



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

**SCUOLA DI SCIENZE**

**DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE**

**Direttore Prof.ssa Cristina Stefani**

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA**

**ANALISI DELL'INFLUENZA DEL TIPO DI  
SUOLO SULL'EROSIONE DEI MARGINI DI  
BARENA**

**Relatore: Prof Andrea D'Alpaos**

**Correlatori: Prof. Massimiliano Ghinassi**

**Dott.ssa Marcella Roner**

**Laureando: Filippo Zago**

**Anno Accademico 2015/1016**



# Indice

1	Introduzione .....	9
1.1	Obiettivo della tesi .....	10
2	Inquadramento geologico, geografico ed ambientale .....	13
2.1	Paleoambiente, origine ed evoluzione.....	13
2.2	Area di studio .....	18
2.3	Morfologie lagunari .....	21
2.4	Litologia.....	24
2.5	Meccanismo di erosione barenale .....	26
2.6	La vegetazione .....	28
2.6.1	Spartina maritima .....	29
2.6.2	Salicornia veneta .....	30
2.6.3	Puccinellia palustris .....	30
2.6.4	Juncus maritimo .....	31
2.6.5	Linomium narbonense.....	32
2.6.6	Phragmites australis .....	32
2.7	Subsidenza.....	33
3	Metodologie operative .....	37
3.1	Prelievo delle carote.....	37
3.2	Calcolo del contenuto organico tramite LOI.....	41
3.2.1	Preparazione dei campioni .....	42
3.2.2	Trattamento dei crogioli .....	43
3.2.3	LOI .....	43
3.3	Analisi granulometrica .....	46
3.4	Analisi d'immagine.....	51
3.5	Potenza del moto ondoso .....	55

---

4	Risultati.....	65
4.1	Carota Sant’Erasmus.....	65
4.1.1	Analisi del sito.....	65
4.1.2	Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica.....	67
4.1.3	Analisi d’immagine.....	69
4.2	Carota Pagliaga EST.....	71
4.2.1	Analisi del sito.....	71
4.2.2	Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica.....	72
4.2.3	Analisi d’immagine.....	74
4.3	Carota San Felice Canale Interno.....	75
4.3.1	Analisi del sito.....	75
4.3.2	Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica.....	77
4.3.3	Analisi d’immagine.....	79
4.4	Carota Scanello.....	80
4.4.1	Analisi del sito.....	80
4.4.2	Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica.....	82
4.4.3	Analisi d’immagine.....	83
4.5	Carota Spacco Tralo.....	84
4.5.1	Analisi del sito.....	84
4.5.2	Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica.....	86
4.5.3	Analisi d’immagine.....	88
4.6	Carota Punta Cane.....	89
4.6.1	Analisi del sito.....	89
4.6.2	Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica.....	91
4.6.3	Analisi d’immagine.....	92
4.7	Carota Canale Novissimo.....	94

4.7.1	Analisi del sito.....	94
4.7.2	Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica .....	96
4.7.3	Analisi d'immagine.....	98
4.8	Carota Pagliaga OVEST .....	99
4.8.1	Analisi del sito.....	99
4.8.2	Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica .....	101
4.8.3	Analisi d'immagine.....	102
4.9	Carota Palude della Rosa .....	104
4.9.1	Analisi del sito.....	104
4.9.2	Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica .....	106
4.9.3	Analisi d'immagine.....	107
4.10	Carota Vigno .....	109
4.10.1	Analisi del sito.....	109
4.10.2	Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica .....	111
4.10.3	Analisi d'immagine.....	113
5	Discussione .....	115
6	Conclusioni .....	121
7	Bibliografia .....	127
8	Ringraziamenti .....	131

---

## **Abstract**

The stability of estuarine and lagoon environments in the face of changes in the environmental forcing is quite an important issue in many systems worldwide, for the progressive disappearance of typical morphological features of these systems. Several factors contribute to undermine possible equilibrium conditions: subsidence, the decrease in sediment delivery to these systems, climate changes such as sea level rise and the increase in the frequency and magnitude of storms.

Salt marshes are typical morphological structures of the Venice Lagoon, as well as of many other tidal systems worldwide, which provide important ecosystem services, dissipate waves and mitigate erosion during storms. In the Venice lagoons salt-marsh areas are rapidly decreasing with rates that vary locally. Until now, many analyses have been carried out which mainly consider wind-wave erosion as a primary driver for salt-marsh retreat. In this thesis, the possible role of soil characteristics has been analysed. Salt marshes, in fact, are constituted by different sediment types, depending on their origin: Soil characteristics might contribute to increase or decrease the resistance of salt-marsh margins to erosion, and therefore might control the survival of these important landforms. Through a detailed analysis of the amount of organic matter, of the grain size, and of the density of the sediment within ten sediment cores collected at different sites in the Venice Lagoon, the relationship between lateral erosion and soil characteristics was investigated.

Rates of salt-marsh retreat display a relatively weak correlation with soil characteristics such as particle size, bulk density, and organic matter content. The rate of erosion is strongly related to the incident wave power density, through a linear relationship.

## Riassunto

Il problema della precaria stabilità degli ambienti lagunari ed estuarini è un problema sentito in tutto il mondo, sia per una tendenza all'interramento o per la progressiva scomparsa di tipiche strutture morfologiche caratteristiche di tali ambienti in seguito a fenomeni di sommergenza o erosione. Molteplici fattori concorrono a minare le condizioni di equilibrio: la subsidenza, la diminuzione degli apporti terrigeni, i cambiamenti climatici come l'innalzamento del livello del medio mare e l'alterazione della frequenza e della potenza degli eventi meteorologici intensi vento.

Le "barene" sono tipiche strutture morfologiche della Laguna di Venezia, come di molti altri ambienti a marea nel mondo, ed assumono una fondamentale importanza a livello biologico costituendo un habitat molto particolare ma anche molto sensibile. Queste forme a marea purtroppo stanno poco a poco scomparendo con tassi di arretramento differenti a seconda delle varie zone della laguna e, fino ad ora, molte analisi sono state condotte tenendo in considerazione principalmente l'azione del moto ondoso da vento.

In questo lavoro di tesi si è indagato il possibile ruolo delle caratteristiche dei suoli sull'erosione dei margini barenali. Le barene sono costituite, infatti, da materiale differente a seconda della loro origine e le caratteristiche dei suoli potrebbero contribuire ad aumentare o diminuire la resistenza, e quindi la sopravvivenza, di tali strutture. Attraverso l'analisi in dettaglio della quantità di materia organica presente, della granulometria e della densità condotta su di dieci carote prelevate in corrispondenza ai margini barenali in vari punti della laguna si cercato quindi di determinare l'influenza di queste caratteristiche fisiche sulla resistenza all'erosione.

I tassi di erosione mostrano correlazioni relativamente modeste con le caratteristiche dei terreni come granulometria, densità e contenuto di materia organica. L'unica forzante che dimostra avere un legame stretto con il tasso di erosione è la potenza del moto ondoso, che ha un'influenza molto maggiore sull'erosione rispetto agli altri fattori considerati.



# 1 Introduzione

Le lagune sono sistemi costieri di transizione caratterizzati da uno stato di perenne instabilità per effetto delle variazioni delle forzanti ambientali ed antropiche, creatisi come conseguenza dell'interazione tra processi fluviali, principalmente legati al trasporto solido verso costa e all'immissione di acque dolci, e costieri, principalmente dovuti agli effetti delle maree, delle onde generate dal vento e delle correnti litoranee.



Figura 1-1 Foto aerea della Laguna di Venezia con sullo sfondo la Pianura Veneta e le Prealpi Venete in un momento di straordinaria limpidezza atmosferica.

L'intero ciclo sedimentario che caratterizza gli ambienti lagunari si sviluppa all'insegna di un complesso sistema di prelievo, trasporto e accumulo di sedimenti derivanti dai fiumi e dello smantellamento degli apparati deltizi precostituiti, i quali vengono poi distribuiti lungo i fondali costieri creando imponenti scanni sommersi paralleli a una certa distanza dalla costa che, alimentati, crescono fino a emergere costituendo un litorale (e.g., Perillo, 1995; Bondesan et al., 2008).

---

Con queste nuove forme emerse, viene delimitato uno specchio d'acqua che prende il nome di laguna (Figura 1-1 Foto aerea della Laguna di Venezia con ) e che, a seconda della portata di acqua dolce ed in funzione delle possibilità di ricambio con il mare mediante le bocche di comunicazione, potrà essere salmastra o salata (Gatto e Serandrei Barbero, 1979)

Il sistema che si viene a creare è tuttavia fortemente instabile ed è facile che possa subire delle trasformazioni anche pervasive che potrebbero portare all'interramento della vecchia laguna ed alla nascita di una nuova laguna più esterna, processo che, ad esempio, caratterizza una fase di regressione marina.

## 1.1 Obiettivo della tesi

Molte discipline nell'ambito delle scienze fisiche e naturali, come ad esempio la geologia e la morfodinamica, così come nell'ambito delle scienze sociali, sono animate dalla ricerca di fornire spiegazioni di processi e tematiche che in qualche modo suscitano la nostra meraviglia.

Questo concetto di Karl Popper si riconosce anche come guida del presente elaborato di tesi. All'interno degli ambienti lagunari, così come di molti estuari in generale, si trovano dei sottosistemi tipici che rivestono un ruolo di fondamentale importanza per l'evoluzione morfologica ed ecologica degli ambienti stessi. Tra questi troviamo ad esempio le barene, descritte in dettaglio nel seguito della tesi, che sono ecosistemi costieri caratterizzati da biodiversità e produzione primaria (produzione di composti organici dall'anidride carbonica presente nell'atmosfera o in acqua) molto elevate (Adam, 1990; Perillo et al., 2009). Le barene influenzano le condizioni idrodinamiche dei sistemi a marea, moderano l'azione del moto ondoso, catturano i sedimenti, filtrano nutrienti e inquinanti, e rappresentano un habitat di fondamentale importanza per particolari specie animali e vegetali. Questi ecosistemi sono particolarmente esposti a trasformazioni potenzialmente irreversibili con notevoli implicazioni ecologiche, morfologiche e socio-economiche, in particolare in tempi di severi cambiamenti climatici naturali e antropici, come quelli attuali (Marani et al., 2007; Perillo et al., 2009).

La presente tesi mira ad indagare i processi che portano al continuo e progressivo arretramento dei margini delle barene e alla successiva scomparsa di tali ecosistemi, con riferimento al caso della Laguna di Venezia. Il problema è di interesse teorico e pratico, per i

diversi aspetti coinvolti: dall'aspetto biologico naturale legato al degrado di queste tipiche strutture morfologiche, agli effetti sul comportamento idrodinamico dei bacini a marea con conseguenze anche sulla "vita" dei centri urbani, che con il loro suggestivo panorama rendono la Laguna di Venezia unica al mondo (Figura 1-2).



Figura 1-2 Burano (a sinistra) e Venezia (a destra). Due perle della Laguna Veneta

Le barene sono principalmente soggette a due tipi di modificazioni che possono portare al loro degrado. Il primo, ben noto in letteratura (si vedano le revisioni a cura di Allen, 2000; Friedrichs e Perry, 2001; Fagherazzi et al., 2012), consiste in una perdita di quota rispetto al livello medio relativo del mare per effetto del prevalere del tasso di innalzamento del medio mare relativo sui tassi di accrescimento di natura inorganica e organica. Il secondo, assai meno studiato in letteratura e solo relativamente di recente (Gedan et al., 2009; van de Koppel et al., 2005; Mariotti e Fagherazzi, 2010; Marani et al., 2011), è legato alla scomparsa delle barene per arretramento dei loro margini, dovuto all'erosione prodotta dalle onde da vento, ma, come vedremo, legato anche ad altri processi di origine naturale ed antropica. Con riferimento all'erosione dei margini delle barene, le analisi riguardano la comprensione dei meccanismi che portano all'erosione delle sponde per effetto delle onde generate dal vento che producono la rimozione del materiale costituente le sponde stesse. La vegetazione riduce l'erosione laterale (Gedan et al., 2009), ma non può impedire il crollo del margine per scalzamento al piede. Il ruolo della vegetazione nella riduzione dell'erosione laterale è quindi incerto (Feagin et al., 2009). Tra i pochi studi effettuati in tale ambito, Feagin et al. (2009) affermano che le proprietà fisiche del suolo sono dominanti nel determinare la resistenza delle sponde delle barene all'erosione, rivestendo un ruolo molto più importante di quello della vegetazione che, si dice, non abbia effetti diretti di aumento di resistenza, ma torni utile

solamente nel controllare le dinamiche sedimentarie che derivano da fenomeni graduali come l'innalzamento del medio mare o le escursioni tidali. L'effetto delle piante sulle caratteristiche del suolo è di incorporare nel suolo stesso sedimento fine diminuendone la densità e la granulometria, ma aumentandone la coesione, e quindi favorendo la resistenza all'erosione laterale.

Questo lavoro, riprende i risultati di recenti contributi allo studio dell'erosione dei margini barenali (Santalucia, 2010; Marani et al., 2011) nei quali è stato evidenziato il legame lineare tra la potenza del moto ondoso da vento e l'arretramento dei margini stessi. Tuttavia, a differenza dei lavori precedentemente citati (Santalucia, 2010; Marani et al., 2011), ed in analogia con il lavoro di Feagin et al. (2009), si sono presi in considerazione anche aspetti più geologici, riguardanti l'influenza che le caratteristiche del suolo, come ad esempio la composizione granulometrica, la densità e il contenuto di materia organica esercitano sull'erosione dei margini barenali. Lo scopo dell'elaborato quindi è di indagare se, come e quanto le caratteristiche fisiche ed organolettiche influenzino la resistenza del margine barenale sotto forzanti naturali.

---

## **2 Inquadramento geologico, geografico ed ambientale**

### **2.1 Paleoambiente, origine ed evoluzione**

La genesi delle forme lagunari ma, più in generale, di tutta l'area che oggi possiamo apprezzare nel nordest d'Italia, vede la sua collocazione temporale durante l'ultima glaciazione, all'incirca 20'000 anni fa.

E' proprio con riferimento al momento dell'acme del grande freddo che si possono cominciare a fare alcune considerazioni in merito alla stesura delle fondamenta dell'attuale paesaggio.

In quel tempo mastodontici ghiacciai si imponevano e coprivano quasi tutta l'area della catena alpina e, con la loro forza abrasiva ed erosiva, smantellavano e sbriciolavano la roccia trasformandola in detrito di svariata granulometria.

Questi detriti venivano poi presi in carico dai corsi d'acqua che, nascendo sottili e labili dal fronte dei ghiacciai, andavano a confluire tra di loro divenendo man mano sempre più importanti e voluminosi: questi grandi fiumi portavano i sedimenti a riempire e colmare una grande valle, che oggi riconosciamo come la Pianura Padana.

All'epoca, il bacino aveva naturalmente una conformazione molto differente da quanto potremmo immaginare dalla geografia attuale: durante l'acme glaciale (22'000 anni B.P.) il mare si presentava ribassato di circa 90 m rispetto all'attuale livello medio del mare (LMM): la costa Adriatica arrivava allora all'altezza di Pescara e su tutto l'alto Adriatico si estendeva una pianura in fase di crescita con l'accumulo dei sedimenti, solcata dai grandi fiumi Padano-Veneti i cui paleoalvei sono ancora oggi riconoscibili nel fondale marino (Figura 2-1 ).

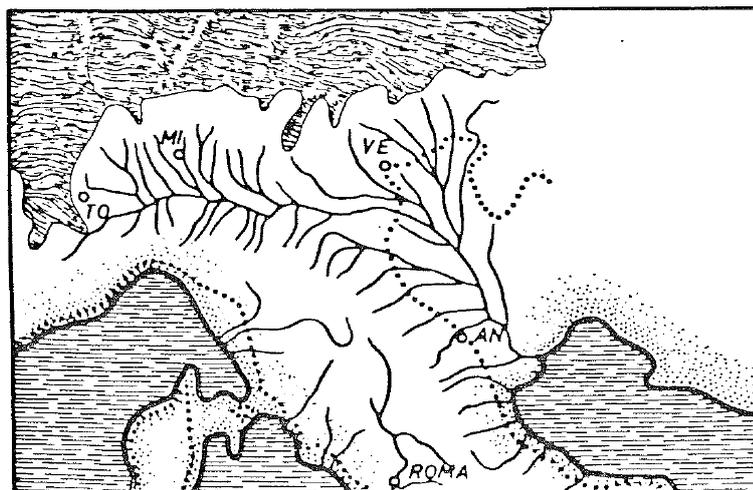


Figura 2-1 Paleogeografia dell'alto Adriatico durante l'ultimo massimo glaciale, che evidenzia il livello del mare diminuito di circa 90m.

(Gatto, 1980)

Questi grandi fiumi, dopo un periodo di parziale inattività durante la fase centrale della glaciazione Würmiana contrassegnata dalla formazione di un'argilla sovraconsolidata detta caranto, ripresero l'attività erosiva sulla paleosuperficie würmiana in concomitanza con il miglioramento climatico, momento in cui viene fatto coincidere l'inizio dell'Olocene.

L'Olocene è l'epoca geologica più recente con inizio 11'700 anni fa; da questo momento i ghiacciai si ritirarono aumentando così la potenza dei corsi d'acqua. Questo consentì un aumento sia del trasporto solido ma anche della capacità erosiva per cui notevoli incisioni si impostarono nel caranto.

Conseguenza del disgelo fu anche l'aumento del livello del medio mare che comportò l'esonazione delle acque che fluivano nel reticolo fluviale, con deposizione di materiale fine e, proseguendo con l'inesorabile risalita, l'inondazione della paleopianura che consentì lo spianamento della superficie ondulata colmando le parti più depresse con sabbie conchigliifere.

Su questa base si imposta l'attuale ambiente caratterizzato da una laguna e da una serie di segmenti litoranei.

Fu solo 6'000 anni B.P. che il mare Adriatico raggiunse grossomodo l'attuale posizione costiera. Durante questo processo di trasgressione marina, protrattosi per oltre 10'000 anni, si andavano creando continuamente nuove e più arretrate linee di costa mentre i fiumi

contrastavano tale avanzata con una notevole attività alluvionale conseguente alla lunga e sostanziosa fase erosiva avvenuta durante la glaciazione appena conclusasi.

Con l'arresto della forte trasgressione marina e lo stabilizzarsi dell'attuale livello del medio mare, i processi alluvional-sedimentari, alimentati dai numerosi fiumi Padano-Veneti, poterono maturare più a lungo, portando alla formazione di una successione quasi ininterrotta di lagune da Ravenna ad Aquileia (Figura 2-2), grazie anche alla caratteristica conformazione di costa bassa. Tra queste, compresa tra il delta dell'Adige e del Piave, troviamo la Laguna di Venezia. Qui, in particolare, eventi alluvionali del Po e dell'Adige furono i maggiori artefici dell'evoluzione della costa meridionale, mentre a Nord prorompevano il Tagliamento ed, in parte, anche il Piave.

Le fonti di alimentazione dei cordoni litoranei erano dunque collocate a Nord e a Sud, ma la distribuzione dei marker mineralogici e le figure strutturali riconosciute suggeriscono la prevalenza delle correnti, e quindi della "fornitura" dei sedimenti, provenienti da Nord.

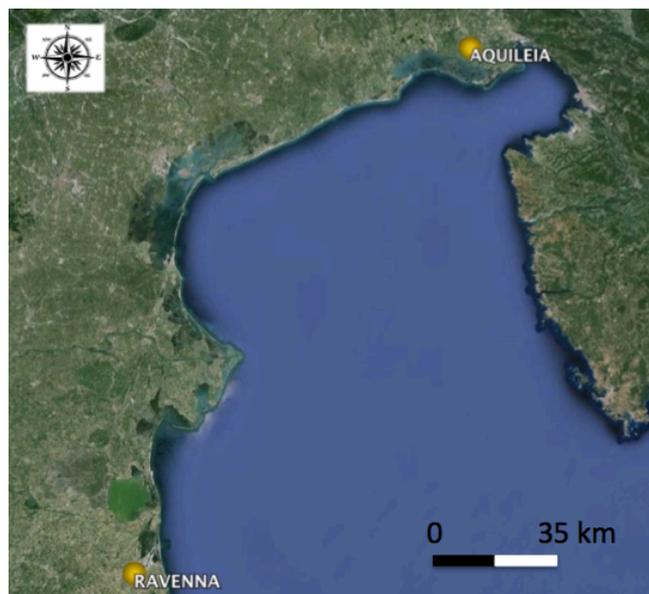


Figura 2-2 Immagine satellitare del litorale friulano-veneto nell'alto Adriatico. La peculiarità della costa bassa combinata con l'importante apporto sedimentario ha portato alla formazione di una serie continua di lagune.

(Fonte Google Earth).

Il bacino primordiale era presumibilmente più ridotto di quello attuale e da allora la configurazione si è evoluta sia a causa dell'accrescimento dei delta di Adige e Piave sia per gli apporti terrigeni dei fiumi che sfociavano all'interno del bacino lagunare, quali Bacchiglione, Brenta e Sile oltre che rami minori di Adige e Piave.

Questi numerosi e potenti “scaricatori” portavano alla naturale e rapida tendenza all'occlusione del bacino rallentata dall'abbassamento del suolo per compattazione dei sedimenti recenti ed il continuo, seppur lieve, innalzamento del livello del mare.

Ciononostante, la regressione continuava a manifestarsi in maniera evidente per cui la Repubblica Veneta tra il 1400 ed il 1800, per tutelare i caratteri della laguna, naturale baluardo difensivo della città, intervenne ripetutamente con grandiose opere idrauliche come la diversione dei grandi fiumi (Bacchiglione e Brenta a sud e Sile-Piave a nord) a mare.

Questo comportò un forte cambiamento nell'approvvigionamento e distribuzione dei sedimenti portando il sistema all'assetto attuale, azzerando i contributi del Po, bloccando gli apporti dell'Adige e rafforzando invece quelli del Sile-Piave a nord.

Successivamente, l'intervento antropico cominciò a manifestarsi anche per quanto riguarda la modifica della configurazione delle bocche lagunari, lo scavo dei canali navigabili e l'interramento di aree di barena a scopo insediativo. Questi interventi, modificarono in modo sensibile gli equilibri ambientali conferendo alla laguna una tendenza evolutiva opposta a quella naturale originaria (Figura 2-3).

La costruzione dei moli alle bocche di porto, in particolare, ha determinato un disequilibrio nel flusso di sedimenti in entrata e in uscita dovuto a un comportamento idraulico asimmetrico delle bocche armate per cui, nella fase di riflusso la corrente in uscita genera un vero e proprio getto tra le dighe, che si proietta compatto in profondità nel mare antistante e trascina con sé i sedimenti trasportati in sospensione, depositandoli lontano dalle testate dei moli (Figura 2-4). Nella successiva fase di flusso, la corrente è richiamata verso la bocca da tutte le direzioni e solo una minima parte dei sedimenti espulsi in mare durante la fase di riflusso è reintrodotta in laguna, determinando come conseguenza un bilancio negativo negli scambi laguna-mare (D'Alpaos, 2010).

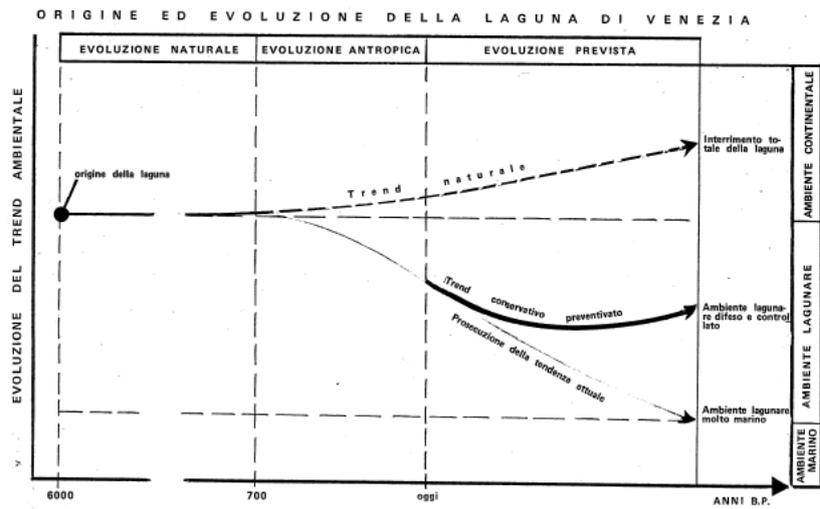


Figura 2-3 Schema del trend evolutivo della Laguna di Venezia che evidenzia come l'intervento antropico sia stato decisivo nel processo d'inversione della tendenza nella trasformazione del sistema lagunare (Fonte Gatto, 1979)



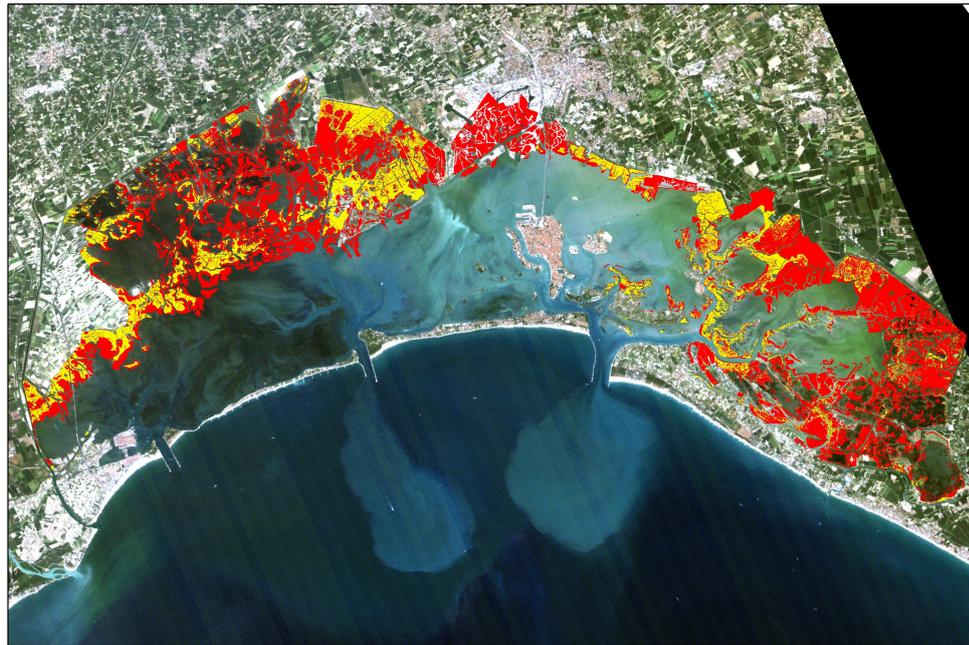
Figura 2-4 Immagine Landsat dell'agosto 1998 che evidenzia la formazione, in fase di riflusso, di due getti tramite i quali i sedimenti fini vengono espulsi in Adriatico e depositati lontano dalle testate dei moli.

## 2.2 Area di studio

La laguna di Venezia attualmente si estende per circa 550 km<sup>2</sup> ed è compresa tra il corso terminale del Brenta a Sud (foce di Brondolo) ed il tratto terminale del Sile a Nord (foce di Piave Vecchia). Il cordone litoraneo che la separa dal mare aperto è interrotto da tre bocche di porto (bocca di Lido, bocca di Malamocco, bocca di Chioggia), che permettono la comunicazione tra ambiente lagunare ed il mare Adriatico e garantiscono continui scambi idrici tra la laguna ed il mare, governati dalle maree.

Il regime mareale è semidiurno, quindi con periodi principali di circa 12.5 ore, avente escursioni medie dell'ordine del metro (con massima escursione alle bocche di circa 1.50m) che subiscono un ritardo ed una attenuazione allontanandosi dalle bocche di porto, per effetto dei fenomeni propagatori all'interno della laguna.

Nella Laguna di Venezia, come del resto in molti ambienti estuarini in tutto il mondo, si possono distinguere, dal punto di vista morfologico, forme caratteristiche riconducibili principalmente a tre diversi ambienti (e.g. Straaten, 1954): le barene, i bassifondi e le piane subtidali, e la rete dei canali (si veda il paragrafo 2.6 per una descrizione dettagliata di tali ambienti). Come evidenziato precedentemente, le modificazioni introdotte dall'attività antropica nel corso dei secoli, hanno favorito l'insorgere di processi erosivi progressivamente crescenti, con conseguente erosione dei fondali lagunari ed approfondimento delle zone di bassofondale e delle piane subtidali e concomitante demolizione dei margini delle barene, con progressiva diminuzione delle superfici occupate da queste strutture morfologiche caratteristiche. L'area delle superfici di barena in laguna di Venezia è diminuita nel corso degli ultimi due secoli passando da circa 180 km<sup>2</sup> nel 1800 agli attuali 47 km<sup>2</sup> (e.g. Marani et al., 2007; D'Alpaos, 2010), come bene evidenziato dalla Figura 2-5. La scomparsa di vaste aree di barena è dovuta a fenomeni di annegamento, per i quali le superfici di barena non riescono a tenere il passo con il crescente livello del medio mare relativo, e a fenomeni di erosione laterale per arretramento dei margini barenali erosi dalle onde prodotte dal vento.



barene naturali 1810-1902    barene naturali 2002

Figura 2-5 Rappresentazione delle aree di barena nel 1810 (porzioni rosse e porzioni gialle) e nel 2002 (porzioni gialle). Fonte: Servizio Informativo del Consorzio Venezia Nuova, Magistrato alle Acque di Venezia.

Un utopico equilibrio con riferimento alle quote delle superfici di bassofondale e delle piane subtidali, si raggiungerebbe se il tasso di deposizione fosse uguale al tasso di erosione per effetto delle onde da vento. Tuttavia, il tasso di deposizione è generalmente minore del tasso di erosione per cui un equilibrio stabile si raggiunge quando il fondale si stabilizza a circa 1.5m di profondità. A tale profondità, un eventuale accumulo di sedimenti, con conseguente diminuzione del tirante idrico, verrebbe eroso per effetto dello sforzo al fondo prodotto dalle onde, mentre eventuali incrementi di profondità porterebbero il sedimento a depositarsi

I processi che portano all'erosione e all'approfondimento dei bassofondali e all'erosione dei margini delle barene, variano all'interno della laguna. In particolare, il bacino nord risente meno degli effetti del moto ondoso legato al vento di Bora ed il tasso di erosione medio annuo dei margini delle barene, dagli anni dal 1970 al 2000, è stato stimato in circa 0.68 m/anno: Nel bacino meridionale, invece, i processi erosivi che comportano la demolizione dei margini delle barene e l'arretramento delle stesse, sono sensibilmente più marcati ed il tasso di erosione medio annuo dei margini delle barene è stato stimato in circa 0.98 m/anno

(Santalucia, 2010). Per quanto riguarda i processi di erosione dei bassofondali, questi sono più marcati nella porzione meridionale della laguna che è stata caratterizzata da diminuzioni più importanti delle quote dei fondali rispetto alla porzione nord orientale della laguna stessa. L'aumento della profondità dei bassofondi e l'arretramento dei margini barenali, con conseguente aumento del fetch (lunghezza di mare libero su cui spira il vento), sono fattori determinanti per il calcolo della potenza del moto ondoso prodotto dal vento.

C'è inoltre da tenere in considerazione l'ipotesi dell'esistenza di una soglia di ampiezza critica di un bacino che regola la tendenza evolutiva dei margini barenali (Mariotti e Fagherazzi, 2013). D'altra parte però l'erosione dei margini barenali provoca un rilascio di sedimenti che riduce la profondità del bacino, cosa che può assumere un significato rilevante se si considera uno specchio d'acqua circondato da terre emerse con a disposizione poche vie d'uscita per il sedimento. Si giunge quindi alla considerazione che se un bacino ha ampiezza minore del suo valore critico si restringe ed eventualmente scompare mentre bacini con ampiezze maggiori dei valori critici si espandono fino all'erosione dell'intera barena che li circonda (Mariotti e Fagherazzi, 2013).

Appare comunque evidente che l'arretramento dei margini barenali sia il risultato del diminuito apporto dei sedimenti da parte dei fiumi, associato agli effetti crescenti del moto ondoso che provoca una decisa rimozione di materiale disgregando i margini barenali e provocando l'arretramento degli stessi.

In un lavoro di Marani et al. (2011), sono state identificate una serie di variabili che è necessario considerare per descrivere l'erosione dei margini barenali: potenza media dell'onda, l'altezza della scarpata del margine, altezza del margine sommerso durante la marea media e la coesione dei sedimenti (anche se quest'ultimo è un fattore estremamente locale). Secondo i calcoli effettuati tenendo conto di questi parametri si è raggiunta la conclusione che esiste una relazione lineare tra potenza dell'onda incidente ed erosione dei margini; cosa tutt'altro che scontata poiché esistono teorie che affermano una correlazione quadratica tra i due parametri.

## 2.3 Morfologie lagunari

In alcune lagune, e in quelle dell'Alto adriatico in particolare, si possono distinguere, dal punto di vista morfologico, forme caratteristiche riconducibili principalmente a tre diversi ambienti (D'Alpaos, 2001): le barene, le velme e bassifondi, e le reti di canali, il cui comportamento si differenzia per il diverso ruolo che vi assumono le forze che governano la propagazione dell'onda di marea.

