



Università
Ca'Foscari
Venezia

Università degli Studi di Venezia, Ca' Foscari

Corso di Laurea magistrale specialistica in Scienze Ambientali

Corso di studio: classe LM-75 SCIENZE AMBIENTALI

Tesi di Laurea Magistrale

**Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale
Malamocco-Marghera**

Relatore

Prof. Emanuela Molinaroli

Correlatore

Prof. Luca Zaggia

Controrelatori

Prof. Bini Claudio

Prof. Rubino Angelo

Laureanda

Maria Gionta

Matricola 822932

Anno Accademico 2013-2014

Indice

1. Abstract	4
2. Introduzione	5
3. Storia della Laguna di Venezia ed evoluzione nel tempo: subsidenza-eustatismo, erosione-sedimentazione.....	13
3.1 Origine della Laguna di Venezia	13
3.2 La subsidenza e l'eustatismo	15
3.3 La sedimentazione e l'erosione	16
4. Area di studio	21
4.1 Casse di colmata A, B, D-E	21
4.2 Il canale Malamocco-Marghera e l'impatto delle navi cargo.....	28
5. Georeferenziazione d'immagini e metodologie di analisi	39
5.1 Analisi d'immagini storiche ed attuali	48
5.2 Rappresentazione delle linee di riva nel tempo	56
6. Risultati della georeferenziazione e dell'elaborazione delle immagini.....	78
7. Attività sperimentale di campo e metodologie di analisi	84
7.1 Osservazioni in campo della cassa di colmata B.....	90
7.1.1 Globuli di fango lungo la spiaggia	91
7.1.2 Cassa di colmata B, area Sud e centro-Sud.....	91
7.1.3 Livello di marea nella cassa di colmata B.....	94
7.1.4 Cassa di colmata B, area Nord, centro e Sud	94
7.1.5 Erosione della vegetazione della cassa di colmata B	95
7.2 Campionamento e analisi di laboratorio	96
7.2.1 Stazione WS7	96
7.2.2 Stazione WS8	99
7.2.3 Stazione WS3	101
7.2.4 Stazione WS9	103
7.2.5 Stazione WS11	106

7.2.6 Stazione WS12	109
8. Risultati delle attività di campo e laboratorio	113
8.1. Stazione WS2.....	114
8.2 Stazione WS9.....	116
8.3 Stazione WS11.....	117
8.4 Stazione WS15.....	118
8.5 Quantità di sedimento eroso nella cassa di colmata B.....	125
9. Discussione	127
10. Conclusioni.....	137
11. Bibliografia e sitografia:.....	139
12 Allegati	146
12.1 Allegato 1: informazioni relative alle fotografie aeree utilizzate nel lavoro di tesi.	146
12.2 Allegato 2: Fotografie aeree e satellitari con le rispettive linee di riva. Le tabelle indicano l'erosione nei diversi periodi di tempo studiati.....	155
12.3 Allegato 3: Schede campo durante i 10 mesi di campionamento.....	177
12.4 Allegato 4: Risultati del programma GRADISTAT. Statistiche usate riguardanti le analisi granulometriche effettuate sui campioni raccolti nel profilo della cassa di colmata B, il 23 settembre 2014.....	191
12.5 Allegato 5: Metodo per il calcolo della quantità di sedimento eroso.	193
13. Ringraziamenti	195

1. Abstract

One of the most debated environmental issue in our recent times is the problem of ship traffic in the Venetian Lagoon, in particular the effects of the navigation through the "Malamocco-Marghera Canal" and the consequent erosion on the shoreline zones are quite relevant.

The aim of this thesis is to analyze the morphologic variations caused by the ship traffic in the areas near the "Canal". For this reason, all the variations of the shoreline in the so called area "Cassa di Colmata B", (south of Fusina) have been taken into consideration.

Photogrammetric materials and satellite images from 1954 to 2014 have been selected, analyzed and interpreted using a GIS software and the results have clearly shown that the erosion of the coastal line is an endless phenomenon and that its force and intensity vary according to space and time.

At the same time, a series of photographic surveys have been made to analyze and quantify the current variations and compare them to the previous ones. Moreover, samples of sediments from the areas have been sampled to study the stratigraphic and granulometric parametres to give an account of the effects and the results of the erosion.

Finally, the results of the data suggest that the erosive phenomena are due to the decrease in pressure, according to the "Bernoulli's wave", caused by the passing of the ships in the "Malamocco-Marghera Canal".

2. Introduzione

La Laguna di Venezia, considerata oggi patrimonio dell'umanità dall'UNESCO, si è originata per l'apporto di sedimenti trasportati da numerosi fiumi tra i quali il Piave, il Brenta, il Dese e il Sile, che hanno formato, con il tempo, un sistema di barre costiere, che si sviluppano quando i sedimenti trasportati dai fiumi incontrano il mare. Per l'insieme delle sue caratteristiche naturali, la laguna è un ambiente di transizione tra la terra e il mare (Ravera, 2000), visibile in Figura 1.



Figura 1. Locazione geografica della Laguna di Venezia.

Delimitata dal fiume Sile a Nord e dal Brenta a Sud (Figura 1), la Laguna di Venezia presenta una forma allungata e incurvata, con una superficie di 550 km², una lunghezza di 55 km, una larghezza massima di 15 km, ed un bacino scolante di 1800 km² (Brambati et al., 2003). Il bacino scolante che circonda la laguna ad occidente è rappresentato da una piana alluvionale a bassa pendenza con un'area di 1850 km² dov'è praticata un'intensa attività industriale ed agricola. Importante per le attività economiche della città di Venezia è l'esistenza del Polo industriale di Porto Marghera, lungo la conterminazione della laguna, la cui locazione geografica è indicata dal cerchio nero, in Figura 2 (Vascellari, 2002).

La Laguna di Venezia è la più grande laguna in Italia ed è la più importante “superstite” del sistema di lagune che in epoca romana ha contraddistinto la costa dell'alto Adriatico, da Ravenna a Trieste. E' una laguna-costiera ed è lambita dal Mar Adriatico e, da Nord a Sud, è collegata da tre bocche di porto: la bocca di Lido (la più larga misura 800 m), la bocca di Malamocco (400 m) e la bocca di Chioggia (400 m), visibili in Figura 2.

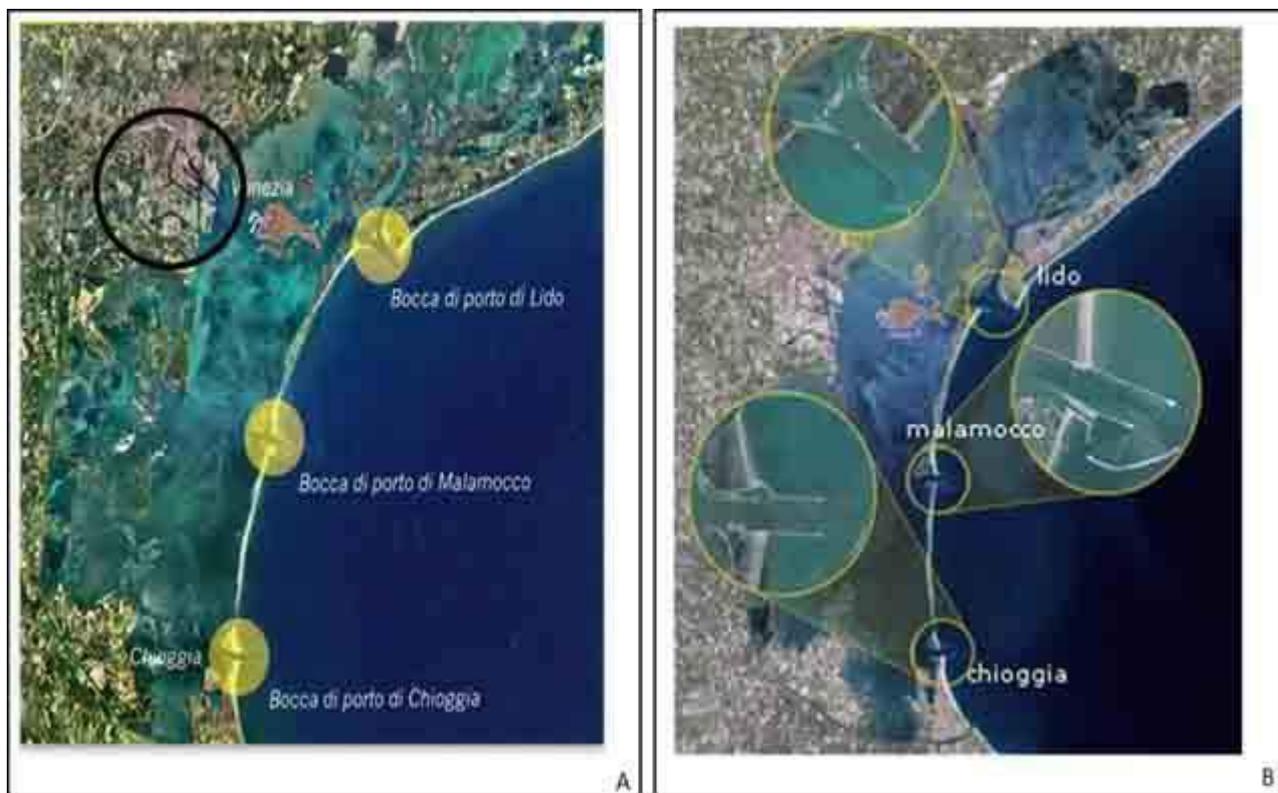


Figura 2. Laguna di Venezia: nell'immagine a sinistra il cerchio nero indica l'area di Porto Marghera (A), nell'immagine a destra (B) è indicato il dettaglio delle bocche tidali.

Le bocche di porto fungono da passaggi per l'acqua lungo il cordone litoraneo in modo tale che acqua e sedimenti si possano propagare all'interno del bacino, grazie al movimento di marea (D'Alpaos, 2010). I fondali tra le bocche di porto presentano profondità differenti. La bocca del Lido è profonda 9 m, la bocca di Malamocco è profonda 14 m e la bocca di Chioggia è profonda tra i 7 e 8 metri (www.port.venice.it/it/accessibilita-nautica.html). Quindi la bocca di porto di Malamocco risulta essere maggiore rispetto alle altre due.

L'ambiente lagunare di Venezia, come la maggior parte delle altre lagune, è sottoposto a variazioni intense e, pertanto, il suo equilibrio è perennemente instabile. La morfologia lagunare nasce dal susseguirsi dell'apporto di sedimenti solidi dal mare e dai fiumi e dall'erosione causata da onde e marea (Ravera, 2000). Questo scambio continuo tra deposizione ed erosione di sedimenti divide la laguna in due parti: una parte formante il sistema suolo e l'altra determinante un complesso sistema

d'acqua. Seguendo questo schema la superficie lagunare è formata dall'emersione di terre naturali e artificiali (litorali, casse di colmata, argini, isole) che costituiscono circa l'8% di tutta la superficie, ed il 92% comprendente canali (11,9%), fondali, velme e barene (80,1%) che costituisce il sistema d'acqua.

Considerando il bacino lagunare nel suo complesso, esso è formato da ampi specchi d'acqua percorsi da una fitta rete di canali di profondità variabile. Dei 550 km² di laguna, 418 km² sono interessati dall'escursione di marea dell'alto Adriatico, con un'escursione rispettivamente di 0,3 metri durante le maree di quadratura e di 1,1 metri durante le maree di sizigie (Molinarioli et al., 2009). Il ricambio delle acque lagunari con quelle marine avviene grazie ai fenomeni tidali e può essere stimato attorno ai 40 milioni di m³/giorno (Vascellari, 2002). La marea uscente dalle bocche di porto, incontra, in laguna, alcuni passaggi naturali rappresentati da canali, all'interno dei quali la velocità e l'energia di propagazione del flusso d'acqua avvengono in base alla profondità ed alla forma meandrica dei canali stessi. Contrariamente, i "ghebi" (canali minori nel detto veneziano) ed i "chiari" (chiamati così gli specchi d'acqua di ghebi interrati), determinano un moto lento e sinuoso delle acque.

I canali lagunari consentono il flusso e riflusso dell'acqua, permettendo il ricambio idrico necessario e determinando l'esistenza della laguna stessa. Essi collegano le zone più interne della laguna con i canali più profondi. Il vento e l'acqua (onde, maree e correnti) interagiscono con i sedimenti per produrre differenti tipi di morfologie presenti in laguna. Le barene, le velme, i canali e i bassi fondi sono creati per l'azione di erosione, trasporto e deposizione di sabbia, silt e argilla, in ambiente tidale. I parametri granulometrici danno utili indicazioni sulle modalità del trasporto e sull'energia dinamica del mezzo che ha trasportato il materiale. La conoscenza della distribuzione spaziale e temporale dei processi di sedimentazione, di trasporto e di erosione è di fondamentale importanza per la gestione di un sistema lagunare (Apitz et al., 2007).

Tra i canali in laguna si ritrovano le barene, create dall'accumulo di materiale solido trasportato dai fiumi e attraverso le bocche tidali. In particolare, le barene che si ritrovano lungo i canali si sono formate per l'accumulo di sedimenti risospesi dal fondo dei canali stessi. Le barene sono terre che vengono sommerse solo durante periodi di marea eccezionale. La superficie delle barene può variare da pochi metri quadrati a diversi ettari, e la loro distribuzione è molto irregolare. Esse hanno la funzione fondamentale di assorbire il volume d'acqua che le sommerge durante l'alta marea, e di rilasciare, in parte, il volume d'acqua durante il periodo di bassa marea (Ravera, 2000). Agendo come una spugna, le barene hanno un effetto regolatore sul livello d'acqua nella laguna. Esse sono

indispensabili per l'ecosistema poiché attuano il movimento dell'acqua, guidando la propagazione delle maree all'interno del bacino, amplificando l'azione dei canali. Agiscono inoltre con un'azione depurante sull'acqua grazie alla vegetazione alofila, che cresce in aree salate e prive di ossigeno. Questo tipo di vegetazione risulta indispensabile per la loro stabilizzazione, poiché lo sviluppo dell'apparato radicale delle piante compatta i sedimenti aumentando la capacità di resistenza alla forza erosiva dell'acqua e favorisce il deposito e accumulo dei sedimenti stessi. Inoltre, la loro presenza attutisce la formazione di onde create dal vento che porterebbero alla sospensione dei sedimenti. La superficie delle barene risulta essere composta generalmente da silt e argilla con la formazione di un ambiente di transizione tra terra ed acqua dove la vegetazione si propaga a macchie (fenomeno noto come zonazione) (Ravera, 2000).

Le velme, invece, sono terre che emergono solo in particolari condizioni di bassa marea rappresentando un habitat vitale per l'alimentazione di particolari specie di uccelli di laguna, ospitando organismi acquatici resistenti ad emersioni temporanee. Insieme a barene e velme, nella laguna s'incontrano anche i bassi fondi, che sono elementi geomorfologici posti poco al di sotto del livello medio del mare ed adiacenti ai canali. Essi sono generalmente sommersi così che, a confronto delle barene, non presentano una vegetazione alofila. Questa mancanza di piante determina un'azione maggiore di erosione dei sedimenti, da parte della marea. Tra il 1970-1990, i bassi fondi si sono approfonditi di circa 7 millimetri, in media, per anno ed in alcune zone sono arrivati a 30 millimetri circa. In essi è presente un altro tipo di vegetazione, quale fanerogame, alghe e colonie microbiche e la loro struttura superficiale è maggiore in sabbia rispetto alla composizione delle barene (D'Alpaos, 2010). In Figura 3 si individuano le caratteristiche forme lagunari descritte precedentemente.



Figura 3. Morfologia lagunare.

In condizioni naturali, senza alcun intervento da parte dell'uomo, i sedimenti trasportati dagli affluenti che si depositavano nel bacino lagunare avrebbero trasformato la laguna, nel corso del tempo, in un tratto di terra ferma. Questo sarebbe stato il destino naturale della Laguna di Venezia senza il lavoro ininterrotto intrapreso durante il periodo storico in cui governava la Repubblica della Serenissima, quando furono deviati i corsi di alcuni fiumi, provocando l'arresto dei processi di deposizione naturale. Al contrario, i fenomeni erosivi dovuti ai flussi mareali, se non contrastati, potrebbero determinare una progressiva trasformazione dell'ambiente considerato, in un tratto di mare (Ravera, 2000).

La morfologia della laguna è notevolmente cambiata tra il 1970 e il 2000. L'aumento del tasso erosivo riflette i cambiamenti sia naturali sia antropici di questo periodo (Molinari et al., 2009). Mentre ai tempi della Repubblica Veneziana si cercò di arrestare il processo di interrimento della laguna, oggi l'opera dell'uomo consiste nell'arginare i fenomeni di erosione a cui la laguna è soggetta sia con il passare del tempo sia a causa della sottrazione degli apporti sedimentari di origine fluviale, operati nel passato. L'assetto morfologico lagunare attuale rappresenta il risultato di trasformazioni determinate sia dai processi naturali che dagli interventi antropici. Sarebbero necessari studi mirati di dettaglio per comprendere le importanti modificazioni delle tipologie morfologiche al fine di individuarne i processi di formazione. Nell'ultimo secolo è risultato evidente che l'aspetto della laguna si sia fortemente deteriorato a causa della continua riduzione delle superfici occupate da barene e dall'approfondimento dei fondali (Saretta et al., 2010). Questo fenomeno si rileva soprattutto nella parte centrale della laguna costituita da diversi canali che si propagano dalle bocche tidali del Lido e di Malamocco e dai grandi canali artificiali (Canale Malamocco-Marghera e canale Vittorio Emanuele III) che l'uomo ha creato per permettere alle navi di grandi dimensioni l'accesso ai porti interni (Figura 4).



Figura 4. I Pallini gialli indicano il percorso del canale Malamocco-Marghera; i pallini rossi indicano il percorso del canale Vittorio Emanuele III.

Molteplici risultano oggi le cause di cambiamento dell'aspetto del bacino lagunare; tra queste si possono individuare (D'Alpaos, 2010):

- 1) il degrado morfologico causato dal bilancio negativo di sedimento scambiato tra laguna e mare;
- 2) l'accrescimento della forza erosiva del moto ondoso e aumento delle capacità di trasporto delle correnti;
- 3) il livellamento dei fondali nei tratti dove la marea oggi assume caratteri del tutto simili a quelli propri del mare aperto;
- 4) la qualità scadente delle acque e dei sedimenti lagunari;
- 5) il moto ondoso dovuto al traffico acqueo che minaccia l'integrità del patrimonio ambientale.

E' in questo complesso contesto che si sviluppa l'obiettivo del lavoro di tesi, che parte dal presupposto di considerare il problema del traffico navale nella Laguna di Venezia come una delle

questioni ambientali più dibattute nel recente periodo. In particolar modo sono stati studiati gli effetti della navigazione attraverso il canale Malamocco-Marghera (Figura 4) e le sue conseguenze sulle zone limitrofe che, nel corso degli anni, hanno subito evidenti trasformazioni con fenomeni erosivi generalizzati.

La costruzione e il mantenimento del canale Malamocco-Marghera ha suscitato importanti discussioni riguardanti i cambiamenti morfo-dinamici e gli impatti ambientali sulla laguna. In seguito alla sua realizzazione si è osservato un incremento della risospensione dei sedimenti nelle aree adiacenti ai canali ed un generale approfondimento dei bassi fondali. Il fenomeno di erosione è aumentato, nelle aree limitrofe al canale stesso, a causa dell'onda che si crea al passaggio di una nave (Scarpa, 2014). Il traffico navale in queste aree della laguna diventa, così, di fondamentale importanza nell'evoluzione della morfologia.

Lo studio di tesi è proprio incentrato sulle variazioni morfologiche dovute al traffico navale nelle aree lagunari prossime a tale canale. Il canale Malamocco-Marghera, che ha origine dalla bocca di Malamocco, con profondità di circa 12 metri e larghezza di 60 metri, è delimitato ad Est da una barriera artificiale, che lo separa da una zona a basso fondale, ed a Ovest da una spiaggia creatasi dall'erosione della sponda di una struttura artificiale, chiamata cassa di colmata B. In particolare quest'area è stata scelta come sito di studio, in quanto presenta uno stato di degrado morfologico e sedimentario molto accentuato rispetto alle aree lagunari limitrofe.

Nel lavoro di tesi si è analizzato, nello specifico, la variazione della linea di riva della cassa di colmata B, localizzata nell'area a Sud di Fusina (Figura 4).

Lo studio è diviso in due parti. Nella **PRIMA PARTE** è stata fatta una revisione storica dell'area con l'analisi e l'interpretazione di materiali fotogrammetrici ed immagini satellitari che ricoprono il periodo dal 1954 al 2014 attraverso l'utilizzo di software GIS.

Nella **SECONDA PARTE** è stata studiata la situazione attuale della cassa di colmata B, attraverso osservazioni e raccolta di dati in campo e successiva analisi. Contemporaneamente sono stati prelevati campioni di sedimento per una caratterizzazione stratigrafica e granulometrica dei depositi, finalizzata all'interpretazione dei processi osservati.

L'obiettivo del lavoro di tesi è di calcolare l'erosione spazio-temporale della linea di riva della cassa di colmata B, attraverso l'analisi del materiale fotogrammetrico a disposizione dall'anno 1974 all'anno 2014. A tal fine è stata eseguita una serie di rilievi in campo per osservare e quantificare le variazioni attuali e confrontarle con l'evoluzione storica.

Sono stati raccolti campioni di sedimento allo scopo di analizzare e studiare la stratigrafia e la composizione granulometrica del profilo della cassa di colmata B. Queste analisi sono state effettuate per cercare di confrontare la quantità di sedimento eroso nell'area Nord, centro e Sud di tale cassa, con la stratigrafia e la composizione granulometrica del sedimento di cui sono costituite. Il lavoro di tesi si conclude con una stima preliminare, attraverso l'uso dei dati a disposizione, della quantità di sedimento che si è eroso dalla cassa di colmata B, nel periodo di tempo considerato nello studio.

3. Storia della Laguna di Venezia ed evoluzione nel tempo: subsidenza-eustatismo, erosione-sedimentazione

3.1 Origine della Laguna di Venezia

La Laguna di Venezia si è originata durante la trasgressione olocenica del Mare Adriatico ed è collocata a Nord-Est della Pianura Padana. Questo bacino sedimentario si è creato grazie agli apporti di sedimenti di origine alpina e appenninica che si accumularono durante l'epoca pleistocenica ([Brambati et al., 2003](#)). I depositi alluvionali e lagunari che si trovano oggi sotto la città di Venezia, documentano un passato di cambiamenti ambientali legati al clima ed al livello del mare ([Donnici et al., 2011](#)).

È stato dimostrato ([Gatto et Carbognin, 1981](#)) che la Laguna di Venezia è nata quasi 7-6 mila anni fa, durante la trasgressione flandriana nel corso del periodo olocenico. Infatti, durante questo periodo (epoca del Quaternario, successiva al Pleistocene) avvenne una fase di innalzamento del livello marino (chiamato trasgressione flandriana o versiliana), che si portò a circa 120 metri al di sotto del livello attuale, in contemporanea alla massima espansione glaciale del Wurm, accaduta tra i 31-18 mila anni fa. Seguì un periodo di deglaciazione ed il livello del mare si innalzò raggiungendo il massimo livello nell'arco di 15-11 mila anni fa. Infine, dopo questo periodo, la fase di eustatismo diminuì ed il livello del mare si portò vicino alla posizione attuale (come riferito inizialmente ai 7-6 mila anni).

Circa 2000 anni fa iniziò un miglioramento del clima. Tale fase portò il graduale innalzamento del livello del mare, ma causò anche importanti fenomeni erosivi e deposizionali, dovuti sicuramente allo scioglimento dei ghiacciai. Di conseguenza, i fiumi alimentati da un ingente apporto d'acqua trasportarono anche una grande quantità di detriti verso valle. In seguito, un successivo miglioramento climatico portò ad un'intensa fase alluvionale con il deposito di sedimenti fini ([Brambati et al., 2003](#)). In una fase successiva, nel territorio a cui appartiene la Laguna di Venezia, le condizioni climatiche e morfologiche iniziarono a stabilizzarsi per un lungo periodo di tempo (oltre 1000 anni). Durante questo periodo si crearono le condizioni tali che permisero la formazione del caranto, orizzonte impermeabile, che si è creato dalla sovra consolidazione di sedimenti limosi-argillosi. Alla fine della trasgressione flandriana, il caranto è stato ricoperto da sedimenti di origine

marina o continentale, a seconda del prevalere del dominio fluvio-palustre terrestre o di quello lagunare (Gatto et Previatello, 1974). Per quanto riguarda la datazione del caranto, le analisi effettuate fanno risalire la formazione dell'orizzonte a 13.000 anni fa, ovvero successivamente all'ultima fase alluvionale pleistocenica ed alla deposizione della coltre di sedimenti limoso argillosi (Vascellari, 2002). Pertanto, il caranto viene considerato un livello guida nella determinazione del passaggio tra i materiali appartenenti all'epoca pleistocenica ed i sovrastanti sedimenti olocenici (Donnici et al., 2011). Intorno ai 4-3 mila anni fa, avvenne un episodio temporaneo di regressione marina che fece tornare la laguna ad un ambiente palustre ed una successiva trasgressione riportò la laguna come si presenta allo stato attuale (Gatto, Previatello, 1974; Scortegagna, 2008).

L'unione di processi erosivi e deposizionali con i fenomeni di subsidenza e eustatismo, che hanno caratterizzato la formazione della Laguna di Venezia, devono essere considerati associati alle azioni compiute dall'uomo in laguna. L'intervento dell'uomo è cominciato con i lavori, realizzati a partire dal 1400, che hanno evitato l'interramento della laguna ad opera dei fiumi ed è proseguito con quelli eseguiti in anni recenti al fine di creare uno sviluppo economico ed industriale dell'area lagunare.

Ai tempi della Serenissima, dopo l'istituzione del Magistrato alle Acque nel 1501 sono stati numerosi gli interventi da parte dei veneziani per proteggere la laguna dai sedimenti portati dai fiumi. La nascita di questo ente prevedeva di salvaguardare Venezia con un programma di interventi idraulici allo scopo di evitare il naturale interrimento lagunare. All'inizio del Quattordicesimo Secolo, all'interno della Laguna di Venezia sfociavano numerosi fiumi: Brenta e Bacchiglione, che confluivano in laguna; Piave e Sile, prossimi alle bocche di porto. Alla fine del secolo iniziarono le operazioni di deviazione del fiume Brenta considerato il fattore principale dell'interrimento lagunare. Pertanto, le acque del fiume furono deviate a Sud verso il porto di Malamocco, attraverso lo scavo del canale Maggiore (D'Alpaos, 2010). Le opere attuate dall'uomo dal '500 al '900, furono la deviazione dei fiumi e la costruzione dei "Murazzi" lungo il litorale da Chioggia al Cavallino (Bascieri, 1996). Nel Diciannovesimo Secolo, invece, gli interventi furono mirati a potenziare la funzione portuale e commerciale di Venezia e di tutta la laguna (Favero et al, 1988).

Gli interventi sopra citati hanno sottoposto la laguna a sostanziali modifiche dei processi sedimentari naturali. Dopo molte indecisioni la Repubblica di Venezia decise che il Brenta dovesse essere estromesso dalla laguna e portato direttamente a mare assieme al fiume Bacchiglione. L'estromissione di questi fiumi determinò cambiamenti morfologici significativi per la Laguna di Venezia, proprio perché i fenomeni di deposito dei sedimenti introdotti dai fiumi vennero a

diminuire, creando però un aumento di fenomeni di erosione, inizialmente a sviluppo orizzontale e solo dopo con forti componenti a sviluppo verticale (D'Alpaos, 2010).

Per mantenere le bocche di porto navigabili, furono realizzati i moli foranei (dal 1810 Malamocco, 1900 Lido, 1930 Chioggia). Questi consistono in dighe che hanno lo scopo di convogliare l'acqua al di fuori delle bocche. In questo modo i litorali furono difesi dalla forza del mare, ma venne impedita anche l'entrata in laguna di sedimenti (Cavazzoni, 1995). Le trasformazioni morfologiche dovute alla costruzione dei moli foranei sono state oggetto di studio dell'autore Gatto (1984). Oltre ai fenomeni erosivi delle correnti marine e del moto ondoso, collegate alla presenza dei moli, Gatto (1984) individua come elementi di criticità per la stabilità dei litorali anche la subsidenza e la forte riduzione dell'apporto solido dei principali fiumi che sfociano lungo la costa veneta. Come conseguenza ne deriva un indebolimento del sistema litorale (Brambati, 1987) associato ad un approfondimento del fondale che contribuisce all'instabilità della laguna (Carbognin et al., 1995).

3.2 La subsidenza e l'eustatismo

Le cause principali di un cambiamento morfologico in laguna sono: la subsidenza (abbassamento del livello del suolo), l'eustatismo (innalzamento del livello del mare), la sedimentazione e i fenomeni erosivi. L'alternarsi di questi processi determina l'evoluzione lagunare.

Il fenomeno di subsidenza può avere origini sia naturali che antropiche. Nel primo caso le stime sono state fatte attraverso analisi al radiocarbonio, dei sedimenti pleistocenici ed olocenici prelevati nella laguna e nei suoi litorali (Bortolami et al., 1985). Kent e collaboratori (2002) hanno individuato un tasso di subsidenza media inferiore a 0,5 mm/anno, dovuto principalmente ai processi tettonici. I loro studi hanno evidenziato che questo valore è inferiore alla subsidenza che si è verificata nel tardo Pleistocene-Olocene (tasso medio di 1,3 mm/anno), che indicava i processi di consolidazione naturale dei recenti depositi. Il tasso medio di 1,3 mm/anno, però, è sceso nel corso degli ultimi secoli, raggiungendo il valore attuale di 0-0,5 mm/anno (Gatto et Carbognin, 1981; Carbognin et al., 1995, 2003). La subsidenza del suolo causata dal consolidamento naturale fu fondamentale durante le fasi iniziali nell'evoluzione della laguna (Brambati et al., 2003), in quanto il processo che ha causato una concentrazione maggiore di sale nei sedimenti argillosi del substrato ha indotto un'azione di compattazione elettrochimica, che ha portato ad un ulteriore abbassamento del livello del suolo nella Laguna di Venezia (Gatto e Carbognin, 1981).

Il fenomeno di subsidenza antropica, invece, è dovuto principalmente all'emungimento delle acque di falda per uso industriale. E' cominciato nel 1930 con un picco di prelievo tra il 1950 e il 1970. Sommandolo al tasso di subsidenza naturale si è arrivati ad un massimo di 17 mm/anno, che è stato registrato tra il 1968-1969 nella zona industriale di Porto Marghera (Brambati et al., 2003). Successivamente a questa fase critica di subsidenza si è verificato un miglioramento dovuto alla chiusura dei pozzi artesiani¹ e alla diversificazione dell'approvvigionamento idrico.

Il fenomeno di subsidenza dell'area lagunare veneziana è associato anche all'innalzamento del livello del mare, processo che è attualmente in atto, dovuto ai cambiamenti climatici. Nel corso del Ventesimo Secolo il livello del mare ha subito un innalzamento relativo di 23 centimetri. Questo valore è stato ottenuto considerando sia la subsidenza di 12 centimetri (3 centimetri causati dalla subsidenza naturale e 9 centimetri dalla subsidenza antropica) sia gli 11 centimetri dovuti al fenomeno di eustatismo (Brambati et al., 2003). Considerando solo l'eustatismo, la stima più attendibile per l'innalzamento del livello del mare in Adriatico, degli ultimi cento anni, è data dagli studi di Carbognin e Taroni (1996). Escludendo la subsidenza, l'eustatismo ha avuto un tasso di 1,13 mm/anno, valore che è in correlazione al cambiamento climatico. Il relativo innalzamento di 23 centimetri del mare in laguna ha creato una generale preoccupazione, dovuta a repentini fenomeni d'inondazione che hanno portato danni alla popolazione ed alla città di Venezia. Infatti, l'innalzamento del livello marino (Ciavola et al., 2002) ha inciso nei siti costieri ed ha causato la scomparsa di barene (Bellucci et al., 2007) ed ha portato a cambiamenti dell'idrodinamica all'interno della laguna (Brambati et al., 2003). Nell'insieme, tutti questi fattori generano un insieme di effetti negativi presenti in laguna (Sfriso et al., 2005), quali l'erosione dei bassi fondali e l'approfondimento dei canali.

