

*Università degli Studi di Napoli Federico II*  
*Facoltà di Scienze MM. FF. NN*

**DOTTORATO DI RICERCA**

**ANALISI E MODELLAZIONE DEI SISTEMI AMBIENTALI**

*XIX CICLO*

*ANALISI DELLE VARIAZIONI INDOTTE SULLE COSTE DALLE  
OPERE DI DIFESA E DALLE TECNOLOGIE DI RIPRISTINO DEI  
LITORALI SABBIOSI*

**Candidata**  
**Dott.ssa Carmela Petrosino**

**Relatore**  
**Ill.mo Prof. T. De Pippo**

**Co-relatore**  
**Ill.mo Prof. M. Fedi**

## INDICE

- <i>Prefazione</i>	
<i>Obiettivo della ricerca, articolazione del programma e metodologie utilizzate</i>	IV
- <i>Introduzione</i>	VI
<b>PARTE I : DEFINIZIONI E PRINCIPI</b>	
1. <b>La conoscenza dell'ambiente costiero</b>	10
2. <b>Ricostruzione del quadro evolutivo del sistema costiero</b>	12
3. <b>Analisi dei fattori, fenomeni e processi geomorfici</b>	13
4. <b>Variazione della linea di riva</b>	14
5. <b>Parametri continentali</b>	15
6. <b>Parametri marini</b>	18
7. <b>Principi di gestione e strategie d'intervento</b>	20
8. <b>Valutazione dell'erosione e metodologie di intervento</b>	22
9. <b>Valutazione del rischio</b>	26
10. <b>Considerazioni sull'utilizzo della fascia costiera</b>	28
11. <i>Driving forces</i> agenti sull'ambiente costiero	31
12. <b>Riferimenti normativi</b>	36
<b>PARTE II : IDENTIFICAZIONE DEI SITI</b>	
1. <b>Scelta dei siti <i>campione</i></b>	41
2. <b>Caratterizzazione geomorfologica, sedimentologica e biocenotica dei siti</b>	45
2.1. <i>Metodologie di studio</i>	45
2.2. <u>Alassio</u>	49
2.3. <u>Ostia</u>	52
2.4. <u>Ischia</u>	58
2.4.1. <i>Inquadramento territoriale della fascia costiera campana</i>	58
2.4.2. <i>Caratterizzazione geomorfologica e sedimentologica dell'area indagata</i>	61
2.4.3. <i>Caratterizzazione biocenotica dell'area indagata</i>	68
2.5. <u>Procida</u>	69
2.6. <u>Ferrara</u>	74

2.6.1. <i>Inquadramento territoriale della fascia costiera emiliano-romagnola</i>	74
2.6.2. <i>Caratterizzazione geomorfologica e sedimentologica</i>	78
3. <b>Trasporto solido e processi di erosione in atto nei litorali esaminati</b>	82
3.1. <b><u>Ostia</u></b>	87
3.2. <b><u>Ischia</u></b>	90
3.3. <b><u>Procida</u></b>	97
3.4. <b><u>Ferrara</u></b>	99
1. <b>Interventi antropici a difesa dei litorali</b>	102
4.1. <b><u>Alassio</u></b>	114
4.2. <b><u>Ostia</u></b>	116
4.3. <b><u>Ischia</u></b>	119
4.4. <b><u>Procida</u></b>	124
4.5. <b><u>Ferrara</u></b>	126
<b>PARTE III : APPLICAZIONE DELLA GEOMETRIA FRATTALE</b>	
1. <b>Utilizzo dell'analisi frattale</b>	144
2. <b>Metodologia applicata</b>	146
3. <b>Caratterizzazione frattale della costa e interpretazione geomorfologia</b>	152
4. <b>Considerazioni conclusive</b>	162
<i>Riferimenti bibliografici</i>	166

## ***Prefazione***

### ***Obiettivo della ricerca, articolazione del programma e metodologie utilizzate***

Sulla base del concetto che la spiaggia costituisce un momento di equilibrio dinamico, concetto che il più delle volte è estraneo all'uomo che ha, piuttosto, un'idea statica di equilibrio, questo studio è indirizzato all'analisi e alla previsione delle modifiche della linea di riva e dei fondali connessi alle opere ubicate nelle aree che controllano l'equilibrio fra gli apporti solidi alle spiagge e l'azione dei fenomeni meteomarini (mareggiate, correnti di deriva, ecc.), quali i manufatti e gli interventi lungo i corsi d'acqua e le strutture in riva al mare.

L'obiettivo proposto nei tre anni del Corso di Dottorato di Ricerca è migliorare lo stato di conoscenza di alcune aree costiere campione, puntando essenzialmente ad analizzare le variazioni indotte sulla costa da differenti opere di difesa e da differenti tecnologie di ripristino dei litorali sabbiosi, come il drenaggio e il ripascimento con sabbie marine.

Sulla base degli studi fino ad oggi pubblicati e dei dati tuttora disponibili in letteratura geologica, geomorfologica e sedimentologica, sono state condotte ricerche più approfondite volte a comprendere meglio gli aspetti morfodinamici nel breve, medio e lungo termine di alcuni sistemi costieri. Sono stati registrate le principali opere di difesa costiera utilizzate in Italia; è stata fatta una rassegna dei principali effetti benefici o distruttivi prodotti da esse; sono state individuate, spesso fuori dall'Italia, le opere di difesa più efficaci dal punto di vista ambientale, estetico ed economico; sono state fatte proposte di miglioramento delle tecnologie di difesa dei litorali.

In sintesi, gli obiettivi rincorsi nei tre anni di ricerca si possono ricondurre ai seguenti prodotti:

- 1) esame delle opere installate a difesa delle coste italiane con particolare riferimento alle conseguenze indotte da ripascimento e drenaggio artificiali su aree costiere campione;
- 2) analisi degli effetti apportati dall'utilizzo delle innovative tecnologie di ripascimento e drenaggio artificiali su alcune aree campione in Italia;

- 3) osservazione delle variazioni della linea di costa nell'ultimo cinquantennio dal confronto tra carte batimetriche storiche e analisi batimetriche condotte nell'ultimo anno;
- 4) determinazione della dimensione frattale di forme del territorio emerso e sommerso, di estensione locale e regionale, e interpretazione in chiave geomorfologica su aree campione;
- 5) individuazione dei processi geomorfici primari e secondari e degli interventi antropici responsabili delle eventuali differenze o convergenze dei valori di dimensione frattale dei morfotipi delle aree campione analizzate.

La ricerca è stata pertanto suddivisa nelle differenti fasi di attuazione di cui sopra, distribuite nei singoli anni del triennio nel seguente modo: nel corso del primo e del secondo anno di attività sono state effettuate ricerche approfondite su aree campione mediante la bibliografia storica e recente e rilievi *in situ* (punti da 1 a 3); durante il terzo anno del progetto, invece, sono state condotte comparazioni dei risultati ottenuti per la definizione della ricostruzione morfoevolutiva dei differenti paesaggi costieri basata sulla dimensione frattale delle diverse componenti analizzate (punti da 3 a 6).

In particolare gli ultimi due punti hanno il fine di individuare, mediante la discriminazione del grado di irregolarità geometrica degli elementi fisici del rilievo, i processi primari e secondari che hanno contribuito alla genesi complessa di alcune forme costiere emerse e sommerse. Inoltre, attraverso il confronto tra i risultati conseguiti, si tenterà anche di ricostruire la storia dei processi geomorfici naturali ed antropici che hanno controllato il modellamento dei litorali sabbiosi.

## ***Introduzione***

Il problema della protezione dei litorali sta assumendo negli ultimi anni un carattere strategico per lo sviluppo economico della fascia costiera. Infatti, l'erosione costiera è sempre più frequentemente un fenomeno allarmante che spesso impedisce lo sviluppo di attività turistiche e ancor più spesso interferisce pesantemente con la pianificazione urbanistica del territorio costiero.

È comunque evidente come le spiagge non possono essere considerate un territorio più o meno stabile da sfruttare senza alcun riguardo.

Il modellamento del paesaggio costiero è un fenomeno complesso interattivo, in quanto governato da numerosi processi dinamici mutuamente legati tra loro in modo non lineare che, alla luce delle moderne conoscenze geografico-fisiche, è errato semplificare e trattare secondo la teoria classica dell'equilibrio.

In questi sistemi ambientali di transizione, estremamente sensibili e dominati da una fisica del non equilibrio, ciascun elemento fisico, biotico e di genesi antropica interagisce con quello contiguo, contribuendo spesso ad accelerare la dinamica dei processi geomorfici.

I litorali sabbiosi, poi, essendo costituiti da materiale sciolto, quindi mobile, subiscono una continua evoluzione per l'azione dinamica del mare.

Risulta evidente che, anche al fine di attuare una corretta gestione e salvaguardia dell'ambiente costiero, sia necessario conoscere a fondo i processi, i fattori ed i fenomeni agenti e come essi si distribuiscano nel tempo e nello spazio.

In particolare, nella verifica dei processi in atto lungo un litorale è indispensabile analizzare la morfologia e la litologia della spiaggia emersa e dei fondali marini prospicienti. Infatti, queste ultime influenzano notevolmente il moto ondoso incidente e le correnti da esso generate attraverso fenomeni di riflessione, diffrazione e rifrazione sul fondo, mentre la presenza di differenti strutture antropiche può condizionare i processi indotti dalle ondazioni e dalle stesse correnti marine.

Oltre al naturale ciclo stagionale di erosione (inverno) e di ripascimento (in estate), una spiaggia può essere soggetta a fenomeni erosivi a lungo termine per cause naturali o

antropiche. Tra le cause naturali si possono distinguere l'innalzamento del livello medio marino per eustatismo o scioglimento dei ghiacciai, la riduzione delle piene fluviali nei periodi di siccità, le condizioni eccezionali delle onde e dei sovralti di tempesta, la dispersione dei sedimenti verso il largo in *canyon* sottomarini. Molto più frequenti e disastrose sono le cause antropiche tra cui possono essere incluse la subsidenza indotta, la diminuzione degli apporti solidi fluviali per la stabilizzazione dei versanti e per la costruzione degli sbarramenti, l'incremento dell'agitazione ondosa per la realizzazione delle opere marittime riflettenti o per l'approfondimento dei fondali, l'estrazione diretta della sabbia dai corsi d'acqua o dalle stesse spiagge, l'interruzione del trasporto litoraneo per la costruzione dei porti oppure delle opere di difesa, l'abbattimento delle dune costiere (naturale serbatoio della spiaggia) per l'urbanizzazione della fascia litoranea.

È da tener presente che qualsiasi opera a mare costituisce un ostacolo al libero propagarsi dell'onda con cui interagisce dando luogo a effetti di vario genere. Gli interventi che hanno determinato il ripascimento nella fascia da proteggere allo stesso tempo hanno incrementato il rischio di erosione nei tratti di litorale limitrofi. Un'opera di protezione limitata ad un tratto breve di litorale in erosione può aggravare, infatti, i fenomeni erosivi in atto o addirittura innescarne di nuovi sulle rive adiacenti non tutelate e il cui bilancio di apporto e di asporto dei sedimenti registrerà in negativo il mancato arrivo del materiale non più eroso nella parte protetta, quindi sottratta alla naturale dinamica del trasporto litorale.

È stato osservato che gli interventi di difesa delle coste vengono realizzati in seguito a vistosi arretramenti della linea di riva. Questo parametro geomorfologico che corrisponde alla riduzione di ampiezza della spiaggia emersa, è significativo nella tendenza evolutiva del settore costiero, ma non bisogna dimenticare che costituisce la tappa finale di un processo erosivo iniziato molto prima nel tratto di spiaggia sommerso compreso tra la linea di riva e la zona dei frangenti.

Ciò significa che fino ad oggi, nella maggior parte dei casi, gli interventi di difesa sono stati effettuati non al primo accenno del fenomeno che si vuole contrastare, ma quando si era ormai nella sua fase finale. Perciò è stato adottato, per necessità, un metodo operativo che non è il migliore dal punto di vista tecnico e della prevenzione. È noto, infatti, che

l'arretramento della linea di riva è sempre preceduto da un progressivo aumento della pendenza dei bassi fondali antistanti. Questo fenomeno costituisce il segno precursore di una tendenza alla destabilizzazione della fascia costiera.

Al fine di perseguire l'obiettivo proposto nel progetto di ricerca – vale a dire raggiungere nell'arco dei tre anni del Corso di Dottorato un miglioramento dello stato di conoscenza di alcune aree costiere campione, puntando essenzialmente ad analizzare le variazioni indotte sulla costa da differenti opere di difesa e da differenti tecnologie di ripristino dei litorali sabbiosi, come il drenaggio e il ripascimento con sabbie marine – sono state effettuate minuziose indagini cartografiche, rilevamenti morfologici, geologici e sedimentologici, un'analisi dei fenomeni di erosione e osservazione dei vari interventi antropici sulle aree scelte come campione e, infine, sono stati scelti alcuni dei siti campione per l'applicazione dell'analisi frattale con l'obiettivo di individuare, attraverso il grado di irregolarità geometrica delle linee di costa, i processi primari e secondari che hanno contribuito e concorrono alla loro genesi nonché alla loro evoluzione morfologica.

## **PARTE I**

### **DEFINIZIONI E PRINCIPI**

## **1. La conoscenza dell'ambiente costiero**

Uno studio che si prefigga di pervenire a conclusioni attendibili sulle tendenze evolutive del litorale deve tener presente che la comprensione di un fenomeno locale è legata alla comprensione dei fenomeni a più ampia scala. In quest'ottica il degrado che si manifesta in una zona, può avere cause assai remote in un territorio molto più distante: ed è proprio lì che bisogna operare l'intervento affinché esso risulti veramente efficace. D'altro canto gli interventi causano degli effetti non solo nel luogo in cui si attuano, ma fanno sentire la loro influenza in tutto il paraggio collegato. Bisogna dunque procedere dal generale al particolare, perché solo conoscendo le condizioni al contorno risulta possibile intervenire puntualmente. I fattori che entrano in gioco sono a grande scala, in quanto interessano tutto il bacino o, addirittura, l'intero globo, come ad esempio la variazione del livello medio marino (innalzamento medio di 1.1 mm/anno; Pirazzoli, 1986), Difficile verificare quantitativamente le modifiche del livello marino collegate al termoeustatismo, ma sicuramente l'instaurarsi di un periodo caldo contribuisce ad accentuare il fenomeno trasgressivo. Studi effettuati nel corso degli anni (La Monica e Landini, 1983) permettono di stabilire che la variazione di 1°C nella temperatura media del mare comporta la variazione di 1 m del livello medio marino.

Parimenti, l'incremento della concentrazione di CO<sub>2</sub> atmosferica ha inciso nella variazione del livello marino, come è possibile che siano avvenute variazioni del clima meteomarinico (mareggiate più frequenti e con maggior potenziale erosivo) come segnalato da alcuni autori in diverse parti del globo (Marotta e Vicinanza, 2001). Anche la diminuzione di piovosità, e quindi del trasporto solido e liquido dei fiumi, come quella verificatasi a partire dall'800, rientra in questa categoria.

Altri fattori, sia naturali che antropici, possono avere una dimensione a piccola scala ed interessare solamente aree ben definite e ristrette. Tra questi possiamo ricordare gli interventi che riducono le portate dei singoli fiumi e le opere marittime, che alterano la dinamica dei sedimenti trasportati lungo riva. Da uno studio condotto da Paskoff (1985) risulta che su scala globale il 70% delle spiagge è in arretramento e solo il 10% in

avanzamento. A scala nazionale uno studio condotto su 2470 km di litorale (La Monica e Landini, 1983) solo il 5% è in accrescimento, contro il 45% in netto arretramento. Il rimanente 50% presenta una situazione di relativa stabilità soprattutto in virtù di interventi di difesa operati a mare.

## **2. Ricostruzione del quadro evolutivo del sistema costiero**

Le ricerche preliminari sono state volte a definire le tendenze evolutive di breve e lungo termine del sistema ambientale costiero.

È stata effettuata la raccolta di dati e di documentazione storica circa eventi morfodinamici occorsi negli ultimi secoli, ed in particolare negli ultimi cinque decenni, sia presso Enti sia presso emeroteche e biblioteche.

Inoltre, è stato condotto lo studio di aerofotogrammetrie e carte topografiche di varie date, completato dall'esame sul campo di singolari evidenze morfologiche relitte e da un confronto tra i dati ricavati.

### **3. Analisi dei fattori, fenomeni e processi geomorfici**

È stato avviato lo studio dei rapporti spazio-temporali tra le trasformazioni del paesaggio costiero emerso e sommerso, per la discriminazione dei periodi di avanzamento ed arretramento della linea di riva, ed i possibili eventi causativi, tra i quali le variazioni climatiche di breve periodo, gli interventi antropici sui corsi d'acqua e sugli ambienti costieri, la coltivazione di cave, la costruzione di sbarramenti fluviali, la cementificazione e derivazione degli alvei, i disboscamenti e le riforestazioni, le impermeabilizzazioni estensive in seguito alla costruzione di strutture ed infrastrutture, l'irrigidimento impositivo di alcuni tratti costieri.

#### **4. Variazione della linea di riva**

Il processo di incessante modellamento del litorale può divenire sintomatico di squilibrio qualora il movimento della linea di riva da oscillatorio, attorno ad una configurazione d'equilibrio (bilancio nullo), divenga sensibilmente traslatorio verso mare (litorale in accrescimento). Viceversa se la componente dello spostamento della linea di riva risulta rivolta verso terra si ha un litorale in erosione.

Molto spesso, per contrastare quest'ultima situazione, vengono avviati studi ed interventi atti a salvaguardare i beni costieri. Le indagini partono dall'esame dell'evoluzione storica del tratto costiero, per spiegare il fenomeno dell'erosione litorale ed analizzano i processi, che determinano "le componenti della costa".

Le analisi delle tendenze lineari, semplici in apparenza, sono assai complesse. Un primo problema da affrontare è quello di verificare se la dinamica della linea di riva costituisce un'indicazione valida del comportamento della costa e se fornisce una buona indicazione del responso della costa ai processi costieri, sia a breve che a lungo periodo. Le registrazioni della variazione della linea di riva sono segnali che mettono in evidenza differenti processi e tendenze.

È necessario che vi sia una coerenza spaziale e temporale dei dati e che la lunghezza delle registrazioni sia in relazione con quella dei tempi dei fenomeni in esame (Simeoni e Tessari, 2004). È inoltre indispensabile che i risultati siano letti con una capacità scientifica che tenga conto della complessità e dell'interazione fra i processi ed i fenomeni costieri. Occorre che le tendenze evolutive siano viste come segnali di variazioni a più ampia scala ed associate all'evoluzione dei parametri climatici, meteomarini, biologici, sedimentologici, antropici, ecc.

## **5. Parametri continentali**

Per comprendere l'evoluzione delle spiagge che bordano le pianure alluvionali, come quella ferrarese, ad esempio, non bisogna dimenticare che esse rispecchiano le vicissitudini dei fiumi che le alimentano. Incrementi di portata solida dei fiumi costruiscono nuovi delta o incrementano la superficie di quelli già esistenti e contemporaneamente alimentano le spiagge ad essi connesse (aree interfociali). Una diminuzione del materiale trasportato dai fiumi determina, per contro, uno smantellamento dell'apparato di foce, che può avvenire assai rapidamente, e l'instaurarsi progressivo di fenomeni erosivi lungo le spiagge da essi alimentati. Queste ultime rispondono in ritardo al diminuito apporto, perché lo smantellamento dell'apparato del delta fornisce loro, ancora per qualche tempo, i sedimenti necessari alla loro alimentazione. Le cause che determinano una diminuzione della portata solida dei fiumi possono essere numerose. Fra le principali e più comuni sono da annoverarsi la costruzione di dighe e sbarramenti che trattengono grandi quantità di sedimento e nel contempo regolarizzano il regime idraulico dei fiumi. La regimazione delle acque determina una laminazione delle piene, cioè una diminuzione dei valori massimi di portata. Poiché la maggior parte del materiale viene trasportata durante le piene, ciò diminuisce la capacità di trasporto solido totale del fiume. Un'altra causa può essere ricercata nella diminuzione della portata liquida, che essendo correlata alla solida, determina un minor attivo di sedimento lungo il litorale.

In genere questo avviene per il prelievo di grandi quantità d'acqua per usi agricoli o industriali, specie nei mesi più caldi.

Anche il riempimento per colmata di aree paludose, con sedimenti provenienti dai fiumi, o le sistemazioni idrogeologiche e forestali dei bacini montani, che diminuiscono l'erodibilità dei suoli, possono incidere notevolmente sulla portata solida dei corsi d'acqua.

In sintesi, l'evoluzione della costa dipende da fattori che hanno origine molto lontana dal mare.

In questo modo il prelievo indiscriminato di sabbie e ghiaie dagli alvei fluviali può determinare i medesimi effetti. Queste asportazioni sono particolarmente dannose perché

rivolte soprattutto alle ghiaie e alle sabbie, che rappresentano una frazione ridotta del trasporto solido dei fiumi. Non bisogna dimenticare che proprio questi sono i materiali che costituiscono le spiagge e non tanto i fanghi (silt e argilla). Inoltre le cavità provocate dalle escavazioni in alveo possono determinare delle zone a contro pendenza sul letto fluviale che facilitano esondazioni locali, e, talvolta, rappresentano un ricettacolo per i materiali reflui di discarica. I danni ai litorali sono particolarmente gravi e immediati laddove l'asportazione avvenga presso la foce o addirittura dalla spiaggia stessa. Lo spostamento della foce fluviale o la variazione di efficienza dei rami deltizi determinano la formazione di nuove aree deltizie e lo smantellamento di quelle preesistenti. Questo fenomeno, anche se apparentemente produce medesimi effetti (tratti costieri in erosione ed altri in avanzamento), è profondamente diverso dal precedente, poiché non vengono modificate le portate solide dei fiumi, che subiscono solo una diversa distribuzione (Regione Lazio, 2001). La variazione della linea di riva è in stretta connessione con lo sviluppo delle dune costiere e la loro preservazione, a testimonianza dell'importanza della conservazione di entrambi gli ambienti. Infatti, le dune e la vegetazione che in esse si instaura rappresentano una naturale difesa contro l'erosione eolica e contro le mareggiate più violente.

L'importanza dei cordoni dunari si esplica non solo in termini di difesa di anormali sopraelevazioni del livello marino, ma anche in termini di compenso delle alternanze stagionali per l'approvvigionamento sedimentario locale.

Altre cause come la subsidenza e le opere marittime possono innescare fenomeni erosivi, ma in genere hanno un peso solo locale, cioè interessano solo aree notevolmente più piccole. La subsidenza equivale ad una fittizia perdita di materiale in seguito all'abbassamento relativo della terra rispetto al mare ed è un fenomeno che fa parte del naturale sviluppo delle pianure alluvionali. Dopo la deposizione vi è una progressiva compattazione del materiale, più o meno veloce a seconda della natura e della dimensione media dei granuli. A volte questo fenomeno, di per sé non preoccupante, può subire una brusca accelerazione, ad esempio per un eccessivo emungimento di falde acquifere della zona costiera, a piccole profondità. Nei confronti dell'arretramento di spiagge a debole pendenza essa può quindi rappresentare un fattore fra i più rilevanti di abbassamenti di pochi centimetri. Ad esempio in alcuni tratti costieri italiani, con tassi di abbassamento

valutati tra 1.5 e 3 mm/anno, si è valutato che negli anni '70 vi fosse stata una perdita di 600.000 m<sup>3</sup>/anno di materiale sabbioso (Preti et al., 1993).

## **6. Parametri marini**

Sono state, altresì, avviate indagini che hanno consentito l'acquisizione di parametri tipici dell'ambiente marino costiero: meteomarini, idrologici, biologici, morfologici, sedimentologici, ecc. Tutti questi aspetti sono importanti per un'esatta analisi del sistema idrosedimentario.

La conoscenza del comportamento dei sedimenti è un requisito essenziale per poter predire l'effetto di interventi antropici su un ecosistema costiero. Il controllo dei processi di erosione, trasporto e deposizione di questi materiali è estremamente complesso. Un intervento antropico nel sistema costiero, che vari la distribuzione ed il trasporto dei sedimenti, produce spesso effetti nocivi su tutto il sistema. Non è raro che progetti ingegneristici in zone con elevata torbidità di acque, abbiano prodotto variazioni a corto e lungo termine non solo sull'evoluzione della linea di riva ma anche sui tassi di deposizione, causando variazioni sulla produttività biologica e peggiorando la qualità delle acque. Lo studio delle caratteristiche tessiturali e composizionali dei depositi di fondo mobile è estremamente utile per ricostruire la dinamica sedimentaria. Il movimento dei sedimenti, oltre che dalle caratteristiche proprie di questi materiali, dipende dalla circolazione idrodinamica, che si realizza nel sistema spiaggia emersa – spiaggia sommersa. Nell'analizzare la dinamica dei materiali bisogna tener in giusta considerazione alcuni principi basilari: il materiale che costituisce la spiaggia non vi risiede stabilmente, è destinato a rinnovarsi nel tempo; i sedimenti sono sottoposti a continua usura; le caratteristiche dei granuli sono in equilibrio con il livello energetico che agisce su di essi; i materiali conservano un record delle modalità di trasporto e deposito subite.

La localizzazione e la distribuzione dei diversi tipi di minerali, entro sedimenti di fondo marini, dipende dal tipo di rocce madri presenti nelle aree emerse e dalle condizioni climatiche, che hanno pilotato i processi di degradazione meteorica. Altri fattori, che influiscono sulla tessitura dei sedimenti, sono la direzione e forza dei movimenti che si verificano entro le masse idriche, oltre al tasso di apporto e di accumulo della componente mineralogica (Aminti e Pranzini, 1993). La combinazione delle informazioni ricavate dagli

studi dimensionali e di frequenza permettono di individuare le facies granulometriche, di stabilire il tipo di mobilitazione e trasporto dei materiali, di ricavare e tracciare gli assi di transito dei sedimenti, di individuare le principali fonti di alimentazione. Solo dopo aver accuratamente definito la dinamica idrosedimentaria dell'unità fisiografica è possibile quantificare le perdite e gli apporti di materiale, cioè effettuare un bilancio del sistema.

## **7. Principi di gestione e strategie d'intervento**

“Non esistono soluzioni certe ma soluzioni che meglio rispondono ad esigenze specifiche dell'ambiente. In alcune zone della Spagna, per esempio, (come nella spiaggia di Almazora o in quella di Pedragalejo a Malaga) la scogliera artificiale ha dato ottimi risultati, mentre altrove ha provocato alterazioni del regime litoraneo, inducendo erosioni più consistenti in altri tratti della costa o l'accumulo di sedimenti in punti non previsti. Se invece parliamo di 'ripascimento' (soluzione che prevede il 'riporto' di quantità di sabbia o ghiaia per ripristinare la spiaggia erosa), sembra funzionare solo in litorali poco estesi. In Italia, Ostia rappresenta uno dei casi di studio più interessanti per l'erosione costiera, in quanto il Comune ha posto in atto, in diversi tratti di costa, differenti soluzioni, dalla scogliera al ripascimento, al BMS. Una tecnica, quest'ultima da poco adottata anche nell'isola di Procida. In generale, l'individuazione delle criticità del fenomeno è l'elemento essenziale che solo ricerca e monitoraggio costante, nel corso degli anni, sono in grado di assicurare, permettendo l'adozione di una politica di prevenzione efficace da inquadrare nei piani di gestione della costa da parte degli organismi amministrativi regionali” (prof. Leonardo Damiani docente di Ingegneria delle Coste al Politecnico di Bari, Convegno Nazionale sul tema dell'erosione costiera, Ancona, 2002).

La gestione di un tratto costiero dovrebbe inserirsi nell'ambito di una strategia di pianificazione costiera nazionale. Dovrebbe esistere un dispositivo globale, dove a grandi linee, siano fissati i principi cui ispirare gli interventi sulla zona litorale, fatte salve situazioni particolari. Questo piano nazionale dovrebbe tracciare le direttive e definire una strategia comune, ad esempio, nei confronti dell'evoluzione della linea di riva.

Le scelte, pur essendo molteplici, possono ricondursi alle seguenti opzioni:

- a) non intervenire, per esempio, non contrastando i fenomeni erosivi;
- b) approntare una strategia di preservazione selettiva, fissando cioè dei chiari criteri che definiscano la necessità dell'intervento;
- c) conservare la linea di riva riferita ad un particolare anno ed intervenire affinché la linea di riva venga, da tale momento in poi, mantenuta inalterata;

- d) approntare una difesa generalizzata della costa favorendo, anche, l'espansione della terra verso mare.

Successivamente, i dispositivi da attuarsi nell'ambito di un'unità idrosedimentaria dovranno essere mirati in funzione del peso, della funzione, dell'importanza dei singoli tratti costieri.

Nella progettazione degli interventi bisogna sempre dare importanza all'elemento spaziale, ad esempio, valutando attentamente l'area entro cui l'inserimento di un'opera creerà ripercussioni. Si dovranno inoltre proiettare i costi e benefici dell'intervento in una scala temporale, per lo meno decennale, valutando attentamente gli investimenti necessari sia per l'opera che per il suo mantenimento. Si dovrà inoltre porre particolare attenzione all'integrazione delle opere nell'ambiente circostante, in un contesto ecologico. Limitare, ad esempio, l'impatto visivo degli interventi e fare in modo che siano inseriti nell'architettura paesaggistica ambientale del sito nel rispetto del funzionamento dell'opera. Infine, ma non certamente ultimo per importanza, è necessario definire l'opportunità economica di difendere l'area costiera e di predisporre un ordine prioritario di azione in funzione delle urgenze.

## 8. Valutazione dell'erosione e metodologie di intervento

In ambito marittimo si riscontrano due tipologie di erosioni:

- *breve termine*, generalmente di tipo reversibile, dovuta alle componenti trasversali del moto ondoso e che comporta il moto dei sedimenti verso il largo associato alle mareggiate, tipico delle “spiagge a pacchetto” (pocket beach);
- *a lungo termine*, di più difficile reversibilità, dovuta al trasporto longitudinale lungo la spiaggia.

Il secondo caso è certamente quello più grave. Infatti l'erosione strutturale, progressiva e permanente, è in genere provocata dall'intervento umano che introduce una discontinuità nella linea di costa. In tale caso il volume eroso è funzione dell'altezza, del periodo e dell'angolo di attacco dell'onda sulla spiaggia.

Qualunque sia la tipologia di intervento per la difesa dei litorali, è opportuno ricordare come qualsiasi opera realizzata lungo la costa costituisce un ostacolo al libero propagarsi del moto ondoso, e pertanto può dar luogo ad effetti di vario genere, causando alterazioni della costa in zone limitrofe a quella di intervento per cui è necessario pensare gli interventi non come opere singole ma come singola componente parte in n sistema di difesa dell'intera fascia litoranea.

Le difese costiere possono distinguersi, a seconda dell'azione svolta nei confronti del fenomeno erosivo, in difese *passive* e *attive*.

Le difese di tipo passivo assicurano solo la protezione del territorio costiero, mentre quelle attive producono anche fenomeni di progradazione della linea di costa.

Le difese possono ancora suddividersi in *rigide*, *morbide* e *miste* in relazione alla deformabilità offerta all'azione del mare. Le opere sono anche distinte per le caratteristiche geometriche funzionali in continue e discontinue, permeabili e impermeabili.

Le opere di difesa disposte parallelamente alla riva nella parte emersa della spiaggia a diretta difesa di abitazioni, strade e ferrovie lungomare, opere *aderenti*, appartengono alla categoria dei sistemi *passivi-rigidi*.

Queste strutture sono adatte per lo più a interventi di emergenza e di breve durata data la loro economicità, rapidità di esecuzione e immediata protezione garantita dall'opera, però non garantiscono alcuna protezione alla spiaggia.

Tra le opere di difesa *attive-rigide* sono comprese sia quelle pressoché parallele alla riva, dette *barriere frangiflutti distaccate*, sia quelle ad essa ortogonali, dette *pennelli* (Montgomery, 1999).

Le *barriere frangiflutti distaccate* vengono realizzate parallelamente ai fronti d'onda incidenti; possono essere realizzate con una serie di scogliere poco emergenti o completamente sommerse (*barriere soffolte*). La profondità di imbasamento coincide con la profondità di frangimento delle onde incidenti il litorale.

Le barriere generalmente sono tracimabili dalle onde più alte e l'effetto più visibile sul litorale adiacente è la formazione del tombolo (un'estroflessione della spiaggia che tende a congiungersi alla barriera).

I *pennelli* vengono utilizzati nei litorali in erosione con forte trasporto solido longitudinale. Questi sono strutture più o meno permeabili ortogonali alla riva, che trattengono parte del materiale in transito creando in genere un avanzamento della spiaggia sopraflutto e un arretramento sottoflutto.

Alla categoria degli interventi attivi di tipo morbido appartengono invece i *ripascimenti artificiali*, versamenti di sabbia di opportuna granulometria estratta da cave di prestito in mare o a terra.

Per limitare gli interventi di manutenzione di una spiaggia artificiale si possono combinare i versamenti di materiali con opere di contenimento realizzando i *ripascimenti protetti o controllati*.

Per poter definire al meglio la tipologia di intervento sul litorale è fondamentale, come primo passo, identificare il tipo di erosione a cui è soggetto il litorale.

Il primo passo è la valutazione dei processi morfologici che interessano l'area tramite l'analisi dei dati disponibili e, dove applicabile, tramite la simulazione dell'evoluzione morfologica costiera utilizzando apposita modellistica matematica.

Successivamente è necessario valutare e indicizzare i parametri che definiscono l'ambito territoriale in cui ricade l'intervento (studio socio-economico, analisi costi benefici e criteri di urgenza).

Infine vanno distinte le opere di difesa a cui viene richiesto la stabilizzazione della linea di costa da quelle da cui è lecito attendersi una progradazione della spiaggia stessa, secondo lo schema seguente (Montgomery, 1999):

- i *pennelli* sono consigliabili dove la deriva litoranea è ben definita per ridistribuire lungo il litorale gli apporti fluviali in ragione diversa da quella derivante dal regime ondoso e dalla configurazione attuale del litorale;
- i *frangiflutti foranei* sono da consigliare dove l'escursione di marea ed il trasporto litoraneo sono modesti;
- i *rivestimenti* sono in genere da sconsigliare per la stabilità della spiaggia;
- le *difese parallele* non sono consigliabili dove, la conformazione della costa è rapidamente variabile;
- i *ripascimenti artificiali* sono da consigliare su piccola scala dove il trasporto è modesto, dove il trasporto litoraneo è consistente, i ripascimenti quasi sempre sono da abbinarsi ad opere di contenimento al fine di ridurre i comunque presenti fenomeni di trasporto.

Nell'ambito della progettazione delle opere di difesa costiera vanno valutati molteplici fenomeni ed interazioni.

Nel caso di opere di tipo rigido sono preponderanti i seguenti aspetti (Regione Lazio, 2001):

- la stabilità idraulica dell'opera, in particolare la stabilità della mantellata dell'opera;
- la stabilità del piede lato mare dell'opera a causa dei fenomeni di scalzamento al piede dovuti al moto ondoso parzialmente riflesso;
- la verifica della portanza e dei cedimenti del terreno di fondazione;
- la stabilizzazione della spiaggia naturale e/o artificiale interessata dalle opere: si deve consentire un certo grado di dissipazione del moto ondoso incidente,

l'innescò della dinamica che consenta la formazione del tombolo, il contenimento delle perdite di materiale in direzione trasversale alla spiaggia, la diminuzione del trasporto solido in direzione longitudinale alla spiaggia;

- il contenimento degli effetti sul litorale sottoflutto.

Nel caso di interventi morbidi i punti a cui prestare particolare attenzione sono:

- la stabilità dinamica delle opere, attuando un corretto ripascimento che conduca ad una disposizione della linea di battigia il più possibile ortogonale alla direzione di provenienza del moto ondoso, predeterminata statisticamente;
- contenimento delle perdite e definizione del programma di manutenzione;
- contenimento degli effetti indotti sul litorale sottoflutto.

## **9. Valutazione del rischio**

Dopo l'acquisizione degli elementi che consentono l'inquadramento geomorfologico, idrodinamico, storico è necessario formulare delle ipotesi sulle tendenze evolutive dell'area costiera.

Questa fase di previsione è estremamente delicata e pericolosa perché trasferisce elementi e tendenze del passato e del presente nel futuro. Per un'attendibile previsione bisognerebbe innanzitutto essere certi che i dati raccolti siano validi, cioè significativi, e che lo saranno ancora nel futuro ed essere coscienti che le proiezioni perdono di attendibilità man mano che ci si spinge più lontani nel tempo. Per raccogliere dati del passato e del presente, per previsioni e proiezioni sul futuro, sempre più si utilizzano dei modelli, essenziali per una corretta gestione litorale. Infatti non è facile determinare i processi costieri dominanti, stimare le loro interazioni possibili e quantificare i loro effetti. Alcuni sistemi costieri sono difficili da modellizzare per le interazioni dei processi fisici e fisicochimici, e per quelle legate alle attività biologiche (ad esempio le piane di marea). Inoltre devono essere sostenuti da appropriate misure sul terreno che spesso mancano, e che sono generalmente costose e lunghe. Con i dati ricavati dallo studio conoscitivo è possibile attuare una semplificazione del problema stabilendo il rischio per singoli tratti costieri, che consente di creare delle priorità di intervento (De Pippo et al., 2006). Il rischio può essere inteso come la probabilità che le conseguenze economiche e sociali di un certo stato di pericolosità superi una determinata soglia, oppure si può intendere come l'insieme di effetti attesi non desiderati su uomini o cose. Esso è dato dal prodotto della pericolosità, cioè la possibilità che si verifichi un certo evento, per la vulnerabilità (la capacità di resistere e/o opporsi) per il valore, che può essere quantificato in termini di costi materiali ed umani. Il valore può quindi essere mitigato agendo sia sui confronti della vulnerabilità che sulla pericolosità.

Le operazioni di mitigazione dei rischi, cioè di prevenzione, implicano una valutazione di costi e benefici. Si dovranno individuare livelli di garanzia e di protezione sia per l'uomo che per l'ambiente. In alcuni casi si tratterà di scegliere una soglia di rischio, che

necessariamente sarà tanto più onerosa quanto più elevata; in altri casi si dovrà stabilire una scala di priorità. La pericolosità, così intesa, è fortemente condizionata non solo dai fattori fisici naturali, ma anche dagli interventi umani che direttamente od indirettamente possono incidere sulla fascia costiera. Non bisogna dimenticare, inoltre, che in un prossimo futuro è prevedibile una ulteriore crescita della pressione e della sovrapposizione dell'uso del litorale, che potranno alterare notevolmente i *trends* naturali di evoluzione.

## **10. Considerazioni sull'utilizzo della fascia costiera**

La conservazione e l'utilizzazione della fascia costiera dipende direttamente dalle politiche territoriali e, spesso, più che di barriere contro gli effetti del mare od altri agenti naturali, si sente il bisogno di regole, che disciplinino le attività umane. E' necessario che nella gestione ambientale venga fatta una corretta "contabilità ambientale", dando maggior peso al vincolo ecologico. In campo economico molte attività intraprese nella fascia costiera rappresentano un fallimento economico del tratto costiero, costruendo opere inefficienti si determinano dissesti il cui costo supera notevolmente i benefici ottenuti. L'esistenza di beni assai difficilmente quantificabili in termini monetari, quali le caratteristiche qualitative ed estetiche dell'ambiente, ha spesso indotto ad escludere dal bilancio economico il degrado e lo sfruttamento delle risorse ambientali non controllati. Appare dunque evidente che un vero sviluppo dell'economia passa attraverso la difesa dell'ambiente. Essa può essere perseguita solo con lo sviluppo di adeguate tecniche di previsione e di prevenzione, a loro volta basate sulla conoscenza scientifica profonda ed aggiornata del continuo evolversi dell'ambiente stesso. E' evidente che una programmazione così complessa dovrà tener conto di fattori economici, sociali ed ambientali, che spesso saranno in contraddizione. Ciò determina che il risanamento, anche di limitati tratti costieri, deve nascere da indagini multidisciplinari. Esse forniranno gli elementi per la realizzazione di attenti piani di sviluppo, strutturati in modo organico e non episodico, che chiaramente individuino, ad esempio, il peso e l'opportunità di nuovi insediamenti urbani.

Nell'operare sulla fascia costiera italiana spesso si riscontrano mancanze di informazione, di convergenza e di coordinamento tra gli organismi istituzionalmente preposti alla sua gestione e controllo. Non bisogna, infatti, dimenticare che la validità di un intervento dipende dalla conoscenza dell'ambiente in cui sarà inserito; appare evidente che interventi fatti con carattere di urgenza mancano di una approfondita valutazione sugli eventuali squilibri generati. A tal proposito è bene ricordare come, ad esempio, in Olanda, già dal 1965, sia stato avviato un programma, che annualmente effettua rilievi della

spiaggia emersa e sommersa lungo profili predefiniti e distanti fra loro circa 200-250 m (Gragnaniello & Previati, 2003). Questi monitoraggi consentono di acquisire un notevole grado di conoscenza del litorale, in modo da operare con interventi preventivi e non a posteriori.