Di particolare interesse è il comportamento delle barene, caratteristiche formazioni morfologiche solitamente situate ai margini del bacino lagunare, anche se a volte, come nel caso della Laguna di Venezia, fasce potenti di queste strutture s'interpongono tra le zone della laguna più prossime alle bocche a mare e gli specchi d'acqua più lontani, posti ai bordi del bacino stesso. Le barene, che oggi ricoprono circa il 5-10% dell'intera laguna, costituiscono la porzione topograficamente più elevata del bacino, trovandosi a quote superiori a quella del medio mare. Conseguentemente esse sono periodicamente interessate dalle sole fasi di alta marea, che le sommergono durante la fase di flusso, scoprendole durante la successiva fase di riflusso. Si tratta generalmente di strutture piatte, caratterizzate però da un andamento altimetrico piuttosto tormentato, per la presenza di una rete diffusa di piccoli canali, che le incidono e consentono alle correnti di marea di invaderle in modo regolare e progressivo. Per la presenza di una ricca varietà di vegetazione alofila, in grado di crescere in zone soggette a prolungati periodi di sommersione e in terreni ad alto contenuto salino, nelle barene si riscontrano importanti interazioni tra i processi morfodinamici di trasporto e di deposito e processi di natura biologica (Day et al., 1999; Morris et al., 2002, D'Alpaos et al., 2007), insieme a quelli, affatto trascurabili, di produzione di suolo. Da un punto di vista idrodinamico, la presenza, all'interno di una laguna, di ampie superfici di barena, può comportare sensibili ritardi di fase nella propagazione dell'onda di marea ed apprezzabili attenuazioni della sua ampiezza. In particolare, dove la fascia di strutture morfologiche di questo tipo è più estesa e continua, come per Venezia nel caso della Laguna Nord, la marea si presenta ai bordi del bacino lagunare con ritardi di fase di quasi tre ore e con attenuazioni, rispetto al mare, sia sui colmi che sui cavi, che possono superare la decina di centimetri.

Quote decisamente inferiori, rispetto alle barene, caratterizzano i bassifondi e le velme, che sono scoperte dalle acque solo nel caso di maree particolarmente basse. In queste porzioni

di bacino, la pressoché continua presenza di acque durante l'alternarsi delle maree, consente lo sviluppo di scarsa vegetazione (principalmente fanerogame), favorendo invece la presenza, sui fondali, di zone nelle quali la frazione sabbiosa cresce avvicinandosi alla bocca. La mancanza di vegetazione, ed i tiranti d'acqua più sostenuti, fanno sì che, in questo ambiente, il flusso mareale sia meno affetto da attrito con il fondo, risultando quindi la propagazione caratterizzata da minori ritardi e attenuazioni.



Figura 2-6 La persona a sinistra è in piedi con l'acqua alle caviglie su di una velma durante una fase di marea medio bassa mentre la persona alla destra si trova al di sopra dell'adiacente barena emersa affacciata alla Palude della Rosa.

Bassifondi e barene, pertanto, sono le uniche forme stabili che derivano da processi di erosione e deposizione a causa dell'elevata precarietà dell'equilibrio (Fagherazzi et al., 2006)(Figura 2-6).

Il terzo ambiente cui si è accennato è rappresentato dalla rete dei canali, che costituiscono percorsi preferenziali per la propagazione dell'onda di marea e per la distribuzione dei sedimenti e drenano le barene e i bassifondi, aumentando di sezione liquida a misura che ci si avvicina alle bocche. Guardando alle loro caratteristiche morfologiche e al loro ruolo nell'idrodinamica lagunare, i canali sono classificabili in due gruppi (Ashley e Zeff, 1988).

---

Il primo gruppo è costituito dai canali principali, che si dipartono dalle bocche e con successive diramazioni mettono in comunicazione il bacino con il mare. La struttura a rete di questi canali, più o meno articolata, controlla in larga misura la circolazione idrodinamica del sistema, favorendo, tra l'altro, gli scambi di sedimenti tra le barene e i bassifondi e tra i bassifondi e i canali stessi e, attraverso la bocca, tra l'intero bacino e il mare.

Al secondo gruppo appartengono i canali minori, che solcano le barene (ghebi), i quali possono estinguersi quando raggiungono il confine con i bassifondi o proseguire fino a ricongiungersi con i canali presenti sui bassifondi stessi. La fitta rete di canali e di vie d'acqua minori che innervano le barene, rende queste strutture molto "permeabili" al flusso di marea, permettendo la comunicazione diretta tra gli specchi d'acqua adiacenti alle barene, anche quando queste strutture risultano pressoché totalmente emerse.

E' importante sottolineare che, come si è detto, la rete dei canali presenti in un bacino a marea determina la presenza di vie preferenziali sia per il flusso d'acqua che per quello dei sedimenti. Questi ultimi possono provenire dalle barene in seguito a fenomeni di erosione, esser portati in sospensione, per asportazione dai fondali o dalle scarpate, per effetto del moto ondoso, generato sulla superficie liquida dal vento o dai natanti in navigazione, e delle correnti litoranee in prossimità delle bocche, oppure esser introdotti dai corsi d'acqua affluenti nel bacino stesso, o come conseguenza dell'azione dell'uomo.

Le tre componenti del paesaggio mareale precedentemente descritte sono fortemente correlate e tra loro interdipendenti, costituendo un sistema intrecciato (Montgomery e Dietrich, 1988, 1992; Rodriguez-Iturbe e Rinaldo, 1997).

## 2.4 Litologia

L'evoluzione paleogeografica è stata deducibile anche e soprattutto dalle caratteristiche strutturali del sottosuolo lagunare e, nel capitolo dedicato alla litologia, scopriamo come di "litico" vero e proprio non ci sia praticamente nulla. Il sottosuolo lagunare, infatti, è composto quasi esclusivamente da diverse centinaia di metri di puro e semplice sedimento.

I depositi sono distinti in due grandi complessi: i più antichi pleistocenici di ambiente continentale ed i più recenti olocenici di ambiente prevalentemente lagunare relativi all'ingressione marina.

Queste due differenti falde sono intervallate da uno strato di argilla sovraconsolidata nota come caranto riscontrabile a varia profondità; più superficiale verso la terraferma, più in profondità verso il mare raggiungendo i -23 m a Chioggia.

Oltre che per le diverse condizioni erosive, la potenza della coltre olocenica varia aumentando verso sud per la naturale pendenza della paleopianura würmiana e localmente anche per i processi di subsidenza naturale particolarmente attivi nelle zone di delta.

Il caranto più precisamente non è altro che una paleosuperficie originatasi dall'accumulo di sedimenti derivati dall'erosione glaciale che, col passare dei millenni, ha subito una pedogenesi molto spinta.

Questo processo di pedogenesi, concretatosi con le migliaia di cicli di essiccamento ed espansione legati ai cicli stagionali, ha portato il terreno a subire la cosiddetta "calcificazione" con l'impostarsi di una cementificazione di tipo carbonatico. Ne risulta quindi, una matrice a densità maggiore e soprattutto la sovraconsolidazione fondamentale dal punto di vista edilizio per la messa in posto dei pali di fondazione e dal punto di vista geologico – stratigrafico per discriminare il limite tra sedimenti olocenici e pleistocenici (Figura 2-7).

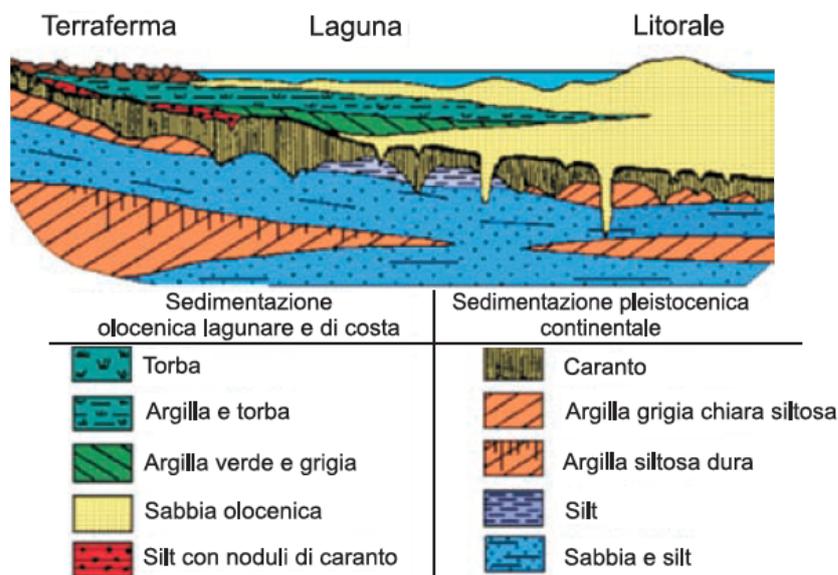


Figura 2-7 Stratigrafia del sottosuolo lagunare veneziano.

Fonte Progetto CARG.

Il complesso tardo pleistocenico è rappresentato da alternanze di orizzonti argilloso-limosi e subordinatamente sabbiosi con intercalazioni torbose; in pratica, un po' di tutto ma le caratteristiche tessiturali ed i contenuti paleontologici rivelano il carattere continentale di questi depositi.

Attraverso i sondaggi diretti si è riusciti a discriminare con maggior dettaglio i sedimenti presenti nei depositi olocenici. Si tratta di un ambiente continentale che subisce poco a poco un'ingressione marina e quindi una situazione d'inondazione ed approfondimento.

Analizzando con ordine, la parte più antica è costituita da sedimenti di facies continentale: sabbie fluviali o argille lacustri in cui potevano avvenire fenomeni di erosione o precipitazione chimica.

Al di sopra di questi depositi si riscontra man mano l'influenza dell'ingressione marina per cui i fiumi diminuiscono la pendenza e danno luogo ad una sedimentazione di materiale più fine di tipo palustre con un alto contenuto di torba.

Infine, la costante crescita del livello del mare, porta alla formazione di un ambiente di tipo marino, nel nostro caso un po' particolare, in quanto, l'eccezionale contributo

sedimentario dei fiumi Padano-Veneti ha garantito la formazione di scanni costieri emersi che delimitano una laguna separata dal mare aperto. Diretta conseguenza è la formazione di facies lagunari con sedimenti ricchissimi di fauna distinguibili dal palustre sottostante.

Quello che è evidente dalla sopradescritta sequenza stratigrafica è il tipico “*transgressivesystemtrack*” ed i limiti tra i depositi caratterizzanti i vari ambienti son di solito netti e chiaramente distinguibili per la natura e la tessitura dei sedimenti (Gatto e Serandrei Barbero, 1979)

Gli spessori delle tre facies sono variabili lungo tutta l’ampiezza della laguna (Figura 2-8).

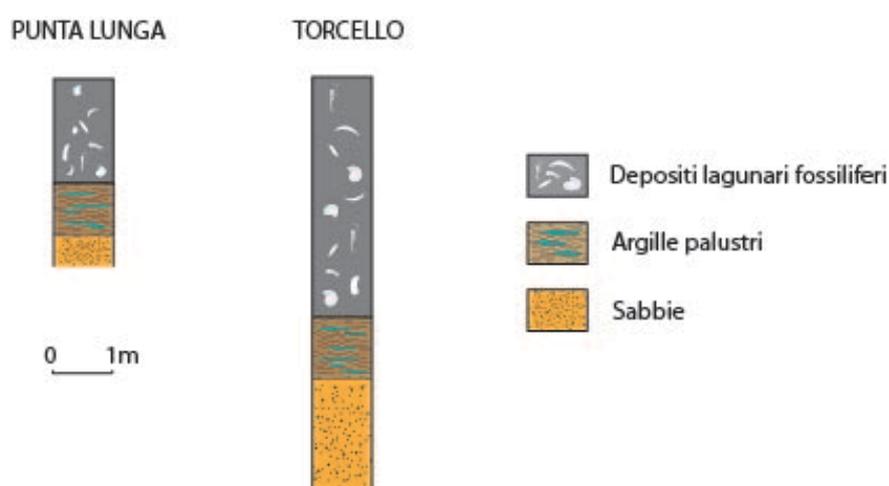


Figura 2-8 Immagine dimostrativa della variabilità dello spessore delle tre facies (continentale, palustre e lagunare) a seconda del punto preso nel bacino. Info spessori fonte Gatto, 1980

## 2.5 Meccanismo di erosione barenale

Durante il processo erosivo i bordi delle barene vengono modellati in vari modi (Schwimmer, 2001).

Quando presentano un andamento abbastanza lineare con zone più facilmente erodibili di altre, la scarpata assume lentamente un andamento ondulato con la formazione di zone più esposte e resistenti all’azione erosiva chiamate “neck” e rientranze “clefts” (**Errore. L’origine riferimento non è stata trovata.** Nel caso in cui la base delle zone sporgenti venga erosa più velocemente della parte più avanzata, si forma il “marsh-stack”, una piccola

porzione di barena che si stacca dal resto della piattaforma. Un altro fenomeno riguarda l'erosione più veloce della parte inferiore della barena dove non è presente l'apparato radicale rispetto alla parte vegetata (Figura 2-9). Man mano che l'erosione avanza, il peso della parte in cui è presente la vegetazione, non più sostenuta dal terreno sottostante ormai eroso, cade su se stessa (crollo per scalzamento).

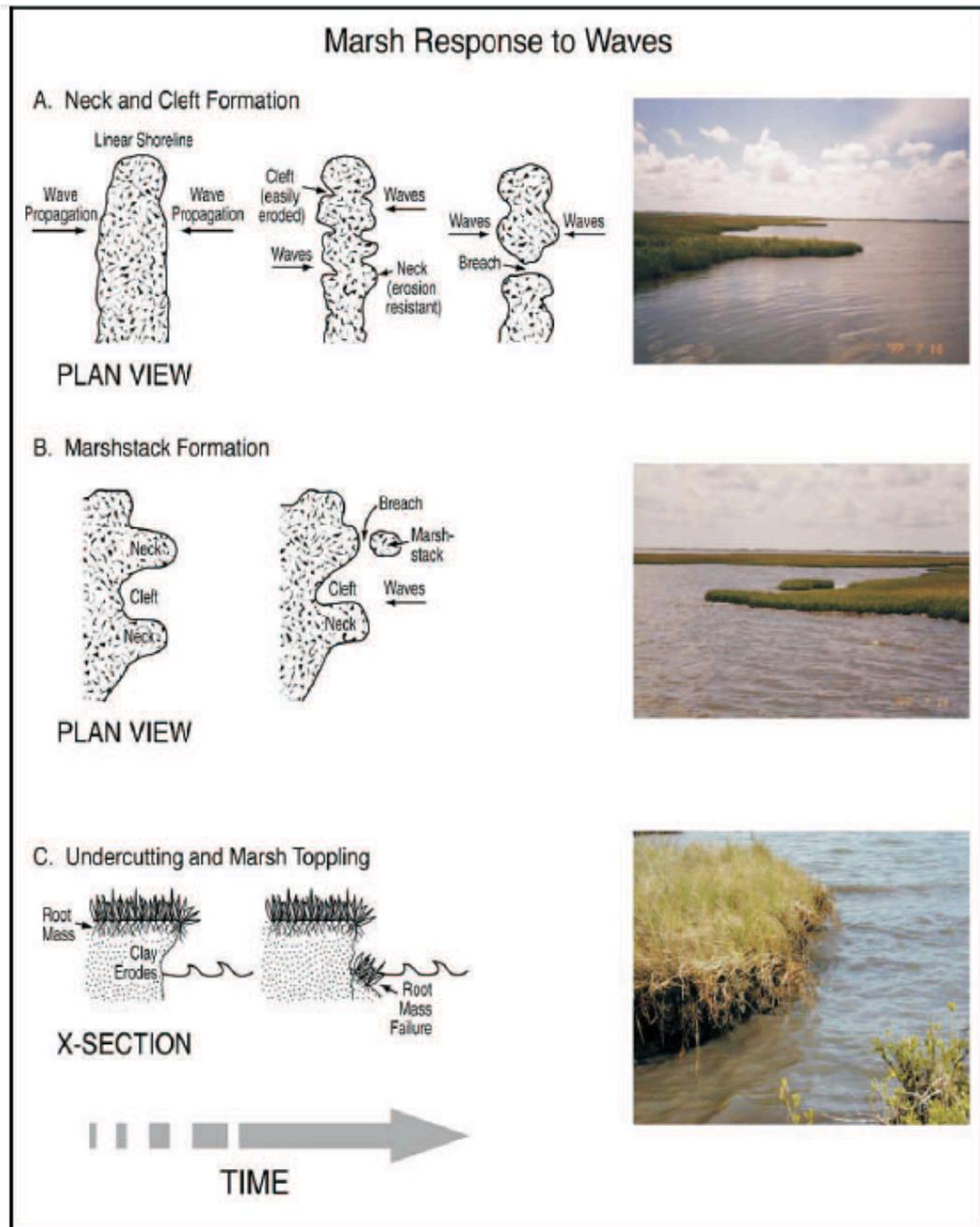


Figura 2-9 Tipologie di processi erosivi barenali.

## 2.6 La vegetazione

Le superfici di barena, fasce caratteristiche, spesso molto estese, della superficie lagunare, poste a quote di poco superiori al medio mare, sono popolate da un limitato numero di specie di vegetazione alofila. Le specie alofile (o “alofite”) sono le uniche specie in grado di resistere e crescere in ambienti salati parzialmente emersi come le superfici di barena. Tali ambienti sono caratterizzati dalla presenza di acque circolanti che possiedono, a causa degli apporti di acqua marina e dell’intensa evaporazione, una concentrazione salina più elevata di quella dell’acqua marina, con concentrazioni saline almeno superiori all’1-2%.

La vegetazione alofila riveste un ruolo di primaria importanza per la sopravvivenza dei sistemi di barena. Essa infatti influenza l’idrodinamica ed il trasporto dei sedimenti favorendo una maggior sedimentazione di suolo inorganico, a causa della una maggiore resistenza offerta al flusso che comporta una diminuzione della velocità, a causa della riduzione della turbolenza che favorisce la caduta per peso proprio delle particelle solide, nonché a causa della cattura diretta di particelle da parte di steli e foglie [e.g., Leonard e Luther, 1995; Mudd et al., 2010]. Inoltre, la presenza di vegetazione alofila produce un accumulo diretto di materia organica che incrementa i tassi di accrescimento verticali e la capacità delle barene di accrescere verticalmente [si veda ad esempio ,Morris et al ., 2002 e Mudd et al. , 2009].

La vegetazione delle barene, inoltre, è costituita da specie che non si distribuiscono uniformemente sulla superficie, ma si organizzano in macchie distinte generalmente dominate da una singola specie. Questo fenomeno è noto come zonazione e consiste in un mosaico di zone dominate da specie differenti. La distribuzione delle piante alofile è strettamente legata alla topografia, poiché specie diverse vivono preferibilmente all’interno di specifici intervalli di quota [Silvestri et al., 2005; Marani et al., 2013].

Le specie maggiormente diffuse, che si trovano con maggiore frequenza e quindi che quindi intervengono più o meno pervasivamente nella composizione del terreno, sono la *Spartina maritima*, la *Salicornia veneta*, *Puccinellia palustris*, lo *Juncus maritimo* ed il *Limonium narbonensis*. Nel seguito si riporteranno informazioni utili alle analisi qui condotte per le diverse specie elencate.

### 2.6.1 *Spartina maritima*

La *Spartina maritima* è una pianta erbacea perenne, verde in primavera ed estate, che sfuma verso il marrone nel periodo freddo.

Possiede delle radici biancastre e carnose a rizoma striscinte e brevi. E' la pianta che più resiste a lunghi periodi di sommersione ed infatti si ritrova verso le quote più basse che corrispondono alle velme e nelle zone più basse della barena, dove vive con le radici immerse nell'acqua tranne che nei momenti di basse maree pronunciate.

La *Spartina* (Figura 2-10) ha un particolare rapporto sinergico col suolo in quanto, per la sua costituzione e per i microhabitat caratteristici che colonizza, aiuta a trattenere i sedimenti portati dalle correnti, dissipa l'energia delle onde prima che raggiungano i margini e protegge il suolo per effetto della copertura delle foglie e del solido apparato radicale (Santalucia, 2010).



Figura 2-10 *Spartina maritima*

### 2.6.2 *Salicornia veneta*

La *Salicornia veneta* (Figura 2-11) è un'aloftita obbligata ed è pertanto presente solo in ambiente umidi e salini per i quali fa parte delle prime specie colonizzatrici. Tuttavia non sopporta sommersioni prolungate per cui sono presenti prevalentemente nei margini delle barene, ambienti caratterizzati dall'aver una quota stabile maggiore rispetto alla parte più interna della piattaforma barenale. Di aspetto ricorda una pianta grassa con un fusto eretto, carnoso con le foglie molto piccole e fuse tra loro avvolgenti il fusto e difficilmente distinguibili da esso.



Figura 2-11 *Salicornia veneta*

### 2.6.3 *Puccinellia palustris*

Sul bordo dei ghebi, tra le varie piante, è possibile trovare la *Puccinellia palustris* (Figura 2-12) che sopporta periodiche sommersioni di acqua salmastra. La *Puccinellia* ha il classico aspetto delle graminacee che spesso si riscontrano con fastidio nei giardini delle case di campagna, quindi si presenta cespugliosa con numerosi fusti eretti, foglie convolute giunchiformi e da giugno a settembre mostra una fioritura a pannocchia formata da spighe violacee.

Inoltre, nelle barene offre un riparo del suolo dal vento contrastando l'effetto disidratante (Santalucia, 2010).



Figura 2-12 Puccinellia palustris

#### 2.6.4 Juncus maritimo

Il *Juncus maritimo* (Figura 2-13) è caratterizzato da un'essenza floreale con minore peculiarità areale rispetto alle altre descritte ma comunque molto presente nelle aree in cui sono state prelevati i campioni nel seguito analizzati.

Si tratta di una pianta erbacea presente lungo tutte le coste della penisola Italiana, in prati salini su suoli che presentano variazioni sia nel livello della falda sia nel contenuto salino.

Il *Juncus maritimo* è facilmente riconoscibile per il tipico aspetto giunchiforme con fusti e foglie verdi, cilindrici e rigidi che si ergono da un ceppo unico dal quale, verso il basso, si diramano radici forti e legnose.



Figura 2-13 Juncus maritimo

### 2.6.5 *Limonium narbonense*

Il *Limonium* (Figura 2-14) è una delle specie più diffuse in quanto colonizza le zone interne della barena ad altitudini intermedie tra le parti più basse costituite dai chiari e dai ghebi ed i margini più elevati.

E' un'alofita facilmente distinguibile poiché presenta foglie basali allungate disposte a rosetta che ricordano nitidamente la rucola comune che vediamo negli orti o dal fruttivendolo. Inoltre in stagione di fioritura, ossia nei mesi estivi da fine giugno a settembre, i fiori di *Limonium* esplodono in un trionfo di colori viola (Figura 2-15) che dipingono in maniera molto affascinante e suggestiva tutte le barene emerse sparse nella laguna interna.

Addirittura la raccolta, spesso indiscriminata di questi fiori, aggiunto alla rarefazione degli habitat, ha indotto diverse regioni italiane ad assumere una posizione di salvaguardia nei suoi confronti.

Inoltre, avendo una foglia larga ed essendo parecchio diffuso, il *Limonium* copre molto bene la superficie mantenendone l'umidità.



Figura 2-14 *Limonium narbonensis*



Figura 2-15 Fioritura del *Limonium narbonensis*

### 2.6.6 *Phragmites australis*

Attorno a laghetti, fiumi, fossati ed anche nelle aree umide come le lagune è facile imbattersi nel tipico canneto di *Phragmites* (Figura 2-16).

La *Phragmites* è una pianta erbacea perenne che si sviluppa su delle radici a rizomi che si diramano in maniera molto pervasiva nel terreno che, geminando fittamente, portano alla formazione di densi canneti.

Essendo un'alofita, ha bisogno di mantenere il piede bagnato, in condizione di saturazione per gran parte del suo ciclo vitale. Nel suo climax ideale scorre acqua dolce tuttavia tollera delle basse concentrazioni di salinità il che, nella Laguna Veneta, riduce il campo di proliferazione ai margini, laddove sfociano i corsi d'acqua, in barene in cui il canneto assume le proporzioni di un fitto e denso muro verde, habitat ideale di numerose specie faunistiche locali.



Figura 2-16 *Phragmites australis*

## 2.7 Subsidenza

Il problema della subsidenza, ovvero del lento e progressivo abbassamento del suolo, è importante e pervasivo in tutta l'area lagunare e gioca un ruolo decisivo nella dinamica a lungo termine del sistema. Congiunto all'innalzamento del livello medio del mare per eustatismo, ha contribuito all'incremento di:

- a) fenomeno dell'acqua alta con immediati problemi alla popolazione ed al patrimonio artistico delle cittadine lagunari.
- b) idrodinamica interna che porta all'erosione dei fondali lagunari.
- c) fragilità delle aree litorali che forniscono una tenace protezione alla laguna contro le distruttive condizioni del mare in tempesta.

In particolare, questi ultimi due punti di carattere geologico hanno una loro importanza nell'ambito dell'argomento di tesi.

Il concetto è tutto sommato, abbastanza semplice e si tratta di fare una prima e fondamentale distinzione tra la subsidenza naturale lenta ed inesorabile e la subsidenza di natura antropica, responsabile di una improvvisa accelerazione del processo, in particolare nella zona di Marghera e Venezia. In pratica l'abbassamento generale del suolo per causa antropica è stato conseguenza dell'estrazione intensiva delle acque negli acquiferi collocati nelle unità sabbiose nei primi 350 m dei 1000 m di argilla normal consolidata della formazione quaternaria (Figura 2-17).

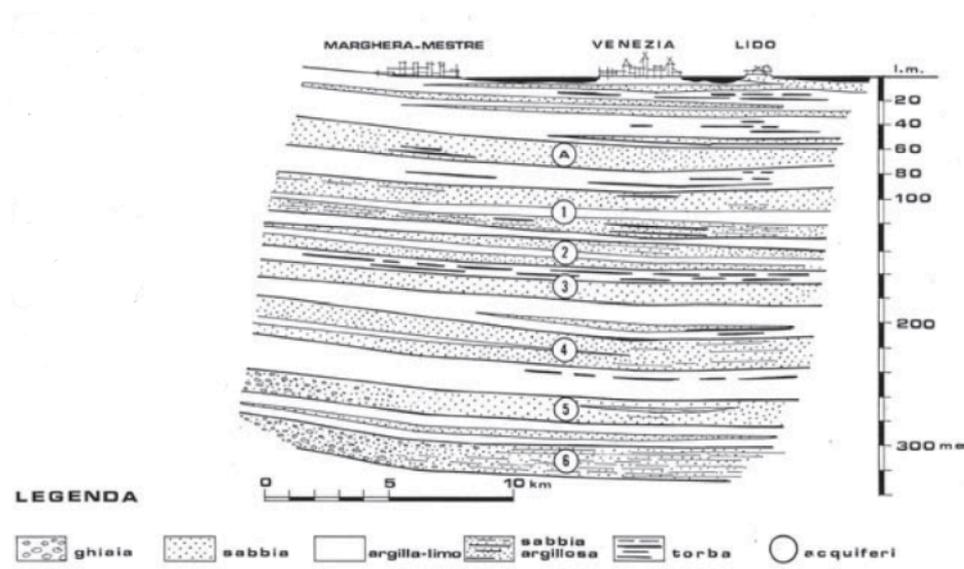


Figura 2-17 Schema rappresentativo degli acquiferi nel sottosuolo Veneziano. E' da questi acquiferi che l'emungimento selvaggio ha provocato la cosiddetta subsidenza antropogenica. Fonte Progetto Carg.

Questi grandi emungimenti hanno visto la loro più fervente attività tra il 1950 ed il 1970 operativi soprattutto nella zona industriale di porto Marghera in prossimità della costa nella terraferma, che hanno portato ad una depressurizzazione degli acquiferi provocando una notevole accelerazione nel consolidamento degli orizzonti argillosi interposti alle falde acquifere il che, si ripercuote in superficie con un abbassamento dell'area di Marghera di 12 cm e a Venezia di 8 cm.

Tramite numerose analisi e sondaggi eseguiti negli ultimi decenni nei centinaia di punti fiduciali nella laguna, sappiamo che le pressioni dei fluidi nelle falde sono state recuperate in tempi molto rapidi dopo le drastiche misure di controllo adottate a partire dal 1970. Per questo motivo la grave e intensa subsidenza che ne era derivata si è arrestata e, a partire dal '75, si

avvertiva una piccola ma significativa inversione di tendenza; di conseguenza l'area centrale della laguna comprendente anche l'area urbana della Serenissima risulta stabile e senza particolare problemi di subsidenza.

Il danno però rimane irreversibile poiché è dimostrato che non si potranno avere ulteriori benefici altimetrici in quanto le caratteristiche dei terreni non consentono recuperi elastici superiori al 15% della deformazione totale indotta nel passato (Gatto, 1979).

Anche se la subsidenza antropica è stata pressoché annullata, rimane comunque quella naturale che è possibile suddividerla in due componenti: quella profonda di origini tettonica legata ai continui movimenti dei complessi crostali terrestri e quella superficiale di assestamento o compattazione dei sedimenti di recente deposito. Pertanto quest'ultimo tipo di processo fa sentire la sua presenza laddove l'apporto di sedimenti è ancora oggi attivo ed abbondante; ci si riferisce alle zone sud e nord della laguna che vedono notevoli e preoccupanti tassi di abbassamento nell'ordine di 5 mm/anno (Figura 2-18).

Difatti, le ferventi località turistiche trevigiane e veneziane, si trovano nell'infelice condizione di continuo abbassamento costringendo le autorità amministrative ad attuare dei costanti piani di controllo delle dinamiche costiere al fine di evitare grossi disagi provocati dall'inerzia naturale del sistema trascurata negli anni d'oro del boom edilizio dell'area litoranea.

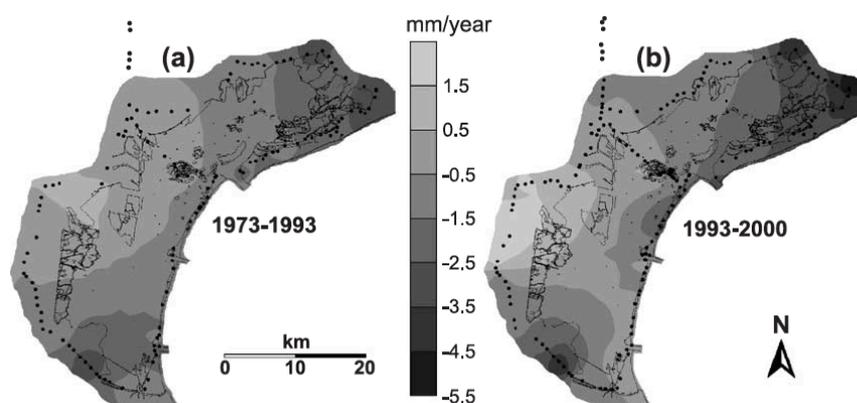


Figura 2-18 In questo schema è intuitivo osservare la distribuzione della subsidenza nella laguna: forte agli estremi nord e sud, più blanda nell'area centrale. Fonte

Carbognin et al. 2004



## 3 Metodologie operative

### 3.1 Prelievo delle carote

Il lavoro, le analisi, i campioni, i dati non esisterebbero se in principio non si passa per la fase di raccolta delle carote in campagna.

Il primo passo è stato l'individuazione di siti con le condizioni al contorno più adatte allo scopo delle analisi, quindi con differenti orientazioni geografiche ed erosioni più o meno marcate oppure con caratteristiche uguali ma in zone della laguna distanti fra loro (Figura 3-1).

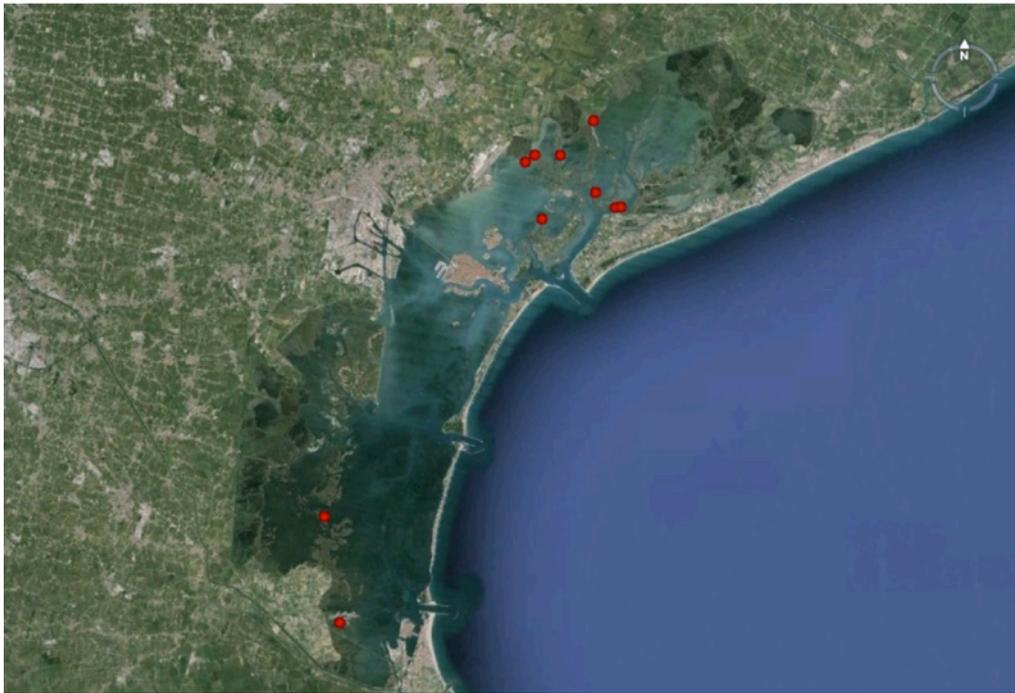


Figura 3-1 Visione sinottica dell'area della Laguna Veneta. I cerchi rossi rappresentano i punti in cui sono state prelevate le carote analizzate. Fonte immagine Google Earth.

