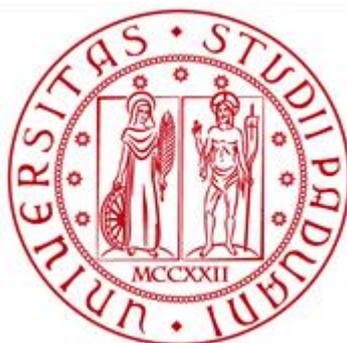


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE ED AMBIENTALE  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE CURRICULUM  
IDRAULICA



TESI DI LAUREA

ANALISI DELLA DINAMICA DEI SEDIMENTI SUI BASSIFONDI E SULLE BARENE  
DELLA LAGUNA DI VENEZIA ATTRAVERSO MISURE DI CAMPO

Relatore: PROF. LUCA CARNIELLO

Correlatore: PROF. ANDREA D'ALPAOS

Laureanda: PATRIZIA PANUTTI

Matricola: 1155079

ANNO ACCADEMICO 2018-2019



# INDICE

ABSTRACT .....	5
RIASSUNTO .....	7
CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE .....	9
1.1 Inquadramento generale: la laguna di Venezia .....	9
1.1.1 Morfologie lagunari.....	11
1.1.2 Aree di studio .....	15
1.2 Il trasporto solido .....	17
1.3 Meccanismi di trasporto .....	18
1.4 Microphytobenthos.....	21
CAPITOLO 2 – METODI.....	23
2.1 Metodi per misurare la deposizione di sedimenti con risoluzione temporale breve .....	23
2.2 La raccolta dei dati .....	26
2.3 Preparazione dei campioni .....	29
2.4 Analisi LOI.....	32
2.5 Analisi granulometrica .....	34
2.6 Procedimento di raccolta dei campioni di microphytobenthos .....	38
CAPITOLO 3 – RISULTATI .....	41
3.1 Confronto tra trappole per sedimento cilindriche ed a superficie piana.....	41
3.2 Confronto tra transetti situati nello stesso sito e in siti diversi.....	54
3.3 Materiale organico contenuto nei campioni .....	63
3.4 Granulometria dei sedimenti .....	68
CAPITOLO 4 – CONCLUSIONI.....	77
BIBLIOGRAFIA.....	79



## ABSTRACT

The Venice lagoon is the largest lagoon in the Mediterranean and it is located in the north-western Adriatic Sea.

Morphologically the tidal landscape, in particular in the Northern Adriatic, is mainly characterized by three different environments: the salt marshes, the shallows and the channels system.

The Venice lagoon, with its complex morphological structure, is constantly evolving and it is a precariously balanced environment, that needs to be monitored and preserved.

Salt marshes are wetland areas that are periodically flooded by the high tides and they are a crucially important ecosystem, that is now at risk due to the effects of the climate changes and human interference.

Salt marshes represent a great resource for the environment as they regulate the water exchange, limit the water level raising in case of high tide, provide a buffer against waves and host halophytic vegetation species. For all these reasons, it is important to study and protect them.

In order to face issues related to tidal environment conservation, it is important to improve our understanding of the processes that regulate the formation and the development of the salt marshes and their geomorphological features.

The present work is focused on the study of the sediment deposition on the salt marshes, characterized by the combined action of physical and biological processes, through field observations. The three study areas are: Sant'Erasmus and San Felice salt marshes, located in the northern Venice lagoon, and Conche salt marsh, in the southern Venice lagoon.

The sediment samples collected in the salt marshes were evaluated using the Loss of Ignition (LOI) procedure and the granulometric analysis.

We also collected samples of microphytobenthos (MPB) on the salt marsh and in the shallow tidal flat close to Sant'Erasmus island.

The aim of this study is to improve the knowledge of sediment transport in tidal environments and sedimentation on salt marshes, defining a measurement method of the sedimentation and an effective procedure to analyze sediment samples. We also considered the effects of the meteorological conditions on the study areas, during the six months of data collection.

The results achieved showed that the cylindrical sediment traps are more effective than the flat sediment traps for the sedimentation measurement on the salt marshes surface, with a short time resolution. Moreover, the percentages by weight of the organic matter are generally higher in the inner part of the salt marsh, instead larger diameters of the sediments are concentrated within 7.5 m from the edge of the salt marsh.

## RIASSUNTO

La laguna di Venezia è il maggior sistema lagunare della regione Mediterranea ed è localizzata a Nord-Ovest del bacino settentrionale del mare Adriatico.

Dal punto di vista morfologico, le forme caratteristiche degli ambienti a marea ed in particolare delle lagune dell'alto Adriatico, sono riconducibili principalmente a tre diversi ambienti: le barene, i bassifondi, e la rete dei canali.

La laguna di Venezia, con la sua struttura morfologica articolata, costituisce un ambiente in continua evoluzione e in precario equilibrio, che è importante studiare e salvaguardare.

Le barene sono superfici di terra emersa, periodicamente sommerse durante l'alta marea, che caratterizzano gli ambienti lagunari e costituiscono un ecosistema di fondamentale importanza il cui futuro è oggi a rischio a causa degli effetti dovuti ai cambiamenti climatici e alle modificazioni antropiche.

Le barene costituiscono una risorsa dal punto di vista ambientale poiché favoriscono il ricambio idrico, limitano l'innalzamento del livello dell'acqua durante l'alta marea, moderano l'azione del moto ondoso e ospitano numerose specie vegetali alofite e per questi motivi è importante analizzarle e preservarle.

Per affrontare i problemi legati alla conservazione degli ambienti di marea è di fondamentale importanza migliorare l'attuale comprensione dei processi che regolano la formazione e lo sviluppo delle barene e delle loro caratteristiche morfologiche.

Il presente lavoro di tesi si concentra sullo studio dei processi di sedimentazione nelle barene, che sono caratterizzati dall'azione combinata di processi fisici e biologici, attraverso indagini di campo. A questo scopo si è posta l'attenzione sulle seguenti tre aree di studio: la barena di Sant'Erasmo e la barena di San Felice, situate in Laguna Nord, e la barena di Conche, situata in Laguna Sud.

Lo studio è stato condotto coniugando l'analisi LOI (Loss On Ignition, ovvero *la perdita al fuoco*) e l'analisi granulometrica, dei dati raccolti durante i campionamenti sulle barene.

Inoltre, durante le fasi di raccolta dei campioni di sedimento, sono stati prelevati dei campioni di microphytobenthos (MPB) su un bassofondo in prossimità della barena di Sant'Erasmo e sulla superficie della barena stessa.

Lo scopo di questa tesi è quindi quello di ampliare le conoscenze relative al trasporto solido in ambiente lagunare e ai processi di sedimentazione nelle barene determinando una metodologia di misura della sedimentazione e una procedura di analisi dei sedimenti efficace. Inoltre, si è cercato di analizzare l'effetto degli eventi meteorologici che hanno interessato le tre aree di studio, durante i sei mesi di raccolta dei dati.

Dai risultati è emerso che le trappole più efficaci per la misura della sedimentazione, con risoluzione temporale breve, sulla superficie delle barene, sono quelle cilindriche rispetto a quelle piane. Inoltre, dalle analisi svolte, è risultato che le percentuali in peso della materia organica sono più elevate nella parte più interna delle barene mentre i diametri maggiori dei sedimenti si concentrano nei primi 7.5 m dal bordo della barena.

# CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE

In questo capitolo verranno introdotte alcune nozioni essenziali a comprendere le misure effettuate sul campo e i risultati in seguito sviluppati attraverso l'analisi dei dati raccolti durante la fase di campionamento.

## 1.1 Inquadramento generale: la laguna di Venezia

La laguna di Venezia rappresenta il maggior sistema lagunare della regione Mediterranea ed è situata nella fascia costiera dell'alto Adriatico tra la foce del fiume Brenta, posta a Sud, ed il tratto finale del fiume Sile, localizzato a Nord (Figura 1).



Figura 1: La laguna di Venezia da una recente immagine satellitare dove in rosso sono indicate le aree di studio (la barena di Sant'Erasmus, la barena di San Felice e la barena di Conche) invece in azzurro sono indicate le stazioni di misura del Centro Maree considerate in questo studio (Laguna Nord e Malamocco Porto).

La laguna presenta una forma allungata in direzione Sud Ovest – Nord Est, con una lunghezza di circa 50 km ed una larghezza di 8-10 km, complessivamente ricopre una superficie di circa 550 km<sup>2</sup> (Brambati et al., 2003). Dal punto di vista morfologico è costituita da bassifondi, barene, isole e reti di canali.

È connessa con il mare Adriatico mediante tre bocche di porto quali Lido, Malamocco e Chioggia, attraverso cui le acque entrano ed escono dalla laguna al variare della marea. La laguna di Venezia è caratterizzata da un regime microtidale semidiurno con escursioni mareali medie dell'ordine del metro.

L'attuale configurazione della laguna di Venezia è il risultato di una serie di processi naturali e antropici, che nel corso del tempo ne hanno mutato le caratteristiche morfologiche ed idrodinamiche (D'Alpaos, 2010). I processi naturali sono ad esempio: la subsidenza del suolo, le variazioni del livello medio del mare, l'apporto di sedimenti ad opera dei fiumi e l'azione del moto ondoso e delle correnti di marea. Invece, tra i principali fattori di natura antropica vale la pena menzionare: gli interventi di diversione dei fiumi, per contrastare i fenomeni di interrimento della laguna e la costruzione di moli alle bocche di porto che hanno favorito il fenomeno dell'erosione. Questa tendenza all'erosione è stata ancor più intensificata dalla subsidenza, indotta dall'estrazione di acqua nel sottosuolo, nel secondo dopoguerra.

### 1.1.1 Morfologie lagunari

La laguna di Venezia presenta, dal punto di vista morfologico, forme caratteristiche riconducibili a tre diversi ambienti: le barene, i bassifondi e la rete di canali, i cui caratteri sono determinati principalmente dall'apporto solido di origine fluviale o marina, dall'azione delle maree e delle onde generate dal vento.

In particolare, queste tipiche forme, che contraddistinguono le lagune costiere alto adriatiche, sono in grado di influenzare l'idrodinamica locale e svolgono importanti funzioni dal punto di vista ecologico.

La Figura 2 rappresenta in modo schematico come si distribuiscono nella laguna di Venezia questi tre diversi ambienti.



Figura 2: Distribuzione delle tipiche forme lagunari in laguna di Venezia (D'Alpaos e Defina, 2007)

Le barene: Le barene sono formazioni morfologiche che rappresentano una fascia di transizione tra terre emerse ed ambiente marino, sono costituite prevalentemente da sedimenti limoso-argillosi e, avendo quote superiori a quelle del medio mare, rappresentano la porzione topograficamente più elevata del bacino lagunare. Esse sono regolarmente sommerse durante la fase di alta marea e vengono scoperte durante la successiva fase di bassa marea.

Le barene sono caratterizzate da un andamento altimetrico piuttosto irregolare, per la presenza di una rete diffusa di piccoli canali, che le attraversano e consentono alle correnti di marea di invaderle regolarmente e in modo diffuso.

Nonostante l'apparente aspetto inospitale, le barene hanno una ricca varietà di vegetazione alofila, in grado di crescere in terreni soggetti a periodi di sommersione, che favorisce la stabilità della barena influenzando la circolazione idrodinamica ed il trasporto dei sedimenti.

Da un punto di vista della dinamica geomorfologica e biologica, le barene attenuano l'azione del moto ondoso sulle coste e fungono da zone di intrappolamento dei sedimenti, oltre ad essere ecologicamente importanti: trattengono le sostanze nutritive delle acque, depurano le acque da sostanze inquinanti e immagazzinano il carbonio organico.

Inoltre, la presenza delle barene, da un punto di vista idrodinamico, può determinare ritardi di fase nella propagazione dell'onda di marea ed attenuazioni della sua ampiezza come accade, in particolare, nella zona della Laguna Nord dove le strutture morfologiche di questo tipo sono più estese.



*Figura 3: Foto della barena San Felice scattata nel mese di Febbraio 2019 durante una campagna di raccolta di dati.*

**I bassifondi:** I bassifondi sono aree caratterizzate da un'elevazione inferiore a quella del medio mare quindi appaiono sommersi durante la maggior parte delle escursioni di marea. L'eventuale

assenza di vegetazione facilita la risospensione da parte delle onde da vento e quindi il trasporto dei sedimenti, da parte delle correnti di marea, verso i canali principali e le bocche di porto.



*Figura 4: Foto di un bassifondo emerso, durante una fase di bassa marea, vicino alla barena di Sant'Erasmo. La foto è stata scattata a Febbraio 2019 durante una campagna di raccolta di dati.*

I canali: La rete di canali è l'ultima forma che caratterizza l'ambiente lagunare. I canali costituiscono vie preferenziali per il flusso d'acqua, durante le fasi di marea, ma anche per lo scambio di sedimenti e di sostanze nutritive tra il mare e l'area intertidale.

La rete di canali si dirama dalle bocche di porto, dove i canali sono più profondi a causa dell'erosione generata dalle velocità più sostenute delle correnti di marea che generano sforzi tangenziali in grado di mobilitare i sedimenti che costituiscono il fondale lagunare, verso l'interno della laguna e fino a solcare i bassifondi e le barene con canali minori detti *ghebi*.

I ghebi sono piccoli canali meandriciformi che inondano e drenano le barene durante ogni ciclo di marea trasportando con sé sedimenti che possono derivare: dall'erosione della barena stessa per effetto del flusso e riflusso della marea, dall'azione naturale delle correnti o delle onde generate dal vento che li mobilita dal fondo e li mette in sospensione, dall'azione erosiva generata dal moto ondoso provocato dai natanti e dal trasporto dei corsi d'acqua.



*Figura 5: Foto di un canale, che attraversa la barena San Felice, scattata durante la campagna di raccolta dati nel mese di Marzo 2019.*

Un'altra struttura morfologica, che si può trovare all'interno delle aree di barena, sono i *chiari* ovvero piccoli specchi d'acqua generati da depressioni del terreno poco profonde, dove l'acqua salmastra si accumula durante i fenomeni d' alta marea e si mescola con l'acqua meteorica.



*Figura 6: Foto di un chiaro, sulla barena di Sant'Erasmo, scattata ad Aprile 2019 durante una campagna di raccolta dati.*

È importante sottolineare che i tre ambienti lagunari caratteristici, appena descritti, non sono indipendenti ma interagiscono tra loro creando un sistema intrecciato più complesso.

### 1.1.2 Aree di studio

Le aree di studio scelte per questo lavoro di tesi sono: la barena di San Felice e la barena di Sant'Erasmus, situate in Laguna Nord, e la barena di Conche, situata in Laguna Sud. La barena di San Felice è situata a Nord di Treporti ed è adiacente al canale San Felice, la barena di Sant'Erasmus si trova in prossimità dell'isola di San Francesco del Deserto, ad Ovest dell'isola di Sant'Erasmus ed infine la barena di Conche si trova ad Est della frazione di Conche nel comune di Codevigo. In figura 1 sono indicate, in colore rosso, le aree di studio appena descritte.

Queste aree sono state scelte per la loro diversa esposizione alle correnti di marea e al vento, fattori che influenzano il trasporto solido, oggetto del nostro studio.

In ogni zona di studio, sono stati collocati un certo numero di transetti, ortogonali ai margini della barena, ciascuno dei quali è costituito da più stazioni in grado di misurare l'accumulo di sedimenti.

In particolare, sulle barene di Sant'Erasmus, San Felice e Conche sono stati posizionati rispettivamente due, quattro e tre transetti.

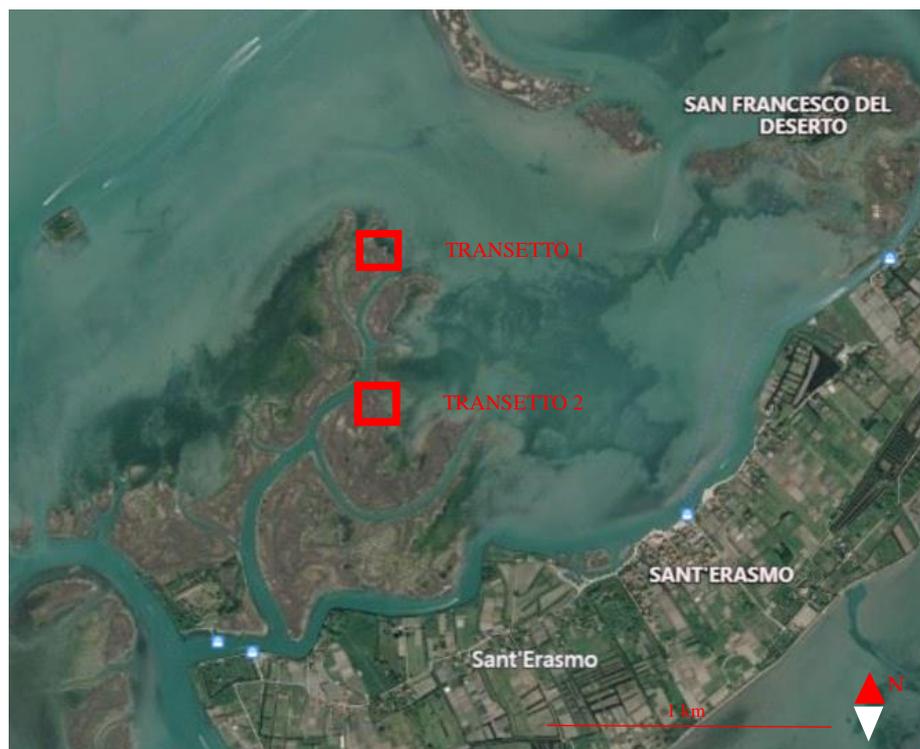


Figura 7: Area di studio presso la barena di Sant'Erasmus (immagine tratta da Google Earth).



Figura 8: Area di studio presso la barena di San Felice (immagine tratta da Google Earth).



Figura 9: Area di studio presso la barena di Conche (immagine tratta da Google Earth).

Ogni transetto, ortogonale al margine della barena, è costituito da tre stazioni di misura a distanza progressiva di 2,5 m, 7,5 m e 27.5 m dal bordo della barena. Solo il transetto 1 sulla superficie della barena di Conche, diversamente da tutti gli altri transetti, è costituito da quattro stazioni di misura a distanza progressiva di 0.0 m, 7.5 m, 15 m e 20 m dal bordo della barena.

La scelta dei luoghi di raccolta dei dati è stata fatta in modo che le stazioni avessero condizioni al contorno diversificate e necessarie allo scopo delle analisi, ovvero, capire se, la diversa esposizione dei transetti ai venti e ai flussi di marea, potesse influenzare la quantità e la tipologia dei sedimenti raccolti nelle diverse stazioni, durante i sei mesi di campionamento e in tal caso in quale modo avrebbe potuto condizionarle. Ad esempio, il transetto 4 sulla superficie della barena di San Felice risulta più esposto al vento di Bora, proveniente da Nord-Est, e soggetto in modo meno diretto alle variazioni di marea, essendo situato internamente alla barena e protetto da un'insenatura, rispetto agli altri transetti (1, 2 e 3) situati in prossimità delle sponde del canale San Felice. Invece, sulla barena di Sant'Erasmo, il transetto 2 risulta più esposto ai venti provenienti da Nord-Est e alle correnti di marea rispetto al transetto 1, situato in prossimità di una vasta area di bassifondi. Sulla superficie della barena di Conche il transetto 3 risulta in una posizione più protetta, essendo affacciato su un'insenatura, rispetto agli altri due transetti ma in generale l'area di studio presso la barena di Conche è più esposta al vento di Bora proveniente da Nord-Est e alle correnti di marea, essendo in prossimità della bocca di porto di Chioggia, rispetto alle altre aree di studio.

## 1.2 Il trasporto solido

Il trasporto di sedimenti è fondamentale per capire come si sviluppa e trasforma l'ambiente lagunare perché è l'insieme di processi dinamici d'interazione tra l'acqua che scorre e i bassifondi della laguna.

L'erosione comporta la rimozione e il trasporto dei sedimenti mentre la deposizione coinvolge il trasporto e la collocazione dei sedimenti al fondo.

La quantità e la dimensione dei sedimenti che si muovono con l'acqua dipendono da tre fattori fondamentali: capacità, competenza e disponibilità di sedimenti (Hickin E., 1995).

La competenza si riferisce alla più grande dimensione (diametro) della particella che il flusso è in grado di muovere e quindi tale flusso può essere competente o incompetente per quanto riguarda una data grandezza del grano.

La capacità si riferisce alla quantità massima di sedimenti di una data dimensione che un flusso può trasportare in trazione come trasporto al fondo in condizioni di equilibrio.

La capacità dipende dal gradiente di concentrazione, dalla portata e dalla dimensione delle particelle (la presenza di materiale fine può aumentare la densità del fluido e la capacità; la presenza di grandi particelle può ostacolare il flusso e ridurre la capacità).

La capacità di trasporto è limitata (massa per unità di tempo), è prevedibile dalle equazioni del trasporto dei sedimenti e si può raggiungere solo quando l'approvvigionamento di sedimenti è abbondante.

La disponibilità di sedimenti si riferisce alla quantità e alle dimensioni dei sedimenti disponibili per il trasporto.

### 1.3 Meccanismi di trasporto

Il trasporto dei sedimenti è convenzionalmente suddiviso in:

- Trasporto al fondo;
- Trasporto in sospensione;
- Wash load (dilavamento).

Questa classificazione però non è rigida poiché spesso nella pratica è difficile fare una netta distinzione tra i meccanismi di trasporto.

Si definisce *trasporto al fondo* la condizione di movimento in cui il materiale, tipicamente incoerente (nel senso che in presenza di sedimento coesivo spesso il trasporto al fondo risulta trascurabile rispetto a quello in sospensione), che si trova al fondo, superata una definita condizione di incipiente movimento (l'approccio semi-empirico più utilizzato per definire la soglia di movimento dei sedimenti è stato proposto all'inizio del 1900 dal fisico tedesco Albert F. Shields che definì uno sforzo tangenziale al fondo adimensionale per l'inizio del movimento  $\theta_c = \tau_{cr}/g(\rho_s - \rho)D$ , comincia a muoversi per slittamento, rotolamento o saltellamento, a causa dell'interazione tra granelli, rimanendo però sostanzialmente a contatto con il fondo.

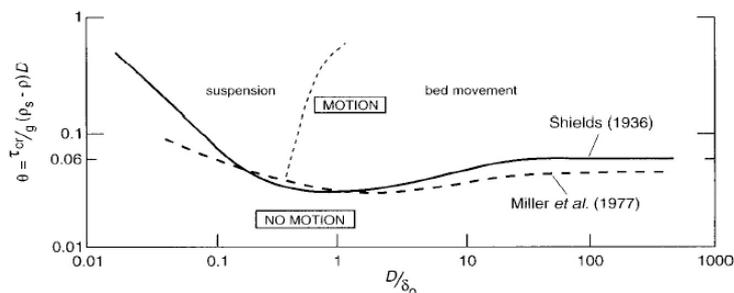


Figura 10: Parametro di Shields critico in funzione del numero Reynolds di grano.

Una volta raggiunta la condizione di incipiente movimento in sospensione, quando il saltellamento dei granelli supera una certa distanza dal fondo (2 o 3 volte il diametro), il materiale entra in sospensione all'interno della colonna d'acqua e si può considerare in condizione di *trasporto in sospensione*, il quale avviene senza alcun contatto con il fondo.

Il carico sospeso è il materiale che si muove attraverso la colonna d'acqua ed è tenuto in sospensione dalle fluttuazioni turbolente.

La condizione di incipiente movimento in sospensione coincide con l'uguaglianza o superamento, da parte della componente in direzione verticale della fluttuazione, della velocità di caduta delle particelle per sostenere il carico di sedimenti sospesi.

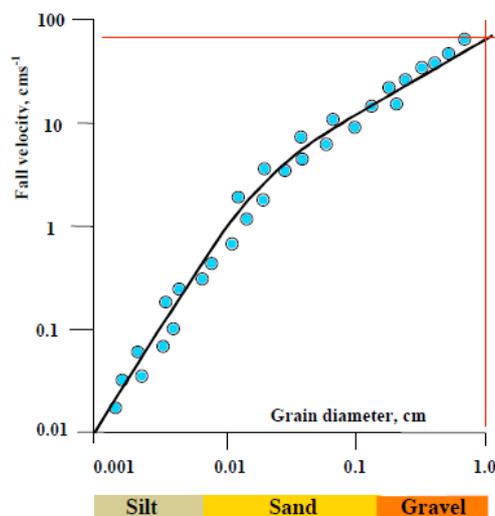


Figura 11: velocità di caduta in funzione della dimensione dei grani.

Alcuni autori interpretano il trasporto in sospensione come il momento in cui una particella, messa in movimento, comincia a staccarsi dal fondo e passa prevalentemente la sua esistenza all'interno della colonna d'acqua invece altri lo definiscono come una situazione di concentrazione stabile all'interno della colonna d'acqua che necessita quindi di più tempo per realizzarsi.

In generale nel trasporto in sospensione le particelle si muovono e si distribuiscono all'interno della corrente secondo un profilo di concentrazione che ci permette di determinare la portata solida trasportata in sospensione.

Il profilo di concentrazione dei sedimenti sospesi, che si può ricavare dall'equazione di trasporto e diffusione con opportune semplificazioni, è distribuito tipicamente nella colonna d'acqua verticale come illustrato nella figura seguente.