Un approccio corretto alla gestione della costa dovrebbe tener conto che la concomitanza di cause, sia a scala globale sia locale, concorre a determinare, per il prossimo futuro, situazioni regressive delle spiagge. Si dovrebbe quindi operare cercando di non disperdere energie e denaro per contrastare sempre e comunque i fenomeni erosivi, ma di attuare interventi atti a regolare e guidare l'attuale tendenza. Ad esempio nelle spiagge non urbanizzate si dovrebbe permettere l'edificazione solo nelle aree dove i fenomeni erosivi sono assenti o meno intensi. In alternativa si potrebbe operare in queste aree tenendo una larga fascia di rispetto non edificabile. Gli edifici dovrebbero distare dalla battigia per lo meno 30 volte la velocità media annuale d'arretramento della spiaggia (Paskoff, 1985) poiché questo limite, in base a controlli periodici, subirà prevedibili spostamenti verso l'entroterra si dovrà non intervenire a difesa dei manufatti, ma semplicemente abbandonarli. Per quest'ultima ragione è consigliabile destinare il tratto edificabile del litorale più prossimo al mare ad interventi di minor costo e con maggior possibilità di ristrutturazione e/o conversione, quali ad esempio campeggi, giardini, parchi e passeggiate. Contemporaneamente dovrebbero essere condotti interventi atti a ristabilire le portate a mare dei fiumi e, se possibile, per lo meno stabilizzarle. Interventi sui bacini fluviali (sbarramenti sui fiumi, prelievi d'acqua, variazioni del regime idraulico, ecc.) dovrebbero essere effettuati conteggiando i dissesti ambientali ed economici che essi provocheranno sulle spiagge. Un altro provvedimento necessario riguarda la chiusura delle attività estrattive negli alvei fluviali che depauperano in modo selettivo le portate solide. Molto spesso, anche per futili motivi, sono state distrutte e/o parzialmente sbancate vaste aree di dune costiere. Operando in tal modo spesso si dimentica che le dune, le spiagge e l'avanspiaggia sono tre elementi solidali dello stesso ambiente.

Intervenire su uno si avranno ripercussioni sugli altri due. Le dune, infatti, costituiscono una riserva di sedimento che viene utilizzata per rifornire la spiaggia in casi di tempesta.

Alcuni interventi dovranno quindi essere programmati per ricreare le dune, dove ancora è possibile, e per restaurare e salvaguardare quelle esistenti.

Nell'eventualità di costruzioni di opere a mare di difesa non bisogna dimenticare come questi interventi, se mal progettati, creano sovente delle situazioni ambientali critiche sul litorale e spesso rappresentano soluzioni temporanee al problema dell'erosione. A volte gli interventi pongono delle questioni di "moralità pubblica": ad esempio opere di difesa poste a salvaguardia di litorali a basso reddito e scarso valore. E' assai difficile comprendere l'impiego di denaro pubblico per queste opere onerose, anche per la periodica manutenzione di cui necessitano, quando non sussistono particolari urgenze né necessità di sanare situazioni drammatiche. Particolare cura dovrà esser posta nella gestione delle aree di foce fluviale perché esse rappresentano la chiave di volta dei litorali. Bisogna assolutamente evitare che in queste aree siano costruite opere marittime (moli, scogliere foranee, ecc.) che possano catturare i sedimenti portati dai fiumi, perché in tal modo si interromperebbe l'alimentazione alle spiagge adiacenti. Nella scelta della tipologia delle opere dovrebbero essere preferenziati quegli interventi di difesa che non hanno un impatto violento sul litorale e che meno lo irrigidiscono. Ad esempio bisognerebbe valutare attentamente la possibilità di intervenire con ripascimenti artificiali, eventualmente contenuti entro opere soffolte, oppure verificare attentamente l'efficacia di opere di difese sommerse. Questi interventi rappresentano soluzioni più naturali, che presentano un minor impatto ambientale perché non interrompono bruscamente la dinamica idrosedimentaria del paraggio (Progetto MESSINA-Interreg IIIC, 2006).

## 11. *Driving forces* agenti sull'ambiente costiero

Il modellamento delle terre emerse è fondamentale determinato dall'azione degli agenti della esodinamica ed in particolare, nel nostro sistema bioclimatico, dall'azione delle acque. La dinamica evolutiva dei versanti riflette quindi i rapporti tra le loro caratteristiche litologiche, il clima e la copertura vegetale.

I processi morfogenetici si sviluppano attraverso le fasi dell'alterazione, dell'asportazione dei materiali alterati, del loro trasporto verso valle, della sedimentazione e, in tempi geologici, della lapidificazione. Nelle prime due di tali fasi si sintetizzano i processi dell'erosione i quali si sviluppano essenzialmente sui versanti ed in maniera ridotta lungo gli alvei dei corsi d'acqua (Cavazza, 2002).

Le fasi del ciclo dell'erosione possono svilupparsi in maniera diversa nel tempo e nello spazio al variare dell'erosività degli agenti dell'erosione, della erodibilità dei terreni, del livello del mare, ove tendono a trasferirsi i prodotti della demolizione dei rilievi. Il mare, secondo una classica definizione del Ferronière (Fairbridge, 1968), è un consumatore e non un produttore di sedimenti, per cui l'apporto terrigeno consegnato alle foci dei corsi d'acqua viene distribuito lungo i litorali o al largo a seconda dell'alternare prevalere delle correnti prossimali o di quelle distali.

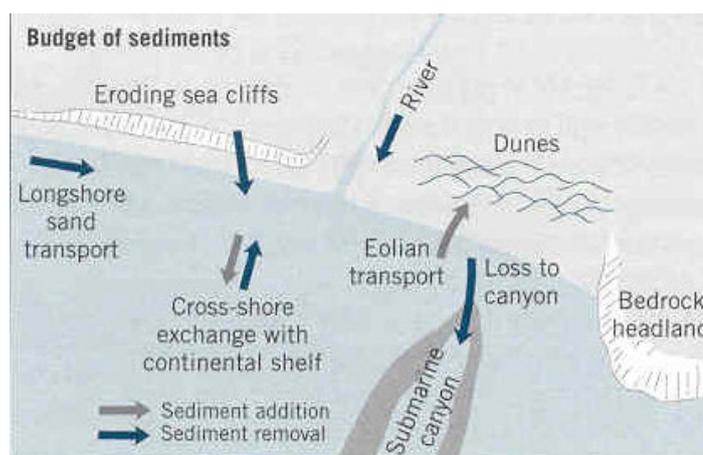


Fig. 1 – Schema del bilancio sedimentario (da Press & Siever, 1998)

Ampliando quindi il sistema in cui si svolgono i processi di demolizione dei rilievi delle terre emerse fino ai fondali della piattaforma continentale, è possibile collegare i processi tipici dell'ambiente terrigeno a quelli radicalmente differenti dell'ambiente costiero, mettendone così in risalto i vincoli ed i condizionamenti. Ed è proprio nelle fondamentali differenze tra i processi di trasporto dei sedimenti in ambiente prima continentale e poi marino, che sembra possibile intravedere un nuovo approccio più ampio e olistico nello studio delle erosioni dei versanti e delle coste, ovvero, con più ampie prospettive, nuove politiche generali per la difesa del suolo e la difesa delle coste, tra loro saldamente interconnesse.

La costa, linea di confine tra terra e mare, ha subito nel tempo gli impatti collegati al ciclo dell'erosione che, per le cinture sabbiose, comprende le tre fasi dell'erosione vera e propria, del trasporto e del deposito dei sedimenti. Il ciclo si determina in rapporto con la dinamica della colonna d'acqua sulla quale agiscono le onde, le maree, le correnti costiere, i fenomeni climatici e geodinamici ordinari ed i cambiamenti globali. Le dinamiche di ciclo sono state favorevoli, nel lungo termine, alla fase di deposito ed accrescimento delle cinture costiere sabbiose fino alla metà del XX secolo. La tendenza si sta invertendo per effetto delle pressioni antropiche e dei cambiamenti del livello del mare per effetto serra.

Anche se i fenomeni naturali, di natura tanto eccezionale che stagionale, hanno rilievo sui processi di erosione, gli effetti più gravi a medio termine sono di origine antropica. Le cause di maggior rilievo della rapida destabilizzazione dell'ambiente costiero sono, infatti:

- l'intensa antropizzazione delle coste a fini turistici ed industriali, con smantellamento delle dune per fare posto ai centri balneari, villaggi residenziali e porticcioli turistici;
- l'impoverimento dell'apporto solido dei fiumi al mare per l'indiscriminato asporto di materiale dal letto dei corsi d'acqua e per la presenza di dighe di ritenuta;
- la subsidenza accentuata per l'estrazione di idrocarburi e acqua in zone troppo vicine al mare.

I fattori di pressione legati alle attività umane si determinano in funzione delle modalità di gestione del territorio a ridosso della costa, delle opere a mare, del deficit dell'apporto detritico dai bacini fluviali determinato dall'impoverimento dell'apporto terrigeno, dalla

regimazione dei corsi d'acqua per finalità energetiche ed agricole e da alcuni fattori di origine locale legati alla morfologia delle coste. I fenomeni di subsidenza costiera che incidono sulla linea della spiaggia possono avere origine naturale, ma spesso sono prodotti da interventi umani sulla falda acquifera o dalle attività estrattive di gas naturale e petrolio (Comune di Ravenna, 1996).

Le zone costiere subiscono pressioni ambientali di origine antropica superiori al normale per effetto del modello di sviluppo e di consumo attuale proprio perché sono i luoghi dove la gente ama vivere e lavorare e dove si svolge una grande percentuale delle attività ricreative e turistiche, che si sommano ad una quantità aumentata di attività di commerci e di scambi. I fattori di pressione sono determinati da un'accentuata spinta all'urbanizzazione, dalla tendenza alla violazione delle leggi ed all'abusivismo edilizio, dalla preferenza per l'infrastrutturazione trasportistica in aree costiere (strade, ferrovie), quando non addirittura sulla linea di costa, dai porti, dal turismo, dall'agricoltura, dalla pesca, dall'industria, ivi attirata anche da un più facile smaltimento di reflui e deiezioni, dagli impianti energetici che trovano acqua a portata di mano. Una schematica raccolta delle pressioni e degli impatti originati dai diversi settori di interesse economico è nella tabella seguente:

<b>ATTIVITA' UMANE (DRIVING FORCES) PRESSIONI IMPATTI SULL'AMBIENTE</b>
<b>Urbanizzazione, Trasporti</b>
Variazioni d'uso del territorio, porti, aeroporti, strade, ferrovie, congestione delle infrastrutture di trasporto, dragaggi e scarichi portuali, perdite di idrocarburi, rifiuti, prelievi idrici, reflui e scarichi in mare. Perdite di habitat e biodiversità, danni paesaggistici, abbassamento delle falde idriche, intrusioni di acqua salata, inquinamento del mare, eutrofizzazione, introduzione di specie aliene, erosione e cementificazione delle coste, rischi per la salute dell'uomo.
<b>Agricoltura</b>
Restituzione del territorio ad usi agricoli, uso di pesticidi e fertilizzanti, prelievi idrici, prelievi degli <i>stock</i> di risorse viventi, opere di canalizzazione dei corsi d'acqua, dighe, impoverimento dei sedimenti e del patrimonio forestale. Perdite di habitat e biodiversità, inquinamento del mare, eutrofizzazione, cattura dei sedimenti, impoverimento degli apporti di acqua al litorale, erosione costiera.
<b>Turismo, Attività ricreative</b>
Costruzione di porti e infrastrutture per il turismo marino, cambio d'uso del territorio, urbanizzazione, congestione dei trasporti, prelievi idrici, produzione di rifiuti e reflui. Perdite di habitat e biodiversità, disturbo agli ecosistemi, danni paesaggistici, abbassamento delle falde idriche, intrusioni di acqua salata negli acquiferi, inquinamento del mare, eutrofizzazione, rischi per la salute dell'uomo.
<b>Pesca, Acquacoltura</b>
Costruzione di porti e banchine, stabilimenti per il trattamento del pesce con reflui e rifiuti, uso di attrezzature per la pesca industriale. Overfishing, danneggiamento di specie non commerciali, rifiuti e oli pesanti sulle spiagge, inquinamento del mare, eutrofizzazione, introduzione di specie aliene, danni agli ecosistemi ed alle comunità acquatiche.
<b>Industria, Energia</b>
Cambi d'uso del territorio, centrali elettriche, estrazione di risorse naturali, reflui di processo, acque di raffreddamento, opere fluviali, sbarramenti a mare. Perdite di habitat e biodiversità, danni paesaggistici, inquinamento del mare, eutrofizzazione, rischi per la salute dell'uomo, cattura di sedimenti, diminuito apporto di acqua al litorale, erosione costiera.

**Tab. 1 – Impatto antropico sugli ecosistemi naturali.**

Dalla fine degli anni '50 ad oggi, la fascia costiera è stata, dunque, utilizzata come un bene inesauribile e indistruttibile su cui fosse possibile gravare con un numero illimitato di opere, senza curarsi delle conseguenze, invece di amministrarlo come un bene prezioso che doveva durare nel tempo per permettere una migliore resa economica (Cocco et al., 1986). I successivi interventi, con la costruzione delle più svariate opere di difesa, sono stati spesso del tipo “tampono”, sotto la spinta dell'urgenza. Si tratta, cioè, di opere realizzate in tempi diversi, in aree limitate, che hanno rimandato la soluzione del problema senza risolverlo.

Oggi sulle coste sono presenti opere di difesa di tutti i tipi, costruite per le più svariate esigenze, ma troppo spesso non sono il risultato di una progettazione oculata secondo una

visione generale del problema, bensì sono realizzate nella vana ricerca di un'opera di difesa "universale" che risolve tutti i problemi.

## **12. Riferimenti normativi**

L'evoluzione dei litorali rappresenta una delle incessanti attività di modellamento cui la morfologia terrestre è sottoposta, in seguito alla mutevolezza degli equilibri naturali. Se è vero che tali fenomeni possono prescindere dalla presenza dell'uomo, in quanto retti da leggi fisiche e precise ed assolute, è anche vero che dagli interventi antropici possono risultare fortemente condizionati.

In Italia, la spiaggia era vista come luogo di fruizione marginale; solo dopo la prima guerra mondiale iniziò la massificazione nel suo uso. Già nel 1933 il Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.) promuoveva indagini sulla variazione della linea di riva per studiare, tra l'altro, i fenomeni erosivi in atto nella costa.

Successivamente, poiché l'arretramento della linea di riva determinava un danno economico significativo, tra il 1950 ed 1970 si ricorse in modo massiccio all'uso di opere di difesa. In tal modo si tentò di condizionare l'evoluzione delle spiagge, ma si irrigidì il sistema litorale.

Nell'ultimo secolo l'intervento dell'uomo, con le modifiche indotte dalle coltivazioni, dalla costruzione di strade e di ferrovie, dalle opere di sistemazione dei bacini imbriferi, dalle estrazioni di inerti dagli alvei, dalla costruzione di opere di sbarramento sui fiumi per molteplici usi (energetico, irriguo, difesa delle piene, ecc.) e dalla costruzione di opere a mare, ha violentemente mutato le condizioni naturali del trasporto solido a mare e lungo riva. Da questo ne deriva che gli interventi sulla fascia costiera devono riguardare anche il territorio retrostante e, quindi, rientrare nella programmazione degli interventi sui bacini imbriferi.

Lo studio del sistema costiero risulta assai complesso. Si tratta di analizzarlo nelle sue diverse componenti al fine di individuare quelle maggiormente influenti sulla sua evoluzione.

*Opere marittime, escavazione dei porti, demanio marittimo, difesa coste.* La nozione di "opera marittima" viene esplicitata nella Legge fondamentale sui LL.PP. del 20.03.1865,

n° 2248 all. F che attribuisce al Ministero dei Lavori Pubblici l'esecuzione delle "opere e lavori di costruzione e di manutenzione dei porti, dei fari e delle spiagge marittime".

In seguito, il D.P.R. 616/1977 sul trasferimento di competenze alle Regioni a statuto ordinario, ha mantenuto il significato di "opera marittima", come anche il Testo Unico dei porti del 2.04.1885, n° 3095 ed il relativo regolamento di esecuzione approvato con R.D. 26.09.1904, n° 713 (Maglia & Santoloci, 1997).

In riferimento a quanto sopra per approfondimento del D.P.R. 616/77, che trasferisce alla Regione le funzioni amministrative in materia di "opere marittime" e di "difesa delle coste", si cita l'art. 79: "Materia del trasferimento. Sono trasferite alle regioni le funzioni amministrative dello Stato e degli enti pubblici di cui all'art. 1 nelle materie «urbanistica, tranvie e linee automobilistiche di interesse regionale», «viabilità, acquedotti e lavori pubblici di interesse regionale», «navigazione e porti lacuali», «caccia», «pesca nelle acque interne», come attinenti all'assetto ed utilizzazione del rispettivo territorio" (Maglia & Santoloci, 1997).

Nel 1953 si ha l'istituzione degli Uffici del Genio Civile per le Opere Marittime alle dirette dipendenze dell'Amministrazione Centrale dei Lavori Pubblici tramite la Legge 5 gennaio 1953, n° 24 (modificata con L. 19 luglio 1959, n° 551) con competenza esclusiva su tutte le "opere marittime" ricadenti sulla fascia costiera di giurisdizione, competenza ora assai ridotta con le deleghe di competenza alle varie Regioni a statuto ordinario e con l'istituzione delle Autorità Portuali (Legge n° 84 del 28 gennaio 1994 di riordino della legislazione in materia portuale). L'art. 28 del Codice della Navigazione include nei beni del demanio marittimo anche quelli che non possono essere ritenuti direttamente destinati ai fini della navigazione (spiagge): Art. 28 – Beni del demanio marittimo *a)* il lido, la spiaggia, i porti, le rade; *b)* le lagune, le foci dei fiumi che sboccano in mare, i bacini di acqua salsa o salmastra che almeno durante una parte dell'anno comunicano liberamente col mare; *c)* i canali utilizzabili ad uso pubblico marittimo (De Filippis & Troncone, 2006).

Nella Legge italiana in materia di difesa delle spiagge n. 542 del 14 luglio 1907 (modificata dall'art. 38 del D.L.gs 7.05.1980, n° 153, convertito nella legge 7.7.1980, n° 299) i principi fondamentali espressi in merito sono condensati nell'art. 14 e possono essere così riassunti:

- per opere di difesa delle spiagge si intendono pennelli di imbonimento, dighe di protezione “ed ogni altra opera che abbia lo scopo di arrestare il processo di corrosione”;
- alla esecuzione di tale opere si provvede *soltanto* su domanda del Comune interessato ed a cura dello Stato, quando “si tratti di difendere gli abitati dalle corrosioni prodotte dal mare”;
- la spesa è per 3/4 a carico dello Stato ed 1/4 a carico del Comune interessato il quale può a sua volta cointeressare, per non oltre 1/3 della propria quota (1/12 del totale), i privati “direttamente beneficiati dalle opere eseguite”;
- la manutenzione delle opere “è obbligatoria e posta ad esclusivo carico del Comune”.

Il dettaglio procedurale e la ricchezza di contenuti della Legge 542/1907 costituiscono un punto di riferimento giuridico ancora valido e vigente.

Riguardo al punto a), si mette in particolare evidenza quanto deliberato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, circa la definizione di opere di difesa: “...*le spiagge possono dissipare efficacemente l’energia dell’onda e pertanto sono classificate fra le strutture di difesa della costa*”. Inoltre, questa legge prevedeva l’intervento automatico dello Stato laddove gli insediamenti abitativi erano minacciati dall’erosione (Provincia di Napoli, 2001; Caravita, 2005; AA.VV., 2006).

La Legge 542/1907 è, quindi, perfettamente applicabile per la realizzazione di ripascimenti a difesa di “abitati”, dove, per questi ultimi, sono da intendersi infrastrutture pubbliche e private regolarmente insediate.

Nella Legge Urbanistica nazionale n. 1150/42 gli Artt. 5 e 6 istituiscono i Piani Territoriali di Coordinamento che con il D.P.R. 8/1972 divengono Piani Territoriali Regionali (Piano Territoriale Regionale L. n. 1150/42 e D.P.R.n8/1972; Maglia & Santoloci, 1997).

*Le aree naturali protette.* Con la L.R. n. 33 del 1 settembre 1993 recante disposizioni in materia di “*Istituzioni dei Parchi e riserve naturali in Campania*” sono state individuate una serie di aree naturali.

Di estremo interesse risulta la disposizione di cui all'art.1 comma 5 della Legge regionale citata: “Nella tutela e nella gestione delle aree naturali protette, lo Stato, la Regione e gli Enti Locali, in armonia con le direttive statali, attuano forme di cooperazione e di intesa secondo o quanto previsto dall’ art. 81 del Decreto del Presidente della Repubblica 24 luglio 1977, n. 616 e dell’ art. 27 della Legge 8 giugno 1990, n. 142.” (Maglia & Santoloci, 1997).

Sulla gestione delle aree naturali protette è intervenuta la Legge 6 dicembre 1991 n. 394, *Legge quadro sulle aree protette*, nella quale è previsto specificatamente alle aree protette marine, che il Ministro dell’Ambiente, di concerto con il Ministro della marina mercantile, sentita la Consulta per la difesa del mare dagli inquinamenti, approva un regolamento che disciplina i divieti e le eventuali deroghe in funzione del grado di protezione necessario. Inoltre è stabilito che: “Beni del demanio marittimo e zone di mare ricomprese nelle aree protette possono essere concessi in uso esclusivo per le finalità della gestione dell’area medesima con decreto del Ministro della marina mercantile. I beni del demanio marittimo esistenti all’interno dell’area protetta fanno parte della medesima. La sorveglianza nelle aree protette marine è esercitata dalle Capitanerie di porto, ai sensi dell’articolo 28 della legge 31 dicembre 1982, n. 979” (Maglia & Santoloci, 1997).

## **PARTE II**

### **IDENTIFICAZIONE DEI SITI**

## 1. Scelta dei siti campione

Le ricerche volte alla caratterizzazione fisica del territorio rappresentano una base per lo studio multidisciplinare della fascia costiera. Sulla base di una nuova e dettagliata classificazione di tipi morfologici, sono state definite le unità morfologiche costiere tramite supporto informatico GIS (Fig. 2).

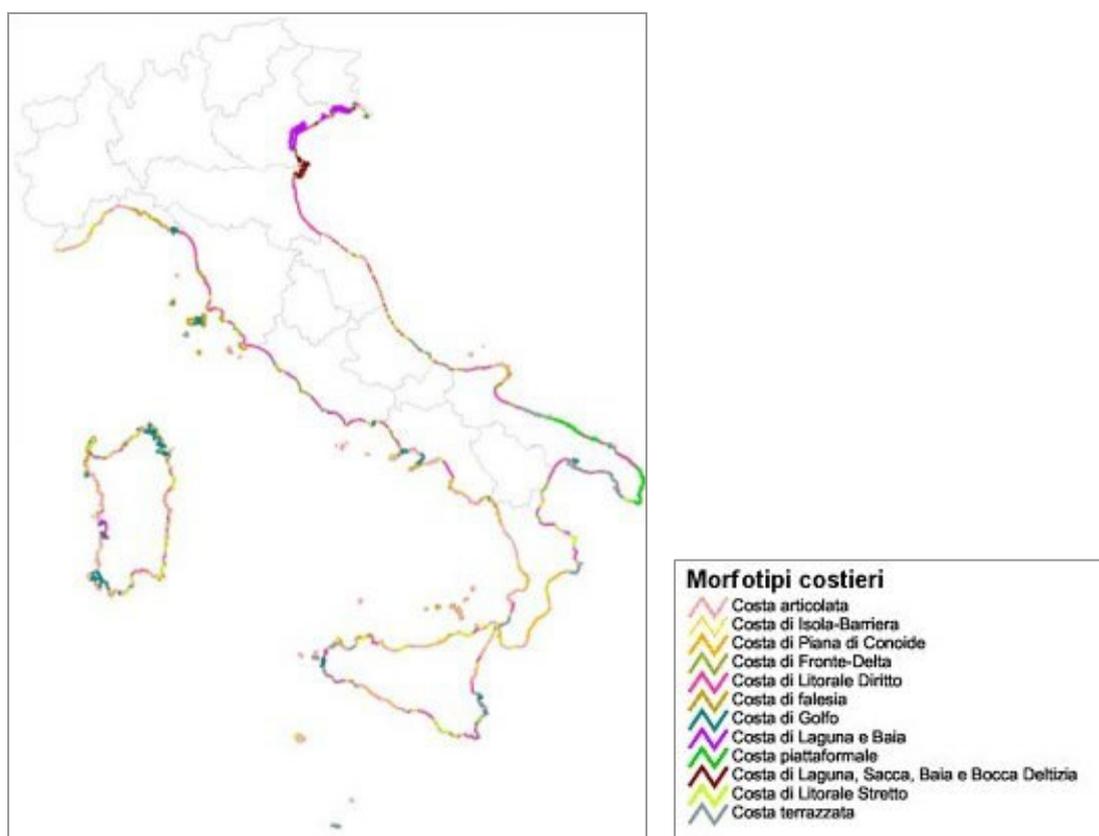


Fig. 2 – Morfotipi costieri (da Ferretti et al., 2003 modificato)

I siti campione scelti sono aree litorali italiane rappresentative dei differenti tipi geografici e costieri della nostra Penisola. Essi sono, da nord-ovest a nord-est (Fig. 3):

- **Alassio (Liguria)**
- **Ostia (Lazio)**
- **Ischia (Campania)**
- **Procida (Campania)**
- **Porto Garibaldi (Emilia Romagna).**



**Fig. 3 - Casi studio oggetto della ricerca.**

Sono stati raccolti dati bibliografici concernenti i principali aspetti ambientali, climatici, geologici, geomorfologici, sedimentologici, biocenotici e antropici della zona emersa e sommersa delle aree campione, al fine di individuare i processi erosivi o deposizionali e, attraverso l'analisi della cartografia storica, sono evidenziate le principali variazioni della fisiografia litoranea e le tendenze evolutive delle suddette aree.

**Alassio** (Savona). Il litorale ligure, da sempre importante meta per turisti da tutta Europa, è, in più punti, soggetto ad un alto tasso di erosione che minaccia la perdita di splendidi litorali. La nostra area di indagine è situata in corrispondenza dell'arenile compreso tra la struttura alberghiera "Hotel Milano" a ponente e il Pontile Bestoso a levante, sul lungomare E.Toti. L'arenile in esame è fortemente condizionato dall'elevato grado di antropizzazione.

**Ostia** (Roma). Nel Lazio l'erosione dei litorali, interessando il 45% della costa, mette a repentaglio un delicato e pregiato sistema ambientale su cui poggia parte non secondaria dell'economia regionale. L'analisi si concentrerà fondamentalmente sulla fascia litorale occidentale di Ostia (*litorale di Ponente*) dove, per contrastare gli spinti fenomeni di erosione, sono state adottate, nel corso degli anni, diverse tecniche disturbando non poco l'ambiente costiero.

**Ischia** (Napoli). L'isola più grande della provincia partenopea è, da anni, combattuta e vinta dall'erosione che ha visto interessanti fasce litorali ridursi notevolmente in estensione. Le ricerche si sono concentrate principalmente sul *litorale dei Maronti* (Comune di Barano), un'esile fascia costiera, ampia 2 km, ubicata nel settore meridionale dell'isola, compresa tra i promontori di Punta S. Angelo ad Ovest e Capo Grosso ad Est (Fig. 11). La suddetta baia rappresenta un'area di elevato valore paesaggistico e naturale nonché di richiamo turistico. Da quasi un ventennio è interessata da intensi fenomeni erosivi che hanno portato alla scomparsa quasi totale dell'arenile soprattutto nella zona occidentale, mettendo in crisi le infrastrutture turistiche dell'area. In questa zona l'erosione della spiaggia ha avuto come immediata conseguenza lo scalzamento al piede delle falesie,

non più protette, e l'attivazione di fenomeni franosi con grave pericolo sia per le persone che per le strutture antropiche poste sul litorale e sul ciglio della falesia.

**Procida** (Napoli). L'isola di Procida è collocata all'estremità settentrionale del Golfo di Napoli, nel canale che separa il promontorio di Pozzuoli dall'Isola d'Ischia. L'area esaminata è la spiaggia della Chiaiolella che occupa la costa nord-occidentale dell'isola di Procida, in particolare tra gli arenili di Ciraccio e Ciracciello.

**Ferrara**. Il territorio costiero ferrarese, se si esclude la sacca di Goro, è interamente balneabile, per una lunghezza di 23 km; si estende dai limiti della sacca di Goro, in prossimità del Lido di Volano, fino a circa 300 metri a nord della foce del canale Bellocchio, antistante le Valli di Comacchio. Il litorale che andiamo ad esaminare circonda Porto Garibaldi (FE), dal Po di Volano alla foce del Reno. Questo tratto, come tutta la costa ferrarese, negli ultimi 40 anni è stata oggetto di continui interventi antropici che hanno portato al progressivo smantellamento dei cordoni dunosi esistenti a vantaggio di insediamenti residenziali e turistici. Questa situazione associata a fenomeni quali la perturbazione delle condizioni idrogeologiche e la subsidenza ha reso particolarmente vulnerabili, in occasione di mareggiate ed acque alte, non solo le zone litoranee ma tutto il territorio che si trova sotto il livello del mare ed alla quota degli argini fluviali.

## **2. Caratterizzazione geomorfologica, sedimentologica e biocenotica dei siti.**

### **2.1. Metodologie di studio.**

Un'area costiera rappresenta un ambiente fortemente dinamico, in cui l'azione del moto ondoso e delle correnti trasversali assume un ruolo determinante. É pertanto indispensabile determinare come tali fattori agiscano nel loro complesso e come siano influenzati dalle caratteristiche morfologiche dell'area sommersa e dalla presenza di eventuali opere antropiche. Risulta evidente che, al fine di operare una corretto studio propedeutico alla salvaguardia dell'ambiente costiero, è necessario conoscere i processi agenti e come essi si distribuiscono nel tempo e nello spazio.

Come è stato ampiamente discusso in precedenza, molto spesso sistemi di protezione di infrastrutture locali comportano fenomeni di disequilibrio in vasti settori contigui. Da rimarcare che il motivo fondamentale dello scarso successo delle opere di difesa esistenti è dovuto alla mancata considerazione della deriva longitudinale dei materiali da nord-ovest a sud-est a scala regionale e delle condizioni morfodinamiche dei singoli settori sui quali si è intervenuto.

Osservandole a piccola scala, le zone costiere, anche quando rappresentano unità geologiche uniformi in quanto conseguenti ad un unico insieme di fenomeni morfostrutturali legati alla genesi dello zoccolo continentale (piattaforma e scarpata) a cui appartengono, sono caratterizzate, da un punto di vista della dinamica del litorale, da un'associazione di tratti distinti più o meno ampi. Tali tratti fanno della zona costiera sottesa una *unità fisiografica* distinta.

Una *unità fisiografica* è caratterizzata dalla particolarità che materiali costituenti il litorale presentano movimenti confinati all'interno dell'unità stessa o presentano scambi con l'esterno in misura non influenzata da quanto accade al restante litorale (Damiani et al., 1983).

Il significato ingegneristico deriva dal corollario che gli effetti di un'opera costruita sul litorale non si estendono, a breve termine, al di fuori della unità fisiografica di cui essa viene a far parte.

Se ci si limita a considerare la più piccola area che, comprendendo l'opera, abbia la proprietà di cui sopra, l'unità fisiografica viene a coincidere con l'area di influenza degli interventi in essa attuati.

I limiti dell'area possono non risultare fissi nel tempo a seguito di eventi, naturali o artificiali, che, modificando la costa, ne alterino la dinamica: ad esempio, forti erosioni o la costruzione di moli.

L'unità fisiografica rappresenta anche l'area alla quale ha significato estendere i rilievi inerenti al movimento delle sabbie.

L'identificazione dell'area può essere fatta sulla base delle cause dei movimenti: vento, onde, correnti, azione dell'uomo; oppure sulla base degli effetti dei movimenti: erosioni e depositi.

L'identificazione richiede un'individuazione seppure sommaria degli agenti dinamici (prevalenti), a cui sono connessi i movimenti, e una indicazione se questi sono influenzati dall'evoluzione del litorale. Può ritenersi, in genere, che gli apporti fluviali e la sottrazione di materiali fini verso il largo non siano influenzati dalla suddetta evoluzione.

Se per litorale si intende la spiaggia emersa e sommersa per un'estensione tale da contenere i movimenti trasversali, l'unità fisiografica è costituita in genere dal tratto di litorale compreso fra due sezioni, entro cui il trasporto longitudinale netto è nullo.

Foci di fiumi o torrenti non interrompono l'unità fisiografica, anche se il verso del trasporto litoraneo è discorde sui due lati, in quanto modifiche anche piccole su un lato della foce inducono una diversa ripartizione degli apporti fluviali e pertanto esercitano influenza anche sul lato opposto.

Ai fini dello studio del comportamento idraulico di un litorale, possono considerarsi unità fisiografiche anche quelle individuabili su brevi intervalli di tempo, ad esempio una mareggiata o una stagione; ma l'uso corrente del termine in ambito progettuale si riferisce ad intervalli di tempo comparabili con la vita delle opere, mentre in ambito geomorfologico si riferisce ad intervalli molto più lunghi.

Al crescere dell'intervallo temporale di osservazione, unità fisiografiche distinte possono fondersi, perché ad esempio si realizza una mareggiata di particolare violenza, che comporta per i sedimenti movimenti prima non realizzati.

I limiti di unità fisiografiche di vasta scala sono determinati dai moti di deriva o trasporti netti quando questi sono significanti, avendo i moti alterni effetto solo a scala inferiore.

L'identificazione dell'unità fisiografica può avvenire secondo vari procedimenti:

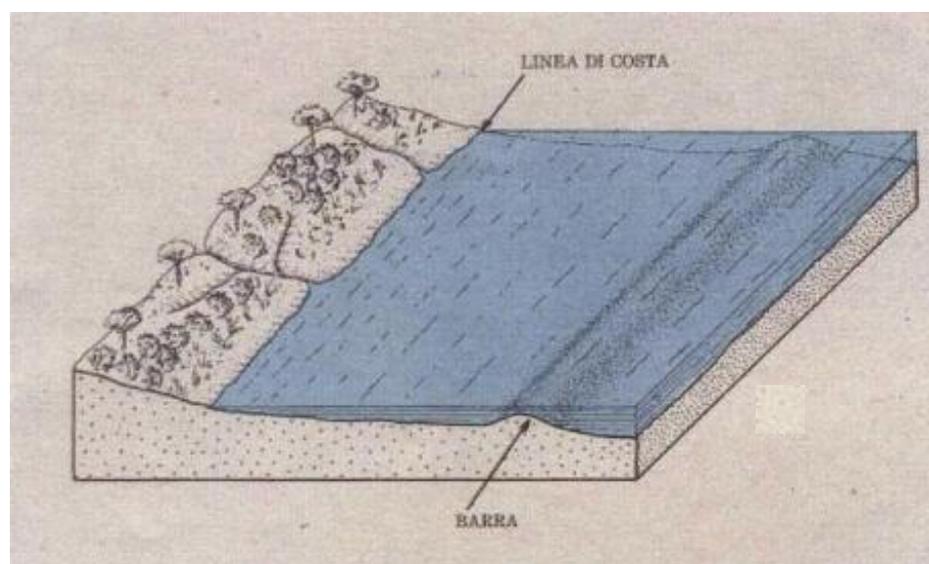
- in base alla morfologia della linea di riva;
- in base ad analisi petrografiche e sedimentologiche;
- in base al regime delle onde e delle correnti.

Una volta identificate le unità fisiografiche dei litorali campione, è stata analizzata la morfologia dei fondali prospicienti la fascia costiera: la morfologia, infatti, influenza fortemente il moto ondoso incidente e le correnti da esso generate attraverso fenomeni di rifrazione sul fondo.

Lungo le aree campione è stato necessario analizzare le geometrie dell'attuale linea di costa riferita al livello medio del mare e le principali variazioni storiche e recenti della linea di costa desumendo i dati da carte batimetriche presenti in letteratura.

È stata indicata l'eventuale presenza associazioni di fanerogame marine ed affioramenti rocciosi e di particolari strutture di fondo quali i sistemi di barre e truogoli la cui genesi è possibile collegare alla presenza di celle di circolazione secondarie prodotte dalla rifrazione del moto ondoso sul fondo marino.

A tal proposito, è opportuno specificare che è proprio la formazione di barre (*submarine bars*; Fig. 4) e truogoli (*troughs*) che differenziano le spiagge mediterranee da quelle oceaniche: le prime presentano tali strutture che rimangono sommerse anche in bassa marea, le seconde presentano *ridges* e *runnels* (King, 1949) che possiamo farli corrispondere a “barre e truogoli intertidali” (in contrapposizione a barre e truogoli “sottomarini”; Carobene & Bramati, 1975 e 1979) e che emergono durante la bassa marea.



**Fig. 4 – Rappresentazione di una barra sommersa (Press & Siever, 1998).**

## **2.2. Alassio.**

La spiaggia presa in esame si presenta con una morfologia caratterizzata da un assetto topografico pianeggiante debolmente digradante verso mare e fortemente condizionato dall'elevato grado di antropizzazione (Fig. 5). La spiaggia, in prossimità dell'Hotel Milano è separata dall'arenile di ponente da un fosso di scolo che raccoglie le acque di precipitazione afferenti al piccolo bacino idrografico retrostante mentre il limite opposto è costituito dal pontile Bestoso il quale delimita nettamente l'area di sito dall'arenile di levante. Il tratto di costa in esame è caratterizzato da una zona intertidale piana sulla quale non si sono individuati canali di marea sviluppati (Fig. 6).



**Fig. 5 - Alassio: arenile indagato.**



**Fig. 6 - Alassio: morfologia della spiaggia.**

La bassa pendenza della spiaggia emersa genera, in condizioni di alta marea e debole brezza, ristagni d'acqua paralleli alla linea di riva con la formazione di cordoni sabbiosi di separazione, i quali persistono solamente durante l'alta marea.

L'intero arenile di Alassio presenta una marcata subordinazione al trasporto eolico proveniente da venti dominanti di S-SW.

In corrispondenza della zona dei flutti montanti di alta marea (berna ordinario) le pendenze aumentano debolmente ed il sedimento di superficie è costituito prevalentemente da sabbie fini ocra e da rari resti di gusci di bivalvi.

La spiaggia emersa, formata da sedimenti superficiali prevalentemente sabbiosi (solo localmente sono presenti elementi a granulometria ghiaiosa), è soggetta all'azione eolica la quale determina trasporto di materiale e sedimentazione dello stesso in prossimità delle strutture antropiche. Tale azione, unitamente alla continua pulizia della sabbia sedimentatasi in corrispondenza delle strutture antropiche, determina la cancellazione di ogni elemento morfologico tipico della spiaggia emersa.

Procedendo verso l'entroterra le quote aumentano debolmente sino al lungomare E. Toti che attualmente chiude completamente la spiaggia emersa con un muretto di sopraelevazione della strada di circa 0,50 m di altezza.

Le fanerogame marine (del tipo *Posidonia oceanica*, *Cymodocea nodosa* – Fig. 7, *Zostera noltii*, *Halopylla stipulacea*) possono contrastare efficacemente i fenomeni erosivi dei litorali; infatti esse formano estese colonie sui fondali mobili frenando, con i propri apparati fogliari, l'azione energetica delle ondate, e catturando e fissando al fondo mediante i rizomi le particelle fini (peliti) trasportate dal moto ondoso e dalle correnti marine. La prateria di *Posidonia oceanica* è ben estesa davanti alle coste di Alassio dove appare formata da isolotti di *matte* intersecati da canali sabbiosi perpendicolari alla riva. Essa mostra segni di degrado causati da attività di pesca a strascico.

