# PROGETTO MAREGOT

## Management dei Rischi derivanti dall'Erosione Costiera e Azioni di Governance Transfrontaliera

**T2.1.2 Proposta metodologica per lo strumento operativo di previsione e gestione del rischio costiero a lungo termine con riferimento ai processi di erosione costiera anche per effetto dei cambiamenti climatici. (Attività 2.1 della componente T2 « Stratégie transfrontalière pour le Plan d'Intervention »)**

**Responsabile attività 2.1 : Consorzio LaMMA**

Il presente rapporto tecnico è stato redatto da:

Carlo Brandini

Massimo Perna

Valentina Vannucchi

Giovanni Vitale

**SOMMARIO**


I. OBIETTIVI DEGLI STUDI RELATIVI ALL' EROSIONE COSTIERA ..... 3

A. L'erosione delle coste ..... 3

B. Scale dei processi ..... 4

II. METODI E MODELLI PER LO STUDIO E LA PREVISIONE DELL'EROSIONE COSTIERA ..... 6

A. Metodi e modelli per la stima del trasporto solido litoraneo ..... 6

B. Ricostruzione delle onde a scala di bacino e regionalizzazione delle onde ..... 7

C. Modelli morfodinamici a breve e medio-termine ..... 8

D. Modelli morfodinamici a lungo termine ..... 9

E. Stima dell'innalzamento del livello medio del mare ..... 11

F. Indici di vulnerabilità della costa ..... 13

G. ALTRI PROGETTI SUL RISCHIO COSTIERO A LUNGO TERMINE ..... 15

III. CONTENUTI DELLA RELAZIONE TECNICA SULLE ONDE PER LO STUDIO E LA PREVISIONE DELL'EROSIONE COSTIERA ..... 16

A. Descrizione dei dati relativi all'area in esame: spiaggia emersa e sommersa ..... 16

B. Descrizione ed elaborazione delle informazioni ..... 17

IV. SINTESI DELLA METODOLOGIA ..... 21

V. BIBLIOGRAFIA ..... 22

# I. OBIETTIVI DEGLI STUDI RELATIVI ALL' EROSIONE COSTIERA

## A. L'erosione delle coste

La conoscenza delle dinamiche di lungo periodo relative all'azione del mare lungo la costa è fondamentale per supportare la pianificazione e la gestione delle aree costiere, specie nel momento in cui si manifestano gli effetti dei cambiamenti climatici. L'arretramento della linea di riva e la conseguente diminuzione della superficie della spiaggia rappresenta un problema di primaria importanza dal punto di vista economico, paesaggistico, e soprattutto di sicurezza, per una buona parte delle spiagge, sottoposte anche a rilevanti pressioni demografiche stagionali. A livello italiano, dalle recenti *Linee Guida Nazionali per la difesa della costa dai fenomeni di erosione e dagli* effetti dei cambiamenti climatici risulta che diverse regioni hanno una percentuale di spiagge in erosione vicina o superiore al 50%. Una spiaggia in erosione può essere fonte di pericolo per l'ambiente retrostante, in quanto il suo "compito" di dissipatrice dell'energia dell'onda, soprattutto in caso di eventi di particolare intensità, tende a ridursi, se non annullarsi nel caso in cui la spiaggia venga erosa del tutto. Manufatti costieri possono subire in questi casi danneggiamenti, mentre strade ed ambiente circostante, naturale od antropico, sono a rischio inondazione. Il clima meteomarino e l'andamento delle correnti incidono sulla distribuzione dei sedimenti long-shore e cross-shore, in base ad equilibri dinamici in continua evoluzione.

La valutazione degli effetti prodotti dai cambiamenti climatici rappresenta una importante sfida per la gestione delle aree costiere, nelle quali è possibile identificare i molteplici rischi legati al clima come, ad esempio, l'innalzamento del livello del mare (*sea level rise*), l'impatto degli eventi meteomarini estremi, l'aumento della temperatura media del mare e le variazioni dei parametri legati alla qualità dell'acqua. In ogni caso è sempre più necessario affiancare ai bilanci di trasporto solido lungo la costa (tradizionalmente valutati considerando il regime di trasporto solido e gli apporti fluviali), valutazioni quantitative relative agli effetti dei cambiamenti climatici, quali le possibili variazioni del regime anemologico, di moto ondoso e di corrente lungo la costa, il sea level rise, o gli stessi cambiamenti delle precipitazioni a cui si possono associare variazioni nei regimi fluviali e nel trasporto solido dai bacini terrestri.

Questi effetti si manifestano nel lungo periodo e sono difficili da valutare, anche perchè le serie storiche di dati osservati attualmente a disposizione, almeno lungo le nostre coste, sono troppo brevi per estrapolare informazioni a lungo termine.

Una stima previsionale dell'erosione costiera a lungo termine non può prescindere da una analisi accurata del clima meteomarino. È necessario produrre dati affidabili riguardanti il clima ondoso lungo la costa, sulla base dei principali parametri fisici legati allo stato del mare che sono causa dell'erosione costiera di lungo periodo. In questo caso la scala temporale di riferimento è dell'ordine di decine di anni, mentre quella spaziale si estende oltre il limite della singola unità fisiografica fino ad un ambito regionale. A partire dai dati suddetti, e attraverso una adeguata modellazione del trasporto solido litoraneo è possibile valutare gli effetti prodotti dal moto ondoso nel lungo periodo attraverso modelli di evoluzione morfodinamica a lungo termine.

Le stime di trasporto solido medio annuo lungo il litorale e anche gli attuali modelli di evoluzione morfodinamica normalmente non tengono conto delle variazioni del clima meteomarino, ad esempio esistono evidenze che sono state messe in luce in vari paesi europei relative alle variazioni del regime anemometrico che si sono manifestate negli ultimi 15 anni. È pertanto fondamentale disporre di dati di clima meteomarino lungo la costa il più possibile affidabili ed aggiornati.

## B. Scale dei processi

L'azione costante di modellazione morfologica della costa da parte del moto ondoso e delle correnti consiste in un insieme di processi fisici a diverse scale spaziali e temporali.
Nelle zone costiere i processi includono venti, onde, maree e correnti, che forniscono l'energia che modella e modifica una costa erodendo, trasportando e depositando sedimenti. Sebbene le onde, le maree e le correnti interagiscano, un processo potrebbe aumentare o diminuire gli effetti di un altro.
In generale, processi come turbolenza, vento, erosione del fondo e/o della shoreface e cambio del profilo della spiaggia avvengono entro micro (da secondi a min) periodi di tempo che coprono una scala spaziale da micro (da mm a cm) a meso (da m a km). Le maree, i percorsi dei sedimenti, i cambiamenti delle coste coprono scale temporali più lunghe da macro (mesi ad anni) fino a mega (da decenni a secoli), mentre in termini di spazio rappresentano forme da 1 a 10 km. Infine, variazioni su base sub-regionale e regionale (scala mega spaziale> 10 km) si verificano all'interno di macro a scala di tempo mega (Gallop al 2015, Kraus et al 1991).

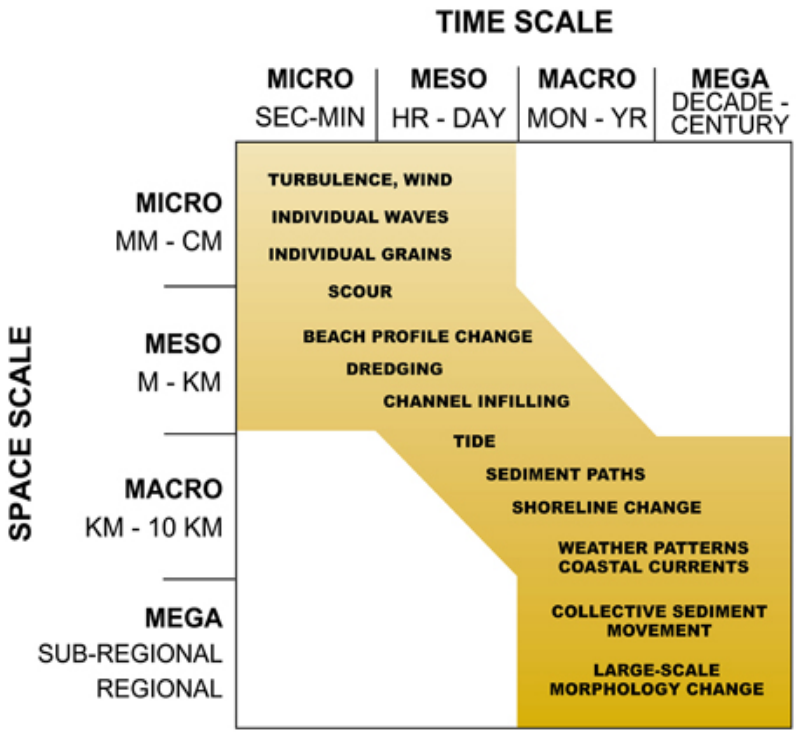


Figura 1: Scale spaziali e temporali relative ai processi accoppiati idrodinamici e morfondinamici costieri (da Gallop al 2015, Kraus et al 1991)

