

15. EROSIONE E ACCRESCIMENTO

15.1. Generalità

15.2. Descrizione del paraggio e individuazione dell'unità fisiografica

15.3. Budget dei sedimenti

15.3.1. Apporti fluviali

15.3.2. Erosione di scogliera

15.3.3. Trasporto dovuto al vento

15.3.4. Canyon sottomarini

15.3.5. Ripascimento e prelievo artificiale

15.4. Erosione per variazione del livello del mare

15.5. Cause antropiche di erosione/accrescimento

15.6. L'evoluzione della linea di costa

15.6.1. Analisi sulla base della cartografia storica

15.6.2. Modelli e metodi di previsione

15.6.2.1. L'equazione della linea di costa e schema numerico di risoluzione

15.6.2.2. Esempi applicativi: profilo di una pocket beach

15.1. Generalità

Nonostante le aree costiere abbiano da tempo attratto l'uomo, solo di recente è emersa la consapevolezza che bisogna bilanciare lo sfruttamento dei litorali e, più in generale, delle coste, con l'apprezzamento ricreativo, culturale e storico per tale ambiente.

In effetti, in analogia ad altri ambienti peculiari, il rapporto tra l'uomo e la costa è cambiato nel corso dei secoli. Infatti, mentre nell'età pre-industriale l'uomo era dominato dalla natura e dalle sue manifestazioni, nel corso del secolo appena trascorso, a seguito dello sviluppo delle città marinare, l'uomo ha cominciato ad lottare contro la natura cercando di dominarla. Solo nel recente passato questo approccio conflittuale è stato sostituito da una nuova sensibilità sinteticamente enunciata dal paradigma dello sviluppo sostenibile, che ha attribuito nuovo valore e nuovi valori all'ambiente costiero.

Chi si occupa di gestione delle aree costiere cerca di proporre nuovi modelli di sviluppo particolarmente volti ad evitare lo sfruttamento di risorse non rinnovabili (per esempio, proibendo il prelievo di sabbie dalle spiagge come materiale da costruzione).

Sempre più importanza viene pertanto data al concetto di Gestione Integrata delle Aree Costiere (ICZM-Integrated Coastal Zone Management) definita come: "fissati gli obiettivi di pianificazione e di gestione delle aree e delle risorse costiere, è la valutazione complessiva che, prendendo in considerazione le tradizioni, la cultura, la storia, finalizzata a gestire gli interessi confliggenti tra usi e interessi" (IPCC, 1994).

Con riguardo agli aspetti ambientali, ogni costa può essere considerata in termini di :

- vulnerabilità (attitudine a subire danni per effetto di cambiamenti);
- sensitività (entità degli elementi a rischio, misurati in modo diverso a seconda della loro natura);
- capacità di adattamento (abilità di una costa a moderare gli impatti potenziali).

I fattori geomorfologici influenzano ovviamente ciascuna di queste proprietà e pertanto lo studio dell'evoluzione della linea di costa va riguardato non solo per quanto concerne la fruibilità della spiaggia, ma anche per quanto attiene alla salvaguardia da rischio di inondazione delle aree costiere.

Per tutto quanto sopra brevemente esposto, di seguito si affronterà il problema dell'analisi dell'evoluzione della linea di spiaggia. Saranno in particolare presentate gli studi

preliminari necessari, alla luce del concetto di unità fisiografica, e i modelli e i metodi per valutare l'evoluzione della linea di spiaggia.

15.2. Descrizione del paraggio e individuazione dell'unità fisiografica

Prima di procedere all'analisi dell'evoluzione della linea di riva di un tratto di litorale, bisogna innanzitutto procedere ad una approfondita descrizione geografica del paraggio. Tale descrizione è utile ai fini della valutazione dell'esposizione al clima marino, ovvero per valutare correttamente il *fetch* nel caso in cui si renda necessaria l'acquisizione di dati ondametrici per via indiretta, ma essa deve anche essere volta a rilevare le caratteristiche di presenza di eventuali promontori utili per la definizione dell'unità fisiografica.

La descrizione geografica deve quindi essere seguita da un'attenta analisi geologica sia della parte emersa che di quella sommersa del tratto in esame del tratto di litorale in esame. Detta analisi è infatti necessaria sia per la caratterizzazione dei sedimenti di cui il litorale risulta composto sia per un'adeguata stima del trasporto solido litoraneo.

Successivamente va individuata l'unità *fisiografica*. A tal proposito è opportuno ricordare che le zone costiere, anche quando rappresentano unità geologiche uniformi sono caratterizzate, da un punto di vista della dinamica del litorale, da un'associazione di tratti distinti più o meno ampi, definiti unità fisiografiche.

Sulla definizione di unità fisiografica vi sono sempre stati equivoci a seconda del peso dei parametri che entrano a formare questo concetto, da un lato semplice, ma invero molto complesso. Trattandosi, nel caso specifico, di una definizione finalizzata ad interventi marittimo - costieri e, quindi, alla realizzazione di opere tendenti a modificare il regime di un litorale, appare chiaro che il concetto di unità fisiografica debba abbandonare quei criteri puramente morfologici e basarsi su valutazioni attinenti all'idrodinamica costiera e, in particolare, al trasporto lungo riva. In questo senso un'unità fisiografica costiera può essere definita come un tratto di costa che evolve autonomamente ai fini del trasporto litorale, rispetto ai tratti di costa attigui, alimentato da una o più sorgenti terrigene, attuali o fossili (erosione di antichi accumuli di materiali sabbiosi).

Nel senso stretto del termine, può essere definita unità fisiografica costiera un tratto di litorale sotteso da un'unica sorgente terrigena capace di farlo evolvere autonomamente. Questo concetto può essere esteso a più sorgenti attigue purché sussistano fattori morfologici (o antropici) che confinino il trasporto litorale (capi, promontori, opere marittime) indipendentemente dal numero delle sorgenti terrigene. In questo senso l'unità fisiografica è data dalla sommatoria di più unità fisiografiche nel senso appena sopra definito.

Dal punto di vista ingegneristico, gli effetti di un'opera costruita sul litorale non si estendono, a breve termine, al di fuori della unità fisiografica a cui l'opera appartiene.

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

E' opportuno precisare che 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'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).

Essa richiede un'individuazione, seppure sommaria, degli agenti dinamici prevalenti, a cui sono connessi i movimenti, e una indicazione se questi siano influenzati dall'evoluzione del litorale.

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.

In definitiva, l'identificazione approfondita di un'unità fisiografica deve essere effettuata in base a indagini inerenti:

- i) alla morfologia della linea di riva;
- ii) all'analisi petrografiche e sedimentologiche;
- iii) al regime delle onde e delle correnti.

