



Università degli Studi di Cagliari

## **DOTTORATO DI RICERCA**

DIFESA E CONSERVAZIONE DEL SUOLO, VULNERABILITA'

AMBIENTALE E PROTEZIONE IDROGEOLOGICA

Ciclo XXVII

### **Caratterizzazione morfodinamica della spiaggia del Poetto**

Settore scientifico disciplinare di afferenza

Geo 04

Presentata da: Walter Brambilla

Coordinatore Dottorato: Prof. Giorgio Ghiglieri

Tutor: Prof. Sandro DeMuro

Esame finale anno accademico 2014 – 2015



*"A smooth sea never made a skillful sailor"*

*Proverbio Inglese*



La presente tesi è stata prodotta durante la frequenza del corso di dottorato in “Difesa e Conservazione del Suolo, Vulnerabilità Ambientale e Protezione Idrogeologica” dell’Università degli Studi di Cagliari, a.a. 2011/2012 - XXVII ciclo, con il supporto di una borsa di studio finanziata con le risorse del P.O.R. SARDEGNA F.S.E. 2007-2013 – Obiettivo competitività regionale e occupazione, Asse IV Capitale umano, Linea di Attività 1.3.1 “Finanziamento di corsi di dottorato finalizzati alla formazione di capitale umano altamente specializzato, in particolare per i settori dell’ICT, delle nanotecnologie e delle biotecnologie, dell’energia e dello sviluppo sostenibile, dell’agroalimentare e dei materiali tradizionali”.

## Indice

1.0	Introduzione .....	6
1.1	Abstract .....	7
1.2	Premessa .....	8
1.3	Obiettivi .....	10
1.4	Metodologia .....	11
1.5	Inquadramento Geografico .....	13
1.6	Inquadramento Geologico .....	17
1.7	Origine del Poetto .....	23
<b>STUDIO CLIMATOLOGICO.....</b>		<b>25</b>
2.0	Introduzione .....	25
2.1	Traversia e fetch .....	25
2.2	Regime dei venti.....	26
2.3	Regime di moto ondoso .....	28
2.4	Classificazione energetica degli eventi d’onda.....	32
2.5	Maree .....	34
2.6	Conclusioni dello studio climatologico.....	38
<b>STUDIO SEDIMENTOLOGICO.....</b>		<b>39</b>
3.0	Introduzione .....	39
3.1	Acquisizione e analisi dei dati bibliografici.....	39
3.2	Acquisizione e analisi dei dati sedimentologici .....	45
3.3	Analisi Tessiturale.....	46
3.4	Analisi composizionale .....	49
3.5	Analisi calcimetrica.....	51
3.6	Analisi del peso specifico.....	53
3.7	Cluster Analysis – Studio statistico e raggruppamento dei dati.....	55
3.8	Conclusioni dello studio sedimentologico.....	64
<b>STUDIO MORFODINAMICO.....</b>		<b>66</b>
4.0	Introduzione .....	66
4.0.1	La spiaggia .....	67
4.0.2	I processi che causano trasporto solido litoraneo .....	70



4.1	Attività preliminari.....	72
4.1.1	Acquisizione dei dati topografici e batimetrici .....	72
4.2	Analisi morfometriche dei profili di spiaggia .....	75
5.0	Classificazione Morfodinamica.....	99
5.1	Regime morfodinamico.....	104
5.2	Calcolo della velocità di caduta adimensionale.....	106
5.3	Classificazione morfodinamica .....	107
6.0	Modelli idrodinamici.....	109
6.1	Analisi preliminari e impostazione del modello.....	111
6.2	Applicazione del Delft-3D .....	112
6.3	Risultati del modello .....	113
7.0	Video-Monitoraggio Costiero .....	117
7.1	La stazione di video-monitoraggio.....	117
7.2	Calcolo della geometria esterna .....	119
7.3	Geo-referenziazione e ribaltamento delle foto .....	122
7.4	Interpretazione delle immagini.....	123
7.5	Discontinuità morfologica delle barre .....	125
8.0	Conclusioni.....	127
	Bibliografia .....	130
	Ringraziamenti .....	137

## 1.0 Introduzione

Il lavoro del dottorato è stato svolto parallelamente alle attività di ricerca previste dal progetto “Beach Environment, management And Coastal Hazard” (Ambiente spiaggia, gestione e rischio costiero) B.E.A.C.H. (Regione Autonoma della Sardegna – L.R. 7/2007 “Promozione della ricerca scientifica e dell’innovazione tecnologica in Sardegna”) e dal progetto TENDER NEPTUNE, coordinati dal professor Sandro De Muro dell’Università di Cagliari. Il progetto B.E.A.C.H. ha l’obiettivo di attivare studi approfonditi per la comprensione delle dinamiche di spiagge campione di notevole valenza ambientale al fine di valutare i rischi a cui queste sono esposte. In concordanza con tale obiettivo, la presente tesi ha come fine principale la comprensione dei principali processi costieri attuali della spiaggia del Poetto.

Le attività operative per l’acquisizione di nuovi dati e per l’installazione di una stazione di monitoraggio costiero, sono state realizzate grazie alle convenzioni accese con :

- Il Comando Militare Marittimo Autonomo in Sardegna.
- Il Reparto Operativo Direzione Marittima della Guardia Costiera di Cagliari la Marina Militare.
- Il Servizio della Rete Ondametrica Nazionale dell’Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale.

Oltre ad allacciare rapporti istituzionali per garantire l’operatività della ricerca, durante il dottorato sono state avviate delle collaborazioni scientifiche con:

- L’istituto autonomo olandese per la ricerca applicata (Deltares con sede a Delft - Netherland) per lo studio dell’interazione tra moto ondoso e la prateria a *Posidonia oceanica* (L.) Delile.
- L’Istituto per l’Ambiente Marino Costiero (I.A.M.C. di Oristano) del Centro Nazionale delle Ricerche per lo studio della morfodinamica costiera.

Gli studi avviati con tali collaborazioni sono ancora in corso.

## 1.1 Abstract

The impact of storms on a sandy coast can drastically modify the geomorphological aspect of beaches, including along the coastal zone where beach front intense human activities cause coastal damage, as well as civil protection issues. This factor is particularly relevant along urban beaches, where managing coastal erosion and maintaining beaches are the most important forms of defence against flooding and storms.

In Sardinia (western Mediterranean), the most important urban beach, Poetto, is a wide, semi-enclosed beach that is about 8 km in length and fronts the city of Cagliari. Poetto Beach is a wave-dominated urbanized sandy beach that is characterized by an inner shelf with large seagrass (*Posidonia oceanica*) meadows that are mainly developed on the eastern side of the submerged beach.

The aim of this study is to investigate the morphodynamic behaviour of a Mediterranean urban beach using a multidisciplinary approach that includes remote sensing, field surveys and numerical models. In particular, the use of video monitoring techniques and numerical modelling provides a low cost and very reproducible methodology for: evaluating urban beach processes, including the effects of storms and human stressors; and helping local managers to properly manage the beach space. Wave data, beach profiling, sediment sampling and analyses, low-cost video monitoring techniques and numerical modelling were used to investigate the beach dynamics. A multidisciplinary methodology coupling wave data, sediment sampling and analyses, beach profiling, video monitoring techniques and numerical modelling was used to investigate the Poetto Beach dynamics.

On the basis of the data obtained it was possible to apply the morphodynamic classification method of Short (1999). The classification is based on the dimensionless fall velocity  $\Omega$ . The climate data (wave and wind) and morphodynamic and sedimentological characteristics of the study area were utilized to set up the numerical model. Both the Delft3D-FLOW (Lesser et al., 2004) and Delft3D-WAVE models were used to simulate the hydrodynamics and waves forcing on to Poetto Beach. The main hydrodynamic scenario identified in the area of Poetto Beach was simulated.

The results derived from the wave data and sediment and beach profile analyses were coupled with a video monitoring analysis to classify Poetto Beach's morphodynamic state. The morphodynamic classification results (Short, 1999) are compatible with morphologies detected with a coastal video monitoring system. The numerical simulation (Delft3D) showed good agreement with the field data and video image analyses for the distribution and direction of the rip and longshore currents. Finally, this study highlighted that the application of a low

cost and easily reproducible methodology (video monitoring) can be very useful for investigating the dynamics of an urban beach, and can provide a helpful tool for beach managers to plan how to prevent and minimize the effects of storms and flooding.

**KEYWORDS:** *Morphodynamics, numerical model, Delft3D, coastal videomonitoring.*

## 1.2 Premessa

Nel Mar Mediterraneo, l'accresciuta domanda per lo sviluppo di infrastrutture e l'utilizzo della fascia litorale, ha incrementato il rischio di erosione costiera. Infatti, vi è un'accelerazione dell'erosione e una riduzione degli habitat naturali lungo diversi chilometri della costa italiana. L'impatto delle mareggiate su una costa sabbiosa può drasticamente modificarne l'aspetto geomorfologico, e creare danni ai retrospiagge antropizzati.

In questo contesto la corretta gestione delle coste rappresenta la più importante forma di difesa contro le inondazioni e l'erosione, perciò lo sviluppo sostenibile delle zone costiere richiede una gestione efficace che deve tener conto delle dinamiche naturali dei sistemi costieri sabbiosi, in quanto questi difendono la costa dalle inondazioni e dai crescenti impatti dovuti ai cambiamenti climatici.

Le coste della Sardegna, rispetto al contesto italiano godono di una discreta naturalità, rappresentano un patrimonio naturale e una risorsa economica/turistica che deve essere tutelata tramite una gestione lungimirante. Tuttavia molte spiagge dell'isola sono a rischio di erosione, in particolare l'unità fisiografica studiata, è una spiaggia che negli ultimi 100 anni è stata soggetta a forte pressione antropica che ha compromesso i processi naturali, la straordinaria qualità dei sedimenti originali e gli aspetti paesaggistici unici che caratterizzavano questo tratto di litorale sino al secondo dopoguerra.

All'inizio del secolo scorso le principali attività antropiche legate alla spiaggia del Poetto erano connesse all'estrazione del sale, intrapresa sin dai tempi più remoti e proseguita dagli Aragonesi e successivamente dagli Spagnoli, attraverso l'istituzione del monopolio del sale riqualificata nel XIX secolo dai Savoia.

Solo dalla fine dell'800 si cominciò ad utilizzare il litorale nel periodo estivo per i "bagni a mare".

Nel 1925 si registrò la prima richiesta ufficiale effettuata dal sindaco di Quartu per ottenere in concessione demaniale tutto il litorale del Poetto per il prelievo di sabbia ad uso edilizio ed industriale, questo fa capire che l'estrazione della sabbia fosse una pratica già diffusa da tempo, tale da interessare il comune per regolamentarla. Il prelievo di sabbia a terra continuò con regolari concessioni fino al '52, anno in cui l'estrazione venne proibita, ma continuò ancora ad opera degli abusivi.

Tra 1960 al 1976 vennero costruiti il porticciolo di Marina Piccola a ridosso del promontorio della Sella del Diavolo e la strada litoranea lungo tutto lo sviluppo dell'arenile. In questo periodo cessò definitivamente l'attività estrattiva della sabbia emersa, ma iniziò il prelievo della sabbia dai fondali prospicienti la spiaggia con conseguente aumento del moto ondoso frangente.

Dal 1977 in poi cessarono definitivamente tutte le attività estrattive a terra e a mare ma si intensificarono i lavori di estrazione di ghiaia e sabbia dagli alvei dei torrenti che sfociano nel golfo di Cagliari. L'attività edilizia continuò intensa nel retrospiaggia e iniziarono a presentarsi nuovi fattori di disequilibrio tra i quali l'erosione provocata dal trasporto eolico, facilitata dalla mancanza di dune e vegetazione.

A partire da metà anni '80 iniziarono gli interventi di "pulizia dell'arenile" per eliminare rifiuti solidi con l'asportazione di ciottoli e ghiaie (substrato della spiaggia) che ormai risultavano visibili e considerati antiestetici. Così facendo venne alterata anche la naturale costipazione della sabbia. Negli anni seguenti le amministrazioni pubbliche demolirono alcune strutture preesistenti tra cui citiamo i casotti e alcuni bracci a mare.

Nel 2002, venne eseguito un ripascimento come opera di protezione civile per contrastare le inondazioni del retrospiaggia antropizzato e per mantenere e promuovere il turismo balneare.. L'opera apportò circa 350.000 m<sup>3</sup> di sabbia sul tratto occidentale, ma cambiò drasticamente i connotati originali dei sedimenti che la costituivano.

Il ripascimento rappresenta l'ultimo "grande" intervento antropico eseguito sulla spiaggia del Poetto. Tuttavia continuano a verificarsi casi di cattiva gestione del litorale, come la fruizione incontrollata, l'uso di mezzi pesanti per la pulizia dell'arenile, la rimozione della berma vegetale e continue opere di urbanizzazione che favoriscono la dispersione eolica dei sedimenti e impediscono la formazione di dune embrionali.

### **1.3 Obiettivi**

L'obiettivo principale di questa tesi è inquadrare la morfodinamica della spiaggia del Poetto attraverso la definizione dei principali fattori ambientali che guidano e controllano il sistema costiero.

In particolare si vogliono definire:

- la climatologia del moto ondoso e l'energia che gli eventi climatici scaricano sul corpo spiaggia;
- Le caratteristiche sedimentologiche dell'area di studio;
- La morfobatimetria stagionale del corpo spiaggia.

Sulla base dei risultati ottenuti dagli studi sul clima, sedimenti e morfologie si vuole:

- ottenere una classificazione morfodinamica della spiaggia attraverso lo studio delle morfologie della zona a barre e a truogoli;
- studiare i processi idrodinamici innescati dai principali eventi di moto ondoso;
- inquadrare i morfotipi di spiaggia attraverso l'elaborazione di immagini acquisite con un sistema di video-monitoraggio costiero;
- cercare una metodologia di validazione delle analisi morfodinamiche.

## 1.4 Metodologia

Il lavoro è stato impostato con un moderno approccio olistico, che vede l'ambiente di spiaggia come un sistema, le cui principali variabili sono:

- input energetici,
- caratteristiche sedimentologiche,
- morfologia.

Col termine “sistema” si intende il quadro organizzativo attraverso cui l'energia (moto ondoso) e la materia (sedimenti) si distribuiscono, creando o distruggendo le morfologie che rappresentano lo stato dinamico del sistema stesso. Durante il dottorato è stata elaborata una metodologia multidisciplinare che prevede lo sviluppo simultaneo di diverse linee di studio per inquadrare i diversi fattori ambientali (Figura 1) (clima, sedimenti e morfologia) che guidano e controllano il sistema costiero. Essi costituiscono le condizioni al contorno del sistema, e sono responsabili delle variazioni geomorfologiche.

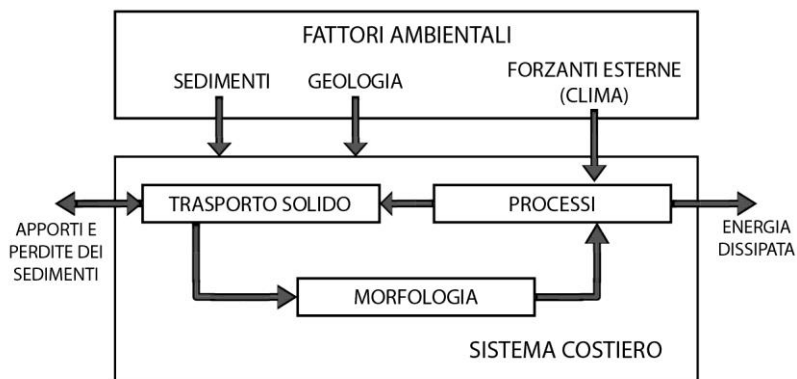


Figura 1. Schema che mostra i principali fattori coinvolti nella morfodinamica costiera.

I principali fattori studiati in questo lavoro sono climatici, sedimentologici e geomorfologici. Il *clima* rappresenta l'input energetico del sistema spiaggia, è stato descritto tramite l'inquadramento dei regimi di vento, d'onda e di marea.

Per definire gli eventi significativi che effettivamente innescano il sistema dinamico spiaggia, è stato necessario classificare gli eventi climatici in base all'energia scaricata sul corpo spiaggia.

La risposta di spiaggia agli eventi dipende dalla natura di questi, ovvero dalle caratteristiche delle onde, dalla durata e dalla provenienza. I **sedimenti** vengono presi in carico dalle correnti innescate dal moto ondoso e ridistribuiti lungo il corpo spiaggia. La distribuzione dei

sedimenti e la loro giacitura dipenderà dalle caratteristiche intrinseche del sedimento stesso e dalle energie che gli hanno trasportati e depositati. Il trasporto e la deposizione del sedimento durante gli eventi modifica la morfologia del profilo di spiaggia che assumerà degli assetti (pendenze e volumi), che tendono a essere in equilibrio con l'energia del moto ondoso. Perciò la **morfologia** del corpo spiaggia è il risultato delle interazioni tra gli eventi climatici e il corpo sedimentario.

Come già accennato il lavoro è stato svolto attraverso lo sviluppo simultaneo di 3 studi:

- studio climatologico;
- studio sedimentologico;
- studio morfodinamico.

Ogni studio si è svolto in 3 principali fasi distinte: la prima di acquisizione di nuovi dati di campagna, la seconda di analisi e la terza di elaborazione dei risultati.

Il lavoro svolto è schematizzato nella Figura 2.

Metodologia utilizzata per lo studio dei processi costieri della spiaggia del Poetto					
Linee di studio					
Fase	Studio climatologico	Studio Sedimentologico	Studio Morfodinamico		
Acquisizione	Rilevamento dati Meteomarini (Onde, Maree, Vento)	Campionamento Rilevamento dei dati Sedimentologici	Rilevamento dati Morfo-batimetrici stagionali	Dati Morfo-batimetrici, sedimentologici e climatologici	Acquisizione di immagini / Video Monitoraggio Costiero
Analisi	Analisi statistica dei regimi climatici e degli eventi significativi	Analisi sedimentologiche (Qualità tessiturali, composizionali e fisiche)	Analisi morfometriche dei profili di spiaggia stagionali. Applicazione del metodo di Short per la definizione dei morfotipi di spiaggia sui profili.	Modellistica numerica (Delft 3D – Xbeach)	Processamento delle immagini (Media temporale, Varianza temporale e Ortoretifica)
Risultati	Regimi climatici (ondametrico, anemometrico e di marea). Climatologia dell'onda del Golfo di Cagliari/Golfo di Quartu Classificazione energetica degli eventi d'onda registrati nel database della RON. Soprallzo complessivo del livello del mare durante le mareggiate.	Distribuzione areale delle caratteristiche sedimentologiche nell'area di studio ( Tessiture, Composizioni, Densità, concentrazione del Carbonato di calcio)	Caratterizzazione degli assetti stagionali. Peculiarità del profilo di spiaggia: profondità di chiusura, profondità di frangenza , altezza dell'onda frangente run-up, etc..  Classificazione morfodinamica tramite la determinazione dei morfotipi di spiaggia attraverso modelli matematici	Simulazioni scenari idrodinamici e schemi di circolazione idrodinamica innescata dai principali eventi d'onda	Caratterizzazione Morfodinamica della zona a barre e a truogoli attraverso remote sensing  Validazione della classificazione morfodinamica (da modelli matematici) e dei schemi idrodinamici (Delft3D)
Prodotti		Mappa sedimentologica della spiaggia del Poetto	Mappa morfo-batimetrica della spiaggia del Poetto (barre, truogoli, posidonia, lettiera, roccia affiorante, etc )	Mappa idrodinamica (correnti On shore e off shore, long shore e rip current)	

Figura 2. Metodologia utilizzata per lo studio dei processi costieri della spiaggia del Poetto.



## 1.5 Inquadramento Geografico

La spiaggia del Poetto è localizzata nella Sardegna meridionale, si estende sul settore orientale del Golfo di Cagliari, dal promontorio della Sella del Diavolo all'Ospedale Marino in territorio di Cagliari e da questo punto sino al Margine Rosso in territorio di Quartu Sant'Elena per una lunghezza complessiva di circa 7.700 m (Figura 3). La spiaggia del Poetto è rappresentata nella cartografia sacala 1: 25.000 dell'Istituto Geografico Militare Italiano (I.G.M.I.), in particolare ricade nel Foglio 557 sezione II - Cagliari e sezione III - Quartu S.Elena e nel Foglio 566 sezione IV - La Maddalena. Ricade anche nella Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000 nella sezione 566020 Sant'Elia, nella sezione 566030 Torre del Poetto, nella sezione 577140 Cagliari e nella sezione 557150 Quartu S.Elena.



Figura 3. Immagine Landsat dell'area di studio modificata da GoogleEarth.

In bibliografia è noto che la spiaggia del Poetto non riceve apporti detritici e che i corsi d'acqua vicini non immettono nel sistema materiali che possano aumentare i volumi della spiaggia. Infatti i corsi d'acqua più vicini (Figura 4) sono fortemente regimentati e a carattere pressoché torrentizio (Fadda e Pala, 1992).

I principali sono:

- **Riu Cuba:** segna il passaggio tra i corsi d'acqua del Sarrabus e quelli del Campidano essendo il suo bacino compreso tra il versante sud-occidentale del Monte Sette Fratelli e le basse colline di Maracalagonis. Il bacino occupa una superficie di circa 30 kmq ed composto prevalentemente da litologie granitiche ad eccezione della piana di Capitana dove l'alveo incontra i primi affioramenti miocenici (Nuraghe Meris). La densità del drenaggio è 3,43 km/kmq con un coefficiente di 0,29.

- **Riu Su Pau (o Riu Flumini):** ha un bacino di 143 kmq che si può suddividere in tre unità geomorfologiche: la prima, altimetricamente più elevata, è rappresentata dalle pendici del Monte Serpeddì e del massiccio dei Sette Fratelli, le litologie presenti sono i graniti ad oriente e a settentrione, la fascia nord-occidentale è occupata da un complesso scistosarenaceo di età prevalentemente ordoviciana. Il complesso paleozoico formava un'antica linea di costa lambita dal mare del Miocene, sono i depositi di questo mare (conglomerati, marne, arenarie) a costituire la seconda unità geomorfologica di bassa collina. Nelle litologie mioceniche si modellano i "cuccurus" che costituiscono ad occidente il tratto più meridionale dello spartiacque. La terza unità geomorfologica è costituita dalle basse colline in cui si estendono i sedimenti ciottoloso-sabbiosi depositati dai torrenti dopo la regressione marina miocenica.

- **Rio Foxi:** il bacino è adiacente a quello dei Rio Su Pau e occupa una superficie di 39,8 kmq. L'asta principale nasce in un settore localizzato nei rilievi paleozoici a nord di Sinnai, prosegue nelle litologie prevalentemente marnose e marnoso-arenacee del Miocene ed infine attraversa terreni di copertura Quaternaria giungendo al mare con una lunghezza totale di circa 14 km. La densità di drenaggio è di 1,5 km/kmq con un coefficiente di 0,65. Il bacino del Rio Foxi comprende nella sua superficie lo "Staini de Simbirizzi", depressione naturale di probabile controllo per faglia utilizzata come invaso per approvvigionamento idrico.

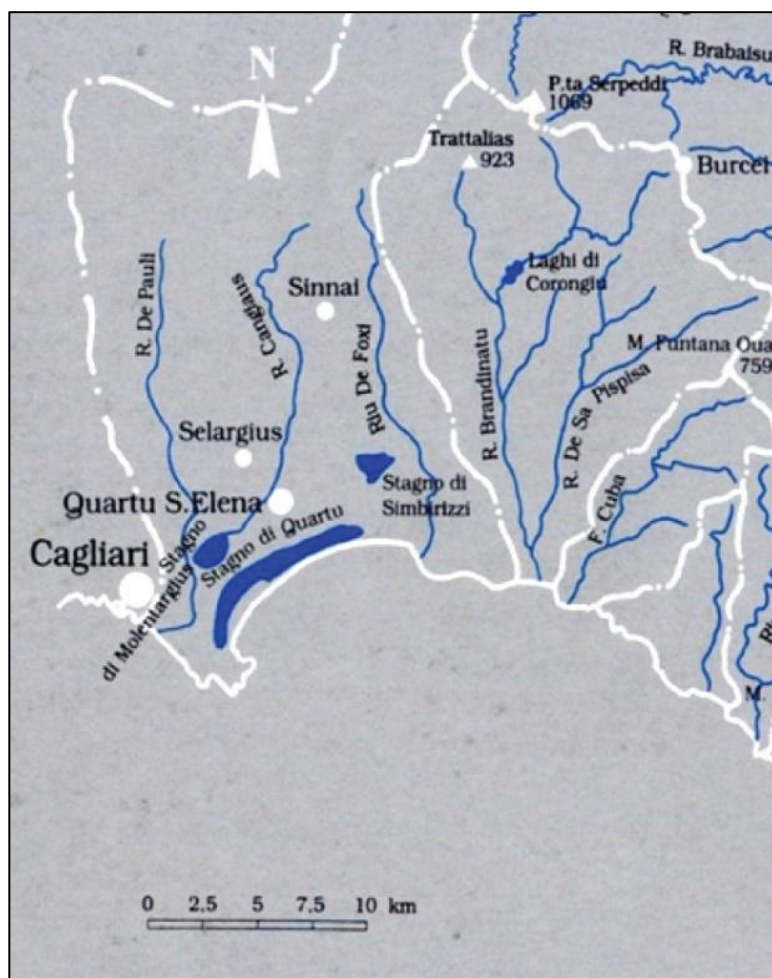


Figura 4. Principali corsi d'acqua vicini alla zona di studio (immagine modificata da Fadda e Pala, 1992).

Lo stagno originale di retrospiaggia del Poetto è stato trasformato in un sistema di vasche evaporanti di una salina parzialmente in disuso. La sua superficie è ormai racchiusa dall'abitato della città di Cagliari e dal suo hinterland (Pirri, Monserrato, Quartu). Le acque marine vengono immesse nel sistema mediante una apposita idrovora le cui condotte passano sotto il cordone sabbioso della spiaggia. Nonostante l'urbanizzazione del litorale, i sistemi di saline e stagni di retrospiaggia costituiscono una rarità ambientale nel bacino del Mediterraneo. Ospitano infatti formazioni vegetazionali legate all'ecosistema salmastro dove si ritrovano le formazioni alofile di piante perenni camefitiche succulente che delimitano le zone afitoiche del deserto del sale. I settori sommersi dello stagno ospitano invece la vegetazione a Ruppia. Queste peculiarità geografiche e vegetazionali, unite alla presenza di specie faunistiche rare come il Fenicottero rosa, (*Phoenicopterus roseus* Pallas, 1811) hanno reso possibile l'istituzione di Zone di Protezione Speciale e Siti di Interesse Comunitario (Z.P.S. e S.I.C. – codici Natura 2000 ITB044002 e ITB042242), sui quali è stato istituito il Parco Regionale di Molentargius.

Il promontorio della Sella del Diavolo che limita la spiaggia a Sud Ovest, permette la formazione del cosiddetto "effetto baia" nella dinamica costiera, inoltre le arenarie mioceniche che formano l'ossatura del promontorio rappresentano la sola fonte di approvvigionamento di sabbie per la alimentazione della spiaggia.

Nella spiaggia sommersa e nella piattaforma continentale antistante si trova una prateria a *Posidonia oceanica* (L.) Delile, 1813 che rappresenta l'habitat prioritario (cod. 1120 -Direttiva Habitat 92/43/CEE - allegato I) per eccellenza del Mar Mediterraneo. Il limite superiore è situato tra i -10 e i -15 metri d'avanti al Poetto di Cagliari e intorno ai -5 metri di fronte al Poetto di Quartu, si presenta marcatamente frastagliato e discontinuo.

## 1.6 Inquadramento Geologico

L'area di studio è mappata nella Carta Geologica della Sardegna scala 1:250.000 (Carmignani et al., 2012)(Figura 5) e nel Foglio 557 di Cagliari della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (Barca *et al.*, 2005). È costituita da rocce che possono essere raggruppate in tre grandi complessi geologici: il basamento metamorfico paleozoico, il complesso intrusivo tardo-paleozoico, le coperture sedimentarie e vulcaniche tardo-paleozoiche, mesozoiche e cenozoiche.

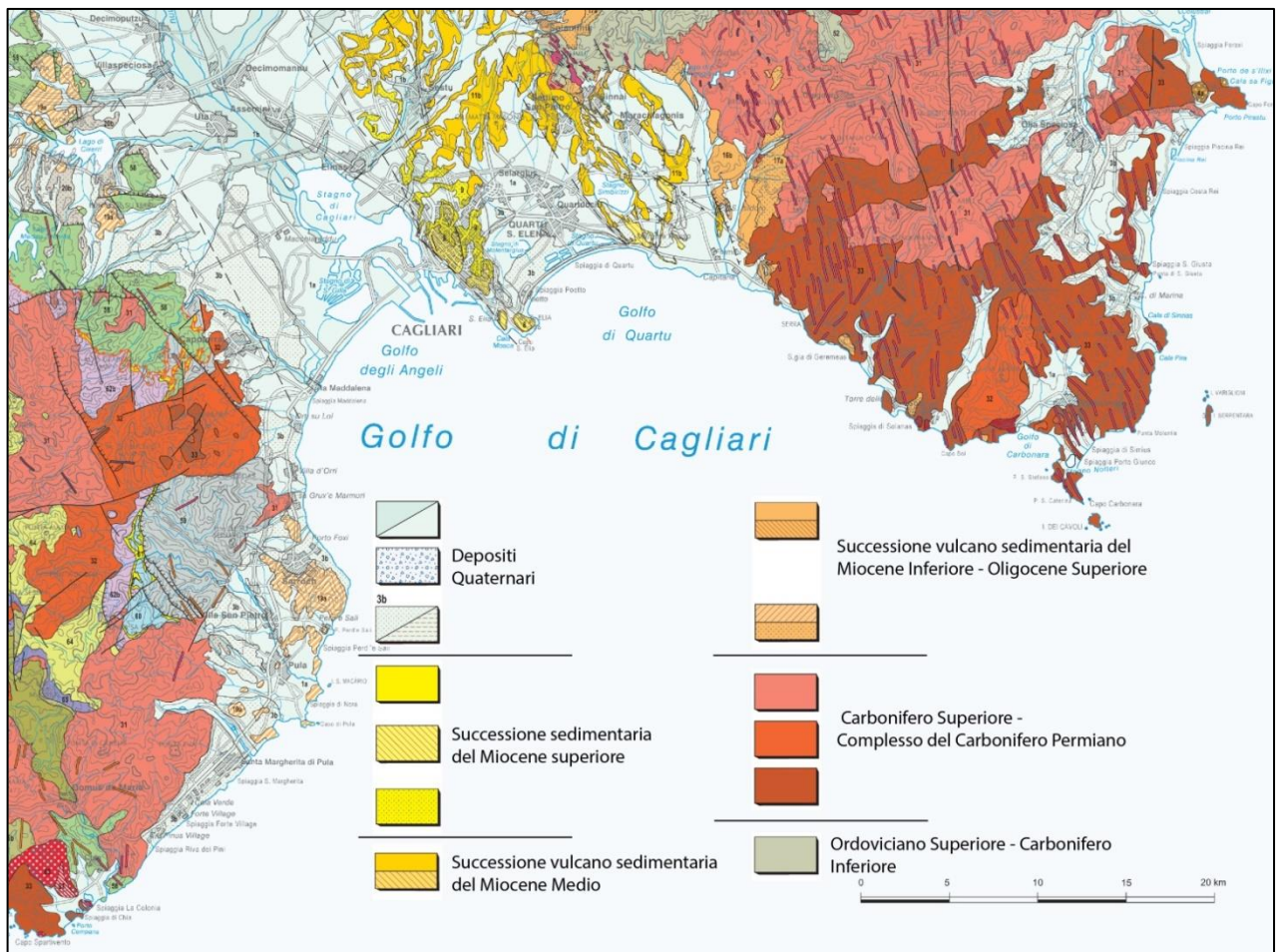


Figura 5. Particolare della Carta Geologica della Sardegna (Carmignani et al., 2012).

### IL BASAMENTO METAMORFICO PALEOZOICO

A Est dell'area di studio affiorano granitoidi appartenenti all'esteso plutone tardo-paleozoico del Sarrabus. Il basamento paleozoico fa parte delle Falde esterne della Catena Ercinica, che affiorano tra la Barbagia e l'Iglesiente-Sulcis e sono costituite da originarie successioni sedimentarie e vulcaniche di età compresa tra il Cambriano e il Carbonifero inferiore.

Queste falde si sono messe in posto con traslazione da NE verso SW nell'avanfossa della Catena durante il Dinantiano. Il metamorfismo sincinemato delle Falde esterne varia



dall'anchizona alla facies degli scisti verdi; metamorfismo e deformazione aumentano di intensità dalle unità geometricamente superiori a quelle inferiori.

La sezione più completa nelle Falde esterne è descritta nella bassa valle del Flumendosa (Carmignani & Pertusani, 1977; Carmignani *et al.*, 1978) dove affiora l'unità tettonica più profonda, l'Unità di Riu Grappa, sottostante all'Unità del Gerrei, la quale a sua volta è sormontata, sul fianco settentrionale dell'antiforme, dall'Unità di Meana Sardo e, su quello meridionale, dall'Unità del Sarrabus (Figura 6).

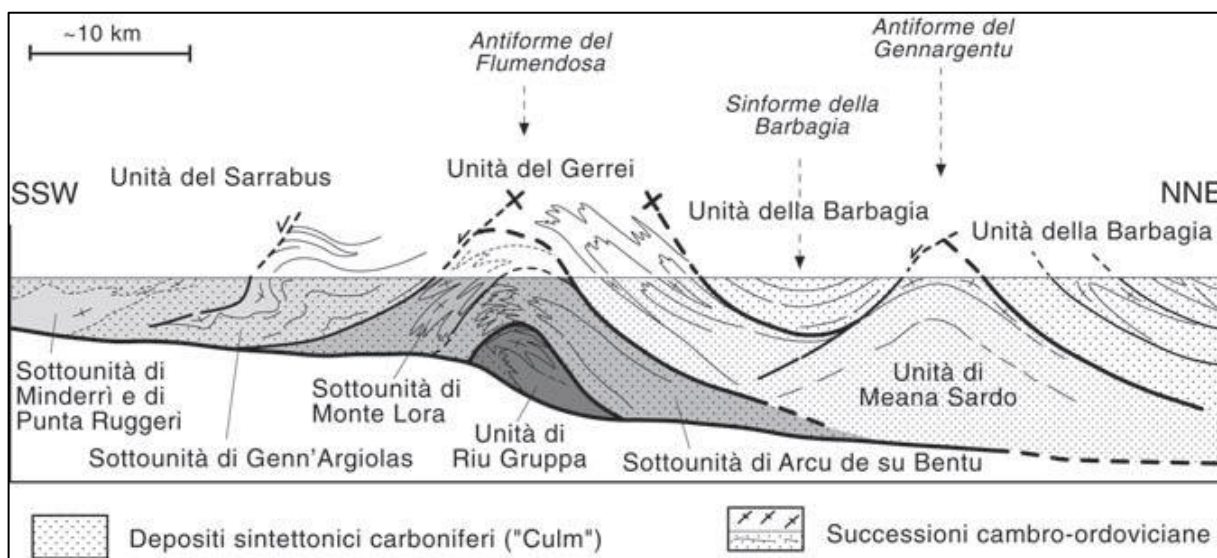


Figura 6. Profilo attraverso la struttura a falde del Basamento paleozoico della Sardegna sud-orientale (da CARMIGNANI et alii, 2001b).

Queste unità tettoniche mostrano significative differenze nella successione stratigrafica, in particolare per quanto riguarda la successione vulcanica e vulcanoclastica dell'Ordoviciano medio. Esse sono state impilate e deformate in un cuneo di accrezione radicato sotto le Falde interne durante le fasi collisionali e di ispessimento crostale dell'Orogenesi ercinica.

Nel Carbonifero superiore e nel Permiano, un'importante tettonica distensiva post-collisionale si sovrappone alle strutture collisionali, portando all'esumazione delle metamorfite ed alla messa in posto del complesso magmatico calcocalino tardo-ercinico.

#### IL COMPLESSO INTRUSIVO TARDO-PALEOZOICO

Nella parte orientale del Golfo di Cagliari affiorano plutoniti e sistemi filoniani riferibili al magmatismo post-collisionale tardo-ercinico sardo. I prodotti intrusivi appartengono al cosiddetto "Batolite sardo-corso" che solo in Sardegna copre un'area di circa 6000 kmq, cioè circa la metà dell'intero basamento cristallino paleozoico. Tale batolite è composito, essendo

costituito da un insieme molto eterogeneo di litotipi riferibili ad associazioni a differente affinità geochimica:

- una seconda definita “associazione calcalcalina Mg-K” (Orsini, 1980), affiorante solo nella Corsica settentrionale;
- una terza associazione, a carattere peralluminoso, costituita in prevalenza da granodioriti e monzograniti a due miche (Oggiano & Di Pisa, 1988; Musumeci, 1992; Di Vincenzo & Ghezzo, 1996);
- sono inoltre presenti locali piccole intrusioni a carattere alcalino (sieniti sodiche nel Sarrabus: Brotzu *et al.*, 1978).

La costruzione del batolite fra il Carbonifero e il Permiano inferiore (330-275 Ma) è pertanto contemporanea alla tettonica post-collisionale della Catena ercinica, caratterizzata dalla sua riesumazione in regime estensionale con transizione alla fase anorogena (Carmignani *et al.*, 1992).

Le intrusioni sono predominanti nella zona assiale mentre, procedendo verso la zona a falde nella Sardegna centro-meridionale, costituiscono vari massici intrusivi, sempre alto-crosta, isolati entro il complesso metamorfico (Complessi intrusivi dell’Arburese, del Sarrabus, del Sulcis-Iglesiente).

Durante il tardo-Carbonifero ed il Permiano, nel blocco sardo-corso-provenzale, così come in altre vaste aree dell’orogene ercinico, l’attività magmatica si è anche realizzata con prodotti effusivi prevalentemente a chimismo intermedio- acido ed affinità inizialmente calcalcalina e successivamente alcalina (Bonin *et al.*, 1998; Cortesogno *et al.*, 1998).

Tutto il basamento e parte della sua copertura permiana (Traversa, 1979a) sono iniettati da filoni di composizione ed età assai variabili (Traversa, 1979b; Orsini, 1980; Ghezzo & Orsini, 1982; Beccaluva *et al.*, 1985; Atzori & Traversa, 1986; Vaccaro *et al.*, 1991; Traversa & Vaccaro, 1992; Ronca & Traversa, 1996). Il quadro del campo filoniano in Sardegna appare quindi notevolmente complesso sia per l’ampio spettro compositivo e tessiturale (facies porfiriche e facies afiriche), sia per i rapporti con le rocce incassanti, con conseguente difficile collocazione cronologica dei diversi corpi. Gli studi più recenti (Atzori & Traversa, 1986; Vaccaro *et al.*, 1991; Pasquali & Traversa, 1996; Ronca & Traversa 1996) hanno evidenziato la presenza di vari gruppi compositivi:

- 1) filoni calcalcalini di composizione da andesitico-basaltica a riolitica;
- 2) filoni basaltici ad affinità tholeiitica sino a transizionale;
- 3) filoni riolitici a carattere-peralluminoso;
- 4) filoni basaltici sino a mugearitici alcalini.

Recenti datazioni isotopiche indicano per il primo gruppo età di messa in posto intorno ai  $289\pm 9$  Ma (Vaccaro *et al.*, 1991); per i filoni peralluminosi è suggerita un'età compresa fra  $298\pm 9$  e  $268\pm 8$  Ma; per il terzo gruppo non ci sono dati ma è ipotizzata (Ronca & Traversa, 1996) per il Sarrabus una messa in posto tardiva a chiusura del magmatismo permo-carbonifero; per il quarto gruppo è proposta l'età più recente, al passaggio Permiano-Triassico (età di un filone camptonitico di circa 220 Ma: Baldelli *et al.*, 1987; età di  $230\pm 10$  Ma: Vaccaro *et al.*, 1991).

L'insieme del magmatismo filoniano e di quello effusivo esprime dunque una sequenza magmatica inizialmente calcicalina o peralluminosa di derivazione crostale e subcrostale, in parte coeva con le diffuse manifestazioni intrusive, successivamente transizionale sino a francamente alcalina essenzialmente subcrostale nelle fasi finali permo-triassiche post-orogeniche.

Le orientazioni prevalenti dei sistemi filoniani variano progressivamente da una direzione media NE-SW in Corsica e nella Sardegna settentrionale, ad una direzione N-S fino a NNW-SSE in quella centrale e meridionale; direzioni che devono essere correlate ai principali sistemi di fratturazione tardo-ercinici connessi con la tettonica trascorrente continentale europea (Arthaud & Matte, 1977; Ronca & Traversa, 1996).

#### SUCCESSIONE MESOZOICHE E CENOZOICHE

Nel Mesozoico la Sardegna gode di una relativa calma tettonica e di una pressoché totale assenza di attività magmatica. In tale era, l'isola non fu pertanto interessata da importanti fasi deformative. Durante tutto il Triassico e il Lias la Sardegna costituiva un alto strutturale in gran parte emerso, che nella paleogeografia alpina probabilmente rappresentava una propaggine del Dominio Brianzese. Questo alto strutturale fu ampiamente trasgredito solo a partire dal Dogger, i cui depositi dolomitici e calcarei di ambiente neritico ricoprono in discordanza sia il basamento ercinico, che la successione continentale stefano-permiana o permotriassica.

Nella successione mesozoica della Nurra e del Sulcis è ben documentata una lacuna, talvolta associata a discordanza angolare (Albiano-Cenomaniano: "lacuna bauxitica"). Una nuova emersione, che interessò l'intera isola, si manifestò alla fine del Cretacico e perdurò per quasi tutto il Paleocene.

Nel Foglio Cagliari non affiorano sedimenti mesozoici; essi sono però diffusi in tutta la Sardegna centro-orientale e localmente sono presenti anche nella Sardegna sud-occidentale e nord-occidentale. Non è da escludere che la trasgressione giurassica possa avere interessato



anche l'area del foglio, ma i relativi depositi sono stati completamente erosi durante i successivi periodi di continentalità.

Anche i depositi trasgressivi dell'Eocene inferiore, ben rappresentati nella Sardegna meridionale (Barca & Di Gregorio, 1977; 1978), non si sono tuttavia conservati nel Foglio Cagliari.

Con l'Eocene medio-superiore si ristabiliscono in tutta l'Isola condizioni di continentalità che perdurano per quasi tutto l'Oligocene, come risulta dai depositi fluviali e lacustri di questa età presenti anche nel Foglio Cagliari.

Nell'Oligocene superiore-Miocene inferiore il Blocco Sardo-Corso subisce i contraccolpi della collisione nord-appenninica. In questo periodo, nella Sardegna centro-settentrionale, così come nella Corsica ercinica, è attiva una importante tettonica trascorrente (Carmignani *et al.*, 1994a; Pasci, 1995), con sistemi di faglie che seguono i lineamenti tettonici e le discontinuità del basamento ercinico. Si originano così:

- a) zone di transpressione, in cui la copertura mesozoica può essere piegata e/o tettonicamente raddoppiata, anche con locali sovrascorrimenti del basamento paleozoico sopra le coperture mesozoico-paleogene (M. Albo);
- b) zone di transtensione, con sviluppo di bacini di pull-apart colmati da depositi prevalentemente continentali e da vulcaniti calcocaline dell'Oligocene superiore-Aquitano (Chilivani-Berchidda).

La parte meridionale dell'Isola appare scarsamente interessata dalle dinamiche trascorrenti oligo-mioceniche. In quest'area sono attribuiti all'Oligocene superiore-Aquitano solo alcuni depositi, da continentali a marino-litorali, di spessore modesto, che affiorano anche nel Foglio Cagliari (Formazione di Ussana). I rapporti stratigrafici tra le varie formazioni che si depongono in questo intervallo di tempo in Sardegna meridionale, compreso il Foglio Cagliari, sono schematicamente riportati nella Figura 7.

Durante il Miocene inferiore-medio, contemporaneamente alla rotazione del Blocco Sardo-Corso (Burdigaliano) e all'apertura del Bacino Balearico e del Tirreno centro-settentrionale, si sviluppa tra il Golfo di Cagliari e quello dell'Asinara un sistema di fosse (Rift Sardo: Cherchi & Montadert, 1984; Casula *et al.*, 2001) con sedimentazione prevalentemente marina, con intercalati notevoli spessori di vulcaniti calcocaline. A partire dal Miocene superiore e fino al Pliocene-Pleistocene, tutta l'Isola è interessata da una nuova, importante fase distensiva da riferire all'apertura del Tirreno centro-meridionale, la quale favorì una breve e localizzata ingressione marina nel Pliocene inferiore.

A questa tettonica distensiva sono da imputare le estese manifestazioni vulcaniche plio-pleistoceniche dell'Isola, prevalentemente basiche e ad affinità alcalina, transizionale e tholeiitica, di età isotopica  $5.3 \pm 0.14$  Ma (Beccaluva *et al.*, 1978).

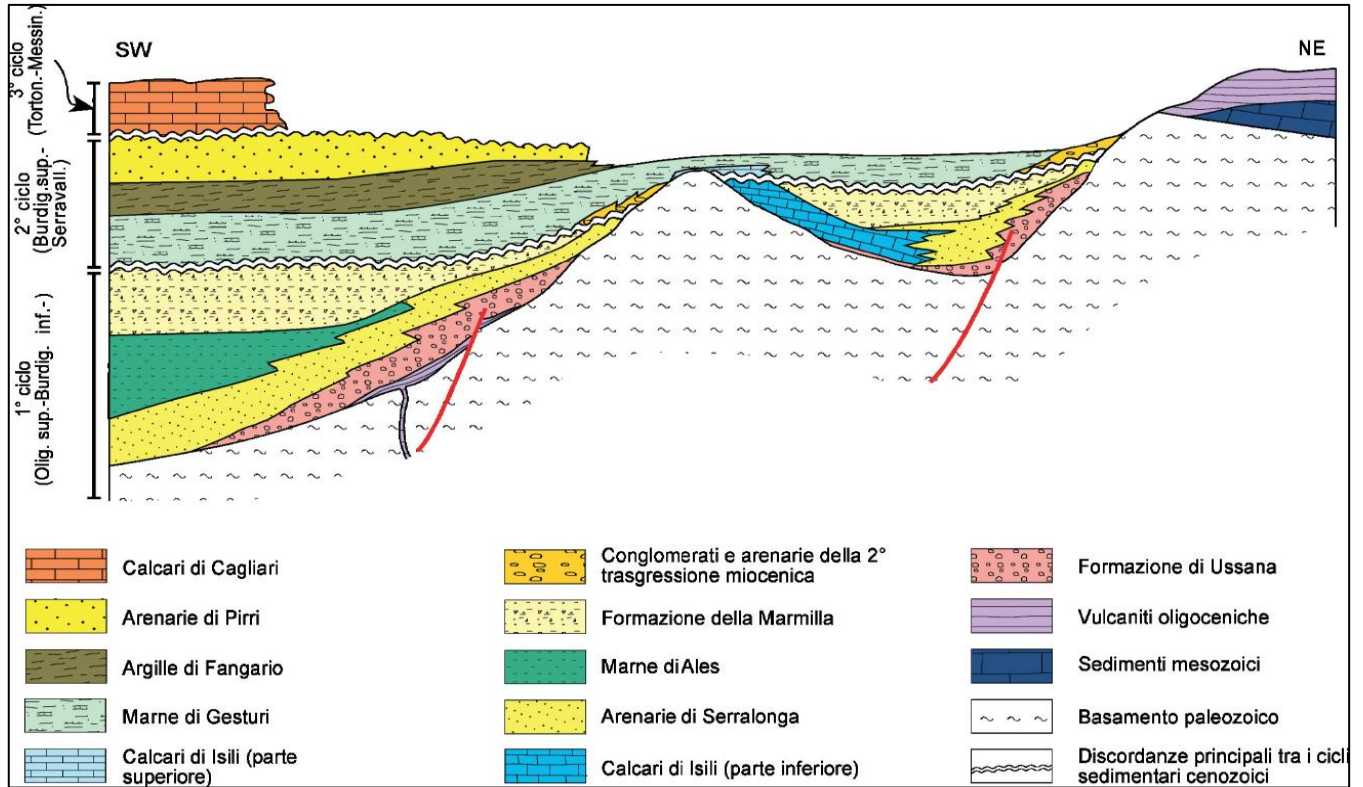


Figura 7. Schema dei rapporti stratigrafici delle formazioni cenozoiche della Sardegna meridionale (da Carmignani *et al.*, 2001b, modificato).

## 1.7 Origine del Poetto

Nella fase interglaciale tra Riss e Wurm, circa 120 mila anni, il livello del mare era più alto di circa 10 metri rispetto al livello attuale e una grande spiaggia si trovava a lambire le falde di Monte Urpinu e costeggiava Pirri, Selargius e buona parte di Quartu. Il Poetto ancora non esisteva.

75.000 anni fa, alla fine del periodo interglaciale, prima del grande freddo wurmiano, emerse il cordone litorale di Is Arenas.

Da 75.000 fino a 18.000 anni fa, momento del massimo freddo glaciale, il livello del mare scese a -130 metri, in quel periodo tutta l'area del Golfo di Cagliari e del Golfo di Quartu era emersa con campi di dune, stagni e lagune molto distanti dalle rive attuali.

Da 18.000 fino a 10.000 anni fa il mare risalì in modo discontinuo, cancellando pian piano i campi dunali, ma lasciando le testimonianze di questa risalita attraverso una successione di spiagge fossili (beach rock), attualmente sommerse a diverse profondità sulla piattaforma continentale del Golfo.

6.500 anni fa un picco di calore chiamato "optimum climatico olocenico", portò il livello del mare a qualche decina di centimetri al disopra del livello attuale. In questo momento iniziò a configurarsi il cordone litorale che conosciamo oggi come Poetto.

Considerando l'evoluzione geologica degli ultimi 150.000 anni, possiamo considerare la spiaggia del Poetto e l'assetto costiero attuale, come la forma più giovane e quindi meno stabile del sistema costituito dalle unità fisiografiche del Golfo di Cagliari.

I due cordoni litorali di Is Arenas e del Poetto, per mancanza di corsi d'acqua importanti come immissari, si sono chiusi dando luogo ai due stagni litorali di Molentargius e di Quartu. Da 6.500 anni fa ad oggi il livello del mare sull'intera superficie terrestre si è ripetutamente sollevato ed abbassato con piccole oscillazioni anche di un metro.

Negli ultimi 100 anni, in particolare dal secondo dopoguerra sono scomparse le dune di retrospiaggia che si estendevano nella parte occidentale ed orientale estrema del Poetto a causa del prelievo indiscriminato della sabbia perseguito fino agli anni sessanta/settanta sia a terra che a mare. Oggi al posto delle dune sono subentrate strade, case ed altri manufatti.

Nell'avanspiaggia, luogo in cui le onde dovrebbero scaricare la loro energia, e che rappresenta la superficie più estesa e più godibile della spiaggia, lo stato naturale è stato alterato dalla costruzione di stabilimenti balneari, ristoranti, ospedali, ecc. Allo stesso modo, la battigia e parte della spiaggia sommersa, sono state alterate dalla costruzione di bracci a mare, rotonde su palafitte, idrovore e bunker della seconda guerra mondiale.

Attualmente è noto che la tendenza generale è verso il sollevamento del livello medio mare e che l'innalzamento per cause naturali è già un importante motivo di avvio di processi erosivi nelle coste basse ed instabili, inoltre, come detto in precedenza, dal punto di vista del bilancio sedimentario la spiaggia del Poetto non ha apporti detritici che possano aumentare i volumi della spiaggia; se a questa situazione aggiungiamo lo sfruttamento eccessivo del litorale avvenuto nell'ultimo secolo, è facile capire che il sistema di spiaggia si trova in una situazione delicata.