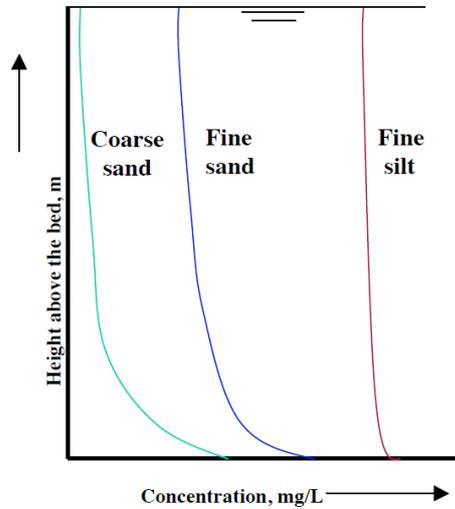


Figura 12: profilo di concentrazione nella colonna d'acqua.

Dalla figura 12 si può constatare che più il materiale è pesante e più il profilo tende ad essere asimmetrico verso il basso ovvero il materiale tende ad essere in sospensione non uniformemente sulla verticale ma più concentrato verso il fondo. Invece più il materiale è fine e più è uniforme la sua concentrazione sulla verticale a parità di forzante idrodinamica.

Il wash load è un trasporto in sospensione continuo ovvero è il materiale che, nell'area di analisi, non ha nessun tipo di interazione con il fondale. Il wash load è costituito essenzialmente da particelle fini di limo e argilla tenute in sospensione da agitazione molecolare termica (a volte noto come “moto Browniano”) con scarsa tendenza a depositare e per questo sono presenti in quantità minima al fondo.

Il wash load, a differenza dei sedimenti sospesi più grossolani, tende ad essere distribuito uniformemente in tutta la colonna d'acqua ovvero non varia lungo l'altezza della colonna d'acqua.

## 1.4 Microphytobenthos

Il microphytobenthos (MPB) è costituito da microalghe eucariotiche e cianobatteri che crescono sullo strato superficiale dei fondali e in molti ecosistemi poco profondi, come la laguna di Venezia, questa biomassa di microalghe bentoniche supera quella di fitoplancton nelle acque sovrastanti.

Il microphytobenthos, attraverso il meccanismo di fotosintesi, concorre all'assunzione di carbonio e alla produzione di ossigeno e, con il suo proliferare, crea un biofilm sulla superficie del sedimento che fornisce un effetto stabilizzante e quindi aumenta la soglia critica per l'erosione del fondo riducendo la risospensione del sedimento stesso.

Più fattori possono influenzare la frequenza con cui avviene la fotosintesi, e quindi la variazione stagionale della proliferazione di MPB, come ad esempio: i forti gradienti fisico-chimici sugli strati superficiali dei sedimenti, la perturbazione del sedimento causata dal moto dell'acqua, le attività antropiche, la salinità, la temperatura dell'acqua, la disponibilità di luce e le dimensioni dei grani del sedimento.

In particolare, il microphytobenthos è influenzato dalle caratteristiche del sito di campionamento come, da alcuni studi (Facca et al.; 2002), è emerso che l'abbondanza cellulare è maggiore nei substrati di limo e argilla poiché sono più adatti alla crescita di diatomee rispetto alla sabbia. Infatti, le particelle di fango sono solitamente una fonte importante di composti organici e sostanze nutritive.

Quindi le comunità di diatomee bentoniche, che sono fortemente legate ad alcune variabili che caratterizzano gli ambienti poco profondi come la laguna di Venezia, potrebbero essere convenzionalmente usate come biomarcatori per monitorare lo stato ambientale dell'ecosistema lagunare.



# CAPITOLO 2 – METODI

In questo capitolo verranno illustrati nello specifico i metodi di raccolta e analisi dei dati messi a punto durante il lavoro di tesi.

## 2.1 Metodi per misurare la deposizione di sedimenti con risoluzione temporale breve

I metodi per la misura dei tassi di deposizione dei sedimenti vengono generalmente classificati in base a due criteri:

- a) se misurano l'accumulo di sedimenti o l'accrescimento verticale dei sedimenti;
- b) se consentono misurazioni continue o discontinue.

Di seguito vengono riportati i metodi che misurano l'accumulo dei sedimenti in modo discontinuo (a intervalli di osservazione) che sono stati utilizzati in questo lavoro di tesi.

"Accumulo di sedimenti", "deposizione di sedimenti" e "sedimentazione" sono termini che coprono un'ampia gamma di scale temporali, e processi fisici, chimici e geologici.

In ambienti acquosi l'accumulo di sedimenti è definito in genere come il flusso di particelle che si depositano per gravità attraverso la colonna d'acqua e che raggiunge il fondale, definito come l'interfaccia acqua/sedimento.

Tuttavia, il risultato finale di questo semplice meccanismo può variare notevolmente a seconda della scala temporale in cui viene analizzato; infatti, il flusso di particelle a breve termine, verso il basso, attraverso la colonna d'acqua, differisce spesso in modo significativo dall'accumulo netto di sedimenti a lungo termine. I diversi processi, che si verificano durante il tragitto verso il fondo e/o in superficie, come la decomposizione della materia organica, la dissoluzione di alcuni minerali, l'erosione, la risospensione e la compattazione delle particelle, possono spiegare queste differenze. Ognuno di questi processi può contribuire, in varia misura, all'accumulo netto a seconda della scala temporale considerata.

È quindi importante definire la scala temporale in cui sono considerati i processi di accumulo, tenendo conto del contesto di ogni studio.

In questo lavoro “l’accumulo su scala temporale breve” si riferisce ad una risoluzione temporale, che rappresenta il periodo coperto dal metodo di misura, dell’ordine delle ore o al massimo di mesi.

Il tasso di deposizione dei sedimenti non è importante solo per studiare i processi di sedimentazione sulle barene e i bassifondi ma può anche aiutare a capire la dispersione e deposizione di altri materiali di tipo organico.

Esistono diversi metodi per misurare l'accumulo di sedimenti con risoluzione temporale a breve termine sia in campo che in laboratorio.

Esiste un’ampia varietà di dispositivi indicati come “trappole per sedimenti” che variano da semplici pannelli a dispositivi automatici che servono alla misura della deposizione dei sedimenti.

A questa categoria di dispositivi appartengono: filtri di carta, cilindri aperti, trappole a superficie piatta.

Il sedimento intrappolato viene raccolto ed essiccato per quantificarne il peso. Uno dei vantaggi delle trappole per sedimenti è che il sedimento intrappolato può essere utilizzato per ulteriori analisi come la granulometria e le caratteristiche chimiche o mineralogiche.

Un problema con questi metodi è che non tengono conto delle particelle depositate sulla vegetazione, che possono depositarsi sul terreno in un secondo momento ed inoltre la risoluzione spaziale è piuttosto limitata perché costituita dalla superficie stessa di una trappola per sedimenti (cm<sup>2</sup>).

Essendo le trappole per sedimenti un metodo che combina basso costo e l’impiego di un numero limitato di persone per la raccolta dei dati, permettono di eseguire un numero elevato di misurazioni in luoghi diversi, consentendo la misurazione delle variazioni spaziali nei processi di sedimentazione.

Le “trappole per sedimenti” scelte per questo lavoro di tesi sono costituite, in ogni stazione di misura sulla barena di San Felice e di Sant’Erasmo, da un sottovaso con diametro di base pari a 18 cm, il cui bordo superiore è a livello della superficie del suolo, e da un CD, reso scabro sulla superficie, di 12 cm di diametro. Entrambi i dispositivi sono ancorati alla superficie della barena attraverso dei perni.

Nelle stazioni di Conche, invece, si è deciso di installare solo i sottovasi.

Il CD è una trappola piatta posizionata direttamente sulla superficie del suolo e per questo risulta sensibile al dilavamento, causato dalle intemperie e dalle maree, che trascina via i sedimenti che si depositano sulla sua superficie.

È importante sottolineare che le trappole a superficie piatta possono causare la perdita di sedimento durante la fase di raccolta e per questo vanno maneggiate con molta attenzione, soprattutto quando sono ancora sommerse. Inoltre, avendo una superficie più liscia e meno adesiva rispetto a quella delle barene, possono influenzare il processo di sedimentazione e per quest'ultimo motivo, è importante rendere scabra la superficie dei CD.

I sottovasi, invece, sono trappole cilindriche aperte, misurano un tasso di deposizione cumulativo poiché, avendo la profondità di circa 3 cm, le particelle di sedimento si depositano più facilmente e vengono in parte trattenute all'interno dei sottovasi. Per questo motivo è facile ipotizzare che i sottovasi misurino un tasso di deposizione più elevato rispetto ai CD.

L'utilizzo contemporaneo di trappole per sedimenti diverse è molto utile per confrontare i vari metodi di raccolta.

## 2.2 La raccolta dei dati

Le uscite in laguna, per il campionamento, sono state eseguite con un'imbarcazione di dimensioni contenute e con un pescaggio ridotto in modo tale da raggiungere con facilità le aree di studio sulle barene di Sant'Erasmus e San Felice, completamente emerse durante la bassa marea.

Ogni mese, sono stati raccolti i campioni di sedimenti accumulati nelle "trappole per sedimenti", precedentemente predisposte, in ogni stazione di ciascun transetto.

Le stazioni di raccolta dei sedimenti sulla barena di Conche sono state invece raggiunte via terra ogni mese, in giornate diverse rispetto a quelle di campionamento sulla barena di San Felice e di Sant'Erasmus.



*Figura 13: Foto di una stazione a San Felice, scattata durante una campagna di raccolta dei dati, dopo aver raccolto il materiale depositato, pulito e riposizionato le trappole.*

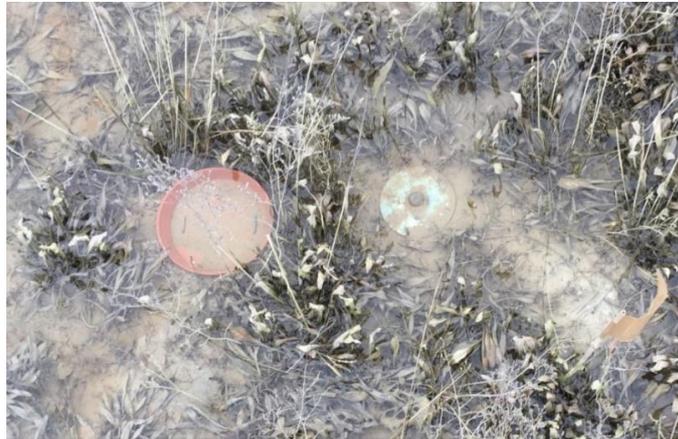
Alla fine, il sedimento intrappolato, tra un campionamento ed il successivo, viene raccolto ed asciugato per quantificarne il peso secco ed essere utilizzato poi per ulteriori analisi.

Per la raccolta si è scelto di utilizzare uno spruzzino nebulizzatore per pulire in modo più accurato le trappole e versare il materiale raccolto, tramite un imbuto di dimensioni più grandi, all'interno di bottigliette di plastica.

Per facilitare il lavoro di analisi dei campioni in laboratorio si è deciso di separare, già in fase di raccolta, il contenuto organico dal resto del campione qualora la parte organica, raccolta dalle trappole, fosse molto voluminosa.

Si riportano di seguito, come esempio, le foto di alcune stazioni di raccolta dei dati durante i campionamenti.

In figura 14 è riportata la stazione a 27.5 m dal bordo della barena San Felice lungo il transetto 4, nel giorno 8 Gennaio 2019, dove si vedono le trappole completamente sommerse durante la campagna di raccolta.



*Figura 14: Foto della stazione a 27.5 m del transetto 4 a San Felice, scattata durante una campagna di raccolta dati nel mese di Gennaio 2019, dove si vedono le trappole completamente sommerse.*

In figura 15 si può vedere la stazione a 2.5 m dal bordo della barena di Sant'Erasmus lungo il transetto 2, il giorno 13 Febbraio 2019, che appare completamente coperta da alghe e materiale organico trasportato in loco dalla marea.



*Figura 15: Foto della stazione, lungo transetto 2, che dista 2.5 m dal bordo della barena di Sant'Erasmus, scattata a Febbraio 2019 durante il campionamento, dove le trappole appaiono completamente coperte da alghe e materiale vegetale trascinato dalla marea.*

In figura 16 è riportata la stazione a distanza 27.5 m dal bordo della barena di Sant'Erasmus lungo il transetto 2, il giorno 12 marzo 2019, dove le trappole sono completamente asciutte e praticamente prive di sedimento.



*Figura 16: Foto della stazione, lungo il transetto 2, che dista 27.5 m dal bordo della barena di Sant'Erasmus, scattata a Marzo 2019 durante il campionamento, dove le trappole sono completamente asciutte e prive di sedimento.*

In figura 17 si può vedere la stazione a distanza 7.5 m dal bordo della barena di San Felice lungo il transetto 3, il giorno 17 Aprile 2019, dove si vede che sia il CD che il sottovaso hanno raccolto del materiale.



*Figura 17: Foto di una stazione del transetto 3 sulla barena di San Felice, scattata ad Aprile 2019 durante il campionamento, dove si vede che sia il CD che il sottovaso hanno raccolto del sedimento.*

## 2.3 Preparazione dei campioni

I campioni prelevati dalle stazioni vengono portati in laboratorio e riposti in dei becher sufficientemente capienti, adeguatamente etichettati e tarati, e lasciati sedimentare sotto cappa per almeno 48 ore.

Per quanto riguarda i campioni prevalentemente organici, che erano stati separati, già in fase di raccolta, dai corrispondenti campioni inorganici, questi vengono sciacquati con acqua deionizzata per staccare l'eventuale sedimento rimasto attaccato il quale poi viene aggiunto al becher del corrispondente campione inorganico, evitando così perdite di sedimento.

I campioni organici, prevalentemente composti da alghe e radici, una volta sciacquati dal sedimento vengono riposti in becher, adeguatamente etichettati, per seguire poi il medesimo procedimento di preparazione degli altri campioni.

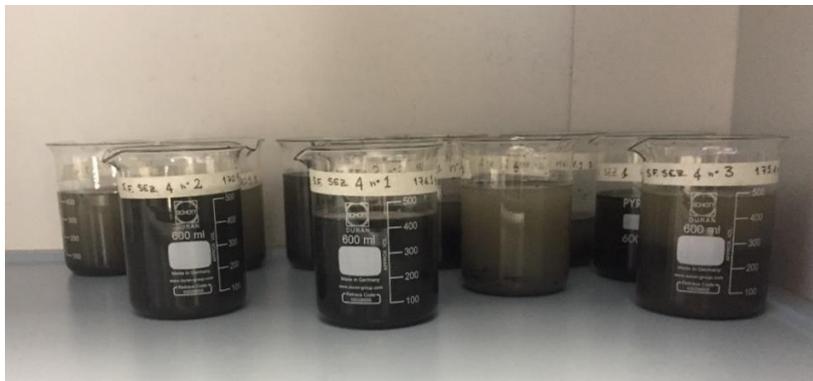


Figura 18: Foto dei campioni, all'interno dei becher, lasciati a sedimentare dentro la cappa.



Figura 19: foto dei campioni a sedimentazione avvenuta.

Dopo questa prima fase, quando i campioni sono sedimentati, si toglie l'acqua in eccesso con delle pipette pasteur, facendo attenzione a non rimettere in sospensione i sedimenti.



*Figura 20: Foto dei campioni dopo aver tolto l'acqua in eccesso.*

I becher vengono poi riposti in forno alla temperatura di 40 °C per almeno 72 ore, fino a quando i campioni non risultano asciutti e seccati.



*Figura 21: Foto dei becher, contenenti i campioni, riposti in forno.*

I becher vengono quindi tolti dal forno e pesati con il loro contenuto ormai secco. In questo modo si determina il peso netto raccolto da ciascuna trappola per sedimento.



*Figura 22: Foto dei becher contenenti campioni asciutti e secchi, dopo essere stati in forno.*

Dopo questa fase preliminare di preparazione dei campioni si passa ai procedimenti di analisi dei campioni: analisi LOI (Loss On Ignition) e analisi granulometrica.

I campioni contenenti solo materiale organico sono sottoposti alla sola analisi LOI poiché, ovviamente, un'eventuale analisi granulometrica risulterebbe inutile.

## 2.4 Analisi LOI

L'analisi LOI è un trattamento che serve a determinare il contenuto organico nei campioni ed è frequentemente utilizzato in letteratura.

Tale metodologia consente di analizzare contemporaneamente più campioni (Roner et al., 2015).

Per preparare i campioni a questo tipo di analisi è sufficiente mescolare il contenuto di ciascun campione seccato e prelevarne una parte, circa due terzi (almeno 2 g quando tale quantità di materiale raccolto è disponibile), da macinare con un mortaio in porcellana fino a renderla omogenea e uniforme.



*Figura 23: Sequenza della macinazione di un campione eseguita in laboratorio.*

I campioni macinati vengono successivamente sistemati in crogioli di porcellana, di cui è nota la tara a caldo.

Non esistendo una procedura LOI standardizzata (Heiri et al., 2001; Barillé et al., 2003; Ball 1964), in questo lavoro di tesi si è scelto di eseguire la procedura descritta da Roner et al.,(2016).

Si utilizzano circa 2 g di sedimento secco di ogni campione all'interno di ogni crogiolo che, dopo essere stati in stufa a 60°C per mezz'ora, vengono pesati e disposti all'interno di una

muffola, dove sono riscaldati ad una temperatura crescente di  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  fino al raggiungimento di  $375^{\circ}\text{C}$  per poi proseguire a temperatura costante per 16 ore.



*Figura 24: Crogioli in porcellana, contenenti i campioni precedentemente macinati, disposti all'interno del forno a muffola.*

Al termine del processo si lasciano raffreddare i campioni in un essiccatore per mezz'ora per uniformare le condizioni rispetto alla pesata precedente la combustione ed in seguito si procede alla pesata lorda post-combustione. La differenza di peso, prima e dopo il processo di combustione, permette di determinare la quantità di materia organica bruciata che rappresenta la quantità di materia organica contenuta in ogni campione.



*Figura 25: Crogioli, contenenti i campioni, all'interno dell'essiccatore.*

## 2.5 Analisi granulometrica

I sedimenti lagunari sono prevalentemente trasportati per sospensione quindi la granulometria inorganica rientra nel campo delle argille, limi e al massimo delle sabbie fini ma non supera mai i 2 mm che rappresenta la soglia del campo delle ghiaie.

La procedura di analisi comincia con la separazione di circa un terzo (almeno 0.5 g) del materiale contenuto in ciascun campione seccato (i.e. dopo l'asciugatura in forno a 40° C) che viene collocato in un nuovo becher sufficientemente alto e lasciato reagire con acqua ossigenata (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) di concentrazione 35% per 36 ore.

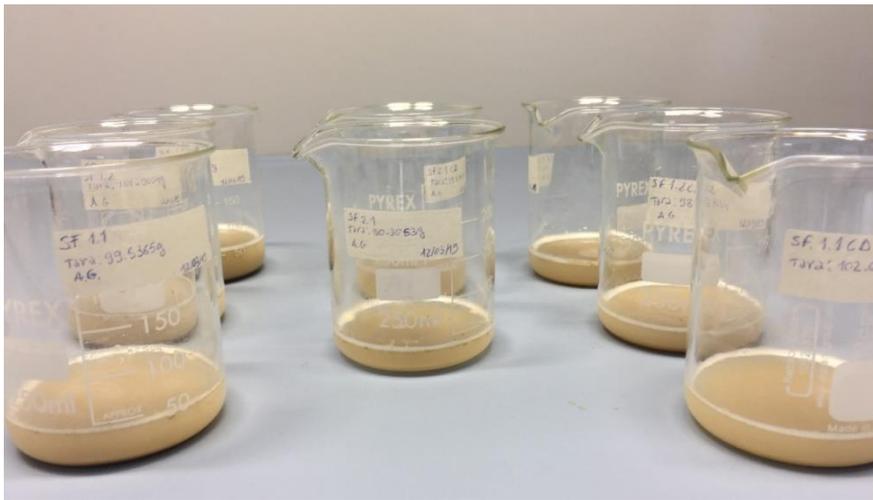


Figura 26: Foto di alcuni campioni durante la reazione con l'acqua ossigenata dove si vede la formazione della schiuma superficiale.

Questo trattamento con acqua ossigenata è fondamentale poiché serve a rimuovere la sostanza organica tramite una reazione esotermica e per questo si svolge sotto cappa aspirante.

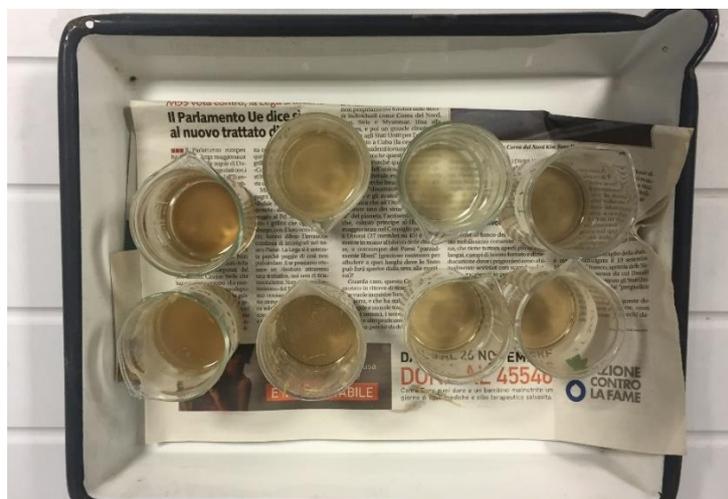


Figura 27: Foto di alcuni campioni terminata la reazione con l'acqua ossigenata.

La rimozione della sostanza organica è una fase necessaria prima dell'analisi granulometrica sulla frazione inorganica con un granulometro laser, che utilizza la diffrazione laser per determinare le dimensioni delle particelle misurando l'intensità della luce diffusa mentre un raggio laser attraversa le particelle del sedimento disperso in acqua deionizzata.

La sostanza organica può presentare diverse forme e misure quindi, per non alterare la distribuzione granulometrica finale della frazione inorganica, è necessaria la sua rimozione dal campione poiché il granulometro laser la registrerebbe come un granulo di sedimento durante il processo di misura.

Una volta terminata la reazione con acqua ossigenata si aggiunge alla soluzione dell'acqua deionizzata, circa 100 ml, allo scopo di creare una colonna d'acqua che permetta di far emergere in superficie la materia organica residua, come ad esempio pezzi di radici, e di far decantare la parte inorganica (per almeno 24 ore), che viene poi sottoposta all'analisi con il granulometro laser.

Successivamente, per riuscire a prelevare dai becher la materia inorganica destinata all'analisi granulometrica, si passa alla fase di vuotamento dei becher tramite sifonamento e manualmente con delle pipette pasteur, facendo attenzione a non rimettere in sospensione il materiale.

Il materiale precipitato, ancora sommerso da un paio di millimetri d'acqua, viene posto in forno a circa 40°C fino alla completa asciugatura, viene poi staccato dai becher raschiando delicatamente le pareti con una spatolina metallica.



*Figura 28: Foto di alcuni campioni asciugati in forno e pronti per essere rimossi dai becher ed imbustati.*

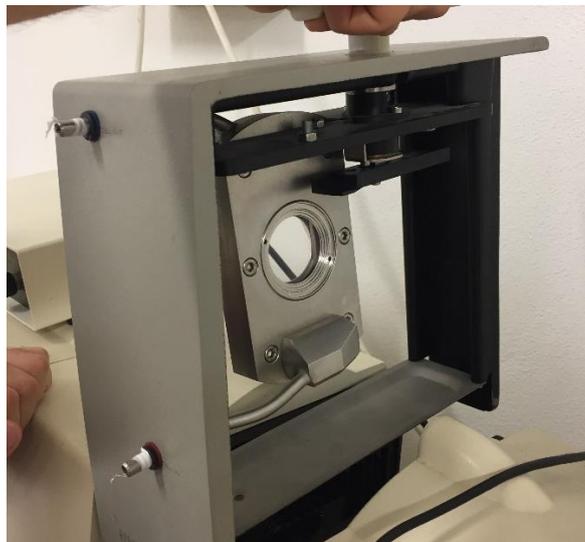
Una volta che il campione è pronto si sottopone all'analisi granulometrica, la quale viene effettuata mediante l'utilizzo di un Mastersizer 2000 prodotto dall'azienda Malvern Panalytical.



*Figura 29: Foto del Mastersizer 2000 che è stato utilizzato per effettuare l'analisi granulometrica dei campioni.*

Il Mastersizer 2000 è collegato ad un agitatore che mette in sospensione i sedimenti, dispersi in acqua deionizzata, che poi fluiscono tra una coppia di lenti, all'interno del granulimetro, attraverso le quali passa un laser che subisce una deviazione del suo percorso in funzione del diametro dei sedimenti e viene raccolto da un detector.

Il software dello strumento restituisce la curva granulometrica del campione analizzato.