L'identificazione dell'unità fisiografica in base alla morfologia della linea di riva si effettua in genere su base cartografica o su rilievi aerofotogrammetrici, in quanto la linea di riva è in essi facilmente identificabile. Tale identificazione si fonda sulla osservazione di alcune forme indicanti il verso del trasporto litoraneo, di cui le principali sono:

- i) accumuli - erosioni a seguito della costruzione di opere intercettanti il trasporto litoraneo;
- ii) dissimmetrie nelle spiagge concorrenti ad un capo roccioso;
- iii) deviazione delle foci fluviali nel verso della deriva litoranea;
- iv) forme caratteristiche delle due estremità dell'asse del trasporto;
- v) cuspidi focali o falesie nelle zone di divergenza dei trasporti litoranei;
- vi) cordoni uncinati o spiagge concave, in cui ha termine o converge il trasporto litoraneo;
- vii) erosioni o accumuli indicanti rispettivamente divergenza o convergenza dei trasporti litoranei, ove si intenda per divergenza il crescere del trasporto nel verso del trasporto stesso.

L'identificazione in base ad analisi petrografiche e sedimentologiche viene eseguita attraverso il prelievo di campioni del fondo mobile sui quali si effettuano analisi composizionali e tessiturali.

I campioni devono essere prelevati fra il materiale mobile o residente in punti diversi e ben identificati. E' opportuno scegliere il punto di prelievo con sufficiente precisione, particolarmente in rapporto alle forme caratteristiche della spiaggia (berma, battigia, barre, ...), fornendo una planimetria con indicazioni dei suddetti punti e forme. I prelievi di materiale mobile devono essere eseguiti nei primi (3 - 5) cm dalla superficie del fondale o della spiaggia e devono permettere di indagare sulla evoluzione temporale della sedimentazione e di caratterizzare i sedimenti che verranno rilasciati in caso di erosione.

La composizione petrografica dei sedimenti, comparata con quella delle possibili fonti, consente di individuare fra queste quella da cui effettivamente il sedimento deriva ed evidenzia pertanto gli spostamenti subiti.

Al trasporto è associata una usura e selezione dei grani e dei ciottoli, che ne altera lungo l'asse di trasporto dimensioni e forma.

L'usura agisce frantumando meccanicamente o disaggregando le rocce e particolarmente la parte più esposta di queste, mentre la selezione è associata al variare della capacità di trasporto al variare delle dimensioni dei sedimenti.

La selezione è trasversale e longitudinale; quella trasversale, che in genere avviene con spostamenti di massa reversibili e piccoli o nulli, tende a portare ogni particella ad una profondità in cui essa si trova in equilibrio statico; quella longitudinale è invece associata sempre ad un consistente trasporto di massa, ed essendo la capacità di trasporto in proporzione inversa alla dimensione dei sedimenti, la selezione avviene nel senso che i sedimenti più fini sono soggetti ad un maggiore spostamento rispetto ai più grossolani, venendo erosi più facilmente e depositati più lentamente.

La selezione trasversale avviene concentrando in genere verso riva i sedimenti più grossolani e portando al largo i più fini ma, per il variare dell'agitazione ondosa e per i cicli deposizionali associati alle barre, non sono infrequenti inversioni locali rispetto alla suddetta tendenza.

Per i grandi spostamenti longitudinali in assenza di apporti distribuiti lungo l'asse, la direzione del trasporto è caratterizzata dal diminuire delle dimensioni dei componenti dei sedimenti e dal crescere della loro rotondità.

Le zone in erosione manifestano una più accentuata variazione trasversale nelle dimensioni dei sedimenti.

I materiali pesanti si comportano come la frazione più grossolana dei sedimenti, forse accentuando, per il maggior peso specifico la selezione per trasporto.

L'identificazione dell'unità fisiografica in base al regime delle onde e delle correnti riguarda soprattutto la determinazione dell'efficacia di queste ultime ai fini del trasporto costiero. Vanno in particolare esaminate le correnti lungo riva, secondariamente le correnti di ritorno e il getto di risalita (o run-up).

Il regime ondoso e correntizio deve essere opportunamente convertito in trasporti litoranei associati dai quali potrà calcolarsi il trasporto netto.

15.3. Budget dei sedimenti

L'applicazione del budget dei sedimenti risulta di fondamentale importanza perché, attraverso la valutazione delle sorgenti e dei pozzi di materiale che intervengono nel sistema spiaggia, si possono stimare eventuali processi di deposito o di erosione.

Il budget dei sedimenti consiste nell'applicazione del principio di continuità o di conservazione della massa ai sedimenti litoranei: la variazione della presenza di sabbia in un sistema è funzione della quantità di sabbia apportata nei confronti di quella perduta. La difficoltà nell'effettuare tale bilancio risiede nella comprensione degli elementi che influenzano il sistema stesso ovvero nella stima dei contributi e delle perdite.

Le cause che possono rilevarsi ai fini della generazione di apporti o perdite di materiale lungo un tratto di costa delimitato da elementi considerati stabili sono numerose, alcune di esse vengono evidenziate nella Tabella 15.I.

I canyon sottomarini possono risultare di rilevante importanza nell'ambito del bilancio dei sedimenti, visto che bloccano il trasporto di sedimenti indirizzandolo verso acque ad elevata profondità. Situazioni di questo genere sono comunque molto rare e più spesso l'ingresso dei canyon avviene in acque molto profonde in prossimità della scarpata continentale, così che i canyon non intervengono nel bilancio dei sedimenti.

Tabella 15.I. Voci determinanti nel bilancio dei sedimenti

APPORTI	PERDITE
Trasporto litoraneo	Trasporto litoraneo
Apporti fluviali	Presenza di canyon sottomarini
Ripascimento artificiale	Prelievo artificiale di materiale
Trasporto verso la costa dovuto al vento	Trasporto verso il mare dovuto al vento
Erosione di scogliera	

Nel bilancio dei sedimenti sono incluse operazioni di ripascimento e di prelievo artificiale. Un metodo per stabilizzare e proteggere, infatti, lunghi tratti della costa è quello di porre sabbia sulla spiaggia. Il materiale viene solitamente prelevato da zone adiacenti e particolare attenzione deve prestarsi nei confronti della granulometria del materiale riportato visto che, se troppo fine, sarebbe rapidamente perduto.

Il prelievo di materiale ha effetto opposto a quello appena descritto, visto che finisce con il facilitare l'erosione costiera. Per tale motivo il prelievo di sabbia dalla spiaggia è generalmente proibito.

15.3.1. Apporti fluviali

Il principale apporto di sedimenti su una spiaggia è solitamente quello dovuto al trasporto solido fluviale che viene generalmente diviso in due contributi:

- i) trasporto in sospensione;
- ii) trasporto al fondo.

Il trasporto solido fluviale può essere stimato utilizzando le numerose relazioni, disponibili in letteratura, che giungono alla quantificazione del materiale trasportato dal corso d'acqua sulla base di misure relative alla corrente, alla dimensione dei sedimenti presenti ed alle caratteristiche della sezione che costituisce l'alveo.