# STUDIO CLIMATOLOGICO

## 2.0 Introduzione

Lo studio climatologico ha lo scopo di inquadrare i regimi delle forzanti climatiche (vento, onde e maree) che forniscono l'energia che guida l'evoluzione del sistema spiaggia.

Con la definizione dei “regimi” si vogliono indicare le caratteristiche statistiche dei parametri sintetici, rilevati in un periodo pluriennale.

In particolare è stata focalizzata l'attenzione sulla distribuzione di frequenza congiunta di accadimento, magnitudine e direzione di provenienza del vento (Figure 8 e 9) e del moto ondoso (Figura 10). Inoltre sono state discriminate le cause che provocano le oscillazioni del livello del mare. La definizione delle caratteristiche con cui si manifestano le fonti energetiche atmosferiche (venti) e marine (onde, maree), è indispensabile per attuare i modelli di classificazione morfodinamica (Short, 1999) e per la corretta calibrazione dei modelli numerici di simulazione idrodinamica e morfodinamica.

## 2.1 Traversia e fetch

La traversia geografica di un settore costiero è definita come la porzione di mare dalla quale può potenzialmente giungere il moto ondoso. La traversia è divisa in due settori (principale e secondario) in funzione delle lunghezze delle aree potenzialmente soggette all'azione diretta del vento. Tali lunghezze (fetch geografici) sono definite tralungando la costa limitrofa lungo la direzione media di provenienza del vento. Invece, il fetch efficace è definito come la porzione di mare che, sotto l'azione diretta del vento, costituisce l'area di generazione dell'evento di moto ondoso (Corsini e Inghilesi, 2004).

Il settore di massima traversia (Figura 8a)(calcolata in gradi-Nord) riferita alla Spiaggia del Poetto ha un'apertura di  $115^\circ$  verso Sud limitata a  $220^\circ$  dal promontorio di Capo Sant'Elia e a  $105^\circ$  dal Capo Boi. La traversia principale che ospita il massimo fetch geografico (Figura 8b) si presenta tra  $125^\circ$  e  $140^\circ$  in direzione del Golfo della Sirte in Libia con ampiezza di circa 1.350 km. Va sottolineato che nel caso dei mari italiani, le lunghezze della traversia geografica che contribuiscono alla determinazione del fetch efficace possono essere limitate ad una estensione massima di 500 km (Figura 8b), in ragione delle massime dimensioni delle perturbazioni meteorologiche agenti sui mari del bacino Mediterraneo (Corsini e Inghilesi, 2004).

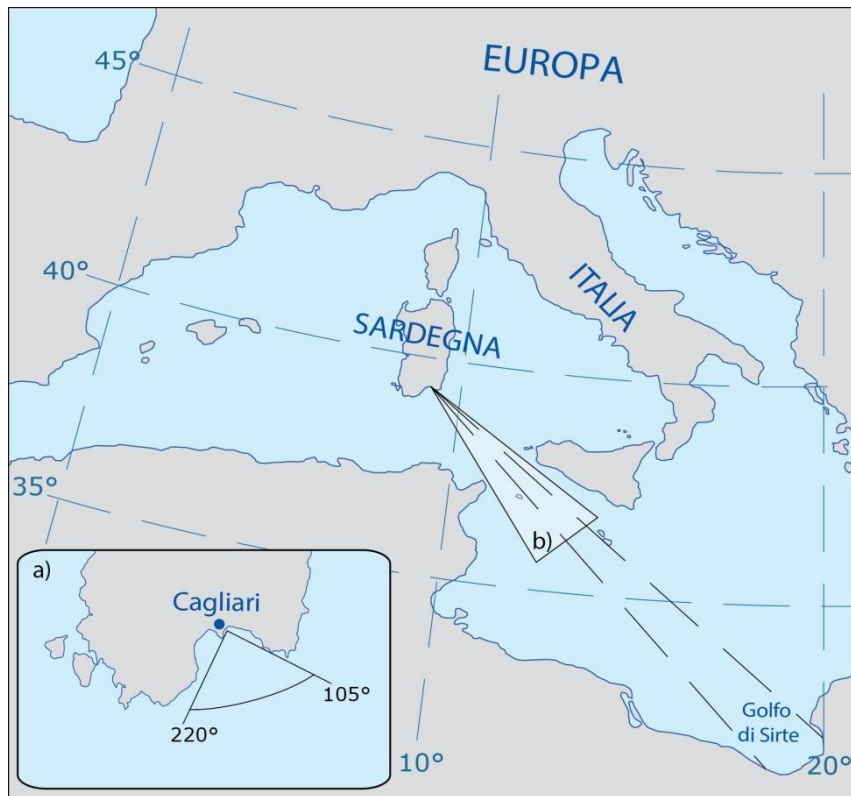


Figura 8 L'immagine mostra il settore di traversia (a), il fetch geografico e il fetch effettivo di 500km (b) riferiti alla spiaggia del Poetto.

## 2.2 Regime dei venti

I dati anemometrici studiati sono stati acquisiti dalla stazione multiparametrica della Rete Mareografica Nazionale (R.M.N.) dell'Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale (I.S.P.R.A.), situata sul molo della Capitaneria di Porto di Cagliari (Lat: 39°12'36.69" Lon: 09°06'51.38"). I parametri presi in considerazione sono la velocità (misurata in m/s) e la direzione di provenienza del vento (misurata in °N).

Tramite l'analisi statistica della serie storica dei dati è stato inquadrato il regime anemometrico dell'area di studio (Figura 9). Il vento predominante proviene da Nord Ovest (NO)(Maestrale) e ha una frequenza di accadimento del 58%. Il Maestrale raggiunge le coste occidentali della Sardegna, si incanala lungo la pianura del Campidano, che congiunge il Golfo di Oristano con quello di Cagliari, e spira sull'area di studio con intensità e frequenza notevoli durante tutto l'anno (Kalb, 2008). Per quanto riguarda la spiaggia del Poetto, non genera onde frangenti verso riva ma sicuramente ha un ruolo importante nella dispersione dei sedimenti da terra verso mare.

Il vento proveniente da Sud Est (Scirocco) risulta predominante dopo il Nord Ovest, si manifesta per il 26% dei casi e genera gli eventi d'onda prevalenti per frequenza e

magnitudine. Lo Scirocco dispone del fetch più ampio (canale tunisino) che permette la formazione di onde di dimensioni maggiori rispetto al Sud Ovest (Libeccio). I venti provenienti da questa direzione si manifestano con una frequenza pari all'8% e creano eventi d'onda meno frequenti rispetto a quelli provenienti da SE ma comunque importanti.

Il vento proveniente da Nord Est (Grecale) si manifesta con una frequenza di accadimento pari all'8%. Risulta il vento meno influente rispetto ai precedenti, non genera onda frangente verso riva e si manifesta con frequenze e intensità inferiori rispetto al maestrale.

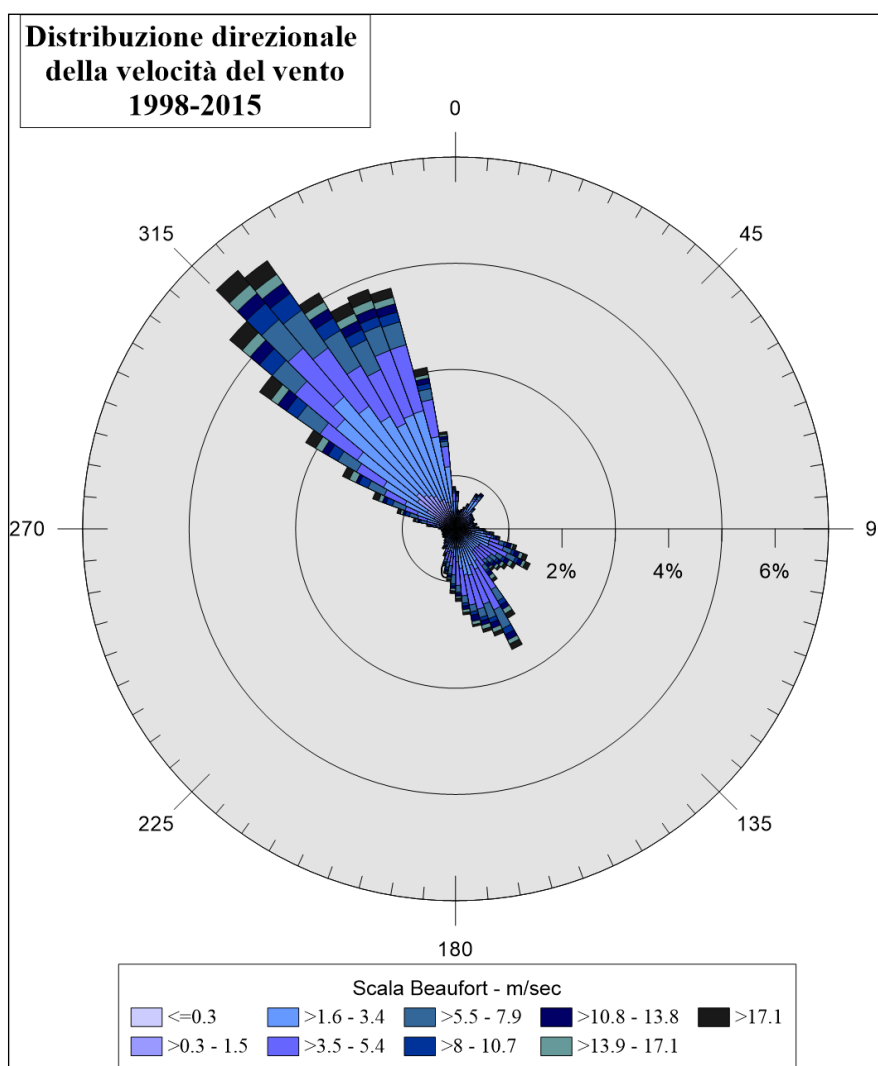


Figura 9. Distribuzione delle intensità e frequenze dei venti registrati dalla stazione multiparametrica della R.M.N. dal 1998 al 2015. I coni, con apertura di 5°, hanno una lunghezza proporzionale alla frequenza percentuale di accadimento. I colori indicano gli intervalli di velocità del vento secondo la scala Beaufort.

Dalla distribuzione degli eventi durante l'anno, è stato possibile osservare che i venti più intensi si manifestano con maggior frequenza durante il periodo compreso tra i mesi di Ottobre e Marzo (Figura 10).

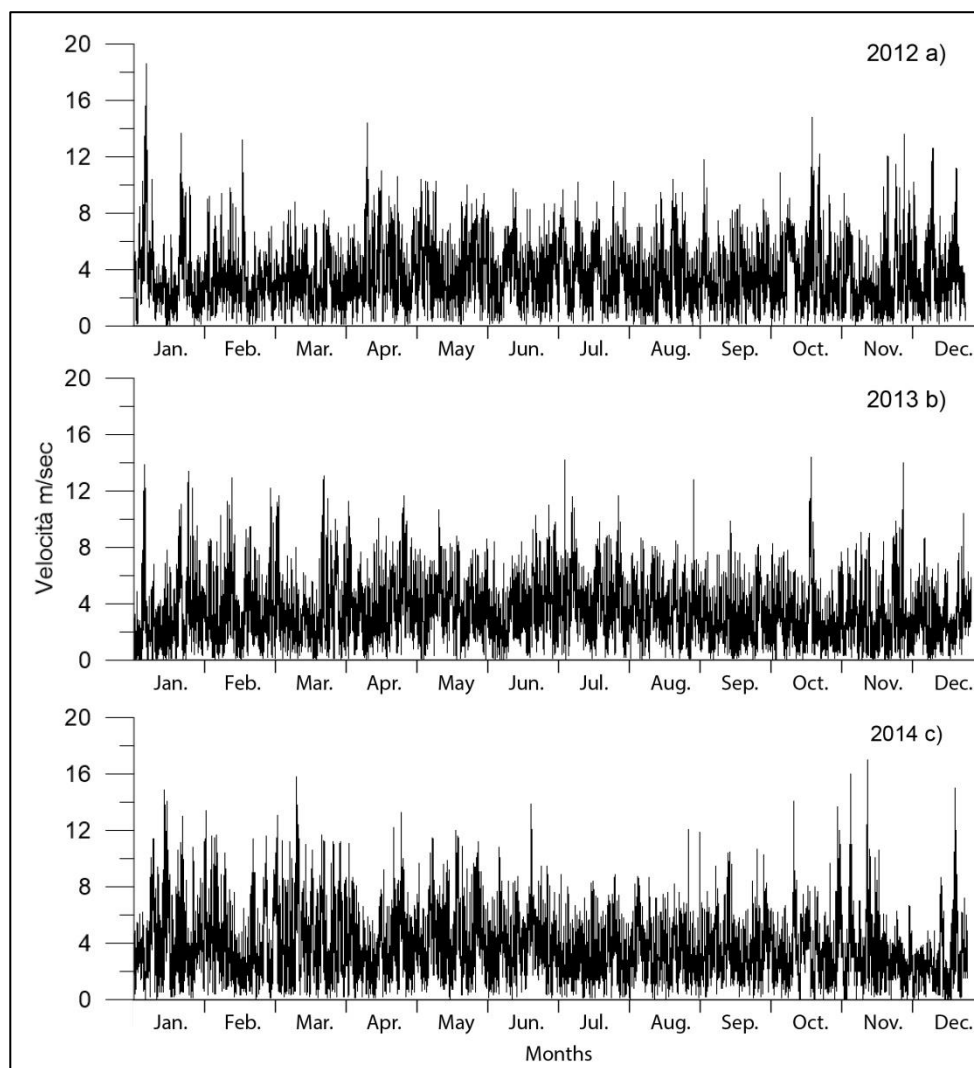


Figura 10. I grafici descrivono l'andamento della velocità del vento durante gli anni 2012 (a), 2013 (b) e 2014 (c).

### 2.3 Regime di moto ondoso

Per definire i regimi ondosi dell'area di studio sono stati analizzati i dati storici acquisiti da diverse boe che sono state operative nel Golfo di Cagliari:

- Boa ondometrica dell'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici (A.P.A.T.) (ora I.S.P.R.A.) posta a 7 miglia a largo della spiaggia del Poetto (Lat:  $39^{\circ}09'05''$ -Lon:  $09^{\circ}17'05''$ ) in funzione dal 01/07/2001 al 30/12/2003 (Figura 11a).
- Boa ondometrica della Rete Ondometrica Nazionale (R.O.N.) dell'I.S.P.R.A. posta a largo della spiaggia di Giorgino in corrispondenza del pontile della Rumianca di Cagliari (Lat: Lon: ) in funzione dal 06/02/2007 al 02/03/2008 (Figura 11b).
- Boa ondometrica della R.O.N. situata nel Golfo di Cagliari a largo di Capo Boi (Lat:  $39^{\circ} 6' 52''$  - Long:  $9^{\circ} 24' 20''$ ), in funzione dal 03/01/2010 al 09/12/2014 (Figura 11c).



I parametri acquisiti dalle boe sono: altezza significativa spettrale HS (misurata in metri), periodo medio T (misurato in secondi), periodo di picco TP (misurato in secondi) e la direzione media di provenienza del moto ondoso (misurata in gradi-Nord).

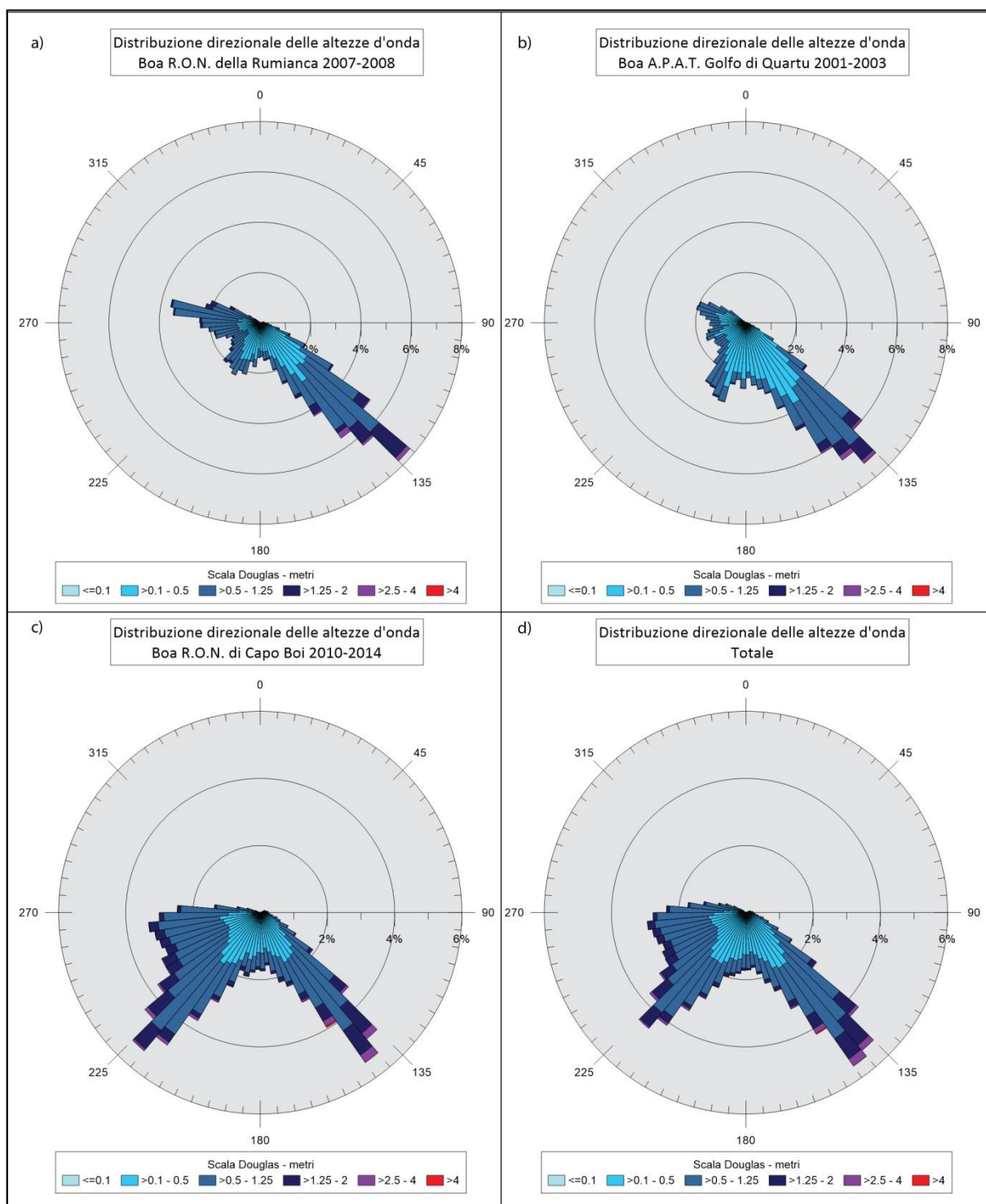


Figura 11. Grafici delle distribuzioni direzionali delle altezze d'onda. I coni, con apertura di 5°, hanno una lunghezza proporzionale alla frequenza percentuale di accadimento. I colori indicano gli intervalli di altezza d'onda secondo la scala Douglas. I grafici mostrano le distribuzioni direzionali delle altezze d'onda registrate tra il 2001 e il 2003 dalla boa dell'A.P.A.T. (a); tra il 2007 e il 2008 dalla boa R.O.N. (b) posizionata presso la Rumianca, tra il 2010 e il 2014 dalla boa R.O.N. posizionata a Capo Boi (c). Il grafico d) mostra la distribuzione direzionale delle altezze d'onda ottenuta con tutti i dati disponibili.

Dall'analisi dei dati è emerso che il regime ondoso del Golfo di Cagliari è caratterizzato da eventi provenienti da Sud Ovest e da Sud Est (Figura 11 – Tabella 1).

Per definire l'effettivo regime che caratterizza la spiaggia del Poetto, sono state selezionate le direzioni di provenienza del moto ondoso incidente (Figura 12) usando il settore di massima traversia della spiaggia: apertura di 120° verso Sud limitata a 220° dal promontorio di Capo Sant'Elia e a 105° dal Capo Boi. Il settore di massimo fetch geografico si presenta nella direzione tra 120° e 150° con ampiezza pari circa 1.000 km.

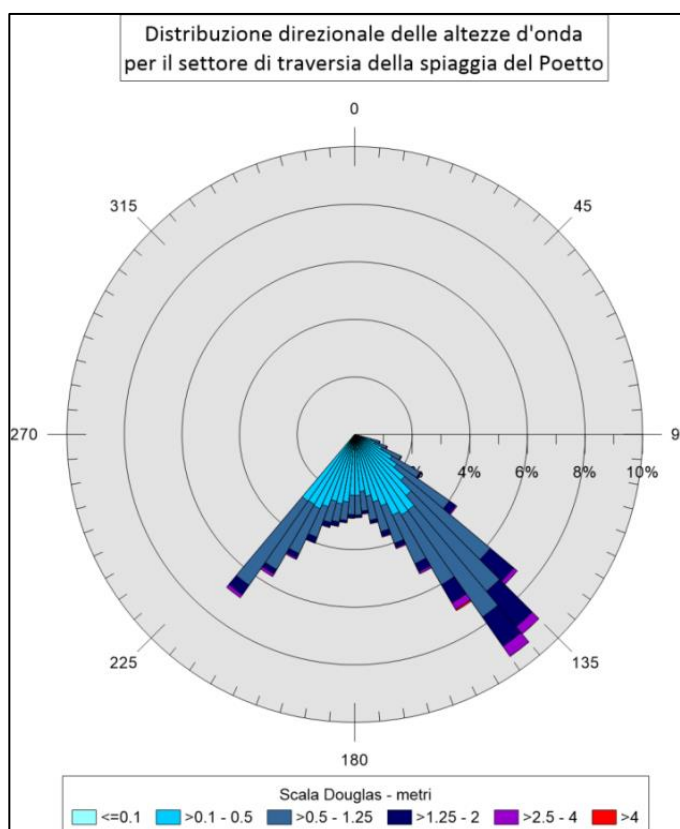


Figura 12. Grafico di distribuzione direzionale delle altezze d'onda per il settore di traversia della spiaggia del Poetto.

I risultati dimostrano (Tabella 1) che il 66% delle onde incidenti al Poetto provengono dal II quadrante e sono generati prevalentemente dal vento di Scirocco che dispone del fetch più lungo. Infatti, il 79% delle onde con altezza superiore a 1m proviene dal II quadrante. Dal III quadrante proviene il 34% del moto ondoso generato prevalentemente dal vento di Libeccio.

**Tabella 1. Distribuzione percentuale per quadrante di provenienza delle onde registrate dalle diverse boe ondametriche e distribuzione percentuale di provenienza secondo la traversia della spiaggia del Poetto.**

Quadrante	A.P.A.T. 2001-2003	Rumianca 2007-2008	Capo Boi 2010-2014	Traversia Poetto
I	10.4%	0.9%	1.3%	-
II	45.3%	50%	36.6%	66%
III	32.8%	32.6%	56.8%	34%
IV	11.5%	16.4%	5.3%	-

Per ovvia corrispondenza con i dati anemometrici precedentemente illustrati, è possibile affermare che gli eventi d'onda più intensi si manifestano con maggior frequenza durante il periodo compreso tra i mesi di Ottobre e Marzo.

## 2.4 Classificazione energetica degli eventi d'onda

Il principale fattore che controlla l'inclinazione dei profili di spiaggia è l'arrivo delle onde di mareggiata. Per quantificare questo importante fattore responsabile dei cambiamenti morfologici, è stato necessario inquadrare gli eventi meteomarini da un punto di vista energetico. È stata utilizzata la metodologia proposta da Mendoza e Jimenez (2004), adottata anche da Armaroli et al. (2007, 2012), Perini *et al.*, (2011) Grottoli e Ciavola (2013) e altri autori.

Gli eventi significativi sono stati identificati come eventi di durata minima di 6 ore con onde di altezza minima uguale al doppio dell'altezza significativa media annuale.

Per caratterizzare l'intensità delle mareggiate è stato calcolato il contenuto energetico, integrando il quadrato dell'altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) per la durata della mareggiata ( $t_1$ ,  $t_2$ ):

$$E = \int_{t_1}^{t_2} H_s^2 dt \quad (1)$$

Per onda significativa si intende la media di 1/3 delle onde più alte di un evento. Sulla base dei dati d'onda raccolti tra il 2010 e il 2014, sono stati classificati 178 eventi significativi che sono stati suddivisi in 4 classi (Tabella 2): Weak (debole), Moderate (moderato), Significant (notevoli) Severe (violente).

**Tabella 2. Categorie degli eventi basati sul contenuto energetico delle onde. t: durata degli eventi per classe; Hs: altezza d'onda significativa; Tp: periodo di picco durante la tempesta; %: si riferisce alla quantità percentuale rispetto al totale degli eventi, N: numero di eventi registrati**

Wave Event Class	% (N)	Mean Values				Energy range (m <sup>2</sup> hr)
		t (hours)	Hs (m)	Tp (s)	E (m <sup>2</sup> h)	
I Weak	53.37 (95)	15	1,36	6,36	28,6	Energy ≤ 58
II Moderate	26.97 (48)	31	1,70	7,61	85,3	58.4 ≤ Energy ≤ 128
III Significant	14.61 (26)	59	1,99	7,68	218,1	128 ≤ Energy ≤ 390
IV Severe	5.06 (9)	81	2,70	8,52	484,6	390 ≤ Energy ≤ 707
	100 (178)					

La distribuzione degli eventi durante l'anno (Figura 13) mette in evidenza una maggior concentrazione di eventi maggiormente energetici durante i mesi autunnali e invernali rispetto ai mesi primaverili ed estivi.

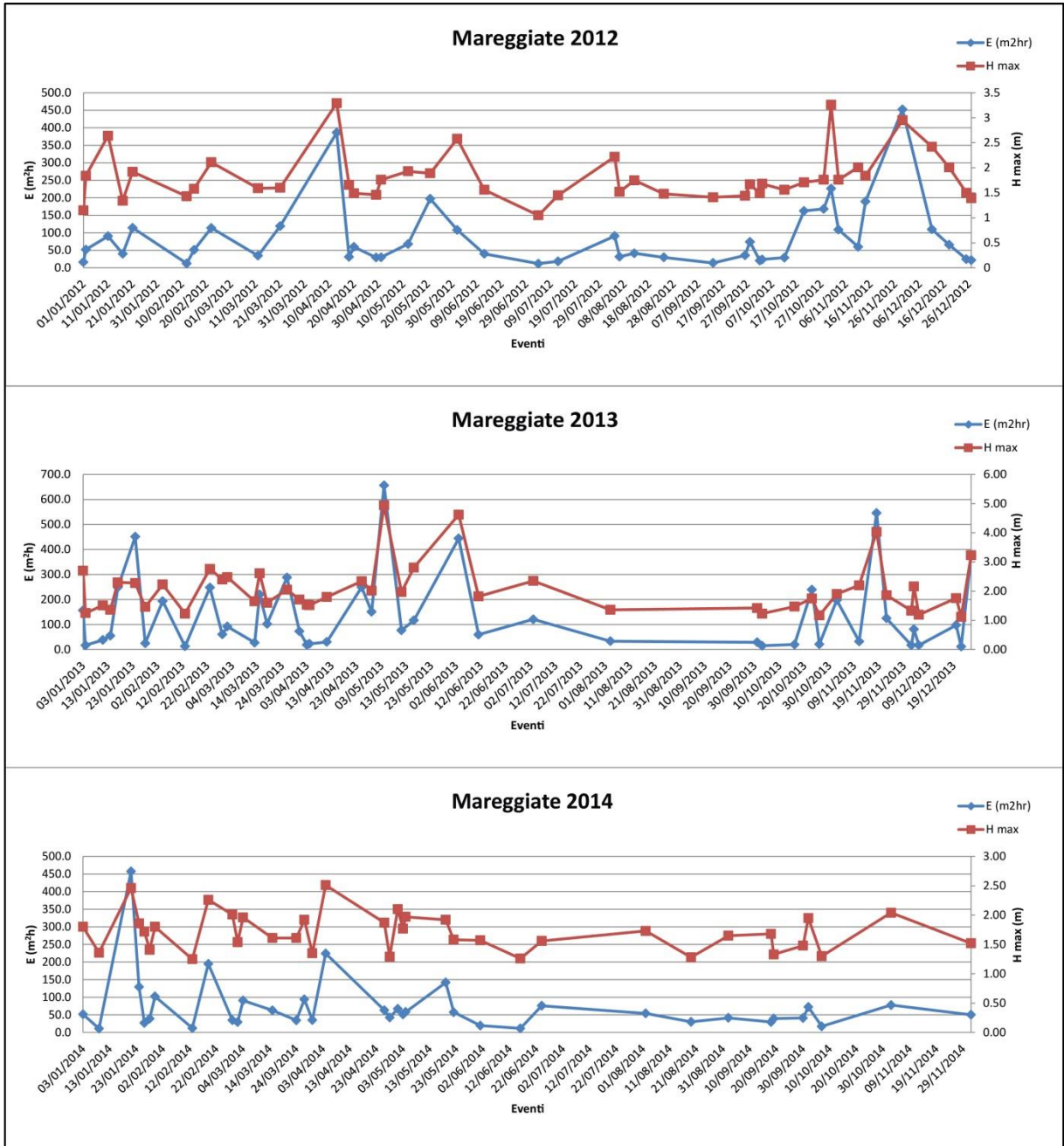


Figura 13. Nel grafico sono indicate sia l'energia ( $m^2hr$ ) che l'altezza d'onda (m) massima registrata durante le mareggiate. In ascissa sono elencati cronologicamente gli eventi di mareggiata registrati per gli anni 20012, 2013 e 2014.

## 2.5 Maree

Le quantificazioni del livello medio mare e delle escursioni di marea, sono state definite con l'analisi dei dati acquisiti dalla stazione multiparametrica della R.M.N. dell'I.S.P.R.A. (Acquisizione dei livelli idrometrici dal 1986).

Dalla mera analisi statistica dei dati disponibili, è emerso che le maree hanno componenti sia diurne che semidiurne, con un valore di escursione massima in sizigie pari mediamente a 30/40 cm, che scende a 15 cm durante le fasi di quadratura (Figura 14). Inoltre sono stati rilevati valori di livello medio mare mediamente più alti di 10 cm durante il periodo autunnale rispetto al resto dell'anno.

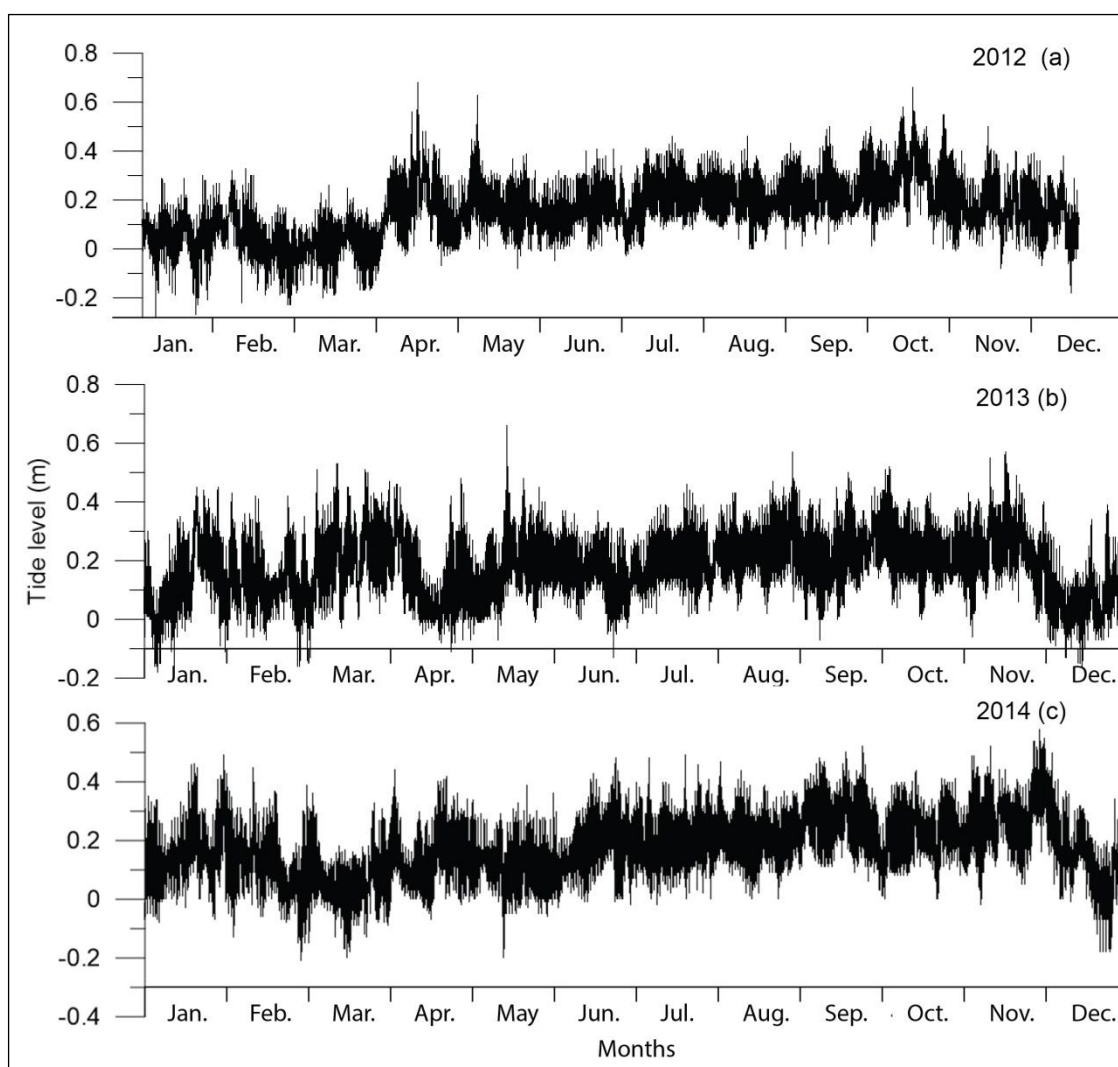


Figura 14. Livelli idrometrici acquisiti durante il periodo di acquisizione e analisi dei dati topografici e batimetrici.

In bibliografia è noto che le maree possono generare processi idro-morfo-dinamici e influenzare l'energia del moto ondoso incidente durante una mareggiata. Per quantificare il ruolo delle maree rispetto agli effetti delle onde incidenti, è stato utilizzato il parametro

“relative tide range”  $RTR$  (Masselink *et al.*, 2011) (Formula 2). Secondo questo parametro gli effetti della marea risultano relativamente insignificanti se  $RTR < 3$ , ma dominano processi di trasporto dei sedimenti quando  $RTR > 15$ .

$$RTR = \frac{MSR}{H_b} \quad (2)$$

$MSR$  (Mean Spring Tide Range) è l’escursione media di marea alle sizigie (33 cm nel Golfo di Cagliari), e  $H_b$  è l’altezza modale dell’onda in frangenza che mediamente varia tra i 0.40 m e 0.80 m.

I valori di  $RTR$  ottenuti sono molto inferiori a 3 e dimostrano che le variazioni di marea non influenzano direttamente il morfodinamismo della spiaggia in studio.

Tuttavia, il sopralzo di marea abbinato a mareggiate provocate dai cicloni caratterizzati da bassa pressione determina un rischio di allagamento della spiaggia emersa e del retrospiaggia antropizzato.

### 2.5.1 Sopralzo complessivo del livello mare

Il massimo livello che può raggiungere il mare in situazioni estreme è stato determinato tenendo conto della massima escursione positiva del livello mare registrata durante la marea astronomica sizigiale e dal sopralzo determinato dalla marea meteorologica, la quale è dovuta a varie cause, quali: sopralzo barico, i venti di mare, il moto ondoso (wave set up).

Il sopralzo complessivo del massimo livello mare è stato ottenuto sommando il singolo contributo delle cause suddette. Per l’area di studio sono state fatte le seguenti considerazioni:

- **Sopralzo di Marea ( $S_m$ ):** per effetto della marea astronomica sizigiale, si è riscontrato un sopralzo massimo del livello mare rispetto al livello medio di 0.21 m.
- **Sopralzo Barico ( $S_B$ ):** è causato da condizioni di bassa pressione atmosferica durante i cicloni. Come noto in bibliografia (Milano, 2008), per ogni millibar (0.75 mmHg) di depressione atmosferica rispetto al valore medio, corrisponde un innalzamento del livello marino di circa 1 cm. Dalle misure barometriche effettuate dalla stazione R.M.N., è stato misurato un valore medio di 1015.24 millibar (761.5 mmHg) e depressioni massime di 27.14 millibar (20.5 mmHg) alle quali corrispondono sopralzi di circa 0.27 m.
- **Sopralzo dovuto ai venti di mare ( $S_v$ ):** è stato calcolato con la seguente relazione implicita (Milano, 2008):

$$S_v = \frac{K L_p U^2}{g(D-d-S_v)} \ln\left(\frac{D}{D+S_v}\right) \quad (3)$$

Dove  $D$  (200m) è la profondità limite di piattaforma continentale,  $d$  (0.50) è la profondità nei pressi della linea di riva,  $L_p$  (13.000 m) è la distanza del limite di piattaforma dalla costa,  $U$  (20 m/sec) è la velocità del vento eccezionale,  $g$  è l'accelerazione di gravità. Il sopralzo ottenuto ha un valore di 0.04 m.

- **Sopralzo dovuto al moto ondoso ( $S_w$ ) (wave set-up):** il calcolo del wave set-up è riferito al moto ondoso con direzione normale alla linea di riva. Infatti se le creste delle onde al frangente formano un angolo diverso da zero con la linea di riva, solo la componente normale del moto ondoso produce il set-up, mentre la componente longitudinale produce una corrente longitudinale alla riva (long shore current) confinata nella surf zone.

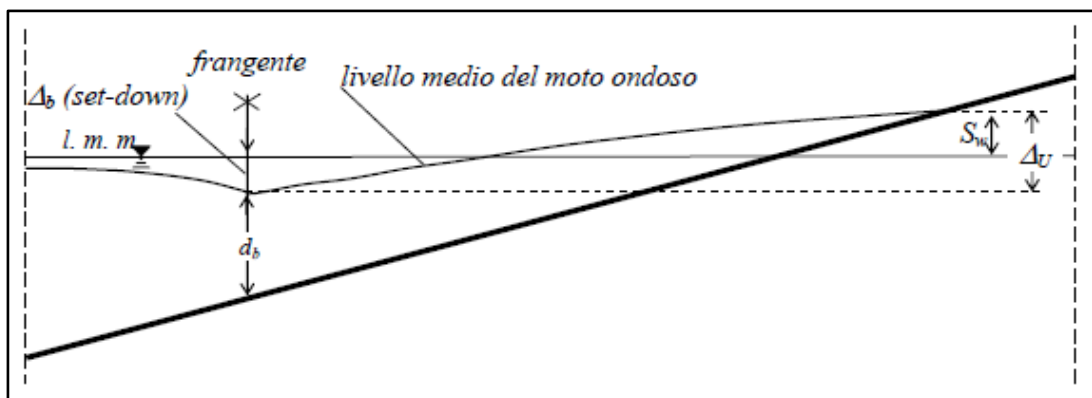


Figura 15. Schema dell'andamento del livello medio del moto ondoso a monte (set down) e a valle (set up) del frangente.

Il wave set up è stato ottenuto applicando il procedimento di Longuet-Higgins e Stewart (1963). Il sopralzo del livello medio mare dovuto solo al moto ondoso si verifica tra la linea di riva e la zona dei frangenti (Figura 15). In prossimità della linea di frangenza delle onde, si verifica un abbassamento del livello medio del mare (set-down), il cui valore è stato ricavato dalla seguente formula:

$$S_b = \frac{0.536 H_b^{3/2}}{\sqrt{g} T} \quad (4)$$

Dove  $S_b$  è il set-down,  $H_b$  è l'altezza dell'onda frangente,  $T$  è il periodo dell'onda e  $g$  è l'accelerazione di gravità.



L'innalzamento del livello tra la zona dei frangenti e la linea di riva ( $\Delta s$ ) è dato da:

$$\Delta s = 0.19H_b \quad (5)$$

L'intero sopralzamento dovuto dal moto ondoso ( $S_w$ ) nei pressi della linea di riva risulta:

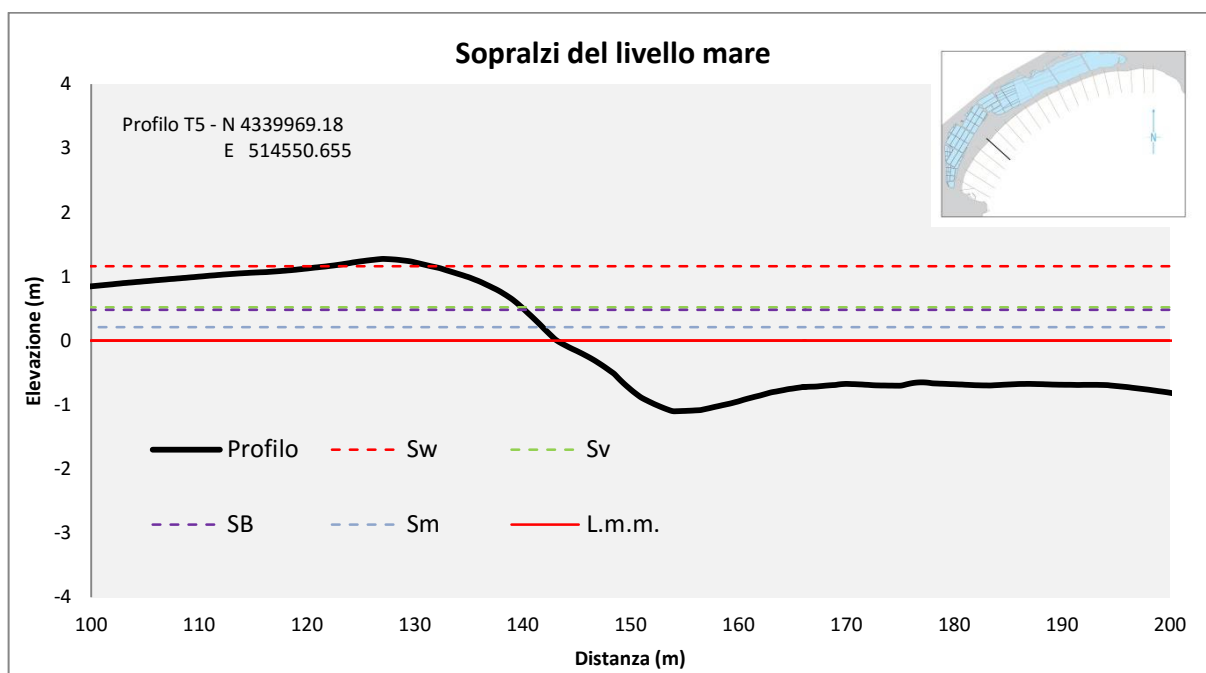
$$S_w = S_b + \Delta s = 0.19H_b \left( 1 - 2.82 \sqrt{\frac{H_b}{gT^2}} \right) \quad (6)$$

$S_w$  è stato calcolato utilizzando valori d'onda ( $H_b$  e  $T$ ) di mareggiate eccezionali rilevate sul database della R.O.N.. I valori utilizzati e i risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 3.

**Tabella 3. La tabella mostra i risultati espressi in metri dei calcoli di set-down ( $S_b$ ) e set-up ( $S_w$ ) eseguiti sui profili di spiaggia rilevati.**

$H_b$ (m)	$T$ (sec)	$S_b$ (m)	$\Delta s$ (m)	$S_w$ (m)	$S_b + \Delta s$
4.00	11	-0.12	0.76	0.64	0.64

Sommando tutti i contributi sopra elencati, è stato ottenuto il sopralzo totale del livello del mare in condizioni estreme (Figura 16): 1.16 m. La possibilità che tutte le condizioni estreme si verifichino simultaneamente è sicuramente raro ma non impossibile.



**Figura 16. Aumento del livello medio mare dovuto al sopralzo della marea astronomica ( $S_m$ ), sopralzo barico ( $S_b$ ), E sopralzo dovuto al moto ondoso ( $S_w$ ). Le linee indicano il contributo di ciascun fattore al sopralzo del livello mare durante condizioni estreme rispetto a un profilo di spiaggia rilevato a nel Marzo 2013.**

## 2.6 Conclusioni dello studio climatologico

L'analisi delle serie storiche di dati ha evidenziato i reali settori di traversia e le caratteristiche degli eventi significativi.

Il Golfo di Cagliari, in ragione della sua disposizione geografica, è influenzato principalmente dai mari provenienti dal II e dal III Quadrante, nello specifico generati dallo Scirocco (vento proveniente da Sud-Est) e dal Libeccio (vento che giunge da Sud-Ovest).

Nell'area di studio l'intensità dei venti foranei è generalmente maggiore se è associati ai fetch più lunghi (come nel caso del vento di Scirocco che arriva spesso a 10/15 m/s). Lo studio del clima ondoso ha consentito di ricavare i valori delle caratteristiche delle onde connesse alle mareggiate provenienti dalle principali direzioni del settore di traversia della spiaggia del Poetto. In generale, si può affermare che il clima di moto ondoso è caratterizzato da onde di bassa energia, con altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) minore di 1 m (80% dei casi). 178 eventi d'onda significativi registrati dalle boe nel Golfo di Cagliari sono stati classificati col metodo di Mendoza e Jmenez (2004).

Nel golfo di Cagliari il regime di marea è di tipo microtidale: infatti nell'area in esame le maree hanno componenti sia diurne che semidiurne, con un valore di escursione massima in sizigie pari, mediamente, a 30/40 cm e che scende a 15 cm in quadratura. I valori relativi alle escursioni di marea, seppur modesti, assumono particolare importanza se sommati ad altri agenti meteo marini locali, potenzialmente potrebbero raggiungere un sopralzo di 1.16 m rispetto al livello medio.

# STUDIO SEDIMENTOLOGICO

## 3.0 Introduzione

I sedimenti sono uno dei principali fattori insieme alla geologia e al clima, che guidano e controllano il sistema costiero, infatti il trasporto solido guida il rapporto tra i processi idrodinamici e le risposte morfologiche della spiaggia. Questo studio è stato realizzato per inquadrare le caratteristiche sedimentologiche attuali della spiaggia del Poetto, acquisire dati indispensabili per effettuare la classificazione morfodinamica della spiaggia e per impostare i modelli numerici di simulazione idrodinamica e morfodinamica.

### 3.1 Acquisizione e analisi dei dati bibliografici

Per comprendere meglio le dinamiche e gli assetti costieri attuali dell'area di studio e per pianificare le attività di acquisizione di nuovi dati sedimentologici, topografici e batimetrici, sono stati raccolti i dati reperibili in bibliografia. I dati bibliografici sono stati analizzati, omogeneizzati, re-interpretati e inseriti in una cartografia preliminare (Figura 18).

I dati bibliografici utilizzati sono:

- 1 Carta Tecnica Regionale (CTR)** acquisita dal Data Base Multiprecisione della Regione Autonoma della Sardegna (R.A.S.); è una banca dati in cui le entità geografiche, provenienti dalla carta tecnica regionale numerica (CTRN) alla scala 1:10.000 e da altri DB, convivono con quelle provenienti dalle carte tecniche comunali numeriche (CNC) alle scale 1:1.000, 1:2.000 e 1:5.000. La CTR è stata utilizzata come base cartografica sulla quale sono state inserite le informazioni estrapolate dagli altri studi. Il sistema di riferimento utilizzato è il WGS84-UTM32 Nord.
- 2 Dati batimetrici** estrapolati dalla Carta Nautica – Litorale di Cagliari in scala 1:30.000 dell'istituto Idrografico della Marina e dagli studi di Kalb (2008) e Cossellu (2003) Brambilla 2012.

Le informazioni batimetriche bibliografiche, sono state integrate con i dati di nuova acquisizione ed utilizzate anche per l'impostazione dei modelli numerici sulla simulazione del moto ondoso a largo.

- 3 **Ortofoto** della Regione Autonoma della Sardegna (R.A.S.), anni: 1954, 1968, 1977, 1997, 2000, 2006, 2003, 2008. **Immagini satellitari** 2011- DIGITALGLOBE INC. da Google Earth. Ortofoto e immagini satellitari sono state utilizzate per l'analisi interpretativa per il riconoscimento di strutture sotto costa quali: affioramenti rocciosi, aree sabbiose, limite superiore della prateria a *Posidonia oceanica* (L.) *Delile*.
- 4 **Sonogrammi Side Scan Sonar** (S.S.S.)(Figura 17) - Campagna Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio - Servizio difesa del mare 2002 – Progetto “*Mappatura delle praterie di Posidonia oceanica lungo le coste della Sardegna e delle piccole isole circostanti*”. I dati consistono in una copertura Side Scan Sonar in scala 1:50.000 realizzata al fine di identificare i limiti, inferiore e superiore, della prateria di *Posidonia oceanica*.
- 5 **Dati sedimentologici** relativi a studi precedenti: Ferrara, 1975; Cossellu, 2003; Lai, 2007.
- 6 **Dati climatici (vento, onde e maree)** provenienti dai data base della Rete Mareografica Nazionale e della Rete Ondametrica Nazionale.

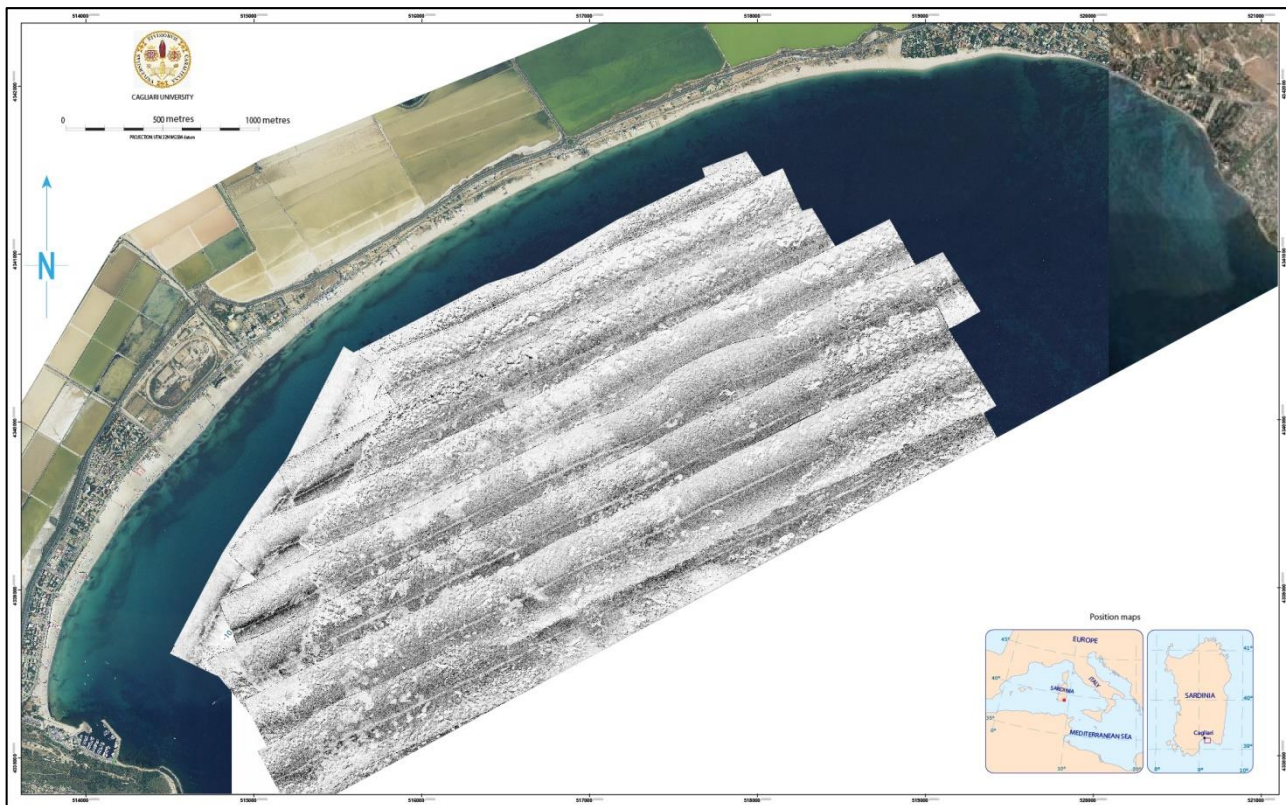
### 3.1.1 Interpretazione dei profili Side Scan Sonar

L'analisi interpretativa dei sonogrammi S.S.S. ha permesso di identificare diverse tipologie del fondale marino attraverso la definizione di facies acustiche (sabbie, roccia, Posidonia). Il principio d'indagine è basato sulla diversa risposta acustica che restituisce il fondo mare. L'intensità del segnale del sonogramma presenta variazioni in funzione dell'assorbimento delle onde acustiche da parte del fondale; questo fenomeno, essendo dipendente dalla tessitura e composizione del sedimento, permette una distinzione tra gli elementi caratterizzati da alti tassi di assorbimento (es. Posidonia, sedimenti prevalentemente fini), e quindi da una risposta ecografica “scura”, e elementi caratterizzati da riflessioni più marcate (sedimenti a granulometria grossa).