3.3 La sedimentazione e l'erosione

I fiumi che confluiscono nel bacino settentrionale danno un apporto alla laguna che è stato calcolato essere in media più di due terzi del totale di acqua dolce immesso, circa $35 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1}$ (Collavini et al., 2005; Zuliani et al., 2005). Studi effettuati sulla riduzione nell'apporto di sedimento in laguna (a causa della deviazione dei fiumi) hanno stimato che è stato introdotto nel bacino lagunare, negli

¹ Pozzo artesiano: è un [pozzo](#) naturalmente effluente: le acque sotterranee arrivano direttamente in superficie senza un uso meccanico di pompe sommerse.

ultimi tre decenni, solamente sedimento fine (Zonta et al., 2005). Gli stessi autori riportano studi effettuati sulla quantità totale di sedimenti trasportati dai fiumi in laguna con una stima di 32×10^3 tonnellate/anno. Il grande ingresso di sedimenti fluviali che avveniva in passato è stato quasi completamente eliminato e i frangiflutti costruiti per difendere le insenature hanno notevolmente ridotto l'ingresso di elevate quantità di sedimenti marini nella laguna (Day et al., 1998). Le analisi, su larga scala per misurare l'apporto di sedimento al sistema, possono essere ottenute grazie alla sequenza di rilievi batimetrici attuati a lungo periodo (Jaffe et al., 2007). Cambiamenti importanti sulla morfologia lagunare sono dovuti anche alla variazione del tasso di sedimentazione. Dal Quattordicesimo al Ventunesimo Secolo il tasso medio di sedimentazione è stato calcolato circa di 0,5 millimetri/anno (Serandrei Barbaro et al., 2006).

Attualmente, nella Laguna di Venezia l'erosione dei fondali e delle barene a causa dell'azione del vento e della marea è sommata al fenomeno del traffico d'acqueo nei canali. I fattori che hanno portato a questo continuo processo erosivo sono numerosi e alcuni risalgono a molti secoli fa. Anche il fenomeno dell'acqua alta in laguna è una conseguenza delle condizioni morfologiche e idrodinamiche presenti nell'ambiente. Con la deviazione dei fiumi dalla laguna è mancata, infatti, la sedimentazione dall'esterno e i processi erosivi sono stati maggiori rispetto ai processi di deposito, così che l'evoluzione naturale lagunare si è invertita rispetto a ciò che è avvenuto in passato.

Fino alla fine del 1800 il fenomeno erosivo si è verificato con processi relativamente lenti. In questo periodo la quantità di sedimenti liberata per l'erosione delle barene subentra al fenomeno d'approfondimento, apportando al sistema acqueo i volumi di sedimenti necessari a mantenere la profondità dei fondali quasi costante. A partire dal 1900, però, le barene sono state erose con crescente intensità ed i volumi di sedimenti liberati non sono più stati in grado di garantire la stabilità dinamica dei fondali (D'Alpaos, 2010).

Un confronto sulla morfologia della Laguna di Venezia, tra il 1811 e il 2003, è visibile in Figura 5.

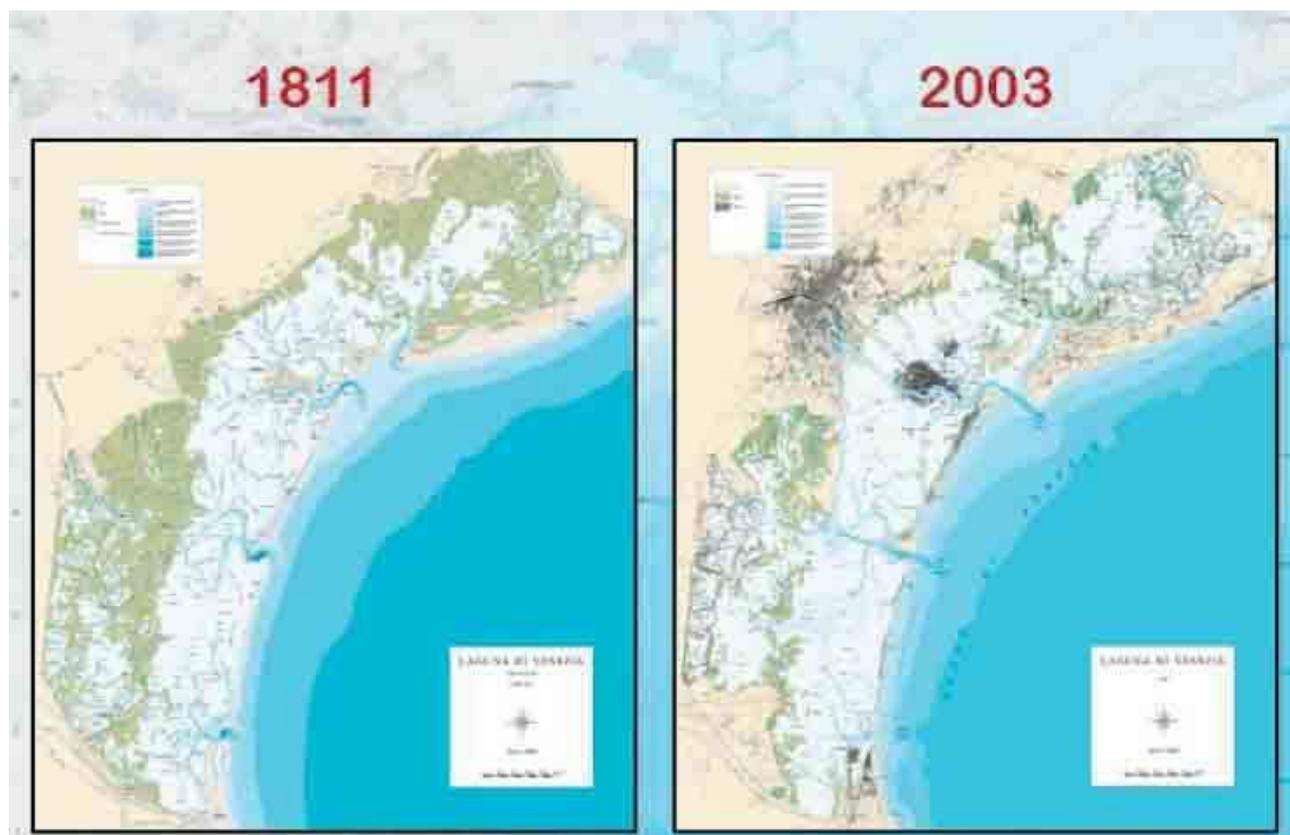


Figura 5. Cambiamenti morfologici della Laguna di Venezia, 1811-2003, Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque. In verde aree di barene.

Successivamente, nei primi del Novecento, l'erosione delle barene continua; ma si determina un aumento in intensità. Questo crea un'insufficienza nella quantità di sedimenti, erosi dalle barene, che si depositano, a loro volta, nei bassi fondali. In questo modo non possono essere mantenute le profondità originarie dei fondali delle zone d'acqua. Sotto l'impulso di forze esterne i bassifondi della laguna hanno incominciato ad erodersi, causando un aumento della profondità. Fino ai primi anni del 1900 il tasso di perdita è stato moderato: in media $0,34 \text{ km}^2/\text{anno}$. Pertanto se la superficie delle barene stimata all'inizio del Seicento era di circa 255 km^2 , nei primi anni del Novecento si arriva a 150 km^2 .

Un cambiamento importante nel tasso di erosione delle barene si riscontra durante il Novecento. Dall'inizio del Ventesimo Secolo al Ventunesimo le superfici di barene hanno subito una riduzione dell'area da 150 km^2 a circa 40 km^2 a causa di differenti processi come l'erosione, la bonifica di estese aree, l'inquinamento e il fenomeno di subsidenza naturale e antropico (Favero, 1992; Scarton et al., 2000; Bonometto, 2005). Già nel 1968 più del 50% della laguna era stata bonificata (160 km^2) con l'obiettivo di costruire aree adatte alla piscicoltura o alla costruzione di una zona industriale

(le casse di colmata) (Molinaroli et al., 2009). La superficie delle barene si è ridotta di oltre il 50%, da 68 Km² nel 1927 a 32 km² nel 2002. Un progressivo approfondimento dei bassi fondali della laguna è stato inoltre registrato soprattutto in una fascia batimetrica tra 0,75 e 2 metri di profondità (da 88 a 206 km² tra il 1970 e il 2002) (Saretta et al., 2010).

La causa dell'erosione delle barene va ricercata nella costruzione dei moli alle bocche di porto (1872-1935), nello scavo dei canali Vittorio Emanuele (1925) e Malamocco-Marghera (1961) (Molinaroli et al., 2009).

La morfologia della Laguna di Venezia è cambiata notevolmente tra il 1970 e il 2000, sia per cause naturali che antropiche. Le batimetrie del 2000 risultano approfondite rispetto ai rilievi batimetrici precedenti (Saretta et al., 2010), fatto probabilmente accentuato dall'apertura del canale navigabile che collega Malamocco a Marghera. Le profondità maggiori rispetto al 1927 sono dovute ad uno scambio maggiore di sedimenti con il mare attraverso la bocca di Malamocco. In conseguenza a questo fenomeno il bacino della laguna centrale si approfondisce rispetto alle aree dominate dalla bocca tidale di Lido e Chioggia. In Figura 6 si può notare come i bassifondi adiacenti ai canali si siano approfonditi in modo maggiore nella laguna centrale e la zona che rimane compresa tra le bocche di porto e i grandi canali navigabili ha profondità di circa 2,5/2 metri in media, di certo superiori ai 0,25/0,1 metri in media del 1927.

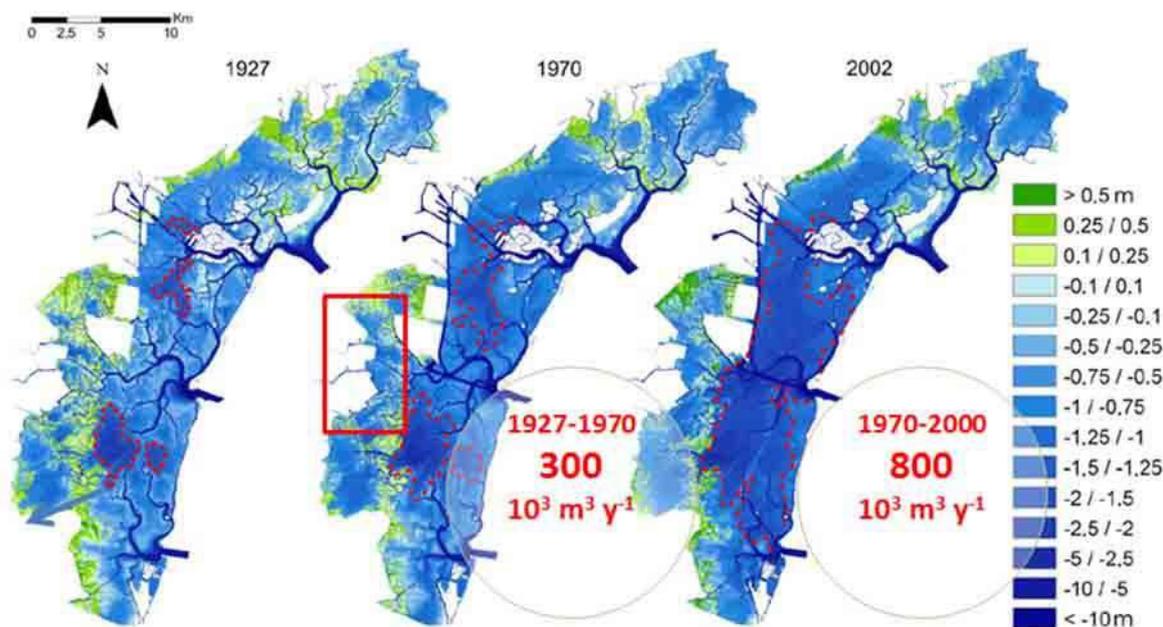


Figura 6. Batimetrie della Laguna di Venezia tra il 1927 e 2002 (Saretta et al., 2010).

Per molte concomitanze di cause avviene una perdita verso il mare di circa 1 milione di metri cubi di sedimento all'anno, con un'omogeneizzazione delle quote dei canali e perdita di barene. Anche la profondità media della laguna centrale è sotto l'influenza di fattori non solo naturali ma, senza dubbio, pure antropici (Saretta et al., 2010). In Figura 7 è rappresentata la situazione di erosione in laguna dal 1927 al 2002. Le zone in rosso sono maggiormente soggette ad erosione e la loro estensione è aumentata dal 1970 al 2002, mentre le aree in verde indicano le zone stabili per la deposizione di sedimenti in laguna. Nell'area evidenziata dal cerchio in giallo si trova la zona studiata in questo lavoro di tesi. Nella Figura 7 si può vedere chiaramente come il processo di erosione sia aumentato dal 1927 al 2002. L'immagine mette in relazione i cambiamenti geomorfologici avvenuti nel tempo a causa di un impatto maggiore dovuto senz'altro alle opere dell'uomo.

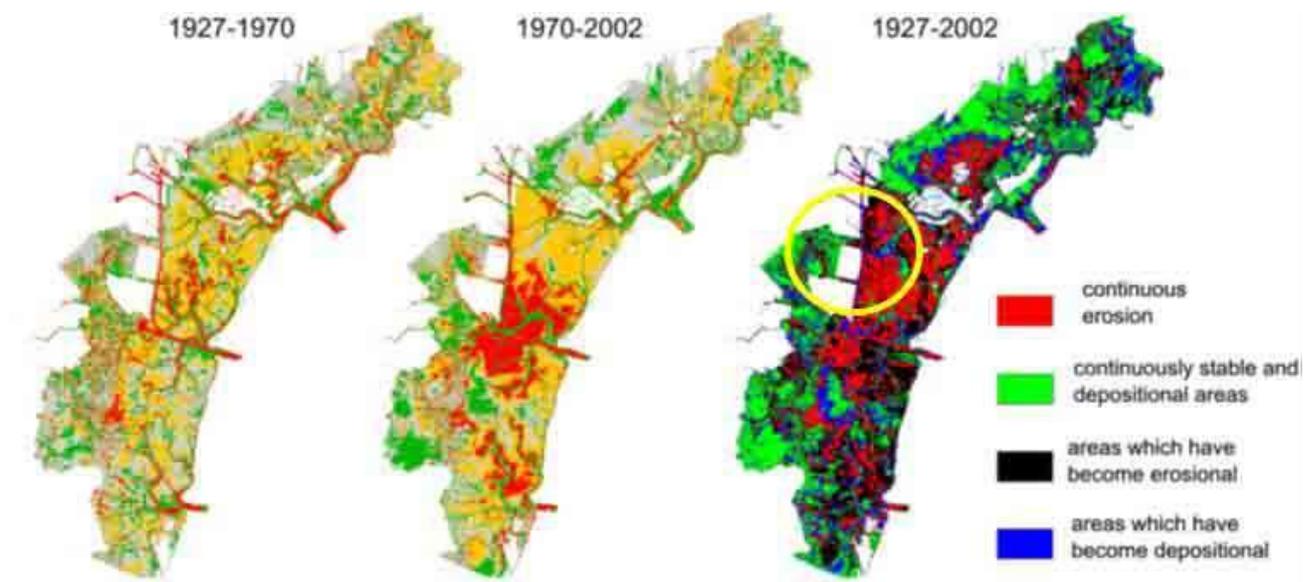


Figura 7. Zone di erosione nella Laguna di Venezia dal 1927 al 2002 (Saretta et al., 2010).

L'erosione delle barene è aumentata a causa dell'eccessivo moto ondoso generato dalle navi di passaggio e l'approfondimento dei fondali lagunari è aumentato anche dall'impatto con i fondali degli attrezzi usati per la pesca dei molluschi in laguna. Questi mettono in sospensione il sedimento che poi viene trasportato a mare con la marea uscente, attraverso le insenature delle bocche di porto (Saretta et al., 2010).

4. Area di studio

4.1 Casse di colmata A, B, D-E

All'inizio del ventesimo secolo venne costruita la prima parte di quella che è l'importante polo Industriale di Marghera. Il progetto d'industrializzazione venne intrapreso dal Conte Giuseppe Volpi nel diciannovesimo secolo; fu inoltre fondata la città di Marghera, detta città giardino, per ospitare le maestranze che dalle campagne si spostavano verso il nuovo centro industriale. Le strutture della nuova area industriale furono inizialmente collegate mediante escavo del canale Vittorio Emanuele III alla Stazione Marittima. Il trasporto di materie prime e di prodotti industriali sia via terra che via mare divenne fondamentale; quindi, insieme allo sviluppo di un porto industriale, si procedette alla trasformazione di estese zone prima occupate da barene, canali, velme e bassi fondi, in aree destinate alle lavorazioni industriali. Queste zone ottenute mediante imbonimento delle aree lagunari sono propriamente definite con il termine "Cassa di Colmata" ([Paolini, 2012](#)). La I Zona Industriale, terminata negli anni '30, nacque dalla bonifica di paludi e zone di barena, con i fanghi provenienti dallo scavo dei canali. Negli anni '50, per ampliare l'area produttiva già esistente, fu costruita la II Zona Industriale e vennero bonificate nuovamente estese aree lagunari con la messa in opera delle casse di colmata. Queste furono realizzate, a differenza della prima area, con i fanghi provenienti dagli scarti industriali della I Zona Industriale ([Master Plan, 2004](#)).

Le fotografie storiche in Figura 8 mostrano la situazione esistente prima e dopo la realizzazione della cassa di colmata A, la cui costruzione è iniziata a partire dal 1963. Questa risulta essere la prima cassa costruita per la realizzazione della III Zona Industriale ed è la più vicina alle aree della II Zona Industriale di Porto Marghera. Per la costruzione della I Zona Industriale vennero sottratti alla laguna circa 500 ettari, mentre per la II e III Zona Industriale furono imboniti circa 1700 ettari di laguna ([Cavazzoni, 1995](#)).

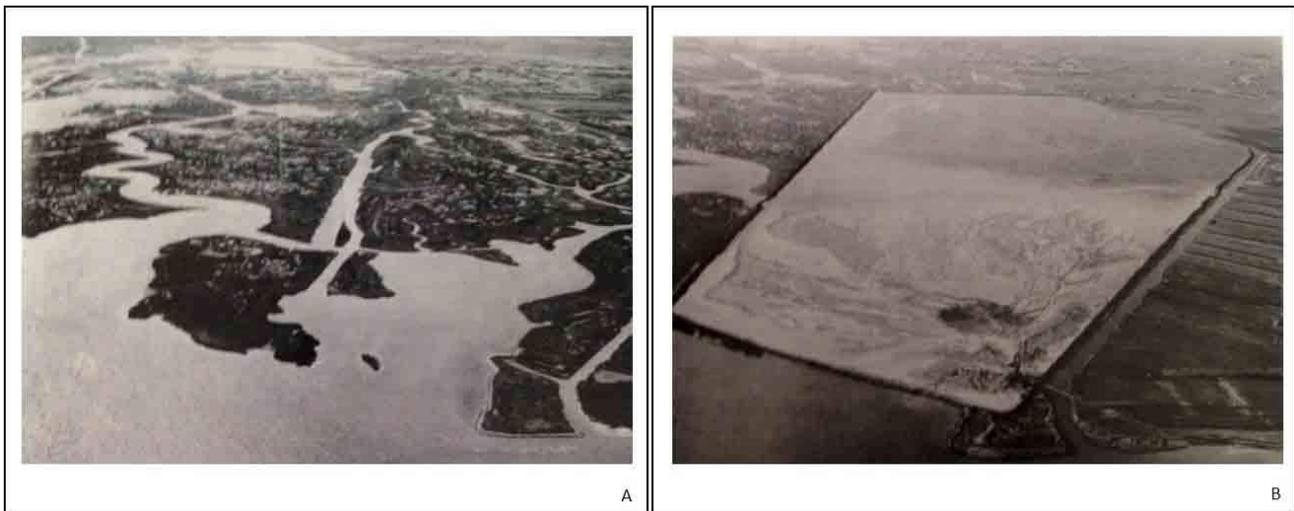


Figura 8. Zona di barene e la cassa di colmata A, prima (A) e dopo la sua realizzazione (B).

Nel periodo tra il 1961 e il 1969 venne escavato il canale Malamocco-Marghera per permettere alle grandi petroliere e navi cargo di scaricare il loro carico direttamente nelle zone limitrofe alle aree di lavorazione e nell'area industriale di Porto Marghera. I primi lavori per consentire l'accesso delle navi dalla bocca di Malamocco erano già stati intrapresi nell'Ottocento. Infatti, tra il 1840 e il 1870 furono costruite le dighe foranee per approfondire il fondale. In seguito a questi interventi il canale portuale raggiunse una profondità di 10 metri e nella seconda metà del Novecento la profondità fu resa maggiore per consentire l'accesso di navi di maggiori dimensioni. Solo con l'escavo del canale Malamocco-Marghera, la profondità nella zona della bocca di porto raggiunse i 15 metri. Il "Canale dei Petroli", così è stato chiamato il canale Malamocco-Marghera, ha inizio dalla bocca di porto di Malamocco e termina presso la I e II Zona Industriale di Porto Marghera.

Con i fanghi che furono rimossi per l'escavo del canale, per raggiungere la profondità di 12 metri idonea al passaggio delle navi in sicurezza, furono realizzate a partire dalla metà degli anni '60 altre casse di colmata che, in seguito, avrebbero permesso una successiva espansione dell'area industriale al di là del Naviglio del Brenta. Queste nuove aree perimetrare furono imbonite fino al confine della conterminazione lagunare, fuoriuscendo dal perimetro delle casse di colmata, distruggendo i laghi esistenti in quest'area (D'Alpaos, 2010).

Le casse di colmata costruite con circa 25.000.000 m³ di fango occupano una superficie di 11,36 km² suddivise in: a Nord, cassa di colmata A di 160 ha, al Centro, cassa di colmata B di 380 ha, e a Sud, cassa D-E di 750 ha. La cassa C, che doveva essere situata ad Ovest della cassa B, non fu mai realizzata. Per la costruzione delle casse sono state utilizzate draghe idro-refluenti che prelevando i fanghi dal canale in escavazione li depositavano direttamente sull'area da imbonire. I segni nell'uso

di questo sistema d'imbonimento dell'area saranno visibili nelle prime fotografie aeree a disposizione (vedi capitolo 5.1), che mostrano una superficie ricolma di solchi bianchi a forma circolare. Le casse di colmata B e D-E sono considerate delle isole, mentre la cassa di colmata A è considerata parte della terraferma a causa della sua contiguità con essa. Attualmente le casse di colmata B e D-E sono state modificate attraverso la realizzazione al loro interno di un sistema di canali. Nel corso del tempo sono stati eseguiti diversi interventi per il ripristino delle condizioni idrologiche nelle zone retrostanti le casse di colmata; nello specifico è stato realizzato un nuovo reticolo idrografico attraverso la costruzione dei canali Taglio Vecchio e Mattoni nella cassa D-E e dei canali Volpego e Fiumesino nella cassa B, ricollegando il lago dei Teneri e la laguna (Figura 9). Si è avviata in questo modo una rinaturalizzazione della superficie delle casse stesse.

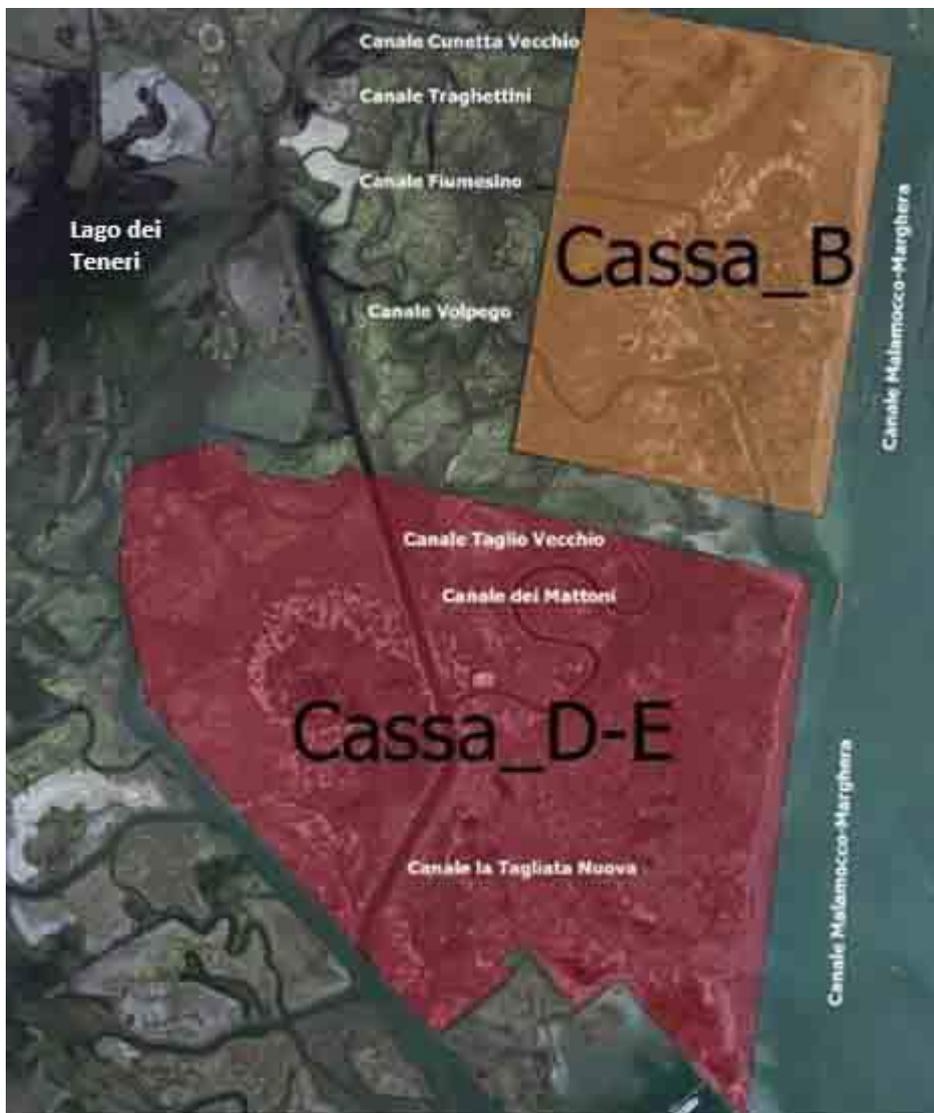


Figura 9. Reticolo idrografico nella cassa di colmata B e D-E.

Le casse di colmata rappresentano oggi un esempio peculiare di ecosistema riqualificato che ospita al suo interno diverse specie di piante e animali (Figura 10).



Figura 10. Rinaturalizzazione della cassa di colmata B. Fotografia del 16 luglio 2014.

La cassa A, prossima alla II Zona Industriale, è la sola che sia stata completata interamente, giacché le altre zone, pur essendo parzialmente perimetrate, presentano ancora ampie superfici non completamente imbonite.

L'intento era di far sorgere la III Zona Industriale di Porto Marghera, ma i lavori furono sospesi completamente nel 1969, a causa dell'alluvione che colpì Venezia il 4 novembre del 1966. In questo giorno la marea raggiunse il livello di 194 centimetri e causò ingenti danni alla città, la cui causa fu attribuita, in parte, alla costruzione delle casse di colmata. Si arrivò a considerare in maniera negativa i cambiamenti apportati in laguna durante la costruzione delle zone industriali a Marghera e così terminarono definitivamente i lavori della costruzione della III Zona industriale. In seguito all'emanazione delle leggi Speciali per Venezia (Legge N.171, 1973; Legge N.798, 1984; Legge N.139, 1992), i progetti di riqualificazione industriale relativi alle casse di colmata furono abbandonati, ad

eccezione di una porzione nella cassa D-E, in cui è stato costruito il terminal petrolifero di San Leonardo.

Le casse di colmata con il tempo hanno sviluppato al loro interno un mosaico ambientale complesso e variegato legato alla natura del substrato, alle sue differenze in termini di spettro granulometrico dei sedimenti utilizzati per l'imbonimento e al diverso grado di salinità delle acque di circolazione. Si sono quindi attivati processi naturali di colonizzazione da parte di animali e piante. Queste aree sono attualmente interne alle Zone di Protezione Speciale dell'Unione Europea (ZPS Laguna di Venezia) e sono considerate grandi zone di transizione tra l'ambiente antropico e lagunare.

Da un punto di vista geografico i confini delle casse di colmata (Figura 11) sono le frazioni di Fusina a Nord e la Laguna di Venezia ad Est (il canale Malamocco-Marghera). Nel dettaglio: a Nord l'area è delimitata dal canale Bondante di Sotto e dal canale Fossetta Barambani; a Sud-Est è delimitata dal canale Tagliata Nuova, che sfocia nel bacino di Malamocco; a Sud invece la delimitazione è data dal canale Darsena di S. Leonardo. Le casse di colmata sono localizzate ad una quota topografica pari a circa 1,5-2,0 metri sopra il livello medio del mare. La composizione granulometrica dei fanghi utilizzata per la costruzione delle casse di colmata risulta fortemente disomogenea, data la differente provenienza dei fanghi stessi. Questa differenziazione si ripercuote per tanto nella distribuzione all'interno della cassa di colmata B, caratterizzata da differenti tipologie di sedimento (vedi capitolo 7.2).

Nello specifico si possono riconoscere diversi ambiti all'interno delle casse. La zona A è formata da due parti: la più interna è prossima al canale Bondante di Sotto e alla Fossetta dei Barambani che la separano dalla terra ferma; la parte più esterna, chiamata A o A1, è adiacente al canale Malamocco-Marghera. Delle tre casse essa risulta essere la meno estesa ed è l'unica che può essere raggiunta da terra, perché una parte della Fossetta dei Barambani è stata interrata.

La cassa di colmata A occupa circa 160 ettari, presenta una forma subtrapezoidale e si trova adiacente al canale Avesa a Sud, il quale sfocia nel bacino di Sant'Angelo; questa è l'unica cassa di colmata considerata terraferma, dove ci sono stati continui interventi da parte dell'uomo, che ne hanno impedito la rinaturalizzazione.

Dalle indagini stratigrafiche disponibili (www.regione.veneto.it/web/ambiente-e-territorio/la-cassa-di-colmata-a) si evince che il materiale con cui è stata costruita la cassa di colmata A è costituito da terreni limosi argillosi, caratterizzati nella parte superficiale dalla presenza di radici vegetali e materiale organico. Sono frequenti le intercalazioni sabbiose ed attualmente la superficie di circa 110 ettari è occupata da un impianto di fitodepurazione. La cassa di colmata A è stata

costruita con sedimento che è stato scavato nel tratto del canale Fusina-Marghera, nella zona prossima alla stessa cassa di colmata. La cassa è costituita da una percentuale minore in sabbia, rispetto alle casse di colmata B e D-E, che sono state costruite con sedimento prelevato in prossimità della bocca di porto di Malamocco, con una composizione maggiore di sabbia (Roccaforte et al., 2002).

La cassa di colmata B occupa circa 380 ettari ed è situata tra la cassa A, a Nord, dove scorre il canale Cunetta e la cassa D-E, a Sud, separata da quest'ultima da una porzione di laguna. La cassa di colmata B è l'area che comprende il sito di studio del lavoro di tesi. In particolare, in quest'ambito è stata studiata la linea di riva della cassa di colmata B che fa da sponda al canale Malamocco-Marghera. Nell'area sono presenti diversi canali interni (canale Volpego e il canale Traghettoni) che si diramano nella parte di laguna definita "morta" (Figura 11). Tra le tre casse di colmata costruite, essa raggiunge le quote topografiche più elevate arrivando a circa 3 metri di altezza dal livello medio del mare. La zona ad Ovest è stata imbonita invece con un minor volume di materiale e per questo motivo è più bassa, soggetta ad un minor grado di erosione e di risospensione di sedimenti (Rado, 2014). Il fenomeno erosivo più importante ai danni della cassa di colmata B è sicuramente quello che sta avvenendo ormai da molti anni lungo il lato Est, a ridosso del canale Malamocco-Marghera. Nei capitoli successivi verrà trattato nel dettaglio questo particolare fenomeno che ha portato nel corso degli anni ad una perdita importante, in termini areali, della cassa stessa (vedi capitolo 6 e 8.5).