La stima della portata solida può essere effettuata anche sulla base di correlazioni tra le precipitazioni nel bacino del fiume in esame e la portata solida. Tale approccio, solitamente di minore precisione, possiede comunque il vantaggio di risultare applicabile anche nei casi in cui non siano disponibili misure della portata liquida del corso d'acqua.

Particolare attenzione deve infine prestarsi allo studio degli eventuali estuari che in taluni casi possono finire con l'intrappolare il fiume e quindi il materiale trasportato che non riesce così a giungere in mare. Addirittura, in presenza di maree, la corrente può persino finire con il trasportare materiale all'interno dell'estuario che diviene così, nell'ambito di un bilancio complessivo, una fonte di perdita per il sistema.

15.3.2. Erosione di scogliera

L'erosione di una scogliera può rappresentare un contributo importante per un sistema, anche se generalmente il suo apporto non supera il 5-10 % del materiale presente su una spiaggia. In casi particolari può però diventare un fenomeno rilevante visto che, in mancanza di protezioni adeguate, la scogliera può arretrare anche di tratti superiori al metro per anno.

Il materiale eroso entra quindi a far parte del sistema e la sua stima può essere effettuata misurando attraverso rilievi topografici l'arretramento della scogliera e moltiplicando poi tale misura per l'altezza e la lunghezza del tratto interessato dal fenomeno.

Il volume eroso ottenuto deve essere corretto prima di essere inserito nel budget di sedimenti per tener conto della percentuale di materiale che rimane effettivamente sulla spiaggia.

La seguente Figura 15.1 rappresenta la collocazione degli agenti di trasporto, apporto e perdita di sedimenti sopra menzionati.

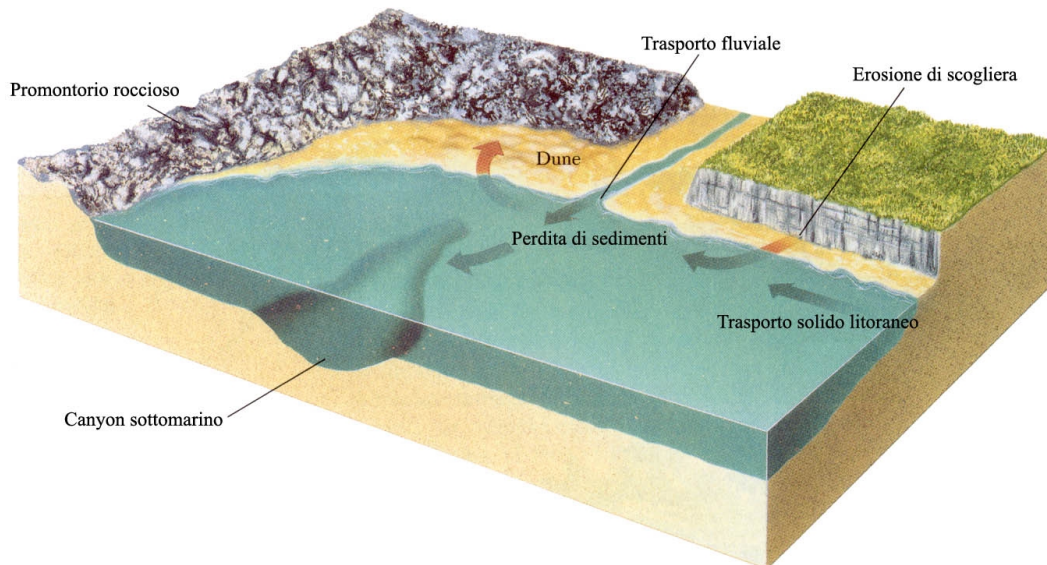


Figura 15.1. Schematizzazione di un'unità fisiografica. Individuazioni delle voci di bilancio necessarie per il budget dei sedimenti.

15.3.3. *Trasporto dovuto al vento*

Il vento può essere una sorgente di materiale per la spiaggia ma nella maggior parte dei casi, dal momento che il vento soffia verso la costa, finisce con il rimuovere la sabbia trasportandola verso zone più interne.

Tipico risultato di tale processo è la generazione di dune la cui dimensione può risultare utile per stimare l'entità di materiale eventualmente perduto dalla spiaggia in un certo periodo.

15.3.4. *Canyon sottomarini*

I canyon sottomarini possono risultare di rilevante importanza nell'ambito del budget di sedimenti visto che bloccano il trasporto di sedimenti indirizzandolo verso acque ad elevata profondità. Situazioni di questo genere sono comunque molto rare e più spesso l'ingresso dei canyon avviene in acque molto profonde in prossimità della scarpata continentale così che i canyon non intervengono nel budget di sedimenti.

15.3.5. *Ripascimento e prelievo artificiale*

Un metodo per stabilizzare e proteggere lunghi tratti della costa è quello di porre sabbia sulla spiaggia. Il materiale viene solitamente prelevato da zone adiacenti e particolare attenzione deve prestarsi nei confronti della granulometria del materiale riportato visto che, se troppo fine, sarebbe rapidamente perduto.

Il prelievo di materiale ha effetto opposto a quello appena descritto visto che finisce con il facilitare l'erosione costiera. Per tale motivo il prelievo di sabbia dalla spiaggia è generalmente proibito.

15.4. Erosione per variazione del livello del mare

Le variazioni del livello del mare vengono registrate dai mareografi. Le registrazioni di lungo periodo relative ad un determinato sito forniscono le variazioni relative S del livello medio

del mare, somma delle variazioni dovute a cause globali e di quelle locali (per esempio, dovute a subsidenza).

Sembra ormai certo che il livello del mare stia crescendo al ritmo di 2 mm per anno. Una variazione locale può comunque essere sia positiva che negativa.

In definitiva, comunque, il primo e, probabilmente migliore, modello che correla l'arretramento della spiaggia all'aumento del livello medio del mare è quello proposto da Brunn (1962, 1988) e rappresentato schematicamente nella Figura 15.2. In formule:

$$R = \frac{L_*}{h_c} S \quad (15.1)$$

in cui R indica l'arretramento della spiaggia, S l'aumento del livello medio mare e h_c profondità di chiusura. La relazione precedente può anche essere espressa come segue:

$$R = m_s S \quad (15.2)$$

dove m_s è la pendenza media del profilo di spiaggia. Con riguardo al fatto che la pendenza media di una spiaggia è dell'ordine 1:50 fino a 1:100 per molte coste, l'equazione precedente suggerisce $R=50S$ fino a $R=100S$ come regola empirica per calcolare l'arretramento atteso della spiaggia per effetto dell'innalzamento S del livello medio del mare.