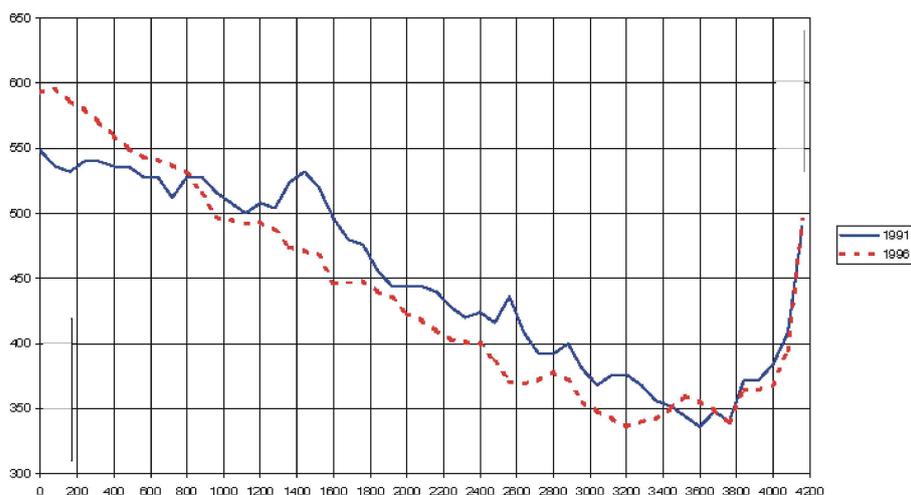


**Fig. 7 – Immagine di *Cymodocea nodosa* (la *C. nodosa* è la pianta “precursore” della *P. oceanica*: si insedia in prima istanza su tratti di fondali che poi vengono colonizzati dalla *Posidonia*.**

### 2.3. Ostia.

Situato nella fascia climatica temperata dell'Italia centrale, la fascia litoranea laziale è, dal punto di vista morfologico, caratterizzata da una costa bassa e sabbiosa con apparati dunari e retrodunari, in parte interessati da pinete. Fatta eccezione per le zone marcatamente antropizzate come Ostia, il morfotipo della fascia litoranea emersa presenta un'ampia duna che degrada dolcemente verso la spiaggia. La parte sommersa presenta una o talvolta due barre naturali.

Per l'analisi della tendenza evolutiva del litorale in esame si è fatto riferimento all'andamento delle linee di riva derivate dalla Carta Tecnica Regionale (C.T.R.) del 1991 e dal rilievo topografico e batimetrico condotto nel 1996 (TE.MA.). L'analisi di confronto condotta (Fig. 8) ha evidenziato che i fenomeni di erosione hanno interessato un ampio tratto di costa per uno sviluppo di circa 4 km con un arretramento medio di circa 25 m in 5 anni (rateo di erosione pari a 5 m/anno con una regressione massima di 65 m) a beneficio dell'estremità sud del litorale ove si registra un avanzamento medio di circa 30 m in 5 anni (rateo di accrescimento pari a circa 6 m/anno).



**Fig. 8 - Ostia: variazione della linea di riva tra il 1991 (in blu) e il 1996 (in rosso) (da Regione Lazio, 1999).**

Il litorale prospiciente l'abitato di Ostia è da anni soggetto a fenomeni di pericoloso arretramento e, a partire dagli anni '90 la Regione Lazio si è adoperata affinché non venisse persa definitivamente la spiaggia e venissero protetti edifici civili e spiagge litoranee.

Dal punto di vista sedimentologico, il litorale laziale evidenzia, nella sua parte sommersa, una composizione prevalentemente sabbiosa nella parte più prossima alla costa (spiaggia sottomarina, da 0 a -10m di profondità) dove ad un primo tratto di sabbie dal diametro compreso tra 1 e 0,250 mm si sussegue un tratto di spiaggia sommersa a granulometria più fine (diametro compreso tra 0,250 e 0,062 mm) (Fig. 9). La piattaforma continentale interna (da -10 a -50m circa) da indagini granulometriche risulta essere costituita da materiale a frazione sabbiosa >95% e, man mano che si procede verso il largo, da sabbia pelitica (frazione sabbiosa compresa tra il 95 e il 70%), pelite sabbiosa (materiale più fine; frazione pelitica compresa tra il 70 e il 95%) fino a pelite (; frazione pelitica >95%) (Regione Lazio, 1999).

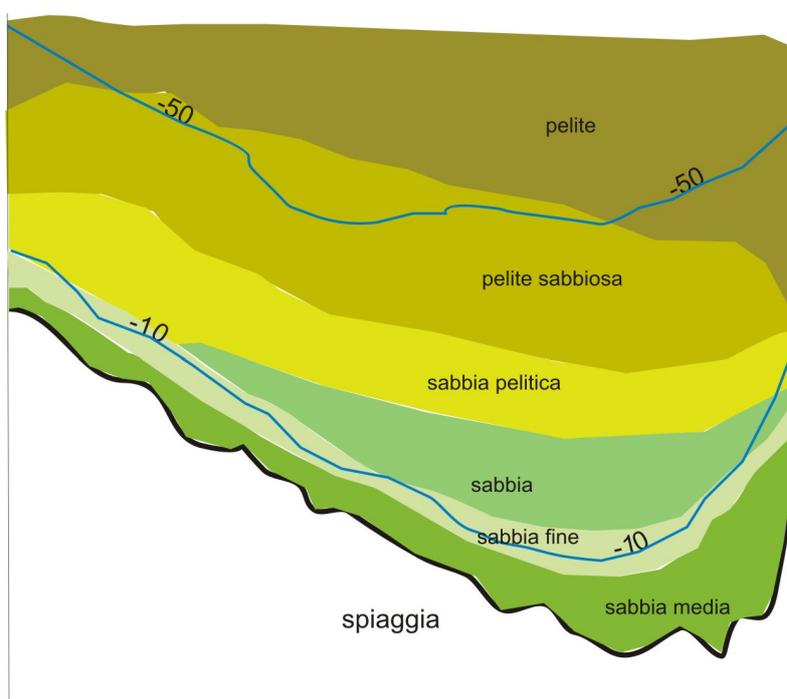


Fig. 9 - Carta della distribuzione dei sedimenti lungo il litorale di Ostia.

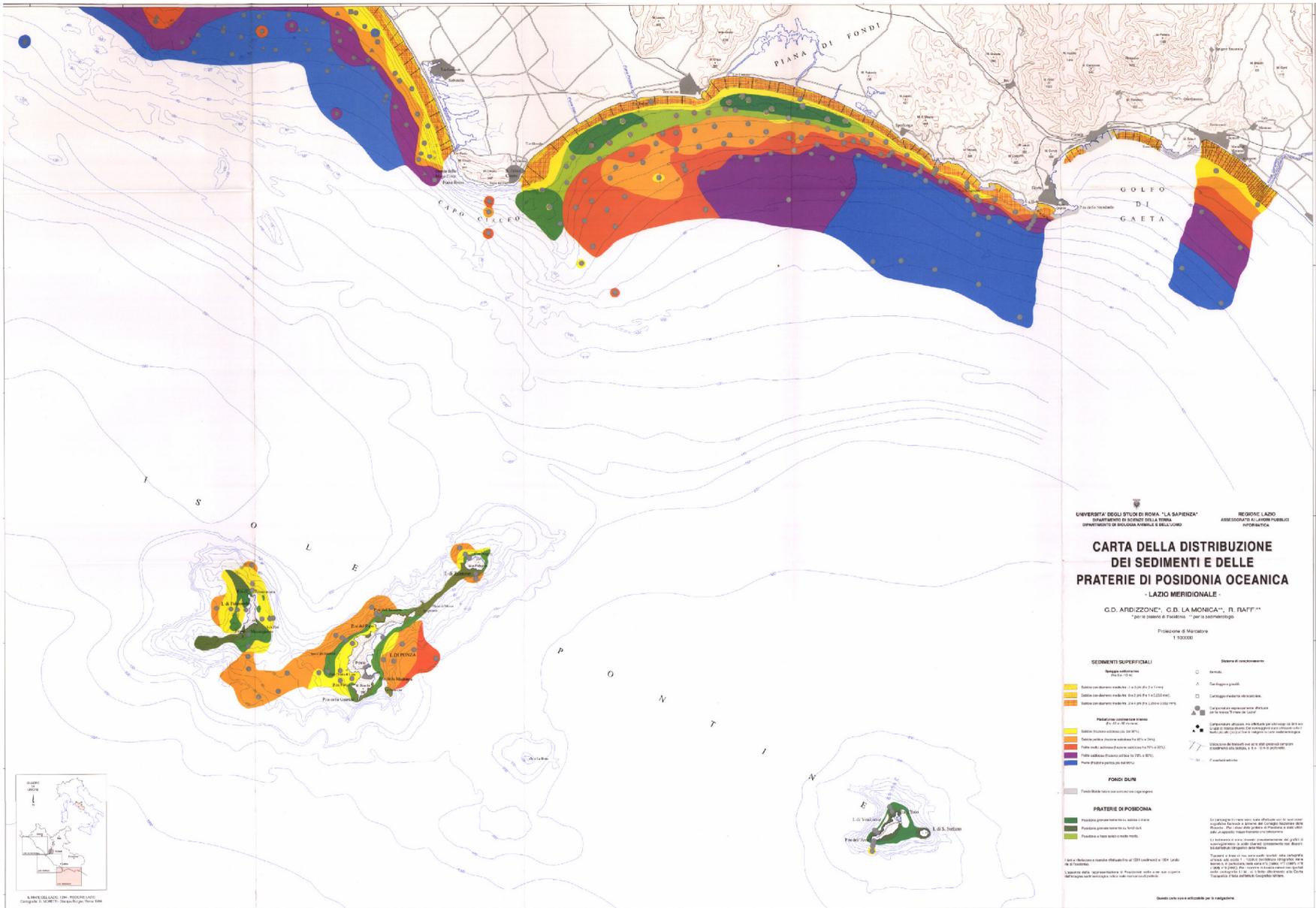


Fig. 10 - Carta della distribuzione delle praterie di *Posidonia Oceanica* lungo il litorale di Ostia.

Infine, le associazioni di *Posidonia* tipiche dell'area Tirrenica si identificano solo più a sud, oltre Capo Circeo, non interessando il tratto di litorale in esame (Fig. 10).

Sui circa 290 Km di litorale laziale (escluse isole), di cui circa 220 costituiti da spiagge, sono stati realizzati innumerevoli interventi di protezione di diversa tipologia ed efficacia che hanno modificato in maniera a volte anche molto impattante il naturale paesaggio litoraneo (Regione Lazio, 1999).

Il problema della protezione delle coste ha assunto un carattere emergenziale di esigenza sociale a partire dagli anni '60-'70 per una serie di fattori diretti ed indiretti tra cui possono essere indicati come principali (Caputo, 1988):

- ✓ decremento generalizzato del trasporto solido da parte dei fiumi per effetto di dighe, delle escavazioni di inerti dagli alvei, della protezione del suolo nell'entroterra con conseguente inversione di tendenza di molti litorali (da avanzamento a regressione);
- ✓ incremento dell'urbanizzazione della costa con distruzione delle dune (riserva naturale di sabbia per la compensazione di eventi estremi) e realizzazione di opere rigide nei pressi della battigia (muri di contenimento, scogliere, ecc.);
- ✓ incremento delle affluenze turistiche con nuova richiesta di aree per le attività balneari.

Questi fattori derivano da cause di ordine generale e riguardano precise scelte di sviluppo socio-economico su cui sarebbe opportuno riflettere per trovare rimedi che ne attenuino gli effetti più rovinosi.

Gli effetti di tali scelte hanno comportato, nelle aree litoranee, deficit strutturali di dimensioni così macroscopiche da non poter essere più affrontati con logiche di difesa passiva e locale tendenti a diminuire o contenere i fenomeni erosivi.

La rilettura e l'analisi critica delle esperienze maturate, specie di quelle più recenti, dimostra che è possibile affrontare il problema con questa nuova impostazione e con un approccio ancora più avanzato rispetto alle esperienze degli anni '80 con i primi tentativi di difesa morbida dei litorali di Terracina, Latina, Formia e Tarquinia.

E' stato avviato l'esame delle basi cartografiche e delle foto aeree che ha consentito un confronto delle linee di riva e la loro evoluzione nel tempo (analisi diacroniche). Questo sistema ha permesso di valutare a larga scala lo stato dei litorali e di conseguenza di definire le macro-esigenze che costituiscono il punto di partenza per i programmi di intervento.

Le verifiche eseguite non si limitano alla sola valutazione dei risultati rispetto alla capacità protettiva ed all'efficacia degli interventi, ma hanno riguardato anche l'analisi costi-benefici per tener conto dell'effettiva convenienza del sistema adottato. Tale verifica non preclude, ma ridefinisce il campo delle ulteriori ricerche e sperimentazioni finalizzate alla individuazione delle tecnologie più efficaci.

L'erosione si è concentrata su solo parte dei litorali oggetto degli interventi provocando locali forti disagi che hanno pesato negativamente sulla percezione complessiva dei lavori eseguiti.

Il continuo monitoraggio delle coste consente non solo la verifica dell'efficacia dei lavori già eseguiti, ma anche l'impostazione e la taratura dei modelli matematici di simulazione delle dinamiche litoranee per scegliere la migliore soluzione progettuale per i nuovi lavori, rappresentando quindi un'attività indispensabile da inserire nella programmazione della difesa della costa.

L'esigenza di ingenti quantità di sabbia per ricostruire e mantenere le spiagge soggette ad erosione, ha spinto alla ricerca di risorse sfruttabili a basso impatto ambientale ed a basso costo. Dalle attività svolte emerge un quadro di notevoli disponibilità potenziali in particolare per quanto riguarda cave marine, non trascurando le risorse sinergiche legate al dragaggio degli avanporti e le risorse (di più difficile impiego) bloccate nei bacini artificiali dalle opere di sbarramento esistenti.

Le attività di monitoraggio (rilievi topografici e batimetrici dei litorali, rilievi a grande scala della costa), di ricerca e caratterizzazione delle risorse minerarie (rilievi geofisici della piattaforma continentale, geologia marina, mappatura dei giacimenti, vibrocarotaggi, analisi sedimentologiche), di ricerca e caratterizzazione ambientale (campionamenti ed analisi chimico-fisiche e biologiche dei sedimenti di fondo e della colonna d'acqua, studio delle correnti marine sottocosta, mappatura e monitoraggio delle praterie di fanerogame,

controllo delle specie ittiche), avviate sin dal 1997, hanno consentito alla Regione Lazio l'avvio di interventi di ripascimento (morbidi e protetti) rendendola fra le prime regioni in Italia ad aver affrontato il problema in questi termini (Regione Lazio, 2001).

Il litorale prospiciente l'abitato di Ostia, soggetto a fenomeni di pericoloso arretramento, è stato difeso a cura del Genio Civile OO.MM. di Roma da un intervento di ripascimento protetto, con sabbia prelevata dalle cave terrestri della Magliana e barra artificiale di difesa al piede, rasata alla quota -1,50 m s.m.m. La consulenza si è sviluppata durante le prove su modello fisico svoltesi a Delft in Olanda, e nelle fasi di realizzazione (Ministero LL.PP., 1990).

## **2.4. Ischia.**

### **2.4.1. *Inquadramento territoriale della fascia costiera campana.***

Le coste campane presentano uno sviluppo di circa 480 km (incluse le isole), di cui il 60 % è costituito da coste alte e rocciose incise in materiali calcarei, subordinatamente terrigeni e vulcanici, mentre il rimanente 40 % è formato da coste basse e sabbiose (talvolta ciottolose) limitate verso l'interno da pianure alluvionali più o meno estese o dalle propaggini terminali delle dorsali appenniniche (Tab. 2).

Erosione del litorale	480 km
Costa alta	256 km
Costa bassa	224 km
Spiagge in erosione	95 km

**Tab. 2 – Sviluppo delle coste campane ed estensione dei tratti in erosione.**

I risultati delle ricerche morfo-sedimentologiche e dinamico-evolutive condotte negli ultimi decenni lungo le coste della Campania fanno emergere un quadro poco confortante: vasti tratti di litorale appaiono soggetti a fenomeni irreversibili di erosione e fortemente compromessi dall'urbanizzazione, altri risultano stabilizzati da opere di difesa, altri ancora, molto esigui, sono in equilibrio o in avanzamento.

Al fine di contrastare le principali cause di erosione dettagliatamente descritte nei paragrafi precedenti, anche in Campania sono state attuate politiche di intervento per la salvaguardia delle coste. Le opere di difesa (barriere aderenti alla costa o distaccate da essa, pennelli, ecc.) hanno spesso stabilizzato solo il tratto sotteso, innescando processi erosivi accelerati nei tratti contigui.

I litorali campani, come quasi tutte le coste italiane, sono interessati da circa 50 anni da un intenso fenomeno erosivo che sta determinando i presupposti di un irreversibile degrado

ambientale della fascia costiera e della sua funzione turistica. Inoltre in alcune aree l'erosione mette sempre più in crisi, infrastrutture e abitazioni e strutture turistiche rendendo impraticabili litorali di notevole pregio ed importanza (basti pensare a quanto accade ai Maronti di Ischia). In corrispondenza delle foci dei corsi d'acqua, come rilevato nel caso del Fiume Volturno, l'erosione costiera ha determinato la scomparsa di diverse centinaia di metri di terra emersa. Le strutture portuali e di difesa della costa (Pinetamare, Casalvelino, Policastro, Ischia, foce del Volturno, Monte di Procida) e gli interventi realizzati lungo le aste fluviali (Traversa di Ponte Annibale sul Volturno, Traversa di Persano sul Sele, diga sul Fiume Alento etc.) hanno contribuito negli ultimi anni a modificare gli equilibri naturali creando locali vantaggi e diffusi scompensi ai litorali.

Il rifornimento di materiale detritico avviene ad opera dei corsi d'acqua principali (Garigliano, Volturno e Sele) e secondari (Alento, Mingardo, Bussento) secondo una deriva regionale con verso NW-SE.

Discorso a parte meritano le spiagge dell'Isola di Ischia, di notevole valore paesaggistico, alimentate dall'incisione dei versanti collinari che le sottendono, a costituzione vulcanoclastica. I caratteri fisici, dinamici ed evolutivi delle spiagge campane sono stati illustrati in numerosi lavori, pubblicati nel corso degli anni, e presi a riferimento nel presente studio.

Sulla base di quanto riportato nel paragrafo 2.2, lungo la costa campana sono state individuate le seguenti unità fisiografiche principali:

- Litorale Domitio, dalla foce del Fiume Garigliano al Promontorio di Monte di Procida;
- Golfo di Napoli;
- Piana del Sele, da Salerno ad Agropoli;
- Piana dell'Alento, da Casalvelino ad Ascea;
- Litorale di Palinuro, da Ascea a Camerota;
- Golfo di Policastro, da Scario a Sapri.

Il Golfo di Napoli, che è quello di nostro interesse, ricade interamente nella Provincia di Napoli, è il più intensamente antropizzato, quindi qualunque fenomeno erosivo può

risultare critico non solo dal punto di vista ambientale. Geograficamente il litorale si sviluppa per 195 km da Monte di Procida fino a Punta Campanella comprendendo le Isole di Capri, Ischia e Procida.

In quest'arco di litorale da alcuni decenni è in corso una fase di squilibrio crescente dell'ambito costiero, con l'innescarsi o l'accentuarsi di intensi fenomeni erosivi.

Il Golfo di Napoli può essere considerato un'unica unità fisiografica, all'interno della quale i continui interventi, in parte dovuti a cause naturali, in parte dovuti all'uomo, consentono di identificare diverse sub-unità. Prevalentemente si ritrovano brevi ma pregevoli litorali sabbiosi e spiagge del tipo "*pocket beach*".

I dati meteomarini sono ricavati dall'analisi delle tabelle e delle rose dei venti registrati presso le Stazioni della Marina Militare di Ischia e Capri.

Le due stazioni sono posizionate agli estremi dell'unità fisiografica e forniscono dati anche per le zone immediatamente attigue, in particolare, il litorale di Bagnoli a nord e la penisola sorrentina a sud.

La stazione di Ischia è esposta ad un settore delimitato dalle visuali 243°N e 212°N.

L'analisi della rosa dei venti annuali evidenzia che oltre il 38% degli eventi totali in un anno si propaga lungo la direzione NO – SE (315°N e 135°N), solo una piccola parte, circa il 7%, si determina con direzione di provenienza 180°N (direzione Sud – Nord).

Frazioni ancora minori si leggono lungo le altre direzioni. Per quanto riguarda le burrasche di vento (eventi dove la forza del vento è compresa o superiore all'intervallo 7 – 12 gradi Beaufort) le direzioni di provenienza sono comprese nell'intervallo Ovest – Nord-Ovest (270°N – 315°N).

Analogamente gli eventi ondosi massimi registrati si sono avuti nello stesso settore con preponderanza delle direzioni a ridosso della 315°N (Nord - Ovest).

L'estensione della costa interessata dalle opere è pari a 50 km, mentre le aree occupate da nuovi insediamenti sono pari a 16,5 milioni di m<sup>2</sup> (AA.VV., 2006).

#### **2.4.2. Caratterizzazione geomorfologica e sedimentologica dell'area indagata.**

L'isola di Ischia, nel sito dei Maronti, presenta una lingua di sabbia lunga circa 2 km.

Il fenomeno erosivo in atto nel sito dei Maronti di Ischia, al centro di numerosi studi da circa 25 anni, è stato tanto marcato ed evidente che il lido in questione è per metà scomparso.

I processi erosivi che interessano in maniera vistosa le spiagge della Baia dei Maronti sono da imputare principalmente agli interventi antropici eseguiti nell'area (in particolare il rafforzamento artificiale dell'istmo del promontorio di S. Angelo). L'attuale dinamica litoranea favorisce la creazione di accumuli di sedimenti sui fondali, ridepositando altrove parte dei sedimenti asportati dalle spiagge, e la formazione di profondi canali attraverso i quali i sedimenti vengono rimobilizzati verso il largo.

L'Isola d'Ischia, ubicata nel settore nord-occidentale del Golfo di Napoli, costituisce assieme ai Campi Flegrei un'area vulcanica attiva, individuata a seguito di più fasi tettoniche distensive correlata all'apertura del Bacino Tirrenico (Vezzoli, 1988), e connesse all'evoluzione plio-pleistocenica del margine occidentale della Catena Appenninica. L'isola è prevalentemente costituita da prodotti eruttivi con età inferiore ai 55.000 anni, sebbene i prodotti più antichi affioranti abbiano un'età di 150.000 anni B.P. La fascia compresa tra circa 400 m s.l.m. e la Baia dei Maronti è attraversata da alcune profonde incisioni tra di loro subparallele, impostate su linee tettoniche, che dissecano in direzione nord-sud i terrazzi marini fino alla falesia costiera. Lungo tali incisioni (le maggiori delle quali denominate "Cave") e nei pressi della spiaggia vi sono numerose manifestazioni fumaroliche e sorgenti termali attive le cui acque sono utilizzate a scopi terapeutici.

Il litorale dei Maronti è costituito da un'esile spiaggia sabbiosa; verso Est un consistente cumulo di frana che ha rimobilizzato accumuli di colate fangose è presente sulla costa tra le vallecole di due profonde incisioni (Cava Petrella e Cava del Fresco). La spiaggia sottende un bacino idrografico di circa 5 kmq ed è alimentata da clasti trasportati, soprattutto in concomitanza dei periodi di maggiore piovosità, lungo le profonde incisioni presenti nei prodotti piroclastici dei versanti meridionali del Monte Epomeo (Fig. 11).

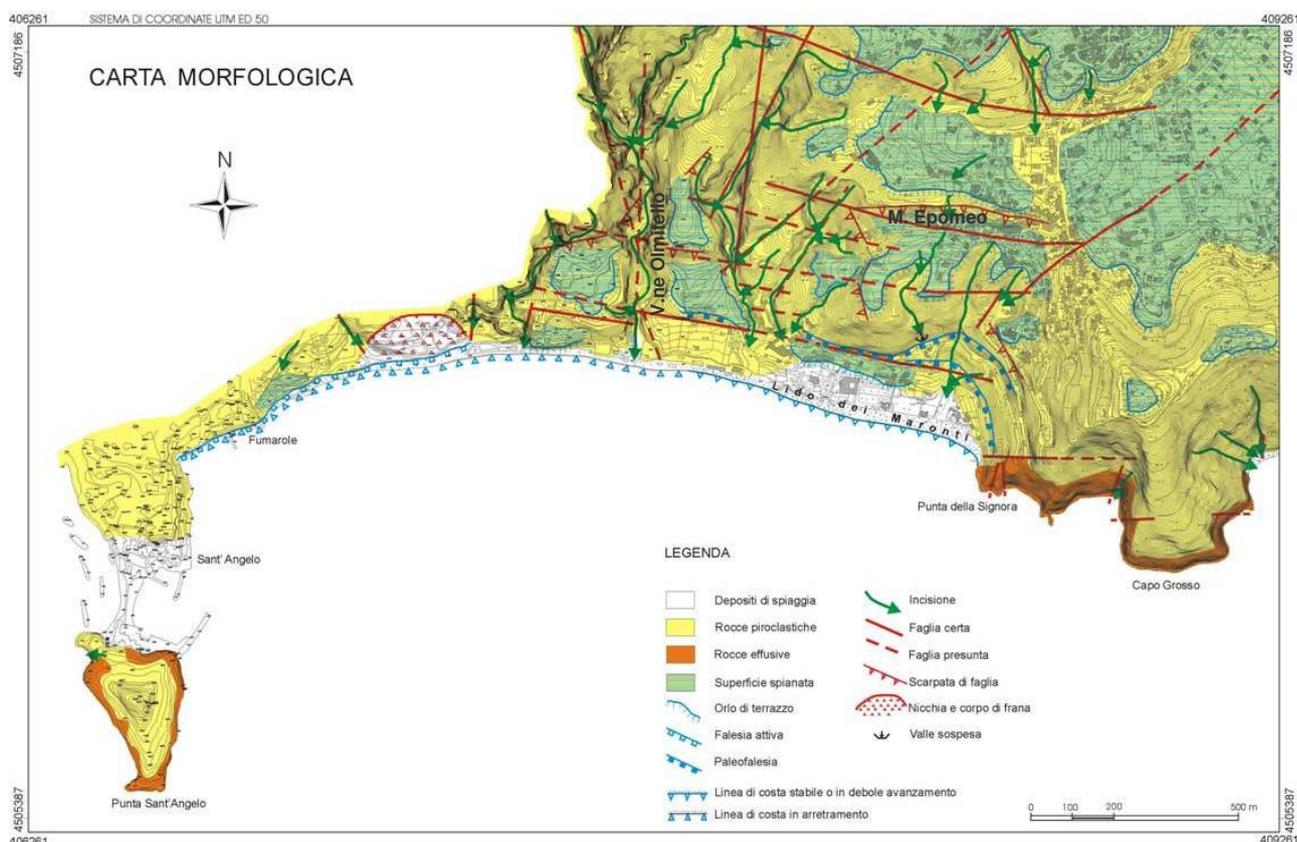


Fig. 11 – Ischia: carta geomorfologica del settore meridionale dell’isola (da De Pippo et al., 2000).

La spiaggia sommersa presenta una morfologia piuttosto complessa (Fig. 12); infatti è possibile osservare fino alla batimetrica di  $-5\text{m}$  la presenza di grossi accumuli sedimentari intersecati da canali, in particolare nell’area antistante lo sbocco del V.ne Olmitello e a ridosso del promontorio di P.ta della Signora.

La spiaggia sottomarina è caratterizzata da un complesso sistema di barre sommerse sviluppate esclusivamente nel settore occidentale e centrale, con ampiezza compresa tra 250 e 100 m, separate dalla costa da un truogolo ubicato alla profondità di  $-3/-4\text{ m}$ .

Da sottolineare la presenza di una blanda rottura di pendenza in corrispondenza delle batimetriche  $-7/-10$  metri che separa due zone essenzialmente più pianeggianti: la prima

compresa tra la costa e la batimetrica dei -7 metri, la seconda compresa tra i -10 e i -20 metri.

E' proprio in corrispondenza di tale batimetrica che si individua il ciglio della scarpata che raccorda la piattaforma costiera alle più alte profondità; nell'area occidentale, compresa tra S. Angelo e Vallone Acquara, l'andamento morfologico del fondo consente di individuare una superficie spianata ubicata all'interno della stessa profondità di -20 metri.

La complessa morfologia nell'area orientale a profondità comprese tra -10 e -50 metri è evidenziata dalla presenza di numerosi modesti alti che sono dovuti, molto verosimilmente alla presenza di massi lavici radicati nei fondali, che tra l'altro consentono l'accumulo di sedimenti a tergo e tra di essi. Anche nell'area orientale si intravede una morfologia che in precedenza doveva essere caratterizzata dalla presenza di massi lavici ma che è stata regolarizzata dalla dinamica litoranea dopo il prelievo degli stessi per la costruzione delle scogliere a difesa del porticciolo di S. Angelo(De Pippo et al., 2000).

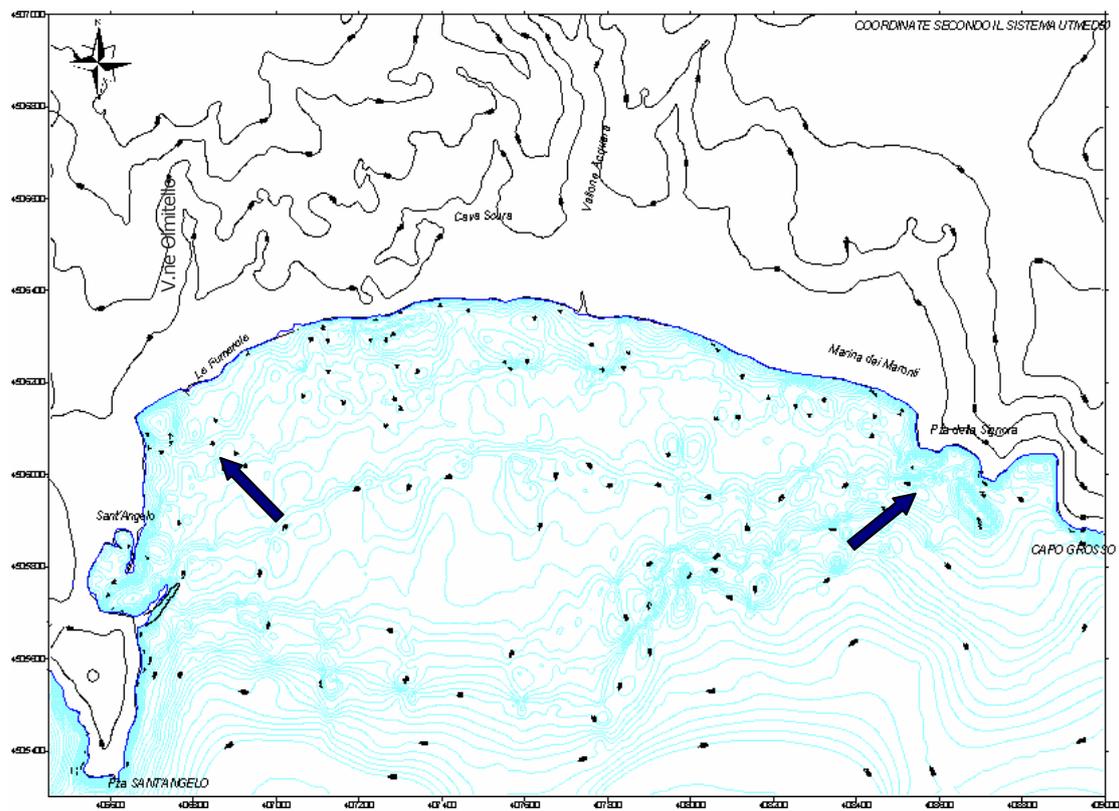


Fig. 12 - Ischia: carta batimetrica dei fondali dell'area indagata (da De Pippo et al., 2000).

La parte più prossima alla costa è caratterizzata dalla presenza di numerosi accumuli sedimentari diversamente orientati, la cui formazione è sicuramente legata alla ridistribuzione dei sedimenti sabbiosi erosi dalle spiagge e dalle falesie a causa del modellamento dei fondali operato dalle ondate incidenti e dalle correnti litoranee da esse generate. I canali che separano le differenti aree di accumulo sono invece da mettere in relazione con l'opera delle forti correnti di compensazione che tendono ad allontanare i sedimenti trasversalmente alla costa. Alcuni di questi canali, in special modo quelli più prossimi alle coste alte, sono da correlare alla presenza di celle di circolazione secondaria che si individuano in seguito ai fenomeni di rifrazione, diffrazione e riflessione del moto ondoso, rispettivamente sul fondo, sulle scogliere del porticciolo e sulle falesie dei

promontori. Grossi accumuli di materiale sono stati inoltre osservati alla profondità di -10 m.

I canali sono invece da mettere in relazione alle forti correnti di ritorno che tendono ad allontanare i sedimenti trasportandoli sia sul fondo sia in sospensione.

Alcuni di tali canali, in special modo quelli più prossimi alle coste alte, sono legati probabilmente alla presenza di celle di circolazione secondaria create dalla diffrazione, rifrazione e riflessione del moto ondoso incidente.

La morfologia dei fondali della Baia dei Maronti è inoltre caratterizzata da una serie di incisioni che quasi certamente rappresentano le vie preferenziali di rimozione dei sedimenti verso il largo e verso le alte profondità.

L'andamento dei profili batimetrici mette in evidenza una piattaforma costiera generalmente ubicata entro la batimetrica dei 20 m con un'ampiezza massima di almeno 700 m. La piattaforma è più ampia nel settore centrale della Baia mentre appare più stretta nell'area occidentale ed orientale; in quest'ultima zona si osserva la minima ampiezza (circa 150 m) in prossimità di Capo Grosso (cfr. Fig. 11). In generale, la piattaforma costiera presenta fondali poco acclivi (2-4%) fino ad una distanza di circa 600/1000 m dalla riva, dove è presente, in corrispondenza della batimetrica -20 m una rottura di pendenza (*shelf break*) piuttosto accentuata; seguono quindi i fondali più acclivi (20-40 %) della scarpata continentale. Mentre la scarpata presenta un profilo convesso ed acclività elevate nel settore occidentale, nell'area centrale ed orientale mostra numerose ondulazioni, una minore pendenza ed un profilo concavo.

Anche i valori del diametro medio dei sedimenti rispondono alla divisione dell'area indagata in due settori, uno orientale e l'altro occidentale (Fig. 13). In quello orientale si osserva una distribuzione che ben si adatta ai principali settori morfodinamici del complesso costiero, mostrando una progressiva distribuzione del diametro medio ( $M_z$ ) verso il largo, evidenziando un controllo operato dai processi litoranei (onde e correnti). Procedendo verso le maggiori profondità, a partire dalla battigia, l'associazione di ghiaie (in verde) e subordinatamente sabbie molto grossolane (in azzurro) passa, a profondità maggiori, a sabbie molto grossolane e gradualmente a sabbie grossolane (in rosso). Tutti i sedimenti sono caratterizzati da una classazione discreta e talvolta buona; la presenza di

una modesta aliquota di sedimento fine (in grigio le sabbie medie e in giallo le sabbie fini) indica una coda di frazione fine nella distribuzione, non completamente ripulita dai processi idrodinamici. Tale andamento potrebbe essere legato al controllo operato sulla dispersione sedimentaria dalla morfologia dei fondali, caratterizzata quest'ultima da numerosi massi lavici radicati separati da modesti canali. La presenza di questi massi, ostacolando in parte la normale dispersione dei sedimenti sottili, ne determinano la deposizione unitamente ai sedimenti grossolani. Confinato nell'estrema propaggine orientale, è visibile un ristretto gruppo di sabbie fini e di sabbie molto grossolane mediocrementemente classate; tale presenza, del tutto anomala, si può ricondurre alla deposizione di materiali erosi dall'alto morfologico ubicato in prossimità dell'area.

Nel settore occidentale, la battigia ed il primo tratto di spiaggia sommersa sono caratterizzati da depositi ghiaiosi e sabbiosi grossolani mediocrementemente selezionati derivati dall'erosione della falesia e dal cumulo di frana presente alla sua base. Tali depositi passano bruscamente verso il largo a sedimenti più fini (sabbie medie) a distribuzione uniforme, in equilibrio con l'ambiente dinamico in cui si rinvengono.

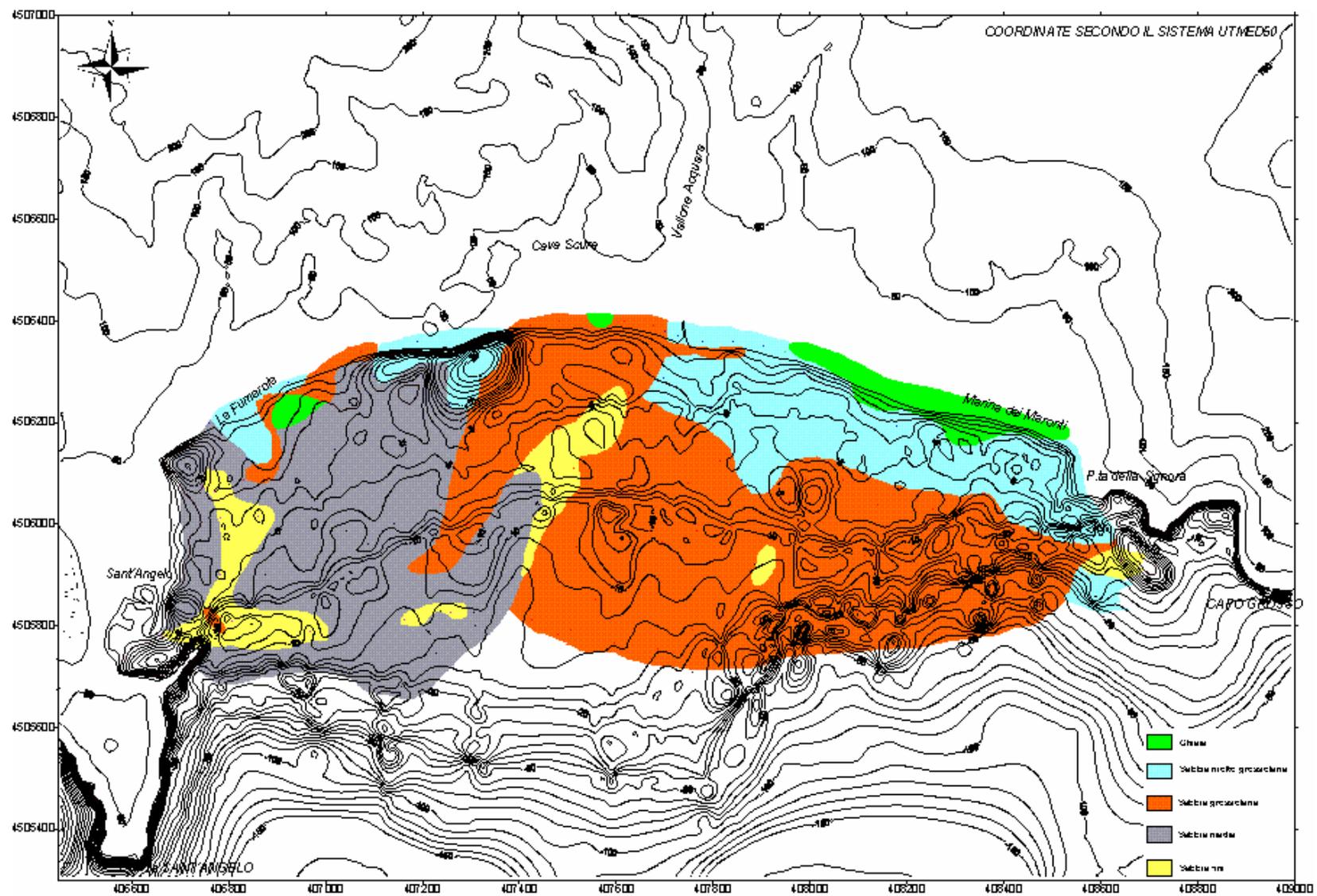
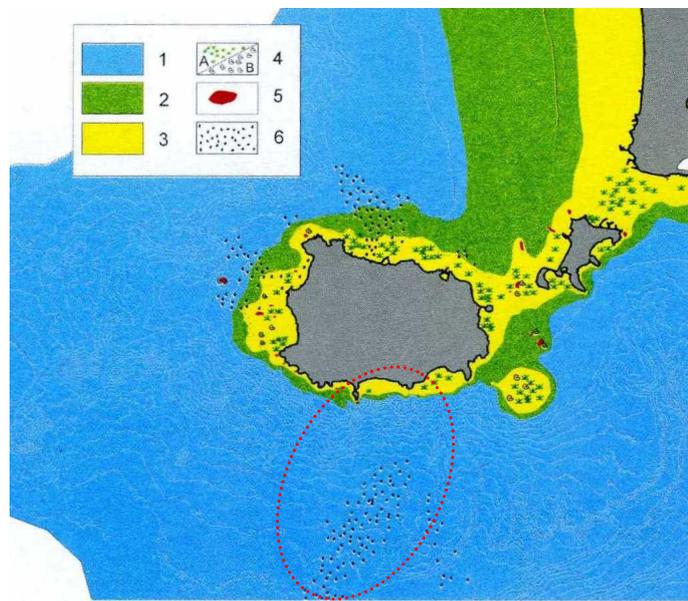


Fig. 13 – Ischia: distribuzione del diametro medio dei sedimenti (da De Pippo et al., 2000).