Le interpretazioni hanno riguardato le distinzioni degli elementi più facilmente identificabili come i sedimenti sciolti, gli affioramenti rocciosi e la prateria a Posidonia nelle sue varie tipologie.

I limiti delle unità presentano cambiamenti nel segnale tanto più marcati quanto più è grande la differenza delle caratteristiche del fondale, con transizioni che da nette e distinte possono diventare tanto graduali da dover attribuire i limiti più o meno arbitrariamente.

Il limite superiore della prateria a Posidonia è ben marcato ed individuabile tramite un tipico gradino segnalato da un'ombra acustica che segna l'inizio della colonizzazione del substrato da parte delle fanerogame.



**Figura 17. Mosaico side scan sonar eseguito nello shoreface del golfo di Quartu. I dati S.S.S. sono stati acquisiti durante la Campagna Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio - Servizio difesa del mare 2002 – Progetto “Mappatura delle praterie di Posidonia oceanica lungo le coste della Sardegna e delle piccole isole circostanti”.**

Gli affioramenti rocciosi o i sedimenti consolidati sono facilmente riconoscibili nei sonogrammi S.S.S. per la loro evidente geometria talvolta lineare e per l’intensità della loro risposta ecografica.

Per ottenere i dati mancanti delle aree non coperte dai profili S.S.S., è stata realizzata un’analisi interpretativa delle ortofoto e delle immagini satellitari sopra elencate. L’analisi ha reso possibile il riconoscimento di: affioramenti rocciosi, aree sabbiose, zone colonizzate da praterie di fanerogame e vaste aree interessate dalla deposizione del fogliame della Posidonia. Le analisi interpretative dei dati S.S.S. e delle ortofoto sono state verificate con sopralluoghi e rilevamenti diretti. I risultati hanno permesso di realizzare una cartografia preliminare (Figura 18) dell’aria di studio.

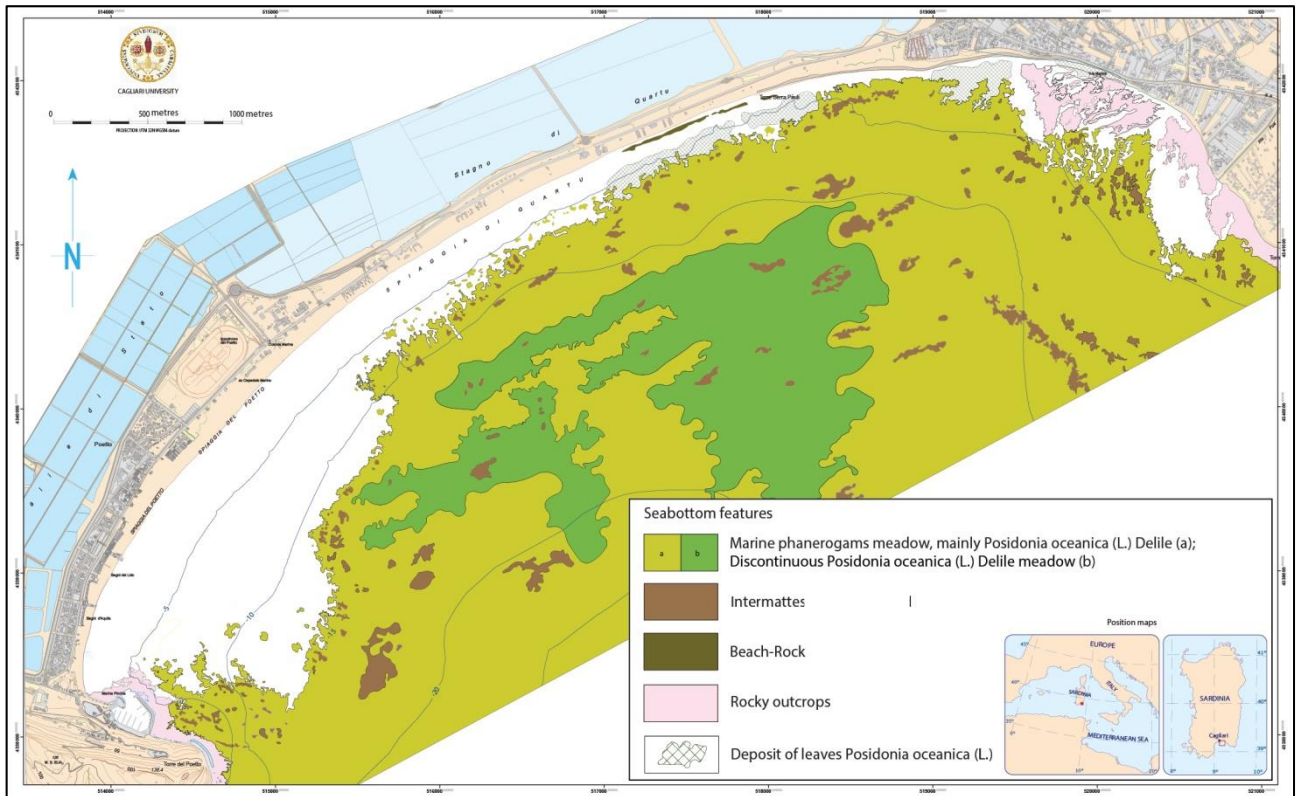


Figura 18. Cartografia preliminare dell'area di studio realizzata tramite l'interpretazione e l'analisi di ortofoto della R.A.S. e i sonogrammi S.S.S. ministeriali. Gli elementi inseriti in carta sono: Posidonia, Intramattes principali, Beachrock, affioramenti rocciosi (Rocky autcrops), aree di deposizione del fogliame della Posidonia.

### Nota sulla prateria a *Posidonia oceanica* (L.) Delile

La sedimentazione bioclastica della piattaforma del Golfo di Cagliari è legata alla produttività dell'ecosistema sottomarino. Questa è influenzata dai vari parametri ambientali come temperatura, correnti, profondità, torbidità e salinità delle acque che determinano le peculiari associazioni biocenotiche dell'ecosistema.

Le condizioni ambientali attuali del Mediterraneo sono intermedie tra quelle dei mari tropicali e quelle dei mari freddi delle alte latitudini (Fornos et alii, 1991) e determinano associazioni intermedie tra la tropicale chlorozoan, a coralli ermatipici (zooxantellati) e alghe verdi, e la molechfor caratteristica di aree temperate fredde (Carannante et alii, 1988 e 1994).

Più specificatamente nel Mediterraneo sono presenti congiuntamente tre biofacies:

- Rhodalgal, caratterizzata da alghe rosse incrostanti, l'associazione prevalente;
- Briotalgal, a briozoi e alghe rosse;
- Molechfor, a molluschi, echinidi e foraminiferi.

Le associazioni biologiche del Mediterraneo sono strettamente dipendenti dalla presenza della specie endemica *Posidonia oceanica* (L.) Delile che si sviluppa formando vere e proprie praterie con associata una specifica entità biocenotica.

La Posidonia oceanica è una pianta evoluta, simile alle graminacee terrestri, facente parte della famiglia delle Fanerogame.

Sviluppa un apparato radicale a rizomi in parte infossato nel sedimento e si presenta con verdi foglie nastriformi, larghe circa 1 cm e lunghe in media tra 80 e 100 cm unite in fasci di 6-7 foglie nell'estremità del rizoma (Gazale e Porcheddu, 1993).

Cresce formando estese praterie, colonizzando soprattutto i fondi sabbiosi a cui aderisce sviluppando il robusto apparato radicale a rizomi.

Vive normalmente tra -1 e -30 metri circa di profondità, arrivando ai -40 m solo in acque particolarmente limpide, in quanto strettamente condizionata dalla presenza della luce.

Può vivere entro un discreto campo di temperature (da 10°C a 28°C circa), mentre è poco tollerante nei confronti delle variazioni di salinità, per cui è assente alle foci dei fiumi e nelle lagune salmastre costiere.

Il tipo di fondo più colonizzato da questa pianta è quello sabbioso al quale si somma il sedimento bioclastico prodotto dalle specie associate all'ecosistema della posidonia. Talvolta si può sviluppare anche su un substrato roccioso parzialmente coperto da sedimenti mobili.

La struttura che si viene a formare risulta compatta e resistente e viene chiamata, con termine francese, "matte".

In condizioni di media energia la crescita della pianta si arresta sotto la superficie e anche un piccolo corpo solido deposto sulla matte può determinare un'erosione andando a formare pozzi o canali intramattes (Pérès e Picard, 1964). In condizioni di alta energia la crescita si arresta più rapidamente.

I rizomi restano vivi nei primi 30-40 cm e tendono a conservarsi nei sedimenti anche per lungo tempo. A Cagliari ed in alcune piane costiere della Sardegna sono segnalati fanghi torbosi bruno-nerastri a posidonie e zoostere sub-fossili attribuibili alla trasgressione Versiliana (Marini, 1976; Maxia e Pecorini, 1968)

L'importanza delle Fanerogame marine, piante superiori ben distinte dalle alghe, in particolare della Posidonia, è riconosciuta come fondamentale nell'economia degli ecosistemi marini costieri, per un insieme di motivi.

Importanti da un punto di vista dello studio sedimentologico sono:

- fissazione dei fondali, così come avviene per la terraferma sui versanti forniti di un adeguato manto vegetale;
- associata produttività bioclastica e talvolta confinamento di sedimenti silicoclastici entro il limite superiore della prateria;

- protezione delle spiagge dall'erosione, grazie alla riduzione dell'idrodinamismo operata dallo strato fogliare e dallo smorzamento del moto ondoso a riva, dovuto all'accumularsi lungo la battigia di foglie morte (Banquette).

La rarefazione e la scomparsa delle praterie sono dovute a molteplici cause, tra cui si può citare:

- l'erosione meccanica dovuta agli attrezzi per la pesca a strascico, con effetti distruttivi;
- il raschiamento provocato dalle ancore delle imbarcazioni da diporto;
- la costruzione di opere costiere (porti, terrapieni ecc.); ciò può provocare anche la scomparsa totale delle praterie a causa sia dell'azione diretta di scavo e ricoprimento, sia della torbidità che impedisce la penetrazione della luce e soffoca la praterie con la deposizione di materiale argilloso;
- l'inquinamento che agisce in vari modi sulle praterie prossime agli scarichi, alterandole con la presenza di sostanze chimiche o con l'alta torbidità dell'acqua nelle aree eutrofiche.



## 3.2 Acquisizione e analisi dei dati sedimentologici

Le attività svolte per la caratterizzazione sedimentologica del Poetto hanno avuto inizio durante la prima campagna di rilevamento avvenuta nel luglio del 2012. Il piano di campionamento (Figura 19) è stato predisposto sulla base dell'analisi interpretativa delle ortofoto della R.A.S. e la rielaborazione del fotomosaico SSS fornito dal Ministero dell'Ambiente (2002). Il campionamento è stato realizzato mediante l'ausilio dell'imbarcazione Marino 660 del Coastal Marine Geomorphology Group dell'Università di Cagliari, equipaggiata con un sistema ecoscandaglio Reson Navisound 215 interfacciato col DGPS l'Omnistar 8300HP attraverso il software di navigazione Reson PDS2000.

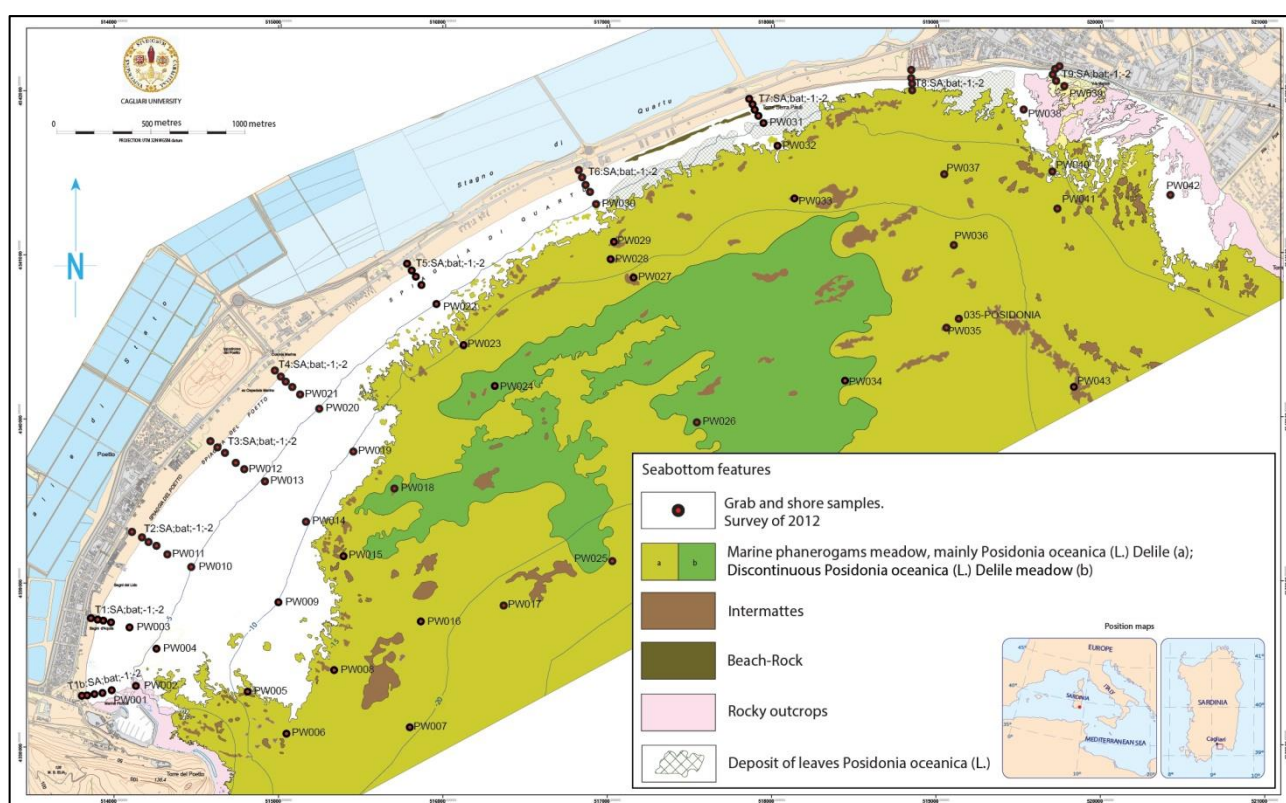


Figura 19. Piano di campionamento per l'acquisizione di nuovi dati sedimentologici. Campagna 2012.

Su 83 stazioni di campionamento previsti, sono stati prelevati 51 campioni in spiaggia sottomarina distribuiti sulle isobate dei -1, -2, -5, -10, -15 e -20 metri utilizzando una benna Van Veen da 5 litri previo allestimento di una gru progettata appositamente per l'imbarcazione. 10 campioni sono stati prelevati lungo la battigia e altri 10 sono stati prelevati dall'alta spiaggia, utilizzando una piccola carota per il prelievo del materiale e un DGPS/RTK/Starfire per il posizionamento. Su 12 stazioni non è stato possibile prelevare i campioni a causa della prateria a Posidonia e l'assenza di intramattes nelle vicinanze, tuttavia sono state considerate come punti di osservazione.

### 3.3 Analisi Tessiturale

Seguendo le consuete metodologie dell'analisi granulometrica, i campioni prelevati sono stati lavati accuratamente in acqua dolce al fine di evitare cristallizzazioni saline e la formazione di aggregati che falserebbero i risultati tessiturali. Al lavaggio è seguita l'essiccazione in forno ventilato con temperatura tarata sulla tipologia di sedimento (es. i sedimenti fangosi sono stati essiccati ad una temperatura di circa 20°C per evitare la cementazione del materiale fine). L'analisi granulometrica è stata realizzata seguendo le procedure dello standard ASTM International (American Society for Testing and Materials). Dopo gli opportuni pretrattamenti, ciascun campione è stato quartato, pesato e setacciato con vibrosetacciatore per il frazionamento dimensionale. I campioni sono stati suddivisi in classi dimensionali secondo la scala di Udden e Wentworth, (1922)(Tabella 4) con intervalli interi di  $\frac{1}{4}$  di  $\Phi$ , tra 6700  $\mu\text{m}$  e 63  $\mu\text{m}$  (Ricci Lucchi 1980). Ogni singola frazione è stata pesata valutandone la percentuale rispetto al peso totale.

I parametri statistici utilizzati (Folk e Ward, 1957) sono stati ricavati tramite l'applicativo Gradistat per Microsoft Excel (Blott and Pye, 2001). Per ogni campione sono state realizzate una curva di frequenza granulometrica e una curva cumulativa su cui sono stati ricavati: la mediana (valore in  $\phi$  del 50° percentile), la media, lo skewness, il coefficiente di cernita, che esprime il grado di classazione del sedimento (Inman, 1952). I risultati sono dell'analisi sono descritti in maniera sintetica nella Tabella 5.

**Tabella 4. Scala dimensionale adottata per il frazionamento dimensionale. Modificato da Udden e Wentworth (1922)**

Gran Size Scale		
Descriptive term		$\mu\text{m}$
Gravel and Boulder		> 6700
Gravel	Fine	5600 ÷ 6700
		4750 ÷ 5600
		4000 ÷ 4750
	Very fine	3350 ÷ 4000
		2800 ÷ 3350
		2360 ÷ 2800
Sand	Very coarse	2000 ÷ 2360
		1700 ÷ 2000
		1400 ÷ 1700
		1180 ÷ 1400
	Coarse	1000 ÷ 1180
		850 ÷ 1000
		710 ÷ 850
	Medium	600 ÷ 710
		500 ÷ 600
		425 ÷ 500
		355 ÷ 425
		300 ÷ 355
		250 ÷ 300
	Fine	212 ÷ 250
		180 ÷ 212
150 ÷ 180		
125 ÷ 150		
Very fine	106 ÷ 125	
	90 ÷ 106	
	75 ÷ 90	
Silt		< 63

**Tabella 5. Campionature della spiaggia del Poetto, golfo di Quartu, con descrizione sintetica del sedimento sulla base delle analisi tessiturali.**

Nome Campione	Profondità (m)	Descrizione delle tessiture
PW 001	-2	Unimodal, Very Well Sorted, Very Fine Sand
PW 002	-4.65	Unimodal, Well Sorted, Very Fine Sand
PW 003	-2.69	Unimodal, Well Sorted, Very Fine Sand
PW 004	-5.3	Bimodal, Moderately Well Sorted, Fine Sand
PW 005	-11.69	Unimodal, Moderately Sorted, Very Fine Sand
PW 006	-14.87	Mud
PW 007	-19.88	Posidonia
PW 008	-15.46	Posidonia
PW 009	-8.8	Unimodal, Very Well Sorted, Very Fine Sand
PW 010	-5	Unimodal, Very Well Sorted, Very Fine Sand
PW011	-2	Unimodal, Well Sorted, Fine Sand
PW 012	-2.2	Unimodal, Moderately Well Sorted, Fine Sand
PW 013	-5.12	Unimodal, Very Well Sorted, Very Fine Sand
PW 14	-10.37	Unimodal, Very Well Sorted, Very Fine Sand
PW 15	-14.93	Posidonia
PW 016	-19.89	Mud
PW 017	-20.84	Posidonia
PW 018	-15.1	Posidonia
PW 019	-9.79	Unimodal, Very Well Sorted, Very Fine Sand
PW 020	-5.03	Unimodal, Very Well Sorted, Very Fine Sand
PW 021	-2.3	Unimodal, Very Well Sorted, Fine Sand
PW 022	-2.45	Bimodal, Well Sorted, Fine Sand
PW 023	-5.23	Unimodal, Well Sorted, Fine Sand
PW 024	-14.16	Posidonia
PW 025	-19.2	Posidonia
PW 026	-16.72	Posidonia
PW 027	-10.7	Unimodal, Moderately Sorted, Very Fine Sand
PW 028	-7.99	Unimodal, Poorly Sorted, Ghiaia bioclastica
PW 029	-8.11	Unimodal, Moderately Well Sorted, Fine Sand
PW 030	-2.6	Unimodal, Moderately Sorted, Fine Sand
PW 031	-10	Bimodal, Well Sorted, Fine Sand
PW 032	-5	Unimodal, Moderately Sorted, Very Fine Sand
PW 033	-11.78	Mud
PW 034	-15.05	Posidonia
PW 035	-12.99	Unimodal, Poorly Sorted, Medium Sand
PW 036	-9.8	Posidonia
PW 037	-5.8	Posidonia
PW038	-3.15	Unimodal, Well Sorted, Fine Sand
PW 039	-2.46	Unimodal, Well Sorted, Fine Sand
PW 040	-5.8	Unimodal, Well Sorted, Very Fine Sand
PW 041	-5.25	Posidonia

Nome Campione	Profondità (m)	Descrizione delle tessiture
PW042	-3.71	Bimodal, Moderately Well Sorted, Fine Sand
PW 043	-8.2	Trimodal, Moderately Sorted, Very Coarse Sand
PW T1 bis -1	-1	Unimodal, Very Well Sorted, Fine Sand
PW T1 -1	-1	Unimodal, Very Well Sorted, Fine Sand
PW T2 -1	-1	Unimodal, Moderately Well Sorted, Medium Sand
PW T3 -1	-1	Unimodal, Moderately Well Sorted, Fine Sand
PW T4 -1	-1	Trimodal, Moderately Well Sorted, Fine Sand
PW T5 -1	-1	Unimodal, Moderately Well Sorted, Fine Sand
PW T6 -1	-1	Bimodal, Well Sorted, Fine Sand
PW T7 -1	-1	Unimodal, Well Sorted, Fine Sand
PW T8 -1	-1	Bimodal, Moderately Well Sorted, Fine Sand
PW T9 -1	-1	Bimodal, Moderately Well Sorted, Fine Sand
PW T1 bis -2	-2	Unimodal, Very Well Sorted, Very Fine Sand
PW T1 -2	-2	Unimodal, Very Well Sorted, Fine Sand
PW T2 -2	-2	Unimodal, Well Sorted, Fine Sand
PW T3 -2	-2	Unimodal, Well Sorted, Fine Sand
PW T4 -2	-2	Unimodal, Very Well Sorted, Fine Sand
PW T5 -2	-2	Bimodal, Well Sorted, Fine Sand
PW T6 -2	-2	Unimodal, Moderately Sorted, Fine Sand
PW T7 -2	-2	Bimodal, Well Sorted, Fine Sand
PW T8 -2	-2	Unimodal, Well Sorted, Fine Sand
PW T9 -2	-2	Bimodal, Moderately Sorted, Very Fine Sand
PW T1 bis bat	Battigia	Bimodal, Moderately Sorted, Medium Sand
PW T1 bat	Battigia	Bimodal, Moderately Sorted, Medium Sand
PW T2 bat	Battigia	Polymodal, Poorly Sorted, Coars Sand
PW T3 bat	Battigia	Polymodal, Poorly Sorted, Coars Sand
PW T4 bat	Battigia	Bimodal, Moderately Sorted, Coars Sand
PW T5 bat	Battigia	Unimodal, Moderately Sorted, Coars Sand
PW T6 bat	Battigia	Unimodal, Moderately Sorted, Coars Sand
PW T7 bat	Battigia	Polymodal, Poorly Sorted, Coars Sand
PW T8 bat	Battigia	Polymodal, Poorly Sorted, Coars Sand
PW T9 bat	Battigia	Polymodal, Poorly Sorted, Coars Sand
PW T1 bis sa	Alta Spiaggia	Bimodal, Moderately Sorted, Medium Sand
PW T1 sa	Alta Spiaggia	Trimodal, Moderately Sorted, Medium Sand
PW T2 sa	Alta Spiaggia	Polymodal, Moderately Sorted, Medium Sand
PW T3 sa	Alta Spiaggia	Polymodal, Poorly Sorted, Coars Sand
PW T4 sa	Alta Spiaggia	Polymodal, Poorly Sorted, Coars Sand
PW T5 sa	Alta Spiaggia	Trimodal, Moderately Sorted, Medium Sand
PW T6 sa	Alta Spiaggia	Trimodal, Moderately Sorted, Medium Sand
PW T7 sa	Alta Spiaggia	Bimodal, Moderately Sorted, Coars Sand
PW T8 sa	Alta Spiaggia	Trimodal, Poorly Sorted, Coars Sand
PW T9 sa	Alta Spiaggia	Unimodal, Moderately Well Sorted, Coars Sand

### **3.4 Analisi composizionale**

L'analisi composizionale è stata eseguita sui campioni interi tramite un esame autoptico al microscopio binoculare, valutando contestualmente le percentuali areali delle diverse componenti mediante comparatori per stima visiva (Bacelle & Bosellini, 1965; Ricci Lucchi, 1980; Swanson, 1985). Le diverse macrofamiglie dei sedimenti sono state determinate sulla base dei caratteri morfologici, del colore e del comportamento all'attacco di acido cloridrico diluito. Questo metodo è stato utilizzato in numerosi studi per suddividere i sedimenti in tre principali gruppi di facies: silicoclastiche, miste e bioclastiche.

Il metodo, non tiene conto delle differenze di peso di volume, per esempio tra bioclasti e clasti terrigeni, perciò contiene errori nelle valutazioni areali. Poiché i vari bioclasti hanno diverse porosità intragranulare e conseguentemente diverso peso di volume, tali errori non possono essere corretti tramite l'introduzione di un unico coefficiente. Questi errori non pregiudicano tuttavia il significato deposizionale attribuito ai sedimenti.

#### **Componente terrigena**

Sono state distinte le seguenti componenti terrigene: quarzo, feldspati s.l., miche s.l., litoclasti (metamorfici, magmatici, calcarei ecc.), minerali accessori e granuli antropici.

In generale il criterio di riconoscimento per il quarzo è basato sul suo aspetto vitreo (benché quando appartiene a cicli sedimentari precedenti possa apparire giallo opaco). Il feldspato s.l., è spesso riconoscibile sulla base della forma, raramente idiomorfa, dalla presenza di sfaldature e dal colore: il K-feldspato è distinguibile per il tipico colore più o meno roseo e i plagioclasti per il colore biancastro. Il riconoscimento del litico si basa sull'evidenza della morfostruttura, del colore e della polimineralogia.

Tali criteri qualitativi in certi casi possono portare alla confusione di specie mineralogiche, ma il metodo è certamente affidabile per la distinzione dei feldspati s.l. rispetto al quarzo. In ogni caso queste imprecisioni nel riconoscimento dei granuli non influiscono sulla finalità dello studio, che è maggiormente rivolto alla valutazione dei rapporti tra la totale componente terrigena e quella carbonatico-bioclastica (Lecca *et al.*, 2005) e affronta preliminarmente la sedimentologia dell'area.

### **Componente bioclastica**

La componente bioclastica è facilmente distinguibile in base alla struttura scheletrica che confrontata con la fauna descritta nel Mediterraneo e nella piattaforma sarda (Lecca *et al.*, 2005; Cossellu, 2007; Kalb, 2008), risulta costituita dai seguenti organismi: molluschi (bivalvi e gasteropodi in frammenti e gusci interi), talli di alghe rosse, colonie di briozoi, foraminiferi (soprattutto forme bentoniche), echinodermi (frammenti di gusci e radioli), ostracodi e numerosi organismi a guscio chitinoso-proteico appartenenti principalmente agli artropodi.

Gran parte della produzione bioclastica deve essere associata all'ecosistema della *Posidonia oceanica*, (L.) Delile che assieme a *Cymodocea nodosa* (Ucria, Ascherson), *Zostera noltii* (Hornemann) e *Zostera marina* (L.), esercita un controllo ecologico dominante e ha importanti relazioni di feedback con l'intero sistema biologico e sedimentario (Unesco, 1977, Lecca *et al.*, 2005). Sono stati rinvenuti gusci frammenti e interi di numerose specie di bivalvi e di gasteropodi. La componente bioclastica attribuibile ai molluschi riveste una notevole importanza data la sua distribuzione in tutta l'area studiata. Anche i foraminiferi fanno parte dei più importanti gruppi di organismi che contribuiscono alla produzione dei sedimenti carbonatici.

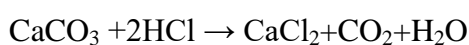
Un altro importante gruppo di organismi biocostruttori è costituito dai briozoi, le cui colonie ricoprono diversi tipi di substrato e di organismi tra i quali le varie parti delle piante di *Posidonia*. Nei sedimenti si riconoscono facilmente le colonie a struttura reticolata, da quelle a struttura radiale come la *Lichenopora radiata*, e frammenti di specie ramificate.

Gli Echinodermi, *Regularia* e *Irregularia*, sono presenti generalmente come frammenti di gusci ma nelle frazioni più fini si riscontrano i radioli degli irregolari. Altre componenti sono rappresentate da Ostracodi, in percentuali nettamente subordinate rispetto al volume totale dei carbonati, e da piccoli organismi a guscio chitinoso-proteico.

### 3.5 Analisi calcimetrica

L'analisi calcimetrica è stata fatta per avere un riferimento della distribuzione delle concentrazioni del calcare lungo riva. Il metodo utilizzato è conforme alla metodologia standard ministeriale (D.M. n° 248 del 21/10/1999).

Il contenuto in carbonato è stato determinato attraverso un'analisi che si basa sulla reazione chimica tra il materiale in esame e l'acido cloridrico. Per la procedura è stato utilizzato il calcimetro di Dietrich-Fruling (Figura 20) che è in grado di determinare la quantità di anidride carbonica che si sviluppa dalla reazione chimica tra una quantità nota di campione opportunamente preparato e HCl diluito secondo la seguente reazione chimica:



La quantità del carbonato di calcio nel campione è stata calcolata partendo dalla misurazione dell'anidride carbonica che si sviluppa dalla reazione, tenendo conto che per ogni mole di  $\text{CaCO}_3$  si forma una mole di  $\text{CO}_2$ .

Sono stati prelevati circa 100g di materiale da ogni campione ed essiccati in forno ( $100^\circ\text{C}$ ) per 24 ore. Il materiale essiccato è stato macinato finemente col mortaio e una volta polverizzato sono stati prelevati 0.5g per il saggio calcimetrico.

Tenendo conto della temperatura e della pressione atmosferica alle quali è stata eseguita l'analisi, il volume della  $\text{CO}_2$  sviluppata dalla reazione è stato standardizzato alla temperatura di  $0^\circ\text{C}$  e alla pressione di 760 mmHg mediante la seguente formula :

$$V_0 = \frac{V_t(P-j)273}{760(273+t)} \quad (7)$$

dove  $V_0$  è il volume della  $\text{CO}_2$  svolta, corretto a  $0^\circ\text{C}$  e alla pressione atmosferica di 760 mm di Hg;  $V_t$  è il volume della  $\text{CO}_2$  svolta alla temperatura e alla pressione atmosferica alle quali è stata eseguita l'analisi, espresso in ml;  $P$  è la pressione atmosferica, espressa in mm di Hg, alla quale è stata eseguita l'analisi;  $t$  è la temperatura, espressa in  $^\circ\text{C}$ , alla quale è stata eseguita l'analisi;  $j$  è la tensione di vapore dell'acqua alla temperatura  $t$ , espressa in mm di Hg.

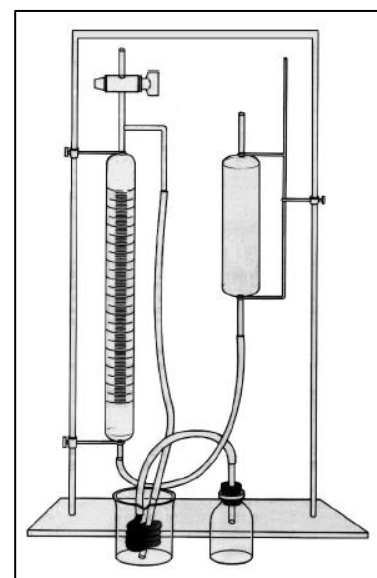


Figura 20. Calcimetro di Dietrich-Fruling. Costituito da base con aste metalliche, bottiglia portacampione, provetta porta-reagente, bicchiere graduato in vetro per l'acqua di raffreddamento, serpentina di raffreddamento, serbatoio graduato a volume (0/200 cc) e serbatoio di livellamento o raccolta acqua di sfiato.

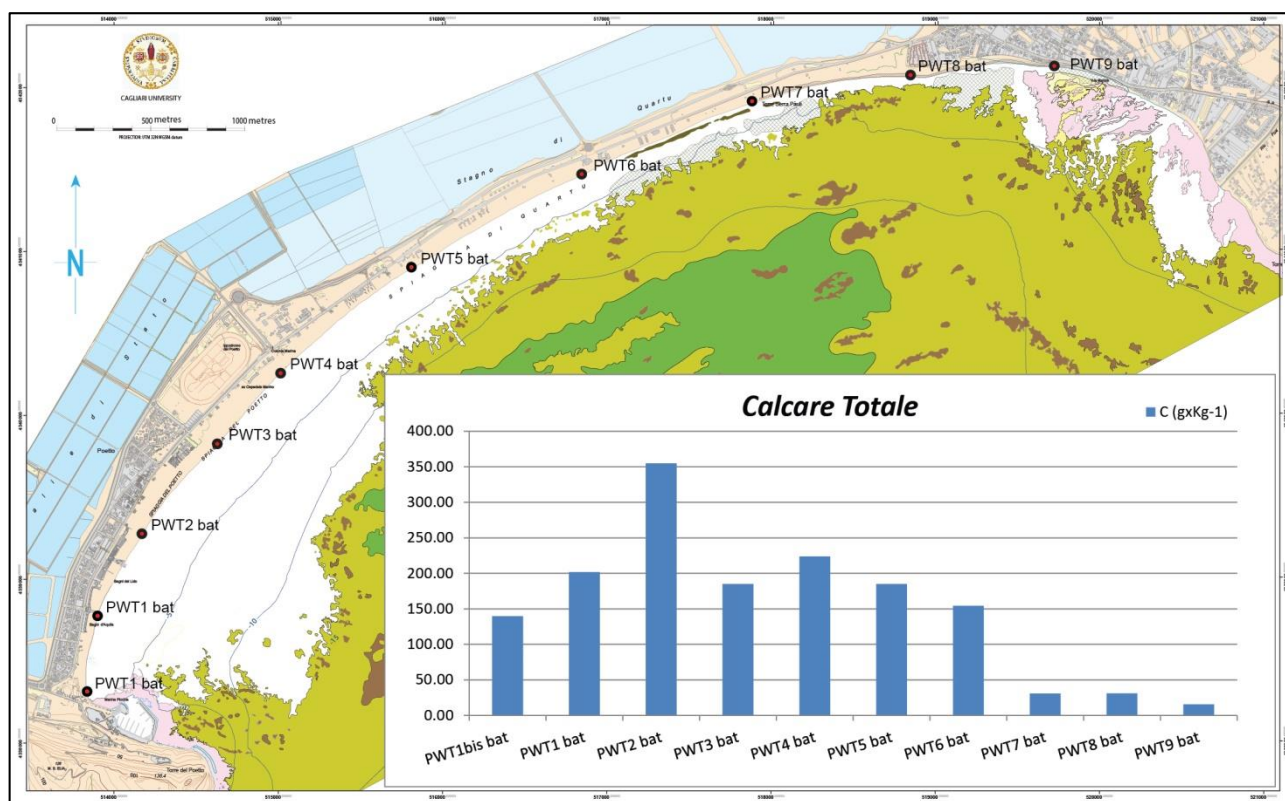
Il contenuto di "calcare totale" (C) espresso in  $\text{gxkg}^{-1}$  è stato calcolato con la seguente espressione:

$$C = \frac{V_0 \cdot 0.0044655 \cdot 1000}{M} \quad (8)$$

dove 0.0044655 è l'equivalente gas-volumetrico e M è la massa del campione utilizzato per l'analisi, espressa in grammi. I risultati dell'analisi calcimetrica sono esposti di seguito (Tabella 6, Figura 21).

**Tabella 6.** La tabella mostra i valori ottenuti con l'analisi calcimetrica per ogni campione trattato.

	$V_t(\text{ml})$	$P_t$ (mmHg)	T (°C)	M (g)	j	$V_0$ (ml)	C ( $\text{gxKg}^{-1}$ )
PWT1bis bat	18	760.5	29	0.5	30	15.64	140
PWT1 bat	26	760.5	29	0.5	30	22.59	202
PWT2 bat	46	760.5	30	0.5	31.8	39.74	355
PWT3 bat	24	760.5	30	0.5	31.8	20.73	185
PWT4 bat	29	760.5	30	0.5	31.8	25.05	224
PWT5 bat	24	760.5	30	0.5	31.8	20.73	185
PWT6 bat	20	760.5	30	0.5	31.8	17.28	154
PWT7 bat	4	760.5	30	0.5	31.8	3.46	31
PWT8 bat	4	760.5	29	0.5	30	3.48	31
PWT9 bat	2	760.5	30	0.5	31.8	1.73	15



**Figura 21.** Istogramma delle calcimetrie e posizioni dei campioni analizzati.



### 3.6 Analisi del peso specifico

Il peso specifico dei sedimenti è stato determinato perché le classificazioni morfodinamiche utilizzate nel presente lavoro richiedono il calcolo della *velocità di caduta* dei sedimenti presenti nella surfzone. Tale parametro compare infatti nella formula della *velocità di caduta adimensionale*  $\Omega$  secondo Dean (1973), che risulta essere il fattore discriminante per poter classificare le spiagge (Wright & Short, 1984; Short, 1999; Masselink & Short, 2011).

Il peso specifico reale dei sedimenti è stato determinato su 30 campioni tramite analisi picnometriche standard. Per *peso specifico reale* si intende il peso della sola sostanza solida costituente i granuli (esclusi gli eventuali pori presenti nei granuli).

Seguendo la procedura, da un campione rappresentativo di sedimento sono stati prelevati, attraverso quartatura, circa 200 g di materiale che successivamente sono stati essiccati in stufa a circa 100°C. Sono stati pesati con precisione di 0.01 g, 50 g di materiale preparato ed introdotti nel picnometro. Successivamente si è versato nel picnometro acqua distillata dearizzata in quantità da riempire il picnometro stesso per circa metà. In seguito si è proceduto ad estrarre l'aria contenuta nel sedimento e nell'acqua sottoponendo il contenuto del picnometro a un vuoto parziale con pressione dell'aria non superiore a 100 mmHg. Successivamente è stato riempito il picnometro con altra acqua distillata dearizzata. Quindi è stata misurata la temperatura dell'acqua e subito dopo è stato pesato il picnometro.

**Elaborazione dei risultati:** il peso specifico reale  $\gamma_r$  del sedimento espresso in grammi al centimetro cubo, è dato da:

$$\gamma_r = \frac{P}{P+P_2-P_1} \gamma_w \quad (9)$$

Dove P è il peso del campione sottoposto all'esame,  $P_1$  è il peso alla temperatura  $t$  del picnometro riempito di sabbia e acqua distillata disareata,  $P_2$  è il peso alla temperatura  $t$ , del picnometro riempito di sola acqua distillata disareata,  $\gamma_w$  è il peso specifico dell'acqua distillata e disareata alla temperatura  $t$ .

I risultati delle analisi picnometriche sono mostrati nella Tabella 7.

Tabella 7. Risultati delle analisi picnometriche ottenuti per ogni campione.

Campione	P (g)	P1 (g)	P2 (g)	T (°C)	$\gamma_w$ g/cm <sup>3</sup>	Densità g/cm <sup>3</sup>
T1 bis bat	50	785.42	753.84	29	0.99597	2.704
T1 bis -1	50	785.18	754	28	0.99626	2.647
T1 bis -2	50	785.3	754.14	27	0.99654	2.645
T1 bat	50	785.4	754.14	27	0.99654	2.659
T1 -1	50	785.27	754	28	0.99626	2.660
T1 -2	50	785.36	754	28	0.99626	2.672
T2 bat	50	785.28	754	28	0.99626	2.661
T2 -1	50	785.41	754.14	27	0.99654	2.660
T2 -2	50	785.35	754	28	0.99626	2.671
T3 bat	50	785.31	754	28	0.99626	2.665
T3 -1	50	785.27	754	28	0.99626	2.660
T3 -2	50	785.26	754.07	29	0.99597	2.647
T4 bat	50	785.43	754	28	0.99626	2.682
T4 -1	50	785.39	754.14	27	0.99654	2.657
T4 -2	50	785.26	754	28	0.99626	2.658
T5 bat	50	785.3	754	28	0.99626	2.664
T5 -1	50	785.15	754.07	28	0.99626	2.633
T5 -2	50	785.15	754.07	28	0.99626	2.633
T6 bat	50	785.35	754.07	28	0.99626	2.661
T6 -1	50	785.22	754.07	28	0.99626	2.643
T6 -2	50	785.26	754.07	28	0.99626	2.648
T7 bat	50	785.24	754	28	0.99626	2.655
T7 -1	50	785.34	754	28	0.99626	2.670
T7 -2	50	785.15	754	28	0.99626	2.643
T8 bat	50	785.19	754	28	0.99626	2.648
T8 -1	50	785.14	754	28	0.99626	2.641
T8 -2	50	785.12	754	28	0.99626	2.638
T9 bat	50	785.37	754	28	0.99626	2.674
T9 -1	50	785.01	754.14	27	0.99654	2.605
T9 -2	50	785.24	754.14	27	0.99654	2.636

### 3.7 Cluster Analysis – Studio statistico e raggruppamento dei dati

I dati quantitativi rappresentanti le caratteristiche tessiturali e mineralogiche dei campioni sono stati trattati secondo il metodo statistico di *cluster analysis* che permette di raggruppare secondo gradi di affinità gli elementi di un insieme e definire delle classi di appartenenza per ogni oggetto.

Il metodo ha permesso di raggruppare i sedimenti in classi, sulla base dei soli parametri numerici, e di confrontare queste con le classi sedimentarie individuate sulla base delle caratteristiche dei campioni. In questo modo l'analisi risulta slegata da elementi non sempre obbiettivi quali la vicinanza geografica di due campionature e rappresenta un approccio puramente quantitativo alla individuazione di caratteristiche sedimentologiche simili tra i campioni.

Il raggruppamento dei dati è basato su algoritmi la cui struttura logica prevede :

1. L'associazione degli elementi che possiedono distanza minima.
2. La registrazione della distanza a cui avviene l'associazione.
3. La formazione di vari gruppi e il calcolo della distanza tra i gruppi esistenti.

Lo strumento grafico che consente di rappresentare il processo di raggruppamento è il dendrogramma, cioè un diagramma costruito sulle matrici calcolate con i vari algoritmi, dal quale è possibile apprezzare il livello di distanza a cui avviene la fusione tra due elementi e quanto un gruppo sia separato dagli altri. Esso quindi indica la forza delle relazioni esistenti tra due elementi in base alla distanza che intercorre tra l'origine e la linea verticale più vicina che connette le linee orizzontali corrispondenti ai due elementi considerati. Il rapporto tra il livello di distanza a cui un gruppo viene formato e quello a cui si fonde con un gruppo gerarchicamente superiore è indicativo del grado di differenziazione poiché definisce quanto il grappolo è delimitato e separato dagli altri.

Per il calcolo di *cluster analysis* si è utilizzato il software applicativo di Microsoft Excel "Cluster" (*ProDomoSua Copyright® F. Cinquegrani*).

Il modello utilizzato è quello Gerarchico e il dendrogramma è basato sulla distanza euclidea con la formula del legame medio (*average linkage*) in cui la distanza tra 2 classi è calcolata in base alla media delle distanze di tutti gli elementi di una classe da quelli dell'altra (Ward, 1963). I valori caratteristici di ogni campione presi in considerazione per la formazione dei raggruppamenti sono stati immessi in tabelle formato MS Excel e sono rappresentati dalla percentuale in peso delle 9 classi granulometriche, da 6 valori che rappresentano le

percentuali composizionali di quarzo, feldspati, miche, minerali accessori, litoclasti e bioclasti, e infine dalla profondità di prelievo di ogni campione (Tabella 8).

Il dendrogramma realizzato mette in relazione le caratteristiche composizionali, tessiturali e la profondità delle stazioni di campionamento per un totale di 16 valori utilizzati dal *software* per il calcolo statistico.

**Tabella 8. - Campioni utilizzati per la *cluster analysis*. la tabella mostra i dati in percentuale relativi alla tessitura e alla composizione dei campioni e la profondità di prelievo.**

Nome Campione	Profondità (m)	MEAN (µm)	Gravel and Boulder	Fine Gravel	Very fine Gravel	Very coarse Sand	Coarse Sand	Medium Sand	Fine Sand	Very Fine Sand	Silt	Quarzo	Feldspati	Miche	Accessori	Litoclasti	Bioclasti
PW 001	-2	99.75	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	12.9%	85.2%	1.4%	70%	6%	3%	0%	1%	20%
PW 002	-4.65	106.6	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	2.8%	23.4%	69.9%	3.6%	68%	2%	3%	1%	1%	25%
PW 003	-2.69	113.4	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	1.0%	4.3%	25.8%	68.1%	0.7%	70%	10%	3%	1%	1%	15%
PW 004	-5.3	215.4	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	2.3%	38.9%	46.5%	11.6%	0.5%	73%	2%	3%	1%	1%	20%
PW 005	-11.69	85.50	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.2%	0.9%	5.5%	80.4%	12.9%	81%	0%	1%	0%	0%	18%
PW 009	-8.8	104.5	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	11.4%	87.2%	1.0%	70%	0%	3%	1%	0%	26%
PW 010	-5	105.2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	18.4%	80.3%	1.2%	73%	10%	2%	0%	0%	15%
PW 011	-2	146.7	0.0%	0.0%	0.0%	1.3%	0.8%	3.9%	69.2%	24.5%	0.2%	67%	2%	3%	1%	2%	25%
PW 012	-2.2	174.9	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.2%	18.1%	64.3%	16.4%	0.1%	56%	3%	2%	1%	1%	37%
PW 013	-5.12	119.4	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%	0.2%	47.5%	51.3%	0.7%	70%	4%	3%	1%	2%	20%
PW 014	-10.37	112.9	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	0.7%	33.4%	63.5%	2.0%	70%	10%	3%	1%	1%	15%
PW 019	-9.79	113.6	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.4%	30.3%	68.1%	1.1%	69%	8%	3%	1%	1%	18%
PW 020	-5.03	114.6	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	36.1%	62.8%	0.9%	70%	5%	2%	1%	1%	21%
PW 021	-2.3	140.3	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	0.9%	2.3%	70.6%	25.6%	0.2%	65%	2%	2%	1%	0%	30%
PW 022	-2.45	169.0	0.0%	0.0%	0.4%	1.1%	2.3%	7.7%	74.7%	13.5%	0.2%	67%	2%	3%	1%	2%	25%
PW 023	-5.23	126.0	0.3%	0.3%	0.1%	0.0%	0.0%	1.7%	44.9%	51.2%	1.3%	70%	10%	3%	1%	1%	15%
PW 029	-8.11	129.8	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.2%	5.7%	42.8%	48.9%	2.2%	70%	5%	2%	1%	2%	20%
PW 030	-2.6	197.5	0.0%	0.2%	1.2%	3.5%	4.5%	15.9%	63.9%	10.7%	0.1%	70%	5%	2%	1%	2%	20%
PW 031	-10	163.5	0.3%	0.0%	0.1%	0.2%	0.9%	9.5%	66.0%	22.8%	0.2%	72%	3%	3%	1%	1%	20%
PW 032	-5	101.6	0.0%	0.3%	0.1%	0.1%	0.3%	2.0%	20.6%	68.4%	8.2%	62%	2%	5%	1%	0%	30%
PW 035	-12.99	297.9	1.9%	1.8%	4.2%	6.8%	4.5%	7.6%	69.8%	3.2%	0.1%	40%	0%	1%	0%	0%	59%
PW 039	-2.46	128.0	0.0%	0.2%	0.3%	0.5%	1.0%	3.2%	44.2%	48.0%	2.4%	78%	2%	3%	1%	1%	15%
PW 040	-5.8	120.3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	1.1%	46.8%	49.0%	3.0%	65%	1%	3%	1%	0%	30%
PW 042	-3.71	170.6	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	14.9%	64.7%	19.5%	0.5%	74%	11%	2%	1%	0%	12%
PW043	-8.2	1068.3	1.7%	3.4%	11.3%	30.2%	49.5%	3.8%	0.1%	0.0%	0.0%	65%	18%	3%	2%	5%	7%
PW T1 -1 bis	-1	129.5	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	67.4%	32.0%	0.2%	65%	1%	7%	1%	1%	25%
PW T1 -1	-1	139.3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	2.2%	71.8%	25.6%	0.1%	70%	2%	3%	1%	1%	23%
PW T2 -1	-1	456.0	0.0%	0.2%	0.7%	5.3%	38.8%	45.1%	9.3%	0.6%	0.0%	56%	7%	3%	1%	3%	30%
PW T3 -1	-1	174.0	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	1.4%	15.3%	69.6%	13.5%	0.1%	60%	5%	2%	1%	1%	31%
PW T4 -1	-1	204.7	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	6.8%	20.7%	63.9%	8.1%	0.1%	75%	3%	1%	0%	1%	20%
PW T5 -1	-1	193.7	0.3%	0.0%	0.1%	1.0%	6.5%	13.4%	70.0%	8.5%	0.2%	65%	5%	3%	1%	1%	25%
PW T6 -1	-1	166.8	0.3%	0.0%	0.4%	1.0%	1.3%	7.9%	73.2%	15.7%	0.2%	73%	3%	2%	1%	1%	20%
PW T7 -1	-1	147.6	0.0%	0.0%	0.3%	0.3%	0.7%	6.9%	58.4%	33.2%	0.2%	56%	5%	2%	1%	1%	35%
PW T8 -1	-1	212.6	0.0%	0.1%	0.7%	1.2%	4.2%	28.0%	57.7%	8.0%	0.1%	70%	5%	3%	1%	1%	20%
PW T9 -1	-1	185.6	0.0%	0.2%	0.5%	1.4%	2.1%	15.9%	67.6%	12.0%	0.3%	65%	5%	3%	2%	2%	23%

Nome Campione	Profondità (m)	MEAN (µm)	Gravel and Boulder	Fine Gravel	Very fine Gravel	Very coarse Sand	Coarse Sand	Medium Sand	Fine Sand	Very Fine Sand	Silt	Quarzo	Feldspati	Miche	Accessori	Litoclasti	Bioclasti
PW T1 -2 bis	-2	116.3	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.1%	0.6%	35.8%	62.8%	0.4%	78%	0%	1%	1%	0%	20%
PW T1 -2	-2	130.3	0.0%	0.0%	0.2%	0.1%	0.3%	2.0%	57.4%	39.9%	0.2%	47%	3%	3%	1%	1%	45%
PW T2 -2	-2	146.7	0.0%	0.0%	0.0%	1.3%	0.8%	3.9%	69.2%	24.5%	0.2%	67%	2%	3%	1%	2%	25%
PW T3 -2	-2	141.7	0.0%	0.1%	0.2%	0.2%	1.2%	5.5%	62.9%	29.6%	0.3%	55%	1%	3%	1%	0%	40%
PW T4 -2	-2	140.3	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	0.9%	2.3%	70.6%	25.6%	0.2%	66%	2%	2%	1%	0%	29%
PW T5 -2	-2	169.0	0.0%	0.0%	0.4%	1.1%	2.3%	7.7%	74.7%	13.5%	0.2%	68%	1%	1%	1%	1%	28%
PW T6 -2	-2	197.5	0.0%	0.2%	1.2%	3.5%	4.5%	15.9%	63.9%	10.7%	0.1%	70%	5%	2%	1%	2%	20%
PW T7 -2	-2	163.5	0.3%	0.0%	0.1%	0.2%	0.9%	9.5%	66.0%	22.8%	0.2%	72%	3%	3%	1%	1%	20%
PW T8 -2	-2	143.5	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	3.2%	65.9%	30.4%	0.5%	67%	3%	3%	1%	1%	25%
PW T9 -2	-2	97.51	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.9%	25.2%	61.5%	12.3%	74%	0%	3%	1%	0%	22%
PW T1bis bat	Battigia	261.9	1.8%	0.1%	1.0%	2.6%	8.5%	43.0%	35.3%	7.6%	0.0%	68%	3%	2%	1%	1%	25%
PW T1 bat	Battigia	392.5	0.6%	0.6%	1.9%	5.4%	24.1%	47.4%	18.4%	1.5%	0.1%	55%	8%	1%	1%	5%	30%
PW T2 bat	Battigia	935.1	2.6%	2.7%	9.7%	25.2%	44.3%	13.4%	1.9%	0.1%	0.0%	52%	5%	1%	1%	1%	40%
PW T3 bat	Battigia	662.8	3.6%	3.3%	5.7%	21.2%	28.4%	24.2%	13.3%	0.3%	0.0%	60%	5%	1%	2%	2%	30%
PW T4 bat	Battigia	554.9	0.2%	0.6%	1.7%	11.6%	42.3%	39.8%	3.5%	0.2%	0.0%	65%	5%	3%	1%	1%	25%
PW T5 bat	Battigia	564.9	0.1%	0.0%	0.5%	11.0%	55.1%	25.3%	7.8%	0.2%	0.0%	52%	10%	1%	2%	5%	30%
PW T6 bat	Battigia	599.0	0.3%	0.1%	0.1%	17.2%	48.0%	24.5%	9.6%	0.2%	0.0%	60%	10%	1%	1%	3%	25%
PW T7 bat	Battigia	685.0	0.9%	2.1%	7.7%	28.6%	23.3%	23.9%	13.1%	0.4%	0.0%	64%	15%	2%	1%	3%	15%
PW T8 bat	Battigia	515.5	0.3%	0.7%	4.5%	13.7%	26.5%	40.4%	13.1%	0.7%	0.1%	58%	20%	1%	1%	3%	17%
PW T9 bat	Battigia	868.8	6.3%	5.5%	13.3%	24.6%	15.3%	14.7%	18.0%	2.3%	0.0%	65%	5%	1%	1%	3%	25%
T1 bis sa	Alta Spiaggia	312.9	0.3%	0.0%	0.2%	2.3%	15.8%	50.3%	25.9%	4.9%	0.3%	63%	3%	1%	1%	2%	30%
PW T1 sa	Alta Spiaggia	262.2	0.0%	0.2%	0.3%	1.7%	9.7%	41.5%	42.6%	3.9%	0.2%	50%	3%	2%	0%	5%	40%
PW T2 sa	Alta Spiaggia	408.1	0.1%	0.6%	1.5%	7.6%	28.3%	41.2%	18.8%	1.6%	0.3%	48%	7%	0%	0%	5%	40%
PW T3 sa	Alta Spiaggia	515.2	0.0%	0.7%	3.1%	20.6%	31.0%	24.5%	18.0%	1.9%	0.3%	50%	8%	1%	1%	5%	35%
PW T4 sa	Alta Spiaggia	601.4	0.0%	0.7%	3.8%	21.9%	35.7%	25.4%	11.3%	0.9%	0.2%	47%	5%	0%	0%	1%	47%
PW T5 sa	Alta Spiaggia	625.4	0.0%	0.6%	3.6%	24.7%	40.3%	23.9%	10.3%	0.7%	0.1%	45%	8%	0%	1%	1%	45%
PW T6 sa	Alta Spiaggia	680.3	0.0%	0.4%	3.7%	25.9%	40.9%	22.7%	6.0%	0.4%	0.0%	40%	10%	0%	0%	5%	45%
PW T7 sa	Alta Spiaggia	448.3	0.1%	0.2%	0.2%	6.6%	38.6%	39.6%	14.2%	0.4%	0.1%	50%	15%	0%	2%	5%	28%
PW T8 sa	Alta Spiaggia	472.7	0.0%	0.1%	1.1%	18.3%	28.3%	29.4%	19.7%	2.7%	0.4%	67%	12%	0%	1%	2%	18%
PW T9 sa	Alta Spiaggia	289.1	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	9.6%	55.5%	33.2%	1.2%	0.0%	60%	15%	0%	2%	3%	20%

Ogni campione è stato rappresentato in un dendrogramma che mette in relazione tessitura, composizione e profondità per un totale di 16 valori utilizzati dal *software* per il calcolo statistico. Viene di seguito presentato il dendrogramma delle campionature che associa la granulometria e la composizione con la profondità (Figura 22).