Le onde generate dal vento sono la più importante fonte di energia immessa nella zona litorale e, insieme con le correnti generate dalle onde, sono responsabili del trasporto di sedimenti.
La piccola scala si occupa della descrizione di processi da pochi periodi d'onda o lunghezze d'onda all'interno dei quali è possibile utilizzare modelli teorici per descrivere in grande dettaglio il movimento della superficie dell'acqua, la velocità delle particelle d'acqua e le pressioni indotte dall'onda. Questo approccio è definito di *risoluzione di fase (phase resolving)*, ha una risoluzione compresa tra una piccola frazione di lunghezza d'onda o periodo ma non viene usato per le simulazioni long-term.
La scala media si occupa di ciò che è compreso tra cento fino a diverse centinaia di periodi o lunghezze d'onda. Questo intervallo è abbastanza breve per condizioni da considerare omogenee o stazionarie e abbastanza lungo da fornire statistiche affidabili; quindi i dati registrati da una boa sono in genere analizzati in riferimento a questi intervalli. Su larga scala si considerano periodi di ordine pari alla durata della singola mareggiata che

quindi coprono durate fino a decine di ore e distanze dell'ordine di centinaia fino a poche migliaia di km. Questo permette di esaminare la variabilità spaziale o temporale dello spettro d'onda e per esempio di tracciare il passaggio delle onde dalla loro area di generazione su grandi distanze fino al raggiungimento della costa. L'approccio adottato, in questo caso, è *mediato sulla fase* (*phase averaged*). Infine, volendo analizzare i processi morfodinamici della costa a scala di unità fisiografica o di singolo paraggio dobbiamo considerare la statistica delle onde su un periodo di decine di anni, andando a studiare il clima ondoso della zona di interesse.
Allo stesso modo la variabilità della scala temporale si estende anche alla diversità delle forme di modellazione dei processi costieri. La linea di riva è un elemento intrinsecamente variabile, che difficilmente si trova nella stessa posizione a poche decine o centinaia di metri dal punto che si sta osservando, e altrettanto difficilmente rimarrà nello stesso punto a pochi giorni di distanza.
Un tratto di costa può risultare in erosione se si analizza la sua evoluzione solo per una piccola porzione della sua estensione, ma può essere in avanzamento, o più presumibilmente in equilibrio se invece si osserva l'intera unità fisiografica alla quale appartiene. Questo perché ondulazioni puntuali della posizione della linea di riva tendono a compensarsi ingrandendo l'area di indagine, in quanto una parte dei sedimenti che vengono erosi in un punto dalle dinamiche che regolano il trasporto litoraneo, viene rilasciata in zone adiacenti. Inoltre l'intervento dell'uomo può agire sulla variabilità di questi fenomeni, tramite la costruzione di strutture che ostacolano il flusso litoraneo di sedimenti.
L'evoluzione temporale della linea di riva in un dato punto è un concetto anch'esso assai variabile a seconda della scala cui si fa riferimento. Tale linea può essere in un punto diverso da quello attuale se la si analizza a distanza di pochi minuti o addirittura secondi se nel frattempo è intervenuto un treno d'onde a modificare l'interfaccia terra-acqua; a distanza di ore o pochi giorni può essere intervenuta con lo stesso risultato una fase del ciclo di marea o una mareggiata. Il susseguirsi di eventi meteomarini di una certa intensità ha una ciclicità tipicamente stagionale, mentre se si considerano variazioni del livello medio del mare la scala da considerare è addirittura pluriennale.

# II. METODI E MODELLI PER LO STUDIO E LA PREVISIONE DELL'EROSIONE COSTIERA

## A. Metodi e modelli per la stima del trasporto solido litoraneo

L'evoluzione della costa è strettamente legata al movimento dei sedimenti nella spiaggia, sia sommersa che emersa. Le correnti costituiscono la principale forzante per il trasporto dei sedimenti in ambiente costiero.
I complessi meccanismi di interazione tra i frangenti e il surf delle onde sottocosta si combinano in pattern orizzontali e verticali e generano correnti costiere che producono il trasporto dei sedimenti della spiaggia. A volte questo trasporto si traduce solo in una locale riorganizzazione della sabbia in barre, o in una serie di ritmiche incisioni sulla spiaggia. Altre volte ci sono ampi spostamenti di sedimenti lungo la costa, fino a centinaia di migliaia di metri cubi di sabbia ogni anno.
Come noto si distinguono due modalità di trasporto solido: per sospensione (suspended load) in cui il sedimento è preso in carico dal flusso turbolento dell'acqua, e il trasporto di fondo (bed load), in cui i sedimenti restano vicini al fondale e si muovono per rotolamento, saltazione o scorrimento.
Il regime idrodinamico rappresenta il fattore maggiormente rilevante per il trasporto solido di sedimenti. In generale, volendo descrivere verticalmente il regime di flusso si ha uno strato sottile e viscoso molto vicino al fondo caratterizzato da un flusso laminare, sovrastato da uno strato a regime turbolento. In acque basse questo strato può arrivare ad interessare l'intera colonna d'acqua ed avere un profilo di velocità di tipo logaritmico.
Anche il moto ondoso ha un ruolo fondamentale nel trasporto solido dei sedimenti, non solo perchè innesca I meccanismi di formazione delle correnti litoranee ma anche perchè contribuisce direttamente, tramite le oscillazioni della velocità orizzontale dello strato limite al fondo, al risollevamento e alla risospensione dei sedimenti.
Il trasporto lungo costa (*long-shore*) è quello che maggiormente incide sulla modellazione delle spiagge, determinandone le fasi di erosione o accrescimento. Esso è comunemente generato da un moto ondoso che incide la linea di costa secondo un angolo obliquo e i parametri che lo caratterizzano comprendono le caratteristiche del moto ondoso (H, T e angolo di incidenza), l'indice di frangimento, le caratteristiche tessiturali dei sedimenti, la pendenza della spiaggia e la scabrezza del fondo.
In letteratura sono noti vari metodi per la determinazione del trasporto *long-shore*, anche se l'equazione di riferimento è quella relativa alla cosiddetta formula del CERC (Shore Protection Manual, US Army Corps of Engineers, 1984). Essa si basa sul principio che la velocità di trasporto *longshore* totale (trasporto di fondo più quello in sospensione) è proporzionale all'energia dell'onda incidente per unità di lunghezza della spiaggia.
Recentemente sono stati proposti numerosi modelli che prevedono la modellazione di numerosi processi coinvolti nel trasporto dei sedimenti (frangimento, tensioni radianti, stress di taglio al fondo, trascinamento, sospensione, interazione onda-corrente, ecc.), e cercano di simulare nel dettaglio ciascuna componente. Questi strumenti utilizzano generalmente un modello di propagazione del moto ondoso per calcolare i parametri di onda lungo il profilo al fine di considerare le caratteristiche batimetriche. Generalmente questi modelli sono di più difficile implementazione anche perchè necessitano di un gran numero di parametri di input oltre che di una accurata calibrazione. Alcuni esempi di tali modelli sono descritti in Deigaard et al. (1986) e UNIBEST-LT (WL|Delft Hydraulics, 1992, Stive and Battjes, 1984).
Oltre al trasporto long-shore si osserva un trasporto di direzione normale alla costa (cross-shore). Questo trasporto, che risulta dominante nel caso di eventi di mareggiata, è la risultante del trasporto verso costa

causato dall'azione del moto ondoso incidente e quello verso largo legato alla risacca ed è fortemente influenzato dallo spettro del moto ondoso incidente.
Recentemente sono stati prodotti numerosi studi sul trasporto *cross-shore* nel tentativo di arrivare ad una previsione delle variazioni del profilo della spiaggia emersa e sommersa a seguito di eventi intensi sulla costa. Certo è che i gradienti di trasporto attivi nel corso di tali eventi sono particolarmente elevati e di conseguenza anche le variazioni morfologiche indotte possono essere particolarmente significative sia spazialmente che temporalmente.
Anche in questo caso sono stati sviluppati vari modelli (ad es. Kobayashi, 2005) o codici commerciali (ad es. codice MIKE 21 - modulo ST), che consentono di tenere conto dei principali elementi da parametrizzare (caratteristiche fisiche dei sedimenti, caratteristiche morfologiche della spiaggia emersa e sommersa, caratteristiche del moto ondoso, etc.).
I risultati delle modellazioni, assieme ai dati disponibili sono fondamentali per una adeguata interpretazione della dinamica dei sedimenti e dei fenomeni erosivi; la complessità delle interazioni dinamiche non lineari tra sedimenti, morfologia e forzanti (moto ondoso, correnti, ...) fanno sì che l'interpretazione dell'evoluzione di un ambiente complesso come quello costiero e dunque la previsione a lungo termine (su scale temporali rilevanti per la società umana) dei rischi legati all'erosione costiera siano particolarmente complessi e richiedano un'attività continua di aggiornamento dei dati e dei modelli disponibili. Ciò al fine di poter attivare una corretta programmazione e progettazione degli interventi lungo costa a difesa dall'erosione, in un'ottica di ottimizzazione delle risorse disponibili.

Modelli di trasporto solido si trovano integrati in vari tipi di modelli 2D e 3D, discussi nel report T2.1.1. Possono essere utilizzati per studi di processo e per la calibrazione dei modelli di trasporto solido (per confronto con dati topo-batimetrici), ma, visto il notevole sforzo computazionale richiesto, non sono ancora adatti per permettere di svolgere simulazioni di lungo periodo.

