento***

La componente massima del trasporto eolico (nel caso in cui  $F > F_c$ ), utile alla formazione della duna, è quella proveniente dal mare e con direzione perpendicolare alla costa. Questa componente è dunque funzione del coseno dell'angolo compreso tra la direzione del vento e la direzione utile al trasporto  $\alpha_t$ :

$$q_{\perp} = \cos \alpha_t \quad (7.22)$$

I venti che spirano dalla duna verso il mare non sono particolarmente efficaci nel trasporto della sabbia sia per la presenza della vegetazione, che stabilizza il sedimento, sia perché spesso alle spalle della duna è presente solo una limitata quantità di sabbia che possa essere presa in carico. Per tali venti è stato calcolato anche l'angolo  $\beta_t$ , con  $\beta_t$  compreso tra  $180^\circ$  e  $360^\circ$ , che rappresenta l'angolo tra la direzione del vento e la linea di riva, individuato partendo dalla linea di riva e procedendo in senso orario (Figura 123a). L'efficacia del trasporto eolico per tali venti è proporzionale al coseno di  $\alpha_t$  e al coseno al quadrato di  $\beta_t$ :

$$q_{\perp} = q \cos \alpha_t \cos^2 \beta_t \quad (7.23)$$

in cui  $\alpha_t$  e  $\beta_t$  sono misurati come evidenziato in Figura 12a e in particolare  $180^\circ < \beta_t < 360^\circ$ .

Essendo  $\alpha_t = \beta_t - 90^\circ$  e quindi  $\cos \alpha_t = \cos(\beta_t - 90^\circ) = -\sin \beta_t$  per cui ne deriva che la capacità di trasporto eolico utile all'accrescimento della duna diventa:

$$q_{\perp} = -q \sin \beta_t \cos^2 \beta_t \quad (7.24)$$

Il termine di  $\sin \beta_t$ , corregge il trasporto secondo la direzione del vento, mentre  $\cos^2(\beta_t)$  rappresenta l'efficacia del trasporto quando i venti spirano da terra (Figura 123b). Per i venti provenienti da mare il valore di  $\cos^2(\beta_t)$  è posto pari ad 1, mentre per i venti da terra questo valore è compreso tra 0 e 1, in funzione della loro direzione (*Coastal Engineering Manual*, 2002).

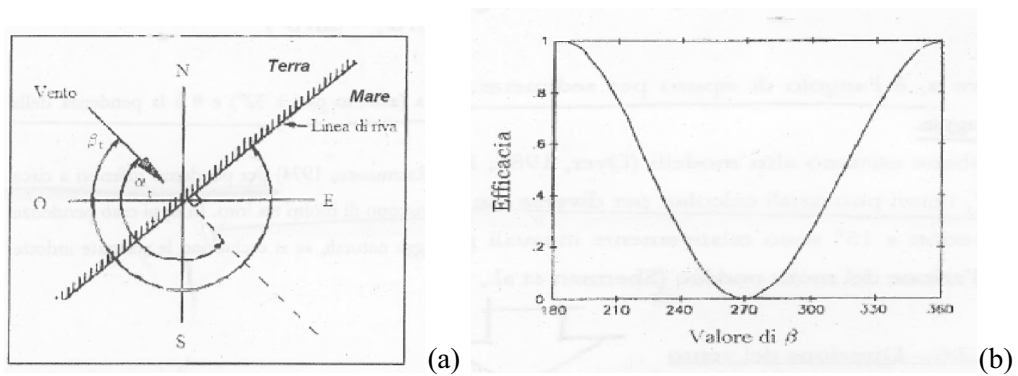


Figura 130 – (a) Definizione degli angoli  $\alpha_t$  e  $\beta_t$ ; (b) Efficacia del trasporto eolico in funzione del valore dell'angolo  $\beta$ . (Coastal Engineering Manual, 2002).

## 7.4\_INTERAZIONE SPIAGGIA-DUNA

### BILANCIO SEDIMENTARIO (il Modello di Psuty, 1988)

**KEY WORDS** (Principi evolutivi associati al bilancio sedimentario di spiaggia e duna)

Lo sviluppo di un campo di dune, è funzione della scala spaziale e temporale che si considera: osservando la formazione e l'evoluzione delle dune su diversi tipi di spiaggia, si può desumere come ciascuna componente del sistema spiaggia-duna abbia in realtà un suo budget sedimentario separato e reagisca in tempi brevi alla variazione di tale bilancio (Psuty, 1988).

C'è una distinzione fra il budget sedimentario della duna e quello della spiaggia che permette un'evoluzione separata delle due componenti, le quali possono procedere parallele nella stessa direzione (mostrare lo stesso trend), o comportarsi in maniera del tutto opposta.

In tempi diversi si possono infatti ritrovare tutte le combinazioni di stati evolutivi di spiaggia e duna, in funzione della disponibilità di sedimento. I due sistemi sono correlati tra loro, ma non necessariamente presentano lo stesso bilancio sedimentario, sia in termini quantitativi, che di tendenza.

Come si vede in Figura 131, le dune presentano il massimo sviluppo quando il bilancio sedimentario per la spiaggia è nullo (Masselink & Hughes, 2003) o leggermente negativo (Psuty, 1986) in quanto il bilancio della duna è positivo. In tali condizioni la sabbia può accumularsi per lunghi periodi di tempo nello stesso luogo, sviluppando un singolo cordone dunare.

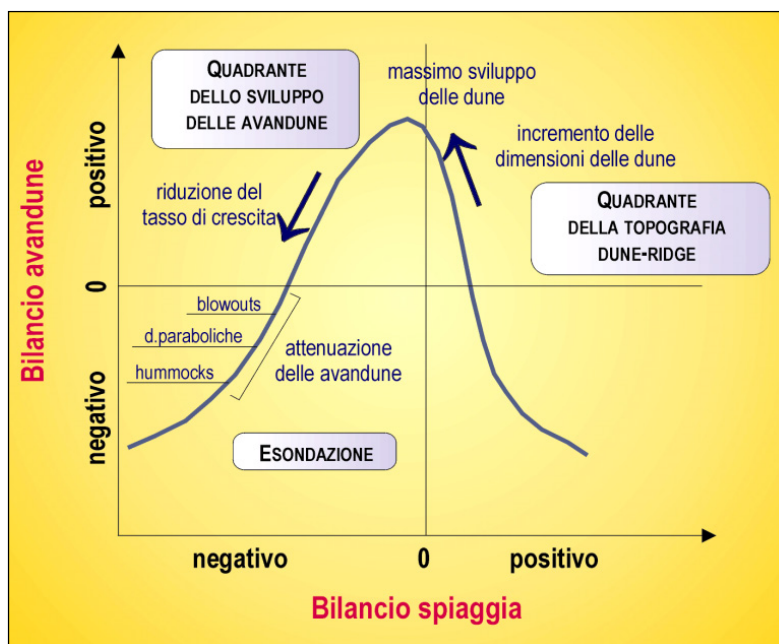


Figura 131 – Sviluppo delle dune in funzione delle variazioni dei bilanci sedimentari di duna e spiaggia (modificato da Pusty, 1986)

Analizzando il modello nelle varie fasi più importanti della curva che descrive l'evoluzione di un apparato di dune, si possono fare importanti considerazioni (Figura 132): (a) In presenza di un fenomeno di progradazione della spiaggia, si assiste alla formazione di una topografia a beach-ridges (Masselink & Hughes, 2003), per cui all'accumulo di origine marina comincia sostituirsi a quello eolico (I Quadrante); (b) Man mano che la spiaggia avanza, sempre più sabbia è a disposizione del vento, per cui, se il tasso di avanzamento della linea di riva non è particolarmente alto, le dune hanno il tempo di consolidarsi in forme sempre più alte e ampie (II Quadrante); (c) La crescita dell'apparato dunare continua in altezza e in volume fino a quando la spiaggia mostra un trend di avanzamento o di stabilità. Allorquando questa comincia a regredire, se i tassi di variazione lo permettono, la duna inizia a comportarsi da "reservoir" sedimentario, per cui prova ad ostacolare l'erosione rifornendo di sabbia la spiaggia antistante: ne deriva che alla crescita si sostituisce, dapprima la stabilità, e poi i primi fenomeni di smantellamento (III Quadrante); (d) Con il procedere dell'erosione, questi processi diventano sempre più intensi, per cui i volumi e le quote tenderanno ulteriormente a diminuire: in funzione della velocità con la quale il sistema arretra, la duna migrerà verso terra, o svilupperà forme erosive destabilizzanti (blowouts e washover), trasformandosi in questo modo in dune di tipo parabolico e/o ad *Hummockies*.

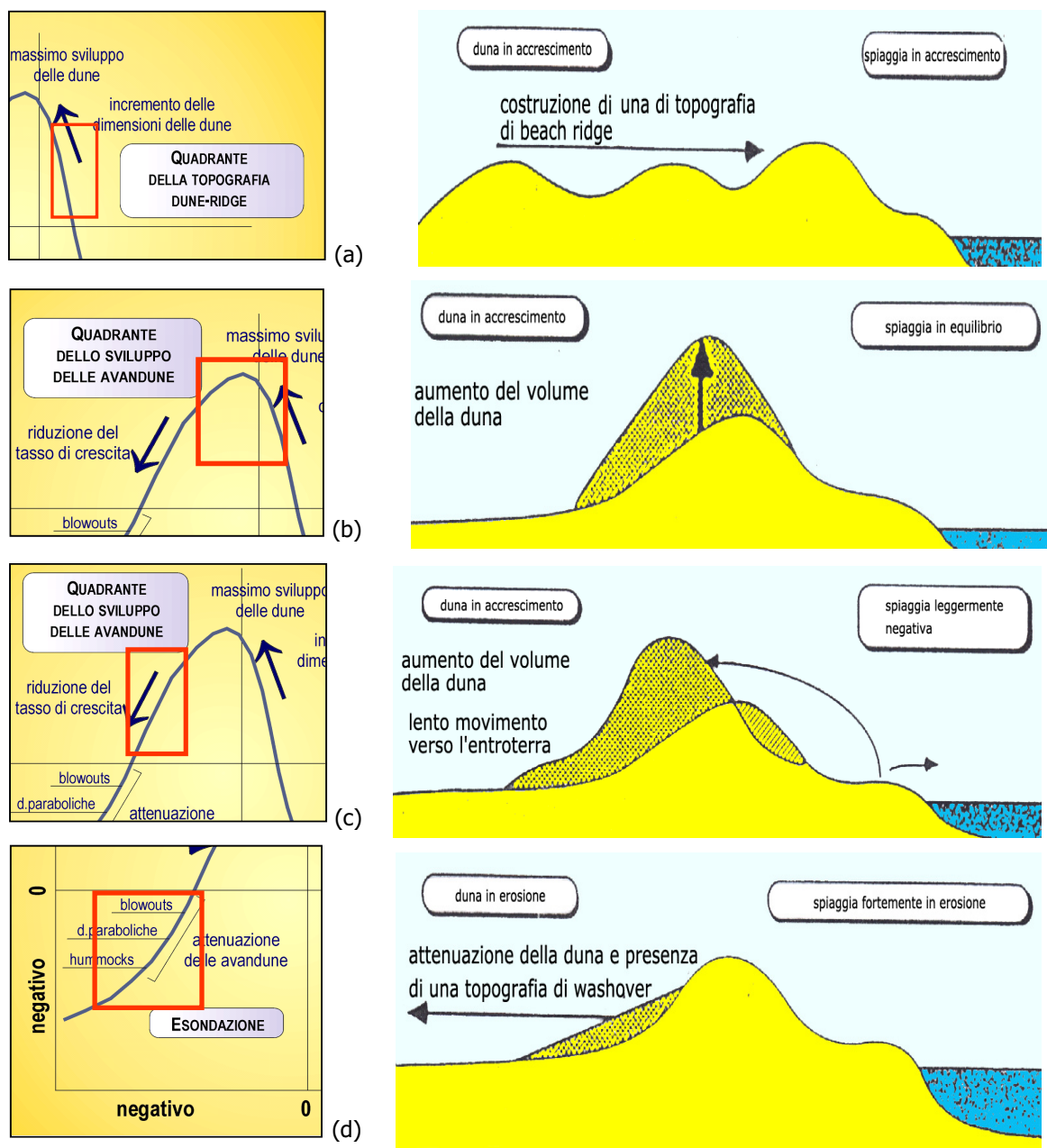


Figura 132 – Variazione della crescita della duna in funzione del bilancio della spiaggia secondo il modello di Pusty (1986), e secondo i quattro punti evolutivi descritti nel testo (a,b,c,d).

## 7.5\_Determinazione del Trasporto Eolico

**KEY WORDS** (Storia della sperimentazione; Cattura eolica; Tasso di Trasporto eolico Reale)

La letteratura scientifica degli ultimi '50 anni (Bagnold, 1941; Zingg 1953; Hsu 1973 e 1986; Carter, 1988; Gomes, 1992; Davidson-Arnoot 1996; Alcàntara-Carriò e Alonso 2000; Reselo e

al, 2002; Junaidi&Aoki, 2009), in merito a determinazioni di tassi di trasporto eolico, ha spesso posto in evidenza come sia difficile determinare, con sufficiente attendibilità, una formula generale che permetta di prevedere il trasporto. Le condizioni locali, espresse in termini di variabilità spazio-temporale delle grandezze che le definiscono, influenzano inevitabilmente i meccanismi di mobilitazione, trasferimento e deposizione del materiale, per cui alla fine diventano fondamentali.

Per poter applicare le formule conosciute in letteratura è necessario conoscere le condizioni locali: ecco perché si è scelto di effettuare un numero sufficientemente rappresentativo di campionamenti eolici in grado di fornire il giusto termine di correzione, applicabile poi a tutto il litorale regionale. Di seguito, verranno prima descritte le sperimentazioni, e poi, passo dopo passo, le procedure che hanno permesso il calcolo del tasso di trasporto teorico per tutti gli apparati dunari considerati.

### ***7.5.1 Storia della Sperimentazione***

Negli ultimi decenni l'uso dei modelli di bilancio sedimentario ben calibrati è diventato un input molto importante per la gestione costiera e lo sviluppo di strategie difensive e di conservazione della costa (Carter, 1988). Infatti, le dinamiche dei sedimenti eolici rivestono un ruolo importante per la definizione di modelli evolutivi dei sistemi di dune embrionali ed avandune, che sono elementi vitali per la protezione della costa contro le ingressioni marine (Konings, 1990).

Il bilancio sedimentario delle dune risulta molto complesso, soprattutto se lo si considera come parte del più generale bilancio del litorale. Per stimare il potenziale di crescita delle dune costiere, come illustrato precedentemente, sono state introdotte diverse formulazioni in grado di predire il tasso di trasporto eolico potenziale. Esse, però, prendono in considerazione solo l'eventuale apporto costruttivo, senza considerare che alcuni processi, quali ad esempio l'erosione marina, possono essere responsabili dello smantellamento dei corpi dunari. Inoltre, un'altra limitazione nell'uso di queste formule risiede nei fattori di disturbo, quali presenza di ostacoli, densità vegetativa, umidità del suolo ed attività antropiche che difficilmente possono essere quantificate.

Le misure dirette del tasso di trasporto sono dunque utili per poter dedurre il locale bilancio di sedimenti che il vento può movimentare e, in secondo luogo, per poter ottenere una stima dell'errore derivante dall'applicazione dei modelli numerici e per introdurre eventuali fattori

correttivi in grado di sopperire agli elementi (morfologici e dinamici) non considerati dai modelli stessi. Per tali motivi spesso vengono condotte misure dirette del trasporto eolico ed in particolare su:

- Piccole aree prototipali, intensivamente monitorate (acquisizione dati  $>1\text{Hz}$ ), con trappole sedimentarie, effettuando microrilievi topografici e raccogliendo dati da sensori elettronici allo scopo di calibrare i modelli empirici (Jackson e McCloskey; Gomes e al, 2002);
- Estese aree costiere dove il trasporto è stato generalmente calcolato usando i dati regionali di vento e rilievi topografici (Gomes, 1992; Davidson-Arnoot 1996; Alcàntara-Carriò e Alonso 2000; Reselo e al, 2002).

Nelle sperimentazioni vengono spesso utilizzate trappole in grado di catturare il sedimento trasportato dal vento. Numerosi sono gli esempi in letteratura di trappole costruite per offrire il minor disturbo possibile e campionare, in opportuni intervalli di tempo, una quantità di sedimento trasportato dal vento statisticamente rappresentativa. Onde poter stimare le condizioni eoliche, tali trappole vengono installate sulla spiaggia unitamente ad una stazione anemologica, in grado di rilevare le caratteristiche istantanee del vento (direzione e velocità) o altre condizioni meteorologiche (radiazione solare, temperatura, umidità).

Tuttavia, qualsiasi sia la trappola utilizzata, i risultati ottenuti sono da considerare con molto precauzione perché interferiscono con il flusso d'aria (Bagnold, 1938). La presenza stessa della trappola determina lo sviluppo di una pressione di stagnazione che devia il flusso d'aria attorno ad essa, impedendo la cattura dei granuli che seguono questo flusso deviato. Inoltre, la presenza delle trappole può dar origine a moti vorticosi che possono favorire il formarsi di piccole zone d'erosione o deposito attorno allo strumento. Per minimizzare questi disturbi si utilizzano trappole con piccole sezioni e forma semplificata (Jones e Willets, 1979; Illenberger e Rust, 1986).

Per determinare il trasporto eolico in prossimità del suolo, dove transita la maggior parte dei granuli, bisognerebbe utilizzare tecniche come le trappole isocinetiche artificialmente ventilate od gli anemometri laser-Doppler. Data la loro complessità di utilizzo, negli studi sul trasporto eolico sono generalmente utilizzate delle trappole a flusso semplificato o che creano una differenza di pressione tra la parte anteriore e quella interna che consente di ridurre il disturbo recato al flusso d'aria. Le trappole orizzontali, che disturbano in minor misura il flusso d'aria di quelle verticali, con venti a velocità elevata debbono essere molto lunghe, per



catturare le particelle con traiettorie piatte (Horikawa e Shen, 1960), e, durante le misure, devono essere costantemente monitorate. Quelle verticali, invece, sono generalmente utilizzate per la cattura dei granuli che si spostano per saltazione e richiedono una continua attenzione per assicurare una efficace cattura del trasporto “*bedload*”. Belly (1964), testando una trappola verticale in un tunnel del vento, constatò che immediatamente si origina un’area erosiva, di limitata profondità, attorno e sotto la trappola. Con forti venti (velocità > 9m/s) la distribuzione della taglia dei sedimenti catturati nella trappola verticale è simile alla distribuzione della taglia dei sedimenti. La relativa assenza di granuli più grandi potrebbe essere attribuita all’ostruzione del trascinamento di superficie al bordo inferiore del collettore. Inoltre, poiché la maggior parte dei granuli si sposta all’interno di uno strato, di ridotta altezza, in prossimità del suolo (Willims, 1964; Rasmussen e al. 1985) le catture condotte con queste trappole sono molto influenzate dalla distorsione del flusso d’aria.

Per ovviare a questi inconvenienti spesso si usano contemporaneamente differenti strumenti per la cattura del sedimento eolico. Ad esempio Bagnold (1954) abbinò una trappola verticale, per raccogliere i granuli trasportati per saltazione, ad una semisepolta, per catturare i sedimenti spostati dal vento per trascinamento. Successivamente i materiali intrappolati furono pesati, rapportati alle dimensioni reali delle aperture delle trappole e sommati per ottenere il trasporto totale di sabbia. Anche Horikawa e Shen (1960) hanno testato, in un tunnel del vento, due tipi di trappole orizzontali (non appoggiate sopra la superficie del suolo) e cinque trappole verticali per misurare, con le prime, la proporzione di sabbia che si sposta per trascinamento e, con le seconde, quella che si trasferisce per saltazione. La sperimentazione evidenziò che il materiale trascinato sulla superficie corrispondeva al 20% del trasporto totale, percentuale non molto diversa (25 %) da quella ottenuta da Bagnold (1954).

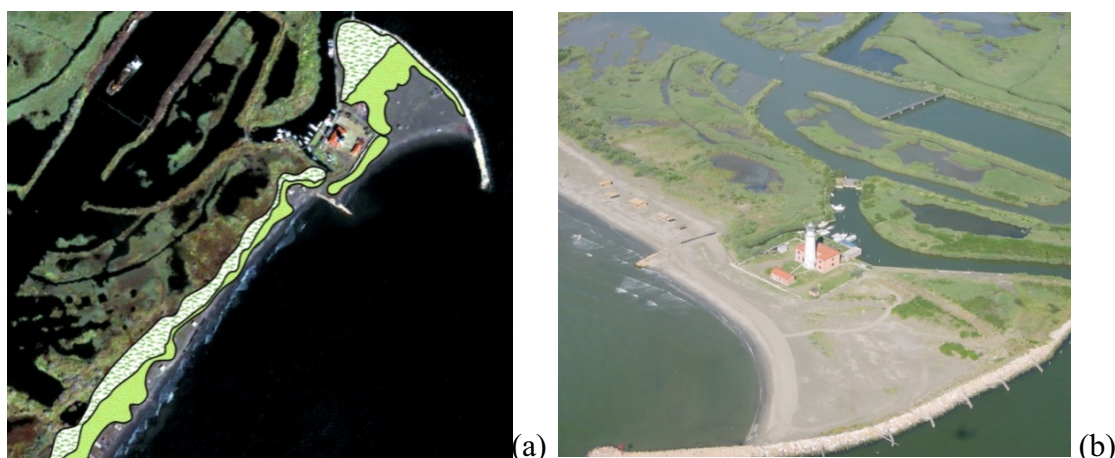
L’efficienza della trappola può essere definita dal rapporto tra la quantità di sabbia catturata e la quantità reale trasportata dal vento in saltazione (Chepil e Milne, 1941); questa determinazione viene generalmente effettuata nei tunnel del vento. L’efficacia delle trappole di sabbia ad alta frequenza varia considerevolmente in funzione dell’intensità del vento, dei contenuti d’umidità nei sedimenti e della taglia dei grani (Bennet e Olyphant 1998). Ne consegue che mentre è relativamente facile ottenere una buona efficienza relativa alla forma della trappola, quella assoluta, che tiene conto anche degli altri parametri sopra elencanti, è di difficile realizzazione.

Gli esperimenti sul trasporto sedimentario eolico sono stati spesso condotti con collettori a trincea (Horikawa e al., 1984; Greeley e al., 1996) ed anche con trappole orizzontali sepolte nella sabbia. Quest'ultime, a volte, sono state associate ad una load cell per studiare le variazioni temporali del trasporto totale come suggerito da Jackson (1996) e Jackson e al. (1997).

Il trasporto totale è comunemente misurato con semplici collettori, integrati verticalmente, ed orientati nella direzione del vento sia operando in situ (Leatherman, 1978; Sarre, 1988; Nickling e McKenna Neuman, 1997) sia in laboratorio (Bagnold, 1941; Jones e Willetts, 1979). Ulteriori informazioni sulla distribuzione verticale del trasporto di particelle possono essere ottenute utilizzando set verticali di trappole (e.g. Williams, 1964; Jensen e al., 1982; Rasmussen e Mikkelsen, 1991; Gillette e al., 1996 ). E', tuttavia, comunemente accettato il fatto che la misura del trasporto sedimentario eolico su una superficie può essere solo approssimata perché la presenza di qualsiasi dispositivo interFERisce con la corrente dell'aria.

### ***7.5.2\_Campagne sperimentali di cattura eolica***

Nel presente lavoro è stata condotta un'attività di campionamento eolico in situ per poter stimare il reale tasso di trasporto sedimentario. I 3 siti campione presi in considerazione corrispondono ad apparati dunari che si sviluppano, da nord verso sud, in corrispondenza dello scanno di Goro (Figure 133 a/b), a Lido di Spina (Figure 134 a/b) e in prossimità della foce del torrente Bevano (Figure 135 a/b).



*Figura 133 – Siti campione: veduta in pianta (a) e dall'alto (b) dell'apparato dunare in prossimità del Faro di Gorino (Scanno di Goro, Ferrara).*

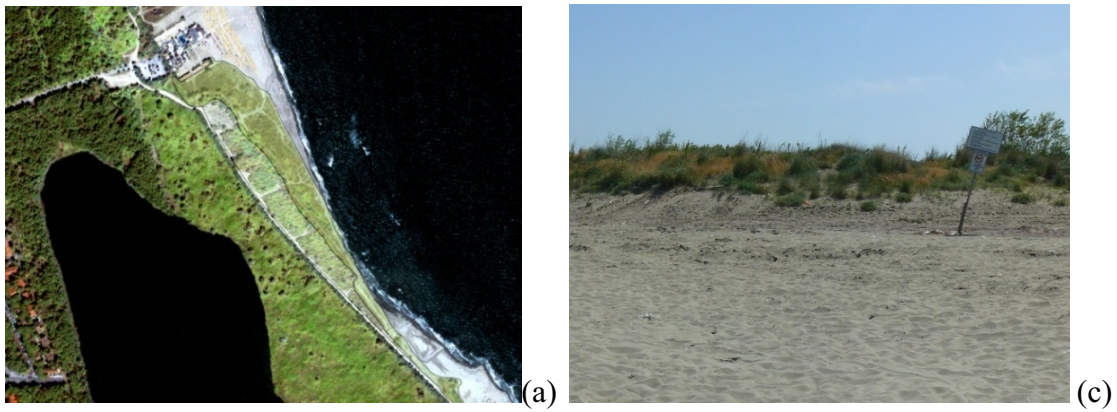


Figura 134 – Sito campione: veduta in pianta (a) e in prospettiva (b) dell'apparato dunare in prossimità di Lido di Spina (Ferrara).

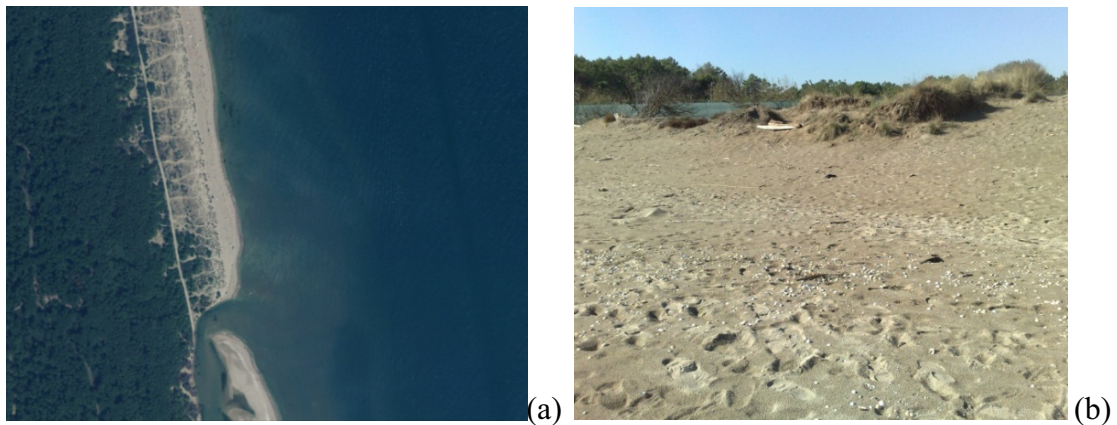


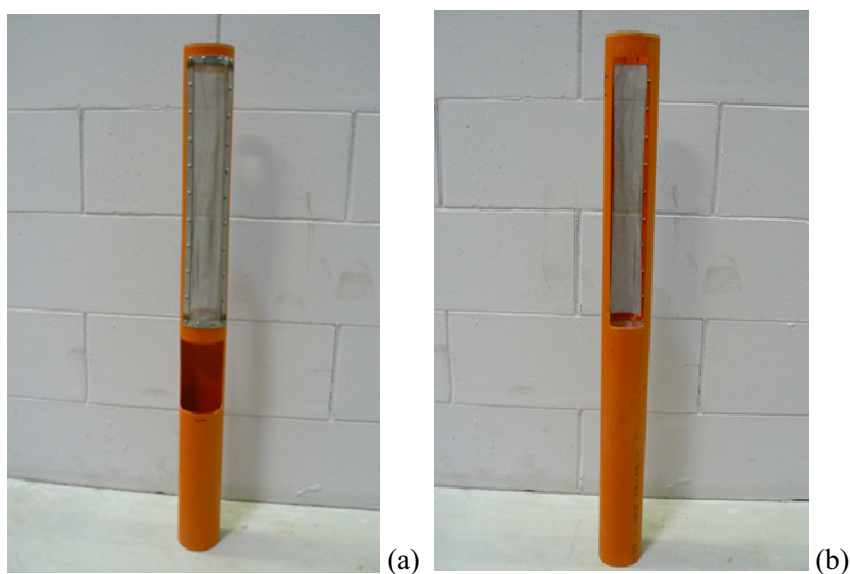
Figura 135 – Siti campione: veduta in pianta (a) e in prospettiva (b) dell'apparato dunare in prossimità della Foce del torrente Bevano (Ravenna) LE IMMAGINI SONO DA MIGLIORARE.

La scelta è stata effettuata sulla base di diversi criteri discriminanti: la presenza di un apparato sufficientemente stabile e sviluppato, che non mostrasse evidenti morfologie erosive, una spiaggia antistante sufficientemente ampia e orientata verso i venti dominanti (rispetto al regime anemometrico regionale), elevato grado di naturalità e basso impatto antropico (dove cioè, l'attività turistica non è intensa e continua, e lo sviluppo della duna è affidato principalmente a processi naturali); in più, per i problemi prima accennati, i siti dovevano essere in numero tale da riuscire a rappresentare macroaree omogenee (per direzione di prevalenza della linea di costa), del litorale regionale.

L'individuazione e la scelta di siti che effettivamente rispondono a tali presupposti non è stata semplice, vista l'intensa urbanizzazione che coinvolge gran parte del litorale regionale, e la forte crisi erosiva in cui si trovano oggi le dune. A parte la foce del Torrente Bevano e lo Scanno di Goro, che sono aree protette (rispettivamente Riserva Naturale "Duna Costiera ravennate-foce torrente Bevano" e Parco del Delta del Po), un tratto di duna a Lido di Spina,

che si estende linearmente per circa 150 m, pur mostrando un moderato disturbo antropico, resta sostanzialmente indisturbata per gran parte dell'anno ed è caratterizzata da una spiaggia antistante sufficientemente ampia; la duna, nonostante qualche centinaio di metri più a sud mostri un forte trend erosivo (con scarpate che superano il 1,5 m d'altezza), in questo tratto mostra un discreto sviluppo lineare e trasversale (con la presenza nel periodo invernale, quando l'attività turistica non rimaneggia la spiaggia, anche di piccole forme embrionali).

Per la determinazione del tasso di trasporto eolico reale si è scelto di utilizzare il modello di trappola verticale proposto da Rosen nel 1978. Rispetto al prototipo originale sono state applicate alcune modifiche, descritte di seguito, per ovviare alle diverse difficoltà incontrate durante le fasi operative, cercando sempre però di mantenere congruenza con le caratteristiche tecniche e scientifiche con cui l'autore l'ha realizzata. La trappola consiste in una porzione di tubo in PVC, con due fessure realizzate a circa 1/3 dell'altezza, diametralmente opposta all'altra; una di queste aperture (ciascuna delle quali ha un'altezza di 10cm e una larghezza di 5,5cm), costituisce l'orifizio collettore, mentre l'altra viene chiusa da uno schermo filtrante (una rete metallica da 63  $\mu\text{m}$  di apertura) per favorire un flusso massimo d'attraversamento del vento e limitare la perturbazione della sue traiettorie all'interno del tubo (Figura 136).



*Figura 136 – Trappole di Rosen (1978) modificate, utilizzate nelle sperimentazioni, viste da di fronte (a) e da dietro (b).*

La trappola viene installata ortogonalmente al terreno, infissa e sepolta in modo che la base delle fessure sia parallela alla superficie della spiaggia, ed esse siano orientate

perpendicolarmente alla direzione del vento dominante. La sabbia passa attraverso la prima fessura, ma non attraverso la maglia metallica, per cui viene convogliata da un imbuto posizionato appena sotto la base della Fessura e raccolta in un barattolo di plastica (trasparente per favorire l'osservazione diretta del materiale catturato).

La trappola di Rosen è una trappola che fornisce ottimi risultati per quella parte del sedimento sabbioso che viene trasportata per saltazione e reptazione (equivalente a circa il 65% del totale - Raudkivi, 1976). È stata preferita alle numerose altre conosciute in letteratura, perché è possibile realizzarla a basso costo (materiale facilmente reperibile), l'utilizzo è agevole (l'installazione è breve e necessita di sole due unità operative), ha un buon recupero del sedimento (che non si rischia di perdere), ed è diffusa in molte sperimentazioni (Bauer et alii, 1996; Sabatier et alii, 2002; Jackson & Nordstrom, 1997; Gome et alii, 2002).

Per contro, dovendo orientare la trappola nella direzione del vento prevalente, se questo cambia, non essendo le trappole motorizzate e autodirezionabili, la sperimentazione va interrotta e ripetuta dopo aver cambiato orientazione delle Fessure; si tratta quindi di un'analisi di tipo unidirezionale (il sedimento raccolto va correlato con un'unica direzione di trasporto), che per essere completa, va ripetuta per tutte le diverse orientazioni costruttive e per ogni condizione anemologica in grado di movimentare la sabbia.

In funzione dell'ampiezza di spiaggia e della morfologia della duna (pendenza fianco lato mare), è possibile utilizzare più di una trappola, disponendo la serie di trappole lungo una o più sezione trasversali, a distanza l'una dall'altra tale da riuscire a caratterizzare il meccanismo di trasporto lungo tutta l'ampiezza della superficie di deflazione, e da coprire tutta l'estensione lineare della duna (Figura 137).

Non essendo lo scopo di questa ricerca quello di quantificare nel dettaglio i diversi contributi che, potenzialmente, ciascuna porzione della spiaggia può fornire alla duna (Sherman, 2005), le quantità raccolte all'interno di ciascuna trappola sono state di volta in volta sommate e considerate come un unico contributo complessivo. Le misura anemologiche sono state acquisite per mezzo di una stazione anemometrica mobile installata in prossimità della sezione di cattura: il sistema è costituito da una centralina anemometrica MicrosR (Figura 138) dotata di cinque sensori: tre per la misura della velocità, uno per la direzione del vento, ed uno per la temperatura/umidità dell'aria.

La configurazione del sistema strumentale è tale da assicurare una misura corretta del vento posizionando i 3 sensori di velocità (mod. anemometri a coppa) rispettivamente a 0.5m, 1.8m



e 3 m di altezza dal piano campagna. Il sensore di direzione è ubicato ad una quota di 3m, in modo da non subire effetti di distorsione del flusso legate alla rugosità della spiaggia o alla presenza di ostacoli. Una centralina munita di memoria esterna registra valori misurati ogni 5 sec. A circa metà dell'asta portante (2m) viene generalmente posizionato il sensore per la misura della temperatura e umidità, il quale invece effettua misure ogni 10 min.



Figura 137 – Esempio di disposizione (array) di trappole sulla spiaggia.

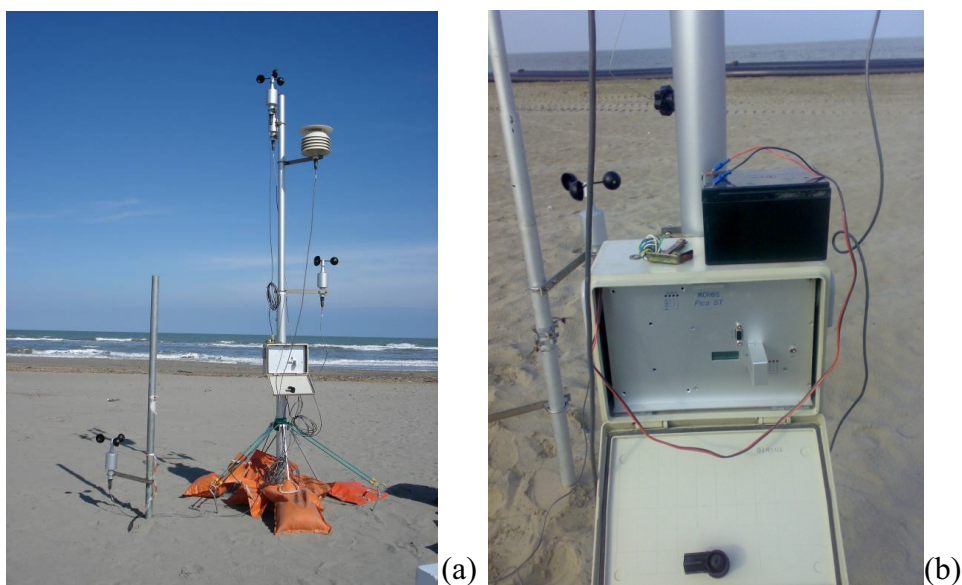
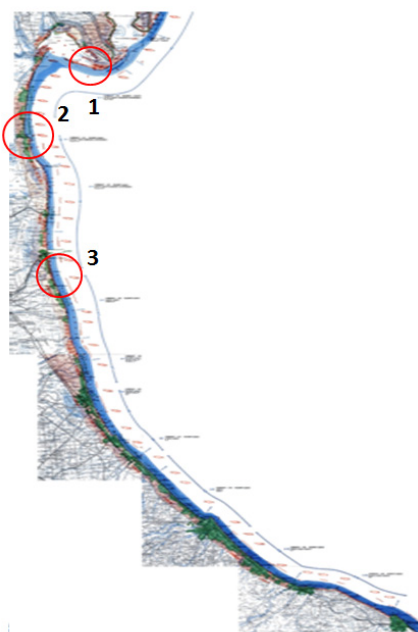


Figura 138– (a) Stazione anemometrica Micros, con tutti i sensori di velocità e direzione del vento e della temperatura e umidità dell'aria; (b) dettaglio della centralina con la memoria per la registrazione dei dati.

Parallelamente al campionamento eolico sono stati realizzati, di volta in volta, anche due rilievi topografici dell'area, uno prima e uno dopo la cattura, lungo profili trasversali individuati in punti rappresentativi della morfologia del sistema.

La durata delle sperimentazioni è stata variabile non solo da sito a sito, ma anche da cattura a cattura: in funzione delle condizioni anemometriche locali, scendendo a volte anche al di sotto dell'ora di misurazione (a causa di inconvenienti tecnici o di pioggia), si è cercato sempre e comunque di prolungare le misure fino al raggiungimento di una quantità minima di sedimento che però fosse rappresentativa (almeno 30gr).

Nella Tabella 5 vengono riassunte schematicamente tutte le campagne eoliche realizzate, ciascuna con la quantità rappresentativa di materiale raccolto e le caratteristiche anemometriche medie del vento durante le sperimentazioni, estrapolate, a loro volta, dalle misure delle velocità a diverse quote dal piano campagna.



SITO 1		DURATA (h.mm.)	DURATA (sec)	VELOCITA' MEDIA (m/s)	Quantità raccolta (gTot/cm)	TASSO DI TRASPORTO REALE (g/cm/sec)
1	18-ott-07	3.55	13805	6.37	112.56	8.15E-03
2	30-nov-07	1.42	6002	13.02	97.23	1.62E-02
3	08-dic-07	2.05	7205	9.8	62.45	8.67E-03
4	11-gen-08	1.32	5402	8.5	98.23	1.82E-02
5	28-feb-08	3.45	13205	11.9	133.12	1.01E-02
6	13-mar-08	1.55	6605	11.2	99.23	1.50E-02
MEDIA (h;sec;m;gTot;g/cm/sec)		2.22	8704	10.13	100.47	1.27E-02

SITO 2		DURATA (h.mm.)	DURATA (sec)	VELOCITA' MEDIA (m/s)	Quantità raccolta (gTot/cm)	TASSO DI TRASPORTO REALE (g/cm/sec)
1	02-feb-07	0.55	3005	17.92	170.88	5.69E-02
2	18-mar-07	1.12	4202	13.02	110.9	2.64E-02
3	10-apr-07	2.25	8405	11.9	181.23	2.16E-02
4	12-mag-07	1.22	4802	4.89	35.89	7.47E-03
5	19-set-07	3.04	10804	5.41	61.09	5.65E-03
6	10-mar-09	1.05	3605	11.2	133.01	3.69E-02
7	18-apr-09	0.33	1803	9.9	38.89	2.16E-02
8	23-set-09	1.59	6609	8.63	117.14	1.77E-02
9	15-ott-09	1.03	3603	13.19	99.9	2.77E-02
MEDIA (h;sec;m;gTot;g/cm/sec)		1.35	5204	10.67	105.44	2.47E-02

SITO 3		DURATA (h.mm.)	DURATA (sec)	VELOCITA' MEDIA (m/s)	Quantità raccolta (gTot/cm)	TASSO DI TRASPORTO REALE (g/cm/sec)
1	20-gen-08	1.22	4802	18.65	212.22	4.42E-02
2	19-mar-08	2.03	7203	9.12	140.1	1.95E-02
3	23-apr-08	2.35	9005	13.9	162.59	1.81E-02
4	11-mag-08	2.45	9605	6.21	55.98	5.83E-03
5	23-set-08	1.58	6608	7.99	99.34	1.50E-02
6	11-ott-08	2.01	7201	9.32	137.68	1.91E-02
7	12-feb-09	1.05	6005	11.48	81.02	1.35E-02
8	17-mar-09	2.12	4202	12.48	131.09	3.12E-02
MEDIA (h;sec;m;gTot;g/cm/sec)		1.85	6829	11.14	127.50	2.08E-02

Tabella 5 – Tabella riassuntiva delle sperimentazioni anemologiche realizzate durante l'inverno del 2007, tutto il 2008 e parte del 2009, unite alle quantità (gTot) raccolte durante le catture eoliche e ai tassi reali calcolati (g/cm/sec).

Per il calcolo del tasso di trasporto eolico REALE, si è proceduto ipotizzando che la quantità totale (gr/cmsec-1) trasportata durante ogni ora osservata è, evidentemente, pari a 3600 volte qv:



$$q_{\text{annuo}} = \frac{q^a}{n} \times 3600 \quad (7.25)$$

in cui  $q^a$  è la quantità campionata durante la durata complessiva della sperimentazione, mentre  $q_{\text{annuo}}$  esprime la quantità in gr/cmsec-1 di sabbia trasportata all'ora, e ricavata dall'intervallo totale (misurato in numero di ore di osservazione "n"). Dato che ognuna delle equazioni proposte non comprende i parametri naturali tipicamente presenti nei sistemi spiaggia/duna, i valori dedotti sono stati poi filtrati in base alle caratteristiche rinvenute sul campo.

### ***7.5.3\_Determinazione dei fattori di correzione***

Per riuscire ad estrapolare il fattore di correzione è necessario confrontare la quantità di sedimento rinvenuto nelle trappole, con quello che si sarebbe dovuto catturare applicando le formule teoriche. Il tasso di trasporto eolico potenziale è stato ricavato seguendo le indicazioni riportate nel Coastal Engineering Manual (US Army, 2002), filtrando i dati misurati, ricostruendo i profili di velocità, e ricavando la velocità in corrispondenza del piano campagna (la maggior parte dello spessore coinvolto nella mobilitazione non supera i primi 50cm dal suolo). Quindi, dopo aver ricavato direzione e velocità medie durante il periodo di campionamento, sono state applicate le formulazioni dei 4 principali autori più utilizzati in letteratura: Bagnold (1941), Kawamura (1951), Zingg (1953) e Hsu (1968).

La Tabella 6 riporta schematicamente, per ogni campagna realizzata, sia il tasso di trasferimento reale, sia il corrispondente valore del tasso di trasporto potenziale predetto per mezzo delle formule: il semplice rapporto tra i due permette di ricavare le differenze e quindi di stabilire, tra le quattro, quale fornisce il risultato più attendibile. Le Figure 10 a/b/c rappresentano invece l'andamento e i rapporti tra i valori teorici calcolati e quelli reali desunti dai campionamenti. Dalla tabella e dai grafici si evince abbastanza chiaramente che i valori dei tassi di trasporto teorici risultano sempre maggiori di quelli reali, dai quali si discostano sempre in maniera abbastanza pronunciata; inoltre emerge che le differenze variano in modo consistente in funzione della formula teorica considerata (Figure 132 a/b/c). I valori più elevati e distanti dalla realtà delle sperimentazioni sono quelli dedotti dalla formula di Kawamura (1951), il quale mostra per tutti i siti, e per gran parte delle catture, un valore di trasporto molto elevato, equivalenti a circa +41% per il Faro di Gorino (stdDev

14,16), poco più del +14% per Lido di Spina (stdDev 12,53) e circa il +27% (stdDev 13,06) per la duna in prossimità della foce del Torrente Bevano.