La cassa di colmata D-E, è stata realizzata per ultima ed è posizionata più a Sud rispetto alle altre. Viene considerata una cassa unica per la continuità e per le caratteristiche strutturali e morfologiche, anche se in origine era costituita da due casse adiacenti. A Nord l'area è delimitata dalla cassa di colmata B, ad Est dal canale Malamocco-Marghera, a Sud dal canale Tagliata Nuova e da un complesso e articolato sistema di barene, canali e bassifondi. La costruzione dei confini della cassa D-E iniziò nel 1965 e durò complessivamente un anno; la realizzazione degli argini della cassa terminarono solo nel 1967. L'estensione totale della cassa è di circa 750 ettari, valore maggiore rispetto alle altre due aree considerate; la realizzazione ha avuto luogo, come per le altre casse, su terreni formati da precedenti barene naturali. Osservando l'area arginata ed imbonita partendo da Nord (Figura 11), si nota come essa sia attraversata dal canale Taglio Vecchio e dal canale dei Mattoni; questa è l'unica cassa che nella porzione a Sud presenta un'area industrializzata, chiamata Darsena San Leonardo, costruita in origine come punto di attracco per le petroliere entranti nel canale Malamocco-Marghera.

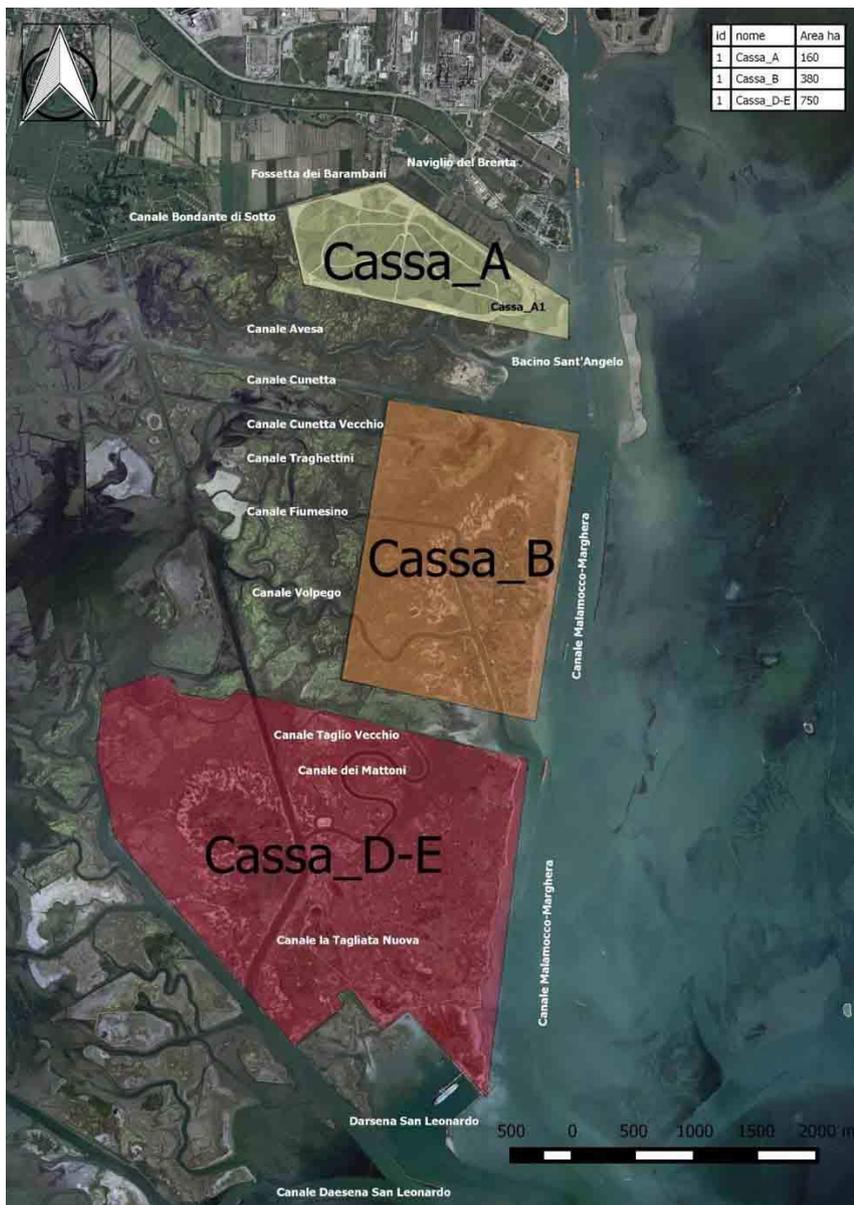


Figura 11. Mappa delle casse di colmata A, B, D-E.

La cassa di colmata D-E presenta alcune caratteristiche ambientali peculiari che permettono al suo interno l'insediamento di numerosi tipi di piante e animali. Le zone a contatto con l'acqua salmastra della laguna possono ospitare piante alofile, tipiche della barena, mentre all'interno della cassa di colmata si ritrovano aree depresse con la presenza di acqua dolce, freatica o meteorica, caratterizzate da vegetazione tipica di ambienti sia di acque dolci che salmastre (www.ecomuseoterredelbrenta.it/pagina.asp?ID=73). Per la valorizzazione delle casse di colmata a livello ambientale, ultimamente, si è ipotizzato lo sfruttamento del percorso naturalistico esistente, con punti di osservazione dell'avifauna. Dal punto di vista biologico è da considerare che il suolo delle casse di colmata non è adatto ad un facile insediamento di piante e animali, infatti, la maggior parte di sedimento che costituisce la cassa, deriva dal fango escavato dal Canale dei Petroli, anche

a elevate profondità (12 metri). Questa condizione fa sì che il sedimento escavato abbia una granulometria molto fine, privo di sostanza organica e ossigeno (come lo sono in generale i fondali lagunari) ed inoltre è ricco di salsedine. Nonostante queste condizioni critiche, con il passare degli anni è avvenuta una ricolonizzazione floro-faunistica di tutte le casse di colmata.

4.2 Il canale Malamocco-Marghera e l’impatto delle navi cargo

Considerando i canali più importanti per la navigazione, essi sono: il canale Vittorio Emanuele III (profondità media 7 metri, dragato nel 1926), che congiunge Marghera alla Giudecca e il canale Malamocco-Marghera, chiamato anche Canale dei Petroli; quest’ultimo consente l’ingresso in laguna dal Mare Adriatico di navi di grandi dimensioni, portacontainer e petroliere. Il tracciato del canale è visibile in Figura 12, nell’immagine satellitare del 2008. La profondità dei canali deve però essere mantenuta da un programma di continuo dragaggio e manutenzione; questi canali caratterizzano in particolar modo la laguna centrale, i suoi margini e l’area prospiciente la bocca di porto di Malamocco.

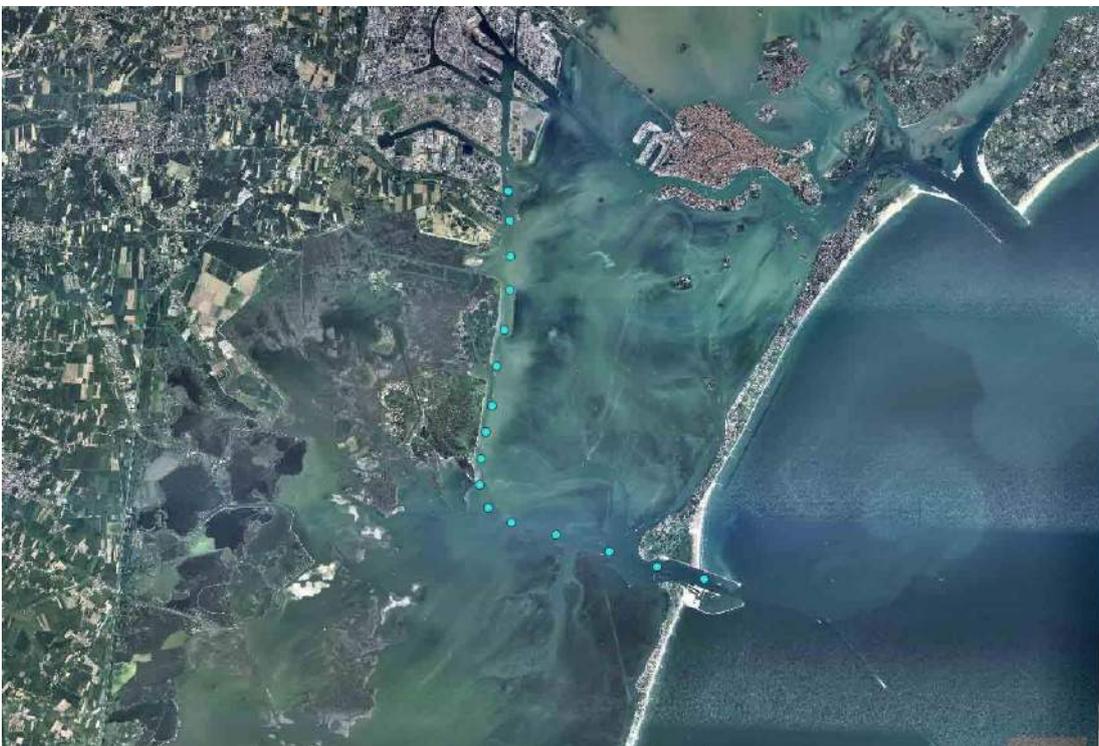


Figura 12. Il canale Malamocco-Marghera. I pallini azzurri evidenziano il tracciato del canale (Google Earth 2008).

I canali artificiali hanno un tracciato semi-rettilineo che molto si differenzia dalla forma dei canali naturali, quest'ultimi caratterizzati da andamenti meandrici (Figura 13). In questa immagine il cerchio blu evidenzia l'area che sarà imbonita per la costruzione della cassa di colmata B. Le barene preesistenti (es. le Motte di Volpego) indicate dalla freccia blu, scompariranno negli anni a seguire la costruzione del canale Malamocco-Marghera (vedi capitolo 5.2). La costruzione del Canale dei Petroli andò ad intersecare alcuni grandi canali naturali presenti nell'area tra cui il canale Melison, ed il canale dei Molini, indicati dalle frecce rosse sempre in Figura 13. Nel primo tratto il canale Malamocco-Marghera segue il tracciato naturale dei canali che si diramano dalla bocca di porto di Malamocco; nel tratto successivo la nuova via d'acqua si dispone seguendo una direzione del tutto anomala, tagliando quasi ortogonalmente la rete di drenaggio naturale e creando, dal punto di vista idrodinamico, importanti modificazioni dell'originale assetto del campo di moto (D'Alpaos, 2010).

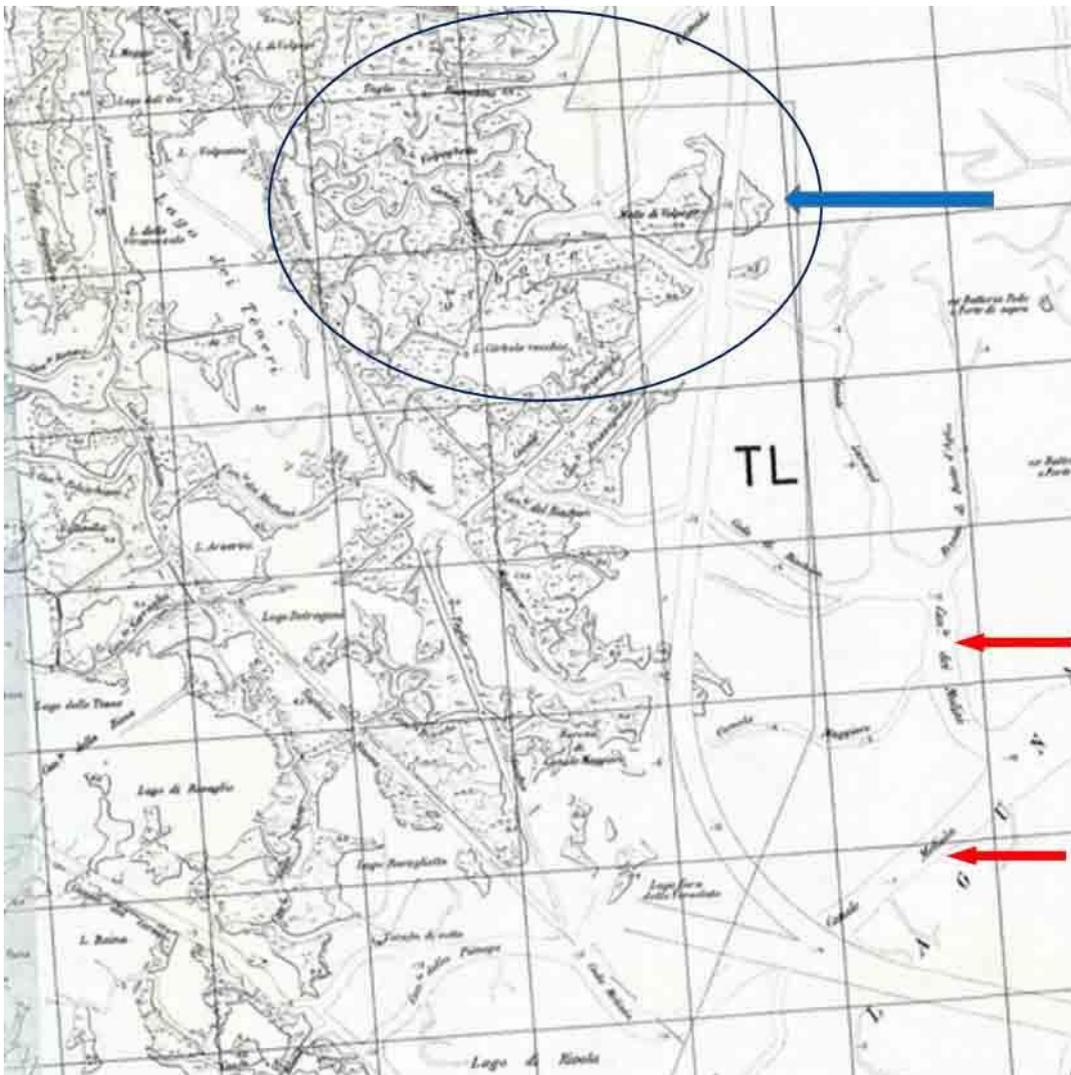


Figura 13. Tavoletta 1:25000 IGM Veneto. Taglio del canale Malamocco-Marghera e morfologia originale dell'area. All'interno del cerchio si ritrova l'area studiata e la freccia blu indica la presenza delle barene chiamate Motte di Volpego. Le frecce rosse indicano i canali naturali Melison ed dei Molini.

Il canale artificiale Malamocco-Marghera collega il petrolchimico di Marghera e la bocca di Porto di Malamocco. Le profondità del canale variano dai 17 metri (erano stati previsti dal progetto originale 14,5 metri) nella parte iniziale verso l'imboccatura di Malamocco, ai 12,5 metri nella parte intermedia e 10 metri in quella terminale a ridosso delle banchine del porto industriale. Il Canale dei Petroli ha una lunghezza complessiva di 20 chilometri, una larghezza media di 200 metri ed una profondità media di 12 metri, dragato alla fine del 1960 (Molinaroli et al., 2013).

Uno scorcio del canale è visibile in Figura 14, in due immagini scattate lungo la riva della cassa di colmata B; le fotografie rappresentano una sequenza scattata durante il passaggio della nave cargo Cannelto, avente una stazza di 150x23 metri ed un pescaggio di 9,06 metri. Al momento in cui è stata scattata la fotografia, la nave che transitava nel canale Malamocco-Marghera aveva una velocità di navigazione di 8,2 kn, circa 16 km/h (valore ottenuto dal AIS² Marine Traffic). L'immagine (A) rappresenta il passaggio della nave Cannelto e l'immagine (B) indica l'onda che si propaga nel canale, al seguito del suo passaggio, che sarà spiegata in un secondo momento. Le fotografie sono state scattate il giorno 16 gennaio 2015, quando il livello di marea si trovava a 0,28 centimetri (www.comune.venezia.it).



Figura 14. Fotografia del canale Malamocco-Marghera presso la cassa di colmata B, durante il passaggio della nave cargo Cannelto (A) e l'onda che segue il passaggio della nave (B). Fotografie del giorno 16 gennaio 2015.

Sul lato opposto alle casse di colmata B, a poca distanza dal bordo del canale navigabile, sono presenti le prime difese longitudinali, che erano state realizzate al tempo della costruzione del canale Malamocco-Marghera (prima fotografia a disposizione con la presenza di queste protezioni è dell'anno 1974). Esse furono inserite con lo scopo di delimitare il canale dai bassi fondali confinanti

² AIS: Automatic Identification System, usato per l'identificazione ed il posizionamento delle navi.

e di prevenire, in questo modo, i processi d'interramento. Negli anni recenti, invece, sono state realizzate delle ulteriori protezioni costituite da materiale sabbioso, protetto con burghe (Scarpa, 2014).

Nella sponda, ad Est, del canale Malamocco-Marghera, è visibile una scogliera artificiale, a protezione dei bassi fondi, posta a 40 metri dal canale navigabile. La barriera artificiale, costruita per confinare la propagazione delle onde (causate al passaggio delle navi), è costituita da un ammasso roccioso permeabile che, dalla profondità di due metri, si estende fino a poco sopra la superficie, permettendo il flusso d'acqua attraverso la costruzione (Scarpa, 2014).

Il canale navigabile, infatti, può essere soggetto a insabbiamenti dovuti alla deposizione di sedimento proveniente dall'erosione dei fondali adiacenti, in particolare, dalle sponde delle casse di colmata (A, B, D-E) e dal basso fondale ad Est del canale di navigazione. La capacità protettiva delle barriere artificiali, però, non risultò sufficientemente adeguata a contrastare i fenomeni erosivi. La porzione di canale che si sviluppa lungo la riva delle casse di colmata ed arriva fino alle banchine del porto industriale, deve essere periodicamente dragata per mantenere inalterata la sezione del canale stesso (D'Alpaos, 2010).

In Figura 15 si può osservare una situazione di risospensione di sedimento, in seguito al passaggio di una nave nel canale Malamocco-Marghera. Nell'immagine (A) si vuole rappresentare la visione generale dell'area: la freccia gialla indica la porzione finale della cassa di colmata D-E (Darsena San Leonardo) e la freccia rossa indica la bocca di porto di Malamocco. Nell'immagine (B) viene rappresentato il dettaglio della risospensione del sedimento.

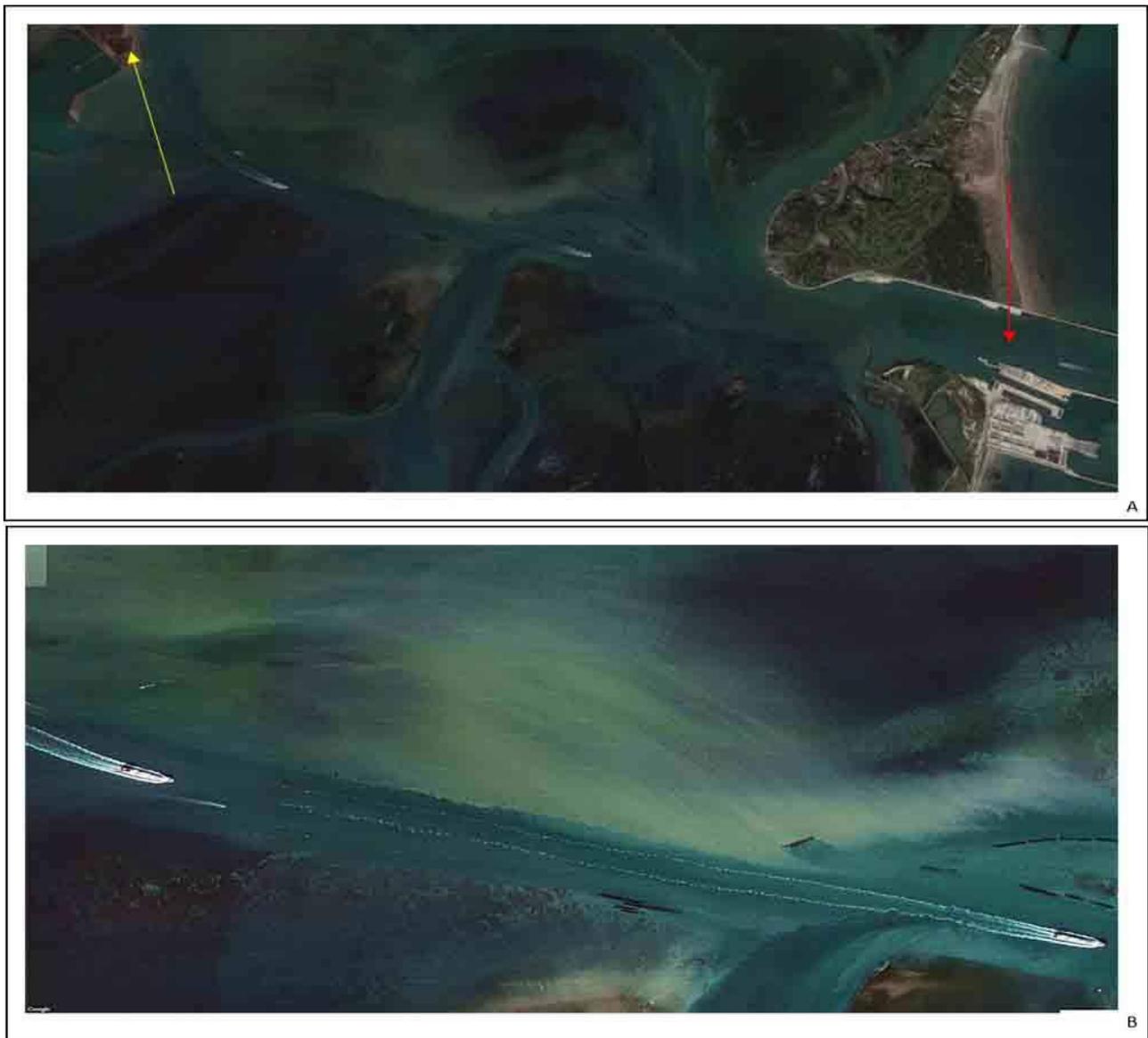


Figura 15. Risospensione del sedimento lungo il canale Malamocco-Marghera. Nell'immagine (A) la freccia gialla indica la porzione finale della cassa di colmata D-E (Darsena San Leonardo), mentre la freccia rossa indica la bocca di porto di Malamocco. Nell'immagine (B) viene rappresentato il dettaglio della risospensione del sedimento. Fonte (Google Earth 2014).

Riguardo ai fenomeni d'interramento ai quali è sottoposto il canale, è rilevante ricordare che nei trent'anni successivi al suo escavo, secondo i dati del Magistrato alle Acque, il volume dragato per ripristinare i fondali è stato di circa $3,5 \times 10^6 \text{ m}^3$, con un tasso annuale di circa il doppio rispetto al canale Vittorio Emanuele III. Pertanto la realizzazione delle casse di colmata e del canale Malamocco-Marghera ha difatti sottratto spazio alla naturale espansione dell'onda di marea, comportando conseguenze sia sul fenomeno dell'acqua alta sia sull'efficacia del ricambio idrico in laguna (Saretta et al., 2010).

Attraverso il Canale dei Petroli, transita un ingente numero di navi dirette al porto industriale di Marghera. E' stato calcolato che in un anno il canale è attraversato da circa 2-3 mila navi, aventi una

dimensione maggiore di 100 metri e una velocità di navigazione massima di 10 kn, circa 19 Km/h (www.port.venice.it/it). Il transito di tutte queste navi, ed il mantenimento dello stesso canale alla profondità necessaria alla navigazione, causano una profonda alterazione dell'ecosistema. Il cambiamento di dimensioni delle navi, rispetto al passato, diventa pertanto una delle cause principali che provocano in laguna l'aumento dell'attività idrodinamica. Il traffico navale è considerato un fattore inscindibile dal fenomeno erosivo e dal trasporto di sedimenti (Nanson et al., 1994), nelle baie (Parnell et al., 2008, Soomere et al., 2009), negli estuari e nelle zone caratterizzate da barene (Houser, 2010) con effetti sulla vegetazione, danni ai natanti e stress su strutture fisse (Nanson et al., 1994). Approfondite ricerche (Erm et al., 2009; Hofmann et al., 2008; Schoellhamer, 1996; Wiberg and Sherwood, 2008) hanno evidenziato che un aumento della velocità della corrente sul fondo del canale è causa di una significativa risospensione del sedimento, che viene trasportato dalla corrente stessa. Le correnti veloci provocano un'amplificazione del deposito di sedimenti all'interno dei canali navigabili.

Durante il passaggio di una nave lungo un canale (come ad esempio il canale Malamocco-Marghera), si crea un'onda che trasporta una grande quantità di energia verso la costa adiacente (Soomere, 2005b; Parnell et al., 2008), nel nostro caso verso le casse di colmata ed in particolare la cassa di colmata B. I fenomeni di sospensione e trasporto dei sedimenti di fondo innescano inoltre un disturbo ecologico e un danno all'ambiente acquatico (Schoellhamer, 1996; Bourne, 2000; Parnell and Kofed-Hansen, 2001; Osborne et al., 2007) sia per la movimentazione continua dei materiali del fondo, che rappresentano l'habitat di diverse specie, sia per l'aumento del valore naturale della torbidità nella colonna d'acqua, fino a valori non tollerati da piante acquatiche e pesci.

Numerosi studi hanno evidenziato che il transito di una nave in un canale di sezione limitata comporta lo spostamento di masse d'acqua in corrispondenza del volume di immersione della carena; da ciò deriva un abbassamento localizzato del pelo libero in relazione al carico cinetico dell'acqua (Costa et al., 2004). Le caratteristiche delle onde trasversali prodotte dall'imbarcazione dipendono dalla velocità del natante, dal volume immerso della carena e dalle sue caratteristiche geometriche, e senz'altro dalla forma del canale stesso (Rapaglia et al., 2011). Le caratteristiche di specifiche onde create al passaggio delle navi sono state oggetto di ricerca nella prima descrizione di "Great waves of translation" di J.S. Russell già nel 1844. Più recentemente diversi autori (Parnell and Kofoed-Hansen, 2001; Soomere, 2005) hanno mostrato che l'impatto maggiore, al passaggio di una nave, sia la formazione di diverse onde a lungo periodo.

L'avanzare di una nave lungo un canale navigabile confinato quale il canale Malamocco-Marghera provoca la formazione di una marcata depressione del livello idrico (Houser, 2010) con conseguente sviluppo di un'onda nota come Onda di Bernoulli, responsabile dell'erosione di una ingente quantità di materiale dalle sponde in quanto in prossimità di bassi fondali, l'attrito con il fondo ne provoca la rottura e conseguente liberazione di una notevole quantità di energia cinetica.

L'effetto considerato, studiato da numerosi autori, è noto come "Bernoulli wake" (Pianc, 2003) o scia di depressione (Soomere, 2007), moto ondoso e prelievo (Houser, 2010; Nanson et al., 1994), o effetto nave (Ravens and Thomas, 2008; Soomere 2007).

In Figura 16 sono rappresentate le depressioni dovute al fenomeno dell'Onda di Bernoulli, in due differenti grafici. L'immagine (A) (Parnell et al., 2014) riporta in rosso le variazioni di livello idrico generate dalle onde provocate da differenti navi che sono transitate nel canale Malamocco-Marghera a diverse velocità, in azzurro si osservano i rispettivi picchi di aumentata torbidità, misurata in FTU (Formazine Turbidity Unit) dovuti al fenomeno di perturbazione misurati con i torbidimetri OBS (Optical Backscatter Sensor). Si può notare come gli alti valori di torbidità causati dalla risospensione dei sedimenti lungo il canale rimangano elevati per diverse ore, ritornando a valori minimi solo durante la notte quando il traffico navale è ridotto. Nel grafico (B) invece viene rappresentata l'onda di depressione di Bernoulli e la relativa curva della concentrazione del sedimento in sospensione in mg/l. Importante è notare che la risospensione dei sedimenti raggiunge concentrazioni superiori a 400 mg/l, durante la formazione dell'onda. Questi valori non sono riscontrati normalmente in laguna, neanche durante le condizioni di tempesta (Rapaglia et al., 2011).

Dall'insieme di questi grafici si è potuto notare che al transitare di una nave viene prodotta un'onda di lungo periodo (Parnell and Kofoed-Hansen, 2001; Soomere, 2005). Quest'onda si può propagare ad un'elevata distanza dal luogo di formazione (Rapaglia et al., 2011) e la sua altezza è direttamente relazionata all'altezza del fondale con cui interagisce. Dalla propagazione di quest'onda si genera una consistente alterazione rispetto alle condizioni di fondo dell'ambiente stesso.

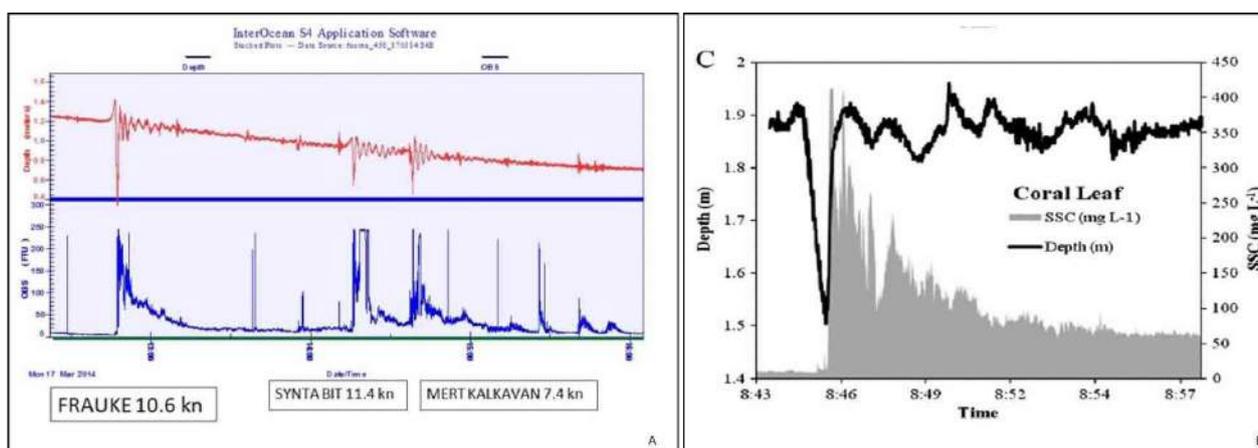


Figura 16. L'Onda di Bernuolli e risospensione dei sedimenti (A) causata dal passaggio di tre navi, fonte Parnell et al., 2014. L'Onda di Bernuolli e relativo risospensione di sedimenti (B) causata dal transitare della nave Coral Leaf, fonte Rapaglia et al., 2011.

In sintesi, nel canale Malamocco-Marghera, al passaggio di una nave si genera l'Onda di Bernuolli, che interagisce con il basso fondale adiacente al canale stesso. Questo significa che quest'onda si estende lungo la riva limitrofa delle casse di colmata, causando l'erosione delle casse stesse. La depressione che si crea all'interno del canale in seguito al passaggio di una nave, è considerata abbastanza ampia da propagarsi in acqua poco profonda.

La propagazione di questa in fondali la cui profondità è minore della metà della sua lunghezza d'onda fa sì che si generi quello che è noto come effetto *shoaling*, responsabile della rottura della cresta d'onda (Figura 17). Il processo di *shoaling* si verifica in questo modo: quando un'onda incontra acque poco profonde cerca di adattare la sua lunghezza al fondale. Se durante la sua propagazione la lunghezza d'onda diminuisce, si riduce anche la sua stessa velocità (la velocità e l'altezza dell'onda sono in relazione all'energia trasportata). Diminuendo la velocità in presenza di basso fondale aumenta l'altezza dell'onda perché il flusso di energia rimane costante fino all'infrangersi dell'onda stessa, visibile in Figura 17. Con il frangimento, l'energia dell'onda si scarica sulla riva, determinando velocità elevate della corrente e turbolenza, e quindi risollemando e trasportando grandi quantità di sedimento. Di conseguenza il fondale e le sponde del canale sono erosi per effetto delle onde generate dalla nave in transito. Le onde sono causate da diversi fattori:

- 1) dislivello tra canale e bassifondi;
- 2) geometria dello scafo della nave;
- 3) velocità di navigazione.