## B. Ricostruzione delle onde a scala di bacino e regionalizzazione delle onde

Lo studio del clima ondoso è l'acquisizione di una serie statisticamente significativa di dati storici rappresentativi delle onde incidenti al largo. L'analisi statistica consente di ricostruire il clima ondoso medio annuo, normalmente espresso in termini di frequenza media associata a classi di direzioni e altezze d'onda, sia le condizioni ondose estreme attese per determinati valori del periodo di ritorno, utilizzando adeguate funzioni di distribuzione probabilistica.
I dati ondametrici possono essere ottenuti utilizzando i seguenti metodi:

1. Metodi indiretti, ovvero metodi empirici e modelli matematici sviluppati a partire da dati anemometrici di tipo previsionale (*forecasting*) o di tipo storico (*hindcasting*) per la ricostruzione di serie temporali ondametriche;
Il dato di grande scala ottenuto tramite misure dirette o indirette (modelli) può essere propagato a costa attraverso modelli numerici di propagazione spettrale non lineare (ad es. SWAN, WAVEWATCH III o WW3, WAM) che consentono il *nesting* di griglie con maglia di discretizzazione a passi diversi. Tali modelli tengono conto, tra l'altro, dei processi relativi alla dissipazione del moto ondoso, come la modellazione della dissipazione legata al *white-capping* ovvero al frangimento in acque alte. Sia WW3 che SWAN consentono un'implementazione del modello su maglia non strutturata, che permette di trattare la scala di bacino e la scala costiera di dettaglio all'interno di uno stesso modello. Altri modelli, utilizzati in passato, quali il metodo SMB (sviluppato dai grandi oceanografi Sverdrup, Munk e Bretschneider), hanno oggi soprattutto un'importanza storica.

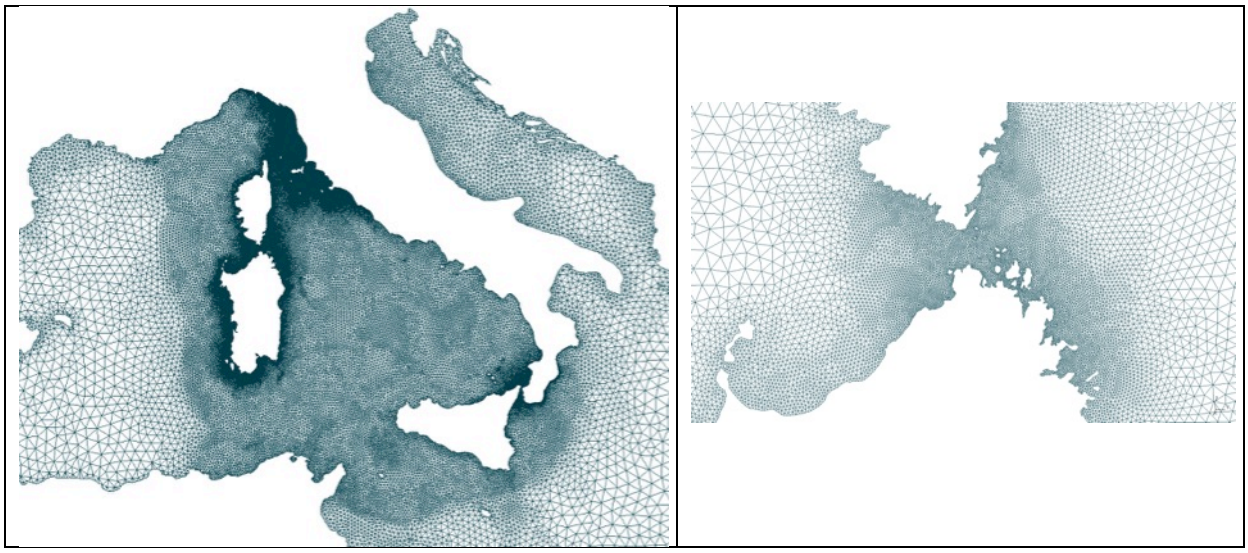

Figura 2 Esempio di griglia a maglia non strutturata per la previsione e l'hindcast di modelli di propagazione delle onde per il forecast e l'hindcast del moto. Fonte: LaMMA.

2. Metodi diretti, ovvero la misura in sito dei parametri ondosi in stazioni prossime all'area di studio.

In generale, i metodi diretti disponibili per la misura in sito delle caratteristiche ondose possono essere compresi in tre grandi categorie:

A. misure condotte al di sotto della superficie marina, ad esempio mediante trasduttori di pressione o correntometri acustici Doppler;
B. misure condotte sulla superficie marina, ad esempio mediante piattaforme, pali o boe ondametriche;
C. misure condotte al di sopra della superficie marina, ad esempio mediante tecniche Radar costieri, o Lidar, o tramite l'utilizzo di osservazioni satellitari. In questa tipologia sono comprese anche le osservazioni da webcam che consentono di acquisire serie storiche di immagini attraverso le quali è possibile analizzare alcuni caratteri delle onde sottocosta.

## C. Modelli morfodinamici a breve e medio-termine

I modelli morfodinamici relativi a processi a medio (da settimane a mesi) o breve (da ore a giorni) termine consentono di determinare le variazioni della batimetria costiera indotte da tali processi.
Tali modelli possono essere genericamente classificati in base all'approccio rispetto alla modalità di trasporto della componente sospesa: in particolare si distinguono i modelli che consentono di risolvere l'equazione 3D del bilancio di massa (avvezione-diffusione). Tali modelli si adattano meglio nel caso di presenza di sedimenti più fini, che in condizioni di moto turbolento sono distribuiti su una porzione più ampia della colonna d'acqua. Altro elemento da considerare è la presenza o meno della simulazione del trasporto *cross-shore* dovuto alla risacca, che è comunemente implementata per modelli Q3D o 3D. In questi modelli la determinazione dei campi di onda e di flusso sono basati su una formulazione *phase averaged*, che consente step temporali più lunghi rispetto alla modellazione *phase resolved*.
Il vantaggio di questi modelli è quella di poter considerare andamenti non regolari della batimetria e implementare la presenza di strutture costiere riflettenti il moto ondoso o di interruzione delle correnti.

Tra i modelli esistenti si ricorda il modello X-Beach, modello numerico open-source appositamente realizzato per simulare processi idrodinamici e morfodinamici su spiagge sabbiose che avvengono su una scala temporale relativa ad un evento di mareggiata, per un dominio di estensione chilometrica.
Un esempio commerciale è il modulo MIKE 21 ST (Sand Transport) che una volta introdotte le caratteristiche dei sedimenti in termini di granulometria media (d50) e di variabilità del fuso (*sediment grading*) è in grado di fornire la distribuzione della capacità di trasporto nel dominio di calcolo in termini di trasporto combinato della componente longitudinale (*long-shore*) e trasversale (*cross-shore*). Anche il modello commerciale TELEMAC-MASCARET dispone di un modulo (SISYPHE), che può modellare complessi processi idrodinamici in ambienti diversi (coste, fiumi, estuari, laghi).

## D. Modelli morfodinamici a lungo termine

La morfologia costiera è modellata dall'interazione dei processi di trasporto solido innescati dal moto ondoso e dalle correnti *long-shore* e *cross-shore.* La modellazione a lungo termine dell'evoluzione morfologica della costa si deve intendere quindi come modellazione di tali processi.
In primo luogo è necessario disporre di un modello di trasporto solido *long-shore.* Quindi deve essere individuata la modalità di accoppiamento di tale modello con le variazioni della morfologia della linea di riva.
Inoltre il modello deve essere in grado di tenere conto, nel lungo termine, delle situazioni locali (effetto di strutture costiere, ripascimenti, ecc.).

| MODELLO | SITO | REFERENCE | GRIGLIA | MOTO ONDOSO | TRASPORTO LONGSHORE |
|---|---|---|---|---|---|
| LITPACK Littoral processes and coastline kinetics | https://www.mikepoweredbydhi.com/products/litpack | DHI (2009a-d) | 1D – griglia lineare rispetto alla posizione della linea di riva | Modello di onda interno; interazione onda-corrente | Calcolo del trasporto con forzanti di onda e correnti su profilo 2D (orizzontale e verticale). Formulazione per gradiente di sabbia non uniforme e spiagge in ghiaia |
| GENESIS GENEralized model for SImulating Shoreline change | http://www.veritechinc.com/products/cedas/cedas-details | Hanson (1987); Hanson and Kraus (1989); Gravens, Kraus and Hanson (1991); Hanson and Kraus (2004) | 1D – griglia lineare rispetto alla posizione della linea di riva | Modello di onda interno; modello spettrale accoppiato | Parametri calcolati al frangimento e inseriti nella formula del CERC |
| UNIBEST UNIform BEach Sediment Transport | https://www.deltares.nl/en/software/unibest-cl/ | Deltares (2011) | 1D – griglia lineare rispetto alla posizione della linea di riva. E' possibile variare la dimensione della cella | Modello di onda interno; interazione onda-corrente | Calcolo simile al LITPACK, ma possibile applicare anche la formula del CERC. Formulazione per gradiente di sabbia non uniforme e spiagge in ghiaia |
| GenCade | https://www.aquaveo.com/software/sms-gencade | Frey et al. 2012 | 1D - griglia curvilinea | Modello di onda interno | Parametri calcolati al frangimento e inseriti nella formula del CERC |
| COSMOS-COAST | Available on request by the authors | Vitousek et al., 2016 | 1D – griglia lineare rispetto alla posizione della linea di riva | Onde generate esternamente da altri modelli (es. SWAN, WW3) | Parametri calcolati al frangimento e inseriti nella formula del CERC. Data assimilation (Kalman filter) |