SITO 1		TASSO DI TRASPORTO REALE (g/cm/sec-1)	TASSO DI TRASPORTO POTENZIALE (g/cm/sec-1)											
1	18-ott-07	8.15E-03	Bagnold, 1941	Diff.	Kawamura, 1951	Diff.	Zingg, 1953	Diff.	Hsu, 1968	Diff.	Stdev		Stdev	
2	30-nov-07	1.62E-02	2.98E-01	36.51	4.45E-01	54.59	1.79E-01	21.90	3.19E-01	39.06	7.44		13.27	
3	08-dic-07	8.67E-03	6.08E-01	37.56	9.10E-01	56.16	3.65E-01	22.53	6.51E-01	40.19	7.44		13.27	
4	11-gen-08	1.82E-02	5.21E-01	60.11	6.85E-01	79.00	2.75E-01	31.70	4.90E-01	56.53	7.44		13.27	
5	28-feb-08	1.01E-02	3.97E-01	21.84	5.94E-01	32.66	2.38E-01	13.11	4.25E-01	23.37	7.44		13.27	
6	13-mar-08	1.50E-02	5.56E-01	55.16	8.31E-01	82.48	3.34E-01	33.10	5.95E-01	59.02	7.44		13.27	
<b>MEDIA</b>		<b>1.27E-02</b>	<b>5.23E-01</b>	<b>34.84</b>	<b>7.83E-01</b>	<b>52.09</b>	<b>3.14E-01</b>	<b>20.90</b>	<b>5.60E-01</b>	<b>37.28</b>	<b>7.44</b>		<b>13.27</b>	

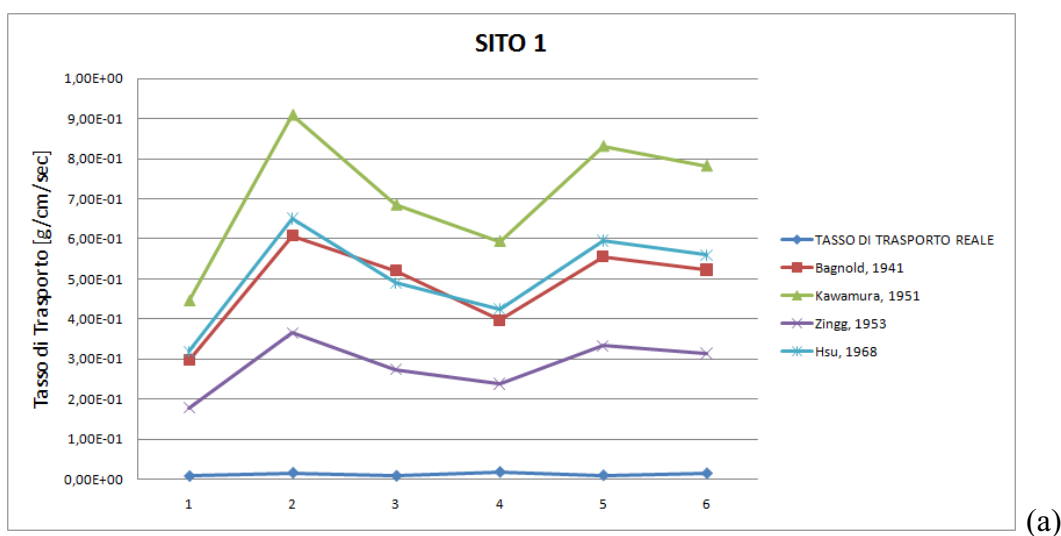
  

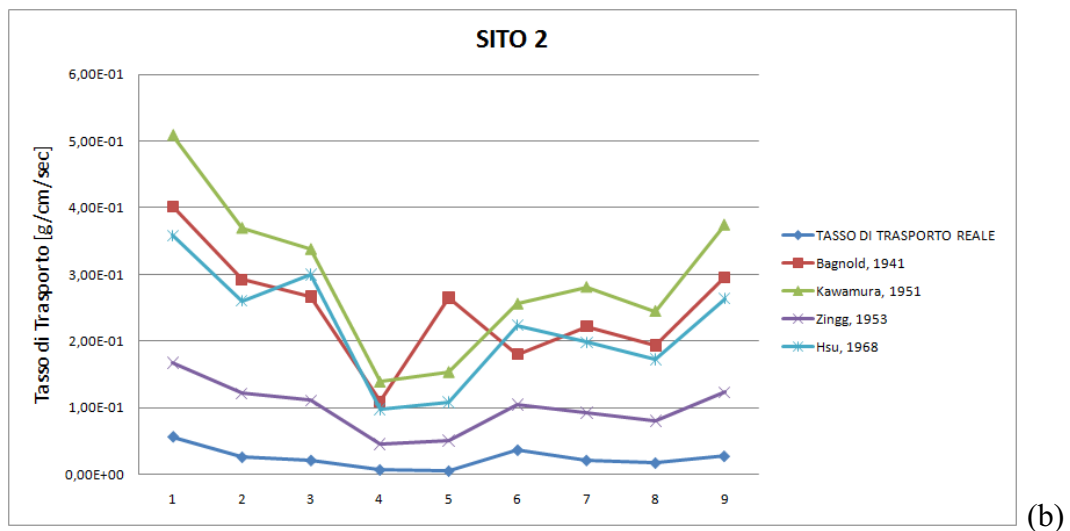
SITO 2		TASSO DI TRASPORTO REALE (g/cm/sec-1)	TASSO DI TRASPORTO POTENZIALE (g/cm/sec-1)											
1	02-feb-07	5.69E-02	Bagnold, 1941	Diff.	Kawamura, 1951	Diff.	Zingg, 1953	Diff.	Hsu, 1968	Diff.	Stdev		Stdev	
2	18-mar-07	2.64E-02	4.02E-01	7.07	5.09E-01	8.94	1.67E-01	2.95	3.58E-01	6.30	1.83		4.08	
3	10-apr-07	2.16E-02	2.92E-01	11.07	3.70E-01	14.00	1.22E-01	4.61	2.60E-01	9.87	1.83		4.08	
4	12-mag-07	7.47E-03	2.67E-01	12.38	3.38E-01	15.67	1.11E-01	5.16	3.00E-01	13.91	1.83		4.08	
5	19-set-07	5.65E-03	1.10E-01	14.68	1.39E-01	18.57	4.57E-02	6.11	9.78E-02	13.09	1.83		4.08	
6	10-mar-09	3.69E-02	2.65E-01	46.87	1.54E-01	27.16	5.06E-02	8.94	1.08E-01	19.14	1.83		4.08	
7	18-apr-09	2.16E-02	1.80E-01	4.88	2.56E-01	6.94	1.05E-01	2.84	2.24E-01	6.07	1.83		4.08	
8	23-set-09	1.77E-02	2.22E-01	10.29	2.81E-01	13.03	9.25E-02	4.29	1.98E-01	9.18	1.83		4.08	
9	15-ott-09	2.77E-02	1.94E-01	10.92	2.45E-01	13.82	8.07E-02	4.55	1.73E-01	9.74	1.83		4.08	
<b>MEDIA</b>		<b>2.47E-02</b>	<b>2.96E-01</b>	<b>10.67</b>	<b>3.74E-01</b>	<b>13.50</b>	<b>1.23E-01</b>	<b>4.45</b>	<b>2.64E-01</b>	<b>9.51</b>	<b>1.83</b>		<b>4.08</b>	

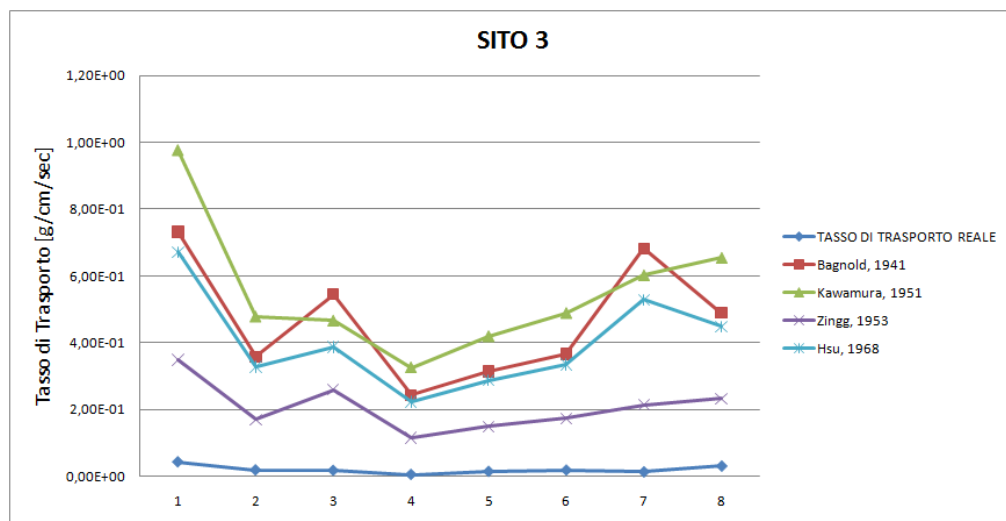
SITO 3		TASSO DI TRASPORTO REALE (g/cm/sec-1)	TASSO DI TRASPORTO POTENZIALE (g/cm/sec-1)											
1	20-gen-08	4.42E-02	Bagnold, 1941	Diff.	Kawamura, 1951	Diff.	Zingg, 1953	Diff.	Hsu, 1968	Diff.	Stdev		Stdev	
2	19-mar-08	1.95E-02	7.32E-01	16.56	9.77E-01	22.11	3.49E-01	7.89	6.71E-01	15.19	4.52		10.13	
3	23-apr-08	1.81E-02	3.58E-01	18.40	4.78E-01	24.57	1.70E-01	8.76	3.28E-01	16.88	4.52		10.13	
4	11-mag-08	5.83E-03	5.46E-01	30.22	4.66E-01	25.79	2.60E-01	14.39	3.87E-01	21.43	4.52		10.13	
5	23-set-08	1.50E-02	2.44E-01	41.82	3.25E-01	55.83	1.16E-01	19.92	2.24E-01	38.36	4.52		10.13	
6	11-ott-08	1.91E-02	3.14E-01	20.86	4.19E-01	27.85	1.49E-01	9.93	2.88E-01	19.13	4.52		10.13	
7	12-feb-09	1.35E-02	3.66E-01	19.13	4.88E-01	25.54	1.74E-01	9.11	3.36E-01	17.55	4.52		10.13	
8	17-mar-09	3.12E-02	6.82E-01	50.57	6.02E-01	44.59	2.15E-01	15.90	5.29E-01	39.21	4.52		10.13	
<b>MEDIA</b>		<b>2.08E-02</b>	<b>4.90E-01</b>	<b>15.70</b>	<b>6.54E-01</b>	<b>20.96</b>	<b>2.33E-01</b>	<b>7.48</b>	<b>4.49E-01</b>	<b>14.40</b>	<b>4.52</b>		<b>10.13</b>	

Tabella 6 – Tassi di trasporto eolico teorico e reale ricavati dalle sperimentazioni eseguite durante il 2007, il 2008, e inizio del 2009; In grassetto rosso sono evidenziati i tassi potenziali minori, mentre in grassetto nero quelli maggiori; in arancione le differenze con il tasso reale maggiori, mentre in verde, quelli minori. Alla base di ogni tabella sono anche evidenziati in rosso i valori medi che saranno successivamente considerati come fattori di correzione dei tassi potenziali calcolati con il dataset CALMET-SIM.





(b)



(c)

Figura 139 – Rappresentazione dei valori di Tasso di Trasporto (Reali e Potenziali) dedotti e calcolati per tutte le sperimentazioni effettuate, per i 3 siti campione: Faro di Gorino (a); Lido di Spina (b); Foce Torrente Bevano (c).

Su un totale di 23 sperimentazioni predice tassi teorici in media superiori al 35% (stdDev 21,68) rispetto a quelli reali. È invece Zingg (1953) a mostrare i tassi che mediamente più si avvicinano a quelli misurati, con una sovrastima media appena superiore a +13%. Per il sito n.1 (Faro di Gorino) la differenza media è di circa il 24% (con un minimo pari a circa il +13,1%), per il sito n.2 (Lido di Spina) è di circa +5% (con un minimo di +2,8%), mentre la differenza, in prossimità della foce del torrente Bevano, scende a poco meno del +12% (con un min di poco meno del 7.5%). Gli altri due autori forniscono risultati che in media (tra tutti i siti) si aggirano per Bagnold (1941), attorno ad un +27% (stdDev 16,56), mentre per Hsu (1968) poco più del +25% (stdDev 15,64). Questa corrispondenza tra risultato atteso e

registrato sembra trovare conferma anche dagli ultimi studi e sperimentazioni pubblicate dalla ricerca scientifica internazionale (Junaidi&Aoki, 2009), a dimostrazione che probabilmente, per le condizioni morfologiche, morfodinamiche e morfo sedimentarie, l'equazione da prendere in considerazione per tutte le valutazioni sul tasso di trasporto è quella di Zingg (1953). Provando a riassumere i valori rappresentativi emersi dalle sperimentazioni (tassi di trasporto reali) e dal calcolo dei corrispondenti valori teorici, si ottiene la Tabella 7. Da essa si evince che per il calcolo dei tassi di trasporto teorico di tutti gli altri 37 apparati dunari considerati in questo lavoro, va presa in considerazione l'equazione di Zingg (1953), a meno di 3 fattori di correzione, uno per ciascun settore d'influenza individuato lungo i tratti di costa che separano i siti campione.

	SITO CAMPIONE		
	N		S
	1. Faro Gorino	2. Lido di Spina	3. torrente Bevano
Numero sperimentazioni	6	9	8
durata media [h]	2.2	1.4	1.9
Velocità media [m/s]	10.13	10.67	11.14
Tasso <b>POTENZIALE</b>	ZINGG (1953)	ZINGG (1953)	ZINGG (1953)
<b>MIN</b> [g/cmsec-1]	1.79E-01	4.57E-02	1.16E-01
Tasso <b>POTENZIALE</b>	KAWAMURA (1951)	KAWAMURA (1951)	KAWAMURA (1951)
<b>MAX</b> [g/cmsec-1]	9.10E-01	5.09E-01	9.77E-01
deviaz.stnd	0.19	0.11	0.20
Tasso <b>REALE MIN</b> [g/cmsec-1]	8.15E-03	5.65E-03	5.83E-03
Tasso <b>REALE MAX</b> [g/cmsec-1]	1.82E-02	5.69E-02	4.42E-02
deviaz.stnd	0.004	0.016	0.012
<b>Differenza min</b> [%]	ZINGG (1953)	ZINGG (1953)	ZINGG (1953)
<b>POTENZIALE/REALE</b>	<b>23.87</b>	<b>4.88</b>	<b>11.67</b>
StdDev	7.44	1.83	4.52

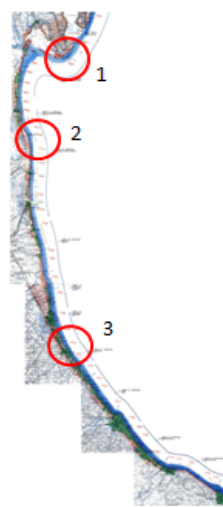


Tabella 7 – Nella tabella sono riportati i valori più indicativi estrapolati dal confronto tra le sperimentazioni e il calcolo dei corrispondenti tassi di trasporto teorici; in grigio vengono messe in evidenza le differenze minori riscontrate dal confronto, le stesse che poi verranno prese come fattore di correzione per il calcolo dei tassi di trasporto teorico per tutti gli altri apparati dunari.

Tali fattori risultano pari a  $C1 = 23.87$  (per le dune dello Scanno di Goro e quelle tra Lido di Volano e Porto Garibaldi - AREA 1),  $C2 = 4.88$  (per le dune tra Lido degli Estensi e Casal Borsetti - AREA 2) e  $C3 = 11.67$  (per tutti gli apparati che si trovano nella parte più a sud, da Ravenna fino a Cesenatico - AREA 3).

Va specificato che, nonostante la scelta dei siti campione sia stata effettuata anche e soprattutto in modo da suddividere la costa in tratti omogenei da questo punto di vista (Area 1, Area 2 e Area 3, Figura 140), i limiti tra un settore e l'altro non ricalcano quelli stabiliti nella determinazione iniziale del clima medio (3 Macroaree per le tre stazioni Arpa).

D'altronde è diverso anche l'obiettivo: nel primo caso, era quello di stabilire un regime anemologico regionale, mentre nel secondo, è di correggere il tasso di trasporto potenziale alla scala del singolo apparato: in altre parole, era importante cercare una suddivisione che tenesse conto solo della distribuzione delle dune, le quali, come si è visto nei primi capitoli introduttivi, risultano concentrate più nella parte centro-settentrionale che in quella meridionale.

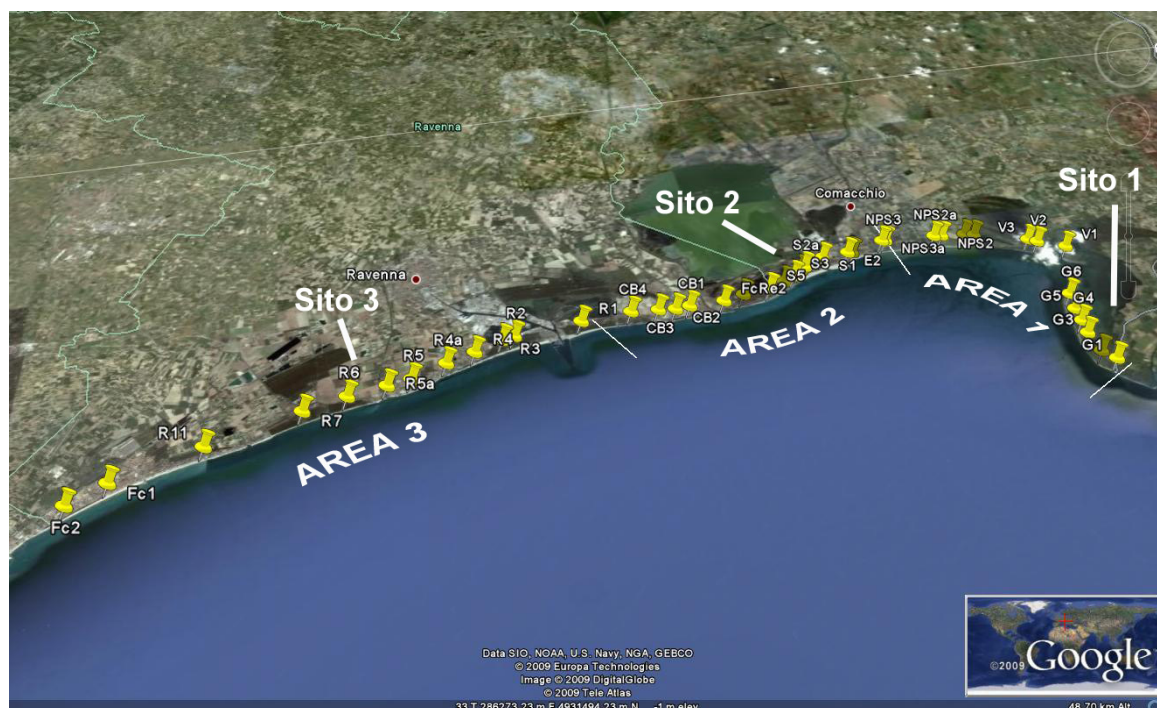


Figura 140 – Siti campione e la suddivisione della costa in base alle aree di influenza associate ai fattori di correzione (C1, C2, e C3) derivati dalla sperimentazione eolica.

## 7.6\_ TASSO DI TRASPORTO EOLICO POTENZIALE

**KEY WORDS** (modello Calmet-SIM; calcolo del Tasso di Trasporto eolico potenziale per ciascun apparato dunare considerato)

A causa dell'estensione dell'area in esame (130km), e del numero complessivo di apparati dunari presi in esame (40), non è stato possibile, operativamente, condurre una quantità di campagne anemometriche sufficiente per ricavare un clima medio locale che fosse realmente rappresentativo per ciascuna duna e per ogni condizione anemologica. D'altro canto,

utilizzare solo tre stazioni meteo (quelle della stazione ARPA) per determinare 40 tassi di trasporto eolico, sarebbe stato comunque un errore, in quanto la scala di applicabilità del dato registrato è totalmente differente da quello necessario.

Si è cercato di ovviare a tale difficoltà con un altro tipo di approccio, utilizzando comunque i dati registrati alle stazioni anemometriche di Lido di Volano (FE), Marina di Ravenna (RA) e Cesenatico (FC), ma inserendoli, grazie alla preziosa collaborazione del Servizio Idro Meteo Clima (SIM-C) della Regione Emilia-Romagna, all'interno del modello fisico-matematico CALMET-SIM (pre-processore meteorologico), sviluppato e promosso proprio da tale sezione. Tale modello non solo è in grado di interpolare i dati in base alla velocità e direzione del vento, ma tiene conto anche dei principali parametri atmosferici (temperatura, umidità, precipitazioni, etc.), e dell'orografia della superficie su cui scorre il flusso eolico, ad una scala del tutto comparabile a quella del singolo apparato dunare (max 5.0 km). In questo modo si è riusciti a ricavare un clima medio locale attendibile e rappresentativo: da questo, attraverso l'utilizzo delle formulazioni presenti in letteratura, è stato possibile derivare un Tasso di Trasporto Potenziale per ogni apparato dunare.

### ***7.6.1\_ Il modello CALMET-SIM***

Il modello CALMET-SIM è un pre-processore meteorologico mass-consistent, cioè uno strumento in grado di ricostruire i valori dei parametri meteorologici su un grigliato, partendo da un insieme di misure di tipo diverso e sfruttando una serie di informazioni sul territorio (orografia, uso del suolo ecc). A differenza di un modello meteorologico, non risolve le equazioni fluidodinamiche applicate all'atmosfera, ma interpola in modo "intelligente" i dati disponibili, usando algoritmi di tipo parametrico per stimare i parametri non osservati (ad esempio quelli che descrivono la turbolenza) e tenendo conto degli effetti dell'orografia.

Presso ARPA-SIM, Calmet è implementato su un dominio che copre il nord Italia con passo di 5 km (Deserti et alii, 2001). Il modello è operativo dal 2000, e il dataset viene aggiornato quotidianamente. Le principali opzioni utilizzate per la definizione del campo di vento sono:

- Campo di prima scelta: interpolazione dei 4 radiosondaggi presenti nel nord Italia (Figura 141a);
- Effetti dell'orografia: attivi gli schemi per brezze di valle, blocco orografico, estrapolazione in quota delle osservazioni superficiali; non attivi minimizzazione della divergenza ed effetti cinematici;

- Osservazioni superficiali: viene usato un sottoinsieme delle stazioni Synop e della rete di ARPA-SIM presenti nel dominio, selezionate in modo da essere il più possibile rappresentative di un'area vasta (Figura 141b);
- Parametri fisiografici: orografia GTOPO30 (USGS, 1996), uso del suolo dal dataset CORINE (EEA, 2002). Gli altri parametri sono stati calcolati a partire dalla frazione dei diversi usi del suolo all'interno di ciascuna cella, usando la tabella proposta nel manuale Calmet (Scire et alii, 2000).

I dati sono stati forniti comprensivi di tutti gli eventi ventosi registrati dal 2001 al 2005. A causa dell'elevato numero di dati a disposizione e della discrepanza tra le misure effettivamente misurate alle 3 stazioni ARPA, si è reso necessario un pre-processamento, finalizzato in particolare al filtraggio e omogeneizzazione dei dati realmente utili: nella Tabella 8 sono riportati, per ogni apparato dunare, i principali parametri statistici relativi ai dati misurati e disponibili.

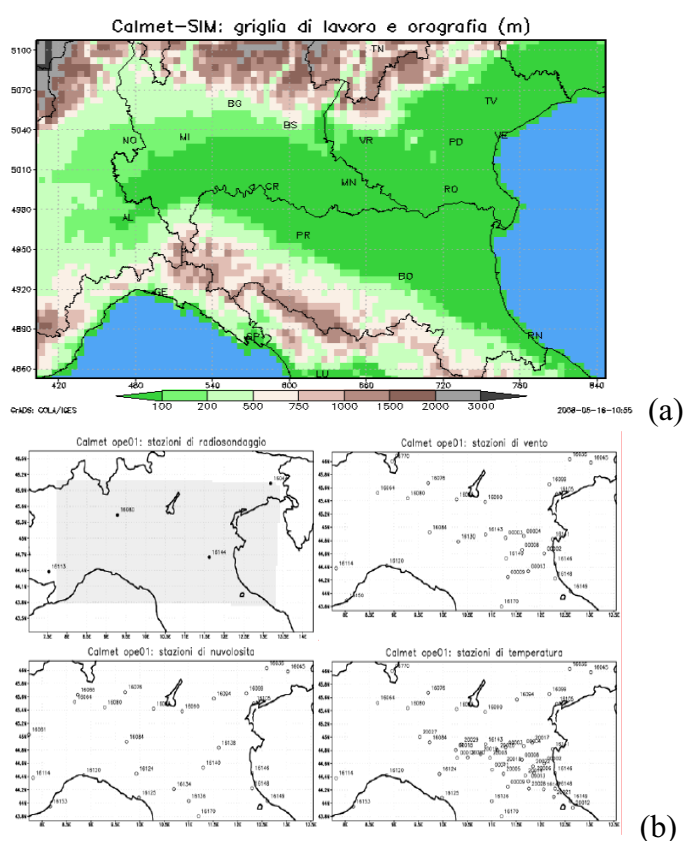


Figura 141 – (a) dominio e orografia del dataset Calmet-SIM; (b) stazioni di misura usate in input da Calmet-SIM, relative ai principali parametri meteorologici richiesti dal modello: profili verticali (alto sinistra), vento a 10 metri (alto destra), copertura nuvolosa (basso sinistra), temperatura a 2 metri (basso destra).



COD: G1				
Latitudine	Temp	Dir-wind	Mod-wind	
Longitudine	44.813	2m	10m	10m
Massimo	309.4	360	360	28.3
Minimo	265.5	0	0	0
Media	287	189	188	1.7
Dev.standa	8.5	102	102	1.4
Dati buoni	41905	41905	41905	41905
Dati rich.	43848	43848	43848	43848

COD: V2				
Latitudine	Temp	Dir-wind	Mod-wind	
Longitudine	44.816	2m	10m	10m
Massimo	309.4	360	360	30.3
Minimo	265.4	0	0	0
Media	286.9	188	188	1.8
Dev.standa	8.6	102	102	1.4
Dati buoni	41905	41905	41905	41905
Dati rich.	43848	43848	43848	43848

COD: NPS3a				
Latitudine	Temp	Dir-wind	Mod-wind	
Longitudine	44.682	2m	10m	10m
Massimo	309.4	360	360	25.2
Minimo	265.5	0	0	0
Media	286.9	192	192	1.9
Dev.standa	8.6	97	97	1.5
Dati buoni	41905	41905	41905	41905
Dati rich.	43848	43848	43848	43848

COD: R3				
Latitudine	44.455	Temp	Dir-wind	Mod-wind
Longitudine	12.299	2m	10m	10m
	Massimo	309.3	360	23.4
	Minimo	266.2	0	0
	Media	287	198	2.5
	Dev.standa	8.5	91	2
	Dati buoni	41905	41905	41905
	Dati rich.	43848	43848	43848

COD: FcRe1				
Latitudine	44.59	Temp	Dir-wind	Mod-wind
Longitudine	12.307	2m	10m	10m
	Massimo	309.5	360	21.9
	Minimo	265.7	0	0
	Media	286.9	194	2.1
	Dev.standa	8.5	95	1.7
	Dati buoni	41905	41905	41905
	Dati rich.	43848	43848	43848

COD: R1				
Latitudine	44.039	Temp	Dir-wind	Mod-wind
Longitudine	12.651	2m	10m	10m
	Massimo	308.9	360	17
	Minimo	267.2	0	0
	Media	287.4	186	2.5
	Dev.standa	8.3	96	2
	Dati buoni	41905	41905	41905
	Dati rich.	43848	43848	43848

COD: R4				
Latitudine	44.41	Temp	Dir-wind	Mod-wind
Longitudine	12.297	2m	10m	10m
	Massimo	309.4	360	27.2
	Minimo	266.2	0	0
	Media	287	199	2.5
	Dev.standa	8.4	91	1.9
	Dati buoni	41905	41905	41905
	Dati rich.	43848	43848	43848

COD: FcRe2				
Latitudine	44.59	Temp	Dir-wind	Mod-wind
Longitudine	12.307	2m	10m	10m
	Massimo	309.5	360	21.9
	Minimo	265.7	0	0
	Media	286.9	194	2.1
	Dev.standa	8.5	95	1.7
	Dati buoni	41905	41905	41905
	Dati rich.	43848	43848	43848

COD: R5				
Latitudine	44.365	Temp	Dir-wind	Mod-wind
Longitudine	12.294	2m	10m	10m
	Massimo	309.3	360	23.3
	Minimo	266.2	0	0
	Media	287	200	2.6
	Dev.standa	8.4	91	1.9
	Dati buoni	41905	41905	41905
	Dati rich.	43848	43848	43848

COD: CB1				
Latitudine	44.545	Temp	Dir-wind	Mod-wind
Longitudine	12.304	2m	10m	10m
	Massimo	309.5	360	23.3
	Minimo	265.9	0	0
	Media	286.9	196	2.2
	Dev.standa	8.5	93	1.8
	Dati buoni	41905	41905	41905
	Dati rich.	43848	43848	43848

Tabella 8 – Tabella riassuntiva delle misurazioni anemometriche e dei principali parametri statistici ricostruiti per ciascun apparato dunare mediante il pre-processore meteorologico Calmet-SIM.

### 7.6.2\_ Calcolo dei tassi di trasporto potenziali locali

La necessità di analizzare il campo eolico locale, piuttosto che quello regionale, per il calcolo del tasso di trasporto potenziale è legato non solo a ciò che è stato detto nella prima parte del capitolo (3 sole stazioni per 130 km di costa non sono sufficienti), ma anche a considerazioni prettamente più morfologiche: sebbene l'andamento del paraggio regionale appaia generalmente rettilineo, con poche direttrici principali di sviluppo, alla scala del singolo apparato, la direzione del cordone dunare e quella della linea di riva possono anche essere molto diverse tra loro (Figura 142).

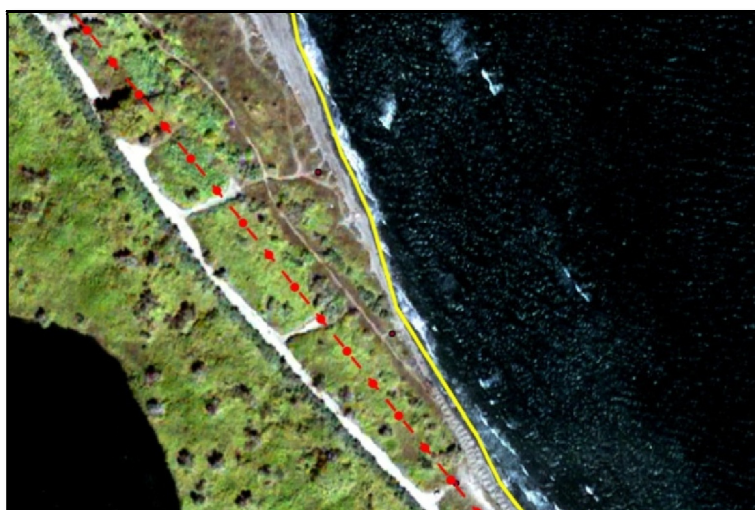


Figura 142 – Esempio di come in alcuni casi l'evoluzione morfodinamica della spiaggia (linea id riva) segua un altro corso rispetto a quella della duna: in questo caso le direzioni di sviluppo risultano molto diverse (Lido di Spina).

Questo vuol dire che se le dune mostrano una direzionalità diversa da quella della linea di riva, il contributo del vento (che ovviamente dipende dall'ampiezza dell'area di deflazione), sarà diverso da punto a punto, e di conseguenza, inciderà in maniera disomogenea sul valore finale. A onor del vero gran parte di queste situazioni coincidono con dune ben strutturate, che si trovano in condizioni morfodinamiche tali da essere soggette più ad arretramento per erosione che a progradazione per trasporto eolico; un assetto del genere, oltre che testimoniare una morfogenesi evidentemente diversa da quella attuale, pone i presupposti, nel caso in cui si verificasse un nuovo trasferimento di sabbia verso la duna (Es. grazie ad un ripascimento che ristabilisce la giusta ampiezza di spiaggia), per la crescita di una geometria probabilmente diversa da quella che si riscontra oggi.

Dalla studio della distribuzione delle frequenze (*Rose Diagram*) è stato possibile, per ogni duna, descrivere il clima meteo "locale", in particolare relativo al settore di paraggio che include le direzioni costruttive. La scelta di vincolare l'analisi solo ad un aspetto del fenomeno di trasporto, in questo caso si giustifica con la convinzione che, tra le due, l'influenza sui meccanismi di sviluppo di venti onshore, sia maggiore di quella di venti offshore; in più, si è dovuto fare i conti con l'impossibilità di misurare operativamente, in maniera rigorosa e sufficientemente precisa, la quantità di materiale che la duna perde a causa di venti che spirano da terra verso mare. In base alla direzione di sviluppo della duna ( $\alpha^{\circ}N$ ), sono stati individuati 3 intervalli angolari di riferimento ( $\pm 15^{\circ}$  rispetto alle direzioni  $\beta = \alpha^{\circ}N+60^{\circ}N$ ,  $\gamma = \alpha^{\circ}N+90^{\circ}N$ , e  $\theta = \alpha^{\circ}N+120^{\circ}N$ , Figura 143): in corrispondenza di ciascuno di essi, attraverso l'analisi statistica degli eventi sono state successivamente calcolate DIREZIONE e VELOCITÀ MEDIA. È stato calcolato un tasso di trasporto potenziale, per ogni direzione, utilizzando la formulazione di Zingg (1953) (per i motivi descritti nel precedente paragrafo), e correggendo i valori così ottenuti in base a:

- ORIENTAZIONE DELLE DIREZIONI DEI VENTI DOMINANTI (Bagnold, 1941) rispetto a quella dell'asse dunare/linea di costa;
- PENDENZA DELLA SPIAGGIA ANTISTANTE (Kawamura, 1953);
- FATTORE DI CORREZIONE (C1, C2 o C3) descritto nel precedente paragrafo (scelto a sua volta in base alla posizione geografica della duna in questione).

Per ovvi motivi di rappresentatività, i tassi relativi alle singole direzioni sono stati successivamente sommati in modo da ricavare, per l'intero apparato dunare, un unico valore di riferimento (Tabella 9).

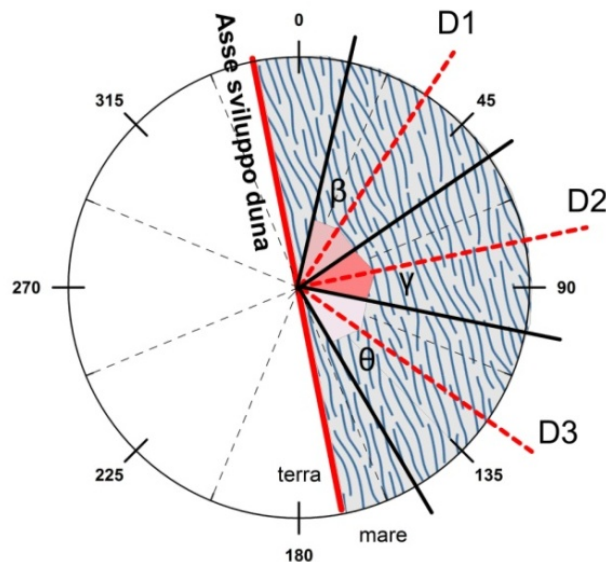


Figura 143 – Schema di suddivisione delle varie direzioni entro cui si è suddiviso il settore costruttivo dei venti onshore, in base alla direzione di sviluppo dell'apparato dunare; gli angoli  $\beta$ ,  $\gamma$ , e  $\theta$  (uguali in ampiezza) vanno misurati in relazione all'orientazione della direttrice di sviluppo della duna ( $\alpha$ ).

In Figura 137 è rappresentato, per mezzo di un'istogramma, l'andamento del valore del tasso di trasporto potenziale lungo l'intero litorale regionale: osservando la distribuzione dei valori ci si rende conto che, da nord verso sud, i tassi mostrano una distribuzione molto variabile. Ciò nonostante è comunque possibile delineare un trend generale che permette di fare importanti considerazioni:

- Partendo dalla porzione più a nord, c'è un settore, comprensivo degli apparati che si sviluppano sullo Scanno di Goro (provincia Ferrara, cod.G1 - cod.G6), che mostra valori molto bassi del tasso di trasporto (in media  $0,07 \text{ g/cmsec}^{-1}$ ); questa distribuzione di valori è legata evidentemente all'orientazione dello scanno (prevalentemente E-W), per cui le dune risultano completamente esposte ai soli venti di Maestrale e, in minor misura, a quelli di Scirocco. Solo l'apparato corrispondente al cod.G1 (duna armata Faro Gorino), per la particolare orientazione locale (completamente esposto a tutti i venti di Scirocco) di questo breve tratto dello spit ( $41^\circ\text{N}$  contro gli  $86^\circ\text{N}$  di media), mostra addirittura un picco di tasso di trasporto ( $0,15 \text{ g/cmsec}^{-1}$ );
- Dallo spit di Volano, fino a Lido di Spina (prov. FE, cod.V1 – cod.S2), si sviluppa un settore che mostra, da nord verso sud, una distribuzione a campana con un aumento progressivo dei valori, fino ad un massimo in corrispondenza di Lido degli Scacchi (in media  $0,10 \text{ g/cmsec}^{-1}$ , con un massimo di  $0,15 \text{ g/cmsec}^{-1}$  in corrispondenza di un

apparato tra Lido degli Scacchi e Pomposa), e successivamente una progressiva diminuzione fino ad un minimo in corrispondenza della cuspidale di Lido di Spina ( $0,06 \text{ g/cmsec}^{-1}$ ). anche questo tipo di distribuzione è legata all'andamento della linea di costa, la quale, alla scala di analisi condotta in questo lavoro, è assimilabile alla direzione di sviluppo dell'apparato dunare.

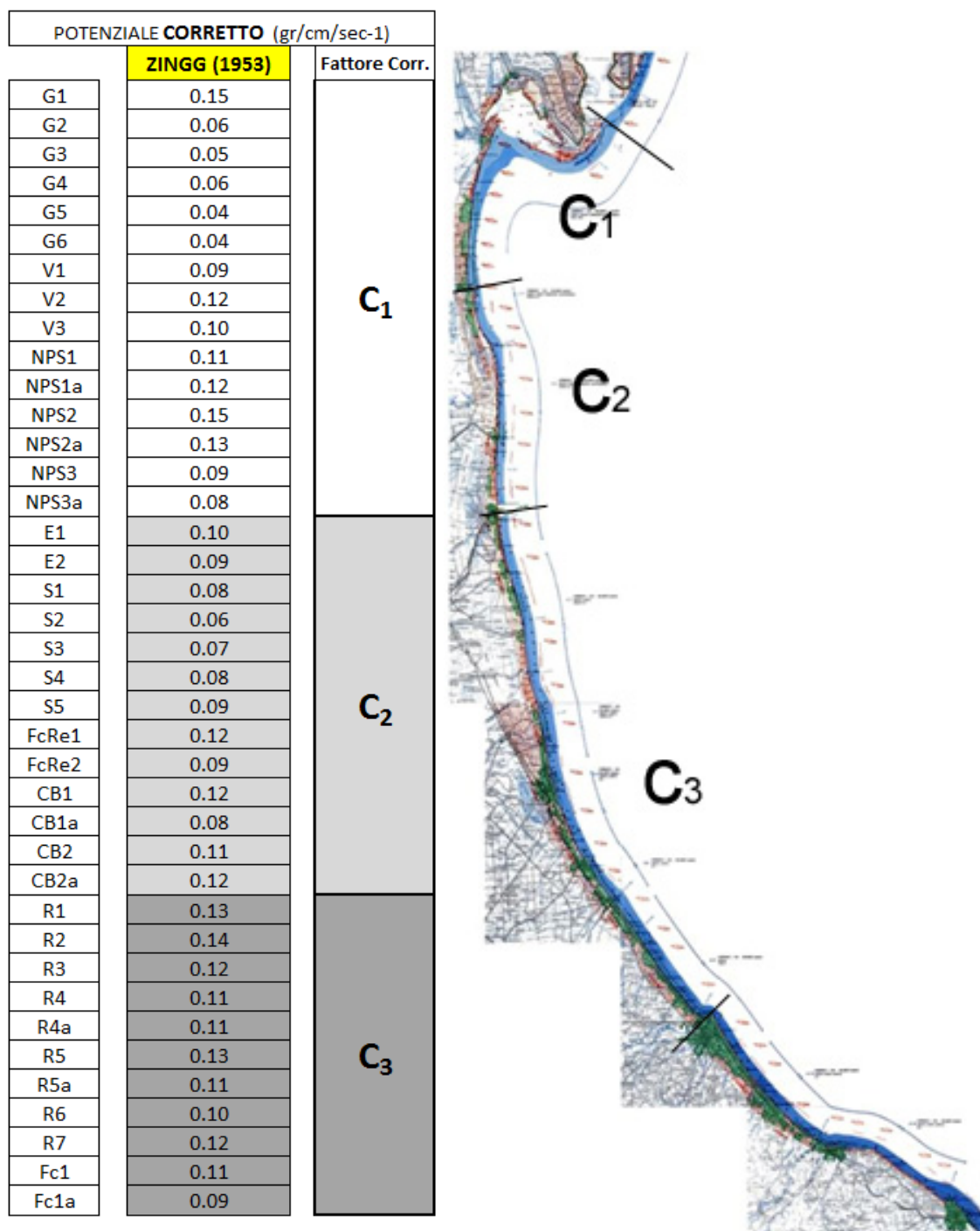


Tabella 9 – Tabella riasuntiva dei tassi di TRASPORTO EOLICO POTENZIALE ricavati per ciascun apparato, secondo la formulazione relativa all'utore indicato.

Spostandosi da nord verso sud, in questo tratto le esposizioni variano progressivamente da NNE-SSW, attraverso una più chiara direttrice NS, fino ad una opposta NNW-SSE, attraverso una geometria di tipo a campana (riquadro in nero, Figura 144), sostanzialmente simmetrica, che ha vertice proprio in corrispondenza di Lido degli Scacchi.

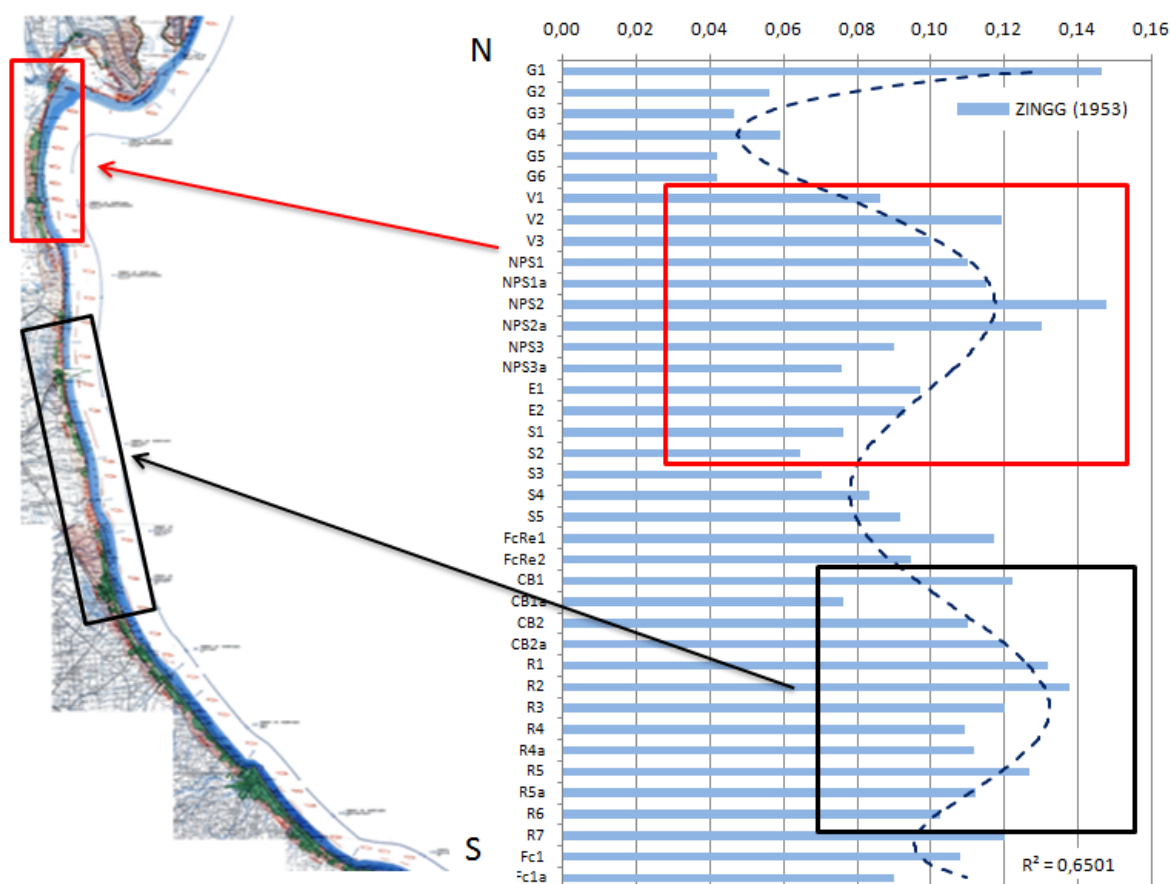


Figura 144 – Andamento del valore di tasso di trasporto eolico spostandosi da nord verso sud: in rosso e in nero sono evidenziati i tratti di costa in corrispondenza dei quali si registrano i valori più elevati.

- Dopo la foce del fiume Reno, inizia un tratto apparentemente più omogeneo, ma con un andamento più articolato, per cui è difficile definirne i limiti: se si osservano i valori di tasso di trasporto, e si prova, come prima, a confrontarli con l'orientazione della linea di costa, ci si rende conto che la variabilità è decisamente ampia, con valori anche molto diversi per tratti sostanzialmente prossimi l'uno all'altro (riquadro in rosso, Figura 137). È il caso per esempio degli apparati di Casal Borsetti (Ra), i quali pur essendo distanti solo qualche centinaio di metri, mostrano valori del tasso di



trasporto diversi ( $0,8 - 0,12 \text{ g/cmsec}^{-1}$ ). A giustificare questa apparente anomalia, così come altre, è ancora una volta l'orientazione della spiaggia antistante le dune in questione (Figura 145): risultano divise dal fiume Lamone, il quale ha una geometria di foce tale che le dune poste a nord e a sud mostrano una differenza di orientazione di ben  $31^\circ$ .

Questa osservazione può essere estesa all'interno di tutto il tratto in considerazione (provincia Ravenna, cod.S3 – cod.R7): a causa della geometria delle foci fluviali e della presenza di numerose opere presenti (pennelli e moli portuali su tutti) la costa è diventata, alla scala del singolo apparato, talmente articolata che l'orientazione di riferimento può assumere valori assai diversi anche per tratti contigui. I valori più alti si registrano nella porzione più meridionale del tratto in questione (in corrispondenza del tratto compreso tra Lido di Dante e la Foce del Torrente Bevano – Cod.R5), dove il valore del tasso di trasporto raggiunge i  $0,13 \text{ g/cmsec}^{-1}$ , mentre in media in questo ampio tratto di costa che prende quasi tutta la provincia di Ravenna, il valore del tasso di trasporto è di  $0,11 \text{ g/cmsec}^{-1}$ .

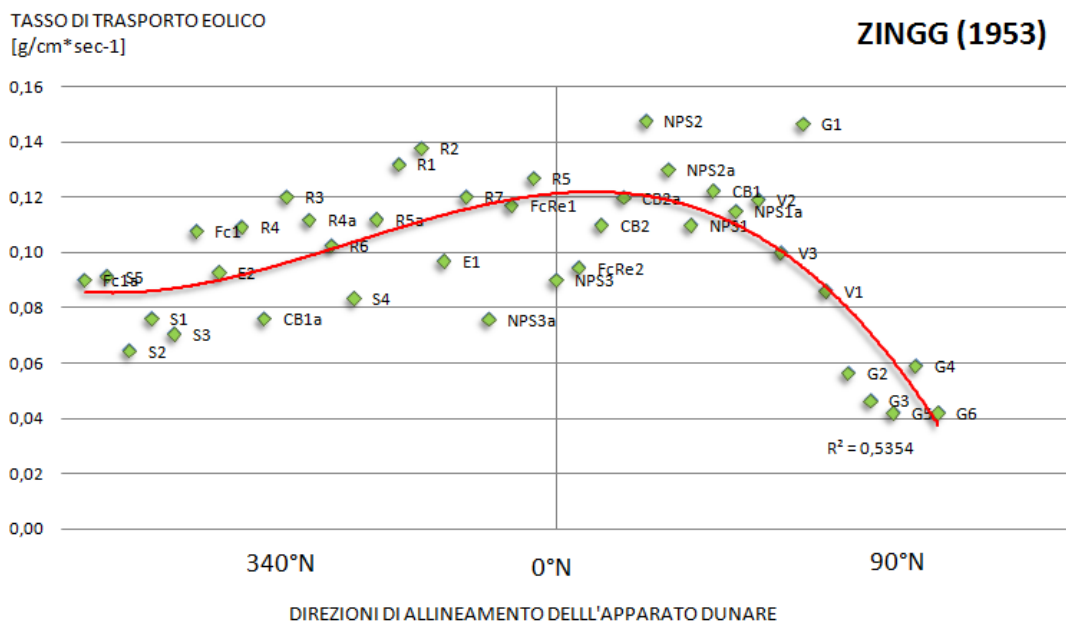


*Figura 145 – Particolare configurazione della foce del fiume Lamone che conferisce al tratto di costa (e quindi anche alle dune) immediatamente a nord e a sud un'orientazione molto diversa.*

- Ancora più a sud la tendenza è quella di ulteriore diminuzione: i valori minimi ( $0,09 \text{ g/cmsec}^{-1}$ ) si registrano proprio in corrispondenza dei due lembi di apparato dunare a Cesenatico (FC), dove la costa assume chiaramente un andamento NNW-SSE.



Le Figure 146 a/b descrivono l'andamento del tasso di trasporto rispetto all'orientazione della linea di costa. La Figura 139a mostra come i valori di tasso di trasporto aumentino man mano che l'orientazione passa da NW-SE (media 0,11 g/cmsec-1), attraverso una direttrice NS (media 0,12 g/cmsec-1), fino a quella NNE-SSW (media 0,010 g/cmsec-1); valori superiori a 45°N espongono la duna ad una direttrice di provenienza dei venti scarsa e poco efficace, per cui c'è un progressivo decremento che vede proprio le dune dello scanno di goro quelle con le probabilità di crescita più basse (in media, 0,05 g/cmsec-1). Nella Figura 139b è mostrato lo stesso tipo di rapporto, ma in una veste che mette in risalto aspetti importanti: in rosso sono rappresentate la curva di variabilità, e le direzioni medie della linea di costa/asse della duna (in termini di orientazioni  $\alpha^\circ N$ ), corrispondenti ai punti di flesso della curva. In blu, sono indicati apparati dunari che in questo tipo di distribuzione, rappresentano "apparenti anomalie", poiché il tasso di trasporto potenziale calcolato per esse sembra non essere legato alla direzione della linea di costa, così come lo è per dune che mostrano direzioni di sviluppo simili. Andando ad analizzare le caratteristiche e i parametri che entrano in gioco nella determinazione del tasso di trasporto, ci si accorge che, non sempre è la direzione ad avere più importanza.