### 2.4.3. Caratterizzazione biocenotica dell'area indagata.

Nel settore considerato, tra i 16 e i 20 m sono stati ritrovati resti di *Posidonia oceanica*, in particolare lungo le spiagge di S. Francesco, tra P.ta Imperatore e P.ta Caruso. Impostata su sabbie e solo in misura minore su roccia, a condizione che si crei un minimo di substrato sabbioso-detritico, la pianta attecchisce al di sotto dei 6-8 metri sulle suddette spiagge sommerse esposte particolarmente al moto ondoso.



**Fig. 14 – Distribuzione di: 1) Fanghi batiali; 2) Peliti sabbiose; 3) Sabbie ghiaie; 4) Fanerogame marine e materiale bioclastico; 5) Secche con roccia affiorante; 6) Fondi a blocchi trasportati da frane (tratto da De Alteris et al., 2006)**

## 2.5. Procida.

L'isola di Procida (Fig. 15) è ubicata nella porzione NW del Golfo di Napoli, a SW dalla costa campana e a NE dell'Isola d'Ischia, e si sviluppa entro un raggio di 7 km dal settore occidentale del distretto vulcanico dei Campi Flegrei, a cui appartiene dal punto di vista genetico, fisico e petrografico (Rosi & Sbrana, 1987).

L'attuale conformazione del paesaggio insulare è il risultato di una serie di complessi eventi geologici, connessi alla dinamica surrettiva della Catena Appenninica meridionale, alle fluttuazioni glacioeustatiche tardequaternarie del livello marino, alle eruzioni vulcaniche pleisto-oloceniche flegree ed infine alle modifiche prodotte dall'uomo sul territorio negli ultimi 25 secoli.

I Campi Flegrei – unitamente alle isole di Ischia, Procida e Vivara – rappresentano un'area vulcanica complessa a chimismo potassico (Di Girolamo, 1981), formata da numerosi apparati piroclastici monogenici di cui alcuni attivi, ma quiescenti (Solfatara), allineati in direzione E-W e caratterizzati sia da manifestazioni esplosive (prodotti piroclastici) sia, in minor grado, effusive (lave, cupole di ristagno).

Le isole di Procida e Vivara (Fig. 15) sono formate da vulcanoclastiti locali ammantate da piroclastiti da caduta flegree più recenti e rappresentano un termine transizionale tra gli edifici ischitani (SW) e quelli continentali (NE) (Parascandola 1953; Rittmann, 1951; Di Girolamo & Stanzione, 1973). I centri eruttivi sono disposti intorno alla prosecuzione di una linea tettonica profonda che attraversa l'Isola d'Ischia e la parte mediana di Procida, in direzione SW-NE (Imbò et al., 1964); la loro genesi è attribuita per lo più ad attività esplosiva in ambiente marino poco profondo.

Procida, nel dialetto locale detta *Pròcita*, secondo l'opinione di Plinio e di Servio deve il suo nome di origine greca (*Προχύτη*, *protesa* o *coricata*) alla sua forma subpianeggiante, come appare l'isola vista da mare; tale etimologia sembra più attendibile di quelle proposte da Dionigi di Alicarnasso (I secolo a.C.) che associa il termine al nome della nutrice di Enea sepolta sull'isola, di M.E. Scotti (1775) e A.M. Scialoja (seconda metà del 1800) che ritengono derivi da *Procima* ovvero *Prima Cyme*, *prossima a Cuma*,

oppure di Marchianò che suggerisce il pelago-albanese *Préi ysta*, è vicina (ad Ischia) (Aiello et al., 2005).

L'Isola di Procida si estende per circa 3 km in direzione SW-NE, presenta una larghezza di 2 km circa ed una morfologia subpianeggiante, con quote medie di 50 m ed altezza massima di 91 m s.l.m. (Terra Murata). La porzione centrale dell'isola è caratterizzata da una morfologia livellata che termina ai margini con falesie costiere subverticali (Fig. 15).

Il perimetro costiero mostra un'atipicità fisiografica per l'alternarsi di baie semicircolari, cale subtriangolari e promontori arcuati derivanti dallo smembramento di centri craterici di diversa età, spesso concentrici o sovrapposti. Le uniche aree costiere ad andamento rettilineo sono rappresentate dalla Spiaggia di Ciraccio, ad W, e dalla fascia settentrionale (Sancio Cattolico). Alti morfologici sono individuabili nelle aree procidane centrale (Starza), nord-occidentale (Ottimo), nord-orientale (Terra Murata) ed infine sud-orientale (Centane).

Gli aspetti geomorfologici più salienti delle isole flegree sono connessi soprattutto all'evoluzione delle forme vulcaniche, espresse dai numerosi relitti craterici inattivi, e alle forme erosionali modellate sui prodotti della loro attività eruttiva.

Inoltre, le oscillazioni verticali del suolo flegreo e gli eventi vulcano-tettonici, unitamente alle fluttuazioni tardo-würmiane del livello marino, hanno avuto un ruolo rilevante nell'assetto fisiografico del paesaggio. Tra gli indizi di tali episodi si segnalano sia le evidenze geoarcheologiche sottomarine, sia la presenza di profonde, rettilinee ed acclivi incisioni dissecate trasversalmente nelle ripide falesie intagliate nelle piroclastiti; queste ultime a volte risultano troncate, talvolta invece proseguono al di sotto del livello marino con sezione ridotta, pendenza minore e percorso talora curvilineo. Il reticolo idrografico, quasi del tutto assente, mostra un *pattern* radiale di tipo centrifugo e solo a luoghi centripeto, strettamente connesso alla morfologia vulcanica relitta (Aiello et al., 2005).

Sono presenti terrazzi d'abrasione marina sia emersi (tra +6 e +20 m) sia sommersi a varie profondità (tra -4 e -20 m), altre forme d'erosione costiera subaerea ad essi associate ed una superficie di spianamento sommitale di genesi complessa. Tracce di paleostazionamenti del livello marino ben conservate (solchi di battente, marmitte

d'evorsione) si segnalano nelle aree emerse a pochi metri sul livello marino (+2 m) e talora in ambiente subacqueo (-4/-5 m), mentre cavità di genesi mista vulcanica e marina e talora di fattura greco-romana sono presenti lungo le falesie costiere e, le prime, anche in ambiente sottomarino fino a circa -18 m.

L'area esaminata è la spiaggia della Chiaiolella che occupa la costa nord-occidentale dell'isola di Procida e si estende con un andamento pressoché rettilineo tra il promontorio di Punta Serra ed il sottile braccio di mare che separa l'isola dall'isoletta di Vivara (Fig. 15). La fascia costiera si presenta come una sottile striscia di sabbia, con granulometria dal fine al medio, limitata nel retrospiaggia da una falesia, la cui altezza va degradando da Punta Serra verso l'estremità meridionale della spiaggia.

Il fondale della fascia costiera prospiciente la spiaggia presenta una pendenza abbastanza ripida, che si può stimare nell'ordine del 2% fino alla batimetria dei 10 m, con isobate che si estendono circa parallele al litorale.

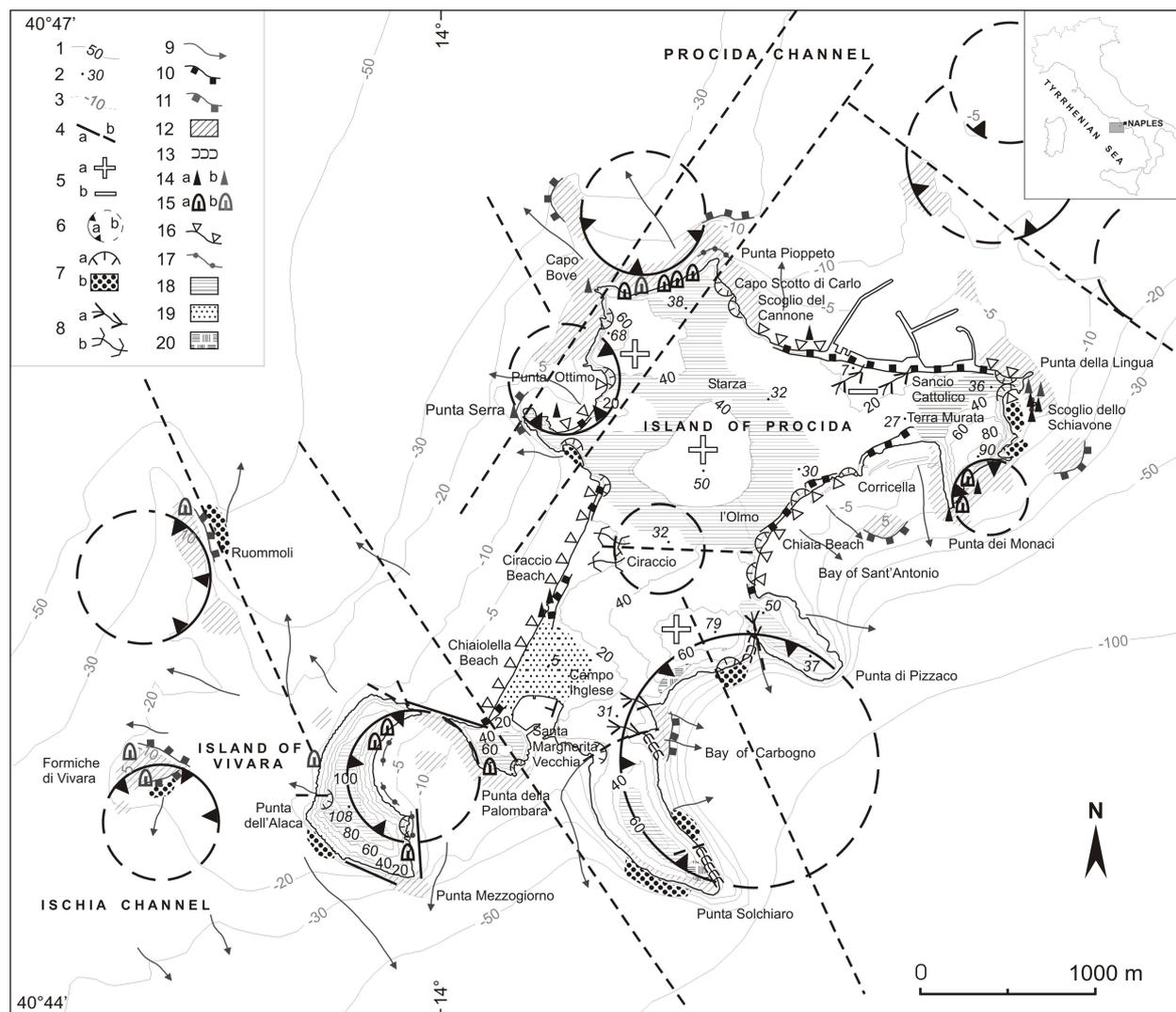


Fig. 15 - Procida: schema geomorfologico (da Aiello et al, 2005).

È possibile riconoscere due differenti assetti geologici, uno relativo alla spiaggia di Ciracciello e l'altro alla spiaggia di Ciraccio. Quest'ultima è caratterizzata dalla presenza di spessori non troppo elevati di sabbia vulcanica nerastra all'interno della quale si intercalano livelli centimetrici di sabbia ghiaiosa ed orizzonti di sabbia fine formata quasi esclusivamente da elementi di magnetite, ferromagnetite ed ilmenite. Alla base dei depositi sabbiosi vulcanici si rinviene tufo grigio litoide in blocchi o in posto, caratterizzato dalla disposizione a mensola degli orizzonti competenti. In corrispondenza delle falesie,

prospicienti al tratto di costa in esame, gli elementi tufacei si incontrano a profondità variabili tra -0,6 m e 1,0 m dal p.c., altrove anche a minore profondità (-0,2 m). La profondità del passaggio sabbia-tufo aumenta solo in corrispondenza della zona centrale della spiaggia di Ciraccio.

L'assetto geologico-stratigrafico della spiaggia di Ciracciello è caratterizzato dalla presenza di uno spessore superficiale di sabbia vulcanica nerastra all'interno della quale si intercalano livelli di spessori centimetrici di sabbia ghiaiosa ed orizzonti di sabbia fine costituita quasi esclusivamente da elementi di magnetite, ferromagnetite ed ilmenite. Al di sotto di questo deposito è stato riconosciuto, quasi ovunque, un livello decimetrico di limo, mediamente consistente, con sabbia ed elementi ghiaiosi. La locale successione stratigrafica prosegue con depositi prevalentemente limosi, inconsistenti, i quali si interdigitano con sedimenti prevalentemente sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi (Impresub, 2001). Tale eteropie di facies sono da mettere in relazione all'evoluzione dell'area di Ciracciello, la quale rappresenta una lingua di spiaggia che unisce il promontorio di S. Margherita Vecchia all'isola di Procida e separa il mare da una zona interna depressa, sede di un'antica palude (Fig. 16).



**Fig. 16 - Procida: particolare della spiaggia di Ciraccio.**

## **2.6. Ferrara.**

### **2.6.1. *Inquadramento territoriale della fascia costiera emiliano-romagnola.***

La costa è un territorio importante per la Regione Emilia-Romagna, sia dal punto di vista socio-economico sia storico-naturalistico, con un'elevata sensibilità ambientale per la difficile coesistenza fra i fenomeni naturali e le numerose attività antropiche.

La costa dell'Emilia Romagna si estende per circa 130 km, tra la foce del Po di Goro, a settentrione, e Cattolica, a meridione, ed è bordata da spiagge sabbiose ampie da pochi metri ad oltre 200 metri che ricoprono materiali limoso-argillosi corrispondenti a più antichi depositi palustri e alluvionali (Tab. 3).

Lunghezza del litorale	130 km
Costa alta	0 km
Costa bassa	130 km
Spiagge in erosione	32 km

**Tab. 3 – Sviluppo delle coste emiliano-romagnole ed estensione dei tratti in erosione.**

Le spiagge sono, in parte e soprattutto nelle aree meno antropizzate, bordate da lembi di cordoni dunari di differenti dimensioni ed età. Per lo più si tratta di accumuli eolici formati 100-150 anni fa, abbandonati in una fase di accrescimento della costa e ritornati a delimitare la spiaggia per l'istaurarsi di una successiva fase regressiva.

Questi allineamenti dunari sono stati in larga parte distrutti per lasciare spazio ad attività ed insediamenti turistico-balneari, sviluppatosi pesantemente attorno agli anni '60. Oggi permangono significativi cordoni solo nell'area di foce del Bevano e della riserva di Bellocchio. (AA.VV., 2006).

A tale drastica riduzione è associata la notevole diminuzione delle quantità di sedimenti portati alle spiagge dalle dune e al mare dai corsi d'acqua, quest'ultima dovuta

prevalentemente alle attività antropiche svolte sia nell'area del bacino fluviale sia nella costa.

Alle spalle del sistema litoraneo si trovano, soprattutto a nord, vasti territori bonificati, con quote inferiori al livello del mare, occupati in parte da aree umide di rilevanza naturalistica (Fig. 17).



**Fig. 17. Litorale ferrarese: particolare delle aree umide di retrospiaggia.**

Data l'estensione e la diversa orientazione, lungo la costa vi è una notevole variabilità del regime anemologico. Su di essa dominano i venti compresi tra NNE ed E (Bora), tra ESE e SSE (Sirocco) e quelli di NW (Maestrale).

L'ambiente litoraneo è attualmente caratterizzato da forti elementi di vulnerabilità e rischio per la presenza di accentuati fenomeni di erosione e di ingressione marina. Questi fenomeni, che interessano circa 40 km del litorale emiliano-romagnolo, dipendono dalla dinamica del mare ma sono significativamente influenzati dall'uso che si è fatto in passato del territorio e delle sue risorse. In particolare, l'abbassamento del suolo per effetto della subsidenza, la diminuzione dell'apporto di sabbia da parte dei fiumi, l'abbattimento delle dune costiere che costituivano il serbatoio naturale di sabbia, la presenza delle opere

portuali, marittime e di difesa che modificano il trasporto del sedimento lungo costa e l'intenso processo di urbanizzazione della fascia costiera rappresentano le principali cause dell'erosione e dell'ingressione marina.

Il massiccio sfruttamento di giacimenti metaniferi, la bonifica di vaste aree vallive, lo sviluppo edilizio e l'affermarsi, nell'entroterra, di un modello di agricoltura fortemente idroesigente hanno determinato un intenso emungimento di acqua di falde superficiali ed accentuato il fenomeno della subsidenza. Nei confronti delle spiagge a debole pendenza, quali sono quelle emiliano-romagnole, questo abbassamento del territorio induce non solo arretramenti della linea di riva (diversi metri a fronte di abbassamenti di pochi centimetri) ma anche un aumento della pendenza dei fondali: nel complesso, una riduzione del corpo sabbioso costiero. Ad esempio, in alcuni tratti costieri, con tassi di abbassamento valutati tra 1,5 e 3 mm/anno, si è valutato (AA.VV., 2006) che negli anni '70 vi sia stata una perdita di 0,6 milioni di m<sup>3</sup> l'anno di materiale sabbioso.

Abbassamento dei suoli e innalzamento del livello marino globale condizioneranno sempre più nei prossimi anni la costa emiliano-romagnola. Le variazioni del livello del mare sono dovute a differenti fenomeni che, sommati, possono provocare notevoli escursioni di misura. I livelli di marea sono dovuti alla sovrapposizione di subsidenza ed eustatismo in un periodo pluriennale, e ad oscillazioni di marea, comprendenti le componenti astronomiche periodiche e prevedibili e la componente meteorologica, variabile in modo imprevedibile e caotico come il tempo meteorologico. Quote del mare particolarmente elevate si raggiungono se ad un'alta marea astronomica si sovrappongono gli effetti di altre cause quali bassa pressione atmosferica, venti spiranti verso costa o da scirocco (da E-NE a S-SE), mareggiate violente. La somma di diverse cause concomitanti, tra cui quelle sopraccitate, può alzare così tanto il livello del mare da creare problemi alla prevalenza degli impianti idrovori, e soprattutto se il mare è particolarmente alto, le correnti di marea entrano nei canali e nelle valli, e viene così ostacolato il deflusso a mare. Il livello medio annuo del mare ha presentato dagli anni '40 ad oggi valori crescenti a causa prevalentemente della subsidenza in atto.

Per gli anni a venire la subsidenza relativa dovrebbe assestarsi intorno ai 5-7 mm/anno, 3 mm/anno dovuti alla costipazione naturale dei suoli e 4 mm/anno dovuti all'eustatismo e

alla sopraelevazione del livello del mare (Simeoni et al., 2003). Attuali dati mareografici rilevati presso Porto Corsini e Rimini, desunti dalla letteratura, i dati di moto ondoso e le stime sopraccitate hanno permesso anche una stima dei valori di innalzamento del livello medio del mare, con tempi di ritorno di 1, 10 e 100 anni, (Tab. 4).

	t=1 anno	t=10 anni	t=100 anni
Cattolica	130	170	210
Rimini	130	170	210
Cesenatico	135	180	220
Fiumi Uniti sud	150	200	250
Fiumi Uniti nord	155	200	250
<b>Porto Corsini</b>	150	195	245
<b>Sacca di Goro</b>	150	195	240

**Tab. 4 - Livello medio del mare (in grassetto sono indicate le zone oggetto di studio; Comune di Ravenna, 1996).**

L'area costiera è esposta, inoltre, anche al rischio di allagamento ad opera delle piene fluviali dei territori posti alle quote più basse e alla contaminazione delle acque dolci di falda per effetto dell'intrusione delle acque salate marine.

### **2.6.2. Caratterizzazione geomorfologica e sedimentologica.**

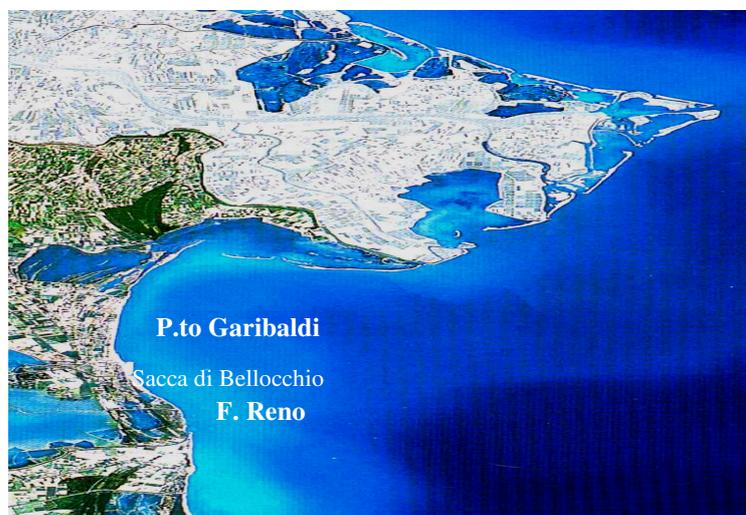
Il settore costiero dell'Italia nord-orientale nel Mar Adriatico, è formato in gran parte dai depositi di progradazione del fiume Po, relativi alla fine dell'ultimo glaciale (Ciabatti et alii, 1987; Colantoni et alii, 1990; Trincardi et alii, 1994, 1996). Durante la successiva risalita e trasgressione del mare (nota in letteratura come trasgressione versiliana, Harland et alii, 1982) le basse pendenze hanno determinato una rapida sommersione, con conseguente scarso rimaneggiamento dei precedenti depositi litoranei (Curzi et alii, 1987).

Le dune fossili di Massenzatica sono antichi cordoni dunari litoranei databili all'incirca al IX secolo a.C., che ora si trovano nell'entroterra per via dell'avanzamento verso E della linea di riva, causato dal graduale accumulo di depositi alluvionali. Questo antico litorale corrisponde alla linea di costa pre-etrusca che, da Ravenna, passava per le attuali località Argine Agosta, Marozzo, Ponte Maodino, San Basilio proseguendo verso N sino a Chioggia. A Massenzatica e San Basilio le dune erano particolarmente elevate (fino a 7 m s.l.m.), pertanto sono tuttora ben visibili.

La Sacca di Goro è una unità fisiografica di recente formazione che costituisce la parte meridionale dell'attuale triangolo deltizio del Po. E' formata da una laguna aperta di circa 3.000 ha, separata dal mare da un sottile scanno sabbioso emerso che a partire dalla foce del Po di Goro si spinge verso ovest per circa 8 km. Relativamente agli aspetti economici, questo lembo di delta è caratterizzato da una intensa produzione ittica all'interno della quale sta assumendo di anno in anno un peso preponderante la mitilicoltura.

In tutto il litorale romagnolo (dal delta del Po a Cattolica) le dimensioni delle sabbie nelle spiagge e nei fondali fino a -2 metri, si mantengono costanti e su valori piuttosto elevati (tra 0,125 e 2 mm), mentre variano oltre tale profondità (De Bonis et al., 2001).

L'area in esame (Fig. 18) va da Lido degli Estensi a Sud a Porto Garibaldi a Nord e presenta una successione di ambienti naturali dal mare all'entroterra, con elevata diversità biologica: spiagge, dune attive e fossili, stagni, paludi, bassure salmastre e foci fluviali.



**Fig. 18 - Ferrara: area indagata.**

Per quanto concerne la vegetazione, nella zona della Sacca di Bellocchio (immediatamente a sud di Porto Garibaldi) si trovano associazioni tra le più importanti del territorio deltizio. Lungo la spiaggia antistante la vegetazione è scarsa o assente, per la ridotta superficie della stessa in conseguenza dell'erosione marina e per la forte presenza di bagnanti. Nelle aree a maggiore disturbo sono presenti popolamenti di specie alloctone con scarso privilegio naturalistico (*Spartina juncea*, *Cicloba atriplicifolia*, ecc.). Sui cordoni di dune si insedia una comunità di specie perenni con aspetto di prateria più o meno densa che colonizzano le dune embrionali avanzate e quelle più arretrate (*Sint. Ammophiletalia arundinaceae*). In condizioni ottimali si distinguono associazioni ad elevato pregio naturalistico, come la comunità dominata da *Ammophila litoralis* (Fig. 19) che si riscontra in dune in forte regressione (Graganiello & Previati, 2003).



**Fig. 19 – Immagine di *Ammophila littoralis* (Sparto pungente), importante per l’azione che esercita frenando la sabbia spinta dal vento e accumulandola alla propria base in ondulazioni via via più elevate, portando così alla formazione delle dune (dal sito web del WWF-Ravenna).**

Nel tratto più settentrionale della costa, presso la Sacca di Goro, il mare proveniente dai settori NNW è fortemente ridotto per la protezione offerta dalla prominenza del delta del Po e la maggioranza degli eventi provengono da ESE (AA.VV., 2006).

Nell’area esaminata, gli unici apportatori di sedimenti da terra, immissari che sfociano nel tratto costiero balneabile del ferrarese, sono il Canale Navigabile (porto canale di Portogaribaldi) e il canale Logonovo; la foce di quest’ultimo canale è soggetta a periodiche ostruzioni e insabbiamenti per effetto delle mareggiate. Il Canale Navigabile nasce a valle dell’abitato di Migliarino dalla biforcazione verso sud est del Po di Volano. Nel tratto terminale è collegato con alcuni bacini vallivi ed è per questo motivo che le sue acque sono sempre salmastre. Raccoglie i reflui dei Comuni intorno e quelli del depuratore di Comacchio nel quale vengono convogliati anche i liquami provenienti da quasi tutta la fascia costiera. Il suo sbocco a mare, all’altezza di Porto Garibaldi (Fig. 20), è protetto da due moli lunghi rispettivamente 300 m (il molo nord) e 500 m (il molo sud).



**Fig. 20 – Porto Garibaldi: sbocco a mare del Canale Navigabile (dati da ARPA Emilia Romagna, 2002, cfr. *infra*).**

### 3. Trasporto solido e processi di erosione in atto nei litorali esaminati

In ambiente marino il movimento del materiale solido terrigeno è regolato fondamentalmente da scambi energetici tra acqua del mare e sedimenti.

In questo ambiente, inoltre, le sollecitazioni dinamiche possono talvolta prevalere sulla componente gravitativa, consentendo la movimentazione di sedimenti verso l'alto sulla spiaggia emersa. Le sollecitazioni sono dovute essenzialmente al moto ondoso ed alle correnti marine (Fig. 21), essendo trascurabili nell'area mediterranea l'azione delle maree, data la loro modesta escursione (ad esempio solo 0,3 m per Procida).

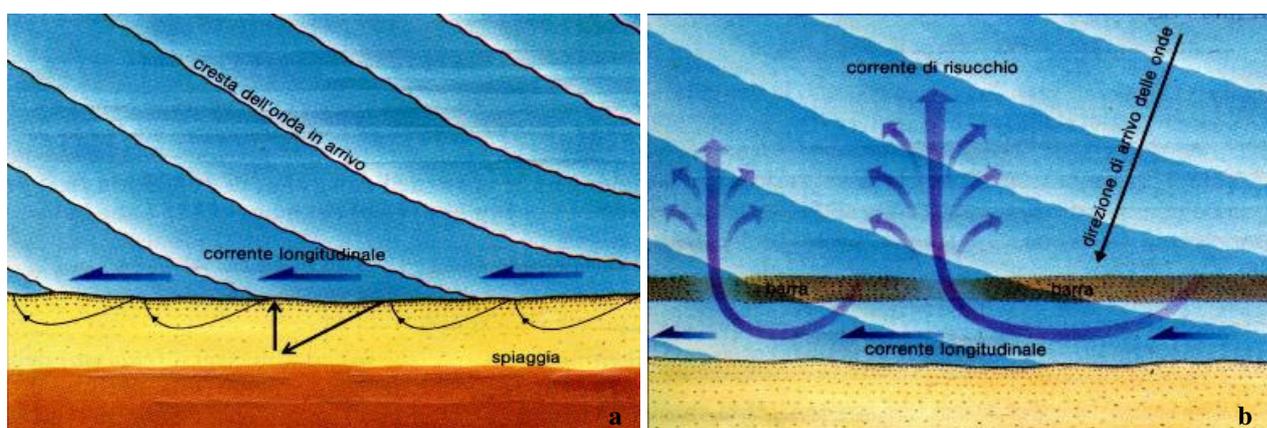


Fig. 21 – Rappresentazione schematica delle correnti agenti lungocosta: longitudinali (a) e di risucchio (b).

Il moto ondoso (Fig. 22a) rappresenta un potente accumulatore dell'energia trasferita dai venti alla superficie del mare ed un dissipatore di tale energia al suo interno o lungo le coste. Come ogni trasferimento di energia per azioni tangenziali l'energia ceduta al mare dai venti ne sollecita i livelli superiori smorzando i suoi effetti già a breve profondità.

Ed è quindi sotto costa, dove la profondità è minore, che l'energia delle onde tende a dissiparsi nel frangimento dell'onda (Fig. 22b) e sul fondale stesso levigando le rocce in sito e movimentando il materiale lapideo incoerente. Le condizioni di moto di tale

materiale sono condizionate fundamentalmente dalla forza e dalla direzione del moto ondoso sotto costa.

I treni d'onda (Fig. 22c) che raggiungono la costa in direzione non ortogonale, determinano, con la loro componente parallela alla costa, la migrazione per getto di riva del materiale mobile esistente in battigia.

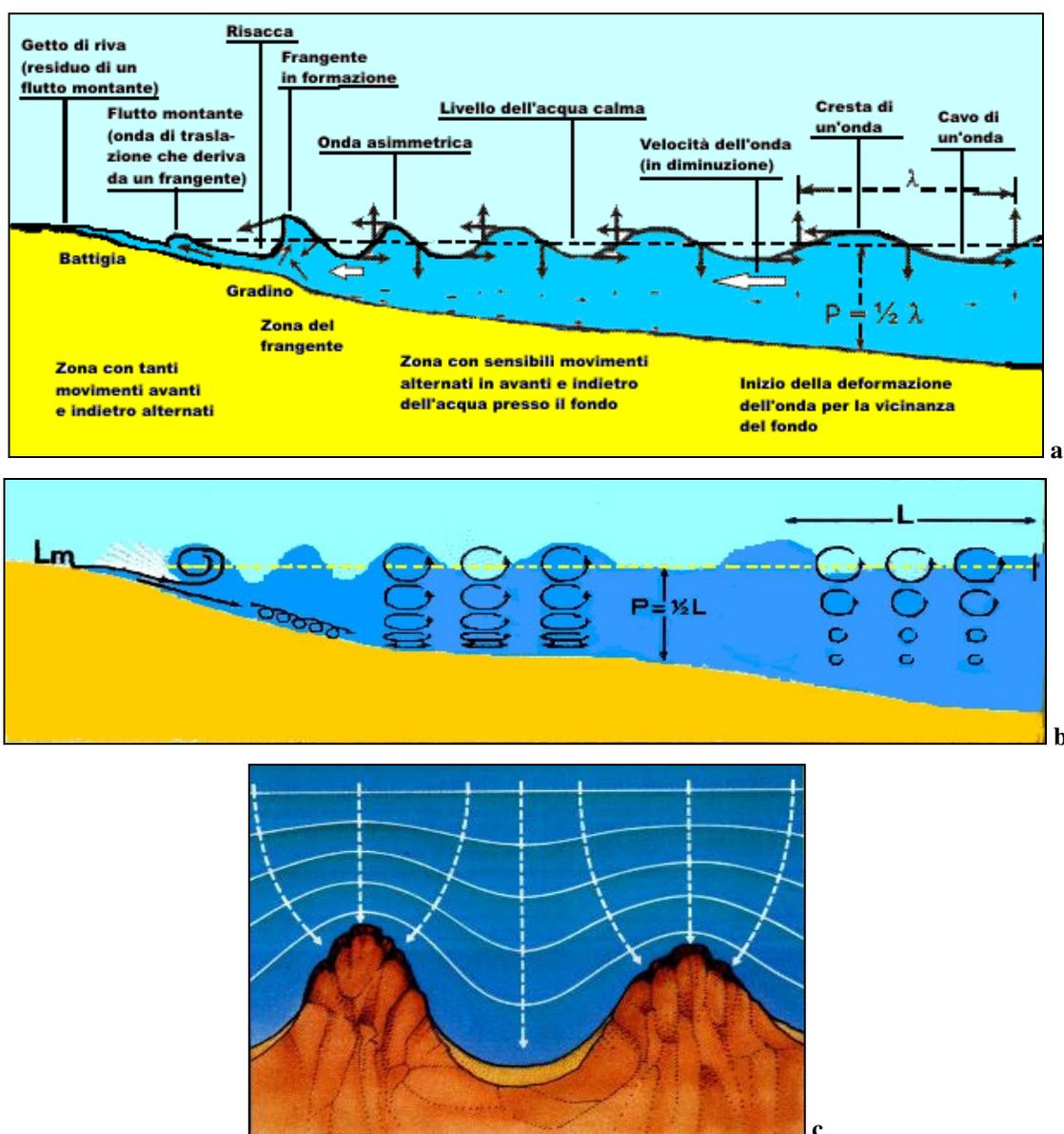


Fig. 22 – Rappresentazione schematica della genesi del moto ondoso (a), la dissipazione dell'energia delle onde (b) e del treno d'onda (c).

La componente del moto ondoso ortogonale alla costa dissipa invece la propria energia demolendo le scogliere delle coste alte e movimentando il materiale incoerente delle coste basse.

Per quanto attiene alla definizione del *clima d'onda* (De Bonis et al., 2001), questa può essere condotta in diversi modi a seconda dei dati disponibili: si può fare riferimento a misure dirette del moto ondoso, nel qual caso è auspicabile poter disporre di misure complete, che contraddistinguono gli stati di mare in termini di altezza significativa, periodo di picco e direzione dell'onda, riferite ad un periodo di registrazioni superiore a 5 anni; in alternativa (Terlizzi, 2005) alle misure ondamiche, si possono impiegare modelli numerici di ricostruzione indiretta degli stati di mare sulla base di misure anemologiche (modelli detti di "hindcasting"); in mancanza di ulteriori fonti di dati si può ricorrere a serie di dati di moto ondoso rilevati a vista da navi in transito per il paraglio in esame.

Il trasporto dei sedimenti marini avviene sia con movimento di fondo, sia in sospensione, e ha componenti trasversali e longitudinali (ortogonali e paralleli alla riva); l'uguaglianza tra le componenti parallele al fondo della forza idrodinamica e quelle della forza peso lungo tutto il profilo della spiaggia crea il cosiddetto "*profilo d'equilibrio*". Questo profilo teorico subisce continue modificazioni, ma assume due configurazioni limite tipiche: quella della stagione invernale, caratterizzata da onde più alte e ripide (con conseguente autodifesa della spiaggia che smista verso il largo i sedimenti per allontanare i frangenti), e quello della stagione estiva, con onde più basse e lunghe (con mobilitazione del materiale verso riva); i due profili sono chiamati rispettivamente *a barra* e *a berma*.

Rilevante sull'evoluzione planimetrica di una spiaggia è l'effetto della dinamica longitudinale che si esplica con un'azione di trasporto in sospensione e di fondo, in particolare tra la zona di frangimento e la riva. Questa attività cresce all'aumentare dell'altezza d'onda e dell'angolo formato dalle creste d'onda con il litorale. Saranno, perciò, effettuate, laddove possibile, valutazioni della quantità e della direzione del trasporto solido longitudinale, nonostante la complessità dovuta alla variabilità dei suddetti parametri, applicando diverse formule, tendenzialmente di carattere empirico, tra le quali la più nota è quella proposta dal Cere (1984):

$$Q = K \gamma_s^{-1} E_b C_{gb} \sin 2 \alpha_b$$

dove:

$Q$  è la portata solida globale transitante in una sezione ortogonale alla spiaggia;

$K$  una costante sperimentale dipendente dalle caratteristiche dei sedimenti e del sito (alcuni ricercatori hanno proposto un valore di circa 0,3 per le sabbie medio-fini, ma è stato verificato che questo valore porterebbe a volumi inaccettabili per i mari italiani, dove, invece, è opportuno definire sperimentalmente tale valore);

$\gamma_s$  è il peso specifico immerso dei sedimenti;  $E_b = \gamma_a H_b^{2/8}$  è l'energia dell'onda frangente;

$C_{gb}$  è la celerità dell'onda;

$\alpha_b$  è l'angolo formato dalla cresta dell'onda con la linea di spiaggia al frangimento (Turcotte, 1997).

L'espressione deve essere applicata a ciascuna classe altezza-direzione in cui si è suddiviso il regime ondoso annuale, moltiplicando ogni contributo per la relativa durata percentuale e attribuendo segni opposti alle direzioni di incidenza ai due lati della perpendicolare alla spiaggia ( $\pm \alpha_b$ ). Dalla somma algebrica di tutti i contributi si ricava il trasporto litoraneo netto, utile per numerosi problemi di ingegneria costiera.

Eseguendo il calcolo per diverse sezioni lungo un'unità fisiografica e risolvendo alle differenze finite l'equazione di continuità del volume solido, si possono valutare gli avanzamenti e gli arretramenti della linea di spiaggia nel corso degli anni (*modello di spiaggia*), rispettivamente, se prevalgono gli apporti o le perdite in sedimenti.

Agli inizi degli anni '90 gli studi sulle aree costiere (Aminti & Pranzini, 1993) indicavano che circa il 33% delle spiagge italiane era in erosione, mentre oltre il 60%, anche a seguito di interventi di difesa, era in equilibrio; solo una modestissima parte (circa il 5%) mostrava una tendenza all'avanzamento. Le cause dell'erosione, ormai note, sono da imputare sia a fattori naturali che all'attività antropica che si attua non solo sulle coste ma anche lungo i bacini idrografici che le sottendono.

Fra le cause naturali di erosione, i venti e i moto ondosi che ne derivano sono certamente le principali. Le condizioni climatiche del Tirreno meridionale, così come del

resto del Mediterraneo, sono strettamente connesse alla posizione dell'anticiclone delle Azzorre: durante l'estate questo sistema di alte pressioni è situato a nord, proteggendo le nostre spiagge dal sistema di depressione dell'Atlantico; durante l'inverno l'anticiclone delle Azzorre muove verso sud non garantendo più la sua protezione, così il Mediterraneo risente del passaggio della depressione atlantica.

Fra le cause antropiche di erosione dei litorali, le più determinanti appaiono le opere realizzate sulla costa; tra queste sono da citare i porti, i pennelli alle foci dei fiumi e le strutture generalmente poste a difesa dei litorali, che hanno incentivato l'erosione nelle spiagge limitrofe a causa della diversa distribuzione dell'energia del moto ondoso incidente.

### 3.1. Ostia.

Nella zona prospiciente l'abitato di Ostia, in occasione dei lavori di ripascimento eseguiti dal Genio Civile alle OO.MM. di Roma è stato previsto un ampio programma di monitoraggio del tratto costiero comprendente, tra le altre, anche misure di moto ondoso mediante una boa ondometrica direzionale disposta su di un fondale di circa 12 m. È stata individuata una sequenza di 5 stati di mare (Tab. 5) rappresentativi del clima che modella il litorale in esame:

Numero Onda	Durata (mesi)	Altezza Hs (m)	Periodo Tp (s)	Direzione (°Y)
1	0.278	1.800	6.7	60.0
2	0.298	1.960	7.0	-30.0
3	0.275	1.870	6.8	0
4	0.433	1.980	7.0	-60.0
5	0.349	1.900	6.9	30.0

**Tab. 5 - Sequenza di 5 stati di mare rappresentativi del clima che modella il litorale di Ostia (Regione Lazio, 1999).**

Considerando, in funzione della variazione della linea di riva, le porzioni (planimetriche) di litorale in erosione ed accrescimento ed ipotizzando una profondità di 5 m della fascia costiera "attiva" nei confronti dei fenomeni di trasporto solido litoraneo è possibile definire un bilancio dei volumi di sabbia interessati dalla dinamica costiera per il tratto di costa in esame per il periodo compreso tra il 1991 ed il 1996. Per i cinque anni di riferimento, si ottiene un bilancio negativo pari a circa 45000 m<sup>3</sup> (tale valore è relativo alle sole caratteristiche delle linee di riva degli anni 1991-1996).