Tabella 1 – Modelli morfodinamici "ad una linea"

L' approccio più comune a tale modellazione è dato dai cosiddetti modelli "ad una linea". In questo caso si assume che sia costante la forma del profilo della costa e che la continuità venga mantenuta attraverso un semplice *shifting* dell'intero profilo *cross-shore* verso il mare nel caso di accrezione o verso terra nel caso di erosione. In questo caso il modello di trasporto solido valuta il tasso di trasporto in ciascun punto della costa sulla base del clima ondoso in quel punto e dell'orientazione della linea di costa. Tipicamente tale modello non tiene conto dell'effetto legato alla memoria delle posizioni di *updrift*. Il modello di trasporto solido può basarsi su semplici equazioni empiriche o su più complesse modellazioni dei processi fisici. Un esempio di modello,

molto utilizzato, è il codice GENESIS; oltre alle caratteristiche suddette in tale modello si prescinde da un calcolo diretto della componente trasversale del trasporto solido litoraneo che può essere comunque introdotto a priori anche al fine di simulare, ad esempio, apporti solidi fluviali, perdite verso il largo e/o interventi di ripascimento. I modelli più utilizzati, oltre a GENESIS, sono: il LITPACK del DHI, composto da più moduli utilizzati per analizzare I processi costieri su una costa regolare; e UNIBEST di Deltares.

Come estensione del modello ad una linea esistono anche modelli a N-linee o *multi-layer*. In questo caso il profilo costiero è schematizzato da una serie di linee (o layers), il cui scopo è di implementare il trasporto cross-shore nei semplici modelli ad una linea. Questi sono accoppiati attraverso un modello di trasporto cross-shore che li forza ad una configurazione di equilibrio. Il trasporto longshore viene quindi modellato per ciascuna linea sulla base del suo andamento 2D.
Le caratteristiche principali comuni a questo tipo di modelli sono:

- tipo di griglia,
- moto ondoso, come principale motore del trasporto solido longshore;
- trasporto solido longshore, che è il principale responsabile delle variazioni della linea di riva, in un modello a una linea.

Normalmente questi modelli richiedono lunghe run di calibrazione per la taratura dei parametri del modello.
Un approccio diverso è dato dal modello COSMOS-COAST, sviluppato da USGS, in cui è stato implementato un originale metodo di riduzione dell'incertezza basato su un metodo di assimilazione con cui di fatto vengono calcolati i parametri del modello in maniera rigorosa, utilizzando le osservazioni pregresse (in particolare la posizione della linea di riva) all'interno di un algoritmo basato su un Kalman filter.

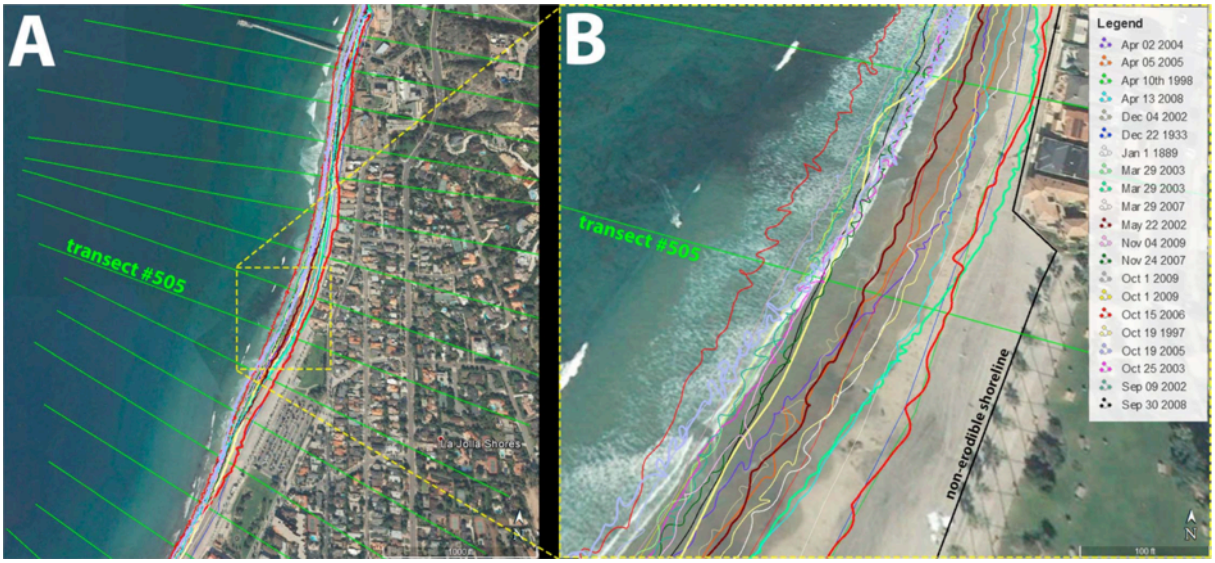


Figura 3 Esempio di applicazione del modello COSMoS-COAST ad un tratto di costa californiana (da Vitousek et al., 2017).

Figura 4 Esempio di applicazione del modello COSMoS-COAST al tratto di costa a nord del porto di Carrara (fonte: LaMMA).

## E. Stima dell'innalzamento del livello medio del mare

L'innalzamento del livello medio del mare (SLR) è un fenomeno ampiamente affrontato dalla comunità scientifica negli ultimi anni. L'innalzamento del livello del mare è solitamente attribuito al cambiamento climatico globale attraverso l'espansione termica dell'acqua negli oceani e lo scioglimento delle calotte glaciali e dei ghiacciai a terra (principlamente l'Antartide e la Groenlandia). Gli impatti legati al SLR sono ovviamente particolarmente significativi per le cosiddette LECZ (Low Elevation Coastal Zones), che circondano tutto il Mediterraneo.

Va sottolineato che Il livello del mare da sempre subisce variazioni, ad esempio 9-10 mila anni il livello era più basso di almeno 30 m ed esistono importanti evidenze, anche in epoca storica che il livello del mare fosse più basso di molti cm ancora in epoca romana (si vede ad esempio dalle piscine che i romani usavano per l'acquacoltura lungo la costa, oggi sommerse).

Le proiezioni future vengono svolte sulla base di scenari calcolati con modelli piuttosto complessi. Per la stima dell'innalzamento del livello medio marino vengono comunemente utilizzate le proiezioni su scala globale dell'IPCC (ad es. Church et al, 2013), ma nuove proiezioni sono attese per il 2018.

Infatti l'innalzamento del livello del mare in località specifiche può essere più o meno della media globale, ed occorre considerare diversi fattori locali. Per determinare l'aumento relativo del livello del mare nell'area di interesse, si devono tenere in considerazione gli effetti legati al comportamento atteso dei tassi di variazione legati allo scioglimento dei ghiacci, alla termo-isostasia, la glacio-isostasia, la sedimento-isostasia, variazioni di carattere tettonico, eustatico-sterico, variazioni nella forza di gravità, della subsidenza natural e, non ultima, quella legata all'attività antropica (es. determinate dall'estrazione di acqua o gas natural dal sottosuolo), ma anche maree, correnti, tempeste, ecc

Il Mediterraneo presenta alcune peculiarità rispetto alla situazione globale:

1) si tratta di un bacino di evaporazione (ovvero, evapora più acqua rispetto al ricambio di acqua dolce da pioggia e fiumi), connesso all'oceano globale tramite l'apertura dello stretto Gibilterra (~14 km). Gli scambi di acqua tra Mediterraneo e Atlantico hanno un controllo idraulico in prossimità dello stretto in cui giocano un ruolo importante sia le maree sia la diversa densità tra Atlantico e Mediterraneo (quest'ultimo è molto più salato). In pratica, il livello dell'Atlantico è diversi cm più alto di quello del Mediterraneo. È anche importante notare che I modelli globali I modelli globali, usati per gli scenari a lungo termine, non simulano il Mediterraneo in modo accettabile, perché non risolvono lo stretto di Gibillterra.

2) Proprio perchè nel Mediterraneo è molto importante anche la salinità, e non solo la temperatura, esistono un effetto importante o effetto alosterico, legato all'equazione di stato dell'acqua di mare, per cui la variazione di salinità tende a bilanciare la variazione di temperature (Marcos e Tsmplis, 2008).
3) Il livello del mare dipende localmente anche dalla circolazione e quindi le proiezioni devono tener conto di tutti processi fisici (ad esempio c'è un importante dislivello tra il sud Tirreno e il mar Ligure).