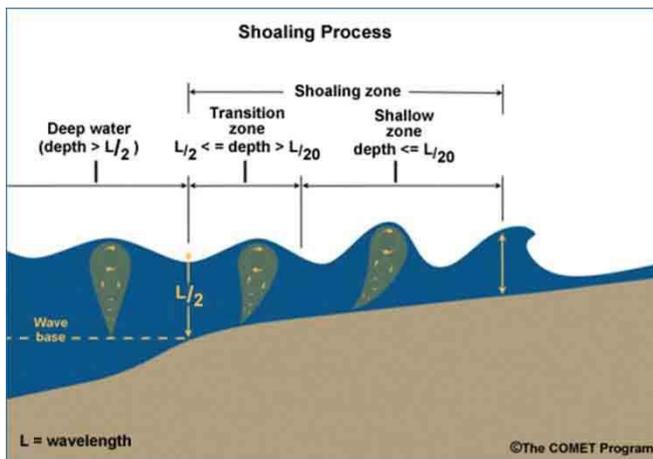


Figura 17. Processo di shoaling.

All'erosione dei bassi fondali adiacenti al canale corrisponde un processo d'interrimento del canale stesso, la cui profondità deve essere mantenuta con operazioni di dragaggio. L'aumento della concentrazione di sedimenti sospesi lungo i bassi fondali della laguna, soprattutto durante i periodi di bassa marea, provocano un deterioramento importante della qualità dell'acqua (Rapaglia et al., 2011).

A questo proposito diversi studi hanno dimostrato che l'onda di depressione causata dal passaggio delle navi ha effetti determinanti sui cambiamenti della morfologia costiera (Soomere et al., 2009). In altri casi possono verificarsi danni alla sicurezza delle persone e dei loro beni laddove la navigazione interessa zone dedicate ad attività ricreative o in presenza di aree abitate (Parnell and Kofoed-Hansen, 2001; Soomere, 2006; Parnell et al., 2007), per il fatto che il volume d'acqua spostato dal passaggio della nave è elevato rispetto alla geometria del canale navigabile (Madekivi, 1993; Bourne, 2000; Schoellhamer, 1996; Neuman et al, 2001). Oltre al problema per la navigabilità dei canali e quindi ai costi di un continuo dragaggio, si genera anche lo spostamento di sedimenti contaminati, presenti nella zona, dall'area del porto industriale attraverso l'intero bacino lagunare (Molinaroli et al., 2013).

Durante i mesi di campionamento (vedi capitolo 7) eseguiti presso la riva della cassa di colmata B, si è ritrovata una spiaggia creatasi dall'erosione della cassa stessa (vedi capitolo 5.2), dovuta all'incidere dell'Onda di Bernuolli. In prossimità della spiaggia si sono individuate le caratteristiche forme di fondo: i *ripple marks* (forme sedimentarie che si originano a causa di un flusso idrico in movimento che esercita un'azione trattiva sul fondo), che vengono creati dalle onde che si infrangono sulla battigia. E' importante rilevare la presenza di *ripple* sia paralleli alla spiaggia (creatisi

dalle onde di marea) sia trasversali ad essa, creatisi dalle onde trasversali, al seguito della onda di Bernuolli, visibili in Figura 18.

In Figura 18 (A) è rappresentata una fotografia di *ripple*, con differenti direzioni, formatisi da onde con correnti discordanti. In quest'immagine si nota il mescolamento di *ripple*, causato dal cambio di direzione di corrente, provocata dal passaggio delle navi. Nell'immagine (B) è visibile l'onda di riflessione che giunge trasversale alla cassa di colmata B, segnando la spiaggia con *ripple* trasversali ad essa. Nelle immagini (C) e (D) si vuole rappresentare i *ripple* paralleli alla cassa di colmata B, quindi creatisi durante le fasi di alta e bassa marea.



Figura 18. Ripple marks lungo la spiaggia della cassa di colmata B. Fotografie scattate il giorno 16 gennaio 2015 (A), 16 giugno 2014 (B-C) e 16 luglio 2014 (D).

Nella Laguna di Venezia sono numerosi i problemi di tipo ecologico studiati da lungo tempo, per esempio il danno dovuto all'introduzione di specie aliene che vanno a modificare i caratteri e le forme di altre specie endemiche o la diffusione dell'inquinamento delle acque, a causa delle navi (Goldberg, 1995; Hayes et Sliwa, 2003; Ricciardi et Rasmussen, 1998). Poco diffusi, a confronto, sono invece gli studi del fenomeno che deriva dall'impatto dei sedimenti risospesi e dell'erosione, che vengono a crearsi a causa dalle navi mercantili di passaggio nel canale Malamocco-Marghera. Tra il 1970 ed il 2000, le condizioni di approfondimento della laguna centrale sono aumentate, in seguito

proprio ai cambiamenti idrodinamici introdotti dall'escavo del canale Malamocco-Marghera (Molinaroli et al., 2009).

5. Georeferenziazione d'immagini e metodologie di analisi

La georeferenziazione consiste in un insieme di tecniche che permettono di attribuire una posizione geografica ad un dato. Nel software di tipo GIS (Geographic Information System), che è stato utilizzato e sarà descritto in seguito, la georeferenziazione sarà riportata su ogni elemento, dai pixel che compongono le immagini raster, ai file di forma geometrica come le linee, i punti o i poligoni (Figura 19).

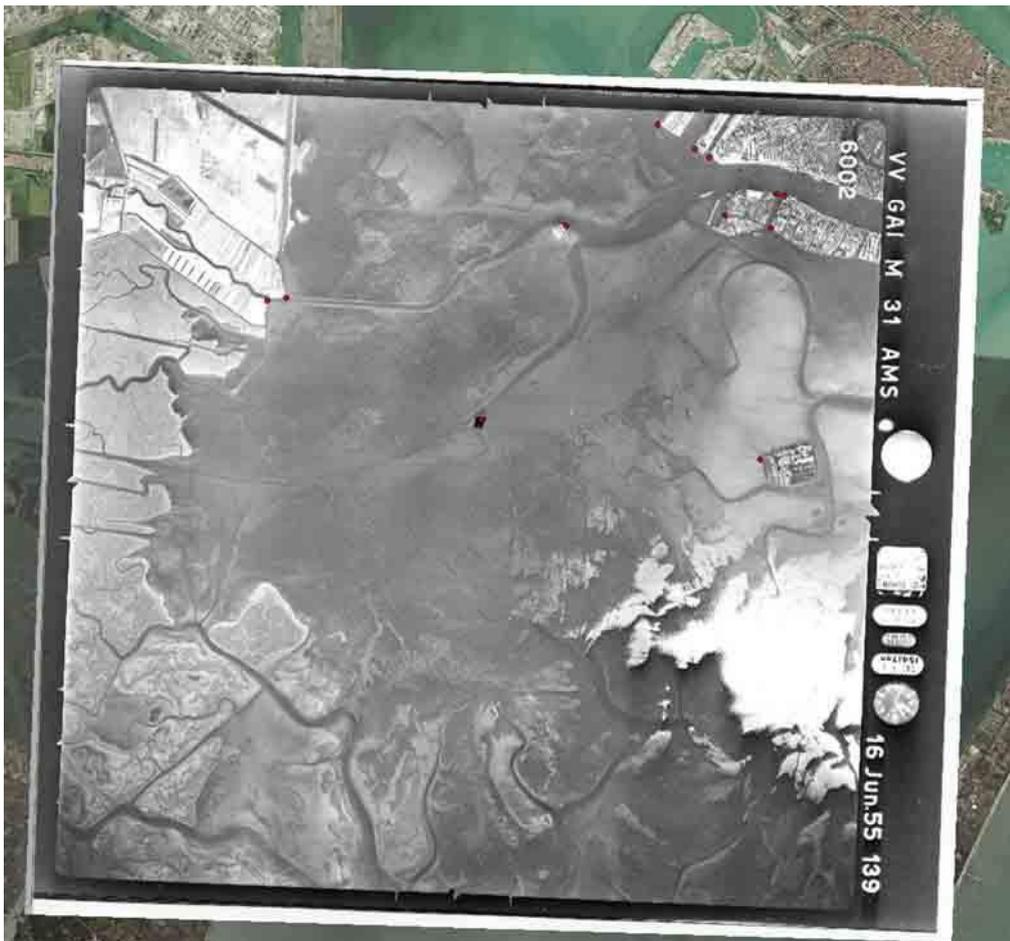


Figura 19. Esempio d'immagine raster georeferenzata, con in rosso i GCP (punti di controllo) utilizzati. Anno 1954.

Le fotografie dei voli aerei (1954-2014) che sono state geo-referenziate, sono elementi di tipo "raster". Quando la funzione di raster fu usata per la prima volta, indicava semplicemente le bande orizzontali di televisori o monitor, per il fatto che le immagini rappresentate sono formate da griglie, aventi una serie di quadrati o celle rettangolari, chiamati pixel, che rappresentano l'unità di riferimento territoriale.

Tutte le celle dell'immagine raster possono essere sia grandi che piccole, in riferimento al dettaglio dell'informazione spaziale. A questo proposito, i pixel di dimensioni minori, corrispondono a informazioni più dettagliate del dato raster. Ad un maggior dettaglio corrisponde tuttavia un maggior tempo per l'analisi e il trattamento delle informazioni e quindi ad un maggior lavoro da parte dell'utente.

Le fotografie aeree dell'area della Laguna di Venezia, dove si trova la cassa di colmata B, scaricate dal [GeoPortale IDT](http://www.geoportale.idt.regione.veneto.it/web/ambiente-e-territorio/foto-aeree) della Regione del Veneto (www.regione.veneto.it/web/ambiente-e-territorio/foto-aeree), contengono informazioni eterogenee, relativamente ai dettagli del terreno. Ad esempio, le immagini più vecchie sono riprese in bianco e nero (es: anno 1978) e si possono considerare solo gradazioni di grigio per valutare le variazioni morfologiche.

Le immagini usate per lo studio del sito non hanno informazioni di riferimento spaziale, trattandosi prevalentemente di aree naturali e in ambiente acqueo ed è per questo motivo, che ha un ruolo molto importante la georeferenziazione. Lo scopo è di assegnare un corretto sistema di coordinate che le collochi correttamente nello spazio.

La georeferenziazione delle foto aeree per lo studio dell'erosione nella cassa di colmata B, è stata eseguita con un software di tipo GIS (Quantum GIS), che consiste in un sistema informativo computerizzato, per l'acquisizione, la catalogazione e lo studio di dati geografici, capace di creare una visualizzazione d'immagini con un sistema di coordinate.

Quantum GIS (*software open source*) è un sistema informatico che consente di gestire e analizzare i dati collocati nello spazio, collegando ogni elemento geografico a delle relazioni di tipo alfanumerico. I dati geometrici georeferenziati possono così essere elaborati per analisi quantitative dei fenomeni.

Il GIS è uno strumento che fu creato allo scopo di analizzare le caratteristiche spaziali e le relazioni tra oggetti ed eventi. Esso contiene varie funzioni che permettono di "mappare" e analizzare i fenomeni che accadono nello spazio e nel tempo.

L'importanza nella creazione e gestione di carte geografiche per analizzare le relazioni spaziali è da sempre stata d'interesse e studio da parte dell'uomo, e proprio la base della cartografia cartacea può essere considerata come un GIS analogico. Con l'introduzione del GIS digitale si è creato un sistema in grado di unire le operazioni dei database con l'analisi geografica e la possibilità di una visualizzazione in mappa.

Lo scopo del sistema GIS è di aumentare la capacità di un database tradizionale, analizzando i dati inseriti grazie alla loro ubicazione geografica. L'importanza di un database di GIS è fondamentale,

esso fa uso del sistema di georeferenziazione come principale dato d'immagazzinamento e di gestione delle informazioni.

Questo sistema informatico, che consente un'accurata analisi geografica è stato utilizzato in questo lavoro di tesi per analizzare le trasformazioni geomorfologiche, subite dall'area oggetto di studio nel corso del tempo, a causa del moto ondoso legato all'intenso traffico navale che interessa il canale Malamocco-Marghera.

Grazie all'uso di Quantum GIS e alla sua disposizione in livelli (*layers*; sovrapposizione d'immagini), si è potuto unire dati di diverse fonti (nel caso studiato i differenti fotogrammi dei voli aerei), in un unico progetto di analisi territoriale.

Nel sistema GIS sono usati sia dati vettoriali che raster, la differenza tra questi consiste che nella struttura vettoriale gli elementi del territorio sono rappresentati fisicamente da entità come: linee, punti e poligoni. Un dato vettoriale è collegato da due componenti in modo dinamico:

- 1) componente geografica: indica la forma geometrica di ciascun elemento;
- 2) componente tabellare: contiene tutti gli attributi in forma alfanumerica che descrivono le proprietà dell'elemento geometrico.

I dati raster sono invece elementi di una matrice. Nella cartografia digitale, ad esempio, il territorio viene rappresentato attraverso una serie di pixel di forma quadrata o rettangolare. A ogni pixel è associato un attributo che definisce le caratteristiche dell'elemento rappresentato. Il concetto sarà spiegato in dettaglio in Figura 25.

Procedendo con lo studio delle immagini, s'incontrano errori geometrici (distorsioni sistematiche e distorsioni casuali), presenti nelle fotografie ottenute dai voli aerei, questi possono essere corretti durante il processo di georeferenziazione.

La georeferenziazione consente di attribuire a dei punti scelti nell'immagine le coordinate note in un sistema di riferimento. Nel caso di studio si è utilizzato il Meridiano di Monte Mario, chiamato così, perché passante per l'osservatorio di Monte Mario a Roma, posto a $12^{\circ}27'08,40''$ E di Greenwich. Questo sistema viene usato dall'Istituto Geografico Militare (IGM) per aggiornare i dati allo standard World Geodetic System 84 (WGS84), su cui si basa anche il sistema di posizionamento globale (GPS).

La trasformazione geometrica che realizza la georeferenziazione consiste nell'uso di polinomiali con ordine dipendente dal tipo di trasformazione da applicare sull'immagine. Il metodo della

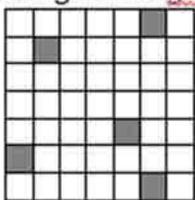
georeferenziazione introduce, però sempre degli errori (RMS Error) e si dovrà procedere (come sarà spiegato in seguito), scegliendo l'ordine della trasformazione per minimizzare i diversi tipi di errori. Una buona procedura di georeferenziazione ha come partenza un certo numero di punti fissi, di coordinate geografiche conosciute, da cui iniziare il processo di elaborazione. Questi punti, conosciuti con l'acronimo GCP (Ground Control Point), sono in pratica un insieme di punti di controllo, corrispondenti ad oggetti di certa localizzazione sul territorio, quali ad esempio, nodi della rete fluviale, intersezioni di assi stradali oppure angoli di edifici, e senz'altro devono essere identificabili sull'immagine (Figura 19).

Durante la georeferenziazione, la determinazione di ogni punto certo è dovuta a due posizioni:

- 1) individuazione del punto preciso (per esempio, angoli di case o edifici) sull'immagine da georeferenziare;
- 2) determinazione delle corrette coordinate geografiche con cui quel punto è identificato.

I collegamenti o link, che uniscono i punti dell'immagine alle loro coordinate, sono forniti da una funzione di trasformazione, o precisamente, da un polinomio. Questo polinomio può essere lineare o di grado più elevato e ha funzione di deformare (*warping*) l'immagine di partenza come se fosse un foglio di carta, in modo da disporla correttamente nel sistema di coordinate scelto. Grazie alle funzioni di trasformazione, si ricrea una matrice vuota ma corretta dal punto di vista spaziale, a cui sono collegati in seguito i corrispondenti valori dei pixel dell'immagine iniziale. In Figura 20 e 21 sono indicate le differenti trasformazioni.

GCPs immagine da georeferenziare



GCPs cartografia di riferimento

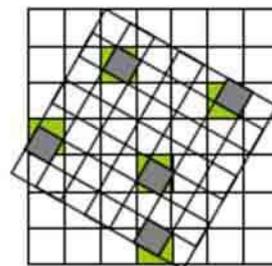
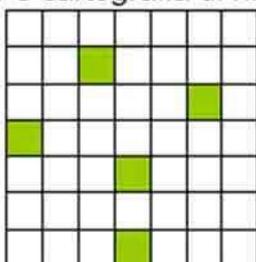


Figura 20. Georeferenziazione di un'immagine e relativi punti GCP.

La procedura di riposizionamento o “*resampling*” che subisce la forma di esempio nella Figura 20 ha lo scopo di creare nuovi valori di pixel dell’immagine corretta, partendo dalla figura da georeferenziare. Per questo metodo esistono tre algoritmi per il ricalcolo dei pixel, visibili in Figura 21:

- 1) *nearest neighbour*: è una trasformazione del primo ordine che assegna a ogni pixel dell’immagine corretta, un valore di radianza (quantità di luce riflessa da una superficie di area unitaria), del pixel più vicino al punto corrispondente nell’immagine non corretta. E’ la tecnica più usata per immagini di tipo raster, perché ha il vantaggio di essere veloce e di non alterare i valori di radianza della scena acquisita, anche se crea errori di disposizione;
- 2) *bilinear resampling*: è la nuova radianza che si ottiene con l’unione dei quattro pixel non corretti più vicini, con peso maggiore secondo la vicinanza più prossima. Il risultato è più articolato, ma ha contrasti meno marcati, richiedendo un tempo di elaborazione molto più lungo;
- 3) *cubic convolution*: è la nuova radianza che si determina tra i sedici pixel non corretti più vicini. Il processo, molto più lungo e complesso, mostra dati più alterati ma con maggiore accuratezza geometrica.

In Figura 21, gli ultimi due algoritmi conservano gli elementi lineari e i bordi degli oggetti anche dopo la correzione, ma subiscono una modifica dei valori originali dei pixel, causando un effetto di sfocatura (*smoothing*) dell’immagine. Per questo motivo, si è scelto sempre il primo criterio (*nearest neighbour*) nella georeferenziazione delle fotografie aeree.

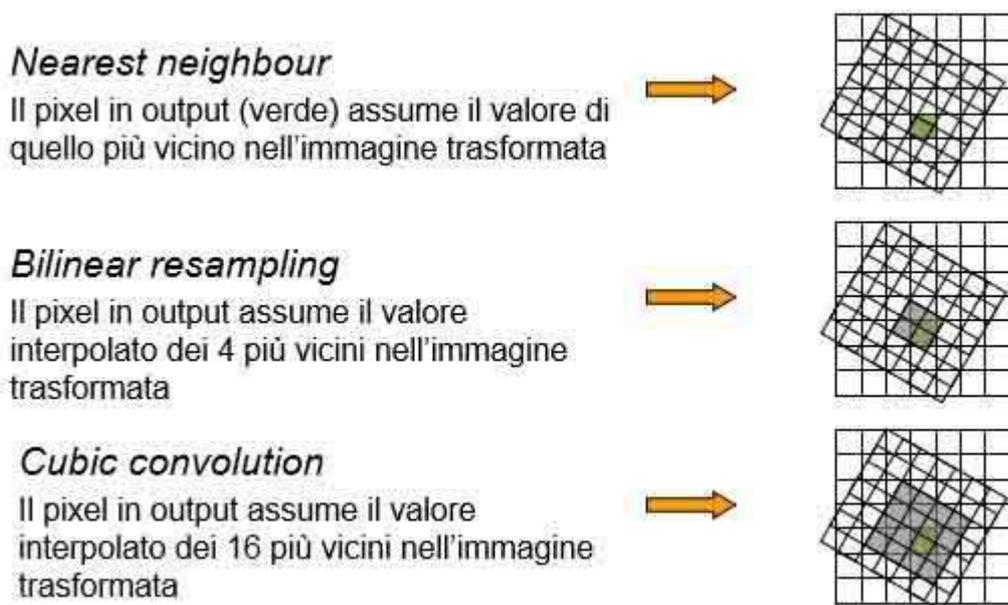


Figura 21. Algoritmi usati per il riallineamento d’immagini.

Gli effetti delle trasformazioni sono visibili nelle Figure 22 e 23, dove si può vedere la differenza concettuale nell'utilizzo dell'algoritmo d'interpolazione nearest neighbour e bilinear resampling. Nella bilinear resampling si prende come valore di radianza del pixel della nuova figura riposizionata la media ponderata, in base alla distanza dei valori di radianza dei pixel più vicini. In questa situazione si creano contrasti molto meno marcati e perciò, la funzione risulta inadatta per distinguere zone di acqua o di terra ferma.

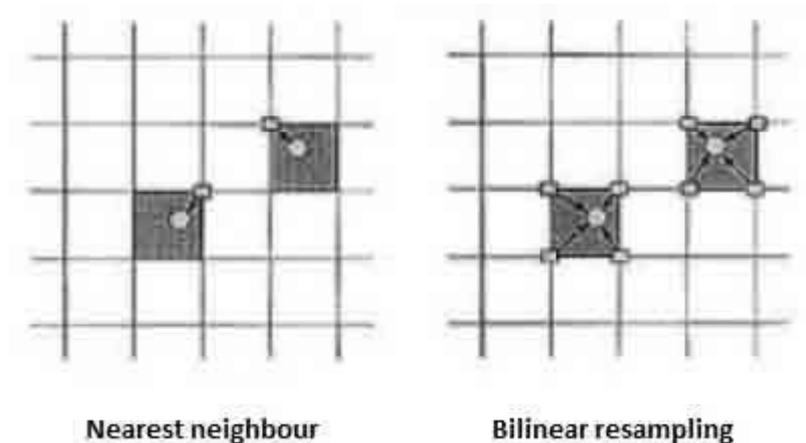


Figura 22. Differenza tra il metodo nearest neighbour e il bilinear resampling.

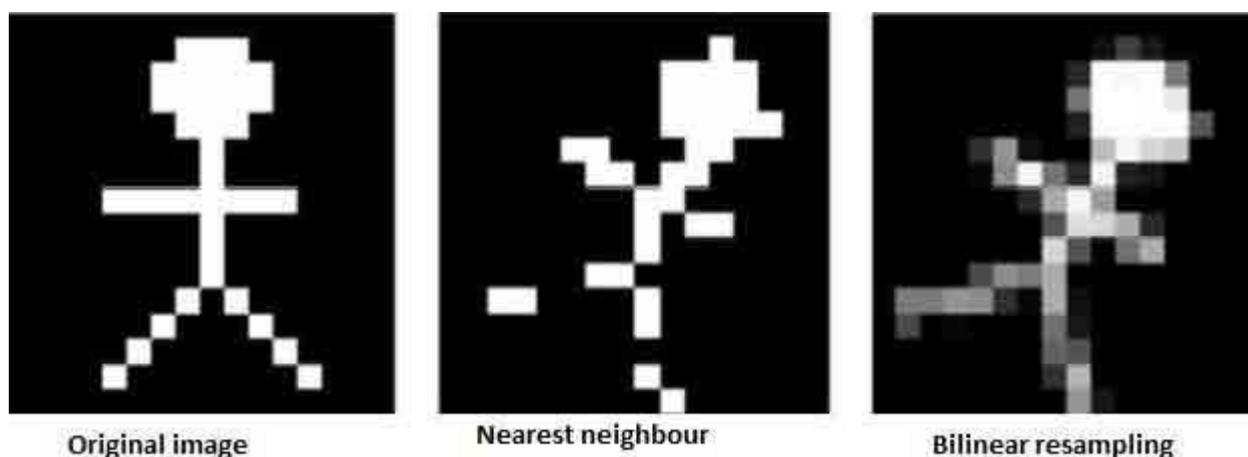
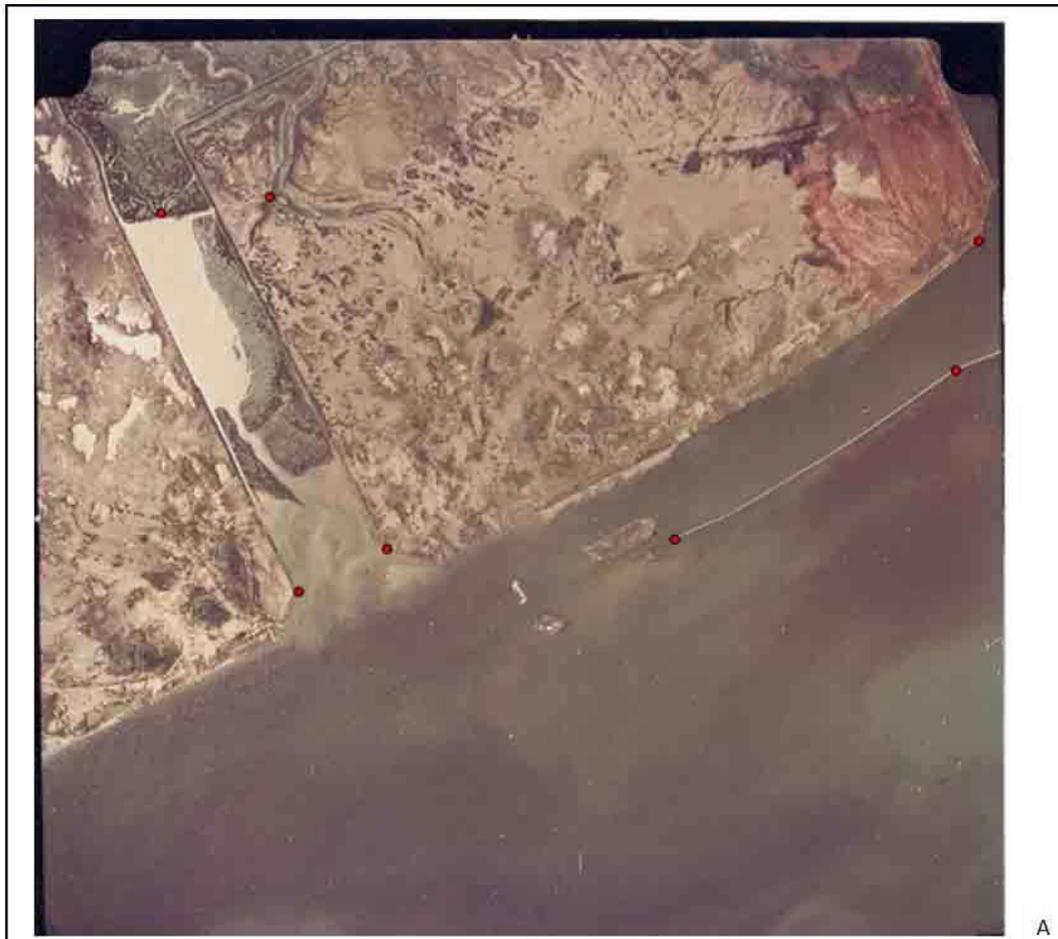


Figura 23. Risultati differenti di ricampionamento con l'uso di nearest neighbour e bilinear resampling.

Nel programma QGIS, le nuove immagini georeferenziate sono salvate in un file che porta lo stesso nome dell'immagine di partenza, solo con estensione differente. Essa può essere .tfw per le immagini .tiff e .jpgw per le immagini .jpeg.

Tra i diversi problemi incontrati durante il processo di georeferenziazione dei fotogrammi aerei dell'area studiata, il più complesso è stato trovare per ogni fotografia, dei corretti GCP. Il numero di

punti da individuare nell'immagine caricata in QGIS, deve essere un numero minimo da garantire una corretta trasformazione. Questo procedimento è visibile in Figura 24, nell'immagine (A) e (B).



A

Tabella GCP

on/off	id	srcX	srcY	dstX	dstY	dX[pixel]	dY[pixel]	residual[pixel]
✘	0	1392.42	-1038.17	2304046.52	5029715.41	0.00	0.00	0.00
✘	1	2050.53	-3028.62	2305197.62	5029284.94	0.00	0.00	0.00
✘	2	784.61	-1130.17	2303870.39	5029387.89	0.00	0.00	0.00
✘	3	3663.52	-2973.84	2305760.44	5030078.15	0.00	0.00	0.00
✘	4	5240.02	-2019.74	2305876.25	5031155.22	0.00	0.00	0.00
✘	5	1556.31	-3268.83	2305131.40	5028962.05	0.00	0.00	0.00
✘	6	5368.91	-1286.74	2305578.13	5031497.59	0.00	0.00	0.00

B

Figura 24. Esempio d'immagine da georeferenziare con relativa tabella GCP per la ripresa aere del 1974.

Il processo che avviene durante la georeferenziazione può essere schematizzato come nell'esempio di in Figura 25.

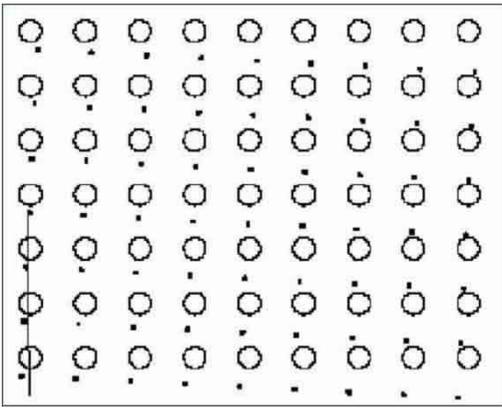


Figura 25. Schematizzazione della trasformazione di un'immagine raster durante il processo di georeferenziazione.

I cerchi vuoti sono il dato raster (la foto) di partenza, mentre i punti neri sono i centri dei pixel dell'immagine trasformata. Maggiore è il numero di punti di controllo (GCP), più alto può essere il grado di trasformazione del polinomio interpolante gli stessi punti di controllo. Il polinomio con grado maggiore permette deformazioni più marcate e riduce gli errori di posizione, come si può vedere in Figura 26. Di norma, il grado di trasformazione del polinomio interpolante è:

- 1) primo ordine, quando l'immagine è semplicemente tralata, scalata, ruotata o inclinata nel piano;
- 2) secondo ordine o più, quando le linee rette sono trasformate in curve, con uno o più punti di flesso.

Quando si aumenta l'ordine di trasformazione sarà necessario di conseguenza un numero maggiore di punti di controllo (GCP) sull'immagine. Per la georeferenziazione delle fotografie nell'area oggetto di studio, si sono utilizzate nel maggiore dei casi, le trasformazioni di polinomiali di 1° ordine, che sono usate per le deformazioni lineari.

Il sistema permette di riposizionare l'immagine in modo tale che i pixel possano riallinearsi.

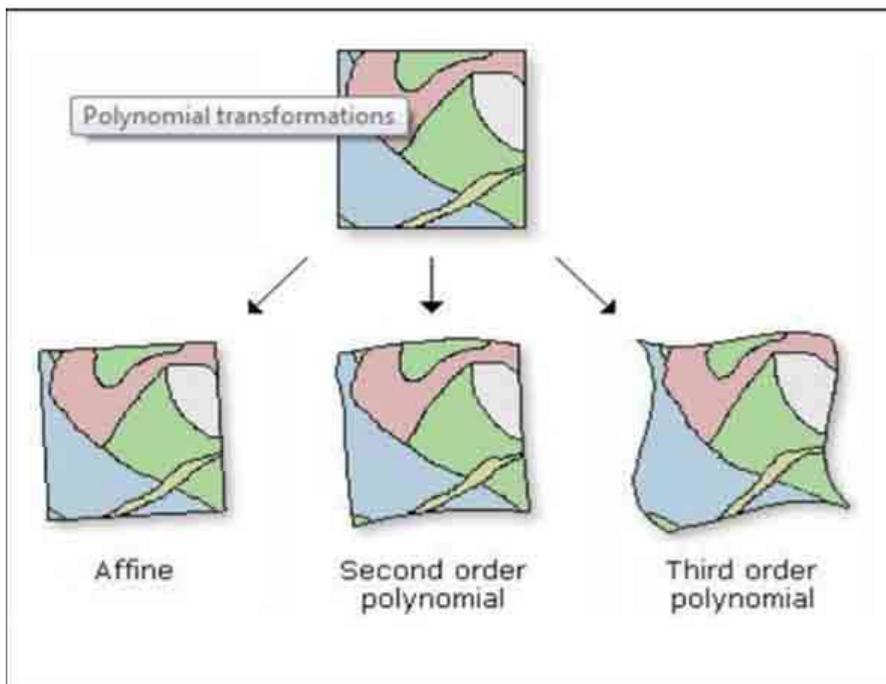


Figura 26. Differenze nell'uso delle trasformazioni polinomiali.

I punti che sono individuati devono coprire il più possibile tutte le zone dell'immagine, per un migliore riposizionamento.

Nella georeferenziazione dei fotogrammi aerei, soprattutto per quelli meno recenti (es. 1954), la quasi assenza di edifici o costruzioni stabili e la bassa risoluzione delle immagini, hanno determinato un difficile e lungo processo di georeferenziazione, allo scopo di ottenere il risultato migliore.