(a)

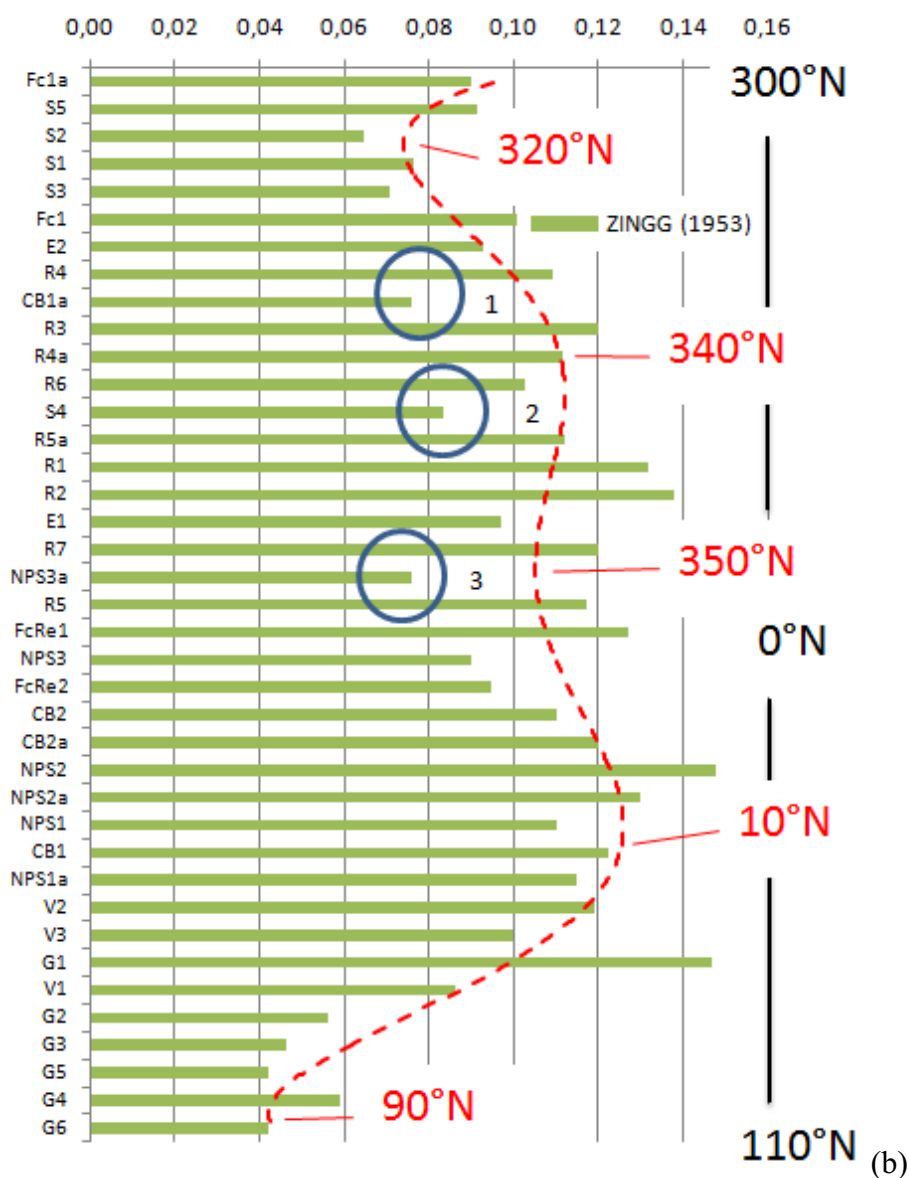


Figura 146 – Rapporto tra tasso di trasporto eolico e orientazione della linea di costa – asse sviluppo dunare: mentre nel diagramma a dispersione (a), nonostante la curva, la distribuzione appare confusa e ad ampio spettro, nell’istogramma (b), non solo la curva mostra un andamento più preciso, ma è possibile individuare anche “apparenti anomalie” nel rapporto tra direzione e tasso di trasporto.

Nel primi due casi a fare la differenza è infatti l’assetto morfologico della spiaggia (pendenza) in quanto spiagge pendenti abbassando il tasso di trasporto: nel primo caso (cod.CB1a), la duna è caratterizzata da una pendenza di 5,43% contro i 3,44% e 4,01% delle dune che le sono affianco nell’istogramma (Figura 146b); nel secondo caso, invece (cod.S4), la duna ha una pendenza di 4.25%, contro i 6,87% e 4,77% delle altre. L’ultimo cerchio nel diagramma evidenzia invece un “anomalia” legata non alla pendenza della spiaggia, ma alle caratteristiche tessiturali del sedimento, in quanto la duna in questione (cod.NPS3a) ha un

$D_{50}$  pari a 2.06 phi, contro i 2,75 phi e i 2.48 phi delle dune che gli sono affianco nell'istogramma; essendo il tasso di trasporto inversamente proporzionale alla taglia del sedimento, a parità di orientazione dell'asse dunare, apparati che sono costituiti da granulometrie più fini saranno contraddistinte da tassi di trasporto più elevati.

A proposito della pendenza della spiaggia, se si diagrammano i tassi di trasporto in funzione della pendenza (Figura 147), ci si rende conto che la distribuzione è estremamente variabile, per cui a questa scala, per le dune che si sviluppano lungo la costa regionale, non è possibile estrapolare una relazione che si possa ritenere sufficientemente valida.

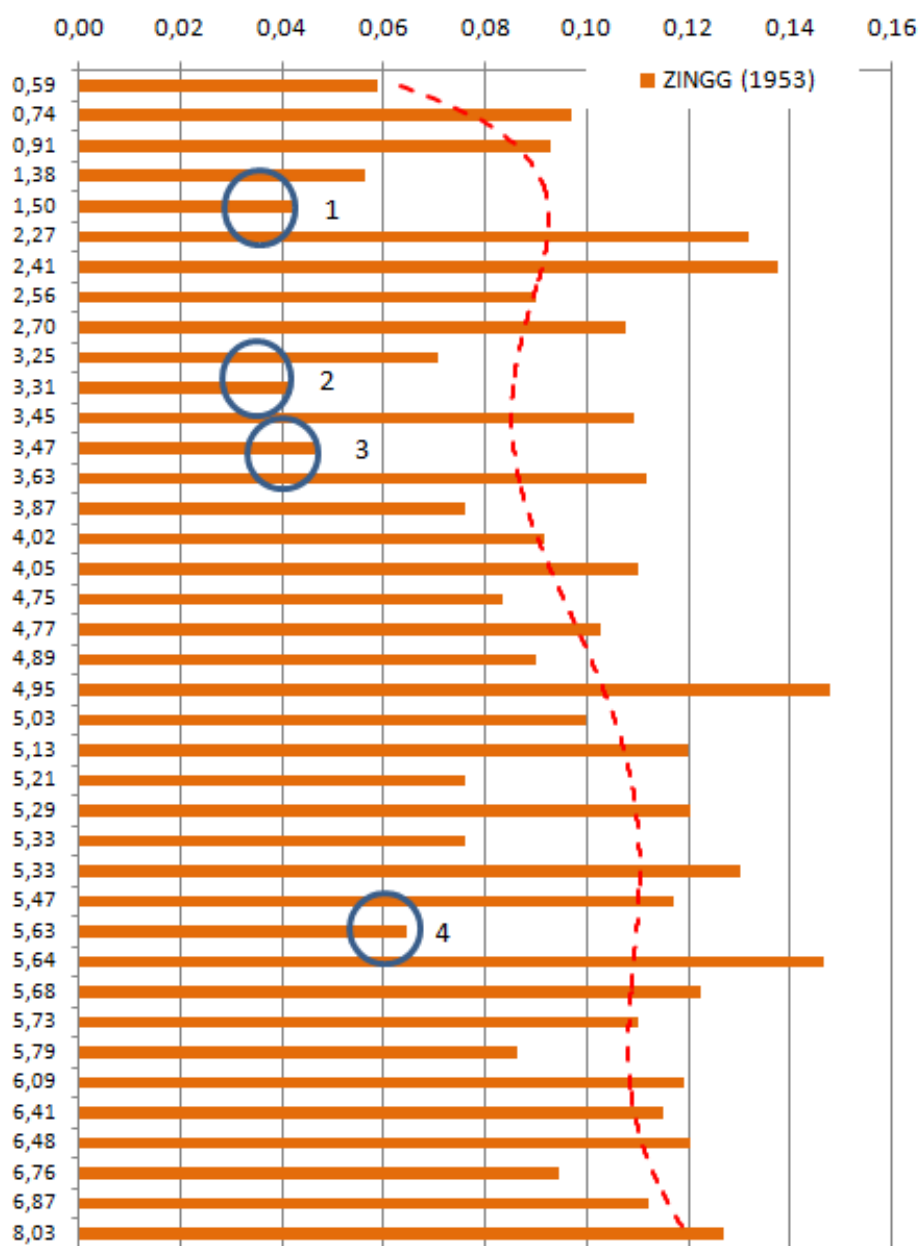


Figura 147 – Diagramma della distribuzione dei tassi di trasporto in funzione delle pendenze della spiaggia antistante; in blu sono cerchiati, anche in questo caso, apparenti anomalie.

Tale aspetto emerge chiaramente dall'andamento dell'istogramma: i valori sono fortemente altalenanti, anche per apparati che mostrano pendenze simili: questo dimostra che l'incidenza sul valore finale del tasso di trasporto, del fattore pendenza, è generalmente più bassa rispetto alle altre (nonostante in alcuni casi, come si è visto precedentemente) può invece rivelarsi fondamentale.

Come è accaduto per il grafico precedente, anche questo mette in luce delle apparenti anomalie nella distribuzione dei valori, e anche in questo caso, le spiegazioni vanno ricercate nei corrispondenti valori degli altri parametri che entrano in gioco. Il gap evidenziato dal cerchio con il numero 1 evidenzia semplicemente un salto di ordine di grandezza, per cui, da spiagge con pendenze inferiori a 1,5°, si passa a valori più elevati (>2°); per gli altri casi (cerchi n.2, 3 e 4), il differente valore di tasso si spiega se si va ad analizzare il corrispondente valore di direzione rispetto a quelle delle dune che nell'istogramma mostrano pendenze simili (Tabella 10).

	<b>COD. duna</b>	<b>Direzione</b>	<b>(°)</b>	<b>Zingg (1953)</b>
	S3	330	3.25	0.07
2	G5	93	3.31	0.04
	R4	341	3.45	0.11
3	G3	90	3.47	0.05
	R4a	342	3.63	0.11
	FcRe1	350	5.47	0.12
4	S2	323	5.63	0.06
	G1	41	5.64	0.15

*Tabella 10 – Tabella dei tassi di trasporto in relazione alle direzioni degli assi dunari e alla pendenza della spiaggia antistante (in celeste sono riportati i valori delle dune indicate con i cerchi blu nell'istogramma di figura 18, mentre in bianco le dune immediatamente sopra e sotto quelle cerchiare).*

I motivi di così tanta variabilità nella distribuzione delle pendenze di spiaggia, sono ovviamente da ricercare nella forte antropizzazione che caratterizza la costa regionale, la quale fa sentire gli effetti della propria azione, principalmente sulla spiaggia, in particolare a cavallo delle stagioni estive, quando, attraverso l'uso di mezzi motorizzati, spianano le superfici all'inizio della stagione turistica o creano gli argini di difesa prima dell'inverno.

Calcolati i tassi, e corretti i valori in base alle considerazioni fatte fin ora, è possibile costruire una CARTA DELLE POTENZIALITÀ EOLICHE per ciascun sito analizzato (sistema spiaggia-duna). In tale carta il regime anemometrico locale è associato ad un diagramma polare che collega ad ogni direzione costruttiva principale il corrispondente valore di tasso potenziale: sia sulla duna che sulla spiaggia vengono rappresentate le forme e le grandezze morfometriche principali, nonché le variazioni areali e lineari rappresentabili, ricavate a varie scale dall'analisi geomorfologica (Capitolo 6). Nelle Figure 148, 149 e 150 sono rappresentati esempi di cartografia del dato di tasso di trasporto eolico ricavato e associato al singolo sistema spiaggia-duna (con affianco il regime anemologico di riferimento), la quale costituirà nei capitoli successivi, la base su cui appoggiare anche tutte le informazioni derivate dall'analisi geomorfologica e dalla classificazione.

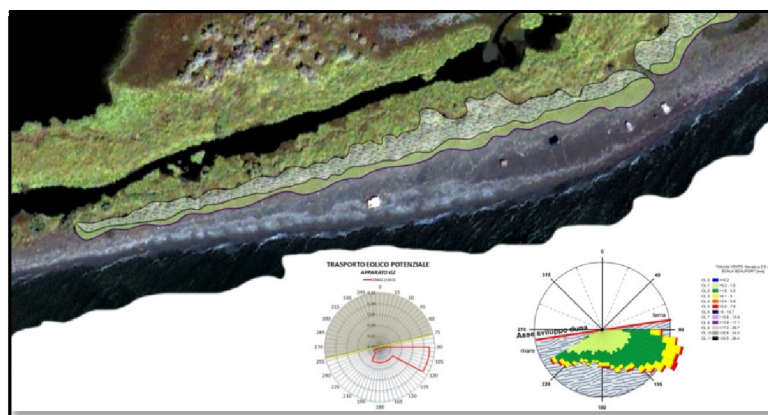


Figura 148 – Apparato dunare in corrispondenza dello Scanno di Goro (Ferrara) con il corrispondente grafico di regime anemometrico e tasso di trasporto eolico potenziale calcolato.

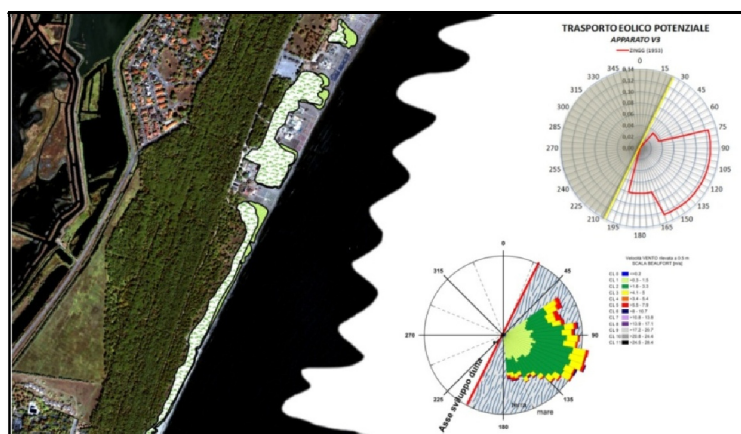


Figura 149 - Apparato dunare in corrispondenza di Lido di Volano (Ferrara) con il corrispondente grafico di regime anemometrico e tasso di trasporto eolico potenziale calcolato.

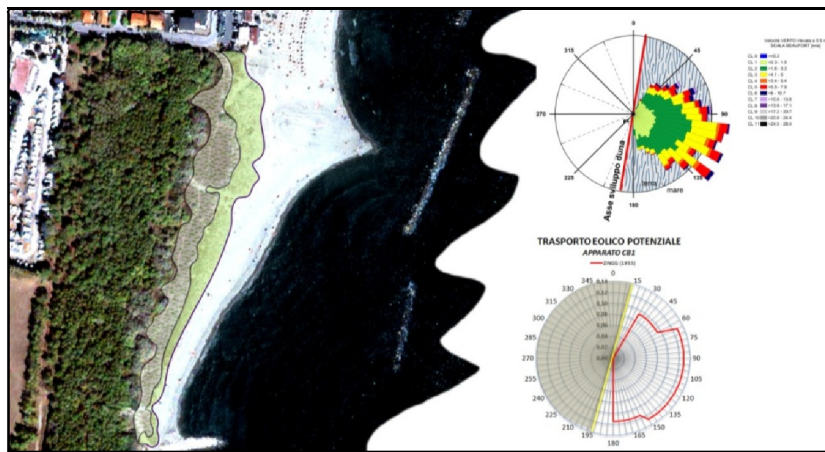


Figura 150 - Apparato dunare in corrispondenza di Lido delle Nazioni (Ferrara) con il corrispondente grafico di regime anemometrico e tasso di trasporto eolico potenziale calcolato.

## Cap 8\_ **INSTABILITA' DEGLI APPARATI DUNARI: LA TEORIA DEI SISTEMI**

**KEY WORDS.** (Generalità; descrizione della matrice d'interazione: scelta dei parametri e concetto di Interattività e Dominanza; parametrizzazione dei fattori di condizionamento; applicazione della matrice; calcolo dell'indice d'instabilità)

---

Storicamente, le prime applicazioni della teoria dei sistemi, anche se implicite, risalgono a molto tempo fa: Gilbert (1877), ad esempio, hanno sempre fatto uso del termine "sistema" quando trattavano l'equilibrio dinamico dei bacini e il ciclo evolutivo dei versanti, rispettivamente. Tuttavia, la teoria dei sistemi così come oggi la si intende è stata proposta per la prima volta da Strahler (1950, 1958) e successivamente ripresa da Chouly (1962) nell'applicazione generale alla geomorfologia.

Questo tipo di approccio metodologico fu sperimentato sui sistemi costieri, e in particolare alle dune già in passato (Simeoni et alii, 1996; 1999; )

L'obiettivo di questo tipo di analisi sta nella comprensione dei rapporti che legano tra loro fattori e processi che concorrono alla normale evoluzione di un sistema perturbato (dinamico): un volta compresi, l'attribuzione, ad ognuno di essi, del giusto peso (valutato nella globalità del sistema) consentirà di valutare l'interattività e la dominanza di ogni singolo fattore. L'analisi, quindi, consente di valutare correttamente l'entità dei processi in atto e permette, di conseguenza, scelte gestionali integrate con l'evoluzione ambientale.

Si tratta di un approccio "sistematico" piuttosto che "modellistico", descritto da Hudson (1992) come un approccio dall'alto verso il basso, dove il problema viene considerato dapprima nel suo insieme e poi scomposto nelle sue componenti di base. A questo scopo la metodologia prevede una serie di passi da seguire che comprendono :

- La scelta dei parametri rilevanti per il problema in esame;
- L'analisi delle interazioni binarie tra parametri;
- La valutazione dell'importanza relativa tra le interazioni;
- L'assegnazione di codici alle differenti classi di valori dei parametri.

Lo schema sequenziale per la selezione dei parametri inizia dalla descrizione qualitativa dell'ambiente, e termina con la lista dettagliata dei parametri legati alle condizioni del sito,



corredata da un'analisi quali-quantitativa che lega tra loro l'azione di ciascuno di essi. La scelta dei parametri può essere dettata:

- Dalle finalità del lavoro;
- Dall'esperienza dell'operatore nel settore;
- Dall'applicazione dei principi della dinamica costiera e soprattutto dalle problematiche ambientali del/i sito/i in esame.

Definiti i parametri, essi possono essere utilizzati per la costruzione della Matrice di interazione. Quest'ultima costituisce la grande innovazione nell'approccio sistematico proprio della teoria dei sistemi. I parametri, infatti, sono importanti sia per la loro singolarità sia perché essi possono interagire reciprocamente: la variazione di un fattore può causare variazioni negli altri. La rappresentazione matriciale facilita molto la valutazione del grado di interazione dei vari parametri. I parametri vengono elencati uno ad uno, lungo la diagonale principale della matrice, mentre nelle altre caselle vengono studiate le interazioni binarie tra i vari fattori utilizzando il criterio di interazione rappresentato in Figura 151.

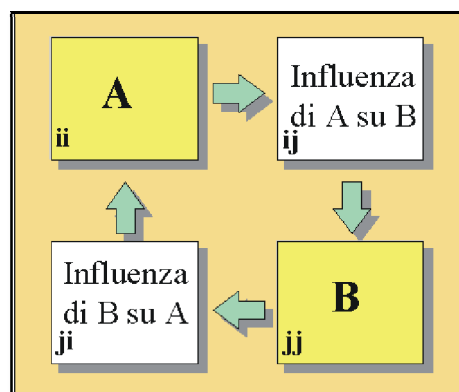


Figura 151 – Schema di flusso di una generica matrice di interazione;

La matrice finale ha dimensioni variabili, in funzione del numero di criteri che vengono presi in considerazione (Figura 152): come è indicato in figura, nell'ultima casella della diagonale viene riportato lo "SCOPO" (target), e cioè il problema che si intende risolvere (in genere esso non ha effetto sugli altri parametri della matrice). Una volta stabiliti i tipi di interazione reciproca tra i vari parametri, è necessario quantificare il grado con cui essa si esplica: ciò può essere fatto, secondo Hudson (1992), utilizzando uno dei cinque criteri elencati in Figura 153.

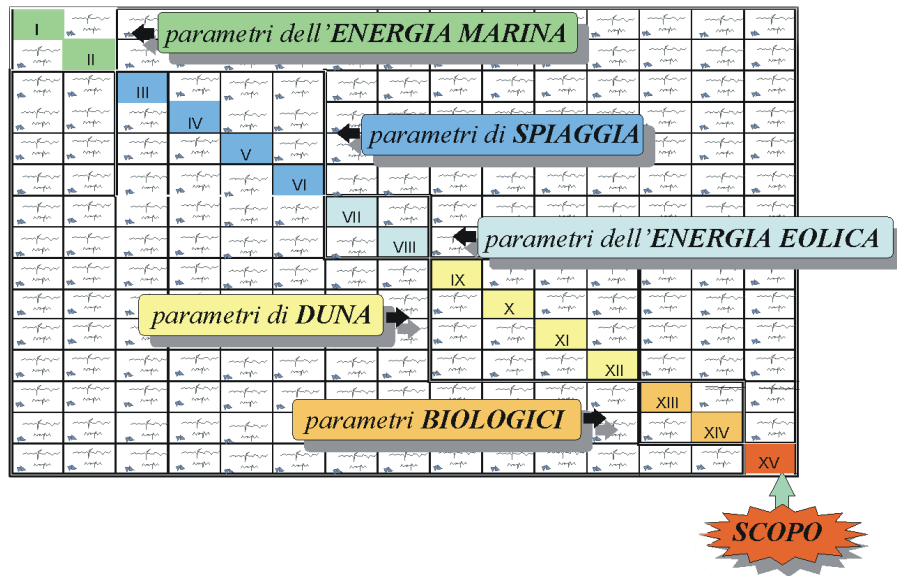


Figura 152 – Schema generale di una matrice di interazione (Simeoni, 2000).

Generalmente il secondo (semi-quantitativo) e quello più utilizzato dal momento che per la sua applicazione non richiede la conoscenza particolareggiata dei parametri in questione. Ad ogni sito in corso di studio dovrà ovviamente corrispondere una matrice di interazione diversa.

<b>Matrix Coding Methods</b>	
1. Binary Mechanism are switched on or of (1;0)	
2. Expert Semi-Quantitative (ESQ):	
<ul style="list-style-type: none"> <li>0. NO Interaction</li> <li>1. Weak Interaction</li> <li>2. Medium Interaction</li> <li>4. Strong Interaction</li> <li>5. Critical Interaction</li> </ul>	
3. According to the slope of the $P_i$ vs. $P_j$ relation	
4. More numerically via solution to partial differential equation (E.g. Solution first order PDE is exponential or negative exponential)	
5. Explicitly via complete numerical analysis of mechanism	

Figura 153 – Criteri di codificazione della matrice d'interazione (Hudson, 1992).

Una volta codificata la matrice di interazione si può passare alla fase successiva che consiste nel determinare il peso di ogni parametro sul sistema (cioè sugli altri parametri) "causa"; e il peso del sistema (cioè gli altri parametri) su ogni parametro - "effetto" (Figura 154).

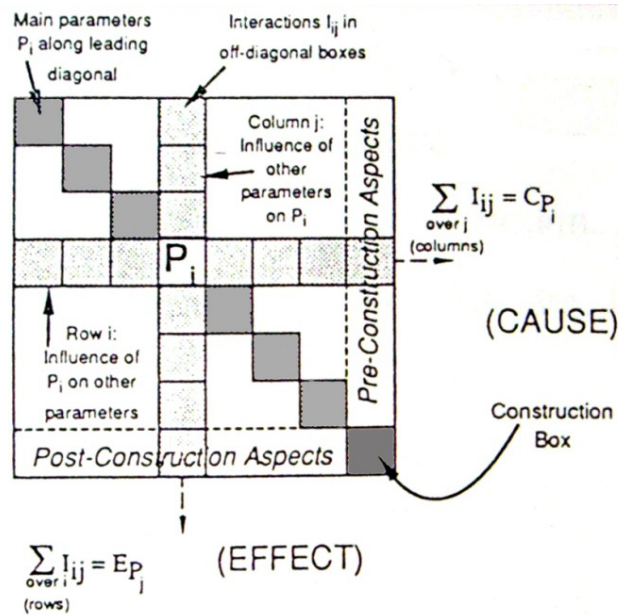


Figura 154 – Schema generale dei rapporti tra "Causa" ed "Effetto" all'interno del sistema ricavato dai singoli elementi della matrice d'interazione (Hudson, 1992).

Un particolare diagramma cartesiano, in cui sulle ascisse viene riportato il valore di "causa" e sulle ordinate il valore di "effetto", permette di stabilire l'Interattività  $[(C+E)/\sqrt{2}]$  e la Dominanza  $[(C-E)/\sqrt{2}]$  dei singoli parametri (Figura 155 a).

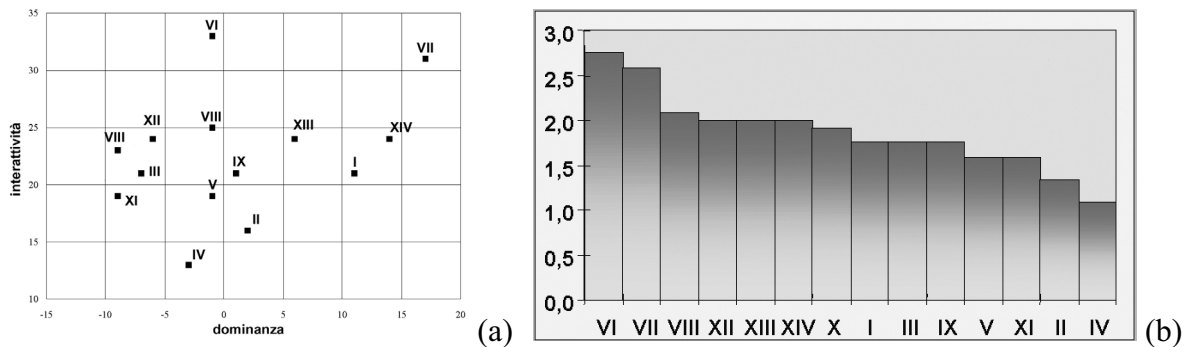


Figura 155 – Rappresentazioni generali del diagramma Causa/effetto (a) e dell'istogramma d'interattività (b).

In Figura 155b è inoltre possibile osservare l'istogramma di interattività che pur essere costruito attraverso la semplice somma dei valori di causa e effetto competente ad ogni parametro. La fase successiva di analisi consente di determinare un indice di instabilità delle dune presenti nel sito indagato. La procedura di calcolo è del tipo:

$$I.I._j = \sum a_i P_{ij} \quad (9.1)$$

Con  $I.I._j$  = Indice di Instabilità;

$a_i$  = Peso riferito al valore percentuale di interattività del parametro considerato;

$p_{ij}$  = Codice assegnato a diverse classi di valori parametrici, caratteristici del sito indagato.

L'individuazione dell'indice di instabilità relativo ad ogni sezione permette, quindi, l'individuazione delle aree a maggior rischio ambientale e, di conseguenza, consente una pianificazione di intervento mirata soprattutto al ripristino delle condizioni ottimali in tali situazioni. In seguito verranno suggerite alcune interessanti proposte di gestione integrata, adottate con successo in altri paesi europei.

## **8.1\_SCELTA DELLO SCOPO E I PARAMETRI: LA MATRICE d'INTERAZIONE**

**KEY WORDS** (cosificazione e parametrizzazione della matrice d'interazione; organizzazione dei dati; analisi della variabilità dei dati)

---

Da quanto detto precedentemente l'applicazione della teoria dei sistemi all'ambiente litorale risulta essere di particolare interesse nella pianificazione di un possibile intervento gestionale. Essa, infatti, mettendo alla luce l'importanza dei parametri regolanti il sistema e della loro interazione definisce l'efficacia degli interventi atti a modificare uno o più dei suddetti parametri. Data l'impronta gestionale che si è voluta dare all'analisi è stato indicato come scopo finale il grado di instabilità del sistema spiaggia-duna, definendolo e descrivendolo, secondo 5 gruppi di fattori principali (riassunti schematicamente nella Tabella 11):

### **A. FATTORI SEDIMENTOLOGICI**

GRANULOMETRIA DELLA SPIAGGIA EMERSA, GRANULOMETRIA DELLA DUNA;

### **B. FATTORI IDRODINAMICI**

INDICE PSD (Probabilità di Superamento Duna), VARIAZIONE LINEA DI RIVA;

### C. FATTORI GEOMORFOLOGICI

ALTEZZA DUNA, PENDENZA DUNA LATO MARE, AMPIEZZA DUNA, INTEGRITA' ASSE DUNARE, AMPIEZZA SPIAGGIA EMERSA, PENDENZA SPIAGGIA EMERSA;

### D. FATTORI MORFODINAMICI

BILANCIO EVOLUTIVO;

### E. ENERGETICI

ENERGIA EOLICA, TASSO DI TRASPORTO, DIREZIONE DOMINANTE VENTO COSTRUTTIVO;

### F. FATTORI BIOLOGICI

DENSITÀ DI VEGETAZIONE, ASPETTI FITOSOCIOLOGICI;

### G. FATTORI ANTROPICI

DENSITÀ DI ANTROPIZZAZIONE, TIPOLOGIA USO SPAZI COSTIERI;

<b>A</b>	<b>I</b>	<b>Granulometria SPIAGGIA</b>
	<b>II</b>	<b>Granulometria DUNA</b>
<b>B</b>	<b>III</b>	<b>(PSD) Indice di Probabilità Superamento Duna</b>
	<b>IV</b>	<b>Variazione LINEA di RIVA</b>
<b>C</b>	<b>V</b>	<b>Altezza DUNA</b>
	<b>VI</b>	<b>Pendenza DUNA lato fianco MARE</b>
	<b>VII</b>	<b>Ampiezza DUNA</b>
	<b>VIII</b>	<b>Indice di Integrità ASSE DUNARE</b>
	<b>IX</b>	<b>Ampiezza SPIAGGIA</b>
	<b>X</b>	<b>Pendenza SPIAGGIA</b>
<b>D</b>	<b>XI</b>	<b>Indice BILANCIO EVOLUTIVO</b>
<b>E</b>	<b>XII</b>	<b>Indice Energia EOLICA</b>
	<b>XIII</b>	<b>Direzione dominante VENTO costruttivo</b>
	<b>XIV</b>	<b>Tasso di Trasporto eolico</b>
<b>F</b>	<b>XV</b>	<b>Densità di VEGETAZIONE</b>
	<b>XVI</b>	<b>Indice di VEGETAZIONE (aspetti fitosociologici)</b>
<b>G</b>	<b>XVII</b>	<b>Densità ANTROPICA</b>
	<b>XVIII</b>	<b>Indice Tipologia utilizzo SPAZI COSTIERI</b>

Tabella 11 – Fattori di condizionamento utilizzati nella matrice.

I parametri compresi nei 6 gruppi possono quindi essere utilizzati per la costruzione di un sistema matriciale in cui sono valutate possibili interazioni di coppia. La valutazione del grado di interazione e la codificazione della matrice è stata effettuata mediante criterio semi-quantitativo assumendo 4 classi distinte:

- **NESSUNA INTERAZIONE, o POCO SIGNIFICATIVA (0);**
- **INTERAZIONE DEBOLE (1);**
- **INTERAZIONE MEDIA (2);**
- **INTERAZIONE FORTE (3).**

Nella Figura 156 (in ALLEGATO 1 viene riportata la matrice in dimensioni reali) viene presentata la matrice nella sua forma iniziale: all'interno delle caselle le diverse interazioni tra i parametri sono state quantificate secondo il criterio appena definito, attraverso cioè una descrizione minuziosa delle influenze che ciascuno ha sull'altro.

Figura 156 – Schema della matrice BIM descrittiva:rispettivamente in marrone sono indicati i parametri **SEDIMENTOLOGICI**; in celeste, quelli **IDRODINAMICI** (agente mare); in giallo, quelli **MORFOLOGICI** (spiaggia e duna); in viola, quelli **MORFODINAMICI**; in blu, quelli **ENERGETICI** (agente vento); in verdino, quelli **BIOLOGICI**; in grigio, quelli **ANTROPICI** e in rosso, il **TARGET (SCOPO)** finale.



Come si può facilmente intuire dalle dimensioni della matrice, la descrizione di ogni singolo rapporto tra fattori è molto dettagliata; i colori suddividono gli ambiti di appartenenza di ciascun fattore precedentemente elencato. Lo schema può essere idealmente diviso in due settori principali (Figura 157), dove l'elemento separatore è costituito dalla "diagonale": essa separa una parte costituita dalle righe e dalle colonne in alto a destra (A), e un'altra parte che invece raggruppa le righe e le colonne in basso a sinistra (B).

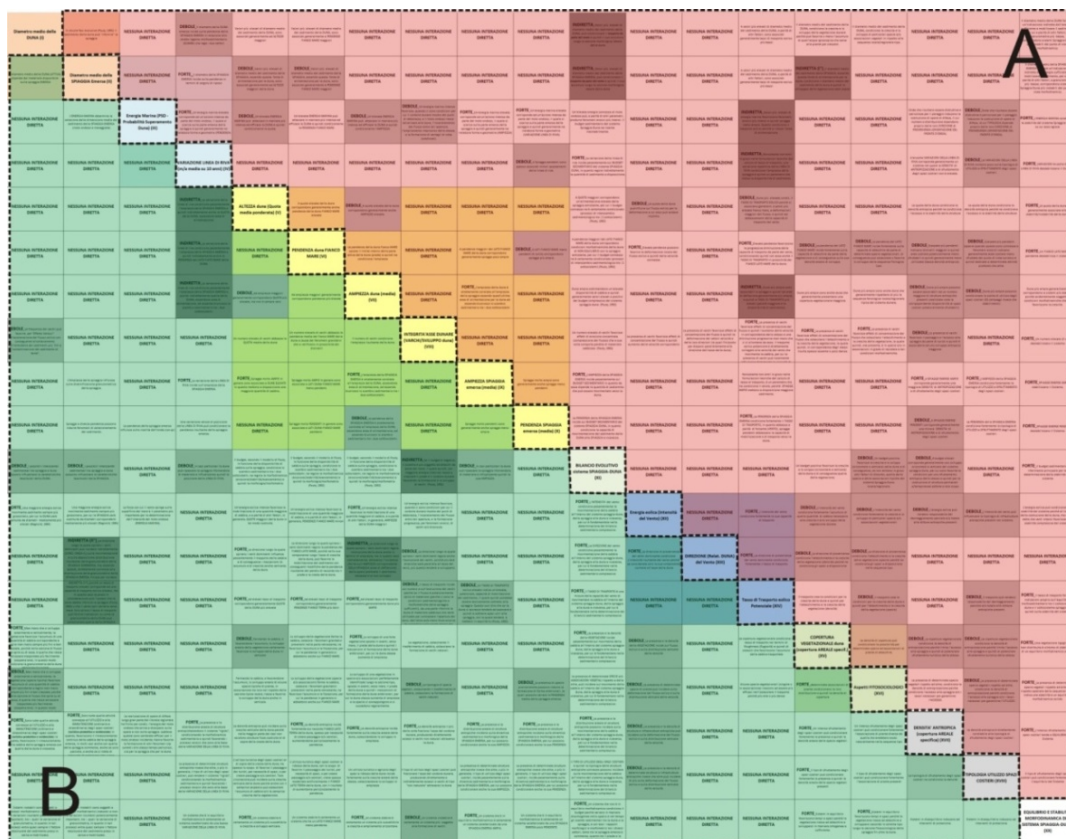
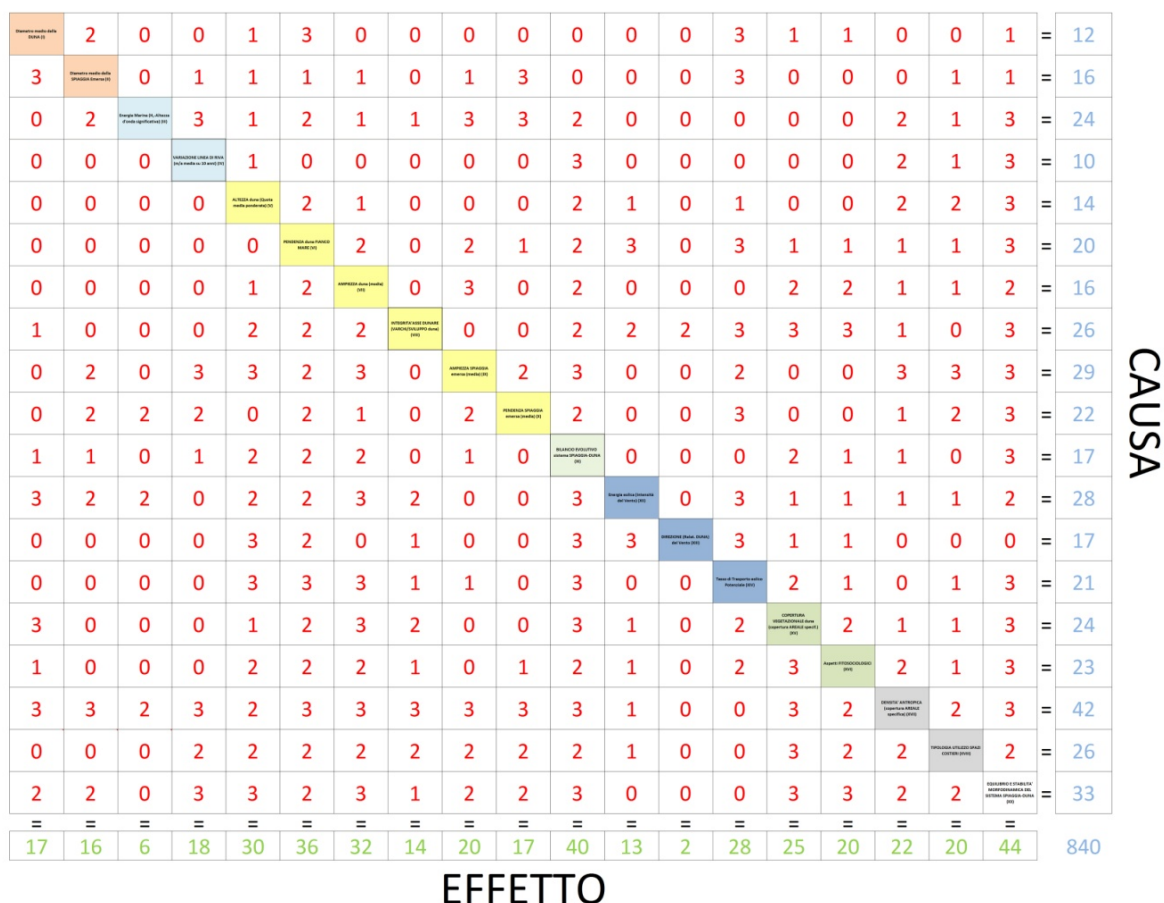


Figura 157 –Matrice descrittiva con la separazione del settore A (Influenze DIRETTE) da quello B (Influenze di FEEDBACK)

Tale schematizzazione rappresenta la sintesi della filosofia con cui ragiona la Teoria dei Sistemi, per cui il condizionamento di un parametro, è diverso in funzione della direzione con cui si traduce (INFLUENZA DIRETTA, parte A, o di FEEDBACK, parte B).

In Figura 7 è rappresentata invece la matrice codificata (anche in questo caso in ALLEGATO 1 la matrice è riportata nelle sue dimensioni reali), all'interno della quale, ad ogni casella (interazione), è stato attribuito un valore numerico (grado d'interazione) in base al criterio sopra descritto: in ultima colonna e in ultima riga rispettivamente i valori di "causa" ed "effetto" di ogni parametro considerato.





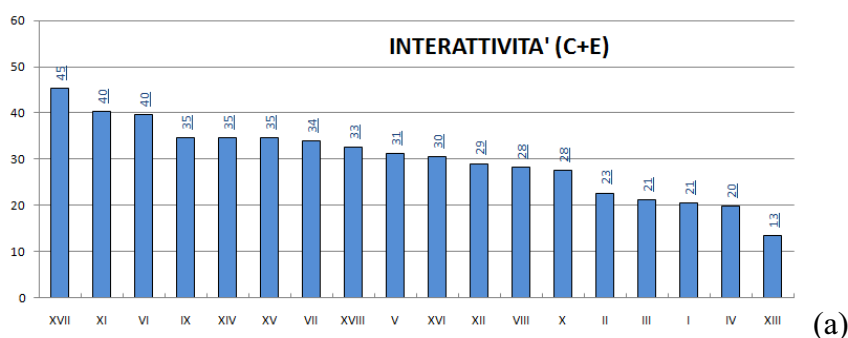
CAUSA

Figura 158 –Matrice BIM codificata, con le influenze tra i fattori (celle) che sono state “tradotte”, da semplici descrizioni, a gradi d’interazione.

Dall’analisi di CAUSE ed EFFETTI è stato possibile determinare successivamente quelli che vengono indicati come indici di l’INTERATTIVITÀ  $(C-E/\sqrt{2})$ , e DOMINANZA  $(C-E/\sqrt{2})$  di ogni parametro: entrambi forniscono indicazioni sul grado di risposta del sistema nel caso in cui, dall’esterno, si interviene su quel determinato parametro. Un fattore altamente interattivo è un fattore del sistema che interagisce molto con tutti gli altri, per cui, ad ogni input esterno che lo fa variare, esso stesso, riesce a produrre modifiche sull’intero sistema (nella direzione definita dal target). Parametri che invece mostrano un’elevata dominanza rappresentano fattori che difficilmente riuscirebbero a far mutare al sistema le proprie caratteristiche ambientali.

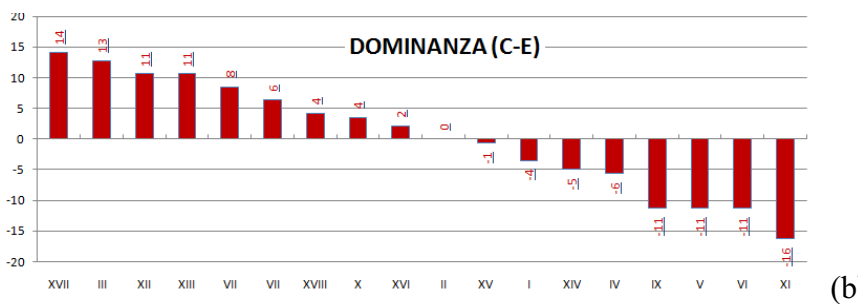
Per una maggior comprensione delle stesse si è provveduto a determinare i relativi istogrammi (Figure 159 a/b). L’andamento degli istogrammi rispecchia fedelmente il sistema in tutte le sue variabili, a dimostrazione che l’analisi descrittiva è stata svolta senza sbilanciamenti e/o sovrastime di alcun genere.

	CAUSA	EFFETTO	(C+E)
Densità ANTROPICA	42	22	45
Indice BILANCIO EVOLUTIVO	17	40	40
Ampiezza DUNA	20	36	40
Altezza DUNA	29	20	35
Tasso di Trasporto eolico	21	28	35
Densità di VEGETAZIONE	24	25	35
Indice di Integrità ASSE DUNARE	16	32	34
Indice Tipologia utilizzo SPAZI COSTIERI	26	20	33
Pendenza DUNA lato fianco MARE	14	30	31
Indice di VEGETAZIONE (aspetti fitosociologici)	23	20	30
Indice Energia EOLICA	28	13	29
Ampiezza SPIAGGIA	26	14	28
Pendenza SPIAGGIA	22	17	28
Granulometria DUNA	16	16	23
(PSD) Indice di Probabilità Superamento Duna	24	6	21
Granulometria SPIAGGIA	12	17	21
Variazione LINEA di RIVA	10	18	20
Direzione dominante VENTO costruttivo	17	2	13



(a)

	CAUSA	EFFETTO	(C-E)
Densità ANTROPICA	42	22	14
(PSD) Indice di Probabilità Superamento Duna	24	6	13
Indice Energia EOLICA	28	13	11
Direzione dominante VENTO costruttivo	17	2	11
Indice di Integrità ASSE DUNARE	26	14	8
Ampiezza SPIAGGIA	29	20	6
Indice Tipologia utilizzo SPAZI COSTIERI	26	20	4
Pendenza SPIAGGIA	22	17	4
Indice di VEGETAZIONE (aspetti fitosociologici)	23	20	2
Granulometria DUNA	16	16	0
Densità di VEGETAZIONE	24	25	-1
Granulometria SPIAGGIA	12	17	-4
Tasso di Trasporto eolico	21	28	-5
Variazione LINEA di RIVA	10	18	-6
Altezza DUNA	14	30	-11
Pendenza DUNA lato fianco MARE	20	36	-11
Ampiezza DUNA	16	32	-11
Indice BILANCIO EVOLUTIVO	17	40	-16



(b)

Figura 159 – Istogrammi di Interattività ( $C+E/\sqrt{2}$ ) (a) e Dominanza ( $C-E/\sqrt{2}$ ) (b);

Dal grafico di Figura 8a si vede che i valori più elevati di INTERATTIVITA' sono rappresentati dalla DENSITA' ANTROPICA e dall'INDICE del BILANCIO EVOLUTIVO. Entrambi sono aspetti inevitabilmente interattivi, in quanto la pressione antropica irrigidisce il sistema, limitando gli spazi a disposizione dei processi, mentre una variazione importante nel bilancio evolutivo (erosione o progradazione) incide inevitabilmente su tutte le caratteristiche del sistema. Tra i fattori morfologici più interattivi ci sono l'ampiezza e l'altezza della duna, le quali rappresentano gli elementi essenziali per caratterizzarne la stabilità. Tra gli elementi meno interattivi c'è invece la direzione di provenienza del vento, in quanto essendo il vento un'agente morfodinamico esterno al sistema, e essendo definito da una direzione del vento che è legata indirettamente anche alla direzione di sviluppo dell'apparato dunare (vento costruttivo), è chiaro che non ci sono elementi in grado di condizionarne il valore. Osservando l'istogramma di DOMINANZA invece si trova che tra gli elementi più dominanti, oltre alla densità antropica, naturalmente in grado di produrre modificazioni su tutti gli altri parametri, nei primi posti ci sono tutti i fattori che descrivono l'azione dei processi morfodinamici, sia il mare che il vento, i quali naturalmente hanno influenza su tutto il sistema.

## **8.2\_ LA PARAMETRIZZAZIONE DELLA MATRICE B.I.M.**

**KEY WORDS** (cosificazione e parametrizzazione della matrice d'interazione; organizzazione dei dati; analisi della variabilità dei dati)

---

Dopo aver descritto i rapporti di reciproca influenza tra i diversi fattori individuati, e codificato la griglia in modo da attribuire un peso ad ogni singola interazione, in modo da bilanciare la matrice, è necessario parametrizzare tutti i fattori in base alle definizioni che sono state date di esse.

Dal punto di vista operativo, la determinazione dell'”Indice d'Instabilità” (IDI) passa a questo punto, attraverso la raccolta dei dati per ciascun fattore analizzato, e la successiva definizione e decodifica degli intervalli di variabilità. Ogni parametro utilizzato per la descrizione dell'ambiente è stato, a tale scopo, valutato quantitativamente (ove possibile) o qualitativamente, in corrispondenza di ogni sito considerato. La codifica adottata comprende generalmente 4 classi (0.5, 1.0, 1.5, 2.0), ma, come si vedrà nel dettaglio dell'analisi, per alcuni fattori è stato necessario aumentarle a 5, in modo da riuscire a suddividere meglio la

variabilità totale. L'assegnazione dei diversi punteggi, è regolata dal target della matrice e dal tipo di indice finale: poiché lo scopo è quello di ricavare un coefficiente d'instabilità, i valori più elevati sono stati assegnati alle condizioni peggiori per la stabilità e lo sviluppo del sistema. Di seguito verranno presentati i risultati delle prime due fasi, descrivendo per ciascun fattore inserito nella matrice, la grandezza che è stata scelta per la determinazione della sua variabilità e la descrizione degli intervalli stabiliti. Verranno presentate anche le tabelle riassuntive di raccolta dei dati e l'intervallo finale codificato, mentre nella successiva sezione saranno presentate le matrici applicate a ciascun sistema.

## ***A. FATTORI SEDIMENTOLOGICI***

Gli aspetti sedimentologici sono stati analizzati studiando l'andamento del valore del  $D_{50}$ , sia per la SPIAGGIA EMERSA, che per la DUNA. Sono stati raccolti circa 120 campioni, indicativamente 3 per ciascun sistema spiaggia-duna considerato: poiché il fine è solo quello di caratterizzare il sistema, non si è andati alla ricerca di una variabilità lineare o areale dei parametri tessiturali, per cui il numero di campioni è risultato variabile in funzione dell'estensione lineare della duna. Di seguito verranno presentati i dati raccolti con un'analisi statistica sulla variabilità spaziale dei valori tra i vari sistemi presi in esame, considerando però, come anticipato in precedenza solo il valore del  $D_{50}$ , scelto in rappresentanza dei caratteri tessiturali del sedimento da inserire all'interno della matrice.

### *Diametro Spiaggia - Duna*

Nella Figura 160 sono riportati i valori del  $D_{50}$  ricavati da analisi svolte su campioni prelevati nella parte alta della spiaggia e sulla duna (in corrispondenza della cresta): dalla variabilità dei valori plottati nell'istogramma e dalla Tabella 11 si evince come, la maggior parte, sia dei campioni di spiaggia che di quelli di duna, ricadano all'interno dell'intervallo granulometrico della sabbia media - sabbia fine (da 1.0 a 3.0 phi), con una differenza tra i valori medi che è trascurabile ( $< 1/4$  phi).

Tale dato, se pur generico, è importante ed evidentemente sintomatico di una condizione che non rispecchia la distribuzione teorica che vuole il sedimento di duna mediamente più fine di quello di spiaggia.