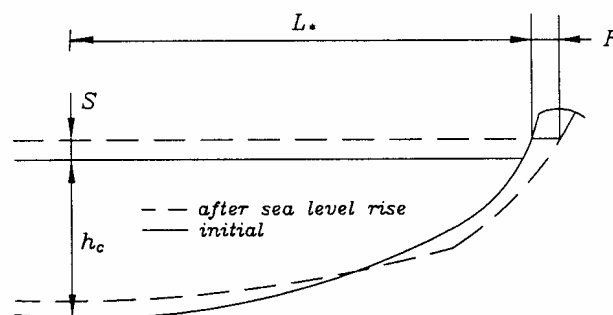


Figura 15.2. Esempio di applicazione della regola di Brunn per la determinazione dell'arretramento di una spiaggia per effetto dell'innalzamento del livello medio mare.

15.5. Cause antropiche di erosione/accrecimento

15.6. L'evoluzione della linea di costa

L'evoluzione della linea di costa è il risultato dell'interazione tra il moto ondoso e la spiaggia: il primo fornisce energia al sistema mentre la seconda assorbe tale energia attraverso cambiamenti della propria configurazione.

I fenomeni che hanno luogo nel sistema mare-spiaggia sono estremamente complessi, difficili da studiare il che ha portato all'adozione di tecniche descrittive piuttosto che analitiche.

I movimenti del mare che contribuiscono alla modellazione dei litorali comprendono anche le maree, le correnti e gli tsunami. Tuttavia il maggior contributo energetico al sistema mare-spiaggia è fornito dalle onde generate dal vento ("wind-waves", nella letteratura anglosassone).

Il fenomeno dell'evoluzione della costa è strettamente legato alle caratteristiche del moto ondoso, analizzate nel corso dei capitoli precedenti, unitamente al trasporto dei sedimenti. Nello studio dei processi costieri è pratica comune quella di distinguere tra:

- trasporto long-shore, diretto parallelamente alla linea di costa, dovuto alla concomitanza di due fenomeni e cioè al fenomeno del frangimento che porta in sospensione i sedimenti ed al trasporto vero e proprio dovuto alle correnti litoranee.
- trasporto cross-shore, che avviene in direzione perpendicolare alla linea di costa, determinato innanzitutto dalla ripidità dell'onda, dalla dimensione dei sedimenti e dalla pendenza del profilo di spiaggia;

15.6.1. Analisi evolutiva sulla base della cartografia storica

Una verifica dell'effettiva tendenza evolutiva di un tratto di litorale, prima ancora che sulla base dell'applicazione di modelli numerici, deve essere condotta sulla base dei dati derivanti dallo studio della cartografia storica.

Appare evidente che una siffatta analisi è fortemente legata anche alla disponibilità di dati. Tuttavia, per meglio comprendere la procedura che può essere utilizzata, di seguito si riporta un esempio di analisi evolutiva sulla base della cartografia storica. L'esempio riguarda il tratto di litorale ricadente nel comune di Letojanni (ME). L'analisi evolutiva è stata condotta sulla base della seguente cartografia:

- Due tavolette IGM in scala 1:25000 derivate da rilevamenti del 1967 e che insieme coprono tutta l'area in esame;
- Quattro mappe catastali del comune di Letojanni (ME) in scala 1:2000 derivate da un rilievo del 1978;
- Due carte tecniche regionali (C.T.R.) in scala 1:10000 del litorale tra Capo S. Andrea e Capo S. Alessio, anno 1986;
- Una aerofotogrammetria in scala 1:20.00 del litorale tra capo Mazzeo e il torrente Oliveri, anno 1990.

Le carte sono state preliminarmente riportate tutte ad una scala comune e quindi confrontate per sovrapposizione. È da premettere che non si conosce la stagione a cui si riferiscono i rilievi e, quindi, variazioni dell'ordine di 20 metri non rappresentano necessariamente un processo erosivo ma sono da considerarsi fisiologiche nell'ambito dell'alternanza tra le configurazioni stagionali della spiaggia.

Il primo confronto effettuato è stato quello tra la cartografia storica relativa al 1967 e quella relativa al 1978 e che ha portato ai risultati illustrati in Figura 15.5; si nota un netto stato di erosione tra la foce del torrente S. Filippo e Capo S. Alessio quantificabile in un arretramento della linea di costa di circa 60 m. Di contro, a sud della zona suddetta, si osserva un leggero avanzamento dell'ordine di 20 m. Successivamente si assiste ad un ulteriore arretramento, dello stesso ordine di grandezza, nella parte prossimale alla foce del torrente Letojanni.

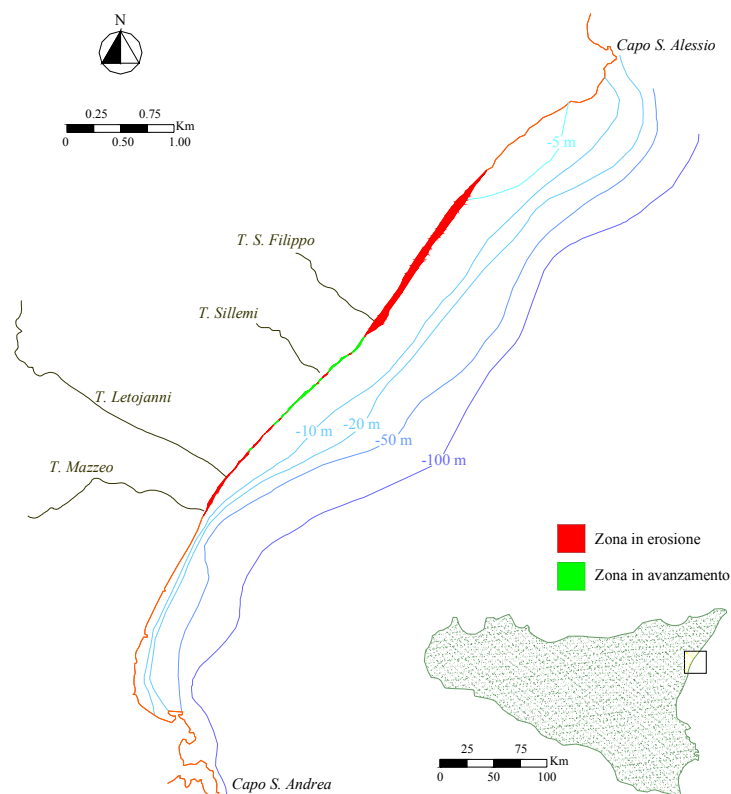


Figura 12.5. Evoluzione della linea di costa del litorale di Letojanni tra il 1967 ed il 1978 sulla base del confronto tra le carte storiche relative ai due anni.

Il secondo confronto è stato quello tra la cartografia storica relativa al 1978 e quella relativa al 1986 e che ha portato ai risultati illustrati in Figura 15.6; un'erosione di circa 40 m interessa la zona subito a sud del Capo S. Alessio e si estende per circa un chilometro e mezzo per cedere il passo a un avanzamento dello stesso ordine di grandezza e di pari estensione che si allunga fino alla foce del torrente S. Filippo. Tra la foce del suddetto torrente e quella del torrente Letojanni si riscontra un arretramento della linea di costa di circa 70 m. Di contro, a sud della zona suddetta, comincia a delinearsi un'attività importante di deposito che interessa la parte terminale del litorale e che causa un avanzamento della linea di costa di circa 50 m.

