

**ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

Dipartimento di Ingegneria Edile  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DEI  
PROCESSI E DEI SISTEMI EDILIZI

Tesi di laurea in  
Controllo e collaudo delle strutture e del territorio M

**ELABORAZIONE ED ANALISI DI DATI GEOMATICI PER  
IL MONITORAGGIO DEL TERRITORIO COSTIERO IN  
EMILIA-ROMAGNA**

RELATORE

Prof. Stefano Gandolfi

PRESENTATA DA

Rosamaria Chiarelli

CORRELATORI

Ing. Enrica Vecchi

Ing. Nunzio De Nigris

Anno Accademico 2018/2019

Sessione Unica



Indice	
Introduzione .....	7
1. Dinamica del litorale.....	11
1.1 Fattori influenti sull' evoluzione costiera .....	14
1.1.1 Apporti fluviali .....	15
1.1.2 Clima del moto ondoso.....	16
1.1.3 Subsidenza.....	18
1.1.4 Trasporto solido.....	18
1.1.5 Azioni antropiche.....	22
1.2 Indicatori dello stato costiero .....	23
1.2.1 ASPE.....	25
1.2.2 ASE .....	27
1.2.3 Valutazione degli effetti prodotti dagli interventi di difesa della costa .....	28
2. Strutture artificiali di protezione.....	30
2.1 Opere parallele .....	31
2.1.1 Opere parallele distaccate dalla costa.....	31
2.1.2 Opere radenti o aderenti parallele alla costa .....	33
2.2 Opere trasversali alla costa .....	37
2.3 Ripascimento .....	38
3. Monitoraggio .....	41
3.1 Il sistema di riferimento.....	41
4. Metodi geomatici.....	45
4.1.Rilievo della spiaggia emersa .....	46
4.1.1 RTK .....	46
4.1.2 NRTK.....	49
4.2 Rilievo della spiaggia sommersa .....	50
4.2.1 Ecoscandaglio <i>Singlebeam</i> .....	52

4.2.2 Ecoscandaglio Multibeam.....	54
5. Metodi di elaborazione .....	57
5.1 Software utilizzati.....	57
5.1.1 Qgis.....	58
5.1.2 Surfer.....	60
5.2 Trattamento dei dati.....	61
5.2.1 Grid.....	62
5.2.2 TIN (Triangular Irregular Network).....	64
5.2.3 Nearest Neighbor .....	66
5.2.4 Kriging .....	66
5.3 Elaborazioni prodotte.....	67
5.3.1 Mappe topo-batimetriche.....	67
5.3.2 Mappe di accumulo-erosione .....	70
5.3.3 Calcolo dei volumi .....	70
5.3.4 Estrazione dei profili e rappresentazione grafica .....	72
6. Misano Adriatico e Riccione.....	73
6.1 Inquadramento storico .....	75
6.1.1 Progettone 1 .....	77
6.1.2 Progettone 2.....	81
6.1.3 Progettone 3.....	82
6.2 Descrizione delle spiagge.....	83
6.2.1 Le opere di difesa a Misano Adriatico.....	84
6.2.2 Le opere di difesa a Riccione .....	86
6.3 Dati da elaborare .....	87
7. Analisi dei risultati ottenuti .....	89
7.1 Intervento di ripascimento del 2007 .....	90
7.3. Intervento di ripascimento del 2016.....	101

7.3 Macrocella 1: confronto 2012/2018.....	113
8. Interpolazione con metodo Tin e Kriging a confronto .....	117
8.1 Fasi di costruzione del modello.....	117
8.2 Elaborazioni .....	119
Conclusione .....	129
Bibliografia .....	131
Ringraziamenti .....	135



## **Introduzione**

L'ambiente costiero, che rappresenta una risorsa naturale ed economica di straordinario valore, è un sistema complesso soggetto ad una continua ed incessante trasformazione sotto l'azione di fattori climatici e antropici. L'attività antropica ha accelerato e inasprito i processi erosivi che da sempre operano naturalmente sui litorali. Infatti, con la regimazione dei bacini fluviali è venuta a mancare l'alimentazione sedimentaria delle spiagge. Con l'estrazione di acqua, gas e idrocarburi dal sottosuolo in prossimità delle coste, in alcune zone, si è avuto un aumento del tasso di subsidenza, producendo quella che in geologia viene definita "accomodation" (spazio disponibile per l'accumulo del sedimento) e che in termini di erosione costiera si traduce in perdita di volume a carico della spiaggia. Con l'urbanizzazione a ridosso dei litorali si è accentuata la vulnerabilità della costa.

Nel mondo si stima che la percentuale di spiagge in erosione sia pari all'80%, in Italia la media si attesta sul 42,5%, in Emilia-Romagna sul 15%<sup>1</sup>.

L'erosione costiera si manifesta in modo evidente con l'arretramento della linea di riva, ovvero l'indicatore tradizionalmente utilizzato per definire la tendenza evolutiva delle coste basse e sabbiose. La regione Emilia-Romagna, a partire dagli anni '80 del secolo scorso, per far fronte a questo fenomeno, è intervenuta con la tecnica del ripascimento. Si tratta di sversamento di materiale sabbioso là dove sono presenti fenomeni di erosione. Inizialmente si utilizzavano sabbie provenienti da cave a terra, in seguito sabbie provenienti da depositi sottomarini individuati al largo della costa regionale. Al fine di valutare gli effetti e i benefici dell'intervento adottato, deve essere effettuato un monitoraggio della zona interessata. E ciò avviene tramite periodiche campagne di rilievo topo-batimetrico che consentono, con il passare del tempo, di confrontare alcune grandezze relative alla medesima

---

<sup>1</sup> Vedi Arpae, 2007, Stato del litorale emiliano-romagnolo dell'anno 2007 e piano decennale di gestione, pp 11.

area di studio. I rilievi interessano sia la spiaggia emersa che quella sommersa. E generalmente si eseguono con tecniche GNSS, che nel caso di spiaggia sommersa, sono integrate da un ecoscandaglio. Il confronto tra i dati acquisiti in fase di rilievo è possibile solo se, tutti i rilievi volti al monitoraggio della zona costiera della regione Emilia-Romagna, sono georiferiti in un unico sistema di riferimento. A tale proposito, nel 2016 è stata realizzata una nuova infrastruttura geodetica di riferimento: la Rete Geodetica Costiera (RGC), nata in collaborazione tra l'Unità Mare e Costa di Arpa e il Dipartimento di Ingegneria Civile Chimica Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Università di Bologna. Si tratta di una rete di vertici a terra, che ha lo scopo di fornire una infrastruttura geodetica riferita ad un unico sistema di riferimento. Le coordinate dei vertici della rete, in accordo con quanto sancito dal D.M. del 10 novembre 2011, pubblicato in G.U. n. 48 del 27 febbraio 2012 (Supplemento ordinario n. 37), sono espresse nel sistema di riferimento geodetico nazionale: l'ETRS89-ETRF2000 (2008.0).

La tesi intende analizzare nel dettaglio, attraverso dati topo-batimetrici ripetuti nel tempo quale sia stato il comportamento di alcuni litorali emiliano-romagnoli valutando anche l'influenza della modalità di gestione del dato a posteriore, nella creazione dei modelli digitali del terreno e nell'uso delle tecniche interpolative.

Il lavoro di tesi si è quindi articolato come segue.

La prima parte introduce il problema dell'erosione costiera, descrive le tipologie di opere di difesa da poter adoperare per fronteggiare il fenomeno, esplicita l'importanza del monitoraggio e quindi del sistema di riferimento, e illustra le tecniche di rilievo per il litorale. La seconda parte della tesi, invece, è di tipo applicativa. Illustra i metodi utilizzati per l'analisi dei dati e i risultati ottenuti in termini di mappe e grafici, grazie all'utilizzo di specifici *software*.

Le elaborazioni prodotte riguardano la Macrocella 1<sup>2</sup> del litorale emiliano-romagnolo, con particolare attenzione alle spiagge di Misano e Riccione che rientrano tra quelle coinvolte dal *Progettone 2* nel 2007 e dal *Progettone 3* nel 2016. La denominazione “*Progettone*” deriva dal titolo formale: “Programma degli interventi di messa in sicurezza dei tratti critici del litorale emiliano-romagnolo mediante ripascimento con sabbie sottomarine”. Nello specifico, per entrambi i *Progettone* sono stati confrontati i rilievi eseguiti prima dell’intervento di ripascimento, subito dopo la sua realizzazione, a distanza di circa un anno e mezzo e a distanza di quasi due anni e mezzo dall’intervento. Il confronto è avvenuto attraverso la comparazione di modelli digitali del terreno (DTM) di periodi differenti che hanno consentito di produrre mappe di accumulo-erosione per ogni spiaggia oggetto di studio e per ciascuna fase temporale del *Progettone*. Ciò ha permesso di valutare la variazione della linea di riva e di calcolare i volumi accumulati o erosi. Inoltre, in corrispondenza delle sezioni di monitoraggio, confrontando i profili ottenuti dalle mappe topo-batimetriche nelle varie fasi temporali, è stato possibile stimare le variazioni di quota. In aggiunta, sono stati analizzati anche i dati relativi alle campagne topo-batimetriche del 2012 e del 2018, condotte sull’intera Macrocella 1 che si estende da Gabicce a Riccione. Questo tipo di analisi rientra nei monitoraggi che la Regione effettua ogni 6 anni per verificare l’andamento generale del litorale. E per terminare, nell’ultimo capitolo è stato riportato uno studio volto a confrontare i risultati ottenuti sulla stessa area di indagine, con metodi di post-elaborazione dei dati rilevati per quanto attiene gli algoritmi di interpolazione e le modalità di generazione dei modelli digitali del terreno.

---

<sup>2</sup> La suddivisione del litorale in “Macrocelle” è definita da Preti et al. (2008). Vedi Arpae, Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2012-erosione e interventi di difesa, pp. 60.



## **1. Dinamica del litorale**

L'ambiente costiero rappresenta la fascia di transizione tra le terre emerse ed il mare. Si tratta di una risorsa naturale ed economica di straordinario valore, sottoposta ad una continua ed incessante trasformazione sotto l'azione di fattori climatici e antropici.

Con il termine "dinamica del litorale" si indica il complesso dei fenomeni che governano l'evoluzione della fascia costiera nel tempo. I processi naturali hanno un ruolo importante, ma soprattutto nel lungo periodo, tale dinamica può essere localmente influenzata, anche fortemente, dagli interventi antropici, sia direttamente lungo la costa, che nei bacini idrografici a monte. In particolare, la conformazione del litorale è il risultato di una complessa interazione tra numerosi fattori sia marini che continentali, alcuni dei quali fortemente influenzati da eventi meteorologici estremi.

Da diversi decenni una discreta parte delle coste sabbiose italiane è interessata da fenomeni erosivi.

L'arretramento della linea di riva ha messo in crisi la sicurezza di numerose arterie stradali e ferroviarie ed ha seriamente pregiudicato l'attività turistica balneare, che nella nostra nazione costituisce un guadagno non indifferente per l'intera comunità. Ciò ha incentivato lo sviluppo di tecniche sempre più sofisticate per la protezione dei litorali, che, d'altra parte, non sempre hanno portato alla risoluzione del problema, soprattutto nel medio-lungo termine.

Si possono distinguere due tipi principali di fenomeni erosivi: l'erosione "a breve termine", di tipo reversibile, prodotta generalmente dal trasporto di sedimenti verso il largo, associata alle mareggiate (con periodicità stagionale), e l'erosione "a lungo termine", dovuta normalmente a squilibri nel bilancio sedimentario originati dal trasporto solido litoraneo.

Un sistema litoraneo si può salvaguardare solo se si conosce nel dettaglio l'entità, l'evoluzione e il grado di incidenza dei fattori che ne governano l'equilibrio. I 110 km di costa bassa e sabbiosa che

caratterizzano il sistema litoraneo complesso dell'Emilia-Romagna, rappresentano di fatto una delle aree costiere più importanti d'Europa sotto il profilo turistico-balneare.

A partire dalla prima metà del XX sec., l'erosione costiera ha interessato quest'area. Il fenomeno si è intensificato negli anni '70, ripercuotendosi sul sistema ambientale e sull'attività turistica. La Regione Emilia-Romagna si è impegnata da tempo per far fronte a questa situazione. A protezione della costa, sono state costruite inizialmente delle opere di difesa rigide, ma, negli ultimi anni, la tendenza si è evoluta verso l'utilizzo di tecniche "soft", quali i ripascimenti, che consistono nell'apporto di materiale di idonee caratteristiche sulle spiagge soggette ad erosione. La sabbia è quindi la risorsa fondamentale su cui dovrà essere basata la difesa della costa in futuro.

Nel mondo si stima che la percentuale di spiagge in erosione sia pari all'80%, in Italia la media si attesta sul 42,5%, in Emilia-Romagna sul 15%<sup>3</sup>.



**Figura 1:** collocazione geografica del litorale emiliano-romagnolo.

Gli interventi di difesa realizzati dalla Regione Emilia-Romagna, si sono imposti come obiettivo quello di proteggere il litorale, di salvaguardare e ripristinare i valori paesaggistico-ambientali del

<sup>3</sup> Vedi Arpae, Stato del litorale emiliano-romagnolo dell'anno 2007 e piano decennale di gestione, pp. 11.

territorio costiero, e di adottare uno studio di pianificazione generale per tutta la costa. La Regione, istituendo un piano progettuale per la difesa del litorale (Piano Costa 1981), ha quindi gettato le basi per arrivare alla gestione integrata della costa, e alla riduzione delle cause dell'erosione. Infatti, tra il 1981 e il 1984, ha bloccato le escavazioni degli inerti lungo i fiumi per aumentare l'apporto di sabbia al mare, ha favorito la costruzione di grandi opere acquedottistiche, in grado di aumentare l'apporto di acqua di superficie alla costa e di ridurre la subsidenza, ha realizzato il primo grande intervento di ripascimento, ed ha istituito e rilevato le reti di monitoraggio dell'intero litorale.



**Figura 2:** suddivisione del litorale nelle “Macrocelle” definite da Preti et al. (2008), limitate da lunghi moli portuali o punti nulli del trasporto solido. Le foci del Po di Volano e del Savio corrispondono rispettivamente ad un punto di convergenza e ad un punto di divergenza del trasporto solido lungo la costa, che nella mappa è rappresentato dalle frecce. Nel riquadro a destra è riportato il dettaglio di tre “Celle litoranee” poste a nord di Porto Corsini.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Vedi Arpae, Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2012, erosione e interventi di difesa, pp. 60.

Il litorale emiliano-romagnolo è formato da due grandi unità, una che va da Cattolica alla foce del Po di Volano, l'altra che si estende fino alla foce del Po di Goro, e comprende sia l'omonimo Scanno, che la laguna retrostante (Sacca di Goro), nella zona più a nord. Circa 108 km di litorale sono costituiti da spiaggia sabbiosa, mentre 4,5 km, difesi con scogliere radenti, sono privi di spiaggia emersa. Foci fluviali, sbocchi di canali, bocche portuali e darsene occupano circa 6,6 km di fronte mare. La bocca di accesso alla Sacca di Goro e la riva interna hanno uno sviluppo di circa 21 km. Il 20% delle spiagge ha un'ampiezza superiore ai 100 m, il 39% tra i 50-100 m, il 33% inferiore ai 50 m, e un 8% è difeso da scogliere<sup>5</sup>.

### **1.1 Fattori influenti sull'evoluzione costiera**

Il litorale dell'Emilia-Romagna è un sistema complesso, in continua evoluzione, la cui dinamica dipende dall'interazione di fattori sia di tipo naturale che antropico.

L'estesa urbanizzazione, lo sviluppo dell'agricoltura, la diminuzione dell'apporto di sedimenti da parte dei fiumi, la presenza di opere costiere, i marcati tassi di subsidenza, e il prelievo di acqua e di metano dal sottosuolo, hanno fortemente accentuato la vulnerabilità della costa, che oggi è soggetta ad estesi processi erosivi.

Le politiche di difesa del litorale, intraprese dalla Regione, hanno portato ad un miglioramento dello stato delle spiagge, per le quali, in breve tempo, si è avuto un allargamento della superficie con un impatto ambientale molto ridotto. Gli effetti positivi dell'intervento vanno a beneficio anche delle spiagge vicine. Infatti, le sabbie che vengono asportate dalle correnti lungo costa vanno ad alimentare i tratti sottoflutto. L'equilibrio del litorale è strettamente correlato al bilancio che si viene a creare tra i suoi sedimenti in entrata e quelli in uscita.

Tra i fattori che influiscono sull'erosione, vi sono sia il moto ondoso che quello delle correnti. Le opere rigide, sono nate proprio per

---

<sup>5</sup> Vedi Arpae, Annuario dei dati 2012, cap. 9c, pp 850.

contrastare tale fenomeno, ma se da un lato risultano efficaci nella riduzione dell'energia del moto ondoso, dall'altro hanno spesso impatti negativi dal punto di vista paesaggistico-ambientale. La subsidenza (naturale o indotta) è un altro importante fattore di instabilità per le zone costiere. Inoltre, tra i fattori incidenti sull'erosione troviamo il trasporto solido, i fenomeni tettonici di sollevamento/abbassamento del settore costiero e le variazioni del livello del mare.

### **1.1.1 Apporti fluviali**

Il trasporto solido fluviale riveste un'importanza primaria tra i fattori che determinano l'equilibrio della costa emiliano-romagnola. Se si escludono i materiali provenienti dall'erosione al piede della scogliera di Gabicce, posta immediatamente a sud del confine tra Emilia-Romagna e Marche, il litorale regionale è esclusivamente alimentato dagli apporti solidi dei fiumi e dei torrenti, ridistribuiti dalle correnti.

Già il Piano Costa del 1981 ha evidenziato, a suo tempo, che alla fine degli anni '70 il trasporto solido fluviale si era ridotto di 3 - 4 volte rispetto agli anni '40. Le principali cause di questa forte riduzione erano dovute alla variazione d'uso dei bacini montani, alla regimazione dei corsi d'acqua e all'estrazione degli inerti dagli alvei fluviali. Quindi, tra le indicazioni del Piano Costa 1981, sono state inserite sia il blocco delle escavazioni in alveo nei fiumi regionali, approvato dalla Regione nel giugno 1982, che la limitazione dell'estrazione di inerti lungo il corso del Po, imposta dal Magistrato nel 1990. Successivamente, nel Piano Costa 1996, il tema del trasporto solido fluviale è stato ri-affrontato, ma con due distinti obiettivi di ricerca:

- la verifica dello stato dei bacini idrografici regionali afferenti in Adriatico, dopo circa 15 anni dalla loro prima caratterizzazione realizzata nell'ambito del Piano Costa 1981;
- l'implementazione di una procedura innovativa per la stima del trasporto solido fluviale utile al mantenimento delle spiagge.

La Relazione Generale del Piano Costa 1996 si è chiusa con un elenco delle indicazioni strategiche volte a favorire la ripresa del

trasporto solido fluviale. Tra queste: il mantenimento del blocco sulle escavazioni in alveo, la pulizia periodica dei canali, il ripristino delle sezioni di deflusso nei tratti di pianura, il favorire l'erosione dei versanti montani a litologia prevalentemente sabbiosa e l'attuazione di interventi strutturali negli ultimi tratti dei fiumi Conca e Reno.

Tale schema di sintesi del Piano Costa 1996 è stato poi riproposto, con alcune integrazioni, nello "Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione".

Per incrementare gli apporti a mare, occorre intervenire non solo nei tratti di pianura, ma anche su quelli montani. Si era potuto riscontrare, infatti, che la ripresa dello scorrimento a valle di sabbia e ghiaia, veniva ostacolata dalle numerose briglie e traverse costruite negli anni '50 lungo gli alvei. A monte di queste opere si erano formati grandi depositi di sovralluvionamento che, in alcuni casi, avevano determinato lo spostamento del corso del fiume e l'insorgenza di problemi erosivi sulle sponde. Pertanto, tra le nuove indicazioni strategiche sono state inserite quelle relative alla possibile rimozione di alcune opere trasversali.

Nonostante il blocco dell'escavazione in alveo, ad oggi, purtroppo, non ci sono ancora segnali evidenti di ripresa degli apporti di sabbia al mare da parte dei corsi d'acqua regionali che sfociano in Adriatico.

### **1.1.2 Clima del moto ondoso**

Il clima del moto ondoso al largo è responsabile sia del regime idrodinamico sottocosta, che del trasporto solido litoraneo.

Esso viene espresso dalla generazione del vento e dalla distribuzione delle varie altezze d'onda secondo la direzione di provenienza. Si rappresenta con delle tabelle di occorrenza e, graficamente, con le cosiddette rose delle onde.

In genere, vengono definiti due tipologie di clima:

- clima medio annuo, in cui la distribuzione delle percentuali di occorrenza utilizza la serie storica disponibile;
- climi medi stagionali, la distribuzione delle altezze d'onda secondo la direzione viene determinata associando i mesi delle quattro

stagioni (primavera: marzo, aprile, maggio; estate: giugno, luglio, agosto; autunno: settembre, ottobre, novembre; inverno: dicembre, gennaio, febbraio).

Le condizioni medie del moto ondoso sono responsabili dell'evoluzione dei litorali a lungo termine, attraverso il regime delle correnti lungo riva e del conseguente trasporto dei sedimenti. Mentre, le condizioni del moto ondoso estreme sono necessarie per il corretto dimensionamento degli interventi lungo la costa e per la verifica sia dei fenomeni erosivi, che delle variazioni lungo il profilo della spiaggia.



**Figura 3:** litorale emiliano-romagnolo: direzione del trasporto solido lungo la costa.<sup>6</sup>

Nella Figura 3, si riporta in forma schematica, la direzione del trasporto litoraneo dei sedimenti sulla costa emiliano-romagnola. Come

<sup>6</sup> Vedi Arpae, Stato del litorale emiliano-romagnolo dell'anno 2007 e piano decennale di gestione", pp 43.

evidenziato dalle frecce, la direzione prevalente è quella da Sud verso Nord. Ma sono presenti due tratti di divergenza in corrispondenza delle zone a Sud delle foci del Savio e del Reno, dove la direzione del trasporto è da Nord verso Sud. Ciò determina la formazione di due punti di “zero” del trasporto, precisamente a Pinarella di Cervia e a Porto Corsini, che si vanno a sommare al terzo punto di “zero” che, invece, si colloca in corrispondenza dell’imboccatura della Secca di Goro.

### **1.1.3 Subsidenza**

La subsidenza è un altro importante fattore di instabilità per il territorio dell’Emilia-Romagna. Sia la pianura che il litorale sono afflitti da questo fenomeno, il quale si manifesta con un abbassamento del suolo, dovuto sia a cause naturali (tettonica, compattazione dei sedimenti) che antropiche (prelievi di fluidi, quali acqua e/o metano dal sottosuolo, bonifiche etc.). L’entità degli abbassamenti per cause naturali è dell’ordine di pochi millimetri l’anno, mentre quella per cause antropiche può raggiungere velocità molto più elevate.

Il problema della subsidenza, che colpisce la Regione da più di 50 anni, oltre a minarne la stabilità, determina impatti significativi dal punto di vista economico. Vanno infatti considerati i costi del materiale di ripascimento che ogni anno occorrerebbe portare per compensare al materiale eroso, i costi derivanti dalla necessità di rialzare gli argini, le banchine e i moli portuali, e quelli per la protezione degli abitanti. Quindi, è nell’interesse di tutti, soprattutto nella prospettiva di un continuo aumento del livello del mare dovuto ai mutamenti climatici, ridurre la subsidenza di origine antropica.

### **1.1.4 Trasporto solido**

Il trasporto di materiale solido lungo la costa contribuisce al rimodellamento della parte di spiaggia attiva. Per le coste basse e sabbiose di un bacino chiuso e poco profondo come il Mare Adriatico, l’estensione in quota della spiaggia attiva può essere valutata tra i 6 e

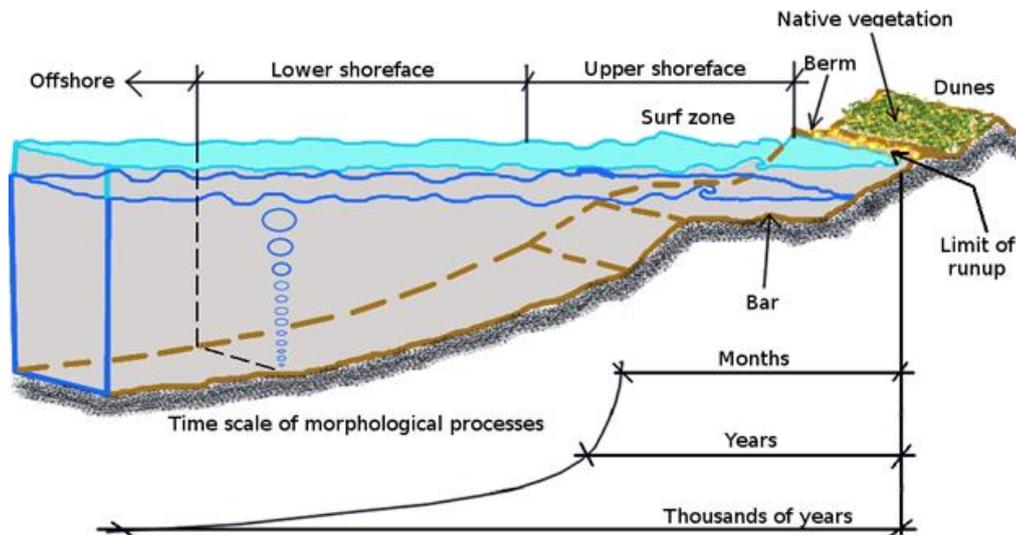
gli 8 m. A partire dal XX secolo, purtroppo, con l'intensificarsi della costruzione dei porti e delle stesse opere di difesa costiera, si è avuta una modifica e, in alcuni casi, addirittura un'interruzione del trasporto solido litoraneo.

La mobilità dei sedimenti dipende dalle onde, che smuovono e portano in sospensione i detriti, dalle correnti, che trasportano le particelle solide di accumulo, dal vento, che è in grado di spostare i granuli dalla parte emersa a quella sommersa del litorale, e dagli interventi antropici.

Nella pratica, il trasporto è, invece, dovuto allo sviluppo simultaneo delle due componenti di moto: quella trasversale e quella longitudinale. Generalmente, una delle due prevale sull'altra in base all'angolo di inclinazione formato dal fronte delle onde incidenti con la linea di battigia. Quest'ultima è la parte di spiaggia, più o meno ampia, contro cui le onde sbattono al suolo, in funzione non solo dell'inclinazione della superficie e della forza del moto ondoso, ma anche dell'ampiezza delle maree.

Il trasporto solido trasversale, ossia in direzione perpendicolare alla linea di riva (*cross-shore*), è dovuto principalmente alle correnti di ritorno, al vento, ai fondali ripidi ed alle correnti di marea in caso di forte escursione termica. Il trasporto solido longitudinale, invece, avviene in direzione parallela alla linea di battigia (*long-shore*), ed è causato principalmente dalla corrente litoranea generata dal frangimento delle onde, oltre che, come nel caso di trasporto *cross-shore*, dal vento e dalle correnti di marea. Il tutto porta alla distinzione di due zone:

- zona *offshore* (al largo) che, partendo dal limite esterno dei frangenti, è quella che va verso mare;
- surf zone o *inshore* (zona dei frangenti), che è quella compresa tra il sopracitato limite e la linea di riva.



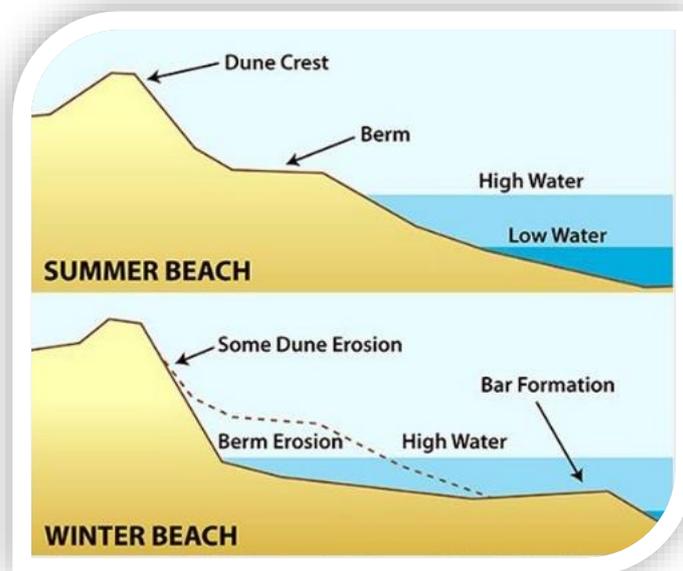
**Figura 4:** rappresentazione idrodinamica e morfodinamica di un generico litorale.  
(<https://www.albertomontanari.it>)

Le due zone presentano caratteristiche diverse.

Tra queste, la granulometria del materiale di fondo, e cioè delle particelle che trovano collocazione dove la forza risultante del trasporto di massa bilancia l'azione di gravità, dovuta, a sua volta, alla pendenza della spiaggia che spinge le particelle a largo. Andando verso riva, aumenta sia la pendenza che la granulometria dei sedimenti. Inoltre, ci sono notevoli differenze anche per quanto riguarda la natura delle due fasce. L'estensione della zona dei frangenti dipende dall'altezza e dal periodo delle onde che arrivano sulla spiaggia, mentre la larghezza di tale zona dipende dal clima, che a sua volta varia con la stagione. Le onde in arrivo risultano inclinate rispetto alla riva, quindi presentano una componente, lungo riva, che sviluppa una corrente nella stessa direzione (*longshore current*). L'orientamento e la velocità di quest'ultima, possono rimanere costanti per giorni, nonostante l'energia immessa nella zona dei frangenti cambi continuamente. Essa cambia in funzione di due fattori: la ripidità e l'angolo di inclinazione che il fronte d'onda forma con la linea di riva in acque profonde. Inoltre, va aggiunto che, la turbolenza causata dal frangimento può sia mettere in sospensione grandi volumi di sedimenti (*suspended load*), che farli rotolare sul fondo (*bed load*). Il flusso della corrente lungo riva, agendo sui sedimenti così movimentati, li trasporta

lungo la spiaggia, generando il cosiddetto trasporto litoraneo (*littoral drift*).

Anche la natura e la larghezza della zona *offshore*, essendo influenzate dalla sedimentazione e dai movimenti tettonici, variano in maniera significativa. In questa area, una delle più importanti azioni esercitate dalle onde è il trascinarsi del sedimento verso riva o verso largo. Il primo avviene durante periodi prolungati di moderata attività ondosa (azione di mare morto o *swell*), mentre il secondo si manifesta durante le mareggiate (azione di mare vivo o *storm*). L'azione di mare morto è un'azione lenta, in cui, dopo la risalita, molta acqua filtra attraverso la sabbia prima di tornare a largo. Si generano quindi onde che hanno periodo lungo e, per spiagge sufficientemente permeabili, il flusso di ritorno sviluppato sarà minimo, consentendo un accrescimento della superficie (condizione estiva). Al contrario, l'azione di mare vivo, che si ha in condizioni di burrasca, di solito in inverno, genera onde più ripide delle precedenti, che hanno periodi brevi e coinvolgono grandi quantità di acqua rendendo subito saturo il fondo della spiaggia.



**Figura 5:** variazioni stagionali della spiaggia; in alto l'estate, in basso l'inverno.  
(<http://newwww.info/gallery/b/beach-nourishment-diagram-for.html>)

Il piano di scorrimento dell'acqua coincide con il fondo stesso, e il flusso di ritorno è molto elevato e ricco di sedimenti che sono rapidamente spostati verso largo, dove si formano una barra e una fossa sottocosta. La barra continua a crescere fino a quando non è sufficientemente alta da far frangere le onde di burrasca. Solo da quel momento in poi le onde arrivano sulla spiaggia con una minore forza, andando così a ripristinare l'equilibrio. Le cause e i meccanismi che portano all'erosione del litorale o all'accumulo di una grande quantità di sedimenti si ricavano dall'analisi del trasporto solido. Da quest'ultimo si deduce qual è l'evoluzione del profilo di spiaggia durante le mareggiate e nel momento in cui muta il livello del mare, qual è la risposta di un litorale al ripascimento, e di quanto sia variata la posizione della linea di riva. Uno spostamento di tale linea verso mare, o verso terra, rappresenta rispettivamente la tendenza della spiaggia all'accumulo o all'erosione.

### **1.1.5 Azioni antropiche**

L'eccessivo utilizzo delle fasce costiere per insediamenti ed attività turistiche ha portato all'estensione dei fronti edificati, spingendoli sempre più verso la battigia, ed ha determinato lo smantellamento delle dune costiere per far posto a centri abitati, villaggi e porti turistici. Inoltre, per risolvere il problema dell'erosione, sono state costruite opere di difesa costiera che, come i fattori sopracitati, influenzano la dinamica del litorale.

Esistono opere di difesa naturali ed opere di difesa artificiali. Tra quelle naturali ricordiamo le spiagge e le dune. Le prime hanno la funzione di proteggere da mareggiate intense la zona circostante, le seconde, invece, proteggono le spiagge e al tempo stesso rappresentano una fonte di approvvigionamento di sabbia, utile al loro ripascimento naturale. In passato le dune occupavano gran parte della fascia costiera emiliano-romagnola. Oggi non è più così, esse si trovano solitamente nel periodo invernale/primaverile.

Tra le opere di difesa artificiali, invece, si distinguono:

- le opere protettive, dette anche *hard* o rigide, che hanno la funzione di impedire l'azione erosiva del moto ondoso. Esistono opere di difesa radenti, opere parallele alla costa ed opere ortogonali alla linea di riva;
- le opere di rifornimento artificiale di sabbia, dette anche *soft* o di ripascimento, che servono a controbilanciare le perdite causate dai processi naturali e/o dovuti agli interventi dell'uomo.

Oltre la metà delle spiagge lungo il litorale emilano-romagnolo (circa 74 Km) sono protette da opere rigide di vario tipo<sup>7</sup>. Le più diffuse sono le scogliere parallele emerse, che difendono circa 40 km di costa. I restanti 30 Km sono protetti da scogliere radenti (opere parallele e aderenti alla riva), scogliere a cresta bassa, barriere sommerse in sacchi e pennelli. A queste strutture si aggiungono le opere portuali e le darsene che occupano circa 2,5 Km di fronte mare.