Le uscite in laguna mirate alla raccolta delle carote son state effettuate con imbarcazioni di dimensioni ridotte e conoscendo in precedenza l'escursione tidale: due dettagli importanti in

quanto lavorando sui margini è molto di aiuto un livello basso di marea in modo da avere scoperta il più possibile la scarpata barenale. Per contro, il tirante idrico diminuisce e certe aree non sono facilmente accessibili con barche chigliate con grande opera viva e quindi con un pescaggio elevato.

Una volta giunti nel sito prescelto si è ricercata la porzione di margine più adatta alla raccolta della carota considerando sia l'integrità della scarpata che la sua rappresentatività.

La carota è stata prelevata infiggendo nel margine esterno della piattaforma barenale una cornice di dimensioni 50x10x10 cm (Figura 3-2) prelevando così un parallelepipedo di terreno che è stato immediatamente avvolto in pellicola trasparente avendo cura di nominare ogni carota e segnarne il verso. Utilizzando questo metodo di prelievo "a cornice", scostandoci quindi dai carotatori convenzionali, si elude il problema dell'alterazione delle caratteristiche fisiche del terreno tra le quali la densità e la porosità in quanto la carota non subisce compattazione con la conseguente occlusione dei pori.

Successivamente, a causa dell'impossibilità di analizzare tutte le carote prelevate nel giro di pochi giorni, queste sono state congelate al fine di conservarne la sostanza organica impedendone la decomposizione.

Pertanto, scelta la carota da analizzare, si scongela, si estrae dalla cornice (Figura 3-3) mantenendo un'estrema cautela per evitarne il disfacimento e si taglia a metà parallelamente al lato lungo (Figura 3-4).

Quest'operazione consente di recuperare metà carota che sarà poi archiviata in congelatore avente funzione di testimone.

La parte destinata all'analisi invece, previo una rapida lettura delle facies riconoscibili, è stata ulteriormente sezionata prelevando tre campioni di dimensioni 2x2x1 cm ogni 5 cm di profondità per l'analisi del contenuto organico ed un quarto campione di volume non noto per l'analisi granulometrica (Figura 3-5). Quest'ultimo campione è stato prelevato ogni 5 cm di profondità, in corrispondenza dei campioni prelevati per l'analisi del contenuto organico, più un campione rappresentativo del top della carota.

I campioni sono stati sistemati all'interno di sacchetti di plastica a chiusura ermetica e, dopo aver pesato quelli destinati al calcolo della sostanza organica, sono stati posti all'interno del congelatore, pronti ad essere prelevati e scongelati nel momento più opportuno per lo svolgimento delle successive analisi in laboratorio.



Figura 3-2 Operazione d'infissione della cornice sul margine della barena.



Figura 3-3 Estrazione della carota dalla cornice in laboratorio. Spesso le carote si presentano molto umide specialmente se prelevate in un momento di marea medio alta.



Figura 3-4 La carota viene divisa in due parti con un taglio parallelo al lato lungo. Il taglio non è sempre semplice e scontato per la possibile presenza di grossi pezzi di radici che rischiano di far disfare la forma della carota e rendere difficoltose le successive operazioni.



Figura 3-5 Il fine ultimo del sezionamento è ottenere quattro campioni ogni 5 cm di profondità per l'analisi del contenuto organico e l'analisi granulometrica.

## 3.2 Calcolo del contenuto organico tramite LOI

Al fine di raggiungere lo scopo finale del lavoro di tesi, la determinazione della sostanza organica presente nei campioni è fondamentale.

Per sostanza organica s'intende semplicemente l'insieme dei composti di origine animale o vegetale presenti nel terreno che ne alterano la densità e la continuità a livello sedimentologico: nella maggior parte dei casi non parliamo altro che di radici, foglie e fiori delle piante alofite che popolano la superficie della barena.

Il contenuto della sostanza organica presente in ogni campione è stato determinato attraverso un processo definito Loss On Ignition (LOI), procedimento attraverso il quale si va a perdere la sostanza organica per combustione.

La metodologia LOI è ampiamente diffusa nella comunità scientifica in quanto è relativamente veloce e permette di analizzare simultaneamente un alto numero di campioni. Tuttavia non esiste ancora una procedura standard riguardo la sua applicazione in termini di temperatura e tempo di esposizione.

Ad esempio, è stato provato che imponendo una determinata temperatura per un dato intervallo di tempo per la stessa analisi in differenti laboratori, i risultati ottenuti sono diversi (Heiri et al., 2001). Semplicemente la granulometria del campione o la posizione del crogiolo all'interno della muffola possono alterare il risultato della combustione.

Inoltre sono da tenere presenti quei processi che possono portare all'errore nella stima della sostanza organica in base alla temperatura di combustione. Ad esempio, in campioni ad alto contenuto argilloso, le argille possono perdere acqua strutturale tra 450°C e 600°C (Ball, 1964; Howard & Howard, 1990); minerali quali siderite, magnesite, rodocrosite e dolomite subiscono perdite di carbonio inorganico tra 425°C e 520°C (Heiri et al., 2001; Frangipane et al., 2009); dolomite e calcite e la maggior parte dei minerali carbonatici sono distrutti tra 700°C e 850°C (Santisteban et al., 2004). Inoltre, la combustione della sostanza organica inizia a circa 200°C (Santisteban et al., 2004), e l'utilizzo di una temperatura di combustione di 550°C porta alla sovrastima del contenuto di massa organica (Frangipane et al., 2009).

Per la nostra analisi di contenuto organico nei campioni si è quindi deciso di impiegare una temperatura di 375°C ed un tempo di esposizione di 16 ore, in accordo con il procedimento suggerito da Ball (1964), Frangipane et al. (2009), Protocollo SFU (2011).

La determinazione del contenuto di materia organica si ricava dalla differenza tra il peso del campione pre-combustione ed il peso del campione post-combustione in un forno a muffola.

Il calcolo finale non è complicato ma per la risoluzione decimale con la quale andremo ad analizzare il peso di ciascun campione, si necessita di una procedura di preparazione per nulla scontata.

### 3.2.1 Preparazione dei campioni

I campioni prelevati dalle carote, sagomati a cubetto di lato 2x2x1 per standardizzare a volume noto come precedentemente descritto, sono inseriti in un forno alla temperatura di 50°C per tre giorni (Figura 3-6).



Figura 3-6 Campioni posti a seccare in forno a 50°C per tre giorni.

Quest'operazione ha il fine di asciugare e seccare il campione facendone evaporare l'acqua dei pori e l'acqua adsorbita dalle superfici delle particelle argillose. A volte è possibile che nella permanenza in forno, alcune forme instabili di sostanza organica possano essere allontanate se la temperatura è superiore a 60°C (Dadey et al., 1992). Di conseguenza, l'eventuale perdita di materiale organico instabile nella fase di asciugatura a 50°C può essere ritenuta una perdita del tutto trascurabile.

Passati i tre giorni, si pesa il campione secco e si passa alla fase di frantumazione e polverizzazione mediante un mortaio di porcellana per rendere omogenei e uniformi i

frammenti di sostanza organica che spesso capita di trovare di svariate dimensioni all'interno del campione (Figura 3-7). Questo è necessario per ottimizzare i risultati della combustione che, alla presenza di frammenti più grossolani, potrebbe risultare incompleta risparmiando la loro parte centrale.

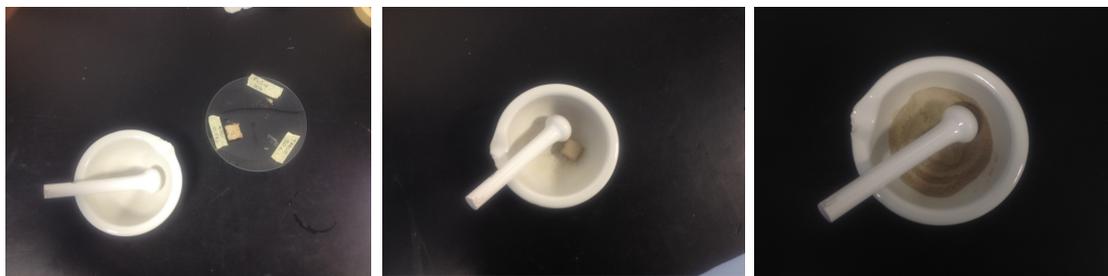


Figura 3-7 Sequenza di frantumazione del campione.

### 3.2.2 Trattamento dei crogioli

Al fine di minimizzare l'errore che potrebbe derivare da una pesatura errata del campione, è opportuno provvedere al trattamento dei crogioli che vanno a contenere il campione polverizzato durante il processo di combustione. Sono stati utilizzati dei crogioli di porcellana, materiale con la caratteristica di assorbire l'umidità dell'aria che ne modifica il peso di qualche milligrammo o centigrammo addirittura. Quindi, per ovviare al problema, i crogioli vuoti sono inseriti all'interno di un forno a muffola che incrementa la temperatura di circa 10°C al minuto fino a 375°C, temperatura alla quale saranno poi bruciati i campioni. I crogioli rimangono in forno a questa temperatura per 1 ora. Al termine si lasciano raffreddare in essiccatore per 30 minuti, in maniera tale da mantenerli isolati dall'umidità esterna che sarebbe altrimenti assorbita nuovamente nei pori della ceramica. I crogioli sono poi pesati per ottenere la tara da utilizzare successivamente. In questa operazione, ma in generale in tutte le pesate con la bilancia analitica, è importante che il materiale da pesare sia a temperatura ambiente per evitare che all'interno della camera di pesata possano formarsi delle correnti d'aria percepite dalla bilancia analitica come variazioni di peso.

### 3.2.3 LOI

Una volta polverizzati i campioni ed opportunamente trattati e pesati i crogioli, si passa alla fase di combustione vera e propria. Ogni campione viene sistemato nel crogiolo e pesato

nuovamente (peso crogiolo + campione pre-combustione). Con cautela si sistemano i campioni in una muffola più piccola rispetto a quella usata per il trattamento dei crogioli e disposta sotto cappa per consentire l'aspirazione di eventuali odori sprigionati dalla combustione della materia organica (Figura 3-8). Da una temperatura ambiente di circa 25°C si incrementa la temperatura di 60°C ogni 10 minuti fino a raggiungere 375°C.



Figura 3-8 Crogioli contenenti i campioni polverizzati disposti all'interno del forno a muffola.

Raggiunta la temperatura di 375°C, la combustione agisce per 16 ore. Al termine si lascia raffreddare il campione in essiccatore per mezz'ora (Figura 3-9) per uniformare le condizioni rispetto alla pesata precedente la combustione ed in seguito si procede alla pesata lorda nella bilancia analitica (peso crogiolo + campione post-combustione - Figura 3-10).

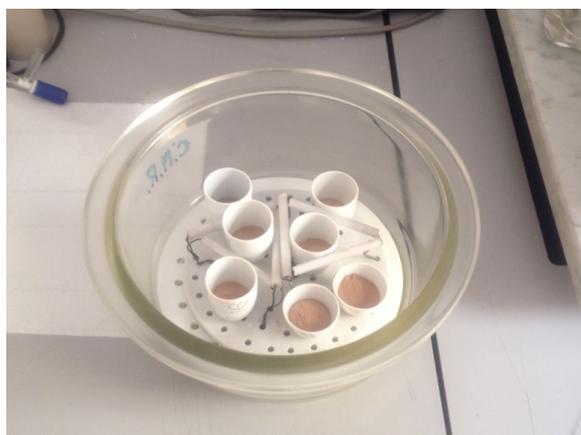


Figura 3-9 Crogioli contenenti i campioni all'interno dell'essiccatore.



Figura 3-10 Bilancia analitica per il calcolo del peso del crogiolo e del campione al suo interno.

Quest'ultimo peso sottratto al peso del campione pre-combustione, fornisce il quantitativo di materia organica bruciata nel processo che rappresenta la quantità di materia organica presente in ogni cubetto prelevato dalle carote ad una determinata profondità.

### 3.3 Analisi granulometrica

Il sedimento inorganico è formato da minerali, frammenti di roccia ed eventualmente anche frammenti di gusci o foraminiferi ma ciò che fornisce loro la consistenza e la resistenza meccanica è il fattore dimensionale dei granuli.

Differenti granulometrie danno infatti differenti reazioni all'impatto con l'acqua, concetto che non è da sottovalutare quando si parla di erosione costiera .

Le particelle a granulometria più fine come le argille interagiscono con l'acqua in diversi modi: possono assorbire e rigonfiarsi, asciugarsi liberando acqua a vari livelli di adsorbimento oppure seccarsi formando delle crepe, il tutto comunque rinforzato dalla proprietà coesiva propria di queste particelle.

La granulometria sabbiosa invece, aumenta di coesione se appena umidificata ma, a meno che non sia sovraconsolidata, a contatto con l'acqua subisce uno scioglimento.

Sopra i 2 mm si entra nel campo delle ghiaie, ma in questo lavoro di tesi resteremo sempre al di sotto di tale soglia poiché i sedimenti lagunari sono prevalentemente trasportati per sospensione, quindi il campo di esistenza della granulometria inorganica si riduce ad argille, silt ed al massimo sabbia fine.

La procedura inizia con il prelievo dalla carota di qualche grammo di sedimento ad ogni livello che si è scelto di analizzare. Nel nostro caso, partendo dal top di ogni carota, è stato analizzato un campione ogni 5 cm di profondità. Previa seccatura in forno per tre giorni, il campione è posto all'interno di un becker di plastica e sottoposto ad un trattamento chimico da parte con acqua ossigenata ( $H_2O_2$ ) di concentrazione 35% (concentrazione molto elevata, basti pensare che quella medica è al 3%) (Figura 3-11).

Questo trattamento è fondamentale in quanto l'acqua ossigenata rimuove la sostanza organica tramite una reazione esotermica che sprigionando calore può portare la soluzione fino a 90°C (Stocco, 2015). Il tutto, infatti, è svolto sotto cappa aspirante.

La temperatura influenza il tempo di contatto necessario alla rimozione della materia organica che richiede spesso diversi giorni e non esiste nessun indicatore affidabile che mostri il termine della reazione. Tuttavia una mancanza di schiuma visibile ed un colore sbiadito del campione possono indicarne il completamento.



Figura 3-11 Acqua ossigenata al 35% versata nel becker contenente il campione secco.

La rimozione della sostanza organica è una fase necessaria prima dell'analisi granulometrica sulla frazione inorganica con un granulometro laser, in quanto questo strumento sfrutta l'interferenza che le particelle del sedimento disperso in acqua deionizzata provocano all'onda elettromagnetica del laser. Poiché la sostanza organica può presentare diverse forme e misure, è necessaria la sua rimozione dal campione al fine di misurare la granulometria della frazione inorganica. Infatti, come dimostrato da Allen e Thornley (2004), se il granulometro laser intercetta un frammento organico, lo registra come un granulo sferico di sedimento della dimensione misurata durante il processo, cosa che va a contaminare il dato spostando il valore della granulometria media a dimensioni maggiori e creando una distribuzione bimodale nella frequenza della granulometria (Figura 3-12).

Il trattamento per la rimozione della frazione organica è pertanto necessario ed il campione, completamente sommerso in acqua ossigenata, resta a reagire nei becker sotto cappa per due giorni abbondanti.

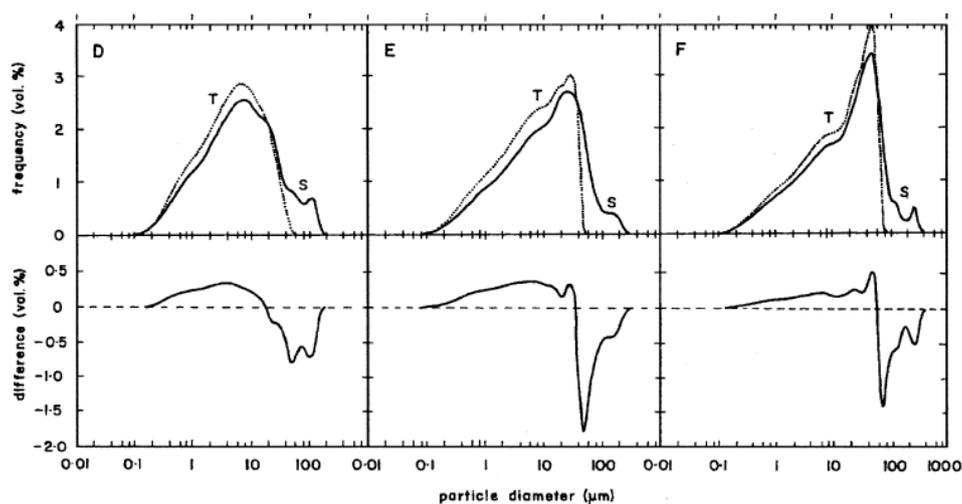


Figura 3-12 Diagramma realizzato da Allen & Thornley (2004) in cui, nelle tre figure in alto, si confronta la curva della granulometria ottenuta al granulometro con e senza pretrattamento con l'acqua ossigenata. La curva ottenuta per il campione non trattato (linea continua indicata con lettera S) mostra una distribuzione bimodale con granulometria massima che raggiunge 200-300  $\mu\text{m}$ . Invece la curva ottenuta da un campione trattato con  $\text{H}_2\text{O}_2$  (linea tratteggiata indicata con lettera T) mostra una moda con frequenza maggiore, media a granulometria minore e la coda della curva interseca l'asse delle ascisse a 60-70  $\mu\text{m}$ .

Al termine, dopo aver controllato che la reazione sia conclusa, si riempie il becker con acqua deionizzata al fine di creare una colonna d'acqua che permetta fin da subito il galleggiamento in superficie della materia organica residua non disciolta, come ad esempio pezzi di radici (Figura 3-13) e la decantazione della parte inorganica, che sarà sottoposta all'analisi con il granulometro laser.

L'acqua deionizzata è stata preferita a quella dell'acquedotto poiché quest'ultima presenta degli ioni in soluzione (per esempio, ione calcio e ione carbonato) i quali potrebbero precipitare andando a falsare le successive analisi.

Il contenuto dei becker, sempre sotto cappa, è stato quindi mescolato e lasciato decantare per un paio di giorni. Per riuscire a prelevare l'inorganico destinato al granulometro, si passa alla fase di svuotamento dei becker tramite sifonamento (Figura 3-14) con un piccolo tubicino di plastica flessibile avendo cura di limitarne lo spostamento che causerebbe la risospensione del sedimento più fine.

Ciò che rimane è il precipitato inorganico sommerso da circa un paio di cm di acqua che non si è prelevata per evitare di creare turbolenze e perder così la parte più fine del materiale.

Infine, questa parte rimanente è travasata in ciotole di ceramica, poi sistemate in forno per tre giorni a 50°C (Figura 3-15). In questa fase l'acqua evapora, il sedimento rimane sul fondo e sulle pareti interne della ciotola dalla quale è raschiato con una spatolina metallica. Quindi viene raccolto e chiuso all'interno di una bustina di plastica a chiusura ermetica (Figura 3-16).



Figura 3-13 Becker con campione trattato con acqua ossigenata, diluito in acqua deionizzata. In superficie galleggia la materia organica residua non disciolta: in foto si vede bene un piccolo pezzo di radice.



Figura 3-14 Sifonamento con tubicino di plastica flessibile. Si sfrutta il salto di potenziale tra il bancone ed il lavandino posto più in basso per svuotare il becker fino alla misura ritenuta più opportuna.



Figura 3-15 Forno che ospita, nella mensola in alto e alla base, le ciotole contenenti il residuo inorganico e l'acqua non sifonata per evitare turbolenze e perdita di sedimento fine. Nella mensola intermedia, invece, si vedono i vetri da orologio con i campioni in fase di asciugatura.



Figura 3-16 Così è come si presenta la ciotola di ceramica dopo tre giorni di forno a 50°C. L'acqua è evaporata e la patina marroncina è il campione inorganico che sarà poi raschiato con la spatolina metallica e posto nelle buste di plastica a chiusura ermetica contrassegnate con il nome del campione.

Il campione è quindi pronto per l'analisi granulometrica, la quale è stata effettuata mediante l'utilizzo di un *Mastersizer 2000* (Figura 3-17). Il sedimento disperso in acqua deionizzata passa attraverso una coppia di lenti (Figura 3-18) ed è intercettato dal raggio laser.

Il raggio, intercettate le particelle, subisce una modifica del suo percorso che viene raccolto da un detector. Questo segnale è quindi convertito in un formato leggibile dal software il quale, alla fine, fornisce la distribuzione del sedimento in funzione della dimensione dei granuli per ogni campione.



Figura 3-17 Mastersizer 2000, lo strumento usato per discriminare la granulometria dei campioni.

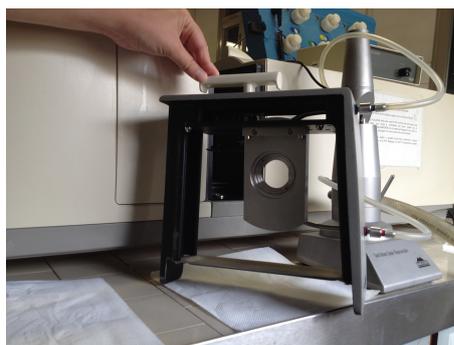


Figura 3-18 Coppia di lenti all'interno del granulometro attraverso le quali fluisce il sedimento disperso in acqua deionizzata.

### 3.4 Analisi d'immagine

Il credo che ha spinto numerosi ricercatori e stimolato l'autore di codesta tesi ad occuparsi della Laguna Veneta è da ricercare fondamentalmente nell'accelerazione di quel processo di erosione che le barene stanno subendo negli ultimi decenni minacciando i centri urbani presenti ed alterando l'intero ecosistema.

Questo processo lungo e continuo si nota abbastanza facilmente. Basti osservare in loco, come in relazione a dei punti fissi nella barena nel tempo la distanza dai canali sia drasticamente diminuita, come i margini delle barene collassino così facilmente sotto il proprio peso o addirittura come interi isolotti siano clamorosamente scomparsi.

E' un processo naturale, figlio di una mancata dose di apporto sedimentario ma con velocità e modalità che possono essere funzione di fattori locali caratteristici di ogni singolo punto nel margine barenale.

Per cominciare a studiare questo fenomeno nel dettaglio è stato necessario digitalizzare la mappa dell'area cercando di ricostruire la storia erosiva lungo tutto il perimetro di ogni barena, in modo da avere una visione completa di alcune zone o, se necessario, dell'intera laguna.

Per fare ciò si è sfruttata la tecnologia informatica, ed in particolare il software tipo GIS (Geographical Information System) nato nel 1963 nel freddo Canada che in quell'epoca ha per primo sentito l'esigenza di analizzare i dati raccolti dal Canada Land Inventory e di produrre statistiche utili per la gestione del territorio.

Il GIS è un ambiente che permette l'elaborazione e la manipolazione di dati geometrici georeferenziati e di fatto non è altro che un insieme di applicazioni che fornisce informazioni riguardanti dati cartografici collegati e collegabili al territorio.

Consente inoltre di rappresentare il mondo che ci circonda con figure geometriche (punti, linee, poligoni), in modo da poter definire ogni elemento, sia esso una strada, un edificio, un lago o, nel caso di questo lavoro, barene e canali a marea, come un insieme di punti a coordinate note e poterne quindi approssimarne efficacemente la struttura.

Le diverse figure geometriche vanno a formare un modello vettoriale e sono dette anche primitive geometriche vettoriali, poiché da questi elementi è possibile ricavare la geometria, in ambito GIS, di qualsiasi oggetto. In particolare:

---

- Il punto è costituito geometricamente da una coppia di coordinate, e può essere utilizzato per rappresentare non solo elementi effettivamente puntuali e privi di dimensione, come ad esempio un punto trigonometrico di riferimento, ma anche entità reali effettivamente esistenti e con una struttura areale ben definita. Questo può essere fatto per motivi di scala o per motivi legati all'uso che s'intende fare dei dati stessi, quando magari non interessa l'estensione dell'area legata al punto, ma una caratteristica intrinseca, come ad esempio il flusso turistico in un certo periodo di osservazione.

- Il poligono descrive una parte di piano compresa all'interno di una linea spezzata chiusa, costituita da un insieme ordinato di punti i cui estremi coincidono. Consente la modellazione di elementi reali che possono essere descritti da aree, e quindi ogni elemento caratterizzato da estensione, come limiti amministrativi di comuni, edifici di vario genere o superfici di barena.

Succede spesso di dover descrivere tratti curvilinei da una linea spezzata, pertanto ci si imbatte frequentemente in problemi di discretizzazione.

Per fornire le coordinate alle immagini all'interno del GIS è dapprima necessario aprire una mappa CTR (Carta Tecnica Regionale) precedentemente scaricata da internet. Nel caso della laguna di Venezia, la CTR è disponibile nel sito della Regione Veneto.

La mappa CTR è un raster, ovvero un'immagine formata sostanzialmente da una griglia costituita da un numero discreto di quadrati o celle rettangolari chiamati pixels, che rappresentano l'unità di riferimento territoriale. Una volta caricata in GIS porta in dote le coordinate geografiche con un preciso sistema di riferimento, che in questo caso è rappresentato dal sistema metrico Gauss Boaga fuso Ovest. Al di sopra di questo layer costituito dalla carta CTR è stata eseguita la procedura di georeferenziazione.

Per georeferenziazione si intende il posizionamento di una immagine satellitare o foto aerea della stessa zona che sia in sovrapposizione nel modo più perfetto possibile con la CTR.

Pertanto una corretta procedura di georeferenziazione richiede il maggior numero possibile di punti fissi su cui basare il processo di elaborazione.

Questi punti, noti con l'acronimo GCP (Ground Control Point) sono dei punti di controllo coincidenti con oggetti di sicura e certa localizzazione al suolo, quali ad esempio incroci stradali, nodi della rete fluviale o angoli di edifici, e devono essere, chiaramente, distinguibili

e ben distribuiti su tutta l'immagine. Una volta riconosciuto un punto nella mappa e nella foto aerea lo si collega tramite l'apposito tool. Questa operazione viene eseguita per un numero di punti ritenuto adeguato e il software automaticamente, attraverso un sistema di algoritmi ed interpolazioni, sistema le immagini una sopra l'altra basandosi sui GCP forniti che fungono da punti di ancoraggio (Figura 3-19).

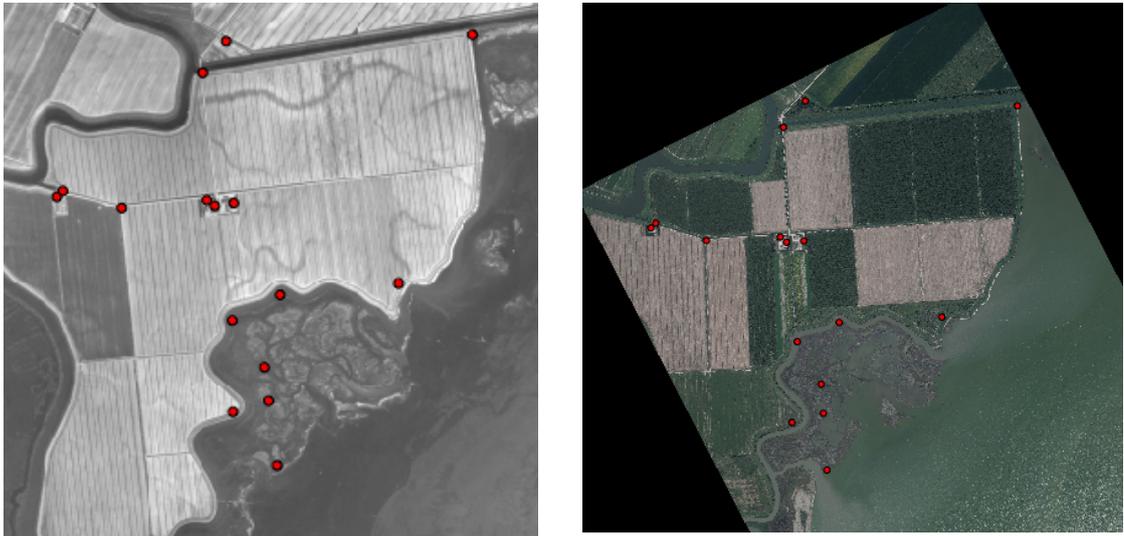


Figura 3-19 Panoramica dei GCP utilizzati per la georeferenziazione della barena situata a ovest della Palude del Vigno, nella zona settentrionale della laguna. La foto a sinistra è stata scattata nel 1978, mentre la foto di destra nel 2010. I GCP più in alto sono presi in riferimento ad edifici ed incroci stradali i quali rappresentano punti molto più affidabili rispetto a quelli in basso, presi nell'intersezione dei canali interni della barena che sono soggetti a un certo tipo di dinamica.

Le immagini da georeferenziare sono naturalmente quelle da confrontare per stabilire il quantitativo di erosione e si tratta di foto aeree scattate a distanza di decenni per consentire di apprezzare l'arretramento dei margini barenali.

Le foto aeree più vecchie disponibili e scaricabili nel sito della Regione Veneto comprendenti tutte le zone in cui son state prelevate le carote risalgono al 1978. Queste sono state confrontate con foto aeree più recenti scaricabili dallo stesso sito risalenti al 2010.

In seguito, per completezza, sono riportate le caratteristiche dei rilievi fotografici utilizzati.

---

- Volo 1978 Reven, giugno 1978, commissionato da Regione Veneto, eseguito da CGR – Parma, tipo analogico, focale 305,38, quota media di volo 6000 m, scala media dei fotogrammi 1:20000, in bianco e nero.

- Volo 2010 Reven area Venezia (volo alto), 21 agosto – 21 settembre 2010, commissionato da Regione Veneto, eseguito da Blom/CGR – Parma, tipo digitale, focale 100,465, quota media di volo 3030 m, a colori, con pixel al suolo del fotogramma da scaricare 24 cm, fotogramma da scaricare pari a 12983 x 8483 pixel.

- Volo 2010 Reven area Venezia (volo basso), 1 settembre – 15 settembre 2010, commissionato da Regione Veneto, eseguito da Blom/CGR – Parma, tipo digitale, focale 100,465, quota media di volo 1680, a colori, pixel al suolo del fotogramma da scaricare 13 cm, fotogramma da scaricare pari a 12983 x 8483.

I GCP, non sono sempre facilmente individuabili in un ambiente poco antropizzato e fortemente dinamico come la laguna. Per cui, nel rilievo effettuato nel 2010, molto spesso si è deciso di utilizzare il volo alto che fornisce una visione sinottica più ampia a discapito della risoluzione. Per quanto riguarda il volo del 1978, non avendo possibilità di scelta tra più fotogrammi, la cura del dettaglio è stata complicata dalla bassa risoluzione delle immagini che sono costituite da pixels di dimensioni molto maggiori rispetto ai fotogrammi del 2010.

A questo punto le immagini georeferenziate, sovrapposte e confrontate, sono in grado di fornire l'area erosa sottraendo le superfici di barena delimitate nelle immagini del 2010 dalle superfici di barena riconoscibili nelle foto aeree del 1978.

La differenza di tale confronto, che rappresenta l'erosione nell'arco dei 32 anni, è segnato da un "poligono", mentre l'ubicazione precisa del sito di prelievo della carota, avendo a disposizione le coordinate ed avendo cura di controllare la correttezza del sistema di riferimento, è segnato da un "punto".

Il risultato finale di questa elaborazione digitale è la rappresentazione della foto aerea più recente sulla quale è evidenziata l'area che riproduce l'entità dell'erosione nell'arco dei 32 anni che intercorrono tra le coppie di fotogrammi. In questo modo si ottiene un'immagine con una visione generale dell'effettiva tendenza di erosione per le varie direzioni ed esposizioni, facile da leggere e d'immediata comprensione.

---

### 3.5 Potenza del moto ondoso

In questo capitolo, si analizza la potenza del moto ondoso generato da vento, alla luce degli effetti che tale parametro ha sull'erosione dei margini barenali (Santalucia, 2010; Marani et al., 2011).

Il moto ondoso valutato è naturalmente quello generato dai venti dominanti, anche se, grossa influenza ha l'impatto delle onde provocate dai numerosi natanti che percorrono i canali lagunari. Per analizzare in un dettaglio sufficientemente rappresentativo quest'ultimo fenomeno però sarebbe necessario un periodo di osservazione di diversi anni cosa che, è ragionevolmente impensabile da prendere in considerazione nell'ambito di una tesi di laurea.

L'obiettivo di queste analisi è di fornire delle mappe che raffigurano, in scala di colori, la potenza media e la potenza massima dell'onda da vento nello specchio liquido della laguna di Venezia. A tal fine, si sono analizzate delle simulazioni numeriche precedentemente condotte utilizzando un modello numerico agli elementi finiti (WWTM Wind-Wave-Tidal-Model, Carniello et al., 2011) che descrive l'idrodinamica e il moto ondoso all'interno della laguna di Venezia. Le simulazioni numeriche sono state effettuate su una griglia computazionale che rappresenta la Laguna di Venezia e una parte del Mare Adriatico (Figura 3-20) e consiste di circa 52'000 nodi e circa 100'000 elementi triangolari. Il modello è stato forzato utilizzando livelli di marea orari misurati presso la piattaforma oceanografica del CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), che si trova in Adriatico di fronte alla Laguna di Venezia (Figura 3-20), e velocità e direzioni del vento osservate alla stazione anemometrica di Chioggia. Il modello è stato forzato con la serie storiche di livelli di marea e velocità e direzioni del vento registrate nell'anno 2005 (D'Alpaos et al., 2013).