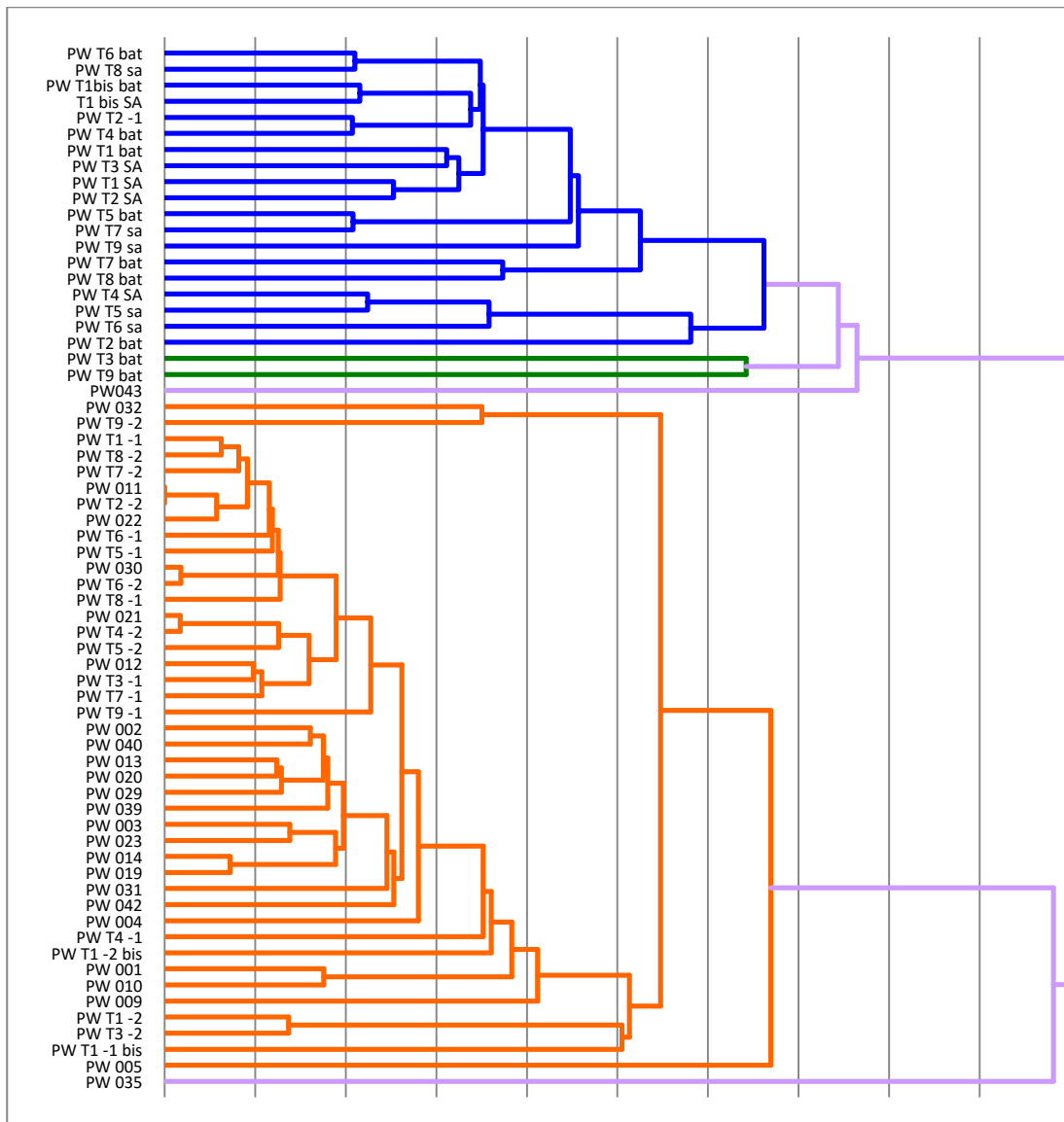


Figura 22. Dendrogramma delle campionature, basato sulle caratteristiche granulometriche, composizionali e la profondità delle stazioni di campionamento. In ascissa: distanza di fusione tra i campioni.

Il dendrogramma mette in evidenza 5 raggruppamenti principali così costituiti:

- **Gruppo A** (42 elementi): prevalenza di percentuali di sabbia fini e molto fini ( $250 \div 63 \mu\text{m}$ ) prevalentemente quarzose, distribuite in spiaggia sottomarina tra -1m e -10 m di profondità;

- **Gruppo B** (18 elementi): prevalenza di sabbia grossa e molto grossa ( $1700 \div 500 \mu\text{m}$ ) con concentrazioni di bioclasti superiore al 25%, distribuita in battigia e alta spiaggia.
- **Gruppo C** (2 elementi): presenza importante della frazione ghiaiosa ( $> 2000 \mu\text{m}$ ) localizzati in battigia;
- **Gruppo D** (1 elementi): campione PW035, prevalentemente ghiaioso e bioclastico prelevato in un intramatte a -12 m di profondità;
- **Gruppo E** (1 elemento): campione PW043, prevalentemente ghiaioso e bioclastico prelevato in un intramatte a -8 m di profondità.

Mettendo in relazione profondità e percentuale della sabbia media ( $\mu\text{m}$ ) si osserva la tendenza ad una relazione di tipo esponenziale dove all'aumentare della prima diminuisce la quantità di sabbia media. Si noti l'eccezione del campione PW004 classificato come sabbia media, ma prelevato ad un profondità di -5,3 m (Figura 23).

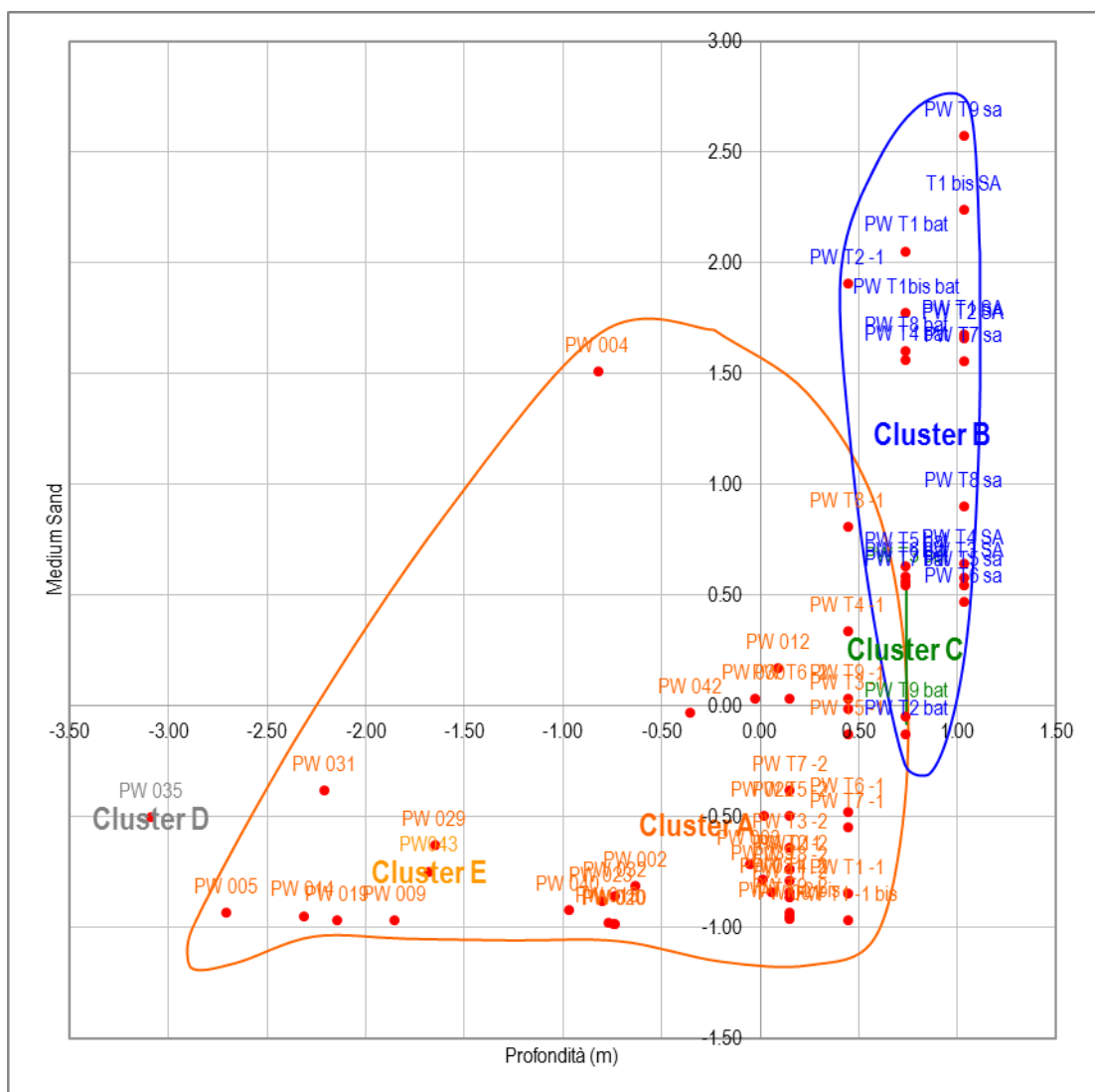


Figura 23. Rappresentazione areale della relazione tra Sabbia Media e Profondità.





Mettendo in relazione la classe tessiturale delle sabbie molto fini con la profondità, si evidenziano ancora 2 raggruppamenti principali molto diversi tra loro. Il primo (gruppo A) è costituito da sabbie di spiaggia sottomarina e risulta distribuito su tutto il range batimetrico. Il secondo raggruppamento (gruppi B e C) risulta distribuito su un areale molto ristretto che rappresenta la battigia e l'alta spiaggia (Figura 25).

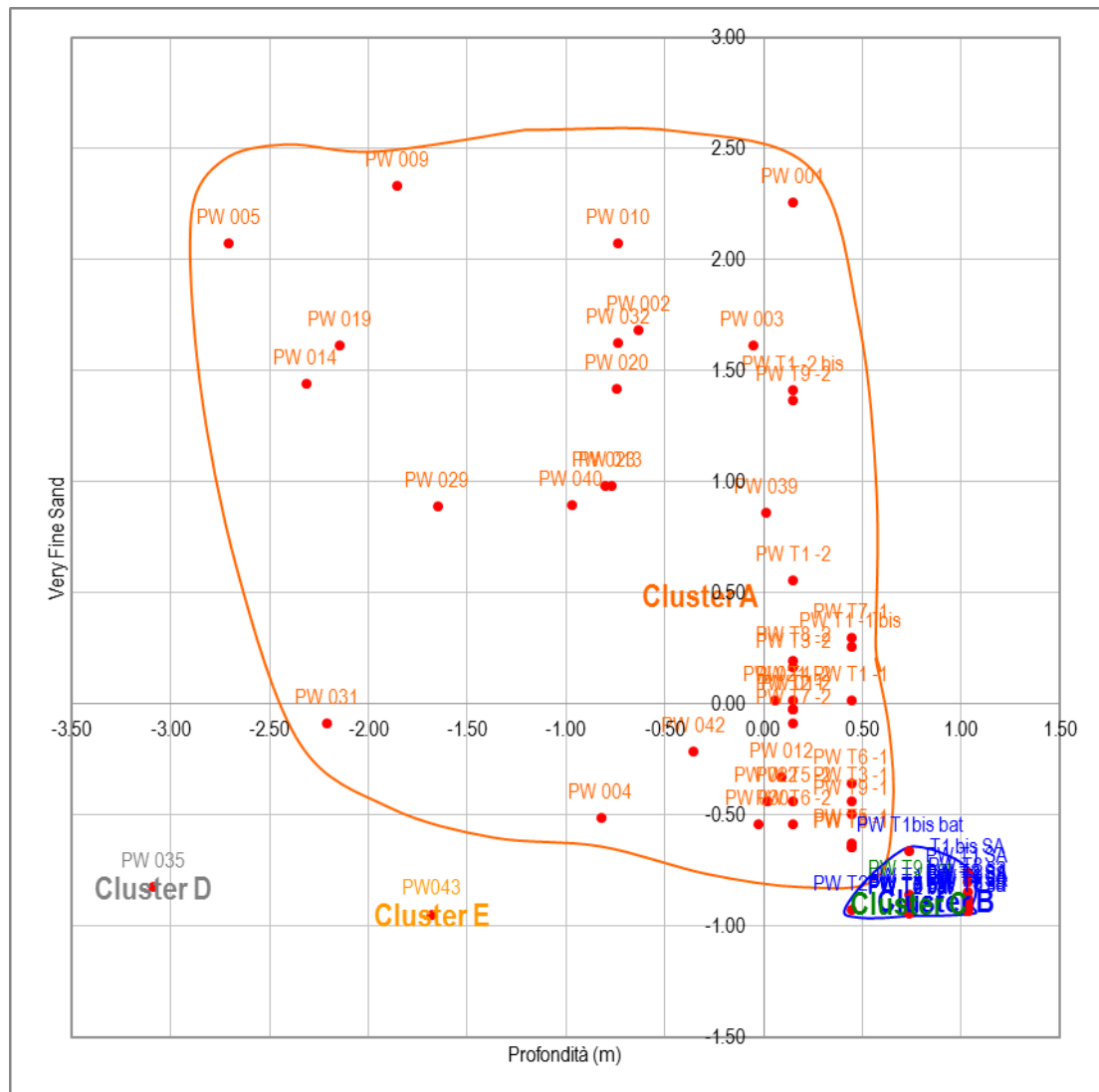


Figura 25. Rappresentazione areale della relazione tra sabbia molto fine e profondità.

Mettendo in relazione la percentuale di quarzo e la profondità si osserva che percentuali minori di quarzo si trovano in spiaggia emersa, mentre in spiaggia sommersa (gruppo A) si osserva una leggera tendenza inversamente proporzionale: all'aumentare della batimetria diminuisce la percentuale di quarzo ad eccezione del campione PW005 (Figura 26).

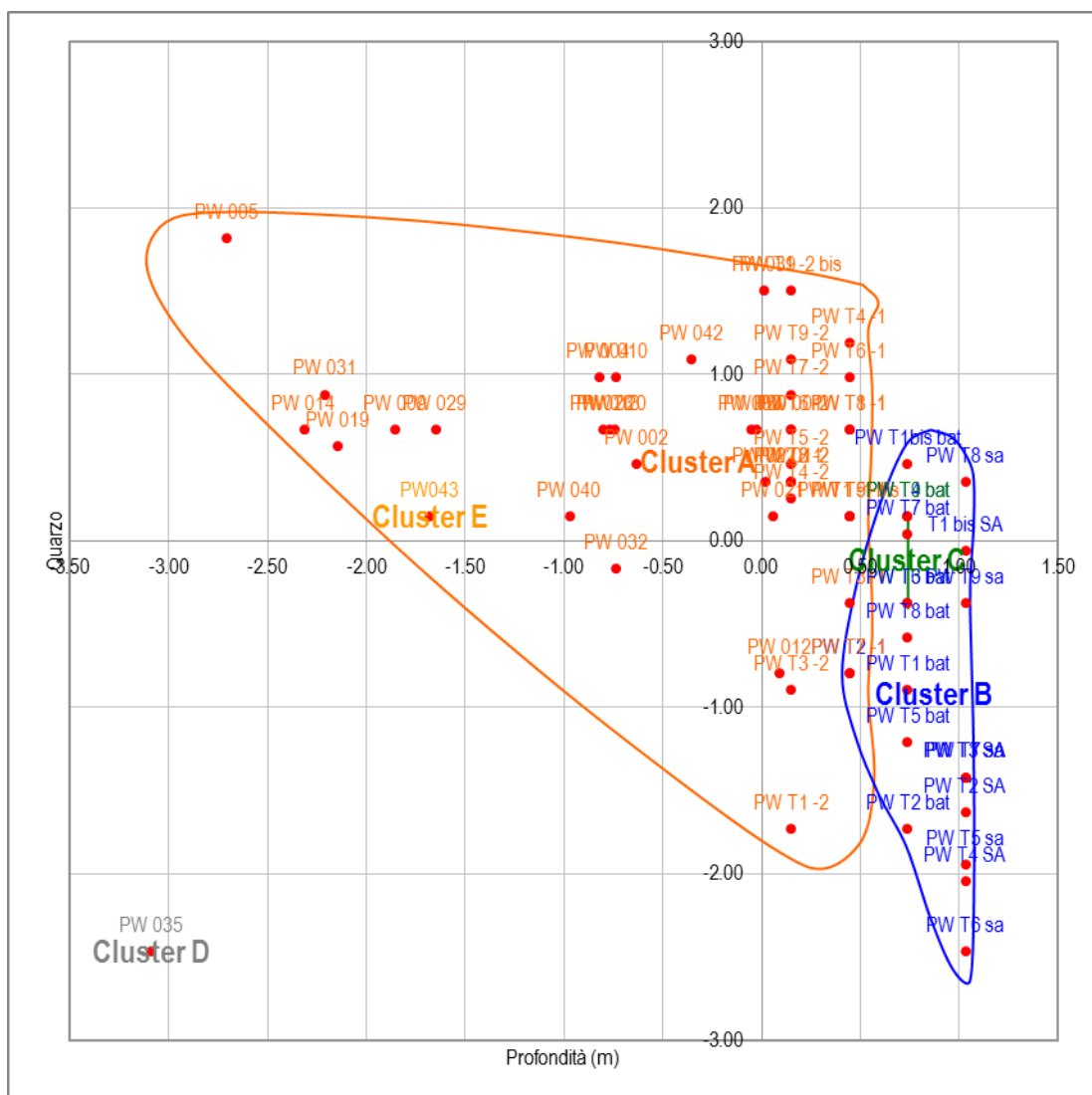


Figura 26. Rappresentazione areale della relazione tra quarzo e profondità.

Mettendo in relazione la percentuale di bioclasti e la profondità (Figura 27) si osservano tendenze opposte da quelle emerse dalla relazione tra quarzo e profondità.

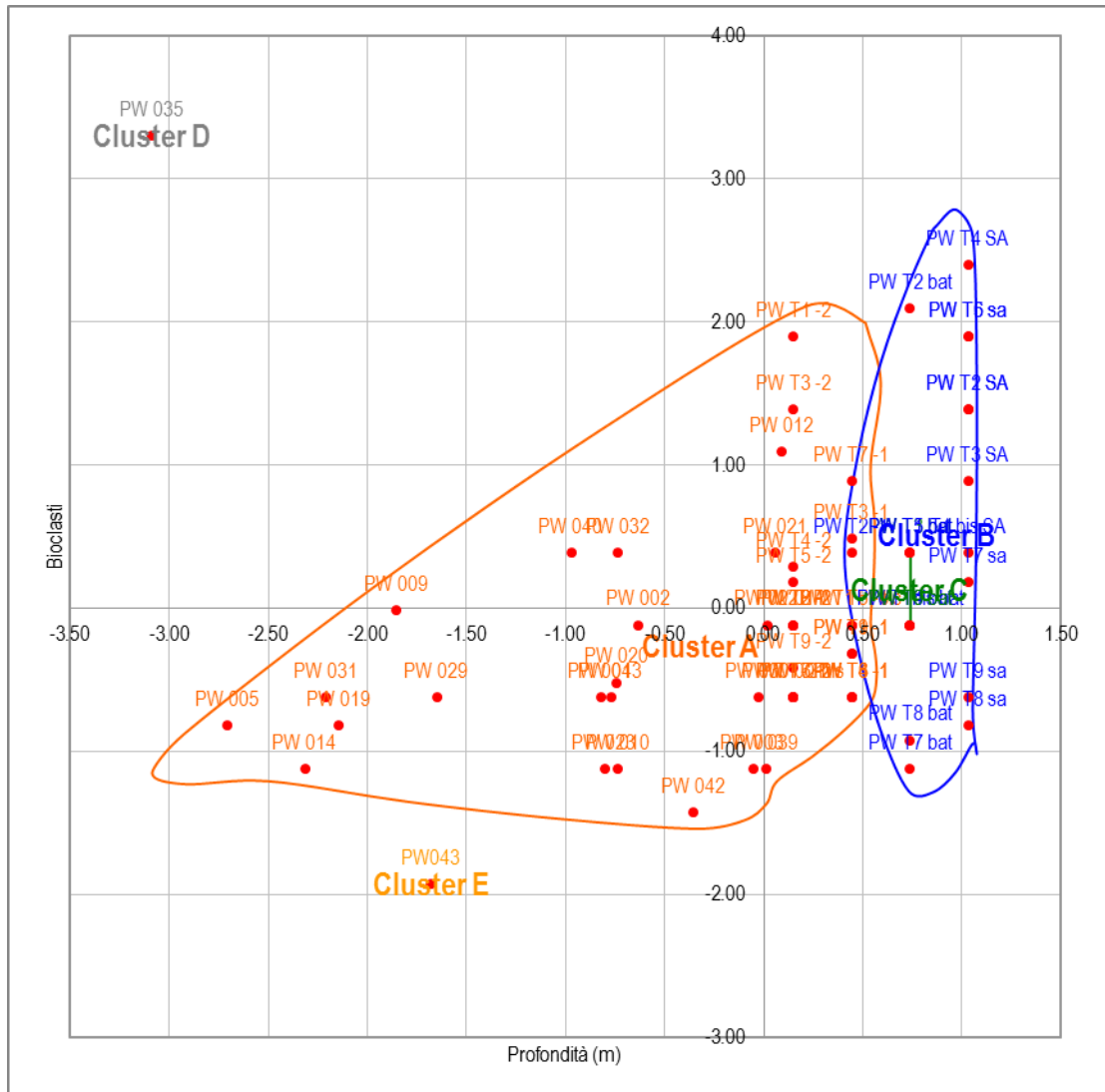


Figura 27. Rappresentazione areale della relazione tra quarzo e profondità.

### 3.8 Conclusioni dello studio sedimentologico

I risultati delle analisi dimensionali, composizionali e statistiche dei sedimenti oltre a fornire informazioni utili per lo studio della morfodinamica della spiaggia del Poetto, hanno portato all'individuazione delle caratteristiche sedimentologiche attuali presenti nell'area di studio. Le caratteristiche osservate nei sedimenti di shoreface (Figura 28) corrispondono a quelle già note in bibliografia (Lecca *et al.*, 2005, Cossellu, 2008). Dal punto di vista granulometrico sedimenti di spiaggia sommersa hanno generalmente una moda compresa negli intervalli delle sabbie fini e molto fini.

La composizione del sedimento è quasi esclusivamente terrigena (quarzoso-arcosica). Nella componente bioclastica predominano i frammenti di molluschi.

La composizione presenta un'alta percentuale in quarzo, superiore al 60%, una percentuale associata di bioclasti e percentuali minori di feldspati e litici.

Come noto in bibliografia (Lecca, 2005; Cossellu, 2007; Kalb, 2008) i sedimenti provengono dalle arenarie e marne mioceniche che affiorano a est di Cagliari, quindi derivano anch'essi dal basamento metamorfico e granitoide del Sarrabus ma attraverso i cicli deposizionali che possono risalire fino al Paleogene.

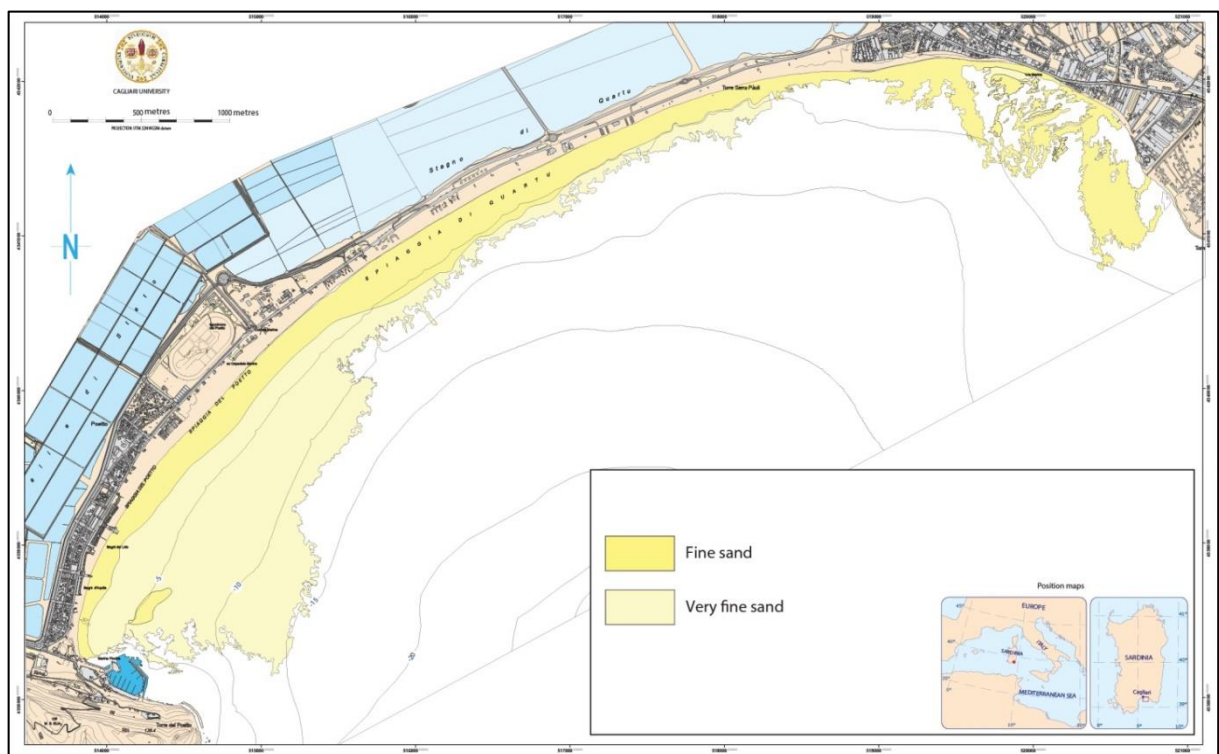


Figura 28. Distribuzione delle sabbie fini e molto fini (Udden e Wentworth, 1922) nella spiaggia sottomarina.

Le caratteristiche dei sedimenti di spiaggia emersa e battigia (Figura 29), sono influenzate dal ripascimento che ha riguardato la parte occidentale della spiaggia (Poetto di Cagliari) eseguito nel 2002.

Il moto ondoso e le correnti hanno ridistribuito il materiale del ripascimento lungo la spiaggia emersa, oltre che a mescolarlo col sedimento originale.

La granulometria dei sedimenti è rappresentata da sabbie medie e grosse con una discreta componente ghiaiosa. Il quarzo, proveniente dagli apporti fluviali del *Graben* del Campidano, rappresenta il 50-60% del sedimento. La componente bioclastica rappresenta, nei campioni prelevati sulla battigia, tra il 15% e il 40% del totale, nei campioni di spiaggia emersa tra il 20% e il 47%. I bioclasti sono in prevalenza gusci di molluschi (lamellibranchi e gasteropodi). Si ritrovano inoltre radioli e frammenti di gusci di echinidi, briozoi, foraminiferi e rare spicole di spugne silicee. Inoltre è stata riscontrata un'alta percentuale di frammenti di bioclasti non attuali dal colore grigio scuro. La quantità di bioclasti tende a diminuire verso Quartu.

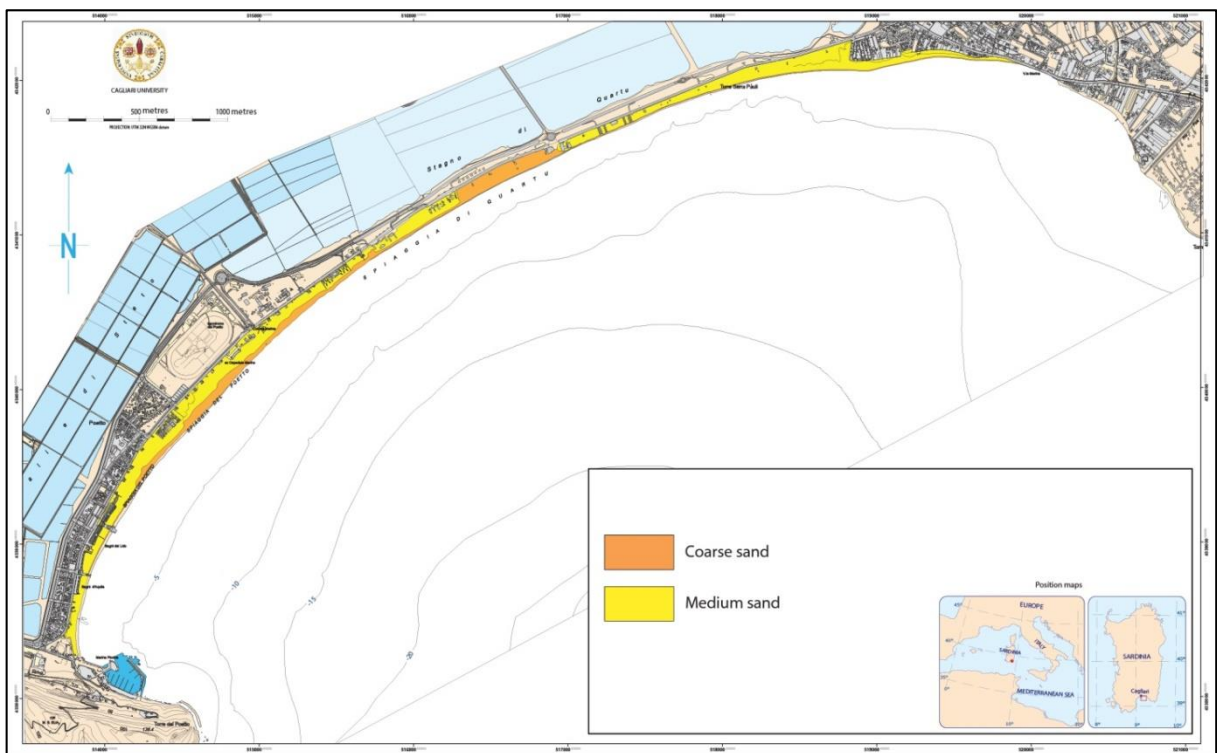


Figura 29. Distribuzione delle medie e grosse (Udden e Wentworth, 1922) in battigia e spiaggia emersa.

# STUDIO MORFODINAMICO

## 4.0 Introduzione

Le morfologie degli ambienti di spiaggia, come già accennato in precedenza, dipendono dal trasporto di sedimenti causato principalmente dagli eventi d'onda.

In ambienti costieri la capacità di trasporto dei sedimenti non è illimitato, il volume di sedimenti trasportati è fortemente influenzato dalle relazioni tra processi idrodinamici, batimetria, geometria della costa e input sedimentario. Il trasporto avviene all'interno di celle litoranee situate in una determinata un'area geografica della costa e della spiaggia sottomarina; lungo riva (longshore transport) è generalmente limitato da promontori o da roccia affiorante, mentre il trasporto perpendicolarmente alla riva (cross shore) è delimitato verso largo dall'azione delle correnti di fondo e/o dalla presenza della prateria di *Posidonia oceanica*.

Attraverso questo studio si vogliono inquadrare gli assetti morfologici relativi a diverse condizioni meteomarine e come gli ambienti di spiaggia emersa e sommersa del Poetto sono collegati attraverso processi di erosione, trasporto e deposizione dei sedimenti.

## 4.0.1 La spiaggia

Esistono diversi modi per descrivere la spiaggia e le parti di cui è composta. Seguendo un approccio geomorfologico, l'ambiente di spiaggia viene suddiviso in quattro zone (zone) che contengono a loro volta sottozone con elementi morfologici e sedimentologici con caratteristiche peculiari (Figura 30):

- Spiaggia sommersa (shoreface).
- Spiaggia intertidale (foreshore).
- Spiaggia emersa (backshore-emerged beach).
- Retrospiaggia (backshore-upland).

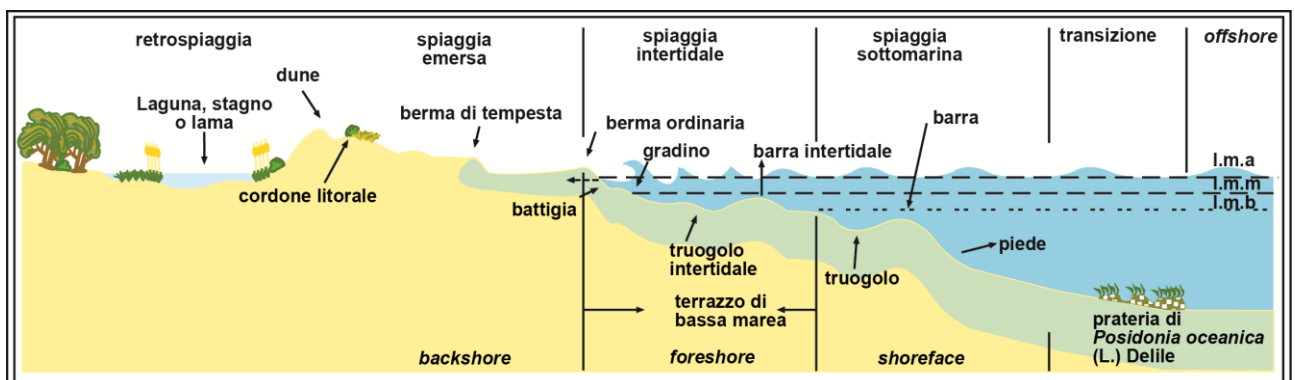


Figura 30. Profilo trasversale ideale di spiaggia. Nelle spiagge Mediterranee la fascia intertidale è ristretta per la bassa escursione di marea (da De Muro & De Falco, 2010).

La **spiaggia sommersa (shoreface)** è la parte superiore della piattaforma continentale influenzata da processi d'onda contemporanei, si estende dal limite terrestre di azione delle onde (run-up) sino al limite di profondità verso mare dove il trasporto di sedimenti è guidato dal moto ondoso (Cowell et al., 1999). La spiaggia sommersa può essere divisa in una sezione superiore (upper shoreface) e in una inferiore (lower shoreface). Il limite di separazione tra upper e lower shoreface è stato individuato con la stima della profondità di chiusura (Hallermeier, 1982). L'upper shoreface è la regione soggetta a continui e importanti cambiamenti morfologici. Lo shoreface inferiore, è soggetto a processi di trasporto dei sedimenti con condizioni d'onda tipiche, ma significativi cambiamenti morfologici si verificano solo durante gli eventi di tempesta estremi. La spiaggia sommersa superiore e inferiore sono quindi diverse regioni morfodinamiche.

La porzione della spiaggia sommersa dominata dalla frangenza delle onde è chiamata **surf zone**. La rottura delle onde è il risultato dell'interazione di queste col fondo, al diminuire della profondità, l'onda tende ad aumentare la sua altezza rispetto alla propria lunghezza e a diventare più ripida sino al limite oltre il quale avviene il frangimento.

Questo fenomeno trasferisce molta energia sul fondale e causa trasporto solido in una gamma di frequenze e direzioni diverse.

La morfologia della surf zone può essere planare, ma di solito come nel caso della spiaggia del Poetto, sono presenti barre e depressioni (trugoli). Le barre, sono l'espressione dell'idrodinamica e dei gradienti del trasporto solido e sono classificate in base alla forma e alla posizione rispetto la linea di riva. Le forme più semplici sono: barre trasversali (trasverse bar), barre a semiluna (crescentic bar) e barre lungo riva (longshore bar) (Figura 31).

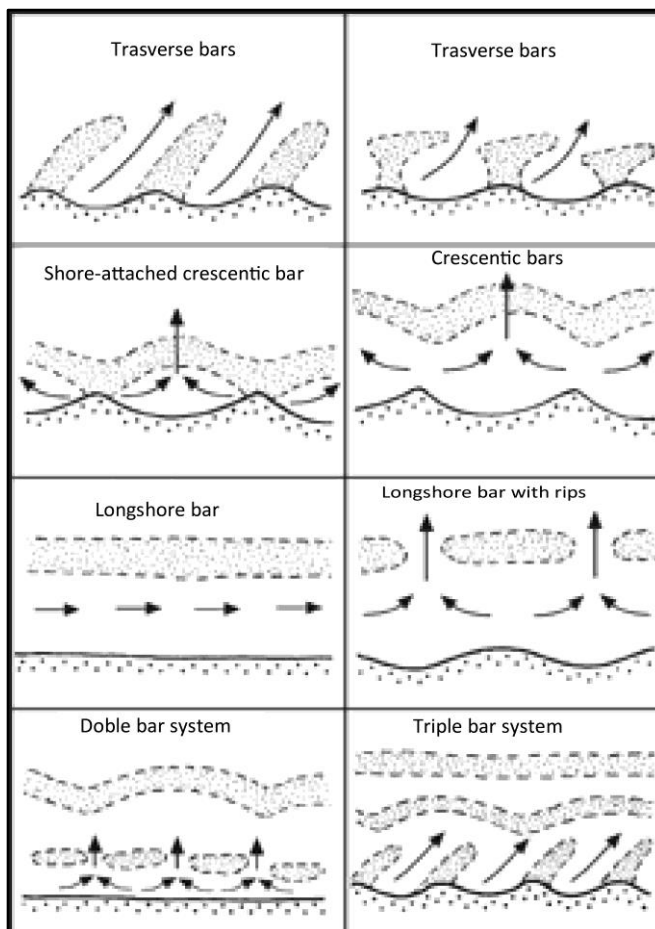


Figura 31. Esempi di diversi tipi di morfologie delle barre sottomarine (da Masselink 2011).

La **spiaggia intertidale (Foreshore)** (Figura 32) è la parte relativamente inclinata del profilo di spiaggia soggetta a processi di sciabordio. Il sedimento viene trasportato a monte e a valle della battigia (beachface) rispettivamente dal flutto montante e dalla risacca. La pendenza della battigia oltre a dipendere dalla granulometria del sedimento, riflette anche il bilancio sedimentario tra il trasporto onshore e quello offshore. La prevalenza del primo determina una battigia più pendente con una berma pronunciata, mentre il secondo determina una diminuzione della pendenza e un abbassamento della cresta della berma.



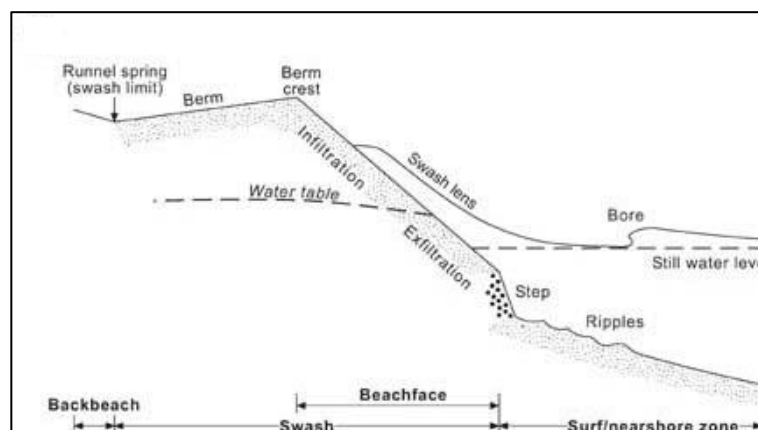


Figura 32. Schema della zona di swash con morfologie di battigia associate ai processi principali. (modificato da Hughes e Turner, 1999)

La **berma** (Figura 32) è la parte più interna della battigia, è un deposito accrezionale che deriva dall'accumulo di sedimenti depositati delle onde. La cresta della berma è più accentuata sulle spiagge costituite da sedimento grossolano, in cui la battigia è tipicamente più ripida. Inoltre, a maggiore altezza d'onda corrisponde una maggiore altezza della berma e una maggiore quota di run up.

La berma e la battigia sono strutture altamente dinamiche che rispondono rapidamente alle mutevoli condizioni del moto ondoso. Queste strutture accrescono quando si verificano condizioni con onde a bassa energia, insieme alla formazione di un profilo di spiaggia generalmente convesso, mentre in condizioni di tempesta i processi erosivi riducono la pendenza della battigia e spianano la berma, sviluppando un profilo di spiaggia concavo.

La **spiaggia emersa (backshore)** è quella porzione della spiaggia che si estende dalla battigia sino ai limiti verso terra costituiti ad esempio da dune vegetate, o nel caso del Poetto dalla strada litoranea e da vari manufatti come gli stabilimenti balneari.

Lungo la spiaggia emersa sono presenti molte altre strutture sedimentarie e morfologie legate all'azione del mare e del vento, come ad esempio cuspidi, ondulazioni (ripple marks, dune), canali etc. Queste strutture sono spesso formate da sedimenti con diverse caratteristiche mineralogiche e granulometriche e da accumuli di materiale organico (legni, canne, piante marine alghe). Sono strutture effimere che rispondono alle sollecitazioni del moto ondoso e del vento provenienti dalle diverse direzioni e conseguentemente altamente variabili nel corso delle ore, dei giorni, delle settimane, dei mesi e degli anni (De Muro *et al.*).

## 4.0.2 I processi che causano trasporto solido litoraneo

Capire l'effetto morfologica delle strutture costiere richiede una conoscenza di base dei più importanti processi idrodinamici all'interno e all'esterno della zona di surf.

Questo capitolo fornisce una breve descrizione della spiaggia e una revisione dei processi più importanti per il trasporto dei sedimenti costieri.

### Correnti costiere

Le onde incidenti dissipano progressivamente la loro energia durante il processo di frangenza. Una quota significativa di questa energia genera correnti costiere (correnti nearshore) e trasporto di sedimenti, formando morfologie distinte di spiaggia sottomarina.

Le correnti nearshore dipendono dalle differenze dei gradienti energetici che si creano nella colonna d'acqua a causa delle variazioni nelle modalità di frangenza delle onde (Kleinhans e Grasmeyer, 2006).

Esistono tre tipi di correnti indotte dal moto ondoso che dominano il movimento della massa d'acqua vicino la costa (Figura 33): le correnti longshore, i flussi di ritorno dal fondo e correnti di risucchio (rip current). Tutti i tipi di corrente sono "quasi-stazionarie", il che significa che scorrono con una velocità relativamente costante per un dato insieme di condizioni d'onda.

Correnti longshore scorrono parallelamente alla riva, mentre le correnti di ritorno di fondo e le correnti di rip scorrono più o meno perpendicolarmente alla linea di riva.

Correnti Longshore sono flussi che scorrono paralleli alla linea di riva all'interno della zona di surf (Figura 33a) e sono guidati principalmente da onde le cui creste sono allineate obliquamente verso la costa. Nelle spiagge con barre, la corrente longshore è limitata principalmente al trugolo tra la barra e la costa o nei trugoli tra più barre. La forza della corrente di longshore aumenta con il livello energetico dell'onda incidente e con l'angolo di incidenza dell'onda.

Il flusso di ritorno di fondo, o risacca, è un flusso diretto in mare aperto che scorre sul fondo. La risacca è parte di un modello di circolazione verticale, caratterizzata dal flusso on-shore nella parte superiore della colonna d'acqua e dal flusso off-shore che avviene in prossimità del fondo (Figura 33b). Il flusso di ritorno è alimentato dalla massa d'acqua portata a riva dai frangenti.

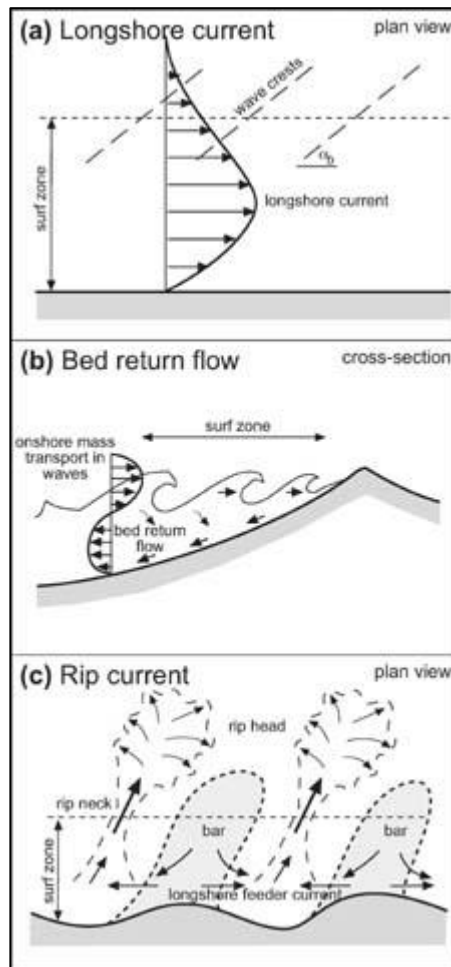


Figura 33. Correnti quasi-stazionarie nella zona del surf: (a) correnti longshore parallele alla linea di costa derivate dall'incidenza obliqua del moto ondoso, (b) visuale verticale del flusso di ritorno sul fondo (risacca), visuale planimetrica delle rip current come parte della cellula vicino alla costa sistema di circolazione.

Le rip currents sono delle correnti che scorrono velocemente verso mare, all'interno di canali che interrompono le barre e attraversano la zona di surf trasportando massa d'acqua e sedimento (Figura 33c). Le rip currents sono parte integrante delle celle di circolazione litoranea, vengono alimentate dal movimento onshore della massa d'acqua e dalle correnti longshore contenute nella zona di surf.

Sono costituite da un collo a scorrimento che si estende dalla confluenza di due correnti opposte di alimentazione e da una "testa", regione dove la rip diminuisce la velocità ed espande il flusso verso il mare. La dissipazione dell'energia delle onde è inferiore sui canali di rip e maggiore sulle barre, questo provoca un gradiente di pressione longshore tra barre e rips che alimenta le correnti e quindi anche la circolazione delle celle litoranee.

## **4.1 Attività preliminari**

Gli studi precedenti hanno fornito il database necessario per realizzare lo studio della morfodinamica della spiaggia del Poetto. Inoltre, sono state studiate le variazioni morfologiche osservate su 6 rilievi di spiaggia emersa e sommersa effettuate durante i primi due anni di lavoro.