Diversamente da ciò che avveniva in passato, dagli ultimi anni del '900, la Regione ha fortemente limitato l'utilizzo di opere rigide per la difesa delle spiagge dai fenomeni erosivi. Alla luce delle conoscenze attuali, infatti, l'utilizzo di queste ultime ostacola la normale circolazione dei sedimenti lungo la costa, crea disequilibri nei profili di spiaggia e determina forti impatti dal punto di vista paesaggistico-ambientale. Ecco perché, già a partire dagli anni '80 del secolo scorso, la Regione Emilia-Romagna ha favorito la difesa dall'erosione costiera con interventi di ripascimento, inizialmente utilizzando sabbie provenienti da cave a terra, in seguito usando sabbie provenienti da depositi sottomarini individuati al largo della costa regionale.

## **1.2 Indicatori dello stato costiero**

Un indicatore ambientale è un parametro qualitativo o quantitativo capace di rappresentare una situazione ambientale complessa, cioè lo 'stato' di uno spazio geografico costituito da componenti naturali, biotiche e abiotiche e da componenti antropiche.

---

<sup>7</sup> Vedi Arpae, Annuario dei dati 2012, cap. 9c, pp. 855.

Per rappresentare la complessità delle zone del litorale emiliano-romagnolo, l'Unità Mare-Costa di Arpae ha introdotto alcuni indicatori dello stato costiero: l'ASPE, l'ASE e la Valutazione Degli Effetti Prodotti Dagli Interventi Di Difesa Della Costa. I tre indicatori sono stati definiti partendo dal presupposto che la linea di riva non è l'unica indicazione dello stato di una spiaggia, ma lo sono anche la morfologia del fondale e la presenza di sistemi di protezione. Infatti, essi si basano sull'analisi integrata della variazione della linea di riva, della situazione degli interventi di difesa, e delle variazioni di volume a carico della spiaggia. Questo approccio si definisce integrato, e in quanto tale si differenzia da quello tradizionale poiché prevede l'analisi di tali aspetti in maniera separata. L'integrazione è dovuta a tre principali gruppi di informazioni:

- variazioni del volume di sabbia a carico di spiaggia emersa e sommersa;
- variazioni della linea di riva;
- situazione degli interventi di difesa.

Considerare singolarmente o escludere una di queste informazioni può essere fuorviante. Ad esempio, una perdita di volume può essere legata a fenomeni erosivi, ma anche al prelievo artificiale di sabbia oppure ad abbassamenti del suolo dovuti alla subsidenza. Analogamente, un accumulo può essere causato da processi naturali, ma può rappresentare anche l'effetto di un ripascimento. La presenza di opere di difesa rigida modifica profondamente le caratteristiche dinamiche e morfologiche della spiaggia, inoltre, le condizioni in cui esse versano e il loro stato di manutenzione sono informazioni necessarie per una corretta analisi del sistema costiero. Infine, variazioni di volume possono interessare anche solo la porzione di spiaggia sommersa e non avere nessuna manifestazione sulla spiaggia emersa, dove la linea di riva può apparire stabile.

Questa metodologia di analisi integrata, basata sull'utilizzo di indicatori, è stata messa a punto su dati riferiti al periodo 2000-2006, che sono gli anni di realizzazione di due campagne regionali di monitoraggio della costa. Come variazione di volume significativa è

stato fissato il valore di  $30 \text{ m}^3/\text{m}$ , mentre per quanto riguarda la linea di riva, sono stati considerati significativi avanzamenti o arretramenti superiori ai 10 m per tratti lunghi almeno 100 m. Entrambe queste soglie sono state definite sulla base delle conoscenze acquisite negli anni sulla costa regionale e sono state utilizzate in maniera flessibile, valutando volta per volta la rappresentatività e la coerenza dei dati.

### 1.2.1 ASPE

L'ASPE (Accumulo, Stabile, equilibrio Precario, Erosione) è l'indicatore che descrive lo stato del litorale emiliano-romagnolo così come si presenterebbe se in un determinato periodo non venissero effettuati interventi di difesa. Tale indicatore ha lo scopo di fornire il quadro dello stato reale di criticità della costa, descrivendo la situazione del litorale in termini di tendenza delle spiagge all'erosione, all'accumulo o all'equilibrio, con riferimento ad un determinato periodo. Si prevedono, dunque, quattro possibili stati dei tratti costieri, così come riportati nella Tabella 1.

Classe	Definizione
Accumulo	Tratto di litorale che evidenzia accumuli di sabbia significativi* nel periodo in esame.
Stabile	Tratto di litorale che non evidenzia perdite o accumuli di sabbia significativi* e che non è stato oggetto di interventi di difesa dall'erosione (ripascimenti o opere) nel periodo in esame.
Equilibrio precario	Tratto di litorale che non evidenzia perdite o accumuli di sabbia significativi* e che è stato oggetto di interventi di difesa dall'erosione (ripascimenti o opere) nel periodo in esame.
Erosione	Tratto di litorale che evidenzia perdite di sabbia significative* nel periodo in esame.
*Sono considerati significativi accumuli o perdite maggiori di $30 \frac{\text{m}^3}{\text{m}}$	

**Tabella 1:** le 4 classi previste dall'indicatore ASPE.<sup>8</sup>

Nell'individuazione di tali classi, si tiene conto della presenza e dello stato di manutenzione delle opere di difesa presenti e si utilizza come elemento di riferimento fondamentale la variazione di volume ( $\text{m}^3/\text{m}$ ). Tale variazione si ottiene sottraendo al valore volumetrico risultante

<sup>8</sup> Vedi Aguzzi Margherita et al., 2012, Nuovi indicatori per lo studio e la gestione della costa emiliano-romagnola, pp. 1-15.

dal confronto tra i rilievi topo-batimetrici, i volumi di sabbia portati a ripascimento, e sommando i volumi di sabbia prelevati, relativi sempre al periodo in esame. Nei casi limite, in cui la variazione di volume risulta prossima alla soglia dei  $30 \text{ m}^3/\text{m}$ , la tendenza della linea di riva assume maggior potere discriminante. Tra i tratti che non presentano accumuli o perdite significative, ASPE distingue le spiagge realmente stabili da quelle che invece sono caratterizzate da un equilibrio precario, garantito da recenti interventi di difesa o di manutenzione delle opere. Questo indicatore, quindi, permette di rispondere a due domande:

- 1) quale sarebbe lo stato del litorale se non si intervenisse?
- 2) quanti e quali sono i tratti critici sui quali sarebbe necessario intervenire?

L' ASPE consente, infatti, di quantificare l'estensione di costa in buono stato (tratti in accumulo e stabili) e l'estensione di costa in stato di criticità, con potenziale necessità di interventi di difesa (tratti in equilibrio precario e in erosione).



**Figura 6:** Schema dell'indicatore ASPE.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Vedi Aguzzi Margherita et al., 2012, Nuovi indicatori per lo studio e la gestione della costa emiliano-romagnola, pp. 1-15.

### 1.2.2 ASE

L'ASE (Accumulo, Stabile, Erosione) è un indicatore di 'stato' che, a differenza dell'ASPE, fornisce indicazioni sullo stato del litorale così come si presenta dopo essere stato oggetto di interventi di difesa. Esso rappresenta un'immagine della costa, paragonabile a quella che si ottiene dall'analisi della variazione della linea di riva, perché analogamente a questa, non considera le cause (naturali o antropiche) che determinano l'assetto della spiaggia. L'ASE ha però una base dati più sostenuta, perché non si limita a considerare la tendenza della linea di riva, ma ha come riferimento principale le variazioni di volume, includendo nell'analisi le modifiche a carico sia della spiaggia emersa che di quella sommersa. Analogamente all'ASPE, l'ASE descrive la costa in termini di tendenza delle spiagge all'erosione, all'equilibrio o all'accumulo, prevedendo però solo tre classi, così come esplicitate nella Tabella 2:

Classe	Definizione
Accumulo	Tratto di litorale che evidenzia accumuli di sabbia significativi nel periodo in esame.
Stabile	Tratto di litorale che non evidenzia perdite o accumuli di sabbia significativi nel periodo in esame.
Erosione	Tratto di litorale che evidenzia perdite di sabbia significative nel periodo in esame.

**Tabella 2:** le 3 classi previste dall'indicatore ASE.<sup>10</sup>

La variazione di volume di riferimento considerata in questo caso è il risultato della somma del valore volumetrico ottenuto dal confronto tra i rilievi topo-batimetrici (volumi 'accumulati e persi'), con i volumi di sabbia prelevati nello stesso periodo. Si tratta quindi di una variazione di volume al lordo dei ripascimenti, che non riconosce come discriminante la presenza o lo stato delle opere rigide. Questo perché l'indicatore serve ad evidenziare gli effetti prodotti dagli interventi di protezione sullo stato della costa. Per la stessa ragione manca la classe dedicata ai tratti in equilibrio precario. L'indicatore è stato definito in questo modo (in termini volumetrici) per poter essere messo a confronto diretto con l'ASPE e per poter essere utilizzato nella

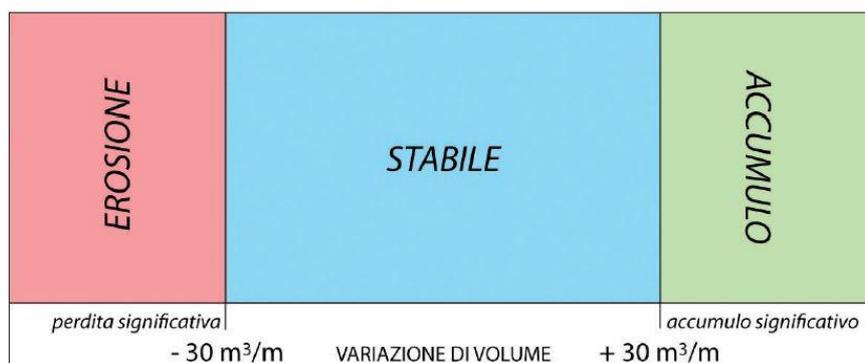
<sup>10</sup> Vedi Aguzzi Margherita et al., 2012, Nuovi indicatori per lo studio e la gestione della costa emiliano-romagnola, pp. 1-15.

valutazione degli effetti prodotti sulla costa dalle misure di protezione adottate.

Quindi, l'ASE consente di rispondere alla domanda:

3) qual è lo stato della costa a valle degli interventi effettuati?

Esso descrive, infatti, lo stato apparente della costa, frutto delle politiche di gestione adottate dalla Regione.



**Figura 7:** schema dell'indicatore ASE.<sup>11</sup>

### 1.2.3 Valutazione degli effetti prodotti dagli interventi di difesa della costa

La "Valutazione degli effetti prodotti dagli interventi di difesa della costa" è un indicatore di "risposta", che permette di valutare gli effetti prodotti dagli interventi di difesa realizzati sul litorale regionale nel periodo di riferimento. Tale indicatore si applica esclusivamente ai tratti che sono stati oggetto di interventi di difesa (costruzione di nuove opere e/o manutenzione di opere esistenti e/o ripascimenti). La valutazione del tratto in questione viene effettuata confrontando la classe di appartenenza all'ASPE con la classe ASE.

L'indice prevede tre casi possibili:

- l'intervento ha prodotto un miglioramento della situazione del tratto costiero interessato (passaggio di classe da ASPE a ASE positivo);
- l'intervento non ha prodotto nessun cambiamento nel tratto costiero interessato (nessun passaggio di classe da ASPE a ASE);

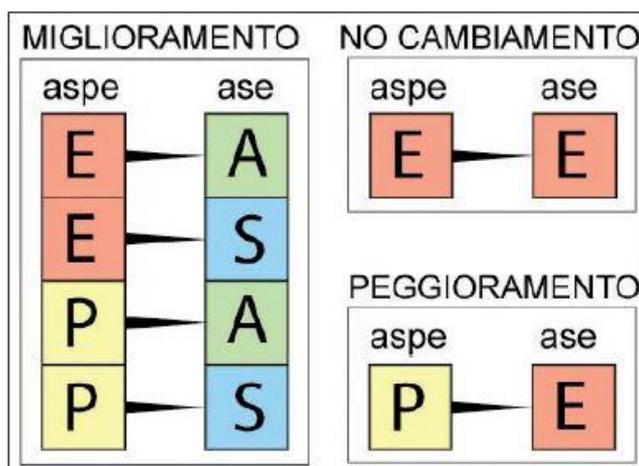
<sup>11</sup> Vedi Aguzzi Margherita et al., 2012, Nuovi indicatori per lo studio e la gestione della costa emiliano-romagnola, pp. 1-15.

- l'intervento ha causato un peggioramento della situazione del tratto costiero interessato (passaggio di classe da ASPE a ASE negativo).

Questo indicatore permette di rispondere alla domanda :

4) che effetti hanno prodotto gli interventi?

Dunque, da esso possono essere tratti suggerimenti e indicazioni in merito a dove e come intervenire in futuro.



**Figura 8:** schema dell'indicatore per la valutazione degli effetti prodotti dagli interventi di difesa basati sul confronto tra ASPE e ASE.<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Vedi Aguzzi Margherita et al., 2012, Nuovi indicatori per lo studio e la gestione della costa emiliano-romagnola, pp. 1-15.

## 2. Strutture artificiali di protezione

Si tratta di manufatti rigidi posti a protezione dell'area costiera in questione. Il meccanismo di difesa, a seconda dei casi, viene innescato attraverso:

- il frangimento o la riflessione delle onde incidenti (dighe o moli);
- la dissipazione dell'energia del moto ondoso;
- la protezione dall'azione meccanica ed erosiva dell'onda;
- la riduzione dei fenomeni di risalita e di tracimazione dell'onda (difese radenti);
- l'intercettazione o il rallentamento del trasporto solido litoraneo (pennelli);
- il rifornimento artificiale di sabbia per bilanciare le perdite di sedimenti (ripascimenti).

Ogni singolo intervento non dovrebbe essere considerato in modo isolato, ma andrebbe inserito all'interno del contesto territoriale. Questo perché la realizzazione di opere rigide lungo costa crea un ostacolo al libero propagarsi del moto ondoso e al trasporto dei sedimenti, andando quindi ad alterare gli equilibri nelle zone limitrofe e in quelle dell'intervento.

Nel XX secolo, con l'accrescersi dell'urbanizzazione dei vari ambienti costieri, è aumentata anche la necessità di creare sistemi di protezione. Il bisogno di comprendere le cause dei cambiamenti ha dato il via ad un approfondimento degli studi sulla dinamica costiera. Con il progredire delle conoscenze, negli anni '70<sup>13</sup>, si è visto che l'uso di molte opere di protezione di tipo artificiale, oltre ad avere costi importanti e limitata durata nel tempo, non fornivano in molti casi i risultati attesi. Ne sono un esempio le opere distaccate parallele alla costa come le barriere, le opere aderenti o radenti parallele alla costa, come rivestimenti, muri ed argini, e le opere trasversali alla costa, come i pennelli. È nata dunque l'esigenza di progettare nuove tipologie di interventi, come ad esempio i ripascimenti artificiali, per la stabilizzazione delle spiagge (con ghiaie) o per la loro ricostituzione

---

<sup>13</sup> Vedi APAT, 2007, Atlante delle opere di sistemazione costiera - Manuale delle linee guida, pp. 45.

(con sabbie). L'efficacia di tali interventi è stata definita e successivamente validata, attraverso dati di monitoraggio.

## **2.1 Opere parallele**

Le opere parallele alla costa, siano esse emerse o sommerse, allineate o sfalsate, hanno lo scopo di ridurre l'energia ondosa. Possono essere di due tipi: distaccate dalla costa, oppure aderenti ad essa.

### **2.1.1 Opere parallele distaccate dalla costa**

Sono strutture di tipo attivo-rigido, posizionate in mare, che hanno lo scopo di provocare una dissipazione dell'energia del moto ondoso a distanza dalla riva (attenuandone il potere erosivo sui bassi fondali). Generalmente sono costruite con scogli di cava, sacchi di sabbia o massi artificiali.

Tra le più comuni opere parallele distaccate, troviamo le barriere, che possono essere realizzate in tempi relativamente brevi. Generalmente, esse non hanno un andamento continuo, ma sono interrotte da varchi.

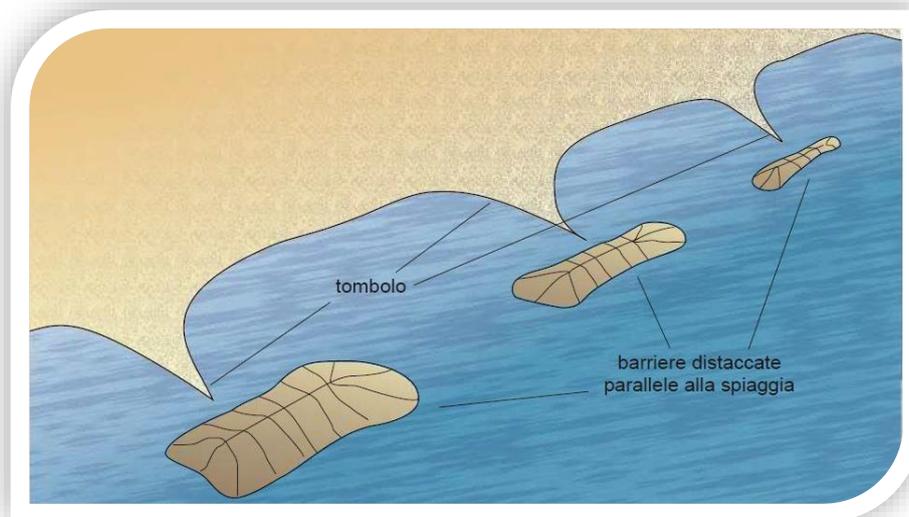


**Figura 9:** esempio di barriera emersa a Marina di Palma (AG).

In relazione alla quota di coronamento rispetto al livello medio del mare, le barriere possono essere emerse (quota al di sopra del livello

medio), o sommerse (possibilità di quota emergente solo in condizioni di bassa marea). Queste ultime differiscono dalle prime sia per la minore capacità di dissipazione energetica sulle onde, che per la minore capacità di trattenere i sedimenti, e quindi di formare accumuli sabbiosi. D'altra parte, esse consentono un miglior ricambio delle acque e sono meno impattanti dal punto di vista paesaggistico. Al contrario, le barriere emerse possono creare problemi di intorbidimento nella zona compresa tra le strutture e la riva. Questa ridotta azione del moto ondoso dietro le barriere, nella zona di bagnasciuga, potrebbe generare la proliferazione di alghe, con conseguente inutilizzo dal punto di vista balneare.

Un sistema di barriere emerse, protegge la costa dall'azione erosiva del moto ondoso e lascia passare le onde diffratte, consentendo la deposizione dei sedimenti, senza però garantire un costante ed efficace ricambio delle acque ai due lati delle strutture. Poiché la costruzione viene solitamente effettuata ad una certa distanza dalla linea di costa, la principale funzione di protezione si esplica nei confronti delle onde più alte, che sono quelle con maggiore capacità erosiva, determinandone una notevole perdita di energia. Le barriere contrastano l'erosione anche attraverso l'accumulo dei materiali che, muovendosi trasversalmente alla riva, le scavalcano o passano attraverso i varchi. Possono risultare efficaci anche in condizioni di modesto trasporto litoraneo. La configurazione, la spaziatura regolare e la distanza dalla costa, consentono a queste opere di controllare l'erosione. Infatti, se mal dimensionate, si formano delle zone concave, nei tratti di spiaggia tra un ostacolo e l'altro, e delle cuspidi (tomboli) nei settori a tergo delle strutture, originando un profilo della linea di riva meno naturale (Figura 10).



**Figura 10:** Schema degli effetti derivanti dalla costruzione di barriere.<sup>14</sup>

### 2.1.2 Opere radenti o aderenti parallele alla costa

Le opere radenti sono manufatti di tipo passivo-rigido, ubicate a terra, che hanno lo scopo di proteggere le infrastrutture presenti in prossimità della linea di riva, o di difendere l'entroterra da inondazioni marine scatenate da mareggiate. Esse sono particolarmente indicate nelle zone caratterizzate dall'assenza di infrastrutture turistiche o in particolari situazioni di emergenza per infrastrutture stradali, ferroviarie o anche per edifici urbani situati in prossimità della costa. Il loro scopo è quello di proteggere la linea di riva mediante la riflessione delle onde incidenti e/o la dissipazione della loro energia.

Tra le opere aderenti si distinguono:

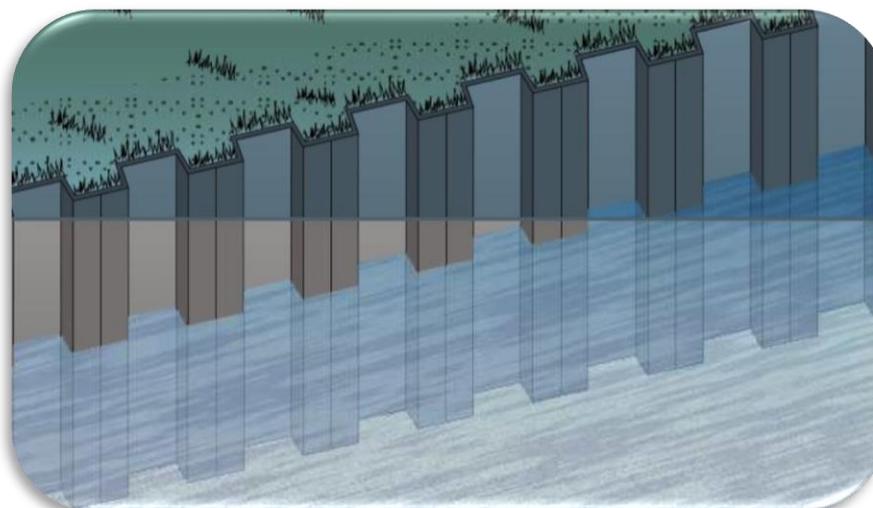
- muri, strutture compatte e continue, realizzate per difendere zone di retrospiaggia dall'azione diretta del moto ondoso. Essi vengono costruiti parallelamente alla linea di riva come rinforzo di una parte del profilo costiero, per proteggere zone di lungomare, strade e case collocate vicino al limite naturale della spiaggia;

<sup>14</sup> Vedi ISPRA, 2014, Linee guida per gli studi ambientali connessi alla realizzazione di opere di difesa costiera - Manuale linee guida, pp. 7-25.



**Figura 11:** Palermo, località Santa Flavia. Muro verticale in calcestruzzo. La protezione al piede, con massi naturali, consente di limitare gli effetti del fenomeno della riflessione, che a lungo andare può provocare l'approfondimento del fondale antistante e lo scalzamento della struttura.<sup>15</sup>

- paratie, che sono strutture di sostegno costituite da legname, acciaio o calcestruzzo, allineate alla linea di riva ed infisse direttamente nel terreno;



**Figura 12:** esempio di paratie in acciaio. Sono costituite da palancole metalliche che possono essere infisse sia in terreni compatti che incoerenti. Le loro giunzioni impediscono all'acqua ed alla sabbia di penetrare. La struttura finale può essere chiusa superiormente con una trave in calcestruzzo oppure ancorata.

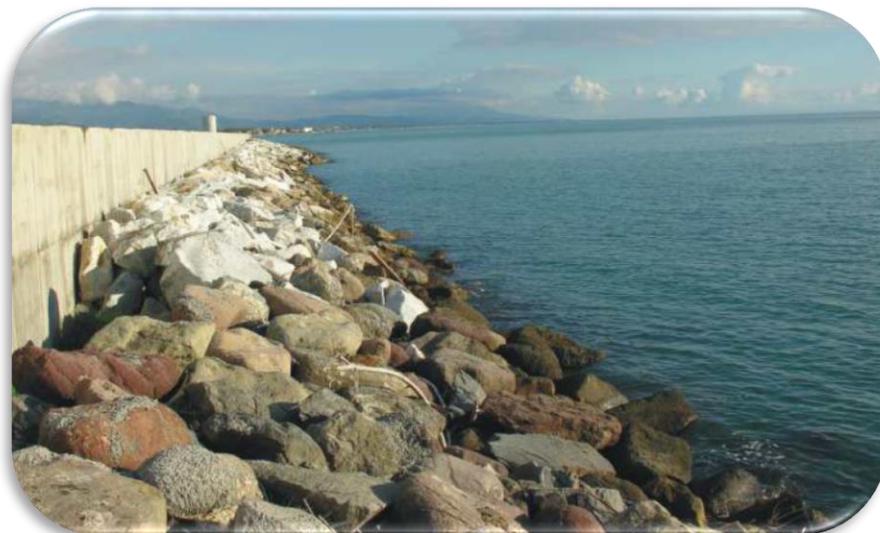
<sup>15</sup> Vedi APAT, 2007, Atlante delle opere di sistemazione costiera - Manuale linee guida, pp. 77-97.

- argini, classificati come opere di difesa passiva del territorio atte ad impedire lo straripamento dei corsi d'acqua;



**Figura 13:** argine del fiume Arno (FI) tra l'Isolotto e la Palazzina dell'Indiano.

- rivestimenti, che sono delle strutture realizzate per la difesa di una scarpata a mare;



**Figura 14:** esempio di rivestimento a Carrara.

- scogliere radenti, strutture di difesa costituite da massi naturali o artificiali disposte parallelamente alla linea di riva, in corrispondenza della spiaggia emersa. Tale tipologia di opere

viene impiegata per proteggere zone prive di vincoli paesaggistici oppure per tutelare da situazioni di emergenza temporanee, ove si abbia la necessità di interrompere provvisoriamente l'arretramento dell'arenile o di limitare la risalita dell'onda.



**Figura 15:** esempio di scogliera radente a difesa di un centro abitato (foto ISPRA).<sup>16</sup>

Questi tipi di strutture richiedono una continua manutenzione e possono essere soggette al pericolo di sfiancamento ai lati se non adeguatamente protette. Esse, tuttavia, non creano svantaggi alle spiagge limitrofe, se si esclude il mancato arrivo sottoflutto del materiale che prima poteva essere eroso. Va detto, inoltre, che l'erosione della spiaggia protetta non è completamente ostacolata, anzi, vi è il rischio che essa possa essere incrementata, sia pure limitatamente alla parte di spiaggia sommersa antistante l'opera di difesa. Ciò avviene in quanto la presenza della struttura, impedendo all'onda di propagarsi verso terra, la costringe a frangere, dissipando quasi tutta l'energia residua e riflettendone una parte. In questo modo, l'onda va ad aggredire la base della struttura creando uno scalzamento al piede, che risulta dannoso per la stabilità e l'integrità

---

<sup>16</sup> Vedi ISPRA, 2014, Linee guida per gli studi ambientali connessi alla realizzazione di opere di difesa costiera - Manuale linee guida, pp. 7-25.

della struttura stessa. Per questa ragione, la base di tali opere deve essere curata e rinforzata adeguatamente.

## 2.2 Opere trasversali alla costa

Le opere trasversali sono manufatti di tipo attivo-rigido, posizionati in direzione ortogonale alla linea di costa, con l'effetto di modificare totalmente o parzialmente il trasporto longitudinale. In genere, si estendono dalla spiaggia emersa alla linea dei frangenti e provocano un accumulo di sedimenti sopraflutto, a scapito dei settori sottoflutto. Infatti, questo tipo di opera viene utilizzato per stabilizzare i tratti di litorale in cui è notevole l'intensità del trasporto solido lungo riva.



**Figura 16:** pennelli in roccia a Misano Adriatico.

L'effetto di tali opere, quali i pennelli, è proprio quello di interrompere il trasporto dei sedimenti, in parte o totalmente, in base alla lunghezza dell'opera stessa e al materiale di cui sono costituiti. Di solito, queste opere sono realizzate con massi naturali, pali in legno, o anche cemento armato (nel caso dei moli). La loro realizzazione implica una particolare attenzione all'ammorsamento a terra del piede dell'opera, al fine di evitarne l'aggiramento da parte dell'onda. È importante anche fare attenzione alla distanza tra i pennelli: se molto lontani non assicurano il completo deposito della zona coinvolta, al contrario, se

sono troppo vicini, risultano poco economici. Solitamente la distanza tra due pennelli è pari a circa due/tre volte la lunghezza dell'opera stessa. Come tutte le opere di tipo rigido, i pennelli generano un elevato impatto ambientale, dovuto non solo ad una questione di carattere visivo, ma anche all'inserimento di materiali lapidei in una situazione di spiaggia sabbiosa, che ne stravolge completamente l'assetto.

### 2.3 Ripascimento

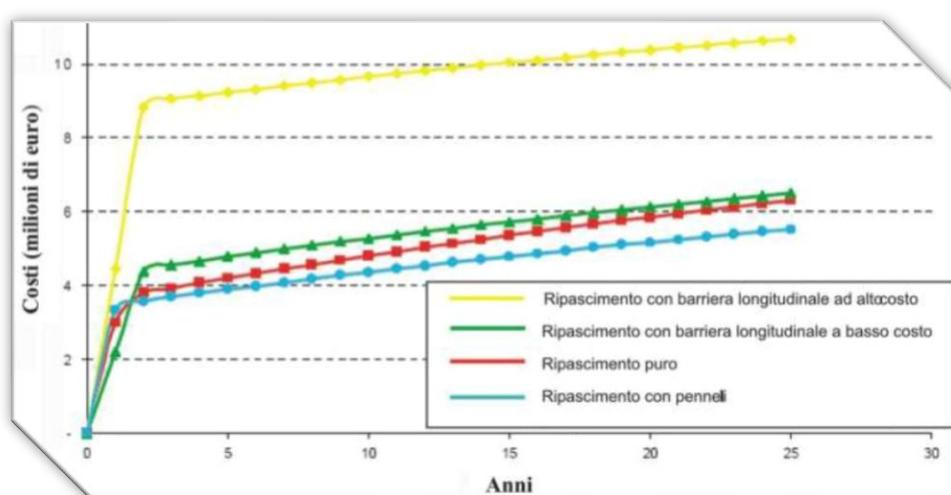
Il ripascimento consiste nella ricostituzione di una spiaggia in erosione mediante materiale idoneo proveniente da fondali marini o cave dell'entroterra. Diversamente dalle opere rigide, questi interventi minimizzano l'impatto ambientale. Un ripascimento può essere morbido oppure protetto: nel primo caso, il versamento diretto di materiale sabbioso stabilizza e ricostruisce la spiaggia, ma non può essere considerato definitivo; nel secondo caso, si tratta di un versamento accoppiato ad una serie di opere di tipo rigido, come pennelli, barriere o entrambi.



**Figura 17:** intervento di ripascimento morbido con sabbie prelevate dai fondali del mare di Barcellona, Spagna.

Gli interventi di ripascimento protetto, difendono la spiaggia dall'erosione, contengono minore volume di sedimento ed hanno minori oneri di manutenzione, a discapito però di un investimento iniziale maggiore dovuto al costo delle opere rigide.

Nel grafico Figura 18 viene riportato l'andamento dei costi in funzione del tipo di opera, al passare del tempo. L'onere maggiore, in giallo, si ha per un intervento di ripascimento con barriera longitudinale, mentre quello minore, in rosso, si ha per un ripascimento puro.



**Figura 18:** Descrizione degli investimenti necessari alla realizzazione di opere di ripascimento (puro e protetto). Soltanto l'intervento con pennelli trasversali (linea azzurra) risulta meno oneroso nel lungo periodo rispetto al ripascimento puro (linea rossa). (Diagramma Beachmed).<sup>17</sup>

La dinamica del litorale è influenzata da numerosi fattori, tra cui le correnti marine ed il moto ondoso, che a loro volta dipendono dal clima, e quindi dalla stagione. Di conseguenza, un'opera di difesa costiera come il ripascimento, che va ad estendersi sia sulla parte emersa che su quella sommersa, deve tener conto della tendenza evolutiva della spiaggia su cui interviene. L'apporto di nuovo materiale determina una distribuzione diversa delle particelle solide in prossimità della linea di riva, non solo in termini di distanza ma anche di profondità. D'altra parte, la naturale migrazione dei sedimenti conduce

<sup>17</sup> Vedi APAT, 2007, Atlante delle opere di sistemazione costiera - Manuale linee guida, pp. 97-110.

nel tempo alla perdita di parte del materiale versato. Bisogna considerare che si tratta di un intervento artificiale e, in quanto tale, per sua natura, tenderà a ritornare nella configurazione di equilibrio iniziale. Quindi, diventa importante lo studio dei profili trasversali naturali (rappresentazione dell'andamento delle quote in funzione della distanza) del litorale in esame, e della distribuzione granulometrica, al fine di dimensionare in modo corretto il quantitativo ed il tipo di sabbia da versare. Infatti, il materiale di impiego per il ripascimento può provenire da alvei fluviali, da cave terrestri, da ambiti costieri o anche da depositi sottomarini. A seconda della tipologia, sono previsti mezzi diversi e quindi costi differenti.

La quantità di inerte utile alla ricostruzione dei soli litorali di interesse, fino al raggiungimento di determinate ampiezze, prende il nome di fabbisogno effettivo per la ricostruzione e si misura in metri cubi ( $m^3$ ). La quantità annua di inerte necessaria a compensare l'erosione nei soli tratti di litorale di interesse, prende il nome di fabbisogno effettivo per la manutenzione, e si misura in  $m^3$ /anno. Integrando i dati relativi ai rilievi periodici, alle registrazioni del moto ondoso e al livello del mare, viene stimata la giusta quantità di sabbia da versare. Nel periodo successivo all'intervento è fondamentale la realizzazione di periodiche campagne di monitoraggio, che hanno l'obiettivo di valutare l'andamento dei profili di spiaggia.

### **3. Monitoraggio**

Il patrimonio costiero rappresenta una risorsa naturale ed economica di straordinario valore. Come già detto, le coste sono sottoposte a continue trasformazioni a causa di fattori climatici e antropici, come per esempio l'erosione delle spiagge, la progettazione di ripascimenti artificiali, la realizzazione o la manutenzione di opere di difesa. Il monitoraggio è il mezzo attraverso il quale è possibile valutare l'evoluzione di tali fenomeni nel tempo. Nello specifico, le attività di monitoraggio consentono di organizzare dei piani di gestione del litorale a medio/lungo termine, e di valutare l'impatto delle opere rigide e l'efficacia degli interventi di difesa sul breve termine. Inoltre, tramite il monitoraggio è possibile analizzare il bilancio sedimentario del litorale e determinare l'estensione e la qualità dell'arenile. Il rilievo della spiaggia emersa e sommersa è lo strumento operativo alla base di queste attività. Per giungere alla definizione di criteri oggettivi sui quali possa essere impostato un programma di monitoraggio, sono importanti sia la valutazione dell'applicabilità, che l'accuratezza dei metodi di rilievo<sup>18</sup>. Generalmente, il confronto tra rilievi successivi eseguiti su una stessa porzione di spiaggia permette di determinare le variazioni in termini di linea di riva e di quota. I dati ottenuti da ogni rilievo devono quindi poter essere confrontati con quelli dei rilievi precedenti. Quindi le procedure devono essere ben collaudate, ben definite, ma soprattutto riferite a un unico sistema di riferimento condiviso, possibilmente stabile nel tempo<sup>19</sup>.