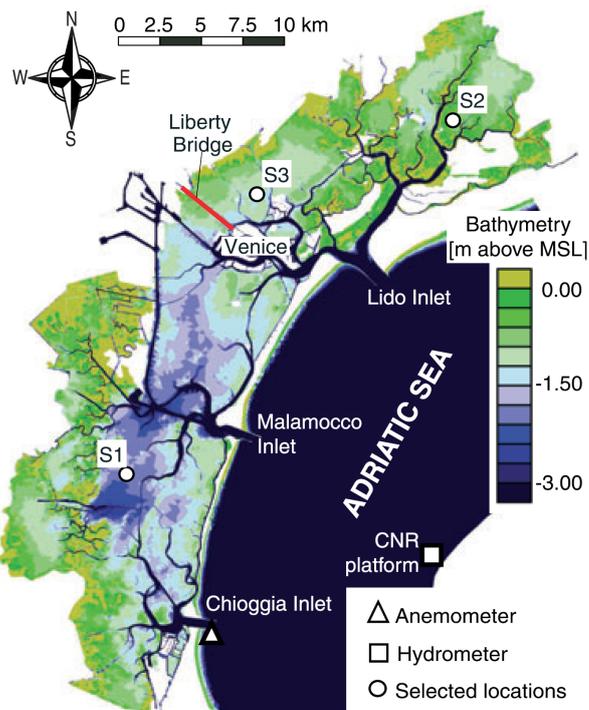


Figura 3-20 L'immagine mostra, in scala a colori, la batimetria della Laguna di Venezia associata al reticolo di calcolo utilizzato per le simulazioni, costruita sulla base del più recente (2003) e accurato rilievo batimetrico. La posizione della stazione anemometrica (Chioggia) e della stazione mareografica (piattaforma CNR) sono indicate un figura.

La potenza del moto ondoso è stata calcolata sulla base della relazione:

$$P = C_g \cdot E$$

dove  $C_g$  è la celerità di gruppo del treno d'onde mentre  $E$  è la densità di energia sprigionata dal treno stesso:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 = \frac{1}{8} \gamma H^2$$

dove  $\gamma$  è il peso specifico dell'acqua e  $H$  è l'altezza dell'onda, funzione della tirante idrico  $D$  (differenza tra la quota della superficie libera e la quota del fondo), della velocità del vento,  $U$ , del fetch e della durata del vento. La celerità di gruppo,  $C_g$ , si calcola tramite la relazione:

$$C_g = \frac{1}{2} C_p \left( 1 + \frac{2kD}{\sinh(2kD)} \right)$$

in cui,  $k$  è il numero d'onda e  $C_p$  è l'espressione della celerità di fase secondo la teoria d'onda lineare.

$$k = 2\pi/\lambda$$

$$C_p = \lambda/T$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda mentre  $T$  è il periodo d'onda calcolato come:

$$T = 3,5 \left( gD/U^2 \right)^{0,35} \cdot U/g$$

dove  $g$  è la forza di gravità,  $D$  il tirante idrico e  $U$  è la velocità del vento.

I dati di livello idrometrico, velocità e direzione del vento, rappresentano le condizioni al contorno. Come evidenziato, i dati di vento sono stati registrati durante l'anno solare 2005 alla stazione di Chioggia (nella parte meridionale della Laguna, Figura 3-20). Come evidenziato nella tesi di Santalucia (2010) le potenze e le frequenze dei venti nella Laguna Sud (Figura 3-22) differiscono da quelli misurati in Laguna Nord (Figure 3-21), e questo ha evidentemente degli effetti valutazione del moto ondoso. Tuttavia, l'unica stazione per la quale era disponibile una serie storica della durata di almeno un anno, era la stazione di Chioggia.

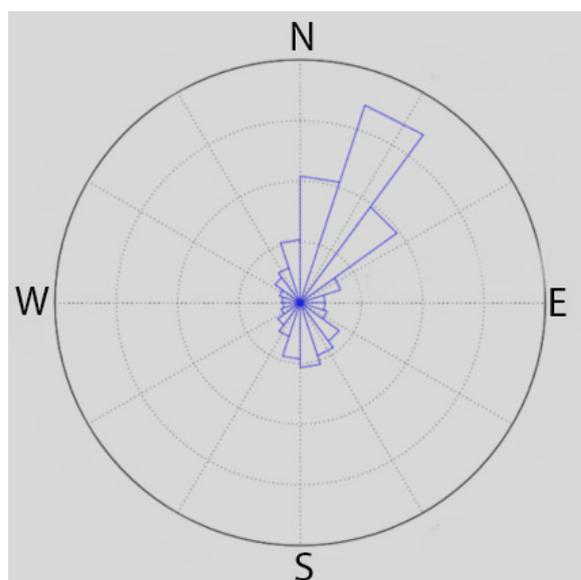


Figura 3-21 Rosa dei venti nella laguna settentrionale.

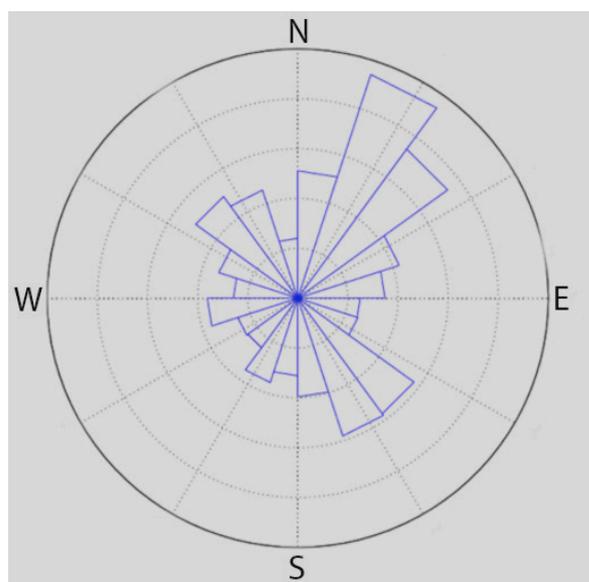


Figura 3-22 Rosa dei venti nella laguna meridionale.

Ciononostante i risultati del modello sono stati ritenuti affidabili per gli scopi della presente tesi (il modello è stato, infatti, ripetutamente calibrato e testato per confronto con dati osservati di livello, altezza di moto ondoso – Carniello et al., 2005, 2011) ed in seguito saranno riportate le mappe in scala a colori che rappresentano le potenze del moto ondoso.

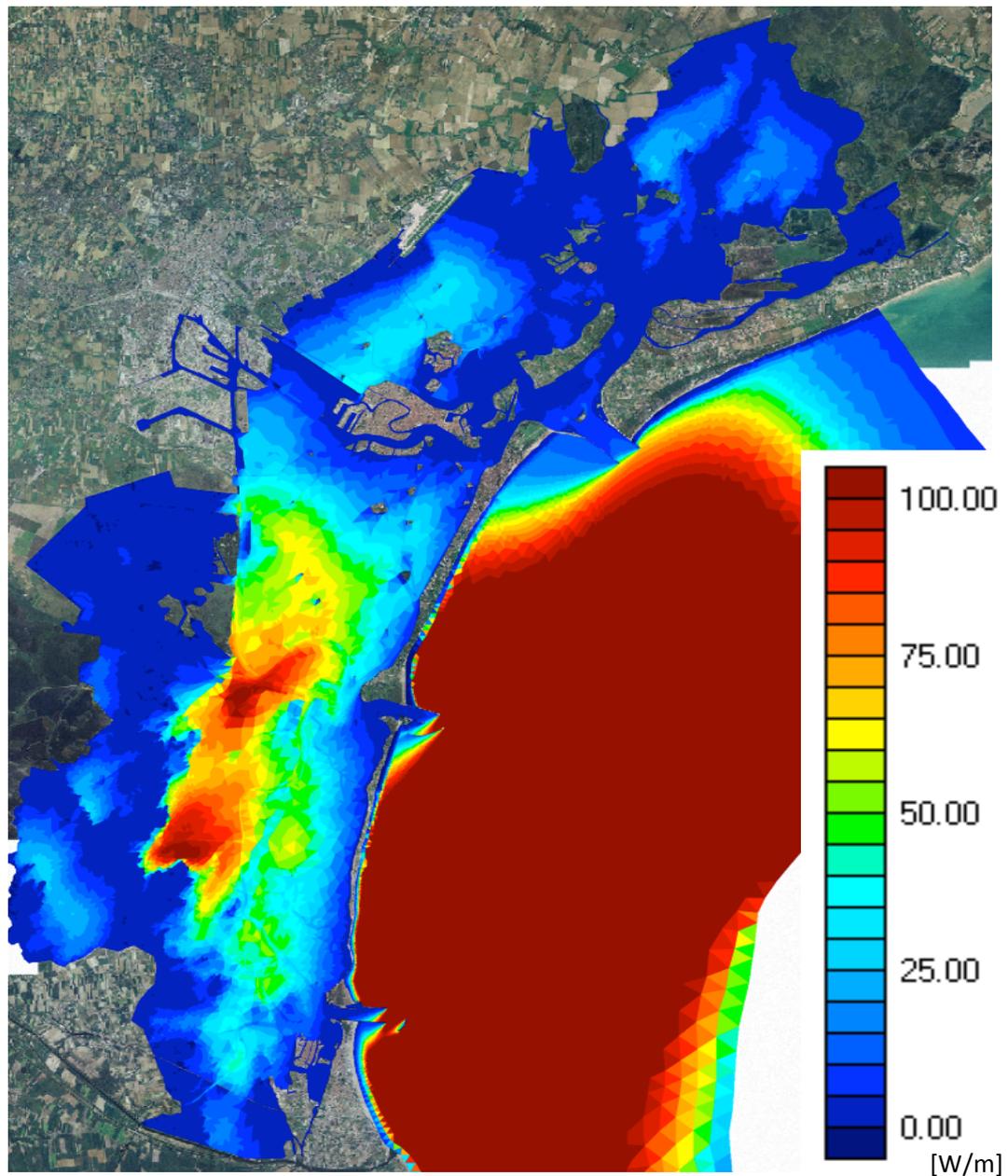


Figura 3-23 Mappa a colori della distribuzione spaziale della potenza media calcolata utilizzando le forzanti relative all'anno 2005 per la Laguna di Venezia

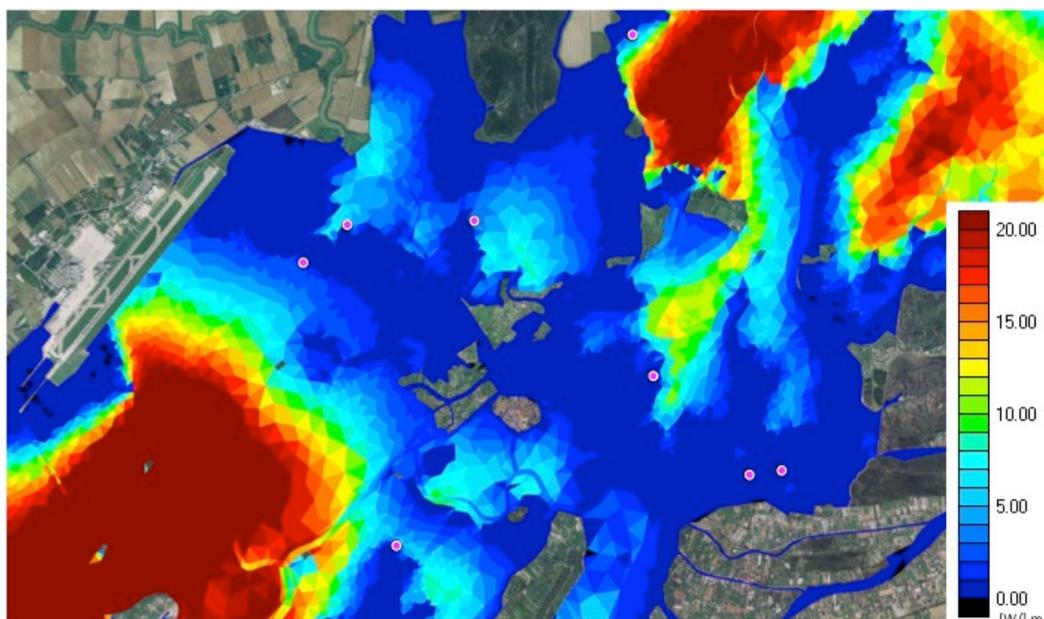


Figura 3-24 Mappa a colori della distribuzione spaziale della potenza media  $[\text{W/m}]$  calcolata utilizzando le forzanti relative all'anno 2005 per la porzione settentrionale della Laguna di Venezia.

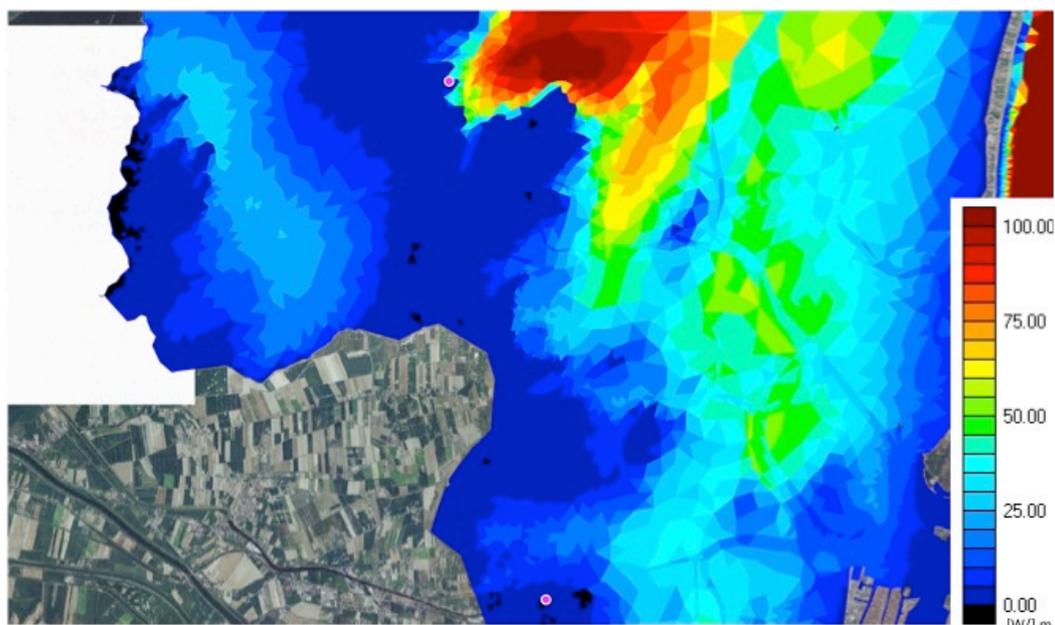


Figura 3-25 Mappa a colori della distribuzione spaziale della potenza media  $[\text{W/m}]$  calcolata utilizzando le forzanti relative all'anno 2005 per la porzione meridionale della Laguna di Venezia.

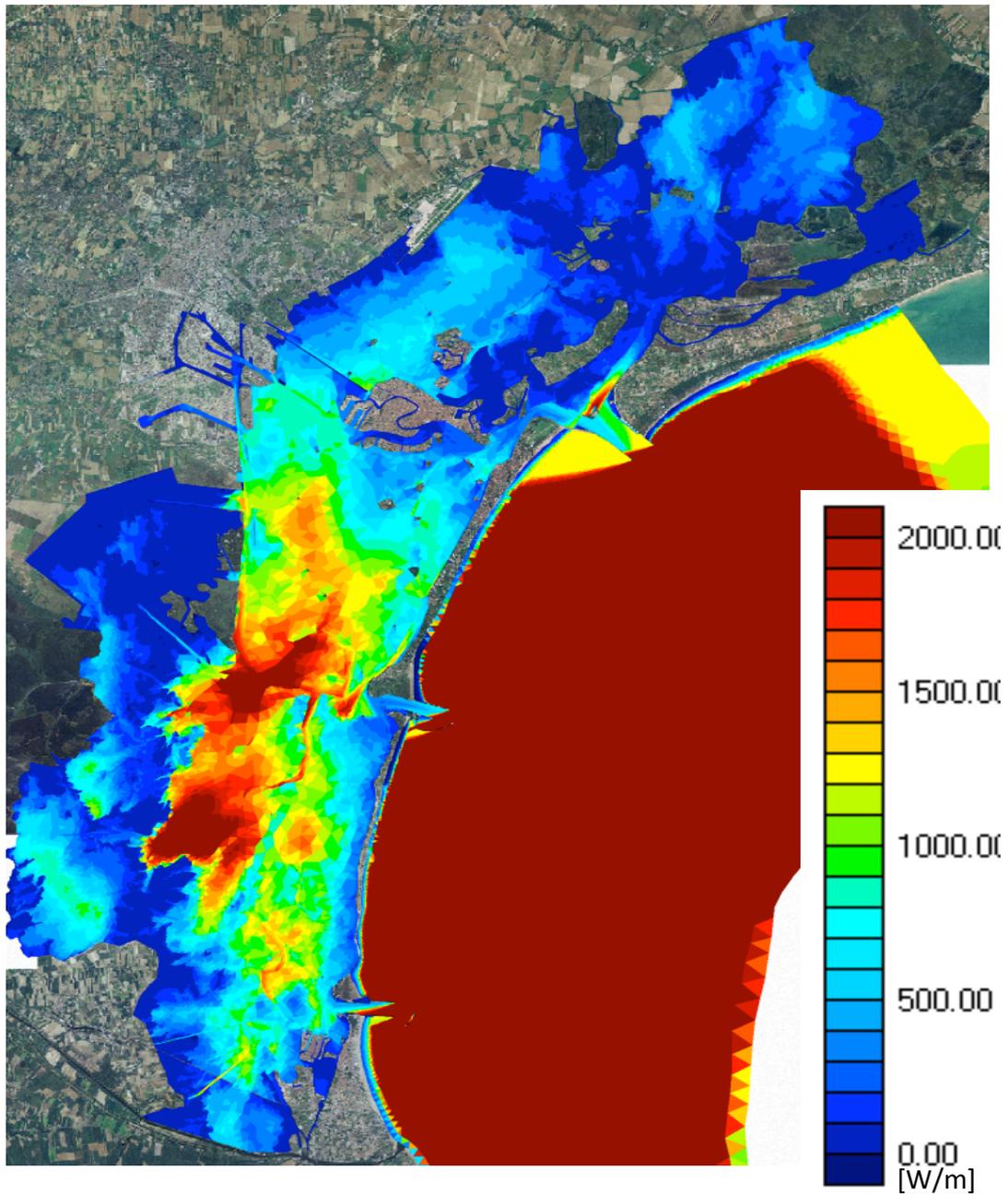


Figura 3-26 Mappa a colori della distribuzione spaziale della potenza massima calcolata utilizzando le forzanti relative all'anno 2005 per la Laguna di Venezia

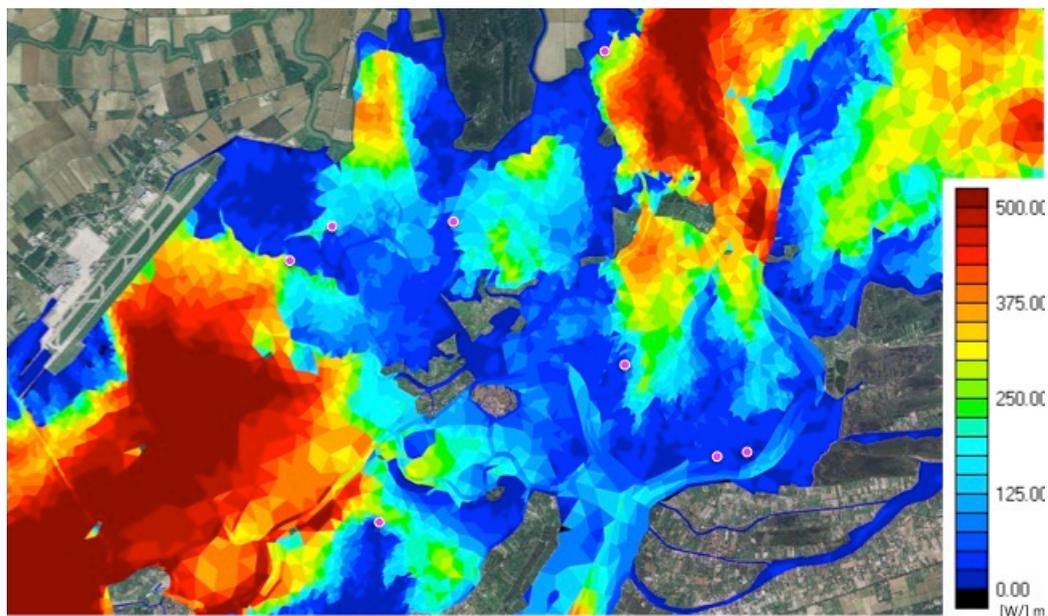


Figura 3-27 Mappa a colori della distribuzione spaziale della potenza massima  $[\text{W/m}]$  calcolata utilizzando le forzanti relative all'anno 2005 per la porzione settentrionale della Laguna di Venezia.

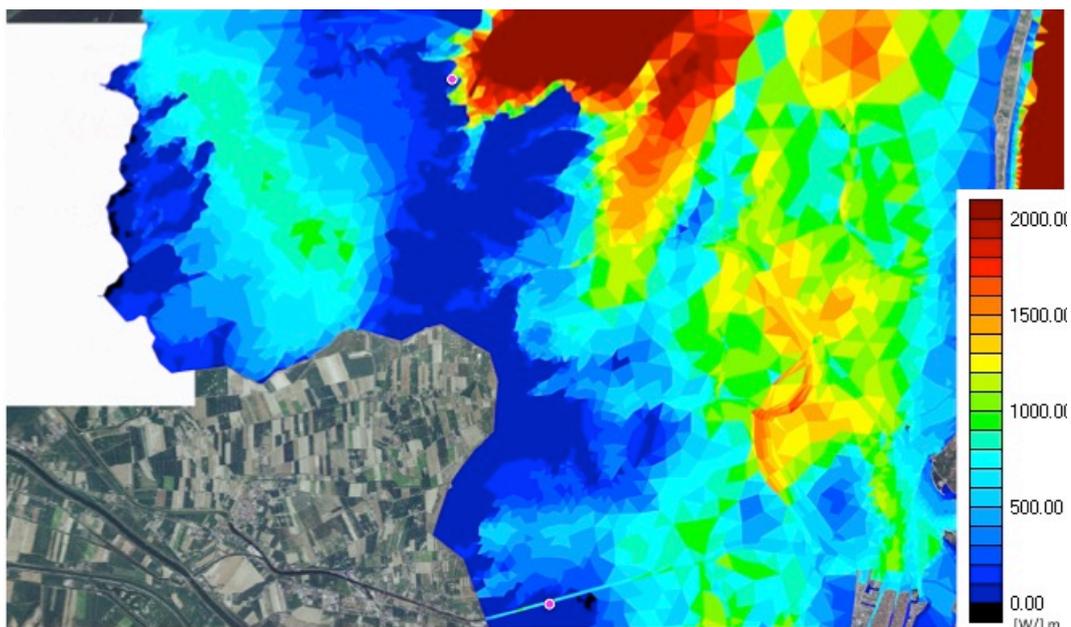


Figura 3-28 Mappa a colori della distribuzione spaziale della potenza massima  $[\text{W/m}]$  calcolata utilizzando le forzanti relative all'anno 2005 per la porzione meridionale della Laguna di Venezia.

Dall'analisi delle immagini, risulta subito evidente come nella laguna meridionale il moto ondoso assuma una rilevanza di gran lunga superiore rispetto alla parte settentrionale, per quanto riguarda la potenza sprigionata, sia per i valori medi (Figura 3-23) che per i valori massimi (Figura 3-26) della potenza. La spiegazione è da ricercarsi nell'effetto del fetch e della profondità dei fondali sulle altezze d'onda e sulla potenza del moto ondoso, che è funzione quadratica dell'altezza d'onda. La porzione meridionale della laguna è caratterizzata da fetch molto ampi per i venti provenienti da nord-est (6-7 km) e da profondità dei fondali elevate che favoriscono lo sviluppo di onde da vento di altezza importante. Al contrario, la laguna Nord è caratterizzata da specchi liquidi con fetch modesti e da profondità poco elevate, che limitano l'altezza d'onda che si può sviluppare, a parità di velocità e durata del vento.

Non a caso, infatti, è proprio la porzione meridionale della laguna di Venezia che negli ultimi decenni ha subito i più gravosi arretramenti barenali legati all'erosione.

In laguna Nord potenze maggiori si sviluppano sempre laddove il fetch è elevato (per i venti dominanti) e le profondità dei fondali non sono troppo modeste, ed è interessante notare come i siti maggiormente esposti, Vigno e Pagliaga Ovest, risentano del moto ondoso in maniera piuttosto differente. Nell'area attorno alla carota denominata "Vigno" (la più a Nord nella mappa) sia la potenza media che la potenza massima in corrispondenza al margine sono elevate, se confrontate con le potenze che si sviluppano nelle aree liquide antistanti ai margini. In questo sito l'erosione fa arretrare il margine di ben 0.68 m/a cosa che non si osserva invece a Pagliaga Ovest.

A Pagliaga Ovest (carota più a Ovest nella mappa, vicina all'aeroporto) la potenza media che si scarica sul margine è assolutamente modesta, mentre essa risulta elevata nel bacino antistante il margine, lontano da questo. La potenza massima, invece, è caratterizzata da valori elevati anche in corrispondenza al margine della barena. Con riferimento al sito Pagliaga Ovest la potenza massima è generata da venti che spirano da Sud-Ovest, registrati con un certo tipo di frequenza in laguna Sud, ma che non si verificano con frequenza altrettanto elevata nella laguna Nord. Questa osservazione suggerisce l'importanza di utilizzare dati di vento da stazioni uniformemente distribuite nella laguna di Venezia (qualora fossero disponibili) per forzare il modello di moto ondoso, piuttosto che dati relativi ad una singola stazione. L'uso di dati di vento provenienti da stazioni lontane dalla zona potrebbero causare una sopravvalutazione delle potenze di moto ondoso che mal si correlerebbero con ridotti tassi di erosione (come il tasso di erosione di 0.15 m/a per il sito Pagliaga Ovest).

---

A Pagliaga Est in cui l'erosione assume importanza notevole (0.62 m/a, seconda solo al sito del Vigno) la potenza media è elevata se confrontata con altri siti, mentre la potenza massima presenta valori intermedi, addirittura inferiori a quelli di Pagliaga Ovest.

Pertanto, da queste osservazioni si evince che ciò che influisce maggiormente sull'entità dell'erosione dei margini barenali non sono gli eventi puntuali di forte energia, bensì il lavoro costante e continuo dell'impatto dell'onda durante tutto l'arco dell'anno.

## 4 Risultati

### 4.1 Carota Sant'Erasmo

#### 4.1.1 Analisi del sito



Figura 4-1 Ubicazione del sito di prelievo della carota nella laguna settentrionale, a nord dell'isola di Sant'Erasmo. Fonte immagine Google Earth

L'isola di Sant'Erasmo (Figura 4-1) si trova nella laguna Nord davanti alla bocca di porto di Lido e fino a qualche secolo fa era parte integrante del lungo cordone litoraneo che separava le acque del mare dal bacino lagunare. Tale restò fino alla realizzazione delle nuove dighe foranee alla bocca di porto concluse nel primissimo Novecento per favorire l'approfondimento dei fondali ed il passaggio delle grandi navi militari e commerciali dell'epoca.

A Sud, tra Sant’Erasmus ed il canale di Treporti, si è formata una larga fascia di velma lungo tutto il lato lungo dell’isola mentre a nord, nella parte interna, si sono sviluppate delle barene che però da diversi decenni stanno subendo un’erosione abbastanza rilevante.

Ed è proprio nel margine più esposto di queste barene che è stato deciso di raccogliere la carota da analizzare dove, stando alla carta geomorfologica della Provincia di Venezia (Bondesan e Meneghel, 2004), si è al di sopra di un argine naturale di un canale lagunare (Figura 4-2).

Da analisi precedentemente eseguite (Santalucia, 2010) è stato riconosciuto come il vento dominante nella Laguna Nord sia la Bora che spira da Nord-Est tra  $0$  e  $54^\circ$  ed arriva a velocità massime intorno a 16-17 m/s.

Il fetch per il vento di Bora, raggiunge circa 670 m fin quando trova come ostacolo una barena che si sviluppa a Nord Ovest dell’isola che ospita il convento di San Francesco del Deserto.

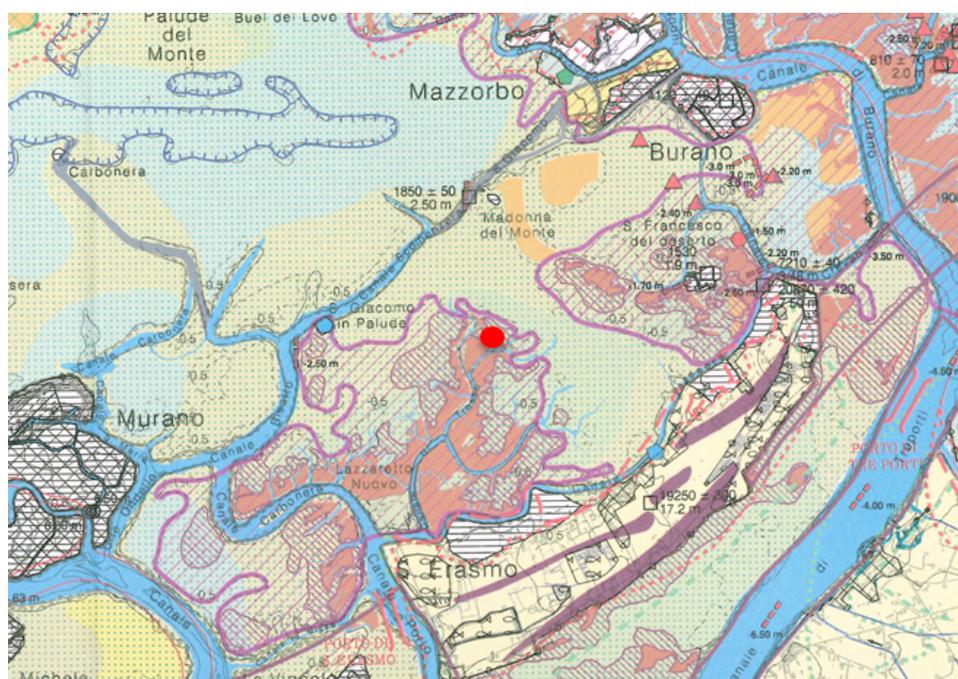
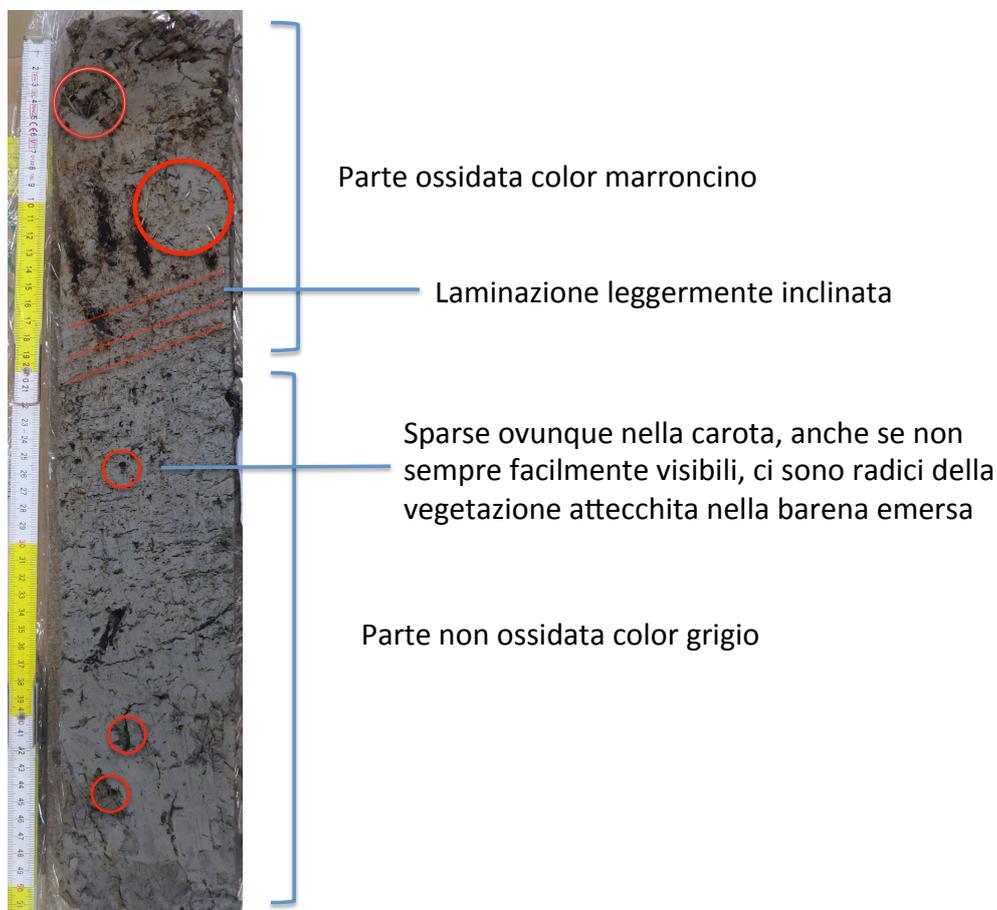


Figura 4-2 Immagine dell’area circostante il punto di prelievo della carota rappresentata nella carta geomorfologica della Provincia di Venezia. (Bondesan e Meneghel 2004).