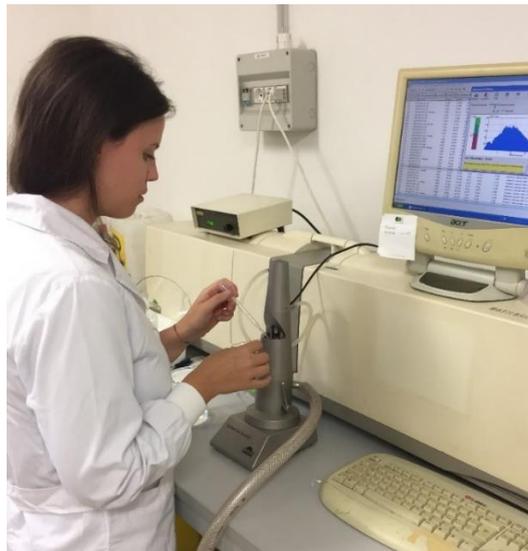
*Figura 30: Foto della coppia di lenti all'interno del granulimetro attraverso le quali fluisce il sedimento disperso in acqua deionizzata.*

Per effettuare l'analisi granulometrica di un campione è necessario, innanzitutto, versare in un becher con una spatola una parte omogenea di sedimento e mescolarla con dell'acqua deionizzata per metterla in sospensione.



*Figura 31: Foto del becher contenente il campione con acqua deionizzata, prima di iniziare l'analisi granulometrica.*

Dopo aver effettuato la calibrazione del granulimetro, si aspira il materiale contenuto nel becher con una pipetta pasteur in modo omogeneo e lo si aggiunge, insieme a dell'acqua deionizzata, all'interno dell'agitatore fino ad ottenere un'oscurazione del laser tra il 10 e 20%.



*Figura 32: Foto che rappresenta il momento in cui viene versato il materiale omogeneo con una pipetta pasteur all'interno dell'agitatore.*

Una volta inseriti i dati del campione si imposta il granulimetro in modo che effettui tre misure consecutive del materiale inserito al fine di poter avere una misura più precisa e poterne calcolare la media.

## 2.6 Procedimento di raccolta dei campioni di microphytobenthos

Come descritto in precedenza, la presenza di microalghe che colonizzano gli stati superficiali di terreno dei bassifondi e delle barene può produrre un effetto stabilizzante e, pertanto, influenzare le dinamiche di risospensione ovvero la disponibilità di sedimenti in sospensione. Per questo motivo, nell'ambito della campagna di misure che il presente lavoro di tesi ha contribuito a mettere a punto si è deciso di prelevare campioni atti ad analizzare e quantificare l'eventuale presenza di microphytobenthos in prossimità delle stazioni di misura selezionate.

Durante i sei mesi di campionamento, oltre ai campioni contenuti nelle trappole per sedimenti, sono stati raccolti dei campioni di microphytobenthos.

I campioni di MPB inizialmente sono stati raccolti con un carotatore su un bassofondo vicino al transetto 1 sulla barena di Sant'Erasmus, dove precedentemente era stato fissato un sensore di temperatura in grado di misurare in continuo la temperatura al fondo.

A seconda del livello della marea le carote sono state fatte direttamente dall'imbarcazione agganciando il carotatore ad una prolunga metallica oppure a mano, quando la marea era tale da permettere di raggiungere a piedi il luogo di campionamento.



*Figura 33: Foto del carotatore applicato a mano direttamente sul bassofondo, scattata a Marzo 2019 durante una bassa marea eccezionale.*



Ogni mese di raccolta dei campioni sono state fatte tre carote, con diametro di circa 3.5 cm, sul bassofondo e su ciascuna di esse veniva reciso, tramite l'utilizzo di un taglierino, il primo mezzo centimetro di terreno coincidente con la parte superficiale del fondale.

I tre campioni così prelevati venivano poi raccolti in un contenitore con una soluzione, costituita da acqua di mare filtrata e fissativo, in grado di conservare a lungo i campioni da analizzare in laboratorio.

*Figura 34: Foto scattata durante un campionamento dove si vede la fase di estrazione del campione dal carotatore tramite l'utilizzo di uno stantuffo.*

I campioni sul bassofondo, così raccolti, hanno una consistenza liquida essendo perlopiù composti da limo e argilla ed è risultato quindi difficile, in laboratorio, dissociare il microphytobenthos dal resto del campione per analizzarlo. Per quest'ultimo motivo durante i campionamenti successivi, a partire dal mese di Febbraio 2019 in poi, oltre ai campioni sul bassofondo si è iniziato a raccogliere campioni di MPB anche sulla superficie della barena di Sant'Erasmus lungo in transetto 1.

Per effettuare le carote sulla superficie della barena, si è utilizzata una siringa da 20 ml, tagliata all'estremità superiore, per contenere la quantità di sedimenti e si è successivamente reciso il primo mezzo centimetro di terreno coincidente con lo strato superficiale.

Sono stati raccolti 4 campioni per ogni stazione lungo il transetto 1 a Sant'Erasmus (a 2.5m, 7.5m e 27.5 m dal bordo della barena) e in aggiunta sono stati raccolti 4 campioni in corrispondenza del bordo della barena e sul bassofondo ad un metro di distanza dal bordo, davanti al transetto 1.

I campioni raccolti sono stati poi collocati in provette Falcon da 50 ml, senza acqua e fissativo, e conservati in un luogo fresco e asciutto. In particolare, durante gli ultimi due campionamenti, effettuati nei mesi di marzo e Aprile 2019, le provette Falcon sono state sostituite da piastre di Petri in plastica per facilitare l'analisi in laboratorio.

Infine, presso il laboratorio del Dipartimento di Biologia, è stato sviluppato un procedimento di analisi dei campioni raccolti di MPB.



## CAPITOLO 3 – RISULTATI

Nel presente capitolo verranno presentati e discussi i risultati derivanti dalle analisi descritte nel capitolo precedente.

### 3.1 Confronto tra trappole per sedimento cilindriche ed a superficie piana

Nelle stazioni presenti sulla barena di San Felice e Sant’Erasmus, dove sono presenti trappole per sedimenti di tipo diverso, può essere di interesse confrontare le quantità di sedimento, in termini di massa, raccolte mensilmente.

Le trappole sulla barena di San Felice sono state posizionate il 15 Ottobre 2018 mentre le trappole sulla barena a Sant’Erasmus il 24 Ottobre 2018 e in entrambi i siti di campionamento ci si è recati ogni mese a raccogliere i campioni fino al 17 Aprile 2019.

Di seguito sono riportati gli istogrammi della massa raccolta da ciascun tipo di trappola lungo ciascun transetto.

Nel grafico in figura 35 è rappresentata la massa raccolta da ogni sottovaso lungo il transetto 1 della barena di Sant’Erasmus, durante i diversi intervalli di campionamento.

Nel primo periodo (24/10/2018 - 04/12/2018) la sedimentazione è stata decisamente maggiore rispetto agli altri intervalli ed in particolare nella stazione posizionata a 7.5 m dal bordo della barena si è registrata un valore della massa pari a più del doppio del valore delle altre due stazioni.

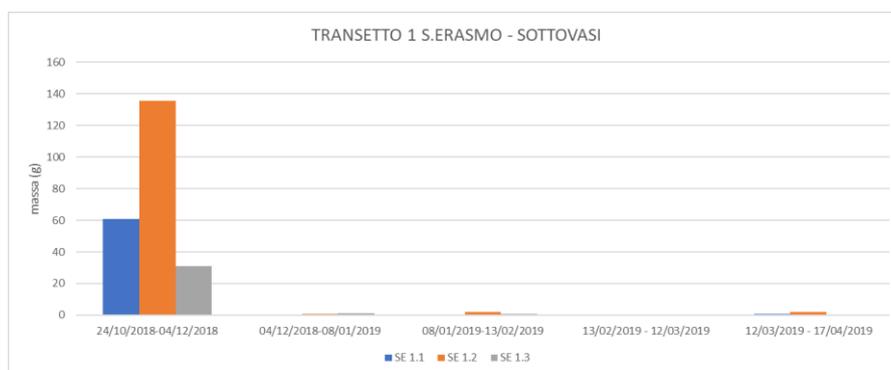


Figura 35: Massa raccolta dai sottovasi disposti lungo il transetto 1 a Sant’Erasmus durante ogni intervallo di campionamento.

Il grafico in figura 36 raffigura la massa trattenuta da ogni CD lungo il transetto 1 della barena di Sant'Erasmus, durante i diversi intervalli di campionamento.

Rispetto alle trappole del primo tipo, la massa raccolta dai CD è molto inferiore però, anche in questo caso, i valori massimi sono registrati nel primo periodo ed in particolare nella seconda stazione.



Figura 36: Massa raccolta dai CD disposti lungo il transetto 1 a Sant'Erasmus durante ogni intervallo di campionamento.

Nel grafico in figura 37 è rappresentata la massa raccolta da ogni sottovaso lungo il transetto 2 della barena di Sant'Erasmus, durante i diversi intervalli di campionamento.

Nel transetto 2 i valori di sedimentazione maggiori sono stati riscontrati nel primo periodo (24/10/2018 - 04/11/2018) ed anche nel secondo (04/11/2018 - 04/12/2018) e quarto (08/01/2019 - 13/02/2019) periodo sono stati registrati valori considerevoli. Inoltre, è interessante osservare che, per ogni periodo, i valori massimi della massa corrispondono alla stazione intermedia, posizionata a 7.5 m dal bordo della barena.

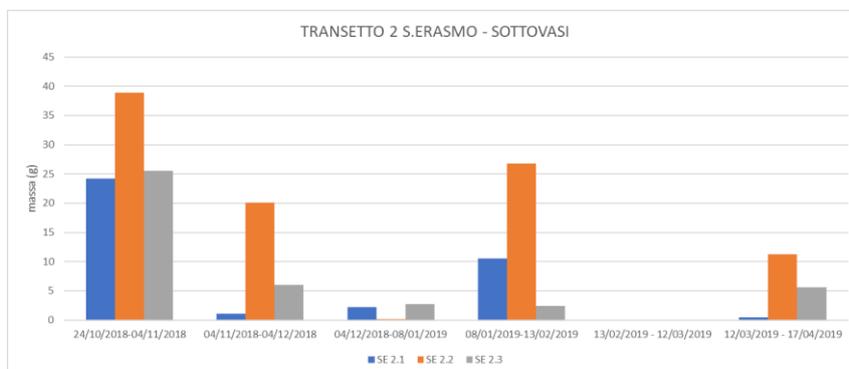


Figura 37: Massa raccolta dai sottovasi disposti lungo il transetto 2 a Sant'Erasmus durante ogni intervallo di campionamento.

Il grafico in figura 38 raffigura la massa trattenuta da ogni CD lungo il transetto 2 della barena di Sant’Erasmus, durante i diversi intervalli di campionamento.

Rispetto ai sottovasi i valori maggiori di sedimentazione corrispondono al quarto periodo e, in generale, nei vari intervalli, in corrispondenza della stazione intermedia vi sono i valori massimi.

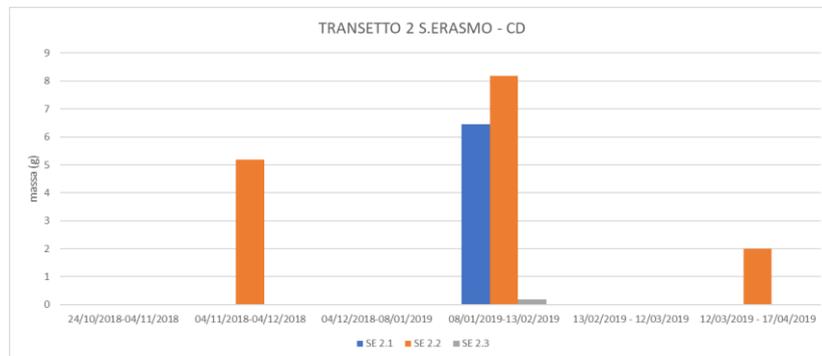


Figura 38: Massa raccolta dai cd disposti lungo il transetto 2 a Sant’Erasmus durante ogni intervallo di campionamento.

Nel grafico in figura 39 è rappresentata la massa raccolta da ogni sottovaso lungo il transetto 1 sulla barena di San Felice, durante i diversi intervalli di campionamento.

Nel secondo periodo (04/11/2018 – 04/12/2018) la sedimentazione è stata superiore rispetto agli altri intervalli ed il valore massimo corrisponde alla prima stazione posizionata a 2.5 m dal bordo della barena. In tutti gli altri periodi si può notare una distribuzione piuttosto uniforme tra le tre stazioni.



Figura 39: Massa raccolta dai sottovasi disposti lungo il transetto 1 a San Felice durante ogni intervallo di campionamento.

Nel grafico in figura 40 è rappresentata la massa raccolta da ogni CD lungo il transetto 1 sulla barena di San Felice, durante i diversi intervalli di campionamento, ed è possibile osservare che la sedimentazione è stata massima nel secondo periodo ed in particolare nella stazione a 2.5 m dal bordo della barena, come si è evidenziato nella figura precedente.

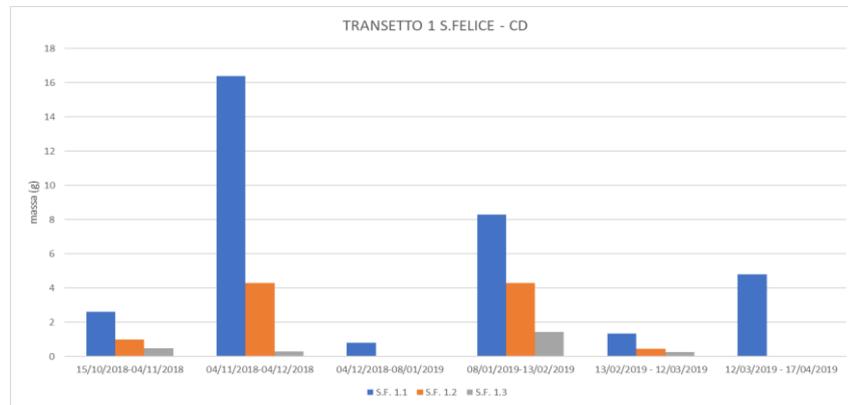


Figura 40: Massa raccolta dai cd disposti lungo il transetto 1 a San Felice durante ogni intervallo di campionamento.

Nel grafico in figura 41 è rappresentata la massa raccolta da ogni sottovaso lungo il transetto 2 sulla barena di San Felice, durante i diversi intervalli di campionamento, dove si può osservare che la sedimentazione risulta molto superiore nel primo periodo rispetto agli altri intervalli.

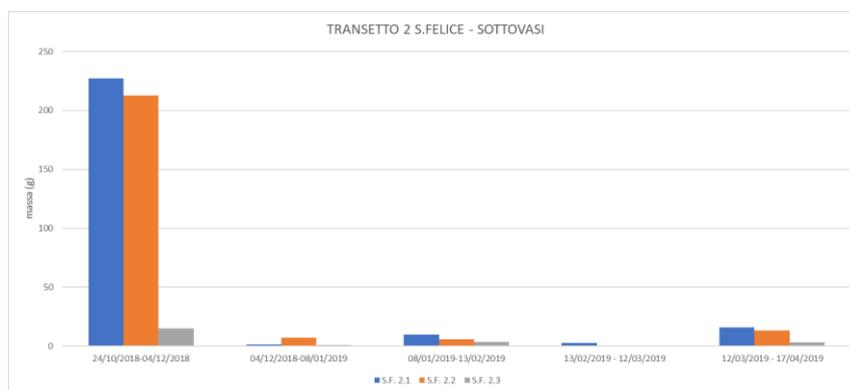


Figura 41: Massa raccolta dai sottovasi disposti lungo il transetto 2 a San Felice durante ogni intervallo di campionamento.

In figura 42 è rappresentata la massa raccolta da ogni CD lungo il transetto 2 sulla barena di San Felice, durante i diversi intervalli di campionamento, per la quale è possibile fare le medesime considerazioni della figura precedente.

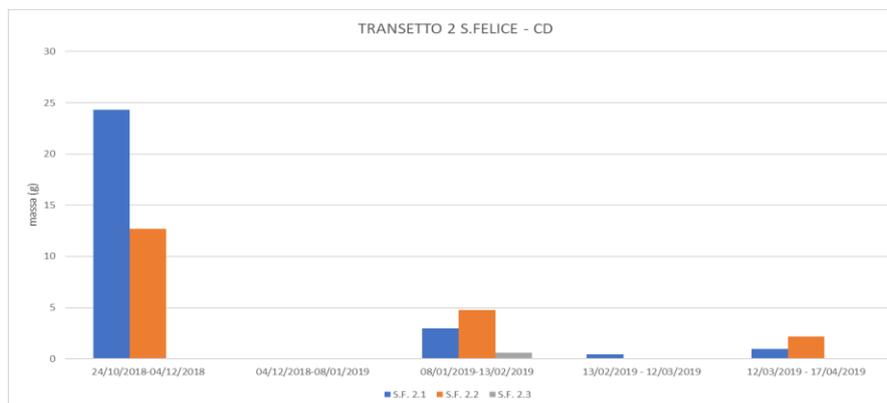


Figura 42: Massa raccolta dai cd disposti lungo il transetto 2 a San Felice durante ogni intervallo di campionamento.

Nel grafico in figura 43 è rappresentata la massa raccolta da ogni sottovaso lungo il transetto 3 sulla barena di San Felice, durante i diversi intervalli di campionamento.

È possibile osservare che la sedimentazione risulta molto più elevata nel primo intervallo di campionamento rispetto agli altri e in generale, in ogni intervallo, la sedimentazione è piuttosto omogenea lungo il transetto.

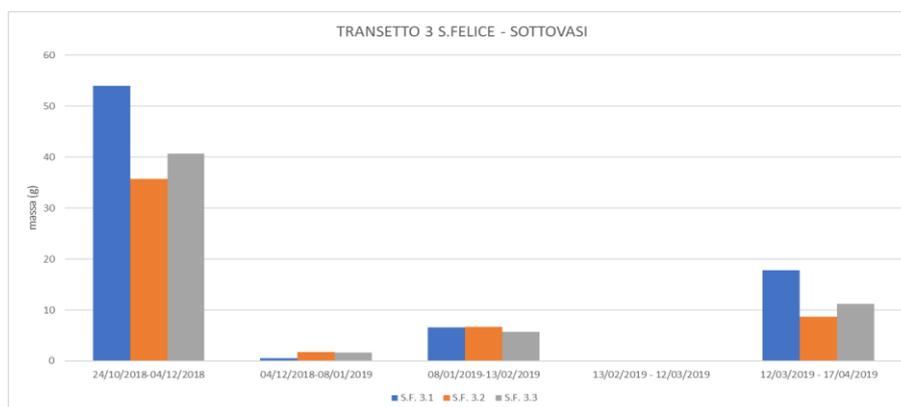


Figura 43: Massa raccolta dai sottovasi disposti lungo il transetto 3 a San Felice durante ogni intervallo di campionamento.

Nel grafico in figura 44 è rappresentata la massa raccolta da ogni CD lungo il transetto 3 sulla barena di San Felice, durante i diversi intervalli di campionamento.

In questo grafico la massa raccolta risulta superiore nel primo (24/10/2018 – 04/12/2018) e terzo periodo (08/01/2019 – 13/02/2019) e in particolare nella prima stazione collocata a 2.5 m dal bordo della barena.

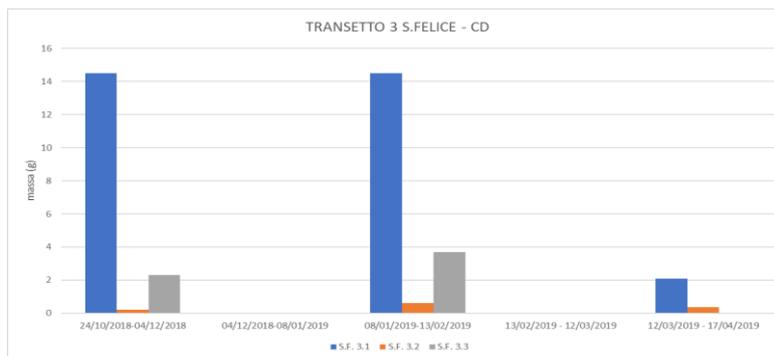


Figura 44: Massa raccolta dai cd disposti lungo il transetto 3 a San Felice durante ogni intervallo di campionamento.

Nel grafico in figura 45, che rappresenta la massa raccolta da ogni sottovaso lungo il transetto 4 sulla barena di San Felice, durante i diversi intervalli di campionamento, è possibile osservare che la sedimentazione è superiore nel primo (15/10/2018 – 04/11/2018) e nel secondo periodo (04/11/2018 – 04/12/2018) dove i valori massimi sono registrati nella stazione intermedia, a 7.5 m dal bordo della barena.

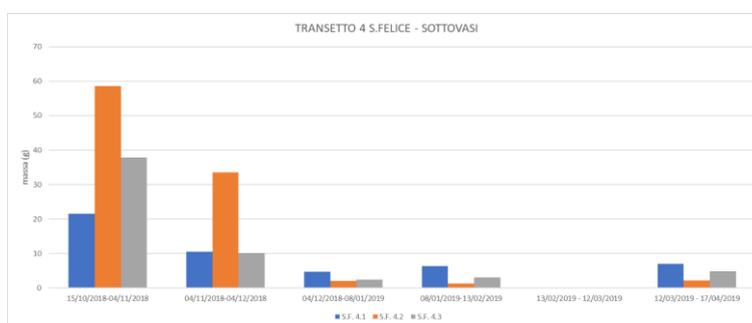


Figura 45: Massa raccolta dai sottovasi disposti lungo il transetto 4 a San Felice durante ogni intervallo di campionamento.

Nel grafico in figura 46, dove è rappresentata la massa raccolta da ogni CD lungo il transetto 4 sulla barena di San Felice, durante i diversi intervalli di campionamento, si può osservare che la sedimentazione risulta maggiore nei primi due intervalli di campionamento e in particolare il valore massimo corrisponde alla prima stazione del primo periodo.

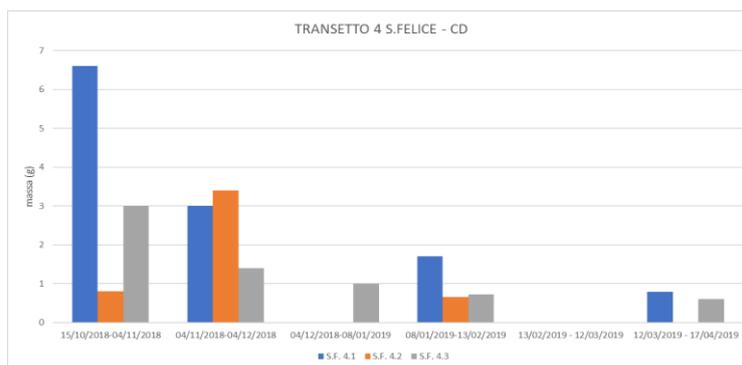


Grafico 46: Massa raccolta dai cd disposti lungo il transetto 4 a San Felice durante ogni intervallo di campionamento.

Per un confronto più immediato tra le due tipologie di “trappole per sedimento” utilizzate in questo lavoro di tesi, sono riportati di seguito, per ogni transetto di ciascun sito di studio, i grafici che raffigurano la massa raccolta dai CD e quella raccolta dai sottovasi, nei medesimi periodi di campionamento e nelle stesse stazioni (a 2.5 m, 7.5 m e 27.5 m di distanza dal bordo della barena).

### Barena di Sant’Erasmo: transetto 1

Si può osservare nei grafici di figura 47 che, in generale, la massa raccolta risulta superiore nei sottovasi rispetto ai CD e in particolare, in quasi tutti gli intervalli di campionamento, la sedimentazione è massima nella seconda stazione, posizionata a 7.5 m dal bordo della barena.

Inoltre, nel grafico B la massa raccolta dai CD risulta sempre nulla.