#### **3.1 Il sistema di riferimento**

Il sistema di riferimento, generalmente, viene materializzato a terra mediante un insieme di punti distribuiti in modo omogeneo di cui vengono determinate delle coordinate con precisione. Ci si riferisce a queste coordinate per determinare in modo univoco la posizione dei nuovi punti incogniti da rilevare. Alcune problematiche sono dovute

---

<sup>18</sup>Vedi Carli et al., 2005, Tecniche di monitoraggio dell'evoluzione delle spiagge, in *Erosione costiera*, pp.125-165.

<sup>19</sup> Vedi Vecchi Enrica, 2018, *Monitoraggio del litorale emiliano-romagnolo con l'utilizzo di misure topo-batimetriche: metodi, prodotti e risultati*, pp.18-19.

alla presenza sul territorio di molteplici infrastrutture geodetiche con caratteristiche differenti. Esse si distinguono principalmente in reti passive e reti attive. Le reti passive si avvalgono di vertici posti a terra collocati in luoghi valutati stabili. Questi punti, ritenuti caratteristici e rappresentativi di possibili movimenti nel tempo dell'area in esame, sono detti capisaldi. Una rete così fatta necessita di periodica manutenzione. Infatti, un'eventuale instabilità nel tempo dei capisaldi può indurre ad errate interpretazioni che si ripercuotono su qualunque misura svolta a partire da essi. Tra le reti passive attualmente presenti in Italia abbiamo la rete IGM'95, la GPS-7 che deriva da un suo raffittimento e la rete di livellazione Arpa. Per quanto riguarda le reti attive, invece, si utilizzano delle stazioni permanenti, utili al posizionamento in tempo reale (NRTK). Si tratta di sistemi che garantiscono precisioni sull'ordine del cm: 2-3 cm in planimetria e 4-5 cm in quota per rilevamenti svolti nelle aree interne alla rete. In questi casi vi è tuttavia il rischio che chi eroga il servizio possa aggiornare il sistema di riferimento senza fornire comunicazioni, che il servizio possa subire interruzioni, o che le reti di stazioni permanenti attuali possano risultare inadatte in futuro a causa della continua evoluzione delle tecnologie di posizionamento GNSS. ItalPos di Leica Geosystem e la Rete FoGER gestita dalla Fondazione dei Geometri e Geometri Laureati dell'Emilia-Romagna sono alcune reti presenti sul territorio emiliano-romagnolo<sup>20</sup>.

“Per uniformare i sistemi nazionali già presenti, l'Unione Europea ha deciso di adottare un sistema comune e condiviso, l'European Terrestrial Reference System (ETRS), al quale devono essere riferite tutte le nuove misure eseguite per applicazioni ufficiali e a cui devono essere riportati i dati preesistenti. Così come sancito dal D.M. del 10 novembre 2011, pubblicato in G.U. n. 48 del 27 febbraio 2012 (Supplemento ordinario n. 37), lo standard italiano è ora l'ETRS89-ETRF2000 (2008.0). Il sistema di riferimento geodetico ETRS89 è un sistema geocentrico, solidale alla placca euroasiatica e derivato dal

---

<sup>20</sup> Vedi Gandolfi Stefano, Appunti sul sistema GNSS, a.a.2008/2009.

sistema ITRS89, con cui coincide all'epoca 1989.0. Il frame ETRF2000 (ossia la posizione delle stazioni che realizzano il sistema ETRS89) è stato scelto per la sua particolare stabilità (nell'ordine di 1 cm), che consente infatti applicazioni di precisione, come il monitoraggio<sup>21</sup>.

Dal 2016, è presente una nuova infrastruttura geodetica utile per le attività di monitoraggio delle zone costiere in Emilia-Romagna, la Rete Geodetica Costiera (RGC). Le monografie di tutti i vertici della Rete sono consultabili sul portale cartografico di Arpae (<https://arpae.it/cartografia/>) e le coordinate dei punti sono espresse nel sistema di riferimento ETRF2000 all'epoca 2008.0. Lo scopo della RGC è proprio quello di fornire una infrastruttura geodetica che garantisca un corretto inquadramento dei rilievi nell'attuale sistema di riferimento, da potersi utilizzare per tutti i periodici rilievi volti al monitoraggio della zona costiera della Regione Emilia-Romagna. Essa è stata realizzata a partire dalle infrastrutture geodetiche presenti sul territorio, seguendo la logica del riuso. Così facendo sono state evitate inutili duplicazioni di vertici, garantendo un risparmio economico. I rilievi dei punti della Rete sono stati eseguiti utilizzando la tecnica GNSS sia in modalità statica che in tempo reale (NRTK).

---

<sup>21</sup> Vedi Vecchi Enrica, 2018, Monitoraggio del litorale emiliano-romagnolo con l'utilizzo di misure topo-batimetriche: metodi, prodotti e risultati, pp. 21.



**Figura 19:** Rete Geodetica Costiera: distribuzione dei capisaldi ad oggi.

#### 4. Metodi geomatici

Un indispensabile punto di partenza su cui basare le politiche territoriali è la determinazione dello stato fisico della zona oggetto di studio. Nel caso specifico, per determinare lo stato di salute della costa, si effettuano campagne di monitoraggio, che si realizzano attraverso periodici rilievi sulle aree in esame. La corretta quantificazione dei volumi portati a ripascimento, la stima dell'efficacia degli interventi stessi e la valutazione dei fenomeni erosivi, sono fortemente dipendenti dall'accuratezza con cui vengono effettuati i rilievi topo-batimetrici della spiaggia emersa e sommersa. Infatti, un'errata misura della quota anche di alcuni centimetri può portare, nel calcolo dei volumi di sabbia erosa o depositata, ad errori di migliaia di metri cubi, con conseguenti effetti in termini di costi e tempi di lavoro. Costi e tempi sono soltanto due dei fattori che influenzano la scelta del metodo più adatto per rilevare la zona oggetto di analisi. La scelta del metodo dipende anche dalla morfologia del territorio, dalla tipologia di strumenti a disposizione, dalla precisione e dalla frequenza richieste dal rilievo, dall'accuratezza dei dati, dall'estensione dei punti da rilevare e dalla loro densità. Generalmente, il rilievo della costa viene effettuato con tecnologia GNSS. Ogni sistema GNSS è caratterizzato da un "segmento spaziale", da un "segmento di controllo" e da un "segmento di utilizzo". Il segmento spaziale è costituito dai satelliti in orbita intorno alla Terra che inviano attivamente dei segnali radio, diretti sia al segmento di controllo che a quello di utilizzo. Il segmento di controllo è costituito dalle stazioni e dai centri di calcolo a terra, che hanno il compito di tracciare i satelliti per definirne le effemeridi, imporre le correzioni di orbita o le correzioni agli orologi di bordo e monitorare lo stato di buon funzionamento. Il segmento di utilizzo è costituito da tutti gli utenti a terra dotati di ricevitori passivi in grado di acquisire e decodificare i segnali GNSS inviati dai satelliti, dal semplice *smartphone* ai più sofisticati ricevitori di classe geodetica<sup>22</sup>.

---

<sup>22</sup> Vedi Tavasci Luca, 2016, Il monitoraggio dei sistemi di riferimento terrestri mediante tecniche satellitari GNSS: dai sistemi globali ai servizi di posizionamento NRTK, pp. 35-36.

I sistemi GNSS sono sistemi versatili che permettono svariate applicazioni in diversi ambiti, grazie ad approcci e metodologie differenti sia in termini di strumentazione, sia per quanto riguarda le precisioni raggiunte<sup>23</sup>.

“Utilizzando ricevitori GNSS di classe geodetica ed approcci di calcolo differenziati basati sulle osservabili di fase è possibile, anche in tempo reale, raggiungere affidabilmente precisioni nell’ordine di pochi centimetri, mantenendo un ottimo livello di produttività. Per questi motivi, il rilievo del litorale, nelle zone di spiaggia emersa e sommersa, si esegue generalmente utilizzando strumenti GNSS (accoppiati a un ecoscandaglio nel caso di spiaggia sommersa) lungo sezioni perpendicolari e parallele alla costa”<sup>24</sup>.

#### **4.1.Rilievo della spiaggia emersa**

Il rilievo della spiaggia emersa generalmente viene effettuato utilizzando una delle due modalità:

- RTK (*real time kinematic*), che rappresenta un’evoluzione del posizionamento cinematico post-processato;
- NRTK (*network real time kinematic*), che rappresenta, invece, un’evoluzione dell’RTK.

##### **4.1.1 RTK**

Il rilievo in modalità RTK prevede l’acquisizione dei dati in tempo reale, direttamente in campagna. L’RTK richiede una coppia di ricevitori (*Master* e *Rover*) e un sistema di trasmissione dati (radio modem, cellulari GSM, GPRS) per l’invio dei dati dal *Master* al *Rover*. Così facendo è possibile ottenere la posizione del ricevitore direttamente in campagna (modalità *Real Time Kinematic*)<sup>25</sup>. I dati sono inviati dal *Master*, che rimane fisso su un punto a coordinate note per tutta la

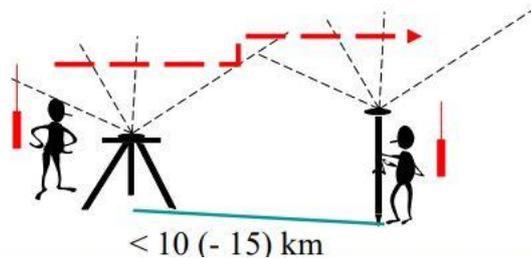
---

<sup>23</sup> Vedi Gandolfi Stefano, Appunti sul sistema GNSS, a.a 2008/2009.

<sup>24</sup> Vedi Vecchi Enrica, 2018, Monitoraggio del litorale emiliano-romagnolo con l’utilizzo di misure topo-batimetriche: metodi, prodotti e risultati, pp.23-24.

<sup>25</sup> Vedi Barbarella Maurizio, 2009, Presentazione delle reti di stazioni permanenti GNSS dell’Emilia-Romagna.

sessione di misure, al *Rover*, che invece si trova in campagna (posizionamento relativo). Il *Rover* elabora i dati e calcola la base, vale a dire il vettore che rappresenta la distanza tra *Master* e *Rover*.



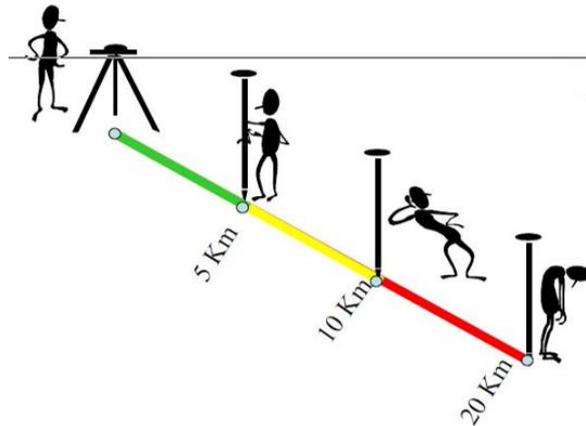
**Figura 20:** invio dei dati (freccia in rosso) dal *Master* al *Rover*, che li elabora calcolando la base (linea turchese).

Si tratta di un metodo che utilizza l'osservabile di fase. Nel momento in cui sia necessario calcolare un numero elevato di basi, risulta una modalità di rilievo più veloce rispetto ad un rilievo di tipo statico. Ma oltre alla riduzione del tempo di misura e di calcolo, con il rilievo RTK si ottengono altri vantaggi:

- sapere già al momento del rilievo se questo è riuscito correttamente oppure no;
- conoscere le coordinate del *Rover* direttamente in campagna, e quindi ad esempio poter effettuare un tracciamento, ovvero andare ad occupare punti del terreno dei quali si conoscono le coordinate;
- conoscere le coordinate nel sistema voluto, che coincide con quello in cui sono note le coordinate del *Master*.

Ovviamente per poter fare questo, deve funzionare il collegamento tra i due ricevitori. Ma non avendo ridondanza di misure (a meno di non rioccupare il punto e fare una nuova misura) non ci si accorge di eventuali errori. Quindi per avere delle precisioni centimetriche, sia in planimetria che in altimetria, (come per il rilievo cinematico post-processato) bisogna limitare la distanza tra i due ricevitori entro i 10-15 km.<sup>26</sup> All'aumentare della distanza tra i ricevitori, le precisioni tendono a diminuire.

<sup>26</sup> Vedi Barbarella Maurizio, 2009, Presentazione delle reti di stazioni permanenti GNSS dell'Emilia-Romagna.



**Figura 21:** esempio di come la distanza influisce sulle precisioni centimetriche.

“Prima di eseguire il rilievo vero e proprio, ossia prima di cominciare a spostare il *Rover*, è necessario che il sistema calcoli un set iniziale di ambiguità di fase su tutti i satelliti in vista, così da avere come uniche incognite proprio quelle di posizione. A tale scopo, esistono oggi algoritmi OTF, *On The Fly*, che, utilizzando tutti le osservabili acquisite, possono inizializzare il rilievo anche in movimento e in maniera molto rapida. Gli algoritmi OTF risultano particolarmente efficienti se sono visibili più di 4 satelliti e se l’acquisizione è poco disturbata; essi soffrono però a causa di frequenti interruzioni del segnale, e in questi casi non danno garanzie di successo. Nel caso di perdita del segnale, le ambiguità cambiano e bisogna dunque provvedere ad una nuova inizializzazione”<sup>27</sup>.

Le ambiguità possono essere fissate a numeri interi (*fixed*) o a numeri reali (*float*)<sup>28</sup>. Nel primo caso si hanno precisioni pari a 1-5 cm, nel secondo caso pari a 15-20 cm. L’utilizzo di questa tecnologia sulle spiagge si mostra particolarmente adatto in quanto le zone in oggetto risultano generalmente prive di ostacoli che potrebbero disturbare il segnale. Qualora, invece, si volesse rilevare in modalità RTK una zona vasta, occorrerebbe disporre di più *Master* a distanza opportuna (circa 20 km). In questo caso l’utente in campagna dovrebbe riferirsi al

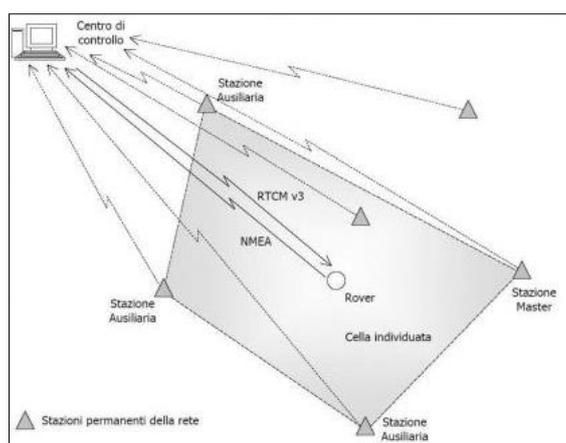
<sup>27</sup> Vedi Vecchi Enrica, 2018, Monitoraggio del litorale emiliano-romagnolo con l’utilizzo di misure topo-batimetriche: metodi, prodotti e risultati, pp.25.

<sup>28</sup> Vedi Gandolfi Stefano, Appunti sul sistema GNSS, a.a 2008/2009.

*Master* più vicino. Ma tenendo conto dei limiti di portata del singolo *Master* (circa 400 km<sup>2</sup>), per avere alta precisione, ci sarebbe bisogno di un elevato numero di stazioni per coprire l'intera area<sup>29</sup>. In questi casi, essendo l'RTK poco performante, si predilige la modalità NRTK.

#### 4.1.2 NRTK

L'NRTK è una rete costituita da stazioni permanenti, vale a dire ricevitori attivi 24h/24.



**Figura 22:** esempio di rete NRTK.

Si tratta di ricevitori a doppia frequenza di cui sono note le coordinate in un determinato sistema di riferimento. Il loro compito è quello di inviare ad un centro di controllo le misure di codice e di fase acquisite. Al fine di poter calcolare un modello in grado di descrivere gli errori sistematici relativi ad una data area in un certo istante, il centro di controllo interpola gli errori (*bias*) che gli sono stati inviati da ogni ricevitore. Il modello di correzione spaziale così ottenuto viene poi distribuito agli utenti, che possono operare all'interno dell'area coperta dalla rete, ricevendo i dati in tempo reale. Il servizio è però a pagamento. Le correzioni spaziali da applicare al proprio ricevitore vengono calibrate dal centro di controllo e inviate agli utenti secondo

<sup>29</sup> Vedi Barbarella Maurizio, 2009, Presentazione delle reti di stazioni permanenti GNSS dell'Emilia-Romagna.

diverse modalità: VRS, FKP, MAC. Quindi, utilizzando tali correzioni, viene determinata in tempo reale la posizione del proprio ricevitore. Il tutto espresso nello stesso sistema di riferimento delle stazioni permanenti. La distanza massima tra stazione permanente e ricevitore in campagna può, in questo caso, raggiungere anche i 60 km. Tale metodo, però, non è in grado di assicurare elevate efficienze all'esterno della rete.

Ad oggi, in Italia, sono presenti oltre 100 stazioni permanenti, gestite da enti differenti quali case produttrici, Università, Istituti di Ricerca, Istituti tecnici per geometri, Amministrazioni Pubbliche e studi privati.<sup>30</sup>

#### **4.2 Rilievo della spiaggia sommersa**

Il rilievo della spiaggia sommersa viene eseguito utilizzando un ricevitore GNSS in accoppiamento ad un ecoscandaglio di precisione. Gli ecoscandagli vengono classificati secondo due principali tipologie:

- ecoscandaglio a fascio acustico singolo (*singlebeam*), consigliabile per aree non molto ampie, in quanto lavora in modo puntiforme e necessita di interpolazione per i punti non rilevati;
- ecoscandaglio a multi-fascio (*multibeam*), consigliabile per aree ampie. Misura le quote batimetriche in modo diretto. E si utilizza dove è necessario calcolare con maggior precisione le variazioni volumetriche del deposito sedimentario<sup>31</sup>.

La scelta di uno dei due sistemi dipende dalla risoluzione richiesta, dalle dimensioni dell'area che si vuole indagare, dal tempo a disposizione per l'esecuzione dei rilievi batimetrici e ovviamente dalla disponibilità economica per l'esecuzione del rilievo batimetrico stesso.

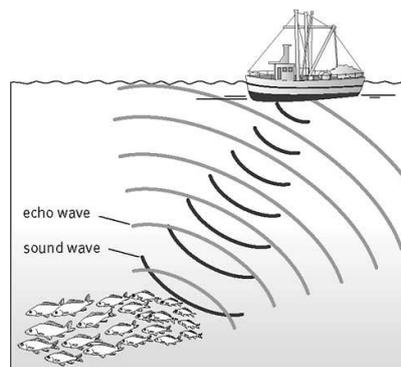
L'ecoscandaglio è un particolare tipo di strumento che misura la profondità del fondale trasmettendo impulsi sonori. Tale strumento si compone di un monitor a colori, o in bianco e nero per i modelli più economici, di un trasduttore e di un'antenna GPS. Il trasduttore non è

---

<sup>30</sup> Vedi Vecchi Enrica, 2018, Monitoraggio del litorale emiliano-romagnolo con l'utilizzo di misure topo-batimetriche: metodi, prodotti e risultati, pp. 26.

<sup>31</sup> Vedi articolo di Rossi Lorenzo, Rilievi batimetrici, alla pagina web: [www.geocoste.com](http://www.geocoste.com).

altro che una sonda che invia segnali sonar in acqua. Se in acqua non vi è nulla, i segnali sonar continuano la loro corsa e si disperdono. Se incontrano un oggetto, si “bloccano” per così dire, rimbalzano e ritornano alla sonda. La sonda li invia al dispositivo dando la possibilità di sapere cosa c'è sul fondo. Il funzionamento è reso possibile dall'utilizzo della stessa tecnologia del Sonar (*Sound Navigation And Ranging*), che usa la tecnica dell'impulso sonoro riflesso, lo stesso metodo usato nel Radar. L'intervallo di tempo tra l'emissione e il ritorno dell'impulso sonoro (scafo-fondo-scafo) viene registrato e diviso per due, ottenendo così la profondità dell'acqua in quel preciso momento. La distanza dalla chiglia al fondo è misurata moltiplicando la metà del tempo impiegato dall'impulso (uscita e ritorno) con la velocità del suono nell'acqua, che è di circa 1,5 km/s.



**Figura 23:** onda sonora nave-fondo-nave.

Per applicazioni precise con l'ecoscandaglio, la velocità del suono deve essere misurata tramite una opportuna sonda. Nella maggior parte delle mappe delle profondità oceaniche viene utilizzata una velocità del suono media o standard, dal momento che, date le grandi profondità, non è necessario calcolare con precisione ogni fattore. Tuttavia, quando è richiesta una maggiore precisione possono essere applicate particolari correzioni stagionali. Per misurazioni della profondità particolarmente precise, di solito richieste solo a scopo specifico o per indagini scientifiche speciali, può essere usato un particolare sensore per misurare la temperatura dell'acqua, la

pressione e la salinità. Questi fattori sono utilizzati per calcolare l'attuale velocità del suono nella colonna d'acqua sottostante<sup>32</sup>.

Ad inizio e fine rilievo si procede alla taratura dell'ecoscandaglio, imponendo sul software di navigazione la correzione di un eventuale errore. La regolazione della velocità strumentale in base alla velocità degli ultrasuoni in acqua viene effettuata tramite il metodo del "Bar Check" (misurazione della profondità di immersione di una barra o disco metallico calato al di sotto del trasduttore e sospeso ad un cavo graduato).<sup>33</sup>

#### **4.2.1 Ecoscandaglio *Singlebeam***

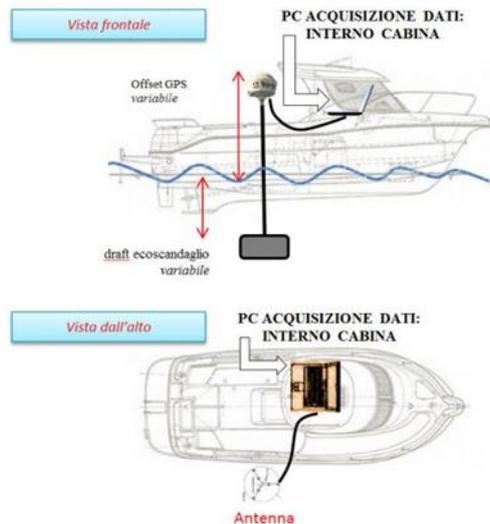
L'ecoscandaglio *singlebeam* è uno strumento idrografico multifrequenza (210/40 KhZ), operativo sino a un battente d'acqua minimo di 70 cm. Le precisioni raggiunte sono dell'ordine di 1-2 cm. Il cono di emissione dello strumento è solitamente molto stretto per garantire una elevata risoluzione geometrica. Si tratta di un sistema molto pratico, flessibile, che risente poco di falsi echi dovuti a torbidità e turbolenze in acqua.<sup>34</sup> Operativamente, si tratta di un rilievo in formato digitale. I dati vengono acquisiti dal computer a bordo dell'imbarcazione di piccole dimensioni, che si muove lentamente e a velocità costante lungo le sezioni di scandagliamento. Il tutto in condizioni di mare calmo e in assenza di vento.

---

<sup>32</sup> Vedi pagina web: <http://www.wiki/ecoscandaglio.org/>

<sup>33</sup> Vedi articolo di Rossi Lorenzo, Rilievi batimetrici, alla pagina web: [www.geocoste.com](http://www.geocoste.com).

<sup>34</sup> Vedi pagina web: <http://www.idrogeotop.it/rilievi.batimetrici.html>.



**Figura 24:** trasmissione dati al computer di bordo.<sup>35</sup>

Le sezioni seguite durante il rilievo, in genere, sono ortogonali alla costa. Ulteriori rotte perpendicolari alle precedenti servono per controllo o per permettere di osservare particolari andamenti (ad esempio in prossimità di eventuali opere rigide di difesa). L'obiettivo è quello di avvicinarsi il più possibile alla riva.



**Figura 25:** esempio dell'andamento di rotta di navigazione.

L'ecoscandaglio in genere viene posizionato in asse al ricevitore. In alternativa, si calcolano gli *off-set* dello strumento per garantire congruenza tra le misure di profondità e quelle planimetriche. Il

<sup>35</sup> Vedi pagina web: <http://www.ato3campania.it/>

sistema di acquisizione dei dati avviene in modo automatico-digitale, con posizionamento dell'imbarcazione in tempo reale, tramite tecnologia GNSS. La correzione delle coordinate avviene via radio-modem.<sup>36</sup>.

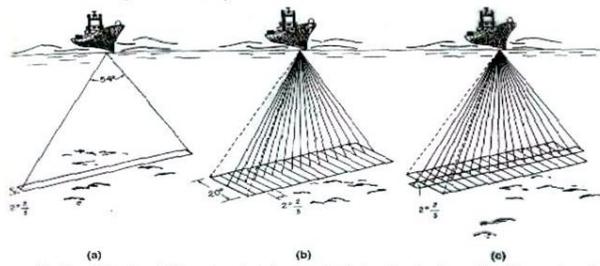
#### **4.2.2 Ecoscandaglio Multibeam**

Questa tecnica, molto sofisticata, permette l'esecuzione di rilievi topobatimetrici in modo continuo, essendo basata sull'uso di un elevato numero di *beam* (impulsi) contemporaneamente. Solitamente i rilievi vengono effettuati scandagliando lungo transetti paralleli che prevedono una sovrapposizione dei dati delle differenti "spazzate". Il fascio emesso ha un'apertura angolare fino a 101 gradi e il suo campo di indagine è generalmente pari a 2-3 volte l'altezza della colonna d'acqua. Quanto descritto, risulta facilmente comprensibile se si considera, ad esempio, che su un fondale di circa 100 m, una singola "spazzata" di *multibeam* riesce a mappare da 200 a 300 m di fondale marino, rilevando anche tutto ciò che affiora su di esso, come affioramenti rocciosi, relitti, condotte sottomarine, ecc. (un risultato impensabile con il *singlebeam*). I dati dei rilievi batimetrici così effettuati raggiungono precisioni dell'ordine del cm<sup>37</sup>. Anche in questo caso, la navigazione viene assistita da un GNSS di precisione in modalità RTK. E ciò permette di eseguire un controllo di qualità del dato direttamente in campagna, senza correre il rischio di dover ripetere parti del rilievo. La configurazione prevede una stazione GNSS *Master*, a terra su un punto a coordinate note e il GNSS *Rover*, installato sull'imbarcazione.

---

<sup>36</sup> Vedi articolo di Rossi Lorenzo, Rilievi batimetrici, alla pagina web: [www.geocoste.com](http://www.geocoste.com).

<sup>37</sup> Vedi la pagina web <http://geonautics-srl.com/>.



**Figura 26:** (a) fascio trasmesso, (b) strips di ricezione, (c) intersezione tra i due precedenti, che determina l'area di fondale coperta realmente.

“Prima di procedere al rilievo vero e proprio, è necessaria una lunga fase di calibrazione dei vari strumenti a bordo e di calcolo degli off-set, che deve essere svolta a imbarcazione ferma. È necessario che ad ogni istante il fascio emesso e ricevuto dal trasduttore sia adeguatamente posizionato nel sistema di riferimento utilizzato per i rilievi. Caricando il file relativo al progetto del rilievo nel sistema di navigazione, l'imbarcazione può seguire le rotte previste dal Piano di Monitoraggio, viaggiando a una velocità consigliata di al massimo 4 nodi. Disponendo dei profili della velocità del suono lungo la colonna d'acqua, ottenuti mediante una sonda SVP, il sistema è in grado di generare adeguatamente i fasci e di compensare l'effetto di riflessione dei raggi acustici. Una sonda SVS montata sul trasduttore *multibeam* esegue invece un rilievo, in continuo e in tempo reale, della velocità del suono in acqua alla testata del sistema. Come per il sistema *singlebeam*, i dati ottenuti da queste due sonde permettono di ottimizzare l'accuratezza del rilievo e sono utilizzati anche in fase di calibrazione.”<sup>38</sup>

Inoltre, per garantire l'accuratezza potenziale dello strumento, bisogna che l'imbarcazione sia dotata di sensori di moto e di una girobussola. I primi per compensare gli effetti di rollio e beccheggio, la seconda per correggere la direzione. Nel caso del *singlebeam* questi fattori risultano trascurabili se si lavora in condizioni di mare calmo. A rilievo ultimato, i dati acquisiti vengono inviati, elaborati e registrati in formato

<sup>38</sup> Vedi Vecchi Enrica, 2018, Monitoraggio del litorale emiliano-romagnolo con l'utilizzo di misure topo-batimetriche: metodi, prodotti e risultati, pp. 33.

digitale. Il software sul computer di bordo consente quindi di visualizzare i dati ma anche di correggere eventuali errori, quali la calibrazione dei trasduttori, il calcolo della velocità del suono lungo la colonna d'acqua, gli offset strumentali e le condizioni meteorologiche.

## 5. Metodi di elaborazione

L'ambiente costiero è un sistema complesso in continua evoluzione, in cui si alternano fasi di erosione e di deposito di materiale. Nel momento in cui la prima fase prevale sulla seconda si ha il fenomeno dell'erosione costiera, che si manifesta con l'arretramento della linea di costa, la perdita di sedimento della spiaggia e l'abbassamento di quota della stessa. Il monitoraggio, effettuato mediante la realizzazione di periodiche campagne di rilievo topo-batimetrico, permette di tenere sotto controllo tali fenomeni. Operativamente, il primo passo consiste nell'esecuzione del rilievo nella zona di interesse, sia sulla spiaggia emersa che su quella sommersa. Il passo successivo, invece, prevede l'acquisizione dei dati e la loro elaborazione. Alla fine, i risultati ottenuti, a seconda del *software* utilizzato, si analizzano sotto forma di modello digitale del terreno (DTM), profili di spiaggia e volume accumulato o eroso. A lavoro ultimato, considerando tutte queste informazioni, è possibile valutare lo stato del litorale.

### 5.1 Software utilizzati

Per elaborare i dati territoriali sono stati utilizzati principalmente due *software*: Qgis 3.6<sup>39</sup> e Surfer 14<sup>40</sup>. L'analisi dei punti rilevati in Qgis è la prima operazione da eseguire, al fine di eliminare punti anomali (*spike*) o punti rilevati sulle opere di difesa. Si tratta di un'operazione manuale necessaria per evitare possibili errori di interpretazione nelle fasi successive. Così facendo, non si falsano i risultati ma si migliora l'accuratezza delle elaborazioni successive. Il confronto tra rilievi eseguiti sulla stessa area in tempi diversi è possibile solo se, attraverso le modifiche necessarie, i DTM relativi ai due rilievi si rendono paragonabili. Infatti, calcolare i quantitativi di sabbia accumulata o erosa, vuol dire calcolare la differenza tra due mappe (DTM) aventi gli stessi limiti spaziali. Le mappe in questione sono

---

<sup>39</sup> Scaricabile gratuitamente alla pagina web [www.qgis.org](http://www.qgis.org).

<sup>40</sup> Surfer – Golden Software, <https://www.goldensoftware.com/products/Surfer>.

mappe topo-batimetriche ottenute importando su Surfer lo *shapefile* dei punti rilevati precedentemente modificato con QGIS. Quest'ultima operazione prevede la definizione dei limiti spaziali e la scelta della metodologia di elaborazione più adatta. A partire dalle batimetrie aventi gli stessi limiti spaziali, è poi possibile calcolare le differenze per ottenere le mappe di accumulo-erosione, dette anche mappe di confronto. In ultima analisi rimane l'estrazione dei profili di spiaggia. Quindi, le mappe di confronto si importano nuovamente su Qgis, dove, utilizzando un apposito *Plugin (Terrain Profile)*, si estrapola il profilo di spiaggia in corrispondenza della sezione di interesse all'interno dell'area di studio. Successivamente, dai profili, si calcolano le pendenze di spiaggia a partire dalle coordinate dei punti in questione.

### **5.1.1 Qgis**

Qgis nasce nel 2002 da un gruppo di volontari, con lo scopo di fornire un visualizzatore di dati geografici facile e veloce. Con l'evoluzione del progetto, emerse l'idea di usarlo come *Graphical User Interface (GUI)*. Successivamente, il *software* è stato ampliato tramite estensioni (*Plugins*) che svolgono funzioni specifiche. Diversamente da altri programmi Gis piuttosto complicati, Qgis ha un'interfaccia grafica intuitiva che ne facilita molto l'utilizzo. Infatti, vi è un'unica finestra, in cui si trovano comandi, mappe e *layers*, ed è possibile gestire dati in formati differenti (*raster*, vettori, servizi web, ecc.). Qgis è un programma completamente Open Source, scaricabile gratuitamente dal sito ufficiale ([www.qgis.org](http://www.qgis.org)). Ad oggi, l'ultima versione stabile è la 3.10. Le versioni con il numero dispari sono considerate "di lavoro", mentre quelle con il numero pari rappresentano avanzamenti di versione o riportano importanti migliorie.

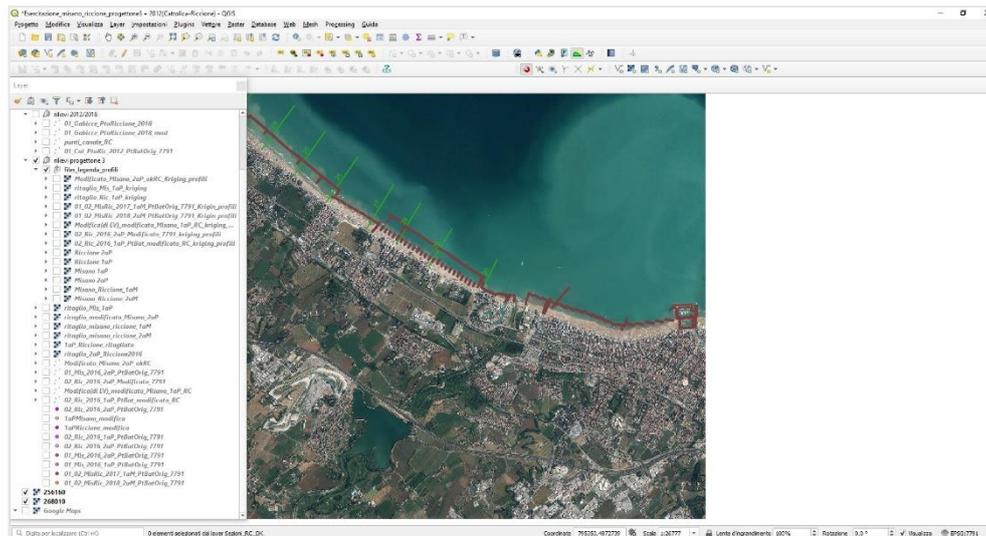


Figura 27: schermata del software Qgis.