#### 4.1.2 Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica



Dall'analisi LOI si ottiene un grafico in cui si plotta la percentuale della perdita di peso del campione pesato prima e dopo la permanenza in muffola per 16 ore. Si riscontrano un paio di picchi a 5 e 20 cm di profondità che evidenziano rispettivamente la presenza di vegetazione in superficie e presumibilmente una lente torbosa o il passaggio di radici.

Nella carota "Sant'Erasmus" sono stati analizzati tutti e tre i campioncini prelevati ogni 5 cm di profondità (Figura 4-2) per cui è stato possibile fornire l'andamento del valore medio (linea azzurra), l'andamento della perdita di peso minima considerando i valori più bassi dei tre (linea verde) e l'andamento della massima perdita di peso considerando i valori più alti (linea rossa). Si nota come i risultati possano variare in maniera considerevole a seconda del valore che si decide di analizzare. Fan parte della sostanza organica anche le radici più o meno sottili delle piante e queste possono assumere dimensioni importanti e pesare

moltissimo in relazione al campioncino; è anche vero che la radice, essendo un elemento unico, interessa solamente il campioncino nel quale ci passa all'interno mentre in quelli adiacenti può non esserci traccia della sua presenza. Pertanto assume notevole importanza la parte statistica, il che si ripercuote sull'analizzare quanti più campioni possibili dello stesso livello di profondità e mediare il risultato, cosa che, purtroppo, non è sempre possibile fare.

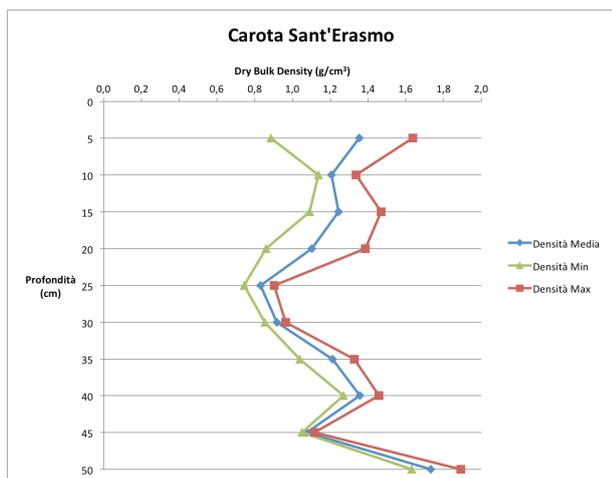
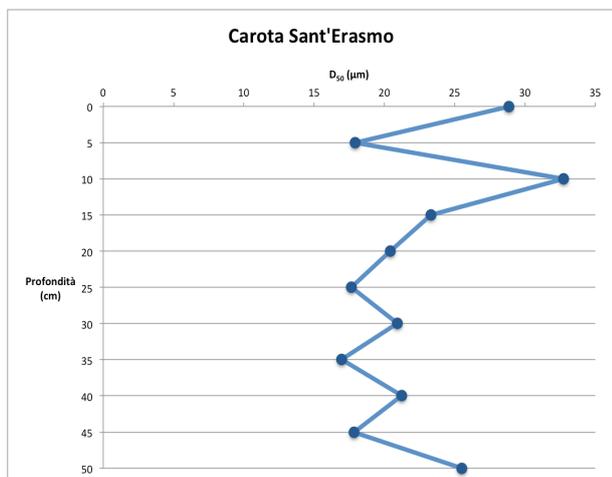
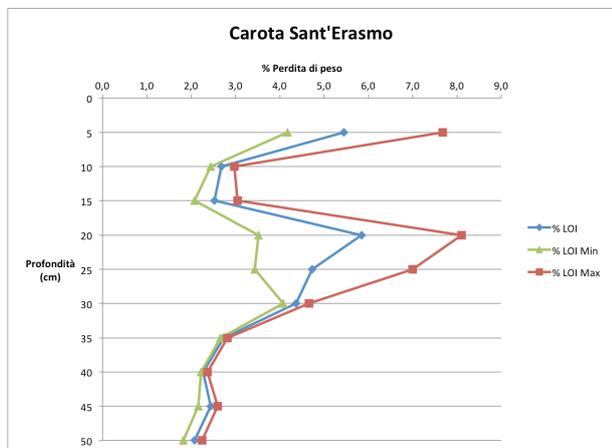


Figura 4-3 I tre grafici rappresentano, in funzione della profondità, la percentuale della perdita in peso del campione pre e post trattamento in muffola (in alto), la variazione della granulometria del  $D_{50}$  (in centro) ed i valori della densità dei campioni (in basso).

Per quanto riguarda la granulometria invece è stato deciso di plottare il valore del  $D_{50}$ , che rappresenta la dimensione della maglia del setaccio attraverso la quale passa il 50% del sedimento. In pratica ci fornisce un dato che è correlabile alla granulometria mediana.

Il range di dimensione della granulometria è stabile tra i 15 ed i 30  $\mu\text{m}$  nel campo del silt medio, con un picco di granulometria massima a 10 cm di profondità che pare relazionabile alla bassa presenza di sostanza organica mentre il picco in superficie potrebbe essere testimone di una recente inondazione che ha portato con se del materiale più grosso della media (Figura 4-3).

### 4.1.3 Analisi d'immagine

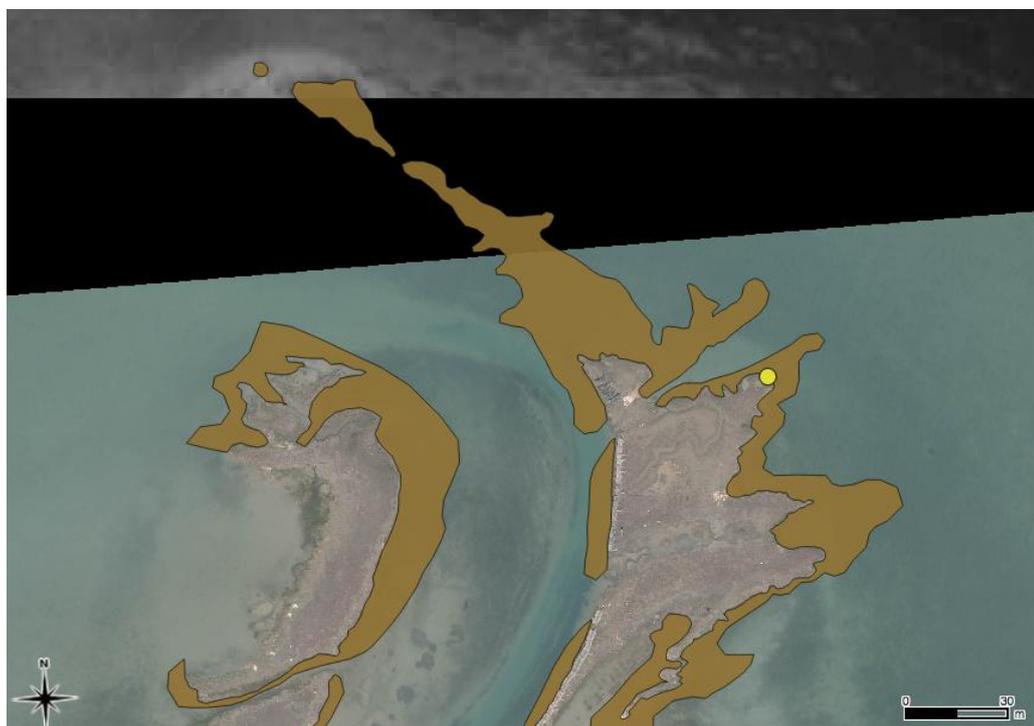


Figura 4-4 In marroncino si evidenziano i margini erosi nell'area attorno al punto di prelievo della carota segnalato dal bollino giallo.

Dal confronto delle foto aeree del 1978 e 2010 è stato possibile discriminare l'entità dell'erosione della barena nell'area attorno alla carota, segnata in marrone nell'immagine proposta (Figura 4-4). L'erosione è stata notevole ma settoriale presumibilmente in funzione dell'esposizione: è perspicuo come l'erosione sia stata maggiore nelle cuspidi di terreno e nei margini rivolti a est laddove la Bora interviene con maggiore continuità e di conseguenza

---

sprigiona il massimo della sua potenza. Dal punto di prelievo della carota in direzione Nord-Est sono stati erosi tra i 15 e i 20 m di barena nell'arco di 32 anni.

## 4.2 Carota Pagliaga EST

### 4.2.1 Analisi del sito



Figura 4-5 Ubicazione del sito di prelievo della carota nella laguna settentrionale, nel margine orientale del complesso di barene chiamate “Pagliaga”. Fonte immagine Google Earth

A livello geografico l’ubicazione del sito di carotaggio Pagliaga EST (Figura 4-5) corrisponde a un punto nella laguna settentrionale a Est delle piste dell’aeroporto “Marco Polo”, a Nord-Ovest dell’abitato di Burano e a circa un km a sud della foce del fiume Dese.

Ci si trova in una delle aree della laguna settentrionale che subisce maggiormente il problema dell’erosione marginale nonostante la vicinanza alla foce di uno dei pochi corsi d’acqua che ancora sfociano in laguna.

Questo perché nella direzione prevalente della Bora si apre uno specchio d’acqua molto ampio, di circa 2,6 km, denominato Palude di Cona.

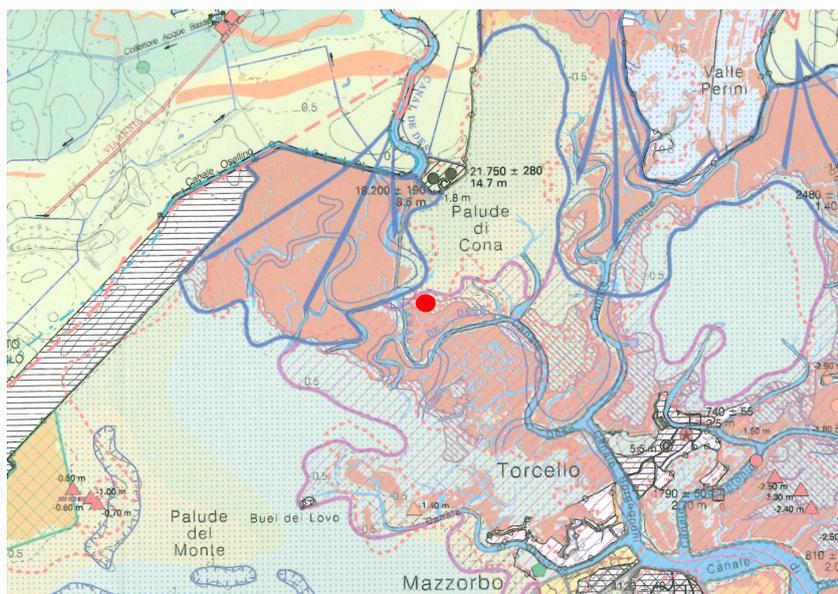
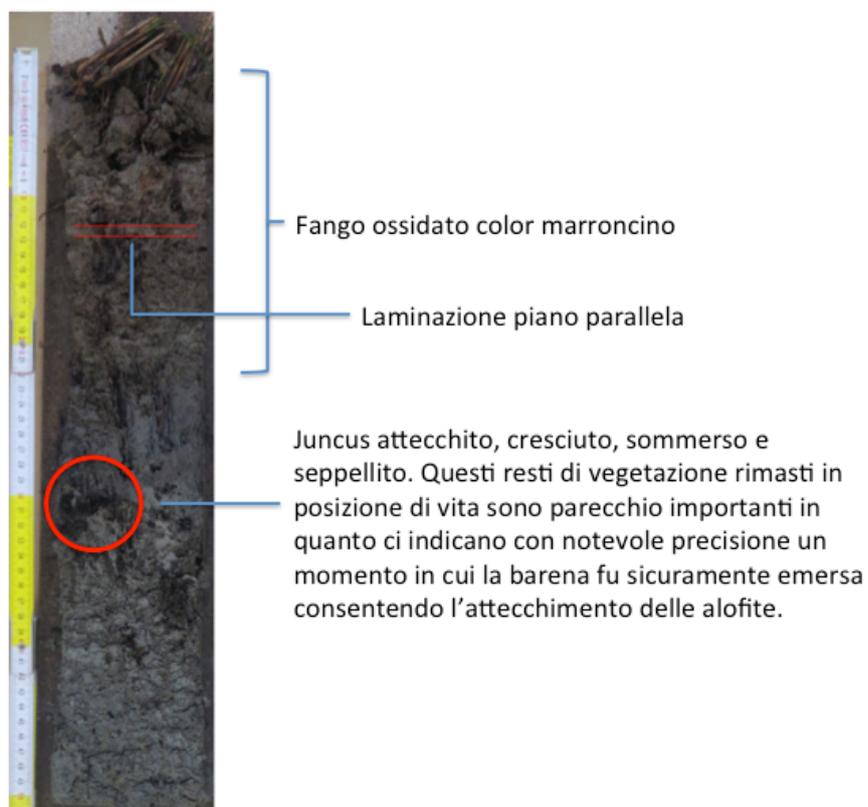


Figura 4-6 Immagine dell'area circostante il punto di prelievo della carota rappresentata nella carta geomorfologica della Provincia di Venezia. (Bondesan e Meneghel 2004).

Dalla carta geomorfologica in Figura 4-6 il sito di prelievo si trova nelle barene facenti parte del delta fluviale endolagunare creato dal fiume Dese (Bondesan e Meneghel, 2004).

#### 4.2.2 Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica



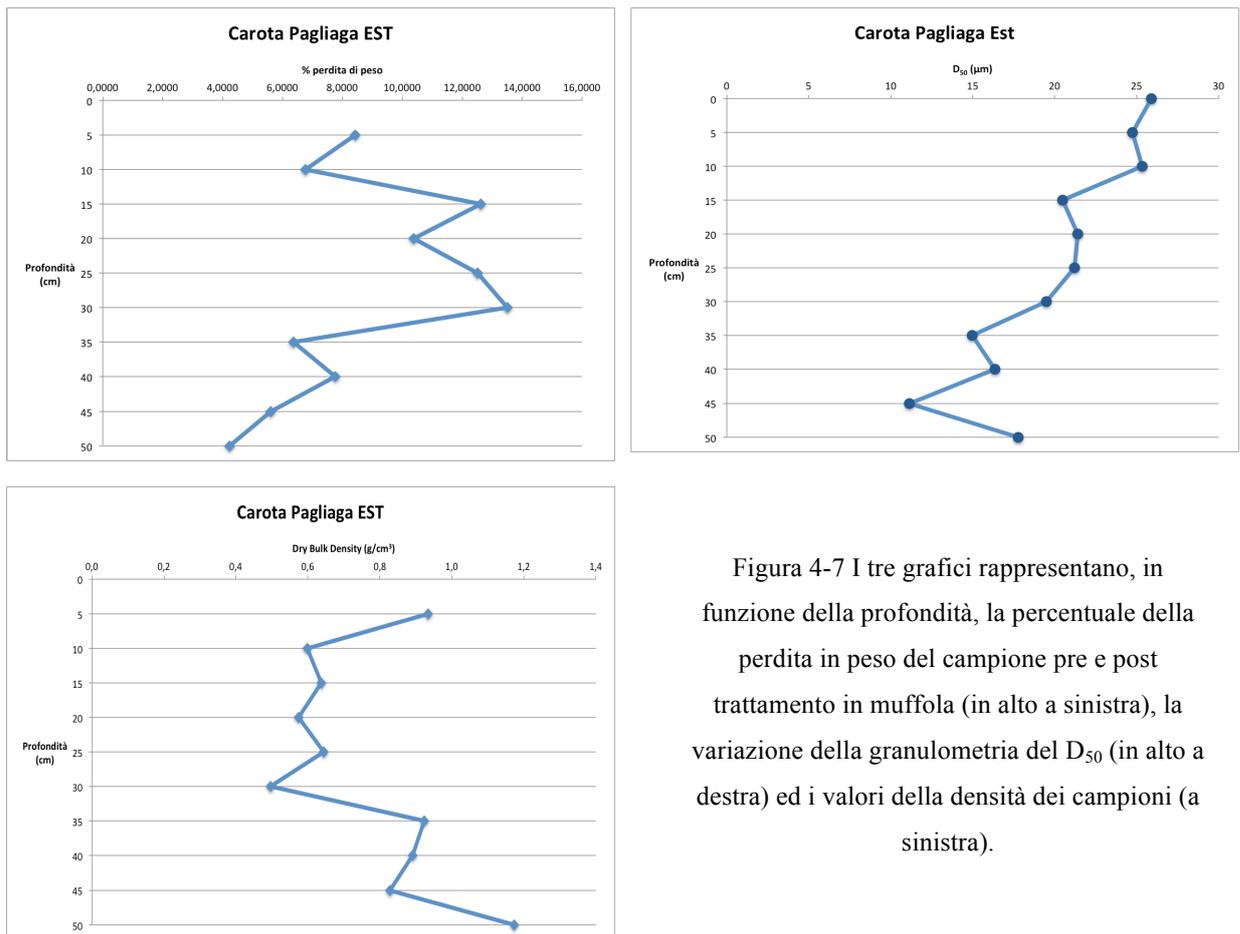


Figura 4-7 I tre grafici rappresentano, in funzione della profondità, la percentuale della perdita in peso del campione pre e post trattamento in muffola (in alto a sinistra), la variazione della granulometria del  $D_{50}$  (in alto a destra) ed i valori della densità dei campioni (a sinistra).

Si riscontra, nella parte centrale della carota, da 15 a 30 cm di profondità, un intervallo con maggiore presenza di sostanza organica.

Al di fuori di questa fascia i valori percentuali delle perdite di peso rimangono più bassi.

Per quanto riguarda la granulometria, il grafico mostra un chiaro trend *coarsening upward* decisamente invisibile ad occhio nudo in quanto i valori si attestano nel range del silt medio tra 25 µm in superficie, ai 10 µm in profondità. Nell'estremità inferiore della carota un livello di sedimento leggermente più grossolano fa registrare un picco a granulometria maggiore (Figura 4-7).

### 4.2.3 Analisi d'immagine

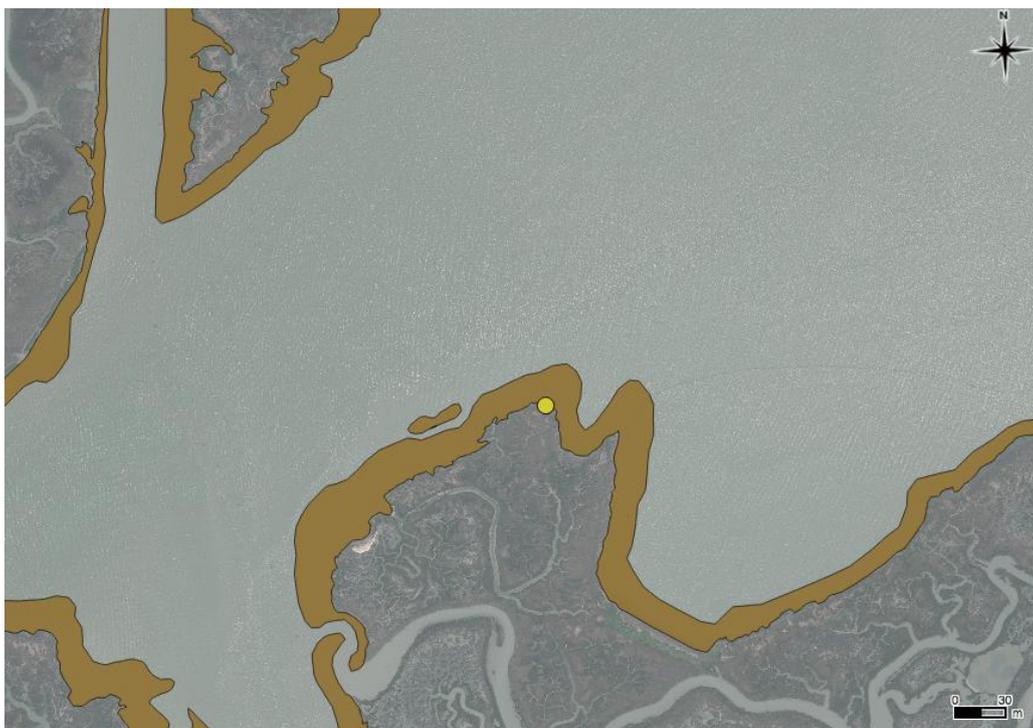


Figura 4-8 In marroncino si evidenziano i margini erosi nell'area attorno al punto di prelievo della carota segnalato dal bollino giallo.

L'arretramento dei margini in quest'area della laguna si dimostra essere costante per ogni orientazione (Figura 4-8) questo poiché laddove non interviene la Bora grazie a un riparo naturale a Nord-Est l'erosione è garantita dal moto ondoso dovuto al passaggio delle imbarcazioni che usufruiscono del canale sviluppato con asse Nord-Sud che si vede a Ovest nell'immagine che, essendo il proseguimento del fiume Dese sfociato in laguna appena un km a Nord, collega diverse darsene nell'entroterra con la laguna.

L'erosione, in realtà è un problema molto più pressante di quanto si possa dedurre da questa immagine poiché la cuspide di barena sulla quale si è prelevata la carota, ha sfruttato per diversi anni una barriera di protezione costituita da uno steccato di legno posto trasversalmente alla direzione di Bora. Questa barriera è stata divelta nell'arco degli anni e non avendo ricevuto un'adeguata manutenzione non è più in grado di svolgere la sua funzione originale. Questo per focalizzare comunque il punto che, se non ci fosse stata la barriera che ne ha rallentato l'erosione, l'arretramento del margine avrebbe potuto assumere delle proporzioni doppie se non triple rispetto ai valori attuali.

## 4.3 Carota San Felice Canale Interno

### 4.3.1 Analisi del sito



Figura 4-9 Ubicazione del sito di prelievo della carota nella laguna settentrionale in un canale interno collegato al canale San Felice vicino all'abitato di Treporti in terraferma.

Il canale San Felice è uno dei più grandi ed importanti nella laguna; inizia laddove si diramano il Canale di Treporti ed il Canale di Burano, si inoltra nelle barene verso Nord-Est andando a perdersi nell'estremità settentrionale della laguna separando di fatto la Palude del Vigno a Ovest e la Palude Maggiore a Est (Figura 4-9).

E' un canale molto ampio e piuttosto trafficato per cui i margini delle barene che gli si affacciano non sono rappresentativi dell'aspetto naturale dell'erosione, pertanto la carota è stata presa in uno dei canali interni, vicino peraltro, allo Spacco Tralo, altro sito analizzato.

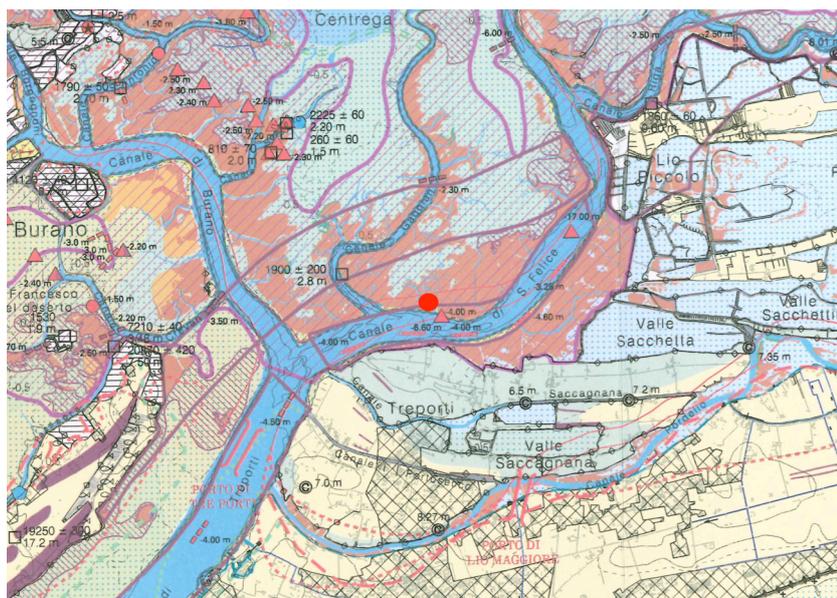
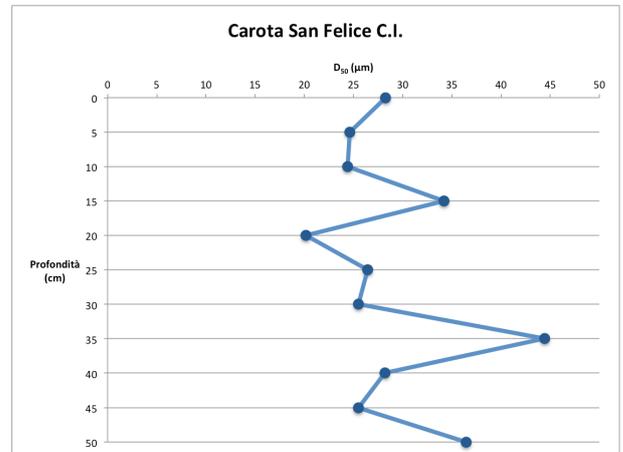
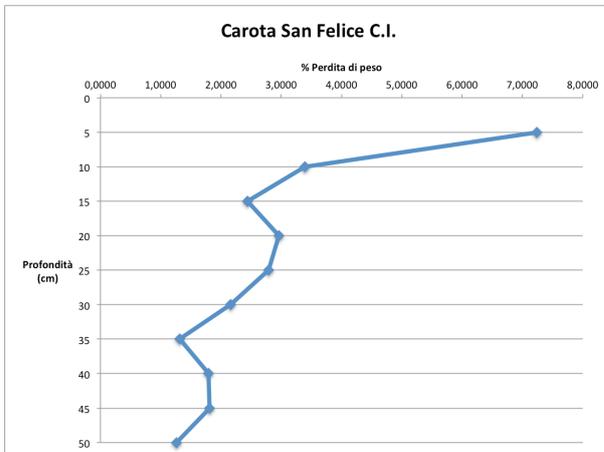
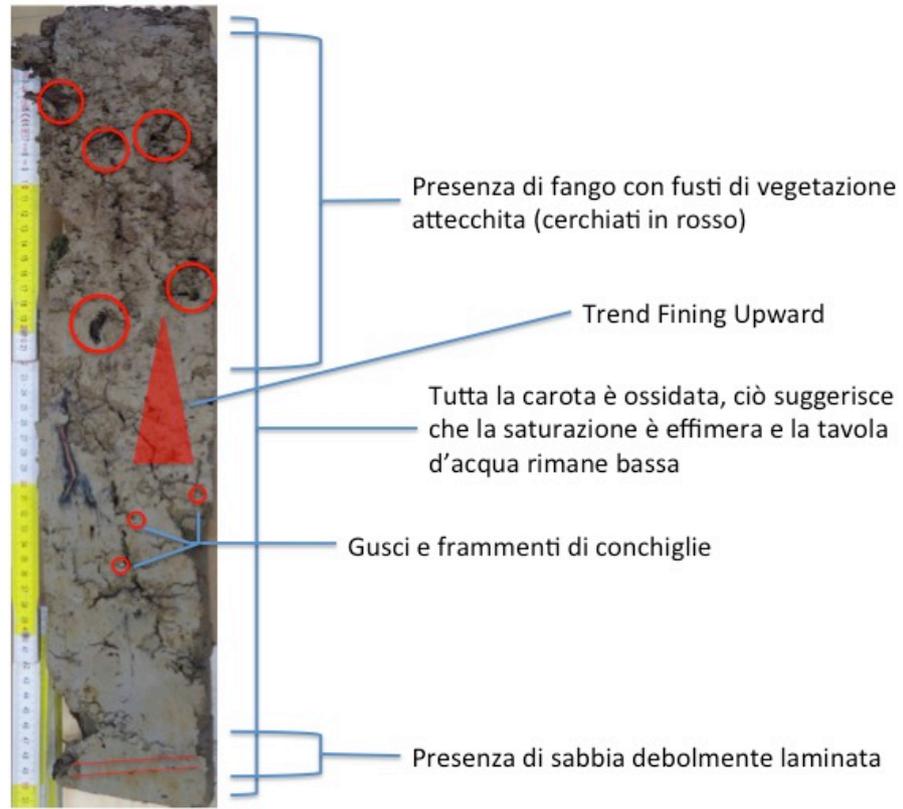


Figura 4-10 Immagine dell'area circostante il punto di prelievo della carota rappresentata nella carta geomorfologica della Provincia di Venezia. (Bondesan e Meneghel 2004).

Va da sé che essendo un canale interno, rimane riparato dall'azione del vento e dal traffico dei natanti ma anche in questo punto si notano i margini con la struttura a mensola indice di un qualche tipo di erosione, presumibilmente dovuta all'escursione tidale.

Dalla mappa geomorfologica si vede come il sito si impone al di sopra di un argine naturale di un canale lagunare ed al margine di un antico cordone litoraneo desunto da rilevamento di campagna (Bondesan e Meneghel 2004) (Figura 4-10).

### 4.3.2 Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica



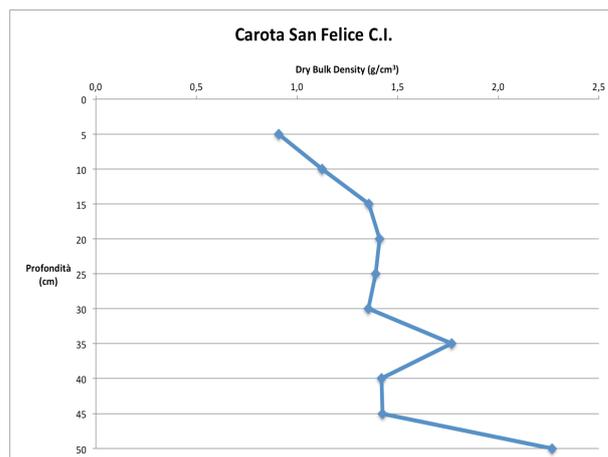


Figura 4-11 I tre grafici rappresentano, in funzione della profondità, la percentuale della perdita in peso del campione pre e post trattamento in muffola (in alto a sinistra), la variazione della granulometria del  $D_{50}$  (in alto a destra) ed i valori della densità dei campioni (qui sopra in centro).

Dal grafico della sostanza organica si evince come un valore particolarmente alto si riscontri a 5 cm dal top della carota mentre già dal livello inferiore i valori scendono bruscamente rimanendo molto bassi. La carota prelevata nel sito di San Felice possiede il contenuto medio di sostanza organica minore rispetto alle altre analizzate, questo può essere dovuto al fatto che la vegetazione attecchita osservata nella sezione della carota non si è sviluppata in maniera pervasiva nel sedimento che costituisce la carota ma è rimasta circoscritta nelle radici e nei fusti principali ed il grosso della struttura è rimasto di natura inorganica.

Nell'analisi della granulometria i valori rimangono all'interno della fascia dell'intervallo del silt medio con l'eccezione di un paio di picchi dovuti a un evento di maggiore intensità che ha portato alla creazione di livelli un po' più grossolani. La media della granulometria della carota si attesta tra le più elevate tra le carote analizzate (Figura 4-11).

### 4.3.3 Analisi d'immagine



Figura 4-12 In marroncino si evidenziano i margini erosi nell'area attorno al punto di prelievo della carota segnalato dal bollino giallo.

In quest'area l'erosione è rilevante principalmente al bordo del canale principale a sud dell'immagine (Figura 4-12) poiché, come descritto nell'analisi del sito, al moto ondoso da vento si somma il moto ondoso derivato dalle imbarcazioni che navigano nel canale. Nel canale interno però si notano delle parti in cui il margine è arretrato anche di una decina di metri conseguente probabilmente alla geometria tortuosa del canale che, come negli alvei fluviali, induce erosioni ed accumuli di sedimenti a seconda dell'idrodinamica locale.

## 4.4 Carota Scanello

### 4.4.1 Analisi del sito



Figura 4-13 Ubicazione del sito di prelievo della carota nell'area di Scanello, una barena in accrescimento a ovest del canale di Burano vicino all'abitato di Burano.

Il sito di Scanello possiede una propria peculiarità che la rende differente rispetto agli altri siti in cui è stata prelevata la carota da analizzare; si tratta infatti di una barena in fase di crescita. Il canale Scanello si dirama dal canale di Burano per poi sfociare nella Palude della Centrega (Figura 4-13), specchio d'acqua che va restringendosi di anno in anno vedendo crescere le barene ai suoi margini sempre più ampie e vegetate.

Nella Palude della Centrega evidentemente si sta concretizzando quanto avevano ipotizzato Mariotti e Fagherazzi nel 2013 in merito all'esistenza di un'ampiezza critica dello specchio d'acqua (descritto nel capitolo 1.3).