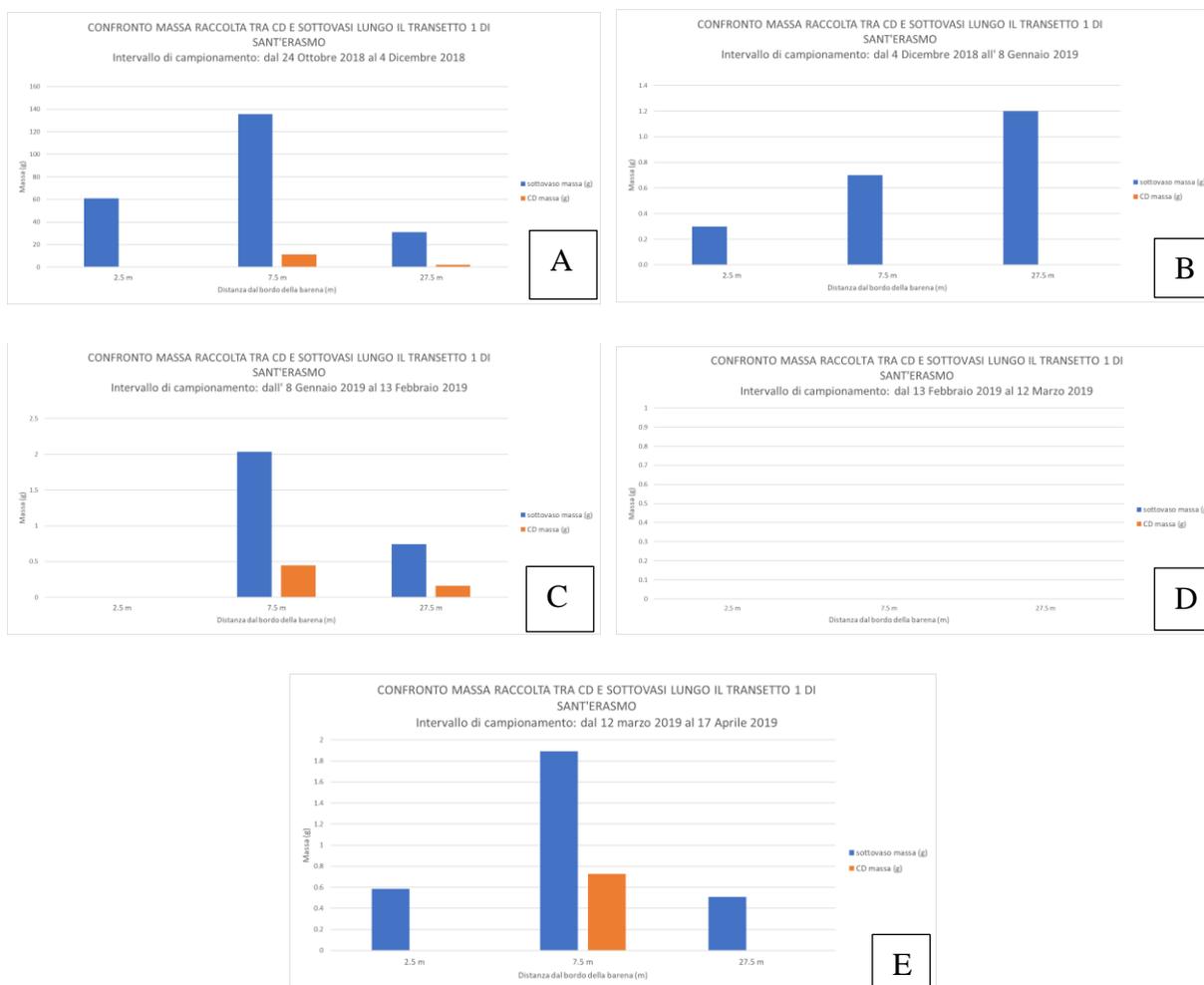


Figura 47: Confronto tra la massa raccolta dai CD (colore arancione) e sottovasi (colore blu) per ogni stazione appartenente al transetto 1 di Sant’Erasmo, durante i vari intervalli di campionamento: (A) periodo 24 Ottobre 2018 - 4 Dicembre 2018, (B) periodo 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (C) periodo 8 gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (D) periodo 13 Febbraio 2019 - 12 Marzo 2019, (E) periodo 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

## Barena di Sant'Erasmus: transetto 2

Nei grafici di figura 48 è possibile fare le medesime osservazione poste nel caso del transetto 1 sulla barena di Sant'Erasmus. Inoltre, nei grafici A e C è possibile notare che la massa raccolta dai CD risulta sempre nulla.

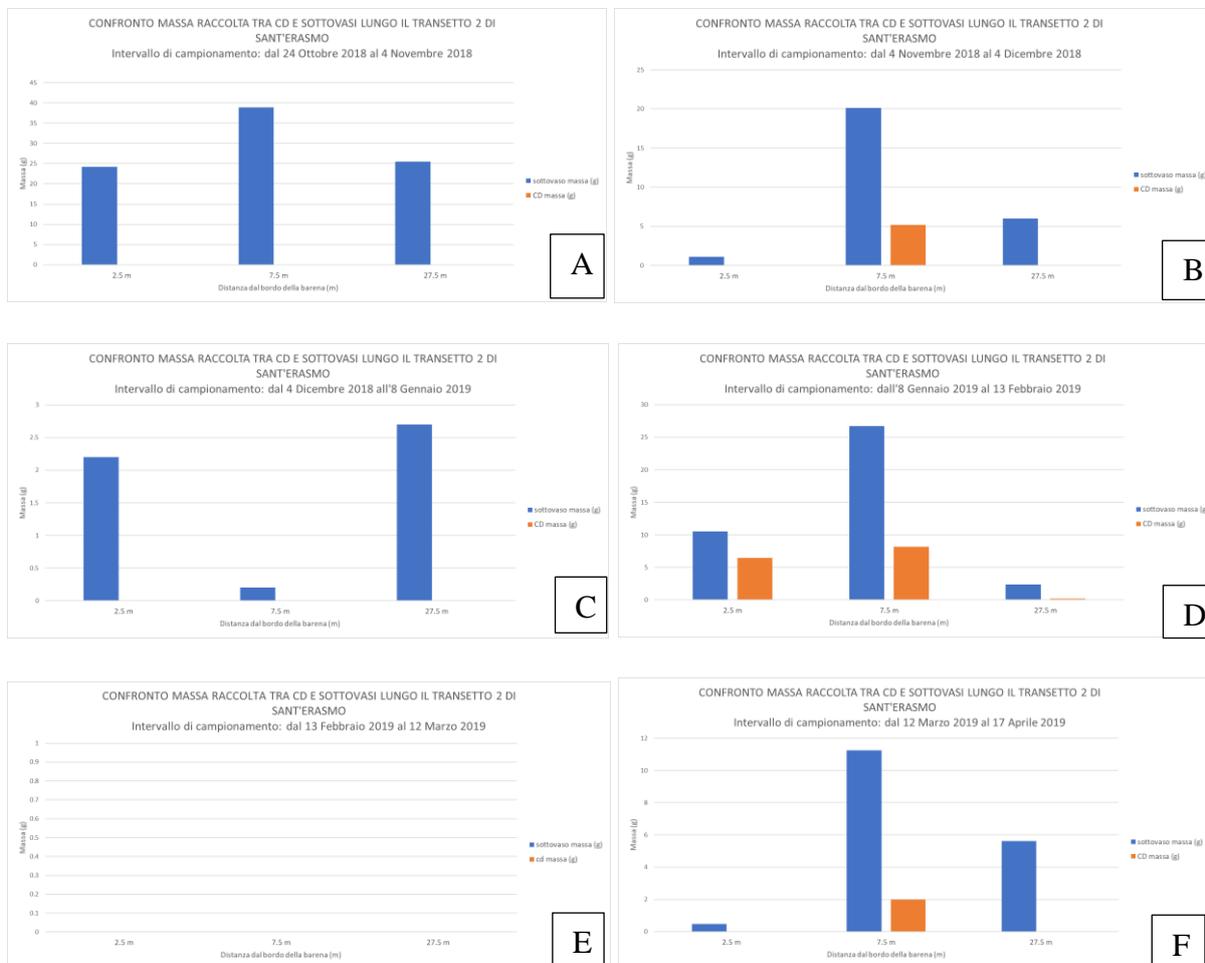


Figura 48: Confronto tra la massa raccolta dai CD (colore arancione) e sottovasi (colore blu) per ogni stazione appartenente al transetto 2 di Sant'Erasmus, durante i vari intervalli di campionamento: (A) periodo 24 Ottobre 2018 - 4 Dicembre 2018, (B) periodo 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (C) periodo 8 gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (D) periodo 13 Febbraio 2019 - 12 Marzo 2019, (E) periodo 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

## Barena di San Felice: transetto 1

Lungo il transetto 1 della barena San Felice la massa raccolta risulta sempre superiore nei sottovasi rispetto a quella raccolta dai CD ed in particolare, in ogni intervallo di campionamento, i valori massimi sono registrati nella prima stazione, a 2.5 m dal bordo della barena.

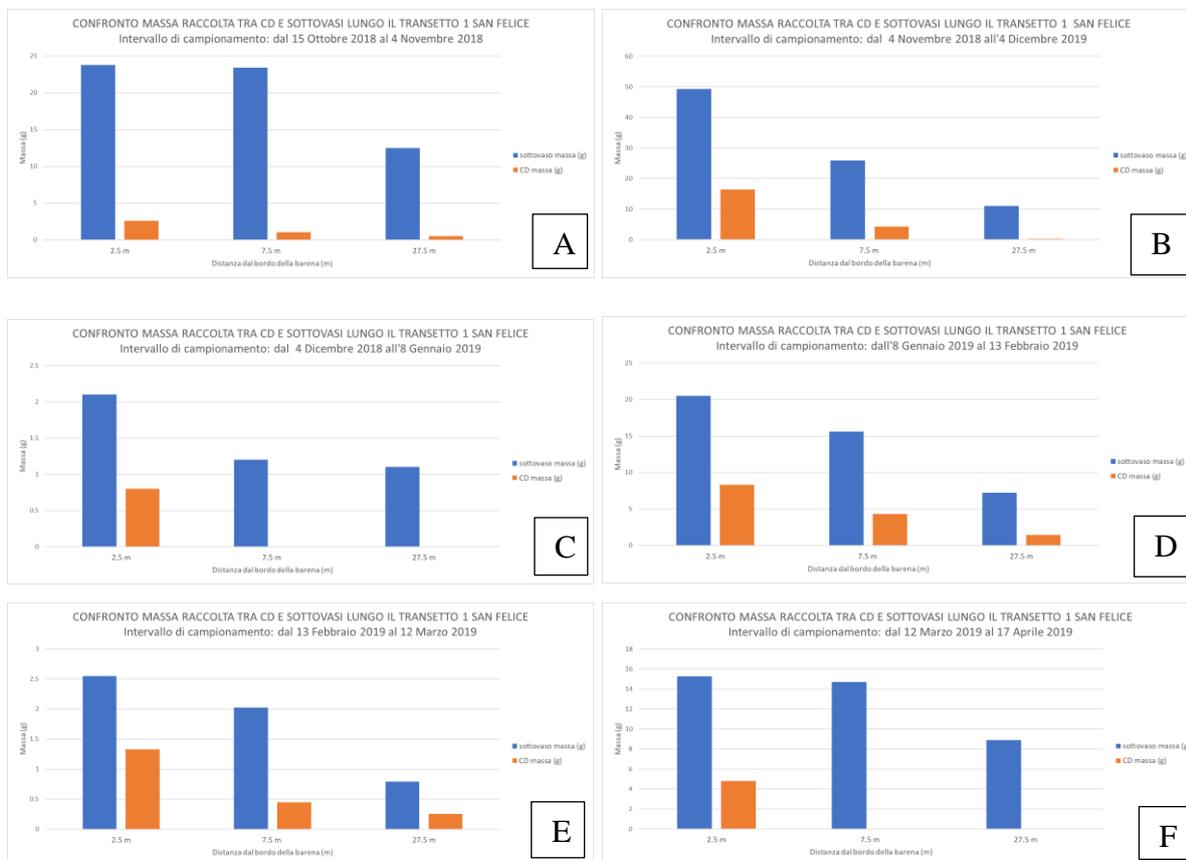


Figura 49: Confronto tra la massa raccolta dai CD (colore arancione) e sottovasi (colore blu) per ogni stazione appartenente al transetto 1 di San Felice, durante i vari intervalli di campionamento: (A) periodo 15 Ottobre 2018 - 4 Dicembre 2018, (B) periodo 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (C) periodo 8 gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (D) periodo 13 Febbraio 2019 - 12 Marzo 2019, (E) periodo 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

## Barena di San Felice transetto 2

Anche nel transetto 2 sulla barena di San Felice si possono fare le medesime osservazioni fatte per la figura 49. Inoltre, la massa raccolta dai CD risulta sempre nulla nel grafico B ovvero per il mese di Dicembre 2018.

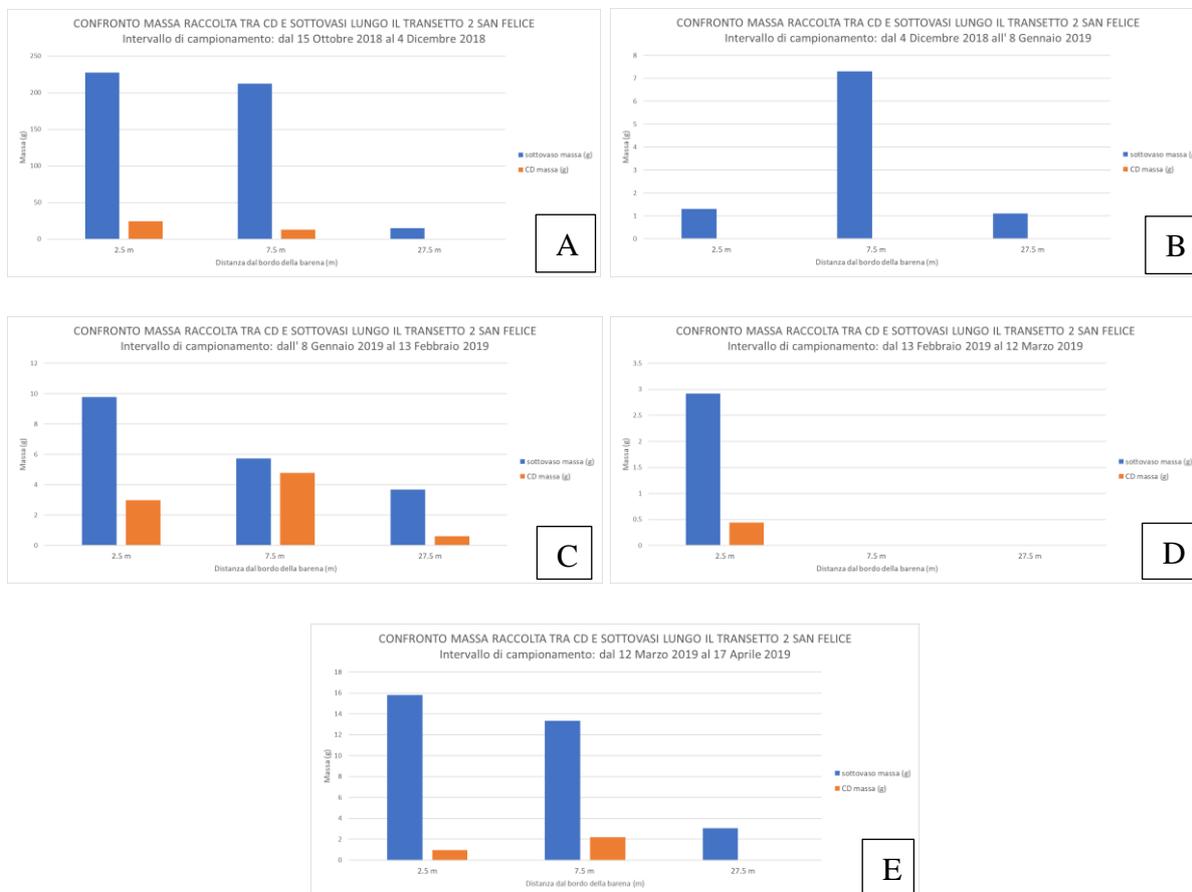


Figura 50: Confronto tra la massa raccolta dai CD (colore arancione) e sottovasi (colore blu) per ogni stazione appartenente al transetto 2 di San Felice, durante i vari intervalli di campionamento: (A) periodo 15 Ottobre 2018 - 4 Dicembre 2018, (B) periodo 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (C) periodo 8 gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (D) periodo 13 Febbraio 2019 - 12 Marzo 2019, (E) periodo 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

### Barena di San Felice: transetto 3

Nei seguenti grafici, si può osservare nuovamente che la massa raccolta dai sottovasi è sempre superiore a quella dei CD. In particolare, nel grafico B, la massa raccolta dai CD risulta nulla diversamente da quanto registrato nei sottovasi.

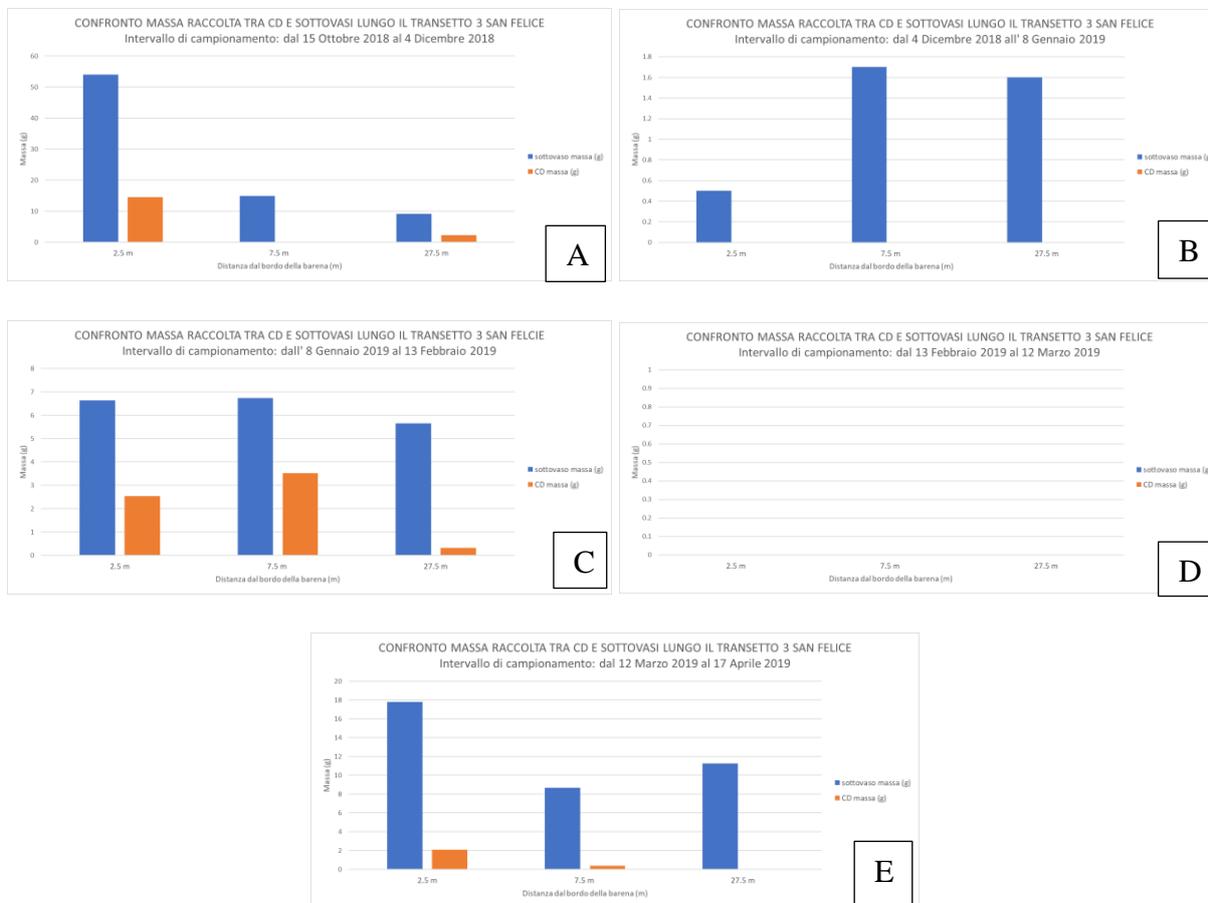


Figura 50: Confronto tra la massa raccolta dai CD (colore arancione) e sottovasi (colore blu) per ogni stazione appartenente al transetto 3 di San Felice, durante i vari intervalli di campionamento: (A) periodo 15 Ottobre 2018 - 4 Dicembre 2018, (B) periodo 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (C) periodo 8 gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (D) periodo 13 Febbraio 2019 - 12 Marzo 2019, (E) periodo 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

## Barena di San Felice: transetto 4

Anche lungo il transetto 4 la massa raccolta dai sottovasi risulta sempre superiore a quella raccolta dai CD ed in particolare i valori massimi sono registrati nella prima o nella seconda stazione.

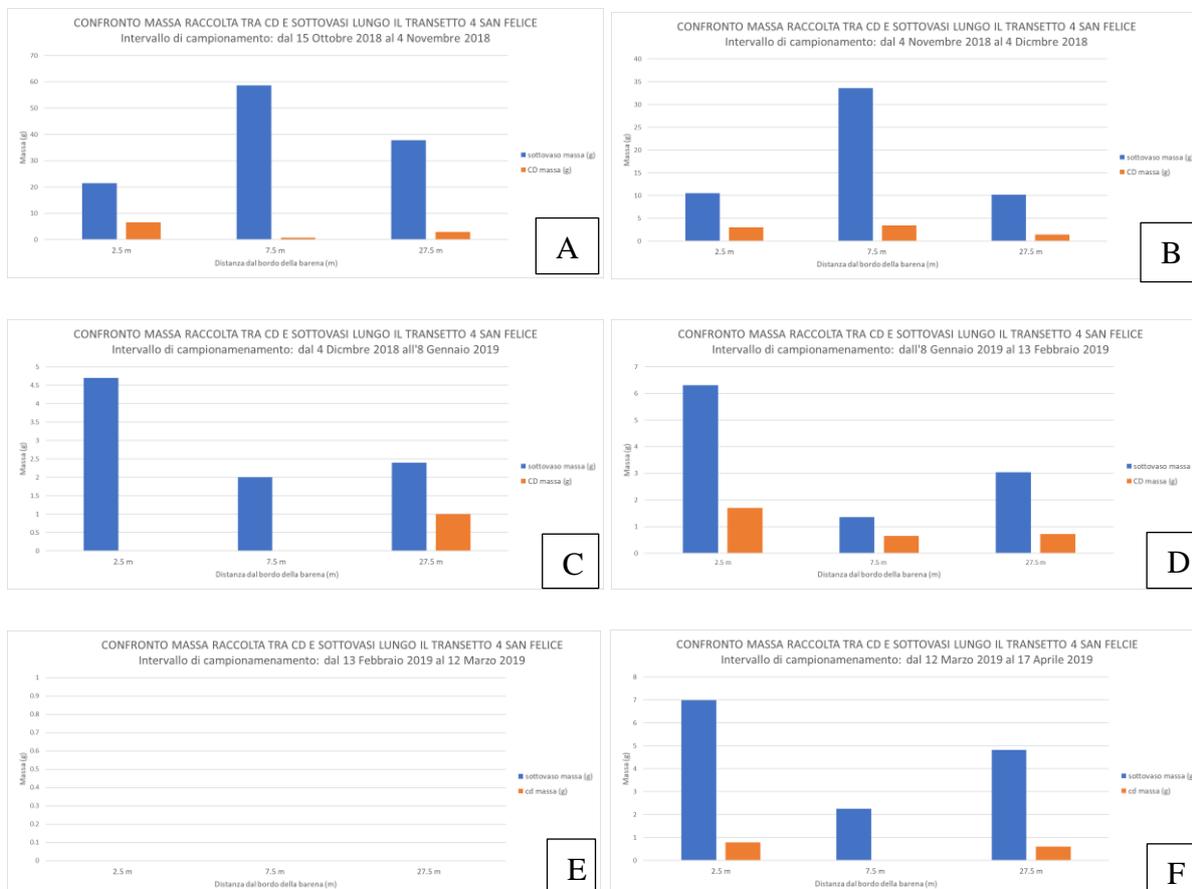


Figura 51: Confronto tra la massa raccolta dai CD (colore arancione) e sottovasi (colore blu) per ogni stazione appartenente al transetto 4 di San Felice, durante i vari intervalli di campionamento: (A) periodo 15 Ottobre 2018 - 4 Dicembre 2018, (B) periodo 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (C) periodo 8 gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (D) periodo 13 Febbraio 2019 - 12 Marzo 2019, (E) periodo 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

Come si evince dai grafici sopra riportati l'ordine di grandezza della massa raccolta dai CD è sempre inferiore rispetto a quello dei sottovasi ma rispetta lo stesso tipo di variazione temporale. Infatti, sia con i sottovasi che con i CD, la massa raccolta risulta superiore nei mesi autunnali e invernali.

Inoltre, in quasi tutti i transetti, i valori massimi di massa raccolta ricadono nel primo intervallo di campionamento, intervallo temporale nel quale si è registrata l'ondata di maltempo, denominata tempesta Vaia, dal 26 al 30 Ottobre 2018, di origine atlantica, che portò persistenti piogge e un fortissimo vento di Scirocco su tutto il Triveneto causando alluvioni, smottamenti

e la distruzione di decine di migliaia di ettari di foreste alpine. In particolare, nel primo pomeriggio del 29 ottobre 2018, in Laguna di Venezia, si è registrata la quarta marea eccezionale più alta di sempre, raggiungendo quasi i 160 centimetri sullo zero di Punta della Salute e venti che hanno raggiunto i circa 25 m/s (i.e. circa 90 km/h) così come registrato dalla stazione di Diga Sud Chioggia.

Da questo confronto emerge chiaramente che le trappole per sedimenti cilindriche trattengono una quantità di materiale superiore rispetto a quelle a superficie piana. Infatti, in alcuni periodi di campionamento, il materiale raccolto dai CD è risultato essere nullo nonostante i sottovasi, pur avendo raccolto poco materiale, non fossero risultati vuoti.

Si è portati a pensare che il sottovaso, a causa della sua forma a catino, che tende a "proteggere" i sedimenti in esso depositati, possa produrre una leggera sovrastima del tasso di deposizione. Al contrario il CD, per quanto reso artificialmente scabro, quasi certamente fornisce una stima per difetto del medesimo processo soprattutto per i periodi caratterizzati da ridotta deposizione. Il materiale depositato in piccola quantità sulla superficie del CD viene rimosso molto più agevolmente di quanto verosimilmente non succederebbe al medesimo materiale depositato sul terreno dove le naturali macro-asperità e "l'incastro" con i granelli già presenti sulla superficie sicuramente rendono più difficile la rimovimentazione.

Per questo motivo, e per semplicità espositiva, nel paragrafo successivo i risultati verranno presentati in riferimento alle trappole cilindriche presenti in tutti i siti di studio, nonostante le analisi siano state svolte, allo stesso modo per il materiale raccolto da entrambe le tipologie di trappole.