Qgis è un programma che ha numerose funzionalità, tra cui quella di visualizzare, analizzare, incrociare, interrogare e stampare mappe georeferenziate, a diverse scale, sia vettoriali che *raster*. Una mappa vettoriale consiste in una serie di oggetti (punti, linee o poligoni) a cui possono essere associati dati diversi, in forma tabellare. Ogni mappa comprende un solo tipo di geometria e ad ogni geometria corrisponde un'immagine a cui possono essere attribuite caratteristiche di colore o di effetti. Poiché le immagini vettoriali sono costituite da forme geometriche è possibile ingrandirle praticamente all'infinito, senza perdere minimamente risoluzione, dato che le stesse forme geometriche hanno alla base delle equazioni matematiche. Una mappa *raster*, invece, è un'immagine composta da una griglia di punti detti *pixel*, di forma quadrata. Ogni *pixel* possiede determinate informazioni di colore che nell'insieme creano una certa immagine. La proprietà più importante di un'immagine *raster* è la risoluzione, che è data dal numero di pixel contenuti in una certa unità di misura. Come standard si utilizzano il pollice inglese (2,54 cm) e il rapporto *Dot Per Inch (DPI)*, cioè punti per pollice. Più alto è il numero dato da questo rapporto e più alta è la risoluzione dell'immagine, quindi la qualità della stessa. Una risoluzione di 300 dpi è considerata lo standard di qualità per una buona stampa, mentre per lo schermo sono sufficienti 72 dpi

per ottenere una buona qualità visiva. Creando un nuovo progetto, è necessario impostare il sistema di riferimento a cui faranno capo tutte le mappe utilizzate. Qgis apre e visualizza numerosi formati vettoriali, ma può modificare solo due tipi di *file*, i cosiddetti *shapefile* e i *file* creati tramite il database *SQLite* (o ancora meglio la sua versione "spaziale" *Spatialite*). Si chiama *shapefile* un tipo di mappa vettoriale in formato *shape*, che è composta da un minimo di tre, ad un massimo di sei *file*:

- *file.dbf*, che contiene la tabella associata alle geometrie;
- *file.prj*, in cui è registrato il sistema di coordinate;
- *file.shx*, che contiene l'estensione della mappa nello spazio;
- *file.shp*, in cui sono registrate le geometrie della mappa;
- *file.qpj*, *file.sbx*, *file.sbn*, ecc., che sono altri file creati dall'applicazione con cui è stato salvato lo *shapefile*.

Altri formati vettoriali comuni (*dxf*, *gpx*, *file.TAB* di *Mapinfo*, *file KML* di *GoogleEarth*, ecc.) possono essere aperti da *Qgis*, in modalità di sola lettura, ed eventualmente convertiti in fase successiva. Inoltre, è bene sapere che per consentire a *Qgis* di leggere uno *shapefile*, tutti i *file* che lo compongono devono essere salvati nella medesima cartella e devono avere lo stesso nome (naturalmente mantenendo estensione differente).

### 5.1.2 Surfer

*Surfer* è un *software* utilizzato per creare mappe di qualità a partire da informazioni geografiche. I dati sparsi (*scattered*), vengono facilmente trasformati in *contour* (curve di livello) e mappe di superficie sia 2D, che 3D. A questi grafici possono essere sovrapposti altri dati in riferimento ai precedenti. Infatti, il *software* consente di aggiungere più livelli alla stessa mappa che, associata ad oggetti e ad annotazioni di testo, può essere personalizzata. Si tratta di un programma basato su un sistema di griglia che interpolando i dati XYZ con spaziatura irregolare, li fa diventare delle griglie con spaziatura regolare. Le modalità di interpolazione sono numerose e ognuna di esse fornisce interpretazioni differenti dei dati associati. Il risultato finale è un

modello digitale del terreno. I *file* della griglia possono essere modificati, combinati, filtrati, suddivisi, interrogati e trasformati matematicamente. Surfer può importare differenti tipi di formati mappe. Quelli base (*base maps*) supportati sono: *dxg, bln, wmf, tif, pcx, lgo, bmp, bna, gsb, plt, clp, tga, pcx*. Inoltre, il programma offre il completo controllo delle misurazioni in scala e fornisce la possibilità di calcolare volumi ed aree di superficie.

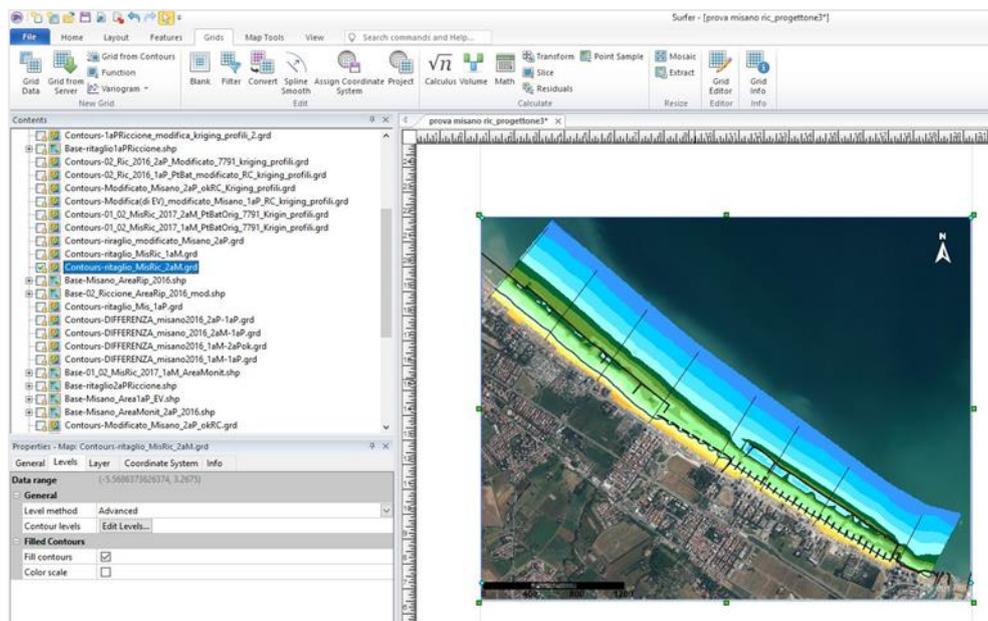


Figura 28: schermata del software Surfer.

## 5.2 Trattamento dei dati

Tramite i *software* sopracitati, a partire da dati sparsi, è stato possibile creare i DTM (modelli digitali del terreno), vale a dire delle rappresentazioni relative alla distribuzione delle quote sul territorio (anche noti come DEM, dall'inglese *Digital Elevation Model*).

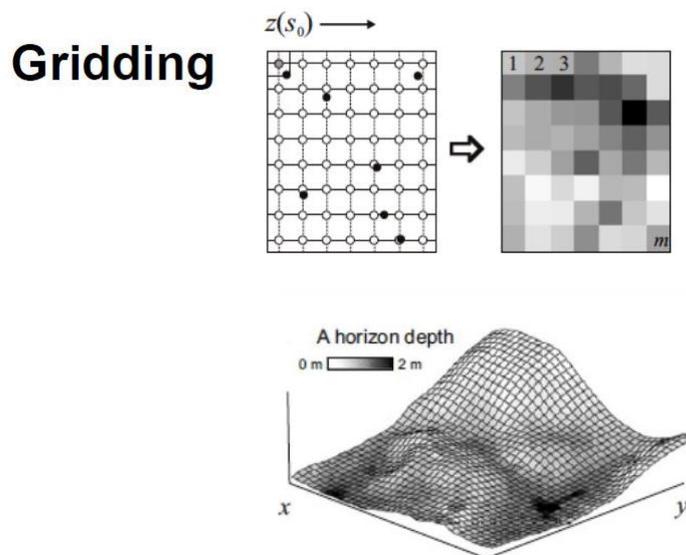
I momenti di elaborazione di un DEM possono essere schematizzati in varie fasi:

- acquisizione dei dati e trasformazione degli stessi in un unico sistema di riferimento;
- definizione del modello ed impiego di algoritmi di interpolazione;
- presentazione dei dati elaborati.

La prima fase è certamente quella più impegnativa dal punto di vista tecnico ed economico. La qualità del DEM, infatti, dipende soprattutto dall'accuratezza, dalla densità e dalla distribuzione dei dati acquisiti. Inoltre, avendo a disposizione una serie di punti del terreno, noti nelle coordinate x,y,z, la costruzione di un DEM può avvenire in base a due schemi strutturali fondamentali: TIN (rete triangolare irregolare) o *Grid* (griglia di nodi regolari ed equidistanti). L'acquisizione dei dati considerati all'interno di questo studio, effettuata da Arpae, è stata organizzata in diversi *shapefile*. Questi ultimi, modificati su Qgis per eliminare eventuali punti anomali, sono poi stati elaborati con Surfer per realizzare le mappe topo-batimetriche. Si inizia dai punti quotati, ottenuti dai rilievi, e si determinano le quote nei nodi del *grid*, ricorrendo a metodi di interpolazione di tipo deterministico o stocastico: i primi basati su formule matematiche, i secondi anche su considerazioni statistiche. Pur operando sullo stesso set di dati, in funzione del metodo utilizzato, i risultati cambiano. Quindi la scelta del metodo diviene fondamentale in quanto in grado di influenzare la qualità e l'accuratezza delle successive analisi. La modalità e lo schema di esecuzione dei rilievi influenza la scelta del metodo. Tra i metodi disponibili, ne sono stati usati tre: TIN, *Nearest Neighbor* e *Kriging*.

### 5.2.1 Grid

Il Grid è una matrice di celle ognuna delle quali può contenere un valore descrittivo di una proprietà o caratteristica. Nel caso di DEM ogni cella contiene il valore di elevazione, considerato localizzato nel centroide della cella stessa. Con la rappresentazione del *grid*, i *pixel* si deformano per garantire una superficie continua; i punti intorno al centroide hanno solitamente valori di quota differenti da esso. Se si dispone di punti quotati noti nelle tre coordinate x,y,z, per la costruzione del *grid* occorre calcolare le quote di tutti i *pixel* di una matrice *raster* che si estende sull'area definita dal *dataset* di partenza. I punti quotati devono essere distribuiti abbastanza uniformemente su tutta la superficie di cui si vuole ottenere il modello.



**Figura 29:** esempio dell'applicazione dell'algoritmo che genera una mappa di tipo *raster*.<sup>41</sup>

Le tecniche per la creazione di una "*gridded surface*" sono riconducibili ad operazioni di interpolazione in grado di assicurare che i valori delle altezze relativi a posizioni prossime siano più simili tra loro di quelli corrispondenti a posizioni lontane: in altri termini deve essere garantito il rispetto della prima legge della geografia in base alla quale "tutto è correlato con tutto, ma le cose più vicine sono più correlate delle cose lontane" (Tobler 1978). La determinazione, per ciascun nodo, del valore  $z$  avviene tramite l'applicazione di metodi di interpolazione che possono essere di tipo deterministico o stocastico. In base alle caratteristiche del terreno, alla qualità dei dati a disposizione e al livello di precisione che si vuol conseguire, diviene fondamentale la definizione del passo della griglia alla base del modello: essa deve essere sufficientemente densa da consentire una descrizione accurata dell'andamento del terreno, ma al tempo stesso non può essere troppo densa per evitare problemi di gestione dei dati.

<sup>41</sup> Vedi pagina web <http://it.linkedin.com/in/valerionoti>.

### 5.2.2 TIN (Triangular Irregular Network)

Il TIN è una metodologia di interpolazione vettoriale, molto utilizzata nella generazione dei DEM. Si tratta di una rete di triangoli adiacenti, non sovrapposti, calcolati a partire da punti irregolarmente spazati. In pratica, i punti, noti nelle coordinate  $x,y,z$  e distribuiti nello spazio, vengono congiunti da linee in modo da formare triangoli piani ed adiacenti. Questi, a loro volta, consentono di rappresentare con continuità la superficie del territorio. La maglia è pertanto irregolare e per stabilire le terne dei punti che costituiscono i singoli triangoli, si utilizzano algoritmi basati su proprietà geometriche. Nello specifico, il TIN viene costruito rispettando la regola di Delaunay: il cerchio che passa per i 3 vertici di un triangolo non contiene alcun altro vertice della rete triangolata. C'è un teorema che dimostra che comunque sia dato un insieme di punti su un piano esiste sempre almeno una triangolazione che verifica la regola di Delaunay.

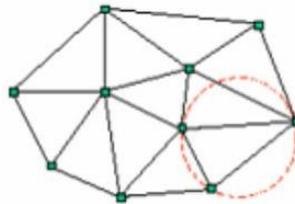


Figura 30: illustrazione della regola di Delaunay.<sup>42</sup>

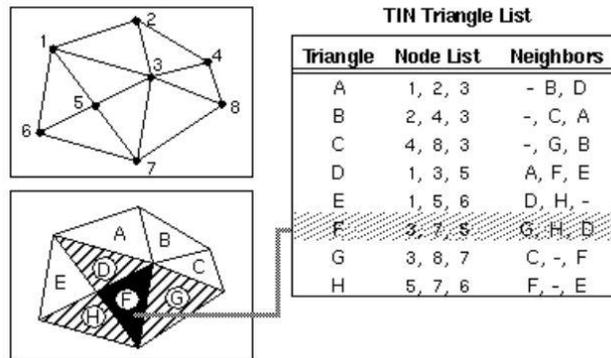
Il TIN risulta, quindi, costituito da nodi, lati, triangoli e relazioni topologiche. I nodi non vengono generati dal modello, ma sono derivati dai dati di *input*. Le facce triangolari del TIN rappresentano visivamente e concettualmente un triangolo orientato nello spazio. Inoltre, il valore di un punto interno ad un qualsiasi triangolo viene calcolato con interpolazione lineare dei vertici del triangolo. In particolare, si considera l'intersezione di una linea verticale passante per  $P$  con il TIN; le coordinate  $x, y, z$  di  $P$  devono soddisfare l'equazione del piano definito dai tre nodi del triangolo in cui ricade il punto in questione:

---

<sup>42</sup> Vedi pagina web <http://it.linkedin.com/in/valerionoti>.

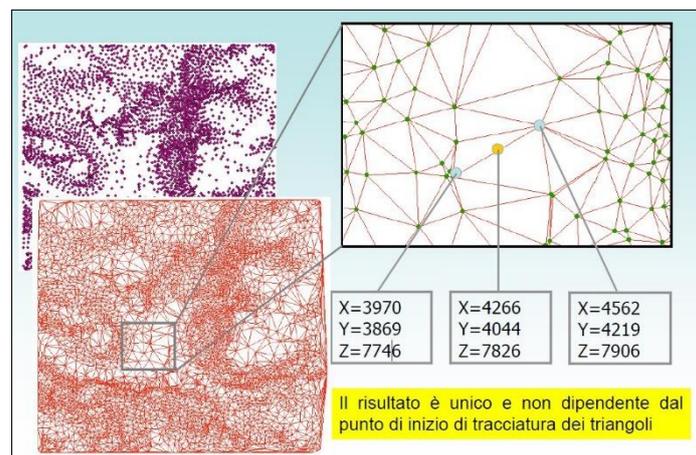
$$ax + by + cz + 1 = 0$$

I coefficienti a, b, c vengono determinati imponendo il passaggio del piano per i tre vertici; la z è ricavata sostituendo nell'equazione sopracitata i valori delle coordinate x,y del punto P. La dimensione dei triangoli dipende dalla configurazione dei dati di *input* (es. in zona pianeggiante, numero inferiore e maggiori dimensioni dei triangoli).



**Figura 31:** le faccette triangolari del TIN rappresentano visivamente e concettualmente un triangolo orientato nello spazio.<sup>43</sup>

Si tratta di un metodo esatto, per il quale i valori dei dati di *input* sono contenuti nel modello finale di *output* come vertici di triangoli.



**Figura 32:** la superficie di output ottenuta con il TIN contiene i dati di input<sup>44</sup>.

<sup>43</sup> Vedi pagina web <http://it.linkedin.com/in/valerionoti>.

<sup>44</sup> Vedi pagina web <http://it.linkedin.com/in/valerionoti>.

Bisogna però considerare che il TIN non fa nessuna misura dell'errore di predizione, che può presentare brusche variazioni al passaggio da un triangolo all'altro e che può mostrare artefatti (spesso inevitabili). Le superfici risultanti non sono lisce.

### 5.2.3 Nearest Neighbor

A ciascun nodo del *grid* viene attribuito il valore del punto più vicino ad esso, da cui deriva la denominazione (*Nearest neighbor*). Di conseguenza, la stessa quota può essere associata a più nodi e il modello risultante presenta zone pianeggianti, cioè con valore di elevazione costante. Il metodo è efficace quando i dati di partenza sono già distribuiti abbastanza uniformemente e presentano solo pochi valori mancanti, per cui viene agevolmente realizzato il riempimento di buchi presenti nel *dataset* iniziale. L'utente può però evitare di considerare aree prive di dati, escludendole dalla costruzione del *grid*: è sufficiente impostare la ricerca del punto più vicino all'interno di un *range* prefissato e limitato, per cui le aree senza dati non vengono interessate dalla realizzazione del modello.

### 5.2.4 Kriging

Il *Kriging* è un metodo di interpolazione di regressione di tipo stocastico, applicato nell'ambito dell'analisi spaziale (geostatistica). Esso permette di interpolare una grandezza nello spazio minimizzando l'errore quadratico medio. Il valore incognito in un punto viene calcolato con una media pesata dei valori noti. I pesi che vengono dati alle misure note, dipendono dalla relazione spaziale esistente tra i valori misurati nell'intorno del punto incognito. Per calcolare i pesi si usa il semivariogramma, un grafico che mette in relazione la distanza tra due punti e il valore di semivarianza tra le misure effettuate in questi due punti. Quindi, il semivariogramma esprime le differenze spaziali e quantitative di tutte le possibili coppie di punti misurati come una funzione della distanza tra i punti stessi. I valori del semivariogramma vengono calcolati mediante la formula:

$$y(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (z(x_i) - z(x_i + h))^2$$

Dove:

$y(h)$  = valore della semivarianza alla distanza  $h$ ;

$z$  = valore della variabile che si sta considerando;

$(x_i, x_i+h)$  = posizioni dei punti di ciascuna coppia;

$n$  = numero delle coppie dei punti separati da  $h$ .

Poiché nella fase di interpolazione il metodo prevede che i valori di semivarianza siano calcolati per qualunque distanza  $h$ , al variogramma sperimentale viene adattato un modello teorico, di tipo matematico, caratterizzato da due parametri: il *range* e il *sill*. Il primo è la distanza entro la quale le coppie di valori della grandezza in esame sono spazialmente correlate; il secondo è il valore di semivarianza corrispondente al range. Per la scelta dell'adattamento ottimale, si utilizza la *cross-validation*: si rimuove temporaneamente uno dei valori misurati e se ne effettua una stima basandosi sui rimanenti valori misurati. La differenza tra valore stimato e valore misurato è detta errore sperimentale di stima e deve essere il più possibile prossima a zero. Per determinare i valori nei punti non campionati vengono proposti differenti soluzioni, così da caratterizzare differenti metodi di *Kriging*, come *Ordinary Kriging* e *Universal Kriging* (Goovaerts, 1997).

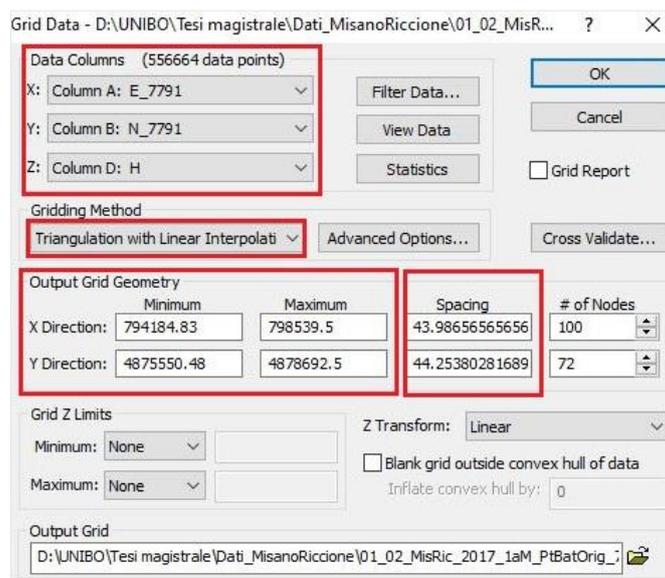
### 5.3 Elaborazioni prodotte

Qui di seguito un elenco delle varie tipologie di elaborati realizzati.

#### 5.3.1 Mappe topo-batimetriche

Le mappe topo-batimetriche, anche dette batimetrie, sono dei DEM realizzati utilizzando la funzione *Grid data* del software Surfer. Si tratta di un procedimento di interpolazione spaziale che, a partire da uno *shapefile* di punti rilevati, crea un *file grid* rappresentativo della superficie del terreno. Nel momento in cui viene avviata la procedura, bisogna scegliere alcuni parametri:

- le variabili da interpolare, in questo caso specifico le coordinate Est, Nord e quota ortometrica H;
- il metodo di interpolazione o *Gridding Method* che, per il caso in esame, è variato da TIN a *Nearest Neighbor* o anche *Kriging*, in base allo scopo e alla tipologia dei dati da elaborare;
- i limiti spaziali o *output grid geometry*, che devono essere uguali per tutti i *grid* da confrontare. Infatti, si analizzano i dati di rilievo della zona di interesse, si sceglie il rilievo con dimensione maggiore di quell'area e si ricercano in esso i valori numerici minimi e massimi delle coordinate X e Y. Tali valori si impostano come i confini della mappa da visualizzare per tutti i *grid* relativi allo stesso tratto di litorale;
- lo *spacing*, vale a dire la distanza tra i punti della griglia che verrà generata. Nel caso in questione, per effettuare i confronti, si è scelto di generare un punto ogni 10 m. In alcuni casi, al solo scopo illustrativo, è stato necessario aumentare la distanza a 20 m o diminuirla a 2 m;
- la modalità di visualizzazione del risultato che per il caso oggetto di studio è stato *contour* (mappa a isolinee).



**Figura 33:** schermata del software Surfer.

Ad elaborazione ultimata, a causa del procedimento di interpolazione, le mappe risultano imprecise per gli effetti di bordo nelle zone più esterne. Quindi, il *grid* viene ritagliato secondo un contorno scelto, tramite la funzione *Blank Outside* di Surfer. Ad ogni mappa viene poi associata una scala di colori: ciascun colore rappresenta un intervallo di valori di quota e quindi di profondità. A quota 0, in corrispondenza del confine tra la spiaggia emersa e sommersa, si ha la linea di riva. La linea di riva è l'indicatore tradizionalmente utilizzato per definire la tendenza evolutiva delle coste basse e sabbiose. Nelle spiagge naturali, un suo spostamento verso mare, o verso terra, rappresenta rispettivamente la tendenza della spiaggia all'accumulo o all'erosione. Nelle spiagge soggette ad interventi antropici questa interpretazione perde di validità, poiché avanzamenti della linea di riva possono attribuirsi ad interventi di ripascimento o alla costruzione di opere frangiflutto in corrispondenza di spiagge che in realtà tendono all'erosione. Per spiagge in naturale accumulo, invece, la linea di riva può apparire in arretramento a causa del prelievo di sedimento per il ripascimento di altre zone in perdita. L'indicatore della linea di riva, quindi, risente fortemente degli interventi di ripascimento e di prelievo, sempre più frequenti negli ultimi decenni.

Qui di seguito, la Tabella 3 sulle classi della linea di riva utilizzate come supporto per gli indicatori dell'erosione costiera.

Classe	Definizione
Avanzamento	Avanzamento della linea di riva superiore ai 10 m per tratti di litorale lunghi almeno 100 m
Stabile	Variazioni della linea di riva inferiori ai 10 m per tratti lunghi almeno 100 m
Arretramento	Arretramenti della linea di riva superiori ai 10 m per tratti di litorale lunghi almeno 100 m

**Tabella 3:** classi di variazione della linea di riva<sup>45</sup>.

<sup>45</sup> Vedi Arpa Emilia-Romagna, Annuario dei dati 2012, cap. 9c, pp 881-883.

Nel caso oggetto di studio, è stato eseguito il confronto tra linee di riva corrispondenti a rilievi successivi per poter determinare lo stato del litorale e l'efficacia degli interventi di ripascimento effettuati.

### **5.3.2 Mappe di accumulo-erosione**

Le mappe di accumulo-erosione sono mappe di confronto realizzate tramite la funzione *Math* del *software* Surfer. Tale funzione esegue delle operazioni matematiche tra due batimetrie relative a rilievi diversi. Si ottiene, dunque, un confronto tra due mappe, che può essere possibile se e solo se sono stati impostati gli stessi limiti e lo stesso *spacing*. Su queste mappe è possibile leggere le variazioni di quota tra due rilievi eseguiti a distanza di tempo. Anche a queste mappe viene attribuita una scala di colori. Nello specifico, le aree in cui le variazioni rientrano all'interno dei 10 cm, sia in positivo che in negativo, vengono visualizzate in colore bianco a rappresentare zone di equilibrio. Oltre i 10 cm, se le variazioni sono in negativo, troviamo i colori freddi (toni di blu, indaco e violetto) che rappresentano in certi casi la presenza di buche, mentre se le variazioni sono in positivo, troviamo i colori caldi (toni del rosso, arancione e giallo), che rappresentano invece zone di accumulo.

### **5.3.3 Calcolo dei volumi**

Il calcolo del volume viene effettuato tramite la funzione *Volume* del *software* Surfer (Figura 34). L'operazione si effettua sulla mappa di accumulo-erosione: si pone come superficie inferiore il piano  $z = 0$  e, utilizzando i poligoni precedentemente disegnati su QGIS, si sceglie l'area di ripascimento su cui calcolarlo. Il risultato dell'operazione è un *file* (Figura 35) contenente sia i dati di partenza, che i valori numerici dei quantitativi di sabbia accumulati, erosi e netti. Il *positive volume* rappresenta l'accumulo sopra la superficie  $z = 0$ , il *negative volume* costituisce il volume eroso sotto la superficie  $z = 0$  e il *net volume* rappresenta il valore netto ricavato per differenza dai primi due.

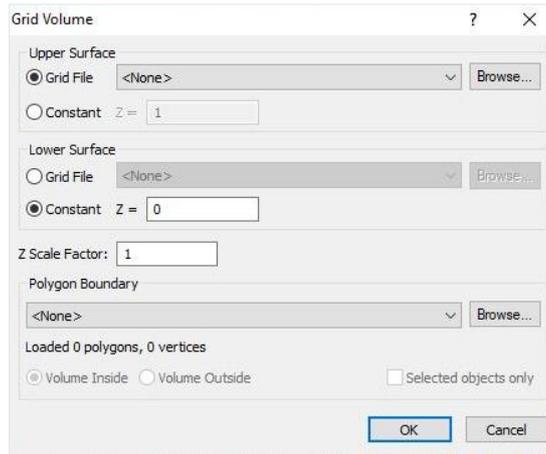


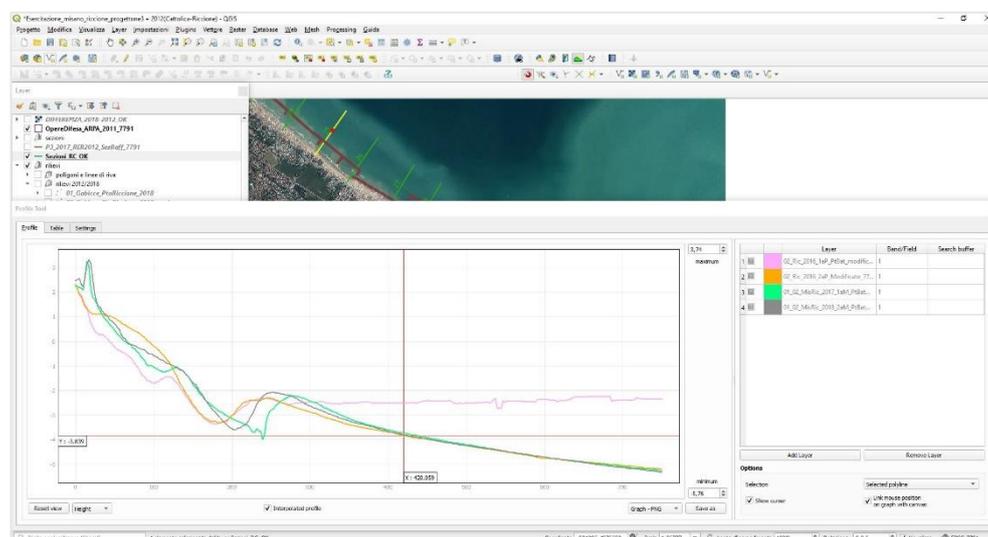
Figura 34: schermata del software Surfer.

Grid Volume Computations	
Wed Oct 2 12:43:51 2019	
<b>Upper Surface</b>	
Grid File Name:	D:\UNIBO\Tesi magistrale\Dati_MisanoRiccione\DIFFERENZA_misano2016_2aP-1aP.grd
Grid Size:	380 rows x 476 columns
X Minimum:	794355
X Maximum:	799105
X Spacing:	10
Y Minimum:	4875545
Y Maximum:	4879335
Y Spacing:	10
Z Minimum:	-3.7164101725276
Z Maximum:	3.5322310282956
<b>Lower Surface</b>	
Level Surface defined by Z = 0	
<b>Polygon Boundary</b>	
File Name:	D:\UNIBO\Tesi magistrale\Dati_MisanoRiccione\shp\aree\Misano_AreaRip_2016.shp
Number of Polygons:	1
Volume:	Inside
<b>Volumes</b>	
Z Scale Factor:	1
<b>Total Volumes by:</b>	
Trapezoidal Rule:	221842.40606699
Simpson's Rule:	221862.87871506
Simpson's 3/8 Rule:	221918.55064133
<b>Cut &amp; Fill Volumes</b>	
Positive Volume [Cut]:	227741.31798208
Negative Volume [Fill]:	5898.9118850853
Net Volume [Cut-Fill]:	221842.40606699
<b>Areas</b>	
<b>Planar Areas</b>	
Positive Planar Area [Cut]:	286175.58447613
Negative Planar Area [Fill]:	48524.415523873
Blanked Planar Area:	17667800
Total Planar Area:	18002500
<b>Surface Areas</b>	
Positive Surface Area [Cut]:	286388.27488242
Negative Surface Area [Fill]:	48692.021556443

Figura 35: esempio del risultato di calcolo di volume restituito dal software Surfer (Misano).

### 5.3.4 Estrazione dei profili e rappresentazione grafica

L'estrazione dei profili di spiaggia è stata effettuata utilizzando il *Plugin Terrain Profile* di Qgis. Per prima cosa è stato necessario caricare su tale *software* tutti i *file grid* dei rilievi precedentemente elaborati con Surfer. Poi, selezionando la sezione significativa (della Rete di Monitoraggio Regionale) sulla quale estrarre il profilo, il programma in automatico ha generato il grafico che permette di osservare l'andamento delle quote in funzione della distanza, nella zona di spiaggia emersa e sommersa. Per ogni sezione significativa sono stati estrapolati i profili dei rilievi di prima pianta, seconda pianta, primo monitoraggio e secondo monitoraggio.



**Figura 36:** esempio di estrapolazione dei profili effettuato sul software Qgis.

Ad elaborazione terminata i grafici così ottenuti sono stati caricati come immagini su un *Layout* di QGIS, insieme alla legenda e ai testi esplicativi necessari. Per ogni sezione sono stati sviluppati due *layout*: uno contenente i profili generati da *grid* ricavati da un'interpolazione *TIN*, l'altro contenente profili generati invece da *grid* ottenuti con metodo di interpolazione *Kriging*.

## 6. Misano Adriatico e Riccione

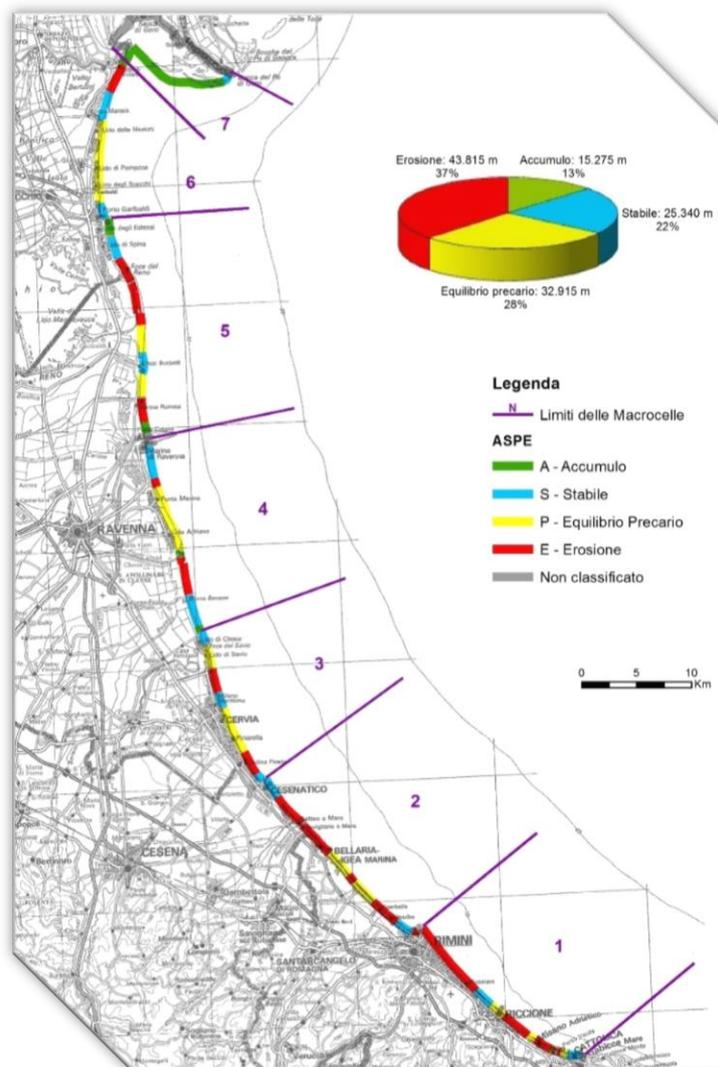
Il presente capitolo, dopo un primo inquadramento storico, descrive le due spiagge oggetto di studio: Misano Adriatico e Riccione.