Un esempio di alcune possibili fonti dati:

| | |
|---|---|
| Espansione termica (globale) | CMIP5 |
| Cambiamento dell'altezza dinamica (locale) | CMIP5 |
| Perdita di massa - calotta glaciale | World Glacier Monitoring Service (WGMS), analisi probabilistica, letteratura |
| Perdita di massa - ghiacciai e cappe glaciali | World Glacier Inventory (WGI), GLIMS Glacier Database |
| Componente gravitativa e isostatica | letteratura |
| Movimenti verticali (GIA, glacial isostatic adjustment) | ICE-5G |
| Land water storage | IPCC 2013 |

Tabella 2 – Fonti di dati relative alla stima delle aree costiere sommerse per effetto dei cambiamenti climatici

Studi sulla variazione del *global mean sea level* sono eseguiti anche attraverso dati da altimetria satellitare (TOPEX/Poseidon, Jason, ecc.), con i quali è possibile avere una serie temporale omogenea a partire dai primi anni '90.
È importante tenere conto delle fonti di dati più attendibili per il Mediterraneo.
Il contributo del cosiddetto TIM, Terrestrial Ice Melt, calcolato per due diversi scenari RCP (Representative Concentration Pathways), ovvero RCP4,5 e RCP8,5 (Slangen et al., 2014), per il Mediterraneo è pari rispettivamente a 35 cm e 43 cm entro il 2100 (Sannino et al., 2018). Lo scenario RCP8.5 in particolare è quello considerato peggiore nel calcolo del SLR a livello globale. Nello stesso studio vengono indicati anche i tassi dei movimenti tettonici verticali di lungo termine per il Mediterraneo. In particolare, in molti punti sulla costa del mar Ligure e alto Tirreno gli spostamenti sono nell'ordine di +/- 0,15 mm/anno.
L'innalzamento del livello marino indotto dai movimenti verticali isostatici (GIA, Glacial Isostatic Adjustment) calcolato attraverso il codice SELEN dovrebbe essere compreso tra i 2 ed i 6 cm, quindi nettamente inferiore al contributo del TIM, anche se con variabilità regionale.

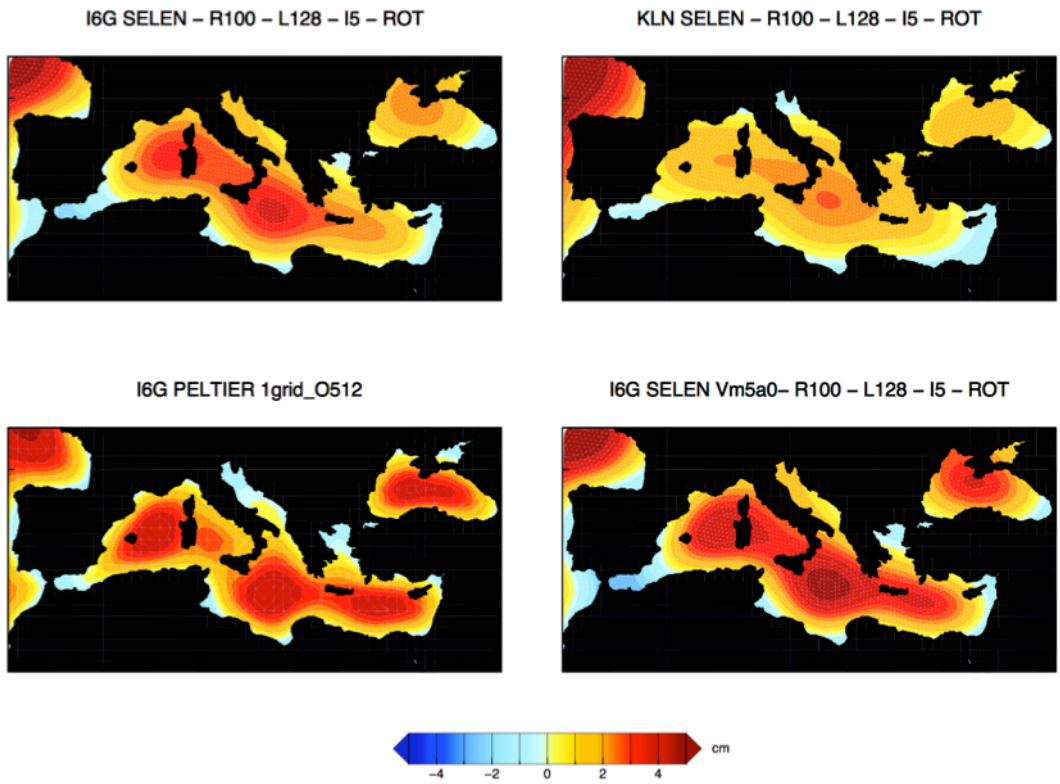


Figura 4 innalzamento relativo del livello del mare indotto dalla regolazione isostatica glaciale (GIA) in risposta alla fusione delle lastre di ghiaccio del tardo Pleistocene. I risultati sono ottenuti tramite il codice SELEN (Spada e Stocchi, 2007) prendendo in considerazione effetti deformativi, gravitazionali e rotazionali e assumendo incomprimibilità (per gentile concessione di Gianmaria Sannino, ENEA).

## F. Indici di vulnerabilità della costa

Sono diversi gli elementi che determinano l'esposizione di un tratto di costa al rischio da erosione, ed in letteratura sono presenti diversi indici sintetici che prendono in considerazione i vari fattori. Recentemente Nguyen et al., (2016) hanno pubblicato una rassegna degli approcci metodologici e degli indici di vulnerabilità ideati sull'argomento.

Tra i primi esempi di indici basati su forzanti geomorfologiche e climatologiche vi è il CVI, Coastal Vulnerability Index (Gornitz, 1991), che prende in considerazione 7 variabili attribuendo a ciascuna di esse delle classi di rischio da 1 a 5 in base al valore della variabile stessa. L'indice viene poi calcolato come radice quadrata del prodotto dei vari fattori, diviso per il numero di variabili presenti.

Le variabili in questione sono rappresentate dall'elevazione del terreno, la litologia, il tipo di costa (spiaggia, falesia, etc.), variazioni del livello marino, evoluzione della linea di riva, escursione di marea, altezza d'onda. Alcuni modelli, come in McLaughlin e Cooper (2010), aggiunsero alle caratteristiche della costa e alle forzanti che su di essa ricadono, l'aspetto socio-economico come sotto-indice da considerare insieme agli altri, calcolati separatamente, per valutare la quantità e la qualità delle infrastrutture potenzialmente a rischio. Tra queste variabili sono presenti la popolazione, l'uso del suolo e la presenza di infrastrutture come strade e ferrovie. Il CVI finale è il risultato della media dei 3 sottoindici denominati *Coastal Characterization*, *Coastal Forcing* e *Socio-Economic*.

In alcuni casi la formulazione originaria è stata adattata alle caratteristiche del caso specifico, come ad esempio per delle spiagge australiane per le quali Abuodha e Woodroffe (2006) aggiunsero i parametri relativi all'altezza della duna costiera, al tipo di barriera sabbiosa e alla tipologia di spiaggia (dissipativa, riflettente etc.) sostituendoli a quelli relativi alla geomorfologia e alla pendenza della spiaggia.

Il tipo di aggregazione dei sotto-indici è una delle discriminanti tra i vari metodi: in alcuni, come ad es. nell'Indicator for storm surge-driven flooding vulnerability (Harwey et al.,2009), non viene suggerito nessun tipo di aggregazione degli indicatori di diversa natura, mentre per Torresan et al. (2008) vengono identificati due set di indici di vulnerabilità, uno per analisi a scala regionale basato su dataset sito-specifici, l'altro finalizzato a studi globali. Inoltre, in ambiente GIS viene suddiviso il litorale in vari settori (un numero elevato per studi a livello regionale, molto limitato invece se lo studio è su più ampia scala) comparati tra loro per identificare le aree omogenee dal punto di vista della vulnerabilità costiera.
L'approccio che considera le diverse variabili come indicatori a se stanti è stato utilizzato inizialmente dal progetto Eurosion, che sulla base dell'approccio DPSIR (Drivers, Pressures, State, Impact, Response) (EEA, 1995) aveva identificato 13 indicatori, di cui 9 nella categoria "*sensitivity*", e 4 nella categoria "*impact*":

1 Innalzamento relativo del livello del mare
2 Trend evolutivo della linea di riva
3 Variazioni della linea di riva da stabilità a erosione o avanzamento
4 HWL, *Highest Water Level*
5 Urbanizzazione costiera entro 10 km dalla costa
6 Riduzione dell'apporto solido fluviale
7 Litologia della costa
8 Altitudine
9 *Engineered frontage* (incluse le opere di difesa)
10 Popolazione residente nel Raggio di azione dell'erosione o dell'inondazione (RICE)
11 Urbanizzazione costiera entro 10 km dalla costa
12 Aree urbane ed industriali all'interno del RICE
13 Aree di valore ecologico all'interno del RICE