L'analisi dell'evoluzione della fascia costiera, condotta sulla base delle variazioni della linea di riva registrate nel periodo dal 1991 al 1996, fornisce utili indicazioni sul regime del trasporto solido litoraneo. A tal scopo è stato utilizzato una metodologia di indagine che muove dall'ipotesi di base dei fenomeni evolutivi a lungo termine condizionati essenzialmente dalla componente longitudinale del trasporto solido litoraneo e che ricalca

la schematizzazione di calcolo usata nei modelli numerici del tipo ad una linea. Rispetto a questi ultimi il metodo proposto opera in modo indiretto trattando come incognita la portata solida litoranea in funzione delle linee di costa note relative ad un preciso intervallo di tempo. Per litorali sabbiosi come quello in esame, ove ad una variazione della posizione della linea di riva corrisponde sostanzialmente una traslazione rigida del profilo trasversale, il fenomeno di evoluzione può essere esaminato considerando la variazione della linea di riva in un intervallo di tempo noto come risultato del bilancio solido litoraneo effettuato per tratti discreti della fascia costiera (Fig. 23) secondo l'equazione di bilancio (Bruun, 1962):

$$(1) \quad \frac{\Delta Q_L}{\Delta x} + D_c \cdot \frac{\Delta Y}{\Delta t} \pm q_t = 0$$

ove:

$Q_L$  è la componente longitudinale del trasporto solido litoraneo

$q_t$  è l'eventuale componente trasversale del trasporto solido litoraneo

$D_c$  è l'altezza della fascia di litorale "attiva" (coinvolta dal fenomeno di evoluzione) somma della profondità di chiusura (lato mare) e dell'altezza di *swash* (lato terra)

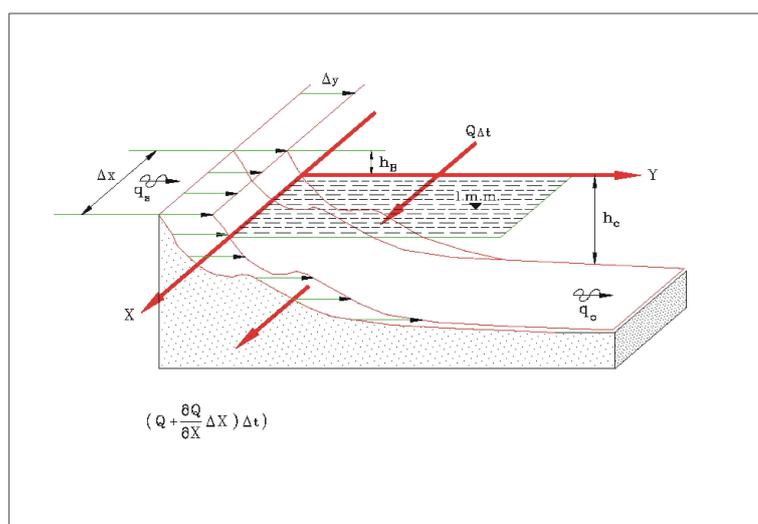


Fig. 23 - Ostia: schema del bilancio solido (basato sul modello di Bruun, 1962).

L'equazione (1), nell'ipotesi di flussi trasversali trascurabili, può essere esplicitata, in termini finiti, in funzione della variazione della componente longitudinale del trasporto solido litoraneo. Si può quindi definire il flusso di materiale che attraversa la generica sezione *i-esima* secondo l'equazione (Bruun, 1962):

$$(2) \quad Q_i = Q_{i-1} + \Delta x \cdot D_c \cdot (\Delta Y / \Delta t)$$

Per la soluzione dell'equazione (2) noto il passo di discretizzazione  $\Delta x$  e l'intervallo temporale  $\Delta t$  di riferimento, è necessario definire il termine  $D_c$  (altezza della fascia attiva) e la condizione di flusso solido in corrispondenza della sezione di estremità.

Il metodo descritto è stato applicato al tratto di litorale in esame derivando così, sulla base dell'evoluzione della linea di riva, l'andamento del flusso solido longitudinale lungo la fascia costiera ipotizzando una profondità di chiusura  $D_c$  pari a 5 m e una risultante nulla del flusso longitudinale nella parte più meridionale.

Il risultato dell'elaborazione indica una risultante del flusso solido longitudinale diretta verso sud con un valore medio dell'ordine di -35000 mc/anno.

Tra gli altri, sono stati usati come indicatori di erosione dei litorali sabbiosi i danni alle strutture civili, la struttura vegetazionale e la presenza o meno di fanerogame.

### **3.2. Ischia.**

Nell'Isola d'Ischia, il Litorale dei Maronti ha sofferto negli ultimi decenni una esasperata urbanizzazione con una serie di interventi "a terra" ed "a mare" (muri di contenimento e costruzione di alberghi alla base della falesia, prolungamento del molo di sopraflutto del porto di S. Angelo, opere di difesa puntuali e di vario tipo) che, riducendo da un lato il rifornimento detritico alle spiagge modificando dall'altro il regime litoraneo, hanno comportato una progressiva crisi erosiva fino alla pressoché completa scomparsa dell'arenile nell'area prossima a S. Angelo, dopo la violenta mareggiata del Dicembre 1999.

Si ritiene che i processi erosivi che attualmente si concentrano lungo la spiaggia dei Maronti sono da mettere in relazione al sistema morfologico dei fondali antistanti, al tipo di ondate (l'attacco del moto ondoso e della sua energia avviene prevalentemente secondo direzioni perpendicolari alla linea di costa) che incidono sulla costa ed al complesso sistema di transito sedimentario, nonché agli interventi antropici operati nell'area.

L'analisi di questo sito si è basata, tra l'altro, sull'esame delle variazioni della linea di riva intervenute negli ultimi decenni, quali sono state desunte attraverso confronti cartografici e aerofotogrammetrici e mediante campagne di rilevamento diretto della battigia.

Gli studi pregressi e gli esami attuali hanno permesso di stabilire una suddivisione del litorale dei Maronti in due settori a differente comportamento dinamico (cfr. Fig. 11): un settore occidentale compreso tra P.ta S. Angelo ed il Vallone Olmitello ed un settore orientale che si sviluppa tra il Vallone Olmitello e Capo Grosso.

Tra il 1956 e il 1965 il settore occidentale è soggetto ad avanzamento generalizzato della linea di riva con valori compresi tra 5 e 25 m (0,5/2,75 m/anno) mentre quello orientale presenta un ripascimento uniforme valutabile intorno ai 20/25 m (2,27/2,7 m/anno). Tra il 1965 e il 1969 si verifica nel settore occidentale un notevole arretramento con valori compresi tra 10 e 25 m (2,5/5 m/anno). Tra il 1969 e il 1979 si assiste ad un arretramento generalizzato della costa con valori intorno a 1,5 m/anno. Da studi effettuati

nel 1981 (Cocco et al, 1987) risulta che i valori di arretramento del settore occidentale sono prossimi alla decina di metri, mentre l'area orientale subisce un notevole avanzamento da pochi metri a oltre 15 m. Nel 1987 il settore occidentale vede un ripascimento con valori dell'ordine di qualche decina di metri, mentre quello orientale un arretramento crescente da est verso ovest da pochi metri a oltre 40 m.

Oggi, nel settore occidentale, caratterizzato da spiagge ridotte, limitate a tergo da falesie intagliate nei prodotti piroclastici delle colate fangose del M. Epomeo, si osserva un continuo arretramento della linea di riva. La scomparsa quasi totale dell'arenile, soprattutto nell'area più estrema del settore ha avuto come conseguenza l'eliminazione della naturale difesa delle falesie in relazione al moto ondoso incidente. Ciò ha consentito che l'azione erosiva del mare operasse lo scalzamento al piede della costa alta e l'innescò dei fenomeni franosi lungo i versanti delle falesie stesse.

Il settore orientale, con spiagge ampie poche decine di metri, risulta molto più protetto presentando un sostanziale equilibrio della linea di riva. In particolare quest'area, pur verificandosi l'allontanamento dei materiali sabbiosi testimoniato in alcuni periodi dall'arretramento della linea di costa, mantiene in parte il suo equilibrio, in quanto viene rifornita temporaneamente dai materiali erosi dall'area occidentale e ridistribuiti dalle correnti litoranee.

L'analisi comparativa di alcune foto del litorale dei Maronti relative a differenti periodi mette in risalto come i fenomeni erosivi abbiano completamente mutato la fisiografia del litorale. Negli anni '80 il litorale mostra ancora spiagge ampie fino a 40 m (Fig. 24a) mentre nel 2000, in seguito alla violenta mareggiata del '99, è possibile notare come l'area occidentale sia priva di spiaggia e che il mare lambisca le costruzioni poste sul versante della falesia (Fig. 24b). Dalla semplice osservazione delle foto si intuisce come le infrastrutture antropiche poste sul litorale e quelle ubicate sul ciglio della falesia siano in grave pericolo.



**Fig. 24 - Ischia: confronto di fotografie dei litorali dei Maronti eseguite in differenti periodi. (a) foto degli anni '80; (b) foto del litorale eseguita nel 2000.**



Solo l'area orientale a ridosso di Capo grosso mostra una spiaggia ampia alcune decine di metri, anche se ridotta rispetto a quella degli anni precedenti. Quest'ultima area si può ritenere in equilibrio o in debole avanzamento anche se è evidente che quest'ultimo fenomeno non può prevalere nel tempo a causa dell'attuale deficit di materiali.

La tendenza erosiva manifestata in special modo dal settore occidentale può essere correlata molto verosimilmente alla ristrutturazione del porticciolo turistico di S. Angelo, eseguita alla fine degli anni '60: l'ampliamento del porticciolo con costruzione di molo foraneo della lunghezza di circa 200 metri, si protende a sperone dalla penisola di S. Angelo verso nord - est; tuttavia, nell'Isola sono stati evidenziati sia fenomeni di bradisismo differenziale sia fenomeni di basculamenti verso sud intorno ad un'asse est-ovest.

La distribuzione dei sedimenti nella piattaforma sottomarina (cfr. Fig. 13) evidenzia uno spostamento dei materiali grossolani per getto di riva da ovest verso est ed uno spostamento dei materiali più sottili da est verso ovest con importanti direttrici di allontanamento verso le maggiori profondità legate a correnti di risucchio.

I vettori di transito relativi alle sabbie molto grossolane (Fig. 25a) indicano uno spostamento dei materiali entro la batimetrica dei  $-7$  m, movimentati da correnti lungocosta, dirette essenzialmente da Ovest verso Est, ed uno spostamento verso il largo a causa delle correnti di compensazione (*rip currents*). I sedimenti che si muovono in tali aree sono essenzialmente quelli che derivano dall'erosione delle falesie e delle spiagge della zona occidentale a causa delle ondate. Si osserva, inoltre, un transito dei sedimenti molto grossolani anche a ridosso di P.ta della Signora con spostamenti delle sabbie verso il largo; ciò potrebbe essere correlato principalmente all'azione di rifrazione e riflessione del moto ondoso (De Pippo et al., 2000).

I vettori di transito delle sabbie grossolane (Fig. 25b) indicano uno spostamento dei materiali sabbiosi dovuto all'azione di correnti di compensazione dirette sia in direzione NE-SW che in direzione NW-SE. Da sottolineare che tale circolazione potrebbe essere messa in relazione alla presenza di celle di circolazione secondaria, innescate dall'azione del moto ondoso incidente, ridistribuendo i materiali sabbiosi nelle aree sommerse comprese tra la costa e la profondità di  $-10$  m. L'esistenza di celle di circolazione

secondaria è confermata dalla carta degli assi di transito delle sabbie medie (Fig. 25c). La circolazione è evidenziata da un movimento di materiali causato dall'azione combinata di correnti lungocosta e di correnti di compensazione (correnti di riflusso) dirette verso il largo.

È interessante, infine, osservare lo spostamento delle sabbie fini (Fig. 25d): tali sedimenti si muovono essenzialmente per correnti dirette verso il largo lungo le estreme propaggini dell'area sia ad Est che ad Ovest. In questo caso è molto più evidente l'esistenza di una cella di circolazione secondaria con movimento antiorario nelle aree più occidentali. I materiali fini sottoposti a tale movimentazione sono destinati, dopo aver a lungo sostato sulla piattaforma costiera, a defluire lungo la scarpata ed a raggiungere aree a maggiore profondità ove non sono più sottoposte alla normale dinamica litoranea.

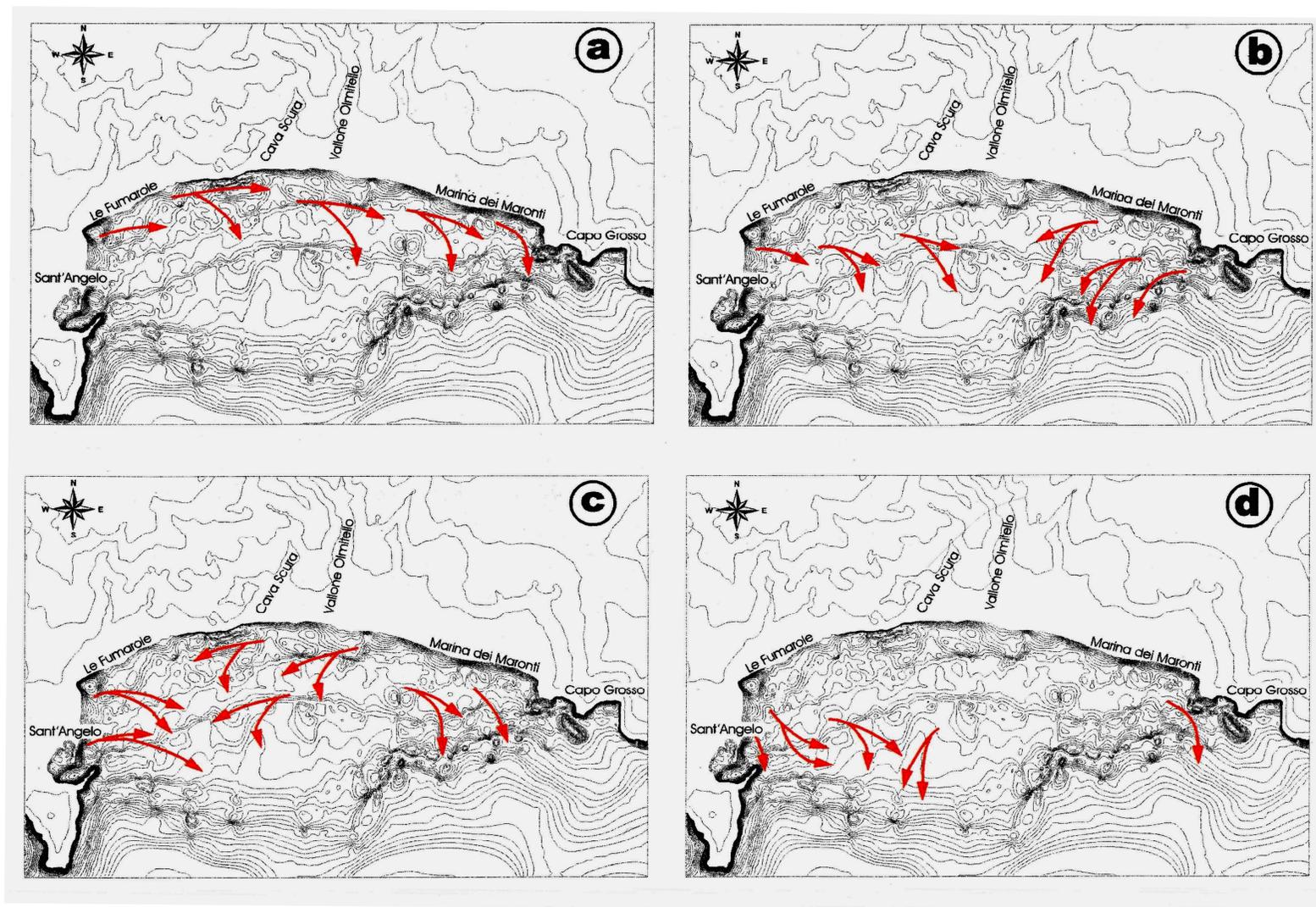


Fig. 25 - Vettori di transito relativi alle sabbie molto grossolane (a), grossolane (b), medie (c) e fini (d) determinati per il litorale dei Maronti (De Pippi et al., 2000)

Poiché non si individuano variazioni del regime anemologico negli ultimi decenni, né rivestono somma importanza gli apporti di materiali solidi dall'entroterra attraverso i corsi d'acqua, appare lecito attribuire la crisi erosiva in atto a fattori antropici, vale a dire alla intensa urbanizzazione ed alla ristrutturazione del porticciolo di S. Angelo.

### **3.3. Procida.**

L'isola di Procida è caratterizzata da coste rocciose a picco sul mare. Si ritrovano, tuttavia, in zona ben definite lungo la costa meridionale, spiagge più lunghe di matrice sabbiosa e spiagge di discreta estensione lungo la costa occidentale.

Tutte le spiagge di Procida sono interessate da spiccati fenomeni di erosione costiera. L'erosione delle spiagge provoca l'asporto progressivo dei depositi vulcanici retrostanti che come conseguenza evidente conduce ad una instabilità dei costoni rocciosi, con lo smantellamento e la continua demolizione della scarpata costituita da depositi vulcanici degradabili. L'isola quindi è afflitta da continui crolli di roccia che mettono in pericolo sia la vita dei bagnanti che i manufatti attigui.

L'erosione dei litorali dell'isola è dovuta esclusivamente a cause naturali, infatti dai rilievi effettuati, si è notato che il quantitativo di sabbia asportato dalla costa ad opera delle correnti innescate dalle forti mareggiate è costantemente maggiore del volume di sedimenti, erosi dai costoni rocciosi, che rappresenta l'unica fonte di alimentazione dei litorali isolani.

L'aggressione delle mareggiate non solo ha determinato l'arretramento della spiaggia emersa di Ciraccio, ma ha chiaramente intaccato il piede della falesia, determinando una serie di franamenti i cui detriti sono ben visibili sulla spiaggia sottostante (Fig. 26).



**Fig. 26 – Immagine della spiaggia di Ciraccio (Procida) dove l'esiguità della spiaggia espone a rischio di erosione la retrostante falesia.**

L'analisi del clima di moto ondoso indica una sostanziale omogeneità nella distribuzione degli eventi attorno alla normale alla spiaggia. Tuttavia alla base della rilevanza delle onde da Ovest, è ipotizzabile una prevalenza del trasporto litoraneo verso Nord.

### **3.4. Ferrara.**

Il tratto costiero compreso tra Cattolica e la foce del Po di Volano è costituito da un'unica spiaggia, lunga circa 110 km, sulla quale sfociano il fiume Reno e numerosi altri fiumi appenninici. Nel corso di questo secolo la valorizzazione economica di questo territorio ha portato all'affermarsi di un'industria turistico-balneare di livello mondiale.

Ciò ha però determinato su questa spiaggia di grande valore paesaggistico e ambientale, una completa alterazione della morfologia e della dinamica costiere (Regione Emilia Romagna, 1981). Processi erosivi sempre più estesi e diffusi, ingressioni marine sempre più frequenti ed accentuate, la qualità dell'acqua marina sempre più degradata, sono le manifestazioni più tangibili della crisi di questo sistema ambientale un tempo caratterizzato da arenili larghissimi, orlati da dune, pinete, boschi elicei, valli e lagune salmastre.

Il culmine della crisi è stato raggiunto verso la fine degli anni settanta, quando il processo di occupazione antropica del litorale della regione Emilia-Romagna ha raggiunto il massimo della sua espansione ed in particolare l'industria turistico-balneare occupava ormai 77 dei 107 km del fronte spiaggia che va da Cattolica a Volano.

Il tratto costiero compreso tra Porto Garibaldi e Volano, alimentato dai rami meridionali del fiume Po per il tratto tra Lido di Volano e la foce del Po di Volano, e dal fiume Reno per il tratto Porto Garibaldi - Lido di Volano, mostra nell'intervallo temporale 1835-1996 un generale bilancio negativo.

Avanzamenti conseguenti ad una leggera ripresa del trasporto di sabbia a mare si registrano nel periodo 1978-1996 a Lido Nazioni sud e Lido Scacchi.

Nel periodo 1993-2000 il litorale tra Porto Garibaldi ed il Po di Volano presenta aree quali Lido di Volano e Lido delle Nazioni nord sottoposte ad azione erosiva e ad un deficit complessivo di apporto sedimentario pari a 1.167.000 di m<sup>3</sup>.



Fig. 27 – Foto aerea del tratto di litorale compreso tra Lido degli Estensi (a sud del molo di Porto Garibaldi) area di prestito e Lido di Volano a nord (gentilmente concessa dal prof. U. Simeoni, Univ. di Ferrara)

Il tratto di Lido di Spina (immediatamente a sud di Porto Garibaldi) è contraddistinto da un cospicuo arretramento della linea di riva nel periodo 1811-1932 (Tab. 6), una crescita in quello intermedio (1932-1977) ed una nuova accentuazione del fenomeno erosivo in quello più recente (1985-1998).

PERIODO	VARIAZIONE MEDIA
1811-1932	-200 m
1933-1977	+100 m (valore max di 300 m a sud)
1977-1985	+ 48 m
1985-1994	- 22 m circa
+1995-1998	- 22 m circa

Tab. 6 - Variazioni della linea di riva del Lido di Spina (Provincia di Ferrara, 2004).

La riduzione della portata del fiume Reno che sfocia in questo punto nell'Adriatico, ha creato degli scompensi al litorale compreso tra Porto Garibaldi e Porto Corsini. Nei confronti delle spiagge a debole pendenze, come quelle emiliano-romagnole, la subsidenza induce non solo arretramenti della linea di riva (diversi metri a fronte di abbassamenti di pochi centimetrici) ma anche un aumento della pendenza dei fondali: in definitiva una riduzione del corpo sabbioso costiero. Dai dati raccolti emerge infatti che entro il 2020 le terre sotto il livello del mare (nei due chilometri interni alla costa) passeranno dal 20% al 50% (Gambolati et al., 1998).

L'analisi del bilancio sedimentario ha indicato nella subsidenza la causa preponderante della generale erosione della linea di riva, per un deficit equivalente di 800.000 mc (De Bonis et al., 2001). In particolari tratti di costa, una forte erosione è dovuta alle numerose barriere che, pur producendo un locale e temporaneo beneficio, riducono molto il trasporto totale e quindi causano danni alle spiagge sottoflutto e lasciano immutato il trasporto al piede delle opere lato mare, determinando erosione al largo di esse quando sussiste una carenza generale di sedimenti in circolo.

#### 4. Interventi antropici a difesa dei litorali

Le cause dell'erosione, ormai note, sono da imputare sia a fattori naturali che all'attività antropica che si attua non solo sulle coste ma anche lungo i bacini idrografici che le sottendono. Fra le cause antropiche di erosione dei litorali, le più determinanti appaiono le opere realizzate sulla costa; tra queste sono da citare i porti, i pennelli alle foci dei fiumi e le strutture generalmente poste a difesa dei litorali, che hanno incentivato l'erosione nelle spiagge limitrofe a causa della diversa distribuzione dell'energia del moto ondoso incidente.

Sono state esaminate le tipologie di opere antropiche presenti sulle aree campione, come moli, canale artificiali, porti, importanti apportatori di modifiche alla distribuzione dei sedimenti, e opere di difesa e tecnologie di ripristino dei litorali sabbiosi degradati.

Le opere antropiche condotte dall'uomo sui litorali mirano alla «difesa» dei litorali ma spesso sono tra le prime cause di erosione dei litorali stessi o di quelli limitrofi.

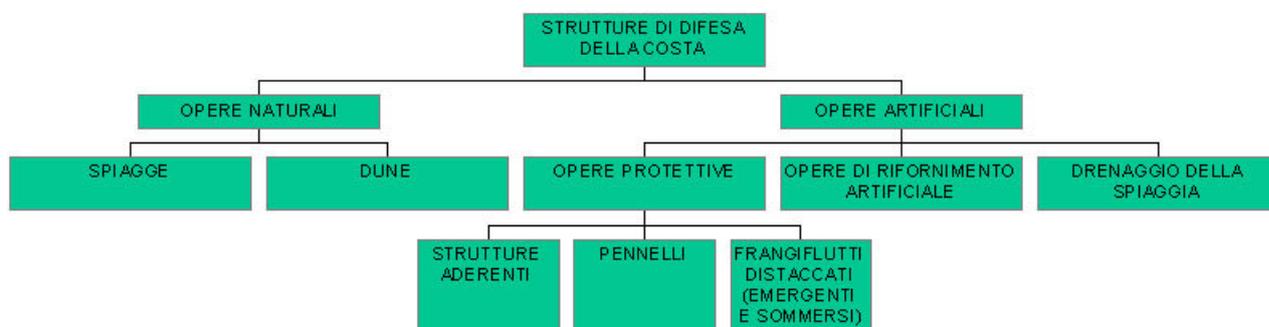


Fig. 28 – Strutture a difesa della costa.

Esiste un'ampia gamma di tecniche di difesa costiera (Fig. 28) operanti in diversi punti della costa: le tecniche operanti a largo (*offshore*) che includono breakwater (frangiflutti), barriere e, in parte, il ripascimento artificiale sottomarino; le tecniche operanti lungocosta (*lower shore*), tra il livello di alta e bassa marea, che includono il ripascimento artificiale delle spiagge, pennelli radicati alla riva (groynes), rafforzamento di scogliere e rivestimenti; operanti immediatamente sopra il livello di alta marea sono i muri di sponda,

i rivestimenti e la cementificazione degli argini alla foce dei fiumi (imbancamenti fluviali); infine, le tecniche operanti sopra la costa (*supra shore*) includono la costruzione di dune artificiali o la ricostruzione di quelle esistenti.

In generale le possiamo classificare in opere *longitudinali* e *trasversali*: le prime sono gli elementi emersi opportunamente distanziati dalla costa e con l'asse maggiore parallelo alla linea di riva (frangiflutti); le seconde sono gli elementi emersi o parzialmente sommersi radicati alla riva (pennelli), spesso collegati alle eventuali opere longitudinali e che hanno lo scopo di arrestare il trasporto litoraneo. Altre opere di difesa sono quelle radenti (muri di sponda, paratie a rame, rivestimenti, ecc.) che frenano l'azione erosiva mediante il rivestimento e il sostegno del terreno a tergo, e le opere di rifornimento artificiale di sabbia (da cave in prestito preferibilmente marine) alla spiaggia per controbilanciare le perdite naturali o causate dall'uomo (ripascimenti).

Le lunghe opere perpendicolari alla riva, così come quelle parallele, quali i moli foranei di alcuni porti o le importanti opere di difesa aderenti e paralleli, fortemente riflettenti, hanno determinato in molti casi fenomeni di erosione. Pertanto, per bloccare tale erosione sono stati eseguiti numerosi interventi, spesso inefficaci o addirittura perturbativi dell'equilibrio delle spiagge producendo tra l'altro effetti negativi sull'ambiente, contrastando così la naturale esigenza di fruibilità delle coste.

Difese molto diffuse sulle coste italiane sono quelle parallele alla costa, emergenti e distaccate, costituite spesso da massi naturali, ma anche da elementi prefabbricati in calcestruzzo, spesso concatenati o incastrati, con le forme più svariate (tetrapodi, cubi, ecc.), utilizzati per dissipare l'energia indotta dal moto ondoso determinando una riduzione dell'agitazione nella zona protetta e quindi favorendo i processi di sedimentazione che accrescono la spiaggia.

Un tipo di opere diverse viene rappresentato nella Fig. 29, in cui compare il litorale di Miliscola, compreso fra monte di Procida e capo Miseno. Qui si vedono quattro isole artificiali di forma semi-circolare poste a difesa della costa che era entrata in erosione a seguito del prolungamento dei moli guardiani del canale che tiene in comunicazione il lago Miseno con il mare. Sono opere non molto frequenti sul litorale italiano, ma sono state costruite in diverse località, in particolare in Liguria, Lazio e Campania. Analogamente a

quanto fanno le scogliere parallele alla costa, queste strutture riparano il tratto di mare retrostante, ma in modo assai meno drastico: inducono una minore riflessione delle onde, che scalza alla base le opere tradizionali, e consentono una migliore circolazione idrica nel tratto riparato. Nel caso in questione le loro dimensioni, in rapporto alla distanza da costa a cui sono poste, sono tali da innescare la formazione di una debole convessità della linea di riva, senza portare alla formazione di un tombolo che determinerebbe una compartimentazione della costa e l'interruzione del flusso sedimentario.



**Fig. 29 – Stralcio della Carta topografica Isola di Procida (F. 465, Sez. IV, Q. IV, Serie 25) dove sono evidenti le quattro isole artificiali semi-circolari a difesa della costa. Nonostante la loro presenza, la quantità di sabbia fluita nella zona riparata è venuta a mancare dalla spiaggia orientale non protetta, che mostra infatti i segni dell'erosione con alcuni edifici posti sull'arenile.**

Tra le soluzioni adottate per la protezione dei litorali, le più tradizionali, spesso realizzate in condizioni di emergenza, sono quelle che si sviluppano nella direzione longitudinale, con un'unica barriera rigida aderente che protegge direttamente il territorio retrostante. Queste, generalmente, sono realizzate in pietrame naturale, in massi artificiali o

in calcestruzzo, e la loro funzione è finalizzata alla dissipazione dell'energia del moto ondoso. In realtà esse sembrano essere le più dannose poiché aumentando i processi di riflessione della spiaggia determinano l'erosione delle spiagge adiacenti non protette (Toue & Wang, 1990), e molto spesso anche della spiaggia che le sottende (Terich & Schwartz, 1993). E' opportuno pertanto utilizzare tali opere di difesa solo in casi, ove non è possibile adottare soluzioni differenti, o al massimo utilizzarle in maniera complementare ad altre opere.

Altre soluzioni, quali i pennelli ortogonali alla riva, che hanno lo scopo di arrestare il trasporto litoraneo, risultano però inutili in quei litorali dominati da una dinamica trasversale.

Per ridurre il forte impatto ambientale sulla costa sono stati poi adottati sistemi relativamente più evoluti, quali le barriere sommerse (Fig. 30). Queste opere, molto verosimilmente meno costose delle precedenti, offrono un grado di attenuazione elevato per le sole onde alte. Per le onde di minore ampiezza, quest'ultimo può però essere migliorato valutando accuratamente alcuni parametri quali la sommergenza delle scogliere e la pendenza della spiaggia. Tali opere risultano comunque efficaci per valori bassi e costanti di sommergenza, favorendo il ricambio delle acque e allo stesso tempo non consentendo il trascinarsi dei sedimenti sia verso il largo che verso riva. Agli effetti positivi che le indicano quale buone soluzioni per il contenimento delle spiagge artificiali si contrappone la creazione di canali dovuti alle correnti che si muovono lungo i varchi esistenti fra esse, l'incremento della turbolenza dietro la struttura, cui corrisponde un incremento dell'altezza d'onda al fronte della struttura, il rifluimento laterale dei sedimenti e le cautele per la navigazione e la balneazione.



Fig. 30 – Immagine di barriere sommerse foranee.

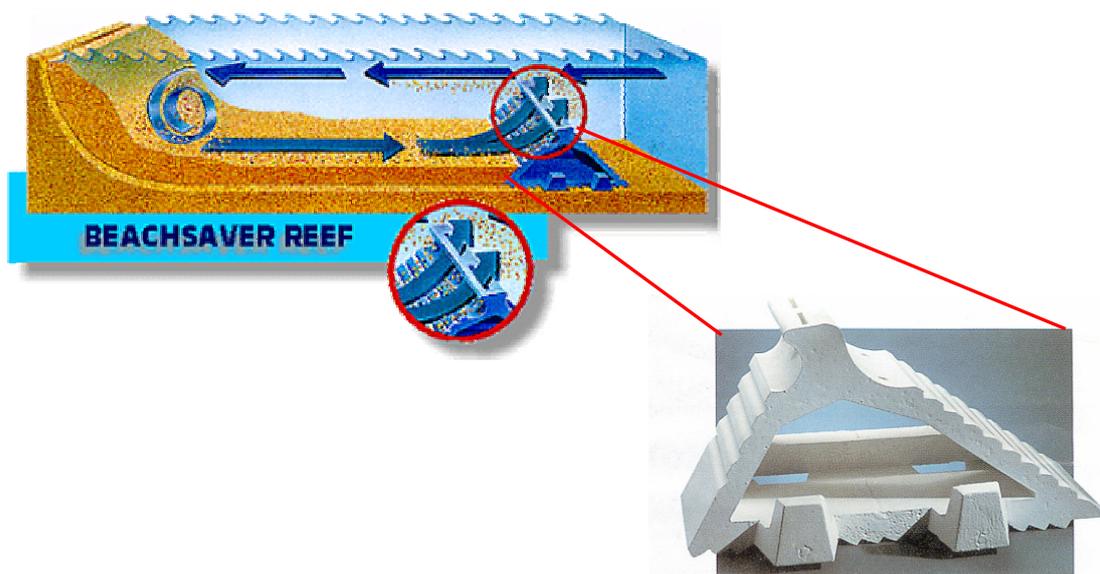


Fig. 31 – Rappresentazione schematica di una scogliera del tipo “beach saver reef”.

Per ridurre i costi e migliorare le prestazioni, in alternativa ai massi naturali, le scogliere soffolte potevano essere sostituite da svariate tecnologie come sacchi riempiti di sabbia o strutture in calcestruzzo ordinario. In quest'ultimo caso, ogni elemento strutturale possiede le forme più svariate; tra esse si citano, ad esempio, le scogliere tipo *Surgebreaker* (posate in opera circa 25 anni or sono negli USA) formate da moduli prismatici collegati fra di loro ed in cui ogni modulo è provvisto di fessure orizzontali per dissipare oltremodo l'energia.

Scogliere tecnologicamente più moderne sono quelle del tipo "*Beachsaver Reef*" (brevettate, poi, dalla Spagna con il nome di *Beachsaver – Forte*), collaudate sperimentalmente in canaletta e su modello in scala, presso i Laboratori Davidson dell'Università del New Jersey (Fig. 31).

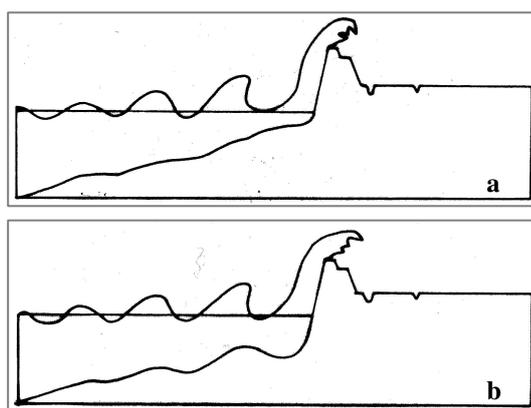
Tali scogliere appaiono quale soluzione ottimale nella difesa dei ripascimenti artificiali, infatti le prove eseguite hanno dato come risultato un prolungamento della stabilità della spiaggia rigenerata, in quanto riduce la quantità di sabbia da utilizzare nel primo pascimento ed in seguito impedisce la migrazione dei materiali, riversati sul litorale, verso il largo a causa dell'effetto combinato di riduzione dell'energia del moto ondoso e di creazione di una barriera idraulica. Oltre alle prove in laboratorio sono state condotte sperimentazioni in situ che hanno fornito, a distanza di oltre cinque anni dalla loro posa in opera su fronti oceanici (varie località della costa del New Jersey), risultati positivi determinando in definitiva un protendimento delle spiagge protette anche in assenza di pascimento artificiale. Il disegno dell'opera infatti consente di ridurre l'energia delle onde di circa il 35%, canalizzando verticalmente le correnti di ritorno attraverso dei setti e limitando la migrazione della sabbia verso il largo. I materiali trasportati dalle correnti di ritorno che vengono in seguito trasportati verso la costa dalle onde incidenti. Tra l'altro il posizionamento di tali scogliere, che prevede una costruzione continua per elementi, eviterà la formazione di canali e quindi la possibilità di scalzamento al piede delle strutture.

Tra l'altro la struttura è stata progettata tenendo conto dell'erosione al piede sia lato mare che lato terra, che si produce generalmente nelle scogliere costruite con massi; inoltre le ondulazioni della superficie consentono la deposizione della sabbia in sospensione permettendo che questa si raccolga alla sua base. Dal punto di vista ambientale tale tipo di

scogliera oltre ad essere sommersa e pertanto non visibile, favorisce la ripopolazione ittica grazie al fatto che la struttura è cava.

A seconda della tipologia di opere che si vuole adottare a difesa dei litorali, distinguiamo un approccio «duro» (*hard engineering*) ed uno «soffice» (*soft engineering*). La prima metodologia prevede l'utilizzo di strutture resistenti all'energia delle onde e delle maree (include i breakwater, i muri di sponda, i pennelli longitudinali e trasversali, gli imbancamenti fluviali e le barriere artificiali). La seconda metodologia prevede elementi che lavorano con la natura, manipolando il sistema naturale ma senza interferire con esso; comprende, infatti, i *ripascimenti artificiali*, la messa in posto di strutture dunari e la rivegetazione dell'area (è da notare che la vegetazione naturalmente presente nell'area può essere un utile mezzo di contrasto per l'erosione).

Spesso ci si avvicina alle problematiche di difesa costiera con entrambe le tipologie di metodi. Le tecniche di ingegneria «dura» sono sicuramente più impattanti dal punto di vista estetico ed ambientale: possono, infatti, come è stato accennato in precedenza, accentuare i fenomeni erosivi (Fig. 32). L'ingegneria "soft" è più compatibile con l'ambiente in quanto cerca di rispettare e mantenere gli equilibri naturali del sistema; pur tuttavia, richiede spazio e ingenti quantità di materiali (si pensi ai rifornimenti di sabbia alle spiagge o per la costruzione di dune).



**Fig. 32 – Effetti di un’opera di difesa rigida aderente. La costruzione di un’opera di difesa rigida aderente alla costa (a) produce nel tempo intensi fenomeni di approfondimento dei fondali nella zona antistante l’opera (b) a causa dell’incremento della riflessione operata dalle spiagge e legato alla modificazione del profilo delle stesse (Terich & Schwartz, 1993).**

Il relativo successo del ripascimento artificiale è principalmente dovuto all'impatto ambientale fortemente negativo indotto dalle difese costiere rigide. Il ripascimento artificiale consiste nel rifornimento della spiaggia con sedimenti naturali o artificiali trasportati con mezzi meccanici sia da terra che da mare o con impianti per il trasporto idraulico della sabbia se direttamente prelevata dal fondo marino. La possibilità di reperire sabbia a limitata distanza dalla riva è vantaggiosa sia per il contenimento dei costi (circa il 50%) ma soprattutto per rendere più stabili i sedimenti sulla spiaggia.

Molti ripascimenti vengono realizzati con inerti di cava anche con granulometria più grossolana di quella dei sedimenti naturali costituenti la spiaggia oppure con un doppio strato in cui i materiali sottostanti sono più grossolani di quelli superficiali, in genere instabili; l'incongruenza di tali interventi è quella di porre rimedio ad un danno ambientale con un altro danno. Altri ripascimenti che tengono conto degli equilibri naturali, vengono invece più opportunamente eseguiti con sedimenti naturali; dovendo infatti esistere accordo fra la granulometria dei depositi e quella dei sedimenti naturali costituenti la spiaggia, vanno individuati nella spiaggia sommersa depositi di sedimenti naturali con caratteristiche petrografiche e tessiturali simili a quelli costituenti la spiaggia emersa (litorale veneziano di Pellestrina, litorale ravennate, ferrarese e litorale occidentale dell'isola d'Ischia). Tali depositi sono spesso ancora presenti sul fondo al largo delle spiagge e sottoposti ai processi dinamici del litorale; essi vanno però prelevati in strati omogenei ed oltre i 10-15 metri di profondità. In alternativa possono essere reperiti sedimenti sabbiosi relitti raccolti in litosomi, anche debolmente sepolti, da individuare con la prospezione sismica ad alta risoluzione (Caputo et al., 1993).

In funzione dei volumi (mc) immessi per unità di distanza lungoriva (m), l'insieme dei ripascimenti realizzati in Italia rivela l'esistenza di due tipi base con i seguenti valori caratteristici:

- da 10 a 50 mc/m
- da 80 mc/m, tipicamente 100-300 mc/m, fino a 400 mc/m.

Questi tipi vengono rispettivamente definiti:

- ✓ Ripascimenti di superficie (*S-Ripascimenti*)
- ✓ Ripascimenti di volume (*V-Ripascimenti*)

La soluzione del ripascimento artificiale è stata adottata in quasi tutti i Paesi del Mondo.

E' evidente che tale soluzione è però temporanea atteso che l'azione erosiva del mare è ininterrotta mentre un pascimento di per sè ha vita breve. Pertanto, al fine di rallentare la perdita di materiale verso il largo o, più in generale verso coste adiacenti, attualmente si indica come soluzione ottimale l'abbinamento del ripascimento artificiale con opere di contenimento preferibilmente sommerse. Nei mari italiani, caratterizzati da modeste escursioni di marea, i moderni criteri di protezione dei litorali prevedono questi interventi integrati in cui vengono realizzate invisibili barriere sommerse a contenimento di spiagge artificiali. Tale soluzione garantisce chiaramente un impatto ambientale quasi nullo ed una mancanza di effetti secondari e negativi sui litorali prospicienti l'opera.

Le strutture sommerse infatti operano una riduzione dell'altezza delle onde trasmesse non permettendo la perdita di sedimenti dalle spiagge protette o dalle spiagge sottoposte a ripascimento, fungendo tra l'altro da ostacolo al trasporto dei sedimenti verso il largo da parte delle correnti di compensazione. Le scogliere sommerse inoltre consentono un'adeguata circolazione idrica, evitando la formazione di tomboli e riducendo l'erosione dell'opera verso mare.