### 3.2 Confronto tra transetti situati nello stesso sito e in siti diversi

Di seguito sono riportati, per tutti e tre i siti di studio (barene di: Sant'Erasmus, San Felice e Conche), i grafici che illustrano l'andamento della massa di materiale raccolta per unità di area dei sottovasi ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) al variare della distanza dal margine della barena, per ciascun intervallo di campionamento.

#### Barena di Sant'Erasmus

Nei grafici di figura 52 è possibile osservare che, nella maggior parte dei casi, lungo il transetto 2 si è misurata una massa depositata per unità di area del sottovaso superiore rispetto al transetto 1 ed in particolare i valori maggiori, in entrambi i transetti, corrispondono alla stazione intermedia.

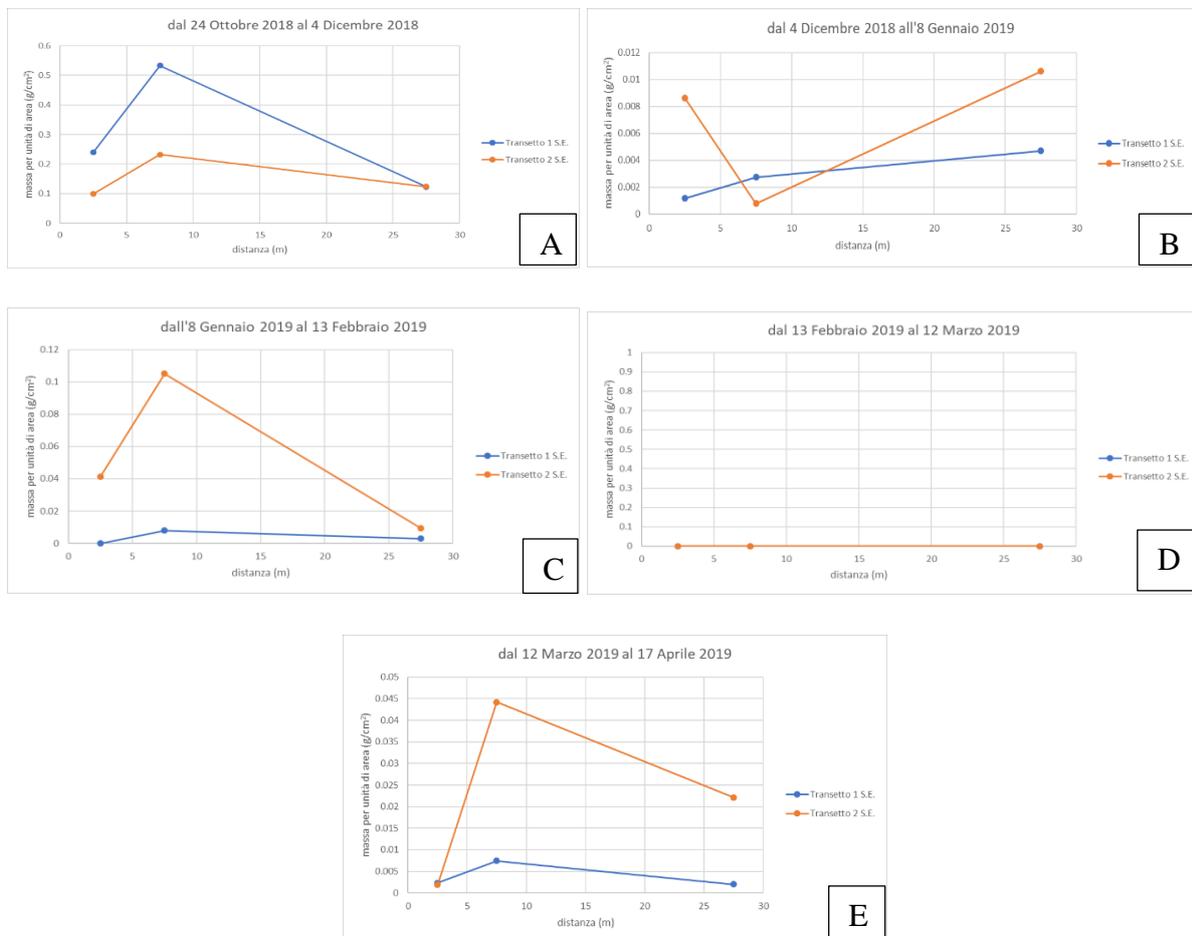


Figura 52: Quantità di massa raccolta per unità di area del sottovaso, durante gli intervalli di campionamento, lungo ogni transetto disposto sulla barena di Sant'Erasmus: (A) periodo 24 Ottobre 2018 - 4 Dicembre 2018, (B) periodo 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (C) periodo 8 gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (D) periodo 13 Febbraio 2019 - 12 Marzo 2019, (E) periodo 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

## Barena di San Felice

Nei grafici di figura 53 si può notare che, per quanto riguarda la barena San Felice, in quasi tutti gli intervalli di campionamento, è il transetto 2 a registrare i valori massimi di massa per unità di area ed in particolare nelle prime due stazioni, posizionate a 2,5 e 7.5 m dal bordo della barena.

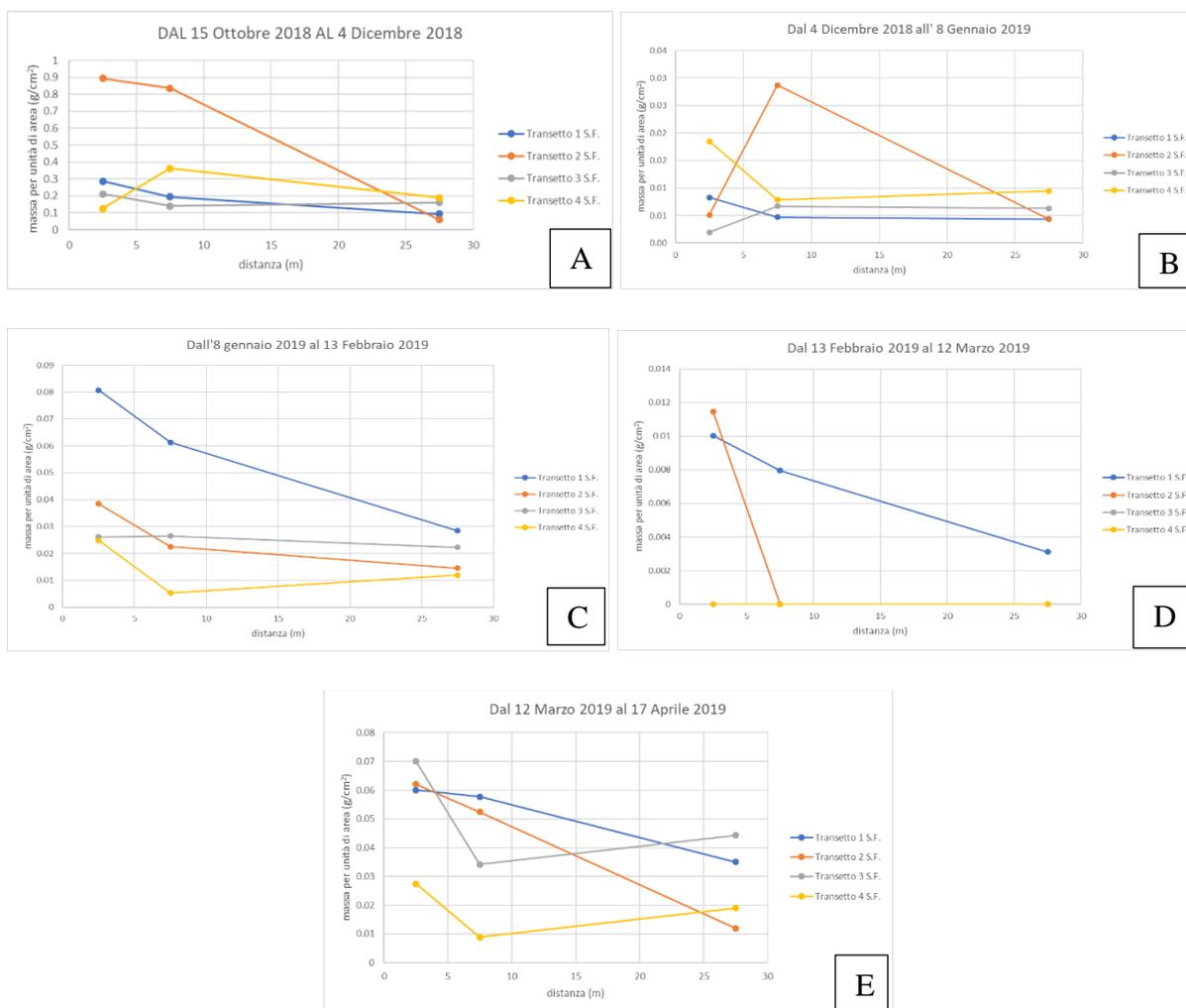


Figura 53: Quantità di massa raccolta per unità di area del sottovaso, durante ogni intervallo di campionamento, lungo ogni transetto disposto sulla barena di San Felice: (A) periodo 15 Ottobre 2018 - 4 Dicembre 2018, (B) periodo 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (C) periodo 8 gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (D) periodo 13 Febbraio 2019 - 12 Marzo 2019, (E) periodo 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

## Barena di Conche

Per quanto riguarda il sito di Conche, nei grafici di figura 54, è possibile osservare che, in generale, i valori massimi di massa per unità di area, in ogni periodo, sono registrati nel transetto 1 o nel transetto 2, mai lungo il transetto 3.

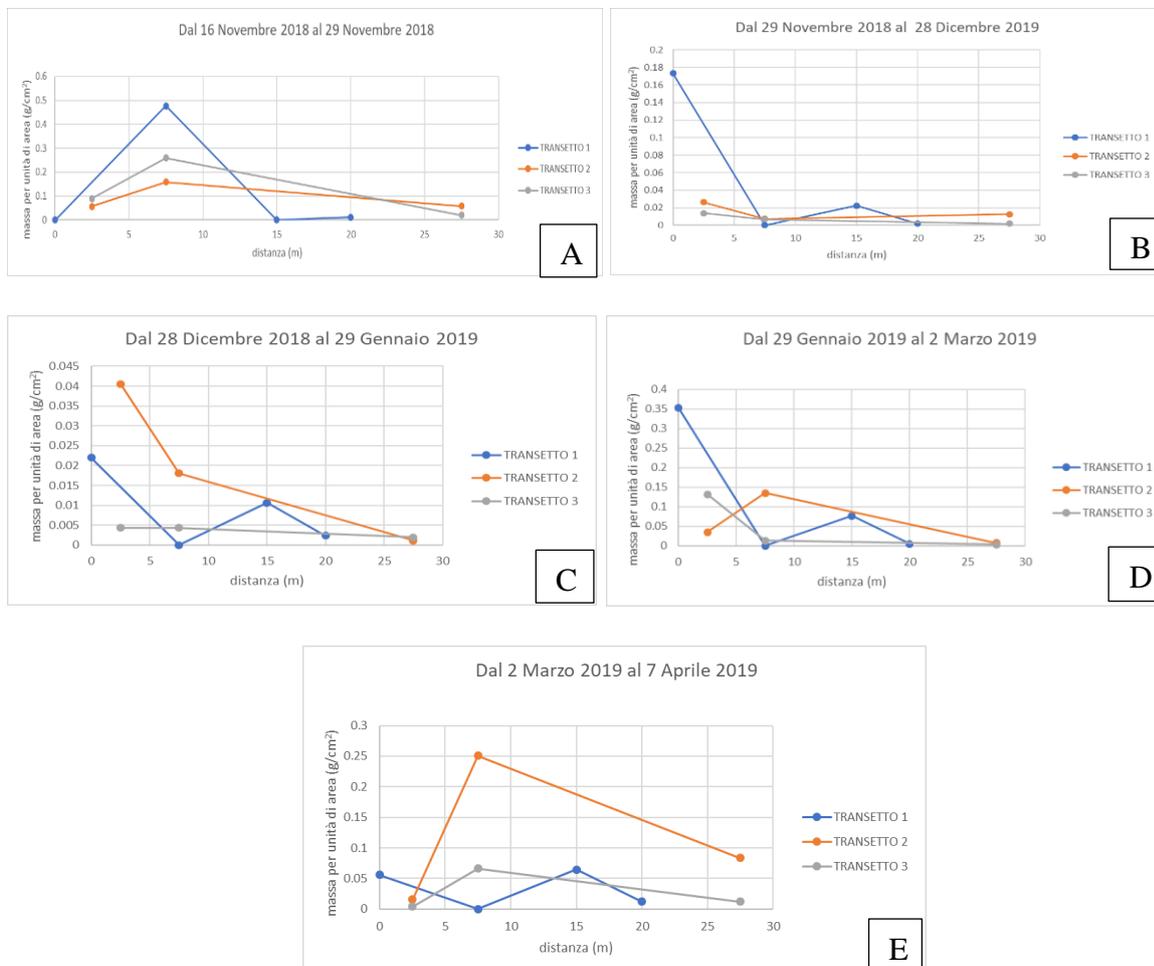


Figura 54: Quantità di massa raccolta per unità di area del sottovaso, durante ogni intervallo di campionamento, lungo ogni transetto disposto sulla barena di Conche: (A) periodo 15 Ottobre 2018 - 4 Dicembre 2018, (B) periodo 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (C) periodo 8 gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (D) periodo 13 Febbraio 2019 - 12 Marzo 2019, (E) periodo 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

Come si è potuto osservare dalla figura 52, le trappole per sedimenti lungo il transetto 2, posto sulla superficie della barena di Sant'Erasmus, hanno raccolto una quantità di massa per unità di superficie superiore, in generale, a quella raccolta lungo il transetto 1 e ciò può essere giustificato considerando la posizione del transetto 2 più esposta al vento di Bora proveniente da Nord-Est e al flusso delle correnti di marea (vedi figura 7). Solo nel primo periodo, caratterizzato dai livelli di marea maggiori, il transetto 1 ha registrato un valore di

sedimentazione maggiore rispetto al transetto 2 e rispetto a tutti gli altri valori registrati in tutti gli intervalli di campionamento, da entrambe le stazioni.

Sulla barena San Felice il transetto 4, rispetto agli altri transetti, presenta sempre valori di massa tendenzialmente diversi rispetto agli altri transetti e questo è dovuto al fatto che il transetto 4 si affaccia su un bassofondo circondato da barene, non c'è un canale che comunica direttamente quindi i sedimenti possono provenire solo da un'area attigua limitata.

Invece nei transetti 1, 2 e 3, sulla barena San Felice, si può osservare un andamento della massa raccolta piuttosto omogeneo che decresce allontanandoci dal canale San Felice verso l'interno della barena. Questo andamento del valore della massa raccolta dai sottovasi è una conseguenza della progressiva deposizione dei sedimenti dovuta al fatto che la marea, avanzando verso l'interno della barena, incontra un fitto manto vegetale che ne diminuisce la capacità di trasporto e favorisce la sedimentazione della frazione sospesa più grossolana in prossimità dei bordi del canale.

Solo il transetto 2, nell'intervallo di campionamento dal 4 Dicembre 2018 all' 8 Gennaio 2019, presenta una quantità di massa per unità di superficie notevolmente superiore in corrispondenza del sottovaso posizionato a 7.5 m dal bordo della barena rispetto alle altre due stazioni di raccolta lungo il medesimo transetto.

Per quanto riguarda i transetti posizionati sulla barena in prossimità della località di Conche non si sono registrati, nei vari intervalli di campionamento, andamenti omogenei della quantità di massa raccolta. Dai grafici emerge che complessivamente il transetto 2 ha registrato valori di massa per unità di superficie superiori agli altri transetti e in particolare nella stazione intermedia a 7.5 m dal bordo della barena.

In tutti i siti di studio le quantità di massa raccolta nei vari transetti sono superiori nei mesi autunnali e invernali, periodi in cui si sono registrati i valori più alti dei livelli di marea e di velocità del vento. In particolare, i massimi livelli di marea si sono registrati nel mese di Novembre 2018 durante i primi due intervalli di campionamento.

Si può inoltre osservare che, in generale, durante i sei mesi di campionamento, i valori di massa raccolti dalle stazioni di Conche sono superiori rispetto a quelli raccolti sulla barena San Felice e Sant'Erasmus.

Per verificare se esiste una relazione tra sedimentazione e condizioni metereologiche ed idrodinamiche, di seguito sono riportati gli andamenti del livello di marea e di velocità del vento, forniti dal Centro Maree del comune di Venezia, registrati dalle stazioni di misura Laguna Nord e Malamocco Porto (vedi figura 1) durante i sei mesi di campionamento.

Nei primi due grafici, in figura 55 e 56, si può osservare che i valori massimi di marea, superiori al metro di altezza riferito allo zero idrometrico di Punta della Salute, sono stati registrati alla fine del mese di Ottobre 2018, durante i mesi di Novembre 2018 e Febbraio 2019 e all'inizio del mese di Aprile 2019.

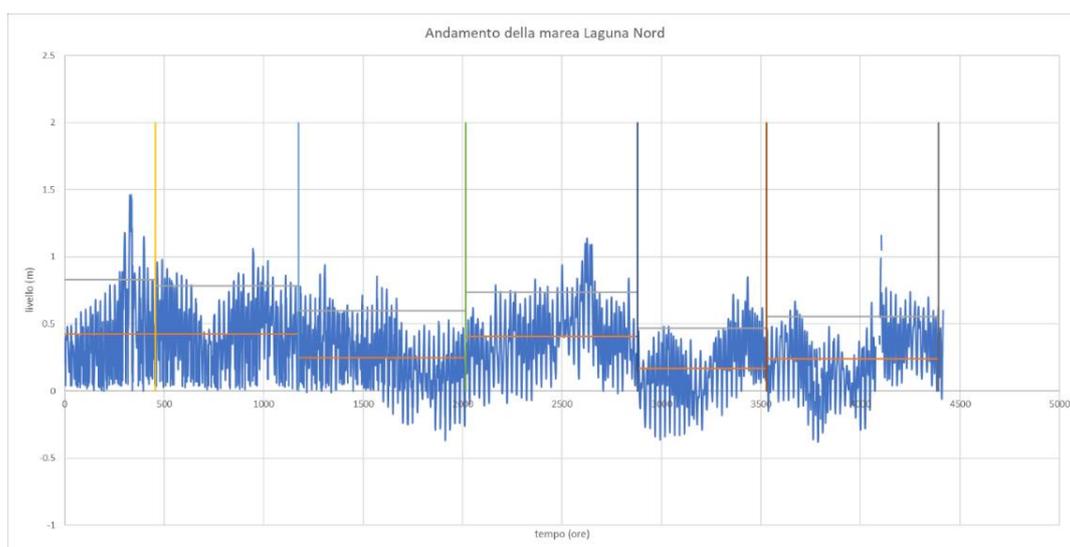


Figura 55: Andamento della marea nel tempo registrato nella stazione Laguna Nord dove sono indicati in colore arancione il valore medio di marea e in grigio la media dei massi in ogni intervallo di campionamento.

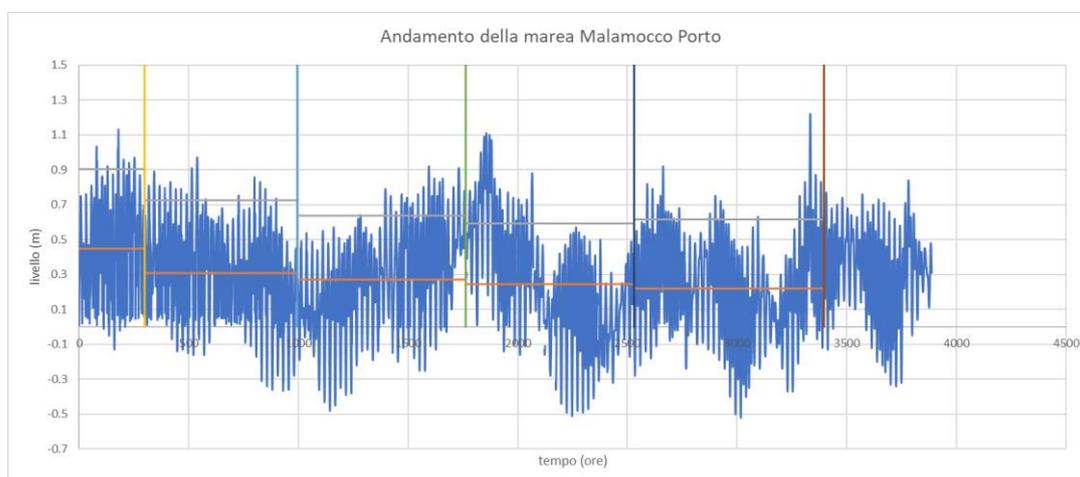


Grafico 56: Andamento della marea nel tempo registrato nella stazione Malamocco Porto dove sono indicati in colore arancione il valore medio di marea e in grigio la media dei massi in ogni intervallo di campionamento.

Per quanto riguarda le velocità del vento, registrate nelle due stazioni, i valori massimi sono stati registrati nei mesi autunnali e primaverili, come si evince dalle figure 57 e 58.

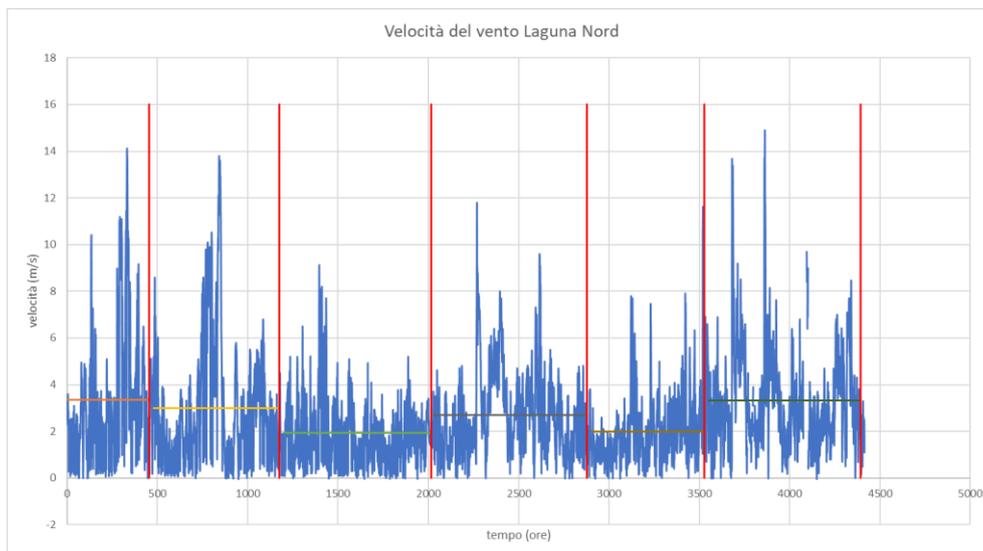


Grafico 57: Andamento della velocità del vento registrato nella stazione laguna Nord dove in colori diversi è in dicato il valore medio in ogni intervallo di campionamento.

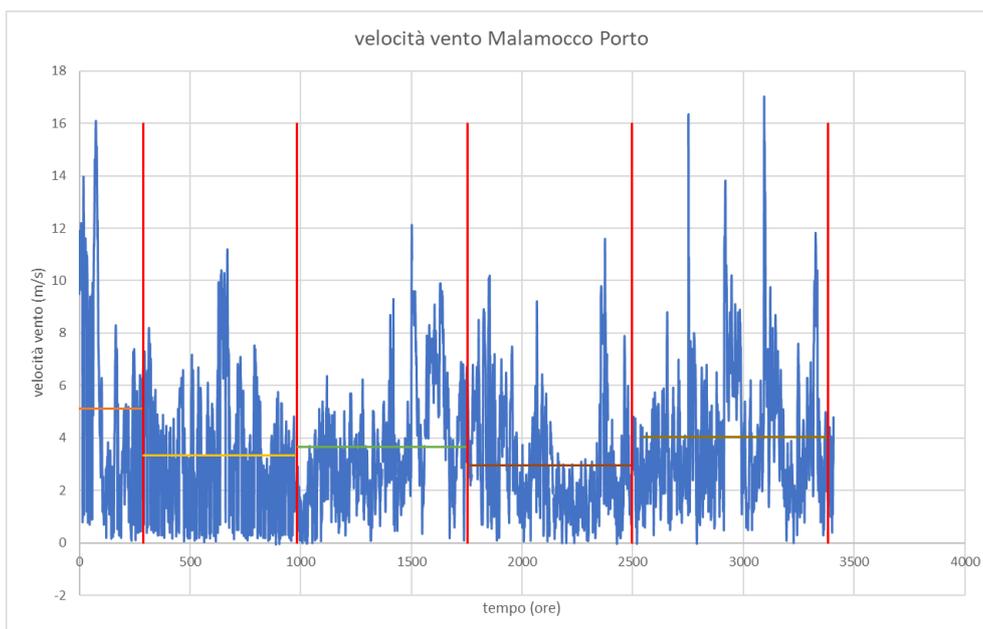


Grafico 58: Andamento della velocità del vento registrato nella stazione Malamocco Porto dove in colori diversi è in dicato il valore medio in ogni intervallo di campionamento.

Di seguito sono riportati i grafici con rappresentati il materiale raccolto per unità di area dei sottovasi, nei vari intervalli di campionamento, in funzione del corrispondente valore medio di marea e di velocità del vento.