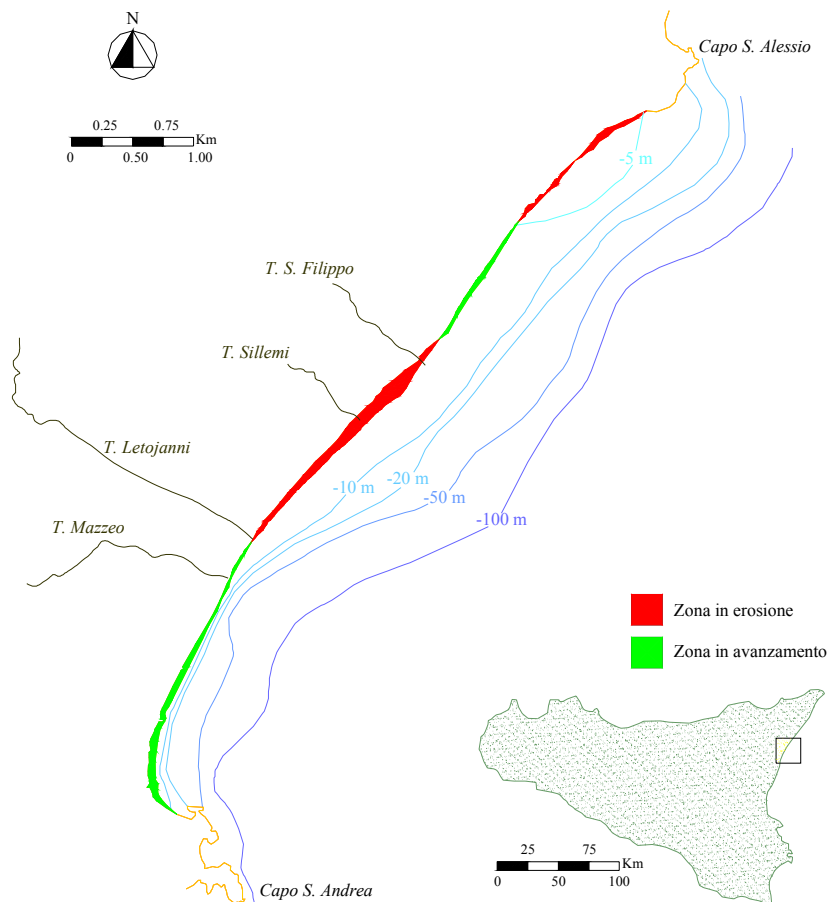


Figura 15.6. Evoluzione della linea di costa del litorale di Letojanni tra il 1978 ed il 1986 sulla base del confronto tra le carte storiche relative ai due anni.

Ad avvalorare l'ipotesi di ripascimento della parte sud del litorale c'è anche la presenza, al giorno d'oggi, di una barriera frangiflutti interamente sommersa dai sedimenti ciottolosi caratteristici del litorale.

Il terzo ed ultimo confronto è stato quello tra la cartografia storica relativa al 1986 e quella relativa al 1990 e che ha portato ai risultati illustrati in Figura 15.7; un'erosione di circa 50 m interessa la zona subito a sud del Capo S. Alessio e si estende per circa due chilometri.

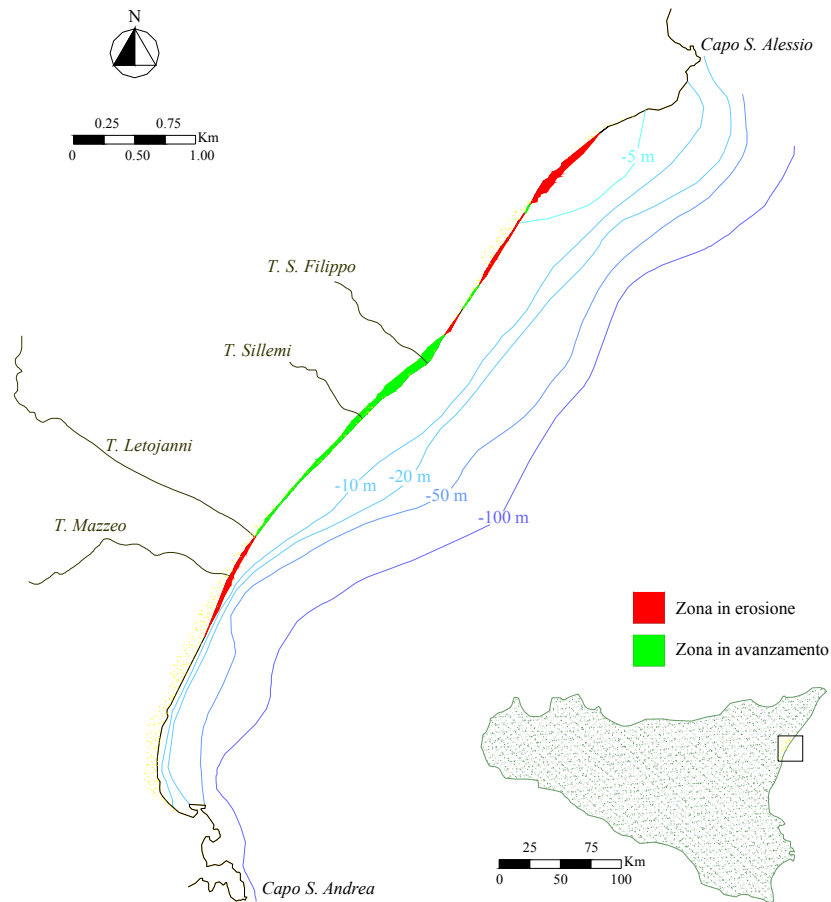


Figura 15.7. Evoluzione della linea di costa del litorale di Letojanni tra il 1986 ed il 1990 sulla base del confronto tra le carte storiche relative ai due anni.

Di contro, sembra recedere l'erosione che si riscontrava in precedenza tra la foce del torrente S. Filippo e quella del torrente Letojanni: si riscontra un avanzamento della linea di costa di circa 50 m. A sud della zona suddetta si delinea, infine un arretramento i cui effetti si estendo a sud per circa un chilometro e mezzo.

Per completezza ed anche per dare un'idea generale dell'andamento della linea di costa nell'intero arco di tempo analizzato, si è effettuato il confronto tra la situazione del 1967 e quella del 1990, i cui risultati sono riportati in figura 6-8.