Di recente ideazione è il metodo danese del *BMS (Beach Management System)*: questo si basa sul concetto che l'abbassamento della superficie freatica in terreni granulari aumenta la loro stabilità ed elimina la tendenza a muoversi. Il concetto su cui si basa il B.M.S. è originale nella sua concezione e prende spunto da una constatazione assai nota: l'abbassamento della superficie freatica in terreni granulari aumenta la loro stabilità e diminuisce notevolmente la loro tendenza a muoversi. Creando una zona non satura, il sistema abbassa la superficie freatica riducendo l'azione erosiva trasversale determinata dal fenomeno di "run-up" delle onde; l'acqua portata dall'onda percola nel terreno drenato e il materiale solido presente nell'acqua si deposita sulla spiaggia, rimanendovi. Il processo continua sino ad ottenere un nuovo equilibrio della spiaggia che corrisponde ad un suo avanzamento (Fig. 33). Infatti, a metà strada tra le tecniche di ingegneria costiera «dure» e quelle «soffici», il sistema non interferisce con la natura del moto ondoso bensì lo asseconda: durante l'inverno il moto ondoso ha un ritmo maggiore, le onde aggrediscono la costa con più frequenza e la spiaggia non riesce a smaltire tutta l'acqua che riceve; il

reflusso provoca l'erosione trasportando verso il largo la sabbia rimossa dalla battigia; il BMS drena più velocemente l'acqua in eccesso ricostituendo, in parte, le condizioni di accrescimento della spiaggia che si verificano d'estate .

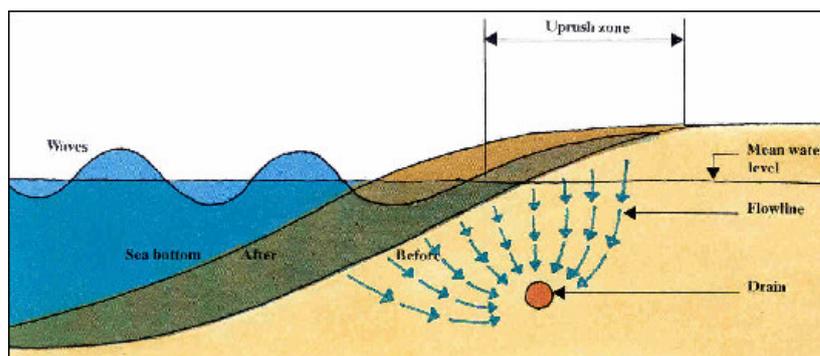
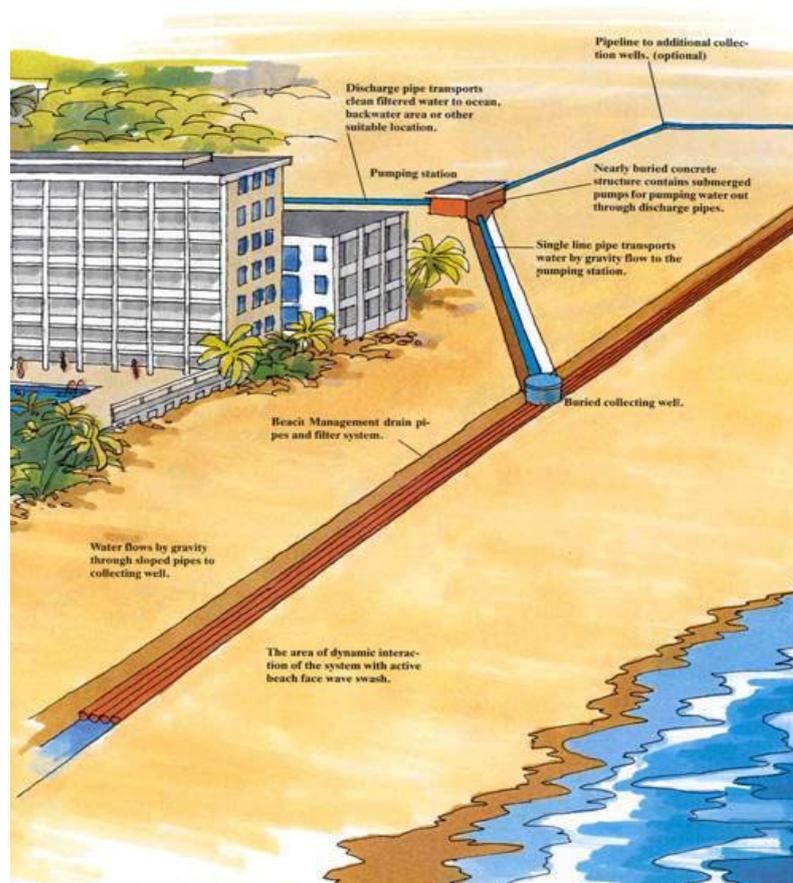


Fig. 33 – Schema del funzionamento del BMS in profilo (sopra) e in un modello di applicazione (sotto).



Questo opera di drenaggio (o “*dewatering*”) avviene attraverso l’installazione di un sistema di tubazioni e di dreni interrato sotto la superficie freatica poco distante dalla superficie costiera; una volta installato, rimane completamente invisibile. La condotta drenante è sepolta nella spiaggia, longitudinalmente alla linea di riva e collegata ad una stazione di pompaggio. L’acqua raccolta nel sistema di tubazioni è inviata a vasche di raccolta da dove ritorna al mare o, essendo filtrata, utilizzata per piscine, acquari, ecc. Il BMS, dunque trattiene la sabbia portata dal mare e la riutilizza (Fig. 34) con un impatto ambientale praticamente nullo ed un basso costo di installazione (Damiani et al., 2001).

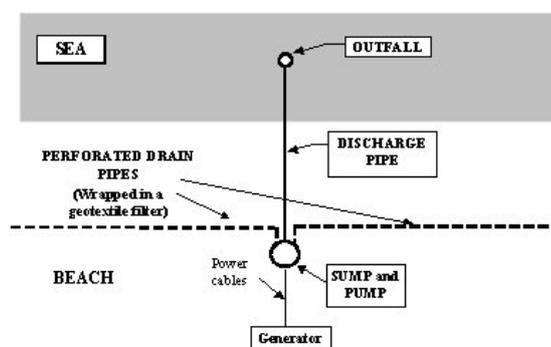


Fig. 34 - Schema strutturale del sistema BMS.

Miglioramenti della presente tecnologia si sono avuti con il brevetto italiano del R.S.A. (Recupero e Stabilizzazione degli Arenili), ad opera della Società di gestione costiera *Ge.Co.* Il progetto RSA nasce dalla necessità di alternare o affiancare ai tradizionali sistemi utilizzati per frenare l’erosione costiera, un sistema innovativo dall’impatto ambientale pressoché nullo (Fig. 35). Secondo tale sistema, l’acqua portata dall’onda, percola attraverso la spiaggia fino a raggiungere un sistema di dreni artificiali che, opportunamente collegati ad un sistema di pompe, consentono l’allontanamento dell’acqua in eccesso altrove, fino ad ottenere, mareggiata dopo mareggiata, un nuovo equilibrio della spiaggia ovvero un suo avanzamento. Fra i vantaggi del sistema vi è quello di assecondare il moto ondoso, senza interferire con la circolazione litoranea, con un unico potenziale svantaggio: l’escavazione della zona di drenaggio e la perdita parziale o totale delle

tubazioni in presenza di mareggiate particolarmente intense e persistenti, non presentando il sistema una protezione attiva (scogliera). Tra gennaio e maggio 2006, due sistemi R.S.A. sono stati installati a Bernalda (MT) - località Metaponto e a S. Michele al Tagliamento (VE) - località Bibione, in aree S.I.C. (Sito di Interesse Comunitario) e Z.P.S. (Zona di Protezione Speciale) e sono in corso le attività di installazione ad Ostia levante (RM) per la stabilizzazione di un intervento di ripascimento (lunghezza circa 2 km).

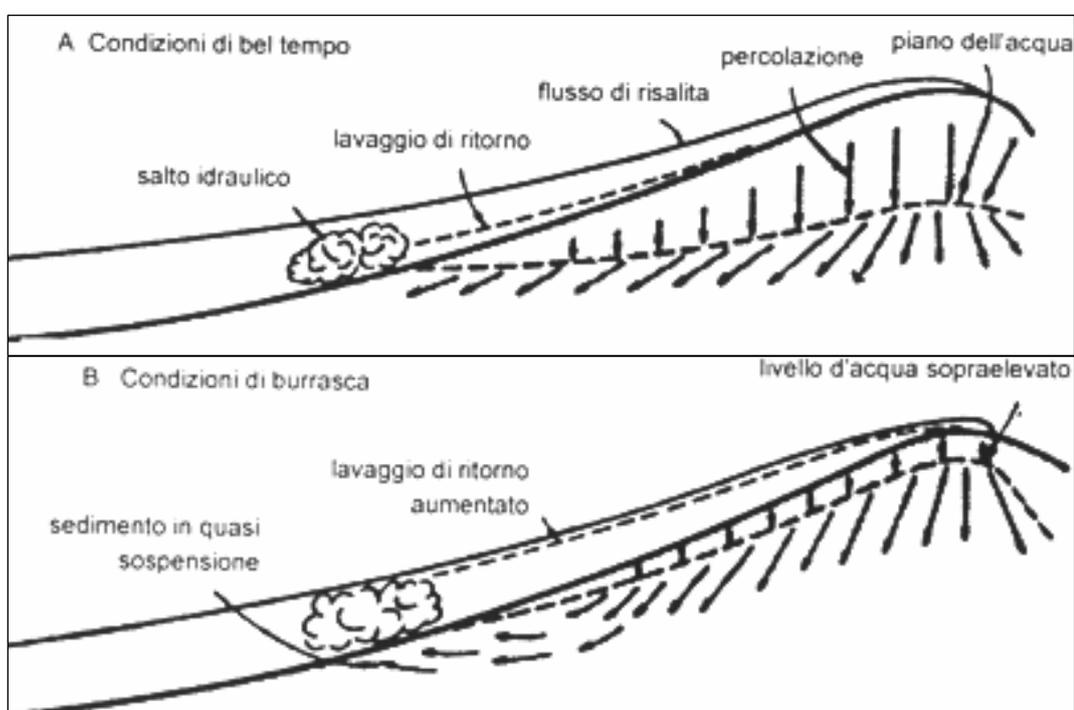


Fig. 35 – Rappresentazione schematica della “riproduzione” delle condizioni estive (A Condizioni di bel tempo) anche d’inverno (B Condizioni di burrasca) con il sistema RSA (da Ge.Co. S.r.l.).

#### **4.1. Alassio.**

Per contrastare l'erosione è stato realizzato un impianto BMS composto da una serie di sezioni drenanti poste in prossimità della linea di battigia e da un pozzetto per la raccolta delle acque drenate. La lunghezza dell'intero impianto sperimentale nel totale è di circa 250 m (un "modulo" di BMS).

I risultati possono essere osservati dalle foto riportate qui di seguito (Fig. 36):



**Fig. 36 - Alassio: risultati dell'installazione dell'impianto BMS: (a) prima dell'installazione; (b) dopo l'installazione del BMS.**

## 4.2. Ostia.

Negli ultimi decenni si è assistito all'assottigliarsi inesorabile delle spiagge di Ostia, storica città balneare con oltre 80 tra stabilimenti e spiagge attrezzate che si sviluppano su un fronte di 7 chilometri. Il litorale sottoposto a un costante fenomeno di erosione è arretrato negli ultimi 40 anni di circa 100 metri. Di fronte a questo drammatico scenario la Regione Lazio, tra le prime in Italia ad adeguarsi alla legge sulla difesa dei litorali, ha varato un coraggioso programma di salvaguardia delle coste. Uno dei punti cardine del programma è la ricostruzione dell'arenile tra il molo di levante del Canale dei Pescatori e la spiaggia di Castel Fusano, per un tratto di litorale lungo 3.500 metri. Questo importante intervento è stato affidato ad un'impresa capace di eseguire il lavoro con una rivoluzionaria tipologia di intervento: il ripascimento morbido utilizzando sabbia prelevata dai fondali marini. (dai 200mila ai 540mila metri cubi di sabbia per ogni intervento su aree lunghe circa 1,5-2 km).

Tale ripascimento morbido è stato integrato e difeso con altri interventi, come le barriere soffolte e i pennelli, là dove le situazioni ambientali lo consentivano.

Il ripascimento e il ripascimento protetto sono stati gli interventi più adoperati sul litorale di Ostia (sia nella parte più a ovest o "Litorale di Ponente" che in quella ad est o "Litorale di Levante").

Nel biennio 1999/00 il Litorale di Ponente ha visto un ripascimento di 2100 m di costa con 346.400 mc di sabbia proveniente da cave a terra. L'ingente mole di materiale disposto sulla costa è stato tutelato da pennelli soffolti richiedendo una manutenzione annua di soli 10.000mc di materiale. Questo "ripascimento protetto" si è aggiunto a quello del 1993 introdotto dal Genio Civile OO.MM. di Roma che prevedeva una barra artificiale di difesa al piede, rasata alla quota -1,50 m.

Nel 1999 il Litorale di Levante ha visto un ripascimento per un tratto di costa di 3500 m di lunghezza per ottenere 40 m di ampiezza (tipo *S-Ripascimento*) rispetto all'ultima linea di riva rilevata (1998) con 950.000 mc di materiali immessi (costo euro 7.643.562 esclusi manutenzione e monitoraggio) con un ripascimento annuo di manutenzione di 50.000 m<sup>3</sup> all'anno. Il tipo di materiale usato è stato sabbia proveniente da cave a mare.

Dopo quest'ultimo intervento si è deciso di adottare il metodo danese *BMS (Beach Management System)*. Nel febbraio 2001, si sono ultimati i lavori presso tre distinti siti dell'arenile di Ostia Levante. I tre impianti di BMS coprono 400 m di lunghezza del litorale. I risultati ottenuti sono stati una stabilizzazione delle tre spiagge e, in una in particolare, un avanzamento di circa 18 metri di arenile (Fig. 37).

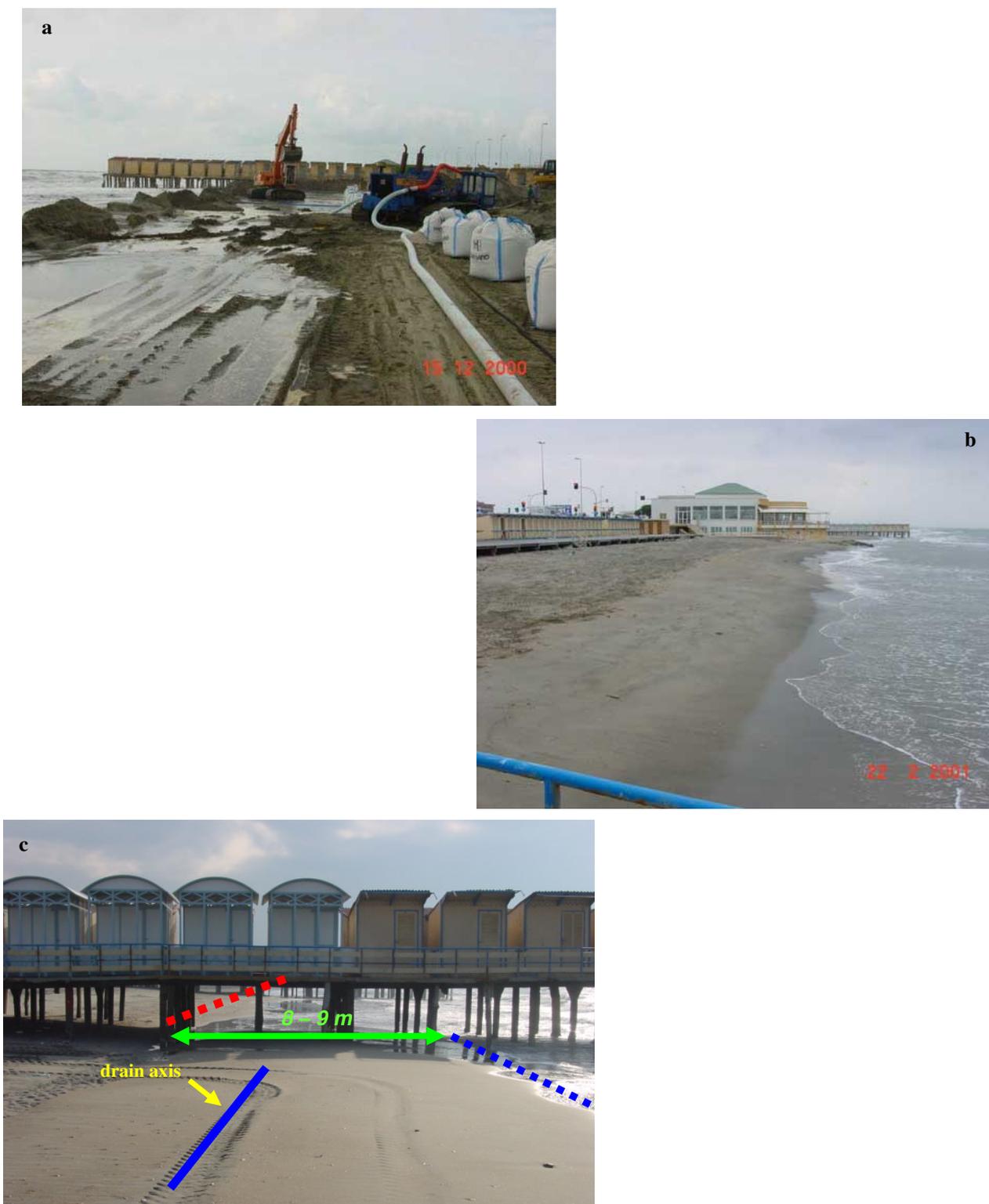


Fig. 37 - Ostia: risultati dell'installazione del BMS: a) prima dell'installazione; b) dopo; c) rappresentazione dell'accrescimento della spiaggia.

### **4.3. Ischia.**

La costruzione delle scogliere frangiflutti del porticciolo turistico di S. Angelo e l'irrigidimento artificiale dell'istmo naturale che collegava il centro di S. Angelo con l'omonimo promontorio, hanno sostanzialmente modificato la dinamica costiera di tutta l'area. In particolare esse non consentono il naturale transito sedimentario tra le aree ad Ovest del Promontorio di S. Angelo e le aree ad est di esso. La costruzione delle scogliere frangiflutti sembrerebbe essere stata effettuata, tra l'altro, utilizzando i massi rimossi dal fondo in tutta la baia dei Maronti; ciò ha compromesso l'azione di difesa naturale che gli stessi massi operavano. La loro rimozione ha, inoltre, consentito alle correnti di fondo trasversali alla costa l'allontanamento dei sedimenti che molto probabilmente in precedenza erano costretti a depositarsi grazie all'effetto barriera determinato dalla presenza di massi sui fondali.

Nel maggio 2002 l'assetto geoambientale dell'intera unità fisiografica è stato completamente modificato (Figg. 38-39) in conseguenza di un ripascimento artificiale (Fig. 38 c-c') con sabbie prelevate dai fondali limitrofi: i materiali versati hanno prodotto un avanzamento della linea di riva di circa 10 m nel settore della Marina dei Maronti.

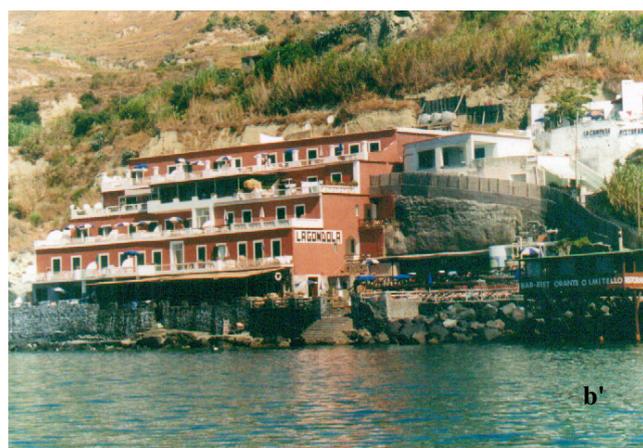
Il ripascimento è stato completato con la realizzazione di un piccolo pennello in parte sommerso, all'estremità orientale del settore, presso Punta della Signora, senza ulteriori opere di contenimento del materiale versato.

Un rilievo della spiaggia eseguito nel biennio 2004/2005 ha messo in evidenza (Fig. 39) la presenza di berme artificiali (almeno tre più sviluppate) create molto probabilmente dalla messa in posto della sabbia di ripascimento che discutibilmente è avvenuta nella maniera più adatta per l'ecosistema.

Nella situazione post-ripascimento, rispetto all'anno 2002, si registra un arretramento generalizzato della linea di riva (Fig. 40).

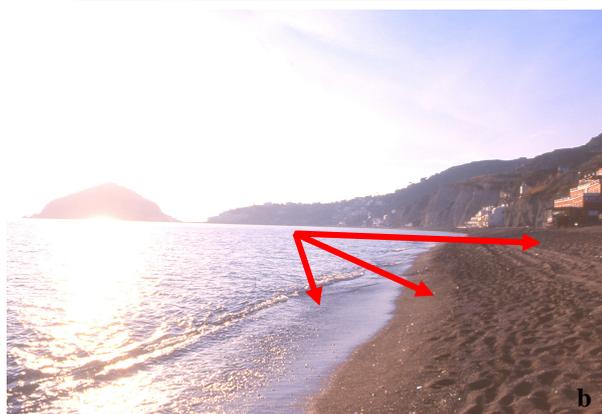
In particolare, l'erosione verificatosi presso la località Fumarole (Fig. 40 a) ha fatto riemergere le vecchie opere di difesa seppellite, al momento del ripascimento, dalla sabbia

di refluento. A meno di un triennio di distanza dall'ingente opera di ripascimento tal strutture sono riemerse (Fig. 40 b) e la spiaggia risulta nuovamente di esigua ampiezza.

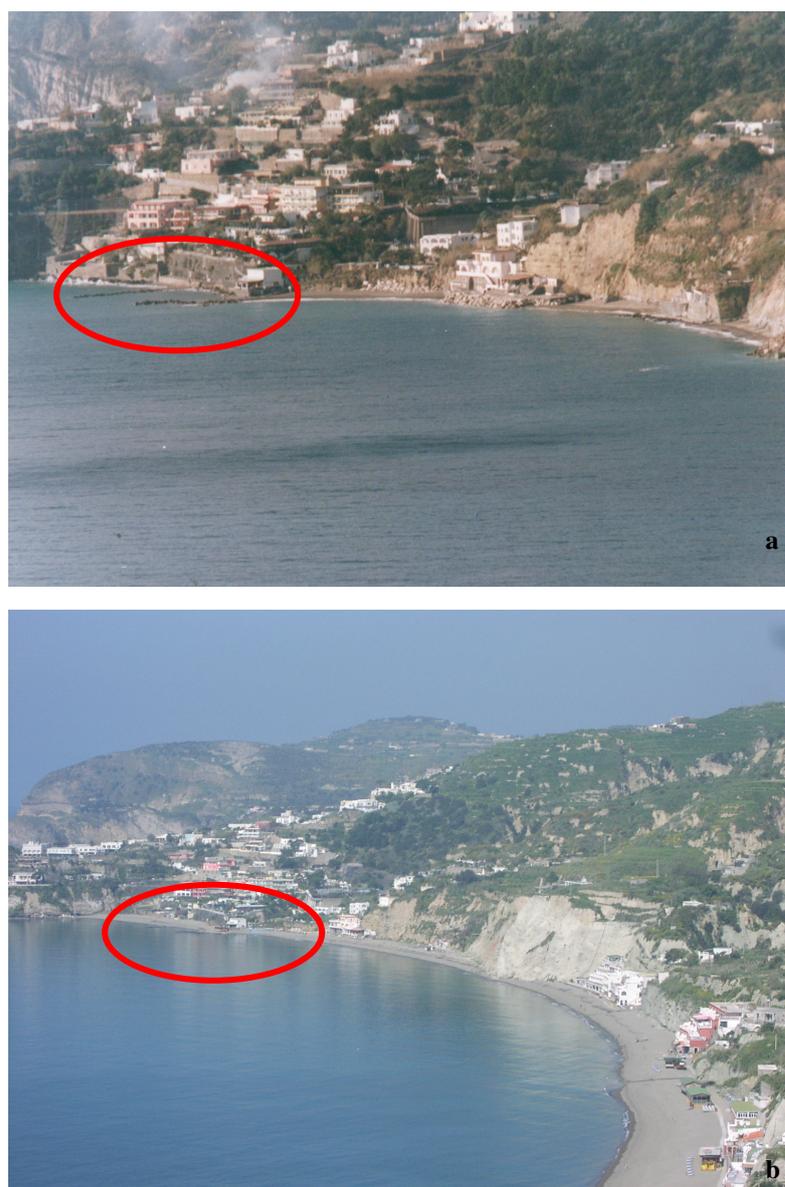




**Fig. 38 – Baia dei Maronti: situazione prima e dopo il ripascimento del 2002: a) foto eseguita nel 2000 raffigurante il litorale quasi del tutto privo di spiagge; b-b'') particolari della foto a) dove il mare lambisce la falesia (b), l'hotel della Baia (b'), la passerella (b''); c-c') intervento di ripascimento del 2002 con sistemazione della sabbia con l'utilizzo della benna (c), copertura con sabbia di strutture presenti lungo il litorale (c') e della passerella (c'').**



**Fig. 39 – Situazione lungo il litorale dei Maronti dopo il ripascimento del 2002: a) formazione di berme artificiali; b) particolare delle berme; c) particolare del gradino di erosione (freccia rossa) e proporzioni rispetto all’altezza umana (nel cerchio rosso).**



**Fig. 40 – Confronto tra la situazione del Litorale dei Maronti nel 2002 prima del ripascimento (a) e nel 2005 (b): evidenziata dal cerchio rosso è la zona delle *Fumarole*.**

Un esame attento della morfologia del fondo ha consentito di individuare forme da legare all'asportazione di massi di natura lavica che verosimilmente erano posati sul fondo. Il prelievo di tali massi, utilizzati poi per la costruzione della predetta scogliera, ha sottratto all'ambiente una naturale difesa consentendo tra l'altro ai depositi sabbiosi, movimentati dalle correnti di fondo, di raggiungere le alte profondità non potendo più fermarsi in corrispondenza della barriera naturale costituita dagli stessi massi.

Considerato pertanto che il litorale doveva essere protetto dai fenomeni erosivi e nello stesso tempo doveva essere ricostituito l'ambiente litoraneo preesistente, si era ipotizzato (De Pippo, 1998), al fine del recupero ambientale e socio-economico di tutta l'area, un ripascimento artificiale, con materiali sabbiosi con caratteristiche idonee tali da renderli in equilibrio con l'ambiente e reperiti in parte sui fondali antistanti il litorale (tra le profondità di -10m/-20m), protetto al piede da scogliere frangiflutti parallele alla costa del tipo *Beachsaver Forte*), evitando l'allontanamento veloce dei materiali sabbiosi riversati sul litorale.

#### 4.4. Procida.

Tra le spiagge di Ciraccio e Ciracciello (cfr. Fig. 26) sono stati installati due impianti di BMS a coprire 1000 m di lunghezza di arenile. In due mesi si è assistito ad un avanzamento di 6 m della linea di battigia con un aumento volumetrico di  $7500\text{m}^3$  di sabbia. Dalle immagini seguenti è possibile notare l'avanzamento della linea di riva lungo il litorale considerato.



Fig. 41 – Litorale della Chiaiolella (a) e suo avanzamento con l'installazione dell'impianto di BMS (b).

#### **4.5. Ferrara.**

La costa ferrarese (Fig. 42) negli ultimi 40 anni è stata oggetto di continui interventi antropici che hanno portato al progressivo smantellamento dei cordoni dunari esistenti a vantaggio di insediamenti residenziali e turistici. Questa situazione associata a fenomeni quali la perturbazione delle condizioni idrogeologiche e la subsidenza ha reso particolarmente vulnerabili, in occasione di mareggiate ed acque alte, non solo le zone litoranee ma tutto il territorio che si trova sotto il livello del mare ed alla quota degli argini fluviali. Per fronteggiare tale emergenza è stato realizzato negli ultimi decenni un sistema di difesa articolato su tre linee: la barriera litoranea costituita da argini in terra o sabbia; l'argine Acciaioli che da Volano arriva a Porto Garibaldi; le arginature sui corsi d'acqua. Ciononostante il territorio dei comuni costieri ferraresi è stato interessato più volte nel passato anche recente da eventi alluvionali.

Il profilo di una linea di costa è mutevole in conseguenza sia della variazione di apporto sedimentario ad opera dei fiumi e della redistribuzione ad opera del mare sia dell'innalzamento del livello marino, della subsidenza, della pressione antropica oltre che della non corretta previsione degli effetti conseguenti alla realizzazione di opere idrauliche.

La realizzazione di nuovi moli od il prolungamento di quelli esistenti ha innescato, nei primi decenni del secolo scorso, processi di accrescimento delle spiagge sopraflutto ed erosione di quelle sottoflutto a Rimini, Cesenatico e Porto Garibaldi.

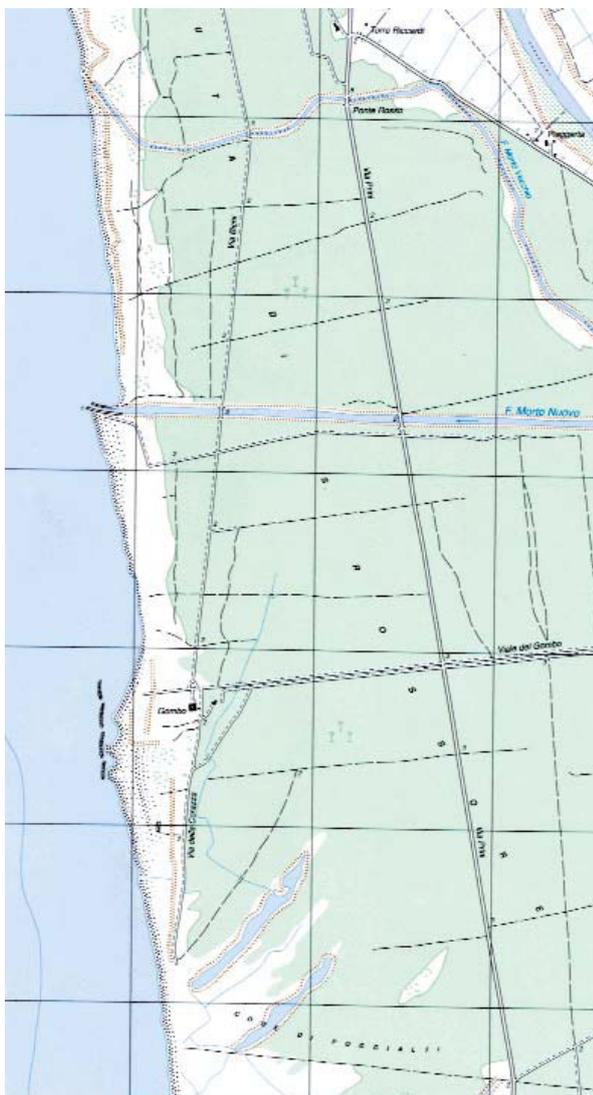
In quest'ultima località i moli foranei, interrompendo la deriva litoranea che risale da sud, hanno determinato un notevole avanzamento della spiaggia sopraflutto di Lido degli Estensi (circa 10 m/anno nell'ultimo decennio) e una profonda crisi regressiva sui litorali sottoflutto quantificabile, tra il 1993 ed il 2000, in un deficit di materiale di circa 2 milioni di m<sup>3</sup> (ARPA RER, 2002). Innescando una sorta di processo a catena, man mano che le correnti marine accumulavano materiale lungo il "doppio molo", le Autorità locali competenti erano costrette ad effettuare un continuo prolungamento del molo stesso. Ciò, faceva sì che la zona sopraflutto del molo sud di Porto Garibaldi contrariamente alla tendenza generale della costa regionale, presentava un bilancio positivo per l'eccessiva sedimentazione che occlude rapidamente l'imboccatura del porto e penalizza l'attività

balneare per l'eccessiva larghezza della spiaggia (circa 300 m, con velocità di progradazione di 10-11 m/anno; ARPA RER, 2002). Viceversa, i litorali sottoflutto vedevano un aumento progressivo del tasso di erosione.

In presenza di un *deficit* sedimentario la stabilizzazione di un tratto costiero induce sempre l'erosione dei settori posti sottoflutto, come risulta evidente dall'andamento della linea di riva a nord dei moli guardiani posti alla foce del fiume Morto Nuovo che intercettano anch'essi il flusso litoraneo a favore della spiaggia meridionale: a nord di essi la costa presenta una nuova falcatura (Fig. 43).



**Fig. 42 –** Stralcio di Carta topografica (F. 205, Q. II, *Comacchio*, Serie 50) riportante il territorio esaminato, da Lido degli Estensi a Sud a Lido delle Nazioni a Nord: si può notare l'accrescimento delle spiagge sopraflutto e la concomitante erosione di quelle sottoflutto.



**Fig. 43 – Stralcio di Carta topografica (F. 272, Sez. 1, Q. I, Migliarino, Serie 25): i prolungamenti dell'apparato di foce del F. Morto Nuovo (Pisa) creano gli stessi effetti ai litorali sopraflutto (a Sud) e sottoflutto (a Nord) riscontrati a Porto Garibaldi.**

Per contrastare questi fenomeni erosivi, negli anni '70 furono realizzate le prime scogliere a Porto Garibaldi e, negli anni successivi, ulteriori opere difensive rigide di varia tipologia (aderenti, fornaee, pennelli) per arrivare, nell'arco di pochissimi chilometri, a circa 30 scogliere che non hanno arrestato il fenomeno, ma solo trasferitolo verso settentrione (Fig. 44).



**Fig. 44 – Rappresentazione schematica e foto aerea raffigurante la serie di circa 70 scogliere parallele al litorale che si sviluppa per 9 chilometri a nord di Porto Garibaldi, dove i moli guardiani del canale intercettano il flusso sedimentario proveniente da sud determinando così l’espansione della spiaggia di Lido degli Estensi.**

Nel tratto più settentrionale la difesa del litorale è affidata anche ad alcuni pennelli, che risultano insabbiati sul lato meridionale, a riprova del fatto che il flusso sedimentario in questo paraggio è diretto da sud verso nord. Anche in questo caso, sottoflutto alle difese si sviluppa una falcatura che attesta l’erosione della costa.

Questi interventi hanno irrigidito il sistema litorale e snaturato fortemente la sua dinamica evolutiva e, soprattutto, non hanno risolto il problema. Anzi, spesso, hanno determinato la formazione di spiagge pensili dove, tra i fondali interni ed esterni addossati alle difese, si instaurano differenze di quota anche di alcuni metri.

Se si escludono quelle a protezione del territorio del Comune di Goro, vi sono in Emilia-Romagna circa 39 km di spiagge ad alta fruizione turistica protette da scogliere parallele emerse, poste a distanza variabile da 50 a 300 m dalla battigia.

In queste zone la limitata circolazione di materiali sabbiosi sottocosta ha fatto sì che nel tempo, per mantenere un minimo di spiaggia, siano stati ristretti i varchi tra le scogliere, costruite soglie soffolte in corrispondenza dei varchi e innalzate le quote delle scogliere stesse. In tal modo la fascia compresa tra scogliere e battigia risulta di fatto nettamente separata dal mare aperto.

L'impatto di un simile sistema difensivo risulta quindi molto elevato, sia dal punto di vista visivo, che della qualità delle acque intercluse, nonché della qualità dei fondali.

Negli anni successivi, a contrasto dei fenomeni erosivi che hanno interessato il territorio costiero romagnolo furono progettati interventi di posa in opera di difese a mare (difese radenti, tubi Longard, ecc.) che a fronte di un influsso positivo esercitato sul controllo e/o il rallentamento del fenomeno nelle aree di intervento, hanno parallelamente determinato accentuazioni dell'azione erosiva nelle aree adiacenti per le modifiche indotte sull'equilibrio del trasporto solido litoraneo. Ne è esempio il molo di Porto Garibaldi che, pur determinando un forte ripascimento delle spiagge poste a sud, ha prodotto un'altrettanto forte erosione di quelle a nord per l'intercettamento dei sedimenti trasportati dalla corrente sottocosta, a prevalente direzione Sud-Nord. Per superare gli svantaggi connessi all'impiego di opere rigide quali scogliere o pennelli e salvaguardare il valore ambientale ed economico delle spiagge, delle aree vegetate e delle dune costiere, oggi si impiegano metodi che prestano più attenzione all'impatto visivo, della qualità delle acque intercluse e della qualità dei fondali. Si privilegia il ripascimento artificiale con sabbia prelevata da fondali marini al largo o con sabbia litoranea proveniente da foci dei fiumi e spiagge in crescita come nel ripascimento degli arenili in erosione a nord di Porto Garibaldi realizzato con sabbia della spiaggia di Lido Estensi.

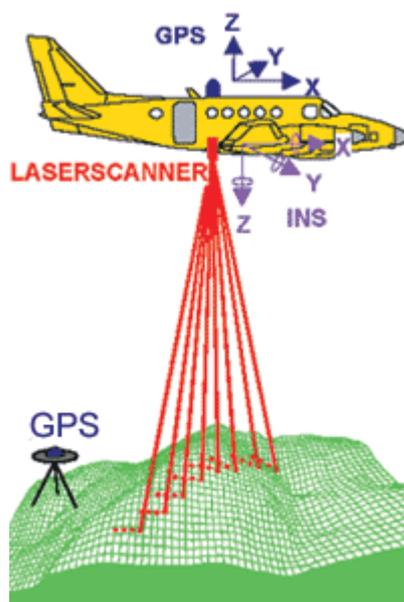
Negli ultimi anni gli incalzanti processi erosivi e le ingressioni marine hanno creato una situazione cui provvedere nel minore dei tempi possibili e per la quale sono state previste soluzioni integrate che vanno dal *dewatering* (drenaggio con sistema BMS), alla realizzazione di moli, dune e risagomatura della sezione di foce.

La scelta del ripascimento artificiale per la ricostruzione delle spiagge erose ha prevalso per la natura dell'intervento non eccessivamente impattante dal punto di vista ambientale. Tale scelta restava comunque subordinata alla disponibilità di notevoli quantitativi di sabbia, di idonea qualità e granulometria.

Visti la difficoltà, i costi economici e l'impatto ambientale derivanti dal reperimento dei diversi milioni di metri cubi di materiale necessari, si decise di estendere anche al fondo del mare la ricerca di accumuli di sabbia utilizzabili allo scopo.

Negli anni 1984 e 1987-88 l'Idroser ha svolto 2 campagne di ricerca di fronte alla costa regionale su 5 aree distinte, effettuando complessivamente 762 km di profili geofisici e batimetrici e 39 carotaggi.

Inoltre, già dai primi anni '80 la Regione ha istituito reti per il monitoraggio sistematico della subsidenza, dell'evoluzione della linea di riva e dell'erosione delle spiagge (Fig. 45).



**Fig. 45 – Rappresentazione della metodologia utilizzata dalla Regione Emilia-Romagna per il monitoraggio della subsidenza.**

Negli ultimi anni queste reti sono state potenziate (Fig. 46) e, attraverso le Autorità di Bacino, si è avviato il progetto per la misura del trasporto solido fluviale.



**Fig. 46 – Potenziamento della rete di monitoraggio della Regione Emilia-Romagna.**

Il sistema informativo geografico della costa raccoglie e organizza tutti i dati disponibili e le elaborazioni cartografiche relative all'ambiente costiero. Il SIG è uno strumento fondamentale per la gestione della costa poiché consente di analizzare contestualmente una grande mole di dati, confrontando tematiche diverse e dati acquisiti in varie epoche, facilitando quindi le attività di studio, il monitoraggio sistematico e la progettazione degli interventi di difesa (Fig. 47).



**Fig. 47 - A sinistra: esempio di foto aerea *Volo RAF 1943-1945*; a destra: esempio di foto aerea *Volo IT2000* associata alle batimetrie (immagini Arpa Emilia Romagna, 2000).**

Sono stati avviati una serie di progetti sperimentali basati sul telerilevamento come, ad esempio, il rilievo delle aree subsidenti effettuato con tecniche radar satellitari (SAR), i rilievi morfo-altimetrici ad altissima risoluzione effettuati con il sistema laser da mezzo aereo (Lidar) e i rilievi puntuali sul comportamento di opere e di foci fluviali con telecamere intelligenti (sistema Argus, progetto Coastview).

Con queste ed altre tecnologie, al largo della costa ravennate e ferrarese, su fondali compresi tra 34 e 40 metri sono stati individuati corpi sedimentari con una potenzialità complessiva di diverse centinaia di milioni di metri cubi.