La carota è stata prelevata nel margine in accrescimento che si presenta con uno slope molto graduale che ricorda le spiagge sabbiose del litorale veneto e una scarpata molto bassa,



#### 4.4.2 Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica

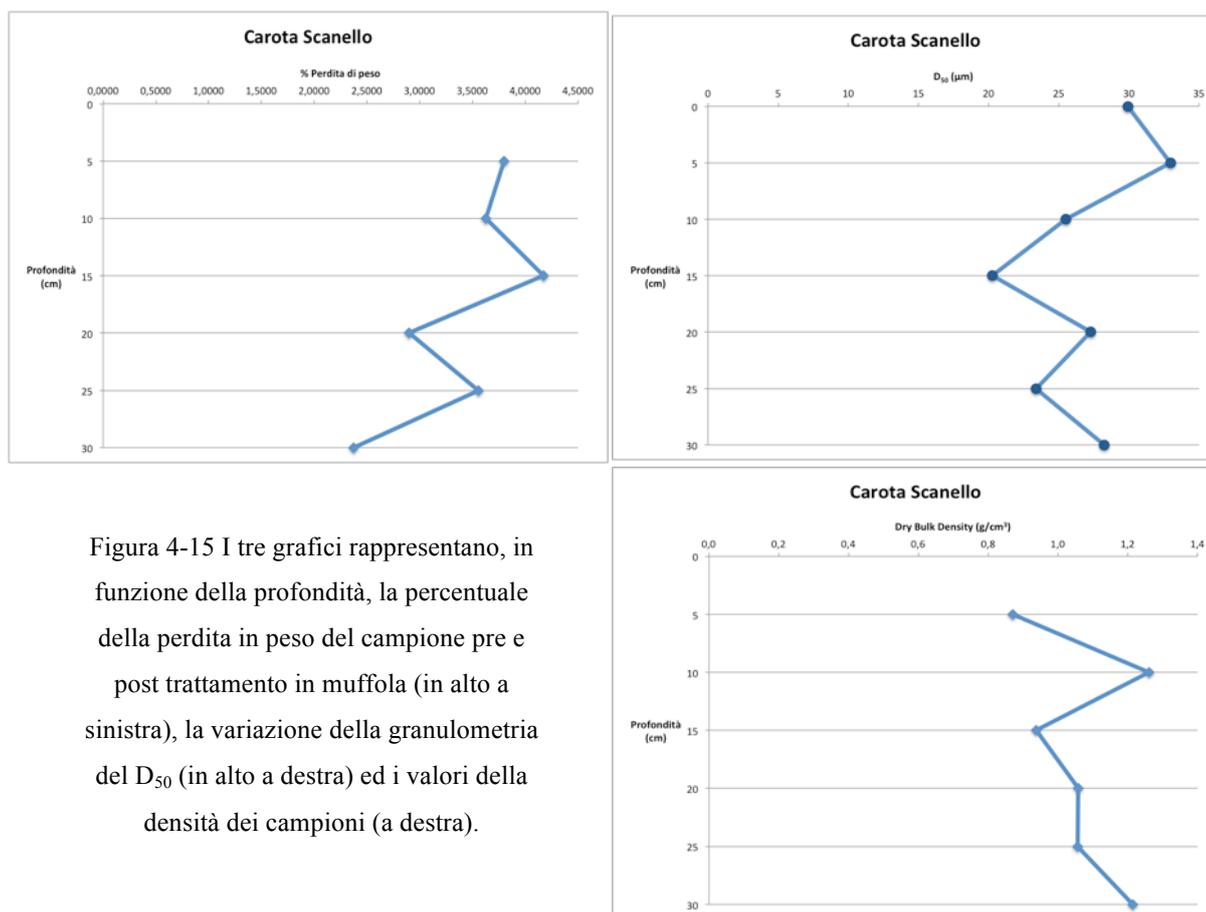
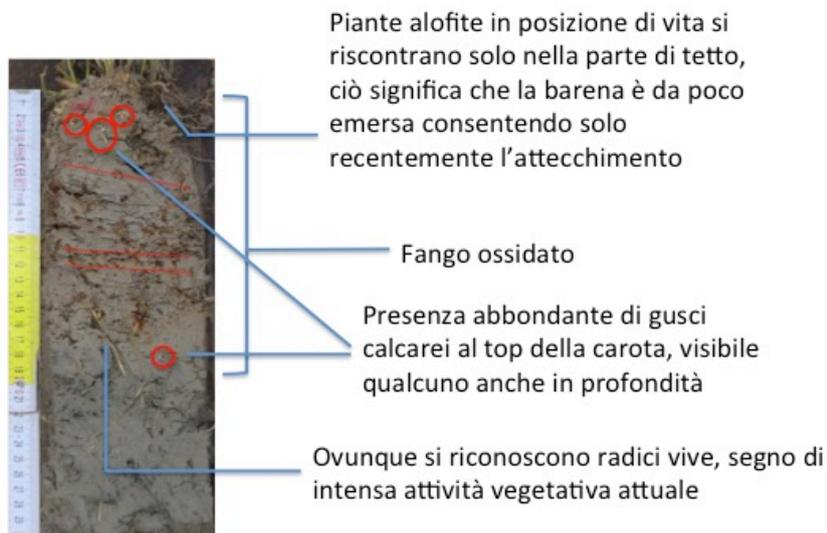


Figura 4-15 I tre grafici rappresentano, in funzione della profondità, la percentuale della perdita in peso del campione pre e post trattamento in muffola (in alto a sinistra), la variazione della granulometria del  $D_{50}$  (in alto a destra) ed i valori della densità dei campioni (a destra).

Il contenuto di sostanza organica si attesta tra le più scarse tra le altre carote analizzate e la presenza si osserva con un andamento discontinuo ma con un trend che tende a scemare con la profondità.

La granulometria è tra le più grossolane anche se rimane sempre tra i 20 e i 30  $\mu\text{m}$  all'interno del range del silt medio ad eccezione di un picco a 5 cm di profondità che si spinge oltre il limite e rientra nel silt grossolano (Figura 4-15).

#### 4.4.3 Analisi d'immagine

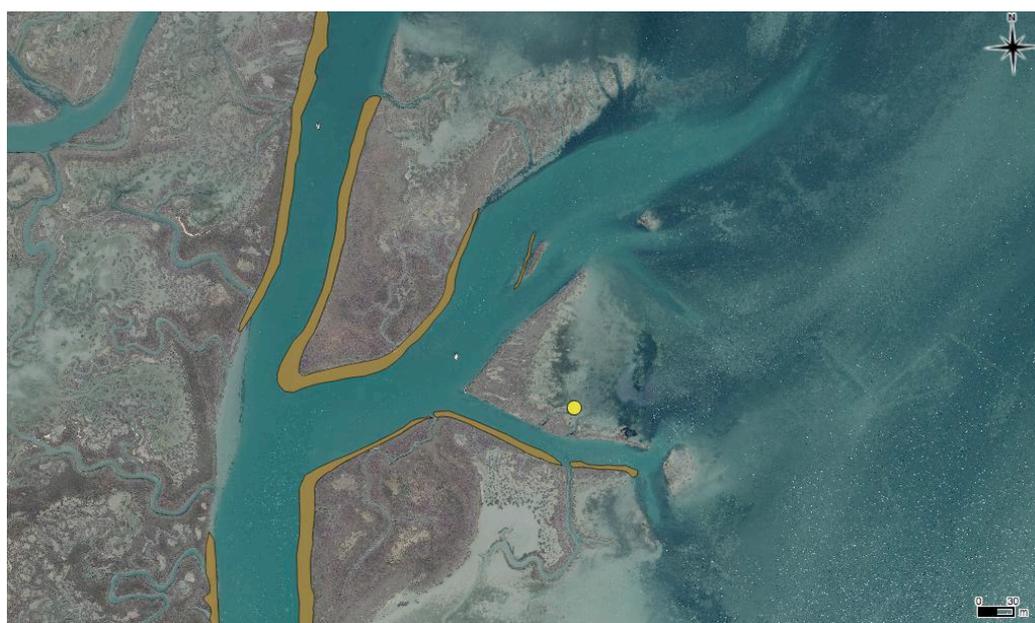


Figura 4-16 In marroncino si evidenziano i margini erosi nell'area attorno al punto di prelievo della carota segnalato dal bollino giallo.

Come già in precedenza, l'area di Scanello vede le barene in crescita verso Est con lo sviluppo sempre maggiore di vegetazione alofita. L'erosione qui è contenuta e riscontrabile solamente nelle sponde dei canali interni (Figura 4-16) in cui è ragionevole pensare che arrivino a fine corsa le ondate prodotte dai natanti che sfrecciano nell'adiacente e trafficatissimo Canale di Burano dal quale si sviluppa il ramo che porta alla zona dell'immagine sopra proposta.

## 4.5 Carota Spacco Tralo

### 4.5.1 Analisi del sito



Figura 4-17 Ubicazione del sito di prelievo della carota Spacco Tralo nel canale che collega il canale San Felice con la Palude del Tralo.

Lo Spacco Tralo è un canale di circa 560 m situato nella laguna settentrionale che collega il canale San Felice alla Palude del Tralo (Figura 4-17). Ha una morfologia molto meno meandriforme rispetto alla maggior parte dei canali naturali osservabili in laguna ed anzi, con la sua forma rettilinea nella parte centrale, sembra trapelare un'origine antropica, ipotesi però non verificata.

Si tratta di un canale interno pertanto il moto ondoso da vento non interviene in maniera vigorosa nell'erosione del margine che, in effetti, si presenta di lieve entità e conseguente principalmente dall'impatto dell'onda provocata dai piccoli e rari natanti che sfruttano il canale per raggiungere la palude interna.



## 4.5.2 Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica

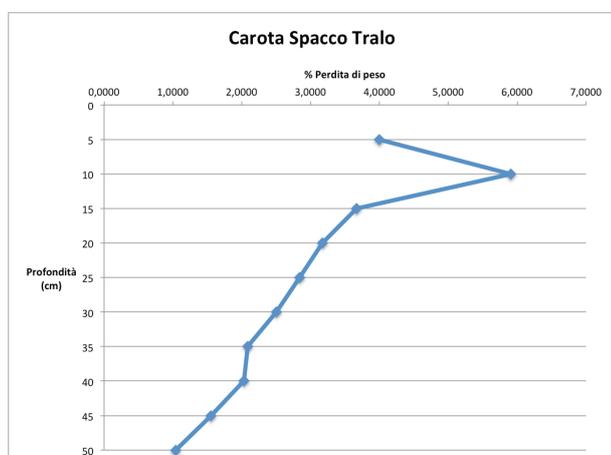




Figura 4-19 I tre grafici rappresentano, in funzione della profondità, la percentuale della perdita in peso del campione pre e post trattamento in muffola (in alto a sinistra), la variazione della granulometria del  $D_{50}$  (in alto a destra) ed i valori della densità dei campioni (a sinistra).

Il grafico della LOI mostra un inequivocabile trend a calare della presenza di sostanza organica con un picco a 10 cm di profondità che potrebbe rappresentare un accumulo vegetale di qualche tipo come il fusto di un attecchimento o il passaggio di una radice.

In generale la carota si presenta tra le più povere in contenuto di materia organica.

Per quanto riguarda la granulometria, un piccolo trend *fining upward* alla base era visibile anche a occhio nudo nella sezione della carota, mentre dal granulometro laser è stato possibile riconoscere anche un aumento di granulometria risalendo verso la superficie (Figura 4-19).

### 4.5.3 Analisi d'immagine



Figura 4-20 In marroncino si evidenziano i margini erosi nell'area attorno al punto di prelievo della carota segnalato dal bollino giallo.

Lo spacco Tralo, ben visibile a Est dell'immagine, si dirama dal San Felice e dal punto di vista erosivo risulta subito evidente come, negli in 32 anni, è stato possibile apprezzare l'arretramento del margine solo nella sponda ovest del canale (Figura 4-20). Il vento di Bora, per quanto poco possa incidere nell'erosione avendo a disposizione un fetch di una decina di metri, evidentemente riesce ad influenzare tale fenomeno anche se, dalle osservazioni di campagna, entrambe le sponde del canale si presentavano con la stessa morfologia senza lasciar intendere una maggiore predisposizione erosiva della sponda sottovento.

Tuttavia, è necessario però tenere in considerazione anche il fatto che, essendo un'immagine in piena laguna, l'affidabilità dei GCP di certo non rasenta la perfezione, anzi, in un ambiente così dinamico è piuttosto complicato giungere a una sovrapposizione delle foto aeree per cui l'erosione settoriale nel canale potrebbe essere figlia di un certo grado di sfasamento.

## 4.6 Carota Punta Cane

### 4.6.1 Analisi del sito



Figura 4-1 Ubicazione del sito di prelievo della carota Punta Cane nelle barene della laguna meridionale in un'area con una notevole distanza dalla terraferma.

L'ubicazione del sito di prelievo della carota Punta Cane si trova nel mezzo della laguna meridionale in quella linea di barene che separa la Valle dei Millecampi dal Fondo dei Settemorti (Figura 4-21). Si tratta di un'area che negli anni ha subito un'erosione molto spinta soprattutto nella parte più interna.

Dalle analisi di campagna risalta la mancanza di una vegetazione ben sviluppata essendo presenti solamente dei ciuffi di graminacee sparsi e del muschio che ne tappezza a macchie la superficie.

Inoltre è una superficie molto rovinata con dei veri e propri buchi pieni d'acqua che nulla ha a che vedere con le tipiche forme di ghebi o chiari. L'impressione è che sia una barena molto umida ed inospitale.

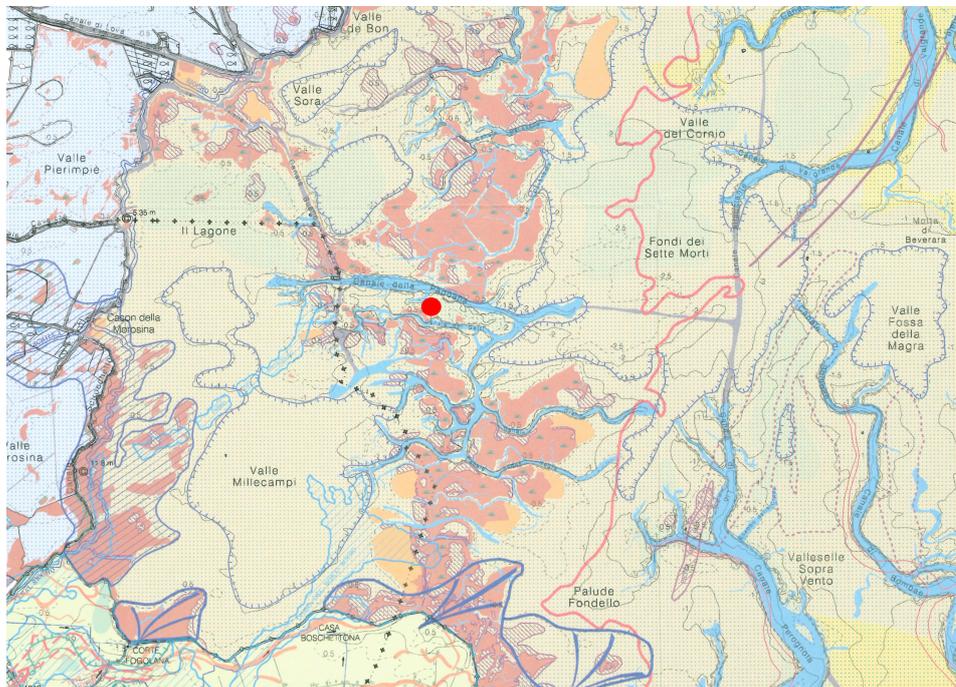
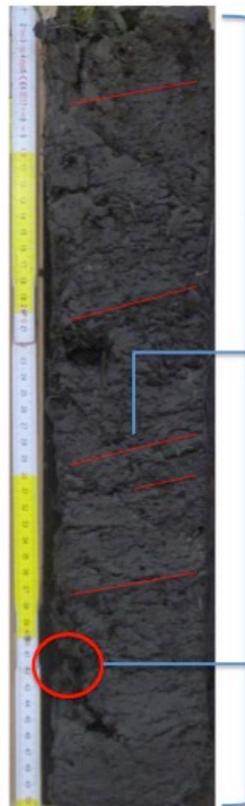


Figura 4-22 Immagine dell'area circostante il punto di prelievo della carota rappresentata nella carta geomorfologica della Provincia di Venezia. (Bondesan e Meneghel 2004)

L'area circostante il sito di prelievo è segnata in carta geomorfologica (Figura 4-22) a granulometria limoso-sabbiosa con sparse velme e barene in erosione (Bondesan e Meneghel, 2004) (Figura 4-22).

### 4.6.2 Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica



Carota che si presenta molto scura, indice di notevole abbondanza di sostanza organica

Laminazione pervasiva su tutta la lunghezza della carota testimoniata da alternanza di fango chiaro e fango scuro

Attecchimento riconoscibile a 42 cm di profondità; questa, è la carota che mostra la barena emersa più vecchia tra tutte quelle analizzate, ipotizzando dei tassi di sedimentazione paragonabili

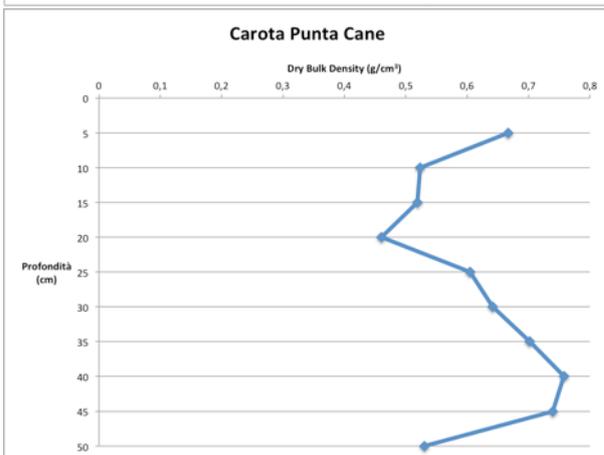
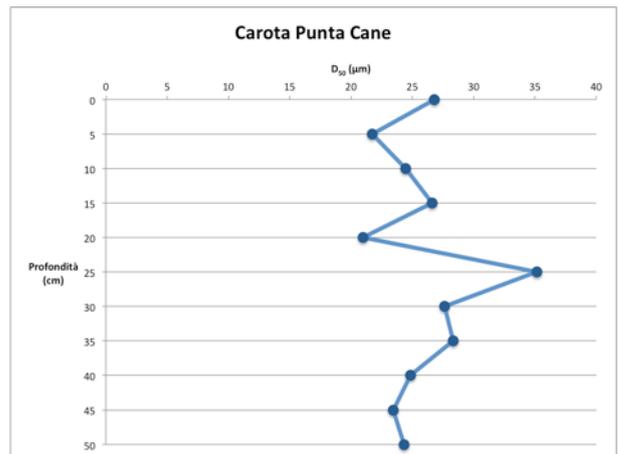
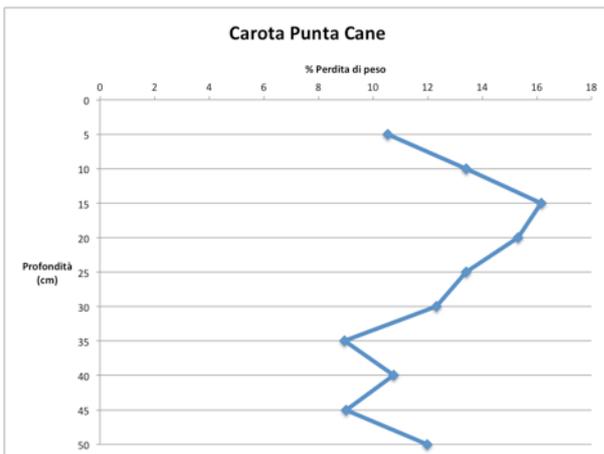


Figura 4-23 I tre grafici rappresentano, in funzione della profondità, la percentuale della perdita in peso del campione pre e post trattamento in muffola (in alto a sinistra), la variazione della granulometria del D<sub>50</sub> (in alto a destra) ed i valori della densità dei campioni (a sinistra).

Come risalta anche a colpo d'occhio osservando il colore della carota, la presenza di sostanza organica è decisamente abbondante. Lo conferma l'analisi LOI con valori che oscillano tra gli 8 e i 16 punti percentuali con una parte più ricca tra i 10 ed i 30 cm di profondità. Essendo un'area con barene vecchie, probabilmente queste un tempo possedevano una vegetazione rilevante che, col tempo, con l'erosione e l'annegamento han prodotto una notevole abbondanza di materia organica residua che disgregandosi in particelle molto fini si è miscelata al sedimento inorganico entrando a far parte dell'accumulo di materiale che andrà poi a formare la strutture di una velma cresciuta poi in barena.

Per quanto riguarda la granulometria rimane stabile tra i 20 ed i 30  $\mu\text{m}$ , valore che rientra nella media delle carote. E' presente comunque un livello a 25 cm di profondità con valori di pochi  $\mu\text{m}$  maggiori che rientra nel silt grossolano.

#### 4.6.3 Analisi d'immagine



Figura 4-24 In marroncino si evidenziano i margini erosi nell'area attorno al punto di prelievo della carota segnalato dal bollino giallo.

La carota è stata raccolta in un margine esposto all'azione erosiva da parte del moto ondoso da vento avente un fetch davvero importante poiché fino al cordone litoraneo di Pellestrina è presente solamente una superficie d'acqua libera estesa per 8,8 km nella direzione di Bora.

---

Nel punto preciso della carota l'erosione però appare molto contenuta, questo solamente perché fino a un decennio fa era protetta da un'altra barena posta dinanzi ora quasi completamente scomparsa (Figura 4-24).

## 4.7 Carota Canale Novissimo

### 4.7.1 Analisi del sito



Figura 4-25 Ubicazione del sito di prelievo della carota sulla sponda del Canale Novissimo nella laguna meridionale alla latitudine di Chioggia.

Al fine di poter confrontare l'entità erosiva di due siti accomunati dall'essere dei canali a fetch limitati ci si è spinti in laguna Nord nel canale Spacco Tralo ed in laguna Sud all'interno del Canale Novissimo. Questo canale è un taglio artificiale che vede le sue origini nell'epoca dei grandi interventi in cui la Repubblica della Serenissima, per proteggere la laguna dal nefasto riempimento, si concentrò sul controllo dei fiumi scaricatori, ovvero, agli inizi del Seicento.

Come da toponimo, il Canale Novissimo si imposta come prolungamento del Taglio Nuovo dopo che questo ha raggiunto il naviglio del Brenta presso Mira Taglio. Come il Sile nella laguna Nord, qui il canale scorre verso sud lungo il margine della laguna meridionale volgendo a Est nella parte terminale, parallelamente al Brenta e, dopo Valli, sfocia nella laguna presso il canale Poco Pesce da cui si può raggiungere facilmente Chioggia.

E' proprio a 870 m all'interno della laguna che è stato individuato il sito più adatto per conseguire al prelievo della carota all'altezza dell'uscita di un ghebo sud da margine di una barena naturale.

Il sottolineare l'origine naturale della barena non è casuale poiché, col passare del tempo, molte ne son state erose nel lato Nord del canale e, per garantire la protezione dal vento di Bora, ne sono state ricostruite per una superficie di quasi un milione di metri cubi negli ultimi decenni.

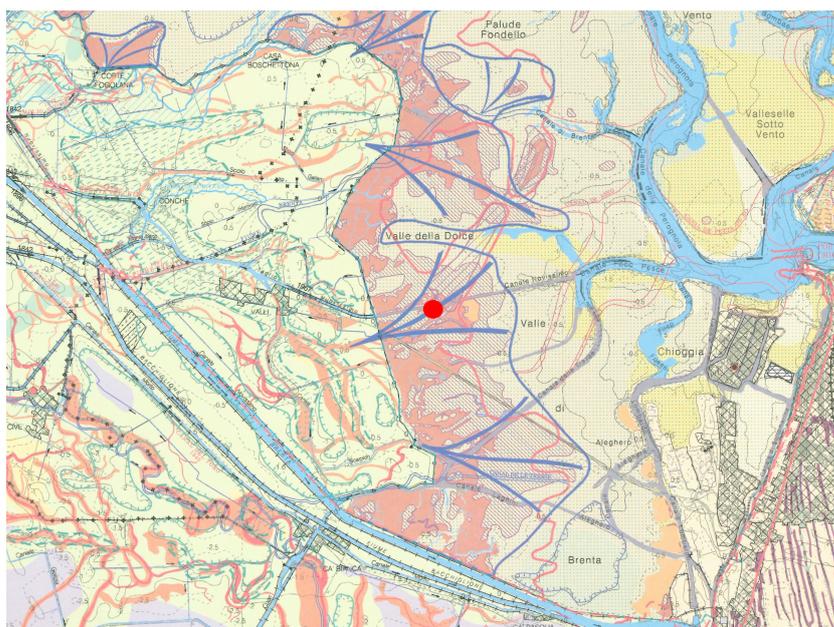


Figura 4-26 Immagine dell'area circostante il punto di prelievo della carota rappresentata nella carta geomorfologica della Provincia di Venezia. (Bondesan e Meneghel 2004)

Dal punto di vista morfologico il sito di prelievo della carota, al margine del Canale Novissimo, si trova all'interno di uno dei delta endolagunari creati dal fiume Brenta ed oggi alimentato dallo sfociare del Taglio Novissimo (Bondesan e Meneghel, 2004) (Figura 4-26).

## 4.7.2 Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica



Dal basso verso l'alto si riscontra una laminazione sempre meno inclinata. Si ipotizza l'istaurarsi di un ghebo che, erodendo la superficie di una barena attecchita, crea l'inclinazione. Con l'accumulo di fango in questo canale ne consegue l'occlusione e la ripresa dell'attecchimento su una superficie che torna ad essere piana.

Evidenze di attecchimento vegetale

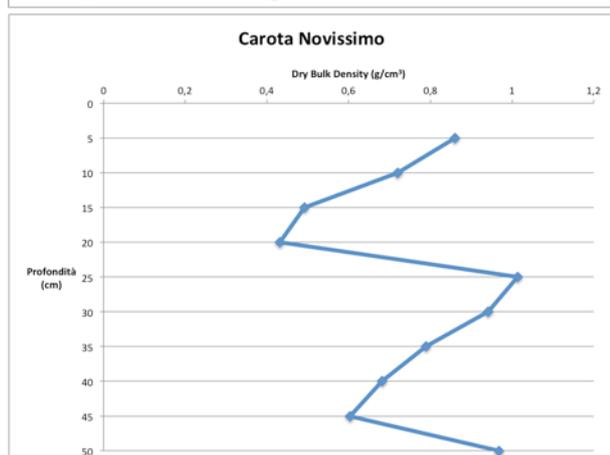
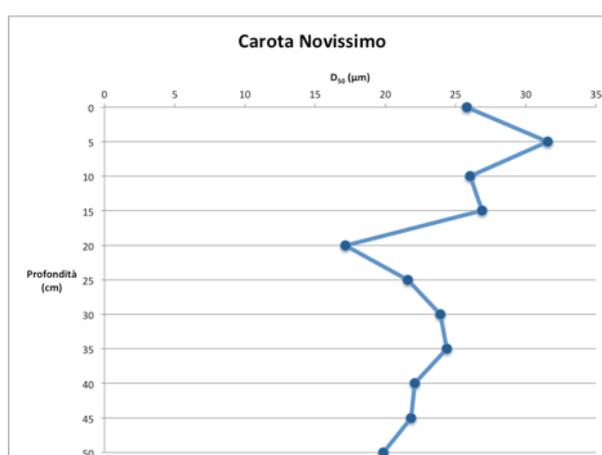
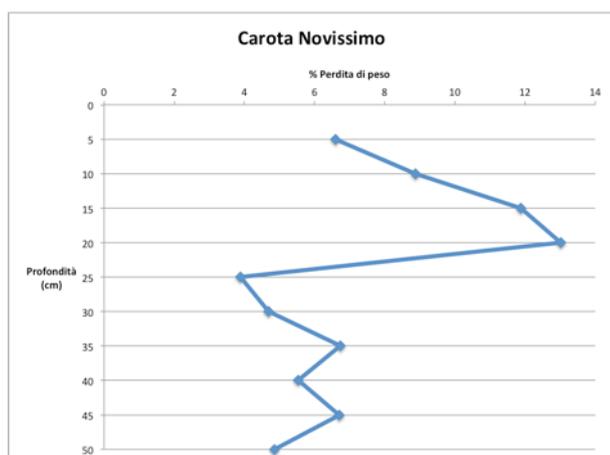


Figura 4-27 I tre grafici rappresentano, in funzione della profondità, la percentuale della perdita in peso del campione pre e post trattamento in muffola (in alto a sinistra), la variazione della granulometria del  $D_{50}$  (in alto a destra) ed i valori della densità dei campioni (a sinistra).

---

La fascia inclinata di fango chiaro visibile sulla carota a 20-25 cm di profondità, oltre che rappresentare uno iatus stratigrafico alla base dovuto, s'ipotizza, all'erosione da parte di un ghebo, ne indica l'inizio dell'accumulo di materiale al suo interno.

Nei grafici è ben visibile lo stacco tra i 20 ed i 25 cm in cui la presenza di sostanza organica ed il valore della granulometria calano bruscamente indice di accumulo di materiale inorganico fine e di un microambiente inospitale alla vegetazione. Il picco di organico, infatti, si impone solamente al di sopra di questo livello quando la diminuzione di profondità del ghebo è stata tale da permettere l'attecchimento delle piante pioniere.

In generale i valori della LOI e della granulometria si attestano nella media delle misurazioni effettuate (Figura 4-27).

### 4.7.3 Analisi d'immagine



Figura 4-28 In marroncino si evidenziano i margini erosi nell'area attorno al punto di prelievo della carota segnalato dal bollino giallo.

Com'è facile intuire, le barene più chiare nella parte Nord-Est dell'immagine sono state da poco ricostruite pertanto non sono state coinvolte nel confronto delle foto aeree.

L'erosione ha provocato un notevole arretramento dei margini barenali alle sponde del canale anche di 20 – 30 metri. Curiosamente ne ha risentito maggiormente il margine a Nord del canale in teoria più protetto dal vento di Bora. Questo perché nella laguna meridionale diventa rilevante anche il vento di Scirocco (proveniente da Sud-Est) che origina treni d'onda che finiscono con l'impattare sui margini rivolti a Sud.

Catastrofico è stato l'effetto dell'erosione all'estremità del Nord-Est del canale; dal confronto tra le foto aeree, si è evidenziata chiaramente la scomparsa di intere barene che offrivano protezione al canale e ne definivano la geometria addentrandosi nella laguna (Figura 4-28).

## 4.8 Carota Pagliaga OVEST

### 4.8.1 Analisi del sito



Figura 4-2-29 Ubicazione del sito di prelievo della carota nel margine occidentale delle barene di Pagliaga a ridosso dell'aeroporto Marco Polo.

La palude di Pagliaga, situata in laguna Nord a ridosso dell'estremità Nord della pista dell'aeroporto Marco Polo, offre notevole varietà di situazioni erosive.

Se a Est le barene sono in forte erosione, a Ovest il margine affacciato alla palude del Monte è pressochè stabile poiché protetto dal vento dominante (Bora) e con direzione grossomodo parallela al vento secondo per influenza che è lo Scirocco (Figura 4-29).

Pertanto, l'ubicazione del sito di prelievo della carota "Pagliaga Ovest" è proprio in questo margine stabile al fine di valutare se, oltre alle condizioni di immunità nei confronti dei venti principali, anche una particolare conformazione organica e granulometrica possa influire sulla resistenza.

Da un'attenta osservazione di campagna è stato possibile constatare una vegetazione piuttosto rigogliosa ed una diffusa foracchiatura nel primo paio di centimetri della parte più esterna del margine.

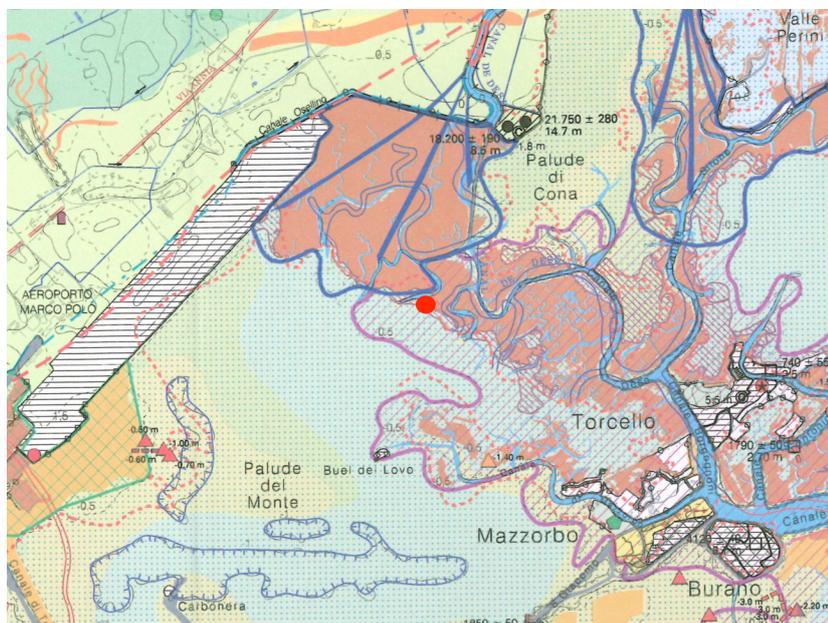


Figura 4-30 Immagine dell'area circostante il punto di prelievo della carota rappresentata nella carta geomorfologica della Provincia di Venezia. (Bondesan e Meneghel 2004)

Dal punto di vista morfologico la carota è stata prelevata a ridosso del conoide endolagunare creato dal fiume Dese.