### **4.1.1 Acquisizione dei dati topografici e batimetrici**

I dati topografici e batimetrici, sono stati acquisiti per inquadrare gli assetti stagionali della spiaggia e per definire le modalità di auto organizzazione del sistema in risposta all'energia indotta dagli eventi climatici. Le attività di rilevamento hanno avuto inizio nell'Ottobre del 2012 e si sono ripetute ogni 3 mesi sino a Dicembre del 2013. I rilievi sono stati svolti su 21 transetti trasversali alla linea di riva (Figura 34) distanti 350 m circa l'uno da l'altro. La misurazione delle quote e delle morfologie dei profili di spiaggia è stata svolta a partire dai limiti antropici che circoscrivono l'arenile (stada, stabilimenti balneari, etc.) sino al limite superiore della prateria di Posidonia a profondità variabile tra i -13 m e i -7 m. La topografia della spiaggia emersa è stata rilevata con un sistema DGPS StarFire 3040 della NavCom, con frequenza di 1Hz. La batimetria della spiaggia sottomarina, è stata rilevata con un sistema ecoscandaglio/DGPS, interfacciando il single beam Reson Navisound 215 e l'Omnistar 8300HP attraverso il software di navigazione Reson PDS2000.

I dati topo-batimetrici sono stati poi processati con il software Reson PDS2000 (modulo post processing) per eliminare eventuali errori strumentali (spike) e per calibrare le misure con i livelli di marea registrati dalla stazione della R.M.N. durante le attività di rilevamento.

I dati di posizione sono stati acquisiti nel sistema di riferimento UTM fuso 32, Datum WGS84. In totale sono state eseguite 6 campagne di rilevamento topografico/batimetrico (Ottobre 2012, Dicembre 2012, Marzo 2013, Luglio 2013, Ottobre 2013, Dicembre 2013), durante le quali sono stati rilevati 132 profili cross shore, informazioni batimetriche per 100 miglia di navigazione e informazioni topografiche per circa 80 km.

Sulla base delle registrazioni ecografiche di nuova acquisizione e dei dati bibliografici (vedi capito 3), è stata elaborata una carta batimetrica dettagliata della spiaggia del Poetto.

La carta batimetrica è stata utilizzata come base per la ricostruzione delle rotte realizzata tramite l'unione dei *fix* registrati in fase di navigazione e i punti di campionamento dei quali si conoscono le coordinate XYZ.

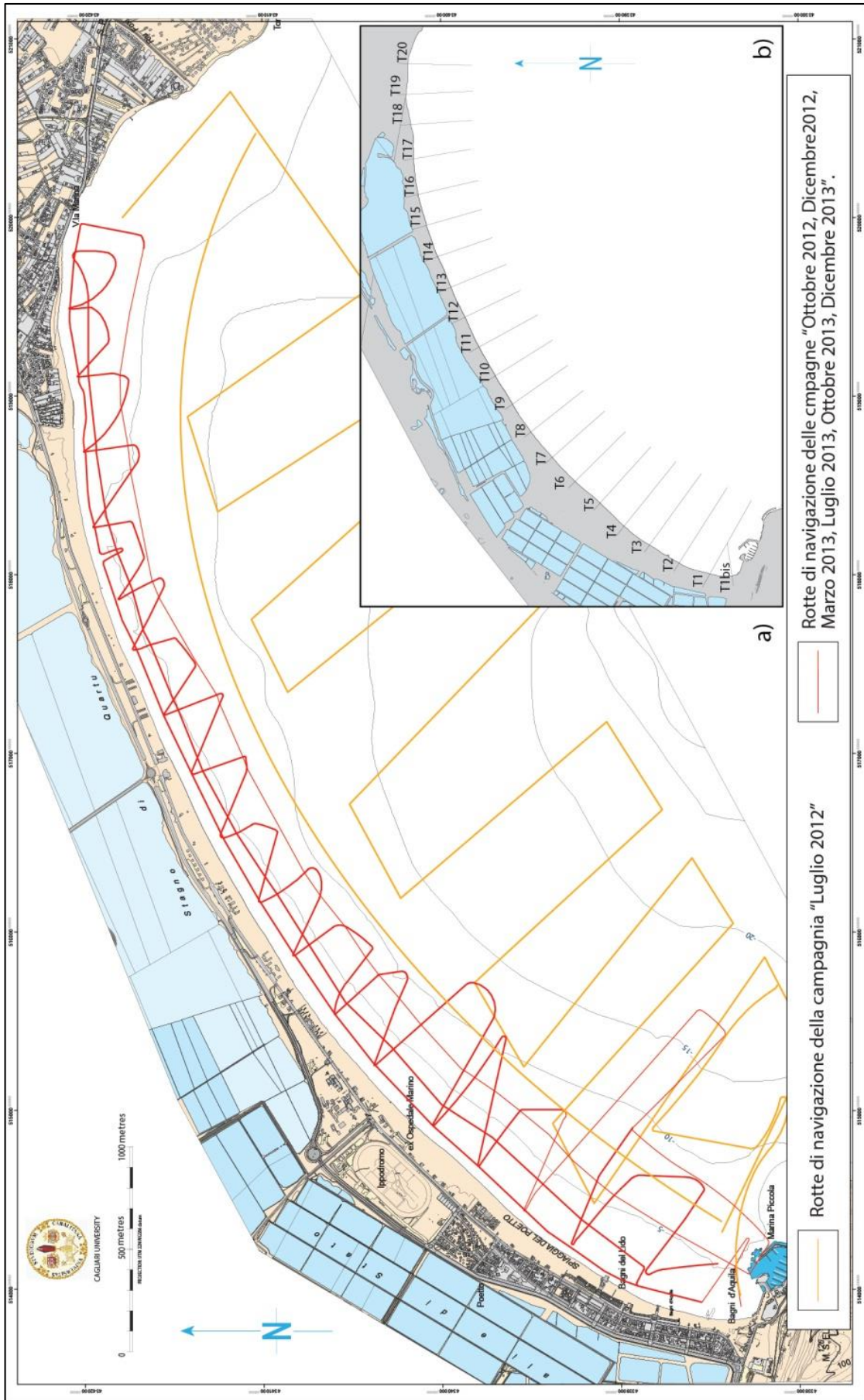


Figura 34. Mappa delle rotte di navigazione delle campagne (a) e transetti predisposti per i rilevamenti dei profili di spiaggia (b).



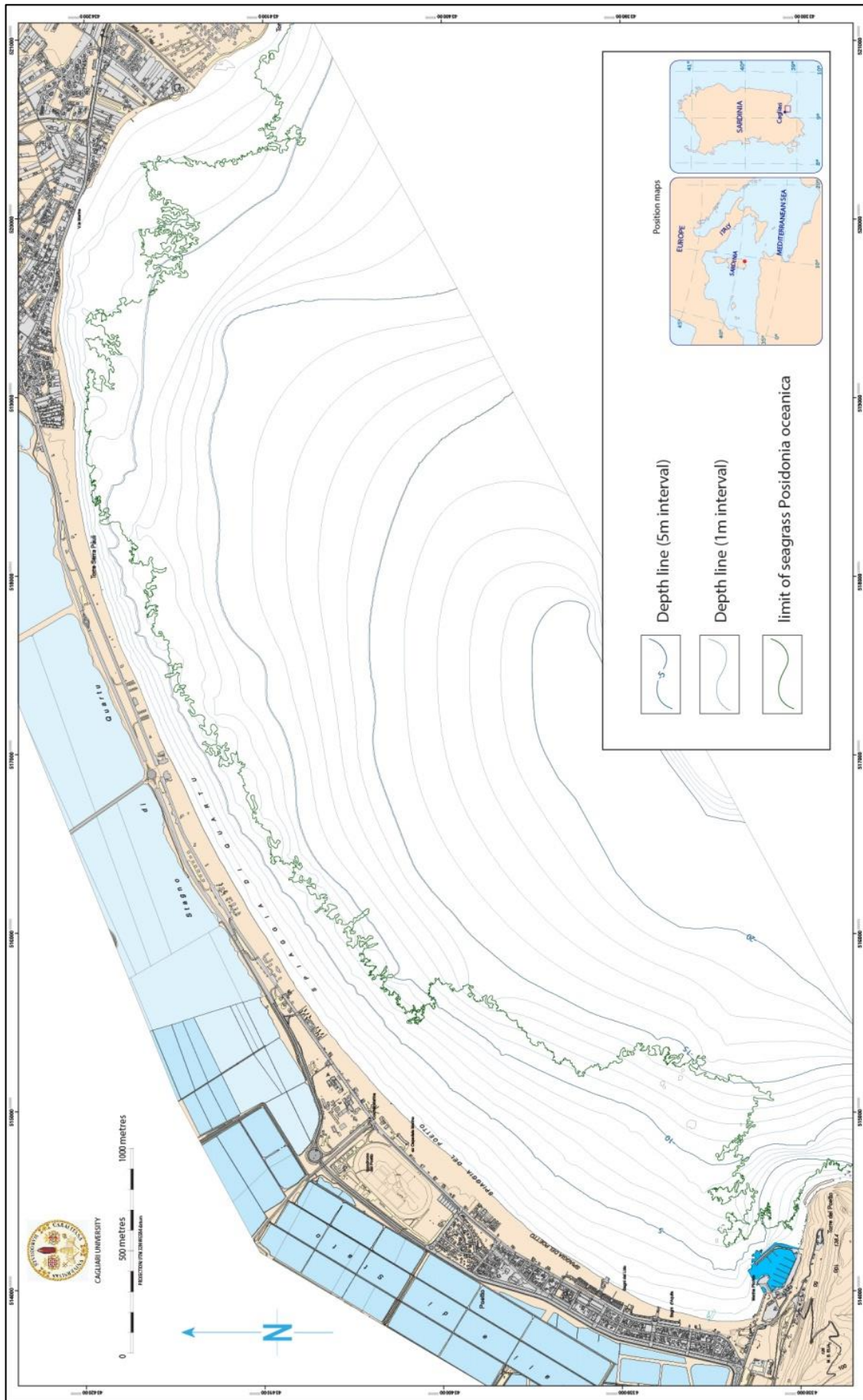


Figura 35. Schema batimetrico del Golfo di Cagliari con isobate equidistanti 5 metri.

## 4.2 Analisi morfometriche dei profili di spiaggia

I profili acustici single beam sono stati elaborati in post processing col software PDS2000, per la pulizia del segnale dai rumori dovuti a interferenze strumentali, e per calibrare le quote batimetriche con la variazione del livello di marea. Successivamente, è stato possibile discriminare le tipologie di fondale (sedimento, roccia e fanerogame).

Per ogni campagna di rilevamento, su ognuno dei 21 profili che coprono l'area studiata, sono stati misurati i seguenti parametri:

- Lunghezza spiaggia emersa (m)
- Volume(m<sup>3</sup>)
- Pendenza totale
- Pendenza della spiaggia sottomarina (Slope shoreface)
- Pendenza della zona dei frangenti (Slope surfzone)
- Pendenza di battigia (Slope foreshore)
- Pendenza spiaggia emersa (Slope backshore)
- Elevazione massima
- Elevazione minima

Dall'analisi di questi parametri è stato possibile caratterizzare le variazioni spaziali e le variazioni temporali delle principali morfologie presenti sui profili di spiaggia del Poetto.

Nello specifico si è cercato di misurare e quantificare le risposte del sistema spiaggia alle sollecitazioni ondose nei diversi mesi dell'anno per individuare le naturali fasi di avanzamento-arretramento-ridistribuzione sedimentaria legate ai normali cicli stagionali (Dubois, 1988).

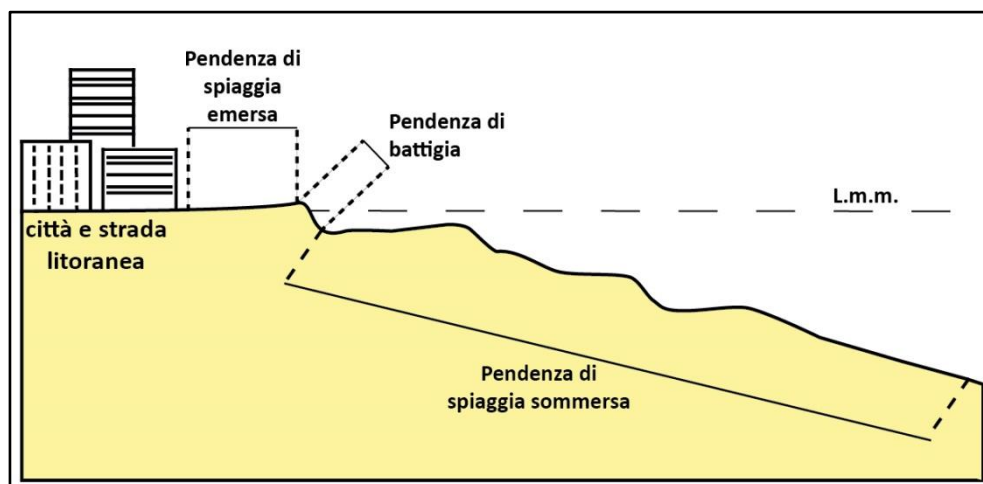


Figura 36. Sia in A che in B sono indicate le pendenze delle 3 principali forme di spiaggia calcolate su ogni profilo.

## 4.2.1 Variazioni spaziali delle morfologie

L'intero tratto di studio è stato suddiviso in 9 zone (Figura 4) per facilitare le descrizioni dei profili di spiaggia. Il riconoscimento di variazioni morfologiche spaziali è il criterio di base secondo il quale è stata suddivisa l'area di studio nelle diverse zone.

**Tabella 9. Valori medi delle 3 pendenze principali espresse in gradi riconosciute su ogni profilo di ogni zona, relativamente alle 6 campagne di rilevamento effettuate.**

ZONE	Elemento Morfologico	Ottobre 2012	Dicembre 2012	Marzo 2013	Luglio 2013	Ottobre 2013	Dicembre 2013	Valori Medi
ZONA 1 (T1bis; T1)	Spiaggia Emersa	1.7	0.9	1.8	1	1.3	1.6	1.4
	Battigia	5.7	4.3	6	7.3	6.3	5.8	5.9
	Spiaggia Sommersa	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9
ZONA 2 (T2; T3; T4)	Spiaggia Emersa	0.3	0.3	0.5	0.4	0.2	0.2	0.3
	Battigia	4.3	6.4	4.3	7	4.4	4.9	5.2
	Spiaggia Sommersa	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
ZONA 3 (T5; T6)	Spiaggia Emersa	-0.2	0.2	-0.5	-0.4	0	-0.5	-0.2
	Battigia	8.5	8	6.4	7.5	6	6.8	7.2
	Spiaggia Sommersa	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZONA 4 (T7; T8; T9)	Spiaggia Emersa	0.5	-0.03	1.5	0.2	1.1	0.3	0.6
	Battigia	7.7	7.5	5.2	7	4	6.1	6.3
	Spiaggia Sommersa	1.1	1.1	1	1	1.1	1.1	1.1
ZONA 5 (T10; T11; T12)	Spiaggia Emersa	0.7	0.3	-0.2	0.3	0.8	0.5	0.4
	Battigia	7.7	7.3	6.3	6.9	5.4	6.4	6.7
	Spiaggia Sommersa	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
ZONA 6 (T13; T14; T15)	Spiaggia Emersa	1.3	0.7	1.4	1.1	1.2	1.3	1.2
	Battigia	7	6.3	7.1	7	5.4	6.3	6.5
	Spiaggia Sommersa	1.5	1.4	1.4	1.5	1.4	1.4	1.4
ZONA 7 (T16; T17)	Spiaggia Emersa	0.3	0.1	0.2	0	0.1	0.3	0.2
	Battigia	4.7	5	6.1	6.7	3.2	5.2	5
	Spiaggia Sommersa	1.7	1.7	1.5	1.8	1.6	1.6	1.6
ZONA 8 (T18)	Spiaggia Emersa	2.68	0.8	1.55	1.84	1.96	1.62	1.7
	Battigia	7.2	5.4	7.4	6.5	3.4	6.2	6
	Spiaggia Sommersa	1.4	1.4	1.2	1.5	1.5	1.3	1.4
ZONA 9 (T19; T20)	Spiaggia Emersa	2.4	1.9	2.3	2.4	2.26	1.92	2.2
	Battigia	6.7	6.3	4.7	6.6	4.9	6.85	6
	Spiaggia Sommersa	1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.15	1.1

Dai 6 rilievi topografici eseguiti, sono stati estratti dei valori medi della pendenza della spiaggia emersa, della battigia e della spiaggia sommersa (ossia delle tre principali rotture di pendenza presenti su un profilo di spiaggia), per ognuna delle 9 zone individuate (Tabella 9).



Va sottolineato che la pendenza della spiaggia emersa è fortemente influenzata dalle attività antropiche, che distruggono regolarmente le configurazioni morfologiche generate dai processi naturali. Infatti è pratica comune l'utilizzo di ruspe per la pulizia dell'arenile e per spianare la spiaggia durante il periodo primaverile/estivo; durante l'inverno è frequente il passaggio di mezzi pesanti usati per la manutenzione di strade, stabilimenti, ristoranti e chioschi. La spiaggia emersa, infatti, si presenta piatta, suborizzontale e in alcuni tratti ha pendenze addirittura negative tra berma ordinaria e inizio spiaggia.

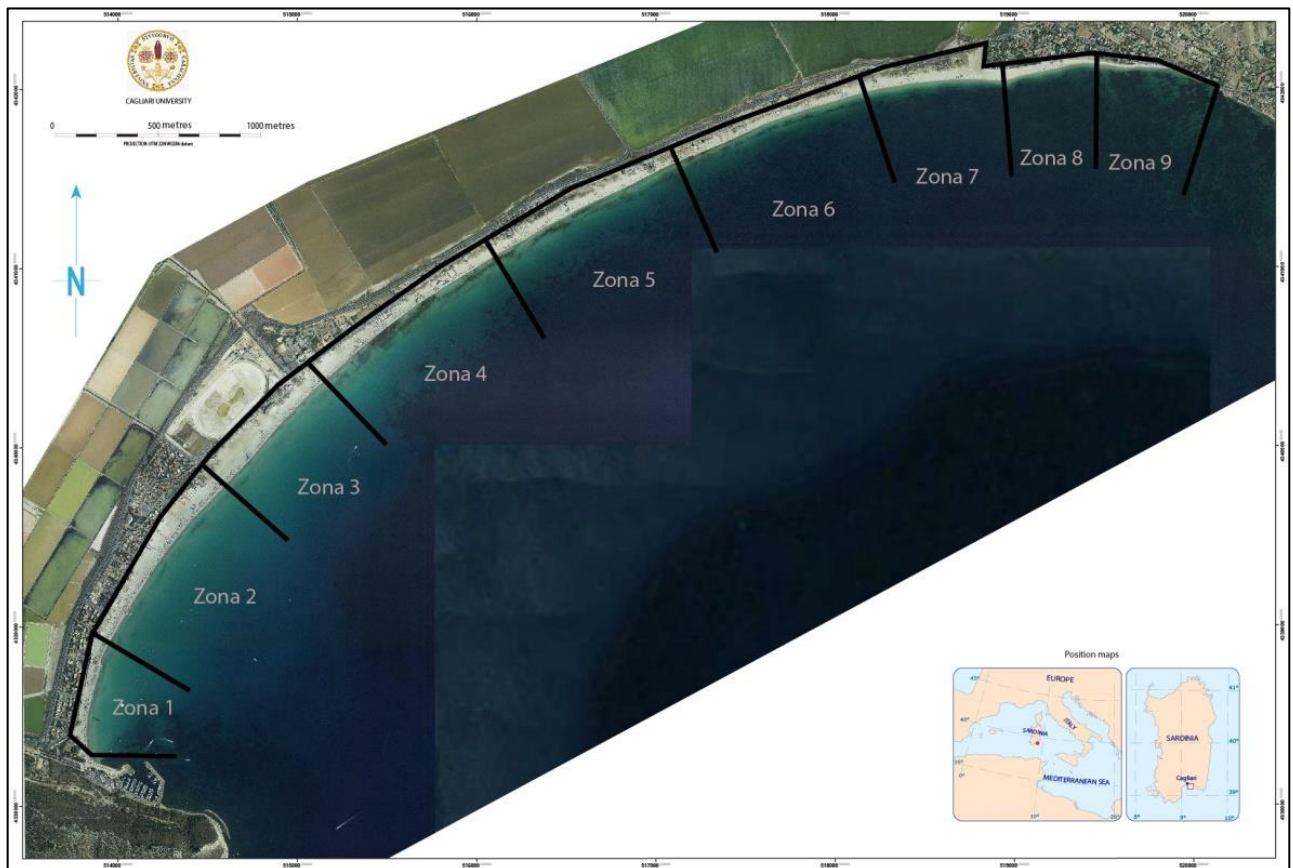


Figura 37. Posizione delle zone con caratteristiche omogenee.

Dalla Tabella 9 si nota come i valori massimi di ripidità della spiaggia emersa si osservano nella zona 1, nella zona 8 e nella zona 9 in ogni campagna di rilevamento ( $1.8^\circ$  è il valore medio più alto misurato nella zona 1;  $2.7^\circ$  è il valore medio più elevato per la zona 8 e  $2.4^\circ$  è il valore più alto misurato nella zona 9).

La pendenza della spiaggia emersa mantiene valori intermedi (media di  $1.2^\circ$ ) nella zona 6, per poi raggiungere valori più bassi (massimi: 0.6; minimi: -0.2) nelle zone 2, 3, 4, 5 e 7.

I massimi valori di pendenza misurati nelle zone 1, 8 e 9 sono dovuti alla presenza di manufatti sulla spiaggia, relativamente vicini alla linea di riva. Questi manufatti non sono

stabilimenti balneari, ma recinzioni di rimessaggi e strutture in disuso che favoriscono il deposito di sabbia che accumulandosi aumenta la pendenza media dei tratti di spiaggia in oggetto.

La battigia presenta le pendenze minori (valori medi tra  $5.2^\circ$  e  $6^\circ$ ) nelle zone più “protette” dal moto ondoso ovvero le zone più esterne (zone 1,2, 8 e 9), tuttavia anche la zona 7 presenta una bassa pendenza (media  $5^\circ$ ) della battigia rispetto alle zone limitrofe (media  $6.5^\circ$  e  $6^\circ$ ). Il motivo potrebbe essere legato alla presenza di una beachrock affiorante a circa -1.5 profondità e si estende parallelamente alla riva lungo tutta la zona 7. Questo affioramento crea un effetto reef che evidentemente smorza notevolmente l'energia dell'onda incidente.

con valori medi di pendenza che si aggirano tra i  $5.2^\circ$  e i  $6^\circ$ . Le pendenze maggiori della battigia si riscontrano nelle zone centrali della spiaggia (zone 3,4, 5 e 6) con valori medi compresi tra i  $7.2^\circ$  e i  $6.5^\circ$ .

La spiaggia sommersa è caratterizzata da pendenze medie comprese tra  $0.9^\circ$  e  $0.7^\circ$  nelle zone 1, 2 e 3. Dalla zona 4 alla zona 7 si riscontra un aumento progressivo delle pendenze medie da  $1.1^\circ$  a  $1.7^\circ$ , mentre nella zona 8 e 9 si hanno valori medi rispettivamente di  $1.4^\circ$  e  $1.1^\circ$ .

## I profili di spiaggia

Per avere una visione complessiva delle variazioni dei profili di spiaggia nel corso dei mesi di misure, di seguito vengono descritti e rappresentati i profili rilevati sui 21 transetti prestabiliti. In ogni profilo mostrato, le linee colorate rappresentano la topografia misurata nelle 6 diverse campagne di rilevamento realizzate. Il profilo di colore verde è relativo a Ottobre 2012, ossia alla prima campagna di rilevamento; rappresenta quindi la situazione iniziale da cui è possibile vedere l'evoluzione delle morfologie fino a Dicembre 2013 (linea arancione).

La **zona 1** è posizionata nella parte più occidentale dell'area di studio (Figura 38b), è situata infatti a ridosso del porticciolo di Marina Piccola dal quale si estende per circa 650 m. In questa zona ricadono i profili T1bis e T1. Nella parte meno ridossata al porticciolo è stata riscontrata un'ampiezza media della spiaggia emersa di 52.6 metri con oscillazioni stagionali anche di 10 metri. La pendenza della spiaggia emersa oscilla tra i  $0.9^\circ$  e  $1.7^\circ$ . La battigia invece oscilla tra i  $4.3^\circ$  e  $7.3^\circ$ . La zona di shoreface non è soggetta a grosse variazioni di pendenza che mediamente rimane sui  $0.9^\circ$ .

La zona a barre e a truogoli è ampia circa 160 metri, è caratterizzata da un sistema formato da due piccole barre situate tra -1m e -0.50m e da una barra più ampia che si sviluppa a circa -2 m di profondità. La porzione di spiaggia più ridossata al porticciolo di Marina Piccola è caratterizzata da una barra singola. Il fronte della prateria principale di Posidonia dista circa 1250 metri dalla linea di riva.

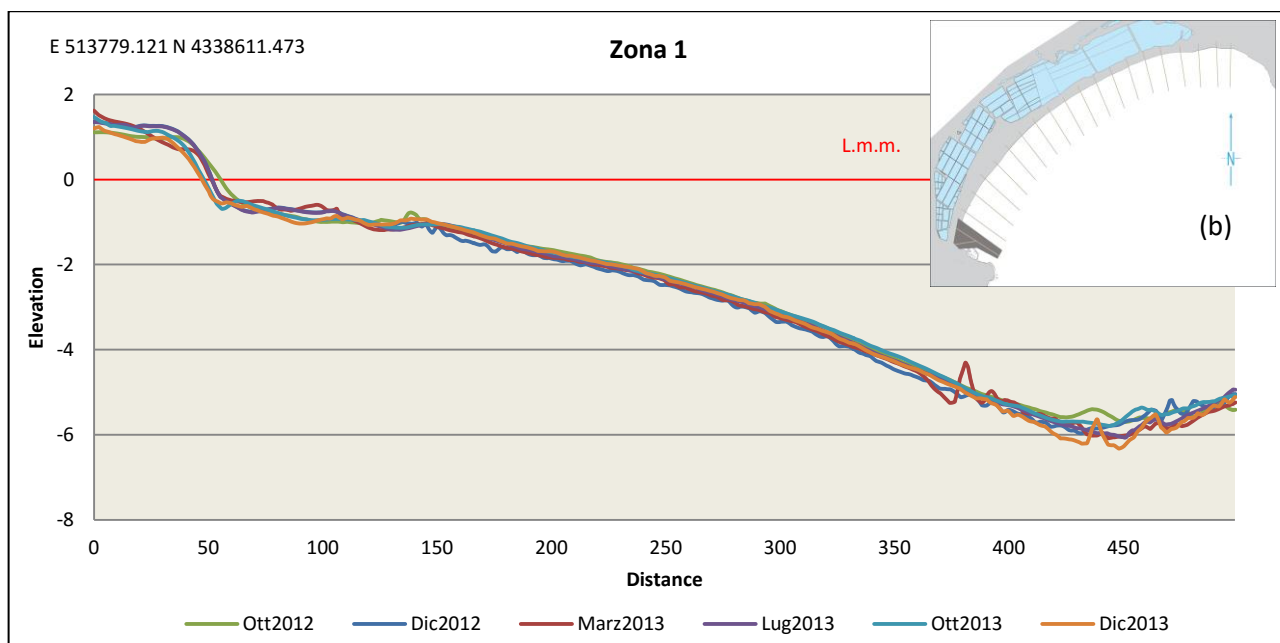


Figura 38. Profili stagionali rappresentativi per la zona 1. In ordinata e in ascissa sono indicate rispettivamente l'altezza sul livello del medio mare e la distanza in metri.

Nella **zona 2** ricadono i transetti T2, T3 e T4 e ricoprono una distanza di circa 900 m (Figura 39b). La spiaggia emersa è ampia mediamente 108.5 metri e sono state osservate oscillazioni massime di 6.2 metri della posizione della linea di riva.

La spiaggia emersa si presenta praticamente piatta e sub-orizzontale con pendenze che oscillano tra i  $0.3^\circ$  e i  $0.5^\circ$ . La battigia in questa zona ha pendenze che oscillano tra i  $4.3^\circ$  e i  $7^\circ$ . Lo shoreface mantiene mediamente pendenze di  $0.7^\circ$ , presenta una zona a barre e a truogoli ampia circa 200 metri, costituita da un sistema a doppia barra con discreta variabilità morfologica sino a profondità di -3 metri. Lungo tutto il profilo della spiaggia sommersa si registrano variazioni batimetriche sino al limite superiore della prateria a Posidonia che dista circa 1200 metri dalla riva a una profondità di 14 metri.

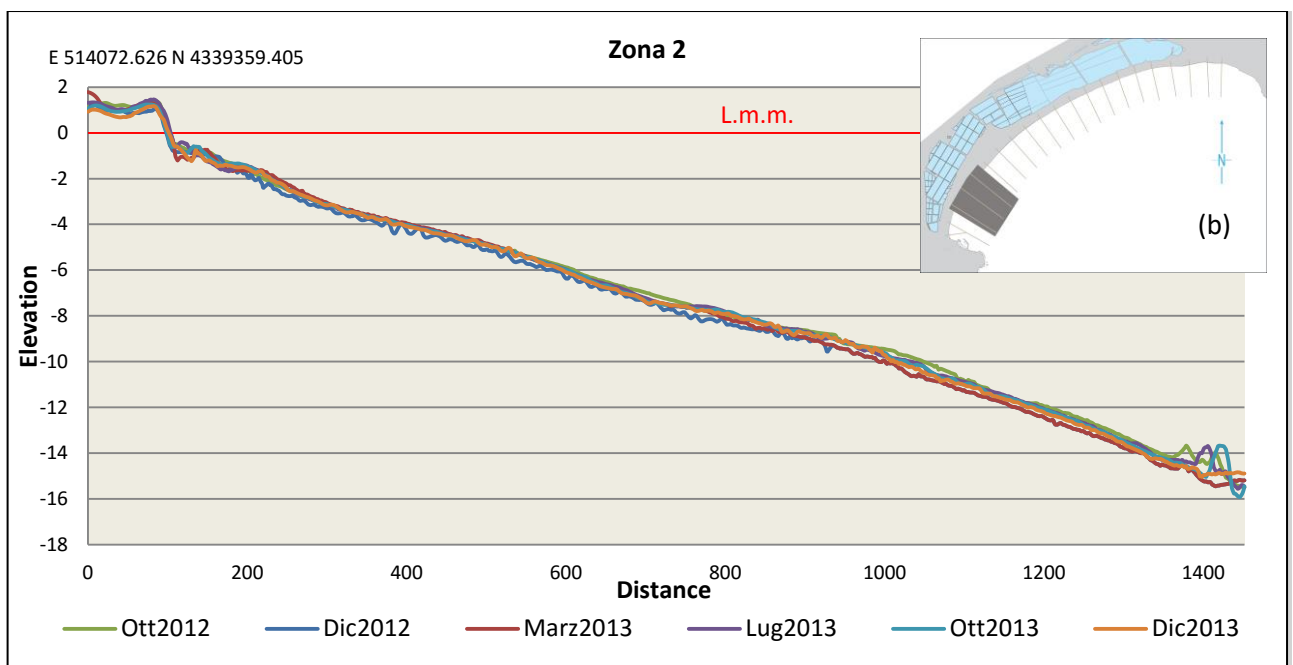


Figura 39. Profili stagionali rappresentativi per la Zona 2. In (b) è mostrata la posizione della zona 1.

La **zona 3** si sviluppa per circa 700 metri e vi ricadono i transetti T5 e T6 (Figura 40b). La spiaggia emersa è caratterizzata dalla presenza del manufatto dell'ex Ospedale Marino costruito negli anni 30. A ridosso della struttura si è depositato un importante accumulo di sabbia alto mediamente 4 metri. La spiaggia emersa è ampia circa 143 metri dalla battigia alla strada, con oscillazioni stagionali di circa 4 metri. La pendenza della spiaggia emersa è mediamente di  $0.5^\circ$ .

La battigia invece ha una pendenza che oscilla tra i  $6.0^\circ$  e i  $8.5^\circ$ . La zona di shoreface non è soggetta a grosse variazioni e mediamente ha un declivio sui  $0.9^\circ$ .

La zona a barre e a truogoli è ampia circa 240 metri, è caratterizzata da due ampie barre situate tra -1m e -2.50 metri di profondità. Il fronte della prateria principale di Posidonia dista circa 800 metri dalla linea di riva.

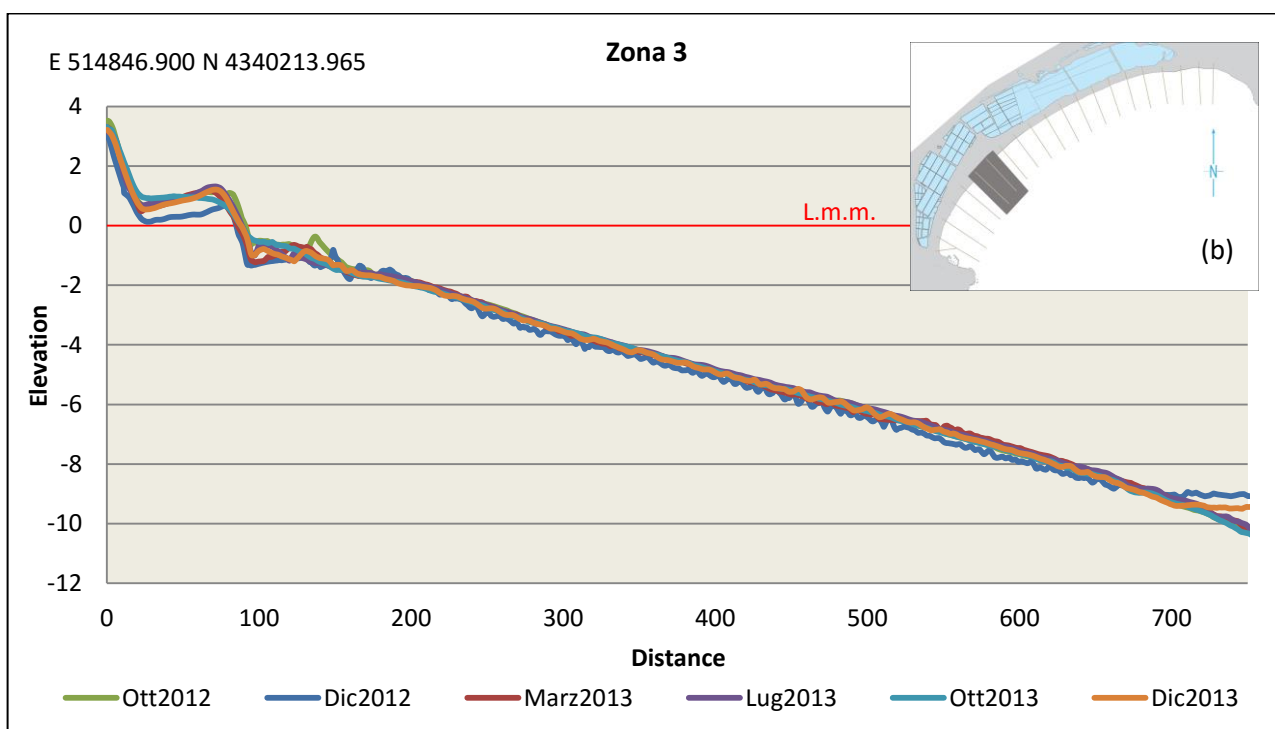


Figura 40. Profili stagionali rappresentativi per la Zona 3. In (b) è evidenziata l'area in cui ricade la zona 3.

La **zona 4** si sviluppa per circa 950 m nella zona centrale del corpo spiaggia(Figura 41b), vi ricadono i transetti T7, T8 e T9. La spiaggia emersa è ampia mediamente 103 metri, ha una pendenza media di circa  $0.6^\circ$ .

Durante i rilievi sono state registrate oscillazioni massime di 4 metri della posizione della linea di riva. La battigia ha pendenze che oscillano tra i  $4^\circ$  e i  $7.7^\circ$ . Lo shoreface mantiene mediamente pendenze di  $1.1^\circ$ , e presenta una zona a barre e a truogoli ampia circa 180 metri, costituita da un sistema a doppia barra con discreta variabilità morfologica sino a profondità metri, di -3 metri. Il limite superiore della prateria a Posidonia è situato a una profondità di -7 metri e dista circa 400 metri dalla riva.

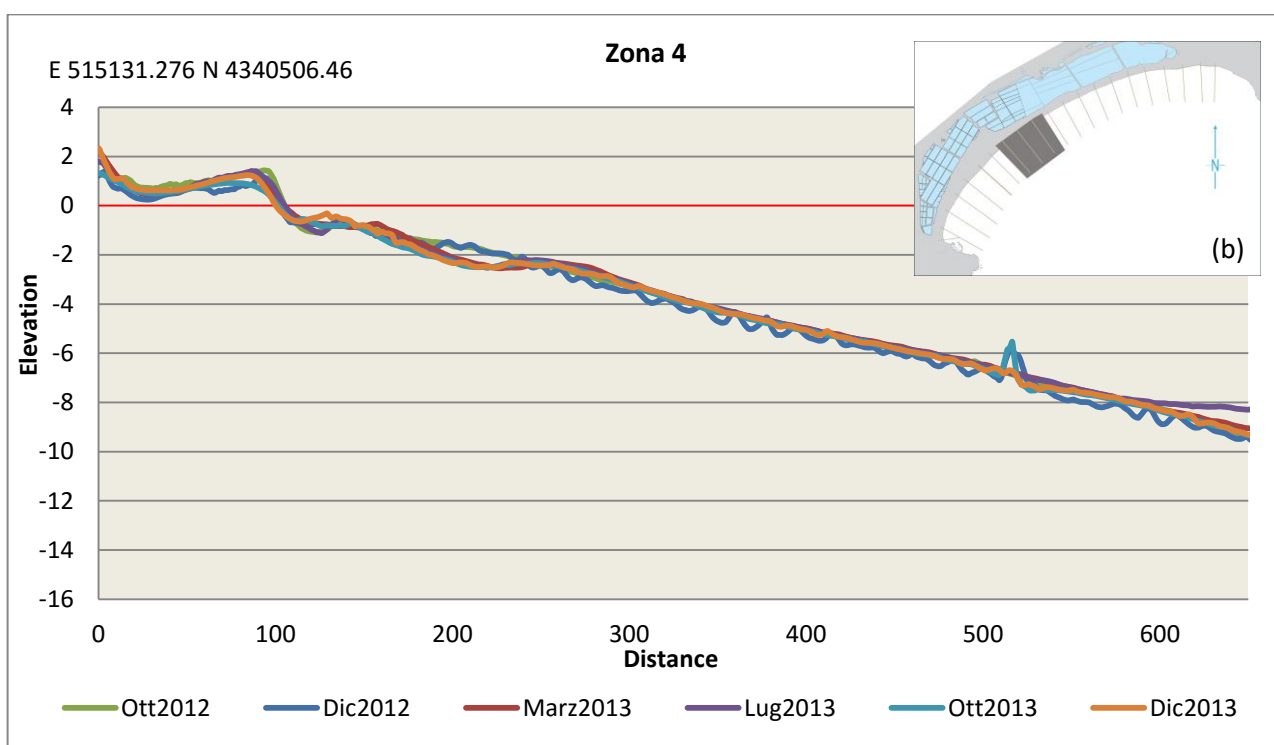


Figura 41. Profili stagionali rappresentativi per la Zona 4. In (b) è evidenziata l'area in cui ricade la zona 4.

La **zona 5** è ricoperta dai transetti T10, T11 e T12, si sviluppa per 950m nella zona centrale della spiaggia (Figura 42b). La parte emersa del profilo è ampia circa 72 metri, è caratterizzata da una pendenza media di  $0.4^\circ$ . Durante l'anno, la posizione della linea di riva varia sino ai 6 metri.

La battigia ha pendenze che variano da  $7.7^\circ$  a  $5.4^\circ$ . La spiaggia sommersa ha una pendenza di  $1.4^\circ$ , è caratterizzata dalla presenza di due barre che mostrano variabilità morfologica sino ai -4 metri di profondità. IL limite superiore della prateria a Posidonia è situato a una profondità di -7 metri a una distanza di circa 400 metri dalla linea di riva.

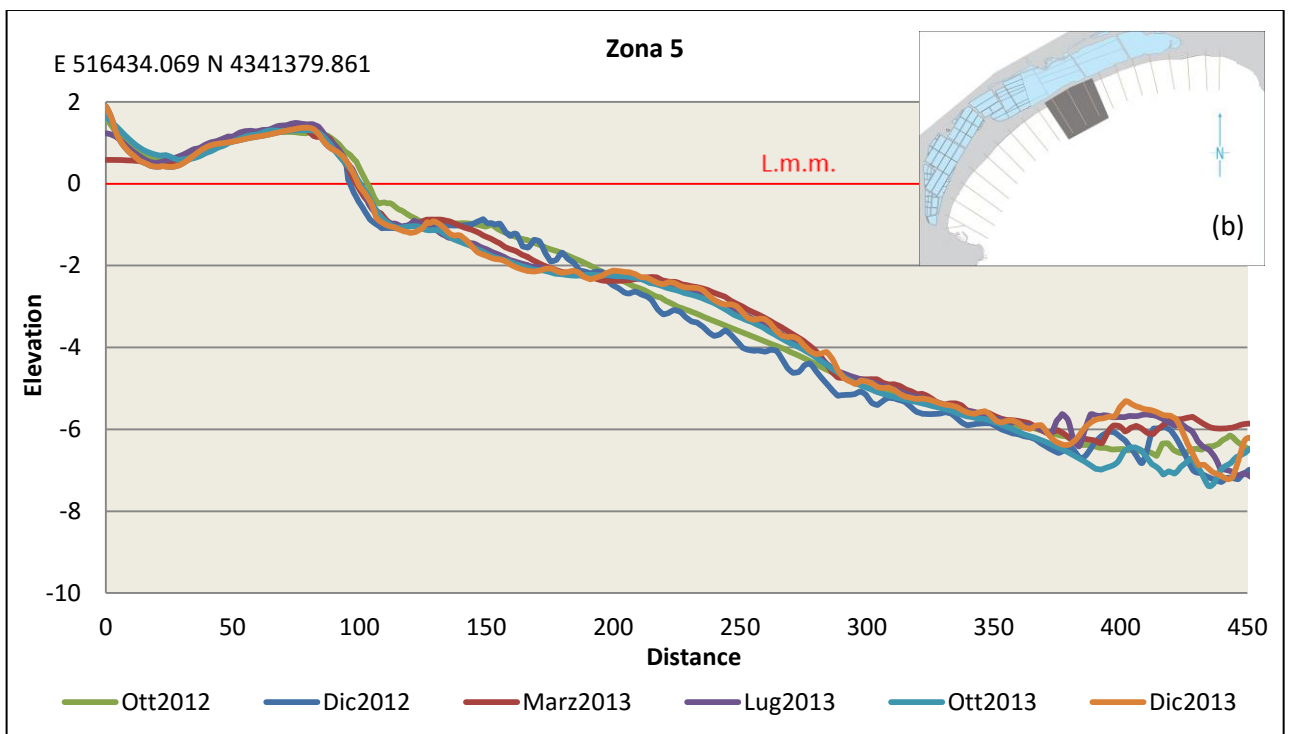


Figura 42. Profili stagionali rappresentativi per la Zona 5. In (b) è evidenziata l'area in cui ricade la zona 5.

La **zona 6** si estende per 1100 metri nella parte centro orientale del Poetto (Figura 43b).

In questa zona ricadono i transetti T13, T14 e T15.

La spiaggia emersa è ampia per circa 43 metri e ha una pendenza di  $1.2^\circ$ .

La posizione della linea di riva oscilla di circa 4 metri durante l'anno, mentre la battigia ha pendenze variabili tra i  $7.1^\circ$  e  $5.4^\circ$ . Lo shoreface ha una pendenza di  $1.4^\circ$  e la zona di barra e truogoli è contraddistinta con un sistema a 2 barre che si sviluppa nei primi 2 metri di profondità. La prateria di posidonia in questa zona ha una struttura a “macchia di leopardo” che si riscontra a 230 metri dalla linea di riva.

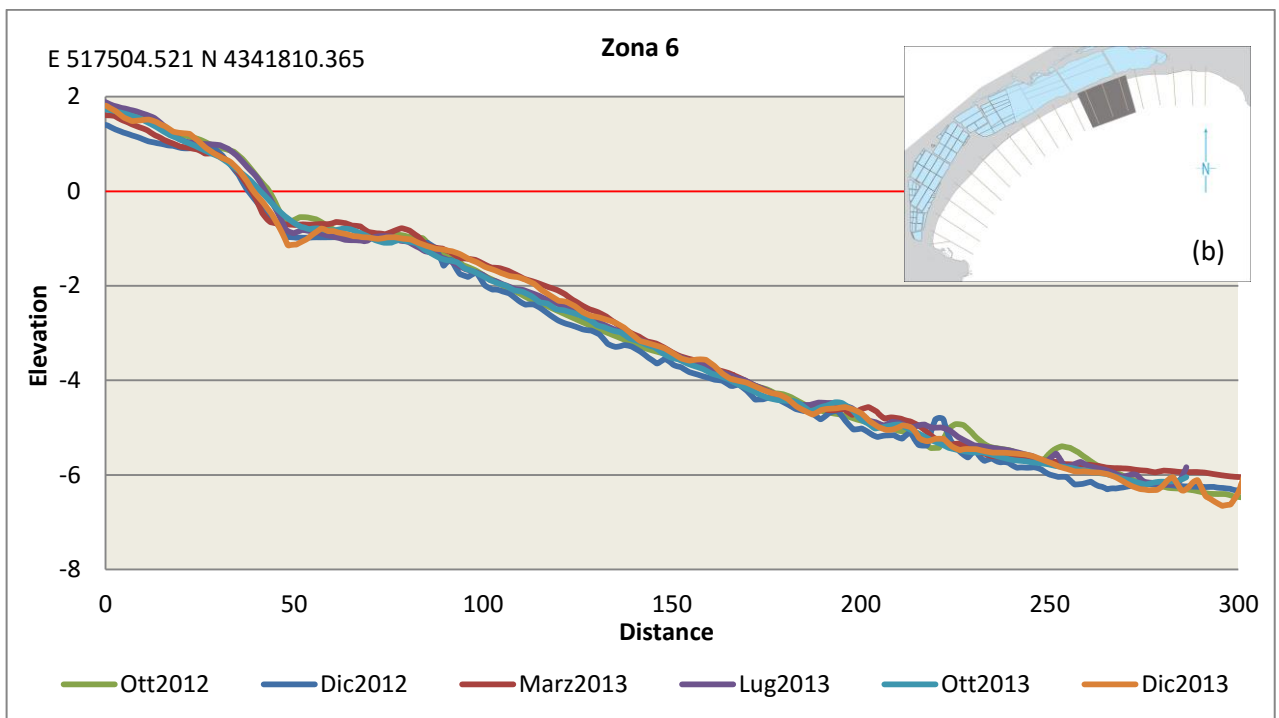


Figura 43. Profili stagionali rappresentativi per la Zona 6. In (b) è evidenziata l'area in cui ricade la zona 6.



La **zona 7** è posizionata nella parte nord orientale dell'area di studio (Figura 44b), si estende per circa 800m. In questa zona ricadono i transetti T16 e T17. è stata riscontrata un'ampiezza media della spiaggia emersa di 103 metri con oscillazioni stagionali anche di 2 metri. La pendenza della spiaggia emersa oscilla tra i  $0.2^\circ$ . La battigia invece oscilla tra i  $3.2^\circ$  e i  $6.7^\circ$ . La zona di shoreface non è soggetta a grosse variazioni di pendenza e mediamente oscilla tra  $1.8^\circ$  e  $1.6^\circ$ .

La zona a barre e a truogoli è ampia circa 70 metri, è caratterizzata da un sistema formato da una barra più ampia che si sviluppa da -1 metro a circa -3 metri di profondità.

Il fronte della prateria di Posidonia dista circa 150 metri dalla linea di riva. Tra il fronte della posidonia e la barra è stata riscontrata un'ampia zona di accumulo di rizomi e fogliame (lettiera) della Posidonia oceanica.

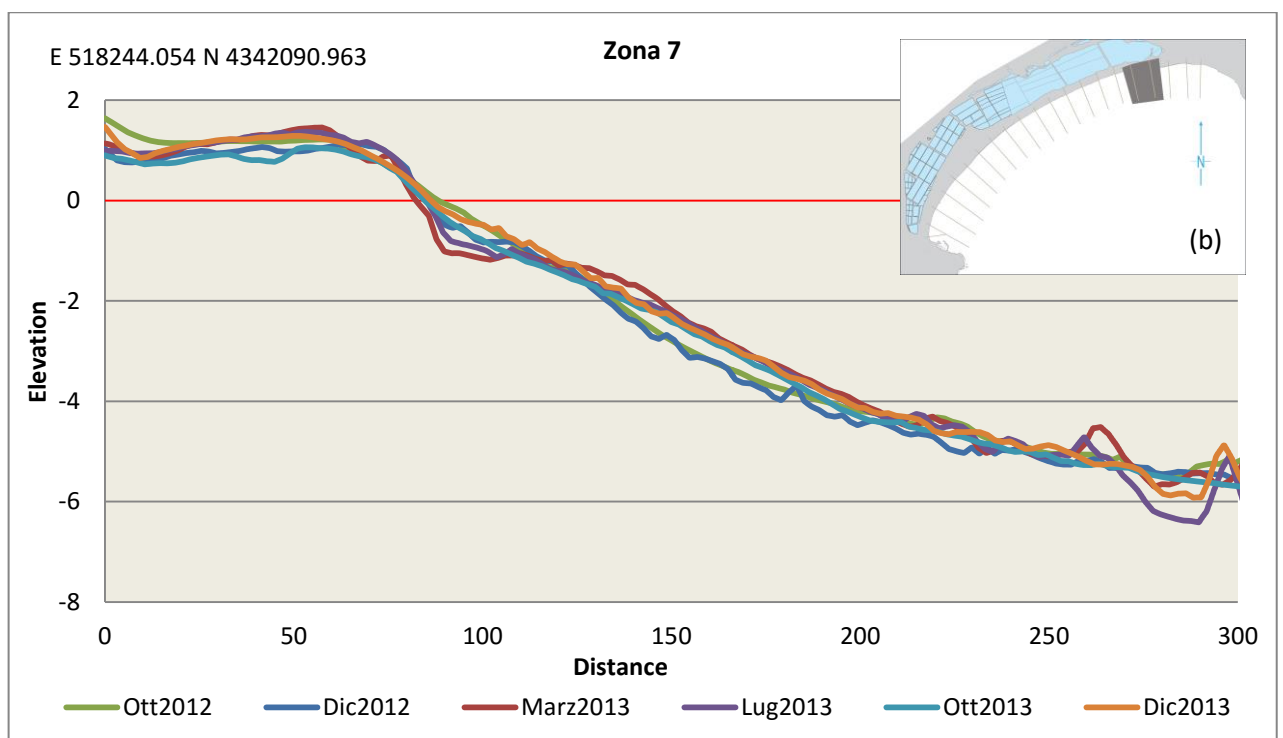


Figura 44. Profili stagionali rappresentativi per la Zona 7. In (b) è evidenziata l'area in cui ricade la zona 7.

La **zona 8** è ampia circa 350 metri e vi ricade il transetto T18 (Figura 45b). La spiaggia emersa è ampia mediamente 46 metri. La pendenza della spiaggia emersa oscilla tra i  $2.8^\circ$  e  $1.55^\circ$ . La posizione della linea di riva ha oscillazioni massime di 5 metri. La battigia in questa zona ha pendenze che variano tra i  $3.4^\circ$  e  $7.2^\circ$ . Lo shoreface mantiene mediamente pendenze di  $1.4^\circ$  e presenta un sistema a barra singola ampia circa 50 metri.