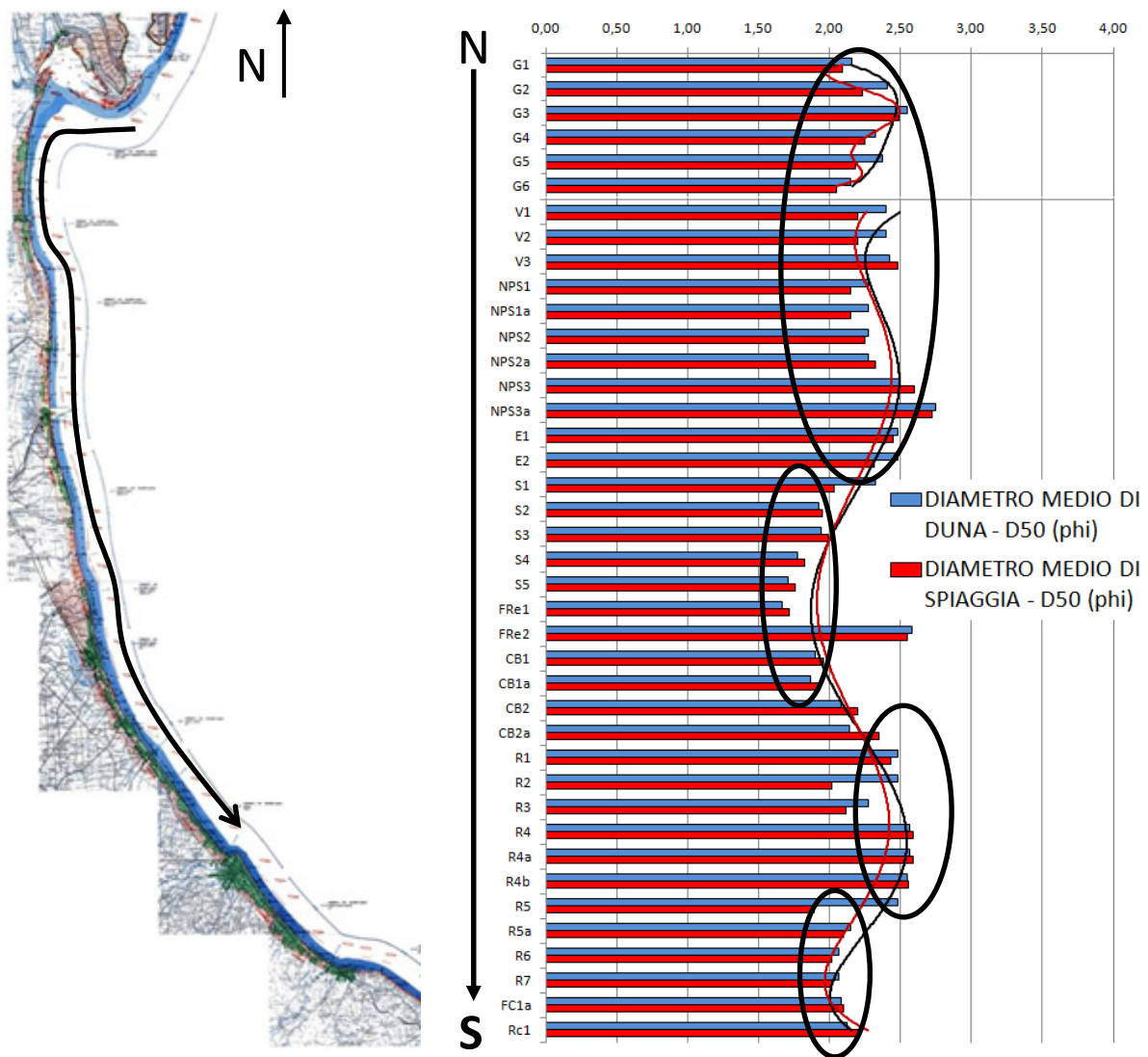


Figura 160 – Distribuzione dei valori di  $D_{50}$  per la duna (blu) e per la spiaggia (rosso) ricavati per ciascun sistema spiaggia-duna analizzato, lungo la costa emiliano-romagnola;

	SPIAGGIA EMERSA	DUNA
<b>Max Valore</b>	2.72	2.75
<b>min Valore</b>	1.72	1.67
StdDev	0.25	0.26
<b>Valore MEDIO</b>	2.20	2.26

Tabella 1 – Principali parametri statistici derivati per i campioni esaminati.

Se si vanno ad analizzare i singoli casi, si noterà che per molti di essi spiaggia e duna mostrano un valore di  $D_{50}$  molto simile: la differenza esiste ma in molti casi è trascurabile. L'82% delle spiagge e circa il 72% delle dune ha un  $D_{50} > 2.0$  phi; la maggior parte delle spiagge (18 su 40, pari a circa il 45%) mostra valori compresi tra

2.0 e 2.25 phi. Il 18% delle dune mostra un  $D_{50}$  al di sotto dei 2.0 phi, e circa il 44% di esse (17 su 40) è comprese tra 2.25 e 2.50 phi (Figure 161 a/b): mentre nel secondo caso si tratta di valori che sostanzialmente rientrano negli intervalli classici di variabilità tessiturale di un sedimento di duna, nel primo (18%) si tratta di sedimenti piuttosto grossolani. Se si osservano i valori del  $D_{50}$  delle corrispondenti spiagge antistanti si noterà che la differenza è minima e che per alcuni di essi (Es. S2, S3 ed S4) addirittura la spiaggia mostra valori più elevati di phi; si tratta di sistemi in forte crisi erosiva (Figura 162), dove il mare arriva fin sopra la duna, modificandone evidentemente non solo la geometria del profilo ma anche la distribuzione dei caratteri tessiturali.

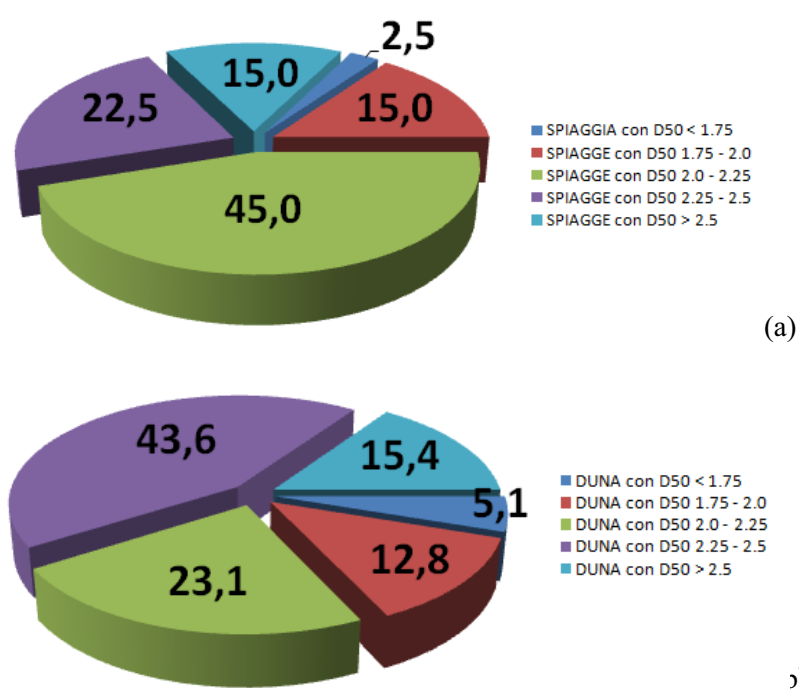


Figura 161 – Diagramma a torta della distribuzione % dei valori misurati all'interno di ciascun intervallo scelto, per la spiaggia emersa (a) e per la duna (b).

Osservando l'istogramma di Figura 160, in particolare l'andamento delle curve di regressione, è possibile anche estrapolare dei domini di tendenza (cerchi neri): esistono 4 grossi settori, da N verso S,, il primo che va dallo Scanno di Goro (Ferrara) alla parte più a sud di Lido degli Estensi (Ferrara) ( $D_{50}$  medio = 2.22phi) , il secondo tra Lido di Spina (Ferrara) e Casal Borsetti (Ravenna) ( $D_{50}$  medio = 1.89phi), il terzo tra Ravenna e Lido di dante (Ravenna) ( $D_{50}$  medio = 2.52phi) e il quarto, tra Lido di Dante e la Lido di Savio (Ravenna), inglobando per caratteristiche, anche i due lembi individuati nella provincia di Forlì Cesena ( $D_{50}$  medio = 2.12phi).



*Figura 162 – Esempio di apparato dunare (Lido di Spina, Ferrara), che investito da forte erosione, non mostra più i caratteri tessiturali tipici di un ambiente di spiaggia-duna;*

## ***B. FATTORI IDRODINAMICI ED ENERGETICI***

Per descrivere nella marice gli aspetti energetici dei processi (naturali ed esterni) che agiscono sul sistema, creando, modificando e distruggendo forme e strutture, si è scelto innanzitutto di separare l'influenza del “mare” da quella del “vento”. Per entrambe, si è cercato di identificare grandezze (misurabili) che permettessero di separare e quantificare DIREZIONI, VERSI e naturalmente INTENSITÀ dei processi.

### *L'azione del Mare*

Per quanto riguarda il mare, l'analisi emersa dalla determinazione del clima meteo-marino medio regionale ha messo in risalto, come non esista di fatto un numero sufficiente di dati a disposizione per riuscire a determinare con la stessa precisione e attendibilità i principali parametri fisici del moto ondoso lungo tutti i tratti della costa regionale (alla scala del singolo apparato). Le serie storiche hanno estensioni diverse e la determinazione degli effetti a riva sono ricavabili esclusivamente attraverso l'utilizzo di modelli matematici di trasposizione del moto. Poiché questi modelli tengono conto di molte variabili, non tutte a disposizione per questo lavoro, si è deciso, anche per semplificare l'analisi, di non scindere i diversi aspetti (energetici e morfodinamici) connessi all'azione del moto ondoso, ma esprimere l'influenza che il mare ha sull'apparato dunare in termini di “PROBABILITA' DI COLLASSO” (Gollwitzer, 1994; Simeoni et alii, 2007). In questo lavoro sono stati utilizzati gli



indici PSD (Probabilità Superamento Duna): si tratta di un parametro che esprime la probabilità che la duna venga “superata” e oltrepassata dalle onde durante una mareggiata, o dalla lama d’acqua in concomitanza di fenomeni di aumento improvviso del livello del mare. Tali valori sono stati ricavati per la costa regionale dell’Emilia-Romagna, nell’ambito di un progetto di ricerca internazionale (*BeachMed-e*, sottoprogetto MedPlan – Misura 3.1, 2005). La distribuzione lungo la costa è rappresentata dalla Figura 163: osservando l’andamento dell’istogramma è possibile individuare più settori (cerchi in nero), i quali, se pur consecutivi, risultano caratterizzati da valori di PSD in alcuni casi anche molto diversi tra loro.

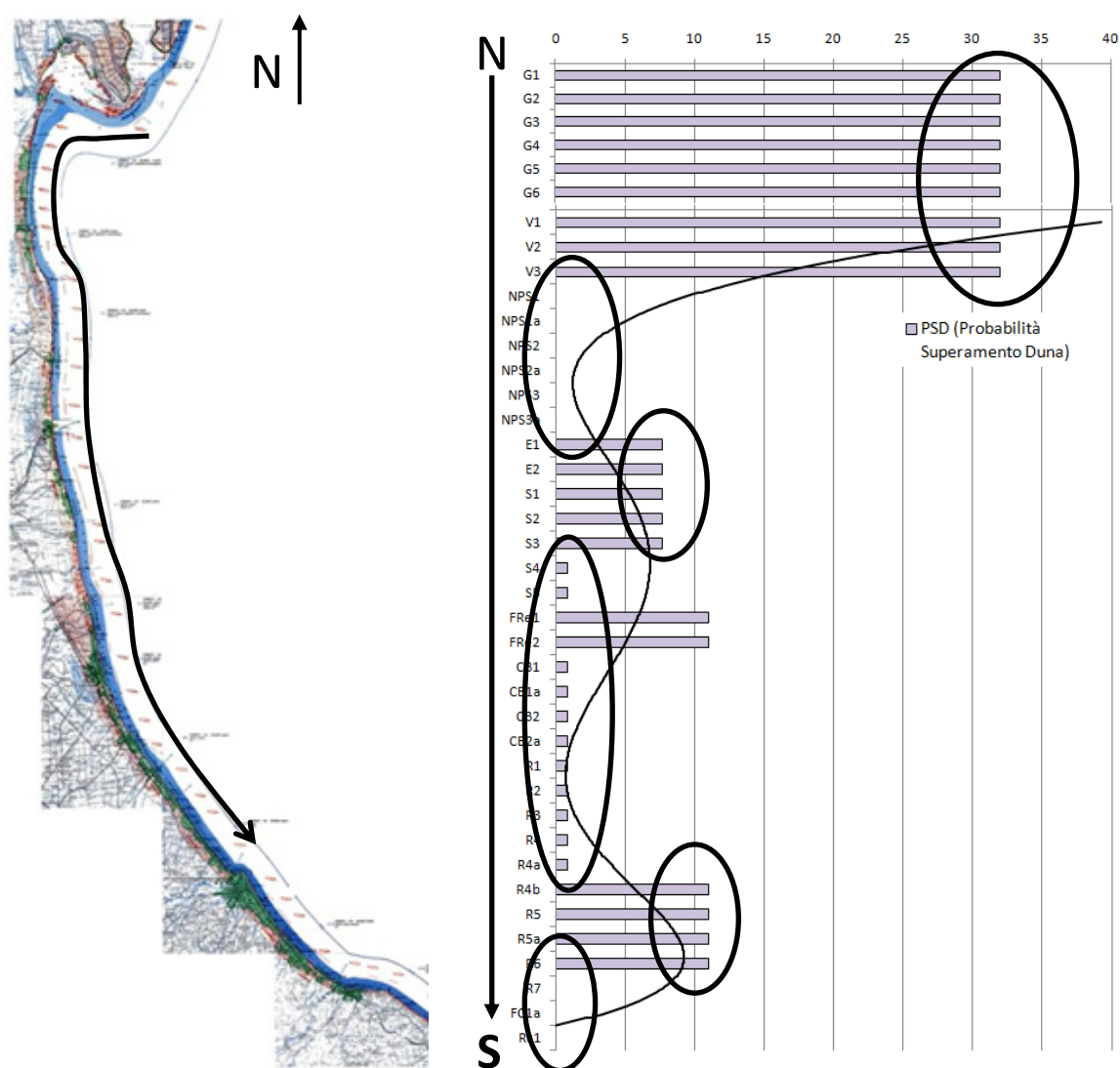


Figura 163 – Distribuzione dei valori di PSD (Probabilità Superamento Duna) ricavati per ciascun sistema spiaggia-duna analizzato, lungo la costa emiliano-romagnola;

Il settore più a Nord, compreso tra lo Scanno di Goro e Lido di Volano (Ferrara) è quello che presenta i valori più elevati (PSD = 32), mentre il tratto compreso tra Lido delle Nazioni e Lido degli Estensi (Ferrara), quello con valori di PSD minori (pari a 0). Dopo Porto Garibaldi e fino a Lido di Spina (Ferrara) i valori crescono (PSD = 7.7), per poi diminuire (PSD = 0.9) tra Casal Borsetti (Ravenna) e Lido di Classe (Ravenna). Tra Lido di Dante (Ravenna) e Lido di Savio l'indice torna ad aumentare assestandosi attorno a valori di 11. L'ultimo tratto (Cesenatico) è caratterizzato di nuovo da valori nulli dell'indice. Provando ad estrapolare i principali valori statistici, se pur è evidente che la variabilità dell'indice lungo la costa, ha scarsa valenza da questo punto di vista, si ottiene il diagramma a torta di Figura 164, dal quale si ricava che il 50% dei sistemi considerati presenta un valore di PSD < 4%, mentre il 22.5%, ha un'elevata probabilità di superamento della duna (> 16%).

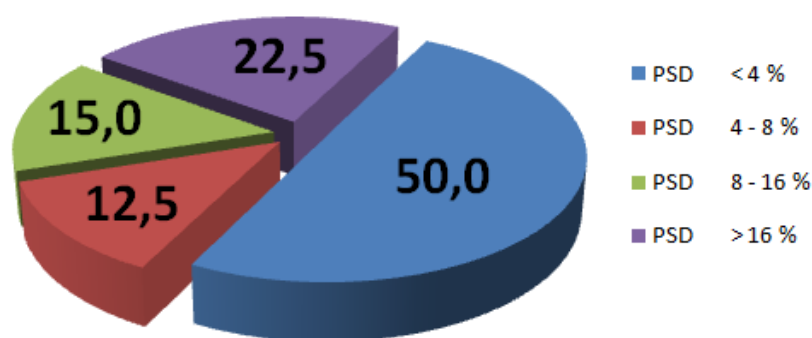


Figura 164 – Diagramma a torta della distribuzione % dei valori, misurati all'interno di ciascun intervallo scelto, per l'indice PSD.

Per riuscire a comprendere bene la distribuzione percentuale di tali valori, va specificato che l'indice PSD è una grandezza che tiene conto di diversi aspetti: è un parametro ricavato da un'analisi congiunta, sia di tipo morfologica (in termini di assetto morfometrico del sistema spiaggia-duna e del livello di subsidenza dell'area circostante), che di tipo fisico, in termini di variabilità di una grandezza definita "livello di sovrizzo idrico", determinata dalla somma delle tre componenti di marea, *run-up* e *set-up* dell'onda. La marea è dovuta alla interazione di vari fenomeni, quali la marea astronomica, la marea meteorologica, la bassa pressione. *set-up* e *run-up* sono l'innalzamento del livello del mare dovuto ai venti e al frangimento delle onde lungo costa, nonché la risalita delle onde sulla spiaggia e sull'argine a mare (questi due ultimi

fenomeni dipendono dalle condizioni ondose (altezza e periodo). Nonostante nel meccanismo di derivazione dell'indice, in parte, ci rientrino anche altri parametri (es. morfologia) si è ritenuto utile il PSD per descrivere l'azione del moto ondoso soprattutto perché in questo modo, con un unico parametro, si riescono a descrivere bene le maggiori influenze che il moto ondoso ha sugli apparati dunari. L'influenza che il moto ondoso ha invece sulla spiaggia è espressa nella matrice attraverso il fattore "variazione della linea di riva". La Figura 165 mostra la variabilità dei tassi di variazione lungo la costa, calcolati in corrispondenza dei sistemi spiaggia-duna analizzati.

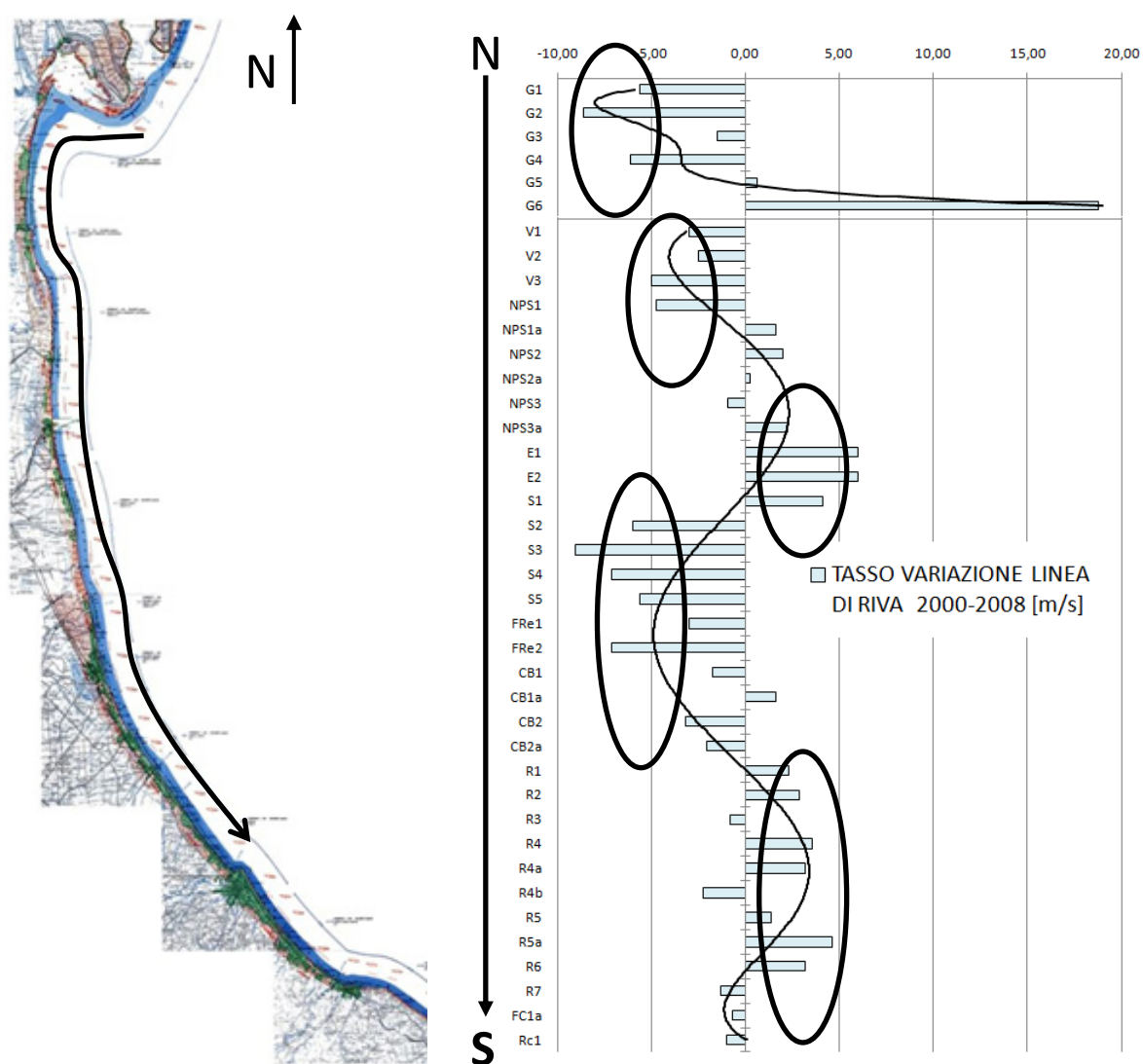
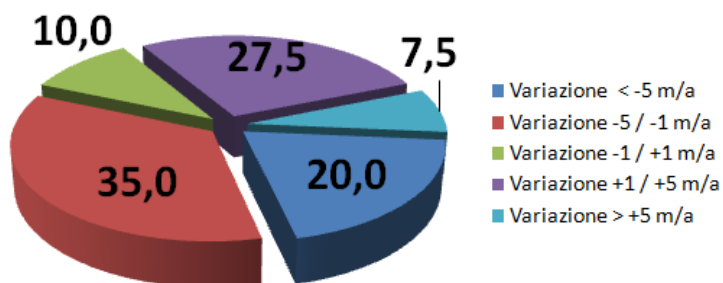


Figura 165 – Distribuzione dei tassi di variazione lineare della linea di riva ricavati per ciascun sistema spiaggia-duna analizzato, lungo la costa emiliano-romagnola;

Osservando la distribuzione dei valori, è possibile individuare tratti omogenei che mostrano tassi di variazione simili (cerchi in nero): lungo lo Scanno di Goro (Ferrara), i tassi di variazione sono in gran parte negativi: dal faro di Gorino (cod.G1) aumentano (-8m/a) per poi diminuire nel settore centrale (-1,5m/a) e diventare addirittura fortemente positivo (+18,75/a) in corrispondenza della parte terminale dello scanno: tale valore si giustifica con la forte deriva litoranea proveniente da est, la quale rifornendo di materiale lo spit ne ha prodotto, in 8 anni, una crescita lineare complessiva verso ovest di oltre 1km (Simeoni, 2008). In corrispondenza di Lido di Volano e fino a Lido delle Nazioni i tassi tornano negativi e prossimi ai -5m/a, la tendenza si inverte (in media +1,5m/a) a ridosso di Porto Garibaldi (settore Nord). Oltre il molo sud e fino a Lido di Spina i tassi crescono fino a raggiungere un massimo di +6m/a; quindi si assiste ad una progressiva diminuzione, la quale verso sud raggiunge un picco negativo di -9m/a in corrispondenza delle Ancone e delle Vene di Bellocchio (Ferrara). L'arretramento caratterizza anche il tratto oltre la foce del fiume Reno e fino a Casal Borsetti (Ravenna), per poi riaumentare, ma con una variabilità maggiore dopo porto Corsini (Ravenna): in media il tasso di avanzamento si aggira attorno ai 3,2 m/a. In Figura 166a sono riportati i principali parametri statistici derivati, mentre in Figura 166b è rappresentato il diagramma a torta delle distribuzioni percentuali entro gli intervalli scelti (rappresentati in legenda). Da essi si ricava che:

	Variazione Linea di Riva [m/a]
<b>Max Valore</b>	18.75
<b>min Valore</b>	-9.07
StdDev	5.07
Valore MEDIO	-0.68

(a)



(b)

Figura 166 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) Diagramma a torta della distribuzione % dei valori, misurati all'interno di ciascun intervallo scelto, per la variazione della linea di riva (b).

## L'Azione del Vento

L'azione da parte del vento compare nella matrice attraverso lo studio della variabilità delle principali caratteristiche fisiche della forzante (*velocità e direzione del vento*) e delle potenzialità costruttive associate al *trasporto eolico*.

### Velocità del vento

La velocità è ricavata nell'ambito del regime anemologico locale, entro i soli limiti degli intervalli "costruttivi", ed esprimendo la grandezza in termini di INDICE EOLICO (IE), definito dal rapporto tra la VELOCITÀ LIMITE DI TAGLIO  $\mu^*t$  (associata alle caratteristiche del sito e calcolata per mezzo della formulazione del tasso di trasporto eolico di ZINGG, 1953) e VELOCITÀ LIMITE  $\mu^*$  calcolata dalla distribuzione delle frequenze di velocità in corrispondenza della direzione dominante. La scelta è stata dettata dalla difficoltà di riuscire, con la sola velocità (m/s), a ricavare una variabilità tra i diversi sistemi spiaggia-duna considerati, visto che la costa emiliano-romagnola presenta orientazioni che a grande scala, non variano di molto. In tal modo è possibile esprimere l'intensità del vento associandola alle potenzialità eoliche del sito. In Figura 167a sono riportati i principali parametri statistici, mentre in Figura 167b è rappresentato il diagramma a torta delle distribuzioni percentuali entro gli intervalli scelti (rappresentati in legenda).

	IE eff
Max Valore	0.51
min Valore	0.35
StdDev	0.05
Valore MEDIO	0.43

(a)

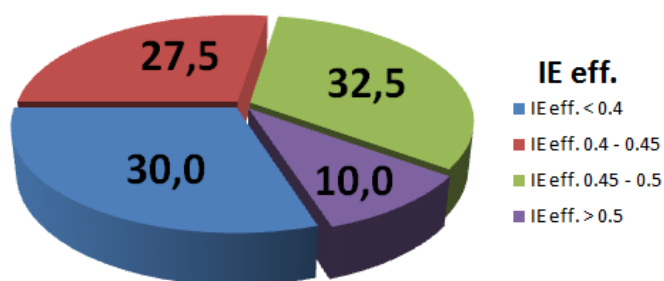


Figura 167 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) Diagramma a torta della distribuzione % dei valori, misurati all'interno di ciascun intervallo scelto, per l'indice IE (Indice Eolico).

Il valore medio di IE è pari a 0.43, rappresentato da circa il 27,5% dei casi: cioè il 30% mostra valori di IE maggiori di 0.4, mentre appena il 10% è al di sotto di 0,5.

Nella Figura 168 è rappresentata la distribuzione lungo la costa, e in corrispondenza dei sistemi spiaggia-duna considerati, i valori dell'indice IE. Come si evince dalla distribuzione dei valori all'interno dell'istogramma l'andamento dell'indice (Curva di regressione risulta, ad una prima analisi, piuttosto ommogeneo; se si osserva bene però è possibile individuare dei singoli tratti a comportamento più o meno uniforme (cerchi in nero).

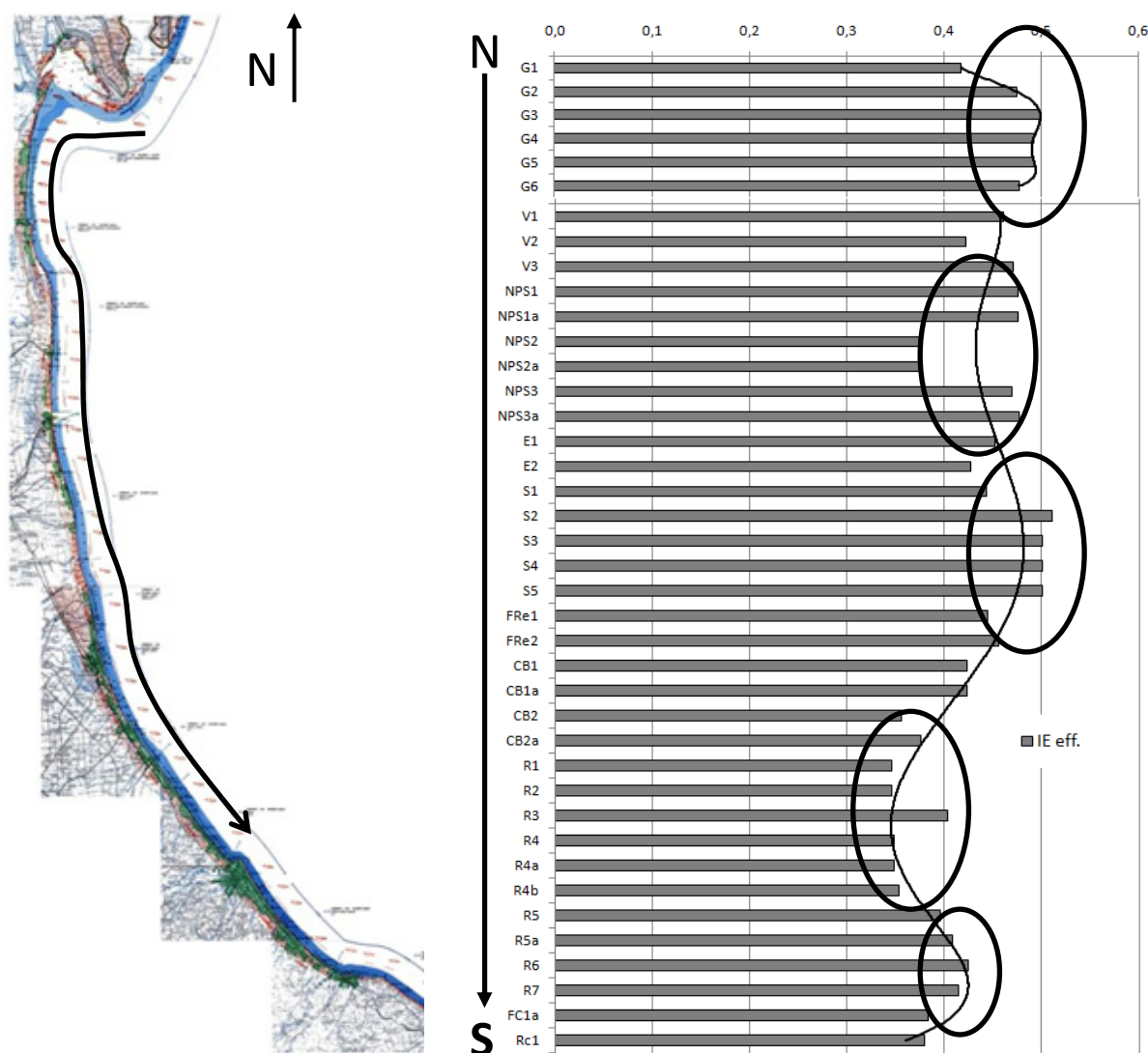


Figura 168 – Distribuzione dell'Indice Eolico (IEeff) ricavato per ciascun sistema spiaggia-duna analizzato, lungo la costa emiliano-romagnola;

Lungo lo Scanno di Goro (Ferrara) l'indice mostra valori sostanzialmente omogenei ed elevati (IE medio = 0,48); un lungo tratto, da Lido di Volano (Ferrara), fino a Lido di Spina (Ferrara), mostra valori sempre elevati, ma abbastanza disomogenei (IE medio = 0,41). Da Lido di Spina a Casal Borsetti i valori si alzano (IE medio = 0,48), per poi toccare un minimo in corrispondenza di Punta Marina (Ravenna) (IE min = 0,35). Dopo Ravenna e fino a Cesenatico (Forli-Cesena) l'indice torna a salire (IE medio = 0,38), fino ad un massimo di 0,42 riscontrato in corrispondenza della foce del torrente Bevano (cod.R6).

### ***Direzione Dominante del vento costruttivo***

Per quanto riguarda la DIREZIONE invece, sono stati misurati gli angoli tra la direzione dominante (a cui si faceva riferimento prima) e la direzione (°N) dell'asse del cordone dunare, in modo da avere un riferimento diretto sull'efficacia dell'azione "più frequente", da parte del vento, sui meccanismi di costruzione dell'apparato dunare.

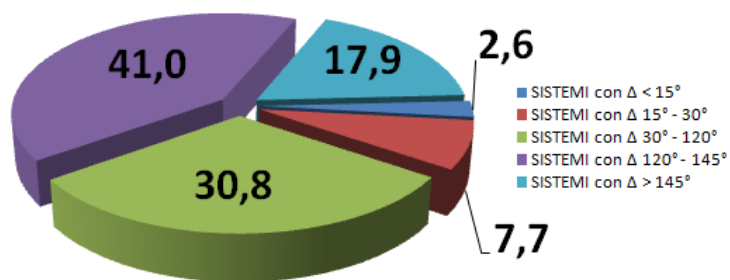
Tale aspetto risulta ulteriormente approfondito con la determinazione del TASSO DI TRASPORTO EOLICO POTENZIALE, il quale, essendo un parametro che non tiene conto solo delle caratteristiche fisiche della forzante, riesce a descrivere la variabilità nell'azione morfodinamica di eventi ventosi simili, su assetti morfologici del sistema spiaggia duna che invece sono diversi.

Come si vede in Figura 169a, la massima differenza ricavata è di 159°, con un valore medio di 110°: il 2,6% dei casi esaminati mostra un  $\Delta^\circ < 15^\circ$  mentre il 71% (28 su 40) è caratterizzato da una differenza tra la direzione di sviluppo del cordone dunare e la dominante tra i venti costruttivi di oltre 120° (Figura 169b).

$\Delta^\circ$	
<b>Max Valore</b>	159
<b>min Valore</b>	7
StdDev	43
<b>Valore MEDIO</b>	110

(a)





(b)

Figura 10 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) Diagramma a torta della distribuzione % dei valori, misurati all'interno di ciascun intervallo scelto, per la Direzione dominante del vento costruttivo.

Nella Figura 170 i valori sono stati plottati all'interno di un istogramma nel quale, lungo l'asse delle ordinate vengono rappresentati i sistemi spiaggia –duna analizzati: come si vede dall'andamento della curva di regressione è possibile individuare e separare tratti di costa che mostrano comportamenti uniformi. Tralasciando lo Scanno di Goro, per il quale la particolare orientazione EW non solo lo separa nettamente dalla restante parte della costa emiliano-romagnola, ma in seno ai singoli tratti che su di esso sono stati individuati, si scopre che la variazione associata all'orientazione degli apparati dunari, diventa importante anche per tratti limitrofi.

Probabilmente la forte variabilità è legata all'assetto morfologico e alla particolare dinamica evolutiva di questo tratto di costa, per cui sia la spiaggia che la duna evolvono in breve tempo, registrando modifiche spesso anche molto importanti dal punto di vista morfologico; queste poi si riflettono nell'assetto locale per cui anche tratti limitrofi possono presentare caratteristiche molto differenti ( $10^\circ < \Delta^\circ < 70^\circ$ ).

Da Lido di Volano (ferrara) sino a Lido delle nazioni (Ferrara) il  $\Delta^\circ$  mostra valori mediamente di  $80^\circ$ , mentre spostandoci verso sud, fino a Ravenna la differenza si alza, ma non varia di molto ( $\Delta^\circ$  medio =  $137^\circ$ ). Naturalmente questo parametro è espressione anche dell'orientazione della costa, la quale da nord verso sud mantiene un'orientazione sostanzialmente uniforme, ma questo aspetto è stato già sufficientemente approfondito nella sezione dedicata al calcolo del tasso di trasporto, per cui non verrà ripreso

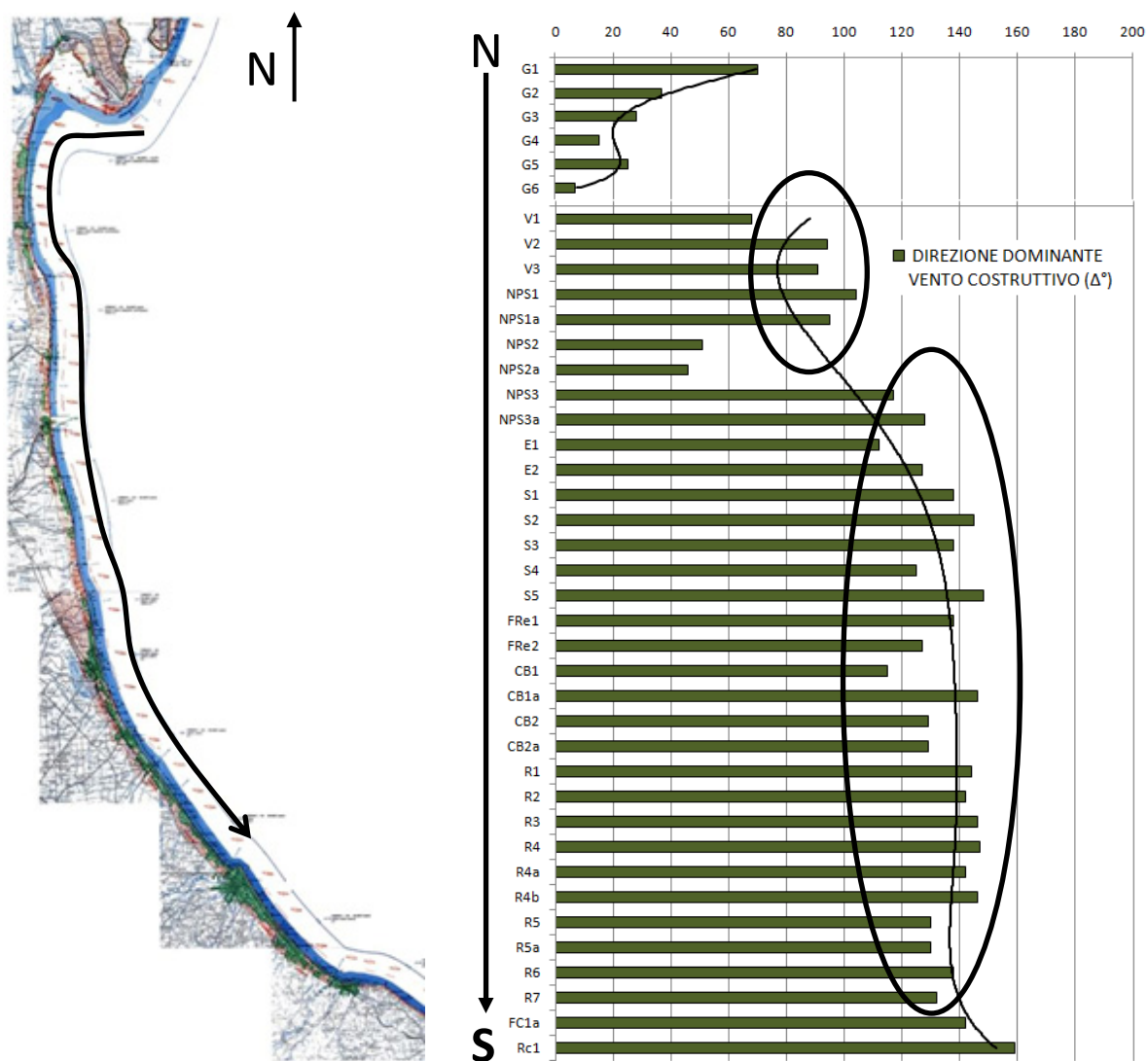


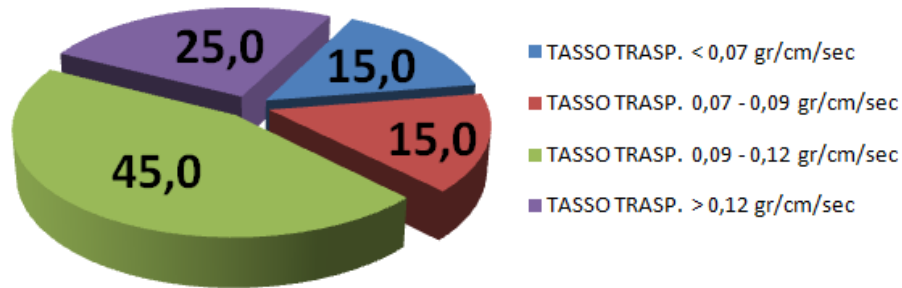
Figura 170 – Distribuzione delle direzioni dominanti costruttive ricavato per ciascun sistema spiaggia-duna analizzato, lungo la costa emiliano-romagnola;

### ***Tasso di trasporto eolico potenziale***

L'analisi della variabilità del tasso di trasporto eolico è stata sufficientemente approfondita nella sezione dedicata per cui in questa sezione si salterà ogni tipo di considerazione, rimandando per approfondimenti, al capitolo di riferimento (CAPITOLO 7). Si riportano in ogni caso, le tabelle di variabilità dei valori, entro i limiti stabiliti per la codifica (Figura 171a), e la distribuzione percentuale all'interno dei singoli intervalli (Figura 171b).

	ZINGG (1953) g/cmsec <sup>-1</sup>
Max Valore	0.15
min Valore	0.04
StdDev	0.03
Valore MEDIO	0.10

(a)



b)

Figura171 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) diagramma a torta della distribuzione dei valori entro gli intervalli indicati in legenda;

### C. FATTORI MORFOLOGICI e MORFOMETRICI

L'assetto morfometrico e morfologico del sistema spiaggia-duna sono sviscerati in tutte le loro principali componenti e grandezze. Sono state analizzate grandezze riferite all'ALTEZZA della DUNA, alla QUOTA della DUNA, alla PENDENZA fianco lato MARE della DUNA, all'AMPIEZZA della SPIAGGIA, alla PENDENZA della SPIAGGIA, alla FREQUENZA dei VARCHI (integrità asse duna).

Lo studio della variabilità regionale di tutte le grandezze sopra elencate rappresenta, forse, la “scatola” più importante della matrice d'interazione: è fondamentale analizzare e descrivere tutti gli aspetti morfologici che caratterizzano “oggi” il sistema, perché essi rappresentano l'effetto più diretto dell'azione da parte degli agenti morfodinamici (MARE, VENTO e UOMO). Anche per questo aspetto verranno presentate tabelle riassuntive all'interno delle quali ogni apparato dunare ha il suo corrispondente valore di quota in cresta; a tal proposito, va specificato che la misura dei valori è stata effettuata in corrispondenza di ogni profilo di misura, e poiché, per quanto detto nei precedenti capitoli, il numero dei transetti non è costante, la media estrapolata non coincide necessariamente con la media aritmetica tra il MASSIMO e il MINIMO valore misurato.

## Altezza Duna

La quota della sommità della cresta è indicativa del grado di sviluppo e maturità di un apparato dunare, e di conseguenza spesso anche dell'età; quote più elevate corrispondono a dune più consolidate e quindi spesso più antiche. Nella Figura 172a sono riassunti i principali parametri statistici, mentre nella Figura 172b è riportata la distribuzione dei valori all'interno degli intervalli scelti.

	QUOTA (m)
<b>Max Valore</b>	5.79
<b>min Valore</b>	1.16
StdDev	1.09
<b>Valore MEDIO</b>	3.11

(a)

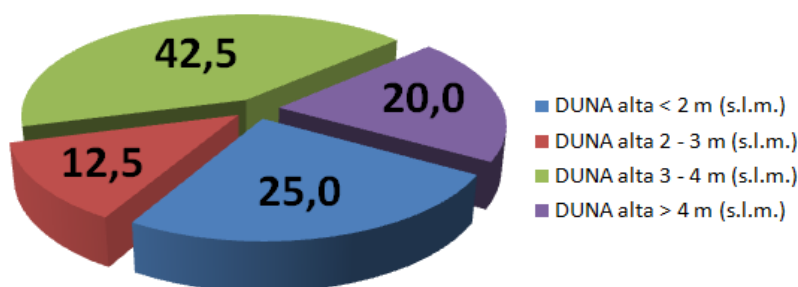


Figura 172 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) Distribuzione percentuale dei valori di altezza di cresta della duna dei 40 apparati esaminati.

Come si evince dalla tabella il valore massimo registrato è di 5,79m slm, mentre mediamente le dune risultano svilupparsi 3,11m sul livello del mare. Il 42,5% delle dune analizzate mostra un'altezza compresa tra i 3 e i 4 m slm (Figura 173a); circa il 37,5% non va oltre i 3m (Figura 173b), mentre solo il 20% presenta una quota al di sopra dei 4m slm. Il minimo valore registrato è di appena 1.16m slm, associabile alle forme pioniere che in alcuni casi (Es. Scanno di Goro, Figura 173c) si sviluppano poco al di sopra dello zero mare, facilitate dall'ampia porzione di spiaggia antistante e dalla completa assenza di qualsiasi forma di disturbo antropico.

Nella Figura 174 sono riportate, attraverso un'istogramma, i valori di quota della cresta associata ad ogni apparato dunare esaminato: se si osserva la distribuzione geografica di tali valori, da N verso S, è possibile individuare dei settori uniformi, il primo che comprende il tratto compreso tra Lido di Volano e Lido di Spina (Quota

media = 3,2m slm), e il secondo, tra Casal Borsetti e Lido di Dante (Quota media 3,6m slm).



(a)



(b)



(c)



(d)

*Figura 173 – (a) Esempio di duna con quota media di 3,6m slm (Punta Marina, Ravenna); (b) Esempio di duna con quota media di 4,98m slm (Lido degli Estensi, Ferrara); (c) Esempio di forme pioniere che possono svilupparsi poco al di sopra del livello del mare quando la spiaggia antistante è particolarmente ampia (Scanno di Goro, Ferrara); (d) Esempio di duna con quota media di 1,89m slm (tra Lido di Spina e foce Reno, Ferrara);*

Tra Lido di Spina e Foce Reno (Ferrara), cosiccome avviene lungo lo Scanno di Goro (precedentemente indicato), le condizioni di totale assenza di disturbo antropico fa sì che in determinati periodi dell'anno ci siano le condizioni per la formazione di forme pioniere poco al di sopra del livello del mare. Le quote in questo caso si aggirano poco al di sotto dei due metri slm (in media = 1.89m): con l'arrivo della stagione invernale naturalmente gran parte di queste viene smantellata dal moto ondoso, per cui le dune non riescono a svilupparsi in altezza (Figura 173c).

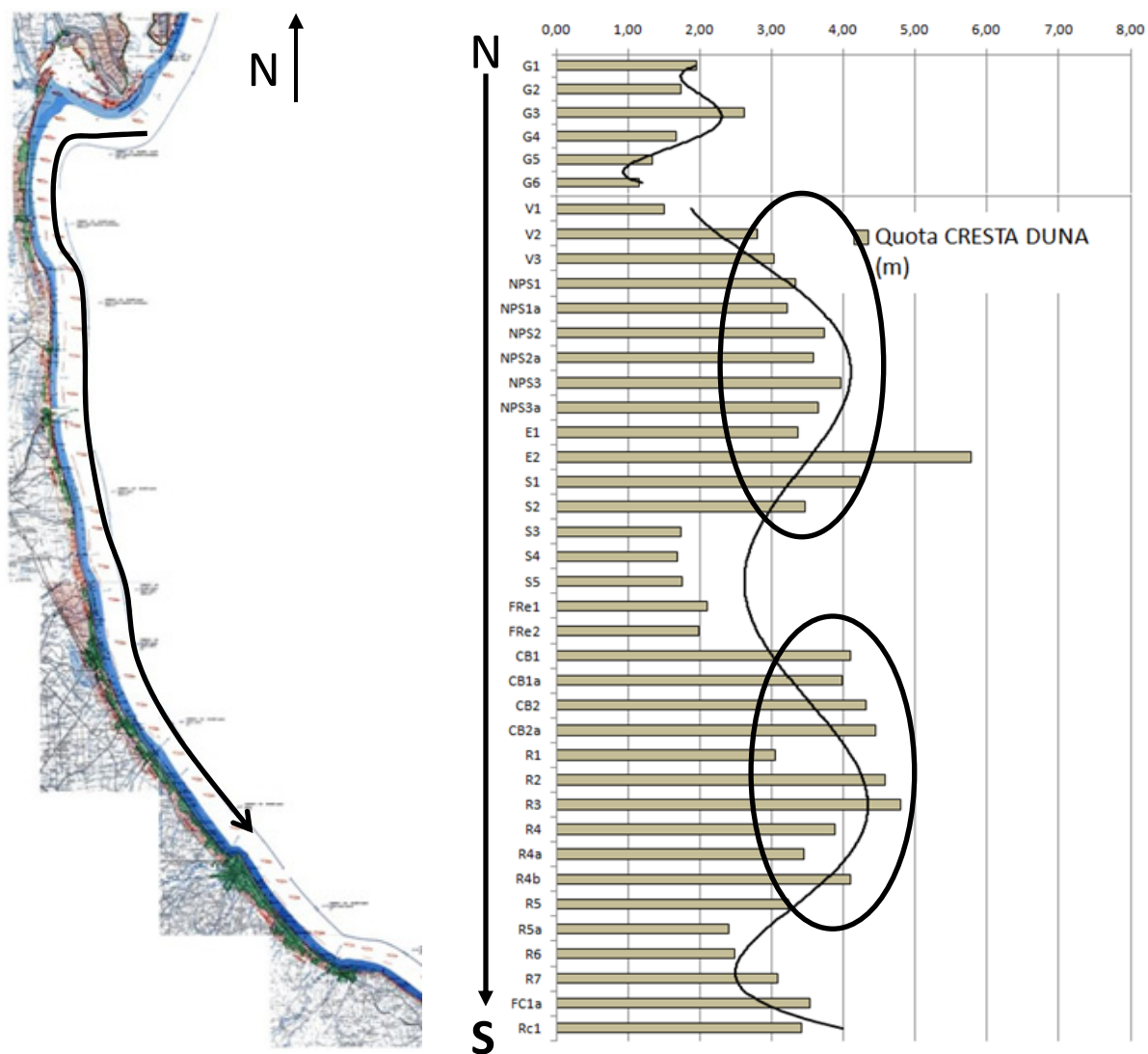


Figura 174 – Distribuzione lungo la costa emiliano-romagnola delle quote in cresta misurate in corrispondenza degli apparati dunari analizzati;

### *Pendenza Duna lato fianco mare*

La pendenza del lato fianco mare è importante per capire lo stato di stabilità di un apparato dunare perché rappresenta una chiara evidenza morfologica del risultato dell'azione modellante da parte del vento o del mare. Pendenze elevate caratterizzano dune in arretramento, al limite, anche in erosione, mentre dune con raccordi dolci e a basso angolo, descrivono una duna in avanzamento, o al limite, caratterizzate da una certa stabilità. Nella Figura 175 sono riportate, per ciascun apparato dunare, proprio l'angolo di raccordo morfologico tra la cresta e la spiaggia. Come si vede



dall'andamento della curva di regressione la variabilità è elevata: ciò nonostante è possibile individuare e separare settori che mostrano un comportamento uniforme, per cui è possibile derivare valori rappresentativi.