### 4.8.2 Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica

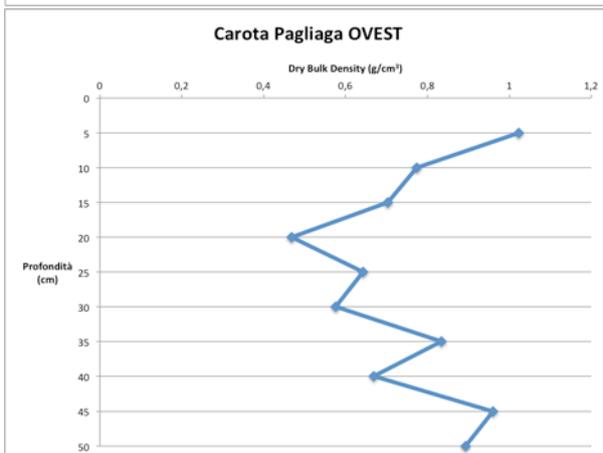
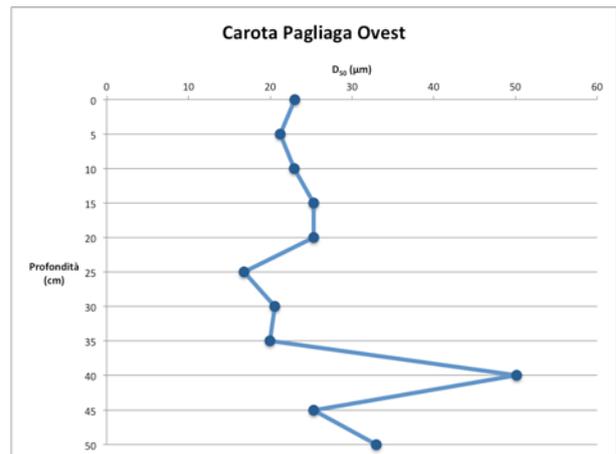
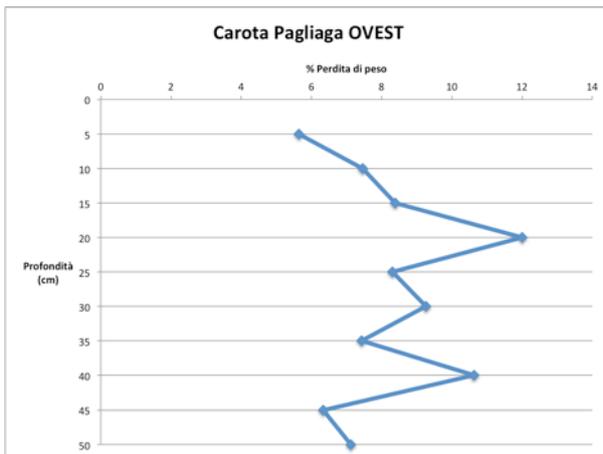
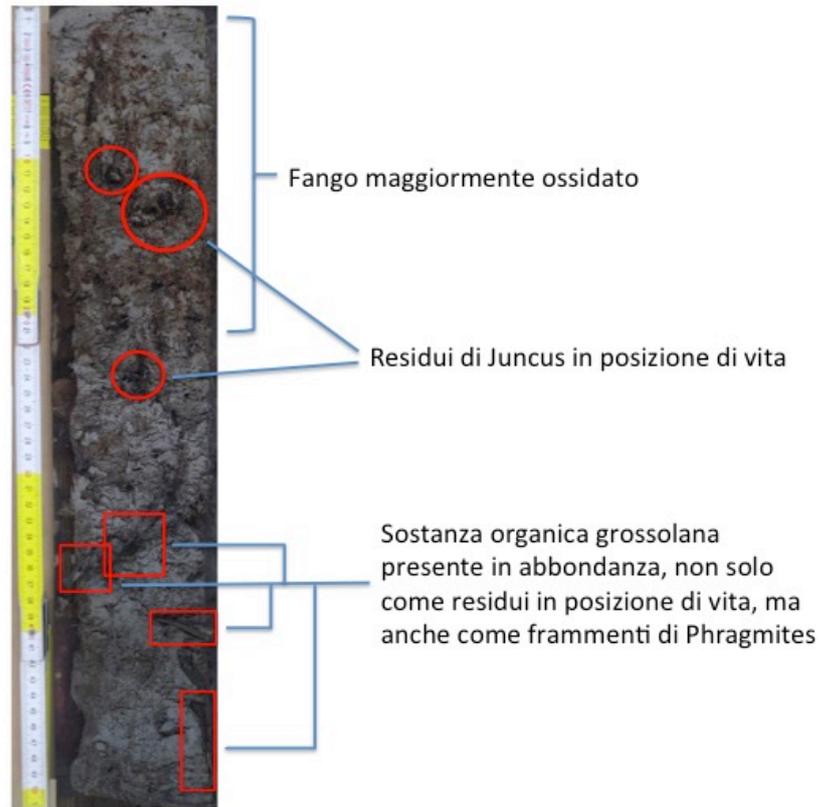


Figura 4-31 I tre grafici rappresentano, in funzione della profondità, la percentuale della perdita in peso del campione pre e post trattamento in muffola (in alto a sinistra), la variazione della granulometria del D<sub>50</sub> (in alto a destra) ed i valori della densità dei campioni (a sinistra).

Il contenuto di sostanza organica assume un andamento un po' caotico, con una tendenza all'aumentare raggiungendo un picco ai 20 cm. Più in profondità varia notevolmente alternando valori alti e bassi.

La granulometria invece rimane molto stabile all'interno del range del silt medio (15 – 30  $\mu\text{m}$ ) con evidenziato a 40 cm un livello di silt grossolano.

Sia il contenuto di organico che la granulometria attestano i loro valori nella media delle carote analizzate.

### 4.8.3 Analisi d'immagine



Figura 4-32 In marroncino si evidenziano i margini erosi nell'area attorno al punto di prelievo della carota segnalato dal bollino giallo. In rosso sono segnate le bilance dei pescatori.

Essendo un'area protetta dai venti di Bora, l'erosione è apprezzabile nei margini orientati E-W in quanto più esposti alle conseguenze che può portare il vento di Scirocco.

Si nota erosione inoltre all'interno dei canali che, come nei percorsi fluviali c'è la tendenza a erodere le sponde a causa della corrente che qui, essendo tidale è bifrontale quindi si apprezza erosione sempre nella parte esterna ma in entrambe le direzioni (Figura 4-32). Segnate in rosso sono le baracche delle bilance da pesca che, si vede molto bene, furono costruire al di sopra della barena, ora invece poggiano la struttura delle fondamenta all'interno dei canali.

---

Nel margine orientato NO-SE invece l'erosione pare assente. Nel confronto delle immagini però la foto aerea del 1978 presentava dei riflessi che rendevano il dettaglio incomprensibile. S'intravedeva un nastro di colore differente parallelo al margine ma che non raggiungeva gli estremi per essere definito parte della barena stessa per cui, confrontato con gli altri margini chiaramente erosi si è optato per ometterlo dalla serie di poligoni che evidenziano l'arretramento.

## 4.9 Carota Palude della Rosa

### 4.9.1 Analisi del sito

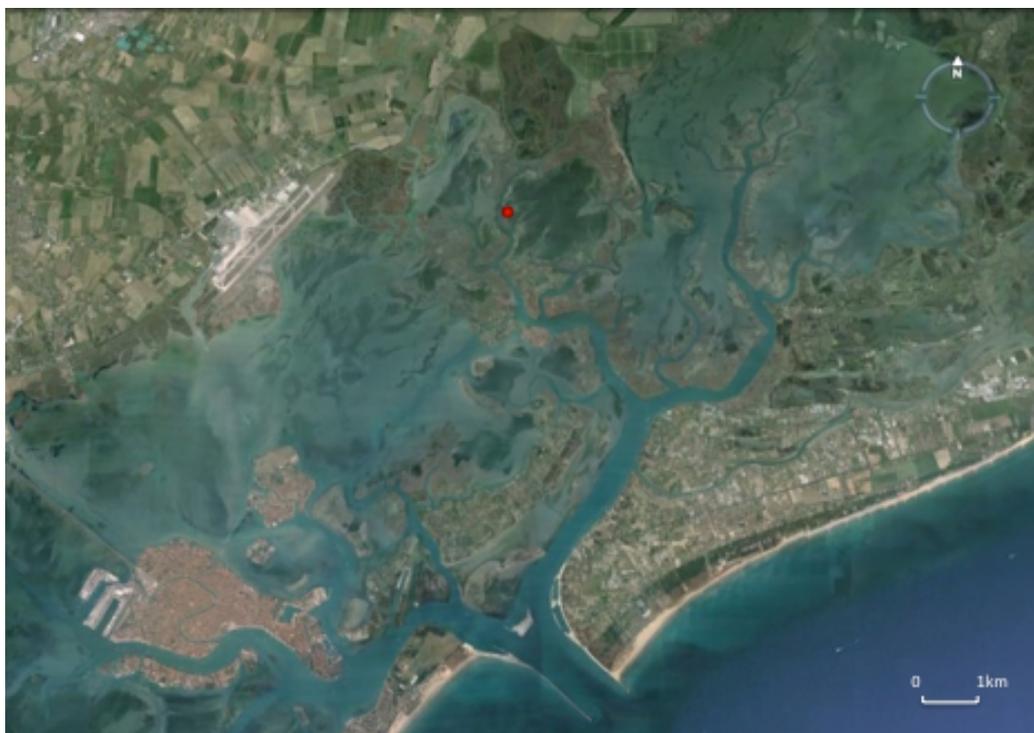


Figura 4-33 Ubicazione del sito di prelievo della carota nelle barene che si affacciano alla Palude della Rosa.

Nella parte nord occidentale della laguna il collegamento tra il canale di Burano ed il Silone è garantito da un canale scavato riscontrabile in cartografia con vari nominativi: c'è chi lo assume come proseguimento del Silone, chi come del Canale Santa Maria e c'è chi lo chiama Siloncello. Insomma regna ancora un po' di confusione... ma ciò che importa è che a Est, questo canale è delimitato da una serie di barene che subiscono un'erosione talmente spinta che alcune sono addirittura scomparse rendendo necessario un intervento antropico di ripristino in quanto garantiscono una fondamentale funzione di riparo del canale rompendo un fetch già grande costituito da tutta l'ampiezza dell'adiacente Palude della Rosa; specchio d'acqua presente a Est di queste barene e a Nord dell'abitato di Torcello (Figura 4-33).

Pertanto la carota è stata raccolta nel margine che si affaccia su questa palude.

Caratteristica di questo margine è la mancanza della morfologia a mensola tipica dell'erosione da moto ondoso riscontrata negli altri siti; qui la barena scende a velma presentando uno slope molto più graduale.

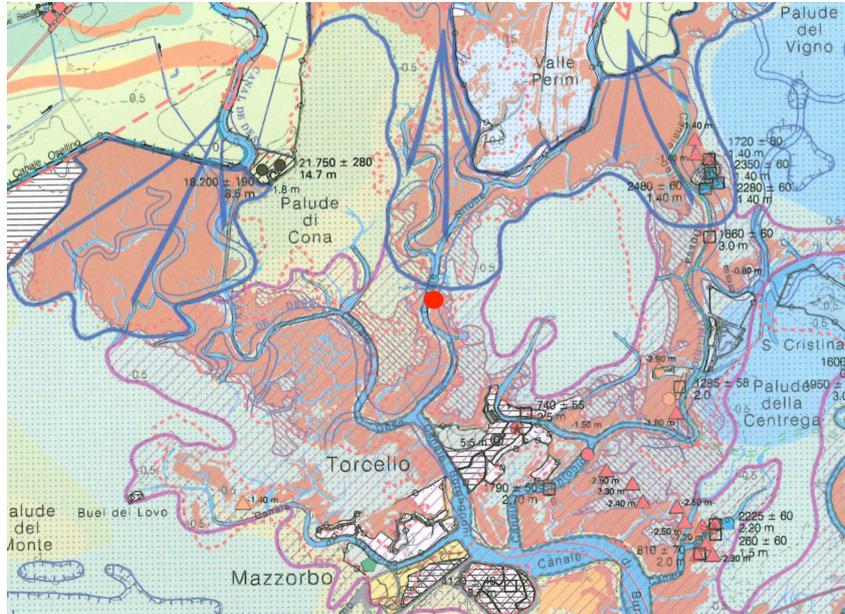


Figura 4-34 Immagine dell'area circostante il punto di prelievo della carota rappresentata nella carta geomorfologica della Provincia di Venezia.

(Bondesan e Meneghel 2004)

Nella carta geomorfologica il punto di prelievo della carota si trova dentro un margine interno lagunare risalente al XVII secolo. Probabilmente sono barene cresciute grazie all'apporto di materiale da parte del Sile e del Canale Santa Maria.

### 4.9.2 Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica

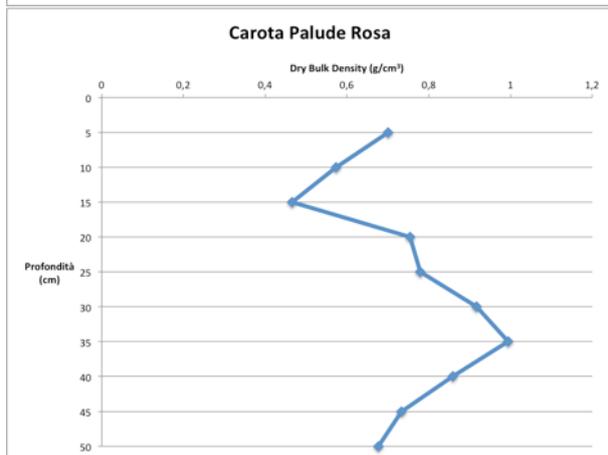
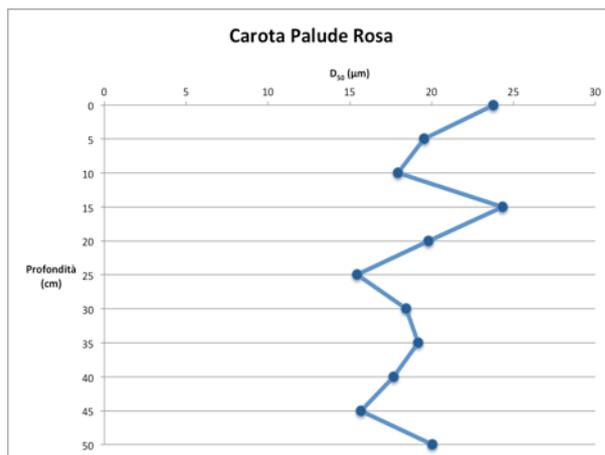
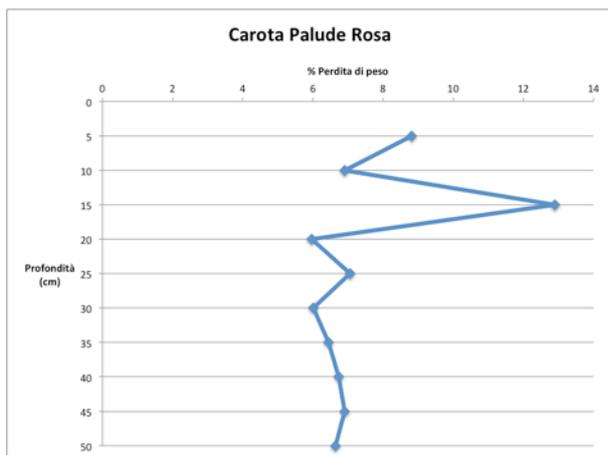


Figura 4-35 I tre grafici rappresentano, in funzione della profondità, la percentuale della perdita in peso del campione pre e post trattamento in muffola (in alto a sinistra), la variazione della granulometria del D<sub>50</sub> (in alto a destra) ed i valori della densità dei campioni (a sinistra).

I valori del contenuto in sostanza organica sono sotto la media delle carote analizzate e rimangono stabili intorno al 7% lunga tutta la lunghezza della carota. Fa eccezione naturalmente il picco a 15 cm di profondità dove probabilmente i campioni analizzati intersecavano degli accumuli di organico locali come potrebbe essere un residuo di vegetazione o una concentrazione di apparati radicali delle alofite.

La granulometria invece si scosta dalla media e risulta avere i valori di dimensioni più bassi tra tutte le carote analizzate con una media pari a 19,26  $\mu\text{m}$ . Nel grafico si nota come in un paio di campioni si oltrepassi, a ribasso, il limite dei 15  $\mu\text{m}$  e si rientri nel campo del silt fine secondo quella che è la classificazione granulometrica di Strekeisen.

### 4.9.3 Analisi d'immagine



Figura 4-36 In marroncino si evidenziano i margini erosi nell'area attorno al punto di prelievo della carota segnalato dal bollino giallo.

Il canale si sviluppa con asse Nord-Sud, a sinistra c'è la Palude di Cona, a destra la Palude della Rosa. Le barene di quest'area sono state erose da tutti i lati ed in particolare nel punto dove è stata raccolta la carota il margine è arretrato di mezzo metro l'anno nei 32 anni intercorsi tra le due foto aeree confrontate. Si vedono inoltre le barene ricostruite probabilmente anche per consentire lo stoccaggio del sedimento dragato dal canale stesso al fine di permettere la navigazione poiché si tratta di un'arteria importante che collegandosi al

---

Silone raggiunge il fiume Sile verso Nord-Est ed Altino con le sue gettonatissime darsene a Nord-Ovest.

## 4.10 Carota Vigno

### 4.10.1 Analisi del sito

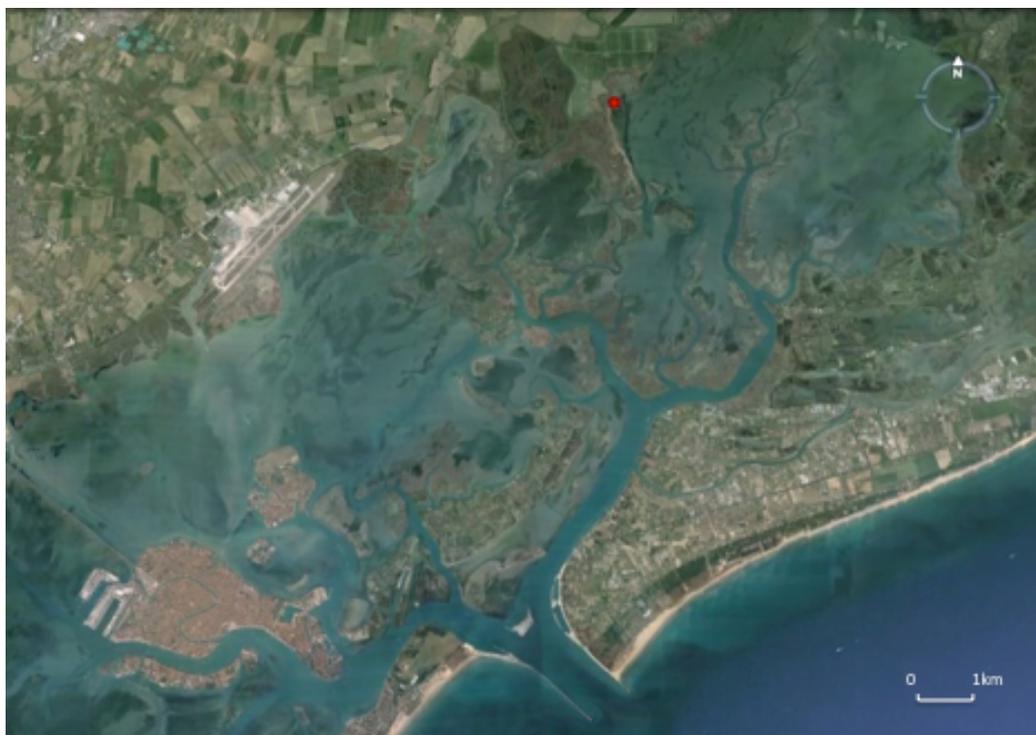


Figura 4-37 Ubicazione del sito di prelievo della carota nelle barene a Ovest della Palude del Vigno

La carota “Vigno” è la più settentrionale tra quelle analizzate ed è stata prelevata dal margine esposto a Sud-Est di una barena che si affaccia sulla Palude del Vigno che consiste nello specchio d’acqua estesa a Ovest del canale San Felice (Figura 4-37).

Nelle barene adiacenti, a Sud di quella scelta per il carotaggio, è stato realizzato un intervento di recupero barenale per garantire la protezione del canale del Vigno che altrimenti sarebbe in comunicazione con lo specchio d’acqua adiacente che ne cambierebbe l’idrodinamica rischiando di portare all’occlusione del canale che fa parte della rete dei canali navigabili fornendo una via di collegamento tra il Silone e Torcello.

Tuttavia la barena nella quale è stata prelevata la carota è di origine naturale e, a differenza delle altre analizzate, ospita qualche pianta di *Phragmites* segno della presenza di acqua più sfumata verso il dolciastro.

Il terreno si presenta molto resistente al calpestio cosa che, curiosamente entra in discrepanza con quanto si vede nella sezione della carota dove, dalla colorazione molto scura si evince l'abbondanza di sostanza organica tanto che addirittura si intravedono degli strati torbosi.

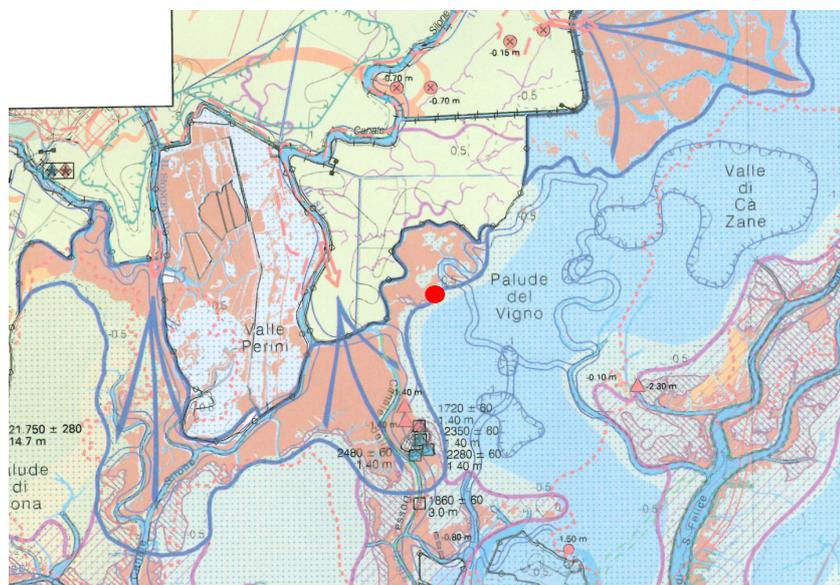


Figura 4-38 Immagine dell'area circostante il punto di prelievo della carota rappresentata nella carta geomorfologica della Provincia di Venezia.

Bondesan e Meneghel 2004

Dal punto di visita morfologico le barene in cui è stata prelevata la carota prendono origine dall'apporto solito fluviale del Sile, infatti in carta, sono segnate all'interno del conoide fluviale endolagunare.

### 4.10.2 Analisi sedimentologica, LOI e granulometrica

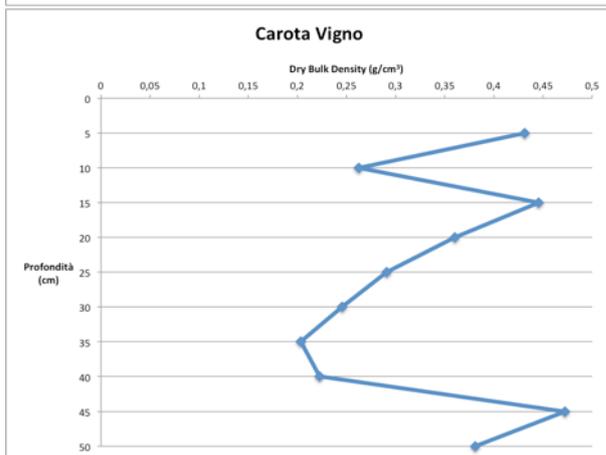
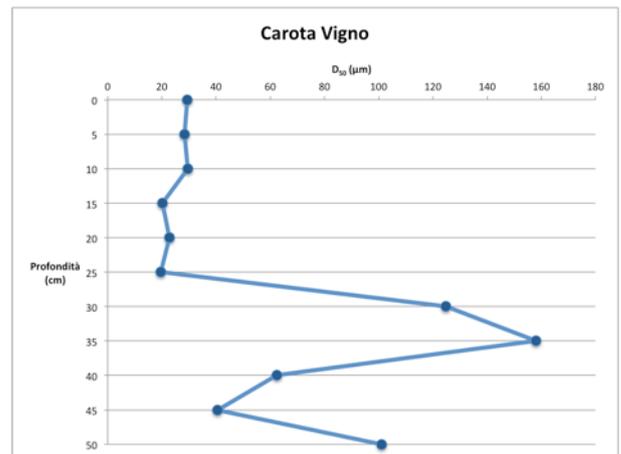
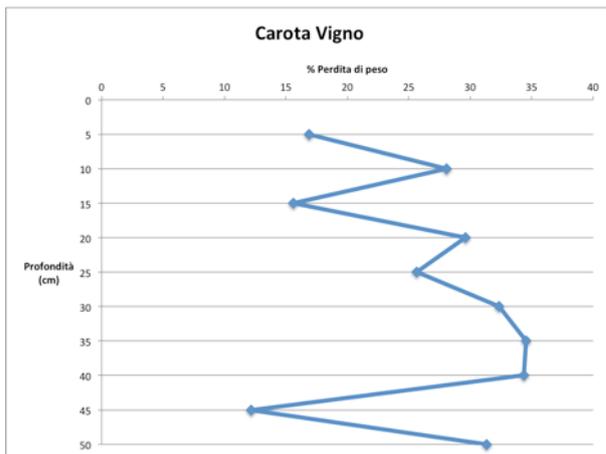


Figura 4-39 I tre grafici rappresentano, in funzione della profondità, la percentuale della perdita in peso del campione pre e post trattamento in muffola (in alto a sinistra), la variazione della granulometria del D<sub>50</sub> (in alto a destra) ed i valori della densità dei campioni (a sinistra).

---

I dati che ci forniscono i grafici dell'organico e della granulometria sono sorprendenti e si discostano notevolmente dalla media computata dalle altre nove carote analizzate.

Il grafico della sostanza organica rimane con valori molto alti ma presenta un andamento un po' bizzarro con alternanza di alti e bassi ed una fascia con percentuali maggiori tra i 25 e i 40 cm di profondità. E' presente un picco negativo a 45 cm in corrispondenza di un livello effettivamente più chiaro visibile nella carota e un ritorno ad alti valori al bottom laddove è stato riscontrato un livello torboso.

Il fatto che la sostanza organica si presenti in abbondanza è stato anticipato anche dagli indizi forniti osservando, toccando ed annusando la carota: colore scuro, consistenza soffice e odori nefandi non sono caratteristiche banali e diffuse ma sono peculiari di elementi ricchi di materia organica.

La granulometria invece vede i suoi valori attestarsi a cavallo tra il silt medio ed il silt grossolano fino a 25 cm di profondità poi, bruscamente, la dimensione aumenta entrando prepotentemente nel campo delle sabbie raggiungendo il picco a 35 cm. Questo è l'unico episodio di un livello propriamente sabbioso riscontrato tra gli undici campioni prelevati dalle dieci carote e sulla sua origine si possono assumere diverse ipotesi: il fatto che queste barene siano vicine allo sfociare di diversi corsi d'acqua potrebbe suggerire una violenta e vigorosa scarica di sedimento dovuta a un periodo di precipitazione molto intenso nel bacino di competenza oppure, un evento di tempesta associata ad una particolare alta marea che ha trascinato materiale più grossolano dal fondo del bacino fino sopra le barene oppure qualche villico locale che parecchi decenni fa scaricò dei sacchi di sabbia proprio in quel punto. Per saperlo sarebbe necessario svolgere analisi più approfondite.

### 4.10.3 Analisi d'immagine



Figura 4-40 In marroncino si evidenziano i margini erosi nell'area attorno al punto di prelievo della carota segnalato dal bollino giallo

Si tratta di un'area che subisce un'erosione calcolata di 0,68 cm l'anno durante i 32 anni intercorsi tra le due foto aeree analizzate (Figura 4-40), che tra i vari siti analizzati è il valore maggiore dovuto a un fetch che nella direzione di Bora assume un considerevole valore di oltre 4 km; dinanzi a questa barena che in effetti, è al margine della laguna, si estende uno specchio d'acqua con un'ampiezza che raggiunge la terra emersa che borda a Ovest il canale San Felice nel mezzo della laguna settentrionale.



## 5 Discussione

Per ognuna delle dieci carote analizzate sono stati ricavati valori della granulometria, densità e presenza di sostanza organica ogni 5 cm di profondità.

Facendo, per ogni carota, una media di questi valori, si ottiene un unico valore rappresentativo che plottato in un grafico relazionato al tasso di erosione ricavato dal confronto delle immagini, può indicare se e quanto, questi fattori influiscano nella predisposizione all'erosione del margine barenale.

Il valore di  $R^2$  (coefficiente di determinazione) presente all'interno del grafico è un dato che possiede un preciso significato statistico: si tratta di un numero che varia tra 0 ed 1, indicando che i valori sono linearmente indipendenti ( $R^2=0$ ) o che tra essi c'è una perfetta correlazione ( $R^2=1$ ).

Si osserva che i valori di  $R^2$  ottenuti dall'analisi sono relativamente bassi e raccontano di una modesta correlazione del tasso di erosione con le tre variabili analizzate (sostanza organica, granulometria e densità).

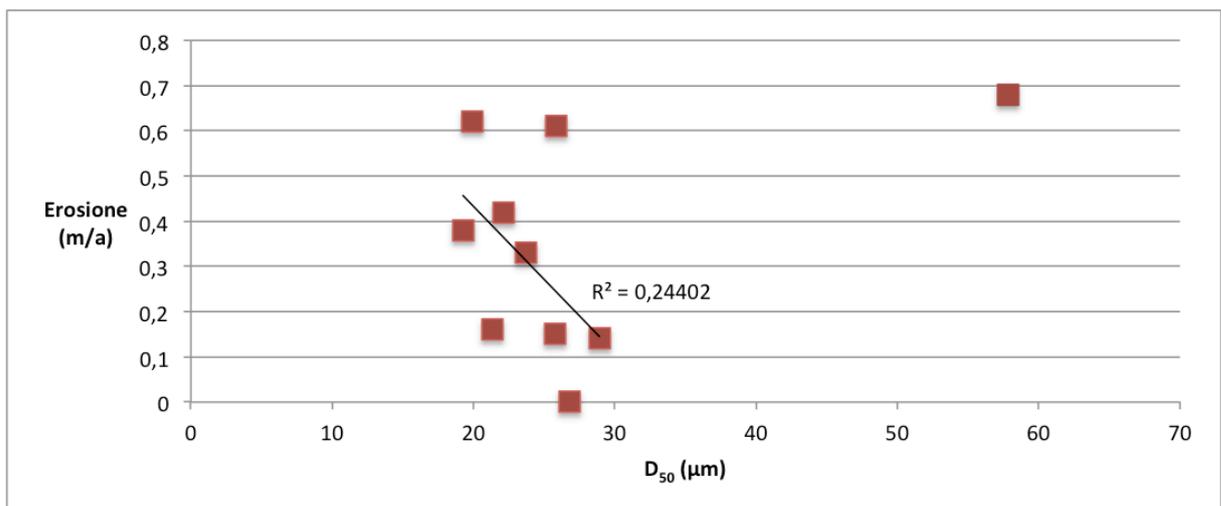


Figura 5-1 Tasso di erosione in funzione della granulometria media, rappresentata dal D50, per i diversi campioni analizzati, escludendo dal calcolo della miglior retta approssimante la carota Vigno.

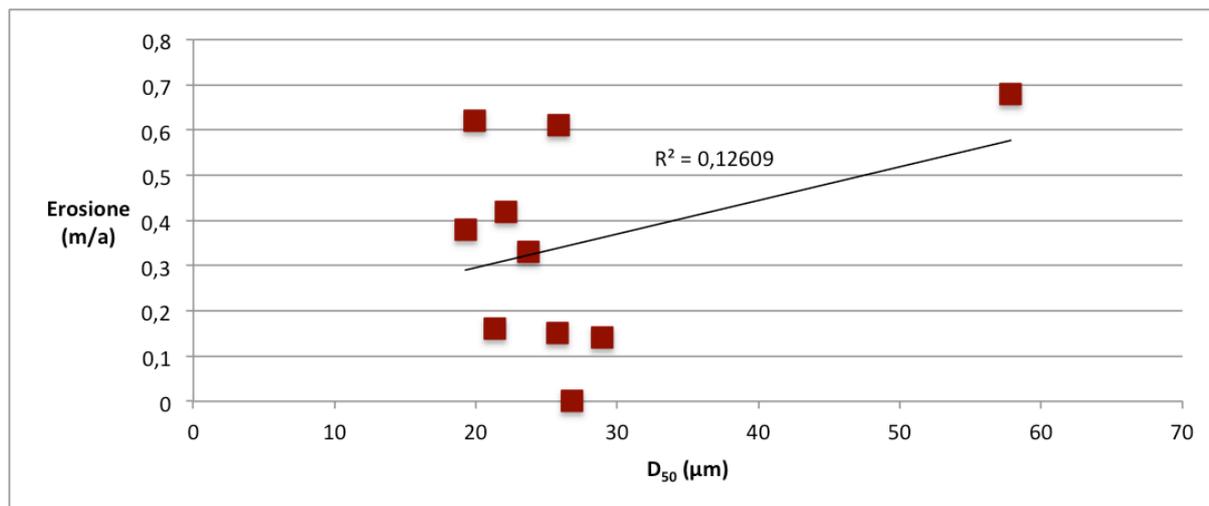


Figura 5-2 Tasso di erosione in funzione della granulometria media, rappresentata dal D<sub>50</sub>, per i diversi campioni analizzati, tenendo conto anche della carota Vigno per il calcolo della miglior retta approssimante.