## G. ALTRI PROGETTI SUL RISCHIO COSTIERO A LUNGO TERMINE

| NOME | ANNO | RIFERIMENTO | PROCESSI | CARATTERISTICHE |
|---|---|---|---|---|
| **EUROSION** | 2004 | https://rcahmw.gov.uk/the-royal-commission-leads-on-new-4m-eu-funded-project/ | Erosione costiera, resilienza costiera, gestione dei sedimenti | EUROSION si basa sul presupposto che l'erosione costiera sia un fenomeno che non può mai essere completamente controllato ma che può essere gestito in modo economicamente ed ecologicamente sostenibile.<br>La visione olistica favorita dal consorzio integra:<br>cause di erosione naturali e indotte dall'uomo (tempeste, movimenti sismici, riduzione dell'offerta di sedimenti dai fiumi a causa di dighe, stesse difese costiere, ecc.);<br>diversi usi della costa - comprese le sue parti terrestri e marine - che vanno dalla conservazione della biodiversità e del paesaggio al turismo, industria e trasporti;<br>diversi livelli di gestione - dai mari locali a quelli europei e regionali;<br>considerazioni sul bacino idrografico;<br>preoccupazioni attuali e prospettive a lungo termine (cambiamenti climatici) |
| **Coastal-Simulator** | 2000- | Mokrech et al., 2009<br>Dawson et al., 2009 | Mareggiata<br>Innalzamento livello del mare<br>Inondazione<br>Erosione costiera | Per la pianificazione e gestione del litorale il progetto sviluppa un simulatore a lungo termine (Tyndall Coastal Simulator) dei processi costieri ipotizzando diversi scenari di potenziali impatti e relativa incertezza. Il simulatore si basa su una serie di modelli climatici collegati (CM) all'interno di un quadro annidato che riconosce tre scale spaziali: (i) la scala globale (GCM); (ii) la scala regionale e (iii) il dominio del simulatore (un'unità fisiografica, come una sottocella costiera). |
| **DIVA** | 1999- | Hinkel e Klein, 2009 | Innalzamento livello del mare<br>Mareggiate<br>Inondazione<br>Erosione costiera<br>Cambiamento aree umide<br>Intrusione salina | DIVA (Dynamic Interactive Vulnerability Assessment model) comprende quattro componenti principali: database globale dettagliato dei dati costieri biofisici e socio-economici; scenari a lungo termine (fino al 2100) di innalzamento di livello del mare e analisi socio-economica; modello integrato che valuta gli impatti biofisici e socio-economici e gli effetti potenziali e i relativi costi; interfaccia grafica per la selezione di dati e scenari. |
| **SimCLIM** | 2005- | Warrick (2009) | Innalzamento livello del mare<br>Inondazione<br>Erosione costiera | Il sistema SimCLIM ha un sistema integrato verticalmente che collega dati e modelli globali, con modelli a scala locale e settoriale per l'analisi di impatti ad esempio sulle coste, l'agricoltura, la salute umana. |
| **CONSCIENCE** | 2010 | http://www.conscience-eu.net/ | Erosione costiera, resilienza costiera, gestione dei sedimenti | CONCETTI E SCIENZA per la gestione dell'erosione costiera è realizzato per fungere da struttura operativa per la gestione sostenibile dell'erosione costiera. Si tratta di un progetto di ricerca nell'ambito del Sesto programma quadro di ricerca dell'UE (6PQ). L'obiettivo strategico del progetto CONSCIENCE è sviluppare e testare concetti, linee guida e strumenti per la gestione sostenibile dell'erosione lungo la costa europea, sulla base delle migliori conoscenze scientifiche disponibili e dell'esperienza pratica esistente. |

# III. CONTENUTI DELLA RELAZIONE TECNICA SULLE ONDE PER LO STUDIO E LA PREVISIONE DELL'EROSIONE COSTIERA

## A. Descrizione dei dati relativi all'area in esame: spiaggia emersa e sommersa

L'analisi del trasporto solido costiero e delle tendenze evolutive di una spiaggia viene svolta tenendo in considerazione sia le caratteristiche meteomarine che quelle morfologiche (es. pendenza, presenza di forma di fondo, ecc.) e sedimentologiche. Questi ultimi due aspetti non sono indipendenti dal clima meteomarino, infatti le onde e l'idrodinamica a scala litoranea sono influenzate dalla morfologia del fondo e anche dal tipo di spiaggia. La morfologia influenza le caratteristiche delle onde in prossimità della linea di riva (es. determinando la profondità di frangimento o la riflessione delle onde), ma anche l'idrodinamica è fortemente dipendente sia dalla morfologia costiera che dalle caratteristiche del fondo (es. scabrezza di fondo).

L'equilibrio di una spiaggia rispetto al clima meteomarino, richiede la valutazione di aspetti legati alla morfologia quali l'orientazione della spiaggia, le caratteristiche del suo profilo e delle forme che si vengono a creare sia nel tratto emerso che in quello sommerso.

Rilievi diretti tramite strumentazione GPS, accoppiata ad ecoscandaglio e montata su natante per l'analisi del tratto sommerso, permettono di mappare sezioni trasversali della spiaggia dalle quali si ricavano diverse informazioni; tali informazioni sono ancor più dettagliate se i dati relativi a più profili adiacenti vengono interpolati per ottenere un DTM, obiettivo che per la spiaggia sommersa è raggiungibile utilizzando la tecnologia *single-beam* (a singolo punto) e *multi-beam* (con maggior dettaglio).

Nelle relazioni tecniche e negli studi meteomarini si fa spesso riferimento alla profondità di chiusura che, concettualmente, rappresenta Il limite verso largo della spiaggia sommersa oltre la quale si considerano trascurabili, per un dato tempo di ritorno, le variazioni di morfologia del fondale. Questo si verifica quando l'energia del moto ondoso non è più in grado di determinare spostamenti significativi di sedimento.

Dal piede della duna alla profondità di chiusura, il profilo di spiaggia fornisce informazioni innanzitutto sulla pendenza di ciascun tratto; è possibile annotare la presenza o meno di diverse morfologie, e le relative dimensioni. Alcune di queste sono tipiche di stagioni associate a climi meteomarini più insistenti, o semplicemente di momenti successivi a delle mareggiate, come ad esempio barre sommerse che si possono ritrovare nei primi metri di profondità, o berme di tempesta nel tratto emerso. Altre morfologie, come le berme ordinarie o lo *step* sono generalmente presenti anche in assenza di eventi di particolare intensità.

Il confronto tra sezioni trasversali effettuati nello stesso punto in momenti diversi può evidenziare spostamenti *cross-shore* dei sedimenti, come l'avanzamento/arretramento della battigia o della barra sommersa. La tridimensionalità fornita dalla creazione di un DTM dell'area di studio permette l'analisi di forma e dimensioni di morfologie quali barre o truogoli, e l'individuazione di elementi tipici delle spiagge come ad esempio le cuspidi.

Dalle caratteristiche granulometriche dei sedimenti si possono dedurre non solo le dimensioni medie degli stessi, ma attraverso la combinazione di alcuni parametri (classazione, asimmetria e le stesse dimensioni medie) è possibile ipotizzare quali siano i flussi di trasporto nell'area di indagine. Ad esempio, se in parte dei fondali si ritrovano sedimenti meglio classati e più fini rispetto ad altri situati più o meno alla stessa profondità, si può ipotizzare che la direzione del trasporto sia verso quello stesso punto, in quanto generalmente le dimensioni dei sedimenti durante il trasporto tendono a ridursi e divenire più omogenee.

## B. Descrizione ed elaborazione delle informazioni

### 1) Clima meteomarino

L'analisi del clima meteomarino di un'area costiera può essere affrontata almeno a due livelli di analisi:

- analisi del clima meteomarino di largo
- analisi del clima meteomarino a scala costiera

L'obiettivo di questa analisi è di definire il regime anemologico, ondametrico e idrodinamico (incluse le variazioni del livello marino), in quanto principali responsabili dei processi morfodinamici costieri. I dati ondametrici sono ottenuti tramite una combinazione adeguata di dati in-situ e dati da modello, in particolare:

- il clima ondoso di largo si caratterizza in maniera prioritaria utilizzando dati provenienti da boe ondametriche direzionali; i parametri da considerare sono l'altezza d'onda significativa, la direzione media e di picco del moto ondoso, il periodo medio e di picco, e possibilmente gli spettri di moto ondoso. È opportuno che le serie storiche di riferimento abbiano una durata almeno decennale;
- in assenza di informazioni sufficientemente rappresentative del regime ondametrico a largo, si può ricorrere a stime fornite da *hindcast* di modelli numerici in cui sia stata dimostrata, tramite un'apposita validazione, la capacità del modello di ricostruire correttamente i dati rilevati indipendentemente nei punti di misura disponibili o in quelli limitrofi;
- il regime ondametrico costiero, invece, si caratterizza in maniera prioritaria utilizzando l'output di modelli di ricostruzione del clima ondoso lungo la costa, opportunamente validato tramite un apposito confronto tra i dati osservati dai correntometri/ondametri disponibili lungo la costa e i dati corrispondenti forniti dal modello nello stesso punto. Questi modelli possono basarsi sul calcolo della propagazione delle onde a partire da dati di largo, oppure si può ricorrere ad appositi modelli a maglia non strutturata in cui le onde di largo vengono calcolate contemporaneamente a quelle in prossimità della costa, garantendo una maggiore consistenza dei risultati si fini della cosiddetta regionalizzazione del clima meteomarino.