Figura 37: posizione geografica di Misano e Riccione lungo costa.

Le spiagge di Misano Adriatico e Riccione appartengono ai 110 km di costa bassa e sabbiosa che caratterizza il litorale emiliano-romagnolo, e che la Regione, con il supporto tecnico-scientifico dell'Unità Mare Costa di ArpaER, monitora periodicamente. Il monitoraggio di queste aree avviene tramite campagne di misura topo-batimetriche, ovvero eseguendo rilievi che coinvolgono la zona di spiaggia emersa e sommersa. Le misure possono interessare sia l'area sottoposta a ripascimento che le zone limitrofe. Ai fini del monitoraggio, nel primo caso si effettuano più rilievi nella stessa area in momenti diversi: uno prima dell'intervento, uno subito dopo e altri con il passare del tempo. Nel secondo caso, invece, la Regione effettua un rilievo ogni sei anni, per valutare le naturali dinamiche del tratto e per vedere quali siano stati gli effetti dell'intervento sulle aree vicine. Per facilitare la gestione dei dati, l'intero tratto costiero è stato suddiviso in 7 Macrocelle. Con il termine "Macrocella" si identifica un tratto costiero caratterizzato da

ridotto scambio di sedimenti con le zone vicine, a causa della presenza di punti di convergenza del trasporto solido o di lunghi moli portuali che ostacolano lo spostamento delle particelle lungo la costa. Le Macrocelle, contraddistinte da un bilancio sedimentario proprio, sono considerate settori territoriali di riferimento indispensabili per l'analisi su grande scala delle perdite di sabbia a carico della spiaggia emersa e sommersa. Misano Adriatico e Riccione rientrano nella Macrocella 1, che si sviluppa dal Porto di Cattolica al Porto di Riccione (Figura 38).



**Figura 38:** suddivisione del litorale emiliano-romagnolo in Macrocelle, e relativa classificazione ASPE (<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/suolo-bacino/argomenti/difesa-della-costa/sicell-2006-2012/stato-litorale-sicell-06-12>).<sup>46</sup>

<sup>46</sup> Vedi Arpae.it: Mare e costa / Costa / Erosione costiera.

Nel tempo sono state effettuate diverse campagne di misura in questo tratto. Utilizzando i dati ottenuti da ognuna di esse è stato possibile quantificare i volumi di sabbia persi o accumulati, valutare il tasso di erosione costiera ed estrapolare i profili di spiaggia.

Nel 1983, per la misura del profilo della spiaggia, emersa e sommersa del litorale emiliano-romagnolo, è stata istituita la rete regionale topo-batimetrica. La rete di allora era costituita da 150 profili topo-batimetrici distribuiti lungo sezioni perpendicolari alla costa, dalla zona più alta della spiaggia emersa al mare, oltre la profondità di chiusura. La più recente campagna di misura si è svolta nel 2018 (sesta campagna topo-batimetrica). Attualmente la rete topo-batimetrica è costituita da:

- 251 sezioni perpendicolari alla costa, che si sviluppano fino alla batimetrica dei 6-10 m;
- 163 profili di raffittimento perpendicolari alla costa, che si chiudono alla batimetrica dei 3-5 m e posti in corrispondenza di spiagge prive di opere di difesa o di foci fluviali. Tale posizionamento è utile per rappresentare meglio le barre sommerse;
- diverse centinaia di chilometri di profili longitudinali alla costa, che intercettano elementi morfologici quali tomboli, salienti e buche, non adeguatamente rappresentabili dai soli profili perpendicolari.

### **6.1 Inquadramento storico**

Nel 1981, quando il Piano Costa indicò il ripascimento come tipologia d'intervento da applicare in sostituzione alla difesa tramite opere rigide, la proposta fu accolta con notevoli perplessità. In quel periodo, infatti, non solo non vi erano in Italia esperienze di questo tipo a cui far riferimento, ma la stessa parola "ripascimento" era sconosciuta ai più, così come il suo significato pratico. Superato questo primo ostacolo, nel 1983, fu realizzato il primo intervento di ripascimento in Emilia-

Romagna. Più di 500.000 m<sup>3</sup> di sabbia<sup>47</sup>, prelevati da cave a terra, furono portati su 5600 m di litorale appartenenti a 4 diversi comuni: Misano, Riccione, Cesenatico e Cervia. Questi interventi furono accompagnati dalla realizzazione di barriere sommerse in sacchi pieni di sabbia alte poco più di un metro e poste ad una distanza di 100-200 m. Il ricorso alle barriere sommerse in sacchi per la protezione al piede dei ripascimenti è andata avanti per tutti gli anni '80 - '90 ed è terminato nel 1999 con la costruzione di un terzo km a Riccione Sud e di un tratto lungo 450 m a Milano Marittima. Di quell'esperienza, che ha interessato 9 tratti di litorale per un totale di 16 km, restano tuttora attive tre barriere longitudinali: a Misano (1600 m), a Riccione (3000 m) e a Milano Marittima (2200 m).

Il Piano Costa del 1996 ed il decreto del Ministero dell'Ambiente del gennaio dello stesso anno sulla movimentazione dei materiali in ambito marino e costiero portano ad individuare, nel 1996, la data di avvio di una nuova fase nell'applicazione del ripascimento in Emilia-Romagna. Infatti, per decenni il materiale di dragaggio di numerosi porti presenti lungo la costa era stato portato sui fondali, a tre miglia al largo. Da quel momento in poi, invece, si prese atto del fatto che tale materiale, poteva in certi casi essere idoneo al ripascimento, se non proprio della spiaggia emersa almeno dei fondali antistanti.

A seguito del passaggio delle competenze in materia di difesa costiera dallo Stato alle Regioni (2001) e grazie ad una buona copertura finanziaria, sono stati realizzati molti interventi di ripascimento su decine di chilometri di costa. Oltre ai materiali provenienti dal dragaggio delle imboccature portuali, sono state utilizzate altre fonti, tra cui:

- materiale di spiagge in avanzamento continuo o ricavato dalla pulizia delle stesse;
- materiale proveniente da scavi edili (Riccione);

---

<sup>47</sup> Vedi Arpae, Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2012, erosione e interventi di difesa, pp. 17.

- escavazioni di nuove darsene;
- accumuli sottomarini.
- scanni di Goro e Volano.

Nel decennio successivo, tra il 1996 e il 2006, la difesa della costa emiliano-romagnola è stata interessata da un forte processo di sviluppo che ha riguardato: i volumi di materiale movimentati, la diversificazione delle fonti di prelievo, le tecniche di dragaggio, trasporto e scarico della sabbia e, più in generale, le conoscenze del sistema litoraneo e delle sue dinamiche.

Nel 2002 e nel 2007, la Regione Emilia-Romagna ha eseguito due interventi di ripascimento su scala regionale, utilizzando sabbie prelevate da giacimenti sabbiosi sottomarini collocati sulla piattaforma nord adriatica.

Nel 2012, in occasione della quinta campagna topo-batimetrica, sono stati misurati oltre 6 milioni di punti topografici e batimetrici su circa 1000 km di profili.<sup>48</sup>

Tra la fine di marzo e la metà di giugno 2016, dati i buoni esiti degli interventi precedenti, del 2002 e del 2007, la Regione ha realizzato il terzo intervento di “Messa in sicurezza di tratti critici del litorale regionale mediante ripascimento con sabbie sottomarine”, denominato “Progettone 3”.

### **6.1.1 Progettone 1**

A partire dal 1996, è emerso che le fonti di sabbia litoranee sarebbero state del tutto insufficienti a soddisfare la domanda di gestione dell'intero litorale. Il ricorso alle cave a terra, da cui erano stati prelevati circa 3,1 milioni di m<sup>3</sup> di sabbia fino al 1999<sup>49</sup>, risultava una pratica sempre meno sostenibile sotto il profilo economico, ambientale e

---

<sup>48</sup> Vedi Arpae.it: Mare e costa / Costa / Erosione costiera.

<sup>49</sup> Vedi Arpae, Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007 e piano di gestione decennale, pp. 188.

dell'ottimale utilizzo della risorsa. L'unico modo per garantire l'equilibrio del litorale era quello di alimentarlo artificialmente, e la fonte che avrebbe potuto soddisfare la domanda di sabbia è stata individuata negli accumuli sottomarini scoperti da Idroser nel 1984. Nel 2000, il Servizio Regionale di Protezione Civile ha attuato anche in Emilia-Romagna il ripascimento con sabbie sottomarine. Questa tecnica, già largamente impiegata da diversi decenni in Olanda e dagli anni '80 in Spagna, è stata utilizzata per la prima volta in Italia nel 1995 dal Consorzio Venezia Nuova e nel 2000 dalla Regione Lazio, per la difesa dei litorali di Ostia. In considerazione dei positivi riscontri forniti da questi primi interventi, nel 2000 la Giunta Regionale ha così destinato 22 miliardi di lire alla realizzazione della proposta progettuale. Il gruppo tecnico di Idroser, passato in ARPA nel 1996, è stato incaricato di individuare l'area di prelievo, di progettare e di monitorare l'intervento. La sua denominazione: "Progettone" deriva dal titolo formale: "Programma degli interventi di messa in sicurezza dei tratti critici del litorale emiliano-romagnolo mediante ripascimento con sabbie sottomarine".

Nel periodo compreso tra il 13 febbraio e il 5 maggio 2002, una draga a strascico autoricaricante-refluente, delle capacità di 6.000 m<sup>3</sup>, ha prelevato circa 800.000 m<sup>3</sup> di sabbia<sup>50</sup> da un dosso sottomarino posto a una profondità di 40 m e a una distanza di 55 km da terra. Il materiale è stato riversato su un tratto di 9 km, distribuito su 8 spiagge distinte: tre protette da scogliere parallele emerse, una da pennelli in roccia, due da barriere sommerse in sacchi, e due prive di ogni tipo di difesa. La scelta delle spiagge da proteggere è stata effettuata seguendo le indicazioni del Piano Costa 1996 e la scala di priorità in esso riportata. Nello specifico, tre delle spiagge interessate corrispondono a quelle che la Regione ha tradizionalmente protetto con continuità a partire dal 1983: Misano, Riccione sud e Milano Marittima (Cervia). Sono state escluse le zone del litorale ravennate perché protette dal Comune con finanziamenti derivanti dalla Legge Speciale per

---

<sup>50</sup> Vedi Arpae, Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007 e piano di gestione decennale, pp. 189.

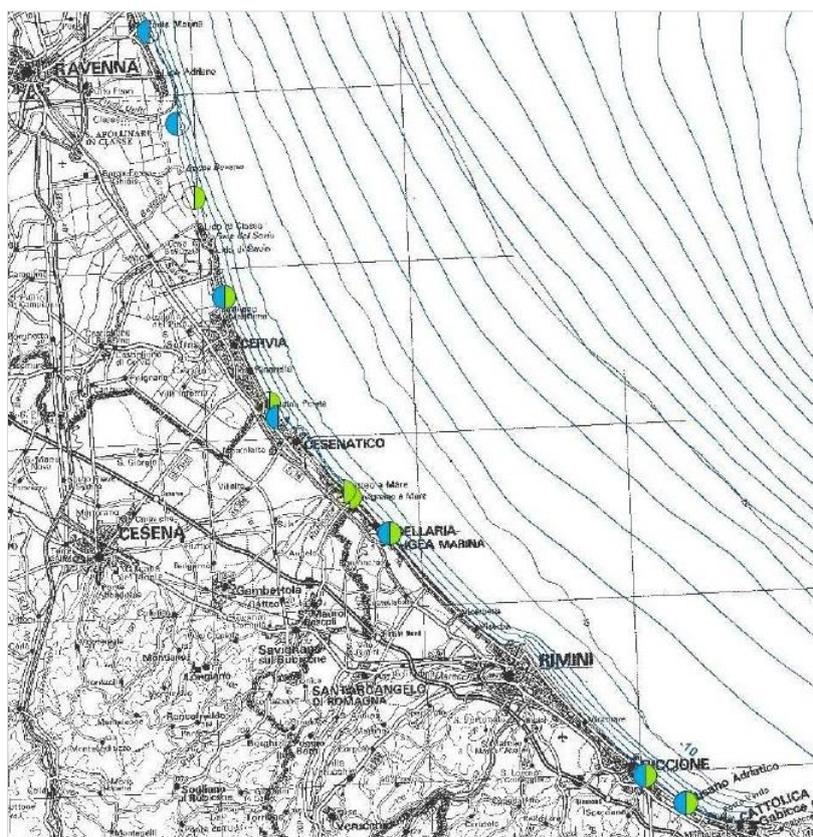
Ravenna (Legge n. 845/80) e le zone della provincia di Ferrara, in quanto caratterizzate da abbondanti accumuli di sabbia litoranea. Essendo l'intervento finanziato dalla Protezione Civile Nazionale, va detto che la scelta delle spiagge non ha riguardato solo zone turistiche, ma anche tratti con elevata valenza ambientale. In realtà il volume totale di sabbia sottomarina portata a ripascimento è stato pari a 803.390 m<sup>3</sup>. In Tabella 4 non sono riportati 10.000 m<sup>3</sup> di sabbia sversati a Gatteo a Mare ed in seguito ripresi e portati a Valverde di Cesenatico via terra.

Località	Lunghezza del tratto (m)	Opere di difesa	Volume di ripascimento (m <sup>3</sup> /m)	Volume unitario di ripascimento (m <sup>3</sup> /m)
Misano Adriatico	1.600	Pennelli e barriera sommersa in sacchi	165.288,75	103
Riccione Sud	2.250	Barriera sommersa in sacchi	253.727	113
Igea Marina	1.125	Scogliere emerse	65.122	58
San Mauro a Savignana	450	Scogliere emerse	20.946	46
Gatteo a Mare	550	Scogliere emerse	28.090	51
Zadina (Cesenatico)	700	/	43.543	62
Milano Marittima (Cervia)	1.700	Barriera sommersa in sacchi	176.111	103
Lido di Classe – Foce Bevano (Ravenna)	650	/	41.013	63
<b>Totale</b>	<b>9025</b>		<b>793.393</b>	<b>88</b>

**Tabella 4:** caratteristiche e volumi di sabbia apportati alle 8 spiagge oggetto di ripascimento nel 2002.<sup>51</sup>

<sup>51</sup> Vedi Preti Mentino, 2011, Studi costieri, dinamica e difesa dei litorali – Gestione integrata della fascia costiera N.19, pp. 7.

Lo scopo dell'intervento è stato quello di ottenere un significativo potenziamento del sistema spiaggia, basato su un innalzamento della quota e un allargamento verso mare dell'arenile, in modo da garantire la sicurezza dell'area retrostante, per un periodo di almeno 3-5 anni. Il *Progettone* ha poi dimostrato che spiagge con configurazioni diverse tra loro potevano essere allargate di decine di metri, con impatto ambientale pressoché nullo. Dopo tre anni dall'intervento, il 50%<sup>52</sup> delle sabbie depositate tra spiaggia e barre sommerse risultavano ancora presenti, ed è stato anche riscontrato che la sabbia fuoriuscita ha garantito l'equilibrio di altri 16 km di spiagge sottoflutto rispetto a quelle oggetto di ripascimento. Quindi, a conferma dei risultati positivi ottenuti, nel 2007 la Regione ha stanziato il secondo intervento di ripascimento con sabbie sottomarine: il "Progettone 2".



**Figura 39:** mappa del litorale emiliano-romagnolo con indicazione delle spiagge oggetto di intervento nel 2002 (in verde) e nel 2007 (in azzurro).<sup>53</sup>

<sup>52</sup> Vedi Arpae, Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007 e piano di gestione decennale, pp 189.

<sup>53</sup> Vedi Preti Mentino, 2011, Studi costieri, dinamica e difesa dei litorali – Gestione integrata della fascia costiera N.19, pp 8.

### 6.1.2 Progettone 2

Nel caso di questo secondo intervento di ripascimento, le modalità, le tecniche d'intervento e la capacità della draga sono state le stesse impiegate per il *Progettone 1*. Tra le principali novità: l'inserimento di due nuove spiagge appartenenti al comune di Ravenna, poste più a nord rispetto a quelle del 2002, e il prelievo della sabbia da 2 giacimenti sottomarini, anziché da uno solo come era avvenuto precedentemente. Il volume<sup>54</sup> di sabbia apportato è stato di 815.000 m<sup>3</sup>. In realtà il volume totale di sabbia sottomarina portata a ripascimento è pari a 815.300 m<sup>3</sup>.

Località	Lunghezza del tratto (m)	Opere di difesa	Volume di ripascimento (m <sup>3</sup> /m)	Volume unitario di ripascimento (m <sup>3</sup> /m)
Misano Adriatico	1.600	Pennelli e barriera sommersa in sacchi	149.000	93
Riccione Sud	2.250	Barriera sommersa in sacchi	105.000	88
Igea Marina	1.300	Scogliere semisommersa e pennelli	80.800	68
Cesenatico Zona Colonie	600	/	68.400	114
Milano Marittima (Cervia)	950	Barriera sommersa in sacchi	90.100	95
Lido di Dante (Ravenna)	1.100	Scogliere semisommersa e pennelli	107.100	97
Punta Marina (Ravenna)	1.660	Scogliere semisommersa e pennelli	189.900	114
<b>Totale</b>	<b>8.410</b>		<b>790.300</b>	<b>94</b>

**Tabella 5:** caratteristiche e volumi di sabbia apportati delle 7 spiagge oggetto di ripascimento nel 2007.

<sup>54</sup> Vedi Arpae, Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007 e piano di gestione decennale, pp. 189.

In Tabella 5 non sono riportati i 25.000 m<sup>3</sup> di sabbia sversati ad Igea Marina e trasportati via terra nelle località di Torre Pedrera (Comune di Rimini), Valverde e Villamarina (Comune di Cesenatico). Anche per questo secondo intervento i risultati sono stati positivi e i giudizi degli operatori di spiaggia e degli amministratori comunali ancora più favorevoli rispetto al primo.

### 6.1.3 Progettone 3

L'attività ha riguardato 8 tratti di spiaggia in erosione: Misano Adriatico, Riccione Sud, Rimini Nord e Igea Marina, Cesenatico Ponente, Milano Marittima Nord, Lido di Dante Sud, Punta Marina e Lido di Spina Sud.

Spiaggia oggetto di intervento	Lunghezza tratto (m)	Volume portato a ripascimento (m <sup>3</sup> )	Incidenza media (m <sup>3</sup> /m)
Misano Adriatico	1.500	219.700	146
Riccione	1.400	188.686	135
Igea Marina	1.600	171.047	107
Cesenatico	880	128.331	146
Milano Marittima	1.400	218.713	156
Lido di Dante	1.200	116.460	97
Punta Marina	2.000	229.125	115
Lido di Spina*	1.300	148.956	115
<b>TOTALE</b>	<b>11.280</b>	<b>1.421.018</b>	<b>126</b>

\*Con sabbie da deposito litoraneo (foce Logonovo)

**Tabella 6:** volumi portati a ripascimento nelle 8 spiagge oggetto dell'intervento nel 2016.<sup>55</sup>

L'intervento è stato realizzato in 78 giorni, per una estensione complessiva di circa 11 km di spiaggia. In queste zone è stato riversato un totale di oltre 1,4 milioni<sup>56</sup> di metri cubi di sabbia, di cui 1,3 milioni provenienti da un deposito sottomarino situato al largo della costa

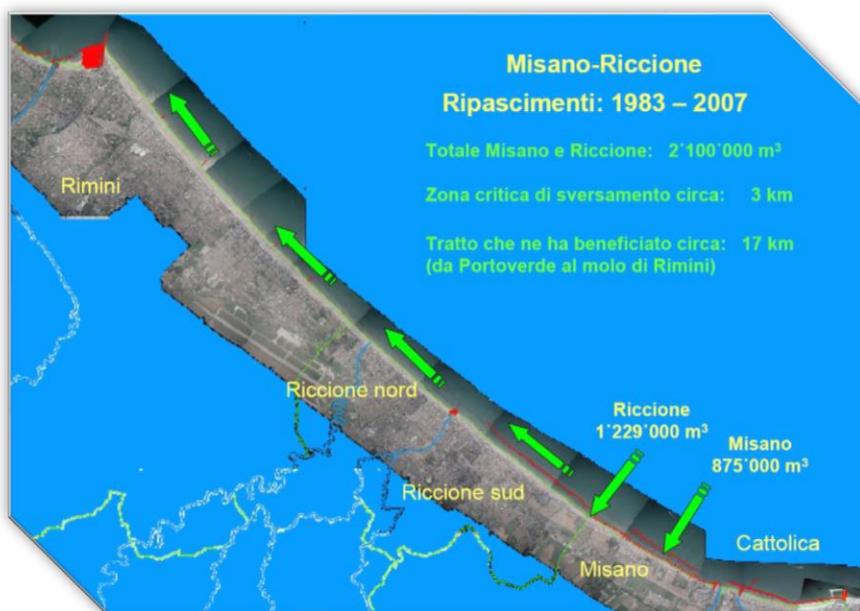
<sup>55</sup>Vedi Preti Mentino, 2007, Stato del litorale emiliano-romagnolo e piano decennale di gestione - La gestione dei litorali: le esperienze in Emilia-Romagna e in Italia, direzione tecnica Arpae.

<sup>56</sup> Vedi Ecoscenza3, 2017, Il ripascimento costiero con sabbie sottomarine, pp. 87-89.

regionale, e la parte restante, destinata alla spiaggia Lido di Spina, da materiale prelevato alla foce del canale Logonovo. Il trasporto dai giacimenti sottomarini è avvenuto via mare grazie all'utilizzo di draghe e condotte. Nell'ambito del progetto esecutivo è stato predisposto un Piano di Monitoraggio per gli anni 2017 e 2018, con lo scopo di valutare l'efficacia dell'intervento, gli impatti sulle aree di prelievo e le modifiche subite dalle spiagge in oggetto, in termini di linee di riva e di profili di spiaggia.

## 6.2 Descrizione delle spiagge

Dalle analisi eseguite da Arpae, relativamente al periodo 2006-2012, risultano in erosione ben 12,5 km di spiaggia tra Cattolica e Rimini.<sup>57</sup>



**Figura 40:** interventi di ripascimento effettuati a Misano e Riccione tra il 1983 ed il 2007. Le frecce lungo la costa illustrano il tratto che ha tratto giovamento in termini di trasporto solido dall'intervento; le frecce trasversali indicano le aree dell'intervento.<sup>58</sup>

<sup>57</sup> Vedi Arpae.it: Mare e costa / Costa / Erosione costiera.

<sup>58</sup> Vedi Preti Mentino, 2007, Stato del litorale emiliano-romagnolo e piano decennale di gestione - La gestione dei litorali: le esperienze in Emilia-Romagna e in Italia, direzione tecnica Arpae.

I casi più critici si collocano proprio a Misano e nella spiaggia a sud di Riccione. La ridotta distanza che caratterizza queste due aree rende utile un loro studio in parallelo. Infatti, il trasporto solido di Riccione, diretto da sud verso nord, è influenzato in parte dagli interventi di ripascimento effettuati su Misano. Queste località, già oggetto di interventi in passato, necessiterebbero di continui interventi di ripascimento, oltre che della revisione delle attuali opere di difesa.

Progettone	Località	Lunghezza del tratto (m)	Volume di ripascimento (m <sup>3</sup> /m)	Volume unitario di ripascimento (m <sup>3</sup> /m)
<b>1</b> <b>(del 2002)</b>	Misano Adriatico	1.600	165.288	103
	Riccione Sud	2.250	253.727	113
<b>2</b> <b>(del 2007)</b>	Misano Adriatico	1.600	149.000	93
	Riccione Sud	2.250	105.000	88
<b>3</b> <b>(del 2016)</b>	Misano Adriatico	1.500	219.700	146
	Riccione	1.400	188.686	135

**Tabella 7:** sintesi degli interventi di ripascimento subiti in passato da Misano e Riccione.

### 6.2.1 Le opere di difesa a Misano Adriatico

Il litorale del Comune di Misano si colloca nella parte più a sud della costa emiliano-romagnola, precisamente a 2,5 km a nord del confine con la regione Marche. In questa zona, dove i fondali sono piuttosto ripidi, il trasporto solido litoraneo è diretto da sud verso nord e ha valori tra i più elevati della costa regionale. Il litorale di Misano è lungo 3200 m ed è caratterizzato da tre tratti distinti.



**Figura 41:** mappa di Misano; in marrone le opere di difesa rigide.

Partendo da sud, nel primo tratto lungo 650 m, sono presenti: la foce del fiume Conca, i moli dell'imboccatura del porto di Porto Verde e una scogliera radente. Questa spiaggia, che in origine era formata da sabbie e ghiaie, è costituita ad oggi da sola sabbia. I sedimenti venivano trasportati a mare dal fiume Conca, ma, a metà degli anni '70, questo corso d'acqua è stato sbarrato con una diga a 3 km dalla foce, bloccando di fatto il trasporto di sedimenti grossolani al mare. Attualmente, i fondali in questa area sono composti prevalentemente da sabbia fine. In prossimità della riva e quindi della scogliera radente, è invece presente sabbia grossolana. Il secondo tratto di spiaggia, lungo circa 1700 m, è difeso da 26 pennelli e da una barriera sommersa in sacchi pieni di sabbia lunga 1600 m. I pennelli in roccia hanno un'anima in cemento armato, sono lunghi 60-80 m ed hanno un'equidistanza pari a 60 m. La barriera sommersa, invece, è posta a circa 150 m dalla testata dei pennelli ed è stata realizzata nel 1983, in occasione del primo intervento di ripascimento con sabbie di cava, poiché il campo di pennelli da solo non riusciva a garantire il mantenimento della linea di riva. L'ampiezza della spiaggia emersa varia tra i 40 m ed i 100 m in funzione della presenza o meno di edifici

o stabilimenti balneari. Questo tratto di spiaggia è, infatti, caratterizzato dalla presenza di diversi stabilimenti a ridosso della battigia e da sabbia nell'area retrostante. Più a nord, l'ultimo tratto di Misano è lungo 750 m ed è difeso da 7 scogliere parallele emerse che hanno determinato la formazione di tomboli. La spiaggia in questa zona ha un'ampiezza di 100-200 m.

### 6.2.2 Le opere di difesa a Riccione

Il Comune di Riccione ha un fronte mare di 6200 m che, a partire dalla fine degli anni '70, è entrato in erosione nel tratto più a sud.



**Figura 42:** mappa di Riccione; in marrone le opere di difesa rigide.

Ciò è accaduto a causa della mancanza di opere di difesa nel momento in cui è stata completata la protezione con opere rigide per i litorali di Gabicce, Cattolica e Misano. La realizzazione di queste difese rigide ha modificato radicalmente i caratteri paesaggistico-ambientali delle spiagge coinvolte e di quelle adiacenti. Ecco perché,

nel 1978, l'amministrazione comunale di Riccione, consapevole di quanto sarebbe successo, ha cercato di opporsi alla realizzazione delle scogliere di Misano, poste a ridosso del proprio confine. A partire dal 1983, l'equilibrio della spiaggia di Riccione è stato garantito con periodici interventi di ripascimento. In seguito, però, per ridurre le perdite di sedimento è stato necessario costruire una barriera longitudinale di sacchi pieni di sabbia, realizzata in varie fasi tra il 1983 ed il 1998, lunga 3 km e posta ad una distanza di 150-180 m dalla battigia. Il tratto a sud del porto, a partire dal confine con Misano, è difeso per 2800 m dalla barriera sommersa in sacchi. Invece, nei primi 600 m a sud del porto e sulla spiaggia a nord del porto non sono presenti opere di difesa. Il tratto corrispondente alla colonia Enel è lungo 250 m e ha un'ampiezza di soli 30-50 m. La spiaggia di Riccione nord (2800 m) è alimentata dal trasporto sedimentario lungo costa diretto da sud verso nord.

### **6.3 Dati da elaborare**

Il monitoraggio del litorale permette di valutare l'evoluzione delle spiagge e l'efficacia degli interventi realizzati. Si tratta di un'attività che richiede periodiche campagne di misura topo-batimetriche, ovvero rilievi topografici che vengono eseguiti ogni qual volta vi sia necessità di conoscere con precisione le variazioni morfologiche delle aree interessate. E per esso si fa riferimento ai vertici della Rete Geodetica Costiera realizzata nel 2016, le cui coordinate sono espresse nel sistema di riferimento nazionale ETRS89 ETRF2000 (epoca 2008.0). La quota ortometrica di questi capisaldi, che si agganciano ai vertici della Rete di Monitoraggio della Subsidenza, deriva da misure di livellazione. Le informazioni sui fenomeni che hanno interessato il litorale si ottengono dal confronto tra i rilievi eseguiti sulla stessa area in tempi diversi.

Nella pratica, i rilievi a cui si fa riferimento sono quelli di:

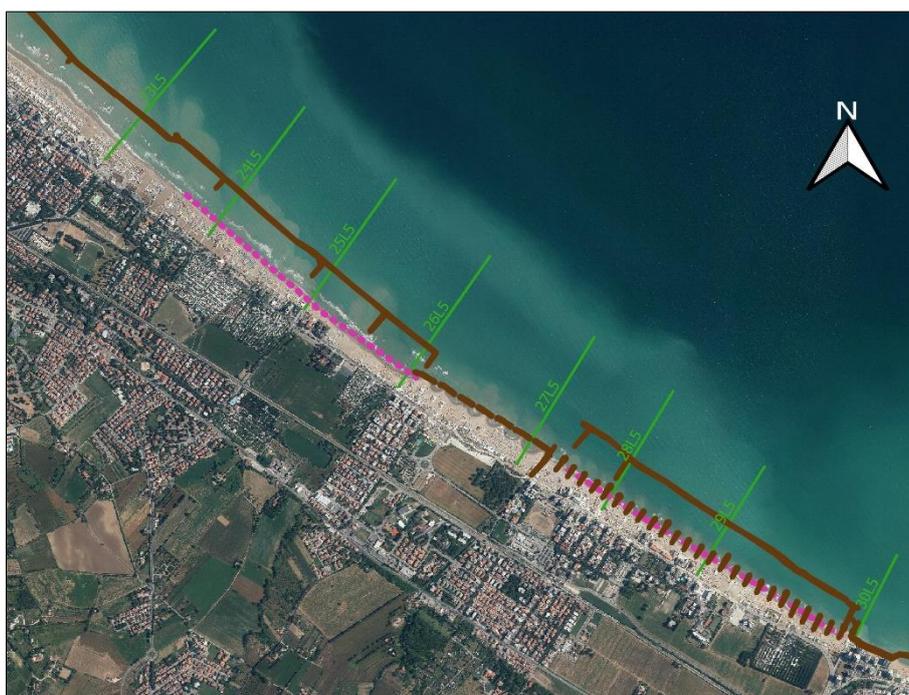
- prima pianta, che si effettuano prima dell'inizio dei lavori per verificare lo stato di fatto dell'area;
- seconda pianta, che si eseguono subito dopo lo sversamento del materiale;
- monitoraggio, realizzati a distanza di tempo dall'intervento per valutare l'evoluzione della spiaggia coinvolta e di quelle limitrofe.

A seguire, saranno analizzati i dati ottenuti dai rilievi e i metodi di elaborazione utilizzati, con riferimento alle spiagge di Misano e di Riccione. Dai risultati ottenuti si osserveranno gli effetti prodotti su quest'area dal *Progettone 2* e dal *Progettone 3*. Inoltre, considerando una zona più ampia, si osserveranno le variazioni morfologiche della Macrocella 1, dal 2012 (quinta campagna topo-batimetrica) al 2018 (ultima campagna topo-batimetrica).

## 7. Analisi dei risultati ottenuti

Le elaborazioni prodotte attraverso interpolazione TIN riguardano la Macrocella 1<sup>59</sup> del litorale emiliano-romagnolo, con particolare attenzione alle spiagge di Misano e Riccione che rientrano tra quelle coinvolte dal *Progettone 2* e dal *Progettone 3*.

A partire dalle mappe topo-batimetriche di prima pianta, seconda pianta, primo monitoraggio e secondo monitoraggio, sono state ricavate le mappe di accumulo-erosione. Dallo studio di queste mappe è stato possibile valutare le variazioni di quota, le variazioni della linea di riva, calcolare i volumi accumulati o erosi ed estrapolare i profili di spiaggia emersa e sommersa in corrispondenza delle sezioni di monitoraggio (Figura 43).



**Figura 43:** sezioni di monitoraggio sui tratti di spiaggia relativi a Misano e Riccione, oggetto di ripascimento (linea lilla).

A lavoro ultimato è stato possibile osservare le variazioni morfologiche delle spiagge e valutare, dunque, l'andamento del tratto di litorale analizzato.

---

<sup>59</sup> La suddivisione del litorale in "Macrocelle" è definita da Preti et al. (2008). Vedi Arpae, Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2012-erosione e interventi di difesa, pp. 60.

## 7.1 Intervento di ripascimento del 2007

I rilievi di prima pianta, relativi alle spiagge di Misano e Riccione, sono stati effettuati tra aprile e maggio 2007. A partire dalla spiaggia emersa fino alla batimetrica di circa 5 m sono state rilevate delle “maglie” di punti, a distanza di circa 1 m gli uni dagli altri. Il rilievo di Misano ha coinvolto un tratto di spiaggia lungo circa 2 km, mentre quello di Riccione un tratto di spiaggia lungo circa 1600 m.



**Figura 44:** carta topo-batimetrica di prima pianta (1aP) per le spiagge di Misano e Riccione. In rosso la linea di riva.

Dalla carta topo-batimetrica di prima pianta (Figura 44), l'andamento della linea di riva, risulta fortemente influenzato dalla tipologia di opere poste a protezione dei due tratti di spiaggia. Infatti, mentre per Misano la linea di riva ha un andamento abbastanza regolare tra i pennelli in roccia, nel tratto di Riccione presenta un andamento quasi lineare. Misano ha un'ampiezza media di spiaggia di circa 40 m, con valori di picco all'estremità dove raggiunge anche i 90 m. A Riccione, invece, l'ampiezza di spiaggia ha valori medi di circa 60 m. In prossimità della barriera sommersa, dal lato riva, i fondali si approfondiscono fino a circa 5,5 m, sia per la spiaggia di Misano che per quella di Riccione (Figura 44).