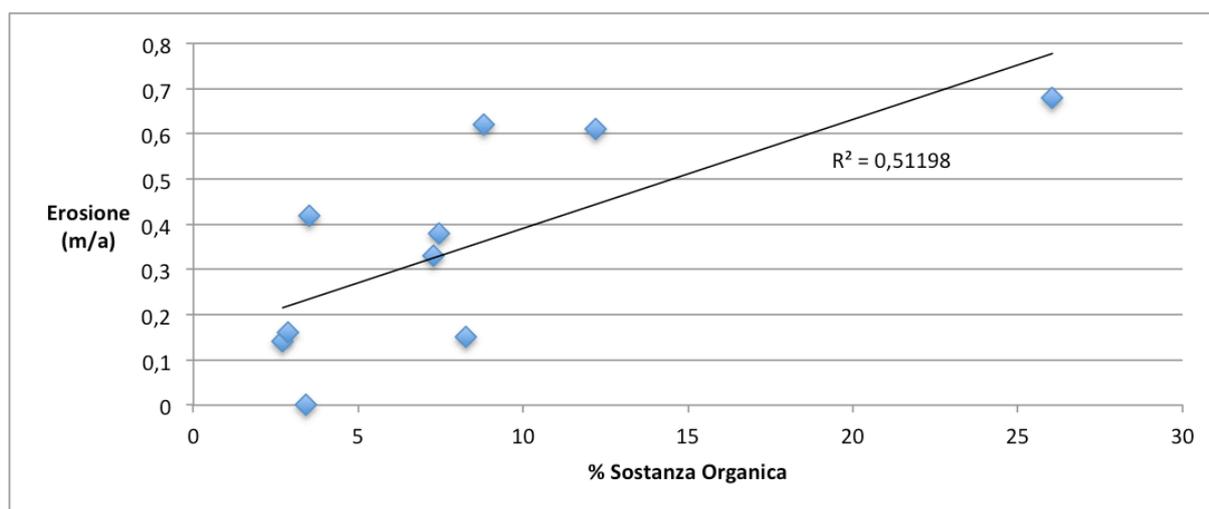


Figura 5-3 Tasso di erosione in funzione della percentuale di materia organica media sulla carota, per i diversi campioni analizzati

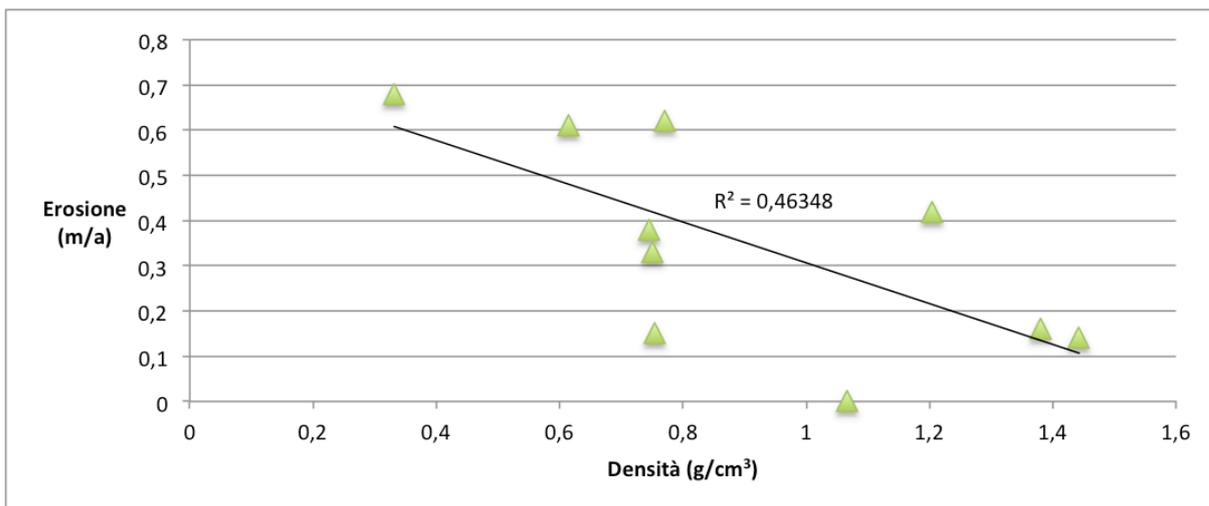


Figura 5-4 Tasso di erosione in funzione della densità media sulla carota, per i diversi campioni analizzati.

Nel grafico che mostra la relazione tra il tasso di erosione e la granulometria media della carota, spicca quel dato in alto a destra che rappresenta la carota Vigno. Questa carota possiede un livello sabbioso alla base che fa aumentare notevolmente la dimensione media dei granuli del sedimento che, essendo silt medio per tutte le carote, risente notevolmente della presenza, anche se limitata, di materiale grossolano.

Pertanto la carota Vigno è stata esclusa inizialmente esclusa dalla determinazione della retta di regressione (Figura 5-1) poiché considerata un outlier, che avrebbe invertito in maniera anomala l' inclinazione della retta stessa come si evince dal grafico in Figura 5-2.

Nonostante i valori molto bassi di  $R^2$  s'intravede una timida tendenza all'aumento dell'erosione per le carote aventi granulometria media minore.

Osservando invece ciò che accade confrontando i tassi di erosione con il contenuto di materia organica (Figura 5-3), i dati evidenziano che il tasso di erosione tende ad aumentare con il contenuto di materia organica, essendo quindi i campioni più ricchi in materia organica, più sensibili all'erosione.

---

Non mancano però valori che si discostano dalla retta di regressione come ad esempio la carota Sant'Erasmus (3,51% di S.O., 0,48 m/a di erosione) che subisce un forte arretramento pur essendo la percentuale di sostanza organica tra le più basse osservate nei diversi campioni.

Inoltre, è interessante confrontare il sito di Pagliaga Est (8,82 %, 0,62 m/a) e Pagliaga Ovest (8,26 %, 0,15 m/a) vicine nella mappa ed infatti anche simili nel valore complessivo del contenuto di materia organica. Tuttavia, poiché i due siti sono orientati in modo diverso rispetto alla direzione dei venti dominanti, essi sono caratterizzati da tassi di erosione profondamente differenti.

La densità è stata calcolata dividendo il peso a secco del campioncino (quindi dopo i tre giorni di permanenza in forno a 60°) per il suo volume, pari a 4 cm<sup>3</sup> (avendo il campione dimensioni 1x2x2). Si tratta quindi della *bulk density*.

I dati evidenziano una tendenza del tasso di erosione a diminuire della bulk density (Figura 5-4). Le carote con una maggiore densità mostrano quindi una maggiore resistenza anche se è giusto sottolineare che “casualmente” i siti con minore densità sono esposti ad una maggiore potenza del moto ondoso e viceversa, fatto che influenza il valore finale dell'erosione. In effetti, anche confrontando i siti di San Felice (1,38 gr/cm<sup>3</sup> di densità, 0,14 m/a di erosione), Spacco Tralo (1,38 gr/cm<sup>3</sup>, 0,16 m/a) e Pagliaga Ovest (0,7544 gr/cm<sup>3</sup>, 0,15 m/a) caratterizzati da potenze del moto ondoso simili tra loro, si evince come questi siti siano caratterizzati da tassi di erosione medi annui confrontabili tra loro, nonostante il sito di Pagliaga Ovest sia caratterizzato da una densità molto minore.

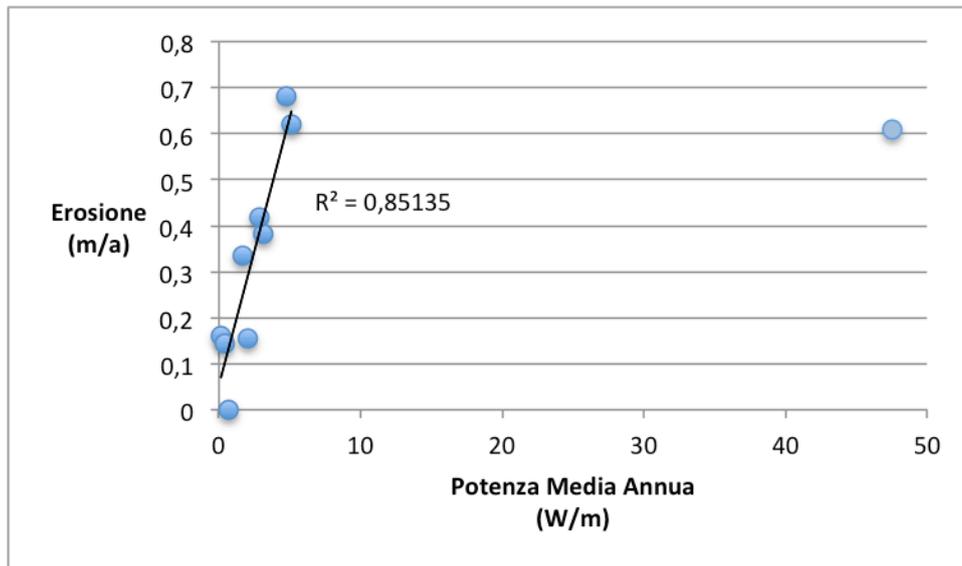


Figura 5-5 Tasso di erosione in funzione della potenza media delle onde incidenti.

Infine, è significativo notare come esista una relazione lineare tra il tasso di erosione medio annuo e la potenza del moto ondoso incidente (Figura 5-5). Tale relazione è caratterizzata da valori del coefficiente di determinazione  $R^2$  molto elevati ( $R^2=0.85$ , molto maggiori di quelli precedentemente osservati) suggerendo l'esistenza di una correlazione importante tra le due grandezze.

Anche qui però c'è da fare una considerazione in merito al punto isolato che nel grafico si trova in alto a destra che rappresenta la carota prelevata a Punta Cane, dove, giustificata da un fetch molto esteso e dalla notevole profondità dei fondali, la potenza del moto ondoso subisce un incremento di quasi un ordine di grandezza.

Trascurando questo dato, gli altri fittano bene con la retta di regressione lineare la quale dimostra che a maggiore potenza corrisponde maggiore erosione.



---

## 6 Conclusioni

Le analisi condotte permettono di formulare alcune riflessioni relativamente all'influenza di diversi fattori, di natura prevalentemente fisica o biologica, sui tassi di arretramento osservati, anche in relazione a lavori esistenti in letteratura.

I tassi di erosione mostrano correlazioni relativamente modeste con le caratteristiche dei terreni come granulometria (sintetizzata sulla base del  $D_{50}$ ), densità e contenuto di materia organica. Non è quindi prudente esaltare l'esistenza di relazioni di proporzionalità diretta o inversa tra i tassi di erosione dei margini di barena e le caratteristiche dei terreni. Tali relazioni, enfatizzate da Feagin et al. (2009) seppur sulla base di valori dei coefficienti di correlazione confrontabili con quelli qui ottenuti, necessitano di ulteriori indagini per poter essere utilizzate.

L'unica forzante che dimostra avere un legame stretto con il tasso di erosione è la potenza del moto ondoso, che ha un'influenza molto maggiore sull'erosione rispetto agli altri fattori considerati.

In particolare, è opportuno evidenziare come nella determinazione della potenza del moto ondoso che incide i margini barenali, come espresso nel capitolo 3, rientrino quei fattori di variabilità che si riscontrano a scala locale dal punto di vista morfologico (fetch e batimetria) e dall'input derivato dalla forzante vento (durata e velocità del vento).

Un altro fenomeno evidenziatosi nel corso della raccolta ed elaborazione dei dati è l'arretramento dei margini barenali anche di barene poco o per niente soggette all'impatto di moto ondoso generato dal vento, in quanto protette dall'azione dei venti dominanti.

E' il caso, ad esempio, delle carote prelevate lungo il Canale Novissimo, in Laguna Sud, o sul bordo del canale Spacco Tralo o, in maniera minore, sulla sponda di un canale interno alla barena San Felice, in Laguna Nord, che si trovano in una posizione per la quale il fetch è pressoché nullo. Tuttavia, le loro sponde, risentono di una certa erosione (Figure 4-12, 4-20, 4-28) le cui cause sono da ricercare plausibilmente nel passaggio di natanti (nel caso

del Canale Novissimo) e nell'influenza delle correnti dovute all'escursione tidale (nel caso di Spacco Tralo e del canale che innerva la barena San Felice).

Dall'osservazione delle mappe delle potenze massime e medie dell'onda che impatta contro i margini barenali si è dedotto che le potenze massime calcolate per un anno di simulazione non assumono rilevante importanza nel determinare l'entità dell'arretramento dovuto a processi erosivi, arretramento che invece sembra essere più direttamente legato alla potenza media dal moto ondoso (figure 3-23 e 3-26 e più in dettaglio 3-24 e 3-27).

Da questo si desume che l'erosione non avviene per effetto di pochi eventi intensi, ma è legata al lento lavoro delle onde da vento, che a più riprese impattano contro i margini barenali, erodendoli. E' anche interessante evidenziare l'importanza di utilizzare periodi di osservazione sufficientemente lunghi (almeno un anno) in modo che questi siano effettivamente rappresentativi del clima ondoso locale, al fine di riuscire a determinare il reale valore di potenza media del moto ondoso, principale causa dell'erosione marginale.

La scelta della raccolta delle carote in differenti punti della laguna, come già descritto nel capitolo 3, non è stata casuale. Dalle analisi è parsa infatti subito evidente la grandissima variabilità delle caratteristiche fisiche e biologiche dei vari siti.

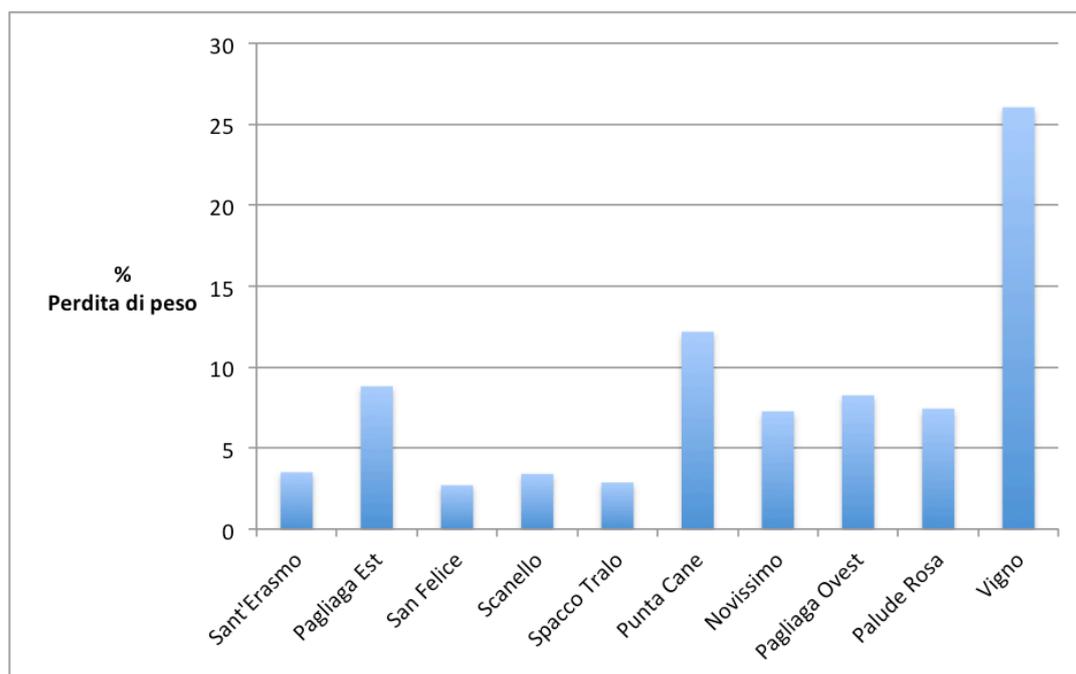


Figura 6-1 Istogramma che rappresenta la perdita di peso media percentuale per ogni carota.

In Figura 6-1 è ben rappresentata la presenza di sostanza organica per ogni carota ricavata dalla media dei valori della perdita di peso percentuale di ogni campioncino analizzato costituente la carota stessa.

I dati sono bassi per i siti di San Felice, Scanello, Spacco Tralo e Sant'Erasmus che sono ubicati vicini al vecchio cordone litoraneo o comunque vicini alla bocca di porto. Valori più alti sono stati registrati per le carote di Punta Cane, Novissimo, Palude Rosa e Vigno, non a caso tutti situati in prossimità della foce di corsi d'acqua ad eccezione di Punta Cane che ora si trova in mezzo alla laguna meridionale ma evidentemente in passato fece parte di qualche sistema fluviale.

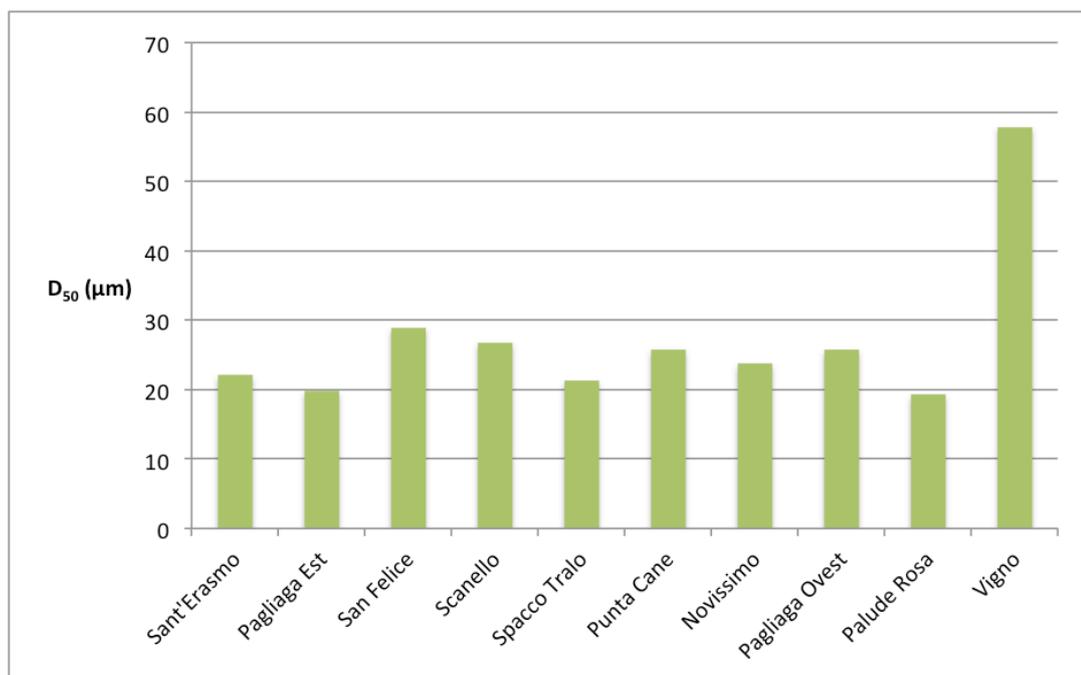


Figura 6-2 Istogramma che rappresenta la granulometria del D<sub>50</sub> per ogni carota.

La granulometria media delle carote analizzate rientrano tutte nel range del silt medio (Figura 6-2), d'altra parte è quello che ci si aspetta nel lavorare su sedimenti palustri. Risalta particolarmente la carota Vigno che, grazie ad un livello sabbioso riscontrato alla base, porta il valore del D<sub>50</sub> all'interno del campo del silt grossolano.

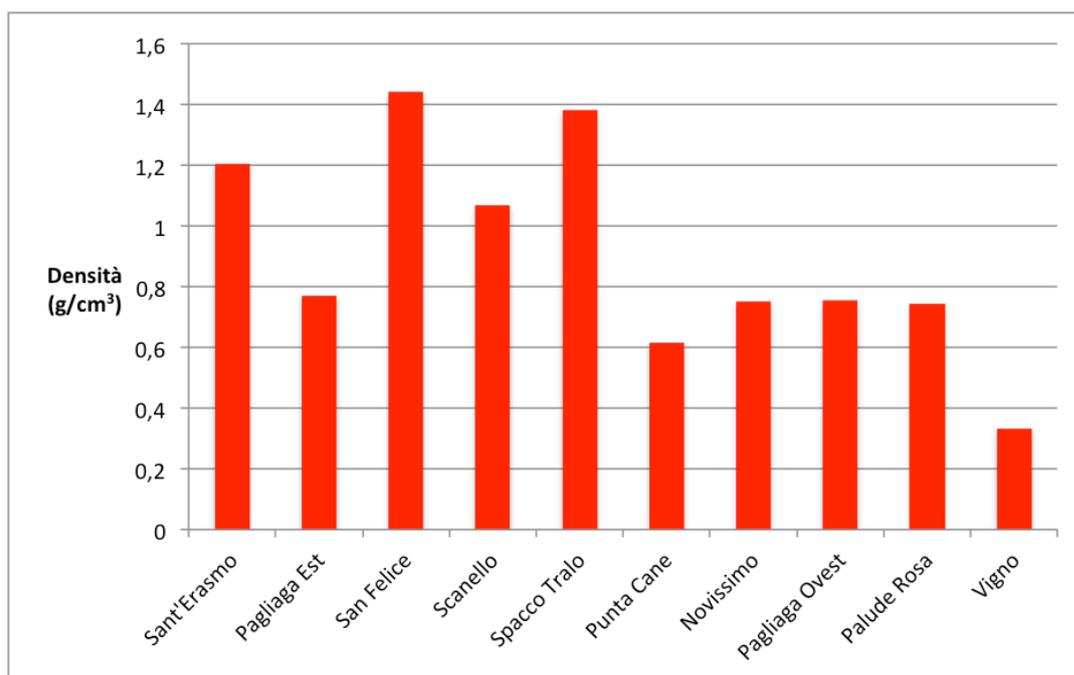


Figura 6-3 Istogramma che rappresenta la densità media per ogni carota

Per quanto riguarda la densità, le carote Sant'Erasmo, San Felice e Spacco Tralo raggiungono i valori più elevati probabilmente correlati alla bassa presenza di sostanza organica e quindi alla vicinanza ai cordoni litoranei. Le altre carote si assestano tra 0,6 e 0,8 g/cm<sup>3</sup> ad eccezione della carota Vigno che fornisce valori di densità molto bassi (Figura 6-3).

Questi risultati raccontano della complessità geologica figlia di fenomeni di sedimentazione di materiale poi rimaneggiato dalle correnti di marea e dalle onde da vento, e delle strette interazioni tra processi di natura fisica e biologica. Tra i processi fisici, le correnti di marea e le onde da vento, dipendono dalle caratteristiche della marea locale, dalle caratteristiche dei venti e dalle caratteristiche della morfologia locale. La disponibilità di sedimenti di origine fluviale, e le diverse caratteristiche della vasta gamma di sedimenti provenienti da sorgenti diverse, inoltre, contribuiscono a determinare le caratteristiche dei suoli, assieme a componenti di natura biologica come la quantità di materia organica prodotta da diversi tipi di vegetazione alofila.

Pertanto, in conclusione, nel cercare di prevenire l'erosione laterale delle barene, risultati più efficaci si possono ottenere concentrandosi nella gestione degli aspetti morfologici piuttosto che sulle caratteristiche fisiche biologiche del terreno che, si è visto, non

---

influenzano in maniera sufficientemente nitida ed inequivocabile la resistenza dei margini barenali.



---

## 7 Bibliografia

Adam P., «Saltmarsh ecology.» Cambridge University, Press, Cambridge, UK. 1990.

Allen J.R.L., Thornley D.M. «Laser granulometry of Holocene estuarine silts: effects of hydrogen peroxide treatment.» In *The Holocene*, 14:290 DOI:10.1191/0959683604hl681rr. 2004.

Allen J.R.L. «Morphodynamics of Holocene alt marshes: A review sketch from the Atlantic and southern North Sea coasts of Europe.» *Quat. Sci. Rev.* 19(12), 1155-1231. 2000.

Bondesan A., Meneghel M., Rosselli R., Vitturi A. «Carta geomorfologica della Provincia di Venezia, scala 1:50000.» 2004.

Carbognin L., Teatini P., Tosi L. «Eustacy and land subsidence in the Venice Lagoon at the beginnin of the new millennium.» In *Journal of Marine System*, 51, 345-353. 2004.

Carniello L., Defina S., Fagherazzi S., D'Alpaos L. «A combined wind wave-tidal model for the Venice Lagoon.» *J. Geophys. Res.*, 110, F04007, doi:10.1029/2004JF000232. 2005.

Carniello L. D'Alpaos A., Defina A. «Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins.» *Estuary Coastal Shelf, Sci.*, 92, 263-276, doi:10.1016/J.ecss.2011.01.001. 2011.

Cola S., Sanavia L., Simonini P., Bchrefler Bernhard A. «Coupled thermohydrmechanical analysis of Venice lagoon salt marshes.» In *Water Resources Research*, Vol. 44, W00C05, doi:10.1029/2007WR006570. 2008.

Dadey Kathleen A., Janecek T., Klaus A. «Dry-bulk density: its ude and determination.» In *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, Scientific Result, Vol. 126. 1991.

D'Alpaos A. Carniello L., Rinaldo A. «Statistical mechanics of wind wave-induced erosion in shallow tidal basins: Inferences from the Venice Lagoon.» *Geophys. Res. Lett.* 40, doi:10.1002/grl.50666. 2013.

Faegin R.A., Lozada-Bernard S.M., Ravens T.M., Moller I., Yager K.M., Baird A.H. «Does Vegetation prevent wave erosion of salt marsh edges?» In *PNAS Early Edition*. 2009.

---

Fagherazzi S., Carniello L., D'Alpaos L., Defina A. «Critical bifurcation of shallow microtidal landforms in tidal flats and salt marshes.» In *PNAS*, vol. 103, 8337-8341. 2006.

Fagherazzi S. «Numerical models of salt marsh evolution: Ecological, geomorphic and climatic factors.» *Rev. Geophys.* 50, RG1002, doi:10.1029/2011RG000359. 2012.

Fagherazzi S., Mariotti G., Wiberg Patricia L., McGlathery Karen J. «Marsh collapse does not require sea level rise.» In *Oceanography*, Vol. 26, N. 26. 2013.

Frangipane G., Pistolato M., Molinaroli E., Guerzoni S., Tagliapietra D. «Comparison of loss on ignition and thermal analysis stepwise methods for determination of sedimentary organic matter.» In *Acquatic Conservation: Marine Freshwater Ecosystem*. 19: 24-33. 2009.

Friedrichs C.T., Perry J.E. «Tidal salt marsh morphodynamics.» In *Journal of Coastal research*, 27, 6-36. 2001.

Gatto P., Serandrei Barbero R. «Aggiornamento scientifico sui problemi della laguna: Paleomorfologia e subsidenza.» In *Atti dei convegni*. 1979.

Gatto P. «La laguna di Venezia conservazione dell'ambiente fisico – subsidenza, idrodinamica lagunare e difesa dei litorali.» In *Atti del XI congresso della società italiana di biologia marina*. 1979.

Gatto P. «Il sottosuolo del litorale veneziano.» In *Technical Report 108*. CNR. 1980.

Heiri O., Lotter André F., Lemcke G. «Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results.» In *Journal of Paleolimnology*, 25, 101-110. 2001.

Marani M., D'Alpaos A., Lanzoni S., Santalucia M. «Understanding and predicting wave erosion of marsh edges.» In *Geophysical research letters*, Vol. 38, L21401, doi:10.1029/2011GL048995. 2011.

Marani M., D'Alpaos A., Lanzoni S., Carniello L., Rinaldo A. «Biologically-controlled multiple equilibria of tidal landforms and the fate of the Venice Lagoon.» In *Geophys. Res. Lett.*, 34, L11402. 2007.

Mariotti L., Fagherazzi S., «Critical width of tidal flats triggers marsh collapse in the absence of sea-level rise.» In *PNAS*, Vol. 110, 5353-5356. 2013.

Perillo G., «Geomorphology and sedimentology of estuaries.» *Elveser*, New York. 1995.

---

Perillo G., Wolanski E., Cahoon D., Brinson M. «Coastal wetlands: An integrated Ecosystem Approach.» p.974, Elsevier, Amsterdam. 2009.

Rado M. *Evoluzione temporale delle reti di canali a marea nella Laguna di Venezia*. Tesi di laurea specialistica. 2014.

Santalucia M. *Analisi ed interpretazione dell'erosione di barene soggette a moto ondoso da vento*. Tesi di laurea specialistica. 2010.

Stocco D. *L'evoluzione di una barena nel settore meridionale della Laguna di Venezia durante gli ultimi 1000 anni*. Tesi di laurea specialistica. 2015.

Tommasini L. *Analisi della dinamica dei sedimenti nella Laguna di Venezia dall'inizio del 1800 ad oggi*. Tesi di laurea specialistica. 2014.



---

## 8 Ringraziamenti

Ringrazio infinitamente il Prof. **Andrea D'Alpaos**, Mandrake e Stakanovista, sommerso da una mastodontica dose di lavoro ma sempre sorridente e disponibile nei confronti di tutti.

Nonostante il perseverare nel darmi del “Lei”, si è istaurato un rapporto di feeling lavorativo che mi ha stimolato a volerne sapere sempre di più e a non perdere mai l'entusiasmo necessario per alimentare la passione nei confronti di un argomento apparentemente banale ma che nasconde una selva di insidie.

Nelle prime linee dei ringraziamenti è doverosa la presenza del prof. **Massimiliano Ghinassi**. Quando c'è lui il tempo scorre veloce e di informazioni ne arrivano tante. Quando c'è lui di sicuro ci si cimenta in qualche lavoro sporco. Indispensabile come sempre nelle questioni sedimentologiche.

Un forte ringraziamento va anche alla Dott.ssa **Marcella Roner** che ha dedicato una lunghissima settimana (e non solo quella) del suo dottorato ai lavori di laboratorio finalizzati a codesta tesi mentre il laureando si trastullava nella gita in catamarano lungo le coste Croate.

Altra dottoranda dalla quale ho ricevuto ho ricevuto un'esorbitante dose di informazioni è **Laura Tommasini**, fiero di averla svezzata nel suo nuovo ruolo di strutturata. A lei va un caloroso ringraziamento e un in bocca al lupo per la sua carriera.

Rinnovo con estrema riverenza il profondo ringraziamento agli sponsor **Nello** e **Gabriella** che, con una smisurata dose di pazienza, mi hanno finanziato senza apparentemente battere ciglio gli anni d'oro più belli ed importanti della mia vita. La sopravvivenza da studente fuori sede culminata con l'Erasmus sono esperienze che fanno crescere forse molto di più di quanto loro possano pensare.

Citavo precedentemente la vita da studente fuori sede... ebbene così ricca ed entusiasmante è stata grazie a quella meravigliosa organizzazione di alcoolizzati identificati sotto il nome di **Need4Spritz** che ha reso ogni serata un trionfo di emozioni condite al gusto di Aperol e Campari. Cosciente del fatto che non più si potranno ripetere le nostre ammirabili gesta tutti insieme ed allo stesso modo, mi accingo a citare uno a uno tutti i componenti come una solenne lista di eroi: Camatel Dott. Cristiano, Salbego Dott. Giorgio, Gaiani Dott.ssa

---

Ilaria, Demurtas Dott. Matteo, Gottardi Dott. Michele, Anzolini Dott.ssa Chiara, Pirola Dott. Nicola, Mencaroni Dott. Menca Davide, Posenato Dott.ssa Valeria, Toaldo Dott.ssa Miriam.

...ma **RReali** e **Tommy Valle**?! Nella squadra di campioni, menzione d'onore ai due fuoriclasse del campionato degli shottini a stomaco vuoto. Idoli incontrastati, esempio perfetto di come bruciarsi in malo modo le cellule cerebrali e riuscire comunque ad avere successo nelle materie scientifiche dove di cervello ne serve tanto. Devo ammetterlo, da voi ho imparato molto e sarete sempre fonte di ispirazione nel momento in cui sarò indeciso se portare a termine una fruttuosa ed importante relazione geologica o ripiegare all'osteria ad affogare i miei pensieri in un calice di Raboso frizzante.

Mi sono accorto che nella tesi triennale non l'avevo fatto, mi accingo allora a rimediare a questa gravosa mancanza e ringraziare i miei "fratelli patavini", i miei coinquilini, in particolare **Jack Bolognino**, **Fede Poloni** e **Nicola Draghi**. Abbiamo trasformato una casa in un luogo di culto, meta di pellegrinaggio di chiunque volesse essere sempre accolto a porte aperte (anche perché spesso divelte). In P300 ancora risuona l'eco delle nostre putride manifestazioni anti bon-ton ma ciononostante il nostro passaggio rimarrà indelebile nei secoli dei secoli. Amen.

Buona parte dei meriti se i 6 mesi a **Barcellona** hanno raggiunto certi livelli e rimarranno indimenticabili vanno a quel gruppetto di Italiani che, fusi con le amiche Spagnole, Catalane e Peruviane mi hanno accompagnato a vivere tutto il possibile da un'esperienza davvero unica ed irripetibile con tanto di registrazione di un paio di esami sul libretto universitario giusto per ufficializzare il mio passaggio come studente.

Ultima ma non ultima anzi, forse prima, **Miss De Faveri** abile e puntuale sempre e comunque nel regalarmi la sua costante presenza anche nelle situazioni più becere e fastidiose trasformandole spesso in momenti di piacere. E vorrei altresì sottolineare il fatto che la sto ringraziando nonostante il suo categorico rifiuto nell'indossare quest'oggi 27/11/2015 le scarpe col tacco che per lei avevo accuratamente selezionato.