Lungo tutto il profilo della spiaggia sommersa si registrano variazioni batimetriche sino al limite superiore della prateria a Posidonia che dista circa 150 metri dalla riva a una profondità di 5 metri. Anche in questa zona è presente un grande accumulo lettiera della Posidonia oceanica tra la barra e il limite superiore della prateria.

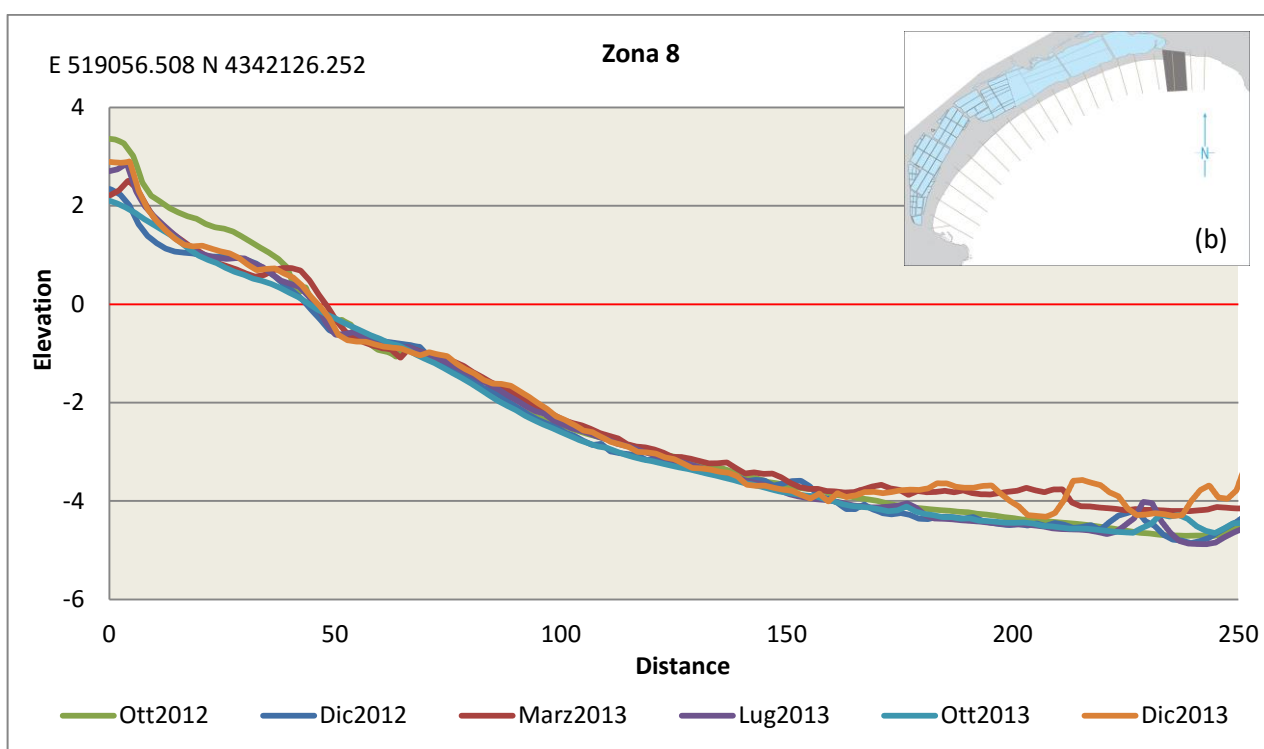


Figura 45. Profili stagionali rappresentativi per la Zona 8. In (b) è evidenziata l'area in cui ricade la zona 8.

La **zona 9** è posizionata nella parte più orientale dell'area di studio, è situata infatti a ridosso del muraglione e della strada di Margine Rosso (Figura 46b). In questa zona ricadono i profili T19 e T20. Questo tratto di spiaggia si estende per circa 800 m. Ha un'ampiezza media di 38 metri che va a diminuire sino alla fine della spiaggia. La pendenza della spiaggia emersa oscilla tra i 2.4° e 1.9°. La battigia invece oscilla tra i 5° e i 7°. La posizione della linea di riva varia stagionalmente anche di 7 metri. La zona di shoreface non è soggetta a grosse variazioni di pendenza che mediamente rimane sui 1.1°.

Lo shoreface è caratterizzato da una barra singola. In questo tratto il fondale è caratterizzato da affioramenti rocciosi, posidonia su roccia e lettiera.

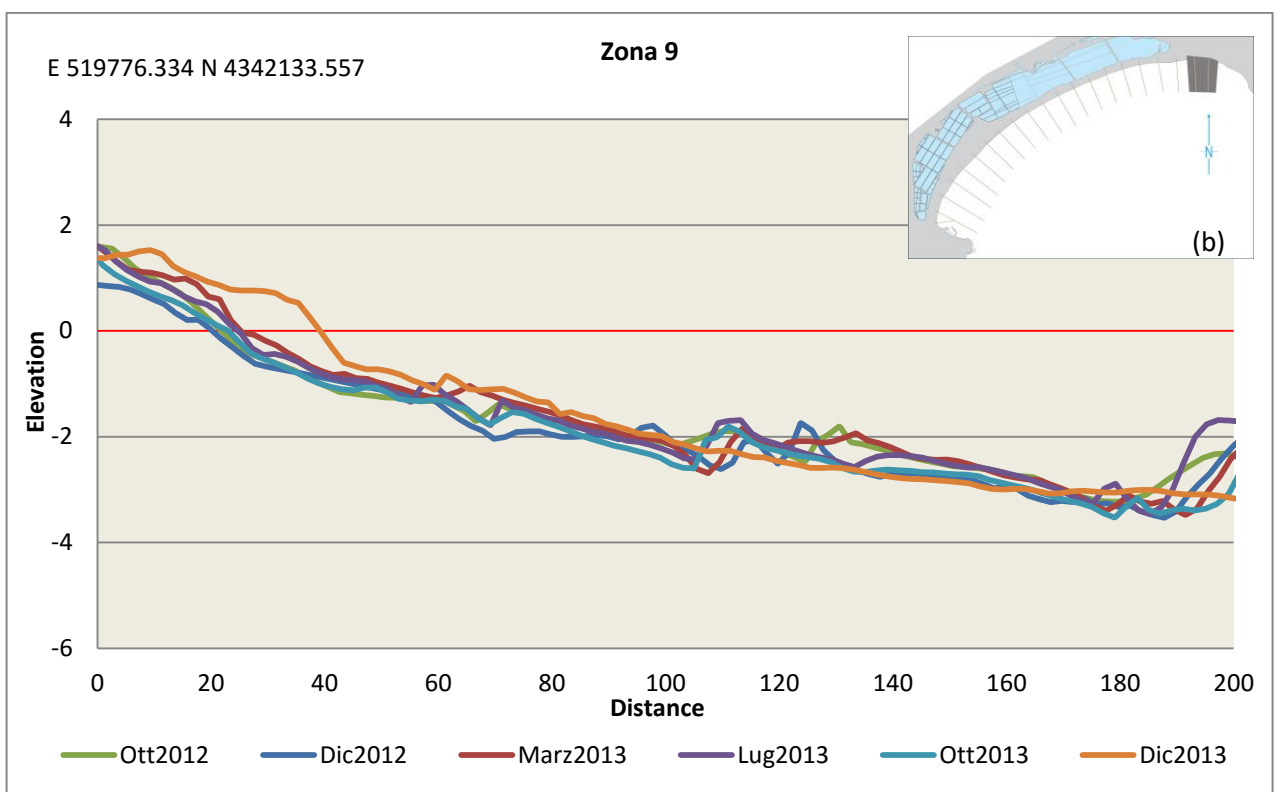


Figura 46. Profili stagionali rappresentativi per la Zona 9. In (b) è evidenziata l'area in cui ricade la zona 9.

Sono stati correlati alcuni elementi morfologici (lunghezza della spiaggia emersa, pendenza della battigia e pendenza della spiaggia sommersa) per identificare possibili relazioni e fattori di controllo. La figura 47 mostra i grafici di correlazione tra le pendenze di battigia e le pendenze della spiaggia sommersa per ogni singola zona.

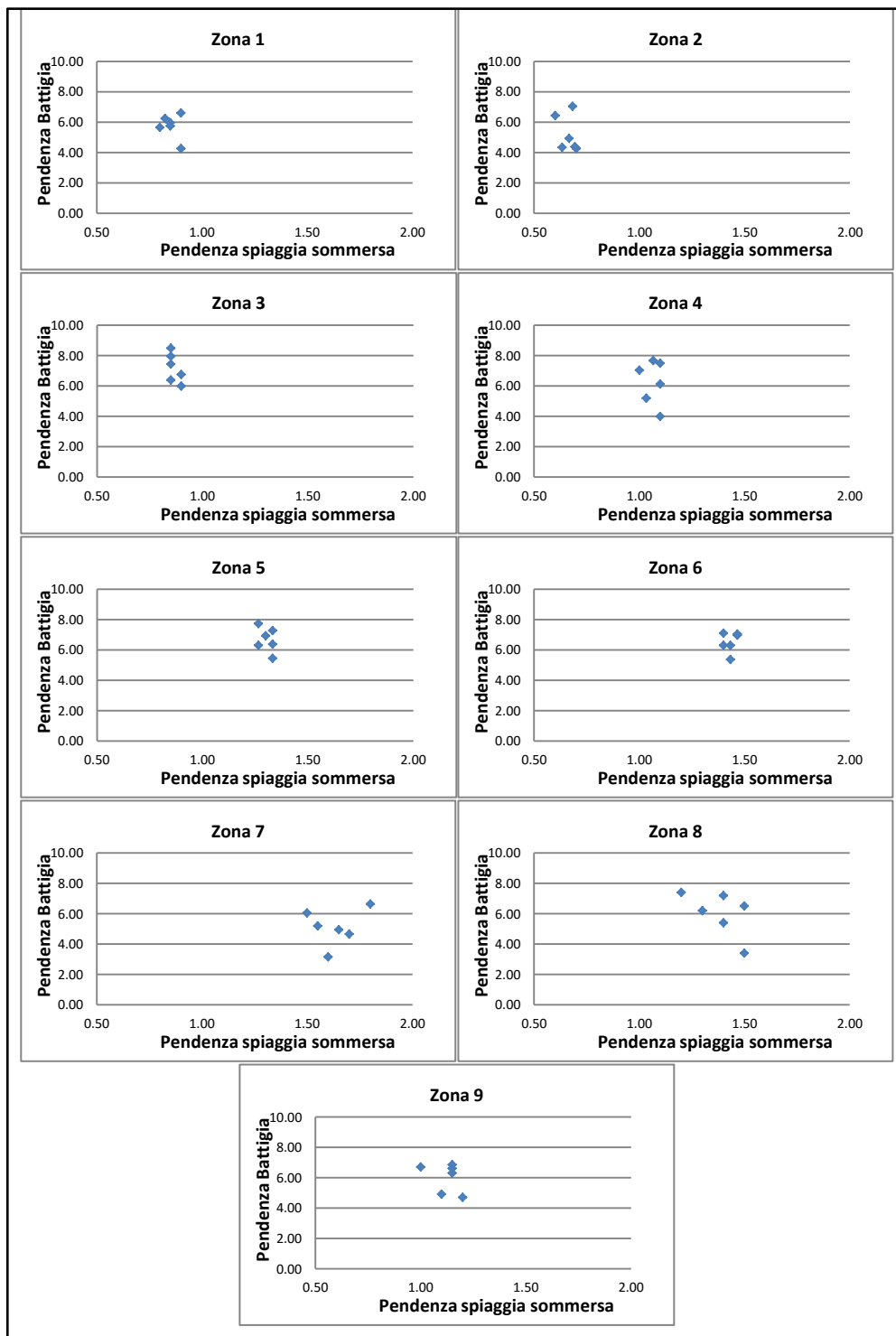


Figura 47. Grafici che mettono in relazione le pendenze medie della battigia e della spiaggia sommersa per ogni singola zona. I dati (mediati in ogni singola zona) provengono da tutte le 6 campagne di rilevamento topografico. I punti rappresentano ognuna delle 6 campagne di rilevamento topografico.

Tra le varie zone di suddivisione del litorale, le zone 7 e 8 mostrano un'elevata variabilità nella relazione tra le due pendenze. Si evince che a maggiori pendenze di spiaggia sommersa si presenta un'alta variabilità delle pendenze di battigia. Questo probabilmente accade perché a maggiori pendenze di shoreface corrisponde una maggiore energia del moto ondoso incidente, di conseguenza la battigia risponde maggiormente ad esso.

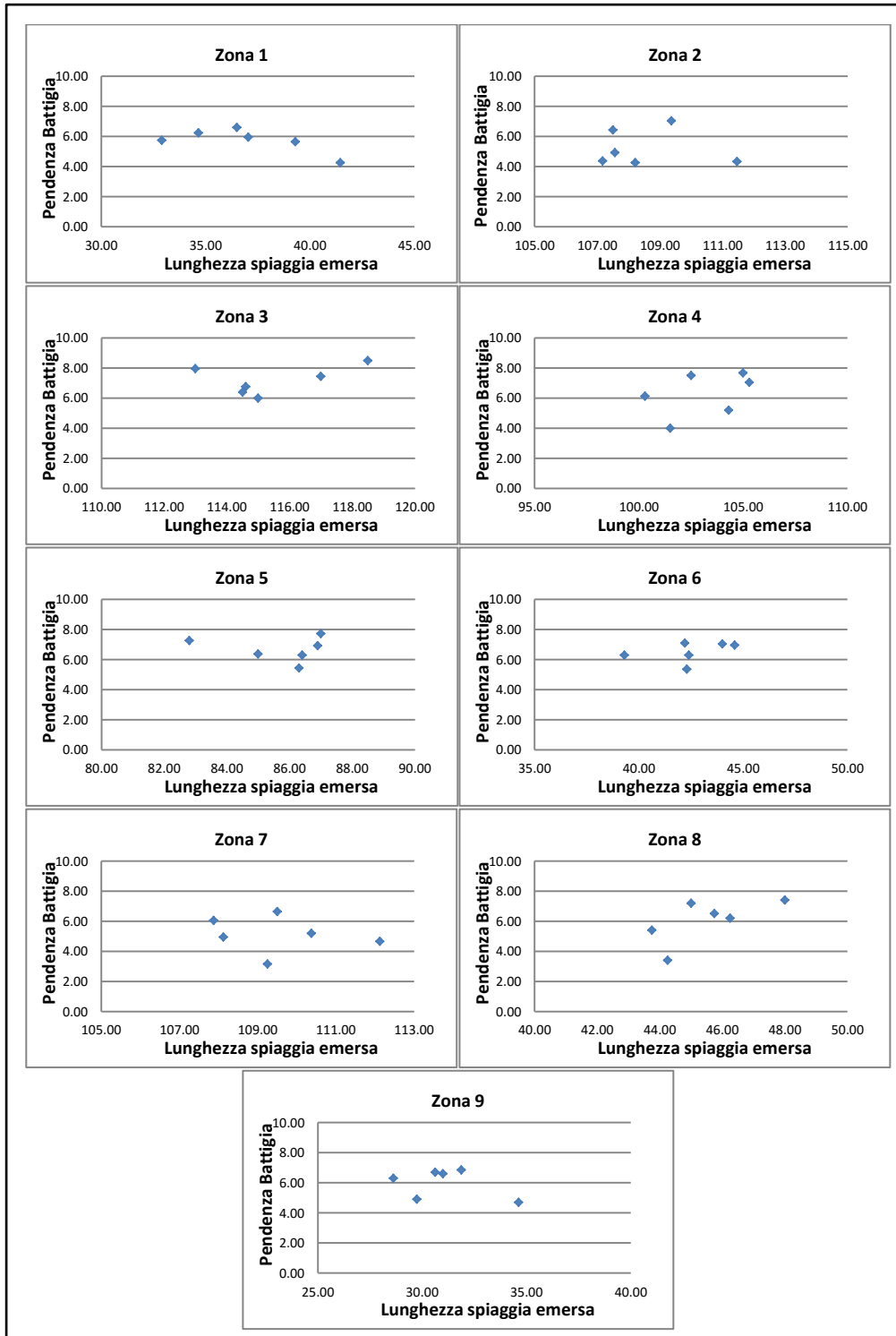


Figura 48. Grafici che mettono in relazione la pendenza media della battigia e l'ampiezza media della spiaggia emersa per ogni singola zona. I dati (mediati in ogni singola zona) provengono da tutte le 6 campagne di rilevamento topografico. I punti rappresentano ognuna delle 6 campagne.

Dal grafico di Figura xx si evince che non esiste alcuna relazione diretta, statisticamente rappresentativa, tra le ampiezze della spiaggia emersa e le pendenze della battigia. Ci si aspetterebbe che a maggiori inclinazioni di battigia corrispondano maggiori lunghezze di spiaggia emersa e a minori inclinazioni di battigia corrispondano minori lunghezze di spiaggia emersa. Infatti le mareggiate spianano la berma oridania e causano trasporto di sedimento costa-largo e longshore. Le cause di questo mancato rapporto tra i due parametri è da imputare: alla casualità di accadimento di mareggiate altamente energetiche che innescano il trasporto solido dalla spiaggia emersa alle barre, dalla redistribuzione del materiale e dai tempi di ritorno dopo un evento “grave” influenzati da eventi successivi.

## 4.2.2 Limiti dei profili di spiaggia

Per individuare la porzione dei profili della spiaggia del Poetto interessata dall'azione del moto ondoso, sono stati calcolati i seguenti parametri:

- Profondità di chiusura calcolata con dati di onde significative medie annuali;
- Profondità di chiusura calcolata;
- Quota di run-up calcolata con dati registrati di onde estreme.

## 4.2.3 Profondità di chiusura

la profondità di chiusura rappresenta il confine tra la spiaggia sottomarina superiore e inferiore e può essere considerata come il limite batimetrico in cui avviene un trasporto solido significativo cross-shore. Questo dato è utile per le applicazioni come la stima del bilancio sedimentario e la modellizzazione numerica di processi costieri.

Dall'analisi dei profili si nota che la variabilità morfologica stagionale è maggiore nella zona di surf e diminuisce progressivamente verso mare. I profili stagionali sono stati sovrapposti su tendono a convergere ad una profondità media di -5 metri, dove la variazione morfologica è insignificante (entro l'errore di misura). Questa profondità corrisponde alla profondità di chiusura.

La profondità di chiusura osservata, è stata comparata con la profondità di chiusura di Hallermeier (1982), calcolata con la seguente formula:

$$d_c = 2.28 H_s - 68.5 \left( \frac{H_s^2}{gT^2} \right) = 5.25 \text{ m} \quad (10)$$

Dove  $H_s$  è l'altezza d'onda significativa,  $T$  è il periodo significativo e  $g$  è la gravità. 2.28 e 68.5 sono dei parametri empirici intrinseci.

La profondità di chiusura è stata calcolata su tutti i 178 eventi significativi classificati nello studio climatologico. inoltre, è stata calcolata sulle onde estreme, utilizzando  $H_{sx}$  e  $T_{sx}$  che corrispondono rispettivamente all'altezza e al periodo delle onde più alte con persistenza di 12 ore nell'arco di un anno. In questo caso la profondità di chiusura del profilo in condizioni estreme è pari a -8.89 m.

La profondità di chiusura morfologica osservata sui profili ha una buona corrispondenza con quella calcolata. Questo dato è solidale anche con la profondità di distribuzione del fronte

della prateria a Posidonia davanti alla spiaggia di Quartu, mentre il di fronte al Poetto di Cagliari è il limite della prateria a Posidonia è situato a profondità maggiori per motivi che verranno esposti nei prossimi capitoli.

Infine, da un punto di vista granulometrico, a profondità superiori ai 5 m, si incontra generalmente una notevole frazione fangosa nei sedimenti, sintomo di scarso potere di rimobilizzazione dei fondali, tranne durante le mareggiate eccezionali.

#### 4.2.4 Determinazione dell'altezza di risalita dell'onda

La massima quota che l'onda raggiunge sulla la superficie libera della spiaggia rispetto al livello medio mare viene detta altezza del run-up (Figura 49) e rappresenta il limite terrestre del shoreface. La risalita dell'onda, è stata osservata durante i sopralluoghi effettuati in occasione delle mareggiate tramite i rilevamenti dei sormonti e dei sedimenti di washover.

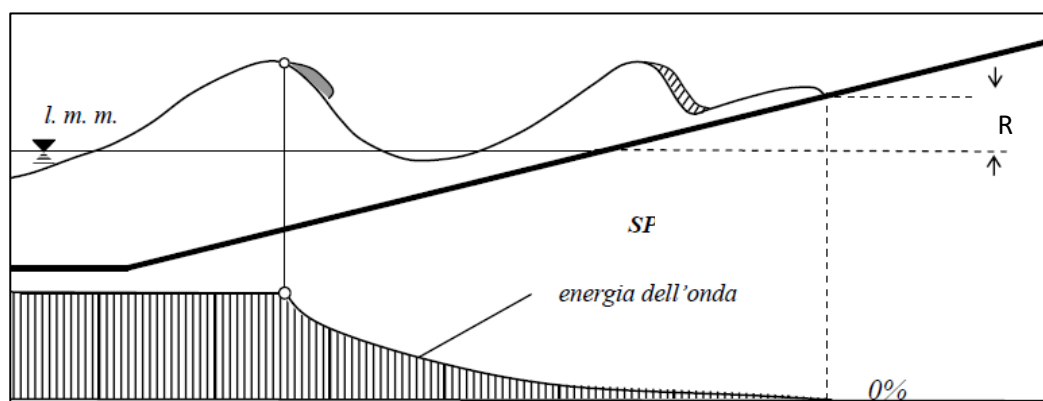


Figura 49 Rappresentazione schematica del frangente e della corrispondente altezza di run-up R.

Un valore del run up puramente indicativo rispetto a condizioni generali che potrebbero verificarsi durante mareggiate importanti, è stato calcolato mediante l'ausilio della formulazione empirica di Hunt (1959):

$$R = H_{sx} \frac{tg\beta}{\sqrt{H_{sx}L_0}} \quad (11)$$

La quota di run up  $R$  è stata calcolata utilizzando il valore dell'altezza d'onda significativa estrema ( $H_{sx}$ ), l'angolo di pendenza della battigia ( $\beta$ ) e la lunghezza delle onde a largo.



La lunghezza d'onda al largo, è stata determinata mediante la relazione di Airy (Atzeni, 2011):

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (12)$$

Dove T è il periodo delle onde estreme a largo e g è la gravità. I valori medi della quota di run up per ogni zona sono esposti nella tabella xx.

Tabella 10. Valori di run up calcolati con valori di onda estremi espressi in cm.

Zona	Run up (m)
Zona 1	1.12
Zona 2	1.00
Zona 3	1.37
Zona 4	1.19
Zona 5	1.27
Zona 6	1.24
Zona 7	0.97
Zona 8	1.15
Zona 9	1.15

Inserendo le quote ottenute nei grafici di misura dei diversi profili di spiaggia è stata stimata l'entità del flutto montante verso terra (Figura 50). Questo dato, per quanto puramente indicativo, è solidale con i dati rilevati in campagna durante le mareggiate.

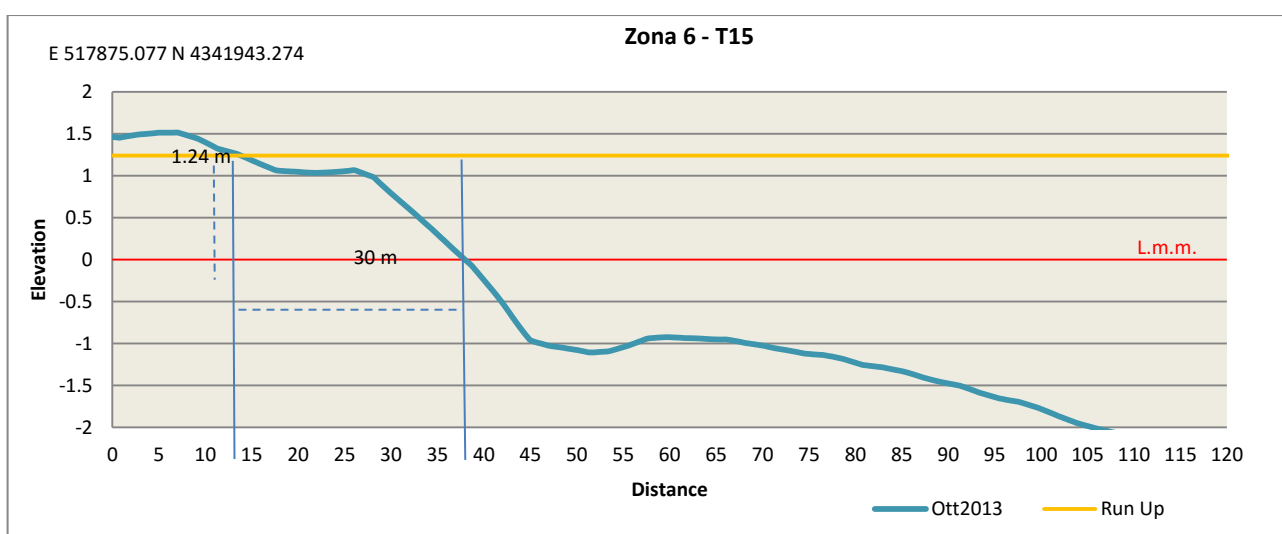


Figura 50. Porzione del profilo di spiaggia rilevato sul transetto T15 nel mese di Ottobre 2013. La linea rossa indica il livello medio mare, mentre quella arancione indica la quota del Run up calcolata.

#### **4.2.5 Variazioni temporali delle morfologie**

Nei precedenti paragrafi si è affermato che l'area di studio è stata suddivisa in 9 zone nelle quali la spiaggia emersa è influenzata dalle continue attività antropiche, la battigia è caratterizzata da ampie variazioni di pendenza nei tratti dove la spiaggia sommersa ha pendenze maggiori. Queste caratteristiche sono rintracciabili nelle diverse campagne di rilevamento realizzate e sono dunque requisiti che evolvono nel tempo. Analizzando più nel dettaglio i dati relativi alle pendenze medie misurate su ogni singola zona (Figura xx), è possibile interpretare meglio le variazioni morfologiche nel corso del tempo, per capire se ci sono state delle situazioni ricorrenti stagionalmente oppure che si sono verificate soltanto in alcuni periodi precisi durante i mesi di misure.

Nel caso della spiaggia emersa, (Figura 51) non è rintracciabile una definita stagionalità nel mutare delle pendenze. Si sono registrati degli aumenti di pendenza nei periodi autunnali, quando l'azione diretta da parte del moto ondoso durante eventi importanti genera quote di run-up elevato. Per il resto dell'anno, come detto in precedenza, la continua attività antropica compromette le configurazioni morfologiche generate dai processi naturali. La battigia mostra un andamento discontinuo tra le diverse zone per i primi due rilievi (Ottobre 2012 e Dicembre 2012); in generale non sembra avere una chiara alternanza stagionale nel variare della sua pendenza media.

La discontinuità della battigia è rintracciabile, oltre che nello spazio (come detto in precedenza) anche nel corso del tempo: infatti non è riscontrabile uno stesso andamento in tutti i rilievi. L'unica ricorrenza stagionale, per quanto riguarda la battigia, è la variazione della pendenza media durante tutti i rilievi eseguiti.

La spiaggia sommersa non mostra una sostanziale variazione di pendenza durante l'anno. Solo nelle zone 7 e 8 si registra una leggera evoluzione.

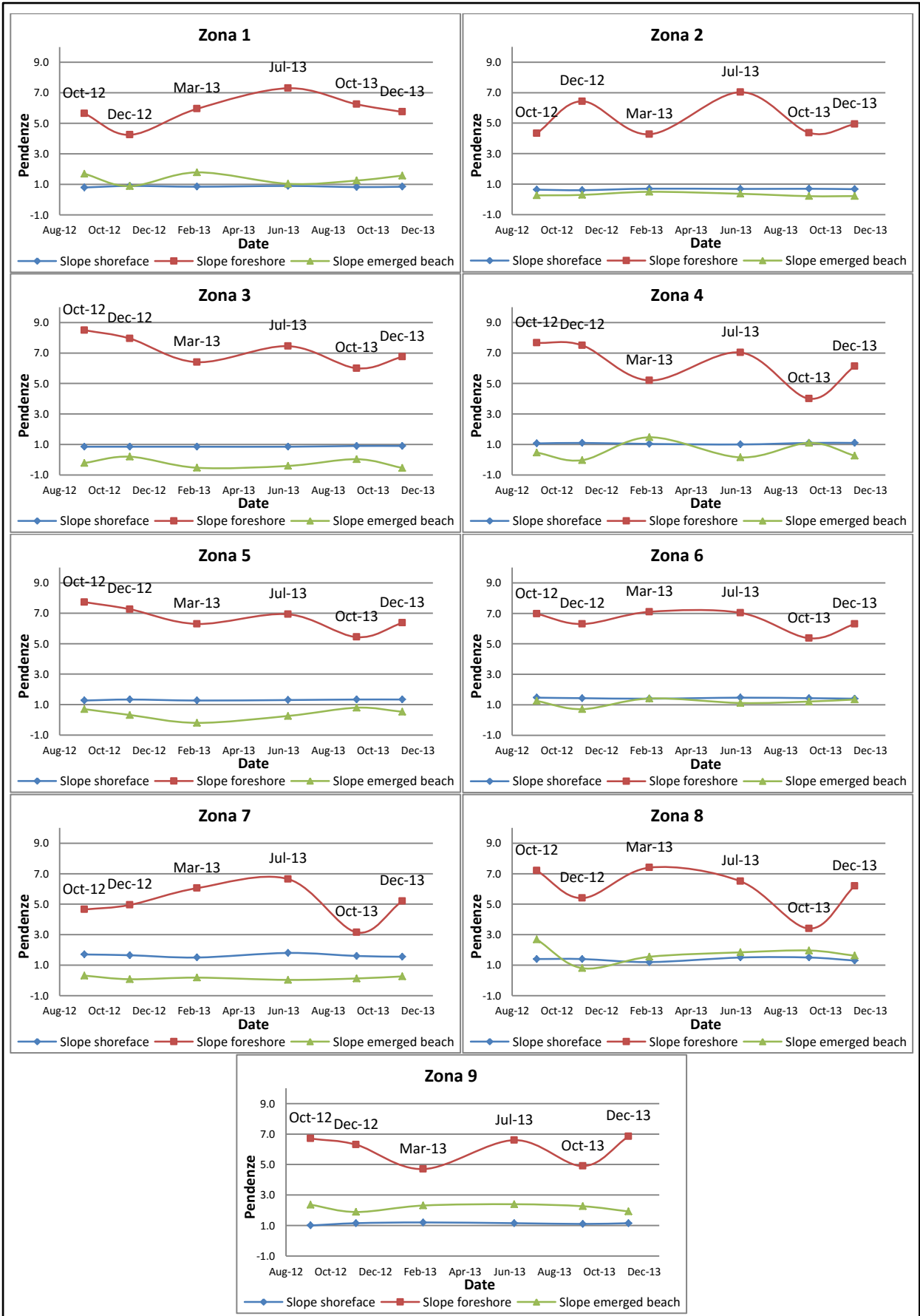


Figura 51. Grafici che mettono in relazione le pendenze medie della spiaggia emersa, della battigia e per tutti e 6 i rilievi topografici eseguiti.

Nella ricerca di variazioni di pendenza stagionali, si intuisce che il principale fattore che controlla l'inclinazione dei profili di spiaggia è l'arrivo delle onde di mareggiata.

L'energia totale (E) di ogni mareggiata (vedi capitolo 2) è stata calcolata come l'integrazione dell'altezza d'onda significativa (Hs) al quadrato per la durata della mareggiata (t1, t2), seguendo così la metodologia di Mendoza e Jimenez (2004) per adattare la scala delle mareggiate oceaniche proposta da Dolan e Davis (1992) al contesto mediterraneo. Analizzando i rilievi topografici si possono trovare delle relazioni tra i cambi di pendenza più evidenti misurati in alcune delle 6 campagne effettuate e il verificarsi degli eventi. Come si vede infatti dal grafico di Figura 52, gli eventi meteo marini più influenti si verificano con maggior frequenza nei periodi autunnali e invernali. I rilievi topografici maggiormente influenzati dal verificarsi delle mareggiate sono quelli di Dicembre 2012, Marzo 2013 e Dicembre 2013.

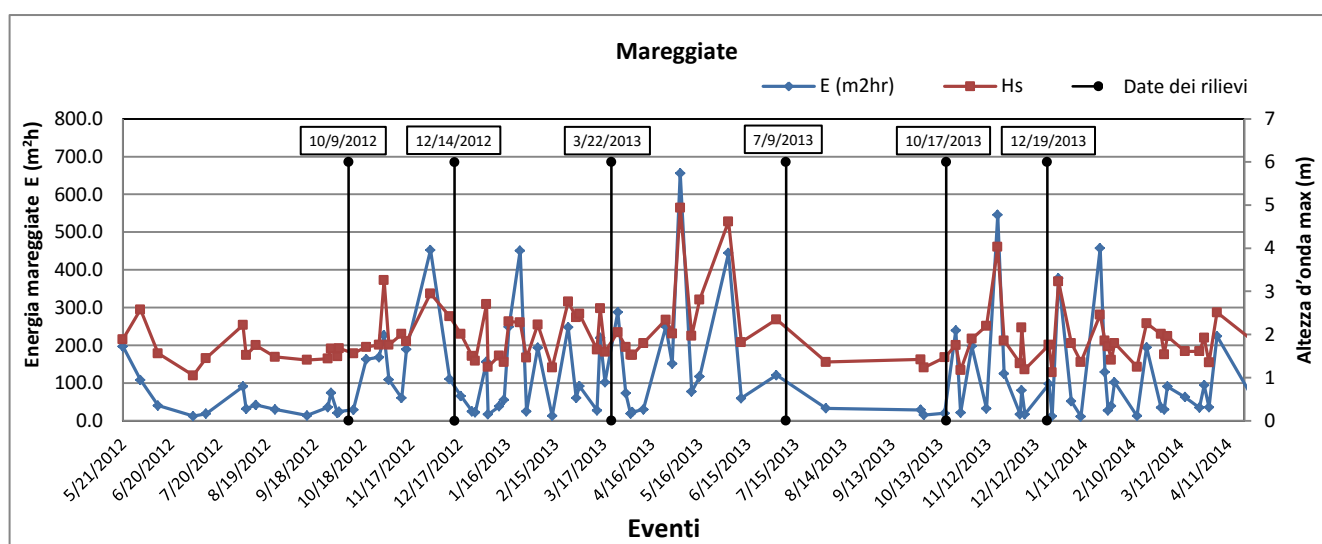


Figura 52. Il grafico mette in evidenza quali mareggiate hanno influito maggiormente sulle pendenze misurate durante i mesi di rilievi. Nel grafico sono indicate sia l'energia ( $m^2hr$ ) che l'altezza d'onda (m) massima registrata durante le mareggiate. In ascissa sono elencati cronologicamente gli eventi di mareggiata registrati per gli anni 2012, 2013 e 2014. Le etichette indicano il momento in cui è stato fatto il rilievo topografico.

L'evento di maggiore intensità (energia pari a  $656,2 m^2h$ , classe IV; altezza d'onda massima pari a  $4,94 m$ ; direzione media di provenienza:  $193^\circ N$ ) si è verificato nei primi giorni del mese di Maggio 2013 (ed in particolare il 4 Maggio). I rilievi primaverili sono stati eseguiti 2 mesi dopo, nel Luglio 2012, quando gli effetti della mareggiata erano già stati "smaltiti" dalla spiaggia.

Un altro evento altamente energetico (energia pari a  $545,5 m^2hr$ , classe IV; altezza d'onda massima pari a  $4,03 m$ ; direzione media di provenienza:  $184^\circ N$ ) si è verificato tra il 17 e il 19 Novembre 2013 (Figura xx). Tale evento ha in effetti determinato considerevoli cambiamenti

nelle pendenze di spiaggia: infatti dai grafici mostrati nella Figura xx si nota come, soprattutto per la spiaggia emersa e la battigia, si siano registrate variazioni nelle pendenze tra le più alte per l'intero periodo di misure. Si nota anche come diverse zone di spiaggia hanno risposto alla mareggiata proveniente da S-SO. In generale si registra un aumento delle pendenze di battigia, dovuto all'erosione e allo scalzamento del piedegradino e al deposito, in spiaggia emersa, della lettiera della *Posidonia oceanica* che forma una berma vegetale con spessori superiori al metro nelle zone 7, 8 e 9 (Figura 53). Contemporaneamente all'aumento di pendenza della battigia si è registrato una diminuzione delle pendenze della spiaggia emersa.



Figura 53. Immagine acquisita dal sistema di video-monitoraggio costiero durante l'evento del 18 Novembre 2013.

Le zone che hanno maggiormente subito l'azione di questa mareggiata sono quelle più esposte l'incidenza del moto ondoso proveniente da S-SO, ovvero la zona 7, 8 e 9. Dalla Figura xx si osserva, dunque, come ci sia una stretta correlazione tra il verificarsi della mareggiata e il conseguente cambio di pendenze dei profili di spiaggia.

L'elemento morfologico che più degli altri varia nella zona di studio, è sicuramente la battigia. Esso ha la sua maggiore variabilità nelle zone 2, 3, 4, 7 e 8.

Le zone 1, 5 e 6 oltre ad avere i valori di pendenza media più bassi hanno anche il minor grado di variabilità. Le zone 3, 4 e 5 (macrozona intermedia) hanno valori di pendenza media leggermente più elevati rispetto alle altre zone, soprattutto quelle più esterne. In quasi tutte le zone si sono registrate pendenze minori rispetto le medie nei rilievi di Marzo 2013 e Ottobre 2013, mentre negli altri rilievi l'inclinazione tende a salire sino a soglie simili. Questo potrebbe verificarsi per le attività antropiche che si svolgono in precisi periodi dell'anno; a Marzo iniziano le operazioni di manutenzione (Figura 54) degli stabilimenti balneari e la rimozione della posidonia spiaggiata con l'uso di mezzi pesanti che spianano la spiaggia emersa e la berma; per quanto riguarda il mese di Ottobre 2013, non si sono registrati eventi altamente energetici che avrebbero potuto modificare il profilo estivo che risulta spianato dalle attività antropiche.



Figura 54. Serie di immagini che documentano le attività di manutenzione che vengono eseguite dopo le mareggiate su tutta la spiaggia.

## 5.0 Classificazione Morfodinamica

La classificazione delle spiagge in gruppi distinti o morfotipi fornisce un quadro utile per esaminare la morfodinamica e i cambiamenti morfologici.

Le spiagge sabbiose vengono generalmente classificate in base alla loro pendenza in spiagge ripide e poco ripide; questi due assetti generali rappresentano fundamentalmente diversi **regimi morfodinamici**.

Nelle spiagge poco pendenti la zona di surf è ampia con diverse linee di frangenza delle onde. In questo caso gran parte dell'energia delle onde incidenti viene dissipata durante il processo di frangenza, queste spiagge sono quindi nominate come **dissipative**. Sulle spiagge ripide, la zona di surf è generalmente assente e le onde incidenti frangono direttamente sulla battigia. In questo caso una parte significativa di energia delle onde in arrivo viene riflessa dalla battigia, ragion per cui queste spiagge sono indicate come **riflettenti**.

Riducendo la scala di osservazione, si riscontrano morfologie sul profilo di spiaggia che sono altrettanto correlate al regime morfodinamico. Una battigia ripida con cuspidi e/o un piedegradino molto pronunciato sono forme tipiche di spiagge riflettenti. Barre sottomarine interrotte da canali di rip sono tipiche forme delle spiagge intermedie. I sistemi a barre multiple sono invece generalmente associati a spiagge dissipative.

Wright e Short (1984) realizzarono un modello di classificazione morfodinamica riguardante le spiagge microtidali dominate dal moto ondoso partendo dal principio che le forme e le associazioni di forme riscontrabili nella surf zone, rappresentano la firma dei processi idrodinamici che le hanno generate.

Il modello classifica gli **stati morfodinamici (o morfotipi)** di spiaggia basandosi sulla velocità di caduta adimensionale  $\Omega$  (Dean 1973), che incorpora le caratteristiche dell'onda, la pendenza del profilo di spiaggia e le caratteristiche granulometriche.

Tale modello è stato successivamente utilizzato e implementato da numerosi autori (Lippmann & Holman, 1990; Short & Aagaard, 1993; Short, 1999; Ranasinghe *et al.*, 2004; Short, 2006; Masselink & Short, 2011).

In particolare Short (2006), ha ampiamente dimostrato l'applicabilità della classificazione, basandosi su statistiche di oltre 10.000 sistemi spiaggia studiati in varie parti del mondo compreso il Mediterraneo, inoltre ha dimostrato che a diversi valori di  $\Omega$ , oltre che a corrispondere diversi morfotipi, corrispondono anche diverse altezze d'onda, diversa granulometria dei sedimenti e diversa gamma di marea (Figura 55).



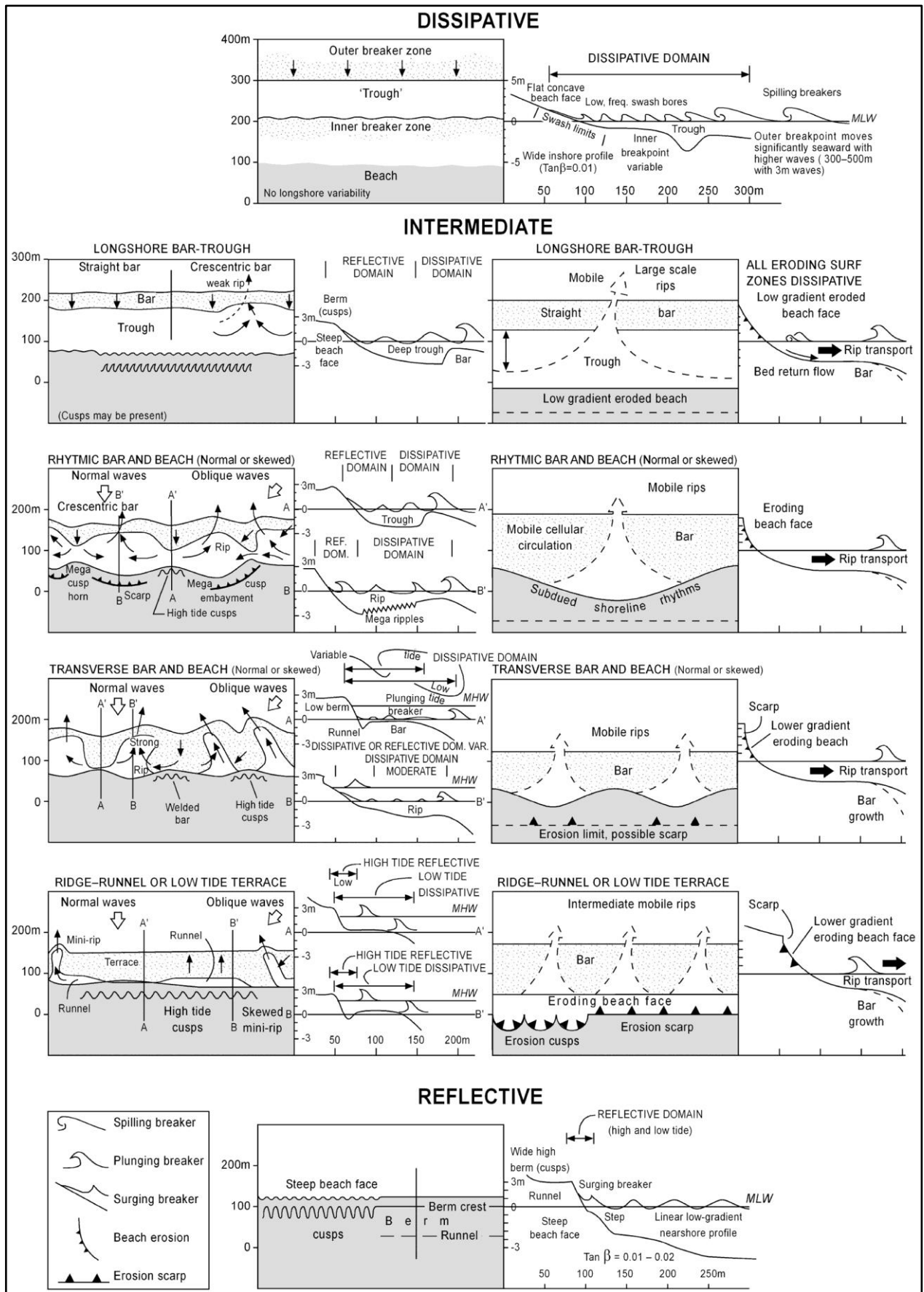


Figura 55. Sequenza tridimensionale dei cambiamenti degli stati morfodinamici di spiaggia. Sui profili sono rappresentate le caratteristiche dell'onda frangente. Sul lato sinistro dello schema sono rappresentate le condizioni di accrezione, mentre sul lato destro sono rappresentate condizioni erosionali. (Da Short, 2006).



Gli autori (Wright e Short, 1984) hanno formalizzato il continuum di variabilità morfologica del sistema spiaggia (Figura xx) tramite 3 stati morfodinamici principali:

- Dissipative beach – DB ( $\Omega > 5.5/6$ )
- Intermediate beach – IB ( $1.5 < \Omega < 5.5$ )
- Reflective beach – RB ( $\Omega < 1.5$ )

A sua volta lo stadio “Intermediate beach” è stato suddiviso in 4 sottostati

- Longshore bar-trough beach – LBT ( $\Omega \approx 5.5/6$ )
- Rhythmic bar and beach – RBB ( $\Omega \approx 4$ )
- Transverse bar and rip beach – TBR ( $\Omega \approx 3$ )
- Low tide terrace beach – LTB ( $\Omega \approx 1.5/2$ )

le morfologie di barra che caratterizzano i suddetti stati morfodinamici possono essere descrivibili tramite alcune semplici caratteristiche spaziali quali, numero delle barre, geometria in pianta e disposizione rispetto la riva. Si possono riconoscere dei sistemi a barra singola, a barra doppia o multi-barra, delle barre a geometria lineare con disposizione parallela e non parallela (obliqua) alla costa, barre distaccate e non distaccate da riva, forme ritmiche, quasi-ritmiche e irregolari (Wijnberg & Kroon, 2002 per una review).

Un sistema di barre può sviluppare, quindi, una serie di stati morfodinamici in funzione del contributo energetico che interessa un determinato tratto costiero in un determinato intervallo temporale. Ad ogni variazione del contributo energetico, sia che aumenti che diminuisca, le barre (e quindi il sistema spiaggia) possono evolvere da uno stadio all’altro con diverse velocità in funzione del rapporto tra volumetria del corpo di barra e dei livelli energetici in gioco (Short, 1999).

L’importanza della morfologia è legata all’assunzione che la variabilità morfologica rifletta più o meno direttamente i processi che la controllano (Wright & Short, 1984). Ad esempio, il numero delle barre sembra mostrare una relazione inversa con la pendenza della spiaggia sommersa, al cui decremento corrisponderebbe un aumento del numero delle barre (Dolan & Dean, 1985; Simeoni, 1989; Wijnberg & Kroon, 2002).

Le **spiagge dissipative DB** (Dissipative beach –  $\Omega > 5.5/6$ ) sono le spiagge più energetiche dello spettro delle variabilità morfodinamiche rappresentato in Figura xx. Questo perché i due requisiti fondamentali di una spiaggia dissipativa sono onde frangenti alte ( $H_b \approx 2$  m). e persistenti e sabbia fine ( $< 0,2$  mm). Questi fattori combinati creano una zona di surf molto

ampia (500 metri ) con un basso gradiente di pendenza, dove si formano diversi ordini di barre che si dispongono parallelamente alla linea di costa. Le onde frangono inizialmente nella barra più esterna, per poi riformarsi nel truogolo successivo e rifrangere nella barra seguente. La zona di swash è molto ampia e a bassa pendenza. Essa si estende dal piede della duna fino al limite di bassa marea. La morfologia della costa nelle spiagge dissipative tende a rimanere molto stabile e mostra cambiamenti minimi della linea di riva. I valori dell'indice di relative tide range *RTR* (Masselink *et al.*, 2011) associati a queste spiagge sono generalmente inferiori a 0.6.

Le **spiagge intermedie LTB** (Longshore bar-trough -  $\Omega \approx 5.5/6$ ) sono caratterizzate da onde alte circa 1,5 m, che frangono sulla barra che si sviluppa in modo lineare lungo riva. La barra è generalmente situata a una profondità di circa 1.5 - 3 metri e dista 100-150 m dalla riva, dalla quale è separata da un truogolo profondo. Lo sviluppo longitudinale della spiaggia, come nelle dissipative, tende a essere rettilineo lungo la battigia. Il gradiente dipende dalle dimensioni del sedimento e può variare da basso a moderato e può contenere cuspidi o berme, con un gradino alla base. La battigia e il truogolo sono relativamente rettilinei, mentre le barre possono variare da dritte quando sono costituite da sabbie fini a leggermente ritmiche in associazione alle cuspidi, quando sono costituite da sabbie medie, con delle anse che generalmente vengono attraversate da rip current ogni 250-500 metri durante le mareggiate (Short, 1999.) Queste tipologie di spiaggia hanno generalmente valori di *RTR* di circa 0.6.

Le **spiagge intermedie RBB** (Rhythmic bar and beach -  $\Omega \approx 4$ ) sono costituite generalmente da sabbia media-fine. Sono caratterizzate da una barra parallela alla linea di riva che procede con andamento ritmico a festoni, in fase con le cuspidi che si formano lungo la linea di riva. Tra la barra e la riva si colloca un truogolo anch'esso parallelo alla battigia. Le onde che transitano sopra la barra possono percorrere due percorsi differenti: 1) passando nella zona a festoni, con una profondità minore, le onde frangono e riducono la propria velocità, mentre 2) le onde che transitano nella zona con la barra meno sviluppata, con una sezione più profonda, possono non frangere mantenendo una elevata energia che genera una corrente parallela alla linea di riva (longshore current). In corrispondenza delle anse generate dalle barre a festoni esse sfociano in rip current. Le cuspidi si generano dopo la formazione delle barre a festoni in quanto i differenti percorsi delle onde, date dalla rifrazione con il fondale, generano un trasporto di sedimento lungo la riva. Questo porta alla formazione di celle di circolazione che

danno origine alle cuspidi accompagnate dalle micro baie. Questo sistema si ripete lungo la spiaggia con andamento ritmico (Short, 1999).

Le **spiagge intermedie TBR** (Transverse bar and rip -  $\Omega \approx 3$ ), prendono questo nome per il fatto che la barra si dispone in maniera trasversale o perpendicolare alla linea di riva. Sono simili alle rhythmic bar and beach ma con la differenza che le barre sono unite alla battigia. Questo genera delle celle di circolazione più isolate le une con le altre e ognuna di esse con la propria rip current. Generalmente le barre trasverse sono spaziate le une dalle altre di circa 150-250 metri, ma possono raggiungere distanze di 700 metri nelle spiagge con moto ondoso ad alta energia. La spiaggia che ne risulta è caratterizzata da un'alternanza di zone poco profonde, e di altre con canali profondi dove si impostano le rip currents. Le cuspidi si uniscono alle barre formando spesso delle insenature caratterizzate da un pendio scosceso nella zona sottocorrente della rip current. Questa tipologia di spiaggia si genera con un sedimento da medio a fine ed onde che possono raggiungere il metro e mezzo di altezza (Short, 1999).