Un numero valido di punti per una corretta georeferenziazione è variabile: innanzitutto occorre avere almeno un minimo di tre punti e di conseguenza tre collegamenti. Con una trasformazione di primo ordine è possibile attribuire a ogni punto dell'immagine raster di partenza una nuova posizione nell'immagine di destinazione. L'aggiunta di nuovi punti di controllo immette errori di posizione o residui, che sono suddivisi dal programma tra tutti i collegamenti.

Per una buona georeferenziazione è necessario però introdurre più di tre collegamenti, perché un maggior errore sulla trasformazione è assegnato da una collocazione non corretta di un link. In questo modo, aumentando l'errore della trasformazione con maggiori collegamenti, aumenta pure la precisione totale della trasformazione.

L'errore che si crea, si riferisce alla differenza tra la posizione del punto materialmente indicato dall'utente e quella reale, originata secondo l'ordine della trasformazione. In sintesi non è altro che lo scarto quadratico medio tra l'ubicazione del punto scelta e quella interpolata dal polinomio ed è

stabilito dalla sigla RMS (*root mean square error*). Il programma permette il calcolo del RMS, corrispondente al punto singolo e totale, con le formule (Figura 27):

$$RMS = \sqrt{(X - X_{GCP})^2 + (Y - Y_{GCP})^2}$$

$$RMS_{tot} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n RMS_j}{n}}$$

Figura 27. Formule per il calcolo dell'errore di posizione.

La RMS totale indica come sono distribuiti gli errori tra tutti i collegamenti durante la georeferenziazione. Pertanto, un errore basso può indicare una buona georeferenziazione, però da solo non può essere usato come indicatore di un corretto lavoro, poiché a volte le foto appaiono comunque distorte. E' a questo punto che si è dovuto aumentare il grado della polinomiale interpolante e aumentare il numero di GCP.

5.1 Analisi d'immagini storiche ed attuali

Tutte le immagini ottenute durante i voli di ricognizione sulla Laguna di Venezia sono state realizzate grazie all'impiego di un velivolo pilotato. Le immagini che saranno presentate sono state ottenute da diversi enti, sia privati che pubblici, come l'Istituto Geografico Militare (IGM), il Gruppo Aeronautico Italiano (GAI) e la Regione del Veneto.

Le fotografie usate, sono state ottenute grazie alla collaborazione tra la Regione del Veneto e il laboratorio di Cartografia e GIS dell'Università IUAV di Venezia, scaricate dal Portale Cartografico della Regione del Veneto. Le immagini satellitari del 2009 e 2012 sono state scaricate dal Geoportale Nazionale (www.pcn.minambiente.it/GN/), mentre l'immagine satellitare dell'anno 2014 è stata scaricata da Google Earth.

Grazie all'uso di differenti immagini aeree dell'area oggetto di studio, si dispone di una visione dell'area su base temporale completa ai fini del processo che si è scelto di investigare. Le prime foto disponibili risalgono al 1954, mentre quelle più recenti e di migliore qualità risalgono all'anno 2010.

Lo studio dell'evoluzione morfologica dell'area ha evidenziato la profonda erosione della linea di riva, nella cassa di colmata B. A partire dalle immagini georeferenziate con QGIS si è potuto studiare l'erosione della linea di riva del sito considerato. Le immagini originali scaricate non sono georeferenziate e quindi non sarebbero utilizzabili a questo scopo.

In Allegato 1 (vedi capitolo 12.1) sono riassunte le caratteristiche delle serie d'immagini utilizzate per lo studio della cassa di colmata B. Le prime informazioni riportate si riferiscono all'insieme dei fotogrammi dei voli scattati sull'intera area e solo successivamente si è indicato il fotogramma specifico considerato nel lavoro di tesi (la cassa di colmata B).

Le immagini disponibili per gli anni 2009, 2012 e 2014 sono fotografie satellitari geo-database web e pertanto già georeferenziate. Esse saranno riportate di seguito insieme alle fotografie aeree dell'Allegato 1, che subiscono il processo di georeferenziazione con QGIS.

Le immagini sono presentate dall'anno 1954 al 2014. Tutte le fotografie sono georeferenziate sulla base dell'immagine satellitare del 2009, a parte il fotogramma del 2010, georeferenziato sull'immagine satellitare del 2012.

In Figura 28 si identificano i processi che avvengono durante le fasi di georeferenziazione che sono state descritte all'inizio del capitolo 5. L'immagine dell'anno 1954 è stata riportata in trasparenza (grazie alle funzioni del programma QGIS) sull'immagine base del 2009. Da questa sovrapposizione si è evidenziata la morfologia dell'area preesistente alla costruzione del canale Malamocco-Marghera ed al contemporaneo imbonimento delle aree lagunari.

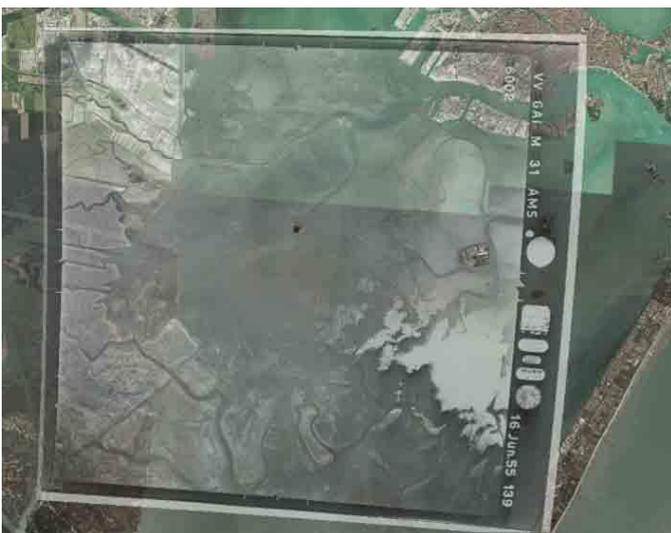


Figura 28. Fotogramma aereo, codice volo: 1954gai_09_6002, georeferenziato sull'immagine satellitare del 2009.

Questa diversità è rappresentata in maggior dettaglio nella Figura 29. L'immagine raffigura il fotogramma aereo del 1961 (prima della costruzione del canale)

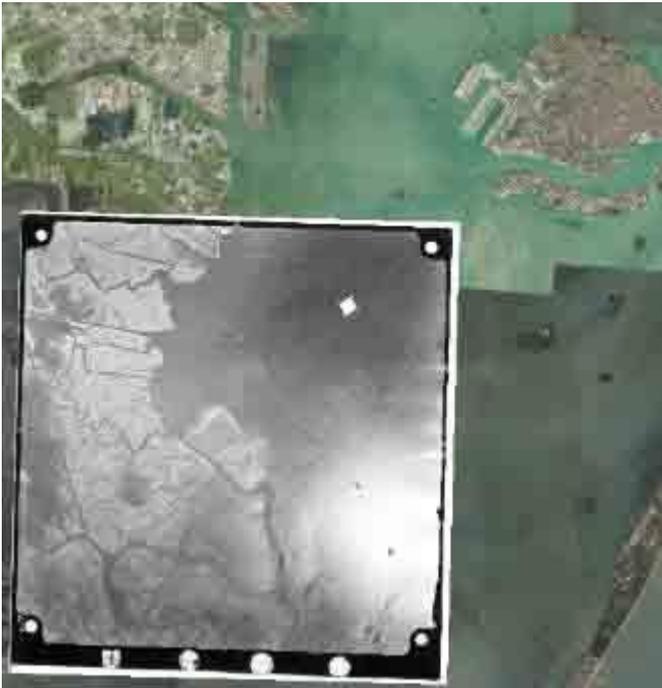


Figura 29. Fotogramma aereo, codice volo 1961igm_12_2559 georeferenziato sull'immagine satellitare del 2009.

In Figura 30 è rappresentata una fotografia del 1974 in sovrapposizione all'immagine satellitare del 2009. Grazie a questa funzione del programma utilizzato, si è in grado di effettuare, dapprima solo attraverso l'uso d'immagini e successivamente, attraverso altri metodi di analisi, una stima dell'erosione dell'area. In questa figura la freccia in blu indica il profilo della linea di riva per l'anno 1974 e la freccia in rosso indica la linea di riva per l'anno 2009.



Figura 30. Fotogramma aereo, codice volo 1974montedison_4_8318 georeferenziato sull'immagine satellitare del 2009. La freccia blu indica la linea di riva nell'anno 1974, mentre la freccia rossa indica la linea di riva nell'anno 2009.

In Figura 31 sono rappresentati i fotogrammi dei voli aerei per gli anni 1975 (A) e 1978 (B) ed in Figura 32 sono raffigurati il fotogramma dell'anno 1987 (A) e 1994 (B).

In Figura 33 vengono, invece, rappresentati i fotogrammi i dei voli aerei per l'anno 2004 (A) e 2005 (B) ed in Figura 34 è raffigurata l'immagine satellitare del 2009 (A) e il fotogramma del volo aereo per l'anno 2010 (B).

Infine, in Figura 35 sono rappresentate le immagine satellitare del 2012 (A) e del 2014 (B).

Tutti i fotogrammi (che sono stati georeferenziati) sono rappresentati con la relativa linea di riva tracciata nell'anno in cui appartiene la fotografia della cassa di colmata B.

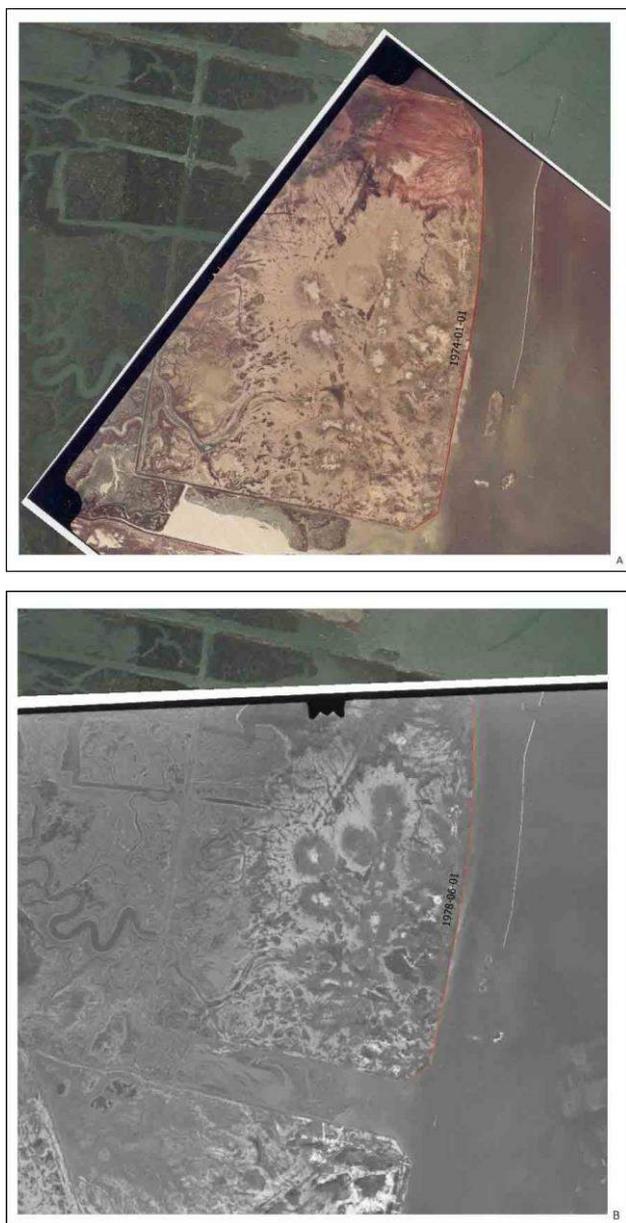


Figura 31. Fotogramma aereo, codice volo 1974montedison_4_8318 (A) e fotogramma aereo, codice volo 1978_reven_11_243 (B) con le relative linee di riva.



Figura 32. Fotogramma aereo, codice volo 1987reven_09_4386 (A) e fotogramma aereo, codice volo 1994venezia_09_298 (B) con le relative linee di riva.



A



B

Figura 33. Fotogrammi aerei, codice volo 2004venezia_15_214 e 2004venezia_16_10 (A) e fotogrammi aerei, codice volo 2005venezia_13_358 e 2005venezia_14_37 (B) con le relative linee di riva.

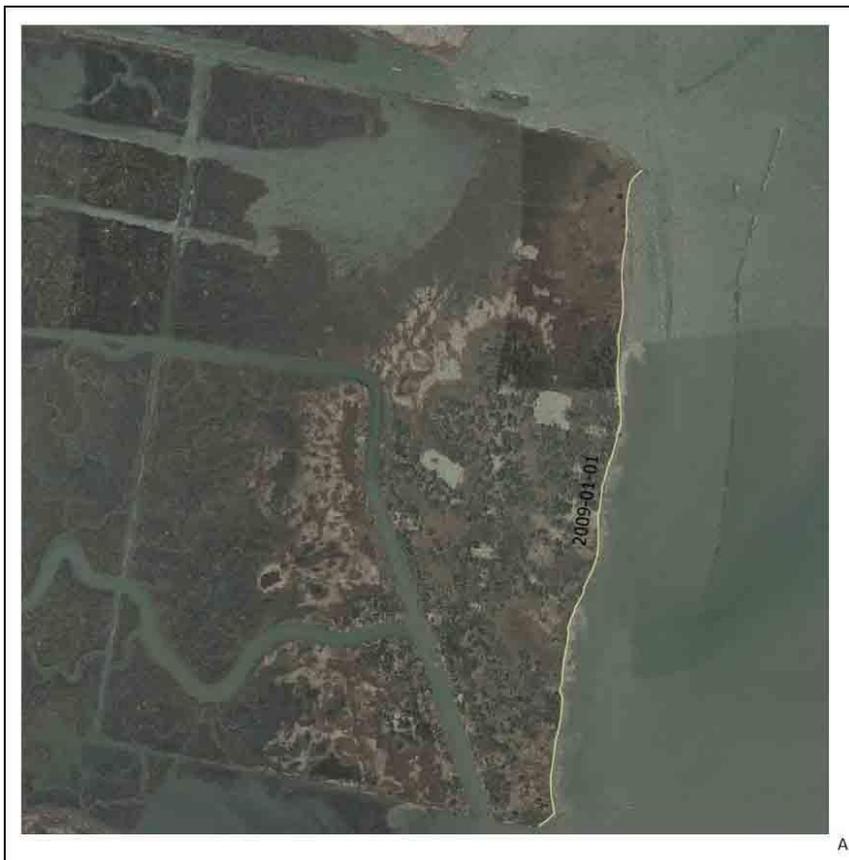


Figura 34. Immagine satellitare nell'anno 2009 (A) e fotogramma aereo, codice volo 2010veneziasa_va_10_451 (B) con le relative linee di riva.

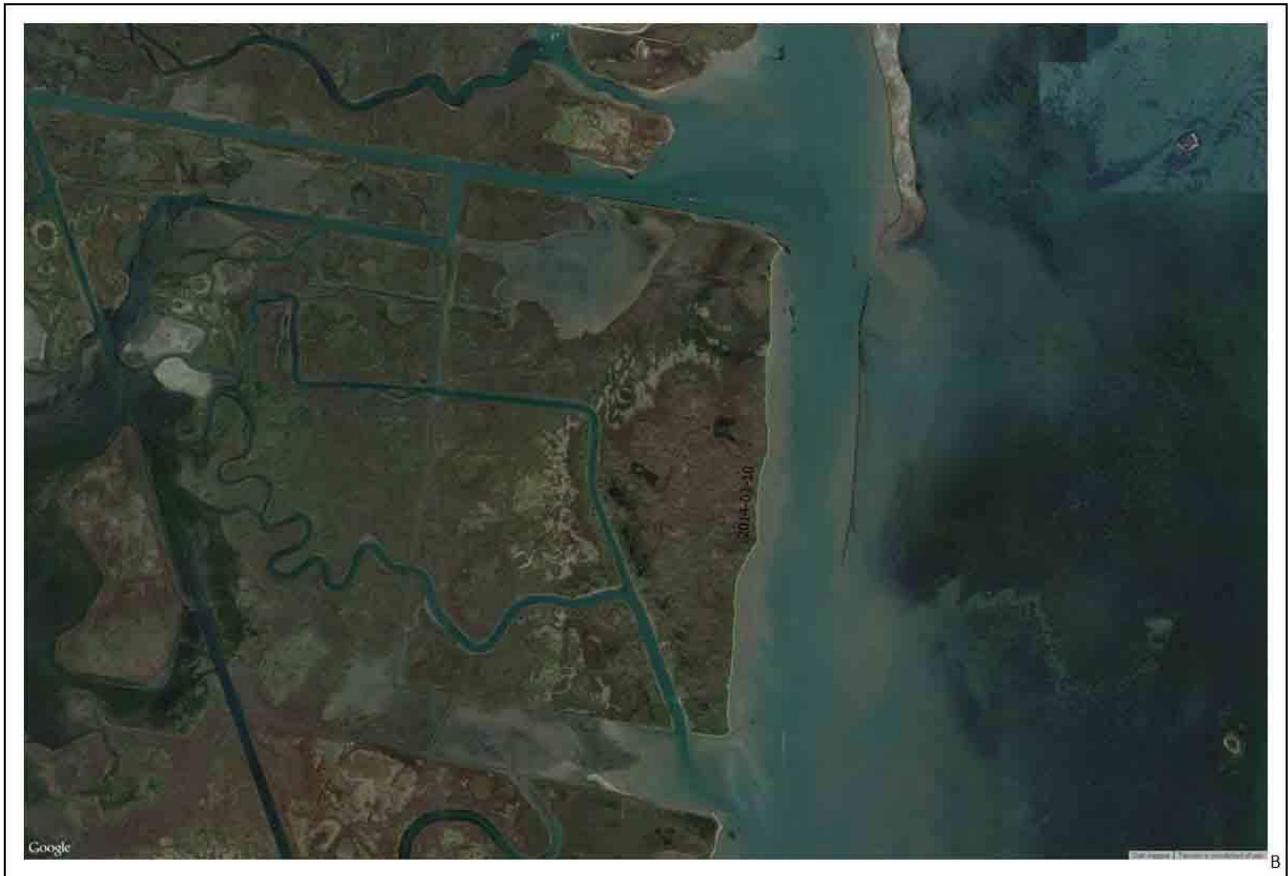
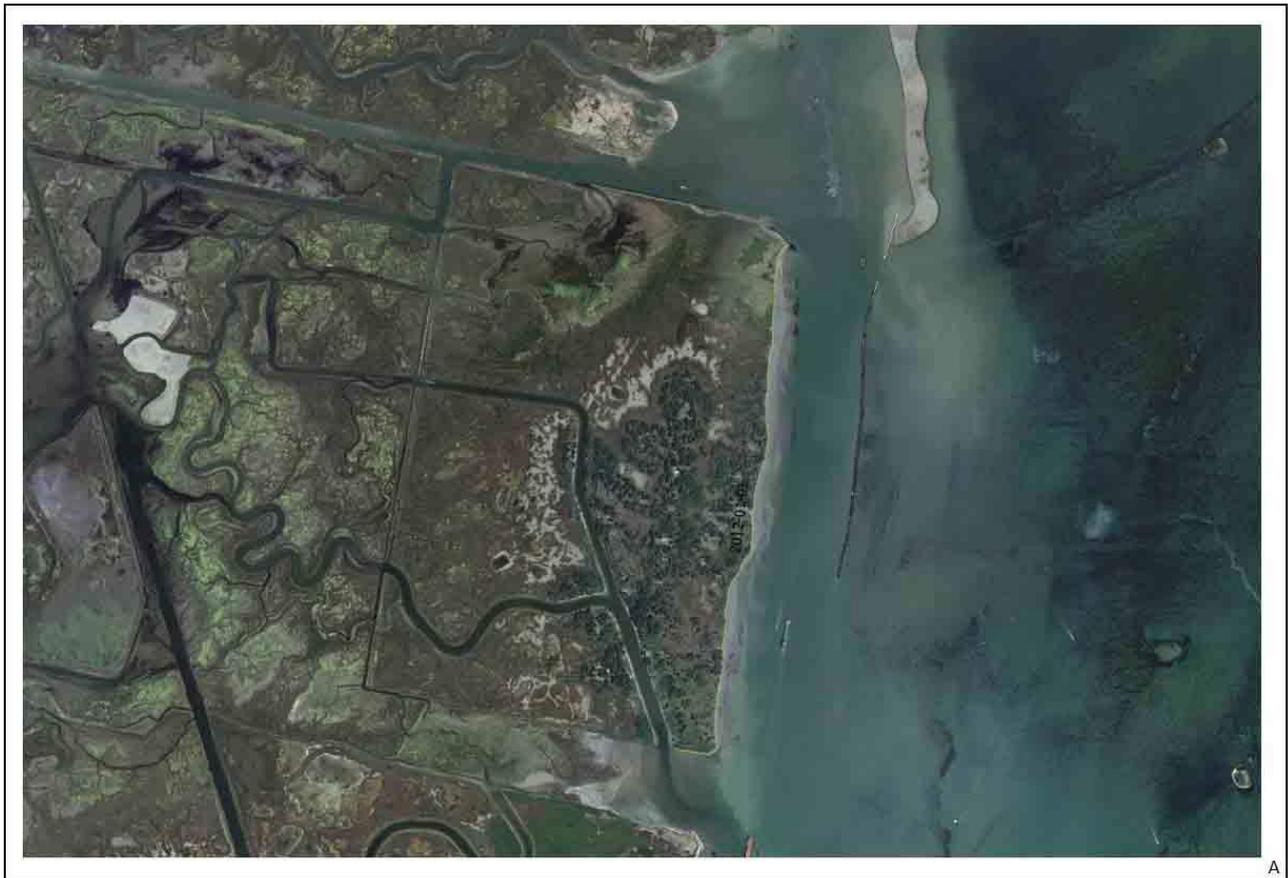


Figura 35. Immagine satellitare nell'anno 2012 (A) e nell'anno 2014 (B) con la relativa linea di riva.

5.2 Rappresentazione delle linee di riva nel tempo

I fotogrammi aerei dei voli sull'area di studio sono stati selezionati in modo da mettere a confronto i cambiamenti morfologici verificatisi nell'intervallo considerato (1954-2014). Per ogni immagine è stata tracciata, tramite la funzione vettoriale di QGIS, la linea di riva della cassa di colmata B. Questa metodologia è stata applicata allo scopo di individuare quale sia stata la riduzione lungo la linea di riva della cassa di colmata B a causa delle onde prodotte al passaggio di navi nel canale Malamocco-Marghera.

Le prime riprese aeree a disposizione risalgono all'anno 1954 e all'anno 1961, visibili in Figura 36. In questi anni non era ancora stata costruita né la cassa di colmata B, con un argine a recinzione e difesa della cassa stessa, né il canale Malamocco-Marghera i cui lavori sono iniziati alla fine del 1961. Nell'immagine sono rappresentati i fotogrammi dei voli aerei per gli anni 1954 (A) e 1961 (B). Il dettaglio dell'area di studio per l'anno 1954 è indicato nell'immagine (C), mentre il dettaglio per l'anno 1961 è visibile nell'immagine (D). Per entrambi gli anni considerati l'area è presente allo stato naturale e sono riconoscibili barene, velme e bassi fondi, attraversati da canali naturali.

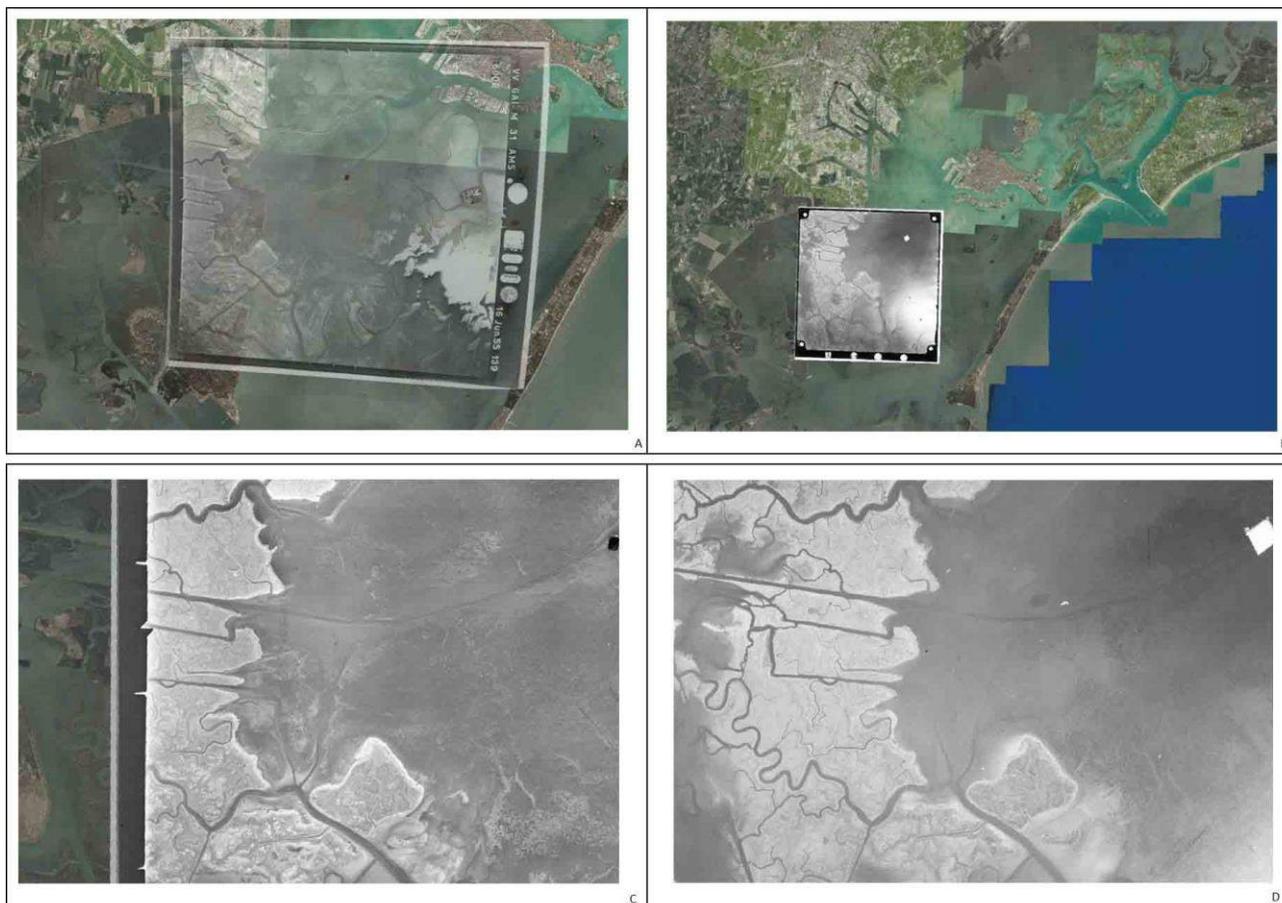


Figura 36. Fotografie aeree per gli anni 1954 (A) e 1961 (B) e relativo dettaglio nell'anno 1954 (C) e dettaglio nell'anno 1961 (D).

In Figura 37 è rappresentata la fotografia aerea del 1954 con le linee di riva (dal 1974 al 2014) riprodotte con diversi colori, proprio nella zona nella quale sarà costruita la futura cassa di colmata B ed il canale Malamocco-Marghera.

Nella stessa immagine si vede il tracciato del grande canale Volpego (freccia gialla) che sarà mantenuto con il successivo l'imbonimento dell'area.

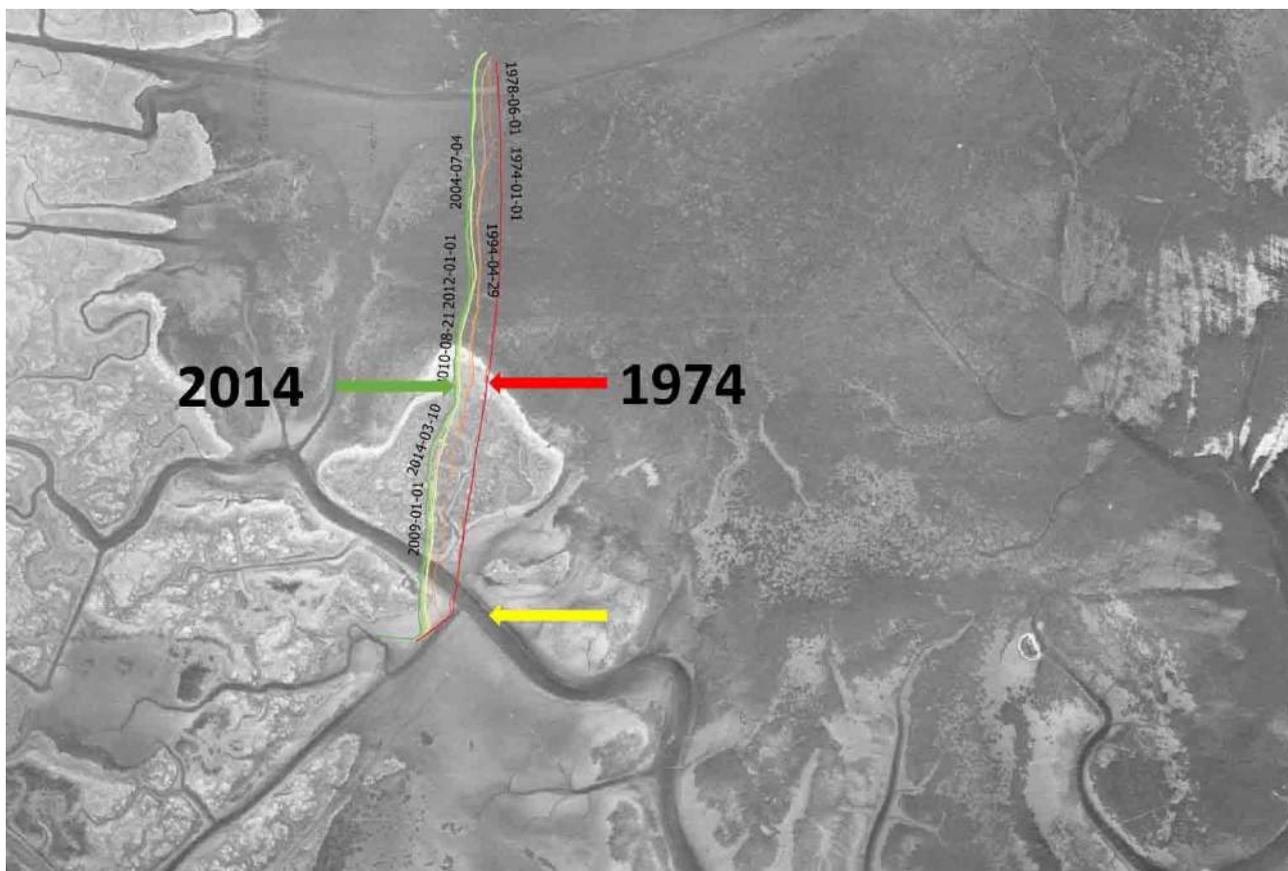


Figura 37. Linee di riva della cassa di colmata B rappresentate sul fotogramma aereo nell'anno 1954. La freccia rossa indica la linea di riva per l'anno 1974, mentre la freccia verde indica la linea di riva per l'anno 2014. La freccia gialla indica il tracciato del canale Volpego.

La prima fotografia aerea disponibile in cui sono presenti il canale Malamocco-Marghera e la cassa di colmata B è dell'anno 1974, visibile in Figura 38. L'immagine (A) rappresenta l'intera zona studiata con le linee di riva per tutti gli anni considerati, mentre l'immagine (B) raffigura il dettaglio dell'area centro-Sud della cassa di colmata B. La freccia rossa in quest'immagine indica la linea di riva per l'anno 1974. Sempre nell'immagine (B) la linea di riva, in rosso, tracciata per l'anno 1974, indica la posizione dell'argine costruito per delimitare i fanghi usati nell'imbonimento per la costruzione della cassa stessa. Per questo motivo la prima linea di riva tracciata per il suddetto anno è la più rettilinea rispetto alle linee di riva degli anni a seguire.



Figura 38. Linee di riva rappresentate sulla fotografia aerea nell'anno 1974 (A) e rispettivo dettaglio dell'area centro-Sud (B). La freccia rossa indica la linea di riva per l'anno 1974, mentre la freccia gialla indica le barene naturali presenti nell'area.