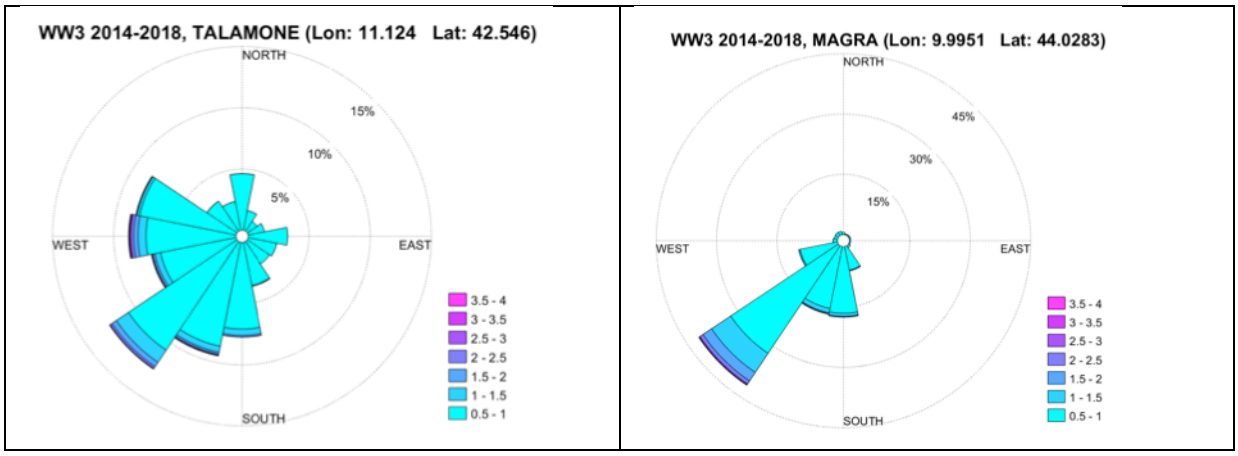


Figura 5 esempio di elaborazione di rose del moto ondoso in due siti della costa toscana.

I dati di misura in-situ sono ottenuti in maniera prioritaria tramite boe ondametriche o correntometri acustici Doppler (misure dirette); nonostante siano disponibili anche misure indirette (da radar costieri, webcam o satelliti) si ritiene che queste siano utilizzabili solo nel caso in cui siano state calibrate mediante misure dirette.
I modelli numerici di riferimento ai fini della ricostruzione delle onde e la loro propagazione dal largo a costa sono i modelli di propagazione spettrale non lineare che rappresentano l'insieme dei fenomeni di generazione delle onde da vento, propagazione, interazione non lineare tra le onde e dissipazione (white-capping e

frangimento). Tali modelli, discussi nel precedente report T2.1.1, sono forzati dall'output di vento ottenuto da *hindcast* di modelli meteorologici. Dagli output di questi modelli si possono elaborare direttamente i dati ricostruendo rose d'onda (normalmente tabelle a doppia entrata in cui viene fornita la frequenza di eventi la cui direzione e altezza d'onda significativa ricade all'interno di un dato intervallo). Le rose d'onda forniscono indicazioni su quali siano gli eventi regnanti e dominanti (o prevalenti) presso l'area di studio, ma sono anche un'informazione molto incompleta.

Una visione sicuramente più approfondita è quella che prevede un'analisi del clima spettrale, in cui gli spettri di moto ondoso sono elaborati con apposite tecniche di clusterizzazione e classificazione e si individuano i regimi d'onda in funzione delle cararatteristiche degli spettri di moto ondoso. Quest'ultima analisi si ritiene particolarmente significativa sia per le indagini morfodinamiche di lungo periodo sia per gli studi finalizzati alla progettazione di opere a mare, anche perchè molte situazioni di interesse sono costituite da stati di mare complessi (ad esempio spettri a più picchi che rappresentano stati di mare incrociato) che non sono descritte da approssimazioni basate solo sull'altezza d'onda e il periodo.

Infine se i dati a disposizione coprono almeno 40-50 anni, è possibile anche dedurre informazioni sul trend di evoluzione di lungo periodo. Ai fini della valutazione degli effetti dei cambiamenti climatici in atto questo aspetto è particolarmente importante. Infatti, i cambiamenti osservati in numerosi siti mondiali sono stati associati a cambiamenti nei regimi di vento / onda in entrambi gli emisferi (Short et al., 2000, Thomas et al., 2010). Si è anche scoperto che questi cambiamenti causano effetti importanti come l'erosione delle spiaggie o la loro rotazione rispetto all'orientamento originario. Questi effetti sono noti in molti siti, anche nel Mar Mediterraneo, dove molte aree costiere sono seriamente colpite dalla combinazione di fattori naturali e antropogenici. Nel Mar Mediterraneo settentrionale, ad esempio, molti dati e attività di monitoraggio suggeriscono un aumento relativo della frequenza dei venti e dei mari sud-orientali (SW o scirocco) e una relativa diminuzione del flusso nord-occidentale (maestrale), con possibili conseguenze sull'equilibrio morfodinamico di diversi siti costieri.

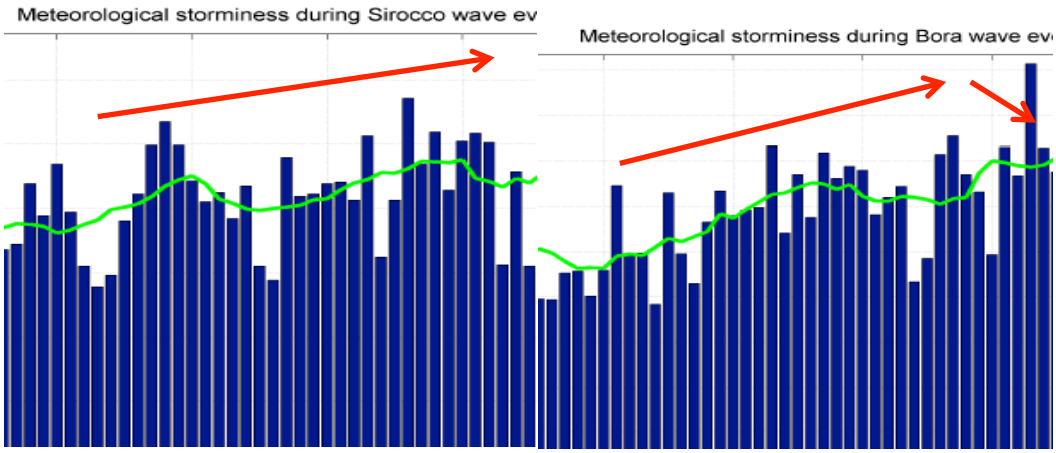


Figura 6 stima della storminess in un sito della costa adriatica, dove è evidenziato l'incremento relativo degli eventi di Scirocco (SE) e il decrement relative degli eventi di Bora (NE). Per gentile concessione di Andrea Valentini (ARPA ER)

### 2) Livello del mare

Come descritto nel paragrafo II.E di questa relazione, ai fini della realizzazione di uno studio morfodinamico a lungo termine, è possibile ottenere una proiezione del livello medio del mare su una certa zona tenendo conto:

a) delle proiezioni di Sea Level Rise ritenute più affidabili per le coste del Mediterraneo (e in particolare per il Mediterraneo Nord-Occidentale);

b) del movimento tettonico verticale a lungo termine di una certa area.

Le variazioni del livello medio marino lungo la costa sono misurate in maniera prioritaria tramite misure in-situ (mareografi, idrometri). *Hindcast* di modelli numerici di circolazione a lungo termine possono essere utilizzati se implementano la fisica completa delle interazioni atmosfera-mare ovvero la marea astronomica, l'effetto della pressione atmosferica, gli effetti del vento (wind setup) e del moto ondoso lungo la costa (wave set-down e set-up).

### 3) Caratterizzazione idrodinamica/morfodinamica del sito per il bilancio sedimentario

Al fine di prevedere come un tratto di litorale reagisca a mareggiate con determinate caratteristiche di provenienza, ad esempio altezza e periodo d'onda, o ancor meglio se si è svolta una classificazione spettrale degli stati di mare, si ritiene opportuno poter effettuare indagini combinate utilizzando sia gli output di modelli di previsione accoppiata (onde-idrodinamica-sedimento), sia monitoraggi topo-batimetrici che rivelino la mappatura dei fondali e della spiaggia emersa e sommersa, pianificando le misure in modo da poter valutare le variazioni tra la situazioni pre-mareggiata e quella post-mareggiata.
Questo non sempre è possibile, anche a causa dei costi, ma la disponibilità crescente di metodi di misura della spiaggia sommersa (anche attraverso lidar o altri sistemi montati su droni aerei, veicoli marini di superficie o anche dati saltellitari) permetterà, in futuro, di avere una migliore disponibilità di dati di monitoraggio.
Un'analisi degli effetti ottenuta combinando, ove possibile, osservazioni e modelli permette di valutare:

- il trasporto solido longshore (anche per interazione con opera di difesa e infrastrutture costiere);
- il trasporto solido crosshore (anche per effetto di celle di circolazione nearshore con componenti ortogonali a riva).

### 4) Identificazione dei modelli idrodinamici e morfodinamici per l'erosione costiera

Per la previsione morfodinamica a lungo termine si possono utilizzare:

- alcuni dei modelli descritti al paragrafo II.C, per la simulazione della futura posizione e orientamento della linea di riva;
- *hindcast* di modelli più complessi, descritti anche nel precedente rapport T2.1.1, per simulare ad una scala locale il sistema di correnti litoranee che si sviluppa in acque basse per effetto del moto ondoso.

Questi ultimi richiedono un notevole impegno computazionale che è sicuramente eccessivo anche in rapporto alle molte incertezze associate alla simulazione morfodinamica a lungo termine, in cui molti dati non sono noti ad un dettaglio sufficiente.
Riguardo alla possibile applicazione di modelli a fisica semplificata (quali modelli ad una linea), I dati di partenza da verificare sono:

i. la costruzione di serie di dati per la simulazione dinamica delle future mareggiate, che siano coerenti con il clima meteomarino osservato tenendo anche contro dei trend legati ai cambiamenti climatici;
ii. l'utilizzo di formule di trasporto solido longshore sufficientemente validate e verificate per l'area costiera in esame, anche utilizzando l'approccio combinato osservazioni-modelli discusso al precedente paragrafo;
iii. l'utilizzo di stime di trasporto solido crosshore sufficientemente validate e verificate per l'area costiera in esame;
iv. l'utilizzo di proiezioni affidabili per la simulazione del SLR per l'area costiera del Nord-Mediterraneo.