Le **spiagge intermedie LTT** (Low tide terrace o ridge and runnel -  $\Omega \approx 1.5/2$ ) sono sottoposte ad un'energia minore. Vengono chiamate anche ridge and runnel. La peculiarità di questa tipologia è data dalla presenza di un gradino (la cui dimensione e pendenza dipende dalla granulometria del sedimento) che è unito, nel punto di bassa marea, alla barra o al terrazzo, da cui il nome low tide terrace. La barra si estende verso il largo per circa 20-50 metri (ma può raggiungere anche i 100m in spiagge con sabbia fine) e prosegue, unito alla riva, lungo la costa. In questa tipologia di spiaggia le onde non superano il metro di altezza. La barra può essere piatta e senza segni caratteristici, tranne che una leggera cresta (ridge) da cui l'altro nome con cui viene identificata questa tipologia di spiagge (ridge and runnel). La barra può essere interrotta ad intervalli di qualche decina di metri da piccoli e poco profondi canali di rip, chiamati mini-rips (Short, 1999).

Le **spiagge riflettenti RB** (Reflective beach -  $\Omega < 1.5$ ) (Figura xx) sono costituite da sedimenti grossolani ( $D > 0,4$  mm) e sono caratterizzate da un profilo ripido e privo di barre. La battigia è caratterizzata dalla presenza di cuspidi. Le onde frangenti relativamente basse ( $H_b < 0,7$  m) si rompono direttamente sulla battigia provocando un importante flutto montante che bagna tutta la spiaggia sino al piede della duna. I valori di RTR di queste tipologie di spiagge sono generalmente maggiori di 1.

## 5.1 Regime morfodinamico

Il regime morfodinamico della spiaggia del Poetto è stato individuato attraverso il calcolo del *surf scaling parameter*  $\varepsilon$  (Guza e Inman, 1975) che indica il livello di riflessione e di dissipazione del moto ondoso sui profili di spiaggia:

$$\varepsilon = \frac{2\pi^2 H_b}{gT^2 \tan^2 \beta} \quad (12)$$

Dove  $H_b$  è l'altezza modale dell'onda frangente,  $g$  è la gravità,  $T$  è periodo dell'onda e  $\beta$  è la pendenza della zona di surf. Secondo questo parametro prevalgono condizioni riflettenti quando  $\varepsilon < 2,5$ , condizioni dissipative quando  $\varepsilon > 20$  e quando  $2,5 > \varepsilon > 20$ , si verificano sia condizioni riflettenti, sia condizioni dissipative e le spiagge sono denominate come intermedie. Il metodo per la quantificazione dell'altezza d'onda frangente è stato scelto dopo diversi test. Le metodologie testate di McCowan (1894) e Munk (1949) sono utilizzate prevalentemente in ingegneria marittima e tendono a sovrastimare l'altezza dell'onda frangente, per questo motivo si è scelto il metodo di Kamphuis che nel 1991 ha individuato un indice di frangenza più adatto a spiagge sabbiose interessate da moto ondoso irregolare. L'altezza dell'onda frangente è stata calcolata utilizzando la formula seguente (Kamphuis, 1991):

$$H_b = 0.56 \exp(3.5m) h \quad (13)$$

Dove  $m$  è la pendenza media del fondale,  $h$  è la profondità del punto in cui l'onda frange, 0.56 è l'indice di frangenza dell'onda secondo Kamphuis e 3.5 è un parametro intrinseco della formula. I valori modali di  $H_b$  sono stati calcolati su ogni profilo di spiaggia rilevato in coincidenza della surf zone (Figura 56).

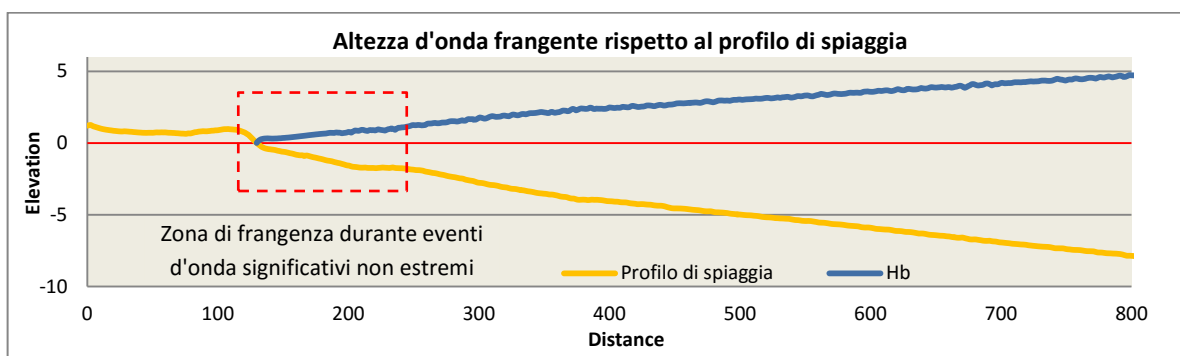


Figura 56. Profilo medio relativo al transetto. In blu è indicata l'altezza dell'onda frangente. Nel Riquadro rosso è evidenziata la zona di surf sulla quale è stata calcolata l'altezza modale dell'onda frangente.

Visto che la spiaggia del Poetto è caratterizzata da una scarsa variabilità delle pendenze della zona di surf, il valore del *surf scaling parameter* varia soprattutto in funzione del clima ondososo incidente. In figura 29 sono mostrati i valori di *Surf scaling parameter* correlati all'energia ( $m^2 hr$ ) degli eventi d'onda (vedi capitolo 2).

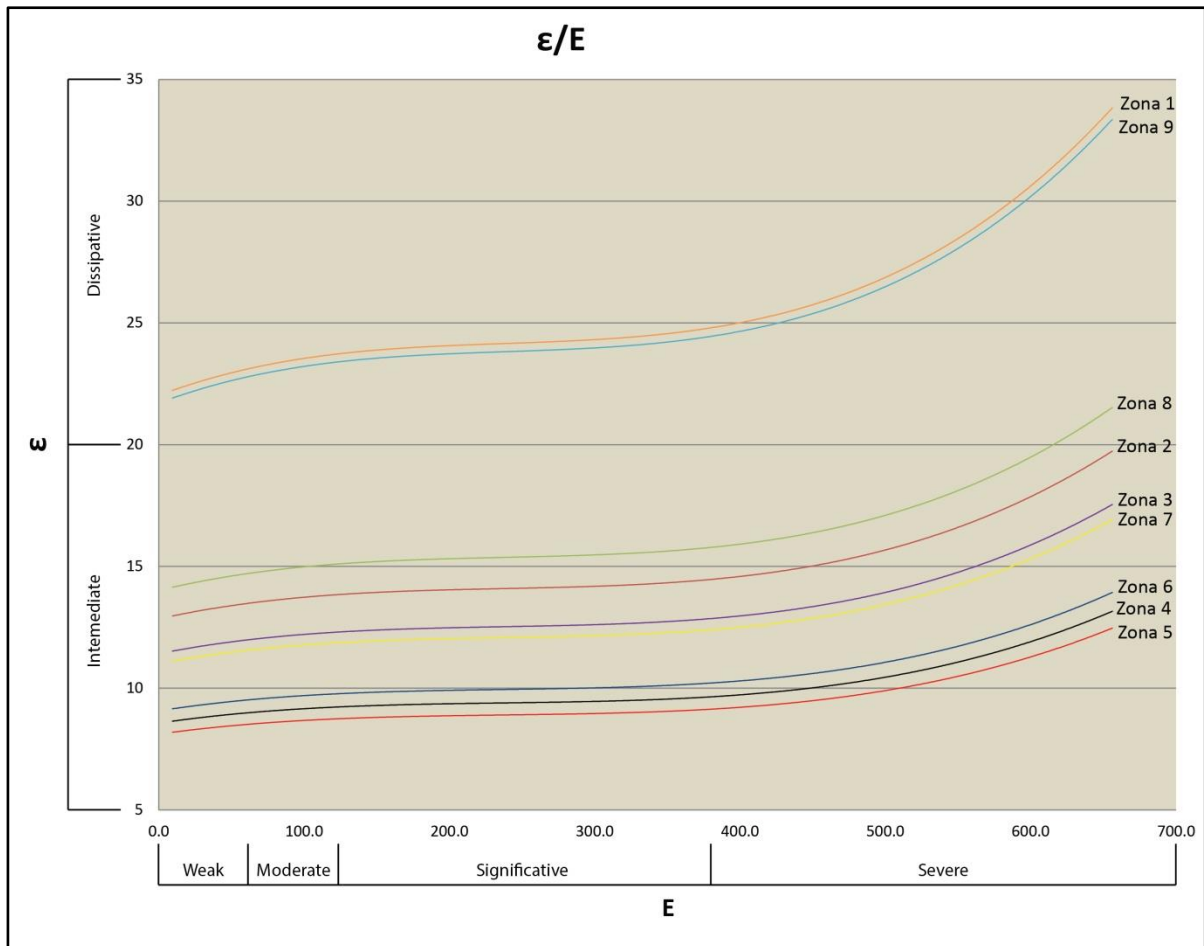


Figura 57. Il grafico mostra le curve di tendenza del regime morfodinamico (*surf scaling parameter*) in funzione dell'energia degli eventi d'onda per ogni zona i cui è stata suddivisa l'area di studio.

I risultati (Figura 57) mostrano il regime morfodinamico delle varie zone in cui è stata suddivisa la spiaggia del poetto . Le “code” della spiaggia, ovvero la zona 1 e la zona 9 sono classificabili come dissipative ( $\epsilon > 20$ ), mantengono questo regime con qualsiasi condizione meteomarina.

La zona 8 possiede caratteristiche di spiaggia intermedia ma in condizioni climatiche estreme si comporta come una spiaggia dissipativa. Tutte le altre zone risultano avere un regime Intermedio in qualsiasi condizione. Le zone con caratteristiche meno dissipative risultano quelle situate al centro spiaggia (zone 5 e 4), mentre procedendo dal centro spiaggia verso le code, si riscontra un incremento delle caratteristiche più dissipative.

## 5.2 Calcolo della velocità di caduta adimensionale

La velocità di caduta adimensionale  $\Omega$  è definita dall'altezza modale delle onde frangenti ( $H_b$ ), dal periodo (T) e dalla velocità di caduta del sedimento ( $W_s$ ).

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s T} \quad (14)$$

Per poter classificare il litorale in esame secondo l'approccio morfodinamico di Wright e Short (1984), sono state eseguite alcune analisi sul sedimento campionato (analisi granulometriche e picnometriche descritte nel capitolo 3) in modo tale da avere dei parametri il più possibile reali per calcolare la velocità di caduta del sedimento  $W_s$ .

$W_s$  è stata calcolata secondo relazioni idrodinamiche note, come la formula di Le Roux (1996), dove equivale a:

$$W_s = \frac{W_{ds}}{\sqrt[3]{\frac{\rho_f^2}{\mu g (\rho_s - \rho_f)}}} \quad (15)$$

$W_{ds}$  è la velocità adimensionale di caduta di una particella sferica (vedi formula (16)), che dipende dal coefficiente di forma  $D_d$  di una sfera (vedi formula (17)), il quale dipende a sua volta dal diametro nominale  $D_n$ . Assumendo per approssimazione che la forma delle particelle della sabbia in questione sia sferica,  $D_n$  equivale al diametro medio  $M_z$  ottenuto dalle analisi granulometriche:

$$W_{ds} = (0.2636D_d - 0.37) \text{ per } 2.9704 < D_d < 22.9866 \quad (16)$$

$$D_d = D_n \sqrt[3]{\frac{\rho_f g (\rho_s - \rho_f)}{\mu^2}} \quad (17)$$

Dove  $D_n$  è uguale al diametro medio del sedimento espresso in metri  $M_z$ ,  $\rho_f$  è la densità dell'acqua marina (pari a 1025 kg/m<sup>3</sup>, alla temperatura di 20°C, alla salinità di 35g/kg ed alla pressione atmosferica),  $g$  è l'accelerazione di gravità (9.81 m/s<sup>2</sup>);  $\rho_s$  è la densità del sedimento,  $\mu$  è la viscosità dell'acqua marina (pari 0.001080 kg/ms, a 20°C di temperatura, alla salinità di 35g/kg). I 30 campioni su cui sono state realizzate le analisi picnometriche (vedi capitolo 3) sono stati prelevati nella zona di surf e in battigia. L'ordine di grandezza di  $W_s$  che risulta dai

calcoli (vedi Tabella 11), è stato comparato con valori esposti in altri studi eseguiti in spiagge mediterranee (Ciavola *et al.*, 2000; Grottoli *et al.*, 2011; Armaroli *et al.*, 2013), è verosimile per una sabbia fine come quella presente nell'area di studio (con valori medi di  $M_z$  uguali a  $318 \mu\text{m}$ ).

Alla luce di risultati ottenuti dal calcolo delle velocità di caduta ( $W_s$ ) secondo la legge di Le Roux, sono stati ottenuti i valori di velocità di caduta adimensionale  $\Omega$  per ogni profilo di spiaggia rilevato. I risultati sono esposti nella Tabella xx.

**Tabella 11. La tabella mostra i parametri calcolati su ogni profilo: diametro medio  $M_z$ , densità  $\rho_s$ , la velocità di caduta  $W_s$  (calcolata secondo la formula di Le Roux) e l'altezza modale dell'onda in frangenza  $H_b$ .**

Profile	$\rho_s$ (kg/m <sup>2</sup> )	$M_z$ (m)	$H_b$ (m)	$W_s$	$\Omega$	Type
T1	2665	0.000195	0.57	0.022	7.12	DB
T2	2664	0.000336	0.85	0.045	5.24	LBT
T3	2664	0.000326	0.6	0.043	3.83	TBR/RBB
T4	2660	0.000300	0.45	0.059	4.23	RBB
T5	2657	0.000326	0.48	0.044	3.08	TBR
T6	2666	0.000320	0.63	0.043	4.11	RBB
T7	2666	0.000300	0.45	0.040	3.18	TBR
T8	2650	0.000304	0.39	0.040	2.70	LTT/TBR
T9	2643	0.000309	0.69	0.041	4.75	RBB/LBT
T10	2647	0.000309	0.37	0.041	2.54	LTT/TBB
T11	2647	0.000309	0.6	0.041	4.13	RBB
T12	2651	0.000310	0.65	0.041	4.44	RBB
T14	2655	0.000320	0.57	0.043	3.74	TBR/RBB
T15	2656	0.000332	0.77	0.045	4.83	RBB/LBT
T16	2650	0.000311	0.73	0.041	4.97	LBT
T17	2649	0.000311	0.71	0.041	4.84	LBT
T18	2643	0.000290	0.57	0.038	4.25	RBB
T19	2641	0.000337	0.76	0.046	4.71	RBB/LBT
T20	2638	0.000384	0.75	0.053	3.99	RBB

### 5.3 Classificazione morfodinamica

Secondo la classificazione morfodinamica Basata sulla velocità di caduta adimensionale (Wright & Short, 1984; Short, 1999), le varie zone di spiaggia sono così catalogabili:

- **Zona 1** ( $\Omega=7.12$ ): spiaggia dissipativa (DB). Come già spiegato in occasione delle analisi morfometriche dei profili di spiaggia, questa zona è contraddistinta da 3 ordini di barra. La zona a barre e a truogoli è ampia circa 160 metri, è caratterizzata da un sistema

formato da due piccole barre situate tra -1m e -0.50 metri e da una barra più ampia che si sviluppa a circa -2 m di profondità. Viste le dimensioni delle barre, questa zona potrebbe essere classificabile come Longshore bar-trough (LBT). Tuttavia vanno tenute presenti sia le dovute proporzioni riguardo alle dimensioni del truogolo e della barra tra questa spiaggia e una spiaggia oceanica per la quale è stata realizzata la classificazione utilizzata, così come le differenti condizioni idrodinamiche tra una spiaggia oceanica e una spiaggia mediterranea.

- **Zona 2** ( $\Omega=4.4$ ): spiaggia intermedia (LBT - RBB - TBR). Sui profili T2, T3 e T4 che ricadono in questa zona si osserva una zona a barre e a truogoli ampia circa 200 metri, costituita da un sistema a doppia barra con discreta variabilità morfologica sino a profondità di -3 metri.

- **Zona 3** ( $\Omega=3.6$ ): spiaggia intermedia (RBB - TBR). In questo settore ricadono i profili T5 e T6 dai quali si riscontra una zona a barre e a truogoli ampia circa 240 metri e caratterizzata da due ampie barre situate tra -1m e -2.50 metri di profondità.

- **Zona 4** ( $\Omega=3.5$ ): spiaggia intermedia (RBB - TBR - LTT). In questa porzione di spiaggia ricadono i profili T7, T8 e T9. Questa zona è una delle meno dissipative della spiaggia, è contraddistinta da un sistema a doppia barra ampia circa 180 metri, con discreta variabilità morfologica sino a profondità metri, di -3 metri.

- **Zona 5** ( $\Omega=3.7$ ): spiaggia intermedia (RBB - TBR - LTT). In questa zona si trovano i profili T10, T11 e T 12. La morfologia è del tutto simile a quella delle zona 4.

- **Zona 6** ( $\Omega=4.5$ ): spiaggia intermedia (LBT - RBB - TBR). Sui profili T13, T14 e T15 che ricadono in questa zona si osserva la zona di barra e truogoli contraddistinta con un sistema a 2 barre che si sviluppa nei primi 2 metri di profondità.

- **Zona 7** ( $\Omega=4.9$ ): spiaggia intermedia (LBT – RBB). Sui profili T16 e T18 che ricadono in questa zona si riscontra un sistema a barra singola ampia circa 70 metri, che si sviluppa da -1 metro a circa -3 metri di profondità

- **Zona 8** ( $\Omega=4.3$ ): spiaggia intermedia (RBB) In questo profilo ricade il profilo T18. La morfologia di questa zona è del tutto simile a quella delle zona 7.

- **Zona 9** ( $\Omega=4.4$ ): spiaggia intermedia (LBT – RBB). In questa zona si trovano i profili T19 e T20. La zona di shoreface è caratterizzato da una barra singola e non è soggetta a importanti variazioni.



## **6.0 Modelli idrodinamici**

La simulazione di scenari idrodinamici innescati da diversi eventi meteomarinari è utile per comprendere le dinamiche sedimentarie che controllano assetti morfologici e scenari evolutivi.

I modelli sono stati eseguiti con il software suite Delft3D, che è costituito da diversi moduli in grado di simulare e gestire le interazioni tra mareggiate, uragani, correnti, onde, trasporto dei sedimenti, morfologia e qualità delle acque.

Per studiare le differenti risposte idrodinamiche della surf-zone ai principali eventi meteomarinari (SE e SO), è stato necessario impostare il modello con i dati climatici (onde e vento), morfometrici e sedimentologici descritti precedentemente.

Il Delft3D è stato utilizzato per la simulazione del moto ondoso (modulo WAVE) e per il calcolo di flussi idrodinamici (modulo FLOW) nelle acque costiere. I moduli di WAVE e FLOW sono accoppiati in linea e comunicano tra loro con intervalli regolari per tenere conto degli effetti delle onde sulle correnti e per fornire condizioni al contorno del flusso per la trasformazione delle onde.

### **Modulo di simulazione del moto ondoso - WAVE**

IL modulo WAVE utilizza il modello spettrale SWAN di terza generazione (Booij et al, 1999;.. Ris et al, 1999). La modellizzazione della trasformazione d'onda comprende la propagazione delle onde, la generazione dal vento, l'interazione onda-onda non lineare e la dissipazione. Il modello SWAN di terza generazione è stato validato con successo e verificato in numerosi casi di studio, ha il grande vantaggio, rispetto ai suoi predecessori, che i fenomeni fisici sono rappresentati esplicitamente grazie a formulazioni di stato dell'arte e che il modello risulta molto più stabile (schemi completamente impliciti).

Un altro suo grande vantaggio è che le simulazioni possono avvenire anche su griglie curvilinee (che si accoppiano meglio con i moduli idrodinamici di Delft3D), e può, per esempio, generare risultati sotto forma di spettri mono e bidimensionali. Per maggior completezza, le forze delle onde sono calcolate dal modello sulla base del gradiente del tensore di "radiation stress" (invece che del tasso di dissipazione come nei precedenti modelli); questo può essere utilizzato come forzante per il calcolo delle correnti indotte dalle onde ed il set-up nel modello idrodinamico.

Il modello SWAN utilizza un'equazione completamente spettrale (in tutte le direzioni e frequenze). Che consente di ricavare i campi d'onda delle onde generate da vento propagatisi

simultaneamente da differenti direzioni. Inoltre consente di calcolare l'evoluzione e la trasformazione delle onde di vento (*short crested random waves*) in regioni costiere ed in acque profonde, di transizione e basse ed in aree soggette a correnti.

Il modello SWAN considera l'effetto di rifrazione e rappresenta i fenomeni rigenerativi del vento, la dissipazione di potenza d'onda, all'attrito sul fondo ed al frangivento delle onde, nonché dell'interazione onda-onda.

### **Modulo Idrodinamico FLOW**

Il modulo idrodinamico, Delft3D-FLOW, è un programma multi dimensionale idrodinamico che calcola flussi non stazionari e fenomeni di trasporto risultanti da forzanti di marea e meteorologiche su una griglia curvilinea e ben modellata.

In questo studio si sono utilizzate soprattutto le possibilità del modello di modellare i flussi idrodinamici dovuti ad onde e di calcolare e modellare il trasporto di sedimenti (Lai, 2008).

Il modulo FLOW si basa sulle equazioni di Navier-Stokes per un fluido incompressibile, sotto le assunzioni di Boussinesq per le acque basse. Tale modulo, attraverso una procedura automatica recentemente implementata, comprende al suo interno il modulo morfodinamico utile, unitamente al modulo di moto ondoso, a simulare i fenomeni morfodinamici costieri.

La formula che lega il trasporto alle forze d'onda è quella di Bijker (1971). Essa è una formulazione frequentemente utilizzata nelle aree costiere in presenza di correnti generate da moto ondoso. Il trasporto dei sedimenti sul fondo e quelli in sospensione sono trattati separatamente ovvero:

$$S = S_b + S_s$$

dove  $S_b$  è il trasporto di sedimenti sul fondo e  $S_s$  è il trasporto di sedimento in sospensione.

Dal punto di vista numerico, il modello discretizza l'intera area in celle-griglia sul piano orizzontale. L'insieme delle equazioni differenziali è così trasformato nello spazio discretizzato. Ogni cella contiene quindi un valore di battente idrico, di batimetria, di velocità nella direzione x della griglia, ed un valore nella direzione y.

Tutti questi valori sono allocati in uno schema denominato "griglia sfalsata", poiché ogni valore è definito in punti diversi della stessa cella della griglia. L'insieme delle equazioni differenziali parziali è risolto utilizzando un metodo alle differenze finite. Il modulo FLOW utilizza il cosiddetto metodo ADI (Alternating Direction Implicit).

## 6.1 Analisi preliminari e impostazione del modello

L'impostazione del modello per l'effettuazione delle simulazioni idrodinamiche è stato preceduto da una serie di operazioni necessarie alla corretta e puntuale definizione delle condizioni al contorno del sito di interesse. In particolare, sono state effettuate una serie di campagne volte al campionamento dei sedimenti, della morfologia e batimetria dei fondali.

La caratterizzazione meteo-marina del paraggio è stata effettuata facendo riferimento ai database della R.O.N. (Rete Ondametrica Nazionale per i dati d'onda) e della R.M.N. (Rete Mareografica Nazionale per i dati di vento e marea)

Lo studio di modellizzazione è suddiviso in diverse fasi concatenate e successive.

Note le "boundary conditions" si procede con la realizzazione di una serie di griglie di calcolo con dettaglio crescente, queste forniscono al software l'area di lavoro in cui verranno eseguite le simulazioni di moto ondoso e i computi idrodinamici.

Nel nostro studio sono state predisposte 3 griglie. La prima è generale sul golfo di Cagliari e ricopre un areale compreso trasversalmente tra Capo Carbonara e Capo Spartivento e longitudinalmente tra la linea di costa e la quota batimetrica di -125 m.

La profondità limite della griglia è stata scelta in base alle statistiche di moto ondoso e in base alla lunghezza d'onda massima registrata nel Golfo. Successivamente sono state realizzate una griglia di calcolo intermedia antistante l'area di studio e una griglia strettamente dettagliata sulla spiaggia del Poetto. La costruzione delle griglie è un passo importante perché queste devono tener conto delle possibili direzioni di vento e i collegati eventi meteomarini e devono prevedere degli areali in cui si possano generare fenomeni di riflessione o rifrazione.

Nella griglia generale del Golfo e nelle due intermedie si è utilizzata la linea di costa acquisita dalla bibliografia (Database RAS) mentre per la griglia di dettaglio la battigia è stata rilevata direttamente con il DGPS. La griglia più ampia e meno definita (Coarse) e quella intermedia (Medium), sono utilizzate dal solo modello d'onda, mentre la più dettagliata (Fine), è utilizzata sia dal modello d'onda (Swan) che da quello idromorfodinamico (Flow).

La fase successiva è stata quella dell'inserimento dei dati batimetrici nelle griglie.

Per quanto riguarda la batimetria generale del Golfo si è utilizzato lo schema prodotto nelle precedenti fasi di lavoro, trasformando i dati in un listato di punti x,y,z, (formato utilizzato dal software per l'inserimento nella griglia).

Per le griglie di dettaglio la batimetria è stata rilevata in maniera diretta mediante ecografo doppia frequenza digitale collegato ad un DGPS.

Le funzioni di interpolazione dei punti del software hanno poi permesso di realizzare una ricostruzione digitale del fondo mare, specifica per ogni griglia.

Successivamente sono stati costruiti i modelli d'onda specifici mediante l'applicazione del modulo WAVE del Delft3D. Il modello procede per fasi di calcolo predefinite ed interattive fino al completo svolgimento del processo costiero in esame. Il modello d'onda ed il modello idrodinamico, una volta impostate le condizioni al contorno e definiti gli intervalli di tempo oggetto dell'indagine, cominciano il loro calcolo risolvendo, passo dopo passo, le equazioni.

## 6.2 Applicazione del Delft-3D

Il modello Delft3d è stato testato con degli eventi tipo che si possono manifestare nel Golfo di Cagliari. Si è scelto di modellizzare gli eventi meteomarinari tipici ricadenti nei settori di traversia della spiaggia del Poetto.

I modelli ottenuti simulano quindi:

- Vento di Libeccio (direzione 220°);
- Vento di Scirocco (direzione 145°);

Come parametri di settaggio, richiesti dal software, si sono utilizzati:

- Significant wave height  $H_s = H_{1/3}$ : Media del 1/3 delle onde più alte registrate; di solito coincide con l'altezza d'onda osservata.
- Peak period: Periodo d'onda al quale è associato il maggior contenuto energetico dell'onda stessa.
- Direction (nautical): direzione della provenienza del vento espressa in gradi.
- Directional spreading: parametro che rappresenta lo stato di formazione dell'onda, es. onda in scaduta (10°), onda di mare vivo (30°) ecc.

Prima delle modellazioni si è proceduto a testare il modello d'onda generato dal Modulo SWAN del Delft3D. Si è proceduto ricreando dei modelli d'onda confrontabili con i dati registrati nel database della R.O.N..

Sono stati quindi osservati i dati della Rete Mareografica Nazionale e identificati dei punti da modellizzare col software in modo da confrontare poi questi dati ottenuti con i dati reali delle Boe R.O.N.. Le condizioni al contorno sono state quindi calcolate sulle condizioni medie stagionali rilevate dalla boa nel periodo d'attività.

Sono stati quindi creati modelli d'onda (modulo SWAN) e relativi modelli idrodinamici (modulo FLOW) al fine di ricreare le condizioni caratterizzanti la mobilitazione dei

sedimenti dello shoreface e la conseguente formazione o rimozione delle strutture sottomarine prossime alla zona di battigia (barre, truogoli ecc.).

Per una più comoda consultazione si è scelto di rappresentare nella tesi le simulazioni degli eventi reali registrati e gli eventi maggiormente efficaci nell'area di studio, ovvero venti di Scirocco e Levante, con intensità 10 m/s.

### 6.3 Risultati del modello

I risultati ottenuti dalle varie simulazioni numeriche consentono di definire in maniera verosimile gli scenari idrodinamici innescati dal moto ondoso in atto nella spiaggia del Poetto.

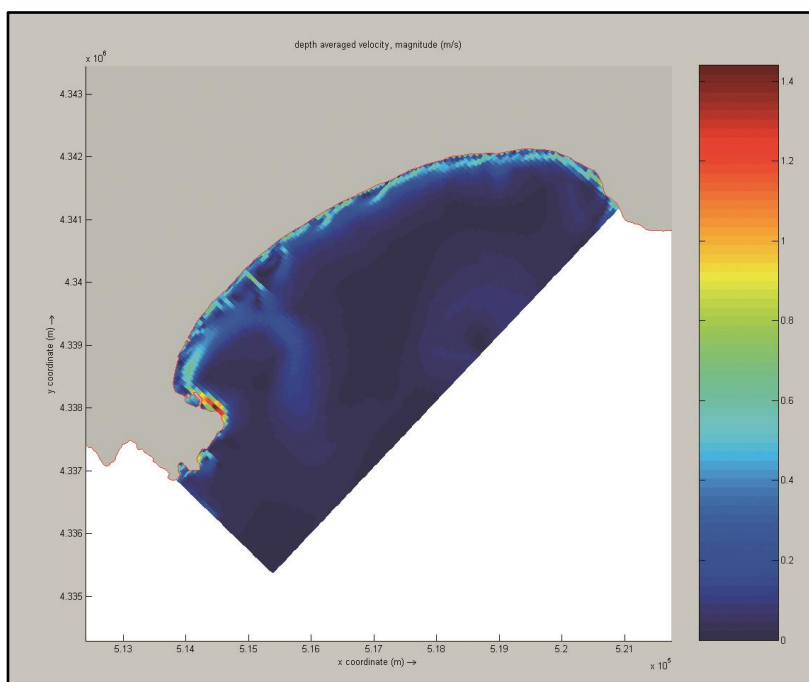
#### Simulazione dell'evento proveniente da Sud Est

Evento Meteomarinico:			Condizioni delle onde:	
Direzione :	Velocità (m/s):	Durata (h):	Hs (m):	T <sub>p</sub> (s):
145°	13	24	2	7

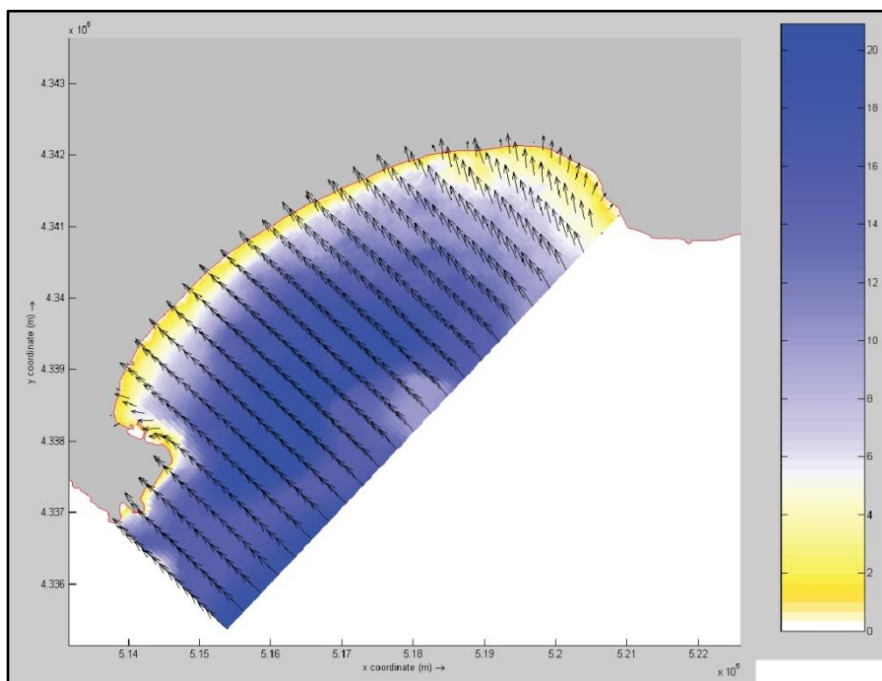
Il vento di scirocco (Sud Est) genera gli eventi meteomarinici più frequenti del periodo autunnale/invernale. L'evento modellizzato proveniente da SE (Figura xx) è caratterizzato da moto ondoso che attiva processi di rifrazione sull'isobata dei -3 metri che causano una leggera rotazione dei vettori d'onda in senso antiorario. Per effetto di tale rotazione sottocosta, con eventi così intensi, i vettori d'onda non riescono a disporsi nuovamente ortogonali alla linea di riva su tutta la spiaggia. Questa situazione si mantiene invariata nell'arco delle 24 ore di simulazione (Figura 58). L'effetto idrodinamico che ne consegue genera una corrente longshore nel settore sud-occidentale della spiaggia che scorre verso NE, generando trasporto solido longshore nella stessa direzione. La corrente longshore viene interrotta dopo circa 800 metri dalle correnti rip perpendicolari alla linea di costa. Nel settore centrale, poche ore dopo l'inizio dell'evento, si generano diverse correnti trasversali di rip orientate verso SO. Questi flussi innescano diverse celle di circolazione alternate in senso orario e antiorario. Contemporaneamente, nell'estremo settore nord-orientale si genera una corrente longshore che scorre verso SW. Questa corrente viene interrotta lungo riva da diverse rip perpendicolari alla linea di costa.

Dopo poche ore dall'inizio dell'evento, la corrente che trova origine dal lato occidentale della spiaggia ne incontra un'altra di senso opposto nel settore centro-occidentale generando un

grande rip current in direzione SE che si sviluppa per circa 800. I valori di corrente riscontrati, anche in presenza di moto ondoso di una certa intensità, sono sempre inferiori a 1 m/s.



**Figura 58.** .Restituzione di una simulazione idrodinamica per un'onda proveniente da 145°N. Caratteristiche d'onda a largo:  $H_s=2$ ,  $T_p=7.0$  s,  $Dir=145^\circ N$



**Figura 59.** Direzione del moto ondoso in approccio alla costa. Direzione evento 145°N.

## Simulazione dell'evento proveniente da Sud Ovest

Evento Meteomarinò:			Condizioni delle onde:	
Direzione :	Velocità (m/s):	Durata (h):	Hs (m):	T <sub>p</sub> (s):
220°	7	24	2	7

Le onde generate dai venti provenienti da SO (Libeccio) subiscono il fenomeno di rifrazione in corrispondenza della batimetria di -2/-3 metri. Le simulazioni mostrano chiaramente un regime idrodinamico caratterizzato dalla presenza di una corrente litoranea prevalente rivolta da ovest verso est. vento SO genera una corrente longshore verso NE generare un trasporto solido litorale nella stessa direzione. La corrente di lungo riva viene interrotta dopo 450 metri da piccole correnti di rip trasversali rispetto alla riva orientate verso E ed E-SE.

Nel settore centrale della spiaggia si generano una serie piccoli flussi lungo riva con lunghezza variabile tra 100 e 200 metri che cambiano direzione e diventano delle correnti di rip trasversali rispetto la linea di riva che scorrono in direzione perpendicolare verso E-NE.

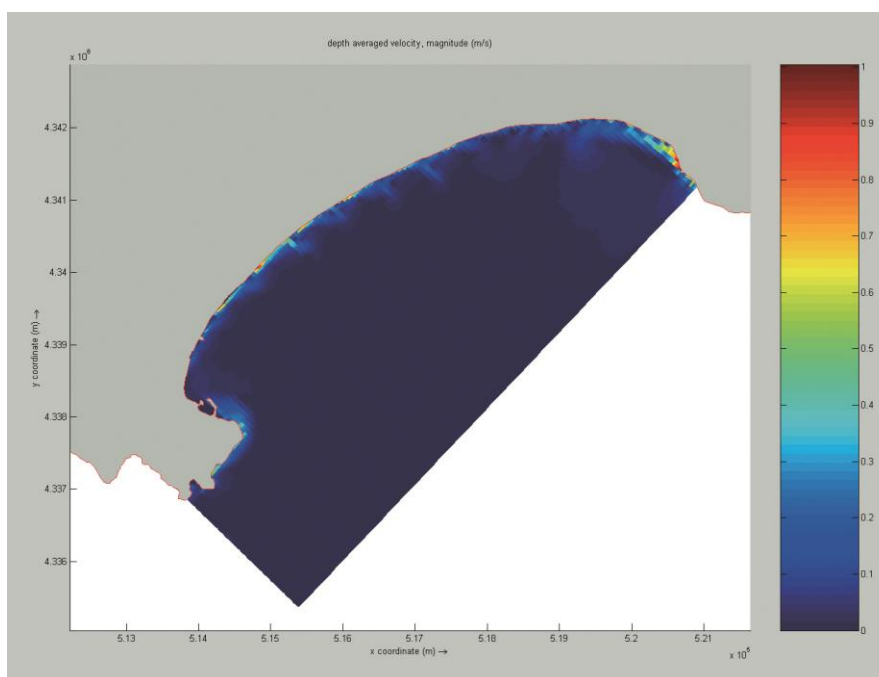


Figura 60. Restituzione di una simulazione idrodinamica per un'onda proveniente da 220°N. Caratteristiche d'onda a largo: Hs=2, T<sub>p</sub>=7.0 s, Dir=220°N

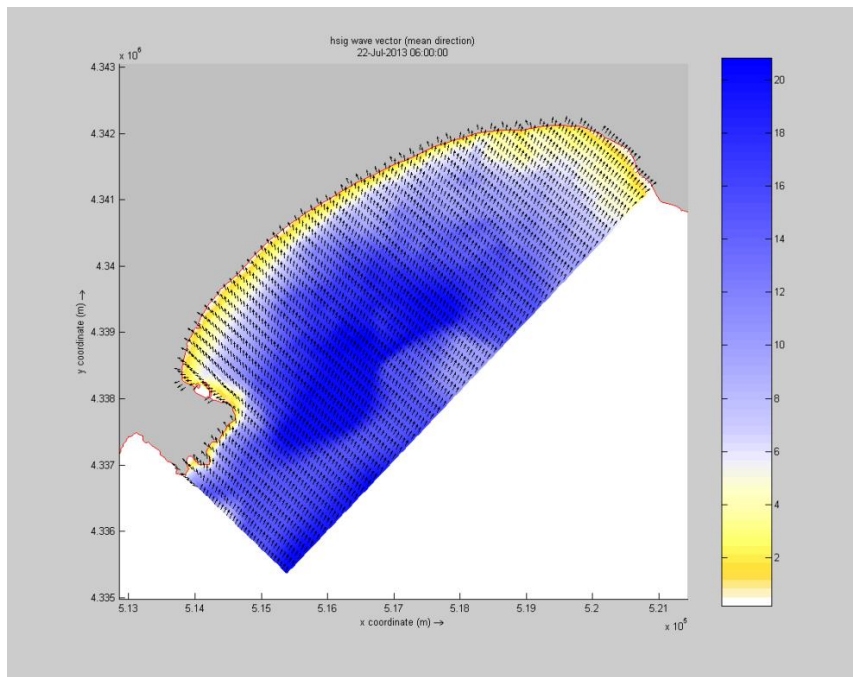


Figura 61. Direzione del moto ondoso in approccio alla costa. Direzione evento 220°N.

Dalle restituzioni grafiche del modello sono stati ricavati degli schemi di circolazione idrodinamica che sono stati inseriti nella “Carta sedimentologica e morfodinamica della spiaggia del Poetto”(Figura 62).

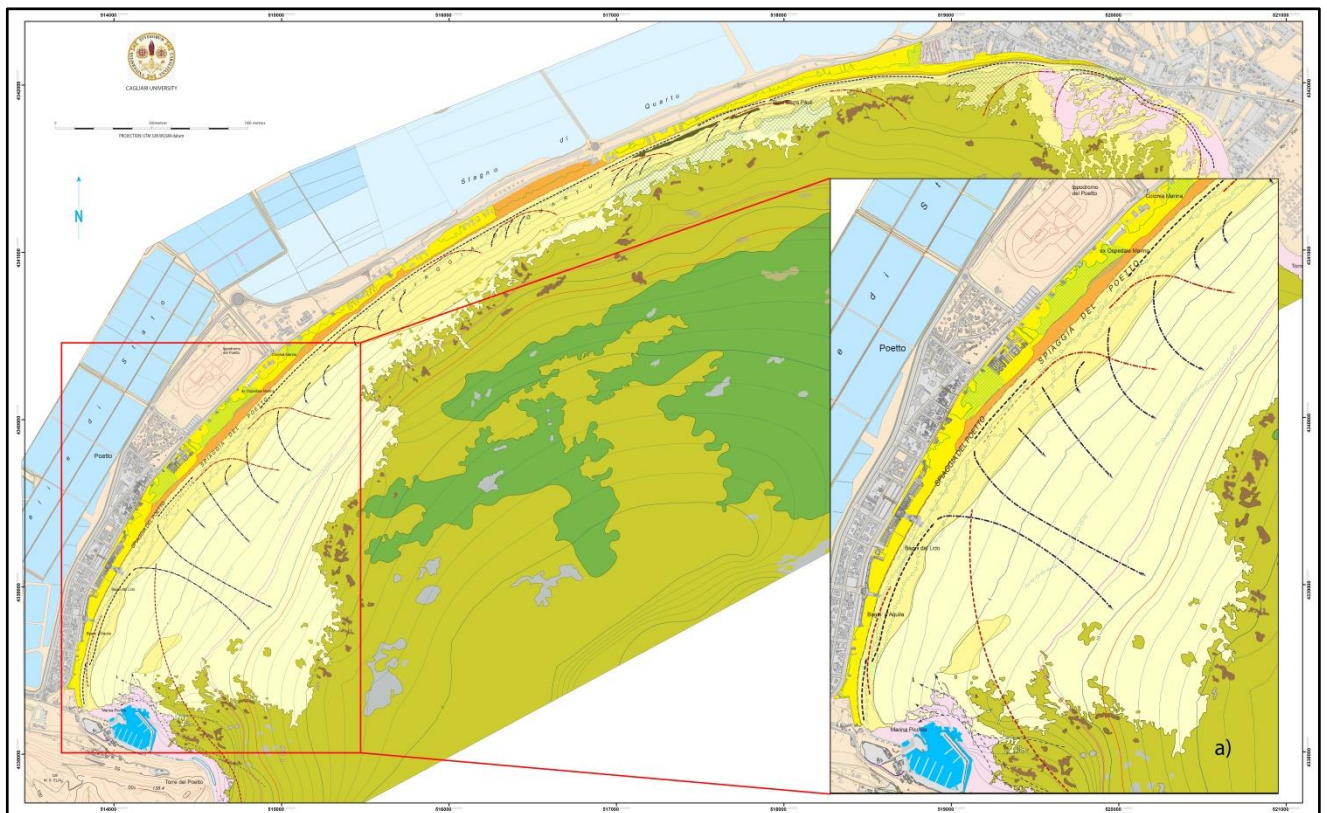


Figura 62. Esempio di schema della circolazione idrodinamica inserito nella Carta sedimentologica e morfodinamica della spiaggia del Poetto. Le correnti sono rappresentate da linee tratteggiate e frecce.



## 7.0 Video-Monitoraggio Costiero

La tecnica del video-monitoraggio costiero, è stata utilizzata con lo scopo di studiare e monitorare l'evoluzione morfodinamica della spiaggia del Poetto. In questo capitolo vengono descritte le caratteristiche e le modalità di funzionamento della stazione di video-monitoraggio, l'attendibilità dei dati video-morfologici, le procedure di elaborazione delle immagini (image processing) per l'interpretazione delle morfologie.

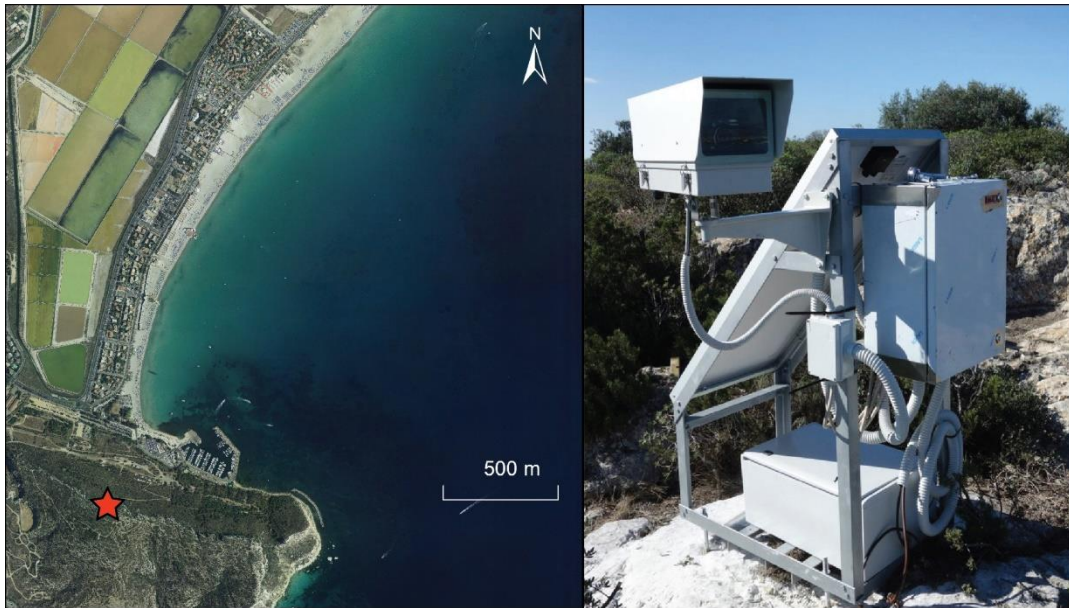


Figura 63. Posizione e immagine della stazione di video-monitoraggio della spiaggia del Poetto.

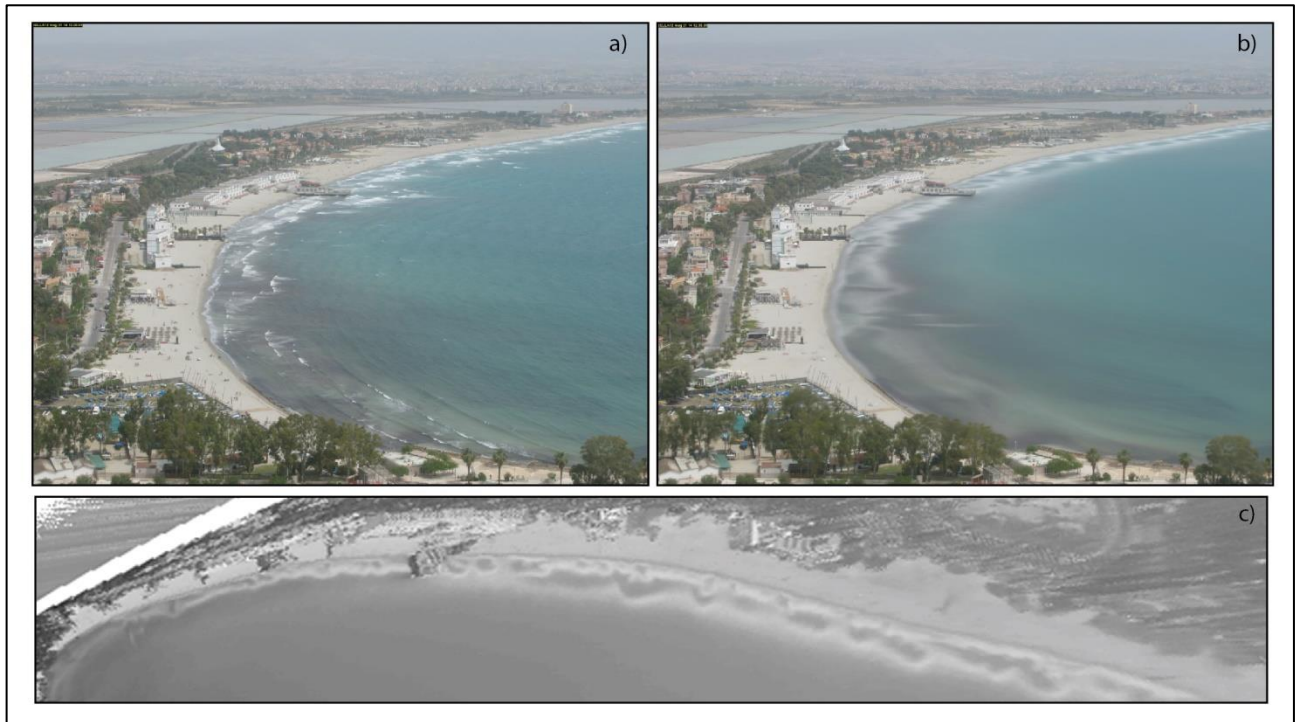
### 7.1 La stazione di video-monitoraggio

Una stazione di video-monitoraggio low cost a bassa frequenza di acquisizione è stata installata nell'ottobre del 2013, è posizionata su una cengia del promontorio del Capo Sant'Elia a una quota di 129 metri (Lat: 39 ° 11'24 "Lon: 9 ° 09'29")(Figura 63).

Il sistema è composto da una macchina fotografica digitale Canon G9 collegata a un computer con disco a stato solido per lo stoccaggio delle immagini e da un sistema di alimentazione fotovoltaico. La stazione è funzionante dal 29 ottobre del 2013 e sono stati analizzati i dati acquisiti sino all'11 maggio 2015.

La stazione di videomonitoraggio ha dimostrato un'affidabilità di registrazione del 92% viste che ha funzionato regolarmente 511 giorni su 560. Durante il periodo di funzionamento sono state acquisite immagini durante 82 eventi significativi di cui 41 sono noti i dati del clima ondosso. Il sistema è programmato per acquisire immagini durante 2 intervalli giornalieri da un ora ciascuno dalle 12 alle 13 e dalle 14 alle 15, evitando così i disturbi che si generano per

il riflesso del sole sul mare durante le prime ore del mattino e al tramonto. Vengono registrate 180 *snapshot* durante ogni intervallo con risoluzione di 9216 dpi (12 megapixel – d 4.000 x 3.000). La *snapshot* (Figura 64a) è una foto istantanea che documenta semplicemente l'attività del sistema spiaggia, ovvero ciò che accade al momento dall'acquisizione, quindi è utile ad esempio per osservare le caratteristiche del campo d'onda.



**Figura 64.** Immagini *snapshot* (a) e *timex* (b) eseguite il giorno 21 Maggio 2014 alle ore 12. In (c) la rispettiva foto *timex* rettificata e proiettata nel sistema di riferimento UTM WGS84.

Le *snapshot* sono state processate per ottenere immagini *time-exposure* (*timex*) (Figura 64b), ovvero immagini medie costruite su un'ora di registrazione. Le immagini sono state mediate tramite un algoritmo sviluppato con Matlab2013b. Le *timex* possiedono la maggiore potenzialità nel fornire informazioni di tipo morfologico ed idrodinamico (Koningsveld et alii, 2007; Holman, 2007; Archetti, 2009). Da questo tipo di immagine si può riconoscere la morfologia della spiaggia emersa e sommersa tramite la mappatura di alcuni video-elementi, che sono più o meno direttamente connessi alla dinamica del moto ondoso. Ad esempio, la posizione della frangenza a riva e delle barre sommerse.

Come si vede da Figura 64c, la posizione dei frangenti è ben documentata da bande chiare (alta luminosità) che si formano in conseguenza al processo di media temporale. Da un punto di vista statistico, quindi, le bande chiare delle immagini *timex* sono caratterizzate da valori massimi di intensità luminosa che documentano il posizionamento xy delle porzioni di spiaggia in cui c'è stata una maggiore frequenza di frangimento durante l'intervallo di 1 ora. Dalla *timex* è quindi possibile ottenere un'indicazione sul posizionamento (xy) della

frangenza sulle barre mediata in 60 minuti. Differentemente, la corrispondente immagine snap non fornisce altrettanto semplicemente tale evidenza, e tantomeno l'informazione statistica associata.