Nel canale Malamocco-Marghera (immagine B, Figura 38) è visibile la presenza di piccole barene naturali, che facevano parte del complesso che prendeva il nome di Motte di Volpego (freccia gialla). Queste sono state mantenute durante la costruzione del canale e nel corso dell'imbonimento dell'area. Esse scompariranno negli anni successivi a causa dell'erosione prodotta dal moto ondoso creato dal passaggio delle navi nello stesso canale.

Nel 1978 la situazione dell'area è quasi invariata rispetto all'anno 1974. In Figura 39 è visibile la cassa di colmata B con le rispettive linee di riva.

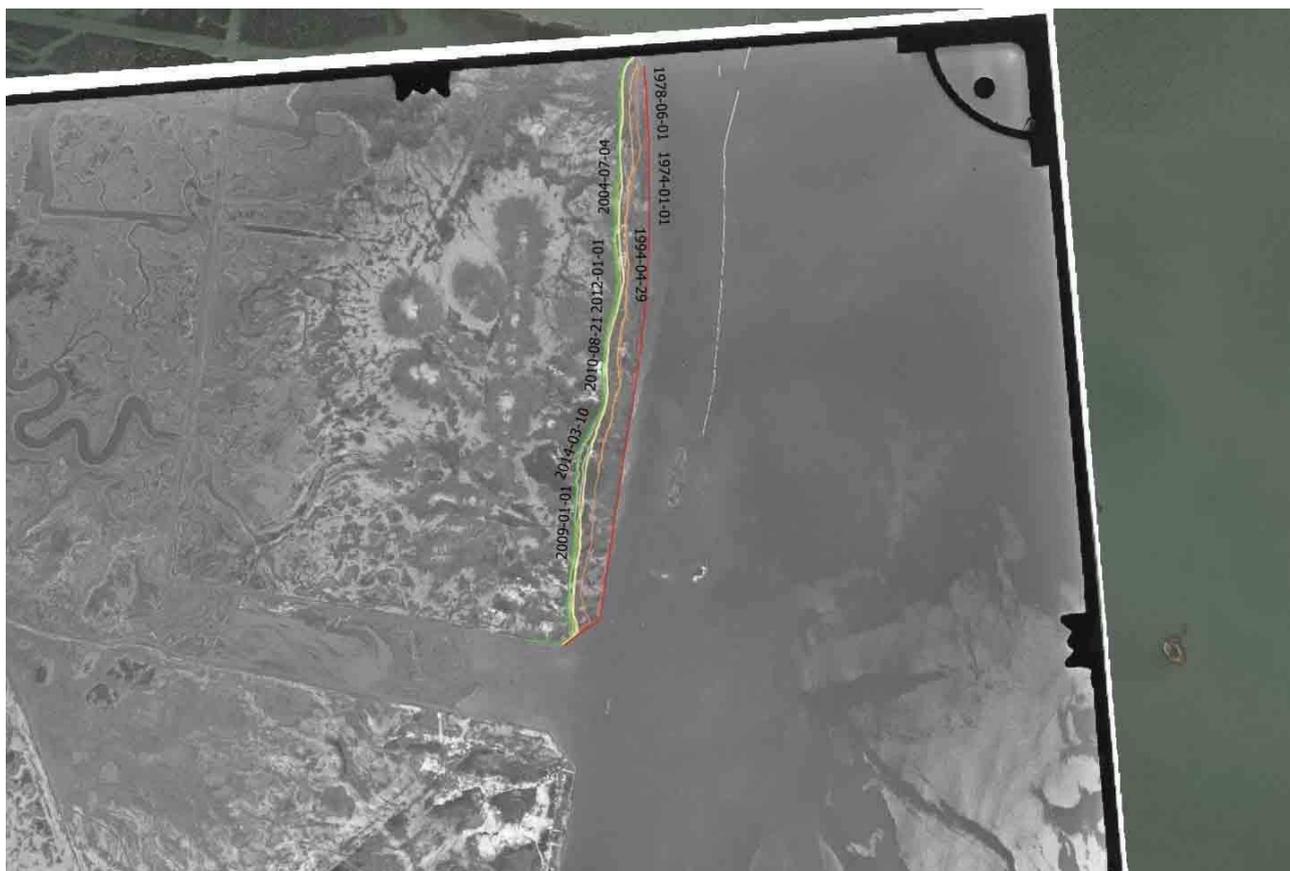


Figura 39. Linee di riva rappresentate sulla fotografia aerea nell'anno 1978.

In Figura 40 è rappresentata l'area centro-Sud della cassa di colmata B dell'anno 1978, visibile nell'immagine (A), dove si possono notare delle piccole erosioni nell'argine a protezione della riva, visibili in maggior dettaglio nelle immagini (B) e (C). La freccia in rosso scuro indica la linea di riva per l'anno 1978, visibile nell'immagine (A). La linea di riva in rosso dell'anno 1978 è praticamente coincidente con la linea di riva per l'anno 1974. Solo in alcuni piccoli tratti è arretrata com'è visibile nell'immagini (B) e (C). Proprio in questi punti si possono rilevare delle piccole erosioni nell'argine, segno che il processo di demolizione e arretramento è già attivo. Nell'area si rileva ancora la presenza dei resti delle barene naturali (Motte di Volpego) visibili nella fotografia del 1974 (Figura

38), anche se nell'immagine (A), in Figura 39, si vede che una di esse è quasi scomparsa sotto l'azione dei fenomeni erosivi.

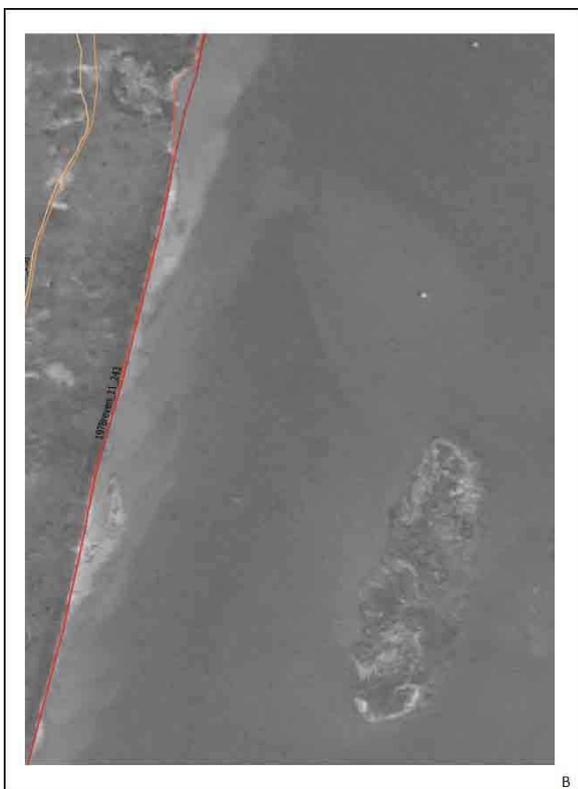
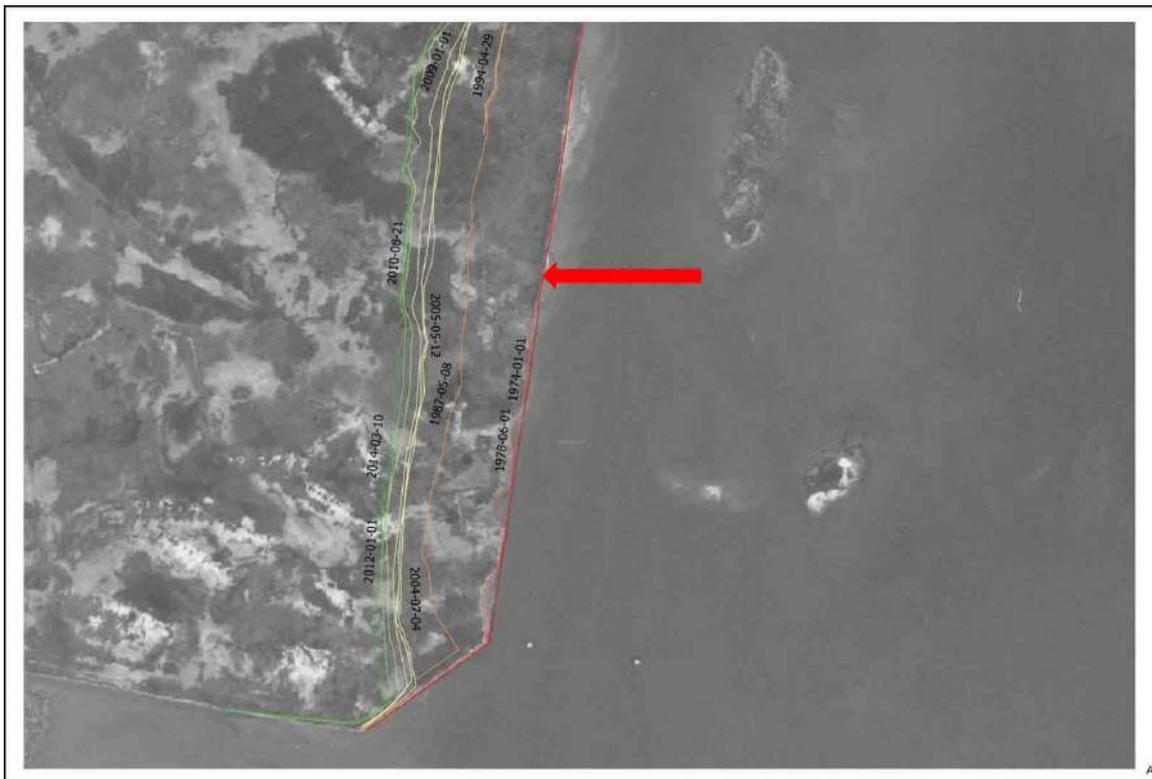


Figura 40. Area centro-Sud (A) e dettagli dell'erosione nella linea di riva per l'anno 1978 (B) e (C). La freccia rossa indica la linea di riva nell'anno 1978.

In Figura 41, nell'immagine (A) viene presentato il primo fotogramma che indica un evidente arretramento nella linea di riva. Bisogna considerare che dal primo fotogramma disponibile con la presenza della cassa di colmata B, sono trascorsi circa tredici anni (1974-1987). Nell'immagine (B) è rappresentato il dettaglio dell'area centrale della cassa di colmata B. La linea di riva per l'anno 1987 è indicata dalla freccia in arancione.

In questa fotografia a colori si può notare la presenza di vegetazione. Non è possibile sapere con esattezza in che anno sia iniziata la crescita della componente arborea, anche perché il precedente fotogramma aereo del 1978 è in bianco e nero. Si può ipotizzare però che fino al 1987 la vegetazione non fosse presente per la mancanza di un suolo idoneo che si sarebbe sviluppato solo successivamente.

Sempre nell'immagine (B) si nota anche la chiara presenza di una spiaggia, venutasi a creare per erosione e arretramento della linea di riva della cassa di colmata B. Le linee di riva elaborate sui diversi fotogrammi indicano l'arretramento progressivo della sponda con il passare del tempo e la prima spiaggia, riconoscibile nel 1987, indica che questo fenomeno erosivo è in atto.

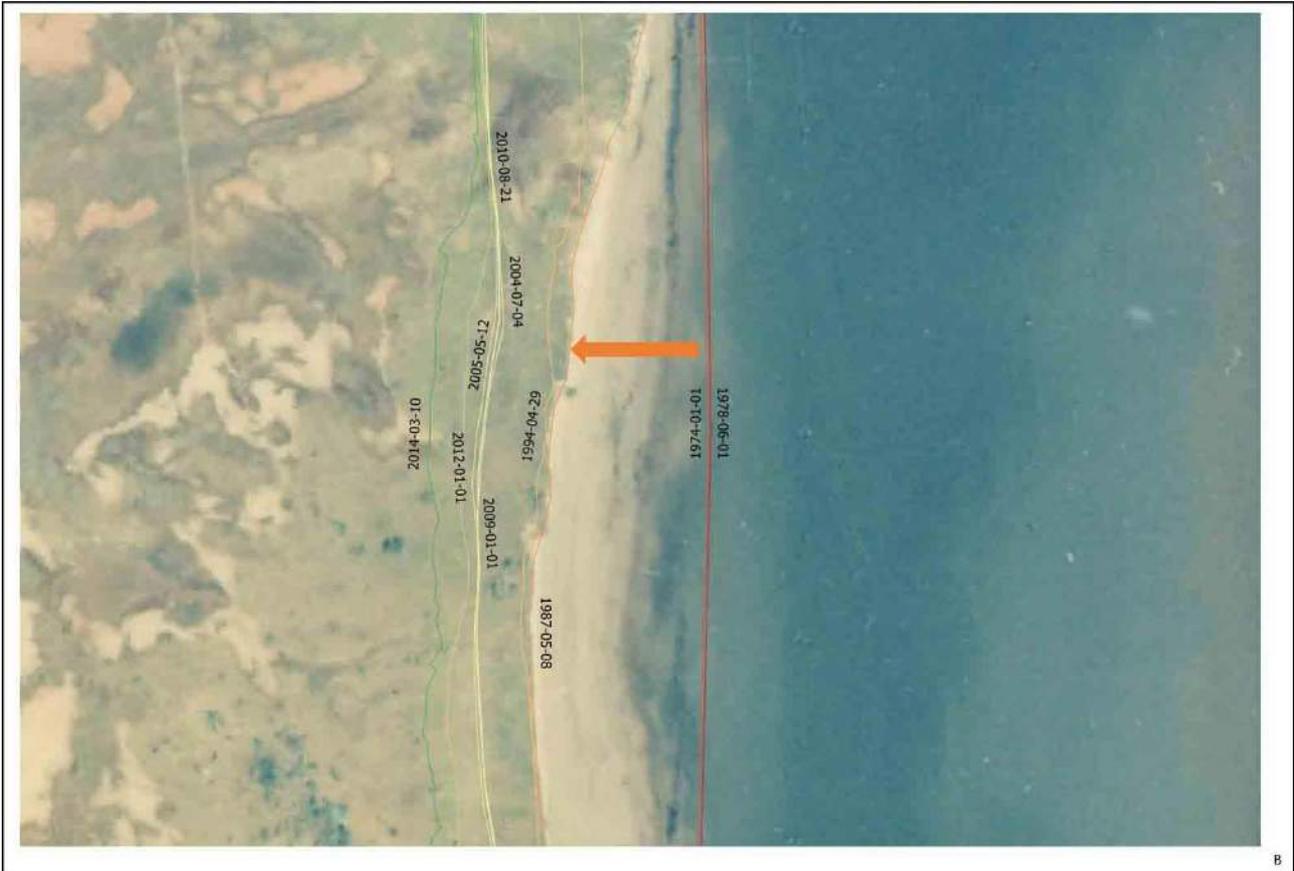
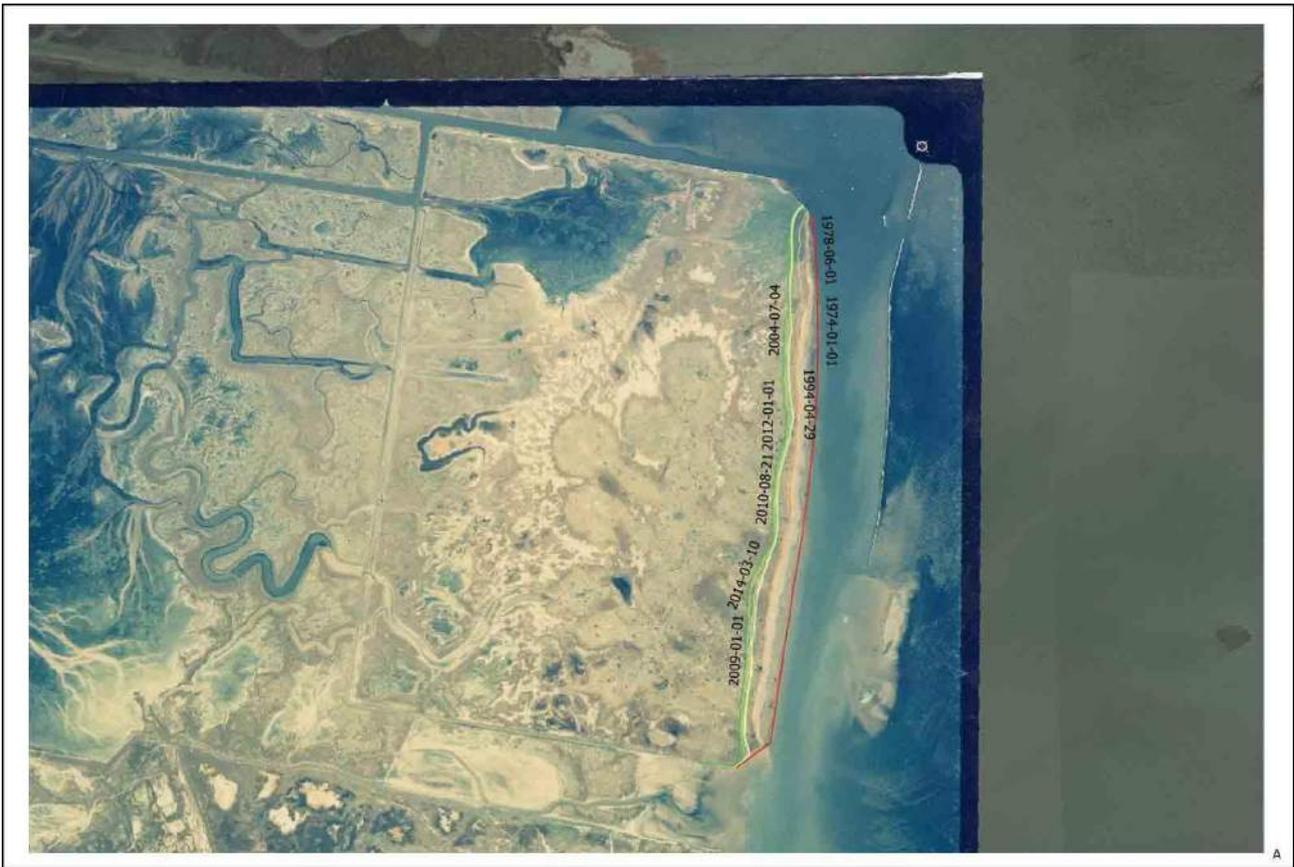


Figura 41. Linee di riva visibili sulla fotografia aerea nell'anno 1987 (A) e rispettivo dettaglio dell'area centrale (B). La freccia in arancione indica la linea di riva per l'anno 1987.

Proseguendo lo studio dei fotogrammi aerei, in Figura 42 è visibile la fotografia dell'anno 1994. Nell'immagine (A) è visibile parte dell'immagine satellitare del 2009 sulla quale è stato georeferenziato il fotogramma aereo, mentre nell'immagine (B) è rappresentato il relativo dettaglio della zona centrale. Il volo effettuato non ricopre l'intera area di studio lasciando scoperta la zona Sud della cassa di colmata B. La freccia in color giallo nell'immagine (B) indica la linea di riva per l'anno 1994.

Dopo vent'anni (1974-1994) il processo erosivo è ancora in atto. Nella stessa immagine (B), in alto vicino alla freccia, si può notare la distanza, in quel tratto di sponda, dalla linea di riva del 1987.

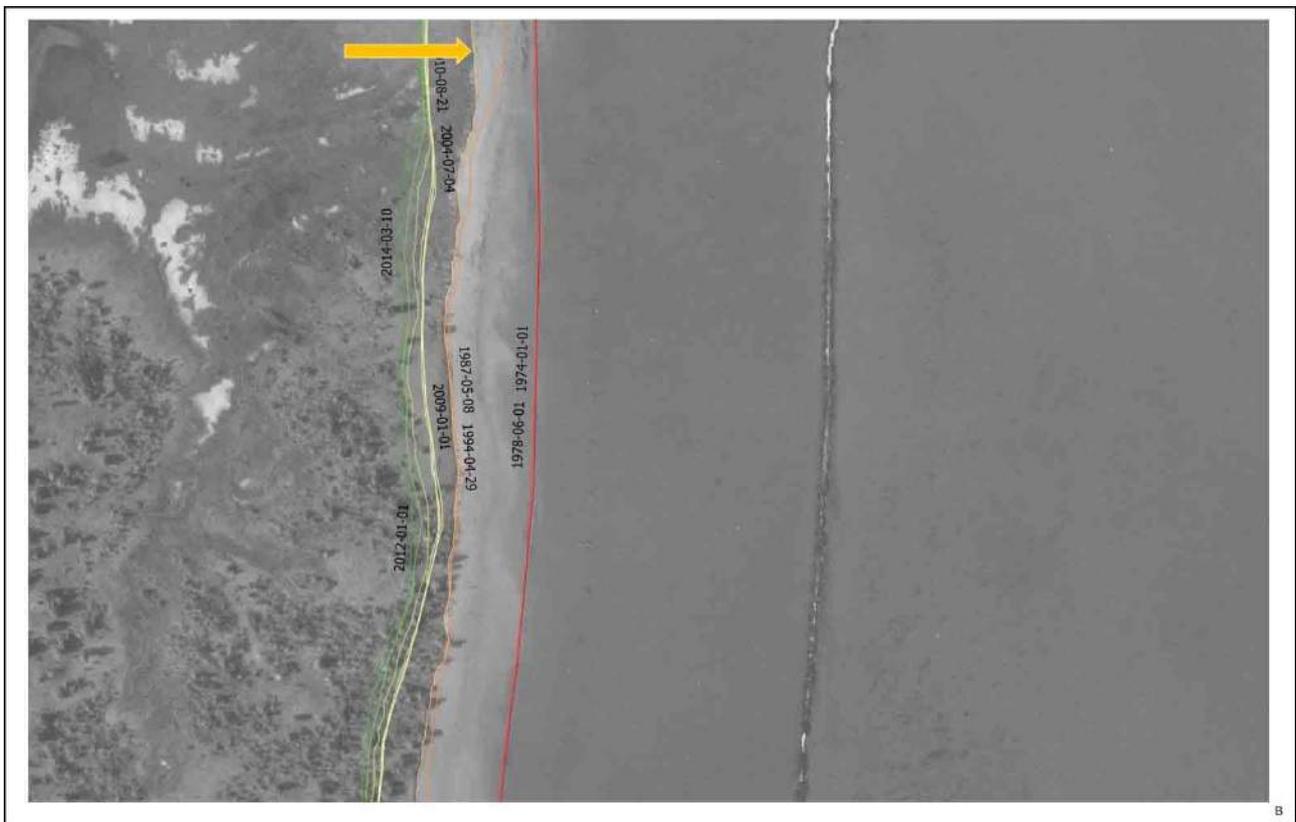


Figura 42. Linee di riva visibili sulla fotografia aerea nell'anno 1994 (A) e rispettivo dettaglio dell'area centrale (B). La freccia in giallo indica la linea di riva per l'anno 1987.

In Figura 43 sono rappresentati i fotogrammi dell'anno 2004. Nell'immagine (A) sono rappresentate le linee di riva per il 2004, mentre nell'immagine (B) viene indicato il dettaglio relativo dell'area centro-Sud.

La linea in colore giallo nell'immagine (B) segna il profilo della linea di riva per l'anno 2004, dopo circa trent'anni dalla situazione iniziale (1974-2004). In questa immagine si nota il progressivo arretramento della linea di riva e la presenza di una florida vegetazione. Le barene del Volpego, che erano presenti nel canale Malamocco-Marghera, a Sud della cassa di colmata B, sono state completamente "smantellate" dall'erosione.

L'analisi di Figura 43 è stata effettuata attraverso l'unione di due fotogrammi aerei dello stesso anno (2004).

In Figura 44, nell'immagine (A) è rappresentato il volo di Venezia dell'anno 2005. Nell'immagine (B) si raffigura il dettaglio dell'area centro-Sud. Dall'anno 2004 al 2005, trattandosi di un intervallo relativamente breve l'erosione è poco evidente dalle immagini. La differenza tra le due linee di riva è minima, esse appaiono quasi coincidenti. Nell'immagine (B), la freccia gialla indica la linea di riva per l'anno 2005.

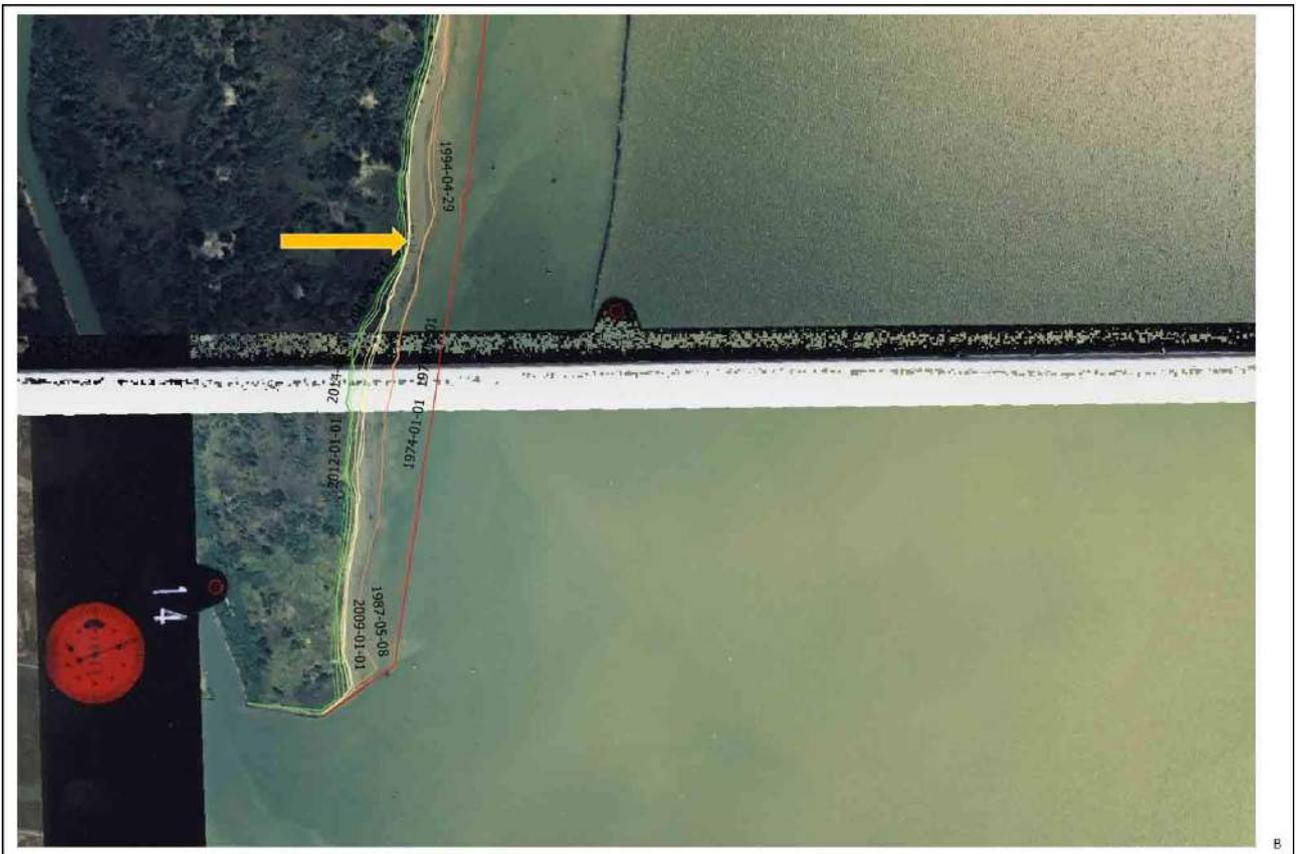
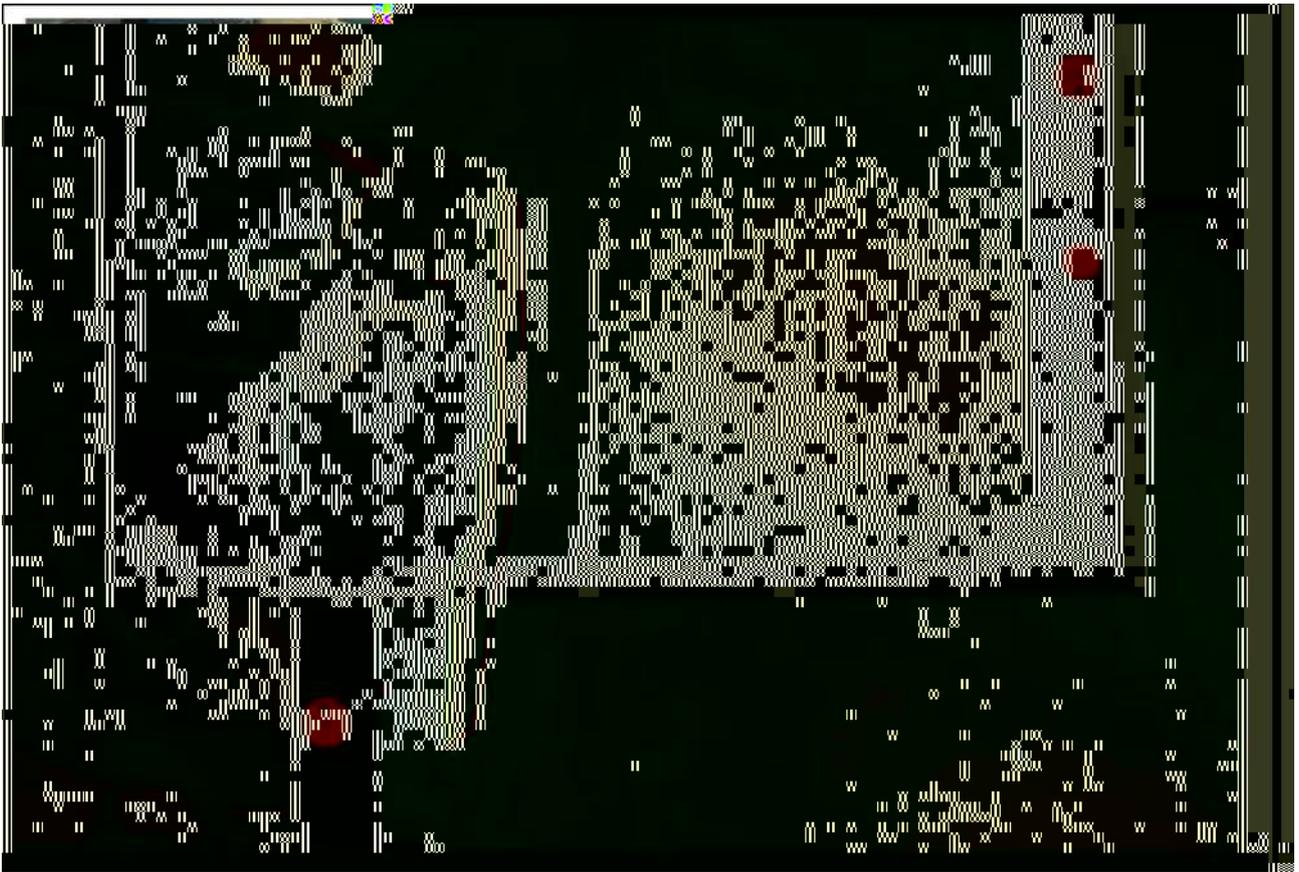


Figura 44. Linee di riva visibili sulle fotografie aeree nell'anno 2005 (A) e rispettivo dettaglio dell'area centro-Sud (B). La freccia gialla indica la linea di riva per l'anno 2005.

In Figura 45 è rappresentata l'immagine satellitare del 2009 (A) e il rispettivo dettaglio dell'area centro-Sud (B).

Anche in questo caso le linee di riva sono quasi sovrapposte, proprio come per gli anni 2004 e 2005 visti in Figura 44. Solo nell'area centro-Sud dell'immagine (B) le due linee di riva si separano visibilmente. La freccia in colore rosa indica la linea di riva per l'anno 2009.

In Figura 46 è rappresentato il fotogramma aereo per l'anno 2010. L'immagine (A) rappresenta l'intera fotografia dell'area con le relative linee di riva, mentre l'immagine (B) indica il dettaglio dell'area centro-Sud della cassa di colmata B. La linea di riva per l'anno 2010 è indicata dalla freccia in verde chiaro.



Figura 46. Linee di riva visibili sulla fotografia nell'anno 2010 (A) e rispettivo dettaglio dell'area centro-Sud (B). La freccia in verde chiaro indica la linea di riva per l'anno 2010.