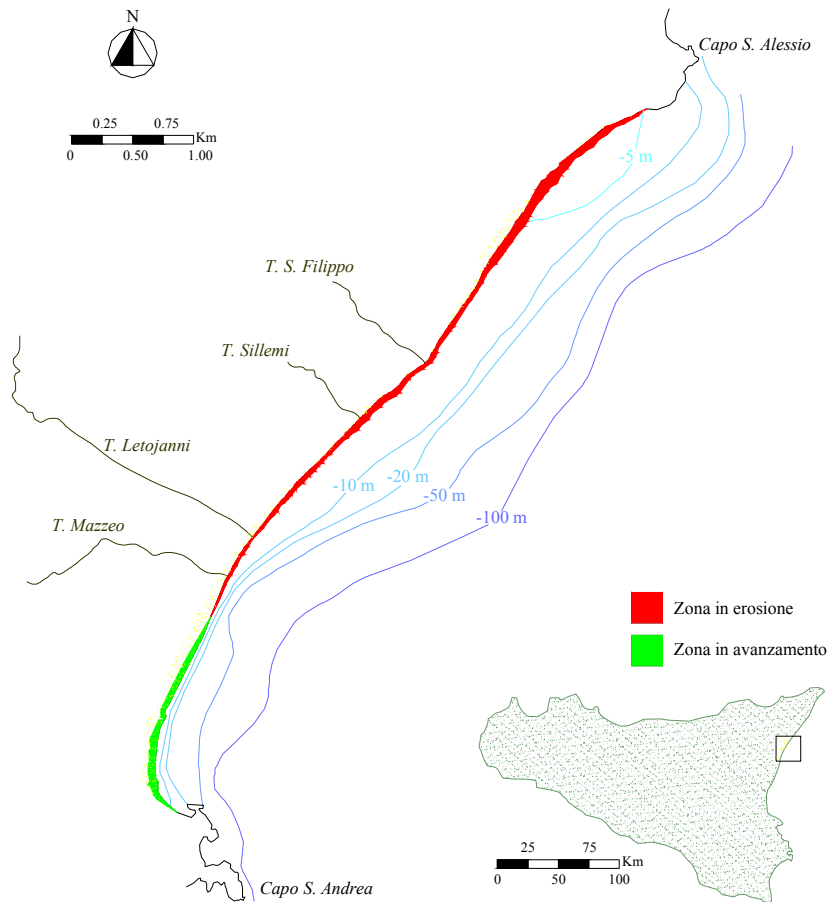


Figura 15.8. Evoluzione della linea di costa del litorale di Letojanni tra il 1967 ed il 1990 sulla base del confronto tra le carte storiche relative all'intero intervallo di tempo.

Appare chiara la tendenza evolutiva della spiaggia: il tratto che va da Capo S. Alessio a qualche centinaia di metri a sud della foce del torrente Letojanni è interessato da una marcata erosione alla quale corrisponde un'attività di ripascimento sulla parte estremamente meridionale del litorale, che pertanto risulta in avanzamento.

15.6.2. Modelli e metodi di previsione

La modellazione matematica permette la rappresentazione numerica dei processi che intervengono lungo la costa e delle variazioni che le opere costiere producono sui litorali circostanti.

I metodi numerici forniscono la possibilità di simulare, sotto opportune ipotesi ed attraverso adeguate formulazioni matematiche, i principali fenomeni fisici della fascia costiera rendendo possibile l'analisi, nel tempo e nello spazio, anche di complessi processi evolutivi del litorale. Anche se questi processi, nella realtà, sono essenzialmente tridimensionali, in talune situazioni alcune dimensioni spaziali possono essere trascurate, focalizzando l'attenzione solo su parte dei meccanismi che regolano effettivamente il trasporto solido. I modelli semplificati così ottenuti possono essere classificati nel seguente modo:

- i) modelli tipo shoreline o coastline che consentono la modellazione di una o più linee longitudinali della fascia costiera (batimetriche) tenendo conto esclusivamente del trasporto solido longitudinale a lungo termine. Questa categoria include i modelli dove i processi fisici coinvolti sono rappresentati esplicitamente nel tempo;

- ii) modelli di evoluzione del profilo trasversale della spiaggia (2DV - model) che trascurano l'evoluzione longitudinale e pongono l'attenzione sui fenomeni a medio termine del trasporto solido trasversale (cross-shore).

I modelli di evoluzione planimetrica della spiaggia sono molto utili per la gestione dei litorali. Modelli di questo tipo sono in grado di fornire indicazioni importanti sul comportamento di un litorale soggetto a ripascimento, aiutando a dimensionare sia le opere di contenimento che il volume dei ripascimento richiesto.

La possibilità di modellare schemi diversi, in breve tempo e a costi contenuti è decisamente un grande vantaggio: permette di ottimizzare l'intervento progettato e di dare indicazioni sulla gestione futura in termini di volumi di materiale da ricaricare dopo un determinato periodo di tempo. I risultati della modellazione numerica sono in genere presentati in forma grafica ma l'uso, per esempio, delle animazioni permette di visualizzare più efficacemente l'evoluzione della spiaggia nel tempo.

Un problema comune per tutti i modelli numerici è la necessità di essere calibrati. Un modello numerico che copre un lungo tratto di costa e che ha l'obiettivo di stabilire la grandezza e la direzione del trasporto dei sedimenti longitudinale, può essere calibrato con i dati storici relativi alla posizione della spiaggia. Una considerazione importante nel corso della modellazione è caratterizzata dalle condizioni al contorno usate.

L'inserimento delle giuste condizioni al contorno per il trasporto solido rappresenta un passo fondamentale dell'intero processo. Nel caso di un tratto di costa delimitata da promontori, il trasporto è completamente contenuto nell'area di interesse.

Il modello numerico è in grado di rappresentare aree estese dando, inoltre, una valutazione delle aree di potenziale erosione o accrescimento da studiare in dettaglio possibilmente con una modellazione fisica. Il modello numerico può fornire le condizioni al contorno da inserire nel modello fisico in termini, per esempio, di trasporto solido. I due modelli possono quindi essere adoperati insieme in modo da modellare correttamente il trasporto netto attraverso la sezione. Ciò risulta particolarmente importante nel caso dei modelli fisici che usano materiale di peso specifico basso, per i quali la scala del trasporto trasversale è diversa dalla scala del trasporto longitudinale.

Una volta calibrato il trasporto solido, si può seguire il processo inverso per la calibratura nel modello numerico. La modellazione numerica può quindi beneficiare moltissimo dall'eventuale collegamento con la modellazione fisica. Il modello numerico, infine, è in grado di simulare l'evoluzione dell'intero sistema, utilizzando l'intero clima d'onda, per periodi di decine di anni, assicurando che gli eventuali interventi, su una particolare parte di costa dell'intera cella litoranea, non abbiano effetti devastanti sui litorali sottoflusso.

15.6.2.1. L'equazione della linea di costa e schema numerico di risoluzione

Per valutare l'evoluzione nel tempo del litorale è possibile implementare un modello numerico del tipo "*ad una linea*". Tale modello si basa sull'equazione di continuità dei sedimenti in direzione parallela alla costa, accoppiata ad un'appropriata formula di trasporto solido. Tuttavia per la risoluzione del problema si impone la definizione di opportune condizioni al contorno.