Ogni transetto è rappresentato con un simbolo diverso e ciascun simbolo varia il colore a seconda dell'intervallo di campionamento. Simboli diversi con medesimo colore corrispondono ai transetti dove il materiale è stato raccolto nel medesimo periodo.

Dai primi due grafici, relativi alla barena di Sant'Erasmus, è possibile evidenziare come i valori maggiori di massa per unità di area sono stati registrati, nel transetto 1 e nel transetto 2, nei primi due intervalli di campionamento, a cavallo del mese di Novembre, al quale corrispondono anche i valori medi del livello di marea e velocità del vento maggiori.

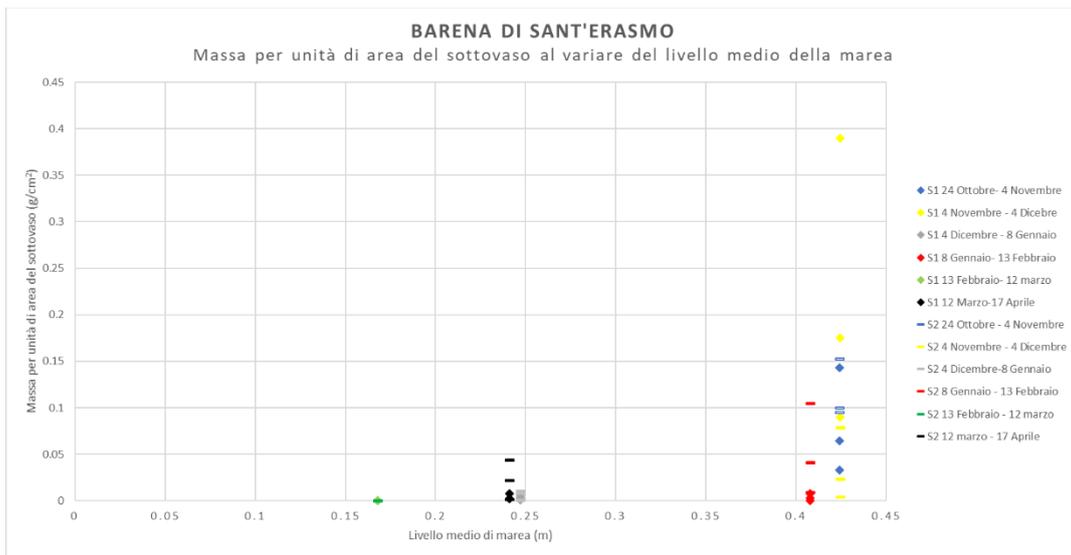


Figura 59: Massa per unità di area del sottovaso al variare del livello medio della marea, per ogni intervallo di campionamento e per ogni stazione dei transetti situati sulla barena di Sant'Erasmus.

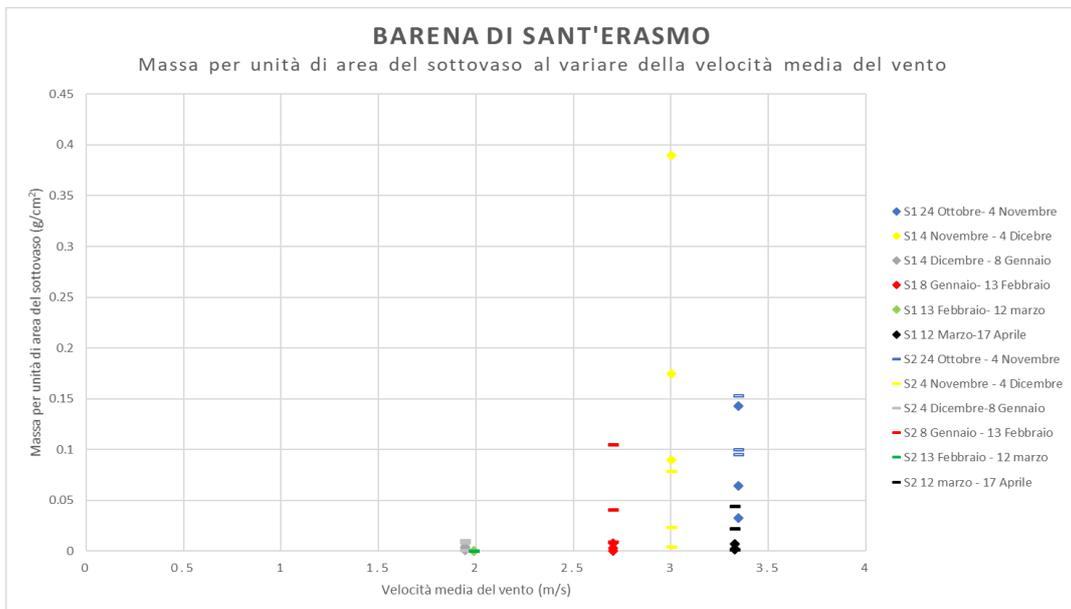


Figura 60: Massa per unità di area del sottovaso al variare della velocità media del vento, per ogni intervallo di campionamento e per ogni stazione dei transetti situati sulla barena di Sant'Erasmus.

Per quanto riguarda la barena di San Felice le osservazioni che si possono fare sono analoghe a quelle fatte per i transetti di Sant’Erasmus ovvero che i valori massimi, in tutti i transetti, sono stati registrati nei primi due intervalli di campionamento.

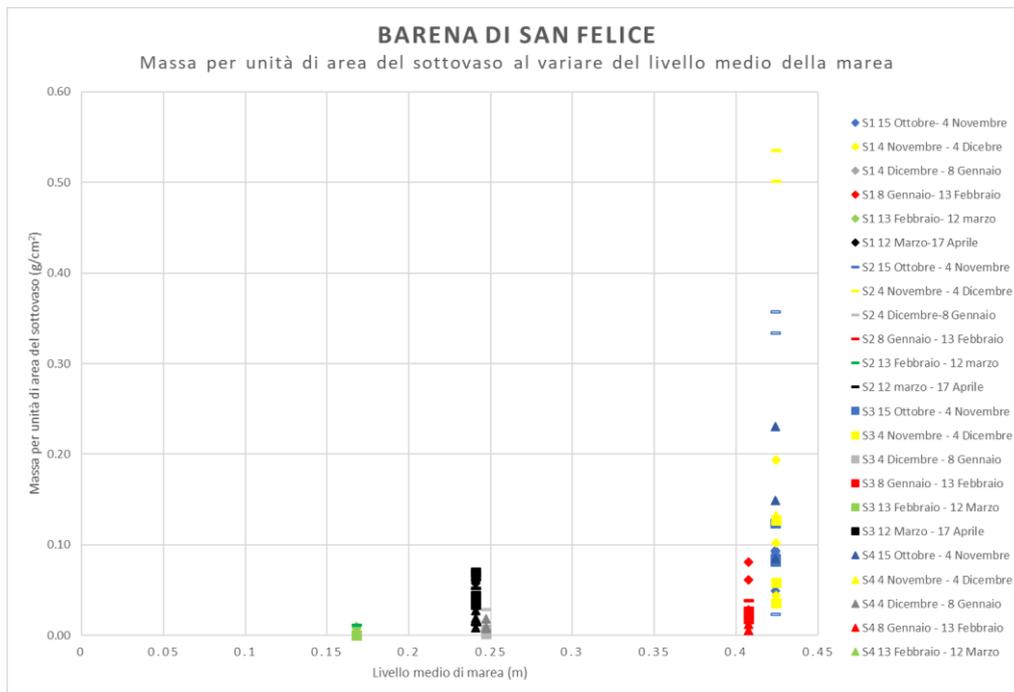


Figura 61: Massa per unità di area del sottovaso al variare del livello medio della marea, per ogni intervallo di campionamento e per ogni stazione dei transetti situati sulla barena di San Felice.

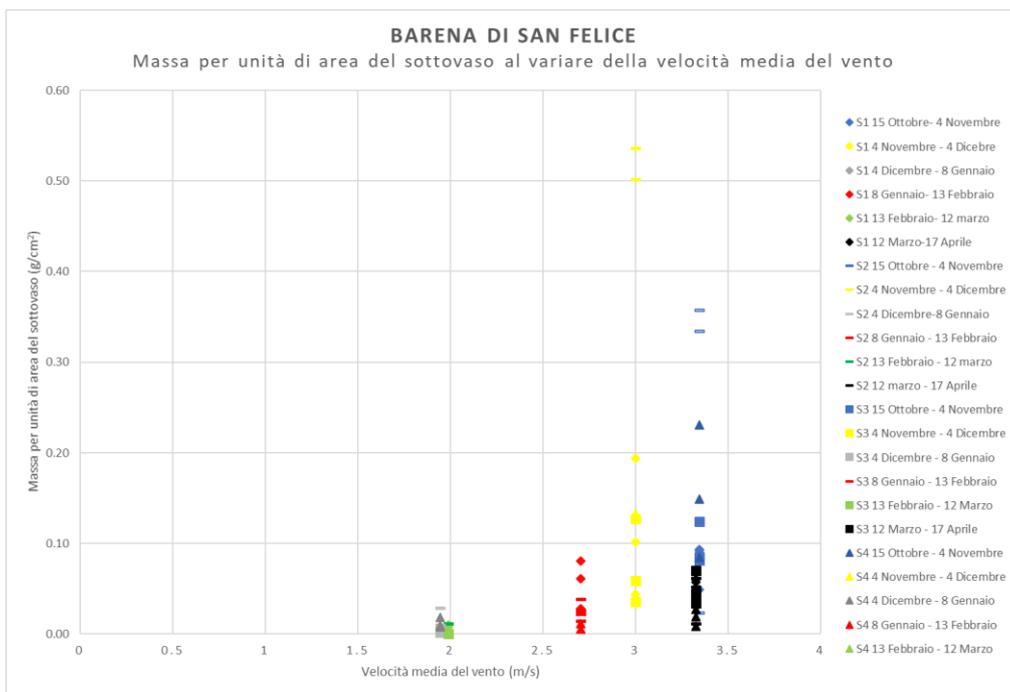


Figura 62: Massa per unità di area del sottovaso al variare della velocità media del vento, per ogni intervallo di campionamento e per ogni stazione dei transetti situati sulla barena di San Felice.

Nei grafici di figura 63 e 64, relativi alla barena di Conche, si può osservare che i transetti 1 e 3 hanno registrato valori massimi nel primo periodo invece il transetto 2 ha registrato il valore massimo nel quinto intervallo di campionamento, dal 2 Marzo 2019 al 7 Aprile 2019, periodo nel quale la velocità media del vento è risultata piuttosto elevata.

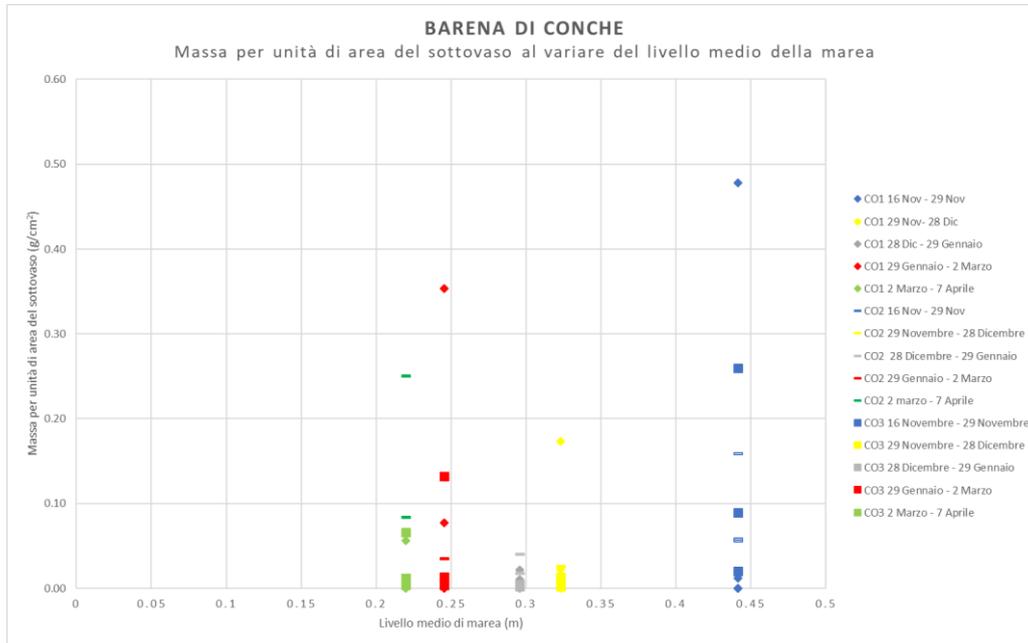


Figura 63: Massa per unità di area del sottovaso al variare del livello medio della marea, per ogni intervallo di campionamento e per ogni stazione dei transetti situati sulla barena di Conche.

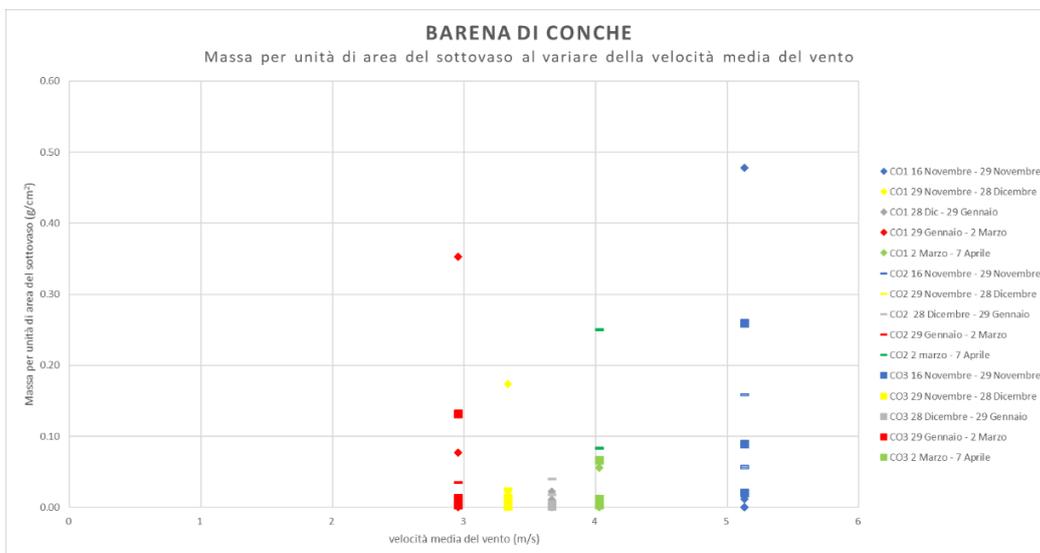


Figura 64: Massa per unità di area del sottovaso al variare della velocità media del vento, per ogni intervallo di campionamento e per ogni stazione dei transetti situati sulla barena di Conche.

In Laguna Nord il livello di marea medio maggiore si è registrato nei periodi: 24 Ottobre 2018 - 4 Novembre 2018, 4 Novembre 2018 – 4 Dicembre 2018 e 8 Gennaio 2019 – 13 Febbraio 2019. Invece, il valore di velocità media del vento maggiore si è registrato nei periodi: 24 Ottobre 2018 - 4 Novembre 2018, 4 Novembre 2018 – 4 Dicembre 2018 e 12 marzo 2019 – 17 Aprile 2019. In particolare, la maggior quantità di sedimenti ( $\text{g/cm}^2$ ) sulla barena di Sant'Erasmus è stata raccolta lungo il transetto 1 (S1) tra il 4 Novembre 2018 e il 4 Dicembre 2018.

Invece, sulla barena San Felice la maggior quantità di materiale raccolto ( $\text{g/cm}^2$ ) risulta essere lungo il transetto 2 nei periodi di campionamento 15 Ottobre 2018 – 4 Novembre 2018 e 4 Novembre 2018 – 4 Dicembre 2018.

In laguna Sud il livello di marea medio maggiore si è registrato nei periodi di campionamento: 16 Novembre 2018 – 29 Novembre 2018 e 29 Novembre 2018 – 28 Dicembre 2018. Il valore di velocità media del vento maggiore si è registrato nei periodi: 16 Novembre 2018 – 29 Novembre 2018 e 2 marzo 2019 – 7 Aprile 2019. La quantità maggiore di materiale raccolta ( $\text{g/cm}^2$ ) sulla barena di Conche risulta essere lungo il transetto 1 nei periodi 16 Novembre 2018 – 29 Novembre 2018, 19 Gennaio 2019 – 2 Marzo 2019 e lungo il transetto 3 nel periodo di campionamento 16 Novembre 2018 – 29 Novembre 2018.

Pertanto, sembra esistere una relazione di proporzionalità tra le forzanti idrodinamiche e meteorologiche e la sedimentazione sulle barene.

### 3.3 Materiale organico contenuto nei campioni

Di seguito si riportano i grafici, raggruppati per area di studio, che rappresentano i risultati ottenuti mediante l'analisi LOI.

I risultati dell'analisi sono espressi come percentuale in peso del materiale organico sul peso totale ovvero come rapporto percentuale tra il peso della sostanza organica ed il peso totale del materiale prima di essere bruciato in muffola.

La mancanza dei risultati relativi ad alcune stazioni è legata al fatto che, in alcuni intervalli di campionamento, i campioni raccolti non sono risultati quantitativamente sufficienti a svolgere l'analisi LOI, la quale richiede almeno 2 g di materiale.

## Barena di Sant'Erasmus:

Nei grafici A e B di figura 65, relativi alla barena Sant'Erasmus, si può osservare che i valori maggiori della percentuale in peso della sostanza organica risultano essere nella stazione posizionata a 27.5 m dal bordo della barena invece nei grafici C e D i valori maggiori risultano coincidere con le prime due stazioni.

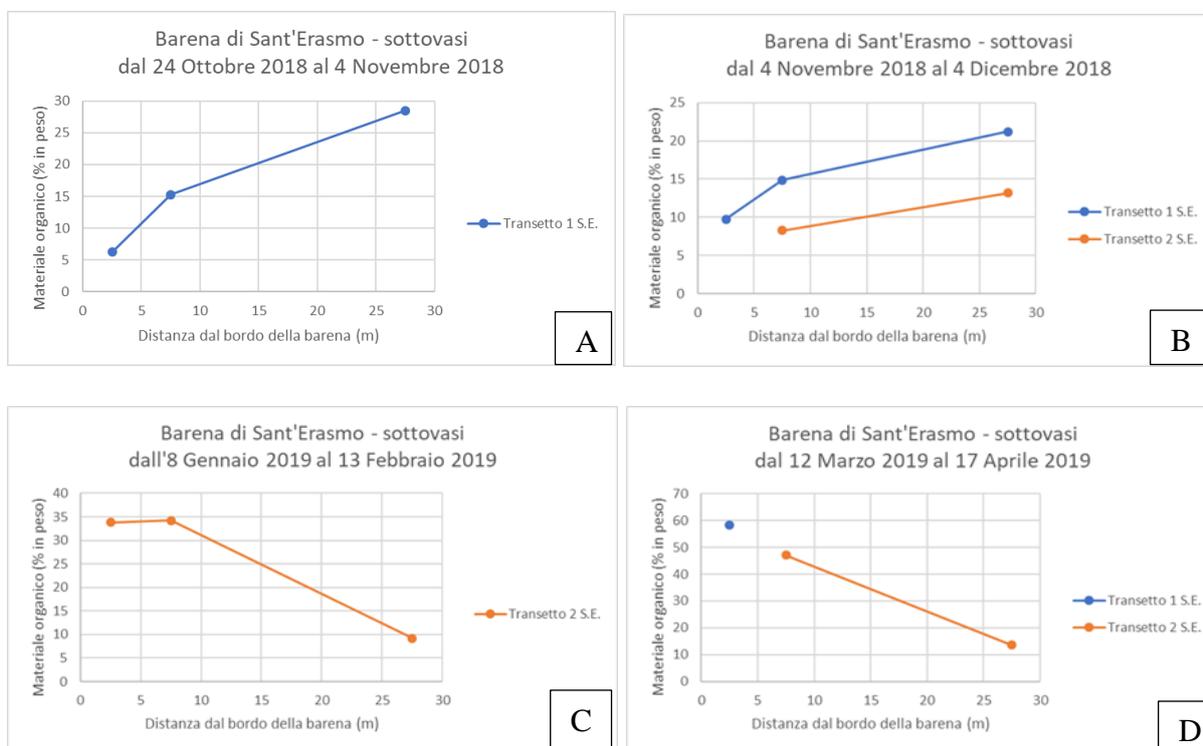


Figura 65: Percentuale in peso del materiale organico raccolto dai sottovasi lungo i transetti sulla barena di Sant'Erasmus: (A) periodo 24 Ottobre 2018 - 4 Novembre 2018, (B) periodo 4 Novembre 2018 - 4 Dicembre 2018, (C) periodo 8 Gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019 ed infine (D) periodo 12 marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

## Barena di San Felice:

Nei grafici di figura 66, relativi alla barena di San Felice, si può osservare che, nei vari periodi, i valori maggiori di materiale organico ricadono lungo i transetti 2 e 4 ed in particolare il massimo valore risulta corrispondere alla stazione posizionata a 7.5 m, nel transetto 4, nell'intervallo dal 15 Ottobre 2018 al 4 Novembre 2019.

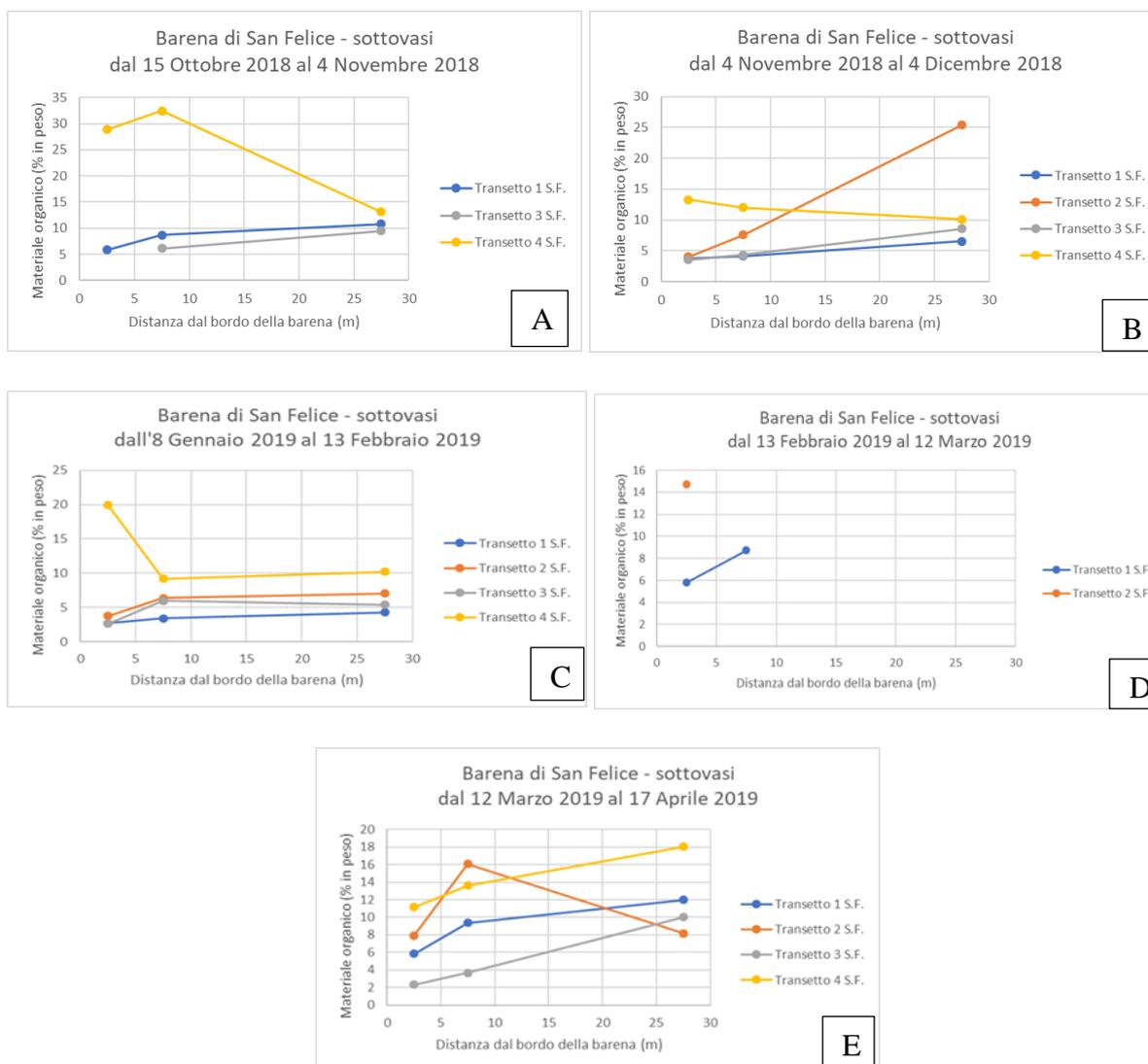


Figura 66: Percentuale in peso del materiale organico raccolto dai sottovasi lungo i transetti sulla barena di San Felice: (A) periodo 15 Ottobre 2018 - 4 Novembre 2018, (B) periodo 4 Novembre 2018 - 4 Dicembre 2018, (C) si riferisce al periodo 8 Gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (D) periodo 13 Febbraio 2019 - 12 Marzo 2019 e infine (E) periodo 12 Marzo 2019- 17 Aprile 2019.