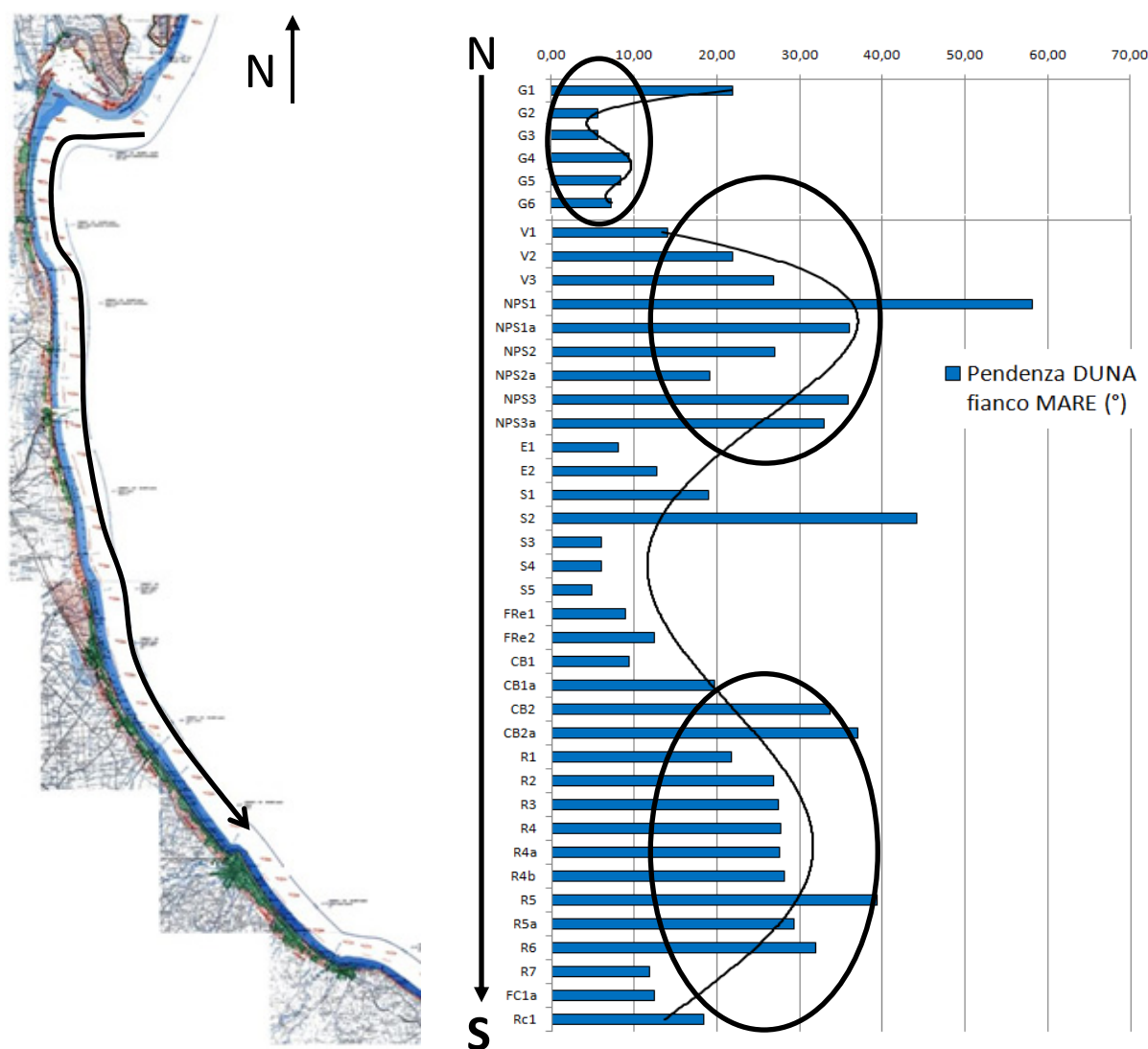
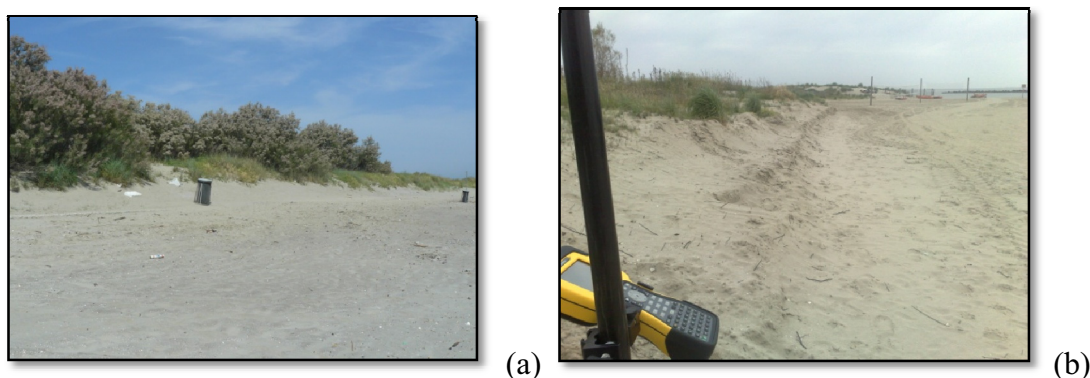


Figura 175 – Distribuzione lungo la costa emiliano-romagnola dei valori di pendenza del raccordo fianco mare della duna, misurati in corrispondenza degli apparati dunari analizzati;

Il settore dello Scanno di Goro, mostra un comportamento piuttosto omogeneo, con un valore di pendenza del raccordo fianco mare appena inferiore ai 10°; fa eccezione la duna in corrispondenza del Faro di Gorino (cod.G1), la quale è una duna artificiale, costruita a protezione del faro, a causa di una forte tendenza erosiva alla quale è sottoposta l'area, e che evidentemente giustifica l'elevato valore riscontrato. Da Lido di Volano (Ferrara) fino a Lido degli Estensi (Ferrara) i raccordi assumono valori



estremamente variabili (da un minimo di 18° ad un massimo di oltre 50°). Tale disomogeneità è legata certamente alla forte antropizzazione alla quale è sottoposto questo ampio tratto di litorale, ma se si va nel particolare ad analizzare i passaggi tra di essi, si noterà che alcuni settori risultano vincolati entro strutture turistico-balneari (pendenza > 30°, Figura 176a), mentre altri, sono caratterizzati da una moderata naturalità delle aree limitrofe: in queste condizioni la superficie di raccordo ha più probabilità di svilupparsi, e le pendenze quindi di abbattersi (Figura 176b).



*Figura 176 – (a) Esempio di duna con pendenze fianco mare più elevate (Lido degli Scacchi, Ferrara); (b) Esempio di duna con pendenze fianco mare meno elevate (Lido di Pomposa, Ferrara);*

Nelle Figure 177a e 177b sono invece riassunti i principali parametri statistici derivanti dall'analisi di regressione e, per mezzo di un diagramma a torta, la distribuzione dei valori all'interno degli intervalli scelti. Il valore più elevato registrato tra i casi presi in esame è di quasi 60° mentre la pendenza minore è di poco inferiore ai 5°, corrispondenti alle forme pioniere viste nell'analisi del precedente parametro. Più che di un valore vero e proprio si tratta di una stima indicativa: definire infatti una superficie di raccordo è praticamente impossibile quando ci sono solo forme isolate e poco sviluppate (campi dunari). Mediamente le pendenze si aggirano attorno a valori di poco più di 20°. Il 48% (19 su 40) presentano raccordi con pendenze superiori ai 20°; di questi, circa il 22% supera i 30°. Se si cercano tali apparati sull'istogramma di distribuzione lungo la costa si scoprirà che la maggior parte di essi si trova in corrispondenza di tratti costieri fortemente urbanizzati, per cui l'elevata pendenza del raccordo è legata a situazioni erosive (Figura 178a) o al rimaneggiamento delle spiagge ad opera dell'uomo prima e durante la stagione balneare (Figura 178b).

	Pendenza DUNA (°)
<b>Max Valore</b>	58.16
<b>min Valore</b>	4.80
StdDev	12.63
Valore MEDIO	21.35

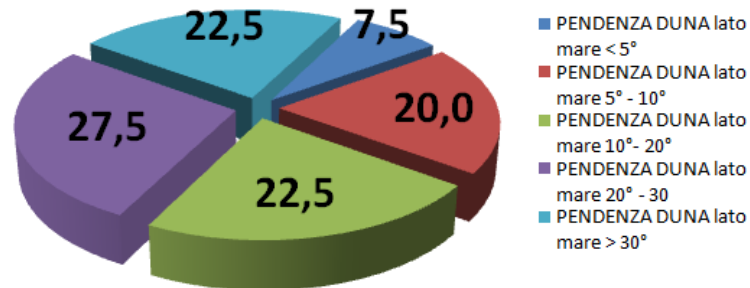


Figura 177 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) Diagramma a torta della distribuzione % dei valori di pendenza della duna lato fianco mare, misurati all'interno di ciascun intervallo scelto.



(a)

(b)

Figura 178 – (a) Esempio di raccordo duna fianco mare molto pendente a causa della condizione erosiva alla quale è sottoposta la duna (Lido di Spina, Ferrara); (b) Esempio di raccordo duna fianco mare molto pendente a causa della rimaneggiamento ad opera dell'uomo per le operazioni di pulizia della spiaggia prima della stagione balneare (Lido degli Scacchi, Ferrara);

### *Pendenza Spiaggia emersa*

La pendenza della spiaggia emersa descrive l'entità dell'azione erosiva da parte del mare e condiziona i meccanismi di accrescimento della duna perché ostacola l'azione di trasporto eolico ad opera del vento. Così come per gli altri parametri fin qui

esaminati, anche per la pendenza della spiaggia sono riportati, in Tabella 10, il valore MEDIO (ricavato dalle misure lungo i profili) e quelli MASSIMO e MINIMO, secondo la stessa metodologia descritta nella parte iniziale del paragrafo. Anche in questo caso la pendenza è spresa in gradi. Nella Figura 179a e 179b sono riassunti i principali parametri statistici derivanti dall'analisi di regressione e per mezzo di un diagramma a torta, la distribuzione dei valori all'interno degli intervalli scelti.

	Pendenza SPIAGGIA (°)
<b>Max Valore</b>	8.03
<b>min Valore</b>	0.59
StdDev	1.81
Valore MEDIO	4.33

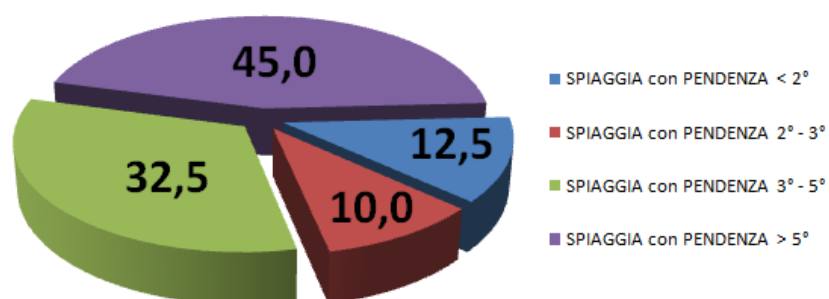


Figura 179 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) Diagramma a torta della distribuzione % dei valori di pendenza della spiaggia, misurati all'interno di ciascun intervallo scelto.

I massimi valori di pendenza della spiaggia si aggirano attorno agli 8°, con un minimo praticamente coincidente con una superficie suborizzontale: il 45% delle spiagge analizzate mostra una pendenza superiore ai 5° (18 su 40), mentre il 42,5% fa registrare pendenze variabili tra i 2 e i 5°. Se si vanno a confrontare tali valori con quelli derivanti dal plottaggio su di un istogramma di distribuzione come quello in Figura 180, è possibile individuare trend uniformi e separare tratti a comportamento simile.

Lungo lo Scanno di Goro la variabilità è elevata e in gran parte rispecchi l'andamento delle pendenze del raccordo fianco mare della duna: fatta eccezione per il primo apparato (per cui vale lo stesso discorso fatto nel precedente paragrafo), il resto degli apparati mostrano una variabilità di pendenze in relazione non tanto al forte stato erosivo al quale sono soggette, ma piuttosto alla particolare dinamica litoranea che, in

questo tratto crea e distrugge ampi settori di spiaggia nell'arco anche di una sola stagione (Simeoni et alii, 2008). Da Lido di Volano (Ferrara) a Lido degli Estensi (Ferrara) la pendenza è moderatamente elevata (in media attorno ai 5°), mentre in corrispondenza di Porto Garibaldi, fino a Lido di Spina, la spiaggia si fa molto meno pendente (circa 1°); in corrispondenza di Lido di Spina è l'erosione legata al moto ondoso che fa variare le pendenze, mentre da foce Reno a Ravenna (molo nord di porto Corsini) le pendenze medie tornano ad aumentare, ma con una maggiore omogeneità nel passaggio da un tratto all'altro.

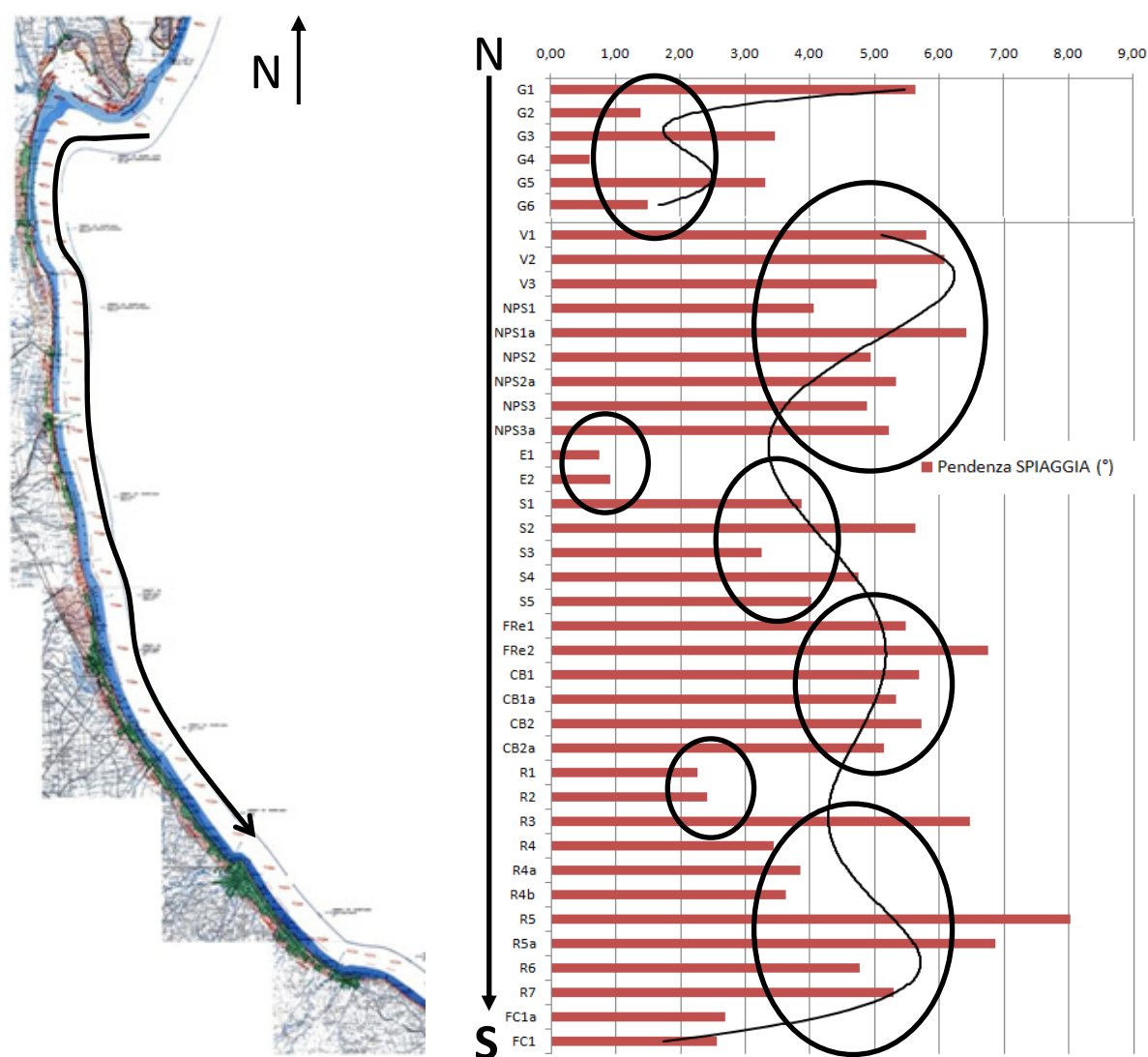


Figura 180 – Distribuzione lungo la costa emiliano-romagnola dei valori di pendenza della spiaggia misurati in corrispondenza degli apparati dunari analizzati;

In corrispondenza di Punta Marina (cod.R1 e R2) la spiaggia è meno pendente rispetto ai tratti limitrofi. Da qui in poi, verso sud è di nuovo l'azione antropica di pulizia delle spiagge che modifica ed incide, a volte pesantemente, sulla naturale pendenza della spiaggia: ecco perché nel diagramma si assiste di nuovo ad un alternarsi di valori.

### *Ampiezza duna attiva*

L'ampiezza della duna attiva (intesa questa come la porzione di apparato, che è coinvolta direttamente nei processi morfodinamici con la spiaggia antistante o direttamente con il mare) fornisce indicazioni non solo sullo stato di sviluppo del sistema, ma anche del suo, eventuale, stato di instabilità: in tale calcolo e misura infatti sono state riconosciute "attive" anche tutti quegli apparati consolidati che sotto la forte spinta erosiva da parte del mare o del vento, sono stati riattivati in settori una volta stabili. Operativamente le distanze sono state misurate sul piano orizzontale, dal punto in corrispondenza del piede (limite inferiore) fino al limite interno, coincidente o con evidenze morfologiche (secondo cordone dunare), o con il limite vegetazionale della pineta retrostante, o ancora, con il percorso/strada antropica costruita dall'uomo.

Nella Figura 181 sono riportate, per ciascun apparato dunare individuato lungo la costa regionale, le ampiezze misurate tra il limite interno, rappresentato il più delle volte dal passaggio alla vegetazione boschiva o arbustiva, e quello esterno, coincidente invece con il piede della duna, o l'eventuale scarpata di erosione. Come si vede dalla distribuzione dei valori, lungo lo Scanno di Goro (Ferrara), le ampiezze tendono ad aumentare, spostandoci da E verso W: dai poco più di 10m misurati in corrispondenza del Faro di Gorino, si passa ai 40m quasi in prossimità della parte terminale dello spit. Lungo il tratto di costa che va da Lido di Volano fino a Cesenatico, prendendo in considerazione tutti gli apparati esaminati, la variabilità è elevata: si passa da poco più di 10m ad ampiezze ben oltre i 60m: tale andamento probabilmente trova giustificazione in parte nell'assunto da cui si è partiti nel tracciare il limite interno, per cui a volte esso è costituito non da un limite naturale (passaggio arbustivo/bosco), ma da uno antropico (strada). Questo fa sì che i singoli tratti si possano differenziare tra loro anche se limitrofi o non lontani. In più c'è l'antropizzazione che naturalmente complica il tutto, con tratti dove si distribuiscono strutture e tratti dove invece la duna ha più spazio per svilupparsi e quindi raggiunge ampiezze maggiori.

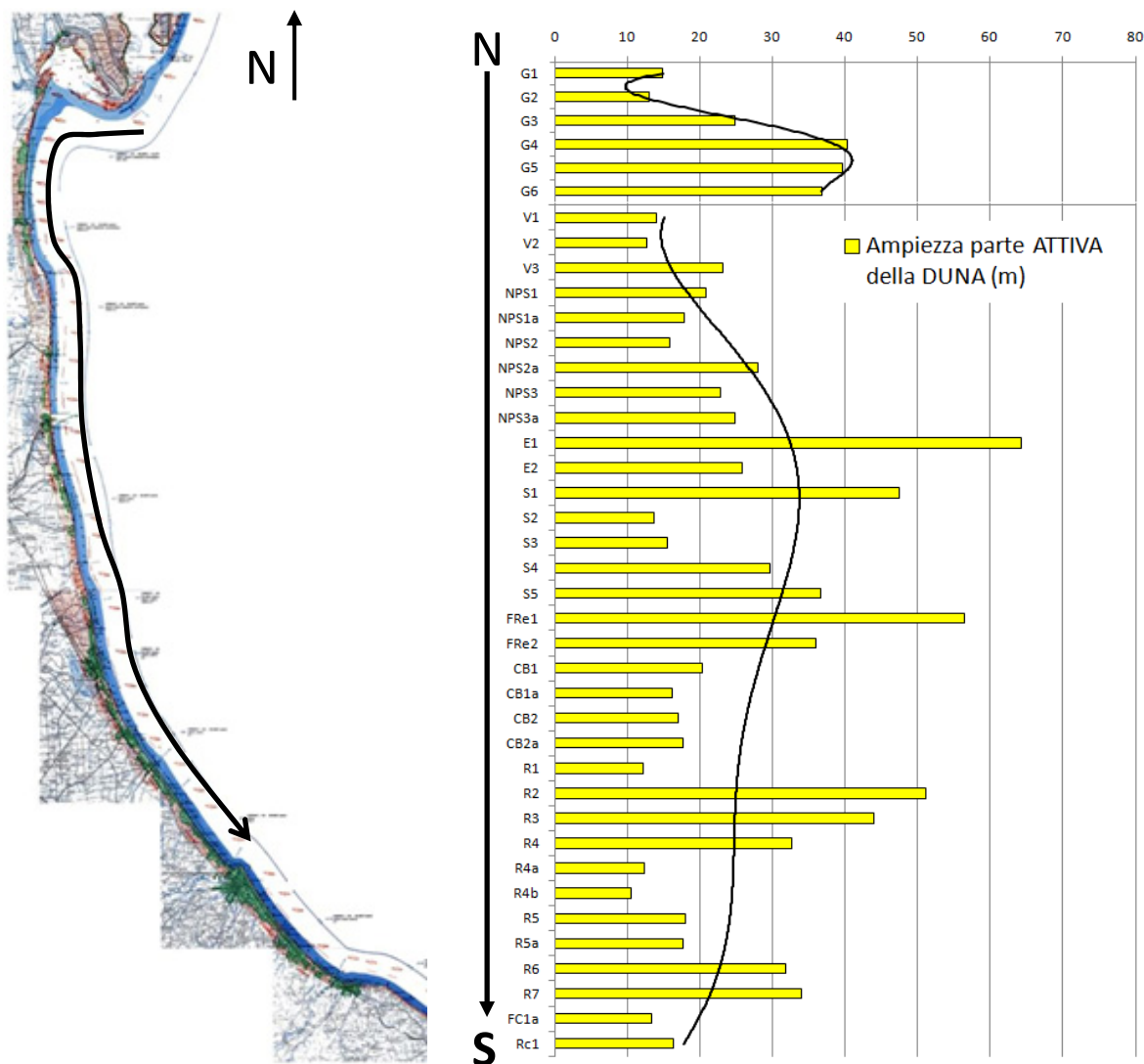


Figura 181 – Distribuzione lungo la costa emiliano-romagnola dei valori di ampiezza della duna attiva misurata in corrispondenza degli apparati dunari considerati;

Nelle Figure 182a e 182b sono rispettivamente riassunti i principali parametri statistici derivanti dall'analisi di regressione, e per mezzo di un diagramma a torta, la distribuzione dei valori all'interno degli intervalli scelti. I valori più elevati si raggiungono in corrispondenza di Lido degli Estensi (molo sud di Porto Garibaldi, Ferrara) dove la duna raggiunge quasi i 65m di ampiezza, mentre il valore minore lo si ritrova in corrispondenza di Lido di Dante, alla foce del fiume Lamone (Ravenna), con appena 10.46m di ampiezza. L'analisi statistica evidenzia che il 45% dei casi esaminati è caratterizzato da un'ampiezza variabile dai 15 ai 30m, il 22,5% da un'ampiezza compresa tra i 30 e i 40m, e solo il 22,5% da un'ampiezza inferiore ai

15m. Appena 4 su 40 sono gli apparati dunari che mostrano un'ampiezza del tratto "attivo" maggiore dei 40m.

AMPIEZZA DUNA ATTIVA	
Max Valore	64.22
min Valore	10.46
StdDev	13.45
Valore MEDIO	26.02

(a)

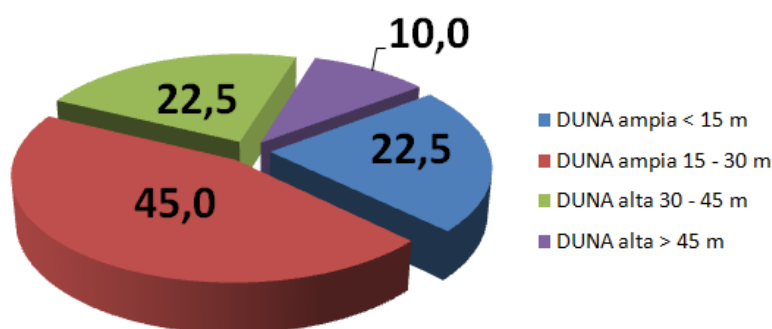


Figura 182 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) Diagramma a torta della distribuzione % dei valori ampiezza della duna attiva, misurati all'interno di ciascun intervallo scelto.

### *Ampiezza spiaggia emersa*

L'ampiezza della spiaggia emersa fornisce indicazioni sulla stabilità del sistema, in quanto spiagge poco ampie corrispondono a situazioni di crisi erosiva più o meno spinta: il mare in queste occasioni può arrivare a lambire la duna erodendola al piede e destabilizzandola. Nella Figura 183 sono riportate, per ciascun apparato dunare, le ampiezze misurate tra il limite interno, rappresentato dal piede della duna, e quello esterno, rappresentato dalla linea di riva. Se si osserva bene l'andamento dell'istogramma si noterà che in questo caso l'uniformità, rispetto al caso precedente sembra essere maggiormente garantita: lungo lo scanno di Goro l'ampiezza media ricavata è di circa 22m, da Lido di Volano e Porto Garibaldi, di 38m (con un  $\pm 10$ m in funzione del tratto presa in considerazione). A Lido degli Estensi la spiaggia raggiunge le sue dimensioni maggiori (oltre i 180m), per poi diminuire progressivamente man mano che ci si sposta verso Sud: a Lido di Spina si scende al di sotto dei 15m. Da Casal borsetti (Ravenna), fino a Ravenna la spiaggia mediamente raggiunge i 23m, mentre da Ravenna fino a Lido Di Dante (Ravenna), siamo sempre al di sopra dei



40m. In prossimità della foce del torrente Bevano la spiaggia si riduce (mediamente attorno ai 20m) e poi riaumenta passando verso Lido di Savio (oltre i 60m).

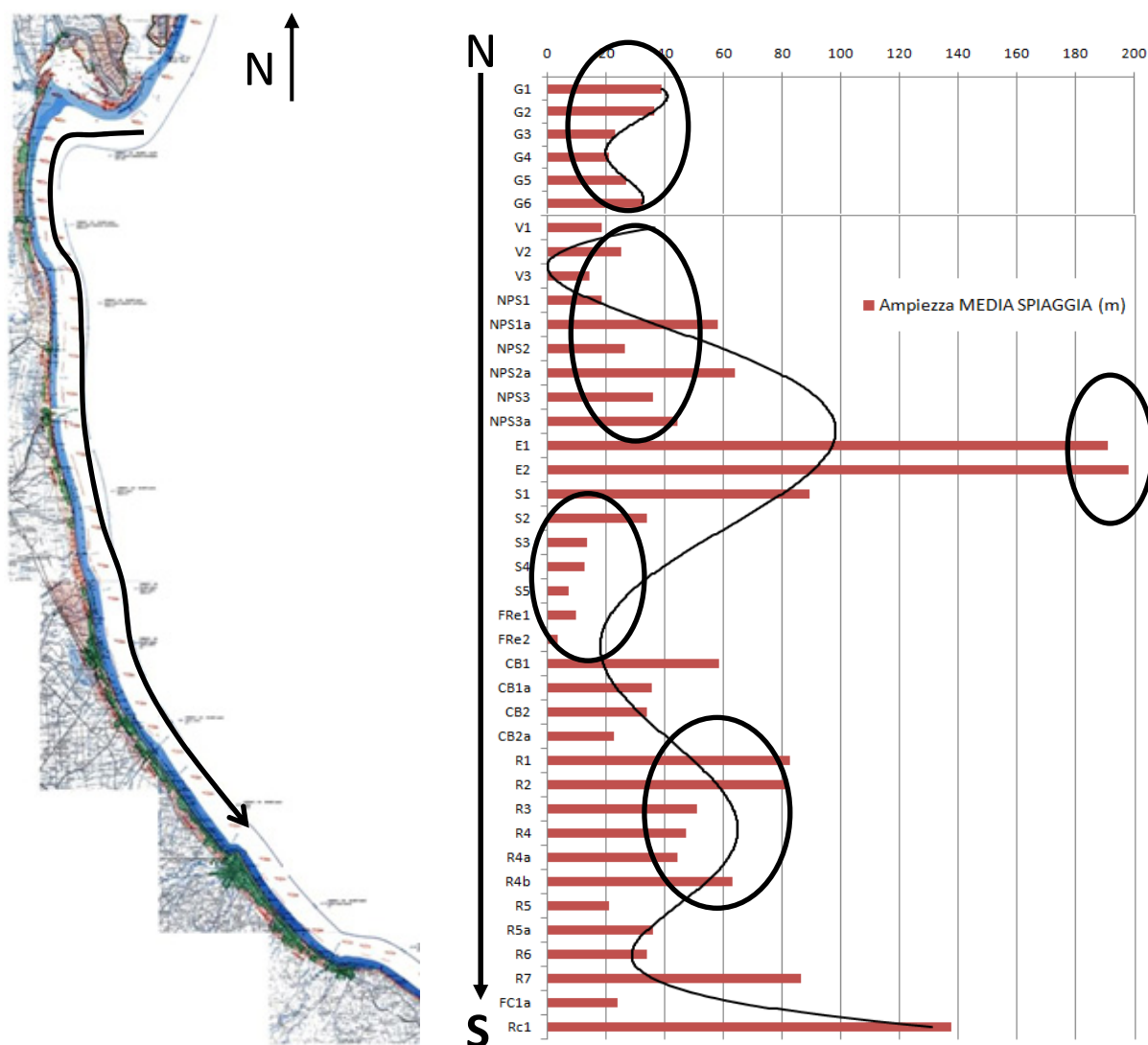


Figura 183 – Distribuzione lungo la costa emiliano-romagnola dei valori di ampiezza della spiaggia misurata in corrispondenza degli apparati dunari considerati;

Nelle Figure 184a e 184b sono riassunti rispettivamente i principali parametri statistici derivanti dall'analisi di regressione e, attraverso l'utilizzo di un diagramma a torta, la distribuzione dei valori all'interno degli intervalli scelti. Dalla distribuzione dei colori si ricava che il 40% dei casi esaminati è caratterizzato da una spiaggia ampia dai 15 ai 30m, il 25%, spiagge dai 30 ai 50m, il 2,5% da spiagge ampie più di 50m, mentre il 27,5% (6 su 40) hanno spiagge inferiori ai 15m.

	AMPIEZZA SPIAGGIA
Max Valore	198.00
min Valore	3.50
StdDev	43.48
Valore MEDIO	47.62

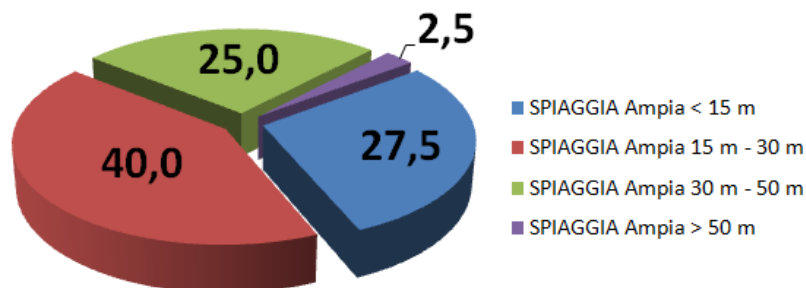


Figura 184 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) Diagramma a torta della distribuzione % dei valori ampiezza della spiaggia, misurati all'interno di ciascun intervallo scelto.

### *Integrità asse dunare*

La presenza e lo sviluppo di un'asse dunare sono fondamentali per il suo assetto morfologico, poiché descrivono la consistenza morfologica dell'apparato (laddove è riconoscibile e misurabile) e forniscono importanti indicazioni, se pur indirette, anche sullo stato morfodinamico del sistema, in quanto assi dunari fortemente frammentati sono sintomo di instabilità generale del sistema. Allo stesso modo laddove non è possibile riconoscere un unico cordone, probabilmente o la duna è in uno stato molto avanzato di rimaneggiamento o, al contrario, si trova nelle prime fasi di sviluppo (forme embrionali). All'interno della Figura 185, l'integrità del sistema dunare è espressa attraverso l'indice ID (Indice di Discontinuità), il quale può variare da 1 (il cordone è intuibile solo a grande scala – foto aeree – e ciò che resta dell'apparato dunare sono semplici lembi isolati e lontano tra loro perché l'ampiezza dei varchi è poco inferiore all'estensione lineare della duna), a valori prossimi allo 0 (il cordone è integro, ben riconoscibile, e l'ampiezza dei varchi non è comparabile con l'estensione lineare complessiva della apparato dunare). Nel primo caso l'indicazione si riferisce alla mancanza del cordone connessa alle sole situazioni di criticità legate a condizioni erosive o di tipo antropico. L'assenza di un cordone ben definito, nel caso si tratti di forme embrionali, è riconosciuta nella codifica dei valori pari a NO DATA. Come si

vede dalla distribuzione dei valori all'interno dell'istogramma si ricava una generale, scarsa, integrità di quasi tutti gli apparati dunari considerati (laddove il cordone è riconoscibile e cartografabile). I valori sono quasi sempre al di sotto dello 0,20: i valori più elevati (cod. NPS2, NPS2a, CB2, R2, R3 e R5a) si registrano in corrispondenza di cordoni che si trovano lungo tratti di litorale fortemente urbanizzati e sfruttati dal punto di vista turistico (Figura 186).

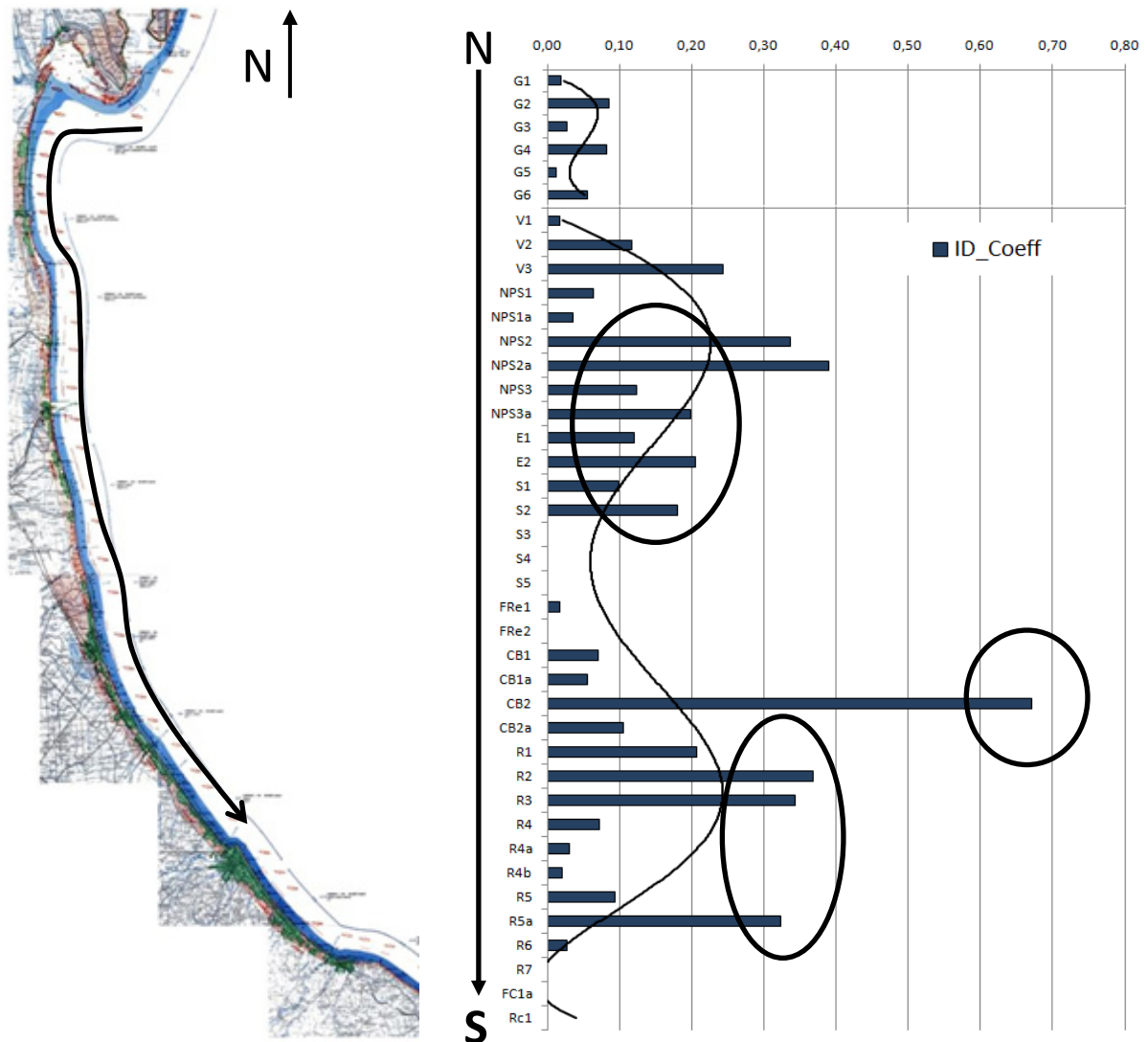


Figura 185 – Distribuzione lungo la costa emiliano-romagnola dei valori di Indice di Discontinuità (ID) ricavata in corrispondenza degli apparati dunari considerati;

Nella Figure 187a e 187b sono riassunti rispettivamente i principali parametri statistici derivanti dall'analisi di regressione, e, per mezzo di un diagramma a torta, la distribuzione dei valori all'interno degli intervalli scelti. Da essi risulta che il 56% dei

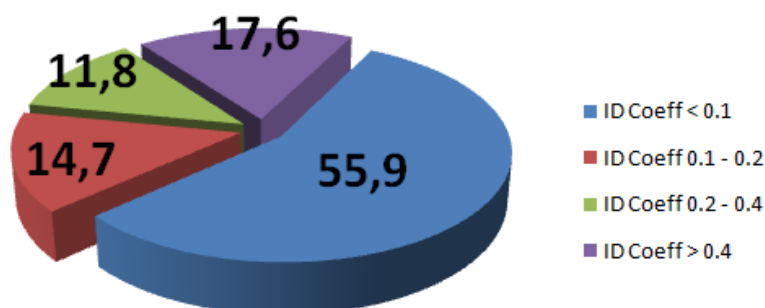
casi esaminati presenta un coefficiente ID < 0.1, sintomatico di un'integrità medio alta. Il 17,6% (6 su 40) mostrano invece un>ID > 0,4, il che significa che per essi la lunghezza totale delle ampiezze lineari dei varchi ha quasi raggiunto la metà dell'estensione lineare del cordone dunare.



Figura 186 – Esempio di interruzione della continuità del cordone dunare ad opera di strutture antropiche fisse (Punta Marina, Ravenna);

	ID_Coeff
<b>Max Valore</b>	0.67
<b>min Valore</b>	0.00
StdDev	0.15
Valore MEDIO	0.14

(a)



)

Figura 187 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) Diagramma a torta della distribuzione % dei valori dell'Indice di Discontinuità (ID), misurati all'interno di ciascun intervallo scelto.

## ***D. FATTORI MORFODINAMICI***

Tra i fattori morfodinamici è stato inserito solo il parametro Bilancio Evolutivo, in quanto fondamentale nella determinazione della condizione di stabilità/instabilità in

cui si può trovare un sistema spiaggia duna, ma di difficile collocazione all'interno dei gruppi di Fattori d'influenza descritti nella parte iniziale del capitolo. La definizione del bilancio imporrebbe la necessità di lavorare con le variazioni volumetriche associate allo spostamento del sedimento da un subsistema all'altro (dalla duna alla spiaggia e viceversa), ma la mancanza di dati a il numero elevato di sistemi analizzati (40) rende impossibile in tale sede l'applicazione al termine del significato più corretto. Per ovviare a tale difficoltà si è partiti dall'assunzione che, come già specificato nella parte di presentazione dell'analisi geomorfologica (Capitolo 7), è possibile parlare di bilancio evolutivo anche se si prendono in considerazione altre grandezze oltre il volume di sedimento, in particolare le aree sottese all'estensione della duna e della spiaggia. Quello che si è fatto è andare a circoscrivere le aree all'interno delle quali potevano nel 2000 e nel 2008 essere inglobate rispettivamente ciascuna duna e la propria spiaggia antistante. La differenza tra le stesse fornisce un'indicazione equivalente del bilancio evolutivo a cui è andato incontro il sistema in esame durante il periodo considerato.

### *Bilancio evolutivo*

L'analisi è stata condotta tra i dati relativi al 2000 e quelli relativi al 2008. Pur non garantendo informazioni volumetriche relative al reale spostamento dei sedimenti, all'interno, da, e verso l'esterno, questo parametro fornisce informazioni importanti a grande scala temporale, in quanto i meccanismi di trasporto si traducono meglio nelle variazioni areali delle morfologie associate. La Figura 188 rappresenta la distribuzione, lungo la costa emiliano-romagnola, dei valori di bilancio netto ricavati per i tratti in esame: lungo lo Scanno di Goro (Ferrara), si registrano solo bilanci negativi, con valori che variano dai  $-40 \text{ m}^2/\text{m}$  in corrispondenza del faro di Gorino, ai  $-60 \text{ m}^2/\text{m}$  in corrispondenza del settore centrale dello Scanno, fino agli appena  $-4 \text{ m}^2/\text{m}$  ricavati nella parte terminale. Per quello che si è detto in precedenza la forte variabilità delle morfologie e delle aree sottese ad esse, il bilancio netto risultante non può che essere fortemente variabile.

Da Lido di Volano (Ferrara) e fino a Lido di Scacchi (cod.NPS3, Ferrara) il bilancio resta negativo, ma il valore medio è più stabile e si aggira attorno ai  $-27 \text{ m}^2/\text{m}$ ; spostandoci verso sud, da Lido degli Estensi (Ferrara), fino alla parte più a nord di

Lido di Spina (Ferrara) il bilancio netto diventa positivo con valori che mediamente si assestano attorno ai +25 m<sup>2</sup>/m.

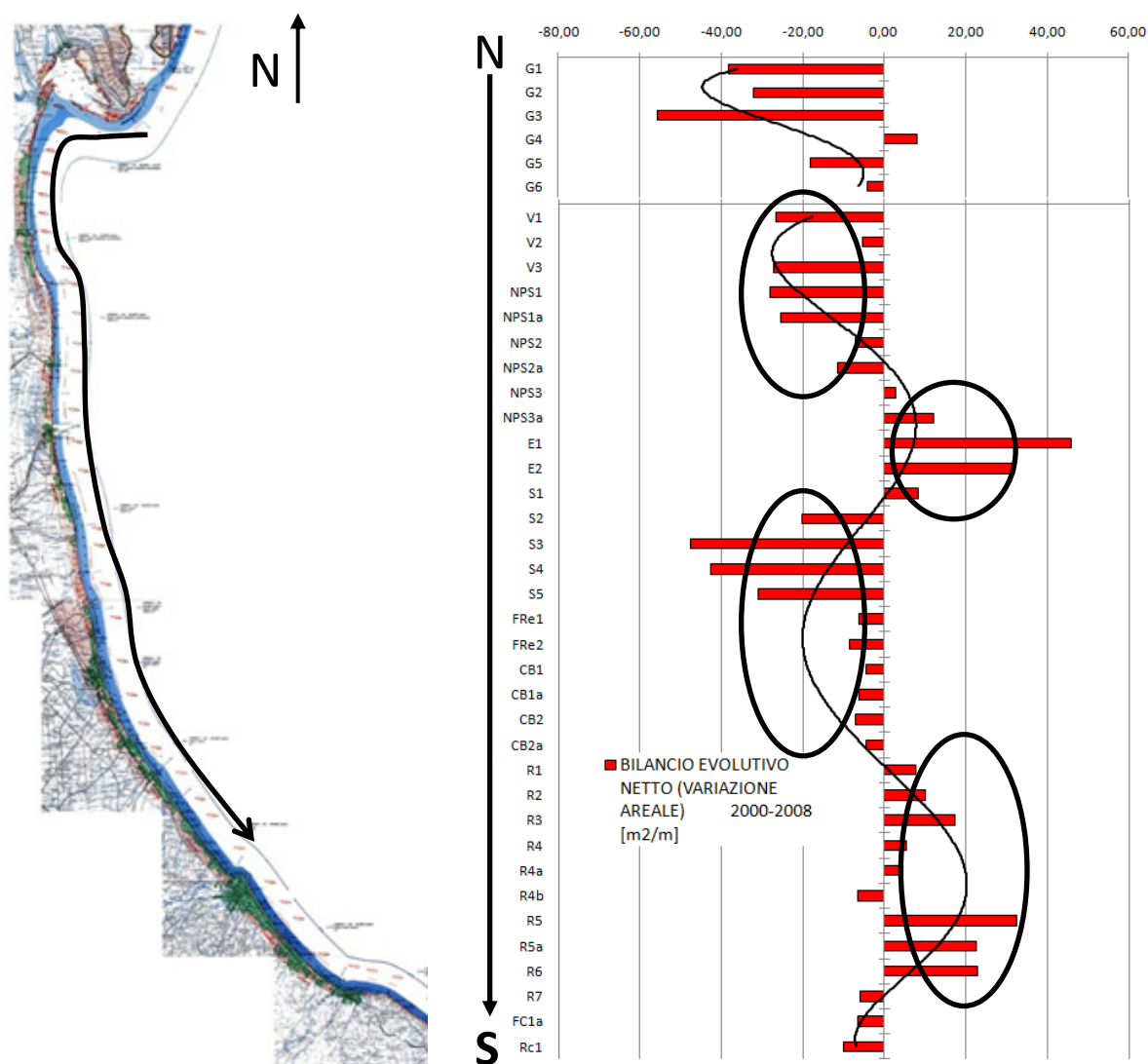


Figura 188 – Distribuzione lungo la costa emiliano-romagnola dei Bilanci Evolutivi (variazioni areali) netti ricavati in corrispondenza degli apparati dunari considerati;

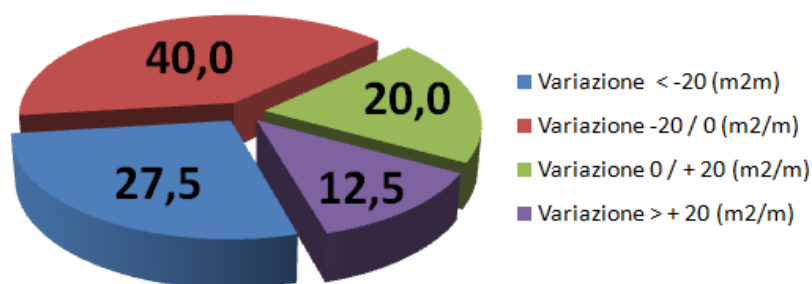
Da Lido di Spina fino a Ravenna i valori tornano negativi, con un picco medio di -40 m<sup>2</sup>/m fino a Foce Reno che poi passano agli appena -6 m<sup>2</sup>/m tra Casal Borsetti fino al molo nord di Porto Corsini (Ravenna).