A tal fine è opportuno riferirsi all'unità fisiografica, possibilmente individuata sulla base di promontori. Così facendo, infatti, è possibile ipotizzare un trasporto solido al di fuori dell'area in esame nullo.

Al fine di comprendere l'applicazione del modello de quo, nel prosieguo ci si riferirà ad un caso di interesse pratico, ovvero all'analisi dell'evoluzione di un tratto di litorale reale, tramite l'applicazione di un modello ad una linea.

Più precisamente, l'area soggetta ad analisi è quella del litorale di Letojanni (ME) racchiusa a Nord dal Capo S. Alessio e a Sud dal Capo S. Andrea. Per essa, le condizioni al contorno sono state stabilite ipotizzando un flusso di sedimenti longitudinale nullo al di fuori di detta area.

Considerando una sezione della linea di costa avente larghezza Δy , mostrata in figura 6-10, se con Q_{lin} si indica la portata di sedimenti entranti in direzione long-shore, con Q_{lout} la portata uscente, l'accumulo netto o l'erosione ΔV nel tempo Δt è dato dalla seguente espressione:

$$\Delta V = (Q_{lin} - Q_{lout}) \Delta t \quad (15.3)$$

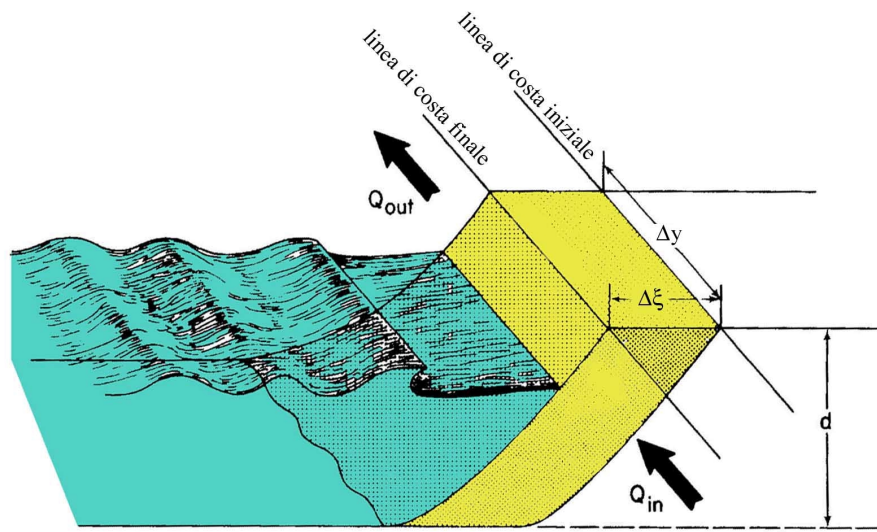


Figura 15.6. Schematizzazione dell'applicazione del bilancio di massa ad un tratto di profilo di spiaggia.

Naturalmente, se Q_{lin} risultasse maggiore di Q_{lout} , si avrebbe un accumulo di sedimenti ed un corrispondente avanzamento della linea di costa; viceversa, se Q_{lout} risultasse maggiore di Q_{lin} , la spiaggia si eroderebbe. Infatti, indicando con $\Delta \xi$ la variazione dalla posizione iniziale in direzione offshore - inshore della linea di costa in un intervallo di tempo Δt , si può scrivere che:

$$\Delta V = d \cdot \Delta \xi \cdot \Delta y \quad (15.4)$$

in cui d , come si vede in Figura, è la altezza della sezione e quindi $d\Delta \xi$ rappresenta l'area della sezione trasversale della spiaggia. Combinando le equazioni (15.3) e (15.4) si trova che:

$$\Delta \xi = (Q_{lin} - Q_{lout}) \frac{\Delta t}{d \Delta y} \quad (15.5)$$

Ponendo quindi $\Delta Q = (Q_{lout} - Q_{lin})$ e passando in termini infinitesimi si trova l'equazione differenziale nella seguente forma:

$$\frac{d\xi}{dt} = -\frac{1}{h_b} \frac{dQ_1}{dy} \quad (15.6)$$

in cui, ragionando in termini di differenze finite:

$\Delta\xi$ indica l'avanzamento o arretramento della linea di costa;

h_b indica la profondità al frangimento;

ΔQ_1 indica la differenza tra la portata volumetrica longitudinale dei sedimenti entrante e quella uscente da una cella, definite attraverso la formula C.E.R.C.

E' chiaro che da un punto di vista pratico bisogna anche organizzare i dati di input al modello. E' pertanto consigliabile utilizzare diversi file.

Nel primo si possono riportare le informazioni relative alla posizione della linea di costa iniziale e del limite oltre il quale, in funzione dell'ordinata alla quale ci si trova, la costa non può più arretrare. Tali informazioni possono essere utilmente riportate in due vettori contenenti:

- i) la distanza $\xi_{lc(j)}$ della linea di costa iniziale dall'asse y;
- ii) la distanza $\xi_{lcl(j)}$ della linea di costa limite dall'asse y.

L'introduzione di un limite per la posizione della linea di costa consente di simulare più correttamente il reale andamento del processo evolutivo.

Nel secondo file vanno invece riportate le seguenti informazioni:

- i) le dimensioni della griglia di calcolo;
- ii) la presenza o meno di eventuali sorgenti terrigene. In caso di presenza di foce, bisogna anche riportare la posizione e la quantificazione degli apporti;
- iii) il valore, espresso in frazione di giorni, del passo di integrazione;
- iv) la durata del fenomeno ondoso relativa al mese ed alla direzione in questione;
- v) la distanza $\xi_{lf(j)}$ della linea di frangimento dall'asse y;
- vi) i valori $H_{b(j)}$ di altezza d'onda al frangimento;
- vii) i valori $L_{b(j)}$ di lunghezza d'onda al frangimento;
- viii) i valori $h_{b(j)}$ di profondità al frangimento;
- ix) i valori α_f dell'angolo di attacco del moto ondoso al frangimento.

La Figura 15.7 illustra un esempio di griglia di calcolo.