**Figura 45:** carta topo-batimetrica di seconda pianta (2aP) per le spiagge di Misano e Riccione. In verde la linea di riva.

Il rilievo di seconda pianta per entrambe le spiagge è stato realizzato tra aprile e maggio 2007, seguendo le stesse modalità esecutive del caso precedente. Dalla mappa topo-batimetrica (Figura 45) è possibile notare l'aumento dell'ampiezza media di spiaggia rispetto ai rilievi di prima pianta. A Misano molti dei pennelli in roccia risultano in parte o completamente sommersi dalla sabbia ed i valori di ampiezza media di spiaggia sono pari a circa 70 m, con picchi di 90 m alle estremità. Invece, a Riccione si ha un'ampiezza media di spiaggia che raggiunge valori più alti nella zona centrale, pari a circa 60 m. Al momento del rilievo, a Misano, in corrispondenza della sezione 27L5 (Figura 52), era presente una buca di circa 5 m in corrispondenza del varco tra le scogliere parallele emerse.



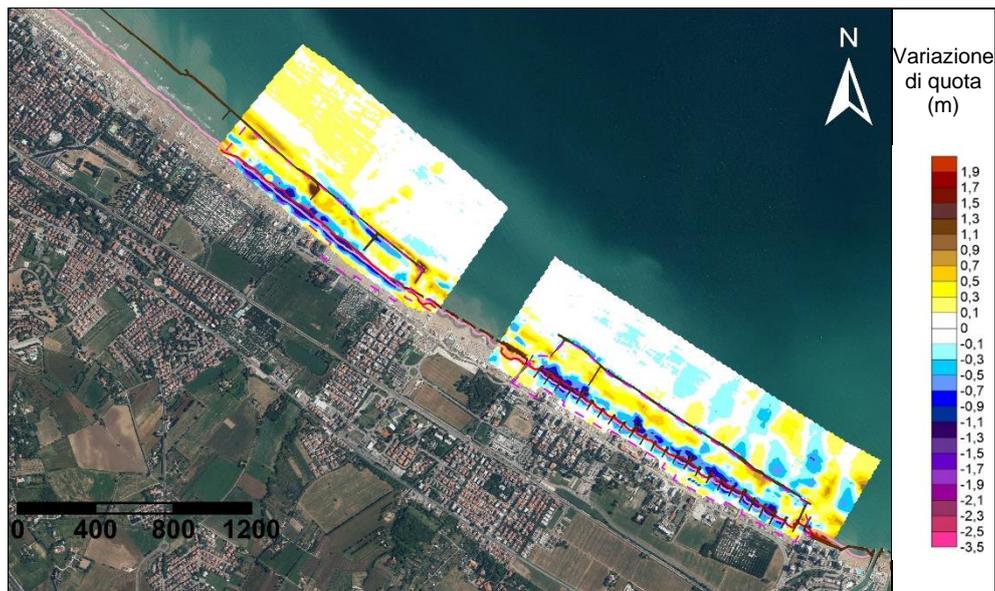
**Figura 46:** mappa di accumulo-erosione tra i rilievi di prima pianta (linea di riva rossa) e di seconda pianta (linea di riva verde), relativi alle spiagge di Misano e Riccione. L'area tratteggiata in lilla costituisce l'area di ripascimento.

Dalla mappa di accumulo-erosione (Figura 46), è possibile vedere che l'intervento di ripascimento ha determinato sia un avanzamento della linea di riva, che un aumento della quota di spiaggia emersa. Nello specifico, nella zona di Misano si è verificato un avanzamento medio della linea di riva di circa 40-50 m e un aumento di quota di circa 1 m nell'area di ripascimento (Figura 46, Figura 52, Figura 53, Figura 54). In prossimità della barriera in sacchi, l'aumento di quota assume valori notevolmente inferiori, compresi tra 0,1 e 0,5 m (Figura 46, Figura 53, Figura 54). A Riccione, invece, l'avanzamento medio della linea di riva è di circa 40 m; l'aumento medio di quota è di poco più di 1 m (Figura 55, Figura 56, Figura 57) nell'area di ripascimento, mentre in prossimità della barriera le differenze di quota appaiono molto ridotte, in quanto comprese tra 0,1 e 0,3 m.



**Figura 47:** carta topo-batimetrica di primo monitoraggio (1aM) per le spiagge di Misano e Riccione. In lilla la linea di riva.

Il rilievo topo-batimetrico di primo monitoraggio (Figura 47), realizzato ad ottobre 2008, ha ricoperto un tratto di spiaggia più ampio rispetto ai precedenti. Esso, infatti, ha coinvolto la parte centrale tra i rilievi di prima e seconda pianta, più altri circa 1500 m a nord di Riccione e 450 m a sud di Misano. In questo caso però, i rilievi sono stati realizzati seguendo dei transetti longitudinali e perpendicolari alla costa, estesi per circa 800 m, a partire dalla spiaggia emersa fino alla batimetrica di oltre 6 m.



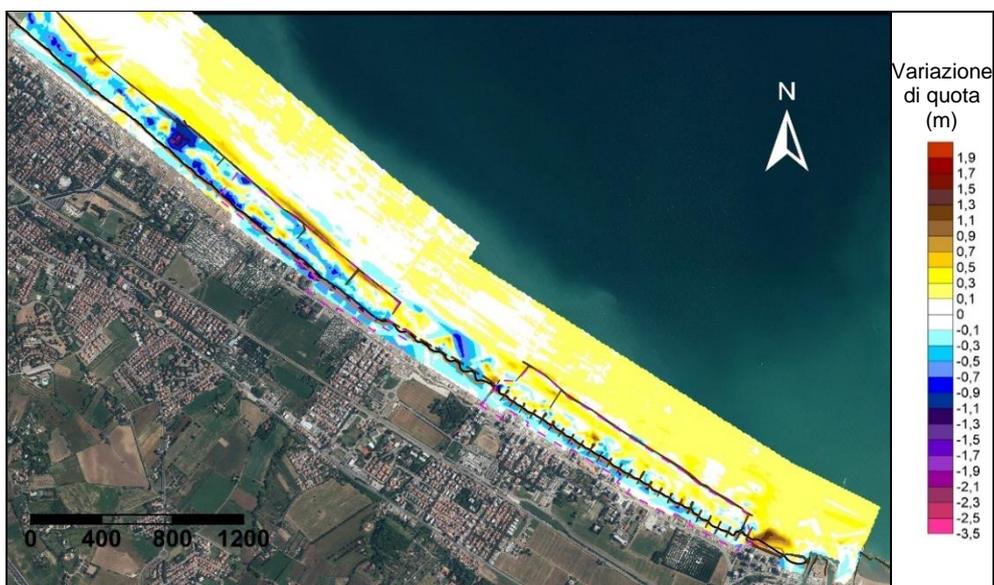
**Figura 48:** mappa di accumulo-erosione tra primo monitoraggio (linea di riva rosa) e seconda pianta (linea di riva rossa), relativi alle spiagge di Misano e Riccione. L'area tratteggiata in lilla rappresenta l'area di ripascimento.

In seguito all'intervento di ripascimento, l'evoluzione della spiaggia di Misano vede abbassamenti di quota con valori di picco fino a quasi 2 m entro i primi fondali (Figura 48) e un arretramento medio della linea di riva di circa 30 m. Parte del sedimento eroso, depositandosi in prossimità della barriera sommersa dal lato riva, ha determinato innalzamenti di quota con valori fino a 0,7 m. Anche dal lato mare della barriera in sacchi, si osservano in alcune zone fenomeni di accumulo, con variazioni di quota fino a circa 0,3 m (Figura 53, Figura 54). Confrontando i rilievi di seconda pianta e di primo monitoraggio, è stata stimata una perdita totale di 53.940 m<sup>3</sup> (Tabella 8) all'interno dell'area di ripascimento. Come a Misano, anche a Riccione, dal confronto tra i rilievi di seconda pianta e di primo monitoraggio, emerge un'alternanza tra zone di accumulo e di erosione. Nei primi fondali si hanno variazioni di quota che raggiungono valori di circa 0,9 m. (Figura 48, Figura 55, Figura 56, Figura 57). All'interno dell'area di ripascimento, dal confronto tra i rilievi, è stata stimata una perdita di 22.760 m<sup>3</sup> (Tabella 8).



**Figura 49:** carta topo-batimetrica di secondo monitoraggio (2aM) per le spiagge di Misano e Riccione. In viola la linea di riva.

Il rilievo topo-batimetrico di secondo monitoraggio (Figura 49) è stato realizzato nel luglio 2009 sullo stesso tratto di costa relativo al rilievo di primo monitoraggio. Operativamente, sono stati seguiti dei transetti longitudinali e perpendicolari alla costa, estesi per circa 800 m, a partire dalla spiaggia emersa fino alla batimetrica di circa 5,5 m.



**Figura 50:** mappa di accumulo-erosione tra i rilievi di primo monitoraggio (linea di riva nera) e secondo monitoraggio (linea di riva arancione), relativi alle spiagge di Misano e Riccione. L'area tratteggiata in lilla costituisce l'area di ripascimento.

Dal confronto tra i rilievi di primo e secondo monitoraggio (Figura 50) è possibile osservare un andamento quasi invariato delle linee di riva, che risultano sovrapposte in più punti. Anche l'andamento dei profili di primo e secondo monitoraggio a ridosso della barriera sommersa è circa il medesimo nell'intera zona analizzata e mostra una tendenza all'approfondimento del fondale dal lato riva e all'accumulo dal lato mare (Figura 52, Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56, Figura 57). Al momento del rilievo di primo e secondo monitoraggio erano presenti argini con altezza massima pari a 2 m (Figura 52, Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56, Figura 57). Dal confronto tra i rilievi di primo e secondo monitoraggio, è stata stimata una perdita di materiale pari a 110 m<sup>3</sup> per la spiaggia di Misano e pari a 45.050 m<sup>3</sup> per la spiaggia di Riccione (Tabella 8). Come nelle annate precedenti<sup>60</sup>, una parte di questa sabbia si è spostata dalla spiaggia al fondale davanti alla barriera in sacchi (Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56, Figura 57).

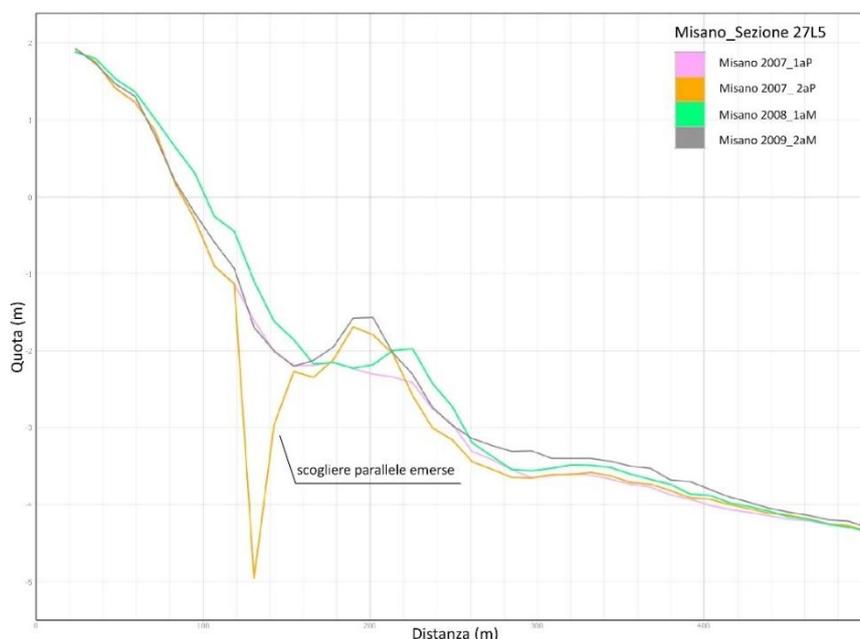


**Figura 51:** mappa di accumulo-erosione tra secondo monitoraggio (linea di riva rossa) e prima pianta (linea di riva verde), relativi alle spiagge di Misano e Riccione. L'area tratteggiata in lilla rappresenta l'area di ripascimento.

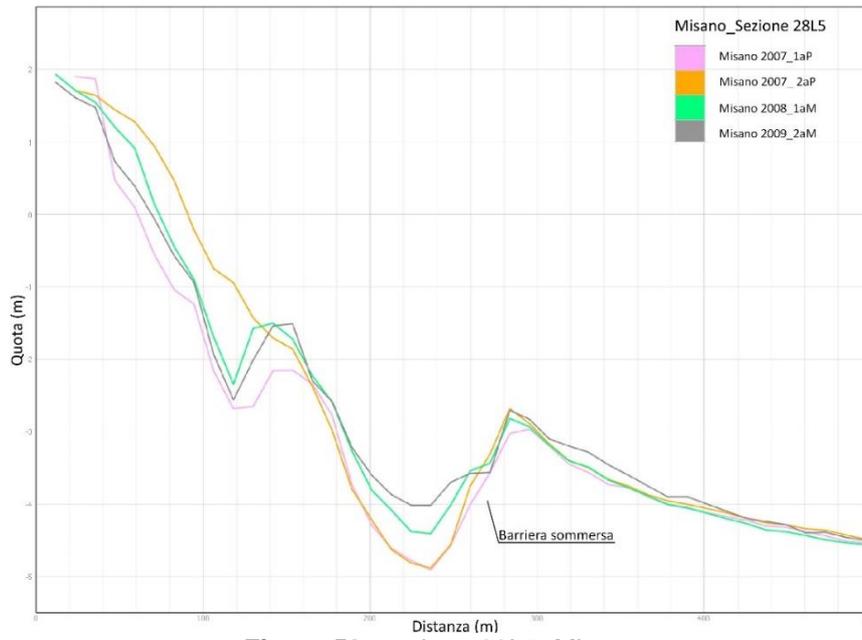
Rispetto alla situazione pre-intervento (Figura 51), la spiaggia di Misano mostra fenomeni di accumulo diffusi quasi nella totalità dell'area in

<sup>60</sup> Vedi Preti Mentino, 2011, Studi costieri N. 19, pp 144.

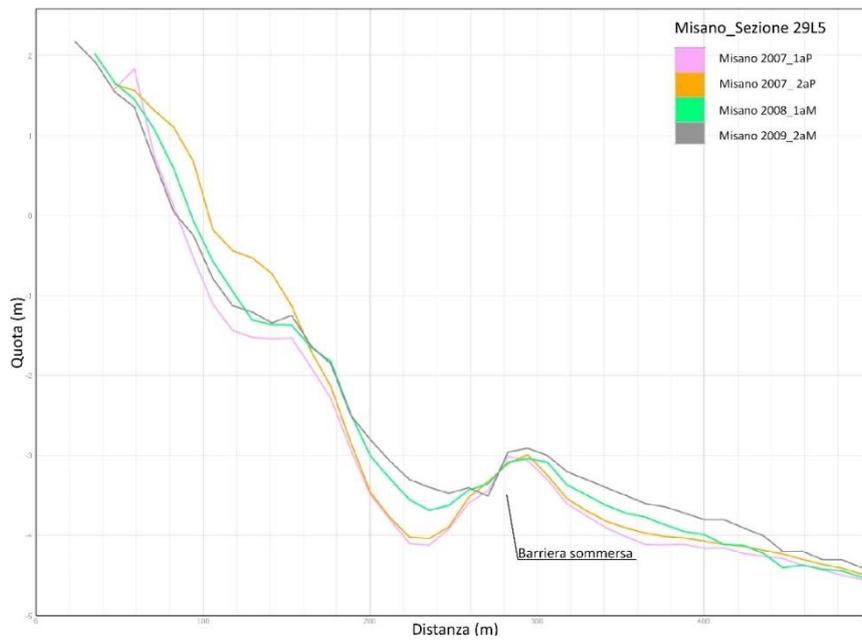
esame, ad eccezione di ridotte zone isolate. Inoltre, si notano zone di accumulo in corrispondenza dei pennelli in roccia. A poco più di due anni dall'intervento, nell'area di ripascimento risulta un accumulo rispetto alla situazione pre-intervento di  $95.020 \text{ m}^3$  (Tabella 8) di sabbia, pari a circa  $60 \text{ m}^3/\text{m}$ . La linea di riva risulta in avanzamento di circa 20 m. In corrispondenza della zona centrale della barriera in sacchi si hanno variazioni di quota fino a poco meno di 1 m (Figura 53, Figura 54). A Riccione, dalla mappa di accumulo-erosione tra secondo monitoraggio e prima pianta emerge la presenza diffusa di zone di accumulo. Ma sia a ridosso della barriera in sacchi a sud, che in alcuni punti dei primi fondali, si osservano zone di erosione (Figura 51). Dopo poco più di due anni risultano ancora presenti circa  $44.970 \text{ m}^3$  (Tabella 8) di sabbia, pari a circa  $37 \text{ m}^3/\text{m}$ . A Riccione, la linea di riva ha subito un avanzamento medio di circa 15 m, mentre le variazioni di quota sono modeste (Figura 55, Figura 56, Figura 57). Qui di seguito i profili estrapolati lungo le sezioni principali per le spiagge di Misano e Riccione.



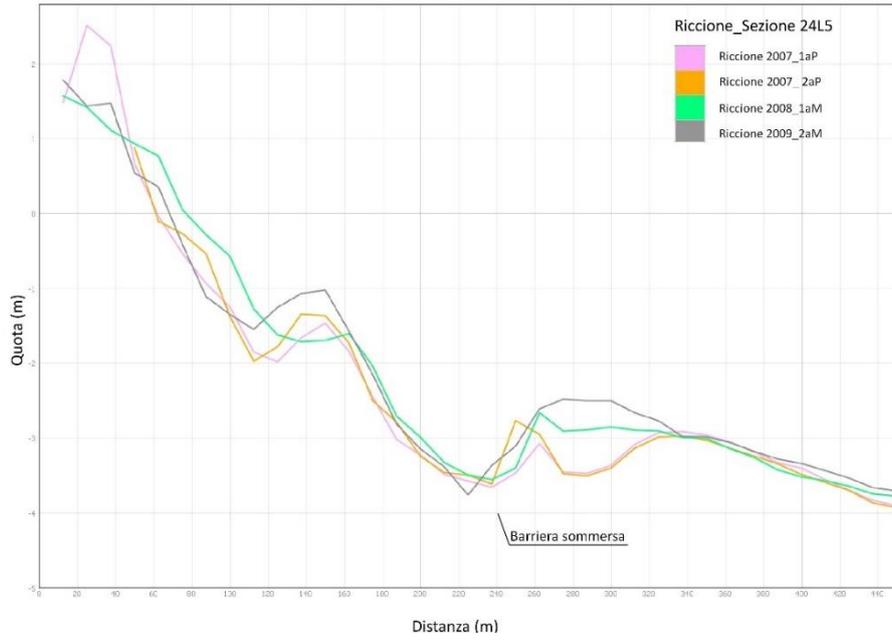
**Figura 52:** sezione 27L5, Misano.



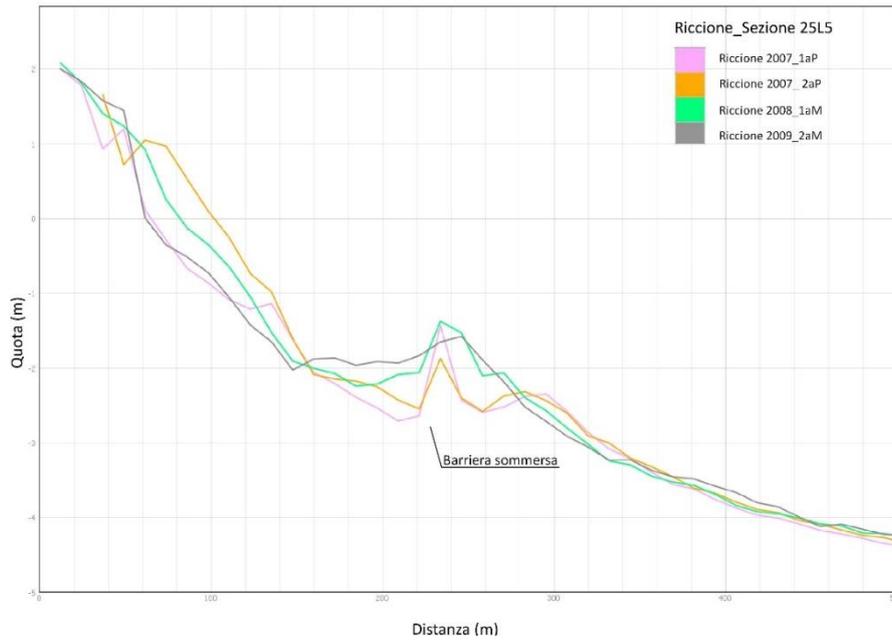
**Figura 53:** sezione 28L5, Misano.



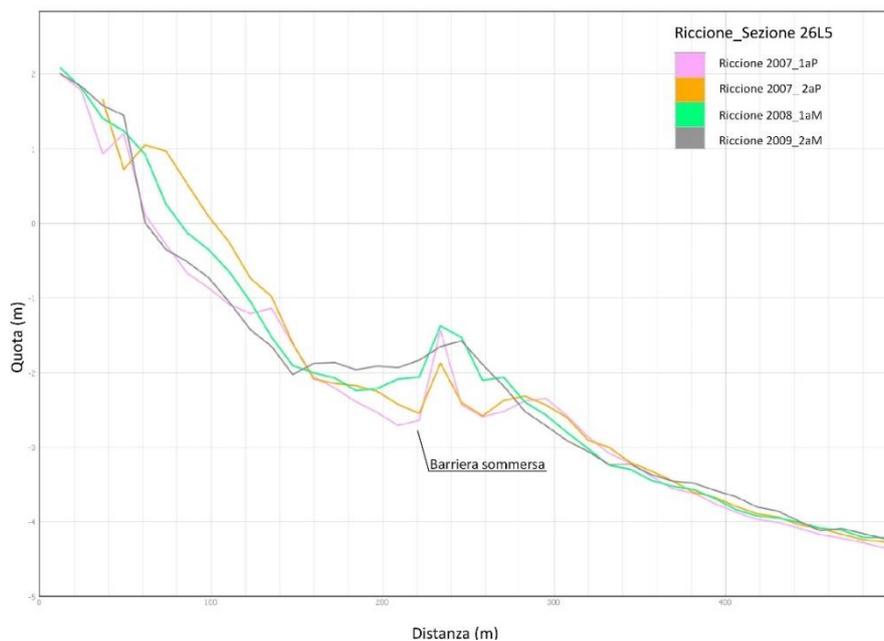
**Figura 54:** sezione 29L5, Misano.



**Figura 55:** sezione 24L5, Riccione.



**Figura 56:** sezione 25L5, Riccione.



**Figura 57:** sezione 26L5, Riccione.

La Tabella 8 mostra in sintesi i volumi stimati per le due spiagge oggetto di studio.

Rilievi		V positivo (m <sup>3</sup> )	V negativo (m <sup>3</sup> )	V netto (m <sup>3</sup> )
Misano	2aP-1aP	164.930	15.920	149.010
	1aM-2aP	44.640	98.580	-53.940
	2aM-1aM	39.470	39.580	-110
	2aM-1aP	127.160	32.140	95.020
Riccione	2aP-1aP	119.280	3.960	115.320
	1aM-2aP	37.840	60.600	-22.760
	2aM-1aM	18.790	63.840	-45.050
	2aM-1aP	59.850	14.880	44.970

**Tabella 8:** volumi stimati per le spiagge di Misano e Riccione (V netto =  $\Delta V$ ).

### 7.3. Intervento di ripascimento del 2016

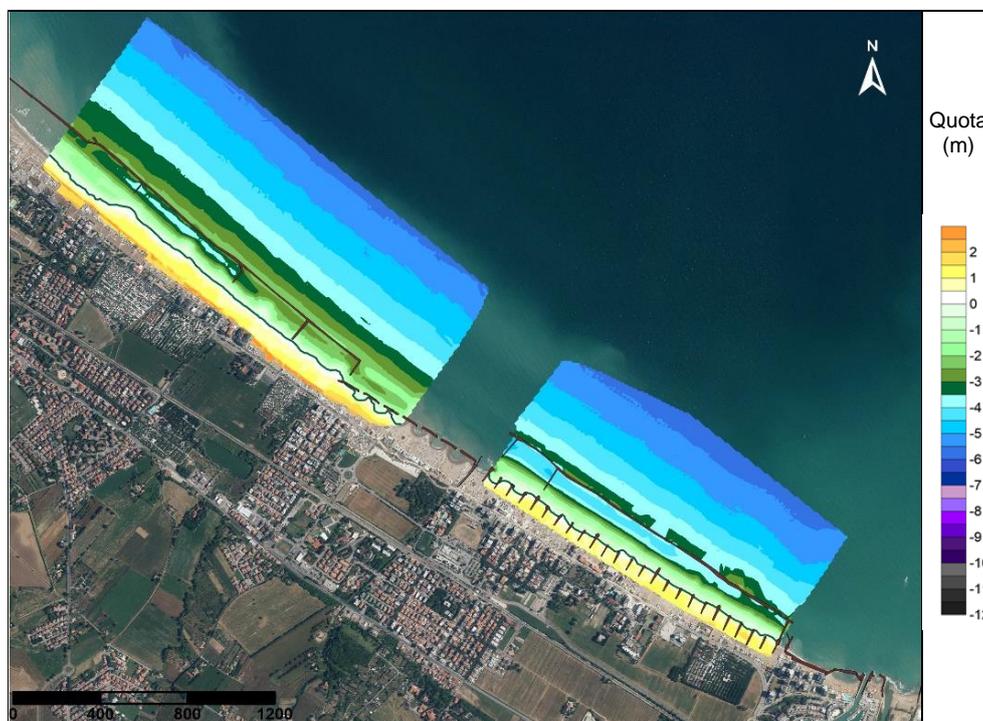
Il rilievo di prima pianta di Misano, che ha coinvolto un tratto di spiaggia ampio circa 1500 m, è stato effettuato il 20 aprile 2016. Esso è stato realizzato seguendo transetti con estensione di circa 250 m, sia longitudinali che trasversali alla costa., a partire dalla spiaggia emersa fino a poco oltre la barriera in sacchi. Il rilievo di Riccione, invece, è stato eseguito il 14 maggio 2016 su un tratto di spiaggia lungo 2 km. Anche in questo caso sono stati seguiti dei transetti longitudinali e trasversali alla costa con estensione di circa 250 m, fino alla barriera sommersa.



**Figura 58:** carta topo-batimetrica di prima pianta (1aP) su Misano e Riccione. In rosso la linea di riva.

Dalla carta topo-batimetrica di prima pianta (Figura 58), si osserva che l'andamento della linea di riva risulta fortemente influenzato dalla tipologia di opere poste a protezione dei due tratti di spiaggia. La zona di spiaggia emersa ha un'ampiezza media variabile in base alla presenza o meno di stabilimenti e infrastrutture. Misano ha un'ampiezza media di spiaggia di circa 35-45 m, mentre Riccione ha

valori compresi tra i 20 e i 90 m. In prossimità della barriera sommersa, si osserva la presenza di zone di approfondimento del fondale, con la formazione di buche profonde fino a circa 4 m (Figura 58).



**Figura 59:** carta topo-batimetrica di seconda pianta (2aP) su Misano e Riccione. In verde la linea di riva.

Il rilievo di seconda pianta è stato realizzato il 6 maggio 2016 sulla spiaggia di Misano e il 27 maggio dello stesso anno sulla spiaggia di Riccione. Anche in questo caso le campagne di misura sono state realizzate seguendo dei transetti longitudinali e perpendicolari alla costa, con estensione di circa 850 m, dalla spiaggia emersa fino ad una batimetrica di oltre 6 m. Dalla mappa topo-batimetrica di seconda pianta (Figura 59), è possibile notare un innalzamento delle quote raggiunte alle stesse distanze dalla battigia e un aumento dell'ampiezza media di spiaggia rispetto ai rilievi di prima pianta. Infatti, a Misano molti dei pennelli in roccia risultano in parte o completamente sommersi dalla sabbia ed i valori di ampiezza media di spiaggia sono compresi tra 70 e 80 m. Invece, a Riccione si ha un'ampiezza media di spiaggia che raggiunge picchi di circa 100 m

nella parte centrale. Inoltre, sempre a Riccione, è possibile osservare che al momento del rilievo erano presenti delle dune con altezza di oltre 3,5 m (Figura 69, Figura 70, Figura 71).



**Figura 60:** mappa di accumulo-erosione tra i rilievi di prima pianta (linea di riva blu) e di seconda pianta (linea di riva verde), relativi alle spiagge di Misano e Riccione. L'area tratteggiata in lilla costituisce l'area di ripascimento.

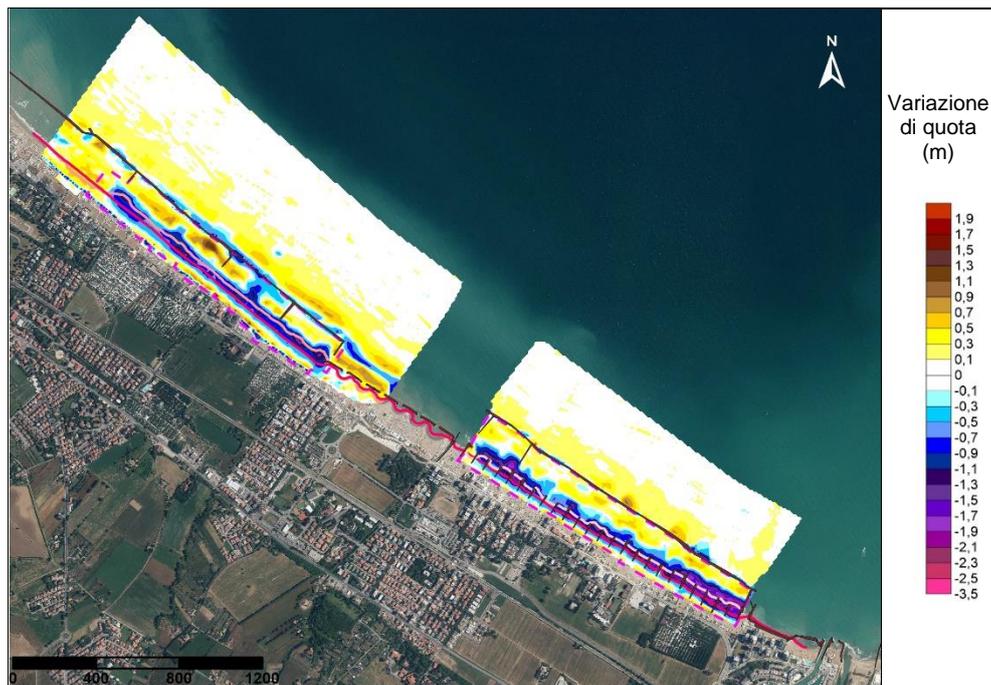
Dalla mappa di accumulo-erosione che mette a confronto questi primi due rilievi (Figura 60), è possibile vedere che l'intervento di ripascimento ha determinato sia un avanzamento medio della linea di riva che un aumento della quota di spiaggia emersa. Nello specifico, a Misano si è verificato un avanzamento medio della linea di riva di circa 40-50 m e un aumento di quota di circa 1-2 m nell'area di ripascimento (Figura 60, Figura 67, Figura 68). In prossimità della barriera in sacchi, l'aumento di quota è notevolmente inferiore, pari a circa 0,2-0,3 m (Figura 60). A Riccione, invece, l'avanzamento medio della linea di riva è di circa 50-60 m; l'aumento di quota è di 1,5-2 m (Figura 69, Figura 70, Figura 71) nell'area di ripascimento, mentre in prossimità della barriera le differenze di quota appaiono molto ridotte.



**Figura 61:** carta topo-batimetrica di primo monitoraggio (1aM) a Misano e Riccione. In lilla la linea di riva.

Il rilievo topo-batimetrico di primo monitoraggio (Figura 61), realizzato tra il 25 e il 28 novembre 2017, ha interessato un tratto di spiaggia più ampio rispetto ai precedenti. Esso, infatti, ha coinvolto anche la zona di unione tra i rilievi di prima e seconda pianta, più altri circa 900 m: 500 m a nord di Riccione e altri 400 m a sud di Misano. Anche in questo caso sono stati seguiti dei transetti longitudinali e perpendicolari alla costa, estesi per circa 850 m a partire dalla spiaggia emersa fino alla batimetrica di oltre 6 m. Il rilievo è stato preceduto da un'attività di inquadramento topografico (7/11/2017) che ha utilizzato i vertici CARI0100, CARI0200, CARI0300, CARI0400<sup>61</sup> della Rete Geodetica Costiera.

<sup>61</sup> Vedi Vecchi Enrica, 2018, Monitoraggio del litorale Emiliano-Romagnolo con l'utilizzo di misure topo-batimetriche: metodi, prodotti e risultati, pp 66.



**Figura 62:** mappa di accumulo-erosione tra primo monitoraggio (linea di riva lilla) e seconda pianta (linea di riva rosa), relativi alle spiagge di Misano e Riccione. L'area tratteggiata in lilla costituisce l'area di ripascimento.

A distanza di un anno e mezzo dall'intervento di ripascimento (Figura 62), l'evoluzione della spiaggia di Misano vede abbassamenti di quota con valori fino a 2 m entro i primi fondali (Figura 67, Figura 68), e un arretramento medio della linea di riva di circa 30 m. Parte del sedimento eroso, depositandosi oltre la barra sommersa, ha determinato significativi innalzamenti di quota, con valori fino a 0,5 m. Anche dal lato mare della barriera in sacchi, si osserva un fenomeno di accumulo, con variazioni di quota di circa 0,3 m (Figura 67, Figura 68). Confrontando i rilievi di seconda pianta e di primo monitoraggio, a Misano, è stata stimata una perdita totale di  $114.320 \text{ m}^3$  (Tabella 9) all'interno dell'area di ripascimento. Come detto, parte del materiale eroso è migrato verso l'area esterna della barriera, mentre parte di esso si è riversato sulla spiaggia di Riccione<sup>62</sup>. Qui, infatti, dal confronto tra i rilievi di seconda pianta e di primo monitoraggio, emerge un'evoluzione meno regolare. Si alternano zone di accumulo e di erosione con variazioni di quota che raggiungono valori di circa 1,3 m.

<sup>62</sup> Vedi Vecchi Enrica, 2018, Monitoraggio del litorale Emiliano-Romagnolo con l'utilizzo di misure topo-batimetriche: metodi, prodotti e risultati, pp 68.