Più a sud, e fino alla foce del torrente Bevano, si registrano bilanci positivi (tranne per il tratto a ridosso della foce del fiume Lamone, cod.R4a e R4b) con valori che crescono fino ai +32 m<sup>2</sup>/m in corrispondenza del settore compreso tra Lido di Dante

(Ravenna) e la foce del torrente Bevano (Ravenna). Nelle Figure 189a e 189b sono riassunti rispettivamente i principali parametri statistici derivanti dall'analisi di regressione, e per mezzo di un diagramma a torta, la distribuzione dei valori all'interno degli intervalli scelti.

BILANCIO EVOLUTIVO	
[m <sup>2</sup> /m]	
Max Valore	46.00
min Valore	-55.57
StdDev	22.90
Valore MEDIO	-7.10

(a)



(b)

Figura 189 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) Diagramma a torta della distribuzione % dei valori di Bilancio Evolutivo (variazione areale) ricavati in corrispondenza di ciascun intervallo scelto.

## ***E. FATTORI VEGETAZIONALI***

La vegetazione compare nella matrice d'interazione attraverso l'analisi di due parametri principali: la DENSITÀ DI COPERTURA VEGETAZIONALE e la descrizione degli ASPETTI FITOSOCIOLOGICI, derivati, indirettamente, dalla misura di un parametro fisico (NDVI) che esprime lo stato di salute della vegetazione in termini di sovrapposizione tra le varie specie (STRESS).

### *Densità vegetazione*

La densità della vegetazione è una misura diretta della copertura vegetazionale al di sopra dell'area dunare (anche in questo caso, solo quella attiva). I valori sono espressi in termini di % relativa rispetto all'area totale della duna. Non sono state fatte



differenziazioni sulla tipologia di copertura vegetazionale, partendo dall'assunto che la densità generalmente aumenti con l'aumentare della consistenza morfologica della duna, per cui nella successiva codifica dei valori rilevati all'interno degli intervalli di variabilità complessiva, i valori maggiori, corrispondenti alla maggior stabilità sono stati attribuiti ai valori più elevati di densità. La Figura 190 mostra la distribuzione dei valori associati a ciascun tratto in esame, distribuiti lungo la costa regionale.

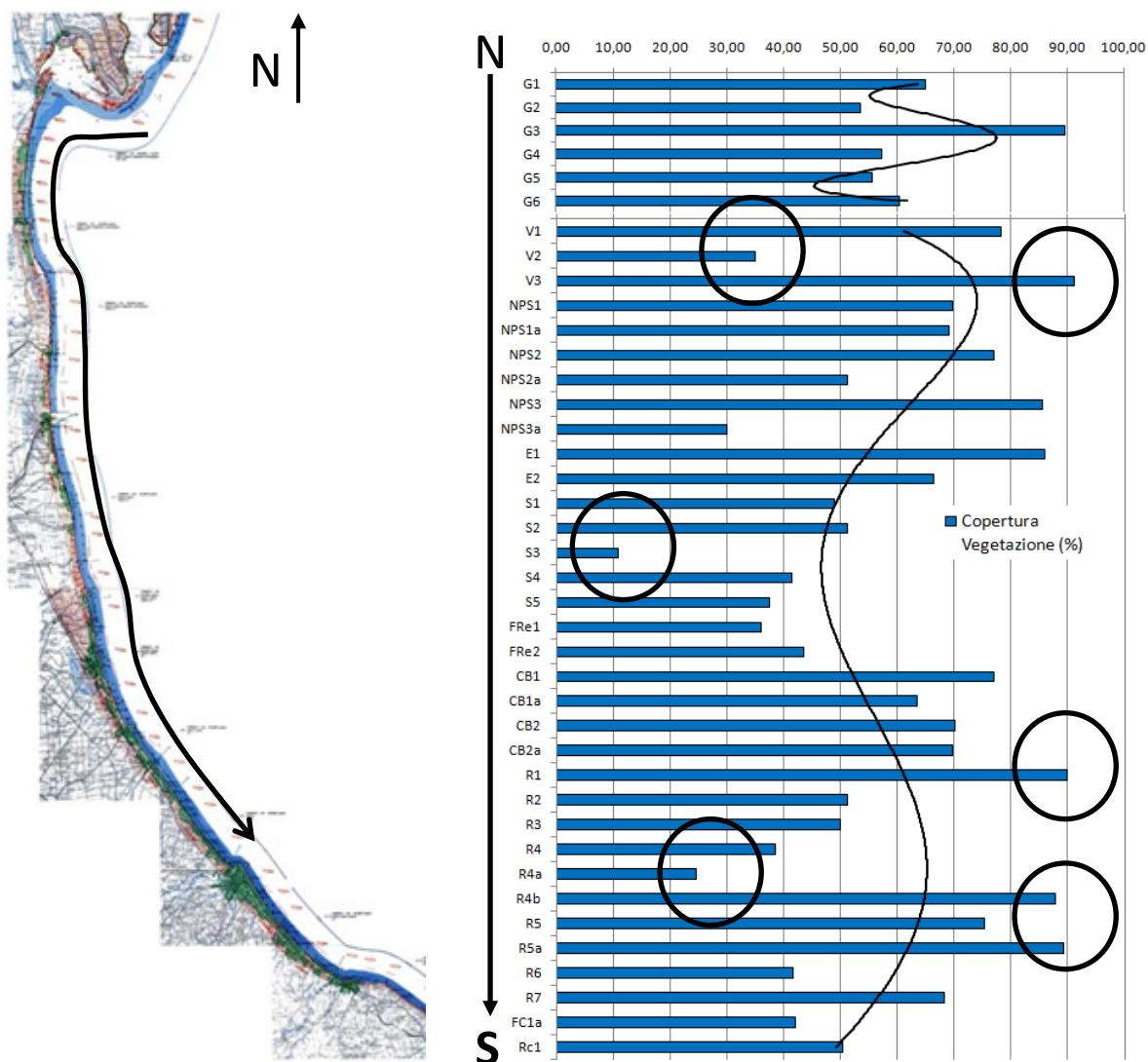


Figura 190 – Distribuzione lungo la costa emiliano-romagnola della % di copertura vegetazionale ricavati in corrispondenza degli apparati dunari considerati;

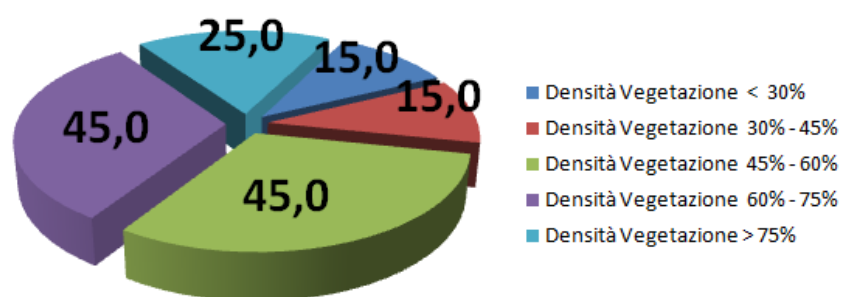
Come si vede dalla distribuzione dei valori, la variabilità è elevata: nel tratto più settentrionale (Scanno di Goro) la densità è sempre oltre il 50%, mentre da Lido di Volano (Ferrara) verso S, tale valore si mantiene solo per la metà di essi (17 su 34). Di

queste, 6 sono caratterizzate da una copertura vegetale al di sotto del 40%. Le dune con i valori più bassi si ritrovano, da N verso S, in corrispondenza della duna cod.V2 (35%), della duna cod.NPS3a (30%), della duna cod.S3 (11%); quelle con la densità maggiore sono, da N verso S, la duna cod.V3 (90%), la duna cod.R1 (89%), la duna cod.R4b (87%) e la duna cod.R5a (89%).

Nella Figure 191a e 191b sono riassunti rispettivamente i principali parametri statistici derivanti dall'analisi di regressione, e attraverso un diagramma a torta, la distribuzione dei valori all'interno degli intervalli scelti.

	DENSITA' VEGETAZIONE (%)
Max Valore	91.25
min Valore	10.98
StdDev	20.23
Valore MEDIO	59.51

(a)



(b)

Figura 191 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) Diagramma a torta della distribuzione dei valori di densità di vegetazione (%) ricavati in corrispondenza di ciascun intervallo scelto.

### *Aspetti fitosociologici*

L'analisi degli aspetti fitosociologici è importante perché l'integrità di un apparato dunare, e quindi la stabilità di un sistema spiaggia-duna, sono molto legati non solo alla densità di copertura vegetazionale, ma anche alla distribuzione delle varie specie sui vari settori al di sopra e nei pressi dell'apparato dunare. Situazioni erosive più o meno spinte possono favorire fenomeni di sovrimposizione tra specie vegetali, con fitocenosi che attecchiscono in settori già parzialmente "occupati", per cui l'effetto è quello di perdere la serie di riferimento tipica di questi ambienti. L'evidenza macroscopica si traduce nell'aumento dello stress associato allo sviluppo stesso della

vegetazione: si tratta di un parametro misurabile in remoto, su immagini multispettrali, e coincidente con l'acronimo NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). È stato derivato un'indice per ciascun apparato, ricavando il valore medio all'interno di un'area di rispetto di 50m oltre i limiti stabiliti per ciascuna duna (Figura 192).

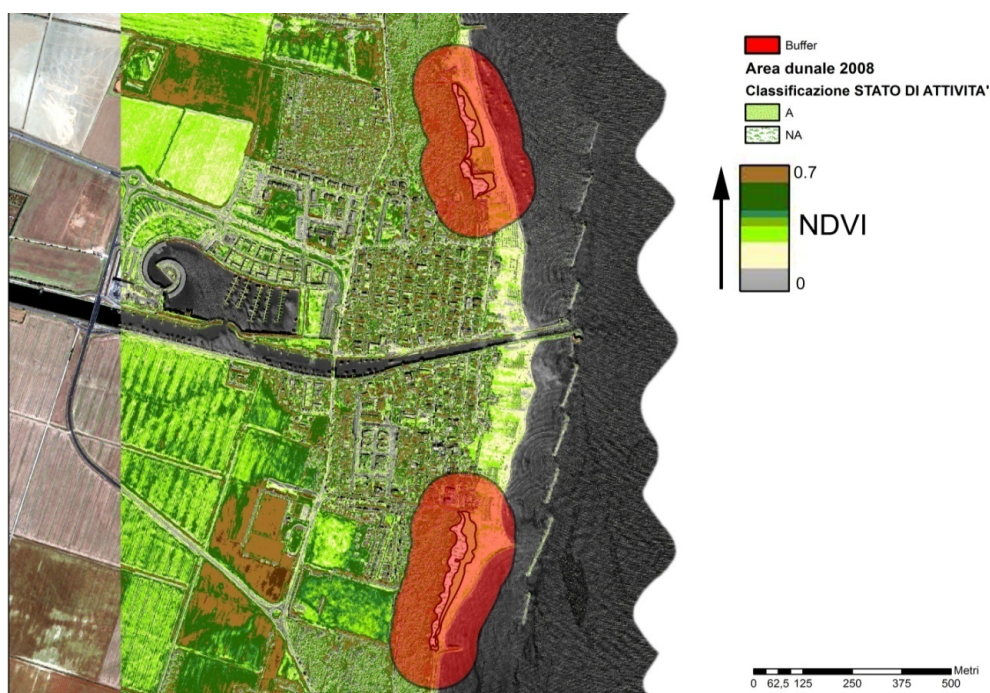


Figura 192 –Esempio di estrapolazione del valore di NDVI, in prossimità del sistema spiaggia-duna considerato e all'interno dell'area di rispetto (Buffer) evidenziata in rosso.

Nella Figura 193 sono riportati in un istogramma i valori di NDVI estrapolati dalle immagini multispettrali (Quickbird e Ikonos): poiché non si aveva a disposizione una copertura sufficiente per tutti gli apparati, per alcune dune si è proceduto ad una valutazione comparativa in funzione della variabilità che l'indice mostra per le aree coperte. Come si evince dal grafico, lungo lo Scanno di Goro i valori si mantengono sostanzialmente costanti (in media,  $3,46E-01$  con  $StdDev = 0,207$ ); da Lido di Volano (Ferrara) a Lido di Spina (Ferrara) i valori variano da  $4,54E-01$  ( $StdDev = 0,31$ ) a  $3,35E-01$  ( $StdDev = 0,190$ ): in tale intervallo sembra essere fortemente dipendente dalla presenza e dall'estensione di strutture antropiche e quindi dall'utilizzo degli spazi connessi e limitrofi alla duna (Figura 193): il numero di varchi e di accessi alla spiaggia favorisce il passaggio verso la spiaggia e quindi il degrado della vegetazione che si alterna e si succede lungo il profilo trasversale.

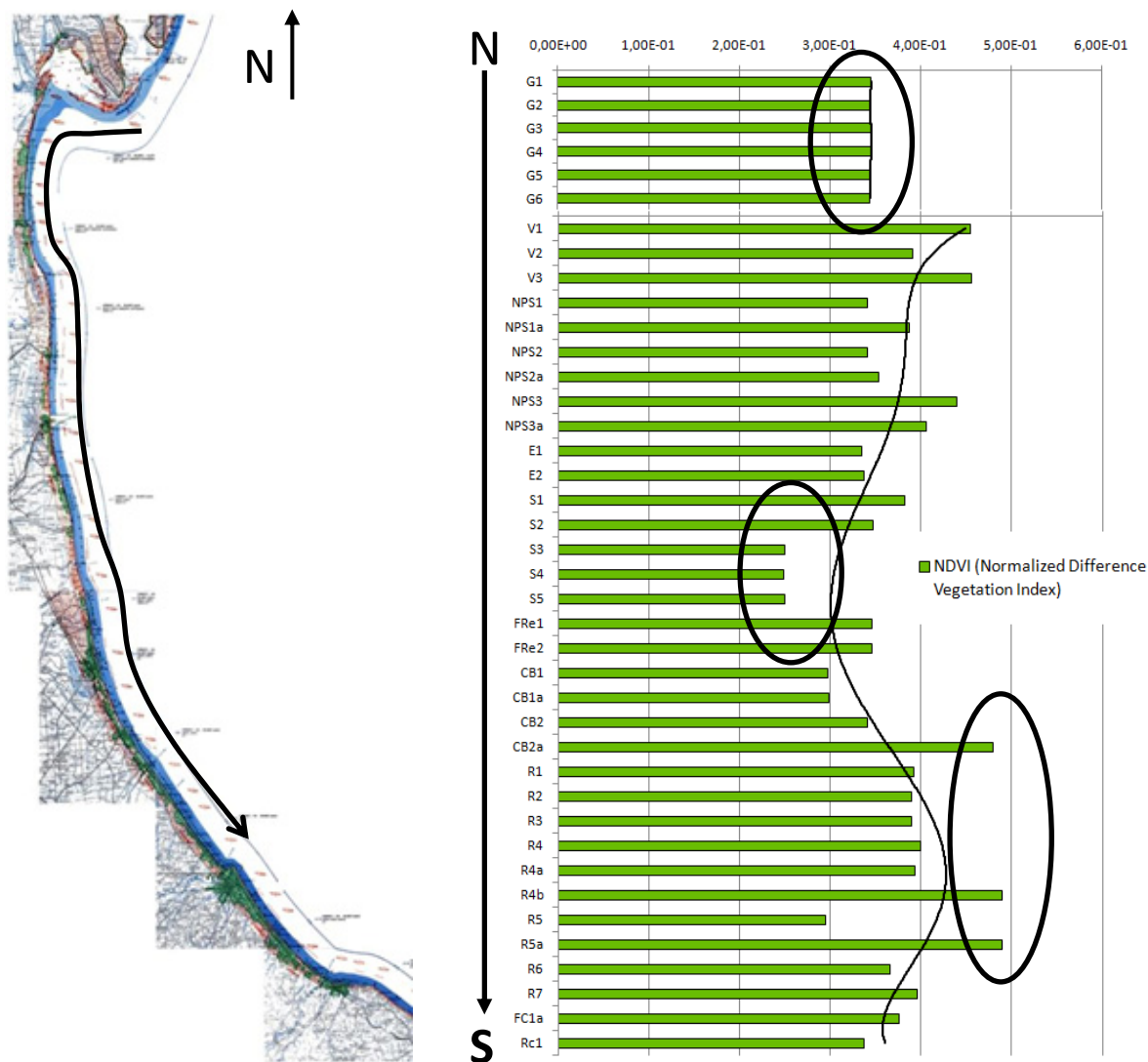
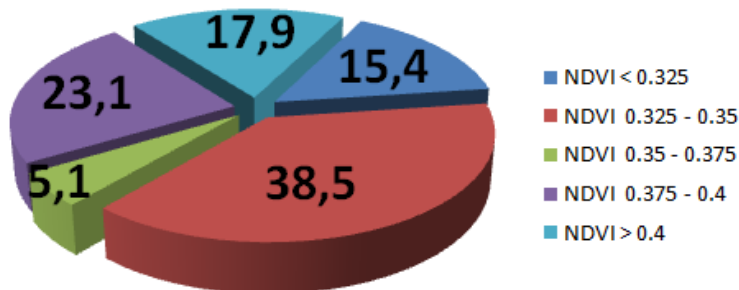


Figura 193 – Distribuzione lungo la costa emiliano-romagnola dell'indice NDVI estrapolati in corrispondenza degli apparati dunari considerati;

Oltre il Lido di Spina l'indice tende ad aumentare, anche se continua la forte variabilità: il valore maggiori si registrano in corrispondenza delle dune identificate con i cod.CB2 (4,80E-01 con StdDev = 0,364), cod.R4b (4,90E-01 con StdDev = 0,28) e cod.R5a (4,90E-01 con StdDev = 0,26). Nelle Figure 194a e 194b sono rispettivamente riassunti i principali parametri statistici derivanti dall'analisi di regressione, e, attraverso un diagramma a torta, i valori, la distribuzione dei valori all'interno degli intervalli scelti.

	NDVI
Max Valore	0.49
min Valore	0.25
StdDev	0.06
Valore MEDIO	0.37

(a)



(b)

Figura 194 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) Diagramma a torta della distribuzione dei valori di NDVI ricavati in corrispondenza di ciascun intervallo scelto.

## F. FATTORI ANTROPICI

L'antropizzazione rappresenta uno dei fattori morfodinamici più condizionanti nell'evoluzione naturale degli ambienti costieri, specialmente per la duna. Come il fattore "vegetazione", il parametro che ne esprime per eccellenza l'intensità di azione è la *densità di copertura*, per cui nella matrice d'interazione, uno dei due parametri che viene utilizzato a tale scopo è proprio l'estensione areale delle strutture antropiche presenti sul territorio. Un altro aspetto è però ugualmente importante, la tipologia di utilizzo degli spazi costieri, in quanto gli effetti connessi ad un utilizzo stagionale sono chiaramente diversi da quelli prodotti da strutture o attività che agiscono l'intero periodo dell'anno.

### *Densità Antropica*

La densità antropica, come la vegetazione, è un parametro facilmente misurabile, ed è espresso come rapporto con l'area occupata dalla duna. Nel caso delle strutture antropiche però, non basta concentrarsi solo sugli spazi di sviluppo dell'apparato: è necessario spingersi oltre, fino ad una certa distanza (area di rispetto – *Buffer*), oltre la

quale qualsiasi struttura, fissa o mobile che sia, si è certi non possa produrre effetti di disturbo nell'evoluzione del'apparato stesso. Nella fase di identificazione e misura delle aree antropiche si è stabilito che la fascia di rispetto vada fissata a circa 100m dai limiti dunari tracciati in precedenza. Nella tabella infatti compaiono solo le misure effettuate su strutture o porzioni di struttura che cadono all'interno di tale distanza. Nella Figura 195 sono rappresentati i valori di densità antropica estrapolati per tutti i tratti esaminati.

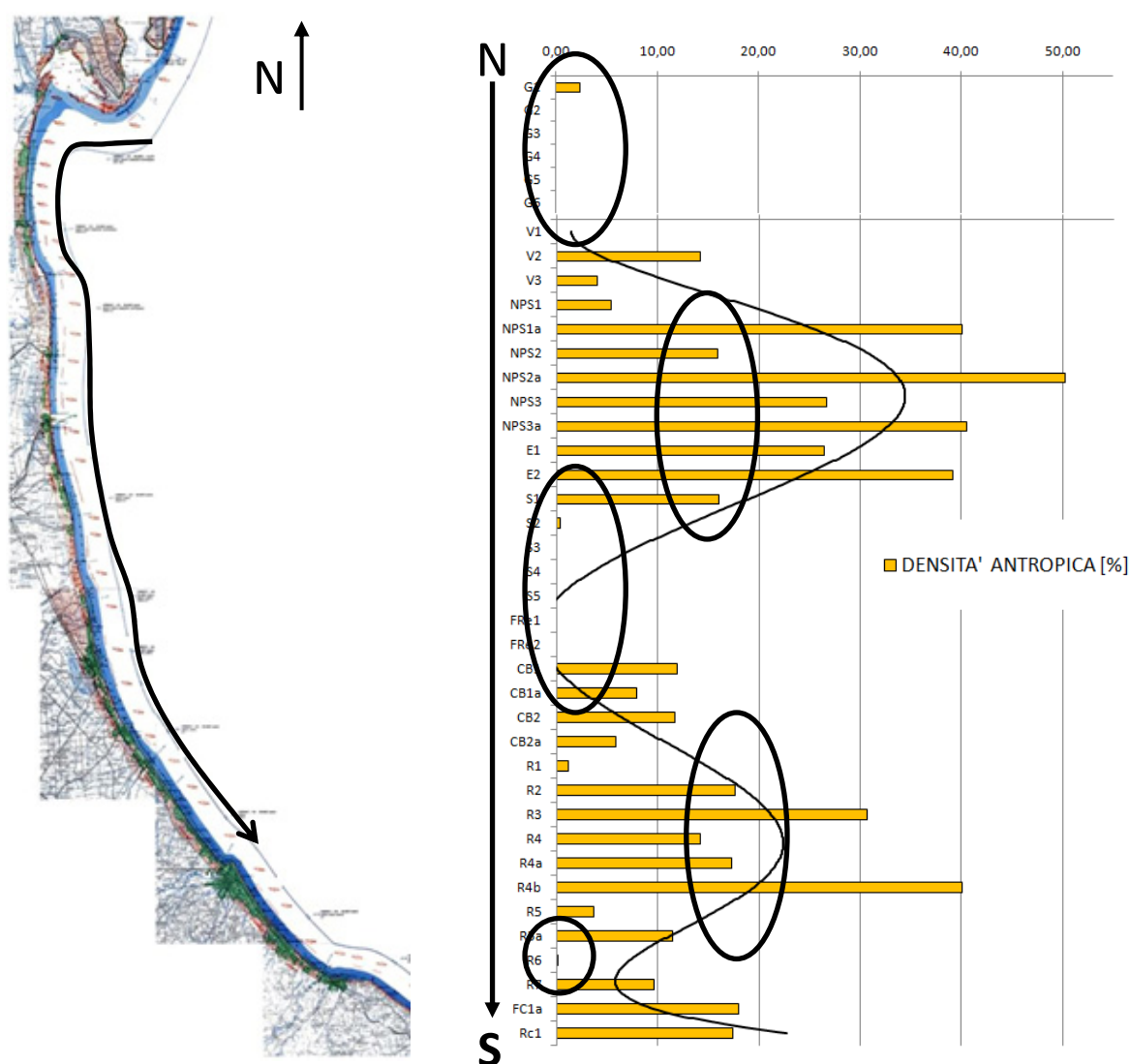


Figura 195 – Distribuzione lungo la costa emiliano-romagnola della % di densità antropica estrapolati in corrispondenza degli apparati dunari considerati;

Lungo lo Scanno di Goro, non esistono strutture, per cui il valore è nullo. La densità antropica raggiunge il suo massimo valore in corrispondenza del sistema spiaggia-



duna identificato con il cod.NPS2a (50,3%) a Lido delle Nazioni: in generale lungo tutto il tratto compreso tra Lido di Volano e Lido di Spina la presenza di strutture balneari condiziona l'evoluzione degli apparati dunari; a prescindere dal tipo di struttura presente, la percentuale di copertura è, per gran parte dei sistemi considerati in questo settore (9 su 11) superiore al 15%.

Il tratto in corrispondenza delle Vene e delle Ancone di Bellocchio (Ferrara), tra i cod.S2 e FcRe2 mostra di nuovo valori nulli, essendo quest'area del tutto naturale. Da Casal Borsetti (Ravenna) verso S, il litorale è contraddistinto da una forte antropizzazione, con la presenza di strutture continue e estremamente prossime agli apparati dunari; i valori si aggirano mediamente attorno al 18%, tranne che per il sistema cod.R6 (Foce torrente Bevano) che essendo all'interno di un'area protetta, non presenta elementi antropici esterni.

Nelle Figure 196a e 196b sono rispettivamente riassunti i principali parametri statistici derivanti dall'analisi di regressione, e attraverso un diagramma a torta, rappresentata la distribuzione dei valori all'interno degli intervalli scelti.

	DENSITA' ANTROPICA (%)
<b>Max Valore</b>	50.25
<b>min Valore</b>	0.00
StdDev	14.16
Valore MEDIO	12.51

(a)

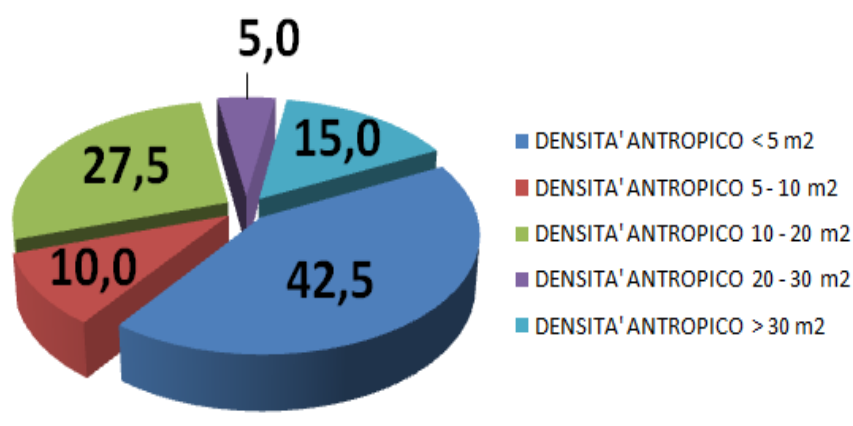


Figura 196 – (a) Tabella riassuntiva dei principali parametri statistici; (b) Diagramma a torta della distribuzione di strutture e infrastutture antropiche entro un'area di rispetto di 100m dei limiti della duna.



## *Tipologia utilizzo spazi costieri*

Per quanto riguarda la tipologia di utilizzo degli spazi costieri, la valutazione è puramente qualitativa, in quanto non esistono grandezze misurabili che ne possono descrivere la variabilità in modo semplice ed efficace (anche ai fini della codifica e dell'inserimento all'interno della matrice finale).

Per questo motivo, si è passati direttamente alla codifica, attribuendo un valore pari a "3" ad un utilizzo costante e intenso (tipico di apparati che si trovano in aree residenziali, per cui case, strutture, e infrastrutture permanenti finiscono per occupare gran parte dell'area di rispetto prima indicata, e la duna non ha spazio per sopravvivere); un valore pari ad "2", per utilizzi temporanei (stagionali), associabili ad apparati che, pur trovandosi in aree dove si svolgono semplici attività turistico-balneare, si trovano comunque intrappolate tra strutture e infrastrutture (che però non sono abitative); un valore pari a "1" per utilizzi temporanei (stessa situazione di prima), ma con spazi attorno che sono più naturali (Es. pinete), per cui all'interno della fascia di rispetto, la densità di copertura è molto bassa); infine, un valore pari a "0" per le dune che si sviluppano in ambienti completamente naturali, senza alcun condizionamento (coincidenti con aree parco o zone protette).

Nella Figura 197 sono plottati, all'interno di un istogramma, i valori equivalenti alla codifica delle classi di utilizzo degli spazi costieri sopra descritti. Saltando il tratto di costa corrispondente allo Scanno di Goro (la mancanza di strutture rende la tipologia di utilizzo del tutto "naturale" = 0), da Lido di Volano fino a Cesenatico è possibile individuare due settori distinti, interrotti da un tratto in corrispondenza delle Vene e delle Ancone di Bellocchio (Ferrara), anch'esso classificato come completamente naturale (Ferrara).

Nelle Figure 198a e 198b sono rispettivamente riassunti i principali parametri statistici derivanti dall'analisi di regressione, e rappresentati, per mezzo di un diagramma a torta, la distribuzione dei valori all'interno degli intervalli scelti.

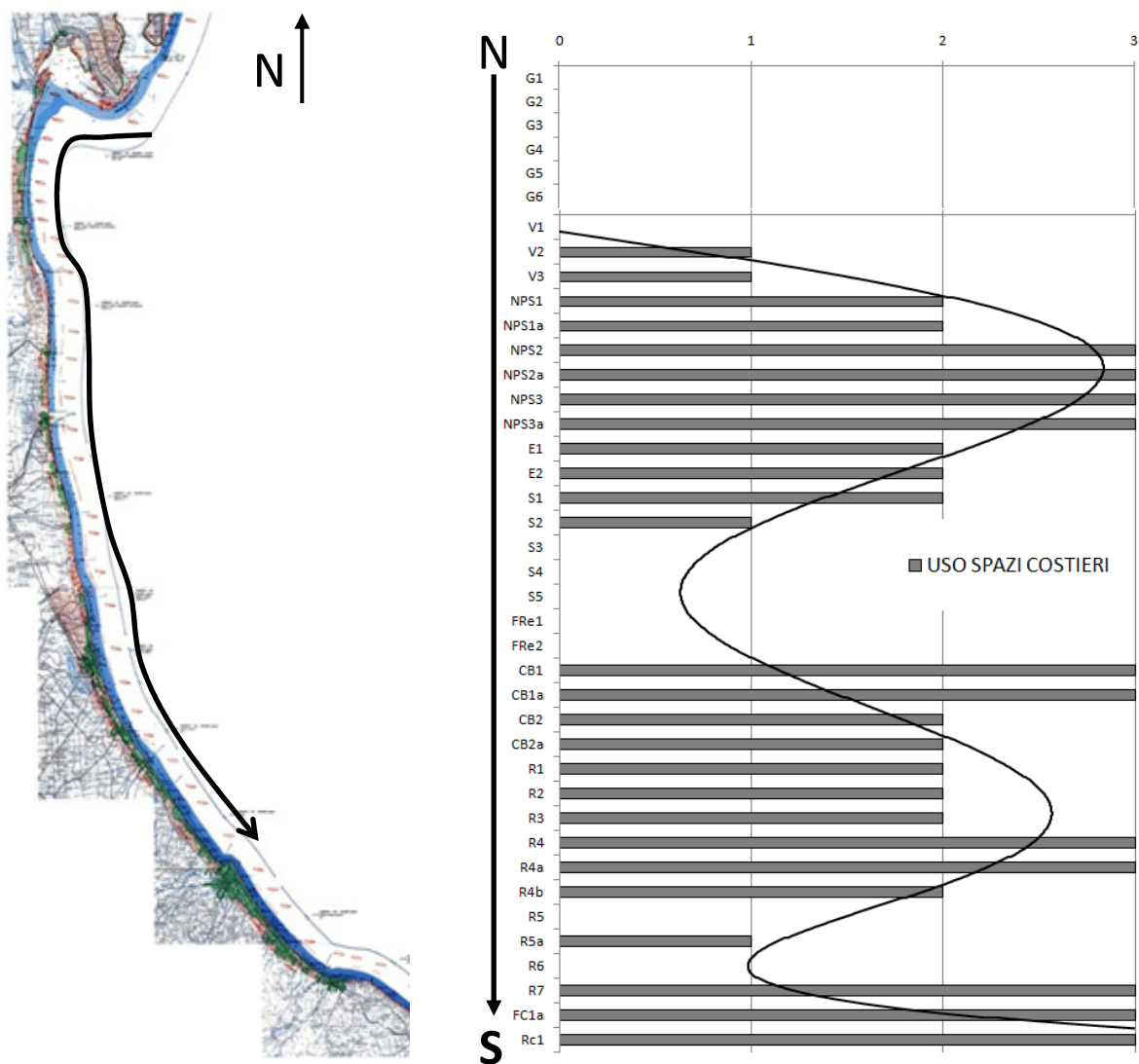


Figura 197 – Distribuzione lungo la costa regionale dei valori indicanti le diverse tipologie di utilizzo degli spazi costieri, ricavati in corrispondenza degli apparati dunari considerati;

Tutti i valori finora analizzati sono stati successivamente codificati, utilizzando intervalli e pesi attribuiti in funzione del significato del singolo parametro: l'obiettivo è quello di estrapolare un'indice d'instabilità (*IDI - Instability beach-Dune system Index*), per cui di volta in volta i pesi più elevati sono stati associati alle condizioni maggiormente instabili. Nella Tabella 12 sono riassunti tutti gli intervalli, i pesi associati e le codifiche applicate, divise per parametro analizzato: nel successivo paragrafo verrà descritta la procedura per codificare la matrice (una per ogni tratto considerato) e ottenere, da questa, l'indice di Instabilità IDI.

DENSITA' ANTROPICA (m <sup>2</sup> )	
Max Valore	3.00
min Valore	0.00
StdDev	1.24
Valore MEDIO	1

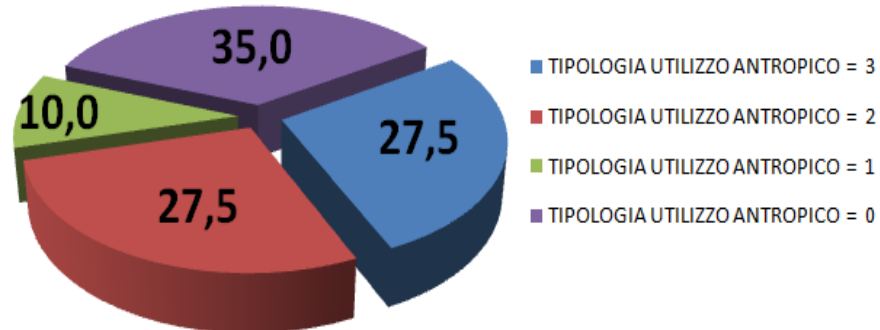


Figura 198 – (a) Distribuzione della tipologia di utilizzo degli spazi costieri, derivata per ciascuno dei tratti in esame; (b) Principali parametri statistici derivati e (c) tabella degli intervalli codificati.

Diam. medio della SPIAGGIA (I) phi	COD.
< 1.75	0.5
1.75   2.00	1
2.00   2.25	1.5
2.25   2.50	2
> 2.50	2.5

Diam. medio della DUNA (II) phi	COD.
< 1.75	0.5
1.75   2.00	1
2.00   2.25	1.5
2.25   2.50	2
> 2.50	2.5

DIREZIONE DOMINANTE COSTRUTTIVA (Δ°)	COD.
< 15	1.5
15   30	1
30   120	0,5
120   145	1
> 145	1.5

PSD (Probabilità di Superamento Duna) %	COD.
< 4	0.5
4   8	1
8   16	1.5
> 16	2

IE (Indice Eolico)	COD.
< 0.4	0.5
0.40   0.45	1
0.45   0.50	1.5
> 0.5	2

BILANCIO EVOLUTIVO [m <sup>2</sup> /m]	COD.
< 20	2
-20   0	1.5
0   20	1
> 20	0.5

PENDENZA spiaggia	COD.
< 2	0.5
2   3	1
3   5	1.5
> 5	2

AMPIEZZA DUNA ATTIVA (m)	COD.
< 15	2
15   30	1.5
30   45	1
> 45	0.5

ID_Coeff	COD.
< 0.1	0.5
0.10   0.20	1
0.20   0.40	1.5
0.4	2

PENDENZA duna fianco MARE (°)	COD.
< 5	0.5
5   10	1
10   20	1.5
20   30	2
> 30	2.5

QUOTA CRESTA DUNA (m)	COD.
< 2	2
2   3	1.5
3   4	1
> 4	0.5

Variazione Linea di Riva [m/a]	COD.
< -5	2.5
-5   -1	2
-1   1	1.5
1   5	1
> 5	0.5

AMPIEZZA SPIAGGIA (m)		COD.	ZINGG (1953) g/cmsec <sup>-1</sup>		COD.	USO SPAZI COSTIERI		COD.
< 15		2	< 0.07		0.5	3		2
15	30	1.5	0.07	0.09	1	2		1.5
30	50	1	0.09	0.12	1.5	1		1
> 50		0.5	> 0.12		2	0		0.5

DENSITA' VEGETAZIONE (%)		COD.	NDVI		COD.	DENSITA' ANTROPICA (%)		COD.
30		0.5	< 0.325		2.5	< 5		0.5
30	45	1	0.325	0.350	2	5	10	1
45	60	1.5	0.350	0.375	1.5	10	20	1.5
60	75	2	0.375	0.400	1	20	30	2
> 75		2.5	> 0.4		0.5	> 30		2.5

Tabella 12 – Schema riassuntivo delle codifiche di tutti i parametri della matrice d'interazione

### 8.3 \_CALCOLO DELL'INDICE DI INSTABILITÀ“IDI”

**KEY WORDS** (determinazione dell'indice di Instabilità IDI e identificazione delle aree più critiche)

Dopo aver codificato ciascun parametro della matrice, per ogni sistema sono stati ricavati i corrispondenti valori di Indici di Instabilità IDI parziali (riferiti cioè ad ogni singolo parametro). Nella Tabella 13 vengono riportati i valori di *interattività percentuale parziale* (PIP) validi per ciascun parametro di condizionamento.

L'individuazione dell'indice di instabilità globale IDI (*Instability beach-Dune system Index*) relativo ad ogni sito in esame si ottiene sommando i valori parziali ottenuti ai singoli parametri (Tabelle 14 s/b): in questo modo è possibile ricavare grafici rappresentativi (Figura 199) di linee di tendenza (regressione), circa la distribuzione dell'IDI lungo la costa regionale.

La Figura 199, mostra chiaramente una situazione generale rivolta verso l'instabilità (più o meno spinta) di quasi tutti i siti considerati. In particolare, immaginando una situazione di equilibrio avente indice pari a 110, è facile notare come solo 6 sistemi dunari su 40 (circa il 15%, Figura 200) mostrino una condizione prossima all'equilibrio (StdDev 6.65): G4, G5 e G6 hanno, rispettivamente, valori dell'indice pari a 105.06, 110.0 e 106.9, mentre i sistemi E1, E2 e S1 sono caratterizzati da valori di IDI pari a 102.62, 108.23 e 105.24.

INTERATTIVITA'	Percentuali Interattive parziali
<b>C+E</b>	
21	3.45
23	3.81
21	3.57
20	3.33
31	5.24
40	6.67
34	5.71
28	4.76
35	5.83
28	4.64
40	6.79
29	4.88
13	2.26
35	5.83
35	5.83
30	5.12
45	7.62
33	5.48

Tabella 13 – Calcolo delle percentuali interattive parziali (PIP) relative ad ogni singolo fattore.

Gli indici più elevati si registrano in corrispondenza dei sistemi spiaggia-duna identificati con i codici G1 (IDI=141.25), V2 (IDI=140.18), NPS1 (IDI=140.06), S2 (IDI=132.69), CB2 (IDI=140.35), R2 (IDI=144.56), R4b (IDI=136.80) R5a (IDI=146.90); ciò nonostante, come emerge dal diagramma di Figura 199, il 47,5% dei siti esaminati (19 su 40) mostra una media Instabilità ( $110 < \text{IDI} < 130.4$ ), mentre il 40% mostra evidenze di una forte instabilità (16 su 40).

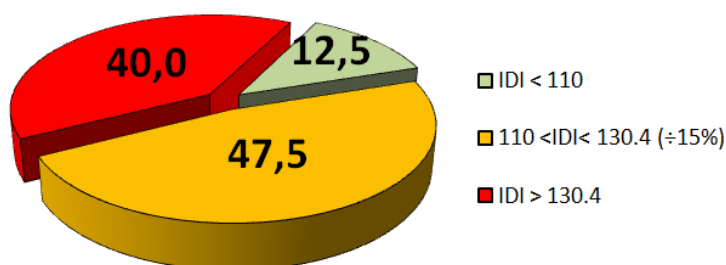


Figura 200 – In verde, la percentuale dei sistemi che mostrano una sostanziale stabilità (in verde, per  $\text{IDI} \approx 110$ ); in arancio, quelli che invece mostrano una media Instabilità (IDI fino al 65% dell'intervallo di variabilità,  $\approx 130,5$ ), mentre in rosso la percentuale dei sistemi esaminati che presentano un indice  $\text{IDI} >$  del 65%, il che si traduce in una forte Instabilità.

**Vedi pdf**  
**“A£ (pp293-296).pdf”**

**Vedi pdf**  
**“A£ (pp293-296).pdf”**



Scendendo del dettaglio dei sistemi che hanno mostrato i valori più elevati di IDI, si scopre che per quanto riguarda il sistema G1, è il parametro *bilancio evolutivo* (IDIp=13.571) a risultare il più incidente a prescindere dalla *direzione relativa del vento costruttivo* (IDIp=1.131); per il sistema V2, il fattore più influente risulta la *pendenza duna fianco mare* (IDIp=13.333), mentre sembra avere meno importanza, anche in questo caso, la direzione del vento dominante costruttivo (IDIp=1.131); stesso discorso vale per il sito NPS1 (IDI=1.131), per il quale sembra, ancora una volta avere maggiore influenza il fattore pendenza fianco mare della duna (IDIp=16.667). Il raccordo con la spiaggia è, anche per il sistema S2, l'elemento più incidente (IDIp=16.667), mentre quello meno importante diventa *l'indice di energia eolica* (IDIp=2.440). Il fattore pendenza fianco mare continua ad essere il più influente per i sito CB2 (IDIp=16.667), che registra, tra i meno condizionanti l'indice PSD (Probabilità Superamento Duna, IDIp=1.786, connesso al rapporto con l'energia del moto ondoso). Gli ultimi 2 sistemi maggiormente in crisi, l'R4b e l'R5a, mostrano, tra i fattori che hanno maggiore influenza in negativo, la *densità di vegetazione* (IDIp=14.583 per entrambi), mentre sembra avere minore importanza, rispettivamente, l'indice PSD (IDIp=1.786) e la direzione dominante vento costruttivo (IDIp=2.262). La completa e stretta dipendenza dell'indice IDI da tutto l'insieme dei parametri caratterizzanti il sistema, fornisce indicazioni molto più complete di una semplice analisi geomorfologica, in quanto, come in gran parte è emerso anche in questo lavoro, con l'analisi spaziale è possibile testare contemporaneamente solo un numero limitato di essi.

L'informazione che ne scaturisce è quindi di estrema importanza nella pianificazione di intervento, sia da un punto di vista riabilitativo che gestionale. E' ovvio che ogni strategia di gestione dei tratti costieri connessi a quelli esaminati, andrà approntata in maniera tale da favorire le situazioni di minore crisi, senza però produrre ulteriori squilibri nell'ambiente. D'altro canto, è necessario, laddove si decidesse di intervenire, che vi sia una pianificazione oculata, che tenga conto principalmente della situazione nel suo complesso per permettere un'adeguata intromissione antropica. Da ciò si ricava l'estrema indicatività posseduta, non dalla singola sezione e dal proprio indice di instabilità, ma dall'intervallo globale entro cui le sezioni, in un determinato sito geografico, sono comprese (intervalli grafici blu e rossi, Figura 199).

Come emerge chiaramente dal grafico di Figura 35, la maggior parte dei siti in esame sono in condizioni di instabilità: in particolare l'andamento della curva di regressione mette in evidenza la possibilità di separare 2 aree principali, corrispondenti al settore V1-NPS3a e Fre2-R6, grosso modo corrispondenti ai tratti di costa che vanno, rispettivamente, da Lido di Volano a Porto Garibaldi (FE) e dalla foce del fiume Reno alla foce del torrente Bevano (RA). Mentre nel primo caso l'instabilità delle dune sembra avere un trend piuttosto omogeneo, nel secondo, pur mantenendo valori elevati, la diversificazione tra i singoli sistemi coinvolti sembra apparire più evidente. Ciò probabilmente è dovuto alla diversa variabilità che si riscontra soprattutto in termini di assetto morfologico e antropizzazione; tra Lido di Volano e Porto Garibaldi, tranne per la porzione più a Nord (in corrispondenza della quale si risente più l'influenza morfodinamica associata alla prominenza meridionale del delta del Po), l'assetto generale è tutto sommato uniforme: le dune presentano una configurazione morfologica simile e anche le spiagge, se pur utilizzate in maniera intensa dal turismo, assumono caratteri geometrici simili.

Se si vanno ad analizzare nel dettaglio i valori di indice d'instabilità parziale (IDI<sub>p</sub>), si scopre che per 3 di essi (V1, V3 e NPS2) l'elemento più destabilizzante è rappresentato dalla vegetazione, per altri 3 (NPS1a, NPS2a, NPS3a), la densità di antropizzazione, mentre gli ultimi 3 (V2, NPS1 e NPS3) risentono maggiormente della pendenza fianco mare: questo dato è importante poiché, se lo si confronta con la distribuzione dei corrispondenti valori finali di IDI (Figura 199), dimostra che sostanzialmente i sistemi hanno risposto nel tempo ai diversi input esterni (naturali e non) in maniera diversificata per poi finire per assumere configurazioni globali simili (anche se elevati). Questo tipo di analisi, eseguita per la seconda area non produce gli stessi risultati: nel Ravennate infatti, la variabilità negli assetti e delle condizioni al contorno assume caratteri più diversificati; d'altronde va tenuto presente che la distanza lineare tra i due sistemi più esterni, e l'estensione media lineare dei singoli tratti, è molto diversa, per cui il risultato in qualche modo non sorprende. L'allineamento della linea di costa assume una configurazione tutto sommato costante (variabilità di circa 10°), infatti, per tutti i casi in esame, la direzione costruttiva del vento dominante appare tra i fattori meno influenti. Le pendenze del fianco lato mare delle dune (5 su 10), il grado di frammentazione delle stesse (3 su 10), e il grado di antropizzazione (2 su 10) giocano invece un ruolo molto diverso: tutto il tratto compreso tra il molo sud di Porto Corsini e Lido di Dante (RA) è tra le località della Romagna più sfruttate dal punto di vista turistico ed economico, per cui con il tempo l'intensità e la pressione antropica hanno intaccato pesantemente la morfologia delle

dune e modificato le dinamiche in atto. I tempi e l'intensità di tale processo però non è stato costante nello spazio, ecco perché l'andamento dei picchi d'indice non appare omogeneo nel diagramma. Picchi isolati di forte instabilità si rinvencono anche per i siti G1 e S2, il primo corrispondente al sistema spiaggia-duna in località Faro di Gorino (FE) e il secondo situato nella parte più a sud di Lido di Spina (FE). Per entrambi i casi si tratta di sistemi storicamente in crisi, per cui il dato non sorprende, ma se si vanno ad esaminare gli indici parziali (IDIp), gli elementi maggiormente destabilizzanti sono, rispettivamente, il bilancio evolutivo, e la pendenza del fianco lato mare. Tali risultati si rispecchiano perfettamente nell'assetto morfologico di entrambi i sistemi: per quanto riguarda il faro di gorino, nel 2001, per contrastare l'erosione della sponda destra in foce Po di Goro, si è provveduto alla costruzione di una duna artificiale, la quale nel tempo è riuscita a proteggere efficacemente quel piccolo spicchio di paraggio, ma oggi, a causa delle violente mareggiate verificatesi nell'ultimo anno (2008 e inizi del 2009) è quasi completamente smantellata (Figura 201 a/b).



*Figura 201 – prospettive della condizione morfologica nella quale si trova oggi la duna in corrispondenza del faro di Gorino (FE).*

Anche l'apparato dunare che si sviluppa in corrispondenza di Lido di Spina mostra chiari ed evidenti segni di forte destabilizzazione, in particolare una scarpata di erosione alta mediamente più di 1,5m che il mare ricostituisce ogni volta che si cerca di contrastare l'erosione attraverso ripascimenti artificiali (Figura 202).

Per quanto detto, appare chiaro che la matrice fornisce importantissime informazioni circa l'assetto globale di un sistema spiaggia-duna, se pur in termini negativi (ma questo dipende dalla scelta metodologica) iniziale. Tutte le considerazioni fatte servono, come ci si era prefissato all'inizio di questo lavoro, per riuscire a fornire indicazioni utili, in modo da

programmare bene gli interventi di ripristino e di difesa, in quanto si presuppone che gli elementi che sono emersi dall'analisi statistica, siano, per definizione, quelli maggiormente interattivi e quindi quelli che meglio riuscirebbero a coinvolgere gli altri nel processo di naturale riequilibrio.