L'analisi dell'immagine satellitare per l'anno 2012 è riportata in Figura 47, mentre lo studio dell'ultima immagine a disposizione è rappresentato in Figura 48.

Nell'immagine (A) (Figura 47) sono rappresentate tutte le linee di riva per i diversi anni, mentre il relativo dettaglio dell'area centro-Sud è visibile nell'immagine (B). La freccia verde indica la linea di riva per l'anno 2012.

Anche in Figura 48, nell'immagine (A) è raffigurata l'intera area con tutte le linee di riva rappresentate e nell'immagine (B) si rappresenta il rispettivo dettaglio dell'area centro-Sud. La freccia in verde scuro indica la linea di riva dell'anno 2014.

La situazione di arretramento dovuta all'erosione della linea di riva della cassa di colmata B è stata calcolata lungo sezioni tracciate sui fotogrammi aerei, che intersecano perpendicolarmente le linee di riva di tutti gli anni studiati. In Figura 49, nell'immagine (A) si vuole rappresentare l'immagine satellitare del 2014, con le relative linee di riva e sezioni di controllo, tracciate sempre attraverso l'uso del programma QGIS.

Le sezioni tracciate sono visibili in dettaglio nell'immagine (B), dov'è rappresentata l'area centro-Sud della linea di riva della cassa di colmata B. Nella figura sono state tracciate sia nove sezioni (S1-S9) in colore viola sia quindici sezioni (WS1-WS15) in colore verde.

Il primo gruppo di sezioni è stato tracciato nei punti che sembravamo maggiormente significativi dell'erosione attraverso lo studio del materiale fotogrammetrico, mentre il secondo gruppo è stato tracciato nei punti di monitoraggio individuati tramite GPS, lungo la linea di riva della cassa di colmata B (capitolo 7).

Nelle fotografie le linee di riva che sono state presentate in questo capitolo non sono sempre visibili con un dettaglio accurato a causa del formato dell'immagine. In Allegato 2 (vedi capitolo 12.2) si riportano tutte le immagini studiate con la relativa linea di riva.

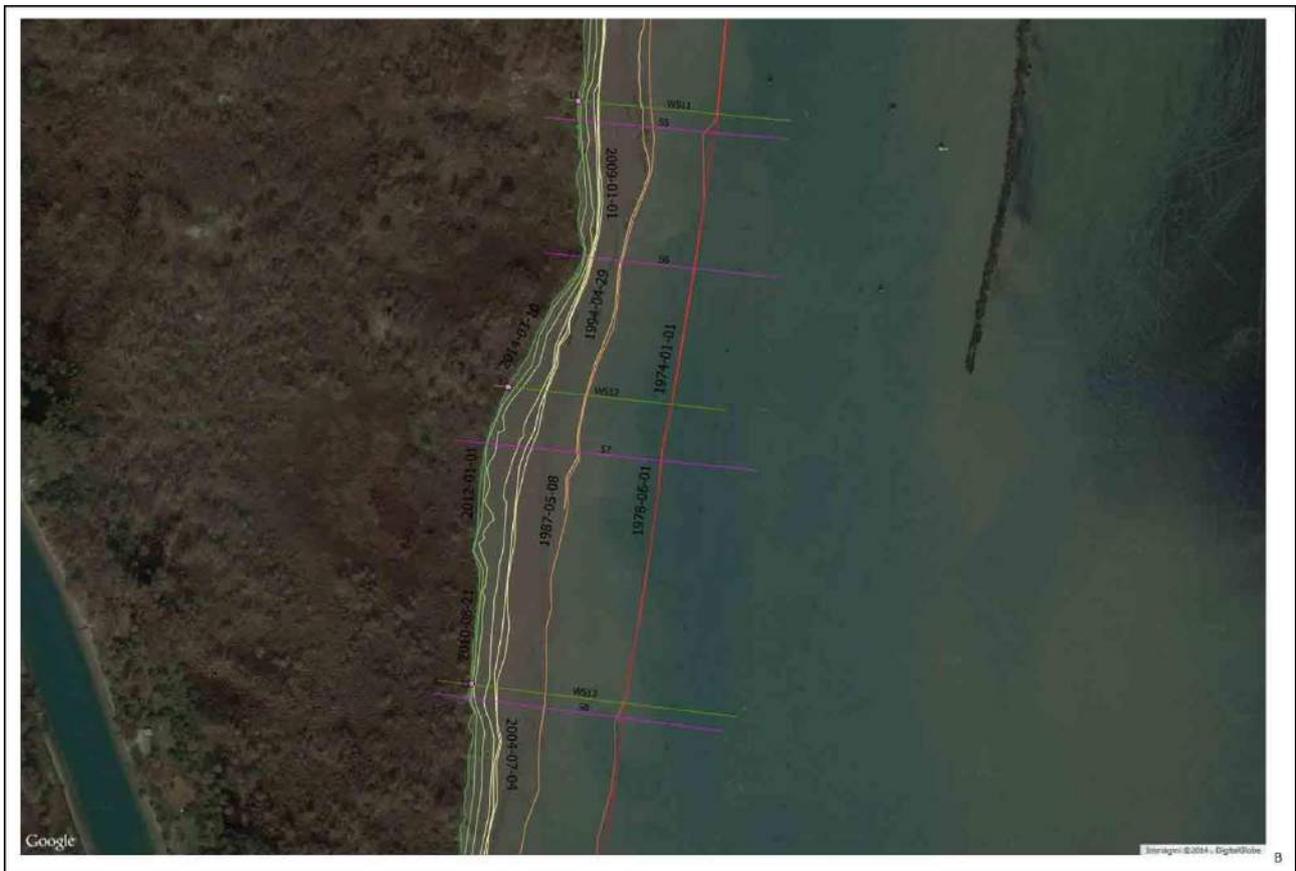


Figura 49. Linee di riva e sezioni per l'immagine satellitare nell'anno 2014 (A) e rispettivo dettaglio dell'area centro-Sud (B).

6. Risultati della georeferenziazione e dell'elaborazione delle immagini

In Figura 50 è rappresentato il dettaglio dell'area centro-Sud della cassa di colmata B (anno 2014) dove le linee di riva visibili sono più facilmente risolubili.

Nell'immagine sono evidenziate due sezioni:

1. WS12 in verde;
2. S7 in viola.

Queste due sezioni sono usate come esempio per le procedure di calcolo utilizzate per tutte le fotografie a disposizione (1974-2014). Tramite l'uso del programma QGIS si è calcolata la regressione della linea di riva per tutte le sezioni tracciate, procedendo sempre da Nord verso Sud.



Figura 50. Dettaglio sezioni S7 (in viola) e WS12 (in verde) per l'immagine satellitare del 2014.

Nella Tabella 1 sono riportati i valori di erosione calcolati per le due sezioni in Figura 50. In tabella (A) sono indicati i valori di erosione lungo la sezione WS12, mentre nella tabella (B) sono rappresentati i valori di erosione calcolati lungo la sezione S7.

Dai calcoli effettuati è risultato che l'erosione totale nella sezione WS12 è di 163 metri, mentre per la sezione S7 è di 174 metri, nel periodo di quarant'anni intercorso.

Tabella 1. Valori di erosione, nel corso degli anni 1974-2014, calcolati lungo le sezioni WS12(A) e S7(B).

Periodo/anni	Erosione in metri nella sezione WS12	Periodo	Erosione in metri nella sezione S7
1974-1978	0	1974-1978	1
1978-1987	84	1978-1987	82
1987-1994	1	1987-1994	2
1994-2004	39	1994-2004	45
2004-2005	1	2004-2005	5
2005-2009	4	2005-2009	8
2009-2010	20	2009-2010	22
2010-2012	7	2010-2012	9
2012-2014	7	2012-2014	0
Totale erosione: 163 m		Totale erosione: 174 m	

Nel grafico, visibile in Figura 51, è rappresentato l'andamento cumulato dell'erosione nella linea di riva della cassa di colmata B, nel corso degli anni (1974-2014), lungo le nove sezioni considerate (S1-S9).

Nel grafico nell'asse delle ascisse (x) sono rappresentati i diversi anni (tempo), mentre nell'asse delle ordinate (y) è rappresentata l'erosione in metri.

Le nove sezioni sono rappresentate in colori diversi e ad ognuna corrisponde una diversa erosione. Ad esempio, la sezione S7 (blu scuro), rappresenta la sezione che raggiunge il più alto valore di erosione, maggiore di 160 m. La sezione S9 invece rappresenta la sezione che ha subito un minore arretramento, poco più di 100 metri, durante i quarant'anni studiati. In questo grafico si può anche notare la variabilità temporale del processo di erosione. Dal grafico si può notare anche che la linea di riva rimane quasi costante nel corso degli anni 1978-1994, per poi riprendere a regredire negli anni a seguire. Dalle analisi fatte si è calcolato che il range di erosione varia da un minimo di circa 3 ad un massimo di circa 4 metri.

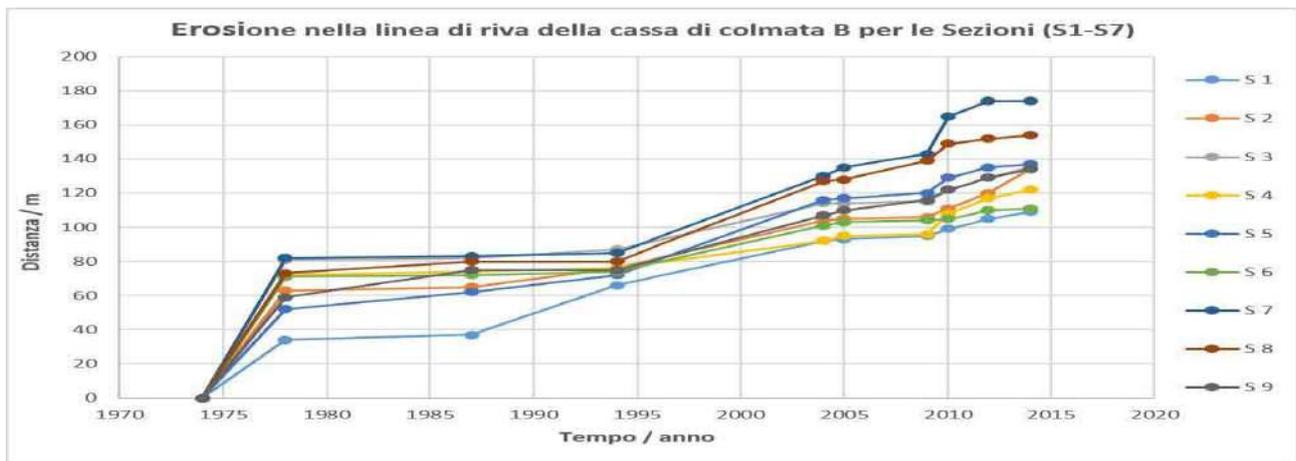


Figura 51. Erosione totale nella linea di riva per la cassa di colmata B nel periodo 1974-2014, calcolati per le sezioni S1-S9, procedendo da Nord verso Sud.

Si è poi esaminato più in dettaglio il processo erosivo considerandone la variazione spazio-tempo riportando, in Figura 52, l'erosione calcolata tra i diversi periodi considerati, cioè è stata calcolata l'erosione della linea di riva nell'asso di tempo indicato. Anche in questa figura nell'asse delle ascisse (x) sono rappresentati i diversi periodi di tempo, mentre nell'asse delle ordinate (y) è rappresentata l'erosione in metri.

Le sezioni sono rappresentate con gli stessi colori delle sezioni del grafico in Figura 51. Da questo grafico si può notare come l'erosione non è costante, ma cambia in base al periodo di tempo considerato. Nei periodi 1974-1978, 1978-1987 l'erosione aumenta, nello stesso modo la riduzione nella linea di riva si accresce anche nei periodi 1994-2004 e 2009-2010. Nel periodo 1987-1994 l'erosione diminuisce, mentre rimane quasi costante dal 2004 al 2005. Nell'intervallo 2005-2009, 2010-2012 e 2012-2014 l'erosione si riduce, aumentando solo per la sezione S2. Bisogna considerare che questi valori di aumento o diminuzione dell'erosione sono relazionati al periodo di tempo. Gli anni nei diversi periodi considerati non sono costanti, ma dal grafico in Figura 51 si è già determinato che l'erosione è un fenomeno progressivo.

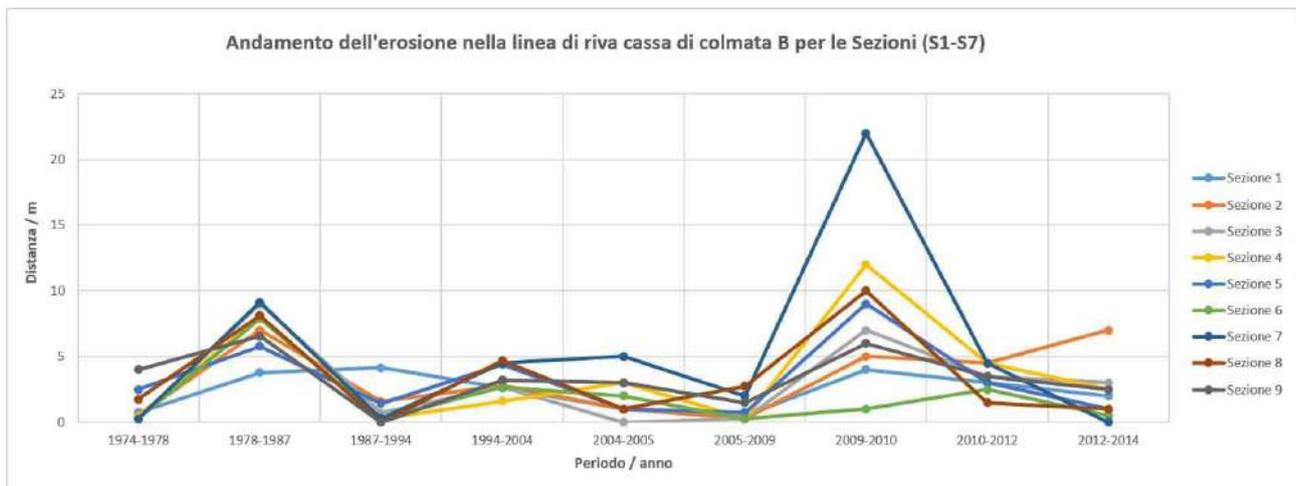


Figura 52. Andamento dell'erosione nella linea di riva della cassa di colmata B, in base al periodo di tempo considerato, per le sezioni S1-S9, procedendo da Nord verso Sud.

Nell'intervallo 2009-2010 si ha il maggior picco di erosione nella sezione S7 (area centro-Sud), ma i valori rimangono abbastanza alti anche nelle altre sezioni. Questo picco di erosione, si è ipotizzato, che sia in relazione con il numero maggiore di acque alte iniziate in questo periodo. Infatti, in Figura 53 viene riportata la distribuzione delle maree maggiori a 110 centimetri, calcolate a Venezia, dal 1872 al 2014 (www.comune.venezia.it). Da questa figura si può vedere come l'aumento nella frequenza delle alte maree si sia verificato a partire dal 1960. Mediamente è stato calcolato che dall'inizio del secolo scorso, si verificava un'alta marea all'anno, invece a partire dagli ultimi anni, la media si è alzata a cinque-sei alte maree all'anno. In relazione all'aumento della frequenza delle alte maree, si è verificata una diminuzione nella frequenza delle basse maree (minori di 50 centimetri).

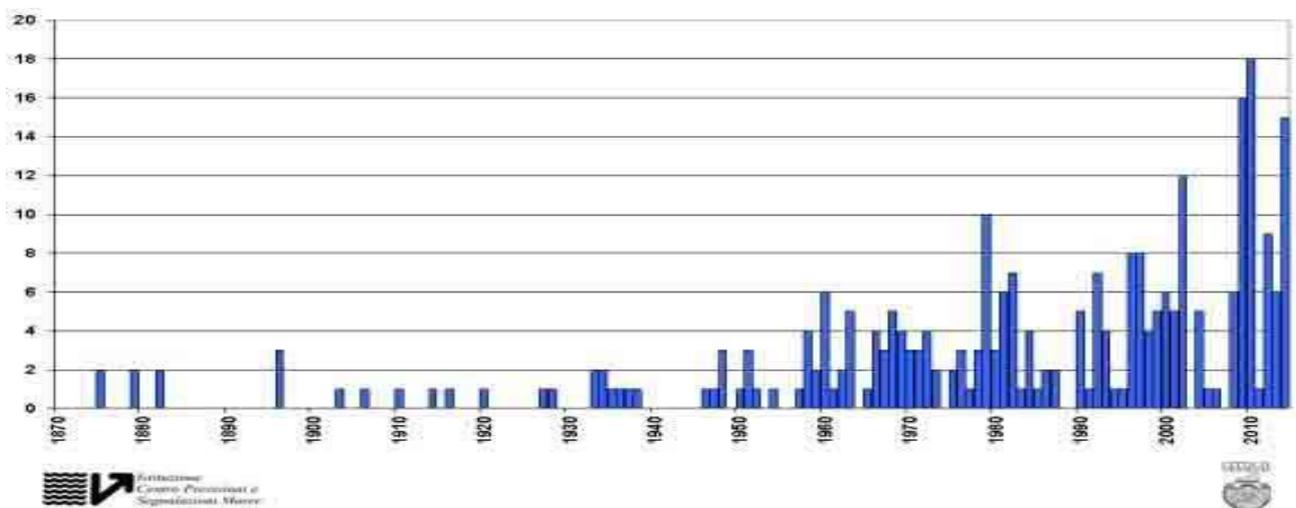


Figura 53. Distribuzione annuale delle alte maree maggiori o uguali a 110 centimetri registrate a Venezia dal 1872 al 2014.

In Figura 54, a differenza del primo grafico (Figura 51), viene rappresentata la sommatoria dell'erosione nella linea di riva della cassa di colmata B, lungo le quindici sezioni (WS1-WS15), sempre per il periodo 1974-2014. Anche in questa figura nell'asse delle ascisse (x) sono rappresentati i diversi anni (tempo); nell'asse delle ordinate (y) è rappresentata l'erosione in metri. Le quindici sezioni sono indicate in colori diversi ed ad ognuna corrisponde un valore differente di erosione. Ad esempio, la sezione WS12 (in arancione scuro) rappresenta la sezione che raggiunge l'erosione più elevata, maggiore di 160 metri. La sezione WS15 invece rappresenta la sezione che ha subito meno erosione, poco più di 100 metri, nell'arco dei quarant'anni studiati. Anche da questo grafico si vede che l'erosione è attiva in tutto il periodo studiato sebbene con intensità diverse nelle differenti stazioni. Sempre in questo grafico si può notare che la linea di riva rimane quasi costante nel corso degli anni 1978-1994, per poi procedere a regredire negli anni a seguire. Dalle analisi fatte si è calcolato che, anche per queste sezioni, il tasso di erosione annuo varia da un minimo di circa 3 metri ad un massimo di circa 4 metri.

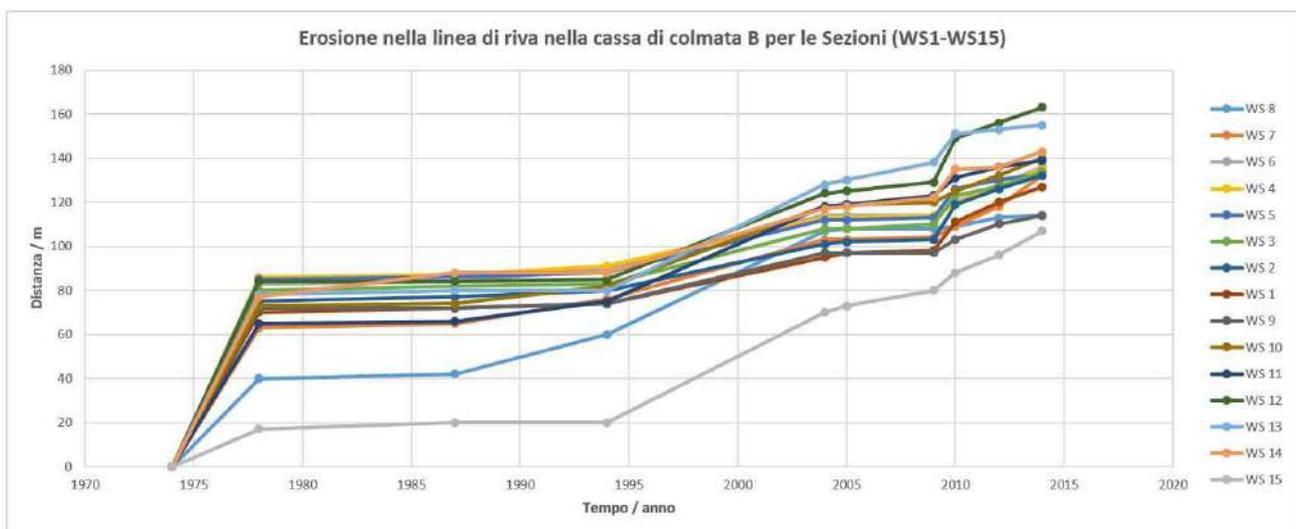


Figura 54. Erosione totale nella linea di riva per la cassa di colmata B nel periodo 1974-2014, calcolata per le sezioni WS1-WS15, procedendo da Nord verso Sud.

Anche in questo caso, per avere delle informazioni più dettagliate sul fenomeno di erosione per le sezioni WS1-WS15 (cioè sapere come l'erosione varia nello spazio e nel tempo), viene considerato l'andamento dell'erosione rappresentato in Figura 55. Anche in questa figura nell'asse delle ascisse (x) sono rappresentati i diversi periodi di tempo, mentre nell'asse delle ordinate (y) sono rappresentate le erosioni calcolate in metri.

Le sezioni sono rappresentate negli stessi colori delle sezioni in Figura 54. Dal grafico, in questa figura, si può notare che l'erosione non è una costante, ma cambia in base al periodo di tempo considerato, indicato nell'asse delle ascisse (x). Nei periodi 1974-1978, 1978-1987 l'erosione aumenta e si accresce anche nei periodi 1994-2004 e 2009-2010. Nel periodo 2009-2010 (come per la sezione S7, nell'area centro-Sud) si ha un picco eccezionale di erosione nella sezione WS12 (area centro-Sud nella cassa di colmata B), rapportabile alle condizioni maggiori di alta marea (Figura 53), ma i valori rimangono abbastanza alti anche nelle altre sezioni di questo periodo.

Nel periodo 1987-1994, 2004-2005 l'erosione diminuisce o rimane quasi costante. L'erosione si riduce anche nel periodo 2005-2009 e 2010-2012. Per il periodo 2012-2014 l'erosione aumenta per le sezioni WS7, WS3, WS14 e WS15, mentre per le altre sezioni essa si riduce. Anche in questo caso bisogna considerare che gli anni di tempo nei diversi periodi non sono costanti, ma dal grafico in Figura 54, si è già determinato che l'erosione aumenta nel tempo. In Allegato 2 (vedi capitolo 12.2), insieme alle fotografie aeree con la rappresentazione delle relative linee di riva, si ritrovano le tabelle con le erosioni in metri, calcolate per ogni periodo di tempo considerato.

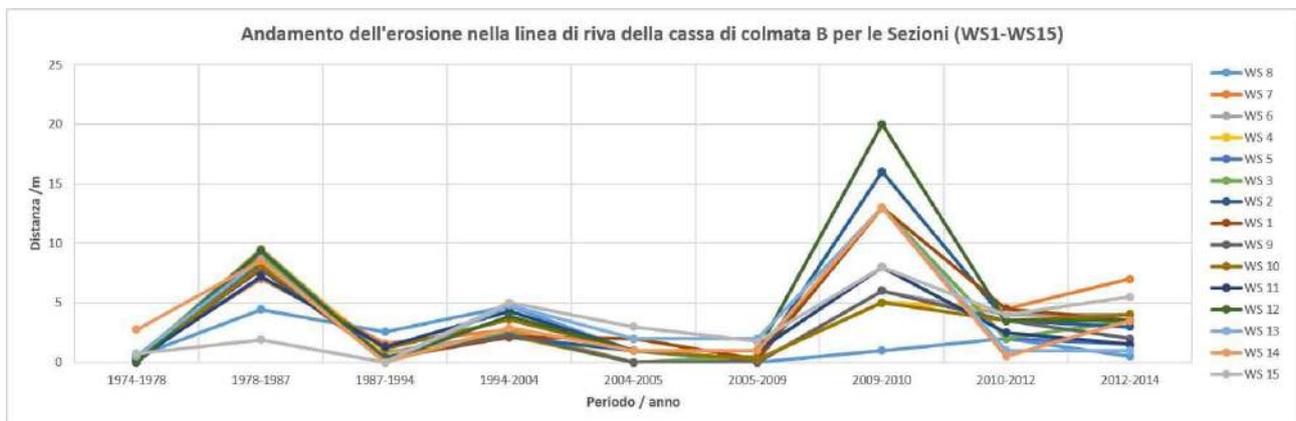


Figura 55. Andamento dell'erosione nella linea di riva della cassa di colmata B, in base al periodo di tempo considerato, per le sezioni WS1-WS15, procedendo da Nord verso Sud.

Per avere un'idea sulle condizioni attuali di arretramento della linea di riva della cassa di colmata B, si sono eseguite osservazioni e analisi di dati raccolti in campo. Queste informazioni verranno descritte nella seconda parte del lavoro di tesi.

7. Attività sperimentale di campo e metodologie di analisi

Presso l'area di studio lungo la linea di riva della cassa di colmata B si sono svolte attività sperimentali in campo con l'obiettivo di verificare la situazione attuale di erosione. La ricerca in campo diventa un fattore indispensabile per rappresentare le condizioni attuali, andando a focalizzare lo studio sulla progressiva modificazione della morfologia lagunare.

Nell'attività sperimentale di campo è stato effettuato un monitoraggio dell'erosione lungo la riva della cassa di colmata B. L'area è stata studiata con diverse misurazioni periodiche da aprile 2014 fino a gennaio 2015.

Per l'indagine sono stati individuati quindici diversi punti, chiamati punti di riferimento o WS, che sono stati localizzati tramite GPS, lungo la riva della cassa di colmata B. In Figura 56 è riportata la mappa con la disposizione dei punti realizzata con il programma QGIS. I punti di controllo sono stati posizionati lungo un tratto della linea di riva (1,8 km) che ha un'estensione totale di circa 2,4 km.

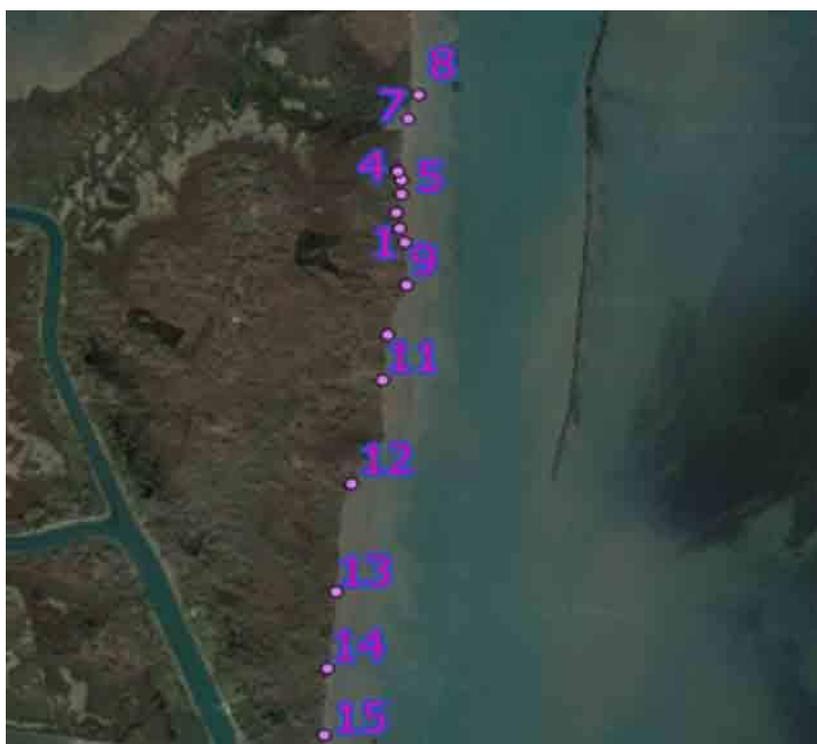


Figura 56. Mappa dei punti di riferimento (WS) individuati tramite GPS.

In ogni punto individuato dal GPS sono stati posizionati, a coppie, quindici paletti di legno, per un totale di trenta paletti. I paletti sono stati posizionati a coppie proprio allo scopo di ritrovare,

durante il campionamento del mese successivo, almeno il paletto più interno alla sponda della cassa di colmata B, nel caso fosse avvenuto un improvviso crollo della sponda. Questi crolli repentini sono visibili nel capitolo 7.1. I punti di riferimento sono stati posizionati in due momenti diversi dello studio:

- 1) per le postazioni dal punto di riferimento 1 al punto di riferimento 8 (zona Nord) le misure sono iniziate dal 17/04/2014;
- 2) per le postazioni dal punto di riferimento 9 al punto di riferimento 15 (zona centrale e Sud) le misure sono iniziate dal 13/05/2014.

Le distanze dai punti di riferimento alla riva sono state misurate con una cordella metrica. In Figura 57 è visibile il metodo di campionamento e di misura utilizzato.



Figura 57. In immagine (A) metodo di campionamento e in immagine (B) metodo di misura. Fotografia del 13 maggio 2014 (A) e del 16 giugno 2014 (B).

Questo metodo consiste nel posizionare i paletti lungo la sponda della cassa di colmata B e di misurare con la cordella metrica la distanza, dal paletto più interno, alla linea di riva. Il paletto più

esterno, verso la linea di riva della cassa di colmata B, è utilizzato anche come punto di riferimento per tracciare, in modo rettilineo, la distanza dalla riva. Il sistema di misura adottato è piuttosto semplice ed è in grado di risolvere variazioni dell'ordine del centimetro, una precisione accettabile per lo scopo delle misurazioni. Lo studio delle immagini aeree e satellitari (vedi capitolo 6) aveva infatti già rivelato che il tasso di erosione annua nell'area è dell'ordine dei metri e quindi apprezzabile anche senza l'uso di rilievi topografici di dettaglio. L'esecuzione di rilievi in quest'area avrebbe del resto comportato notevoli difficoltà per l'assenza di punti di riferimento nell'area dato che le uniche quotature della Carta Tecnica Regionale (anno 1968) erano state fatte solo sulla struttura di contorno della Cassa di Colmata, struttura ormai smantellata dai processi erosivi nell'arco dei quarant'anni considerati (1974-2014).

I dati raccolti nelle sette uscite in campo sono stati riassunti in quindici figure. In Figura 58 è rappresentata una scheda di campo esemplificativa, relativa al punto di riferimento numero 2. Le altre 14 schede campo sono riportate in Allegato 3 (vedi capitolo 12.3).

 Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arenale - Tese 104 Castello 2737F - 30122 Venezia, Italy Tel +39 041 2467827 Fax +39 041 2467949 direttore@ismar.cnr.it C.F. 04054370506 - P.IVA 02118321006		 PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera	
Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina		COORDINATE	
Sito di misurazione: fotografia del 16 luglio 2014		WGS 84	
		φ Lat 45.3971310800966	
		λ Long 12.2592047138746	
		Waypoint	
		7415	
		Punto di riferimento	
		2	
Inquadramento territoriale		Area studio: 16 luglio 2014	
			
Data 1° rilievo:	17/04/2014	Misura in metri:	3.80
Data 2° rilievo:	13/05/2014	Misura in metri:	3.78
Data 3° rilievo:	16/06/2014	Misura in metri:	3.76
Data 4° rilievo:	16/07/2014	Misura in metri:	3.27
Data 5° rilievo:	23/09/2014	Misura in metri:	1.07
Data 6° rilievo:	04/11/2014	Misura in metri:	1.00
Data 7° rilievo:	16/01/2015	Misura in metri:	0.00

Figura 58. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 2.

In diversi punti di riferimento utilizzati nelle stazioni lungo la linea di riva attuale della cassa di colmata B, sono stati raccolti quattordici campioni di sedimento.