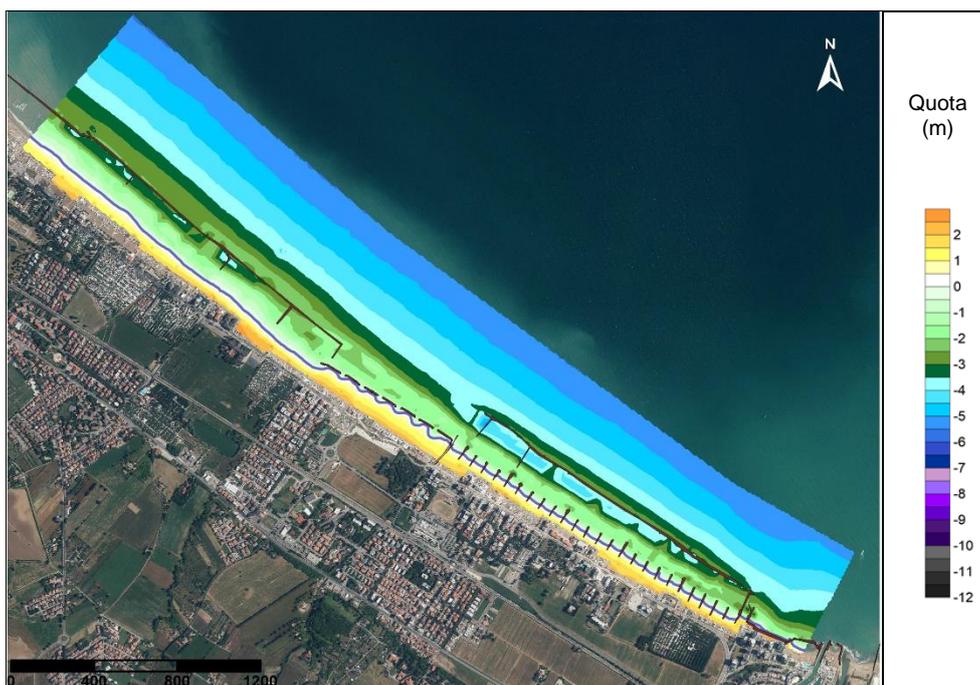
Lo sviluppo di questo tratto risulta simile a quello di Misano: erosione fino ai primi fondali e formazione di una barra sommersa oltre la quale il materiale eroso tende parzialmente ad accumularsi (Figura 62). A Riccione, all'interno dell'area di ripascimento, dal confronto tra rilievo di seconda pianta e di primo monitoraggio, è stata stimata una perdita di  $65.330 \text{ m}^3$  (Tabella 9).



**Figura 63:** mappa di accumulo-erosione tra primo monitoraggio (linea di riva rosa) e prima pianta (linea di riva blu), relativi alle spiagge di Misano e Riccione. L'area tratteggiata in lilla costituisce l'area di ripascimento.

Rispetto alla situazione pre-intervento (Figura 63), la spiaggia di Misano mostra un'evoluzione piuttosto positiva, con fenomeni di accumulo diffusi quasi nella totalità dell'area in esame, ad eccezione di ridotte zone isolate. Inoltre, si notano zone di accumulo sul lato sud dei pennelli in roccia. Ad un anno e mezzo dall'intervento, nell'area di ripascimento risultano ancora presenti  $108.910 \text{ m}^3$  (Tabella 9) di sabbia, pari a circa  $70 \text{ m}^3/\text{m}$ . La linea di riva risulta in avanzamento di circa 10-20 m. In corrispondenza della zona centrale della barriera in sacchi si osservano variazioni di quota elevate, fino a poco più di 1 m (Figura 63). Si osserva inoltre la tendenza del materiale sversato a migrare

verso la zona di approfondimento (fossa longitudinale), sul lato riva della barriera. Parte del materiale di ripascimento ha subito inoltre un trasporto in direzione longitudinale verso nord, andando ad alimentare la spiaggia di Riccione<sup>63</sup> (Figura 63, Figura 67, Figura 68). A Riccione, dalla mappa di accumulo-erosione tra primo monitoraggio e prima pianta emerge la presenza diffusa di zone di accumulo. Solo a ridosso della barriera in sacchi si osserva una zona di erosione (Figura 63). Dopo un anno e mezzo risultano ancora presenti circa 146.580 m<sup>3</sup> (Tabella 9) di sabbia, pari a circa 105 m<sup>3</sup>/m. La linea di riva ha subito un avanzamento di circa 25-35 m, mentre le variazioni di quota vedono dei picchi fino ad 1 m circa (Figura 70, Figura 71). Anche per la spiaggia di Riccione il materiale portato a ripascimento tende ad accumularsi sui primi fondali, fino a raggiungere la barriera in sacchi.

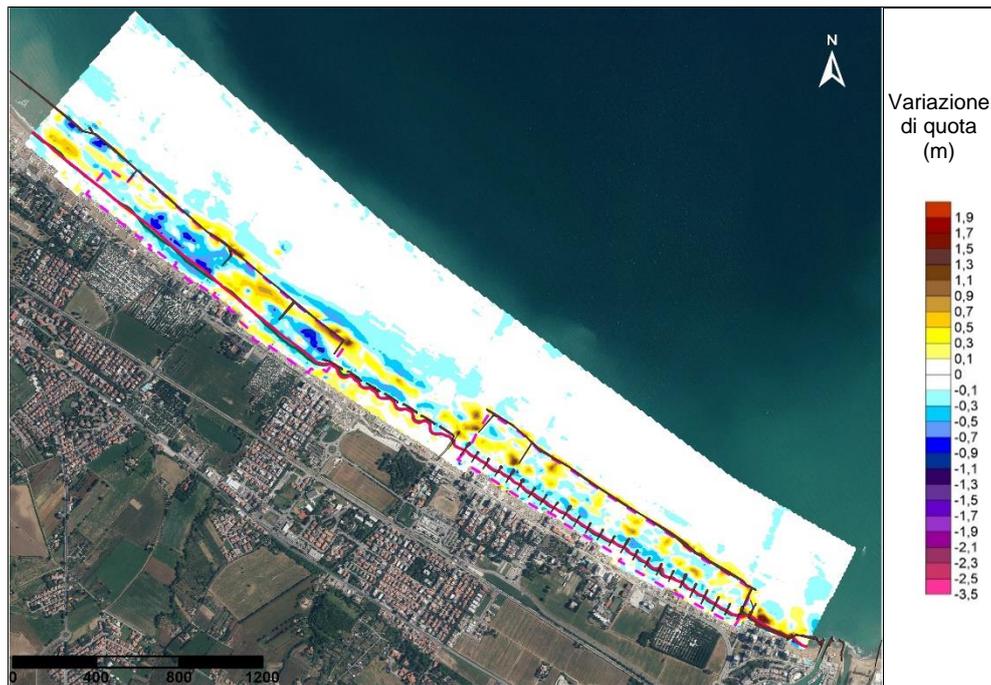


**Figura 64:** carta topo-batimetrica di secondo monitoraggio (2aM) a Misano e Riccione. In viola la linea di riva.

Il rilievo topo-batimetrico di secondo monitoraggio (Figura 64) è stato realizzato sullo stesso tratto di costa relativo al primo monitoraggio

<sup>63</sup> Vedi Vecchi Enrica, 2018, Monitoraggio del litorale Emiliano-Romagnolo con l'utilizzo di misure topo-batimetriche: metodi, prodotti e risultati, pp 69-70.

eseguito a dicembre 2018. Operativamente, sono stati seguiti transetti longitudinali e perpendicolari alla costa, estesi circa 850 m, a partire dalla spiaggia emersa fino alla batimetrica di circa 5,5 m, unitamente ad alcuni altri con estensione di circa 2 km, fino alla batimetrica di 11 m.



**Figura 65:** mappa di accumulo-erosione tra primo monitoraggio (line di riva lilla) e secondo monitoraggio (linea di riva verde) per le spiagge di Misano e Riccione. L'area tratteggiata in lilla costituisce l'area di ripascimento.

Dal confronto tra i rilievi di primo e secondo monitoraggio (Figura 65) è possibile osservare la sovrapposizione delle due linee di riva, a indicare che l'andamento è rimasto quasi invariato. A ridosso della barriera sommersa, l'andamento dei profili di primo e secondo monitoraggio è circa il medesimo nell'intera zona analizzata: esso mostra una tendenza all'approfondimento del fondale dal lato riva e all'accumulo dal lato mare (Figura 67, Figura 68, Figura 69, Figura 70, Figura 71). Al momento del rilievo di primo e secondo monitoraggio erano presenti argini con altezza variabile compresa tra circa 2,5 m e 3,5 m (Figura 67, Figura 68, Figura 69, Figura 70, Figura 71). Dal confronto tra primo

e secondo monitoraggio è stata stimata una perdita di materiale pari a  $32.300 \text{ m}^3$  (Tabella 9).

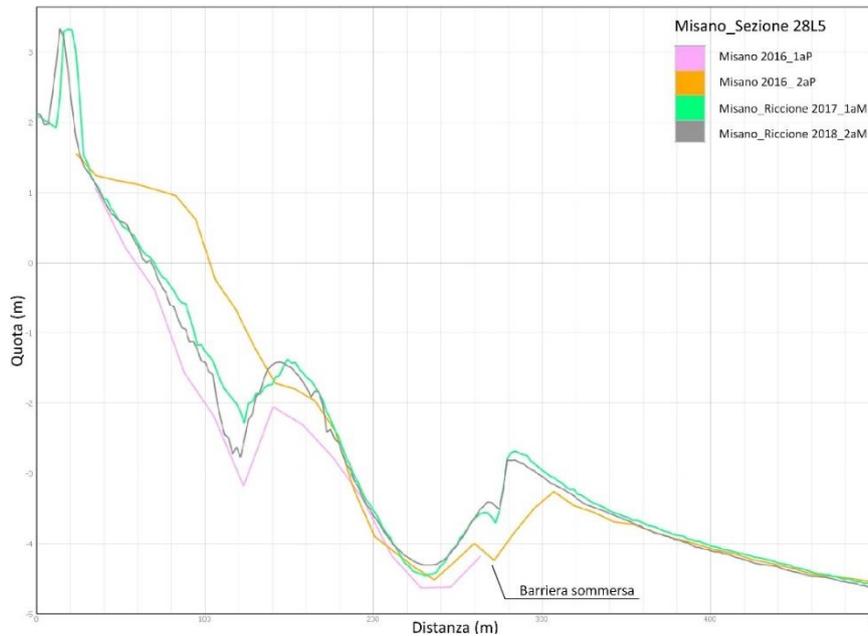


**Figura 66:** mappa di accumulo-erosione tra secondo monitoraggio (linea di riva turchese) e prima pianta (linea di riva blu), relativi alle spiagge di Misano e Riccione. L'area tratteggiata in lilla costituisce l'area di ripascimento.

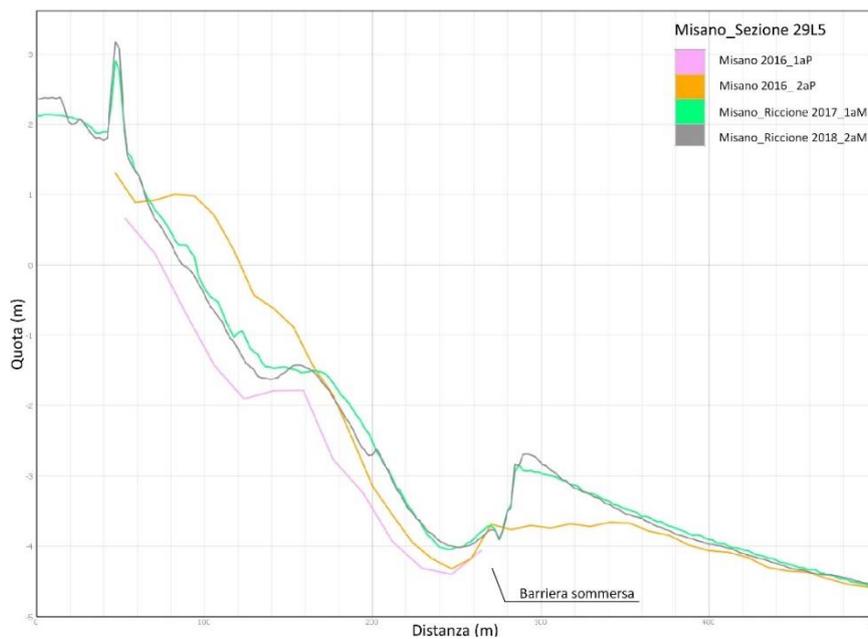
Rispetto alla situazione pre-intervento (Figura 66), la spiaggia di Misano mostra fenomeni di accumulo diffusi quasi nella totalità dell'area in esame, ad eccezione di ridotte zone isolate. Inoltre, si notano zone di accumulo sul lato sud dei pennelli in roccia. A due anni e mezzo dall'intervento, nell'area di ripascimento risultano presenti  $103.140 \text{ m}^3$  (Tabella 9) di sabbia, pari a circa  $68 \text{ m}^3/\text{m}$ . La linea di riva risulta in avanzamento di circa 20 m. In corrispondenza della zona centrale della barriera in sacchi si osservano variazioni di quota elevate, fino a poco più di 1 m (Figura 66). A Riccione, dalla mappa di accumulo-erosione tra secondo monitoraggio e prima pianta emerge la presenza diffusa di zone di accumulo, ma sia a ridosso della barriera in sacchi che in alcune zone nei primi fondali si osservano fenomeni di erosione (Figura 66). A distanza di circa due anni e mezzo dall'intervento risultano ancora presenti circa  $114.280 \text{ m}^3$  (Tabella 9) di sabbia, pari a

circa  $81 \text{ m}^3/\text{m}$ . La linea di riva ha subito un avanzamento medio di circa 35 m, mentre le variazioni di quota vedono dei picchi fino a valori di 1 m (Figura 69, Figura 70).

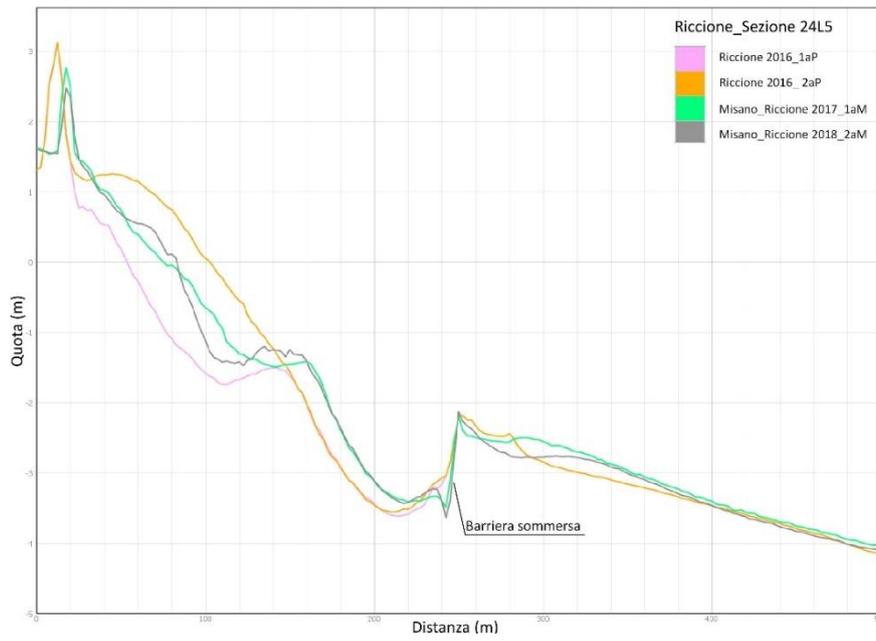
A seguire i profili estrapolati lungo le sezioni principali per le spiagge di Misano e Riccione.



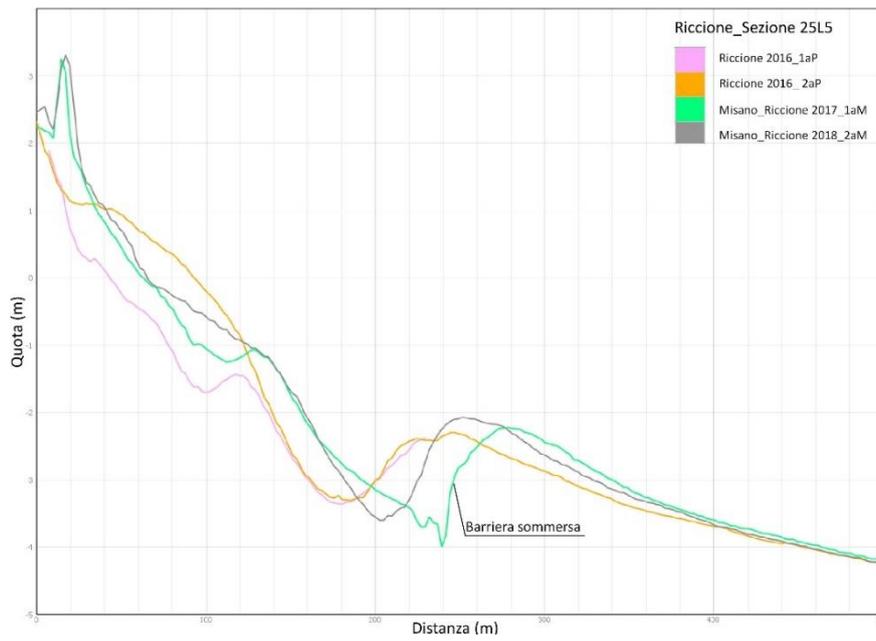
**Figura 67:** sezione 28L5, Misano.



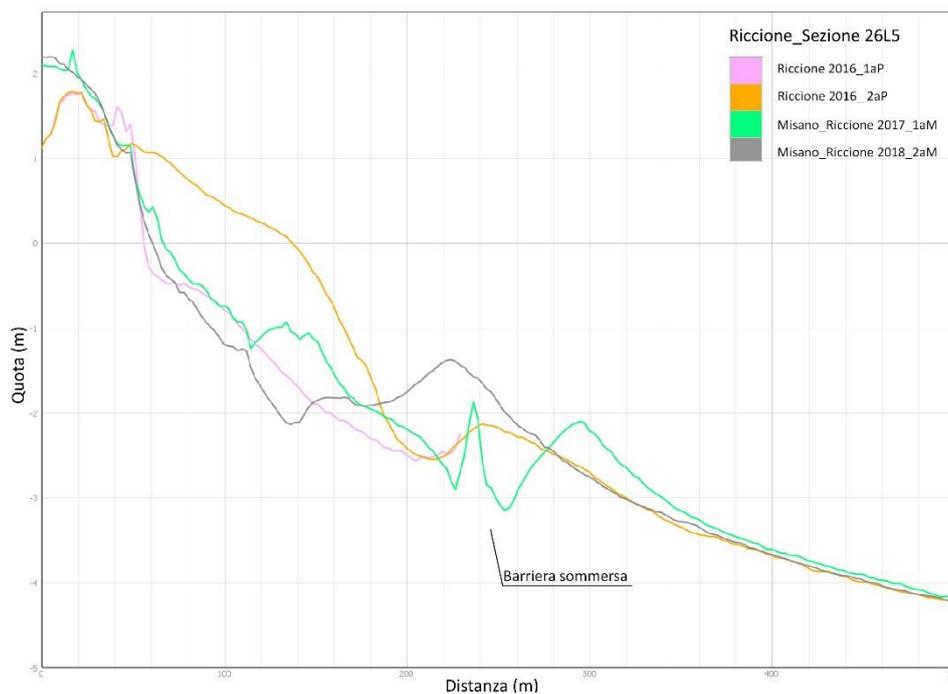
**Figura 68:** sezione 29L5, Misano.



**Figura 69:** sezione 24L5, Riccione.



**Figura 70:** sezione 25L5, Riccione.



**Figura 71:** sezione 26L5, Riccione.

La Tabella 9 mostra in sintesi i volumi stimati per le due spiagge oggetto di studio.

Rilievi		V positivo (m <sup>3</sup> )	V negativo (m <sup>3</sup> )	V netto (m <sup>3</sup> )
Misano	2aP-1aP	227.740	5.900	221.840
	1aM-2aP	37.770	152.090	-114.320
	1aM-1aP	117.940	9.030	108.910
	2aM-1aP	109.140	6.000	103.140
Riccione	2aP-1aP	213.380	1.450	211.930
	1aM-2aP	46.800	112.130	-65.330
	1aM-1aP	166.320	19.740	146.580
	2aM-1aP	141.020	26.740	114.280
Area di monitoraggio	2aM-1aM	28.300	60.600	-32.300

**Tabella 9:** volumi stimati per le spiagge di Misano e Riccione (V netto =  $\Delta V$ ).

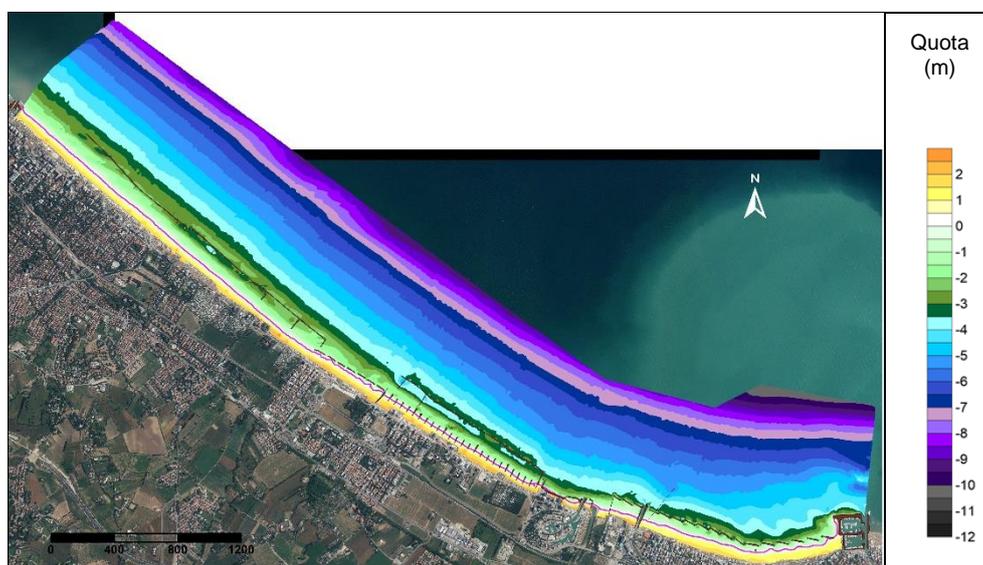
### 7.3 Macrocella 1: confronto 2012/2018

Il confronto tra le campagne topo-batimetriche della Macrocella 1 rientra nei monitoraggi che la Regione Emilia-Romagna effettua ogni 6 anni per verificare l'andamento generale del litorale. Tra gennaio e marzo 2012 è stata realizzata la quinta campagna topo-batimetrica, che ha interessato il tratto di litorale dal Porto di Cattolica a Riccione. A partire dalla spiaggia emersa fino alla batimetrica di circa 11 m, il rilievo è stato realizzato seguendo dei transetti perpendicolari e longitudinali alla costa. L'ultima campagna topo-batimetrica si è tenuta tra ottobre e novembre 2018 e ha coinvolto il litorale da Gabicce a Riccione.

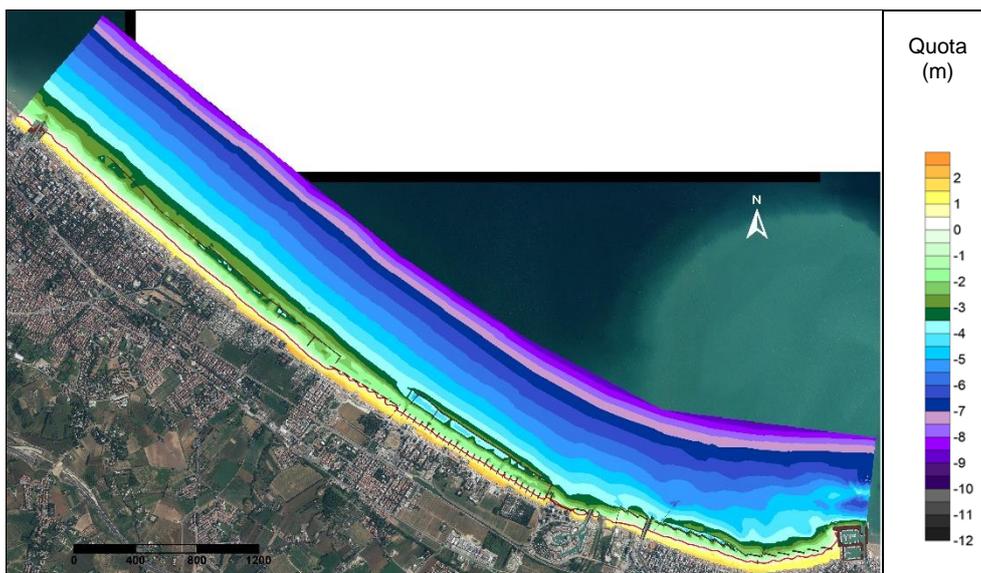
In fase di elaborazione è stata riscontrata una problematica: il rilievo del 2018 è stato realizzato seguendo sezioni più fitte rispetto a quelle del 2012. Ciò ha determinato la scelta di un approccio diverso dai precedenti per ottenere le mappe di accumulo-erosione. Tali mappe si ottengono per differenza tra le carte topo-batimetriche dei due rilievi. Ma, in questo caso, avendo delle aree prive di dati, il modello finale generato con metodo di interpolazione di tipo TIN sarebbe stato poco realistico. Infatti, con questo metodo, come già detto nel Capitolo 5, i punti distribuiti nello spazio, vengono congiunti da linee in modo da formare triangoli piani ed adiacenti. Questi, a loro volta, consentono di rappresentare con continuità la superficie, anche là dove non ci sono dati rilevati. Il valore di un punto interno ad un qualsiasi triangolo viene calcolato con interpolazione lineare dei vertici del triangolo, ma nel passaggio da un triangolo all'altro potrebbero esserci artefatti. Utilizzando, invece, il metodo di interpolazione *Nearest Neighbor*, c'è la possibilità di evitare di considerare aree prive di dati, escludendole dalla costruzione del *grid*. Infatti, è sufficiente impostare la ricerca del punto più vicino all'interno di un *range* prefissato e limitato, per cui le aree senza dati non vengono interessate dalla realizzazione del modello.

Ecco perché è stato utilizzato il metodo di interpolazione *Nearest Neighbor* per ottenere sia il file grid dei dati relativi al 2012, che quello

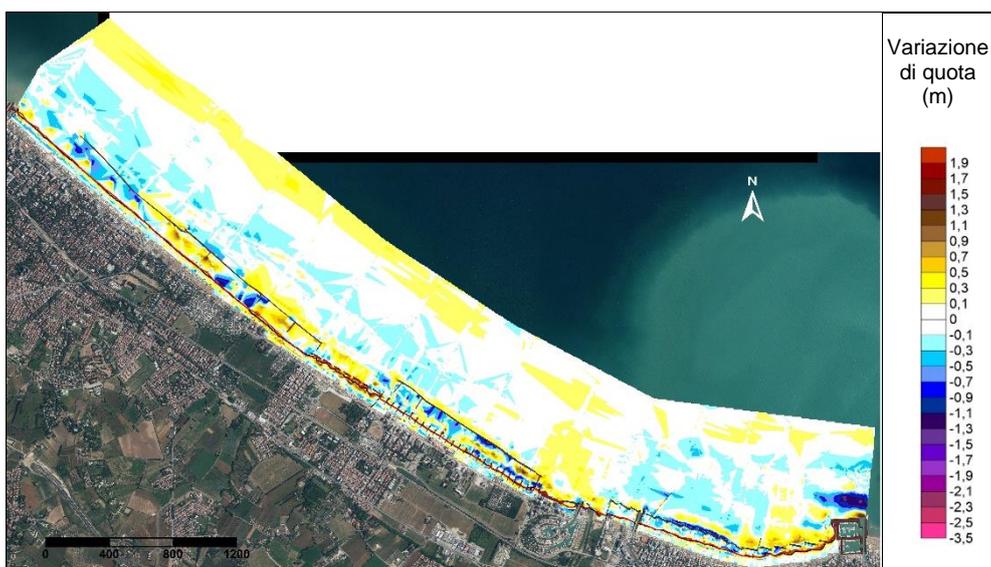
dei dati relativi al 2018. Per differenza tra questi due file è stata poi ricavata la mappa di accumulo-erosione, relativa ai soli punti comuni ai due rilievi. Successivamente, tale file è stato esportato al fine di poter essere rielaborato con metodo TIN per ottenere una mappa di accumulo-erosione simile a quelle viste fin ora. Prima di queste operazioni è stato necessario tenere conto del fatto che i rilievi del 2012 fossero riferiti non all'attuale sistema di riferimento nazionale (ETRS89-ETRF2000 epoca 2008.0), bensì all'UTM-ED50 fuso 32. Quindi, lo *shape* relativo al rilievo del 2012 è stato importato su Qgis cambiando il sistema di riferimento. Tale trasformazione è stata compiuta in automatico dal *software*, che così facendo ha collocato i punti nella posizione corretta rispetto al nuovo sistema di riferimento. Ma successivamente è stato necessario cambiare le proprietà del file per esplicitare la trasformazione avvenuta anche sulle coordinate dei punti. Infatti, sono stati introdotti due nuovi campi all'interno della tabella attributi associata ai dati di *input*, nei quali è stata inserita la funzione relativa alla trasformazione delle coordinate.



**Figura 72:**carta topo-batimetrica del 2012 relativa alla Macrocella 1, dal Porto di Cattolica a Riccione. In lilla la linea di riva.



**Figura 73:** carta topo-batimetrica del 2018 relativa alla Macrocella 1, da Gabicce a Riccione. In rosso la linea di riva.



**Figura 74:** mappa di accumulo-erosione tra il 2012 (linea di riva nera) ed il 2018 (linea di riva rossa), relativa alla Macrocella 1.

Per la Macrocella 1, dal confronto tra il 2012 ed il 2018 (Figura 74), emergono fenomeni di erosione diffusi, soprattutto in prossimità delle opere di difesa, dal lato riva. Dai calcoli di volume effettuati, risulta una perdita di materiale pari a  $39.620 \text{ m}^3$  nell'area in prossimità delle opere di difesa, lato riva (Tabella 10). Inoltre, la linea di riva mostra un arretramento medio, rispetto al 2018, di circa 25-30 m e l'ampiezza media di spiaggia è pari a circa 80 m. In generale, come già si era

verificato tra il 2006 ed il 2012, si rivela una perdita di sedimento. E una delle cause potrebbe essere la riduzione degli apporti di sabbia a ripascimento dei tratti sopraflutto a Misano e Riccione sud, da cui il materiale dovrebbe provenire grazie al trasporto solido litoraneo diretto da sud verso nord<sup>64</sup>.

La Tabella 10 mostra in sintesi i volumi stimati per l'area oggetto di studio.

Rilievo		V positivo (m <sup>3</sup> )	V negativo (m <sup>3</sup> )	V netto (m <sup>3</sup> )
Macrocella 1	2018-2012	774.460	814.080	-39.620

**Tabella 10:** volumi stimati per la Macrocella 1 (V netto =  $\Delta V$ ).

---

<sup>64</sup> Vedi Arpae, Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2012, pp 82.

## 8. Interpolazione con metodo Tin e Kriging a confronto

La tipologia di interpolazione influisce sulla costruzione del modello digitale del terreno (DTM) in contesti di rilievo topo-batimetrico.

### 8.1 Fasi di costruzione del modello

Il modello si costruisce a partire da una serie di punti sparsi che presentano una certa distribuzione. Questi punti vengono interpolati tramite un algoritmo che produce un grigliato regolare, all'interno del quale a ciascun punto viene attribuita una quota. Il passo successivo è quello di rappresentare il grigliato attraverso una superficie. Questa fase risulta influenzata da due aspetti:

- la densità di punti e la posizione che essi occupano;
- la densità del *grid*, che è indipendente dal modello di interpolazione scelto.

Il metodo di interpolazione TIN viene costruito rispettando la regola di Delaunay: il cerchio che passa per i 3 vertici di un triangolo non contiene alcun altro vertice della rete triangolata. C'è un teorema che dimostra che, comunque sia dato un insieme di punti su un piano, esiste sempre almeno una triangolazione che verifica la regola di Delaunay<sup>65</sup>. Quindi il metodo TIN crea dei triangoli che meglio ricoprono la porzione di territorio in questione senza che ci sia sovrapposizione tra di essi. Il metodo di interpolazione *Kriging*, invece, è un metodo di regressione di tipo stocastico. Il valore incognito in un punto viene calcolato con una media pesata dei valori noti. I pesi che vengono dati alle misure note, dipendono dalla relazione spaziale esistente tra i valori misurati nell'intorno del punto incognito. Per calcolare i pesi si usa il semivariogramma, un grafico che mette in relazione la distanza tra due punti e il valore di semivarianza tra le misure effettuate in essi. Se si disponesse di dati regolari in partenza (ad esempio, con interdistanze pari a 1 m in tutte le direzioni) e si creassero modelli a 1 m, i risultati ottenuti con il metodo *kriging* e con il metodo TIN risulterebbero molto simili tra loro. In generale, la scelta

---

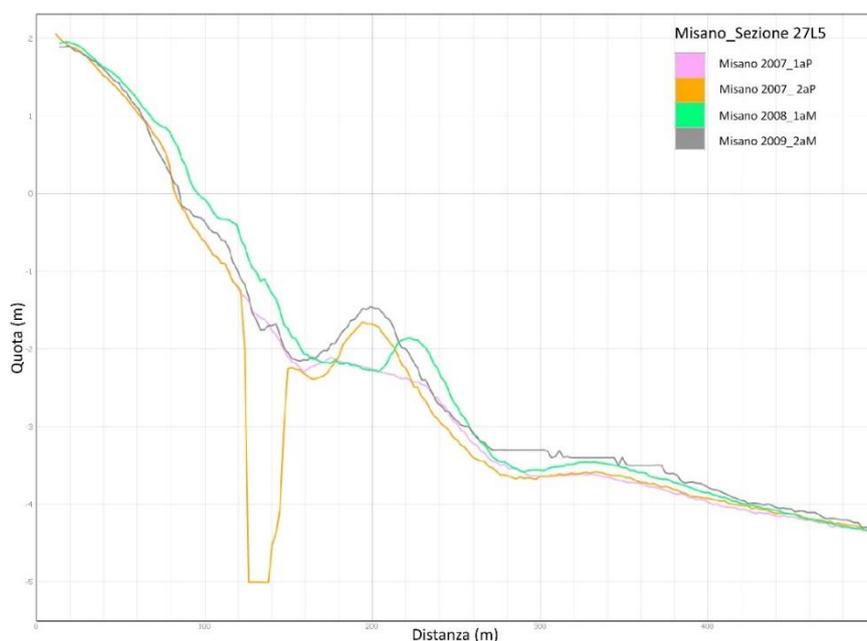
<sup>65</sup> Vedi pagina web <http://it.linkedin.com/in/valerionoti>.

di ottenere i DTM tramite il metodo TIN (con un passo di griglia pari a 10 m) può essere legata ad una questione visiva. Infatti, l'interpolazione TIN restituisce delle superfici piuttosto lisce. Più è denso il dato di partenza, meno risulta influente la scelta dell'interpolatore, sia per scopi di misura, che di rappresentazione. Infatti, se i dati di partenza sono molto densi, l'operazione di interpolazione dovrà determinare un numero molto limitato di nuove informazioni. Laddove, invece, il dato è molto sparso e disomogeneo, la scelta del metodo dell'interpolazione influisce in modo significativo anche in termini di rappresentazione. In quest'ultimo caso, tuttavia, non è detto che un metodo sia giusto e l'altro sia sbagliato. Tutti i metodi di interpolazione commettono errori nel momento in cui si sopravvaluta il contenuto di informazioni che essi contengono: dove non ci sono dati, spesso non esistono leggi fisiche in grado di determinare l'andamento reale. Ciò rientra nella parte di aleatorietà relativa all'indeterminazione sulla stima di una superficie.