*Figura 202 – Particolare del raccordo fianco mare della duna in località Lido di Spina (FE).*

## 9 CONCLUSIONI

**KEY WORDS** (Stato attuale, Classificazione, Teoria dei sistemi, Carta del trasporto eolico, Carta Geomorfologica di sintesi; Indicazioni di programmazione e priorità d'intervento)

---

Come più volte sottolineato nei primi capitoli di questo lavoro, le dune oggi rappresentano un patrimonio assolutamente da difendere e salvaguardare, non solo per il proprio valore ambientale ed economico (Arsen and Wiersma, 1994), ma anche e soprattutto per la sua funzione di difesa dei territori retrostanti dall'azione erosiva da parte del mare (Psuty, 1989).

In Emilia Romagna, le dune oggi continuano a vivere la pesante crisi erosiva iniziata circa 60 anni fa, con realtà locali che però hanno visto peggiorare notevolmente la loro condizione d'instabilità a tal punto da perdere gran parte della propria identità morfologica. Tale situazione in realtà è nota da tempo a chi le dune costiere regionali le ha studiate (Borghi e Cencini, 1980; Bondesan, 1995; Simeoni et alii, 2000; 2004; 2005), ma forse non lo è a chi le dune le ha gestisce, tant'è che sul territorio costiero regionale si è intervenuti tanto, cercando di mitigare l'azione erosiva del mare, praticamente in qualunque modo, senza però produrre risultati efficienti nel tempo sul piano della sopravvivenza degli apparati dunari e del tratto di spiaggia antistante. Si interviene, ma spesso in maniera non corretta, pensando che la duna e la spiaggia siano due elementi distinti. In tal senso è nato l'obiettivo di questa ricerca: si è partiti dalla consapevolezza che non si conoscono a fondo i meccanismi di evoluzione o, anche laddove si intervenga con criterio, si crede che possano valere ancora gli schemi descritti nella letteratura scientifica, dove l'evoluzione degli apparati dunari è in molti casi esclusivo di sistemi costieri totalmente naturali. Oggi, per la regione Emilia-Romagna, questo rappresenta un approccio non corretto, in quanto, più volte lo si è sottolineato, il litorale è fortemente condizionato dall'economia del turismo, per cui l'uomo rappresenta a tutti gli effetti un agente morfogenetico.

La metodologia e' stata quella di percorrere più strade parallele: da un lato quella della rivisitazione delle CHIAVI DI LETTURA evolutive, in modo da riuscire, attraverso una CLASSIFICAZIONE ad hoc, ad aggiornare lo stato attuale delle dune regionali; dall'altro, la creazione e la messa a punto di uno strumento di comprensione analitica dei meccanismi con cui i sistemi spiaggia-duna evolvono (MATRICE D'INTERAZIONE), per riuscire ad individuare, nell'ambito dei singoli stati di criticità, quali sono gli aspetti maggiormente destabilizzanti (INDICI DI INSTABILITA' PARZIALE - IDIp), sui quali evidentemente conviene intervenire per avere i risultati migliori.

L'analisi geomorfologica ha permesso di esaminare e circoscrivere l'entità delle varie configurazioni di spiaggia e di duna entro le singole circoscrizioni provinciali. Dal grafico di Figura 203 emerge infatti che, escludendo dal dato statistico gli apparati che si sviluppano nella porzione più meridionale della costa regionale (in quanto non sufficientemente rappresentativi a scala regionale per numero e stato di rimaneggiamento dell'assetto morfologico), gran parte degli apparati dunari in crisi sono localizzati all'interno della provincia di Ferrara: il 40% dei casi che fanno registrare valori negativi del bilancio di duna (I e IV Quadrante, rappresentati dai diagrammi a torta evidenziati in nero) si sviluppano tra la foce del Po di Goro e quella del fiume Reno, mentre a registrare un bilancio positivo del sistema, anche se non proprio in maniera netta, è il 25% dei casi (10 apparati, 5 della Provincia di FE e 5 di quella di Ravenna).

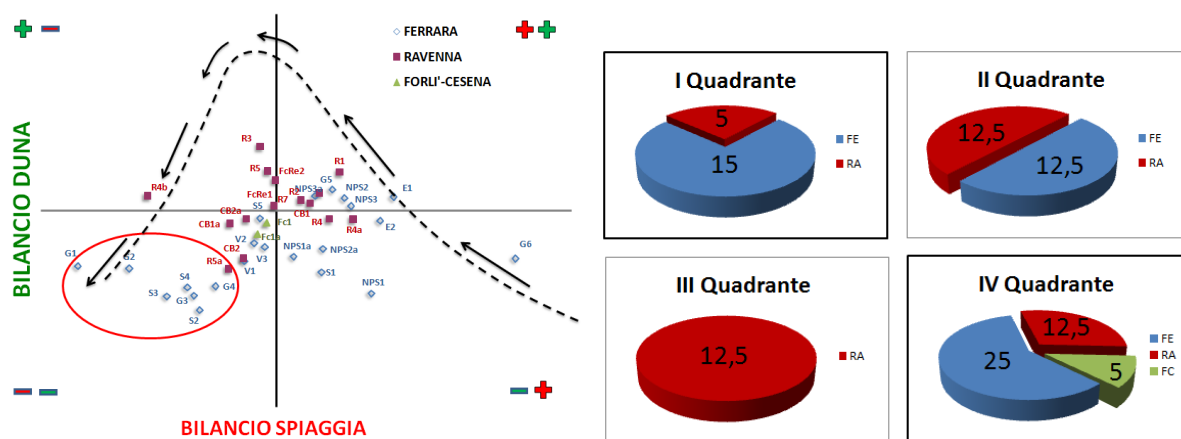


Figura 203 – a sx la distribuzione dei sistemi spiaggia duna indagati nel Modello evolutivo di Psuty (1968) – in rosso sono cerchiati i casi più critici; a dx i diagrammi a torta mostrano la distribuzione delle frequenze dei sistemi spiaggia-duna indagati (divisi per provincia di appartenenza) in relazione ai vari quadranti – in nero sono evidenziati i quadranti corrispondenti al bilancio negativo della duna.

Le indagini dirette, i dati raccolti e le complesse analisi spaziali eseguite nell'ambito della banca dati associata ha permesso di estrapolare aspetti e configurazioni comuni (se pur rappresentativi e di conseguenza semplificati nella determinazione dei passaggi tra una classe e l'altra), per cui tutti i sistemi regionali possono essere raggruppati entro 4 classi predefinite: a. Sistemi con tendenza a crescita naturale; b. Sistemi con tendenza ad erosione; c. Sistemi a sviluppo controllato; d. Sistemi a sviluppo misto. Da tale classificazione emerge che gran parte dei sistemi esaminati si trova in una condizione di crisi erosiva o di forte

condizionamento da parte dell'uomo, il quale ovviamente ostacola qualsiasi processo di crescita o sviluppo naturale. Il diagramma a torta rappresentato in Figura 204 evidenzia le percentuali relative di ciascuna categoria: solo il 10% (4 su 40) mostra configurazioni stabili/crescita, il 30% (12 su 40) è condizionato dalla presenza di strutture antropiche e attività turistiche che ne limitano la crescita naturale, mentre il 32,5% (11 su 40) presenta configurazione fortemente instabili, con spiagge quasi assenti ed evidenti forme erosive (scarpate e crolli dell'apparato dunare) prodotte dall'azione diretta da parte del mare.

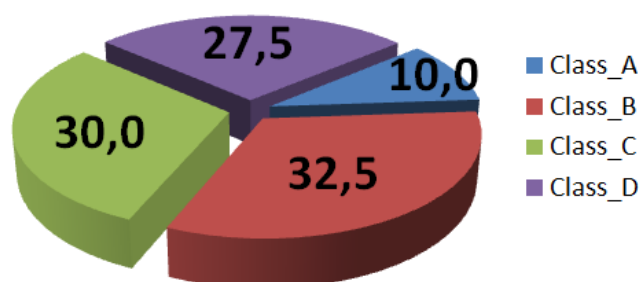


Figura 204 – Diagramma a torta della distribuzione percentuale ricavata dall'applicazione della classificazione proposta ai 40 sistemi spiaggia-duna esaminati;

Il restante 27,5% desta comune preoccupazione, in quanto caratterizzato da forme e configurazioni non inquadrabili nettamente in nessuna delle categorie precedenti: i processi agiscono in maniera diversa, lungo tratti contigui dello stesso sistema, per cui è possibile ritrovare forme erosive (Es. scarpate e crolli) associate a tratti in equilibrio. La distribuzione lungo il territorio regionale è vario: come si vede in Figura 205, è difficile estrapolare, tranne per alcuni di essi (in nero), un'andamento generale o associazioni tra le classi di appartenenza di sistemi contigui. È evidente che i processi alla base dell'evoluzione sono molto complessi, il territorio è fortemente antropizzato, e questo complica l'analisi e la valutazione della configurazione generale. Se è possibile ritrovare sistemi a sviluppo misto affianco a sistemi stabili, a loro volta affianco a sistemi in erosione, è chiaro che non sono solo gli agenti morfodinamici naturali ad incidere: anzi, dal diagramma di Figura 205 (in nero) si potrebbe dedurre che è proprio l'uomo ad esserne il principale responsabile, in quanto le uniche uniformità nella configurazione di sistemi limitrofi (se pur erosivi) si ritrovano laddove l'uomo è praticamente assente (Scanno di Goro e Vene di Bellocchio).

In tale visione l'azione da parte degli agenti naturali resta comunque importante e preponderante: le valutazioni ricavate sinora non possono prescindere dalla conoscenza di



come essi agiscono, in particolare di come il vento riesca a contribuire nei meccanismi di costruzione della duna e quindi a contrastare il processo di smantellamento. A tal fine per ciascun apparato dunare individuato, sono stati calcolati i tassi di trasporto eolico potenziale.

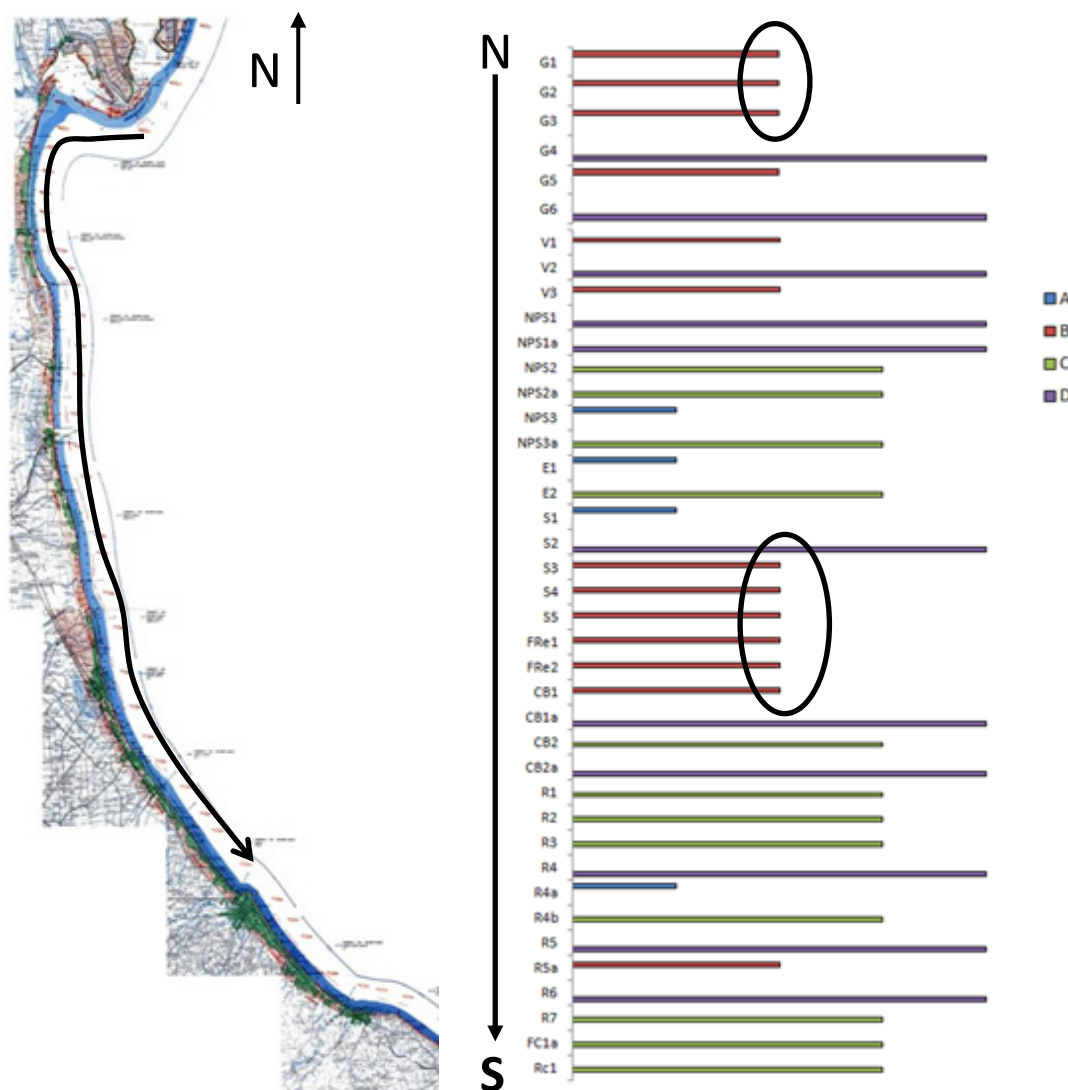


Figura 205 – Distribuzione lungo la costa emiliano-romagnola dei sistemi spiaggia-duna analizzati, suddivisi per classe di appartenenza;

Dallo studio è emerso che lungo il litorale regionale i tassi d'accrescimento assumono valori compresi tra 0,04 e 0,15 g/cmsec-1. I valori più bassi sono stati riscontrati in corrispondenza dello Scanno di Goro, probabilmente a causa del diverso orientamento della costa (E-W) rispetto alle principali direzioni dei venti costruttivi, ed i più alti a ridosso del molo meridionale di Porto Garibaldi. Per verificare l'attendibilità dei dati sono state effettuate delle catture, e derivati coefficienti di correzione in modo da rendere più attendibili i risultati del

calcolo teorico. Anche le informazioni che emergono dall'applicazione della matrice d'interazione (Figura 206 e 207) descrivono un quadro estremamente preoccupante: gran parte dei sistemi spiaggia duna (34 su 40), mostrano un grado di instabilità medio alto.

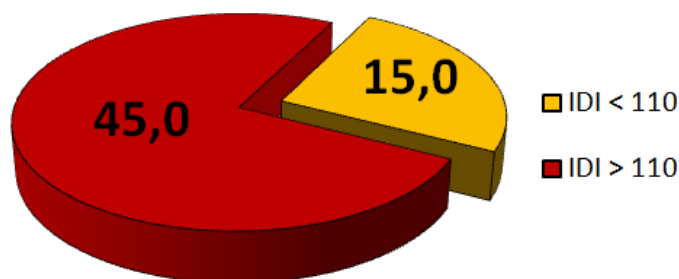


Figura 206 – In arancio, quelli che invece mostrano una media Instabilità (IDI fino al 65% dell'intervallo di variabilità,  $\approx 110$ ), mentre in rosso la percentuale dei sistemi esaminati che presentano un indice IDI > del 65%, la quale si traduce in una forte Instabilità.

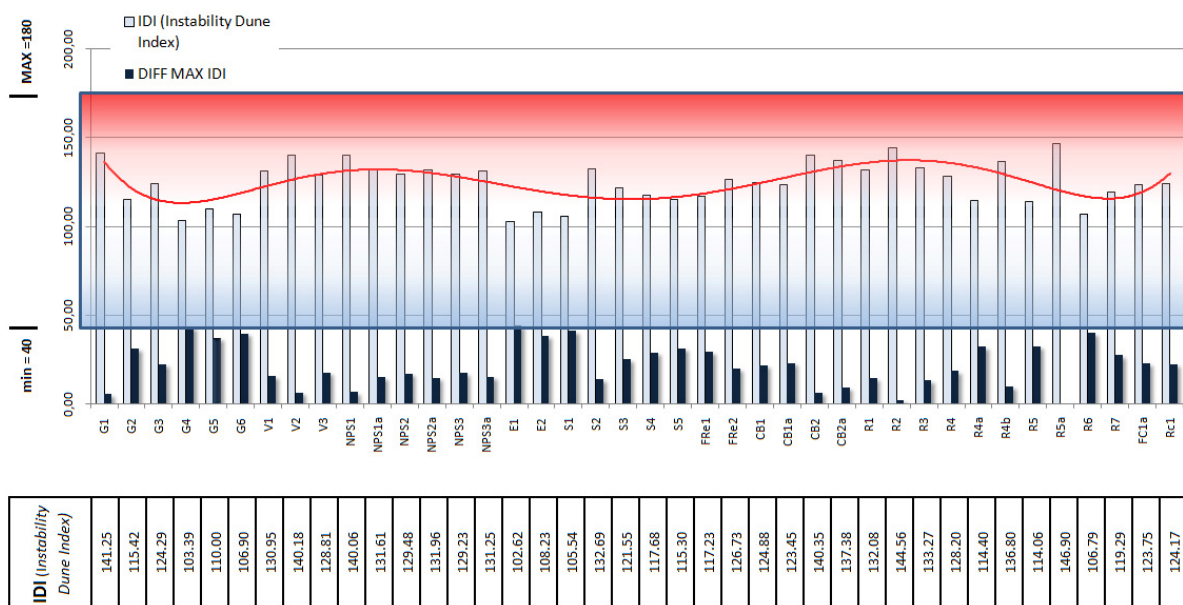


Figura 207 – Valori di IDI (Instability beach-Dune system Index) ricavati per ciascun sito in esame; In celeste sono diagrammati i valori assoluti dell'indice, mentre in blu le differenze rispetto al valore massimo ricavato; il riquadro definisce l'intervallo di variabilità dell'indice: l'area in celeste raggruppa i valori al di sotto della soglia media di instabilità, mentre l'area rossa indica un'instabilità critica (verso la distruzione);

Emerge che è possibile separare due grossi settori di Instabilità, il primo corrispondente al tratto di litorale che si sviluppa da Lido di Volano (Fe) e Porto Garibaldi: in questo settore di costa i sistemi mostrano un'indice di Instabilità IDI elevato ( $IDI \approx 130$ , StdDev 4.39) e sostanzialmente costante. Il dato è probabilmente da correlare con la sostanziale uniformità dell'assetto morfodinamico che caratterizza il paraggio. Anche l'impatto antropico e le attività turistico-economiche che si sviluppano lungo questo territorio mostrano caratteri molto simili, per cui anche l'uomo agisce in maniera omogenea.

Se si va ad approfondire il discorso, si scopre che *l'incidenza antropica*, la *vegetazione* e la *pendenza del raccordo fianco mare* sono tra gli elementi più destabilizzanti. Tra questi, considerato che la densità antropica è difficilmente modificabile per ragioni meramente economiche, i fattori più interattivi rimangono (in ordine) la vegetazione e la pendenza fianco mare, per cui ipotizzando interventi di messa in sicurezza o di stabilizzazione della duna, in base alle indicazioni che si possono trarre da questa considerazione, si dovrebbe intervenire proprio su questi due parametri. Una soluzione potrebbe essere quella di associare al ripascimento della spiaggia la rimodellazione del fianco mare della duna, in modo da favorire le condizioni morfologiche per cui, successivamente, il vento possa contribuire alla costruzione dell'apparato dunare. Identificare le fitocenosi adatte e considerare la possibilità di una ripiantumazione mirata con specie vegetali pioniere (specie ammophila), in grado di fissare in breve tempo la sabbia movimentata, contribuirebbe ulteriormente alla stabilizzazione del sistema.

Un secondo settore che può essere identificato in funzione della distribuzione dell'indice di instabilità è quello compreso tra il molo sud di Porto Corsini e Lido di Dante: in questo caso la variabilità dei valori risulta sostanzialmente maggiore ( $IDI \approx 130$ , StdDev 7.58). La *pendenza del fianco lato mare* della duna, il *grado di frammentazione* della stessa, e il *grado di antropizzazione*, sono tra i fattori che destabilizzano maggiormente. Tutto questo tratto di litorale è tra le località della Romagna più sfruttate dal punto di vista turistico ed economico, per cui, con il tempo, l'intensità e la pressione antropica hanno intaccato pesantemente la morfologia delle dune e modificato le dinamiche in atto. I tempi e l'intensità di tale processo però non sono stati costanti nello spazio, ecco perché le configurazioni delle dune e delle spiagge antistanti sono diverse anche per tratti apparentemente contigui e i valori di IDI non appaiono omogeneo.

Ancora una volta, visto che l'antropizzazione non si riesce ad eliminare, e non è possibile recuperare gli spazi persi con lo sviluppo dei varchi e degli accessi (che condizionano il

parametro integrità dell'asse dunare), immaginando interventi di stabilizzazione, si dovrebbe ragionare o sulla pendenza del raccordo fianco mare, o sulla *pendenza della spiaggia* (fattore, dopo quelli appena indicati, ad essere mediamente il più interattivo e condizionante per questo gruppo di sistemi spiaggia-duna). In questo caso, abbinare la rimodellazione della sabbia utile al ripascimento della spiaggia per ricostituire anche le pendenze della duna, vorrebbe probabilmente dire rinunciare ad una quantità sostanziale di spiaggia "utile" per il turismo, in quanto la maggior parte degli apparati in questo settore raggiunge quote discrete (in media 3.9 m slm) e di conseguenza avrebbero bisogno di maggiori spazi. Considerato che quelli fronte mare sono comunque limitati (gran parte di questo tratto di litorale è protetto da scogliere e gruppi di scogliere), si potrebbe pensare di intervenire non per favorire lo sviluppo della duna, ma per cercare di salvaguardare almeno quello che rimane di essa; le diverse soluzioni proposte dall'ingegneria naturalistica, che prevedono la limitazione d'interferenza con le attività antropiche, potrebbero essere utili per rallentare il processo di degrado e aumentare di conseguenza il valore ecologico, naturalistico e anche economico del tratto in esame.

Dal confronto tra la classificazione e la matrice d'interazione emerge che i sistemi più instabili (IDI>130), non sono necessariamente classificati come Class\_B (*Sistemi con Tendenza Erosiva*): dei 15 casi che ricadono in questo intervallo, solo 3 mostrano delle evidenze chiaramente erosive. Si tratta del tratto in corrispondenza della faro di Gorino (Ferrara, cod.G1), di Lido di Volano (Ferrara, cod.V1) e alla foce del Lamone (Ferrara, cod.R5a); il resto è classificato come sistema a sviluppo misto (5) o controllato (7). I sistemi a *sviluppo controllato* (Class\_C), che mostrano un'elevato valore di IDI (>130) sono localizzati prevalentemente nella provincia di Ravenna e coincidono con i lembi più residuali che si ritrovano lungo il litorale tra Punta Marina e Lido di Dante.

C'è corrispondenza tra i sistemi classificati come *tendenti alla crescita naturale* (4) con quelli con più basso valore di IDI. Quelli che mostrano maggiore variabilità sono chiaramente quelli con sviluppo misto: 4 dei restanti 6 (su 11) mostrano i valori più bassi (<110): la causa è da ricercarsi soprattutto nella variabilità morfologica dei tratti in erorione e dei tratti stabili di ciascuno di essi. 2 di questi (cod.R5 e cod R6) sono rappresentati dalle dune e dalle spiagge in corrispondenza della foce del torrente Bevano, dove la naturalità dell'area, l'evoluzione morfodinamica della foce e l'estensione longitudinale della duna (oltre 1,5 km), fanno sì che nell'ambito dello stesso sistema, si alternino tratti stabili, in avanzamento, e in arretramento (Figura 208 a/b).



(a)



(b)

*Figura 208 – Esempio di come un sistema classificato come a sviluppo misto (Class\_B), possa presentare lungo la propria estensione lineare (quando particolarmente elevata) tratti stabil/ in avanzamento (a) e tratti dove invece sono evidenti forme erosive (b) (foce torrente Bevano, Ravenna);*

Il prodotto finale fornito da questo lavoro è una visione complessa, interattiva e organica dei maggiori squilibri ambientali che caratterizzano i sistemi spiaggia-duna dell'Emilia-Romagna: la CARTA GEOMORFOLOGICA basata sulla classificazione ad hoc aiuta ad identificare e caratterizzare, dal punto di vista morfologico e morfodinamico, i tratti ancora esistenti; la TEORIA dei SISTEMI, con la MATRICE D'INTERAZIONE, fornisce lo strumento per riuscire ad individuare, nell'ambito dei tratti maggiormente in crisi, quali sono

gli elementi da considerare per eventuali piani d'intervento e il tipo d'intervento stesso; il TASSO DI TRASPORTO EOLICO infine aiuta a capire se esiste la possibilità, una volta completate le azioni di ripristino, di sfruttare il volano dell'azione naturale delle potenzialità costruttive del vento nei meccanismi di sviluppo dell'apparato dunare. Le Figure 209, 210, 211, e 212 rappresentano esempi (da N verso S) della mappa di sintesi estrapolata da tutte le informazioni e dati acquisiti estrapolati, ricavati elaborati e/o dedotti.

Dalle Carte Geomorfologiche di sintesi è stato possibile estrapolare le caratteristiche rappresentative di quello che tra tutti rappresenta il sito con l'instabilità minore (min IDI), le quali, assieme alle considerazioni fatte in precedenza sui parametri più influenti della matrice potrebbero essere di importante riferimento per capire cosa fare e come fare per intervenire sugli altri sistemi.

In un contesto economico come quello attuale, dove di fatto si fa fatica a reperire fondi per interventi di salvaguardia del territorio costiero, se non in casi di estrema emergenza, il lavoro si propone come strumento di supporto alle decisioni da prendere per stabilire le priorità d'intervento: ogni decisione, se pur vincolata dalle risorse a disposizione, in tal modo risulterebbe guidata da indicazioni precise che vanno ben oltre l'analisi delle dinamiche sul singolo sito in emergenza, e che potrebbero risultare utili per valutare correttamente il rapporto costo-benefici di ogni azione.

In tale direzione, una possibile prospettiva di sviluppo e applicazione della ricerca potrebbe essere quella di continuare questo percorso di conoscenza cercando di validare l'approccio, magari con dati provenienti da altre regioni, in modo da provare a rendere più snella la matrice e arrivare a creare uno strumento più semplice (ma testato ad una scala più ampia) da fornire direttamente alla pubblica amministrazione.

**Vedi pdf  
“A£ (pp293-296).pdf”**



**Vedi pdf**  
**“A£ (pp293-296).pdf”**

**Vedi pdf  
“A£ (pp293-296).pdf”**

**Vedi pdf**  
**“A£ (pp293-296).pdf”**

## BIBLIOGRAFIA

---

- ACOSTA A., BLASI C., STANISCI A. (2000) - *Spatial connectivity and boundary patterns in coastal dune vegetation in the Circeo National Park, Central Italy*. Journal of Vegetation Science, V.11, pp. 149-154.
- ACOSTA A., ERCOLE S., SVANISCI A., BLASI C. (2004) - *Sandy coastal ecosystem and effects of disturbance in Central Italy*. Journal of Coastal Research. Proceedings of the 8th International Coastal Symposium, Brazil.
- AHLBRANDT I.S., 1979. *Textural parameters of aeolian deposits*, in (a cura di) McKEE E.D., A study of Global Sand Seas. United States Government Printing Office, Washington, p. 25-52.
- ALLEN J.R.L. (1985) - *Principles of physical sedimentology*. George Allen & Unwin, London, 272 pp.
- ANDERSON JR J.D. (1991) - *Fundamentals of aerodynamics*. Second Edition. McGraw-Hill International Editions, 772 pp.
- AMOS C. (1995) - *Cohesive Sediment Transport*. Dispense da "Corso Breve: Meccanica della Sedimentazione e Dinamica Costiera" - Parma, 1995.
- ANDERSON R.S. (1989) - *Saltation of sand: a qualitative review with biological analogy*. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, n. 96B, p. 149-165.
- ANGUS S., ELLIOTT M.M. (1992) - *Erosion in Scottish machair with particular reference to the Outer Hwbridges*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS T.G.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, AA Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 93109.
- ARENS S.M., VAN KAAM-PETERS H.M.E., VAN BOXEL J.H. (1995) - *Airflow over foredunes and implications for sand*. Earth Surface processes and landforms, V.20, pp.315-332.
- ARENS S.M., WIERSMA J., (1994). *The dunes of foredunes: Inventory and Classification*. Journal of Coastal Research, V.10(1), pp. 189-202.
- ARPA (2007) – *Stato del Litorale Emiliano-Romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione*. Agenzia Regionale Per la Protezione Ambientale, Emilia-Romagna – RAPPORTO TECNICO, p.174.
- ATKINSON O., HUSTON J.A. (1992) - *Toward a research strategy for the Sefton coast in north-west England*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS T.G.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 455-464.
- AA.VV. (1958) - La flora. Touring Club Italiano. Conosci l'Italia, volume II. 272 pp.
- AA.VV. (2004) - *Fabbisogni di sabbia per la ricostruzione e la manutenzione dei litorali*. Il progetto BEACHMED-e: Recupero ambientale e mantenimento dei litorali in erosione con l'utilizzo di depositi sabbiosi marini. 3° Quadernotecnico, Fase "C", pp 15-82.
- AA.VV. (2006) - *Studi costieri. Lo stato dei litorali italiani*. Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero .V.10, 174 pp.
- BAGNOLD R.A. (1954) - *The physics of blown sand and desert dunes*, Chapman & Hall, London, pp. 265.
- BAGNOLD R.A. (1973) - *The nature of saltation and "bed-load" transport in water*. Proceedings of the Royal Geographic Society of London, Series A V.332, pp.473-504.
- BARBERI F., BUONASORTE G., CIONI R., FIORELLI A., FORESI L., LACCARINI S., LAURENZI M.A., SBRANA A., VERNIA L., VILLA I.M. (1994) - *Plio-Pleistocene geologia'*

- evolution of the geothermal area of Tuscany and Latium*. Memoria Descrittiva della Carta Geologica d'Italia, V.49, pp.77-134.
- BARDONOFF-NIELSEN O.E. (1989) - *Sorting, texture and structure*. Proceedings of the Royal Society of Edinburg, V.968, pp. 167-179.
- BAUER B.O., DAVIDSON-ARNOTT R.G.D. (2002) - *A general framework for modelling sediment supply to coastal dunes including wind angle, beach geometry and fetch effects*. Geomorphology V.49, pp.89-108.
- BARRERE P. (1992) - *Dynamics and management of the coastal dunes of the Lands, Gascony, France*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS T.G.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, AA Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 25-32.
- BATTJES J.A (1975) - *Surf Similarity*. Proceedings of Coastal Engineering Conference, 14th, Copenhagen, pp. 466-479.
- BELLOTTI P., BIAGI P. F., TORTORA P., VALERI P. (1987) - *Il delta del Tevere: caratteri morfologici e sedimentologici della piana deltizia*. Giornale di Geologia, V.49, pp. 89-99.
- BELLOTTI P., DI FILIPPO M., EVANGELISTA S., LA MONICA G.B., MINORENTI V. (2006) - *Apporto Sedimentario dalla Spiaggia alla Duna nella Tenuta Presidenziale di Castelporziano e ai Cancelli* (Lazio centro-meridionale). Studi Costieri , N° 11, pp 43-60.
- BELLY P.Y. (1964) - *Sand movement by wind*. Technical Memorandum 1, Addendum III. US Army Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center, Washington, DC, 24 pp.
- BERRIOLO G., SIRITO G. (1972) - *Spiagge e porti turistici*. Hoepli, Milano, pp. 21-23.
- BEZZE G. (1982) - *Sedimentologia, dinamica e ipotesi di interventi nei litorali marchigiani fra Ancona e la foce dell'Aso*. Tesi di laurea inedita, p. 26-34.
- BIGARELLA J.J. (1975) - *Lagoon dune fields, Santa Catherina, a model of aeolian and pluvial activity*. Bulletin Para. Geosciences, V.33, pp. 133-167.
- BIGARELLA BECKER R.N., DUARTE G.M. (1969) - *Coastal dune structures from Marana (Bail)*. Marine Geology, V.7, pp. 5-55.
- BIGI G., COSENTINO D., PAROTTO M., SARTORI R., SCANDONE P. (1992) - *Structural Model of Italy and gravity map*. Sheets 1-9, 1:500.000. CNR Quaderni della Ricerca Scientifica, 114, P.F. Geodinamica Monografie finali, 3.
- BIRD E.C.F. (1972) - *Coast: An introduction to systematic geomorphology*. Australian National University Press. Vol. 4, 139 pp.
- BIRD E.C.F., JONES D.J.B. (1988) - *Beach ridges and Foredune on the coast of Victoria, Australia*. Journal of Coastal Research, Special Issue 3, Dune/Beach Interaction, edited by Psuty N.P., pp.11-13.
- BIRD E.C.F., JONES E.J.B. (1988) - *Transverse dune trailing ridges and vegetation succession*. Journal of Coastal Research, V.4 (2), pp. 181-192.
- BITELLI G. TINI M.A., VITTUARI L. (2003) - *Low height aerial photogrammetry for archaeological orthoimaging production*. ISPRS Archives, Vol.IV, Part 5/W12, pp.55-59.
- BUCKLER W.R. (2001) - *Dune Type Inventory and Barrier Dune Classification Study of Michigan's Lake, Michigan shore*. REPORT OF INVESTIGATION 23 - Michigan Department of Environmental Quality (DEQ) and Geological Survey Division (GSD), 25p.
- BULLARD J.E., NASH J.D. (2000) - *Valley-marginal sand dunes in the south-west Kalahari: their nature, classification and possible origins*. Journal of Arid Environments, V.45, N.4, pp. 369-383 (15).
- BULLARD J.E., THOMAS D.S.G., LIVINGSTONE I., WIGGS G.F.S. (1995) - *Analysis of linear sand dune morphological variability, southwestern Kalahari Desert*. Geomorphology, V.11, N.3, pp.189-203 (15).

- CAPUTO C., LA MONICA G.B., LUPIA PALMIERI E., PUGLIESE F. (1986) - *Physiographic characteristics and dynamics of the shore of Rome (Italy)*. International Geomorphology 1986 Part I, Edited by V. Gardiner, 1987, John Wiley & Sons Ltd.
- CARTER R.W.G. (1976) - *Formation, maintenance and geomorphological significance of an aeolian shell pavement*. Journal of Sedimentological Petrology, V.46, pp. 418-429.
- CARTER R.W.G. (1988) - *Coastal environments. An introduction to the physical, ecological and cultural system of coastlines*. Environmental Science, University of Ulster, Northern Ireland, 511 pp.
- CARTER R.W.G., WILSON P. (1988) - *Geomorphological, Sedimentological and Pedological influences on coastal dune development in Ireland*. Journal of Coastal Research, Special Issue 3, Dune/Beach Interaction, edited by Psuty N.P., 27-31.
- CARTER, R.W.G. (1990) - *The geomorphology of coastal dunes in Ireland. Dunes of the European coasts*. Edited by Bakker, Th.W. & P.D. Jungerius, J.A. Klijn, pp 31-40.
- CARTER R.W.G., NORDSTROM K.F., PSUTY N.P. (1990) - *The study of coastal dunes. Coastal Dunes: Form and Process*. Edited by Nordstrom K.F , e Psuty N.P., pp. 392.
- CARTER R.W.G., CURTIS T.F.G., SHEEHY-SKEFFINTON M. (1992) - *Coastal dunes: geomorphology, ecology, and management for conservation*. Balkema, Rotterdam.
- CARTER R.W., WILSON P., (1993) - *Aeolian processes and deposits in Northwest Ireland*. in (a cura di) PYE K. The dynamics and Environmental Context of Aeolian Sedimentary System, Geological Society Special Publication, V.72, pp. 173-190.
- CASTIGLIONI G.B. (1989) - *Geomorfologia*, II edizione, UTET, Torino, pp. 436.
- CAVINATO G.P., COSENTINO D., De Rita D., Funiciello R., Parotto M. (1994) - *Tectonic-sedimentag evolution of intrapenninic basin and correlation with the volcano-tectonic activity in Central Italy*. Memoria Descrittiva della Carta Geologica d'Italia, V.49, pp. 63-76.
- CENCINI, C. and VARANI, L., (1989) - *Degradation of coastal dune systems through anthropogenic action*. In Coastlines of Italy. Ed. Paolo Fabri. American Society of Civil Engineers, New York, pp.55-69.
- CERC, (1977-1984). *Shore Protection manual*.
- CHAPPEL J. (1967) - *Recognizing fossil strand lines from grain size analysis*. Journal of Sedimentary Petrology, V.37, pp. 157-165.
- CHEPIL W.S. (1956) - *Influence of moisture on erodibility of soil. by wind*. Proceeding of Soil Science of the Society of American Journal, V.20, pp.292-340.
- CHORELY R.J. (1962) - U.S. *Geological Survey Professional Paper*, n. 500B/1, pp.45-57.
- CLERICI A, CUCCURU G., TRAMBAGLIO L., LINA F., (1993) – *La realizzazione di una carta della stabilità dei versanti mediante l'uso di un sistema di informazione geografica*. Geologia Tecnica ed ambientale, n. 4/93, pp. 25-40.
- COOPER W.S. (1958) - *Coastal Sand Dunes of Oregon and Washington*. Geological Society of American Memory. V.72. 169 pp.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (CEC), (1999) – *Towards a European Integrated Coastal Zone Management (ICZM) Strategy - General Principles and Policy Options*, CEC, Luxembourg.
- CORNELIS W.M., Gabriels D. (2003) - *The effects of moisture on the entrainment of dune sand by wind: an evaluation of selected models*. Sedimentology, 50, 771-790.
- CORTEMIGLIA G. (1979) - *Caratteristiche morfometriche delle ondulazioni da vento (Ripples marks) del Sahara algerino, nigerino e tunisino*. Affi dell'Accademia Ligure di Scienze e Lettere di - Genova, V.36, pp. 3-29.

- CUCLLAINE A.M. KING (1972) – *Beach and Coasts*, II Edition. E. Arnold, London, pp.180-186.
- DAL CIN R., SIMEONI U. (1987) - *Processi erosivi e trasporto dei sedimenti nelle spiagge pugliesi fra S. M. di Leuca e Taranto. Possibili strategie di intervento*. Bolleffino della Società Geologica Italiana, V.106, pp. 767-783.
- DALRYMPLE R.A., THOMPSON W.W. (1977) - *Study of equilibrium beach profiles*. Procedure of 15<sup>th</sup> International Conference of Coastal Engineering, Honolulu, Hawaii, pp. 1277-1296.
- DAVIES J.L. (1957) - *The importance of cut and fill development of sand beach ridges*. Australian Journal Sciences,20, 105-111.
- DAVIS J.e. (1973) - *Statistics and Data Analysis in Geology*, Wilkey, New York, pp. 550.
- DAVIES J.L. (1980) - *Geographical Variation in Coastal Development*. Longman, London, 2<sup>d</sup> ed., V.10, pp. 152-168.
- DAVIDSON-ARNOTT R.G.D., WHITE D.C. (1997) - *The effects of artificial pebble concentration onaeolian sand trampont on a beach*. Canadian Journal of Earth Science, V.34, pp.1499-1507.
- DEAN R.G. (1973) - *Heusteric models of sands transport in the surf zone*. Procedure of Conference on Engineering Dynamics in the Surf Zone, Sydney, N.S.W., Australia, pp. 208-214.
- DE LUCA G. (1979) - *Erosione del litorale del Lido di Roma: Cause ed effetti*. L'Universo 6, pp. 1117-1182.
- DIAZ BARRADAS M.C., MUNOZ REINOSO V. C. (1992) - *The ecology of vegetation of the Asperillo dune system, southwest Spain*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS T.G.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 211-218.
- DOODY J.P. (1989) - *Management for dune conservation*. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, V. 96B, pp. 247-265.
- DOODY J.P. (1992) - *Nature conservation on the coast - The role of coastal zone management*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS T.G.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 495-502.
- DUANE D.B. (1964) - *Significance of skewness in recent sediments, western Pamlico Sound, North Carolina*. Journal of Sedimentary Petrology, n. 33, p. 864-874.
- DYER K.R. (1986) - *Coastal and estuarine sediment dynamics*. Wiley, New York, 463 p.
- ERCHINGER H. F. (1992) - *Conservation of barrier dunes as smooth, natural method of coastal protection on the East Friesian stand, Germany*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS T.G.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp.389-396.
- FÉCAN F., MARTICORENA B., BERGAMETTI G. (1999) - *Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid regions*. Annuary Geographical, V.17, pp.149-157.
- FEILBERGER A, JENSEN F. (1992) - *Management and dune conservation of sand dunes in Denmark*, in (a cura di) CARTER R.W.G, CURTIS T.G.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., coastal Dunes, AA Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 429-439.
- FITZSIMMONS K.E. (2007) - *Morphological variability in the linear dune fields of the Strzelecki and Tirari Deserts, Australia*. Geomorphology. Vol.91, ISSUE 1-2, pp.146-160.
- FOLK R.L. (1962) - *Of skewness and sand*. Journal of Sedimentary Petrology, V.32, pp. 145-146.
- FOLK R.L., WARD W. (1957) - *Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journal of Sedimentary Petrology, V.27, pp. 3-26.



- FRIEDMAN G.M. (1961) - *Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics*. Journal of Sedimentary Petrology, V.31, pp.514-529.
- FRYBERGER D., DEAN G: (1979) - *Dune form and wind regime*, in (a cura di) McKEE E.D. A study of Global Sand Seas, united States Government Printing Office, Washington, pp.137-170.
- FUNICIELLO R., PAROTTO M. (1978) - *Il substrato sedimentario nell'area dei Colli Albani: considerazioni geodinamiche paleo, eografiche sul margine tirrenico dell'Appennino centrale*. Geologia Romana, V.17, pp. 233-287.
- 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.
- GARES P.A., NORDSTROM K.F. (1995) - *A geologic model of foredune blowout evolution for a leeward coast: Island Beach, N.J.*. Annals of the Association of American Geographers, V.85, pp.1-20.
- GARY M.R, MCAFEE Jr C.L. (1972) - *Glossary of geology*. American Geological Institute, Washington, DC. Wolf editors. 805 pp.
- GARCIA-MORA M.R., GALLELO-FERNANDEZ J.B., WILLIAMS A.T., GARCIA-NOVO F. (2000) - *A Coastal Dune Vulnerability Classification. A Case Study of the SW Iberian Peninsula*. Journal of Coastal Research, V.17(4), pp. 802-811.
- GILBERT G.K. (1877) - *Report on the geology of the Henry Mountains*. U.S. Geological Survey, pp.7-21.
- GILES R.T., PILKEY O.H. (1965) - *Atlantic beach and dune sediments of southern United States*. Journal of Sedimentary Petrology, V.35, pp.900-910.
- GILLETTE D.A., HERBERT G., STOCKTON P.H., OWEN P.R. (1996) - *Causes of the fetch effect in wind erosion*. Earth Surface Processes and Landforms, V.21, pp.641-659.
- GIMINGHAM C.H., RITCHIE W., WILLETS B.B., WILLIS A.J. (1989) - *Coastal Sand Dunes*. Proc. R. Soc. Edinburg B96.
- GIORDANO E., CAPITONI B., EBERLE A., MAFFEI L., MUSICANTI A., RECANATESI F., TORRI V. (2006) - *Contributo alla realizzazione del piano di gestione del patrimonio forestale della Tenuta Presidenziale di Castelporziano: il sistema ambientale della Tenuta Presidenziale di Castelporziano*. Seconda serie V.111, pp.1231-1300. Editore dall'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Roma.
- GOLDSMITH V. (1985) - *Coastal dunes*, in (a cura di) DAVIS R.A. Jr Coastal Sedimentary Environments, Springer, New York, pp. 171-235.
- GOLDSMITH V. (1989) - *Coastal Sand Dunes as Geomorphological System*. Proceeding of the Royal Society of Edimburgh, V.96b, pp. 3-15.
- GREGORY J.M., DARWISH M.M. (1990) - *Threshold friction velocity prediction considering water content*. Paper N° 902562. American Society of Agricultural Engineering, St Joseph, MI, 16 pp.
- GUILCHER A. (1958) - *Coastal and Submarine Morphology*. Methuen, London. 274 pp.
- GUILCHER A, HALLEGOUET B. (1991) - *Coastal dunes in Brittany and their management*. Journal of Coastal Research, n.7/2, p. 517-533.
- GUTIÉRREZ-ELORZA M. DESIR G., GUTIÉRREZ-SANTOLALLA F., MARIN C. (2005) - *Origin and evolution of playas and blowouts in the semiarid zone of Tierra de Penares (Duero Basin, Spain)*. Geomorphology, V.72, pp.177-192.

- GUZART, INMAN D.L. (1975) - *Edge waves and beach cusps*. Journal of Geophysics Research, V.80, pp. 2997-3012.
- HACK T.J. (1941) – *Dunes of the Western Navajo Country*. Geographical Review, American Geographical Society. V.31(2), pp.240-263.
- HAILS J.R (1967) - *Significance of statistical parameters for distinguishing sedimentary environments in New South Wales, Australia*. Journal of Sedimentary Petrology, n. 37, p. 1059-1069.
- HARDAWAY Jr C.S., VARNELL L.M., MILLIGAN D.A., THOMAS G.R., HOBBS III C.H. (Nov 2001) – *Chesapeake Bay Dune Systems: Evolution and Status*. Final Report, Department of Environmental Quality's Coastal Resources Management Program, Coastal Zone Management, 38 p.
- HARTOG M., VAN DER MEULEN F., JONGEJANG J. (1992) - *Dune landscape development and changing groundwater regime: quantitative landscape succession with help of GIS*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS T.G.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 119-128.
- HESP P.A. (1981) – *The Formation of Shadow Dunes*. Journal of Sedimentary Petrology. V.51, pp.101-112.
- HESP P.A. (1983) — *Morphodynamics of incipient foredunes in N.S.W., Australia*. Aeolian Sediments and Processes, Developments in Sedimentology, V.38, pp.325-342.
- HESP P.A. (1984a) — *Foredune formation in southeast Australia*. Thom BG (Ed), Coastal Geomorphology in Australia. Sydney Academic Press, 69-97.
- HESP P.A. (1984b) - *The formation of sand "beach ridge" and foredunes*. Search, V.15, pp. 289-291.
- HESP P.A. (1988a) - *Morphology, dynamics and internal stratification of some established foredunes in Southeast Australia*. Sedimentary Geology, V.55, pp. 17-41.
- HESP P.A. (1988b) - *Surf-zone, beach an Foredune interactions on the Australian South East coast*. Journal of Coastal Research, Special Issue 3, Dune/Beach Interaction, edited by Psuty N.P., pp. 15-25.
- HESP P.A. (1989) - *A review of biological and geomorphological processes involved in the initiation and development of incipient foredunes*, Proceedings of the Royal Society of Edinburg. n. 96B, pp. 181-201.
- HESP P.A., THOM B.G. (1990) - *Geomorphology and evolution of active transgressive dune field*. Coastal Dunes. Forms and Processes. Edited by Nordstrom K.F. e Psuty N.P., cap.XII, pp. 253-288.
- HESP P.A., HASTINGS K. (1998) – *Width, Height and Slope relationship and aerodynamic maintenance of Barchans*. Geomorphology. V.22, pp.193-204.
- HESP P.A. (1999) – *The Beach Backshore and Beyond*. Short AD (Ed), Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics, Chichester. J Wiley & Sons, NY, pp. 145–170.
- HESP P.A. (2000) – *Coastal Sand Dunes: form and function*. Massey University. Forest Research (Rotorua) and New Zealand Coastal Dune Vegetation Network (CDVN), 28p.
- HESP P.A. (2002) - *Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics*. Geomorphology, V.48, pp. 245-268.
- HESP P.A., DAVIDSON-ARNOTT R., WALKER I.J., OLLERHEAD J. (2005) - *Flow dynamics over a foredune at Prince Edward Island, Canada*. Geomorphology, V.65, pp.71-84.
- HESP P.A. et alii (2005) – *Beach ridges, foredune or transgressive dunefield? Definition and examination of the Torres to Tramandaí barrier system, Southern Brazil*. Anais da Academia Brasileira de Ciências – Annals of the Brazilian Academy of Sciences. Vol.77(3), pp.493-508.
- HESP P.A., MARTINEZ M.L. (2008) - *Transverse dune trailing ridges and vegetation succession*. Geomorphology, V. 99, pp. 205-213.