## 7.2 Calcolo della geometria esterna

Un'immagine digitale è una rappresentazione bidimensionale discreta di una porzione tridimensionale dello spazio.

Tale rappresentazione avviene per mezzo di determinati processi di campionamento, in cui la misura della luce è demandata a sensori elettronici che convertono l'intensità del segnale luminoso in un impulso elettrico semplice. La rappresentazione dello spazio fotografato è detta discreta in quanto la foto digitale è composta da un numero finito di elementi principali, detti pixels. Generalmente, un'immagine RGB codifica, per ogni pixel, il colore per mezzo di tre livelli o bande di colore (R rosso; G verde, B blu). Ne risulta che, un'immagine digitale, sarà costituita da  $m$  per  $n$  pixels, di cui  $m$ -pixels lungo l'asse verticale della foto ed  $n$ -pixels lungo quello orizzontale. Ulteriormente gli  $m$  per  $n$  pixels della foto sono ripetuti per ogni livello di colore  $i$ , nel caso RGB  $i=3$  ( $i=1$  rosso,  $i=2$  verde,  $i=3$  blu). In termini puramente matematici la foto digitale è una matrice dove ogni pixel è caratterizzato da una coppia di coordinate (coordinate immagine), di seguito chiamate  $\mathbf{u}$  e  $\mathbf{v}$  ( $u$  = riga e  $v$  = colonna).

Ogni processo applicato ad una foto digitale risulta quindi da una serie di operazioni matematiche eseguite per ogni elemento (pixel) della matrice (foto).

Il video-monitoraggio utilizza come dato di input una visione prospettica di un determinato tratto litorale (fotografia). Vengono utilizzate, quindi, una serie di procedure matematiche per eliminare l'influenza della distorsione prospettica sulla rappresentatività spaziale della foto, e quindi per analizzare la foto in chiave metrica (fotogrammetria) ed estrarre informazioni circa lunghezze e relazioni tra lunghezze desumibili da foto. Il grado di accuratezza delle potenziali informazioni spaziali estraibili da una foto sono funzione dell'orientazione spaziale della camera (definita dalla sua geometria esterna). Definire i parametri della geometria esterna è funzionale alla geo-referenziazione del dato immagine. Una volta determinati tali parametri, è possibile calcolare la relazione geometrica tra coordinate immagine e coordinate spaziali, ovvero è possibile proiettare una foto digitale prospettica in un nuovo sistema di coordinate piane in cui l'unità di misura dei pixels può rappresentare un'unità di misura metrica. La nuova foto digitale è detta rettificata (o ribaltata).

I parametri di orientamento esterno definiscono la posizione della fotocamera nello spazio reale, il loro calcolo permette di stabilire la relazione geometrica tra le coordinate immagine ( $u, v$ ) e le coordinate spaziali ( $x, y, z$ ). I parametri che definiscono la geometria esterna di un sistema di ripresa sono definiti da tre valori angolari (Figura 65): l'azimuth ( $\varphi$ ), il tilt ( $\tau$ ) e il roll ( $\sigma$ ).

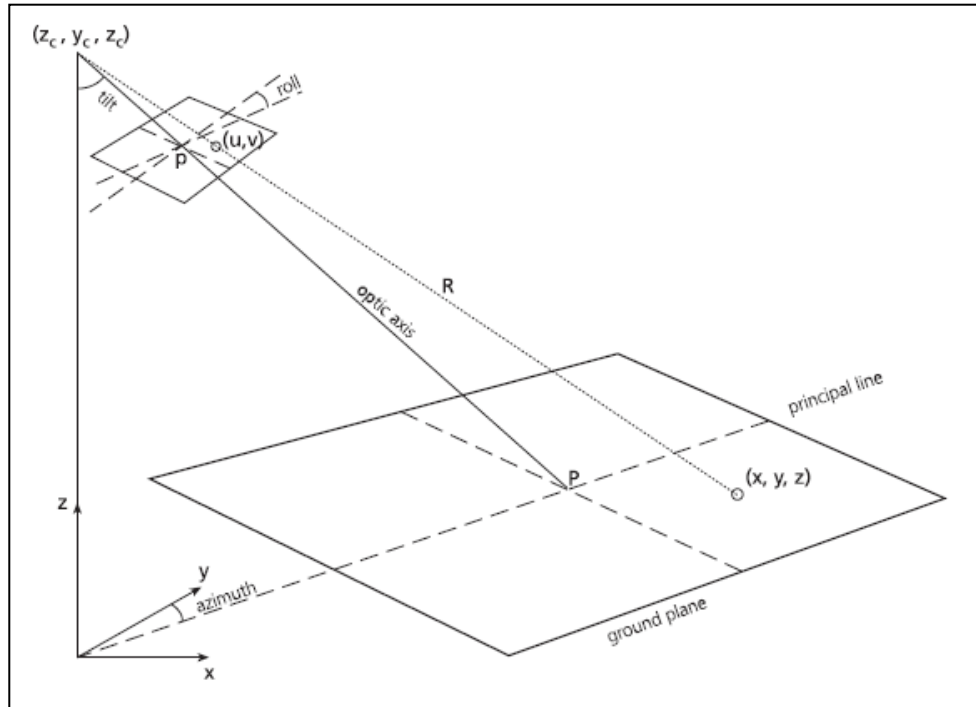


Figura 65. Georeferenziazione di un immagine obliqua. Relazione tra coordinate immagine ( $u, v$ ) e coordinate reali ( $x, y, z$ ).

La relazione tra coordinate immagine ( $u, v$ ) a coordinate spaziali ( $x, y, z$ ) è formalizzata a mezzo di una serie di coefficienti lineari:

$$u = \frac{L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \quad \text{e} \quad v = \frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1}$$

dove,  $L_1$ - $L_{11}$  rappresentano funzioni lineari di sette incognite che rappresentano la posizione del sistema di ripresa ed  $f$  (focale effettiva):

$$\begin{aligned} L &= -(x_c m_{31} + y_c m_{32} + z_c m_{33}) \\ L_1 &= \frac{(u_0 m_{31} + f m_{11})}{(\lambda_u L)} \\ L_2 &= \frac{(u_0 m_{32} + f m_{12})}{(\lambda_u L)} \\ L_3 &= \frac{(u_0 m_{33} + f m_{13})}{(\lambda_u L)} \\ L_4 &= -(L_1 x_c + L_2 y_c + L_3 z_c) \\ L_5 &= \frac{(v_0 m_{31} + f m_{21})}{\lambda_v L} \\ L_6 &= \frac{(v_0 m_{32} + f m_{22})}{\lambda_v L} \\ L_7 &= \frac{(v_0 m_{33} + f m_{23})}{\lambda_v L} \\ L_8 &= -(L_8 x_c + L_9 y_c + L_{10} z_c) \\ L_9 &= \frac{m_{31}}{L} \\ L_{10} &= \frac{m_{32}}{L} \\ L_{11} &= \frac{m_{33}}{L} \end{aligned}$$

Gli m-coefficienti descrivono le successive rotazioni l'azimuth ( $\phi$ ), il tilt ( $\tau$ ) e il roll ( $\sigma$ ):

$$\begin{aligned}
 m_{11} &= \cos \phi \cos \sigma + \sin \phi \cos \tau \sin \sigma & m_{23} &= \sin \tau \cos \sigma \\
 m_{12} &= -\sin \phi \cos \sigma + \cos \phi \cos \tau \sin \sigma & m_{31} &= \sin \phi \sin \tau \\
 m_{13} &= \sin \tau \sin \sigma & m_{32} &= \cos \phi \sin \tau \\
 m_{21} &= -\cos \phi \sin \sigma + \sin \phi \cos \tau \cos \sigma & m_{33} &= -\cos \tau \\
 m_{22} &= \sin \phi \sin \sigma + \cos \phi \cos \tau \cos \sigma & &
 \end{aligned}$$

Queste incognite possono essere calcolate tramite l'ausilio di una serie di punti di riferimento nell'immagine (Ground Control Point) di cui siano note sia le coordinate immagine (u,v) sia le coordinate spaziali (x, y, z). Sebbene questa procedura riesca a calcolare indirettamente il posizionamento della fotocamera ( $x_c, y_c, z_c$ ), Holland et al. (1997) indicano che la loro misura diretta fornisce una maggiore accuratezza della trasformazione. Per tale motivo, sono state misurate le coordinate spaziali del baricentro del sistema di ripresa.

Conoscendo almeno 3 tre coordinate reali dell'area ripresa (Ground Control Points) è possibile risolvere le equazioni di *collinearità* e calcolare le incognite (parametri della geometria esterna). Per svolgere questa operazione sono state utilizzati 21 GCPs (Ground Control Points) acquisiti dal rilevamento LIDAR 2008.

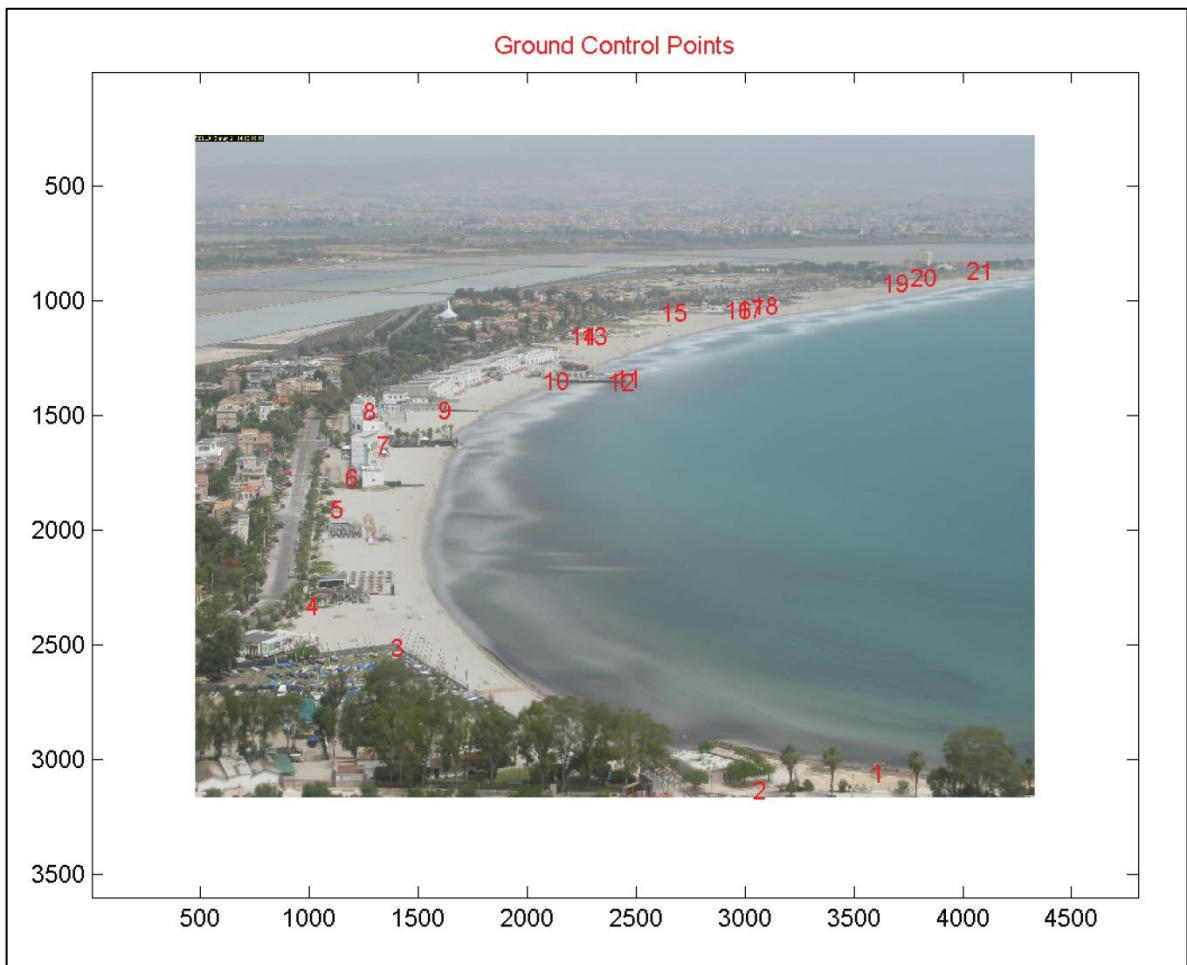


Figura 66. Immagine timex con i GCPs. In ascissa e in ordinata sono riportate le coordinate u,v dei pixels.



### 7.3 Geo-referenziazione e ribaltamento delle foto

La geo-referenziazione delle immagini è funzione dei parametri di geometria esterna della foto camera ( $\varphi$ ,  $\tau$ ,  $\sigma$ ,  $x_c$ ,  $y_c$ ,  $z_c$ ) e dalla focale effettiva  $f$ .

Partendo dalla seguente equazione è possibile geo-referire le immagini:

$$\begin{bmatrix} L_1 - L_9u & L_2 - L_{10}u & L_3 - L_{11}u \\ L_5 - L_9v & L_6 - L_{10}v & L_7 - L_{11}v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v - L_4 \\ v - L_8 \end{bmatrix}$$

dove i coefficienti L-L11 sono stati precedentemente descritti. La trasformazione di ogni pixel dell'immagine obliqua (u,v) permette di localizzare nello spazio (x,y,z) una determinata porzione di spiaggia fotografata. Dal punto di vista matematico, questa trasformazione è di tipo bidimensionale, ovvero trasforma il piano immagine (foto obliqua) nel piano spiaggia, assumendo una quota di riferimento (z) costante. Generalmente, questo significa che le coordinate xy vengono proiettate su un piano la cui quota è coincidente al livello altimetrico 0.

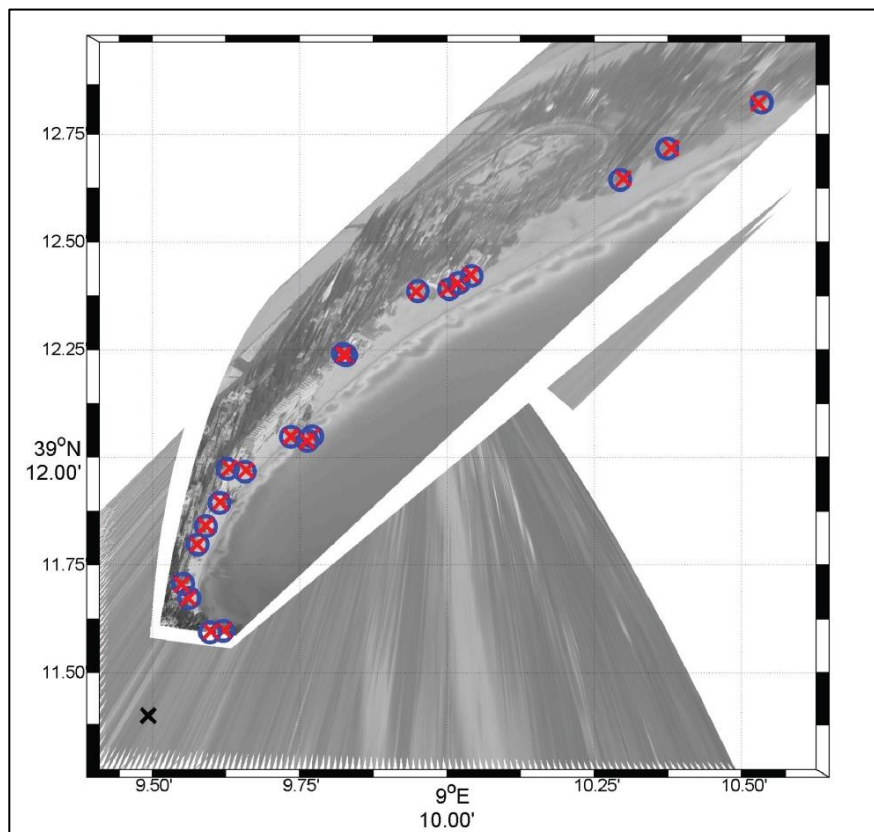


Figura 677. Immagine timex rettificata e proiettata nel sistema di geografico. La croce nera indica la posizione della stazione di videomonitoraggio

Un applicativo Matlab dedicato impostato con gli algoritmi descritti (Pawlowicz, 2003), è stato utilizzato per risolvere la relazione esposta in precedenza per ogni pixel della foto

prospettica (corretta dalla distorsione ottica) e ha fornito una nuova immagine ribaltata caratterizzata da una risoluzione di 2.23m x 2.23m che copre 2574m lungo costa e fino a 430m trasversalmente alla costa (Figura 67). l'errore di posizionamento massimo xy (RMS) è di 4.78 m e varia in funzione della distanza dalla stazione di video-monitoraggio e dai GCPs.

#### **7.4 Interpretazione delle immagini**

Le analisi interpretative sono state svolte sulle immagini timex rettificate che offrono una visione planimetrica della zona a barre e a truogoli che viene messa in evidenza durante gli eventi d'onda. Queste immagini consentono di identificare le posizioni e le forme di elementi chiave costieri come le barre sommerse e i canali di rip.

La classificazione delle morfologie è stata realizzata usando un *sorting* visivo basato sul modello di Wright and Short (1984) descritto in precedenza. Il modello è composto da tre principali tipi spiaggia: dissipativo, intermedio e riflettente. Lo stato intermedio è suddiviso in quattro morfotipi dal più dissipativo al più riflettente: Longshore Bar and Through (LBT), Ritmic Bar e il Beach (RBB), Trasversal Bar e Rip (TBR) e Low Tide Terrace (LTT).

I vari morfotipi sono stati riconosciuti in base alle caratteristiche delle barre, come la forma (lineare o a semilune), l'orientamento (perpendicolare, trasversale e parallelo a riva-parallelo) e la connessione alla riva. I morfotipi LBT e RBB presentano una barra distaccata dalla spiaggia emersa con una depressione significativa e la presenza di deboli canali di rips; nelle categorie TBR e LTT la barra è collegata alla riva ma caratterizzata da canali di rips (forte per il TBR, e debole per i tipi LTT).

L'analisi interpretativa ha messo in evidenza 4 zone con caratteristiche morfologiche omogenee (figura 68) lungo il tratto di spiaggia studiato. Queste zone variano di ampiezza durante l'anno. Variano anche le caratteristiche morfologiche delle barre sommerse (forma, orientamento e connessione alla spiaggia emersa) a seconda delle caratteristiche dell'evento d'onda registrato. La prima zona si estende dal Capo Sant'Elia per circa 300 metri. Appare con una riva lineare priva di cuspidi e con barre prive di canali di rips. Presenta quindi morfologie tipiche di spiaggia dissipativa che mantiene durante tutto l'anno (figura 68).

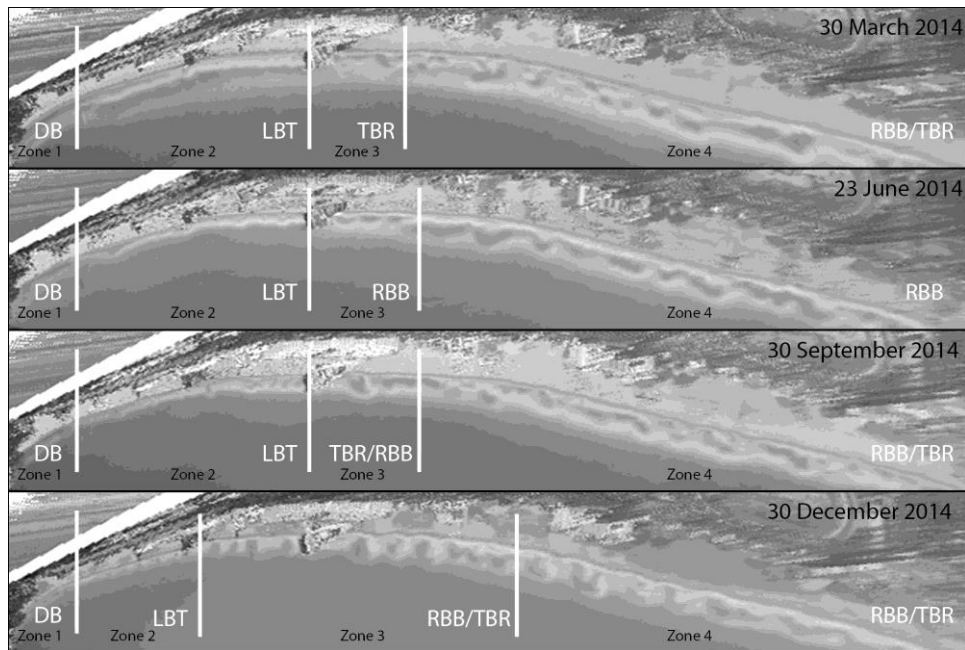


Figura 68. La figura mostra i principali situazioni maggiormente ricorrenti durante il periodo di acquisizione. Le immagini sono state acquisite a marzo , giugno , settembre e dicembre 2014. L'immagine mostra anche la fvariabilità lunfo riva delle 4 aree individuate.

La seconda zona si estende per 500 metri e termina in coincidenza di uno stabilimento balneare che interrompe la continuità della linea di riva con una rotonda sul mare palificata. La seconda zona possiede morfologie classificabili come LBT. Presenta una barra esterna regolare distaccata di circa 40 metri dalla barra interna con una depressione significativa. La barra interna, molto vicina al foreshore, presenta canali rips deboli che tendono ad accentuarsi durante il periodo primaverile/estivo sino a far assumere alla barra delle piccole forme crescentic (25m). Una terza zona si estende per circa 200 metri. In primavera/estate sono visibili crescentic bars regolari che cambiano durante l'inverno in barre trasversali con profondi e marcati canali rips. A questa sono associabili i morfotipi RBB e TBR.

La quarta zona è caratterizzata da una forte variabilità durante l'anno sia morfologica che spaziale. Le morfologie prevalenti si possono apprezzare nella Figura 68. Nel Marzo 2014 presenta delle morfologie complesse costituite da barre doppie (Figura 68). La barra esterna è quasi saldata collegata alla barra interna con barre trasversali. Presenta canali rips ben formati che si orientano a seconda della direzione del moto ondoso. La barra più interna è collegata alla linea di riva ed è caratterizzata dalla presenza canali rips trasversali.

Nelle immagini acquisite in Settembre 2014 (periodo estivo), è possibile osservare una tipica morfologia RBB, la barra interna è saldata alla linea di riva che risulta più lineare. Mentre la barra esterna diventa quasi l'unica barra con forme crescentic. Nelle immagini di Dicembre 2014 è invece evidente una morfologia di tipo TBR che presenta delle cuspidi sulla linea di riva e barre trasversali alternate da canali rips pronunciati e profondi.



## 7.5 Discontinuità morfologica delle barre

Negli eventi in cui sono visibili due barre, l'andamento della barra esterna è più lineare rispetto a quello della barra interna che invece risulta articolato. Spesso le flessioni della barra interna sono in fase con le uncinature della linea di riva.

Dalle immagini registrate durante gli eventi d'onda si osservano delle discontinuità della morfologia delle barre lungo riva (Figura 69) in coincidenza della *Rotonda del Lido* e dei resti sommersi di un vecchio canale di regimentazione idrica delle saline. Queste strutture inducono delle discontinuità nella morfologia del sistema di barre (Figura 69) ben identificabili dalle immagini elaborate.

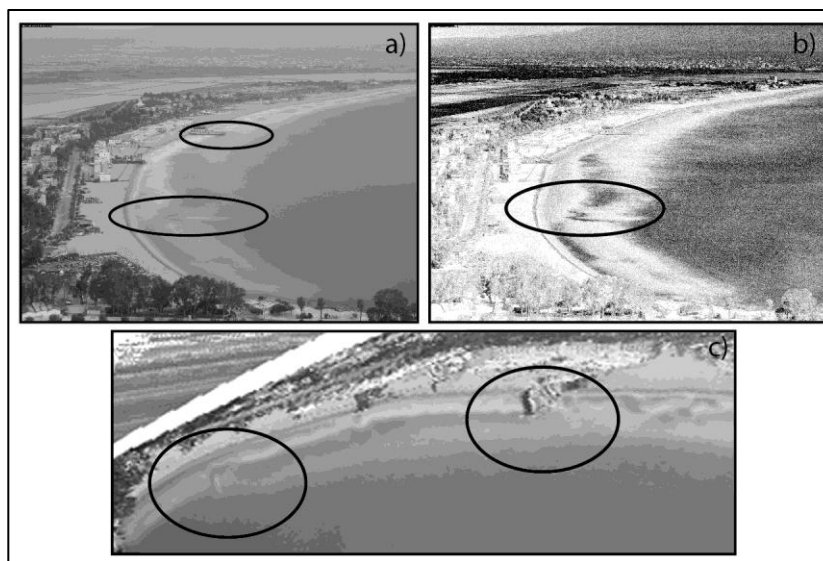


Figura 69. Fenomeno di Bar switching osservati nella Spiaggia del Poetto.



Figura 70. Esempio di bar switching a Wanganui. Da Shand et al. (2001).

Le modalità con cui un sistema di barre può accomodare una discontinuità dei fondali è individuabile in un'evoluzione differente delle porzioni sopraflutto e sottoflutto a tale discontinuità. Tale fenomeno può essere confinato sia nel tempo che nello spazio. Wijnberg & Wolf (1994), a seguito dell'analisi del comportamento di lungo periodo delle barre lungo le coste olandesi, individuano dei momenti in cui determinate porzioni di litorale erano caratterizzate da una evoluzione delle barre non uniforme lungo settori adiacenti di costa. Gli autori ascrivono tale fenomeno ad una migrazione fuori fase delle barre, ovvero ad un

avanzamento (o arretramento) presso un settore ne corrisponderebbe uno opposto nei settori adiacenti. Shand et al. (2001) individuano un simile comportamento lungo le coste sabbiose di Wanganui (Nuova Zelanda) e lo relazionano alla discontinuità morfologica rappresentata da un molo a protezione di una foce.

Gli Autori analizzano il meccanismo tramite cui un sistema di barre ripristina le discontinuità planimetriche, e lo denominano *bar switching* (Figura 70) (biforcazione della barra). Le forzanti che generano tali episodi sono sempre caratterizzati correnti lungo riva molto consistenti.

## 8.0 Conclusioni

La morfodinamica della spiaggia urbana del Poetto è stata studiata tramite l'applicazione di una metodologia multidisciplinare che ha permesso di inquadrare i principali fattori ambientali che guidano e controllano il sistema costiero: Clima, Sedimenti, Morfologia.

L'analisi delle serie storiche dei dati climatici ha evidenziato i reali settori di traversia e le caratteristiche degli eventi significativi che interessano la spiaggia del Poetto.

L'area di studio è influenzata principalmente dai mari provenienti dal II e dal III Quadrante, nello specifico generati dallo Scirocco (vento proveniente da Sud-Est) e dal Libeccio (vento che giunge da Sud-Ovest).

Nell'area di studio l'intensità dei venti foranei è generalmente maggiore se è associati ai fetch più lunghi (come nel caso del vento di Scirocco che arriva spesso a 10/15 m/s). Lo studio del clima ondoso ha consentito di ricavare i valori delle caratteristiche delle onde connesse alle mareggiate provenienti dalle principali direzioni del settore di traversia della spiaggia del Poetto. In generale, si può affermare che il clima di moto ondoso è caratterizzato da onde di bassa energia, con altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) minore di 1 m (80% dei casi). 178 eventi d'onda significativi registrati dalle boe nel Golfo di Cagliari sono stati classificati col metodo di Mendoza e Jimenez (2004). Il 53% degli eventi sono classificabili come *deboli* (I classe - Weak), il 27% come *moderati* (II classe - moderate), il 15% ricadono nella classe *significativi* (III classe - significative) e il 5% risultano *severi* (IV classe severe).

Nel golfo di Cagliari il regime di marea è di tipo microtidale: infatti nell'area in esame le maree hanno componenti sia diurne che semidiurne, con un valore di escursione massima in sizigie pari, mediamente, a 30/40 cm e che scende a 15 cm in quadratura. I valori relativi alle escursioni di marea, seppur modesti, assumono particolare importanza se sommati ad altri agenti meteo marini locali, potenzialmente potrebbero raggiungere un soprizzo di 1.16 m rispetto al livello medio.

Le analisi di interpretazione delle fotogrammetrie e dei dati Side Scan Sonar, hanno permesso di ottenere una cartografia di base dell'area di studio, sulla quale sono state elaborate le 7 campagne di acquisizione di nuovi dati sedimentologici, topografici e batimetrici. Durante le campagne, sono stati prelevati 71 campioni sedimentologici e sono stati rilevati 132 profili cross shore per un totale di 100 miglia di informazioni batimetriche e circa 80 km di informazioni topografiche. Sulla base dei dati batimetrici raccolti durante le

campagne è stato elaborato uno schema batimetrico che è stato inserito nella “*Carta tessiturale e morfodinamica della spiaggia del Poetto*”.

I risultati delle analisi tessiturali composizionali e statistiche dei sedimenti hanno portato all’individuazione delle caratteristiche sedimentologiche attuali presenti nell’area di studio. Lo studio sedimentologico ha permesso di ottenere una rappresentazione planimetrica delle conoscenze sui sedimenti superficiali della spiaggia, sintetizzata nella “*Carta tessiturale e morfodinamica della spiaggia del Poetto*” in scala 1:8.000. Inoltre le analisi di laboratorio hanno fornito i dati utili per impostare i modelli numerici di simulazione idrodinamica e lo studio della morfodinamica.

Le caratteristiche osservate nei sedimenti di shoreface (Figura 28) corrispondono a quelle già note bibliografia (Lecca *et al.*, 2005, Cossellu, 2008). Dal punto di vista granulometrico sedimenti di spiaggia sommersa hanno generalmente una moda compresa negli intervalli delle sabbie fini e molto fini. La composizione del sedimento è prevalentemente terrigena.

In spiaggia emersa e in battigia la granulometria dei sedimenti è rappresentata da sabbie medie e grosse con una discreta componente ghiaiosa. Il quarzo, proveniente dagli apporti fluviali del *Graben* del Campidano, rappresenta il 50-60% del sedimento. La componente bioclastica rappresenta, nei campioni prelevati sulla battigia, tra il 15% e il 40% del totale, nei campioni di spiaggia emersa tra il 20% e il 47%.

I dati acquisiti durante i 6 rilievi topografici e batimetrici, hanno permesso di ricostruire la morfologia della spiaggia e definire le variazioni morfologiche tramite il confronto morfometrico dei vari assetti registrati durante i mesi dei rilievi.

In particolare sono state prese in considerazione le pendenze della spiaggia sommersa, della battigia e della spiaggia sottomarina.

Attraverso le analisi morfometriche sono state definite le variazioni spaziali e temporali dei profili di spiaggia. Il riconoscimento di variazioni morfologiche spaziali è il criterio di base secondo il quale è stata suddivisa l’area di studio in 9 zone.

Dalle analisi sulle variazioni spaziali dei profili di spiaggia acquisiti durante le 6 campagne di rilievo è emerso che lo shoreface del Poetto è relativamente stabile. Infatti non si sono registrati cambiamenti considerevoli nelle pendenze. Nella prima parte occidentale della spiaggia (Zona 1) è presente una zona di surf ampia circa 160 metri con un basso gradiente di pendenza, dove sono presenti tre ordini di barre che si dispongono parallelamente alla linea di riva. Il corpo centrale (Zone 2, 3, 4, 5 e 6) della spiaggia si estende per circa 5 km, la surf zone è caratterizzata da 2 ordini di barre con ampiezza variabile tra i 160 e 240 metri.

Infine gli ultimi 1300 metri del settore orientale, sono caratterizzati da un sistema a barra singola ampio circa 70 metri che si sviluppa parallelamente alla linea di riva.

Dalle analisi è emerso che le barre subiscono delle leggere variazioni altimetriche, ma non così importanti da cambiare sensibilmente la pendenza della surf zone.

La battigia risulta l'elemento morfologico più attivo con pendenze variabili da tra i 2° e gli 8°, inoltre sono state registrate oscillazioni della posizione della linea di riva di pochi metri tra un rilievo e l'altro.

Dall'applicazione delle formulazioni empiriche di Hellermaier (1982) (profondità di chiusura) e di Hunt (1959) (Run up), è stato possibile definire rispettivamente il limite inferiore e il limite superiore d'azione delle onde in condizioni estreme. Questi limiti sono stati confrontati e validati dalle analisi dei profili, dai numerosi rilievi di campo effettuati durante le mareggiate e dalle immagini acquisite dal sistema di videomonitoraggio costiero.

Dallo studio delle variazioni temporali è emerso che gli assetti dei profili di spiaggia non seguono una vera e propria stagionalità, ma hanno un andamento discontinuo.

La discontinuità nelle variazioni è rintracciabile, oltre che nello spazio anche nel corso del tempo: infatti non è riscontrabile uno stesso andamento in tutti i rilievi. Di conseguenza si intuisce che l'inclinazione dei profili di spiaggia è controllato principalmente dalle onde di mareggiata. I rilievi topografici maggiormente influenzati dal verificarsi delle mareggiate sono quelli di Dicembre 2012, Marzo 2013 e Dicembre 2013.

L'effetto delle mareggiate oltre a provocare un allagamento del retrospiaggia antropizzato, in generale determina un appiattimento dell'alta spiaggia e un aumento delle pendenze di battigia, dovuto all'erosione e allo scalzamento del piedegradino e al deposito, in spiaggia emersa, della lettiera della *Posidonia oceanica* che forma una berma vegetale con spessori superiori al metro specialmente nel settore orientale della spiaggia (zone 7, 8 e 9).

Un "fattore esterno" al sistema morfodinamico naturale, dal quale dipende l'andamento discontinuo delle pendenze di spiaggia sia nello spazio che nel tempo è l'uomo.

Durante i numerosi sopralluoghi, sono state documentate le attività di manutenzione degli stabilimenti che vengono svolte puntualmente dopo ogni mareggiata insieme alla rimozione della *Posidonia* spiaggiata. Queste attività vengono svolte con mezzi pesanti che spianano la spiaggia emersa eliminando le berme e gli assetti morfologici naturali. Queste operazioni

interferiscono con i naturali processi costieri, irrigidiscono il sistema spiaggia e impediscono la configurazione di assetti morfologici in equilibrio con gli eventi climatici.

La definizione dei principali fattori ambientali (clima, sedimenti e morfologia) che guidano e controllano il sistema spiaggia, ha permesso di inquadrare e classificare i *regimi* e gli *stati morfodinamici* della spiaggia del Poetto.

Il *regime morfodinamico* è stato ricavato con la definizione del Surf Scaling Parameter (Guza & Inman, 1975). Il risultato mostra che la spiaggia del Poetto possiede un regime di tipo *Intermedio*.

Gli *stati morfodinamici (o morfotipi)* sono stati ottenuti basandosi sulla velocità di caduta adimensionale  $\Omega$  (Wright & Short, 1984; Short, 1999; Masselink & Short, 2011), che incorpora le caratteristiche dell'onda, la pendenza del profilo di spiaggia e le caratteristiche sedimentologiche del corpo spiaggia.

Gli stati morfodinamici individuati sono di tipo dissipativo solo nella la zona 1, mentre il resto della spiaggia è caratterizzato da stati morfodinamici intermedi. I morfotipi ottenuti sui profili variano da Longshore Bar and Trough (LBT) al Tansvers Bar and Rip (TBR); solo le zone centrali 4 e 5 tendono ad assumere lo stati di Low tide terrace o ridge and runnel (LTT).

Il regime e stati morfodinamici ottenuti risultano perfettamente compatibili con con il clima di moto ondoso caratterizzato da onde di bassa energia, ( $H_s < 1$  m per l'80% dei casi) e dai sedimenti della surf zone che sono costituiti da sabbia fine. La zona 1 risulta di tipo dissipativo probabilmente perché, essendo situata a ridosso del promontorio della Sella del Diavolo, gode dell'effetto baia che condiziona la batimetria e l'energia del moto ondoso.

I dati climatici (onde e vento), sedimentologici e morfobatimetrici sono stati utilizzati per impostare il modello numerico di simulazione idrodinamica.

L'applicazione del software di modellazione idrodinamica Delft3D ha permesso di simulare gli eventi meteomarini registrati nel Golfo di Cagliari sulla spiaggia del Poetto e quindi valutare gli effetti idrodinamici prodotti nella spiaggia sottomarina.

È stato possibile osservare e valutare la dinamica della zona a barre e truogoli (surfzone) e collegare le morfologie rilevate e i morfotipi all'idrodinamica innescata dai principali eventi di moto ondoso provenienti da SE (Scirocco) e da SO (Libeccio).

La modellizzazione dell'idrodinamica ha fornito un quadro completo delle dei processi idrodinamici di trasporto sedimentario legati alle correnti di fondo. Dalle restituzioni grafiche del modello sono stati estrapolati degli schemi di circolazione idrodinamica per ogni evento

simulato; successivamente gli schemi sono stati inseriti nella “*Carta tessiturale e morfodinamica della spiaggia del Poetto*”.

La tecnica del video-monitoraggio costiero è stata utilizzata per analizzare la morfodinamica della zona a barre e a truogoli dei primi 2 km del settore occidentale della spiaggia del Poetto. Attraverso tecniche di image processing sono state create immagini statistiche (timex) e rettificate per ottenere la visione planimetrica. Questa operazione ha permesso di poter osservare le morfologie delle barre messe in evidenza dal moto ondoso. Tramite la mappatura di alcuni video-elementi, che sono più o meno direttamente connessi alla dinamica del moto ondoso è stato possibile estrapolare informazioni morfologiche e idrodinamiche. Dall’interpretazione delle forme rilevate è stato possibile individuare i reali morfotipi della spiaggia del Poetto.

I risultati hanno permesso di validare la classificazione degli stadi morfodinamici eseguita sui profili di spiaggia e i modelli numerici di simulazione idrodinamica eseguiti col Delft3D.

La classificazione eseguita sui profili di spiaggia è coerente con i morfotipi riconoscibili dalle immagini. Gli eventi simulati col Delft3D generano correnti compatibili con le morfologie rilevate col sistema di video-monitoraggio.

Dalle immagini registrate durante gli eventi d’onda sono state rilevate delle discontinuità della morfologia delle barre lungo riva indotte due strutture antropiche. In queste discontinuità è stato riconosciuto il fenomeno di *bar switching* (biforcazione della barra). Le forzanti che generano tali episodi sono sempre caratterizzate da correnti lungo riva molto consistenti.

Tutte le informazioni ricavate dagli studi eseguiti: caratteristiche sedimentologiche, caratteristiche morfologiche, schemi idrodinamici, mappatura della prateria di Posidonia oceanica, etc., sono state sintetizzate e rappresentate nella “*Carta sedimentologica e morfodinamica della spiaggia del Poetto*” scala 1:8.000.

## Bibliografia

- Archetti R.**, 2009. Study of the evolution of abeach protected by low crested structures using video monitoring. *Journal of Coastal Research* . Vol 25(4). Pp 884 – 899. Issn 1551-5036.
- Archetti R.**, Torricelli E., 2009. Il video monitoraggio per gli studi costieri. Report Webcam Università di Bologna - Administrative and managing documents – Beachmed.
- Armaroli C.**, Ciavola P., Perini L. e Luciani P., 2007. Morfologia delle spiagge ravennati e vulnerabilità per fenomeni di inondazione - Terzo Forum Nazionale, Pianificazione e tutela del territorio costiero; questioni, metodi, esperienze a confronto, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RN), vol. 127: 363 - 389.
- Armaroli C.**, Ciavola P., Perini L., Calabrese L., Lorito S., Valentini A. e Masina M., 2012. Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology*, vol. 143-144: 34-51.
- Atzeni A.**, 2011. Criteri per la scelta dell'onda di progetto. Dispense di Idraulica Marittima. Aracne Editrice. Roma.
- Bacelle L. & Bosellini A.**, 1965. Diagrammi per la stima visiva della composizione percentuale nelle rocce sedimentarie. *Annali Univ. Ferrara*, sez. IX, vol. 16, 19-40.
- Battjes J.A.**, 1974. 'Surf similarity.' *Proceedings 14th International Conference on Coastal Engineering*. ASCE, 466–480.
- Battjes J.A.**, 1988. Surf-zone dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 20, 257-293.
- Bencivenga M.**, Nardone G., Ruggiero F., Calore D., 2012. The Italian Data Buoy Network (RON). - *Proc. Advances in Fluid Mechanics IX*. Edited by WIT, UK, ISBN: 978-1-84564-600-4, 2012, pp. 321-332.
- Brignati R.**, Contini P., Franco L., Nunziati A., Milana G., MODIMAR, 2004. Rapporto n.3. Piano di monitoraggio dei lavori di ripascimento analisi dei dati ondametrici, delle verifiche con modello matematico ad una linea e studio statistico della deflazione eolica.
- Carmignani L.**, Oggiano G., Funedda A., Conti P., Pasci S. & Barca S., 2012. Carta Geologica della Sardegna. Scala 1:250.000, LAC, Firenze.
- Corsini S.** e Inghilesi R., 2004. Atlante delle onde nei mari italiani – Italian waves atlas. A.P.A.T..
- De Muro S. & De Falco G.**, 2010. Manuale per la gestione delle spiagge. Studi, indagini ed esperienze sulle spiagge Sarde e Corse. CUEC Editrice. ISBN: 978-88-8467-629-0.



- De Muro, S.,** Ibba, A., Kalb, C., 2015. Morphosedimentology of a Mediterranean microtidal embayed wave dominated beach system and related inner shelf with *Posidonia oceanica* meadows: the SE Sardinian coast.
- Fadda A.F.** e Pala A., 1992. Le Acque della Sardegna. COEDISAR - ISBN: 8885966039.
- Ferrara C.** e Palmerini V., 1974. Indagine sedimentologica sulla dinamica della linea di costa in facies sabbiosa nel settore centrale del Golfo di Cagliari. Bollettino della Società Sarda di Scienze Naturali – Anno VIII –Vol. XIV - 1974.
- Folk R.L. & Ward W.,** 1957. “Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters” - Journ. Sed. Pet., 27, 3-26.
- Grottoli E. & Ciavola P.,** 2013. Morfodinamica e risposta a corto e medio termine ad eventi di mareggiata delle spiagge comprese tra Foce Bevano e Lido di Classe (RA). Studi Costieri, 03/2012; 20:25-46.
- Guza R.T. & Inman D.,** 1975. ‘Edge waves and beach cusps.’ Journal of Geophysical Research, 80, 2997–3012.
- Guza R.T. & Thornton E.B.,** 1985. ‘Observations of surf beat.’ Journal of Geophysical Research, 90, 3161–3172.
- Hallermeier R.J.,** 1983. Sand Transport Limits in Coastal Structure Design,, Proceedings of Coastal Structures’ 83, Asce, pp.703-706.
- Holman R.A.,** Stanley J., 2007. The history and technical capabilities of Argus. Coastal Engineering 54 (2007) 477–491.
- Kalb C.,** 2008. “I sedimenti superficiali della piattaforma interna del Golfo di Cagliari. Relazioni tra moto ondoso, correnti indotte e sistemi di sedimentazione su spiagge campione” – Tesi di Dottorato in Scienze della Terra, Università degli Studi di Cagliari.
- Kamphuis, J. W.,** 1991. Incipient wave breaking. Coastal Engineering. 15: pp. 185-203.
- Koningsveld M.V.,** Davidson M., Huntley D., Medina R., Aarninkhof S, Jiménez J.A., Ridgwell J, Kruif A., 2007. A critical review of the CoastView project: Recent and future developments in coastal management video systems. Coastal Engineering 54 (2007) 567–576.
- Lai A.,** 2007. STUDIO GEOMORFOLOGICO E TENDENZE EVOLUTIVE DEL LITORALE DI CAGLIARI - QUARTU SANT’ELENA. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria del Territorio XIX Ciclo. Università degli Studi di Cagliari.
- Lecca L.,** De Muro S., Cossellu M. & PAU M., 2005. I sedimenti Terrigeno-Carbonatici attuali della piattaforma continentale del golfo di Cagliari, IL Quaternario 18(2), 2005, 201-221.

- Le Roux**, J.P., 1996. An EXCEL program for computing the dynamic properties of particles in Newtonian fluids. *Computer & Geosciences*, 23, 6, 671-675.
- Lippmann**, T. C. & **Holman** R. A., 1989), Quantification of sand bar morphology: a video technique based on wave dissipation. *Journal of Geophysical Research* 94, 995– 1011.
- Lippmann**, T. C. & **Holman** R. A., 1990), The spatial and temporal variability of sand bar morphology. *Journal of Geophysical Research* 95, 11575–11590.
- Longuet-Higgins** M. S. and **Stewart** R. W., 1963. A note on wave set-up. *Journal of Marine Research*. 21: pp. 4-10
- Manca E.**, Pascucci V., Deluca M., Cossu A., Andreucci S., 2013. Shoreline evolution related to coastal development of a managed beach in Alghero, Sardinia, Italy. *Ocean & Coastal Management*. Vol. 85, Part A, December 2013, Pages 65–76.
- Masselink G.**, Michael H., Jasper K., 2011. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*, 2nd Edition. Routledge, 09/2011. 14
- McCowan**, J., 1894. On the highest waves of a permanent type. London, Edinburgh, Dublin. *Philos. Mag.*, Ser. 5(38): 45-58.
- Mendoza** E.T. and **Jimenez** J.A., 2004. Factors controlling vulnerability to storm impacts along the Catalanian coast. *Proceedings International Conference of Coastal Engineering 2004*, Lisbon, pp. 3087-3099.
- Milano** V., 2008. *Idraulica Marittima*. Maggioli Editore, ISBN 978-88-387-4077-1.
- Munk**, W.H., 1949. The solitary wave theory and its applications to surf problems. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 51: 376-423.]
- Nunziati** A., Milana G., Franco L., -MODIMAR, 2004. Rapporto n.1. Piano di monitoraggio dei lavori di ripascimento analisi dei dati ondametrici, delle verifiche con modello matematico ad una linea e studio statistico della deflazione eolica.
- Pawlowicz** R., 2003. Quantitative Visualization of Geophysical Flows Using Low-Cost Oblique Digital Time-Lapse Imaging. *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING*, VOL. 28, NO. 4.
- Perini** L., Calabrese L., Deserti M., Valentini A., Ciavola P. e Armaroli C., 2011. Le mareggiate e gli impatti sulla costa in Emilia-Romagna 1946-2010. *I Quaderni di ARPA*, ARPA Emilia-Romagna, 143 pp.
- Péron**, C. and **Sénéchal**, N., 2011. Dynamic of a meso to macro-tidal double barred beach: inner bar response. *Journal of Coastal Research*, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), 120-124.Szczecin, Poland, ISBN 0749-0208.

- Regione Autonoma della Sardegna**, 1998. “CARTA TECNICA REGIONALE DELL’ASSESSORATO DEGLI ENTI LOCALI, FINANZE, URBANISTICA – Servizio Informatico e Cartografico - scala 1:10.000” - Area Golfo di Cagliari, varie sezioni.
- Ricci Lucchi**, 1980. “Sedimentologia – Parte I: Materiali e Tessiture dei Sedimenti”. Ed CLUEB.  
ISBN : 978-88-8091-331-3.
- Ricci Lucchi**, 1980. “Sedimentologia – Parte II: Processi e Meccanismi di Sedimentazione”. Ed CLUEB. ISBN : 978-88-8091-332-0.
- Ricci Lucchi**, 1980. “Sedimentologia – Parte III: Ambienti Sedimentari e Facies”. Ed CLUEB.  
ISBN : 978-88-8091-333-7.
- Rouse and Hunter**, 1997. Nomogram for the setting velocity of the spheres. Div. Geol. Geo. Exhibit D, Rept, Comm Sedimentation (1936-1937) Natl. Res. Council, Washington, D.C, pp 57-64.
- Roy, P.S., Cowell, P.J., Ferland, M.A. and Thom, B.G.**, 1994. wave-dominated coasts.’ In: R.W.G. Carter and C.D. Woodroffe (eds) *Coastal Evolution*, Cambridge University Press, Cambridge, 87–120.
- Shand, R., D., Beiley, D., B. & Shepherd, J., M.**, 2001. Longshore realignment of shoreparallel sand-bars at Wanganui, New Zeland. *Marine Geology* 179, 147-161.
- Short A.D. and Aagaard T.**, 1993. Single and multi-bar beach change models. *Journal and Coastal Research*, Special Issue 15, 141-157.
- Short A.D.**, 1999. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Ed. Wiley - ISBN 0471965707.
- Sunamura T.**, 1984. Onshore-offshore sediment transport rate in the swash zone of laboratory beaches. *Coastal Engineering in Japan*, 27, 205-212.
- Swanson R.G.**, 1985. *Sample Examination Manual*, AAPG, 35 pp.
- Thieler E.R., Himmelstoss E.A., Zichichi J.L., and Ayhan E.**, 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.
- Virdis S.G.P., Oggiano G. and Disperati L.**, 2012. A Geomatics Approach to Multitemporal Shoreline Analysis in Western Mediterranean: The Case of Platamona-Maritza Beach (Northwest Sardinia, Italy). *Journal of Coastal Research*, 28, 3, 624–640.
- Wentworth C.K.**, 1992. “A scale of grade and class terms for clastic sediments” - *Journal of Geology*, 30, 377-392.

**Wijnberg, K. M. & Wolf, F., C., J., 1994.** Three-dimensional behaviour of a multiple bar system. Proceedings of Coastal Dynamics '94, ASCE, New York, 59-73

**Wright L. D. e Short A. D., 1984.** “Morphodynamic variability of surf zones: a synthesis” – Mar. Geol., 56, 93 – 118.

### **Sitografia**

[www.beachmed.it](http://www.beachmed.it) - Ottimizzazione delle Tecniche Integrate di Monitoraggio applicate ai Litorali;

[www.mareografico.it](http://www.mareografico.it) - ISPRA - Rete Mareografica Nazionale;

[www.telemisura.it](http://www.telemisura.it) - ISPRA - Rete Ondametrica Nazionale;

[www.idromare.it](http://www.idromare.it) - ISPRA – Servizio Mareografico;

[www.astm.org](http://www.astm.org) - American Society for Testing and Materials.

## **Ringraziamenti**

Ringrazio sentitamente tutte le persone che hanno reso possibile la realizzazione di questa tesi di dottorato. In primo luogo ringrazio il prof. Sandro DeMuro per la disponibilità e per i mezzi e gli strumenti che ha messo a disposizione in questi anni.

Ringrazio il Comandante Massimiliano Molinas per l'impegno e l'interesse a mantenere attiva la convenzione che lega gli enti militari con l'O.C.EA.N.S. (Osservatorio Coste E Ambiente Naturale Sottomarino) dell'Università di Cagliari fin dal 2005. Inoltre ringrazio l'Ammiragliato e la Direzione Marittima/Autorità Portuale di Cagliari per le concessioni e le assistenze in mare durante le operazioni di rilevamento oceanografico.

Ringrazio l'ing. Gianni Alvito, l'ing. Giulio Giambalvo e il sig. Salvatore Vacca per l'assistenza tecnica durante la realizzazione, l'installazione e la manutenzione del sistema di video-monitoraggio costiero. L'ing. Gabriele Nardone dell'ISPRA per i dati ondametrici del Golfo di Cagliari.

Ringrazio il dott. Arnold van Rooijen e l'ing. Giorgio Santinelli per gli insegnamenti, l'assistenza tecnica e la compagnia durante l'internship in Deltares (Delft, Olanda).

Ringrazio il dott. Simone Simeone del CNR-IAMC per i consigli e la preziosa collaborazione. Il dott. Angelo Ibba, Nicola Pusceddu, Claudio Kalb e Fabrizio Ferraro, Paolo Frongia e Cristina Buttau per il supporto tecnico e il sostegno durante questi anni di dottorato.

In fine, i ringraziamenti più importanti sono per la mia Famiglia perché mi è sempre stata accanto e non mi ha mai fatto mancare il suo sostegno. Grazie a Davide, Rita, Emerson e Francesca.