## Barena di Conche:

Nei grafici di figura 67, relativi alla barena di Conche, si può osservare che i valori maggiori di percentuale in peso della materia organica sono generalmente più elevati rispetto a quelli registrati nelle altre aree di studio.

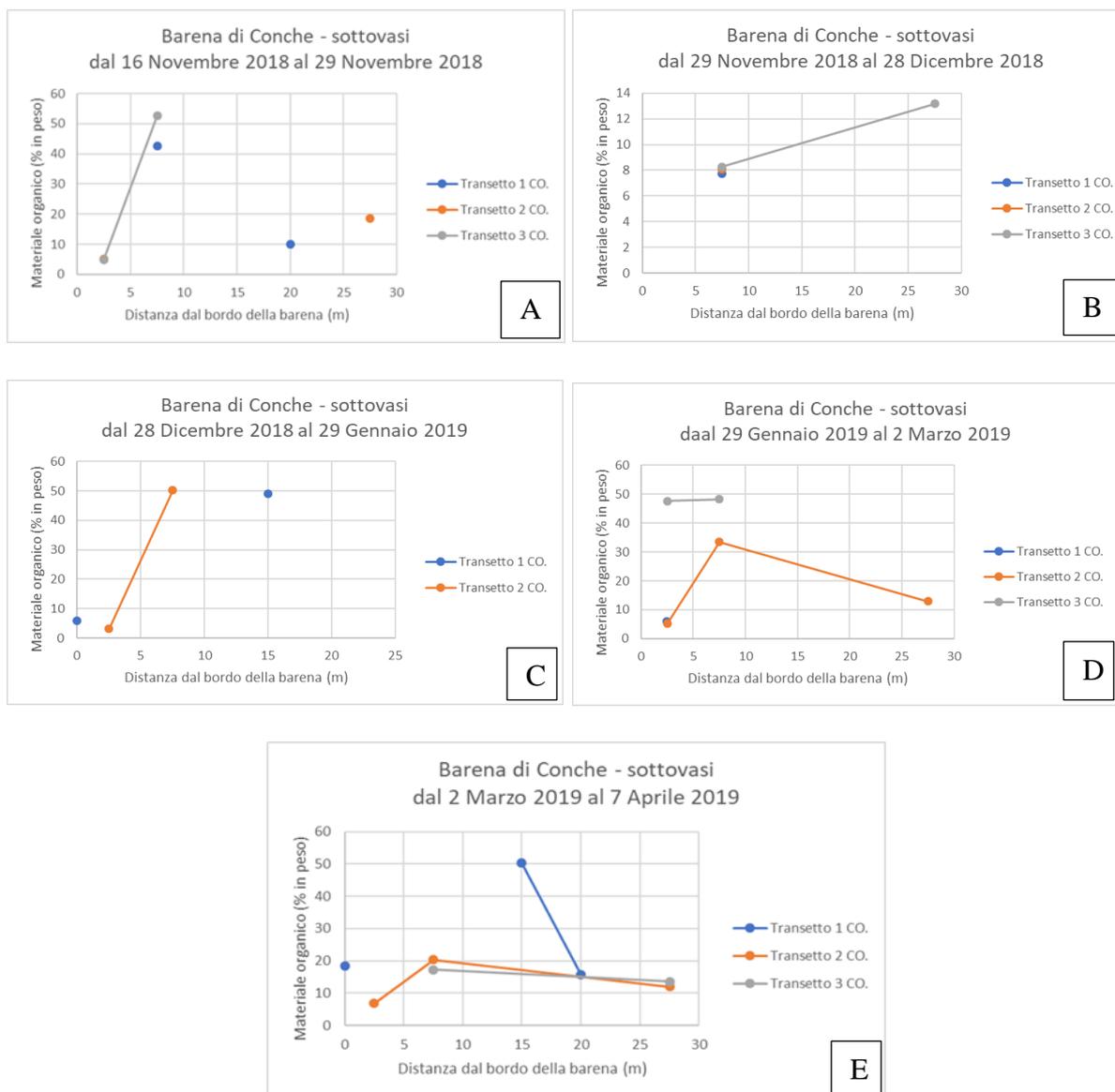


Figura 67: Percentuale in peso del materiale organico raccolto dai sottovasi lungo i transetti sulla barena di Conche: (A) periodo 16 Novembre 2018 - 29 Novembre 2018, (B) periodo 29 Novembre 2018 - 28 Dicembre 2018, (C) periodo 28 Dicembre 2018 - 29 Gennaio 2019, (D) periodo dal 29 Gennaio 2019 - 2 Marzo 2019 e infine (E) periodo 2 Marzo 2019 - 7 Aprile 2019.

Dai grafici sopra riportati, relativi al materiale organico raccolto dai sottovasi sulla barena di Sant'Erasmus (figura 65), si evince un andamento crescente della percentuale in peso della sostanza organica allontanandoci dal bordo della barena, nei mesi autunnali. Al contrario, negli intervalli di campionamento durante i mesi invernali e primaverili, si osserva un andamento

decescente della percentuale in peso della sostanza organica allontanandoci dal bordo della barena.

Osservando i grafici relativi alla barena di San Felice (figura 66) si può dire che, nei vari intervalli di campionamento, l'andamento della percentuale in peso della sostanza organica, lungo ogni transetto, è piuttosto simile. Solo la percentuale in peso della sostanza organica lungo il transetto 2, nei periodi dal 4 Novembre 2018 al 4 Dicembre 2018 e dal 12 Marzo 2019 al 17 Aprile 2019, e lungo il transetto 4, nel periodo dal 18 Ottobre 2018 al 4 Novembre 2018, ha un andamento che si differenzia molto rispetto a quello tenuto lungo gli altri transetti, nei medesimi intervalli.

Per quanto riguarda la barena di Conche (figura 67), si può dire che le stazioni posizionate alla medesima distanza dal bordo della barena, lungo i tre transetti e nel medesimo intervallo di campionamento, hanno valori della percentuale in peso del materiale organico raccolto molto vicini tra loro. Inoltre, si può osservare che nel periodo dal 29 Novembre 2018 al 28 Dicembre 2018 i picchi di percentuale in peso del materiale organico sono molto inferiori rispetto agli altri intervalli di campionamento.

In generale, i risultati ottenuti dall'analisi LOI suggeriscono un andamento, lungo i transetti, della percentuale in peso del materiale organico, crescente o decrescente non monotono, con consistenti variazioni di valore. In particolare, i valori minimi della percentuale in peso del materiale organico, che ricadono in un intervallo tra il 2 e il 4%, si registrano nelle stazioni posizionate a 0 m e 2,5 m di distanza dal bordo della barena invece nelle stazioni più interne della barena si raggiungono valori di picco che superano anche il 20%.

### 3.4 Granulometria dei sedimenti

Di seguito si riportano i grafici, raggruppati per area di studio, che rappresentano i risultati che sono stati ricavati dall'analisi granulometrica effettuata mediante granulimetro laser.

Nei grafici sono rappresentati tre diametri significativi ovvero, rispettivamente:  $D_{90}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{10}$ .

I tre diametri sono stati calcolati, per ogni stazione, facendo una media tra i risultati relativi ai sottovasi ed ai CD.

La mancanza dei risultati relativi ad alcune stazioni è legata al fatto che, in alcuni intervalli di campionamento, non è stata raccolta una quantità sufficiente di sedimenti.

#### Barena di Sant'Erasmus: transetto 1

Dai grafici di figura 68, riferiti al primo transetto della barena di Sant'Erasmus, si può osservare che il  $D_{50}$ , che corrisponde al diametro medio della distribuzione granulometrica, ha un andamento generalmente decrescente allontanandoci dal bordo della barena. Mentre i diametri  $D_{50}$  e  $D_{10}$  seguono un andamento piuttosto simile in tutti i periodi, il  $D_{90}$  si differenzia molto, dagli altri due diametri, solo nel periodo dal 4 Novembre 2018 al 4 Dicembre 2018.

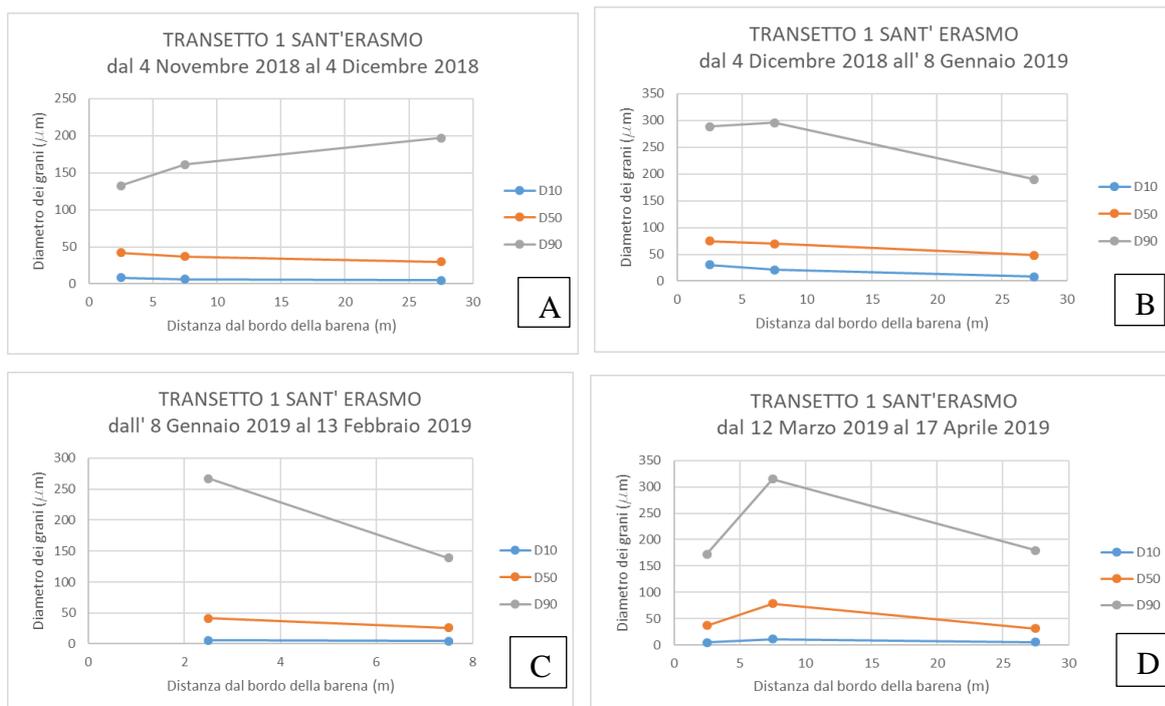


Figura 68: Grafici analisi granulometrica, transetto 1, per periodo: (A) 4 Novembre 2018 - 4 Dicembre 2018, (B) 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (C) 8 Gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (D) 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

## Barena di Sant'Erasmus: transetto 2

Nei grafici di figura 69, riferiti al secondo transetto della barena di Sant'Erasmus, si possono fare osservazione analoghe a quelle fatte per il transetto 1 ma, in questo caso, il D<sub>90</sub> si discosta molto dall'andamento degli altri due diametri in tutti gli intervalli di campionamento.

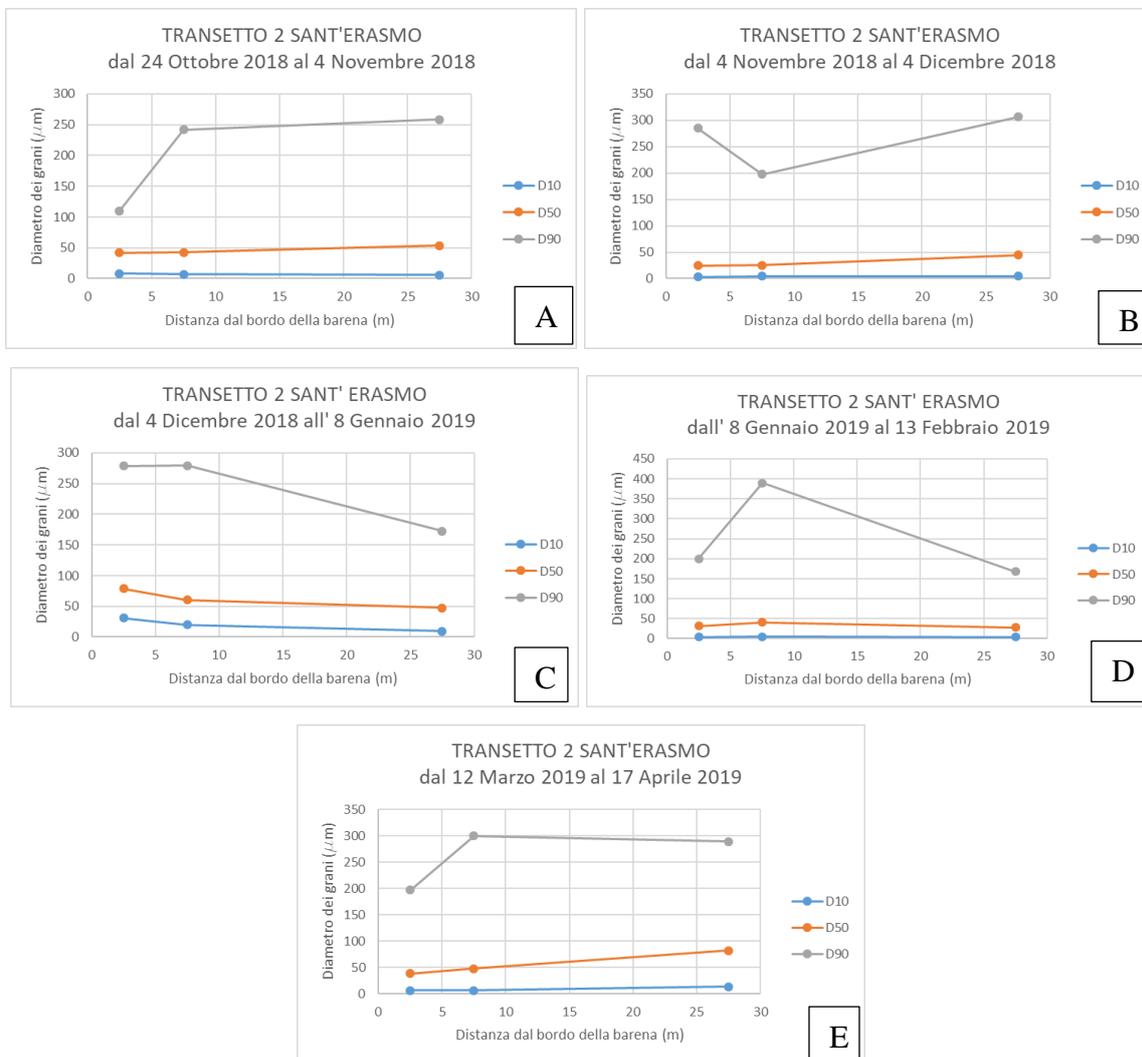


Figura 69: Grafici analisi granulometrica, transetto 2, per periodo: (A) 24 ottobre 2018- 4 Novembre 2018, (B) 4 Novembre 2018 - 4 Dicembre 2018, (C) 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (D) 8 Gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (E) 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

## Barena di San Felice: transetto 1

Nei grafici di figura 70, riferiti al transetto 1 della barena di San Felice, si può osservare un andamento decrescente di quasi tutti i diametri analizzati nei vari periodi, allontanandoci dal bordo della barena.

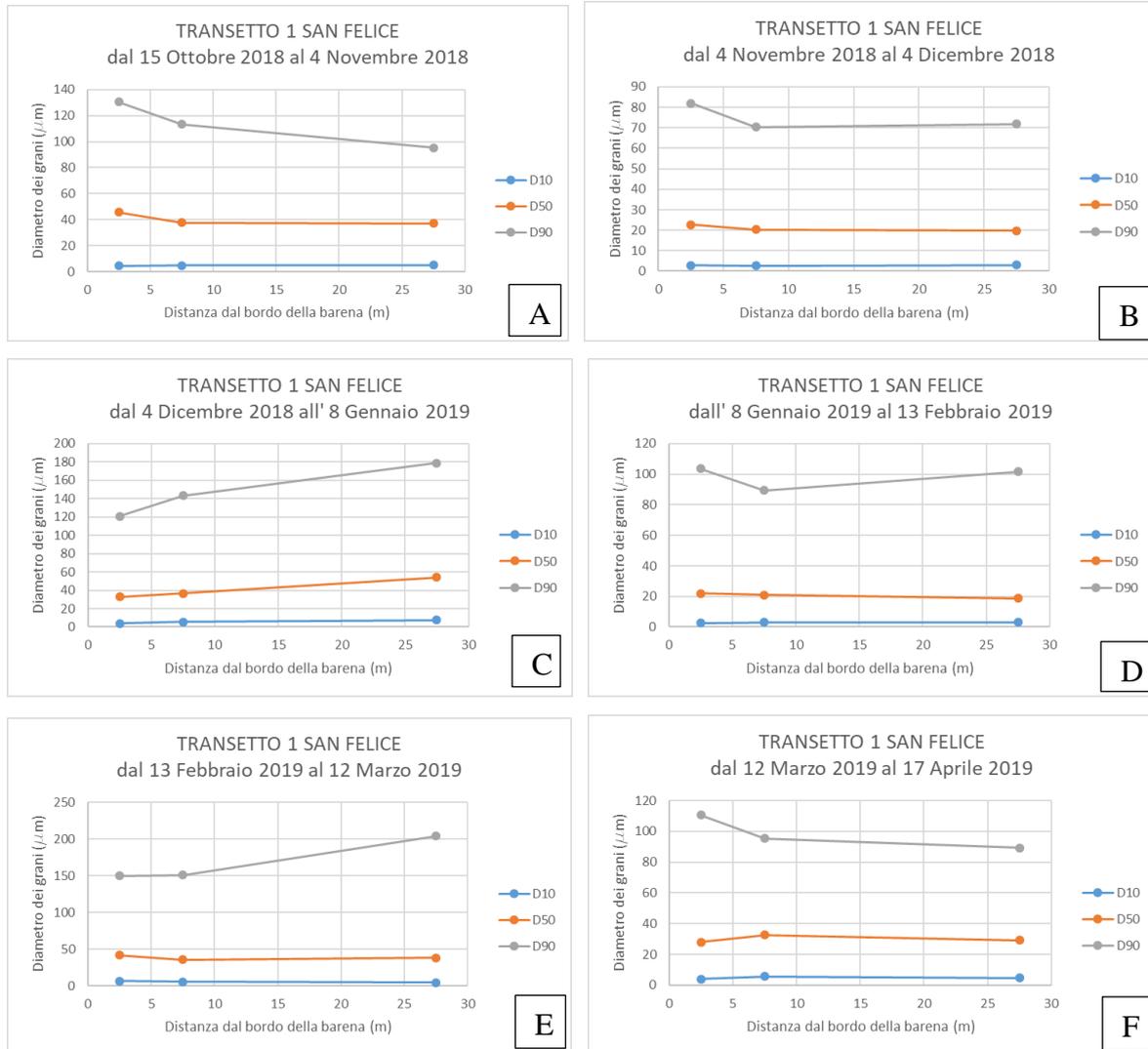


Figura 70: Grafici analisi granulometrica, transetto 1, per periodo: (A) 15 ottobre 2018- 4 Novembre 2018, (B) 4 Novembre 2018 - 4 Dicembre 2018, (C) 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (D) 8 Gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (E) 13 Febbraio 2019 - 12 marzo 2019, (F) 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

## Barena di San Felice: transetto 2

Nei grafici di figura 71, riferiti al transetto 2 della barena di San Felice, i tre diametri seguono grossomodo lo stesso andamento. Solo nel grafico C si può osservare che il D<sub>90</sub> ha un andamento opposto rispetto agli altri due diametri. Invece, nel grafico B, a differenza di tutti gli altri periodi, tutti i diametri hanno un andamento crescente allontanandosi dal bordo della barena.

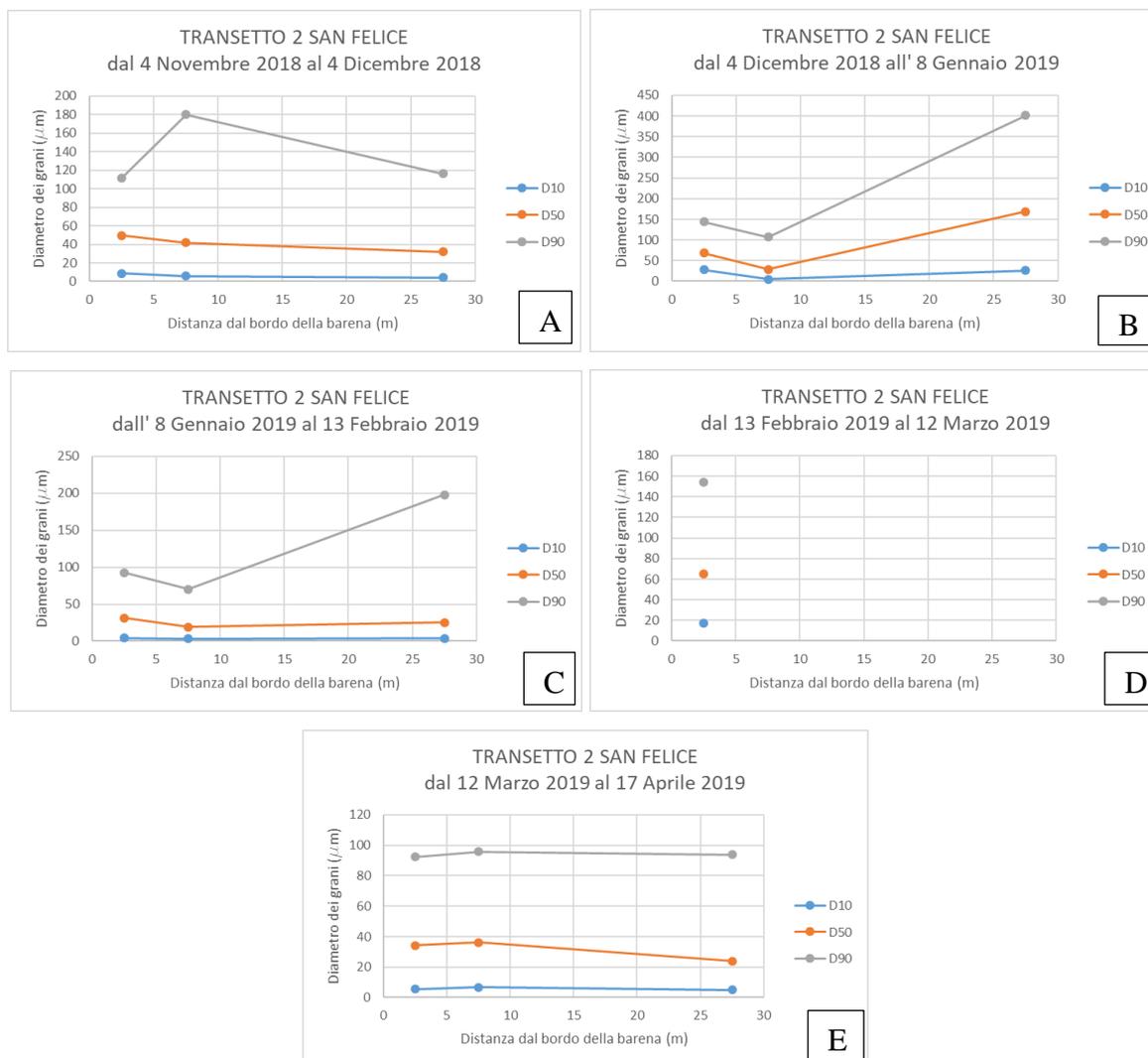


Figura 71: Grafici analisi granulometrica, transetto 2, per periodo: (A) 4 Novembre 2018 - 4 Dicembre 2018, (B) 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (C) 8 Gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (D) 13 Febbraio 2019 - 12 marzo 2019, (E) 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

### Barena di San Felice: transetto 3

Nei grafici di figura 72, riferiti al transetto 3 della barena di San Felice, si può osservare che, in generale, il  $D_{10}$  e il  $D_{50}$  hanno andamento simile nei vari periodi mentre il  $D_{90}$  ha un andamento molto diverso rispetto agli altri due diametri e varia anche molto da un intervallo all'altro.