- HESP P.A., WALKER I.J., NAMIKAS S.L., DAVIDSON-ARNOTT R., BAUER B.O., Ollerhead, J. (2009) – *Storm Wind Flow over a Foredune, Prince Edward island, Canada*. Journal of Coastal Research, Special Issue V. 56, pp. 312-316.
- HILTON, M.J. (2006) – *The loss of New Zealand's active dunes and the spread of marram grass (Ammophila Arenaria)*. New Zealand Geographer, V.62, N.2, pp. 105-120 (16).
- HORIKAWA K., HOTTA S., KUBOTA S., Katori S. (1984) - *Measurement of blown sand transport rate by trench trap*. Japan Coastal Engineering, V.27, pp. 214-232.
- HOTTA S., KUBOTA S., KATORI S., HORIKAWA K. (1985) - *Sand transport by wind on a wet sand beach*. Proceedings 19<sup>o</sup> Coastal Engineering Conference, ASCE, pp 1265-1281.
- HOTTA S. (1988) - *Sand transport by wind*. In: Nearshore Dynamics and Coastal Processes. Edited by Horikawa K, University of Tokyo, pp. 218-238.
- HUDSON J.A. (1992) - *Rock Engineering System*, pp. 278.
- HUGHES S.A., Chui T.Y. (1981) - *Beach and dune erosion during severe storms*. University of Florida, Dept. of Coastal and Oceanographic Engineering, Report UFL/COEL-TR/043, 290 pp.
- HSU S.A. (1986) - *Correction of land-based wind data for offshore applications: a further evaluation*. Journal of Physical Oceanography.
- IMMORDINO F., VALPREDÀ E, SIMEONI U. (2002) – *Il telerilevamento iperspettrale MIVIS per la gestione costiera (foce Adige – Veneto)*. Atti 6a Conferenza Nazionale ASITA: “Geomatica per l’ambiente, il territorio e il patrimonio culturale”. Perugia 5-8 Novembre, 2: 1343-1348.
- INMAN D.L. (1952) - *Measures for describing the site distribution of sediments*. Journal of Sedimentary Petrology, V.22, pp.125-145.
- IVERSEN J.D., RASMUSSEN K.R. (1994) - *The effects of sudeate slope on Saltation threshold*. Sedimentology V.41, pp. 721-728
- JACKSON N.L., NORDSTROM K.F. (1998) - *Aeolian transport of sediment on a beach during and after rainfall, Wildwood (NJ), USA*. Geomorphology, V.22, pp. 151-157.
- JACKSON D.W.T., COOPER A.G. (1999) - *Beach fetch distance and aeolian sand transport*. Sedimentology, V.46, pp. 517-522.
- JANGERIUS P.O., VAN DER MEULEN F., LOEDEMANN J.H., STUIVER J. (1992) – *A geometrical approach to monitoring blowout development from aerial photographs using a Geographical Information System (GIS)*. in *Coastal Dunes*, AA Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 129-138.
- JENNINGS J.N. (1967) - *Cliff-top dunes*. Australian Geographical Studies, Vol.5, pp. 40-49.
- JENSEN F. (1994) – *Dune Management in Denmark: Application of the Nature Protection Act of 1992*. Journal of Coastal Research, n. 10/2, p. 263-269.
- JONES P.S., ETERINGTON J.R. (1992) – *Auto ecological studies on the rare orchid “Liparis loeselii” and their application to the management of dune slack ecosystem in South Wales*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS T.G.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., *Coastal Dunes*, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, p.299-312.
- JUNGERIUS P.D, VERHAGGENE J.T., WIGGERS A.J. (1981) - *The development of blowouts in "de Blink", a coastal dune area near Noordwijkerhout, Netherlands*. Earth surface Processes and Landforms, Vol. 6, pp. 375-396.
- JUNAIKI S., AOIKI S. (2009) – *Wind-Blown Sand Topographic Changes of the Coastal Dune at the Eroded Beach*. Journal of Coastal Research, Special Issue V.56, pp.322-326.
- KADIB A.A. (1965) - *A function for sand movement by wind*. University of California Hydraulics Engineering Laboratory, Report HEL, 2-8, Berkeley.

- KAGANOV E.I., YAGLOM A.M. (1976) - *Errors in wind speed measurements by rotation anemomag*. Boundary Layer Meteorology, V.10, pp.15-34.
- KAWAMURA R. (1951) - *Study of sand movement by wind*. Translated (1965) as University of California Hydraulics Engineering Laboratory Report HEL, 2-8, Berkely.
- LA COCK G.D., LUBKE R.A., WILKEN M. (1992) - *Dune movement in the Kwaaihoek region of the eastern cape, South Africa, and its bearing on future developments of the region*. Journal of Coastal Research, n. 8/1, pp. 210-217.
- LA MONICA G.B. (2001) - *L'erosione di spiagge e coste. Un Paese spaesato. Rapporto sullo stato del paesaggio italiano*. I Libri Bianchi del Touring Club Italiano, V.12, pp. 44-49.
- LANCASTER N., NICKLING W.G., MCKENNA NEUMAN C., WYATT V.E. (1996) - *Sediment flux and airflow on the stoss side of a barchan dune*. Geomorphology V.17, pp. 55-62.
- LEES B. (2006) – *Timing and Formation of Coastal Dunes in Northern and Eastern Australia*. Journal of Coastal Research. Vol.22(1), pp78-89.
- LETTAU K., LETTAU H.H. (1978) - *Experimental and micro-meteorological field studies of dune migration*. In Exploring the world's driest climates, Lettau H.H., Lettau K. (eds.). Institute of environmental studies of dune migration. University of Wisconsin: Madison; pp. 110-147.
- LEVIN N., BEN-DOR E. (2004) – *Monitoring sand dune stabilization along the coastal dunes of Ashdod - Nizanim, Israel, 1945-1999*. Journal of Arid Environments V.58, ISSUE 3, pp.335-355.
- MASO C.C., FOLK R.L. (1958) - *Differentiation of beach, dune and aeolian flat environments by size analysis, Mustang Island, Texas*. Journal of Sedimentary Petrology, V.28, pp. 211-226.
- MASTRONUZZI G., SANSONO P. (1993) - *Caratteri ed evoluzione attuale del litorale fra le foci del fiume Fortore e del fiume Ofanto (Puglia)*. Bonifica, n. 3, pp. 83-90.
- MASSELINK G., HUGHES M.G. (2003) - *Introduction to Coastal Processes Geomorphology*. Oxford University Press Inc, United States of America. p. 354.
- MATSUKURA Y. (1977) - *A study of the aeolian bedforms in Enshunada Beach, Shikoku Prefecture, Central Japan: their configuration*. Geografic Review of Japan, V.50 (7), pp. 402-419.
- McKEE E.D. (1979) - *Introduction to a study of global sand seas*. In (a cura di) McKEE E.D. A Study of Global Sand Seas, United States Government Printing Office, Washington, pp. 86-136.
- MCKEE E. (1979a) - *An introduction to the study of global sand areas*. U.S Geological Survey Paper, V.1052, pp.1-20.
- MCKENZIE P. (1958) - *The development of sand beach ridges*. Australian Journal Sciences, 20, 213-214.
- MCKENNA NEUMAN C., NICKLING W.G. (1989) - *A theoretical and wind tunnel investigation of the effect of capillary water on the entrainment of sediment by wind*. Canadian Journal of Soil Sciences, V.69, pp.79-96.
- MCKENNA NEUMAN C., LANCASTER N., NICKLING W.G. (1997) - *Relations between dune morphology, air flow and sediment flux on reversing dunes, Silver Peak, Nevada*. Sedimentology. V.44, pp.1103-1113.
- MCLEAN R., SHEN J.S. (2006) – *From Foredune to Foredune: Foredune Development over the last 30 Years at Moruya Beach, New South Wales*. Journal of Coastal Research. V.22(1), pp. 28-36.
- MEU C., HALLEGOUET B., BODERE J.C. (1992) – *Coastal dune management policies in France: the example of Brittany*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS T.G.F. and SHEELYSKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 419-428.
- MIKKELSEN H.E. (1989) - *Wind flow and sediment transport over a low coastal dune*. Geoskrifter, V. 32, pp. 1-46.

- MITCHELL S.C. (2000) – *Aeolian Sand Transport at the Lanphere Dunes, Northern California*. Earth Surface Processes and Landforms, Vol.25, pp. 239-253
- MOIOLA R.J., WEISER O. (1968) – *Textural parameters: an evaluation*. Journal of Sedimentary Petrology, V.38, p. 45-53.
- MULLIGAN K.R. (1988) - *Velocity profiles measured on the windward slope of a transverse dune*. Earth Surface Processes and Landforms, 13, 573-582.
- NI J., Li Z., MENDOZA C. (2004) - *Blown-sand transport rate*. Earth surface Process and Landforms, V.29, pp.1-14.
- NICKLING W.G., DAVIDSON-ARNOTT R.G.D. (1991) - *Aeolian sediment transport on beaches and coastal dunes*. *Proceedings of the symposium on coastal sand dunes*. Edited by R.G.D. Davidson-Arnott. National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, pp. 1-35.
- NOLI A., DE GIROLAMO P., SANIMARCO P. (1996) - Parametri meteomarinari e dinamica costiera. In: Il mare del'Edito dalla Regione Lazio "Assessorato Opere e Reti di Servizio e Mobilità", pp. 283-327.
- NORDSTROM K.F., Psuty N.P., Carter N.W.G. (1990) - *Coastal Dunes: processes and morphology*. Wiley, Chichester.
- NORDSTROM K.F., Jackson. N.L. (1992) - *Aeolian transport on an estuarine beach*. Sedimentology, V.39, pp. 769-778.
- NORDSTROM, K.F. (2000) - *Beaches and dunes of developed coasts*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 338 p.
- OLSON S. (1958) - *Lake Michigan dune development wind-velocity profiles*. Journal of Geology, Vol. 66 (3), pp.254-263.
- ORME R.A. (1990) - *The instability of Holocene coastal dunes: the case of the Morro dunes, California*. *Coastal Dunes: Formation and Processes*. Edited by Nordstrom K.F. e Psuty N.P., 392 pp.
- OTTO G.H., (1939) - *A modified logarithmic probability graph for the interpretation of mechanical analyses of sediments*. Journal of Sedimentary Petrology, V.9, pp.62-76.
- OWEN P.R. (1980) — *Sand movement mechanism*. Workshop on Physics of desertification, International Center for Theoretical Physics, Trieste, Italy.
- PALLOTTINI E., CAMPO V., CAPPUCCI S., ROSSI L. & LA MONICA G.B., (2008) – *Beach-Dune System Interaction and Evolution*. Rendiconti online Società Geologica Italiana, Vol.2.
- PANAIRO D., PIÑEIRO G. (1997) – *Vulnerability of oceanic dune Systems under wind pattern change scenarios in Uruguay*. Climate Research, Vol.9, pp. 67-72.
- PAREA G.C. (1978). *Trasporto dei sedimenti ed erosione lungo il litorale fra il Tronto ed in Fortore (Adriatico centrale)*. Memorie della Società Geologica Italiana, n. 19, p. 361-367.
- PAROTTO M., PRATURLON A. (1975) - *Geological summag of the Central Appennines*. C.N.R. Quaderni della Ricerca Scientifica, V.90, pp. 257-311.
- PASKOFF R. (1993) - *Cotes en Dangere*. Masson, Paris, pp. 249.
- PASSEGA R. (1962) - *Problem of comparing ancient with recent sedimentary deposit*. Bulletin of American Association of Petrologists and Geologists, Vol. 46, pp. 114-124.
- PIGNATTI S. (2002) - *La vegetazione delle spiagge: dune e spiagge sabbiose, ambienti fra terra e mare*. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, pp.3-61.
- PRANZINI E. (2004) - *La forma delle coste. Geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali*. Zanichelli editore. 245 pp.

- PRANZINI E. e SIMEONI U. (2005) – Morfologia delle dune costiere. In: “Le dune costiere in Italia”; Ed. Felici Editore, San giuliano Terme (PI), 93-114. ISBN 88-99327-98-3
- PSUTY N.P. (1986) - *Principles of dune-beach interaction related to coastal management*. Thalassas, 4, pp 11-15.
- PSUTY N.P. (1988) - *Sediment budget and dune/beach interaction*. Journal of Coastal Research, Special Issue 3, Dune/Beach Interaction, edited by Psuty N.P., pp 1-4.
- PSUTY, N.P. (1989) - *An application of science to the management of coastal dunes along the Atlantic coast of the U.S.A.* Proceedings of the Royal Society of Edimburg, n. 96B, pp. 289-307.
- PSUTY, N. (1988) - *Dune/Beach Interaction*. Journal of Coastal Research Special Issue No. 3.
- PSUTY N.P. (1989) - *A review of biological and geomorphological processes involved in the initiation and development of incipient foredunes*. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, V.96(B), pp.181-201.
- PSUTY, N.P. (1992) - *Spatial variation in coastal Foredune development*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS T.G.F. and SHE LY-SKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 3-14.
- PSUTY N.P. (1993) - *Foredune morphology and sediment transport, Perdido Key, Florida (USA)*.
- PSUTY, N. P., MARTÍNEZ, M. L. (2004) - *Coastal Sand Dunes: Ecology Conservation*. Ecological Studies. M. Luisa Martínez, Norbert P. Psuty Editors, V.171, p.390.
- PYE, K. (1984) - *Models of transgressive coastal dune building episodes and their relationship to Quaternary sea level changes: a discussion with reference to evidence from eastern Australia*. in Clark, W. (ed.), Coastal Research, U.K. Perspectives, Geo. Books, Norwich, pp. 81-104.
- PYE K., Tsoar H. (1990) - *Aeolian sand and sand dunes*. Unwin Hyman, London, 396 pp.
- PYE K., (1993) - *The dynamics and environmental context of aeolian sedimentary systems*. Geological Society Special Vol.72.
- RADLEY G.P. (1992) - *The dunes in England, an example of national inventory*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS T.G.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 438-454.
- RASMUSSEN K.R. (1989) - *Some aspects of flow over coastal dunes*. Proceedings of the Royal Society of Edimburg, V.96B, pp.129-147.
- RICCI LUCCHI F. (1980) - *Sedimentologia - parte III*. Ambienti sedimentary e facies, UTET Torino, pp.183-191.
- RITCHIE W. (1972) - *The evolution of coastal sand dunes*. Scottish Geographic Magazine, V.88, pp 19-35.
- ROBERTSON-RINTOUL M.J. (1990) - *A quantitative analyses of the near surface wind flow pattern over coastal parabolic dunes*. Coastal Dunes. Form and Process. Edited by Nordstrom K.F. e Psuty N.P., 392 pp.
- RUZ M.H., ALLARD M. (1994) - *Foredune development along a subarctic emerging coastline, eastern Hudson Bay, Canada*. Marine Geology, V.117, pp. 57-74 .
- SALEH A., Fryrear D.W. (1995) - *Threshold wind velocities of wet soils as affected by wind blown sand*. Soil Science, V.160, pp. 304-309.
- SALISBURY E. (1952) - *Downs and Dunes*. Their Plant Tafe and Environments. Bell, London, 212 pp.
- SANJAUME E., PARDO J. (1992) - *The dune of the Valencian coast (Spain): Past and present*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS T.G.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 475-486.

- SARRE R.D. (1988) - *Evaluation of Aeolian sand transport equations using intertidal zone measurements, Saunton Sands, England*. *Sedimentology*, 35, 671-679.
- SAYE S.E., PYE K., CLEMMENSEN L.B. (2006) - *Development of a cliff-top dunes indicated by particle size and geochemical characteristics: Rubjerg Knude, Denmark*. *Sedimentology*, 53, 1-21.
- SCHULZE DIECKHOFF M. (1992) - *Propagating dune grasses by cultivation for dune conservation purpose*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS T.G.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., *Coastal Dunes*, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 361-368.
- SENGUPTA S., VEENSTRA H.J. (1968) - *On sieving and settling techniques for sand analysis*. *Sedimentology*, V.11, pp. 83-98.
- SERWAY R.A. (1996) - *Principles of physics*. Saunders College Publishing. 1017 pp.
- SHAO Y., RAPAUCH M.R., LEYS J.F. (1996) - *A model for predicting sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region*. *Australian Journal of Soil Research*, V.34, pp. 309-342.
- SHEPARD F.P. (1964) - *Criteria in modern sediments useful in recognizing ancient sedimentary environments*. *Development in Sedimentology*, V.1.
- SHEPARD F.P., YOUNG R. (1961). *Distinguishing between beach and dune sands*. *Journal of Sedimentary Petrology*, V.31, pp. 196-214.
- SHERMAN D.J., B.O. (1993) — *Dynamics of beach-dune systems*. *Progress in Physical Geography*, Vol. 17 (4), pp. 413-447.
- SHERMAN D.J., JACKSON D.W.T., NAMIKAS S.L., WANG J. (1998) - *Wind-blown sand on beaches: an evaluation of models*. *Geomorphology*, V.22, pp. 113-133.
- SHORT AD., HESP P.A (1982) - *Wave Beach and Dune interaction in southeaster Australia*. *Marine Geology*, V.48, pp. 259-284.
- SHORT AD. (1988) - *Wave, beach, foredune, and mobile dune interactions in Southeast Australia*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n. 3, p. 5-9.
- SHORT A.D. (1988) - *Holocene Coastal Dune Formation in Southern Australia: a Case Study*. *Sedimentary Geology*. Vol.55, pp.121-142.
- SILENZI S., DEVOTI S., LA MONICA G.B., MANCINI M., MONTAGNA P., PARLAGRECO L., CICERO A.M. (2006) - *Sintesi delle conoscenze relative all'evoluzione geologica, geomorfologica ed ambientale dell'area costiera di Castelporziano (scala regionale e locale) durante il Quaternario recente*. Il sistema ambientale della Tenuta Presidenziale di Castelporziano. Seconda serie vol. II 951-984. Edito dall'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Roma.
- SIMEONI U., MAZZINI E., FONTOLAN G. (1996) – “*The 'System Theory' aimed at the determination of a coastal instability index: a case studied, the Atlantic side of the Strait of Magellan*”. In: Taussik J. & Mitchell J. (eds.), *Partnership in Coastal Zone Management*, Samara Publishing Limited, Cardigan, United Kingdom, 267-274.
- SIMEONI U., CALDERONI G., CIAVOLA P., MAZZINI E., TESSARI U. (1998) - *Un nuovo approccio per la gestione delle dune costiere*. *Accademia Nazionale dei Lincei, Convegno “Il rischio idrogeologico e la difesa del suolo”*, 1-2 Ottobre Roma: 23-24.
- SIMEONI U. (1999) – *L'evoluzione delle coste*. In: Turri Eugenio (Ed.), *Adriatico mare d'Europa: la geografia e la storia*. Rolo Banca, A. Pizzi, Milano, 110-113.
- SIMEONI U., MAZZINI E., TESSARI U., CIAVOLA P. (1999) – *Valutazione integrata, a fini gestionali, delle dune costiere: metodologia e caso studio*. *Studi Costieri*, Firenze, 1: 85-102.
- SIMEONI U., ALVERINHO DIAS J.M., DE BERNARDINIS B., GARÇIA NOVO F., MAZZINI E., TESSARI U., CIAVOLA P., TRIVISANI A., VITA M., GRECO M., SANTASIERO V., GARÇIA MORA M.R. (1999) – *Integrated management of the beach-dune system*. In: G. Randazzo (ed),



- Coastal Environment Management; Proceedings Coastlines '97, European Union for Coastal Conservation (EUCC), Italy/EUCC (CD-Rom).
- SIMEONI U. (2002) – *La duna: da elemento del paesaggio ad opera di difesa*. Suppl. Atti Accademia delle Scienze di Ferrara, V.78 (178), pp.7-19.
- SIMEONI U., VALPREDÀ E., SCHIAVI C., CORBAU C. (2005) - *A national database on coastal dunes: Emilia-Romagna and southern Veneto littorals (Italy)* . In Proceedings of the “6th International Symposium on GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management”, (Ed) David R. Green, 21-23 July 2005, Aberdeen, Scotland (UK).
- SIMEONI U., VALPREDÀ E., SCHIAVI C., CORBAU C. (2006) – *Le dune costiere dell'Emilia-Romagna*. Studi Costieri, V.11, pp.121-132.
- SIMEONI U., BRUNELLI V., CORBAU C., TESSARI U., UTIZI K. (2008) - *Intervento di ripristino dell'efficienza della bocca secondaria della Sacca di Goro (Delta del Po)*. Studi e Ricerche, Autorità di Bacino della Basilicata, 9: 275-284.
- SMITH, H.T.U. (1954) - *Coastal Dunes*. Office of Naval Research. Geography Program First Coastal Geography Conference, pp. 51-56.
- SÓRENSEN M. (1991) - *An analytic model of wind-blown sand transport*. Acta Mechanica Supplement, V.1, pp. 67-82.
- STRAHLER AN. (1950) - *Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis*. American Journal of Science, n.248, p.673-696.
- STRAHLER AN., 1958. *Dynamic basis of geomorphology*. Bulletin of the American Geological Society, n. 63, p. 923-938.
- STURGESS P., 1992. *Clear-felling dune plantation*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS TG.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, AA Balkema, Rotterdam, Brookfield, p. 339-350. T C. I., 1988. Atlante automobilistico scala 1:200000.
- SVASEK J.N., TERWINDT J.HJ. (1974) - *Measurements of sand transport by wind on a natural beach*. Sedimentology, V.21, pp.311-322.
- TINELLI A. (1997) - *Studio dell'evoluzione della linea di costa e valutazione della variazione del sistema dunale in funzione dell'impatto antropico*. Progetto di monitoraggio ambientale della Tenuta Presidenziale di Castelporziano, Rapporto 1997. pp 350-361.
- TINLEY K. (1985) – *Coastal Dunes of South Africa*. REPORT of S.A. National Science Program, 109. pp.300.
- TASTET J.P., PONTEE N.I. (1998) – *Morpho-Chronology of Coastal Dunes in Médoc. A new interpretation of Holocene dunes in Southwestern France*. Geomorphology, V.25, ISSUE 1-2, pp. 93-109
- TSOAR H. (1983) - *Wind tunnel modeling of echo dunes and climbing dunes*. In Brookfield, M.E. and Ahlbrandt T.S. (Eds), Aeolian Processes and Sediments. Elsevier, Amsterdam, pp. 247-260.
- TSOAR H., BLUMBERG D.G., STOLER Y. (2004) – *Elongation and migration of sand dunes*. Geomorphology, V.57, N.3, pp. 293-302.
- U.S. ARMY (2002) - *Coastal Engineering Manual*. Wind-Blown Sediment Transport, Chapter 111-4, pp. 1-79.
- VAN BOHEMEN H.D., MEESTERS H.J.N. (1992) - *Ecological engineering and coastal defence*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS TG.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, AA Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 369-378.
- VAN DER MEULEN F., JANSSEN J. (1992) - *Toward a monitoring programme for European coastal environment*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS TG.F. and SHEELY-SKEFFINGTON M.J., Coastal Dunes, AA Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 517-524

- VAN DE GRAAFF J. (1986) - *Probabilistic design of dunes: an example on the Neatherland lands*. Coastal Engineering, V.9, pp. 479-500.
- VAN DE VEN T.A.M., FRYREAR D.W., SPAAN W.P. (1989) - *Vegetation characteristics and soil loss by wind*. Journal of Soil and Water Conservation, V.44, pp.347-349.
- VAN DIJK P.M., STROOSNIJDER L., DE LIMA J.L.M.P. (1996) - *The influence of rainfall on traniport of beach sandby wind*. Earth surface processes and landforms, V.21, pp.341-352.
- VAI G.B. (2001) - *Structure and stratigraphy: an overview*. In: Vai G.B., Martini I.P. (Eds), *Anatomy of an Orogen: the Appenines and Adjacent Mediterranean Basins*, pp. 375-400, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- VAN ZOEST J. (1992) - *Gambliig with Nature? A new paradigm of nature and its consequences for nature management strategy*, in (a cura di) CARTER R.W.G., CURTIS TG.F. and SHEELYSKEFFINGTON M.J., *Coastal Dunes*, AA Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 503-516.
- VESPREMEANU - STROE A., PREOTEASA L. (2007) - *Beach-Dune interactions on the dry-temperate Danube delta Coast*. Geomorphology, V. 86, pp. 267-282.
- YAK G.N., 1989. *Grain size parameters and environments of river, beach and coastal dune sediment near KalWar, west coast of India*. Coastal zone, n. 5, p. 4449-4459.
- WALKER I.J., NICKLING W.G. (2002) — *Dynamics of second airflow and sediment transport over and in the lee of transverse dunes*. Progress in physical geography, V.26, pp. 47-75.
- WHITE B.R., SHULTZ J.C. (1977) - *Magnus effects on saltation*. Journal of Fluid Mechanics, V.81, pp 497-512.
- WIGGS G.F.S., ATHCRTON R.J., Baird A.J. (2004) - *Thresholds of aeolian sand transport: establishincu, suitable values*. Sedimentology, V.51, pp. 95-108.
- WILLETS B.B., RICE M.A., SWAINE S.E. (1982) - *Shape effects in aeolian grain transport*. Sedimentology, V.29, pp. 409-417.
- WILLETS B.B. (1983) - *Trampoli by wind of granular material of different grain shapes and densities*. Sedimentology, V.30, pp. 669-679.
- WILLETTS B.B. (1989) - *Physics of sand movement in vegetated dune system*. Proceedings of the Royal Society of Edimburg, V. 968, pp. 37-49.
- WIPPERMAN F.K., GROSS G. (1986) - *The wind-induced shaping and migration of an isolated dune: a numericalexperiment*. Boundary Layer Meteorology, V.36, pp. 319-334.
- WRIGHT L.D., SHORT AD. (1984) - *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis*. Marine Geology, V.56, pp. 93-118.
- WRIGHT L.D., CHAPPEL J., THOM B.G, BREDSHAW M.P., COWELL P., (1979). *Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore system: southeastern Australia*. Marine Geology, V.32, pp. 105-140.
- WRIGHT L.D., GUZA G.T., SHORT A.D. (1982). *Dynamics of a high-energy dissipative surf zone*. Marine Geology, V.45, p. 4162.
- ZEMAN O., JENSEN N.O. (1987) - *Modifications of turbulence characteristics in flow over hills*. Quarterely Journal of the Royal Meterological Society, V.113, pp. 55-80.
- ZINGG A.W. (1953) - *Wind tunnel studies of the movement of sedimentag material*. Proc . 5th Hydraulics Conference Bull., Institute of Hydraulics, Iowa City, V.34, pp.111-135.
- ZONNEVELD L.M.L., (1992) - *Eco-hydrological dune slack research for management purposes*. A cura di CARTER RW.G., CURTIS T.G.F. and SHEELV-SKEFFINGTON M.J., *Coastal Dunes*, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 397-406.

APPENDICE 1  
*SCHEDE*  
*FATTORI D'INFLUENZA*  
*TEORIA DEI SISTEMI*

**SCHEDA 1: FATTORI SEDIMENTOLOGICI**  
**GRANULOMETRIA (Spiaggia e Duna)**

COD	DIAMETRO MEDIO DI SPIAGGIA - $D_{50}$ (phi)	DIAMETRO MEDIO DI DUNA - $D_{50}$ (phi)
G1	2.09	2.16
G2	2.23	2.41
G3	2.49	2.55
G4	2.25	2.32
G5	2.18	2.37
G6	2.05	2.15
V1	2.20	2.40
V2	2.20	2.40
V3	2.48	2.42
NPS1	2.15	2.28
NPS1a	2.15	2.28
NPS2	2.25	2.28
NPS2a	2.32	2.28
NPS3	2.60	2.49
NPS3a	2.72	2.75
E1	2.45	2.48
E2	2.31	2.48
S1	2.03	2.33
S2	1.95	1.92
S3	1.99	1.94
S4	1.83	1.78
S5	1.76	1.71
FRe1	1.72	1.67
FRe2	2.55	2.58
CB1	1.96	1.90
CB1a	1.93	1.87
CB2	2.20	2.08
CB2a	2.35	2.14
R1	2.43	2.48
R2	2.01	2.48
R3	2.12	2.27
R4	2.59	2.56
R4a	2.59	2.56
R4b	2.56	2.55
R5	1.90	2.48
R5a	2.10	2.15
R6	2.01	2.06
R7	2.01	2.06
FC1a	2.10	2.08
Rc1	2.21	2.12

*Tabella a – Distribuzione dei valori di  $D_{50}$  ricavati per i sedimenti prelevati nella parte alta della spiaggia e sulla duna;*

## SCHEDA 2: FATTORI ENERGETICI

Parametro MARE 1 (Indice PSD)

COD	Direz. DUNA (°N)	PSD (Probabilità Superamento Duna)
G1	41	32
G2	77	32
G3	90	32
G4	103	32
G5	93	32
G6	113	32
V1	49	32
V2	23	32
V3	26	32
NPS1	9	0
NPS1a	18	0
NPS2	3	0
NPS2a	8	0
NPS3	0	0
NPS3a	349	0
E1	348	7.7
E2	341	7.7
S1	330	7.7
S2	323	7.7
S3	330	7.7
S4	343	0.9
S5	320	0.9
FRe1	350	11
FRe2	0	11
CB1	13	0.9
CB1a	342	0.9
CB2	0	0.9
CB2a	0	0.9
R1	345	0.9
R2	347	0.9
R3	342	0.9
R4	341	0.9
R4a	342	0.9
R4b	342	11
R5	350	11
R5a	350	11
R6	342	11
R7	348	0
FC1a	330	0
Rc1	313	0

Tabella b – Distribuzione dei valori dell'indice PSD (Probabilità di Superamento Duna) (Beachmed-e, sottoprogetto MedPaln, Misura 3.1, 2005;

### **SCHEDA 3: FATTORI ENERGETICI**

Parametro MARE 2 (Variazione Linea di riva)

<b>COD</b>	<b>N. SEZIONI misurate</b>	<b>TASSO VARIAZIONE LINEA DI RIVA 2000-</b>
G1	28	-5.64
G2	22	-8.63
G3	12	-1.50
G4	24	-6.13
G5	20	0.63
G6	8	18.75
V1	16	-3.00
V2	14	-2.51
V3	28	-5.00
NPS1	17	-4.75
NPS1a	5	1.63
NPS2	45	2.00
NPS2a	4	0.26
NPS3	16	-0.96
NPS3a	15	2.25
E1	14	6.00
E2	20	6.00
S1	7	4.12
S2	28	-6.00
S3	7	-9.07
S4	20	-7.11
S5	4	-5.63
FRe1	19	-3.00
FRe2	5	-7.13
CB1	10	-1.75
CB1a	7	1.65
CB2	15	-3.17
CB2a	10	-2.04
R1	10	2.28
R2	16	2.89
R3	5	-0.82
R4	16	3.57
R4a	10	3.17
R4b	10	-2.25
R5	31	1.35
R5a	31	4.60
R6	27	3.18
R7	4	-1.32
FC1a	15	-0.68
Rc1	7	-1.01

*Tabella c – Distribuzione dei valori di variazione della linea di riva;*

## **SCHEDA 4: FATTORI ENERGETICI**

Parametro VENTO 1 (Indice Eolico)

COD	Direz. DUNA (°N)	IE eff.
G1	41	0.418
G2	77	0.474
G3	90	0.499
G4	103	0.492
G5	93	0.493
G6	113	0.477
V1	49	0.461
V2	23	0.423
V3	26	0.471
NPS1	9	0.476
NPS1a	18	0.476
NPS2	3	0.375
NPS2a	8	0.375
NPS3	0	0.470
NPS3a	349	0.477
E1	348	0.452
E2	341	0.427
S1	330	0.444
S2	323	0.511
S3	330	0.500
S4	343	0.500
S5	320	0.500
FRe1	350	0.444
FRe2	0	0.456
CB1	13	0.423
CB1a	342	0.423
CB2	0	0.356
CB2a	0	0.376
R1	345	0.346
R2	347	0.346
R3	342	0.403
R4	341	0.349
R4a	342	0.349
R4b	342	0.353
R5	350	0.396
R5a	350	0.408
R6	342	0.424
R7	348	0.415
FC1a	330	0.383
Rc1	313	0.380

Tabella d – Distribuzione dei valori dell'indice IE (Indice Eolico);



## SCHEDA 5: FATTORI ENERGETICI

Parametro VENTO 2 (Direzione Dominante VENTO costruttivo)

COD	Direz. DUNA (°N)	DIREZIONE DOMINANTE
		VENTO COSTRUTTIVO ( $\Delta^\circ$ )
G1	41	70
G2	77	37
G3	90	28
G4	103	15
G5	93	25
G6	113	7
V1	49	68
V2	23	94
V3	26	91
NPS1	9	104
NPS1a	18	95
NPS2	3	51
NPS2a	8	46
NPS3	0	117
NPS3a	349	128
E1	348	112
E2	341	127
S1	330	138
S2	323	145
S3	330	138
S4	343	125
S5	320	148
FRe1	350	138
FRe2	0	127
CB1	13	115
CB1a	342	146
CB2	0	129
CB2a	0	129
R1	345	144
R2	347	142
R3	342	146
R4	341	147
R4a	340	142
R4b	342	146
R5	350	130
R5a	350	130
R6	342	138
R7	348	132
FC1a	330	142
Rc1	313	159

Tabella e – Distribuzione della direzione dominante costruttiva ( $\Delta^\circ$ );

## SCHEDA 6: FATTORI ENERGETICI

Parametro VENTO 3 (Tasso di Trasporto eolico potenziale)

COD	Direz. DUNA (°N)	Tasso di Trasporto EOLICO POTENZIALE (g/cm*sec <sup>-1</sup> )
G1	41	1.47E-01
G2	77	5.63E-02
G3	90	4.65E-02
G4	103	5.90E-02
G5	93	4.20E-02
G6	113	4.20E-02
V1	49	8.62E-02
V2	23	1.19E-01
V3	26	1.00E-01
NPS1	9	1.10E-01
NPS1a	18	1.15E-01
NPS2	3	1.48E-01
NPS2a	8	1.30E-01
NPS3	0	9.00E-02
NPS3a	349	7.59E-02
E1	348	9.69E-02
E2	341	9.29E-02
S1	330	7.62E-02
S2	323	6.45E-02
S3	330	7.06E-02
S4	343	8.35E-02
S5	320	9.15E-02
FRe1	350	1.17E-01
FRe2	0	9.46E-02
CB1	13	1.22E-01
CB1a	342	7.60E-02
CB2	0	1.10E-01
CB2a	0	1.20E-01
R1	345	1.32E-01
R2	347	1.38E-01
R3	342	1.20E-01
R4	341	1.09E-01
R4a	342	1.19E-01
R4b	342	1.12E-01
R5	350	1.27E-01
R5a	350	1.12E-01
R6	342	1.03E-01
R7	348	1.20E-01
FC1a	330	1.08E-01
Rc1	313	9.00E-02

Tabella f – Parametri statistici del tasso di trasporto eolico potenziale (Zingg, 1953) derivati dalla distribuzione spaziale lungo tutti i sistemi spiaggia-duna considerati;

## **SCHEDA 7: FATTORI MORFOLOGICI e MORFOMETRICI**

Parametro DUNA 1 (Quota cresta)

<b>COD</b>	<b>N. SEZIONI misurate</b>	<b>Quota CRESTA DUNA (m)</b>
G1	28	1.96
G2	22	1.73
G3	12	2.62
G4	24	1.67
G5	20	1.33
G6	8	1.16
V1	16	1.50
V2	14	2.80
V3	28	3.03
NPS1	17	3.33
NPS1a	5	3.21
NPS2	45	3.74
NPS2a	4	3.59
NPS3	16	3.97
NPS3a	15	3.65
E1	14	3.37
E2	20	5.79
S1	7	4.23
S2	28	3.47
S3	7	1.73
S4	20	1.68
S5	4	1.75
FRe1	19	2.11
FRe2	5	1.98
CB1	10	4.11
CB1a	7	3.98
CB2	15	4.31
CB2a	10	4.45
R1	10	3.05
R2	16	4.58
R3	5	4.80
R4	16	3.88
R4a	10	3.45
R4b	10	4.10
R5	31	3.23
R5a	31	2.40
R6	27	2.49
R7	4	3.09
FC1a	15	3.53
Rc1	7	3.42

*Tabella g – Distribuzione della quota in sommità della cresta della duna;*

## **SCHEDA 8: FATTORI MORFOLOGICI e MORFOMETRICI**

Parametro DUNA 2 (Pendenza lato fianco mare)

COD	N. SEZIONI misurate	Pendenza DUNA fianco MARE (°)
G1	28	21.91
G2	22	5.55
G3	12	5.56
G4	24	9.34
G5	20	8.41
G6	8	7.23
V1	16	13.98
V2	14	21.89
V3	28	26.83
NPS1	17	58.16
NPS1a	5	35.98
NPS2	45	26.92
NPS2a	4	19.07
NPS3	16	35.83
NPS3a	15	32.98
E1	14	8.06
E2	20	12.74
S1	7	18.98
S2	28	44.23
S3	7	5.97
S4	20	6.00
S5	4	4.80
FRe1	19	8.90
FRe2	5	12.37
CB1	10	9.32
CB1a	7	19.76
CB2	15	33.69
CB2a	10	36.99
R1	10	21.68
R2	16	26.87
R3	5	27.37
R4	16	27.65
R4a	10	27.61
R4b		28.21
R5	31	39.37
R5a	31	29.35
R6	27	31.98
R7	4	11.80
FC1a	15	12.49
Rc1	7	18.39

Tabella h – Distribuzione della pendenza della duna fianco lato mare;

## **SCHEMA 9: FATTORI MORFOLOGICI e MORFOMETRICI**

Parametro DUNA 3 (Ampiezza della duna)

<b>COD</b>	<b>N. SEZIONI misurate</b>	<b>Ampiezza parte ATTIVA della DUNA (m)</b>
G1	28	14.78
G2	22	13.05
G3	12	24.85
G4	24	40.32
G5	20	39.66
G6	8	36.89
V1	16	14.11
V2	14	12.665
V3	28	23.13
NPS1	17	20.84
NPS1a	5	17.84
NPS2	45	15.79
NPS2a	4	28
NPS3	16	22.9
NPS3a	15	24.815
E1	14	64.22
E2	20	25.795
S1	7	47.4
S2	28	13.675
S3	7	15.5
S4	20	29.735
S5	4	36.615
FRe1	19	56.5
FRe2	5	36.02
CB1	10	20.345
CB1a	7	16.265
CB2	15	17.045
CB2a	10	17.675
R1	10	12.155
R2	16	51.11
R3	5	43.94
R4	16	32.73
R4a	10	12.45
R4b	10	10.455
R5	31	17.995
R5a	31	17.765
R6	27	31.805
R7	4	33.975
FC1a	15	13.395
Rc1	7	16.43

*Tabella i – Distribuzione dell'ampiezza della parte attiva della duna;*

## **SCHEDA 10: FATTORI MORFOLOGICI e MORFOMETRICI**

Parametro SPIAGGIA 1 (Pendenza spiaggia)

<b>COD</b>	<b>N. SEZIONI misurate</b>	<b>Pendenza SPIAGGIA (°)</b>
G1	28	5.64
G2	22	1.38
G3	12	3.47
G4	24	0.59
G5	20	3.31
G6	8	1.50
V1	16	5.79
V2	14	6.09
V3	28	5.03
NPS1	17	4.05
NPS1a	5	6.41
NPS2	45	4.95
NPS2a	4	5.33
NPS3	16	4.89
NPS3a	15	5.21
E1	14	0.74
E2	20	0.91
S1	7	3.87
S2	28	5.63
S3	7	3.25
S4	20	4.75
S5	4	4.02
FRe1	19	5.47
FRe2	5	6.76
CB1	10	5.68
CB1a	7	5.33
CB2	15	5.73
CB2a	10	5.13
R1	10	2.27
R2	16	2.41
R3	5	6.48
R4	16	3.45
R4a	10	3.85
R4b	10	3.63
R5	31	8.03
R5a	31	6.87
R6	27	4.77
R7	4	5.29
FC1a	15	2.70
FC1	7	2.56

*Tabella 1 – Distribuzione della pendenza della spiaggia;*

## **SCHEDA 11: FATTORI MORFOLOGICI e MORFOMETRICI**

Parametro SPIAGGIA 2 (Ampiezza spiaggia)

<b>COD</b>	<b>N. SEZIONI misurate</b>	<b>Ampiezza MEDIA SPIAGGIA (m)</b>
G1	28	39
G2	22	36.5
G3	12	23
G4	24	21
G5	20	27
G6	8	32.5
V1	16	18.5
V2	14	25.5
V3	28	14.5
NPS1	17	18.5
NPS1a	5	58
NPS2	45	26.5
NPS2a	4	64
NPS3	16	36
NPS3a	15	44.5
E1	14	191
E2	20	198
S1	7	89.5
S2	28	34
S3	7	13.5
S4	20	13
S5	4	7.5
FRe1	19	10
FRe2	5	3.5
CB1	10	58.5
CB1a	7	35.5
CB2	15	34
CB2a	10	23
R1	10	82.5
R2	16	81.5
R3	5	51
R4	16	47.5
R4a	10	44.45
R4b	10	63
R5	31	21
R5a	31	36
R6	27	34
R7	4	86.5
FC1a	15	24
Rc1	7	137.5

*Tabella m – Distribuzione dell'ampiezza della spiaggia;*



## SCHEDA 12: FATTORI MORFOLOGICI e MORFOMETRICI

Parametro DUNA 4 (“ID”, Indice di discontinuità)

COD	Direz. DUNA (°N)	ID_Coeff
G1	14.569	0.02
G2	39.531	0.09
G3	17.202	0.03
G4	61.136	0.08
G5	12.444	0.01
G6	44.553	0.06
V1	12.304	0.02
V2	50.973	0.12
V3	459.761	0.24
NPS1	54.544	0.06
NPS1a	4.876	0.04
NPS2	318.931	0.34
NPS2a	39.515	0.39
NPS3	116.547	0.12
NPS3a	59.229	0.20
E1	54.486	0.12
E2	170.339	0.21
S1	23.041	0.10
S2	150.300	0.18
S3	NO	NO
S4	NO	NO
S5	NO	NO
FRe1	33.455	0.02
FRe2	0.000	0.00
CB1	25.645	0.07
CB1a	17.169	0.06
CB2	1090.500	0.67
CB2a	38.330	0.10
R1	136.837	0.21
R2	411.638	0.37
R3	317.933	0.34
R4	81.722	0.07
R4a	32.077	0.03
R4b	55.737	0.02
R5	77.143	0.09
R5a	167.928	0.32
R6	89.296	0.03
R7	NO	NO
FC1a	NO	NO
Rc1	NO	NO

Tabella n – Distribuzione dell'ampiezza della spiaggia;

### **SCHEDA 13: FATTORI MORFODINAMICI**

Parametro SISTEMA SPIAGGIA-DUNA (Bilancio evolutivo)

COD	BILANCIO EVOLUTIVO NETTO (VARIAZIONE AREALE) 2000-2008 [m <sup>2</sup> /m]
	G1
G2	-32.10
G3	-55.57
G4	7.94
G5	-17.98
G6	-4.09
V1	-26.54
V2	-5.36
V3	-27.31
NPS1	-28.08
NPS1a	-25.47
NPS2	-7.26
NPS2a	-11.56
NPS3	2.82
NPS3a	12.08
E1	46.00
E2	32.00
S1	8.44
S2	-20.15
S3	-47.73
S4	-42.73
S5	-30.87
FRe1	-6.28
FRe2	-8.56
CB1	-4.40
CB1a	-6.21
CB2	-7.01
CB2a	-4.47
R1	7.74
R2	10.12
R3	17.30
R4	5.45
R4a	4.61
R4b	-6.41
R5	32.41
R5a	22.45
R6	22.92
R7	-6.09
FC1a	-6.59
Rc1	-10.01

*Tabella o – Distribuzione del bilancio evolutivo (somma tra i singoli bilanci di duna e spiaggia) lungo i vari tratti in esame;*

## **SCHEDA 14: FATTORI BIOLOGICI**

Parametro VEGETAZIONE (Densità di copertura)

COD	Direz. DUNA (°N)	Copertura
		Vegetazione (%)
G1	41	64.97
G2	77	53.55
G3	90	89.63
G4	103	57.31
G5	93	55.57
G6	113	60.44
V1	49	78.27
V2	23	35.08
V3	26	91.25
NPS1	9	69.76
NPS1a	18	69.21
NPS2	3	76.93
NPS2a	8	51.29
NPS3	0	85.49
NPS3a	349	29.96
E1	348	85.91
E2	341	66.51
S1	330	48.89
S2	323	51.33
S3	330	10.98
S4	343	41.40
S5	320	37.53
FRe1	350	36.09
FRe2	0	43.60
CB1	13	76.97
CB1a	342	63.59
CB2	0	70.18
CB2a	0	69.74
R1	345	89.95
R2	347	51.27
R3	342	50.07
R4	341	38.50
R4a	342	24.56
R4b	342	87.82
R5	350	75.34
R5a	350	89.27
R6	342	41.71
R7	348	68.21
FC1a	330	42.03
Rc1	313	50.31

*Tabella p – Distribuzione dei valori di densità vegetazionale (rapporto tra l'area dunare e l'area occupata dalla vegetazione) lungo i vari tratti in esame;*

## SCHEDA 15: FATTORI BIOLOGICI

Parametro VEGETAZIONE 2 (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*)

COD	NDVI ( <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> )	StdDev
G1	3.46E-01	0.210
G2	3.45E-01	0.207
G3	3.45E-01	0.208
G4	3.46E-01	0.207
G5	3.44E-01	0.207
G6	3.44E-01	0.207
V1	4.54E-01	0.317
V2	3.90E-01	0.253
V3	4.55E-01	0.318
NPS1	3.41E-01	0.187
NPS1a	3.87E-01	0.234
NPS2	3.41E-01	0.188
NPS2a	3.53E-01	0.201
NPS3	4.39E-01	0.287
NPS3a	4.06E-01	0.254
E1	3.35E-01	0.187
E2	3.38E-01	0.190
S1	3.82E-01	0.234
S2	3.48E-01	0.214
S3	2.50E-01	0.116
S4	2.49E-01	0.115
S5	2.50E-01	0.116
FRe1	3.46E-01	0.211
FRe2	3.46E-01	0.211
CB1	2.97E-01	0.181
CB1a	2.99E-01	0.183
CB2	3.41E-01	0.225
CB2a	4.80E-01	0.364
R1	3.92E-01	0.276
R2	3.89E-01	0.274
R3	3.90E-01	0.274
R4	4.00E-01	0.284
R4a	3.94E-01	0.278
R4b	4.90E-01	0.284
R5	2.95E-01	0.263
R5a	4.90E-01	0.267
R6	3.66E-01	0.263
R7	3.96E-01	0.294
FC1a	3.76E-01	0.274
Rc1	3.38E-01	0.235

Tabella q – Distribuzione dell'Indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) lungo i vari tratti in esame, derivati anch'essi all'interno di una fascia di rispetto di 100m oltre i limiti dell'apparato dunare;

## SCHEDA 16: FATTORI ANTROPICI

Parametro ANTROPIZZATO 1 (Densità di copertura)

COD	Direz. DUNA (°N)	DENSITA' ANTROPICA [%]
G1	41	2.31
G2	77	0.00
G3	90	0.00
G4	103	0.00
G5	93	0.00
G6	113	0.00
V1	49	0.00
V2	23	14.18
V3	26	4.00
NPS1	9	5.42
NPS1a	18	40.09
NPS2	3	15.91
NPS2a	8	50.25
NPS3	0	26.65
NPS3a	349	40.48
E1	348	26.43
E2	341	39.15
S1	330	16.03
S2	323	0.39
S3	330	0.00
S4	343	0.00
S5	320	0.00
FRe1	350	0.00
FRe2	0	0.00
CB1	13	11.97
CB1a	342	7.89
CB2	0	11.75
CB2a	0	5.92
R1	345	1.19
R2	347	17.68
R3	342	30.68
R4	341	14.25
R4a	342	17.25
R4b	342	40.06
R5	350	3.68
R5a	350	11.43
R6	342	0.20
R7	348	9.65
FC1a	330	18.00
Rc1	313	17.45

Tabella r – Distribuzione della densità di antropizzazione lungo i vari tratti in esame, derivati anch'essi all'interno di una fascia di rispetto di 100m oltre i limiti dell'apparato dunare;

## **SCHEDA 17: FATTORI ANTROPICI**

Parametro ANTROPIZZATO 2 (Tipologia di copertura)

<b>COD</b>	<b>Direz. DUNA (°N)</b>	<b>USO SPAZI COSTIERI</b>
G1	41	0
G2	77	0
G3	90	0
G4	103	0
G5	93	0
G6	113	0
V1	49	0
V2	23	1
V3	26	1
NPS1	9	2
NPS1a	18	2
NPS2	3	3
NPS2a	8	3
NPS3	0	3
NPS3a	349	3
E1	348	2
E2	341	2
S1	330	2
S2	323	1
S3	330	0
S4	343	0
S5	320	0
FRe1	350	0
FRe2	0	0
CB1	13	3
CB1a	342	3
CB2	0	2
CB2a	0	2
R1	345	2
R2	347	2
R3	342	2
R4	341	3
R4a	342	3
R4b	342	2
R5	350	0
R5a	350	1
R6	342	0
R7	348	3
FC1a	330	3
Rc1	313	3

*Tabella s – Distribuzione dei valori di utilizzo degli spazi costieri, per tutti gli apparati considerati, derivati anch'essi all'interno di una fascia di rispetto di 100m oltre i limiti dell'apparato dunare;*