L'adozione della tecnica del ripascimento in alternativa alle scogliere ha prodotto, pur con tutti i limiti derivanti dall'applicazione pratica di questa nuova tipologia, la stabilizzazione dei litorali protetti, senza indurre effetti negativi sulle spiagge limitrofe e senza produrre modificazioni di sorta su fondali, qualità dell'acqua e aspetti paesaggistici.

Tuttavia, causa l'insufficienza degli apporti per via naturale, ad opera dei fiumi, e la presenza di numerosi moli portuali che interrompono il flusso litoraneo, era necessario definire una politica di gestione ottimale della risorsa sabbia. Di conseguenza, in alternativa ai materiali di cave a terra, si è valorizzato l'accumulo di sabbie in eccesso lungo alcuni tratti di litorale.

È stato realizzato il trasferimento di oltre 200.000 m<sup>3</sup> di sabbia dall'ampia spiaggia Lido Estensi ai litorali in erosione presenti tra Porto Garibaldi e il Lido delle Nazioni (per fronte complessivo di 8,5 km). Per quest'opera è stato allestito un sabbiodotto che ha traversato il Porto Canale evitando il trasporto via terra o via mare (Fig. 48), ovvero un innovativo sistema di trasporto delle sabbie dai punti di accumulo di Lido degli Estensi fino ad oltre 8 km più a nord.

L'intervento programmato ha presentato alcuni aspetti innovativi che hanno reso l'operazione particolarmente conveniente. Nell'area di prelievo è stato creato un bacino, collegato con il mare, ampio 100 m<sup>2</sup> e profondo 2-3 m, dal quale viene prelevata, tramite una pompa idraulica, una miscela composta da 80% di acqua e 20% di sabbia. La miscela, trasferita tramite un "sabbiodotto" costituito da un tubo in PVC di 25 cm posizionato nella parte emersa della spiaggia ad una distanza massima di 8,5 km con l'impiego di due pompe *booster*, con una produzione giornaliera di circa 2000 m<sup>3</sup>. Qui viene ricostruita la spiaggia emersa e parzialmente i fondali mediante versamento continuo, movimentando in totale oltre 200.000 m<sup>3</sup> di sabbia, prelevati da un'area estesa 64.000 m<sup>2</sup>. L'intervento, data la presenza delle scogliere parallele, è da considerarsi come un *ripascimento contenuto*.

Il ripascimento è stato progressivo, allungando di volta in volta la condotta utilizzata per il trasporto della miscela di sabbia e acqua ad opera delle potenti pompe idrauliche. Si sono distribuiti circa 214.000 m<sup>3</sup> di sabbie dilavate in 6 mesi. Questa tipologia di intervento, costato al netto circa 1.700.000 euro, ha abbattuto gli impatti ambientali dovuti al trasporto su gomma, e la distribuzione del sedimento è stata più omogenea di come poteva avvenire se fosse avvenuta per sversamento da mezzo navale. Il dilavamento del fine e le modalità di accumulo hanno prodotto un complesso sedimentologico relativamente addensato, che sembra offrire maggior resistenza all'azione erosiva marina rispetto agli interventi precedenti. È comunque in corso un monitoraggio che darà il responso finale sul progetto realizzato.

La serie di immagini seguenti ripercorre i vari stadi dell'intervento:

**Fig. 48 – Fasi dell'intervento di ripascimento tramite *sabbiodotto* nell'area di Porto Garibaldi:**



**1) Gennaio 2004: tratto di litorale tra Lido Pomposa e Nazioni dopo una serie di mareggiate**



**2) Ubicazione dell'area di scavo e cantiere sulla spiaggia del Lido degli Estensi, a ridosso dei moli portuali di Porto Garibaldi**



**3) Indicazione del posizionamento del sabbiodotto**



**4) Lido degli Estensi, zona di scavo (a fine lavori, maggio-giugno 2004)**



**5) Fase di realizzazione del bacino di miscelazione e del canale adduttore.**



**6) Bacino di disgregazione-miscelazione delle sabbie e sistema di pompaggio (area di cantiere)**



**7) Particolare in opera del disgregatore ad acqua in pressione**



**8) Immagine della condotta al Lido degli Scacchi che segna il limite, verso terra, del materiale versato**



**9) Installazione del sabbiodotto (costituito da tubi in polietilene Ø interno 280 mm – lunghezza 13 m)**



**10) Fasi di versamento in cui viene evidenziata la sospensione del materiale versato**



**11) Particolare del versamento della sabbia sulle spiagge da ripascere**



**12) Versamento e distribuzione del materiale**



**13) Rimodellamento del profilo di spiaggia tramite pala meccanica**



**14) Vista dall'alto del litorale dopo la copertura della condotta**



**15) Lido degli Estensi dopo il ripascimento, maggio 2004**



**16) Lido di Pomposa, settembre 2004, dopo l'intervento di ripascimento**

Visto l'insuccesso avuto dai 39 km di scogliere parallele emerse nella difesa dei tratti critici e nella capacità di mantenere la stabilità della spiaggia laddove non ci sono sabbie in circolazione lungo costa, l'adozione alternativa della tecnica del ripascimento ha prodotto la stabilizzazione dei litorali protetti, senza indurre effetti negativi sulle spiagge limitrofe e senza produrre modificazioni di sorta su fondali, qualità dell'acqua e aspetti paesaggistici.

E' emerso così che le esigenze più sentite dagli amministratori locali e dagli operatori economici sono un'elevata qualità dell'ambiente litoraneo (acqua e fondali in particolare) e la disponibilità di larghe spiagge.

Ma una larga spiaggia, con al retro un apparato dunoso continuo, costituisce anche il miglior sistema di difesa del territorio e degli abitati dal mare.

A ciò va aggiunto che il sistema spiaggia è in grado di far fronte egregiamente all'eventuale innalzamento del livello marino (40-50 cm nel prossimo secolo) dovuto alla variazione della temperatura media della terra, che recenti studi considerano più che probabile per i prossimi decenni.

In questi ultimi anni, inoltre, sono state sperimentate sul litorale comacchiese delle nuove tecniche di interventi innovativi per contrastare l'erosione costiera favorendo l'accumulo di nuovi sedimenti. Ad opera del Servizio Tecnico di Bacino del Po di Volano sono state progettate e realizzate delle nuove tipologie di pennelli perpendicolari alla linea di costa, costruiti in legno idraulico, lunghi da 4 a 6m, infissi nei fondali e sulla battigia, allo scopo di intercettare il trasporto solido e creare delle celle a bassa energia idraulica per consentire la sedimentazione.

## **PARTE III**

### **APPLICAZIONE DELLA GEOMETRIA FRATTALE**

## **1. Utilizzo dell'analisi frattale**

A partire dalla seconda metà degli anni '60, e più decisamente negli anni '90, la geometria frattale si è messa in luce quale nuova disciplina matematica – la Matematica frattale – in grado di descrivere in modo dettagliato le più disparate forme naturali. Quanto alle applicazioni, i frattali sono utilizzati per rappresentare oggetti che esibiscono una forma uguale o simile a se stessa a molti livelli di scala, dalle coste marittime alle catene montuose, e sono usati in grafica computerizzata per riprodurre immagini realistiche (Odifreddi, 2000).

Negli ultimi dieci anni l'utilizzo della dimensione frattale dei bacini e delle reti fluviali, delle linee di costa, delle superfici topografiche e di altri elementi geografico-fisici, si è dimostrato un valido strumento a supporto di analisi geomorfiche quantitative.

Tra l'altro, sono ancora da comprendere e chiarire le relazioni – che si ritiene siano strette, ma non immediatamente visibili – tra le dimensioni frattali ed i vari processi dinamico-evolutivi espletatisi in differenti condizioni tettonico-eustatiche e climatiche in ambienti costieri differenti.

Com'è noto, il modellamento del paesaggio è un fenomeno complesso interattivo, in quanto governato da numerosi processi dinamici legati tra di loro in modo non lineare, che alla luce delle moderne conoscenze geografico-fisiche è errato semplificare e trattare secondo la teoria classica dell'equilibrio. In diversi sistemi ambientali, dominati da una fisica del non-equilibrio, è già stata riconosciuta alla base una legge di potenza – la nota legge di Gutenberg-Richter (Gutenberg & Richter, 1948, 1956; Richter, 1958) – invariante di scala, ubiqua ed universale (Buchanan, 2001).

Inoltre, l'uso della dimensione frattale per quantificare i vari parametri morfologici si rivela di specifica importanza, in quanto le misure effettuate da qualsiasi ricercatore sul medesimo oggetto risultano verificabili. Pertanto, le varie dimensioni frattali uni-, bi- e tridimensionali calcolate per uno stesso oggetto fisico – una linea di costa, una conca, un rilievo – di una certa area geografica e con la medesima età, sono tra di loro oggettivamente confrontabili.

La dimensione frattale non è espressa da una specifica unità di misura, bensì da un semplice numero reale (p.e. 1,26), frazionario (p.e. 5/3) oppure anche irrazionale (p.e.  $\log 4 / \log 3$ ). Pertanto, come in un certo senso l'etimologia stessa del neologismo indica (*frattale* deriva dal latino “*fractus*”: *interotto, frazionato*), un oggetto frattale ha una dimensione non intera, da intendersi come una sorta di dimensione adimensionale indicatrice del grado d'irregolarità geometrica o frammentazione di una forma.

La dimensione frattale di coste con genesi e morfologia differenti, presenti in zone diverse del globo, talora può essere espressa da uno stesso numero. Per questi motivi la scelta delle aree campione è inevitabilmente ricaduta su quei territori la cui storia geologica ed assetto geomorfologico sono generalmente conosciuti. In particolare, sono state individuate le seguenti aree campione la cui storia geologica ed assetto geomorfologico sono nel complesso noti e tra di loro molto diversi: Baia dei Maronti (Ischia) e litorale di Porto Garibaldi (Ferrara) e si è tentato il confronto tra le linee di costa attuali e quelle storiche desunte dalla letteratura.

In queste aree l'analisi frattale (Mandelbrot, 1967, 1975, 1983) è stata applicata con l'obiettivo d'individuare, attraverso il grado d'irregolarità geometrica delle linee di costa, i processi primari e secondari che hanno contribuito e concorrono alla loro genesi (Klinkenberg, 1992; Klinkenberg & Goodchild, 1994; Gao & Xia, 1996; De Santis et alii, 1997; Turcotte, 1997; Poli & Perugini, 2001) nonché alla loro evoluzione morfologica (Xiao & Klinkenberg, 1993).

In sintesi, gli obiettivi di questa analisi sono stati:

- determinazione della dimensione frattale di forme del territorio costiero emerso e sommerso, di estensione locale e regionale, ed interpretazione evolutiva in chiave geomorfologica di alcune aree campione;
- individuazione e discriminazione dei processi geomorfici endogeni ed esogeni, responsabili delle eventuali differenze o convergenze dei valori della dimensione frattale.

## 2. Metodologia applicata

È noto che i frattali sono insiemi non topologici; infatti, mentre per gli insiemi topologici la dimensione  $D_f$  di Hausdorff-Besicovich è un intero (0 per il punto, 1 per la curva, 2 per la superficie, 3 per il solido), per gli insiemi che sono frattali  $D_f$  non è un intero, ma un numero reale. La parte intera di quest'ultimo rappresenta la natura topologica dei dati, mentre la parte decimale descrive l'irregolarità rispetto alla natura topologica, pur conservando la caratteristica essenziale degli insiemi frattali che è rappresentata dall'invarianza di caratteri geometrici all'interno di un determinato intervallo di scala (Mandelbrot, 1983).

L'immagine dell'oggetto naturale viene riprodotta attraverso un algoritmo in uno spazio matematico astratto, occupando una porzione di questo spazio che rappresenta la sua dimensione. Tale dimensione viene quindi definita da un numero che descrive la parte di spazio che occupa. Pertanto, la dimensione di un morfotipo che l'analisi frattale va a determinare con un algoritmo rappresenta la parte di spazio che occupa. Se ne deduce che il valore numerico che descrive la dimensione frattale dipende dall'algoritmo utilizzato per riprodurre l'immagine o forma dell'oggetto.

Il grado d'irregolarità di una linea di costa può essere calcolato mediante vari algoritmi: il *box-counting*, che fornisce la dimensione frattale  $D_f$  con procedura simile a quella impiegata da Mandelbrot (1967) per la costa britannica; l'*integrale di correlazione*, che restituisce la dimensione di correlazione  $D_C$ . Il primo algoritmo conta per  $n$  volte il numero di caselle di una griglia occupate almeno da un punto dell'oggetto, con la dimensione della cella elementare dimezzata di volta in volta; il secondo, invece, conta il numero di coppie di punti la cui distanza ricade in un determinato intervallo di lunghezza, ogni volta raddoppiato.

Entrambi i metodi calcolano la distribuzione areale (*clustering*) dei punti analizzati e consentono di calcolare la dimensione frazionaria che rappresenta l'irregolarità della linea di costa in esame; inoltre, permettono il calcolo del cosiddetto intervallo di scala (*scaling region*) al cui interno esiste la proprietà d'*invarianza di scala* (o *autosomiglianza* = *self-*

*similarity*, ovvero *omotetia interna*), per esempio la proprietà di assimilare la forma di un breve tratto di costa, quando lo si ingrandisce, ad uno più lungo che lo comprende.

La dimensione  $D_f$  ottenuta con il metodo del *box-counting* è leggermente maggiore della dimensione  $D_C$  ottenuta invece con l'integrale di correlazione. Tuttavia, il grande vantaggio di quest'ultimo metodo consiste nell'alto livello di confidenza che si raggiunge nel calcolo dell'intervallo di scala.

Pertanto, la dimensione frattale permette di stimare l'irregolarità di una linea di costa considerata come punti distribuiti in un'area; sulla base di quanto sopra specificato, per la stima di tale dimensione è stato preferito l'utilizzo di un algoritmo *box-counting*, così come fu sviluppato da Mandelbrot (1967) sui dati non pubblicati da Richardson. Il metodo del *box-counting* (Goodchild, 1982), in generale, è risultato idoneo per l'analisi di linee prive di biforcazioni, quali le isoipse o i singoli canali fluviali.

In genere, nei casi in studio il numero limitato di punti esaminati per ogni linea di costa comporta una stima instabile di  $D_f$ . In alternativa, si utilizza l'integrale di correlazione  $C(R)$  (Grassberger & Procaccia, 1983; Luongo et alii, 2000) che calcola il numero di coppie con distanza  $|X_i - X_j|$  minore di  $R$ . L'analisi prevede che si consideri volta per volta ogni punto della linea di costa quale centro e si analizzi la distribuzione degli altri punti relativamente a quello considerato, tenendo conto che le distanze tra punti di una linea di costa sono determinate mediante la trigonometria applicata alle coordinate geografiche.

L'integrale di correlazione è così definito:

$$C(R) = 2 / n(n-1) \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \Theta(R - |X_i - X_j|) \quad [1]$$

dove  $\Theta$  rappresenta la funzione di Heaviside,  $n$  è il numero dei punti disponibili ed  $X_i$  è l'insieme delle coordinate dell' $i$ -esimo punto,  $2/n(n-1)$  è il fattore di normalizzazione che rappresenta il numero di coppie tale che  $C(R)$  tenda a 1 per  $R$  che tende all'infinito.

Se gli  $n$  punti della linea di costa hanno una distribuzione frattale, accade che:

$$C(R) = kR^D \quad [2]$$

oppure, in forma equivalente, su di un grafico a *scala log-log*, si ha che:

$$\log(C) = \log(k) + D \log(R) \quad [3]$$

dove  $C(R)$  è la distribuzione della frequenza cumulativa di tutte le distanze tra i punti,  $k$  è una costante e  $D$  è la dimensione frattale (appresso denominata  $D_f$ ).  $D_f$  indica la dimensione di correlazione ( $D_c$ ) ed è leggermente più bassa della reale dimensione frattale ( $D_f$ ), ma in genere si considera che le due dimensioni siano simili (Korvin et al., 1990).

In teoria la relazione lineare [3] vale per tutti i valori di  $R$ , ma per i dati sperimentali esiste un intervallo limitato di validità della [3] (*scaling region*) nel quale il valore iniziale ed il valore finale sono legati alla risoluzione areale, alla grandezza ed alla forma della linea di costa analizzata. Queste circostanze conducono ad una stima di  $D_f$  come coefficiente di regressione  $r$  della relazione lineare [3], all'interno di uno specifico *range* di distanze, solamente quando il coefficiente di correlazione  $r$  tra le  $N$  coppie disponibili di  $\log(C)$  e  $\log(R)$  è confidente ad un livello maggiore del 99%.

Questo livello si basa sull'ipotesi nulla di correlazione zero che è rigettata ad un livello di confidenza del 99%, quando la seguente relazione:

$$\left[ r \sqrt{(N-2)} / \sqrt{(1-r)} \right] \quad [4]$$

fornisce un valore maggiore di quello dato dalla distribuzione di Student con un numero di gradi di libertà pari a  $N - 2$  e con un livello di confidenza del 99% (Mazzarella & Tranfaglia, 2000).

Per calcolare la dimensione frattale delle linee di costa e delle relative isobate e per identificare l'intervallo di distanze all'interno del quale le coordinate dei singoli punti delle forme analizzate seguono la relazione frattale [3], si restituisce su un diagramma *log-log* il numero  $C$  di coppie di punti con distanza più piccola di  $R$ , come funzione di  $R$ . Si pone la

distanza più piccola utilizzabile pari alla risoluzione areale (p.e. 25 m), gradualmente aumentata di un fattore di 2.

Il *best fitting* della retta di regressione dei minimi quadrati di  $\log(C)$  su  $\log(R)$ , confidente ad un livello più alto del 99%, si ottiene per distanze comprese all'interno di un intervallo di distanze espresse in metri con una dimensione frattale  $D_f$  uguale alla dimensione topologica di una linea, sia per la linea di costa che per le isobate considerate.

Il grafico *log-log* inizia a curvare per  $R$  maggiore di una certa distanza e questo non permette un'interpretazione corretta di  $D_f$ . Non appena  $R$  raggiunge la dimensione dell'area investigata vi sono sempre meno coppie di punti con separazione sufficiente; per valori di  $R$  più grandi dell'estensione dell'area in esame il numero di coppie con distanze minori di  $R$  rimane costante, cioè  $R$  aumenta e  $D_f$  è pari a 0 (*edge effect*).

I valori della dimensione frattale delle paleolinee di riva e di quelle storiche ed attuali sono approssimati al decimo; la loro interpretazione in chiave geomorfologica fornisce informazioni sui processi primari e secondari (Cortemiglia, 1996), connessi al modellamento costiero e – in ultima analisi – anche sulle tendenze morfoevolutive.

Va specificato che il tipo di analisi frattale eseguita sulle varie coste non ha tenuto conto in alcun modo dell'esistenza o meno di attrattori *sensu* Lorenz (1963, 1975 e 1979) o di moti browniani (Brown, 1828), che afferiscono invece alla più ampia teoria del caos.

Infatti, l'applicazione della geometria frattale è stata condotta sui semplici dati rappresentati dalle coordinate cartesiane ( $x, y, z$ ) dei punti che compongono le linee di costa cartografate in una certa data. Pertanto, in tal senso queste coste si possono considerare statiche, al pari di una fotografia, e non dinamiche, come un filmato; anche il confronto della dimensione frattale della medesima linea di costa in anni differenti è stato svolto seguendo lo stesso criterio.

Non è stato considerato il fattore *tempo*, inteso in termini di continuità temporale, nonostante esistano alcuni esempi applicativi in altre discipline, quali la Geofisica e la Vulcanologia, dove alcuni Autori combinano mediante algoritmi la dimensione frattale  $D_f$  ed il tempo  $t$ , come funzione  $x(t)$ , ottenendo la cosiddetta autoaffinità frattale (*self-affinity*, *self-affine fractals*), finalizzata – a differenza degli obiettivi di questa ricerca – alla

costruzione di complessi modelli previsionali delle eruzioni vulcaniche e dei sismi (Mandelbrot, 1985; Palumbo, 2003).

L'irregolarità di una linea di costa, come quella dell'Italia, può essere calcolata con diversi algoritmi quali il *box-counting* che fornisce la dimensione frattale  $D_F$  simile a quella ottenuta da Mandelbrot per la costa della Gran Bretagna e l'integrale di correlazione che fornisce la dimensione di correlazione  $D_C$ .

Il primo algoritmo conta il numero delle griglie di una maglia occupate da almeno un punto con la dimensione delle griglie di volta in volta raddoppiata; il secondo, invece, conta il numero di coppie di punti la cui distanza rientra all'interno di una distanza prefissata di volta in volta raddoppiata.

Entrambi i metodi calcolano il *clustering* areale dei punti analizzati e permettono di calcolare una dimensione frazionaria che rappresenta l'irregolarità della costa investigata. Inoltre, entrambi i metodi permettono di calcolare la cosiddetta regione di *scaling* all'interno della quale vale la proprietà dell'invarianza di scala o omotetia interna, vale a dire la proprietà che assimila un piccolo tratto della costa, quando dilatato, a quello più lungo, secondo una cascata geometrica. È ben noto in letteratura che la dimensione  $D_F$  ottenuta con il metodo del *box counting* è leggermente più grande di  $D_C$  ottenuta con l'integrale di correlazione. Tuttavia è utile ricordare, che il grande vantaggio del metodo dell'integrale di correlazione consiste nel maggiore livello di confidenza ottenuto nel calcolo della regione di *scaling*. Applicando il metodo del *box counting* alla linea di costa italiana si ottengono, così come atteso, valori leggermente superiori (l'aumento ammonta appena al 5%) rispetto a quelli risultanti con il metodo dell'integrale di correlazione e con i rapporti tra i diversi valori di  $D_F$ , calcolati per i diversi settori della costa italiana, identici a quelli fra i differenti valori di  $D_C$ . Si sottolinea, però, che l'identificazione della regione di *scaling* con il metodo del *box counting* è stata ottenuta ad un livello di confidenza di appena il 90% contro il 99% ottenuto con il metodo dell'integrale di correlazione.

Va infine precisato che il calcolo dell'irregolarità della linea di costa italiana attuale è indipendente dalla sua evoluzione temporale così come magistralmente descritto da Mandelbrot per la costa della Gran Bretagna con il metodo del *box counting* e per la curva di Koch. Mandelbrot, infatti, era alla ricerca dei limiti dell'invarianza di scala della linea di

costa della Gran Bretagna e non ha mai introdotto le *traiettorie nello spazio delle fasi*, concetto che è stato introdotto successivamente dal meteorologo Lorenz che definì la convezione del calore all'interno dell'atmosfera come un sistema caotico dinamico. Pertanto, la linea di costa attuale dell'Italia non è un sistema dinamico ma statico; solo un'analisi delle variazioni temporali di una linea di costa introduce un sistema dinamico ed in tal caso ha senso parlare di attrattore dell'evoluzione della linea di costa, la cui misura è ben espressa dalla dimensione frattale dell'attrattore.

### 3. Caratterizzazione frattale della costa e interpretazione geomorfologia

Diverse forme naturali del rilievo, sebbene siano caratterizzate da una geometria dello spazio complessivamente approssimabile ad una curvatura costante, mostrano nel dettaglio una geometria a curvatura variabile.

La geometria delle forme naturali è caratterizzata da un grado d'irregolarità variabile nello spazio e dalla proprietà di auto-somiglianza (*self-similarity*) o invarianza di scala, di recente definita dimensione di omotetia interna  $D_F$  in quanto rappresenta una cascata geometrica (Mandelbrot, 1983 e 1987).

In genere la geometria frattale delle linee di costa, ottenibile con il metodo generalizzato della curva di Koch (1904 e 1906), può essere espressa da un numero frazionario compreso tra 1.1 ed 1.9, anche se più comunemente in natura risulta variabile tra circa 1.16 e 1.26 (Mandelbrot, 1975 e 1987). In questo caso le prime sono meno frastagliate delle seconde che tendono, invece, ad una curva di Peano (1890) di dimensione frattale pari a 2 (Mandelbrot, 1987). Tuttavia, queste grandezze, ad una prima analisi, potrebbero non fornire informazioni dirette sui processi prevalenti responsabili del modellamento del paesaggio costiero.

Dai risultati degli studi condotti lungo le aree costiere campione sembra possibile risalire dalla dimensione frattale ai processi primari e secondari responsabili del modellamento, differenziando quelli di natura tettonica da quelli morfogenetici e definendo verosimilmente quali siano prevalenti.

Un valore della dimensione frattale  $D_F = 1$ , caratterizzante la dimensione euclidea di una linea, è assimilabile a quello teorico che si ottiene nel caso di un'elevata regolarità geometrica. In natura, nel caso specifico di una costa dove  $D_F \sim 1$ , tale grandezza è riconducibile quasi esclusivamente a forme di genesi tettonica con orientamento unidirezionale. Invece, un valore della dimensione frattale  $D_F > 1$ , caratteristico di una curva segmentata la cui dimensione tende al piano euclideo, è assimilabile a quello teorico che si ottiene quando è più alta l'irregolarità geometrica. In questo caso la dimensione frattale è riconducibile a forme costiere, quali ad esempio alternanze di baie, cale ed

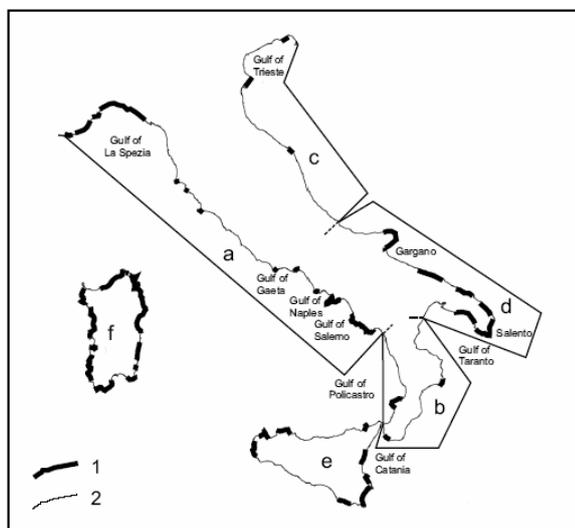
isolotti (Mandelbrot, 1975 e 1987; Cheng et al., 1999), caratterizzate dall'azione modellatrice del moto ondoso e delle oscillazioni glacioeustatiche in relazione a fenomeni tettonici assenti o trascurabili.

Laddove la morfotipologia costiera è caratterizzata dal susseguirsi di baie subcircolari o subellittiche, cale subtriangolari ed isolotti frastagliati prossimi alla costa, i valori decisamente alti dell'irregolarità geometrica delle linee di costa attuali, più articolate ed in genere con valori di dimensione frattale prossimi a quelli della costa britannica ( $D_F = 1.25$ ; Mandelbrot, 1967), denotano un marcato controllo dei fenomeni eustatici postglaciali, ma soprattutto dell'azione erosiva per opera del moto ondoso in tempi recenti e storici.

Precedenti lavori in tal senso (D'Alessandro *et al.*, 2006) hanno messo in evidenza che l'attuale costa italiana, caratterizzata da una morfologia più o meno rettilinea, presenta una dimensione frattale media con valore di poco superiore all'unità (Tab. 7). Si è ipotizzato che, nel complesso, tale linea di costa sia stata interessata dalla sovrapposizione coeva di processi di modellamento marino (secondari), espletati per lo più dell'azione erosiva operata dalle onde e da processi di morfoselezione attivi in condizioni climatiche diverse dalle attuali, su quelli tettonici (primari), responsabili della strutturazione dei paesaggi costieri ereditati. I valori della dimensione frattale per le linee di costa italiane (Fig. 49) sono risultati pressoché simili ed in media pari a 1.06. La maggior parte dei valori risulta di poco superiore all'unità: in particolare, quelli della costa italiana nord-orientale sono pari a circa 1.03; procedendo da N verso S si registra un valore costante della dimensione frattale lungo il versante tirrenico, in media pari a 1.03.

zona costiera		dimensione frattale ( $D_C$ )	
a	Italia NW	1.03 ± 0.01	1.03 ± 0.01
b	Calabria	1.03 ± 0.01	
c	Italia NE	1.03 ± 0.01	
d	Puglia	1.05 ± 0.01	1.04 ± 0.01
e	Sicilia	1.10 ± 0.01	
f	Sardegna	1.14 ± 0.01	
Italia		1.06 ± 0.01	

**Tab. 7 - Valori della dimensione frattale ( $D_C$ ) della linea di costa attuale dell'Italia e dei sei settori in cui è stata suddivisa. Procedendo da N verso S si registra un valore costante della dimensione frattale nel settore continentale occidentale ed un lieve aumento in quello orientale. I valori prossimi all'unità indicano una generale prevalenza dei processi tectogenetici su quelli morfogenetici, questi ultimi indicati da una dimensione frattale maggiore. La similitudine del grado frattale medio tra le regioni costiere dell'Italia occidentale ed orientale indicherebbe una convergenza morfologica legata a processi di morfoselezione.**

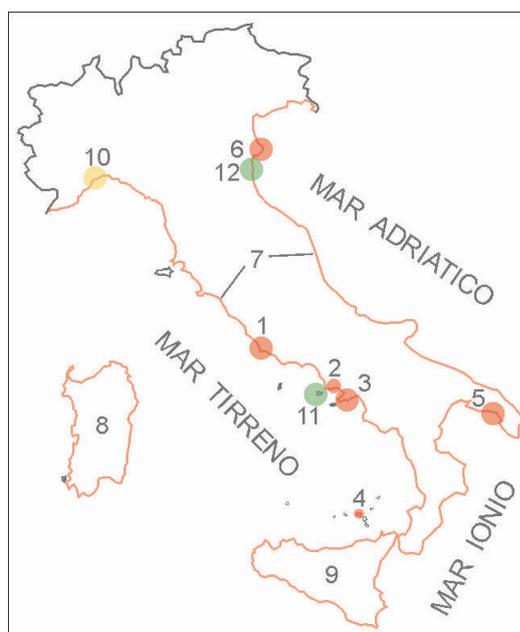


**Fig. 49 - Settori costieri italiani per i quali è stata eseguita la caratterizzazione frattale: a) Italia nord-occidentale; b) Calabria; c) Italia nord-orientale; d) Puglia; e) Sicilia; f) Sardegna. Morfotipologia costiera (da Parotto & Lupia Palmieri, 2004 mod.): 1) coste alta rocciose; 2) litorali sabbiosi.**

La dimensione frattale della linea di costa dell'Italia tirrenica, pari a  $D = 1.03$ , indicherebbe la sovrapposizione dei processi di modellamento del mare (secondari) su quelli tettonici (primari). Restano comunque evidenti gli effetti dell'attività tettonica che hanno fortemente controllato la strutturazione e l'evoluzione morfologica del paesaggio. Pertanto, in accordo con De Pippo *et al.* (2004), i valori della dimensione frattale fanno ipotizzare che l'evoluzione di questi settori costieri abbia risentito dell'azione modellatrice del mare, pur conservando ancora le forme ereditate dai fenomeni tettonici che li hanno strutturati.

La costa dell'Italia nord-orientale, invece, presenta ampi litorali e brevi tratti di falesia bassa; anche in questo caso il grado frattale della linea di costa, pari a  $D = 1.029$ , indicherebbe una prevalenza dei processi di modellamento del mare su quelli tettonici ereditati.

Sulla scia di questo lavoro e per la prima volta in questo campo, un gruppo di ricerca delle Università di Genova, Roma, Napoli e Chieti ha condotto l'analisi frattale per alcune aree costiere campione italiane di maggior rilievo geomorfologico (Fig. 50).



**Fig. 50 - Ubicazione delle aree campione costiere per le quali è stata condotta l'analisi frattale: in rosso sono i siti di D'Alessandro et al. (2006): 1) apparato deltizio del Fiume Tevere (Lazio); 2) costa vesuviana (Campania); 3) Penisola Sorrentina (Campania); 4) Isola di Salina (Eolie, Sicilia); 5) Porto Cesàreo (Salento, Puglia); 6) apparato deltizio del Fiume Po (Veneto); 7) penisola italiana; 8) Sardegna; 9) Sicilia; in giallo il sito di uno studio effettuato in Liguria da Giannoni et al. (2000): 10) Celle Ligure; in verde le applicazioni realizzate in questa sede: 11) Ischia (Maronti) per il 1968 e il 2000; 12) Porto Garibaldi (Emilia Romagna) per il 1972 e il 2005.**

Com'è stato detto in precedenza, il litorale dei Maronti e quello di Porto Garibaldi sono stati scelti come campioni per l'applicazione della geometria frattale all'attuale linea di costa e a quella storica riferite al livello medio del mare.

L'attuale conformazione della linea di costa è stata ottenuta dalla digitalizzazione di mappe topografiche aggiornate e a piccola scala.

Per calcolare la dimensione frattale delle linee di costa e per identificare il *range* di distanze all'interno del quale le coordinate dei singoli punti delle forme analizzate seguono

la relazione frattale (3), si è plottato su un diagramma *log-log* il numero  $C$  di coppie di punti con distanza più piccola di  $R$ , come funzione di  $R$ . Si è posta la distanza più piccola utilizzabile pari alla risoluzione lineare di 25 m, gradualmente aumentata di un fattore di 2.

Utilizzando una *scaling region* 0,31 – 3,0 (2 m – 1000 m) e ponendo  $N$  (relazione [4]) uguale a 8, i valori della dimensione frattale ( $D$  o meglio  $D_C$ ), approssimati al centesimo, per le linee di costa esaminate risultano pari a:

	$D_C$	$R^2$
Linea di costa Baia dei Maronti 1968	1.08	0.99
Linea di costa Baia dei Maronti 2000	1.19	1.00
Linea di costa Porto Garibaldi 1972	1.06	1.00
Linea di costa Porto Garibaldi 2005	1.37	0.98

**Tab. 8 – Valori della dimensione frattale  $D_C$  e della distribuzione della frequenza  $R^2$  per i due siti analizzati**

Di seguito sono rappresentati i diagrammi della funzione logaritmica:

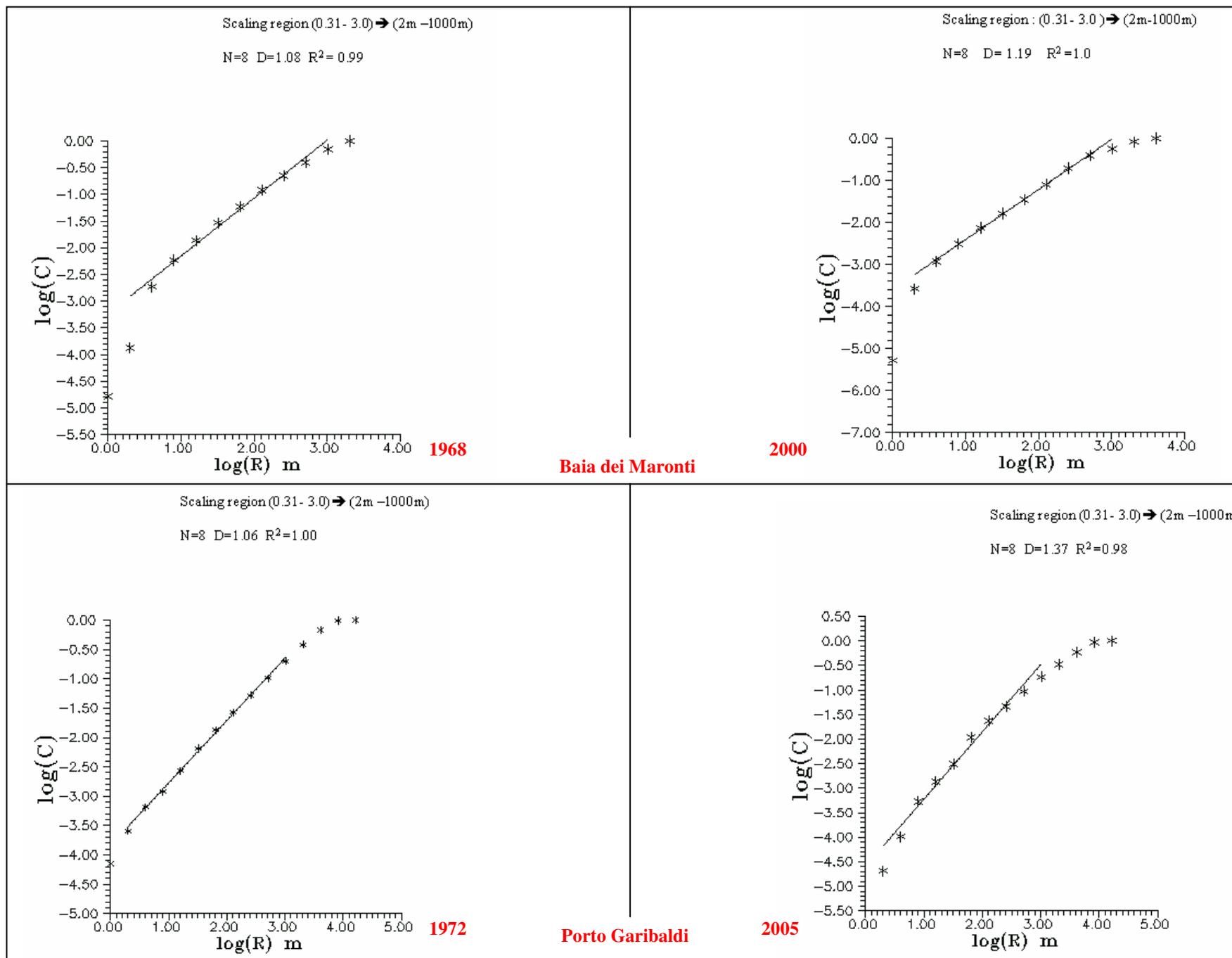


Fig. 51 - Diagramma *log-log* su cui si è plottato il numero  $C$  di coppie di punti con distanza più piccola di  $R$ , come funzione di  $R$ .

Per quanto riguarda i Maronti, la linea di riva del 1968 mostra ampie spiagge nell'area occidentale (zona delle fumarole), nell'area centrale e nell'area orientale; invece, nell'area prossima a Vallone Olmitello, si osserva già un arretramento che espone le falesie all'attacco dei marosi e a conseguenti fenomeni franosi (Fig. 51).

L'osservazione della linea di riva del 2000 – che, tra l'altro, si può ricondurre con ristretto margine di errore a quella attuale (cfr. *supra*) - consente di rilevare che l'area occidentale è priva di spiaggia e che il mare lambisce le costruzioni poste alla sommità e sul versante della falesia costiera.

Solo l'area orientale, a ridosso di Capo Grosso, mostra una spiaggia profonda alcune decine di metri, anche se ridotta rispetto a quella che si osserva negli anni '60. Quest'ultima area si può ritenere in equilibrio nel tempo o in alcuni momenti in debole avanzamento anche se è evidente che tali fenomeni sono temporanei e legati al clima meteomarinario stagionale, in quanto attualmente è evidente nell'unità fisiografica un deficit di materiali.

L'analisi frattale condotta per l'unità costiera dei Maronti, alla luce anche delle discussioni condotte nei paragrafi precedenti, permette di attribuire ai differenti interventi antropici il forte condizionamento passato e presente di tutti i processi indotti dal moto ondoso e dalle correnti marine da esso generate.

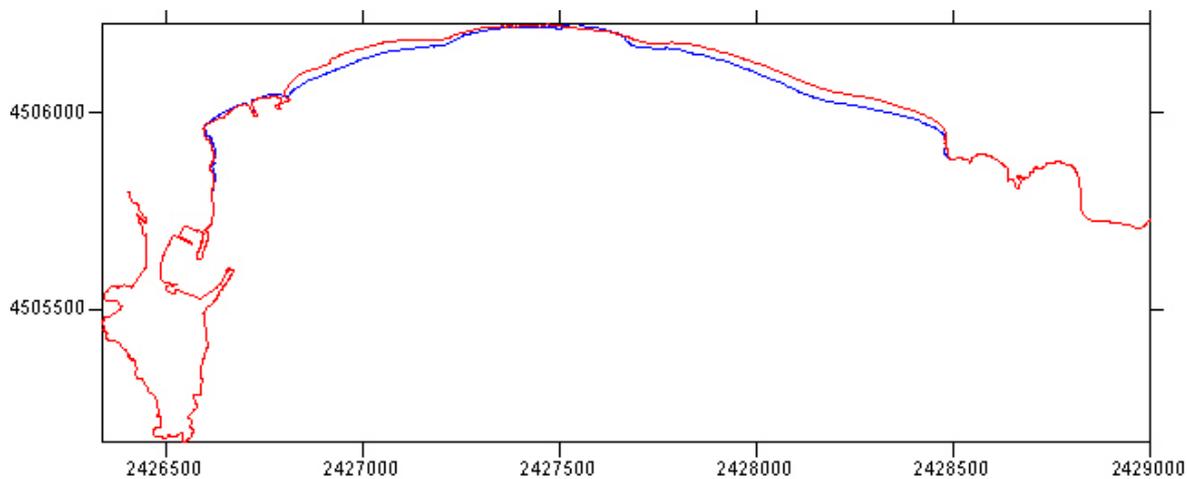
Confrontando il valore  $D_C$  del 1968 con quello del 2000 (da 1.08 a 1.019; cfr. Tab. 8 e Fig. 52), si nota solo un leggero aumento di  $D_C$ , il che consente di evidenziare come l'erosione che ha interessato il litorale sia stata più o meno parallela alla linea di riva; inoltre, l'aumento in questione è molto verosimilmente imputabile ad un incremento dell'irregolarità della costa.