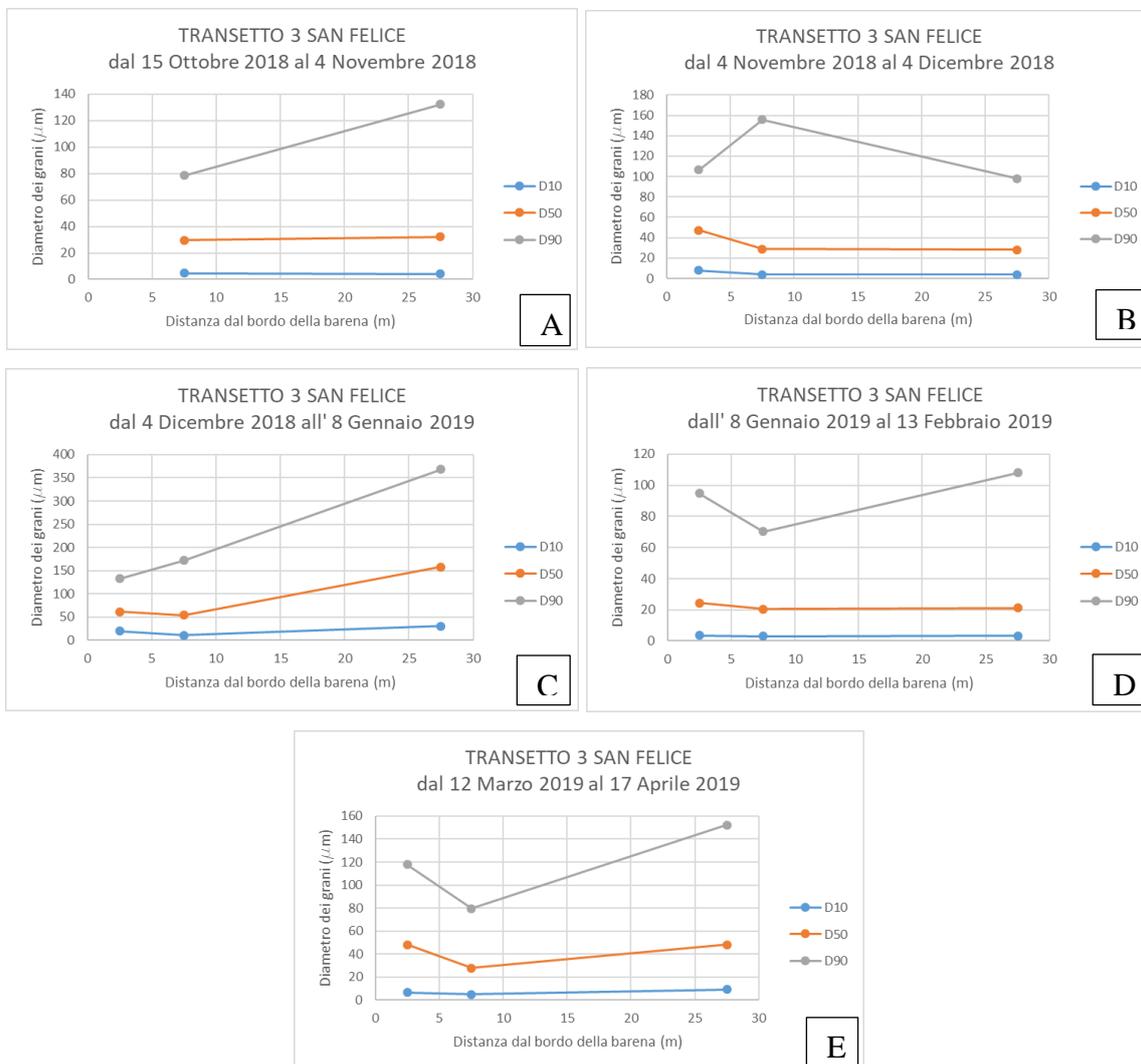


Figura 72: Grafici analisi granulometrica, transetto 3, per periodo: (A) 15 ottobre 2018- 4 Novembre 2018, (B) 4 Novembre 2018 - 4 Dicembre 2018, (C) 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (D) 8 Gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (E) 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

## Barena di San Felice: transetto 4

Nei grafici di figura 73, riferiti al transetto 4 della barena di San Felice, si può osservare che i tre diametri seguono un andamento piuttosto simile nei vari intervalli, che decresce allontanandoci dal bordo della barena.

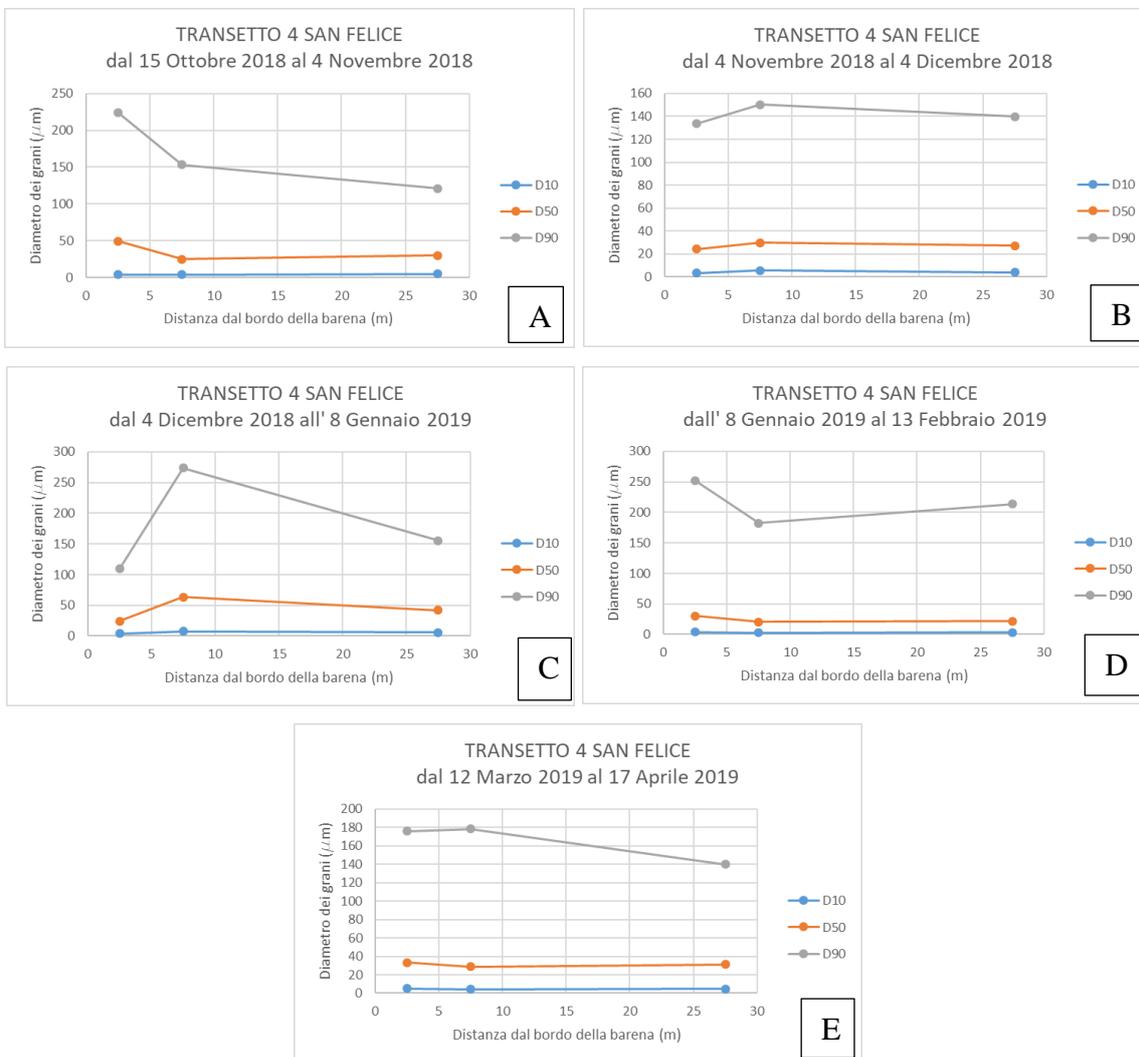


Figura 73: Grafici analisi granulometrica, transetto 4, per periodo: (A) 15 ottobre 2018- 4 Novembre 2018, (B) 4 Novembre 2018 - 4 Dicembre 2018, (C) 4 Dicembre 2018 - 8 Gennaio 2019, (D) 8 Gennaio 2019 - 13 Febbraio 2019, (E) 12 Marzo 2019 - 17 Aprile 2019.

## Barena di Conche: transetto 2

Nei grafici di figura 74, riferiti al transetto 2 della barena di Conche, si può osservare che i tre diametri hanno andamento piuttosto simile nei vari periodi.

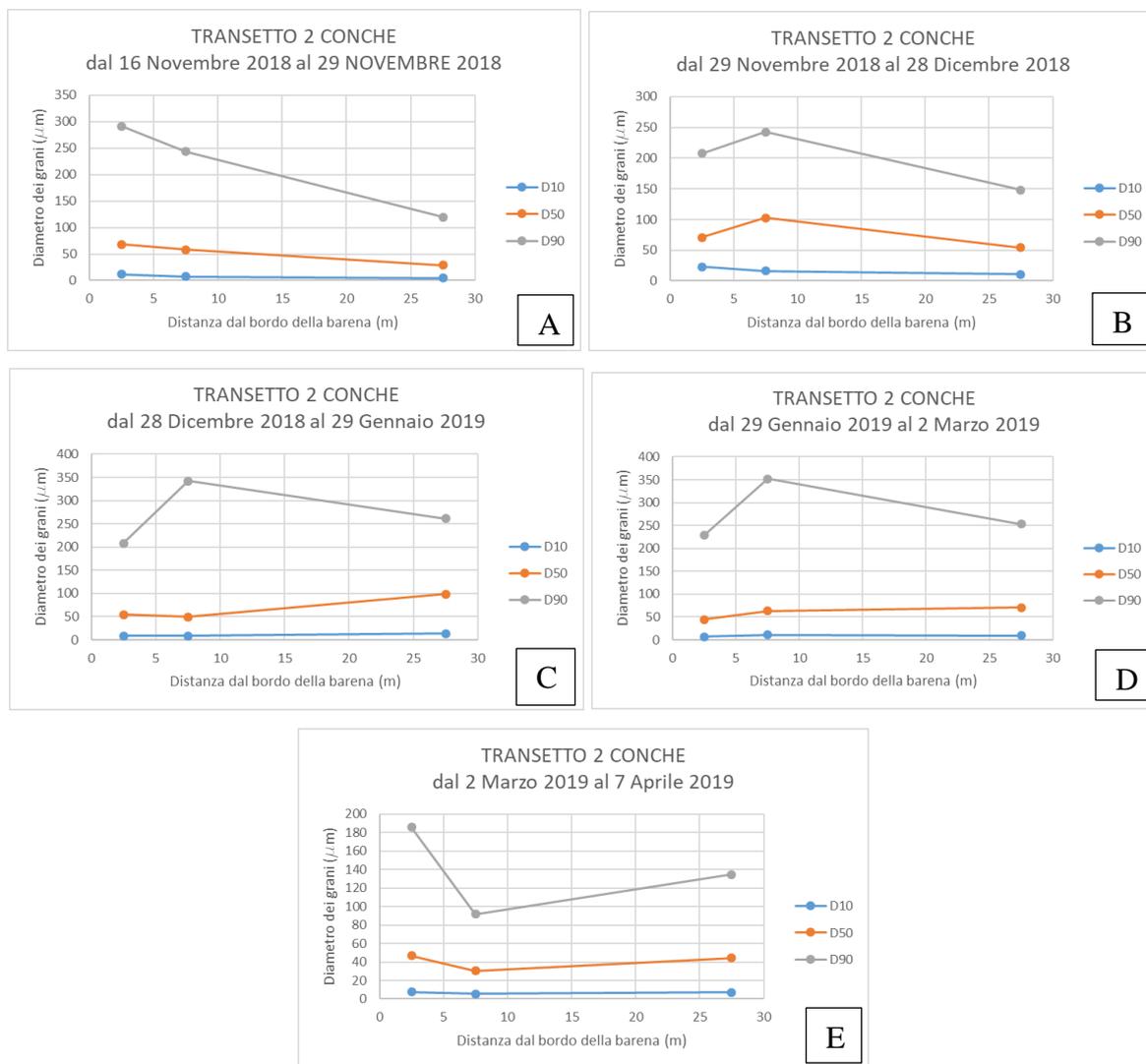


Figura 74: Grafici analisi granulometrica, transetto 2, per periodo: (A) 16 Novembre 2018 – 29 Novembre 2018, (B) 29 Novembre 2018 – 28 Dicembre 2018, (C) 28 Dicembre 2018 – 29 Gennaio 2019, (D) 29 Gennaio 2019 – 2 Marzo 2019, (E) 2 Marzo 2019 – 7 Aprile 2019.

### Barena di Conche: transetto 3

Nei grafici di figura 75, riferiti al transetto 3 della barena di Conche, si può osservare che i diametri  $D_{50}$  e  $D_{10}$  hanno andamento piuttosto simile, nei vari periodi, mentre il  $D_{90}$  ha un andamento che si discosta rispetto agli altri due diametri.

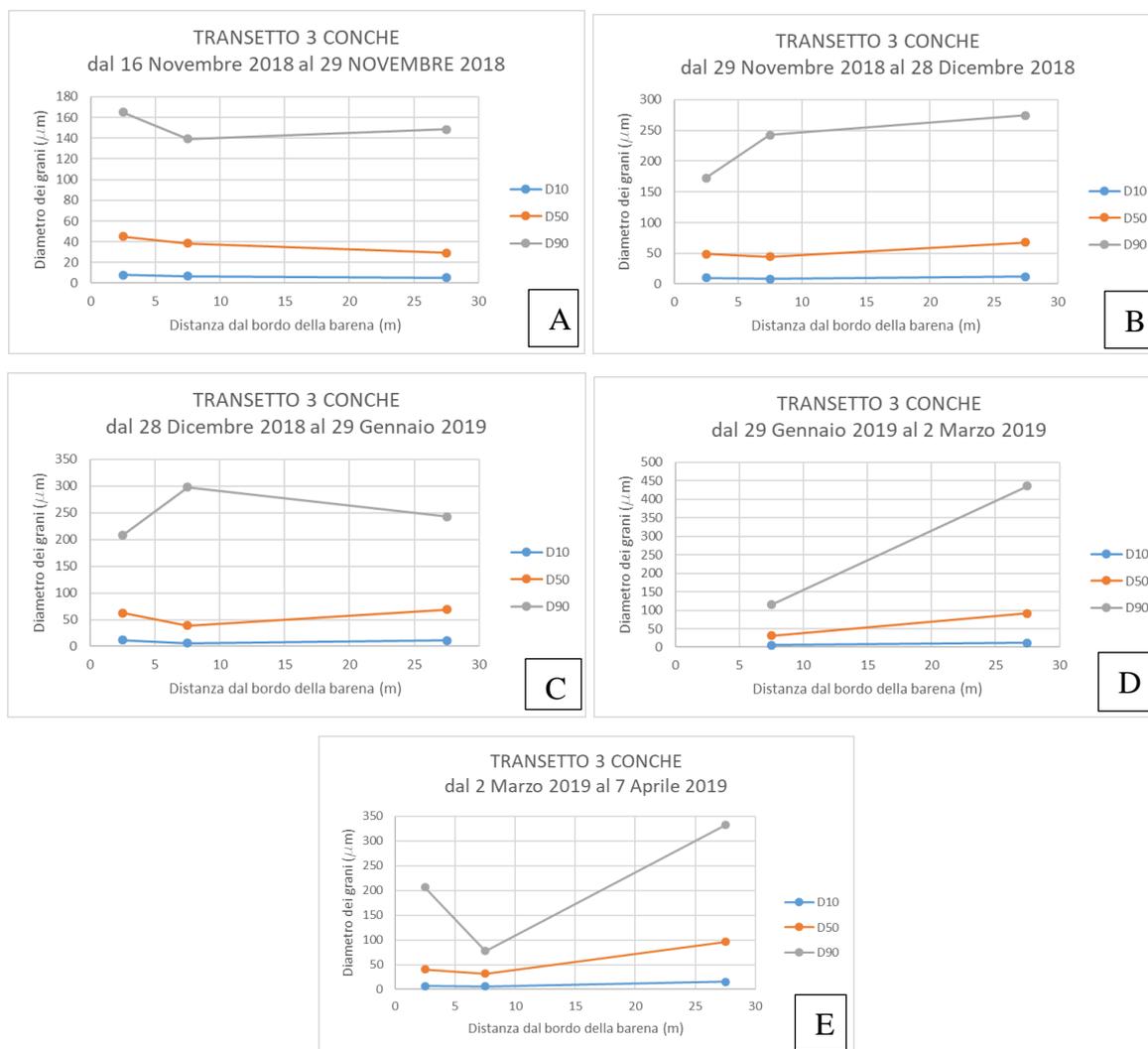


Figura 75: Grafici analisi granulometrica, transetto 3, per periodo: (A) 16 Novembre 2018 – 29 Novembre 2018, (B) 29 Novembre 2018 – 28 Dicembre 2018, (C) 28 Dicembre 2018 – 29 Gennaio 2019, (D) 29 Gennaio 2019 – 2 Marzo 2019, (E) 2 Marzo 2019 – 7 Aprile 2019.

Dai grafici, riferiti alle tre aree di studio, precedentemente riportati, si può osservare che la distribuzione del  $D_{10}$  è quasi sempre costante lungo i transetti e varia tra i 2 µm e i 30 µm.

Per quanto riguarda il  $D_{50}$ , che corrisponde alla granulometria mediana, la sua distribuzione varia complessivamente tra i 20 µm e i 102 µm ed in particolare quest'ultimo valore massimo è stato registrato nella stazione intermedia del transetto 2 sulla barena di Conche nel terzo intervallo di campionamento, dal 29 Novembre 2018 al 28 Dicembre 2018. In quasi tutti i

periodi, in particolare negli intervalli di campionamento a cavallo tra i mesi di Novembre 2018 e Febbraio 2019, i grani più grossi hanno diametro  $D_{50}$  compreso tra i  $30 \mu\text{m}$  e i  $57 \mu\text{m}$  e sono registrati nelle prime due stazioni, a 2.5 m e 7.5 m dal bordo della barena. Si può quindi affermare che, generalmente, la granulometria mediana decresce allontanandoci dal bordo della barena e in particolare dopo i primi 7.5 m dal bordo.

La distribuzione del  $D_{90}$  non è regolare, varia molto da transetto a transetto e nei vari periodi, ed i suoi valori spaziano da  $65 \mu\text{m}$  a  $401 \mu\text{m}$ . Nella maggior parte dei periodi i valori massimi del  $D_{90}$  sono compresi tra i  $200 \mu\text{m}$  e i  $300 \mu\text{m}$ .

Concludendo, si può dire che il Mastersizer ha registrato una granulometria che varia tra la sabbia media ( $400 \mu\text{m}$ ) e l'argilla ( $2 \mu\text{m}$ ).

## CAPITOLO 4 – CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha contribuito a mettere a punto una metodologia di raccolta dei sedimenti sulla superficie delle barene e una procedura di analisi dei campioni raccolti, durante i sei mesi di campionamento.

Data la durata complessiva del periodo di campionamento, sono stati utilizzati metodi per misurare la deposizione dei sedimenti con risoluzione temporale breve ed in particolare si è scelto di utilizzare, in ogni stazione di misura, una trappola per sedimento a superficie piana ed una trappola cilindrica.

I sottovasi si sono rivelati la soluzione più adeguata per la misura della sedimentazione e alla necessità di svolgere le analisi sui campioni. Infatti, in molti periodi, il materiale raccolto dai CD è risultato essere nullo o non sufficiente a svolgere tutte le analisi.

Si può affermare infatti che i CD restituiscano un accumulo di sedimenti, tra un campionamento ed il successivo, che sottostima il tasso di deposizione, avendo una superficie meno scabra e più sensibile al dilavamento rispetto alla superficie delle barene.

Andando ad analizzare le correlazioni tra la quantità di sedimento raccolto nei diversi periodi di campionamento e le corrispondenti caratteristiche delle forzanti idro-meteorologiche, è stato possibile evidenziare l'esistenza di un legame di proporzionalità tra le forzanti stesse ed i tassi di deposizione.

Oltre a ciò, la procedura di analisi dei campioni svolta, coniugando l'analisi LOI e l'analisi granulometrica, ha permesso di evidenziare alcuni aspetti interessanti.

Dai risultati dell'analisi LOI è emerso che la percentuale in peso della materia organica, contenuta nei campioni, si distribuisce in modo vario lungo i transetti ma si concentra soprattutto nella parte più interna delle barene, che generalmente è la più vegetata.

Invece, per quanto riguarda i risultati relativi all'analisi granulometrica, ponendo l'attenzione in particolare al  $D_{50}$ , che rappresenta la granulometria mediana, è stato possibile riconoscere, nella maggior parte dei transetti, nei vari periodi, un andamento decrescente della dimensione del diametro all'aumentare della distanza dal bordo della barena. Questo risultato è giustificabile perché il sedimento più grossolano, trasportato dalle onde da vento e dalle maree,

tende a depositarsi prima sulla superficie delle barene mentre solo le particelle più fini possono essere trasportate nella parte più interna.

Inoltre, grazie all'analisi granulometrica, è stato possibile classificare le particelle, che compongono i sedimenti lagunari raccolti, in un range compreso tra la sabbia media e l'argilla.

## BIBLIOGRAFIA

Ball DF. Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. *J Soil Sci.* 15, 84–92 (1964).

Barillé-Boyer A.-L., BarilléL, MasséH, Razet D, Héral M. Correction for particulate organic matter as estimated by loss on ignition in estuarine ecosystems. *Estuar Coast Shelf Sci.* 58,147–53 (2003).

Brambati, A., Carbognin, L., Quaiá, T., Teatini, P. & Tosi, L. The Lagoon of Venice: Geological setting, evolution and land subsidence. *Episodes* 26, 264–265 (2003).

D'Alpaos, L. Fatti e misfatti di idraulica lagunare: la laguna di Venezia dalla diversione dei fiumi alle nuove opere alle bocche di porto. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti 44 Memorie (2010).

Day, J. W., Rismondo, A., Scarton, F., Are, D. & Cecconi, G. Relative sea level rise and Venice lagoon wetlands. *J. Coast. Conserv.* 4, 27–34 (1998).

Day J. et al. Rapid Deterioration of a Salt Marsh in Venice Lagoon, Italy. *J. Coast. Research* 14(2), 583–590 (1998).

Facca, C., Sfriso, A. & Socal, G. Temporal and spatial distribution of diatoms in the surface sediments of the Venice Lagoon. *Bot. Mar.* 45, 170–183 (2002).

Facca, C., Sfriso, A. & Socal, G. Changes in abundance and composition of phytoplankton and microphytobenthos due to increased sediment fluxes in the Venice lagoon, Italy. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 54, 773–792 (2002).

Facca, C. et al. Description of a Multimetric Phytoplankton Index (MPI) for the assessment of transitional waters. *Mar. Pollut. Bull.* 79, 145–154 (2014).

Hensel, P. F., Day, J. W., Pont, D. & Day, J. N. Short-term sedimentation dynamics in the Rhone River Delta, France: The importance of riverine pulsing. *Estuaries* 21, 52–65 (1998).

Heiri O., Lotter AF., Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J Paleolimnol.* 25, 101–110 (2001).

Hickin E. River geomorphology: Chapter 4. Wiley (1995).

Howard PJA., Howard DM. Use of organic carbon and loss-on-ignition to estimate soil organic matter in different soil types and horizons. *Biol Fert. Soils*. 9,306–10 (1990).

Merlo G., *Analisi dell'evoluzione morfodinamica di un meandro a marea in Laguna di Venezia*. Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Padova, (2016).

Mook DH., Hoskin CM. Organic determination by ignition, caution advised. *Estuar Coast Shelf Sci*. 15, 697–9 (1982).

Nolte, S. et al. Measuring sedimentation in tidal marshes: A review on methods and their applicability in biogeomorphological studies. *J. Coast. Conserv.* 17, 301–325 (2013).

Pastro M., *Analisi delle caratteristiche morfometriche e sedimentologiche di un meandro a marea in Laguna di Venezia*. Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Padova, (2016).

Pivato, M., Carniello, L., Moro, I. & D'Odorico, P. On the feedback between water turbidity and microphytobenthos growth in shallow tidal environments. *Earth Surf. Process. Landforms* 44, 1192–1206 (2019).

Reed, D. J. Patterns of sediment deposition in subsiding coastal salt marshes, Terrebonne Bay, Louisiana: The role of winter storms. *Estuaries* 12, 222–227 (1989).

Roner, M. et al. Spatial variation of salt-marsh organic and inorganic deposition and organic carbon accumulation: Inferences from the Venice lagoon, Italy. *Adv. Water Resour.* 93, 276–287 (2016).

Temmerman, S., Moonen, P., Schoelynck, J., Govers, G. & Bouma, T. J. Impact of vegetation die-off on spatial flow patterns over a tidal marsh. *Geophys. Res. Lett.* 39, 1–5 (2012).

Thomas, S. & Ridd, P. V. Review of methods to measure short time scale sediment accumulation. *Mar. Geol.* 207, 95–114 (2004).

Zago F., *Analisi dell'influenza del tipo di suolo sull'erosione dei margini di barena*. Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Padova, (2016).

# RINGRAZIAMENTI

Ringrazio i professori Luca Carniello e Andrea D'Alpaos che mi hanno permesso di affrontare questo studio nella mia Laguna, che ho avuto il piacere di scoprire e studiare in un modo nuovo.

Ringrazio l'ingegnere Mattia Pivato, che mi ha aiutata nella fase di raccolta dei campioni, ed in particolare ringrazio l'ingegnere Davide Tognin che mi ha seguita con pazienza, disponibilità e grande attenzione, durante l'intero lavoro della tesi.

Ringrazio i miei genitori che mi hanno sempre sostenuta e senza i quali non avrei mai potuto intraprendere questo percorso di studi.

Ringrazio i miei amici che mi hanno sempre supportata ed in particolare Anita ed Ilaria che, in questi ultimi anni, sono state per me come delle sorelle e mi sono sempre state vicine consigliandomi ed aiutandomi in ogni momento.

Infine, ringrazio Jacopo, la persona più importante della mia vita, che è stato parte attiva in questo lavoro di tesi e che, come sempre, si è dimostrato una persona disponibile e premurosa nei miei confronti.