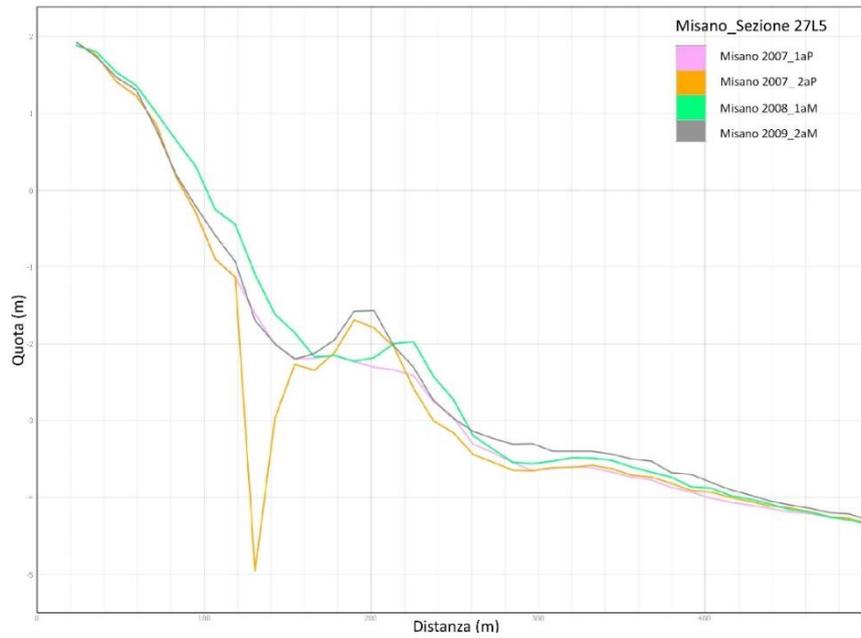
A seguire si dimostra, su una superficie campione, come cambiando il passo e il metodo di interpolazione, a partire dagli stessi dati, si ottengono risultati diversi, sia in termini di restituzione grafica che in termini di volumi.

## 8.2 Elaborazioni

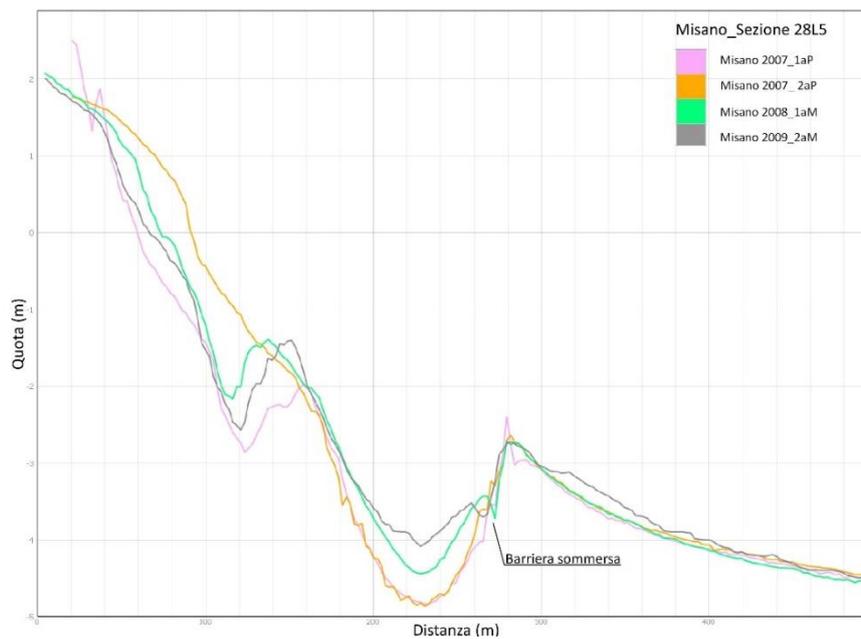
Riguardo alla restituzione grafica, si riportano come esempio i profili lungo due sezioni di monitoraggio (27L5 e 28L5), ricavati a partire da batimetrie ottenute con algoritmi di interpolazione differenti. Nello specifico, si tratta delle batimetrie di prima pianta, seconda pianta, primo monitoraggio e secondo monitoraggio elaborate con un passo di interpolazione pari a 10 m e metodo TIN. Successivamente l'operazione è stata ripetuta con metodo *kriging* e passo di interpolazione pari a 2 m. La riduzione delle dimensioni del grigliato per il *kriging* è stata necessaria al fine di estrapolare dei profili di spiaggia che non fossero eccessivamente "lisciati". Infatti, quest'ultimi non devono risultare eccessivamente "lisci", in modo da consentire di osservare gli andamenti in corrispondenza delle opere o la presenza di eventuali dune o buche, ma allo stesso tempo è necessario che essi non risultino troppo dettagliati, al fine di garantire una semplice interpretazione. La superficie campione riguarda la spiaggia di Misano, in merito ai dati di rilievo del *Progettone 2*.



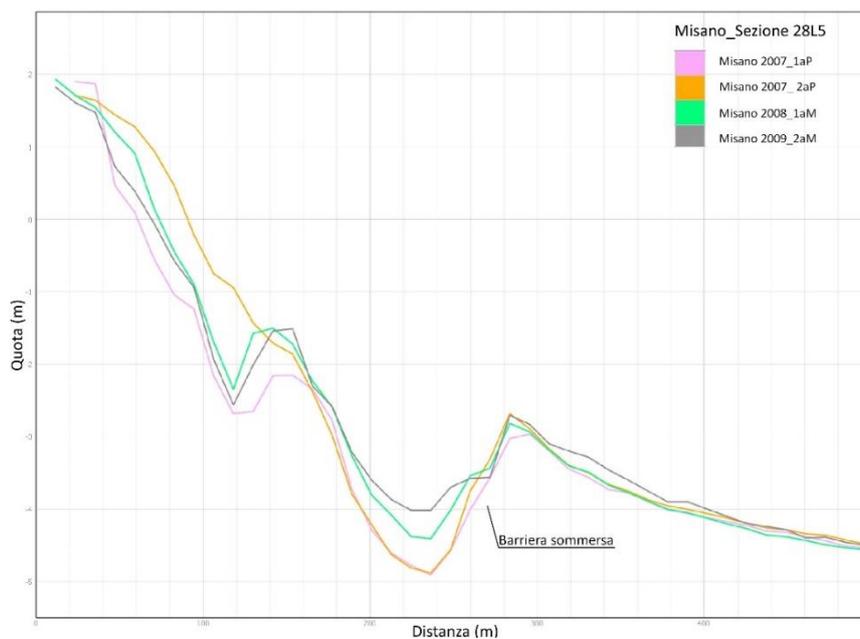
**Figura 75:** Sezione 27L5 - profili di spiaggia ricavati da DTM ottenuti con metodo *Kriging* e passo di griglia pari a 2 m.



**Figura 76:** Sezione 27L5 - profili di spiaggia ricavati da DTM ottenuti con metodo TIN e passo di griglia pari a 10 m.



**Figura 77:** Sezione 28L5 - profili di spiaggia ricavati da DTM ottenuti con metodo *Kriging* e passo di griglia pari a 2 m.



**Figura 78:** Sezione 28L5 - profili di spiaggia ricavati da DTM ottenuti con metodo TIN e passo di griglia pari a 10 m.

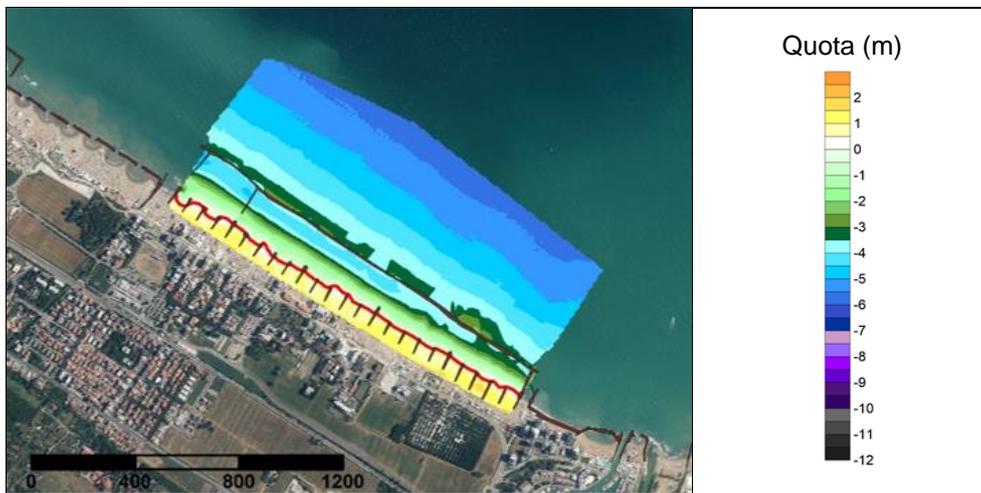
A livello grafico è evidente che i profili ottenuti con il metodo di interpolazione TIN sono più lisci ( Figura 76, Figura 78) degli altri (Figura 75, Figura 77).

A seguire, a parità di dati, si valutano le differenze in termini di volume, al variare della densità del *grid* e in funzione del metodo adottato.

Le mappe riguardano la spiaggia di Misano e si riferiscono ai dati dei rilievi di prima e seconda pianta, relativi al Progettone 3. In particolare, il calcolo dei volumi è stato eseguito a partire dalle mappe di confronto.



**Figura 79:** carta topo-batimetrica di prima pianta per la spiaggia di Misano. Linea di riva in blu. Metodo di interpolazione TIN e passo di interpolazione pari a 10 m.



**Figura 80:** carta topo-batimetrica di seconda pianta per la spiaggia di Misano. Linea di riva in rosso. Metodo di interpolazione TIN e passo di interpolazione pari a 10 m.



**Figura 81:** carta di accumulo-erosione tra seconda (linea di riva in verde) e prima pianta (linea di riva in blu) per la spiaggia di Misano, ricavata come differenza tra mappe TIN con passo 10 m.

Calcolo del volume netto relativo alla Figura 81:

	Rilievo	V netto (m <sup>3</sup> )
Misano	2aP-1aP	221.840

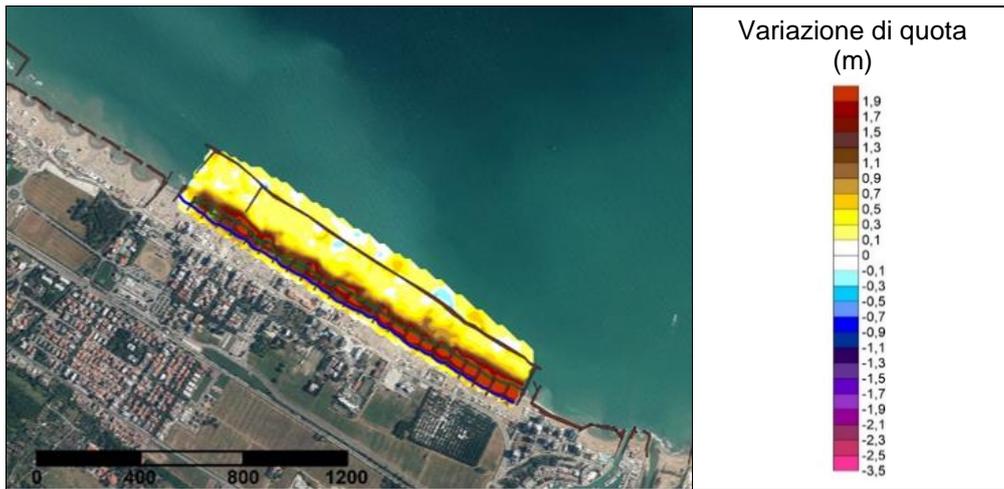
**Tabella 11:** volume accumulato, stimato per la spiaggia di Misano, da confronto tra prima e seconda pianta.



**Figura 82:** carta topo-batimetrica di prima pianta per la spiaggia di Misano. Linea di riva in blu. Metodo di interpolazione TIN e passo di interpolazione pari a 20 m.



**Figura 83:** carta topo-batimetrica di seconda pianta per la spiaggia di Misano. Linea di riva in rosso. Metodo di interpolazione TIN e passo di interpolazione pari a 20 m.

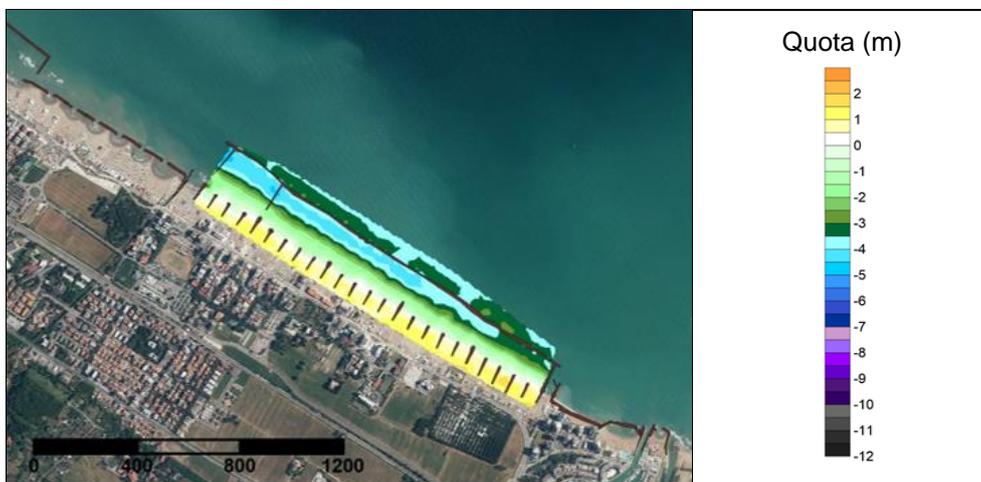


**Figura 84:** carta di accumulo-erosione tra seconda (linea di riva in verde) e prima pianta (linea di riva in blu) per la spiaggia di Misano, ricavata come differenza tra mappe TIN con passo 20 m.

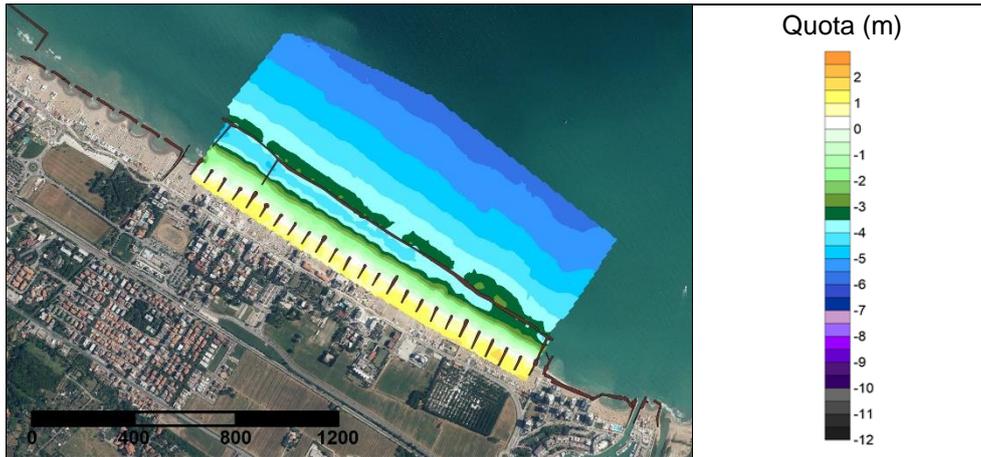
Calcolo del volume netto relativo alla Figura 84:

	Rilievo	V netto (m <sup>3</sup> )
Misano	2aP-1aP	274.850

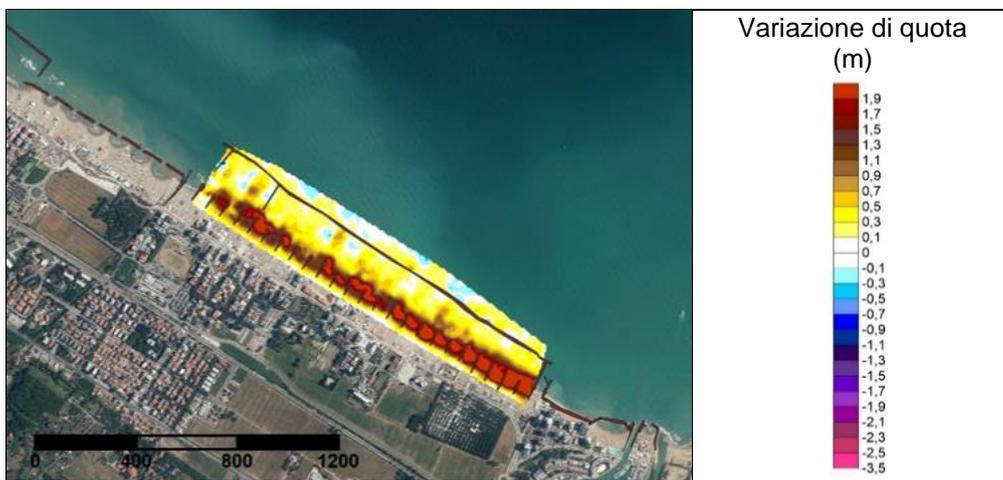
**Tabella 12:** volume accumulato, stimato per la spiaggia di Misano, da confronto tra prima e seconda pianta.



**Figura 85:** carta topo-batimetrica di prima pianta per la spiaggia di Misano. Metodo di interpolazione *kriging* e passo di interpolazione pari a 10 m.



**Figura 86:** carta topo-batimetrica di seconda pianta per la spiaggia di Misano. Metodo di interpolazione *kriging* e passo di interpolazione pari a 10 m.



**Figura 87:** carta di accumulo-erosione tra seconda e prima pianta per la spiaggia di Misano, ricavata come differenza tra mappe *kriging* con passo 10 m.

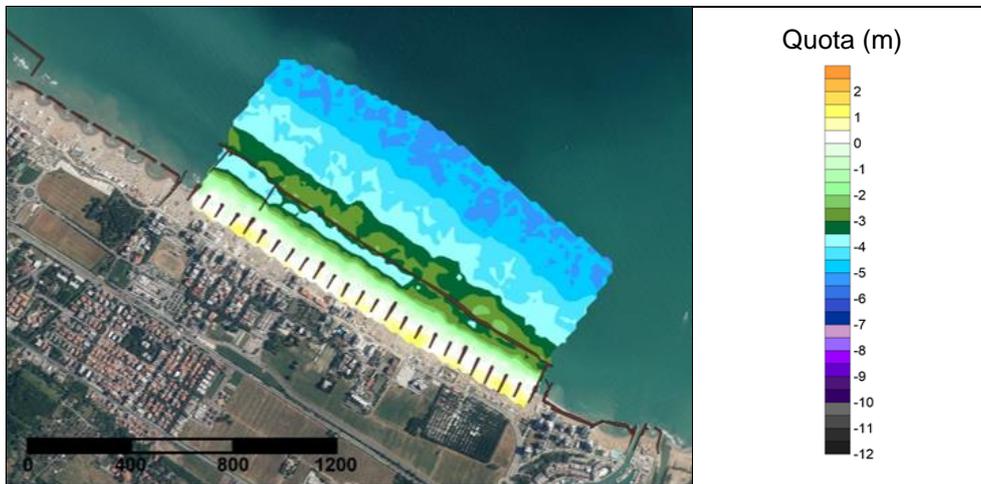
Calcolo del volume netto relativo alla Figura 87:

	Rilievo	V netto (m <sup>3</sup> )
Misano	2aP-1aP	276.180

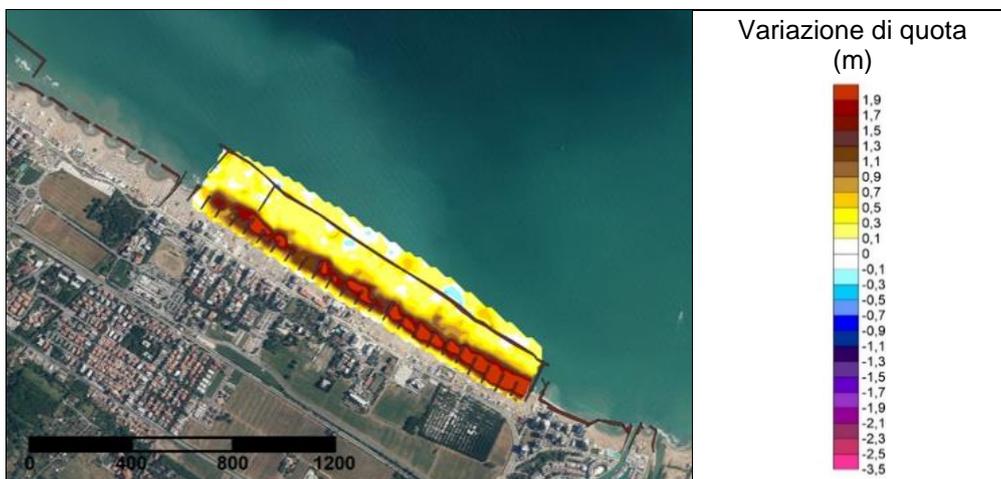
**Tabella 13:** volume accumulato, stimato per la spiaggia di Misano, da confronto tra prima e seconda pianta.



**Figura 88:** carta topo-batimetrica di prima pianta per la spiaggia di Misano. Metodo di interpolazione *kriging* e passo di interpolazione pari a 20 m.



**Figura 89:** carta topo-batimetrica di seconda pianta per la spiaggia di Misano. Metodo di interpolazione *kriging* e passo di interpolazione pari a 20 m.



**Figura 90:** carta di accumulo-erosione tra seconda e prima pianta per la spiaggia di Misano, ricavata come differenza tra mappe *kriging* con passo 20 m.

Calcolo del volume netto relativo alla Figura 90:

	Rilievo	V netto (m <sup>3</sup> )
Misano	2aP-1aP	277.480

**Tabella 14:** volume accumulato, stimato per la spiaggia di Misano, da confronto tra prima e seconda pianta.

Dall'osservazione dalle mappe (Figura 79, Figura 80, Figura 81, Figura 82, Figura 83, Figura 84, Figura 85, Figura 86, Figura 87, Figura 88, Figura 89, Figura 90) si ricava che, a parità di dato in ingresso, aumentando il passo di interpolazione aumentano le differenze a livello visivo, a causa del fatto che i due metodi lavorano in modo diverso.

A livello di volumi, invece, i risultati sono riportati in Tabella 15, dove, non disponendo di un dato "vero", il confronto tra i volumi stimati è stato possibile solo comparando i risultati ottenuti a due a due. Nell'ultima colonna di Tabella 15 si riporta la differenza tra modelli per unità di superficie.

Confronto	Metodo di interpolazione	Passo di interpolazione (m)	V netto (m <sup>3</sup> )	Differenza ( $\frac{m^3}{m^2}$ )
Misano 2aP-1aP	TIN	10	221.840	14,97%
	TIN	20	274.850	
	<i>Kriging</i>	10	276.180	0,36%
	<i>Kriging</i>	20	277.480	
	TIN	10	221.840	15,35%
	<i>Kriging</i>	10	276.180	
	TIN	20	274.850	0,74%
	<i>Kriging</i>	20	277.480	

**Tabella 15:** differenza tra i volumi ottenuti a partire dalle diverse mappe topografiche, rapportata all'area di calcolo (area di ripascimento, 353.900 m<sup>2</sup>).

La Tabella 15 mostra una variazione dei volumi stimati con differenze che in alcuni casi non superano un punto percentuale per unità di superficie. In particolare, si osserva come la scelta del passo di campionamento sia più incidente sul metodo di interpolazione TIN (14,97%) piuttosto che sul metodo di interpolazione *kriging*, dove le variazioni di volume raggiungono lo 0,36%. Mentre, la scelta del metodo di interpolazione è più incidente per un passo pari a 10 m

(15,35 %) piuttosto che per un passo pari a 20 m, dove le variazioni di volume raggiungono lo 0,74%.

Si sottolinea infine che tali test non possono ritenersi esaustivi per molteplici ragioni, ma prima tra tutte che il risultato ottenuto è riferito ad un'unica area. Per avere risultati più significativi e stabili, sarebbe stato necessario estendere il numero di aree e soprattutto partire da un modello digitale del terreno di riferimento a più alta densità, da utilizzarsi come riferimento.

## **Conclusione**

Il sistema litoraneo della regione Emilia-Romagna, nel corso del '900, soprattutto nella seconda metà, è stato oggetto di una profonda trasformazione. Gli originari caratteri paesaggistico-ambientali sono radicalmente cambiati, sia per fattori naturali che antropici. Dopo aver individuato le cause del dissesto, la Regione ha contrastato il fenomeno con opere di difesa rigide e, negli ultimi anni, con interventi di ripascimento. Gli effetti e l'efficacia di questi interventi sono stati affiancati da piani di monitoraggio. A tal proposito, sono state necessarie delle campagne di rilievo topo-batimetriche che hanno permesso di confrontare alcune grandezze a distanza di tempo. Ciò è stato possibile in quanto i rilievi sono stati georiferiti in un unico sistema di riferimento.

L'elaborato ha riguardato una prima analisi sulle spiagge di Misano e Riccione, sia nell'ambito del *Progettone 2* (nel 2007) che dell'ambito del *Progettone 3* (nel 2016). Utilizzando diversi *software*, i risultati ottenuti per queste due spiagge sono stati analizzati sotto forma di modelli digitali del terreno (DTM), profili di spiaggia e volumi accumulati o erosi. Alla fine, è emerso che queste due località, già oggetto di interventi in passato a causa dei fenomeni erosivi che le caratterizzano, necessiterebbero di continui interventi di ripascimento, oltre che della revisione delle attuali opere di difesa. Inoltre, è anche emerso che il trasporto solido di Riccione, diretto da sud verso nord, è influenzato in parte dagli interventi di ripascimento effettuati su Misano.

Una seconda analisi, invece, ha coinvolto un tratto più ampio del litorale emiliano-romagnolo: l'intera Macrocella 1, che si estende da Gabicce a Riccione. In questo caso sono state valutate le variazioni morfologiche che hanno interessato tale tratto di litorale dal 2012 al 2018. Dai due modelli digitali del terreno e dal calcolo delle variazioni di volume sono emersi, anche in questo caso, fenomeni di erosione diffusi, soprattutto in prossimità delle opere di difesa, dal lato riva.

Una terza ed ultima analisi ha invece coinvolto un aspetto legato all'ambito della ricerca. In questo caso, per la stessa area di indagine, sono state confrontate delle mappe di accumulo-erosione e dei grafici relativi all'andamento dei profili di spiaggia, ottenuti con metodi di post-elaborazione differenti. A lavoro ultimato, è stato riscontrato che i punti interpolati con un certo tipo di algoritmo, producono risultati diversi sia a livello visivo che di volume stimato, a seconda della densità di punti, della posizione che essi occupano e della densità del *grid* cercato. Inoltre, su una superficie a campione è stato osservato come la scelta del passo di campionamento sia stata più incidente sul metodo di interpolazione TIN (14,97%) piuttosto che sul metodo di interpolazione *kriging*, dove le variazioni di volume hanno raggiunto lo 0,36%. Invece, la scelta del metodo è risultata più incidente per un passo di interpolazione pari a 10 m (15,35 %) piuttosto che per un passo pari a 20 m, dove le variazioni di volume non hanno superato un punto percentuale per unità di superficie (0,74%).

A conclusione di tutto il lavoro svolto emerge che l'erosione costiera dell'Emilia-Romagna è un problema attuale. L'unico modo per far fronte a questo fenomeno, e quindi per preservare tale patrimonio, è l'attuazione di un piano di monitoraggio che preveda periodici interventi di ripascimento. A questo proposito, c'è bisogno di misure affidabili, di misure realizzate in modo adeguato, ma soprattutto è necessario comparare in modo diretto i vari rilievi nel tempo. Infatti, solo attraverso la conoscenza e la disponibilità delle informazioni è possibile trasformare le crisi e le emergenze ambientali in nuove sfide per la crescita e lo sviluppo sia sociale che economico.

## **Bibliografia**

Arpae, Annuario dei dati 2012, cap. 9c, pp. 848-900.

Arpa Servizio Idro-Meteo-Clima, 2015, Relazione specialistica: piano di monitoraggio dell'intervento.

Arpae, Stato del litorale emiliano-romagnolo dell'anno 2007 e piano decennale di gestione.

Arpae, Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2012, erosione e interventi di difesa.

Aguzzi Margherita et al., 2012, Nuovi indicatori per lo studio e la gestione della costa emiliano-romagnola, pp. 1-15.

Aguzzi Margherita et al., Il monitoraggio di Arpae sulle spiagge, in *Ecoscienza*, 3, 2017, pp. 94-95

Aguzzi Margherita et al., Stato dell'arte del litorale emiliano-romagnolo, in *Ecoscienza* 5, pp. 80.

Barbarella Maurizio, 2009, Presentazione delle reti di stazioni permanenti GNSS dell'Emilia-Romagna.

Carli et al., 2005, Tecniche di monitoraggio dell'evoluzione delle spiagge, in *Erosione costiera*, pp.125-165.

Dovesi Linda, 2018, Realizzazione della Rete Geodetica Costiera della Regione Emilia-Romagna: aspetti geodetici e computazionali, tesi di laurea.

Gandolfi Stefano, Appunti sul sistema GNSS, a.a.2008/2009.

Gandolfi Stefano et al., Asita 2017, La rete geodetica costiera della regione Emilia-Romagna, pp. 599-603.

Gandolfi Stefano - Dalla base GNSS alle Reti di stazioni permanenti GNSS per il posizionamento in tempo reale, pp. 1-96

ISPRA, 2014, Linee guida per gli studi ambientali connessi alla realizzazione di opere di difesa costiera - Manuale linee guida, pp. 1-25.

Montanari Roberto e marasmi Christiana, 2011, Nuovi strumenti per la gestione dei litorali in Emilia-Romagna, pp. 1-72.

Monica Guida e Roberto Montanari, 2016, Stato del litorale emiliano-romagnolo - erosione e interventi di difesa - pianificazione e programmazione di interventi per il contrasto all'erosione, convegno.

Piva Andrea, 2012, tecniche di monitoraggio del litorale: evoluzione morfologica di lungo periodo della spiaggia di cattolica (RN), tesi di laurea.

Preti Mentino, 2007, Stato del litorale emiliano-romagnolo e piano decennale di gestione - La gestione dei litorali: le esperienze in Emilia-Romagna e in Italia, direzione tecnica Arpae.

Preti Mentino, 2011, Studi costieri, dinamica e difesa dei litorali – Gestione integrata della fascia costiera .19, pp 8.

Preti Mentino, 2011, La difesa delle spiagge tra scogliere e ripascimento, in Ecoscienza 2, pp.72-73.

Rossi Lorenzo, Rilievi batimetrici, alla pagina web: [www.geocoste.com](http://www.geocoste.com).

Tavasci Luca, 2016, Il monitoraggio dei sistemi di riferimento terrestri mediante tecniche satellitari GNSS: dai sistemi globali ai servizi di posizionamento NRTK, tesi di dottorato.

Vecchi Enrica, 2018, Monitoraggio del litorale emiliano-romagnolo con l'utilizzo di misure topo-batimetriche: metodi, prodotti e risultati, tesi di laurea.



## Ringraziamenti

Se qualcuno, tempo fa, mi avesse detto che il 7 febbraio del 2020 mi sarei laureata “di nuovo”, non ci avrei mai creduto. Non è stato facile decidere di ricominciare a studiare, ma giunta alla fine di questo intenso percorso, dico che ne è valsa assolutamente la pena.

Dedico queste ultime righe ai ringraziamenti di tutte le persone che in questi due anni sono entrate nella mia vita per poco o molto tempo, profondamente o superficialmente. Ognuna di loro mi ha insegnato e lasciato qualcosa.

Desidero innanzitutto ringraziare il Professor Stefano Gandolfi per la disponibilità, l’attenzione e la gentilezza dimostrate dal primo giorno di lezione e durante tutto il periodo di stesura della tesi. Grazie alla capacità di trasmettere la passione per quello che insegna, ho avuto modo di appassionarmi e avvicinarmi ad una realtà lavorativa per me nuova. Ringrazio tutto il suo “staff”, che dal primo giorno al DICAM mi ha fatto sentire “come a casa”. Ma un ringraziamento particolare va ad Enrica, che con i suoi preziosi consigli mi ha sopportato e supportato durante la realizzazione della tesi e mi ha dato modo di imparare tanto.

Un doveroso ringraziamento va all’Ing. Nunzio De Nigris grazie al quale è stato possibile conoscere il *modus operandi* di una grande azienda come l’Arpae.

Ringrazio la mia Famiglia. In particolare, Dario che più di tutti mi ha sempre spronato e incoraggiato. Lui dal primo giorno ci ha sempre creduto. Grazie per aver sopportato le mie ansie, le mie paure ma soprattutto i miei sbalzi di umore.

E ringrazio me stessa: senza la mia tenacia, la mia determinazione e la mia forza di volontà tutto questo non sarebbe stato possibile. Che tale traguardo sia per me un nuovo punto di partenza.

In bocca al lupo a me!