Indipendentemente dal tipo di modello utilizzato, è ovviamente importante disporre di dati storici relative alla posizione della linea di riva negli ultimi 40-50 anni per la calibrazione del modello numerico (oppure per

l'utilizzo di tecniche di data ingestion). La dinamica trasversale alla riva potrà essere meglio descritta se si disponde di un numero sufficiente di transetti sensibilmente ortogonali alla riva stessa.

<table>
<tr><th>Tema del monitoraggio</th><th>Fonte del dato</th><th colspan="2">Elaborazioni</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Clima meteomarino</td><td rowspan="3">Boe ondametriche<br>Modelli meteomarini (hindcast)</td><td>Rosa d'onda</td><td rowspan="6">Modelli idrodinamici e morfodinamici per la previsione dell'evoluzione della linea di riva e della spiaggia emersa e sommersa</td></tr>
<tr><td>Rosa dei venti</td></tr>
<tr><td>Tempi di ritorno per eventi dominanti</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Livello del mare</td><td rowspan="2">Mareografi<br>Modelli idrodinamici<br>Scenari di innalzamento del livello medio del mare</td><td>Oscillazioni dovute a maree e pressione atmosferica (da associare alle mareggiate)</td></tr>
<tr><td>Proiezione future di Sea Level Rise</td></tr>
<tr><td>Trasporto solido</td><td>Modelli morfodinamici<br>Rilievo topo-batimetrico<br>Analisi granulometrica sedimenti</td><td>Mappatura spiaggia emersa e sommersa<br>Caratteristiche sedimentologiche del sito</td></tr>
</table>

Tabella 3 – Quadro delle informazioni necessarie per eleborare studi morfodinamici a lungo termine

# IV. SINTESI DELLA METODOLOGIA

Gli studi morfodinamici di lungo periodo finalizzati alla previsione del trend evolutivo delle spiagge, richiedono di poter valutare il trasporto solido litoraneo che, a sua volta, dipende strettamente dal clima meteomarino. L'analisi del clima meteomarino richiede di avere a disposizione serie storiche di dati piuttosto lunghe, non meno di 10 anni per una caratterizzazione di base, e non meno di 30-50 anni se invece si vogliono valutare i trend di evoluzione del regime anemologico o ondametrico, legato a variazioni del clima. I metodi tradizionali di valutazione del clima meteomarino richiedono il calcolo della frequenza di eventi caratterizzati da una certa intensità e direzione, ma può essere opportune adottare tecniche più complesse che prevedono l'analisi degli stati di mare attraverso la classificazione degli spettri di moto ondoso (climatologia spettrale). Questo secondo livello di analisi è indubbiamente più completo perché permette di valutare gli effetti prodotti dal moto ondoso sottocosta, che in generale è un processo multidirezione e multifrequenza. Riguardo ai dati a disposizione per l'analisi del clima meteomarino, soprattutto nella valutazione del clima ondoso di largo, sono fondamentali i dati misurati da boe ondametriche, che servono in ogni caso per validare l'output di modelli numerici di *hindcast*. Per quanto riguarda la valutazione del clima meteomarino a scala litoranea, a meno che non si abbia a disposizione una fitta rete di dati in situ puntuali, è opportuno realizzare appositi *hindcast* di modelli numerici di simulazione che è necessario calibrare e validare utilizzando i dati *in situ* a disposizione.

I modelli morfodinamici di previsione a lungo termine utilizzano come parametri di input i dati di clima meteomarino, ma richiedono a monte anche una preventiva calibrazione dei modelli di trasporto solido adottati, che può essere realizzata tramite una valutazione del trasporto solido (*longshore* e *crosshore*) ottenuta confrontando modelli di evoluzione morfodinamica a breve-medio termine con dati topo-batimetrici relativi a situazioni pre- e post- mareggiata.

Per quanto i modelli morfodinamici a lungo termine (es. i modelli ad una linea) siano affetti da grande incertezza, costituiscono uno dei principali strumenti per la valutazione evolutiva di un tratto di costa bassa nel lungo periodo, ed è pertanto opportuno adottarli cercando di inserire dati (input) e parametri di modellazione corretti. Una delle principali fonti di incertezza è rappresentata dall' innalzamento del livello medio del mare, atteso nei prossimi decenni come uno degli effetti più drammatici prodotti dai cambiamenti climatici. Questo effetto deve essere stimato a partire da dati di scenario rappresentativi del Mar Mediterraneo, che ha una sua specificità, e i cui dati relativi al *Sea level rise*, denotano, al momento, un trend evolutivo meno marcato rispetto a quanto avviene nell'oceano globale, ma comunque importante.

# V. BIBLIOGRAFIA


Abuodha P., Woodroffe C.D. (2006) - International Assessments of the Vulnerability of the Coastal Zone to Climate Change, Including an Australian Perspective. Australian Greenhouse Office, Department of the Environment and Heritage, p. 75. September 2006.

Delft Hydraulics Institute (DHI). 2009a. LITPACK: An Integrated Modeling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics (Short Introduction and Tutorial). Published by MIKE by DHI.
———. 2009b. LITLINE: Coastline Evolution (LITLINE User Guide). Published by MIKE by DHI. Jan 2009.
———. 2009c. LITDRIFT: Longshore Current and Littoral Drift (LITDRIFT User Guide). Published by MIKE by DHI. Jan 2009.
———. 2009d. LITSTP: Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves (LITSTP User Guide). Published by MIKE by DHI. Jan 2009.

Deltares. 2011. UNIBEST-CL+ Manual: Manual for Version 7.1 of the Shoreline Model UNIBEST-CL+. 13 January 2011

EEA, 1995. Europe's environment. The Dobris assessment. EEA, Copenhagen, Denmark, 712 pages.
Available at: http://reports.eea.eu.int/92-826-5409-5/en (last access: 10.08.2011).

Frey, A., K. Connell, H. Hanson, M. Larson, R. Thomas, S. Munger, and A. Zundel. 2012. Gencade Version 1 model theory and user's guide. ERDC/CHL TR-12-25. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center.

Gornitz, V.M., 1991. Global coastal hazards from future sea level rise. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 89, 379 e 398

Hanson, H. 1987. GENESIS - A generalized shoreline change numerical model for engineering use. Report No.1007. Lund, Sweden: University of Lund, Department of Water Resources Engineering. ERDC/CHL CHETN-II-55, December 2013

Hanson, H., and N. C. Kraus. 1989. GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change, report 1, technical reference. CERC-89-19. Vicksburg, MS: US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center.

Hanson, H., and N. C. Kraus. 2004. Advancements in One-Line Modeling of T-Head Groins: GENESIS-T. Journal of Coastal Research, Special Issue 33:315-323.

Harvey, A., Hinkel, J., Horrocks, L., et al., 2009a. Preliminary Assessment and Roadmap for the Elaboration of Climate Change Vulnerability Indicators at Regional Level. DG ENV. Reference: ENV.G.1/ETU/2008/0092r. Final Report to the European Commission (Restricted Commercial, ED45669, Issue Number: 3). AEA, London.

Mclaughlin, S., Cooper, J.A.G., 2010. A multi-scale coastal vulnerability index: a tool for coastal managers? Environ. Hazards 9, 233 e 248

Nguyen T., Bonetti J., Rogers K., Woodroffe K. (2016) - Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A

review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. Ocean & Coastal Management 123 (2016) 18-43.

Slangen A.B.A., Carson M., Katsman C.A. et al. - Climatic Change (2014) 124: 317. https://doi.org/10.1007/s10584-014-1080-9

Sannino G., Antonioli F., Carillo A., Galassi G., Malanotte-Rizzoli P., Pisacane G., Spada G., Struglia M.V. (2018) - Future relative sea level for the Mediterranean Sea. Ensemble projections combining terrestrial ice melt, high resolution steric effects, tectonics , and glacial isostatic adjustment. EGU General Assembly 2018, Vienna, 8-13 Aprile 2018.

Spada, G., Stocchi, P., (2007). SELEN: a Fortran 90 program for solving the ''Sea Level Equation''. Comput. Geosci. 33 (4), 538-562.

Robert C. Thomas and Ashley E. Frey (2013). Shoreline Change Modeling Using One-Line Models: General Model Comparison and Literature Review. US Army Engineer Research and Development Center.

Torresan, S., Critto, A., Dalla Valle, M., Harvey, N., Marcomini, A., 2008. Assessing coastal vulnerability to climate change: comparing segmentation at global and regional scales. Sustain. Sci. 3, 45 e 65..
Spada G., Stocchi P. (2007) - SELEN: a Fortran 90 program for solving the ''Sea Level Equation''. Comput.Geosci. 33 (4), 538-562.

Vitousek S., Barnard P., Limber P., Erikson L., Cole B. "CoSMoS-COAST: a model to predict long-term shoreline change applied to Southern California. USGS Accessed online in 6 May 2016.

Vitousek, S., P. L. Barnard, P. Limber, L. Erikson, and B. Cole (2017), A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change, J. Geophys. Res. Earth Surf., 122, 782–806, doi:10.1002/2016JF004065.