Il tratto di costa ferrarese presenta avanzamenti nella porzione meridionale e arretramenti in quella centro-settentrionale (Fig. 53). Infatti, com'è stato ampiamente discusso nei paragrafi precedenti, la presenza del doppio molo di Porto Garibaldi ed i suoi continui prolungamenti, costituiscono un'interruzione del normale flusso litorale da S verso N, permettendo l'accumulo dei sedimenti nella parte meridionale e causando, perciò, una erosione, spesso intensa, lungo i tratti settentrionali.

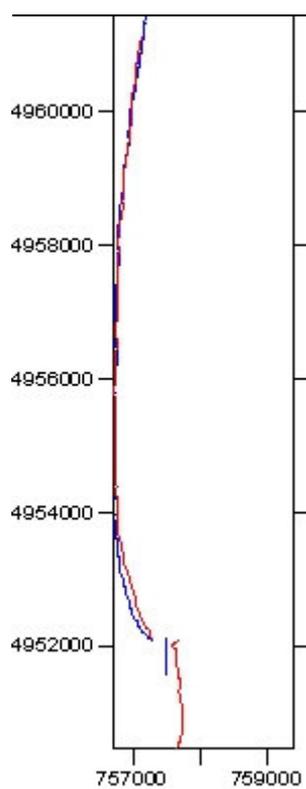
Ciò è evidente osservando una rappresentazione dell'evoluzione della linea di riva costruita sovrapponendo le linee di riva storiche del ventennio 1978-98 allo sviluppo di un'aereofoto (Fig. 54): sono, infatti, visibili la progradazione quasi eccessiva della costa a sud del doppio molo e, per contro, l'ingente arretramento della costa a nord.

Per questo sito, il valore della dimensione frattale tende ad aumentare da 1.06, riferito alla linea di riva del 1972, a 1.37, riferito alla linea di riva del 2005. L'aumento di tale valore è riconducibile ad un'intensificazione dell'irregolarità della linea di costa dovuta alla presenza dell'ostacolo rappresentato dal doppio molo.

Inoltre, i risultati ottenuti sono in accordo con i recenti studi condotti da D'Alessandro et al. (2006) in cui il grado frattale della linea di costa dell'alto Adriatico ( $D = 1.03$ ) indica una prevalenza dei processi di modellamento del mare e morfoselettivi su quelli tettonici ereditati.



**Fig. 52 – Baia dei Maronti: confronto tra la linea di costa del 1968 (in blu) e quella del 2000 (in rosso).**



**Fig. 53 – Porto Garibaldi: confronto tra la linea di costa del 1972 (in blu) e quella del 2005 (in rosso).**



**Fig. 54 - Evoluzione della linea di riva del Lido degli Estensi (area di prestito) dal 1978 al 1998 (dati da ARPA Emilia Romagna, 2002)**

In sintesi, dai risultati di queste prime analisi, in accordo con i precedenti Autori citati, emerge che i processi secondari (morfogenesi), legati in prevalenza all'azione modellante del moto ondoso, tendono ad incrementare il valore della dimensione frattale che risulta  $D_f > 1$ ; in tal caso l'erosione determinerebbe un aumento della dimensione frattale ( $D_f \geq 1$ ).

Pertanto, l'aumento della dimensione frattale si traduce dal punto di vista geomorfologico anche in un'intensificazione del grado d'irregolarità del disegno costiero.

#### **4. Considerazioni conclusive**

Il presente contributo ha affrontato lo studio sulla dinamica costiera ed il problema della erosione delle coste italiane, poiché è questo un fenomeno le cui conseguenze riguardano sia l'ambiente che l'economia, soprattutto per quelle zone che vivono con il turismo balneare. Particolarmente gravi sarebbero le conseguenze per le zone costiere edificate, anche se è proprio a causa dell'eccessiva presenza di strutture realizzate dall'uomo ad aumentare il degrado delle coste. E' in particolare il tratto di costa dell'Alto Adriatico, con la massiccia presenza di infrastrutture turistiche della riviera romagnola, a trovarsi in questa rischiosa situazione, anche se in Italia il fenomeno dell'erosione è un male comune.

La spiaggia, definita come il risultato dell'interazione tra il trasporto di sabbia da parte dei fiumi e l'azione del moto ondoso e delle correnti marine che ridistribuiscono il sedimento lungo il litorale, rappresenta un già delicato equilibrio naturale cui si è sovrapposto l'intervento dell'uomo che ha irrigidito l'evoluzione dei litorali costruendo insediamenti e strutture turistico-balneari, porti, moli aggettanti e opere di difesa tutti insistenti sulla sottile fascia costiera o subito a ridosso di questa.

Dal punto di vista geomorfologico possiamo dire che la forma del litorale è la risultante dell'azione combinata di numerosi agenti e fattori del modellamento costiero che tendono a raggiungere una condizione di equilibrio reciproco (moto ondoso, correnti litorali, maree e agenti subaerei da una parte; natura e struttura della roccia, caratteristiche dei sedimenti in via di formazione, moti relativi fra terre emerse e mari e variazioni climatiche dall'altra).

Da indagini condotte negli ultimi anni (Torre, 2002; AA.VV., 2006), la situazione attuale dei litorali italiani sembra essere la seguente: su uno sviluppo di oltre 7000 km di litorali, quasi la metà (42%) è in erosione (Tab. 9); in particolare, su uno sviluppo di 2.470,5 km dei più significativi tratti di coste, solo il 5 % risulta in accrescimento, contro il 45 % in netta erosione ed il 50 % momentaneamente stabilizzato unicamente in virtù di interventi artificiali di salvaguardia.

Ancora dalle pregresse indagini, risulta che tra le regioni a minor rischio di erosione, tra quelle esaminate in questo lavoro, vi è, a parità di condizioni, la Campania.

Regione	Lunghezza totale (km)	Coste alte e aree portuali (km)	Coste basse (km)	Tratti in erosione (km)	% spiagge in erosione
Liguria	350	256	94	31	33,0
Lazio	290	74	216	117	54,2
Campania	480	256	224	95	42,4
Emilia Romagna	130	0	130	32	24,6
<b>Italia</b>	7465	3515	3950	1661	42,1

**Tab. 9 – Quadro sintetico della situazione dei litorali in alcune rappresentative regioni d’Italia e in Italia nel suo complesso (tratto da AA.VV., 2006)**

Infatti, mettendo in giusta proporzione la lunghezza totale della costa con l’estensione di quella sabbiosa (costa bassa), i tratti in erosione e la percentuale di erosione, ne deriva che il Lazio è la regione più a rischio, seguita – in base alla Tab. 8 – dalla Liguria, l’Emilia Romagna e, infine, la Campania.

L’alta percentuale di spiagge campane in erosione (42,4 %) è distribuita su ben 480 km di costa, che, a parte le due maggiori isole del territorio nazionale, fanno della Campania una delle regioni con maggior sviluppo costiero.

Se si prendono in considerazione i vari fattori antagonisti, si può evidenziare che nell’ambito dei vari agenti endogeni, quali la subsidenza e l’eustatismo o il movimento delle placche, od esogeni, quali l’innalzamento del livello marino con il relativo effetto Bruun e l’incremento della concentrazione di anidride carbonica nell’atmosfera o la variazione del regime anemologico o modificazioni delle falde acquifere, non rivelano quelle modificazioni significative in grado di provocare gli effetti erosivi dirompenti segnalati nell’ultimo secolo lungo i litorali italiani. L’unico fattore esogeno significativo risulta l’antropizzazione delle zone costiere.

L’intervento antropico sui litorali li trasforma sino a provocare un vero proprio depauperamento estetico ma soprattutto una forte influenza del bilancio ambientale ed una profonda trasformazione del paesaggio.

Inoltre, un'indagine eseguita da Cortemiglia (1981) ha messo chiaramente in evidenza come su tutto l'intero sviluppo di circa 7.500 km del litorale italiano non esista un solo tratto di costa deposita esente da pressione antropica.

Siffatta azione erosiva prodotta dall'antropizzazione sull'ambiente litoraneo comporta che, con l'arretramento della linea di riva, si perda una superficie di spiaggia fruibile, arrecando così non solo un danno ambientale, ma anche un danno economico quanto mai significativo.

In base allo studio delle fluttuazioni climatiche del passato, le previsioni dei ricercatori ci avvertono che ci stiamo avviando verso un periodo in cui le mareggiate saranno sempre più intense. La soluzione a questa difficile situazione che si prospetta è quella di disporre di una rete di sorveglianza della costa che tenga sotto controllo la pendenza dei fondali vicino alla riva che deve essere, per evitare situazioni rischiose, inferiore allo 0,5 per cento.

Per la conservazione e la tutela dei litorali, è necessario adottare una strategia di intervento articolata su due indirizzi:

- rimozione delle principali cause di erosione della spiaggia
- definizione delle tipologie di intervento da adottare per la difesa dal mare.

E' chiaro che, ove possibile, il primo indirizzo consente di ottenere risultati per periodi di tempo notevolmente superiori, rispetto a quelli ottenibili con il secondo. Nel bilanciamento del litorale, occorre fare tutto il possibile per eliminare la componente di origine antropica, riportando il fenomeno alla sola componente naturale. La difficoltà consiste negli interessi economici che poniamo in movimento e nella mancanza quasi cronica di sensibilità nei confronti del problema. Da ciò deriva l'abitudine, purtroppo consolidata, di agire sulle coste in modo da difenderle dal mare, attraverso la costruzione di scogliere frangiflutti e/o di pennelli.

Con la tecnica del ripascimento si può riuscire a conciliare l'esigenza di protezione del territorio e delle infrastrutture retrostanti, con il mantenimento del bene spiaggia e la salvaguardia dei valori paesaggistici e ambientali del paraggio. Grazie all'interazione con le correnti di trasporto litoraneo, con questa tecnica è inoltre possibile mantenere in equilibrio lunghi tratti di spiaggia con interventi localizzati. L'obiettivo progettuale di un intervento di ripascimento è quello di garantire un avanzamento minimo della linea di riva

rispetto alla posizione *ante-operam*. Nella definizione del volume di ripascimento, necessario per realizzare l'avanzamento previsto dal progetto, è necessario tenere conto dei fenomeni di perdita dei sedimenti legati essenzialmente a due fattori:

1. La naturale tendenza evolutiva del litorale, contraddistinta da una ridistribuzione dei sedimenti di ripascimento lungo la fascia costiera, per effetto delle componenti longitudinali del moto ondoso (flusso longitudinale) o per la deriva dei sedimenti all'esterno della fascia attiva (flusso trasversale).

2. La sabbia estratta da cave, prelevata da una condizione sedimentaria stabile spesso da tempi geologici e posta in una fascia particolarmente attiva sottoposta a continue azioni idrodinamiche del moto ondoso, comporta una naturale azione di rielezione granulometrica e talvolta mineralogica del materiale di apporto, consentendo l'effettiva sedimentazione di una parte sola dello stesso materiale.

Una volta noti gli elementi in gioco e impostata una strategia di monitoraggio che consenta di considerarne l'evoluzione nel tempo, occorre stabilire degli obiettivi da conseguire in funzione dell'importanza socio-economica dell'area in esame.

### **Riferimenti bibliografici**

- AA.VV. (1986) – *Le praterie sommerse del Mediterraneo*. Laboratorio di ecologia del benthos della stazione zoologica Anton Dohrn di Napoli.
- AA.VV. (2006) – *Le spiagge della Campania*. In “Studi costieri. Lo stato dei litorali italiani”, vol. 10.
- ACKERS P., WHITE W.R. (1973) – *Sediment transport: a new approach and analysis*. J.Hydddr., Div. Am. Sc.Civ. Eng., 99, HY11. 2041-2060.
- AIELLO G., BARRA D., DE PIPPO T., DONADIO C. (2005) - *Evoluzione geomorfologica delle isole vulcaniche flegree di procida e vivara (campania, italia meridionale)* (in corso di pubblicazione)
- AMINTI P., PRANZINI E. (1993) - *L'erosione e la difesa dei litorali*. In «La difesa dei litorali in Italia». Ediz. Delle Autonomie, Roma. 9-24.
- ARPA REGIONE EMILIA ROMAGNA (2002). *Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2000*. Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente dell'Emilia-Romagna, Bologna: 128 p.
- BARTOLINI C., PRANZINI E., LUPA PALMIERI E., CAPUTO C. (1979) – *Studi di geomorfologia costiera: l'erosione del litorale di Follonica*. Boll. Soc. It., vol. 96, pp. 87-116.
- BRAMBATI A., CAROBENE L., ZUNICA M. (1976) – *Caratteristiche geologiche e dinamica dei litorali nella prospettiva della pianificazione territoriale*. Mem. Soc. Geol. It., vol 14, pp. 1-8.
- BRAMBATI A., CIABATTI M., FRANZUTTI G.P., MARABINI F., MAROCCO R. (1988) – *Carta sedimentologica dell'Adriatico centrale (scala 1:250.000)*. C.N.R. Roma.
- BRIGGS J. (1993) - *L'estetica del caos. Avventure nel mondo dei frattali: scienza, arte e natura*. RED ed., Como, pp. 176.
- BROWN R. (1828) - *A brief account of microscopical observations made in the months of June, July and August 1827 on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies*. London, Taylor, July 30, 1828. (Not published. Like many wealthy scientists of his day, Brown had his results published privately and distributed to friends, colleagues and press).
- BRUUN P. (1962) - *Sea-level rise as a cause of a shore erosion*. Journ. Waterways, Harbours Div. 88: 117-130.
- BUCHANAN M. (2001) - *Ubiquity. The science of history... or why the world is simpler than we think*. I ed., A. Mondadori ed., Milano, 251 pp.

- CAPUTO C. (1988) – *Evoluzione del litorale del Lazio centrale, effetti dell’antropizzazione e ipotesi di intervento per la difesa delle spiagge*. Atti XXIV Congr. Geogr. It., vol. II, Torino, pp. 441-447.
- CAPUTO C., CHIOCCI F.L., FERRANTE A., LA MONICA G.B., LANDINI B., PUGLIESE F., (1993) - *La ricostruzione dei litorali in erosione mediante ripascimento artificiale e il problema del reperimento degli inerti*. In: *La difesa dei litorali in Italia*. Ediz. Delle Autonomie-Roma, 103-121.
- CAPUTO C., D’ALESSANDRO L., LA MONICA O.B., LANDINI B., LUPIA PALMIERI E. (1991) – *Present erosion and dynamics of Italian beaches*. *Zietschr. Geomorphol.*, suppl. 84, Stuttgart, pp. 31-39.
- CAPUTO C., LUPIA PALMIERI E. (1976) – *Cartografia storica e recente, aerofotointerpretazione. Ricerche sul regime e la conservazione dei litorali*. *Quad. Ric. Scient.*, vol. 92, pp. 72-40, Fig. 1, Tav. 2, Roma.
- CARAVITA B. (2005) – *Diritto dell’Ambiente*. Terza edizione. Ed. Il Mulino.
- CAROBENE L., BRAMBATI A. (1975) – *Metodo per l’analisi morfologica quantitativa delle spiagge*. *Boll. Soc. Geol. It.*, vol. 94, pp. 479-493.
- CAROBENE L., BRAMBATI A. (1979) – *Analisi morfologica delle spiagge dell’alto Adriatico, tra i fiumi Brenta e Tagliamento*. *Boll. Soc. Geol. It.*, vol. 96, pp. 1-39.
- CAROBENE L., CATANI G., CANADIAN C., MAROCCO R., BRAMBATI A. (1979) – *Zonizzazione delle spiagge dell’alto Adriatico mediante analisi di parametri morfologici e sedimentologici*. *Mem. Soc. Geol. It.*, vol. 19, pp. 315-320.
- CAVAZZA S. (2002) - *Dall’erosione sui versanti all’apporto terrigeno ai litorali*. Università degli Studi di Pisa, Facoltà di Ingegneria, Istituto di Idraulica.
- CHENG Y.C., LEE P.J. & LEE T.Y. (1999) – *Self-similarity dimension of Taiwan Island landscape*. *Computer & Geosciences*, 25, 1043-1050.
- CHIAIA G., DAMIANI L., PETRILLO A. (1992) - *Evolution of a beach with and without a submerged breakwater: Experimental result*. *Proc. of 23<sup>rd</sup> ICCE, Venezia*. Vol. 3, 1959-1972.
- CIABATTI M. (1980) – *La morfologia sottomarina*. In “*La ricerca geografica in Italia 1960-1980*”. Atti del Convegno A.G.E., marzo-aprile 1980, Varese, pp. 663-667.
- CIABATTI M., CURZI P.V., RICCI LUCCHI F. (1987) - *Quaternary sedimentation in the Central Adriatic Sea*. *Giornale di Geologia* 49, 113-125.

- CINQUE A., DE PIPPO T., ROMANO P. (1995) - *Coastal slope terracing versus relative sea level changes. Deduction based on computer simulations*. Earth Surface Proc. Landf. 20, 87-103.
- COCCO E., DE MAGISTRIS M.A., DE PIPPO T. (1987) - *Fenomeni erosivi del litorale dei Maronti nell'Isola d'Ischia (Campania)*. Mem. Soc. Geol. It. 37, 459-469.
- COCCO E., DE MAGISTRIS M.A., DE PIPPO T., 1986, *Evoluzione e dinamica del litorale alto ionico (Golfo di Taranto)*. In ENEA: *Evoluzione dei litorali. Problematiche relative al Golfo di Taranto*. Atti del Convegno organizzato dal Centro Ricerche della Trisaia (Rotondella); Policoro (Matera), 16-17 ottobre 1986, 61-76;
- COCCO E., DE PIPPO T., EFAICCHIO M.T., TARALLO F. (1988) - *Caratteri morfologici della piattaforma costiera del Golfo di Pozzuoli*. Mem. Soc. Geol. It., 995-1004.
- COLANTONI P., PRETI M., VILLANI B. (1990) - *Sistema deposizionale e linea di riva olocenica sommersi in Adriatico e al largo di Ravenna*. Giornale di Geologia, 52, 1-18.
- COMUNE DI RAVENNA (1996) - *Valutazione e conseguenze delle variazioni del livello marino medio sulla costa ravennate dovute a subsidenza e ad effetti climatici*. Rapporto Tecnico, Ravenna. pp.270.
- CORTEMIGLIA G.C., LAMBERTI A., LIBERATORE O.F., LUPA PALMIERI E., STURA S., TOMASICCHIO U. (1981) - *Raccomandazioni tecniche per la protezione delle coste*. Pubbl. 156 C.N.R. Prog. Fin. "Conservazione del suolo, sottoprogetto dinamica dei litorali", pp. 1-81.
- CORTEMIGLIA G.C. (1981) - *Metodo sperimentale di misura delle variazioni quantitative della spiaggia sommersa*. Quad. Ist. Geol. Univ. Genova, vol. II, n. 1, pp. 3-35.
- CORTEMIGLIA G.C. (1982) - *Geomorfologia e dinamica delle coste*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., vol. 5, fasc. 2, pp. 427-428.
- CORTEMIGLIA G.C. (1986) - *L'erosione dei litorali e la tecnologia degli interventi di protezione e di salvaguardia*. Quad. Ist. Geol. Univ. Genova, vol. 7, n. 1, pp. 3-16.
- CORTEMIGLIA G.C. (1991) - *Fruizione dei litorali e pianificazione costiera*. Politica globale, pp. 97-103.
- CORTEMIGLIA G.C. (1996) - *A morphodescriptive framework of high rocky coasts*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., "Atti del Convegno Geosub 94", 52, 29-30.
- CURZI P.V., TOMADIN L. (1987) - *Dinamica della sedimentazione pelitica attuale ed olocenica nell'Adriatico centrale*. Giornale di Geologia 49, 101-111.

- D'ALESSANDRO L., DAVOLI L., FREDI P., LUPIA PALMIERI E., RAFFI L. (1983) – *Beach erosion on the tyrrhenian coast of Calabria: considerations about natural and man-induced causes*. Proceed Symposium “Coastal Problems in the Mediterranean Sea”, Bologna, pp. 69-81.
- D'ALESSANDRO L., DE PIPPO T., DONADIO C., MAZZARELLA A., MICCADEI E. (???) - *La dimensione frattale dell'Italia: una lettura in chiave geomorfologia*. ???
- D'ASCIA G. (1864) – *Storia di Ischia*. Edizioni Errecci, Napoli.
- DAL CIN R., PAMBIANCHI P. (1991) – *I sedimenti della sacca di Goro (delta del Po)*, Milano.
- DAMIANI V., DE ROSA S., FERRETTI O., ZURLINI G. (1983) – *Caratterizzazione sedimentologica, mineralogica e geochimica dei sedimenti marini costieri tra Capo Circeo e l'Isola d'Ischia*. In: Un esempio di analisi ecologica del sistema marino-costiero da capo Circeo all'isola d'Ischia. Atti del Convegno organizzato dall'Enea al centro ricerche Energia Ambiente di S. Teresa, La Spezia, 14 giugno, 77-95.
- DAMIANI L., RANIERI G., ROSSETTI R. (2001) - *Coastal protection with BMS: the first experience in Italy*. Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Bari.
- DE ALTERIS G., TORRICELLI R., PASSARO S., DE LAURO M. (2006) – *Isole Flegree (Ischia e Procida)*. Serie *Batimetria dei fondali marini della Campania*. Liguri ed., pp.73
- DE BONIS P., FATTORUSO G., ONORI F., PAGANO A., PASANISI F., PELOSO A., REGINA P., TEBANO C., ZARLENGA F. (2001) - *La Dinamica Costiera. Modellistica Fisico-Matematica, Analisi del Territorio, il Supporto G.I.S. e la Strumentazione in Uso. Lo stato dell'arte*. ENEA – CAT.
- DE FILIPPIS A., F. TRONCONE (2006) – *Codice della Navigazione. Regolamenti, leggi complementari, convenzioni internazionali*. Approvato con R.D. 30/03/1942; aggiornato al D.Lgs. 18-7-2005, n. 171 (Codice della nautica da diporto) e al D.Lgs. 15-3-2006, n. 151 (Disposizioni correttive ed integrative al D.Lgs. 9-2005, n. 96, recante la revisione della parte aeronautica del Codice della navigazione) VI Ed., pp. 1088.
- DE PIPPO T. (1998) – *Rilievi, indagini e studio del modello fisico – matematico per la realizzazione di opere lungo il litorale dei Maronti nel Comune di Barano d'Ischia*. Progetto di Ricerca per la Regione Campania. Relazione Conclusiva (u.d).
- DE PIPPO T., PENNETTA M., TERLIZZI F., VECCHIONE C. (2000) - *Hypothesis for a protected nourishment along the Maronti beach (Commune of Barano – Ischia Island – Italy)*. Journal of technical & environmental geology. 1, 33-43.
- DE PIPPO T., DONADIO C., PENNETTA M. (2003-2004) – *Morphological control on sediment dispersal along the southern Tyrrhenian coastal zones (Italy)*. Geologica Romana, 37, 113-121.

- DE PIPPO T., DONADIO C., MAZZARELLA A., PAOLILLO G., PENNETTA M. (2004) – *Fractal geometry applied to coastal and submarine features*. Z. Geomorph. N. F., 48, 2, 185-199.
- DE PIPPO T., PETROSINO C., VECCHIONE C., RANDAZZO G., GEREMIA F., LANZA S. (2005) - *Managing European Shorelines and Sharing Information on Nearshore Areas (MESSINA – Project Interreg IIIC West): An Introduction to Component 4 “Engineering the Shoreline”*. Atti Conv. Naz. AIGeo “Montagne e Pianure”, Padova, 15-17 Febbraio 2005. In “Materiali” n. 28 (Ed. A. Bondesan e A. Fontana) Dipartimento di Geografia, Univ. di Padova, pp. 88-89. Abstract.
- DE PIPPO T., DONADIO C., PENNETTA M., PETROSINO C., TERLIZZI F., VALENTE A. (2006) - *A method for evaluating coastal hazard: applications in Campania, southern Italy*. Geomorphology (in stampa).
- DE PIPPO T., PETROSINO C., VECCHIONE C., RANDAZZO G., GEREMIA F., LANZA S., (2005) – *Assessing and monitoring innovative coastal defence techniques throughout the Europe* . 6<sup>th</sup> International Conference on Geomorphology. Zaragoza (Spain), 7-11 Settembre 2005. Absrtact Poster, p.248.
- DE PIPPO T., DONADIO C., PENNETTA M., PETROSINO C., TERLIZZI F., VALENTE A., VECCHIONE C. (2006) – *Coastal hazard along Surrentibne Peninsula and Capri Isaln, southern Italy*. Geophysical Research Abstracts, vol. 8, Vienna (Austria), 02-07 Aprile 2006.
- DE PIPPO T., DONADIO C., GUIDA M., PETROSINO C. (2006) – *The case of Sarno River (Southern Italy). Effects of geomorphology on the environmental impacts*. Environmental Science and Pollution Research, 13 (3), 184-191.
- DE PIPPO T., PETROSINO C. (2006) – *Innovative littoral preserving technologies within the European Coastal Management*. In: Acts of the 8<sup>th</sup> International Conference Littoral 2006 “Coastal Innovations and Initiatives”, 18-20 September, Gdańsk, Poland.
- DE PIPPO T., VECCHIONE C., PETROSINO C., RANDAZZO G., GEREMIA F., LANZA S., MARRIOT C., FURMAŃZICK K. (a cura di) (2006) - *Engineering the Shoreline*, final draft, M.E.S.S.I.N.A. Project - Interreg IIIC West Programme
- DE SANTIS A., FEDI M., QUARTA T. (1997) – *A revisitation of the triangular prism surface area method for estimating the fractal dimension of fractal surfaces*. Ann. Geofis., 40(4), 811-821.
- DEAN R., OH T.M. (1992) - *Beach face dynamics as affected by ground water table elevations*. Coastal & Oceanographic Engineering Department, University of Florida. pp.31

- DEL MONTE M., FREDI P., LUPIA PALMIERI E., SALVINI F. ( 1999) – *Fractal analysis to define the drainage network geometry*. Boll. Soc. Geol. It., 118, 167-177.
- DI GIROLAMO P., STANZIONE D. (1973) - *Lineamenti geologici e petrologici dell'Isola di Procida*. Rend. Soc. It. Miner. Petrol., 29, 81-125.
- DI GIROLAMO P. (1981) - *Aspetti geologici e petrografici*. In AA.VV. Vivara. "Oasi di protezione naturale". Giunta Regionale della Campania, Ass. Agricoltura e Foreste, Napoli, 19-34.
- FAIRBRIDGE R.W. (1968) - *The encyclopedia of geomorphology*. Reinold Book Corp., New York.
- FERRETTI O., DELBONO I., FURIA S., BARSANTI M. (2003) - *Elementi di gestione costiera. Parte Seconda. Erosione costiera. Lo stato dei litorali italiani*. Rapporto Tecnico ENEA RT/2003/43/CLIM. Pp. 167.
- GAMBOLATI G., GIUNTA G., PUTTI M., TEATINI P., TOMASI L., BETTI I., MORELLI M., BERLAMONT J, DE BACKER K., DECOUTTERE C., MONBALIU J., YU C.S., BROKER I., CHRISTENSEN E.D., ELFRINK B., DANTE A., GONELLA M. (1998) - *Coastal evolution of the Upper Adriatic Sea due to sea level rise and natural and anthropic land subsidence*. In CENAS, Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropic Land Subsidence. G. Gambolati (ed.). Kluwer Academic Publ. 1-34.
- GAO J., XIA Z. (1996) – *Fractals in physical geography*. Progress in Phys. Geogr., 20, 2, 178-191.
- GIANNONI, F., G. ROTH AND R. RUDARI (2000) – *Sull'uso di concetti di geometria frattale nella modellazione afflussi deflussi a scala di bacino*, XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Genova, September 12-15, II, 65-75.
- GOODCHILD M.F. (1982) - *The Fractal Brownian processes as terrain simulation model*. Modelling and Simulation, 13, 1133-1137.
- GRAGNANIELLO S., PREVIATI L. (2003) - *Approccio gestionale dell'area costiera del Parco del Delta del Po Emiliano-Romagnolo*. Studi costieri. Pisa. 7, 95-105.
- GRASSBERGER P., PROCACCIA I. (1983) - *Characterization of strange attractors*. Phys. Rev. Lett., 50, 346-349.
- GUTENBERG B., RICHTER C.F. (1948) – *Deep-focus earthquake in the Mediterranean region*. Review of Pure and Applicable Geophysics, 12, 1-4.
- HAMBREY M. J., HARLAND W. B. (1982) – *Earth's pre-Pleistocene glacial record*. Cambridge University Press, London.
- IMBÒ G., BONASIA V. & GASPARINI P. (1964) - *Rilievo gravimetrico dell'Isola di Procida*. Ann. Oss. Vesuv., Napoli, 6, 117-138.

- IMPRESUB (2001) - *Rilevamenti geognostici della Spiaggia della Chialiolella – Procida* (dati non pubblicati).
- KING C.A.M., WILLIAMS W.W. (1949) – *The formation and movement of sand bars by wave action*. Geol. Journ., 113, 70-85.
- KLINKENBERG B. (1992) - *Fractal and morphometric measures: is there a relationship?* In: SNOW R.S. & MAYER L. (eds.), *Fractals in Geomorphology*, Geomorphology, 5, 5-20.
- KLINKENBERG, B., GOODCHILD, M. (1992) - *The fractal properties of topography: a comparison of methods*. Earth Proc. Landf., 17, 217-34.
- KOBAYASHI N., STRELOCKI M.S., WURJANTO A. (1998) - *Swash oscillation and resulting sediment movement*. International Conference on Coastal Engineering.
- KOCH H. VON (1904) – *Sur une courbe continue sans tangente, obtenue par une construction géométrique élémentaire*. Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik, 1, 681-704.
- KOCH H. VON (1906) – *Une méthode géométrique élémentaire pour l'étude de certaines questions de la théorie des courbes planes*. Acta Mathematica, 30, 145-174.
- KORVIN C., BOYD D.M., O'DOWD R. (1990) - *Fractal characterization in the South Australian gravity station network*. Geoph. Journ. Int., 100, 535-539.
- LA MONICA G.B. E LANDINI B., 1983, *Tendenze evolutive delle coste basse della penisola italiana*. Atti XXIII Cong. Geogr. It., Catania, 209-217;
- LORENZ E.N. (1963) - *Deterministic nonperiodic flow*. Journ. Atmosph. Sci., 20(2), 130-141.
- LORENZ E.N. (1975) – *The physical bases of climate and climate modelling*. World Meteorol. Org., GARP Publ. Ser., 16, 132-136.
- LORENZ E.N. (1979) – *Forced and free variations of weather and climate*. Journ. Atmosph. Sci., 36, 1376.
- LUONGO G., CUBELLIS E., OBRIZZO F. (1987). *Ischia – Storia di un'isola vulcanica*. Ed. Liguori, Napoli.
- LUONGO G., MAZZARELLA A., DI DONNA G. (2000) - *Multifractal characterization of Vesuvio lava-flow margins and its implications*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 101, 307-311.
- MANDELBROT B.B. (1967) - *How long is the coast of Britain? Statistical similarity and fractal dimension*. Science, 155, 636-638.
- MANDELBROT B.B. (1975) - *Stochastic models of the Earth's relief, the shape and the fractal dimension of the coastal lines, and the number area rule for the islands*. Proc. Nat. Acad. Sci., USA, 72, 3825-3828.

- MANDELBROT B.B. (1983) - *The fractal geometry of nature*. Freeman and Company, N.Y., USA, 468 pp.
- MANDELBROT B.B. (1985) – *Self-affine fractals and fractal dimension*. Physica Scripta, 32, 257-260.
- MANDELBROT B.B. (1987) - *Gli oggetti frattali. Forma, caso e dimensione*. G. Einaudi ed., Torino, Italia, 207 pp.
- MARCHELLO F., PERRINI M., SERAFINI S. (2004) – *Diritto dell’Ambiente. Codice dei beni culturali e del paesaggio* VI Ed. - pp. 656.
- MAROTTA L. & VICINANZA D. (2001) - *Indici di qualità ambientale nella gestione integrata della fascia costiera*. Studi Costieri, Firenze, Italy. 4, 83-98.
- MAZZARELLA A., TRANFAGLIA G. (2000) - *The fractal characterisation of geophysical measuring networks and its implications for an optimal location of additive stations: an application to a rain-gauge network*. Theor. Appl. Climatol., 65,157-163.
- MINISTERO LL.PP. (1990) - *Ripascimento del Lido di Ostia*. Consulenza Condracos 1990-93
- MONTGOMERY C. W. (1999) - *Environmental Geology*, Ed. McGraw-Hill College, pp. 540
- NIOLA BUCHNER D. (1984) – *Ischia nelle carte del ‘500 e del ‘600*. Bologna.
- ODIFREDDI P. (2000) - *La matematica del Novecento. Dagli insiemi alla complessità*. Piccola Biblioteca Einaudi Scienza, Einaudi ed., Torino, Italia, 193 pp.
- PALUMBO A. (2003) – *Il Vesuvio, i Campi Flegrei e i napoletani. Che cosa potrà accadere e quando*. Liguori ed., 188 pp.
- PANIZZA M. (1973) – *Elementi di geomorfologia*, Bologna.
- PANIZZA M. (1995) – *Introduction to a research methodology for geomorphology and environmental impact assessment*. Quad. Geodin. Alp. Quat., vol. 3.
- PARASCANDOLA A. (1953) - *Sui lavori compiuti nell’Isola di Procida, nel comprensorio di Monte di Procida, Monte di Cuma, Miseno e Vesuvio per il Foglio 184 della Carta Geologica d’Italia*. Boll. Serv. Geol. It., 75.
- PAROTTO M., LUPA PALMIERI E. (2004) – *Il globo terrestre e la sua evoluzione*. V ed., Zanichelli (ed.), Bologna (Italy), pp. 596.
- PASKOFF R. (1985) - *Les littoraux. Impact des aménagements sur leur évolution*. Ed. Masson, Paris, 184 pp.
- PEANO G. (1890) - *Sur une courbe, qui remplit une aire plane*. Mathematische Annalen, 36, 157-160.

- PEITGEN H.-O., RICHTER P.H. (1987) - *La bellezza dei frattali. Immagini di sistemi dinamici complessi*. Bollati Boringhieri, Torino, pp. 195.
- PICCAZZO M., CORNET Y., CORRADI N., CASALE R., PEDEMONTE S. (1988-1989) – Quelques exemples d’utilisation des géotextiles dans le domaine de la géomorphologie appliquée. Centre National de Recherches Géomorphologiques, Documents de Travail, Liegi, vol. XXVIII, pp. 3-18.
- PIRAZZOLI P.A. (1986) - *Secular trends of relative sea level changes indicated by tidal gauge records*. Jour. Of Coastal Research, 1, 126;
- POLI G., PERUGINI D. (2001) - *La Geometria Frattale e le Scienze della Terra*. Geoitalia, F.I.S.T., 7, 21-27.
- PRANZINI E. (1984) – *La tutela della fascia costiera*. Atti del Convegno “Proposte nella provincia di Livorno per la salvaguardia attiva dell’ambiente, Livorno, giugno 1984, pp. 91-94.
- PRANZINI E. (2004). *La forma delle coste. Geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali*, Bologna, Zanichelli.
- PRESS F., SIEVER R. (1998) – *Earth*. W H Freeman, 4th edition.
- PRETI M., AMINTI P., PRANZINI E. (a cura di). (1993). *La difesa del territorio costiero in Emilia Romagna: esperienze e considerazioni*. In “La difesa dei litorali in Italia”, Roma, Edizioni delle Autonomie, pp. 283-295.
- PROVINCIA DI FERRARA (2004) – Rapporto sullo Stato dell’Ambiente dei comuni costieri della Provincia di Ferrara. Relazione Tecnica RSA-COSTA21.
- PROVINCIA DI NAPOLI – ASSESSORATO ALL’AMBIENTE (2001) – *Primo Rapporto sullo Stato dell’Ambiente della Provincia di Napoli*. A cura di C. Del Giudice.
- REGIONE EMILIA ROMAGNA (1981) – Piano Coste 1981.
- REGIONE LAZIO (1999) - *Mare, Coste, Porti. Risorse per uno sviluppo sostenibile*. Assessorato Opere e Reti di Servizi e Mobilità.
- REGIONE LAZIO, Dipartimento Territorio - Direzione Regionale Ambiente e Protezione Civile (2001). *Difesa del litorale, salvaguardia degli ecosistemi naturali, riduzione e controllo degli impatti delle attività antropiche. Difesa del litorale dai fenomeni di erosione costiera e riduzione dei fattori di rischio*. Relazione Tecnica.
- RICHTER C.F. (1958) – *Elementary Sismology*. W.H. Freeman & Co. eds., San Francisco, USA.
- RITMANN A., GOTTINI V. (1980) – *L’isola di Ischia – Geologia*. Boll. Serv. Geol. It., CI, 131-274.
- RITTMANN A. (1951) - *Cenni sulla Geologia di Procida*. Boll. Soc. Geol. It., 70, 533-544.

- ROSI M., SBRANA A. (1987) - *Phlegrean Fields*. Quad. de "La Ricerca Scientifica", Prog. Final. Geodin., Monogr. Fin., CNR, Roma, 144, 9, 168 p.
- SIMEONI U., ANCONETANI P., GABBIANELLI G., GONELLA M., DEL GRANDE C., PELLIZARI M., TESSARI U., ZAMARIOLO A. (2000) - *Studio dell'Ancona e delle Vene di Bellocchio, del litorale tra Porto Garibaldi e Porto Corsini: proposte di sistemazione ambientale*. Rapporto conclusivo II Fase. Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Ferrara. 42-44.
- SIMEONI U., DEL GRANDE C., GABBIANELLI G. (2003) - *Variazioni ed ipotesi evolutive dell'assetto altimetrico del litorale emiliano-romagnolo*. Studi costieri. Pisa. 7, 81-93.
- SIMEONI U., TESSARI U. (2004) - *Il precario equilibrio del litorale ionico/4 gestione e tutela dei litorali sabbiosi: Conoscere per prevenire*. Dipartimento di Scienze Geologiche e Paleontologiche Università degli Studi di Ferrara.
- TERICH T.A., SCHWARTZ M.L. (1993) - *The effect of seawalls upon beaches*. Proc.Hilton Haet Island Int. Coastal Symp. Vol.1:127-133.
- TERICH T.A., SCHWARTZ M.L. (1993) - *The effect of seawalls upon beaches*. Proc. Hilton Heat Island Int. Coastal Symp., Vol. 1, 127-133.
- TERLIZZI F. (2005) - *Analisi delle interazioni tra eventi meteomarinari, evoluzione morfodinamica e sedimentaria di alcuni settori della piattaforma costiera del Molise*. Tesi di Dottorato Univ. Di Napoli Federico II.
- TORRE F. (2002) - *Geomorfologia costiera e della piattaforma continentale in Italia. Per una ricerca bibliografica*. In "Ricerche di Geomorfologia, Archeologia navale, Archeometria" a cura di G. Savio. Agorà Edizioni.
- TOUE T., WANG H. (1990) - *Three dimensional effects of seawall on the adjacent beach*. Coastal Eng.Conf.pp2782-2795.
- TRINCARDI F., CORREGGIARI A., ROVERI M. (1994) - *Late Quaternary transgressive erosion and deposition in a modern epicontinental shelf: The Adriatic Semienclosed Basin*. Geo-Marine Letters, 14, 41-51.
- TRINCARDI F., ASIOLI A., CATTANEO A., CORREGGIARI A, VIGLIOTTI L., ACCORSI C.A. (1996) - *Transgressive offshore deposits on the central Adriatic shelf: Architecture complexity and the record of the Younger Dryas short-term event*. Il Quaternario, 9: 753-762.
- TURCOTTE D.L. (1997) - *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. II ed., Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. pp. 221.

- VEZZOLI L. (1988) - *Island of Ischia*. Quaderni de «La Ricerca Scientifica», Prog. Finalizzato “Geodinamica”, Monogr. Finali, C.N.R. 10, 114, Roma, 133p.
- VOSTERBY H., MANGOR K., REFSGAARD A. (1999) - *The Beach drainage Concept. Development of an Engineering Design Tool*. COPEDEC '99, Cape Town, South Africa. Proceedings, Vol. 2, 961-971.
- XIAO Y., KLINKENBERG B. (1993) - *Topographic characterization for geographic modelling*. Proc. GIS'93, Vancouver, 883-898.