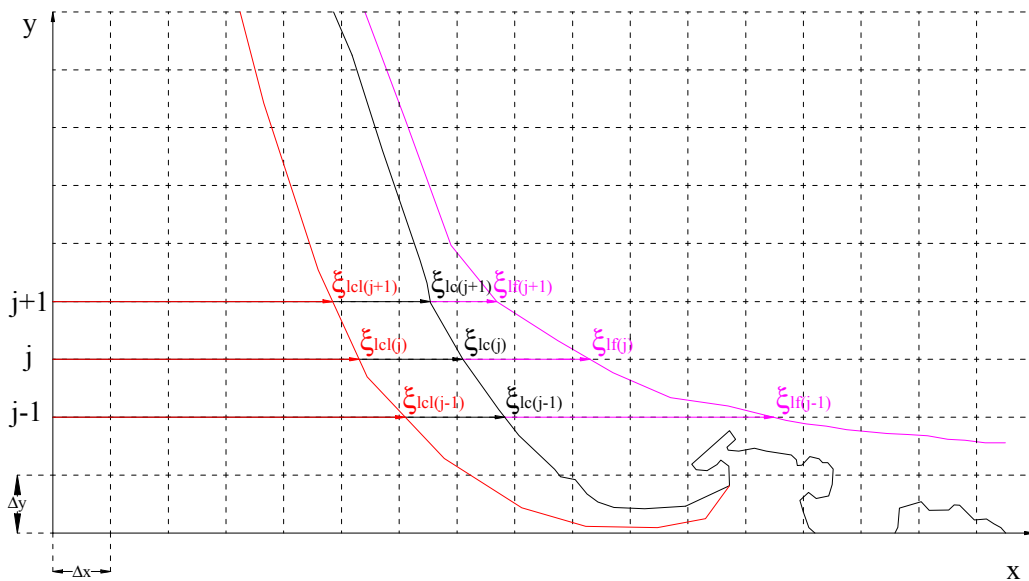


Figura 15.7. Definizioni delle linee di costa e di frangimento.

La prima operazione eseguita dal codice di calcolo proposto consiste nella valutazione dell'angolo α_b formato dalla linea di frangimento e dalla linea di costa (vedi Figura 15.8)

$$\alpha_b = \alpha_f - \arctan \frac{\Delta \xi_{lc}}{\Delta y} \quad (15.7)$$

Effettuati questi calcoli preliminari, il codice di calcolo C.E.R.C. applica iterativamente l'equazione (15.6) incrementando ad ogni iterazione la variabile tempo espressa in giorni.

I risultati vengono quindi registrati in un file temporaneo e riutilizzati fino a coprire l'intero arco di tempo assegnato alla simulazione. Per ogni file di input viene scritto un file di output, contenente il vettore dei nuovi valori di $\xi_{lc(j)}$: ciò rende possibile la rappresentazione non solo della configurazione finale del litorale ma anche di tutte quelle intermedie risultanti dall'applicazione dei singoli climi ondosi.

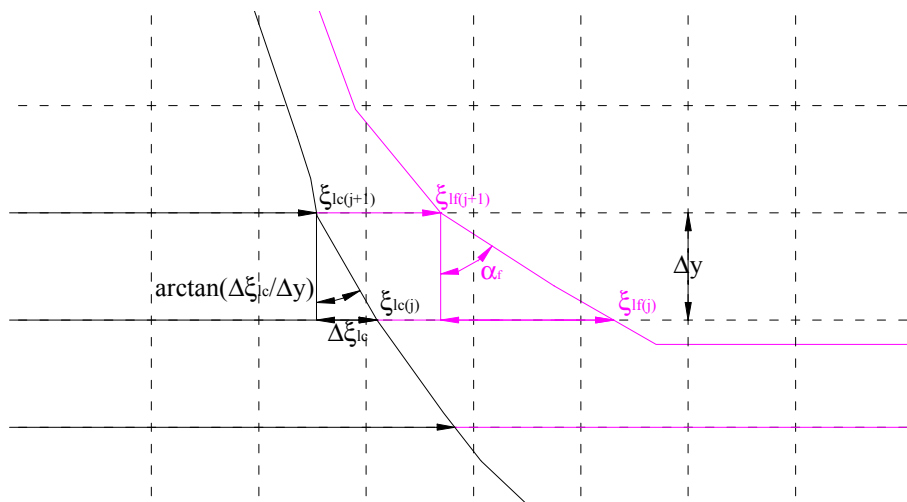


Figura 15.8. Schema geometrico di risoluzione dell'angolo di attacco del moto ondoso al frangimento.

15.6.2.1.1. Esempi applicativi: profilo di una pocket beach con e senza apporti solidi fluviali

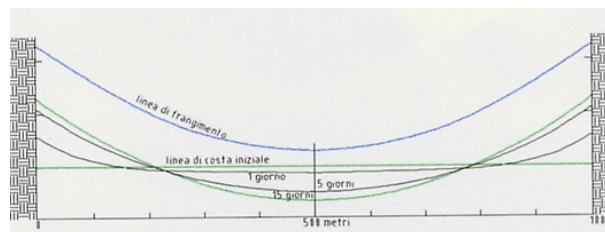


Figura 15.9. Esempio di evoluzione di una pocket beach così come proposto da Komar (1976).

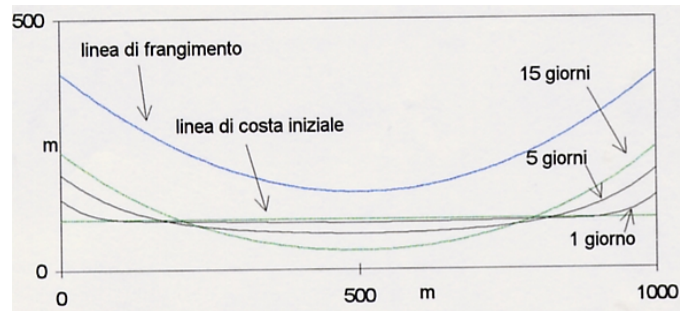


Figura 15.10. Esempio di evoluzione di una pocket beach adottando lo schema numerico descritto.

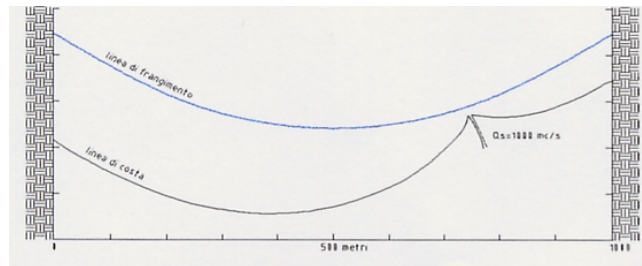


Figura 15.11. Esempio di evoluzione di una pocket beach interessata da un apporto fluviale di sedimenti così come proposto da *Komar* (1976).

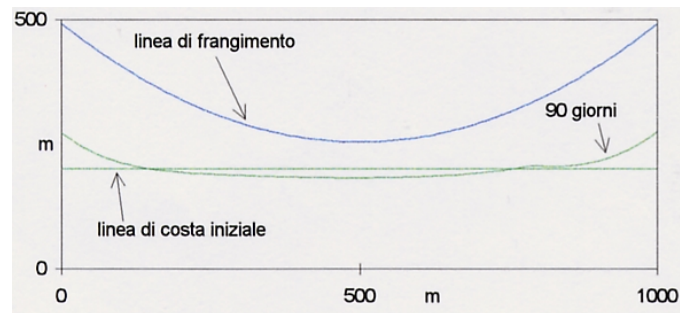


Figura 15.12. Esempio di evoluzione di una pocket beach interessata da un apporto fluviale di sedimenti secondo lo schema numerico descritto.