In seguito i sedimenti sono stati analizzati in laboratorio tramite lo strumento LISST-100X (*Laser In-situ Scattering and Transmissometry*–Sequoia Scientific, USA). Lo strumento determina la distribuzione granulometrica del sedimento utilizzando il principio della diffrazione della luce di una sorgente laser (manuale d'uso LISST-100X). La funzione del laser è di determinare le dimensioni delle particelle distribuite in soluzione acquosa o la loro concentrazione in volume. Lo strumento può lavorare sia in sito, nella colonna d'acqua, fino ad una profondità massima di 300 metri, sia in laboratorio collegato a una cella di flusso.

In Figura 59 è rappresentato il LISST-100X in uso al CNR-ISMAR di Venezia in immagine (A), insieme al computer a cui è collegato, raffigurato in immagine (B), durante le sessioni di analisi in tempo reale in laboratorio.

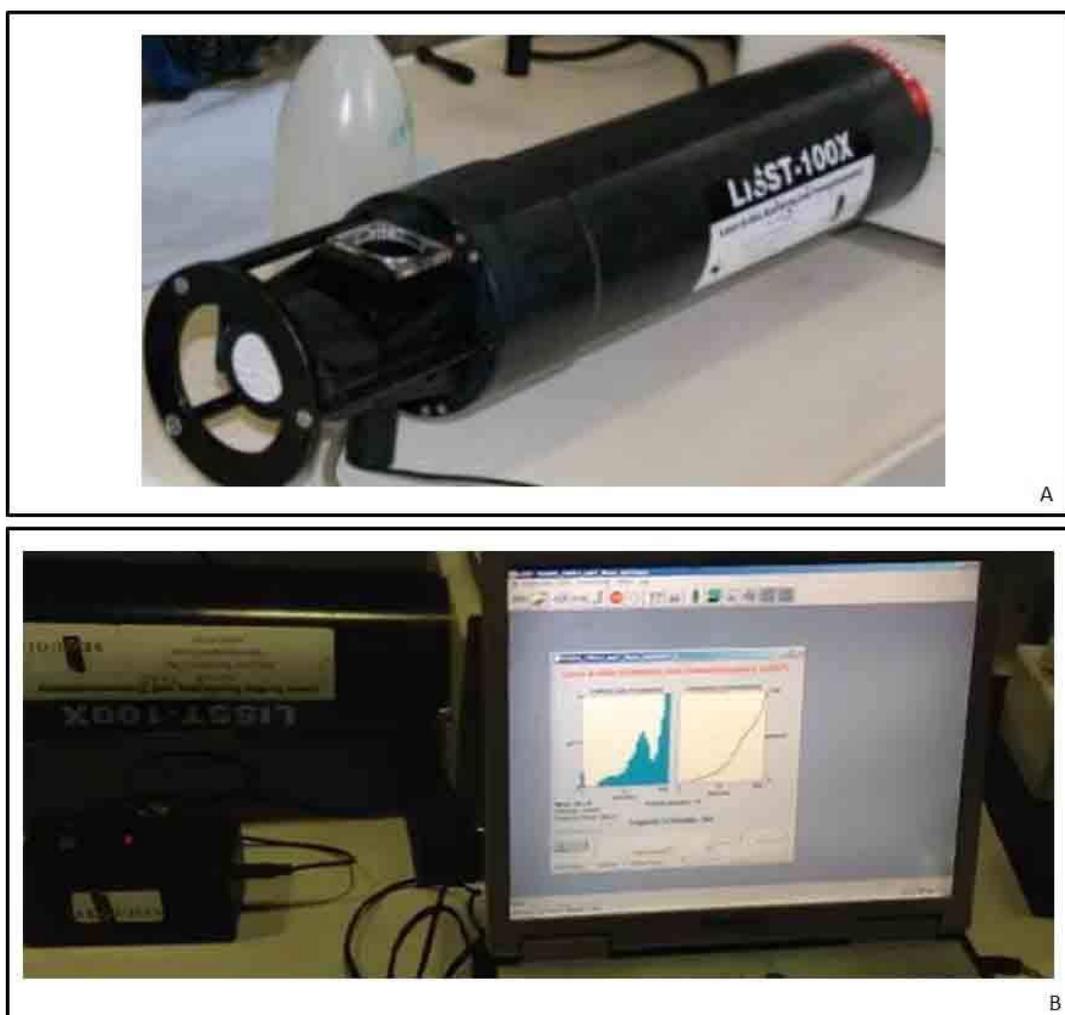


Figura 59. LISST-100X (A) e il computer a cui è collegato durante un'analisi in laboratorio (B).

Quando lo strumento effettua l'analisi le particelle presenti in soluzione deviano (*scattering*) il fascio luminoso del laser (in base alle proprie dimensioni) secondo angoli diversi, in relazione al diametro delle particelle presenti in sospensione nell'acqua o nel campione contenuto nella cella di misura. Per ogni angolo, che corrisponde ad una classe di diametri è presente un rilevatore ottico che determina l'intensità del raggio deviato. Lo strumento confronta l'intensità per i diversi angoli e la confronta con l'intensità iniziale ed esegue un algoritmo di inversione determinando la concentrazione volumetrica delle particelle nelle diverse classi di diametri.

Per la procedura di inversione si è considerato il modello *Random Shape* che meglio si adatta alla tipologia delle particelle presenti nei campioni. Questo modello approssima infatti la forma naturale delle particelle e quindi non le considera regolari come invece fa il modello che utilizza l'approssimazione sferica. Il software per la programmazione e il controllo dello strumento permette di controllare alcuni parametri per la visualizzazione e il salvataggio dei dati e visualizza in tempo reale (Figura 59 (B)) un istogramma che indica la distribuzione (dimensione) delle particelle misurate in $\mu\text{l/l}$ e la concentrazione cumulativa del volume delle particelle suddivise tra le varie classi (μm).

La preparazione del campione da sottoporre ad analisi consiste nel prelievo di una piccola frazione di sedimento dal campione raccolto e nella sua diluizione con 200 ml di acqua distillata (temperatura ambiente). Le analisi sono state effettuate su due repliche per migliorare la rappresentatività e ridurre gli errori di campionamento.

Lo strumento LISST-100X è di CNR-ISMAR misura in un intervallo di diametri da 2,5 a 500 μm con suddivisioni in 32 classi di diametri. Non sono quindi rilevate la frazione sabbia grossa, sabbia molto grossa e la frazione argillosa, il materiale più fine con un diametro inferiore a 2 μm . Tuttavia qualora i materiali agli estremi dello spettro rilevato siano presenti in quantità apprezzabile, questi sono valutati come appartenenti all'ultima classe di diametri rilevata e la distribuzione rimane quindi "aperta", evidenziando la presenza del materiale più fine o più grossolano di quello compreso nell'intervallo di rilevazione.

Per tutti i campioni di sedimento si esegue un minimo di cinquanta letture, dalle quali vengono eliminate, in fase di elaborazione su foglio di lavoro Excel, quelle con un valore non coerente per lo sviluppo di bolle d'aria nella cella di misura. Si esegue una media di tutte le letture validate e si determina la curva di distribuzione del sedimento per ognuno dei campioni analizzati.

I dati ottenuti sono quindi ulteriormente elaborati con GRADISTAT³ v8, una suite di elaborazione statistica creata per gli studi di sedimentologia e basata su una piattaforma Microsoft Visual Basic. Attraverso l'elaborazione con Gradistat si ottengono, oltre alle elaborazioni grafiche, i diversi parametri della distribuzione tra cui la media, la moda, la classe modale e l'asimmetria delle curve granulometriche dei campioni.

Nella rappresentazione dei dati granulometrici sono considerati tre parametri:

1) la **classe modale**, ossia la porzione di sedimento contenente la maggior quantità relativa di granuli (o classe di massima frequenza) nella quale possono essere presenti anche mode secondarie. La variabilità del sedimento può essere elevata se sono presenti molte classi, cioè se il sedimento è molto assortito o eterometrico, oppure bassa se i granuli sono distribuiti in poche classi attorno a quella modale;

2) il valore di **Sorting**, cioè il grado di selezionamento che indica la dispersione della particelle nel campione rispetto alla sua media e pertanto può dare un'idea del grado di elaborazione a cui è stato sottoposto il sedimento; la **deviazione standard grafica inclusiva (σ)** è la misura grafica del grado di selezionamento delle particelle in un campione;

3) il valore dell'**asimmetria grafica inclusiva (Sk_G)** che permette di calcolare graficamente l'asimmetria di una popolazione granulometrica.

Il metodo asimmetrico (*skewness*) misura l'asimmetria geometrica in una curva granulometrica. L'asimmetria fornisce informazioni sulla forma della distribuzione, ha un valore negativo quando la curva granulometrica è spostata verso il campo delle classi più fini; al contrario, si dice che l'asimmetria è positiva se la curva è geometricamente spostata verso il campo delle frazioni più grossolane. Quindi, questo parametro indica la prevalenza o meno di particelle fini o grossolane rispetto alla media del campione.

Per classificare i sedimenti è stata utilizzata la scala di Udden-Wentworth (1922). I limiti di classe di questa scala sono definiti come potenze di 2, rispetto al diametro in mm (es. 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8, etc.).

³ Blott, S.J. And Pye, K. (2001) GRADISTAT: A grain size distribution and statistic package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1237-1248.

In Figura 60 è visibile la scala di classificazione utilizzata nelle elaborazioni, la scala di Udden-Wentworth (immagine A) che considera materiale di silt la frazione da 3,9 a 62,5 µm, sabbia molto fine da 62,5 a 125 µm, sabbia fine da 125 a 250 µm e sabbia media da 250 a 500 µm. Per l'interpretazione dei risultati, per il valore di sorting e dell'asimmetria, è stato considerato il metodo grafico dei momenti geometrici (immagine B).

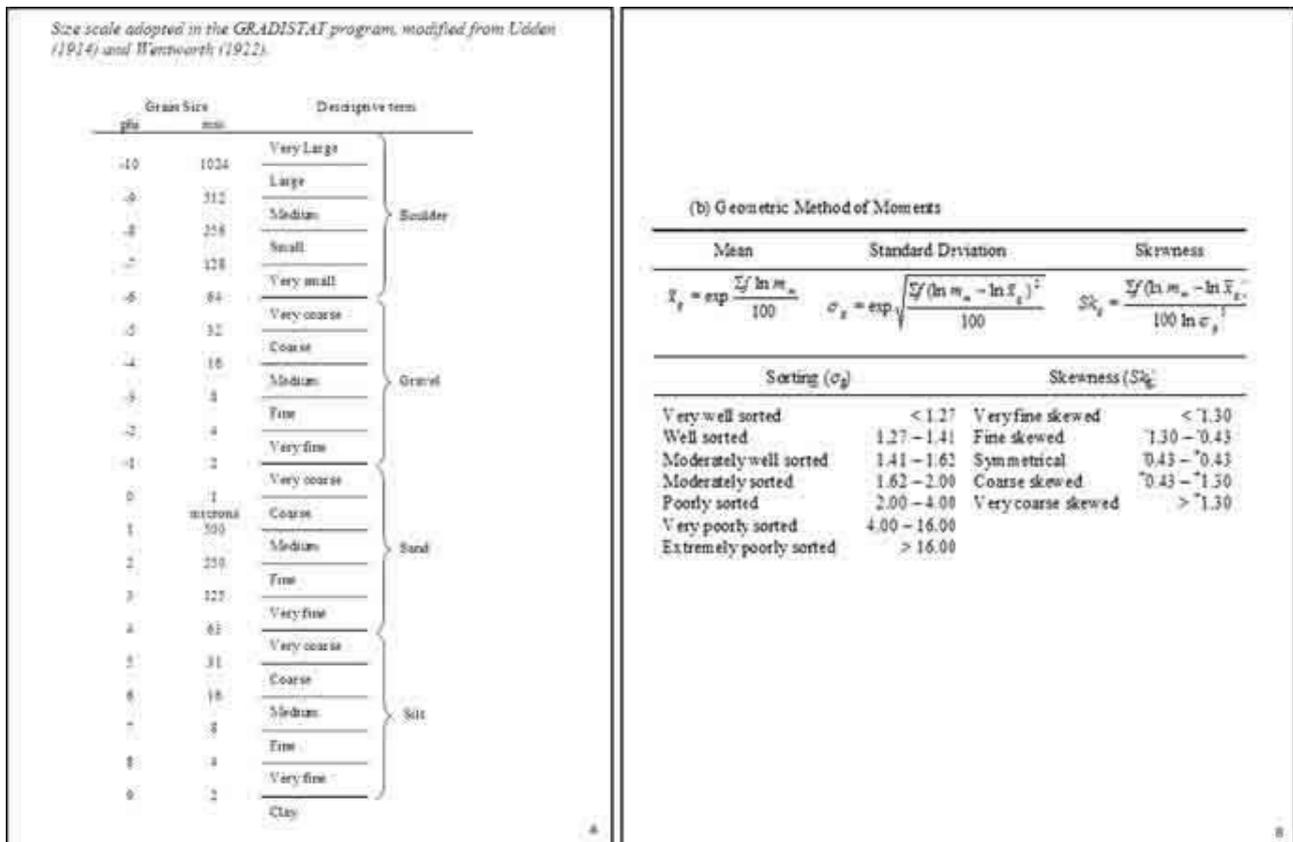


Figura 60. Diagramma di classificazione di Udden-Wentworth (A) e scala dei parametri del metodo dei momenti geometrico (B).

In Allegato 4 (vedi capitolo 12.4) si ritrovano, per tutti i campioni, le schede di output dei risultati ottenuti con l'analisi del Gradistat.

7.1 Osservazioni in campo della cassa di colmata B

In un sopralluogo preliminare dell'area, in occasione di uno studio sul moto ondoso (Scarpa, 2014), in un primo momento è stata osservata la situazione di forte erosione e degrado ritrovata, che caratterizza la sponda del canale nell'area Sud. Si è deciso così di analizzare l'evoluzione nel breve periodo della linea di riva della cassa di colmata B, mediante misurazioni in campo.

7.1.1 Globuli di fango lungo la spiaggia

Lungo il tratto di spiaggia che si è formato per l'erosione della cassa di colmata B, si ritrovano aggregati di fango (globuli) con dimensioni variabili, intorno ai venti centimetri. In Figura 61 sono rappresentati (con le immagini A-B-C) i globuli fusiformi di fango, frammisto a conchiglie, rinvenuti lungo la spiaggia. La forma quasi arrotondata ad ellissoide è dovuta alla azione delle onde generate dal transito delle navi che li trasportano parallelamente alla spiaggia per rotolamento. L'abrasione al contatto con il materiale sabbioso della spiaggia durante il rotolamento ne modellerebbe la forma conferendo ai globuli un aspetto ellissoidale. In immagine (A) il colore più scuro del sedimento lungo il profilo della cassa di colmata B (freccia gialla), potrebbe indicare il livello che la marea può raggiungere, insieme all'altezza dell'onda che segue il passaggio della nave. Durante questo frangimento dell'onda i globuli possono essere trascinati dalle onde verso la battigia (B-C).



Figura 61. Globuli di fango lungo la spiaggia nella cassa di colmata B. Fotografie del 16 luglio 2014.

7.1.2 Cassa di colmata B, area Sud e centro-Sud

In Figura 62 sono riportate due immagini dell'area centro-Sud (A), (B) ottenute utilizzando un drone, lungo la spiaggia della cassa di colmata B. Nell'immagine (A) la morfologia della linea di riva indica uno stato di elevata erosione con alberi caduti lungo la riva. La vegetazione è florida, ma lungo la

riva è erosa in vari punti. Nell'immagine (B) la vegetazione lungo la sponda è segnata dal crollo del materiale che costituisce la sponda. Il promontorio visibile nell'immagine indica un'area dove l'erosione ha inciso in maggior modo nell'area più a Sud.

La freccia rossa, in entrambe le immagini, indica la presenza di sacchi in materiale plastico contenenti sabbia. I sacchi sono stati ritrovati solo in quest'area e non è chiaro se si tratti di materiale abbandonato o di qualche resto di opere di protezione della sponda.



Figura 62. Erosione nell'area centro-Sud (A), e dettaglio di una zona erosa (B) lungo la linea di riva della cassa di colmata B. Fotografie del 16 gennaio 2015.

In Figura 63, invece, sono rappresentate tre immagini (A), (B) e (C), che raffigurano un dettaglio dell'area Sud nella cassa di colmata B. Nell'immagine (A), (fotografia aerea), la zona dentro il cerchio nero indica l'area più erosa in questo tratto di sponda. Le immagini (B) e (C) specificano il suddetto dettaglio (freccia gialla e rossa), fotografato da terra (le due foto sono in sequenza), lungo l'area di spiaggia.

Il piccolo promontorio indicato dalla freccia gialla (A) è sporgente rispetto al resto della linea di riva. Questa situazione si verifica quando, al seguito del crollo di materiale o alberi lungo la riva, si verifica una sorta momentanea di diga, a protezione della sponda. L'erosione in questa situazione incide in maggior modo in altre zone vulnerabili. Quando tutto il materiale sarà rimosso dalla forza delle onde, allora l'erosione procederà anche in quel tratto di sponda.

La cassa di colmata B in questa zona risulta ad una quota di 1,40 metri ed il livello di marea il giorno 16 gennaio 2015 alle ore 10.00, quando sono state effettuate le riprese, era di 28 centimetri (www.comune.venezia.it). Quando si verifica una marea sostenuta, maggiore di 0,80 centimetri, le onde generate dal passaggio delle navi nel canale interagiscono con la base della scarpata erosiva e possono quindi determinare un impatto maggiore sull'erosione della cassa di colmata B.

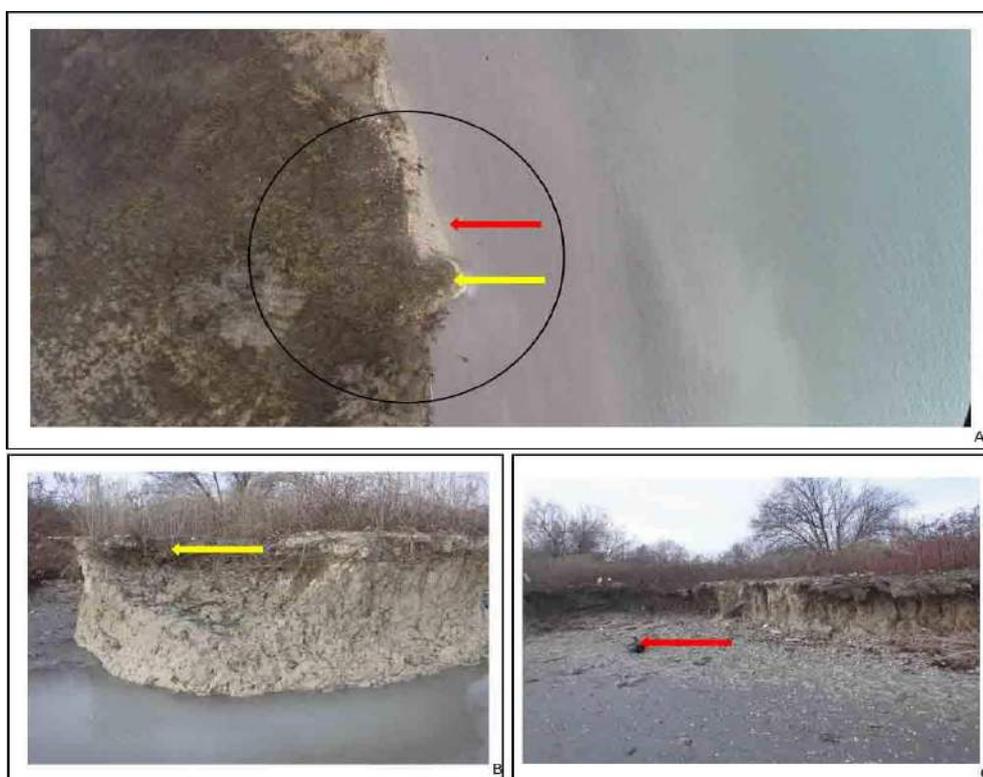


Figura 63. Erosione nell'area Sud della cassa di colmata B. Ripresa aerea (A) e fotografie da terra (B)-(C). Fotografie del 16 gennaio 2015.

7.1.3 Livello di marea nella cassa di colmata B

In Figura 64 (immagine A) è rappresentata una situazione di alta marea ed una situazione di bassa marea (immagine B), incontrate in due mesi di campionamento differenti. Le fotografie (A) e (B) indicano zone dell'area centro-Sud. L'immagine (A) è stata scattata il giorno 4 novembre 2014 e la marea aveva raggiunto un livello di 0,86 centimetri. L'immagine (B) rappresenta la situazione incontrata il giorno 16 gennaio 2015 e la marea, invece, risultava essere ad un livello di 0,28 centimetri.



Figura 64. Livello di marea differente nella cassa di colmata B. Fotografie del 4 novembre 2014 (A) e 16 gennaio 2015 (B).

7.1.4 Cassa di colmata B, area Nord, centro e Sud

Le immagini riportate in Figura 65 dimostrano una sequenza di una zona Nord (A), centrale (B) e Sud (C) della cassa di colmata B, nel loro stato di attuale erosione. Nell'immagine (B) e (C) sono visibili delle zolle di terreno recentemente franate.



Figura 65. Erosione nella cassa di colmata B. Area Nord (A), centrale (B) e Sud (C). Fotografie del 4 novembre (A), del 16 giugno (B) e del 16 luglio 2014 (C).

7.1.5 Erosione della vegetazione della cassa di colmata B

In Figura 66 sono rappresentate alcune delle situazioni erosive che si ritrovano nella zona centro-Sud della cassa di colmata B.



Figura 66. Erosione nella vegetazione della cassa di colmata B. Aree centro-Sud. Fotografie del 16 gennaio 2015.

L'erosione della base della scarpata e il successivo crollo di porzioni della sponda ha messo a nudo gli apparati radicali delle piante determinandone in alcuni casi il crollo e l'accumulo alla base della scarpata. Nell'immagine (C) l'altezza della sponda è stata misurata e risulta avere una quota di circa 1,80 metri dalla base della scarpata; nell'immagine (G) viene rappresentata la fotografia aerea che indica la zona con la più alta concentrazione di alberi caduti ritrovati lungo la spiaggia. Le altre immagini (A), (B), (D), (E) e (F), indicano diverse situazioni di erosione riscontrate nella riva della cassa di colmata B, durante il campionamento.

7.2 Campionamento e analisi di laboratorio

7.2.1 Stazione WS7

Prendendo in esame il primo sito campionato, la Figura 67 indica la locazione geografica della zona corrispondente al punto di riferimento numero 7 (WS7) nella quale sono stati raccolti i primi campioni. Tutti i campionamenti sono stati effettuati il giorno 23 settembre 2014.



Figura 67. Mappa del punto di riferimento numero 7.

Il punto di riferimento 7 si trova lungo la linea di riva nella parte Nord della cassa di colmata B. Partendo da quest'area, indicata in Figura 68, si è prelevato un campione alla base (freccia rossa), nello stato intermedio (freccia blu) e nella parte superficiale (freccia verde) del profilo della cassa di colmata B. In immagine (A) l'area evidenziata dal cerchio in rosso rappresenta la zona di

campionamento, mentre l'immagine (B) indica il dettaglio dell'area dov'è avvenuto il prelievo del sedimento.

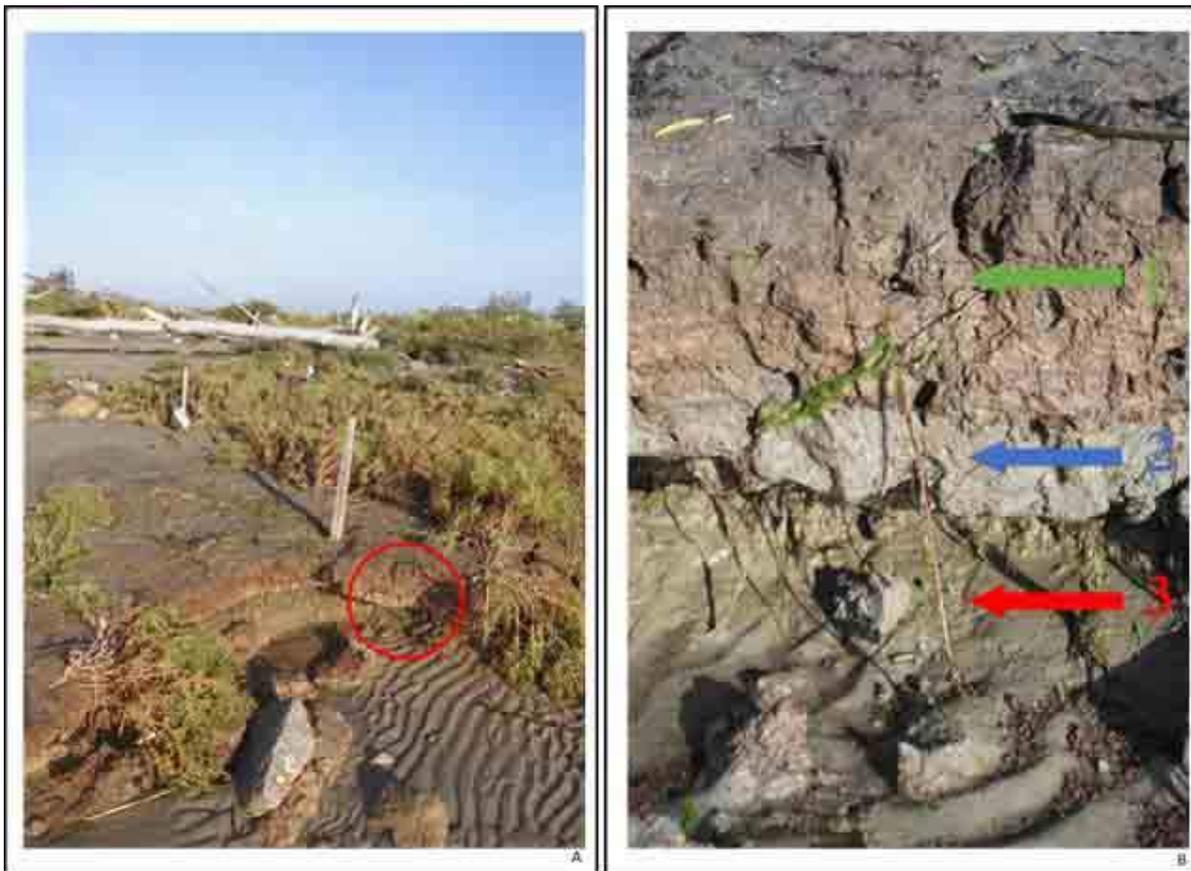


Figura 68. Punto di riferimento numero 7. Prelievo di tre campioni. Zona di campionamento (A) e relativo dettaglio (B). Fotografie del 23 settembre 2014.

In Figura 69 è rappresentato il grafico con scala in micron (μm), che indica la distribuzione delle particelle nei tre campioni raccolti nel punto di riferimento 7. Per tutti i campioni analizzati sarà utilizzato il grafico con la suddetta scala.

L'esame delle curve di distribuzione rappresentate nei grafici consente di identificare alcune interessanti informazioni.

Il primo campione prelevato nello strato superficiale della cassa di colmata B, è rappresentato dalla curva in verde (7wpt_1_top_230914). La curva rappresenta un sedimento eterometrico con uno spettro che ricopre molte classi e la distribuzione è bimodale (mode a $13,9 \mu\text{m}$ e $37,6 \mu\text{m}$). Il valore di Sorting (σ) è di 2,52, si tratta cioè di un sedimento che è poco selezionato in base ai valori riportati in Figura 60 (B). Riferendosi al valore dell'asimmetria grafica inclusiva (Sk_G) esso è pari a 0,36, ossia la distribuzione presenta un'asimmetria verso la frazione più grossolana. Il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è: **fango sabbioso**.

Il secondo campione è stato prelevato nello strato intermedio della sezione campionata ed è rappresentato dalla curva in blu (7wpt_2_intermedio_230914). Anche in questo caso la curva mostra una distribuzione bimodale (mode a 16,4 μm e 32 μm), e rappresenta un sedimento di tipo eterometrico. Si tratta ancora di un sedimento poco selezionato con Sorting (σ) pari a 2,10. L'asimmetria grafica inclusiva (S_{kG}) è uguale a 0,57, ossia la distribuzione presenta un'asimmetria verso la frazione più grossolana di sedimento. Il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è: **fango**.

Il terzo campione raccolto alla base del profilo della cassa di colmata B, è rappresentato dalla curva in rosso (7wpt_3_Base_230914). La distribuzione è plurimodale con tre mode (10,0 μm , 37,6 μm e 61,8 μm). Si tratta anche in questo caso di un sedimento di tipo eterometrico. Il parametro che descrive il Sorting (σ) assume il valore di 2,84, quindi, anche in questo caso, il sedimento è poco selezionato. Il valore dell'asimmetria grafica inclusiva (S_{kG}) risulta di 0,01, ossia la curva è simmetrica. Il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è: **fango sabbioso**.

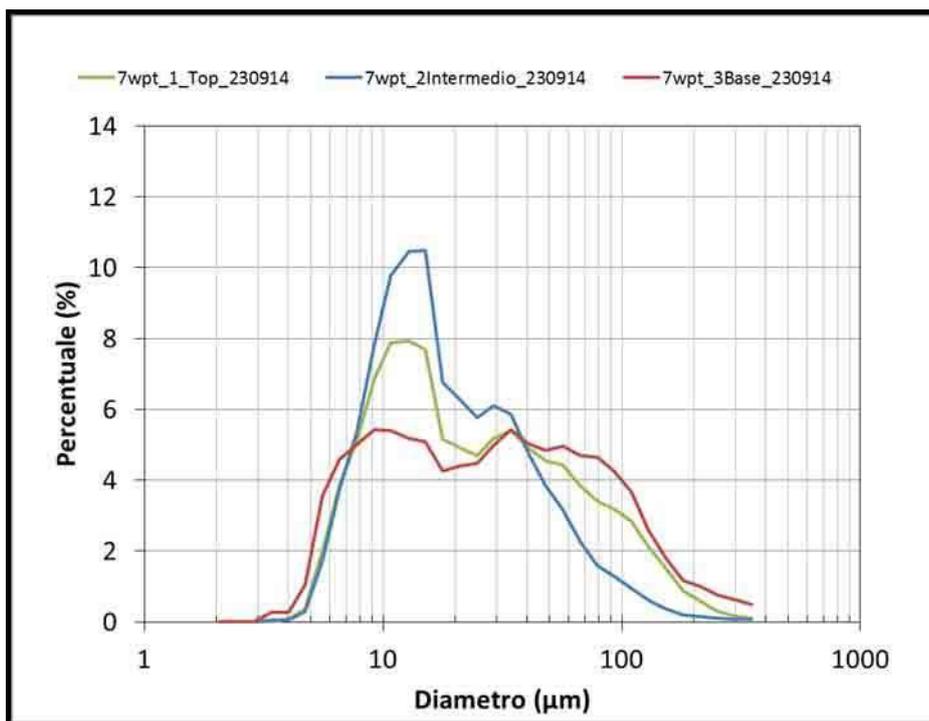


Figura 69. Distribuzione granulometrica, con diametro in micron (μm), nei sedimenti campionati nel punto di riferimento numero 7.

7.2.2 Stazione WS8

La seconda stazione di campionamento si ritrova nel punto di riferimento numero 8 (WS8), la cui locazione geografica è visibile nella mappa in Figura 70.



Figura 70. Mappa del punto di riferimento numero 8.

Anche questo punto di riferimento si ritrova nella parte Nord della cassa di colmata B. In questa zona è stato prelevato solo un campione nello stato superficiale, evidenziato in Figura 71.



Figura 71. Punto di riferimento numero 8. Prelievo di un campione. Zona di campionamento (A) e relativo dettaglio (B). Fotografie del 23 settembre 2014.

Il campione è stato prelevato nella zona più elevata della scarpata (immagine B) lungo la linea di riva nella parte Nord della cassa di colmata B.

In Figura 72 è indicata la distribuzione del campione di sedimento prelevato nell'area indicata dalla freccia rossa in Figura 71 (B).

La distribuzione granulometrica del campione prelevato nel punto 8 (8wpt_4_Top_230914) è plurimodale con tre mode (120 μm , 37,6 μm e 16,4 μm). Il sedimento rappresentato è eterometrico. Il valore del Sorting (σ) è di 3,23, ed il sedimento è quindi poco selezionato. Il valore dell'asimmetria grafica inclusiva (Sk_G) è pari a -1,19, valore che indica un'asimmetria verso la frazione più fine di sedimento. Il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è: **sabbia fangosa**.

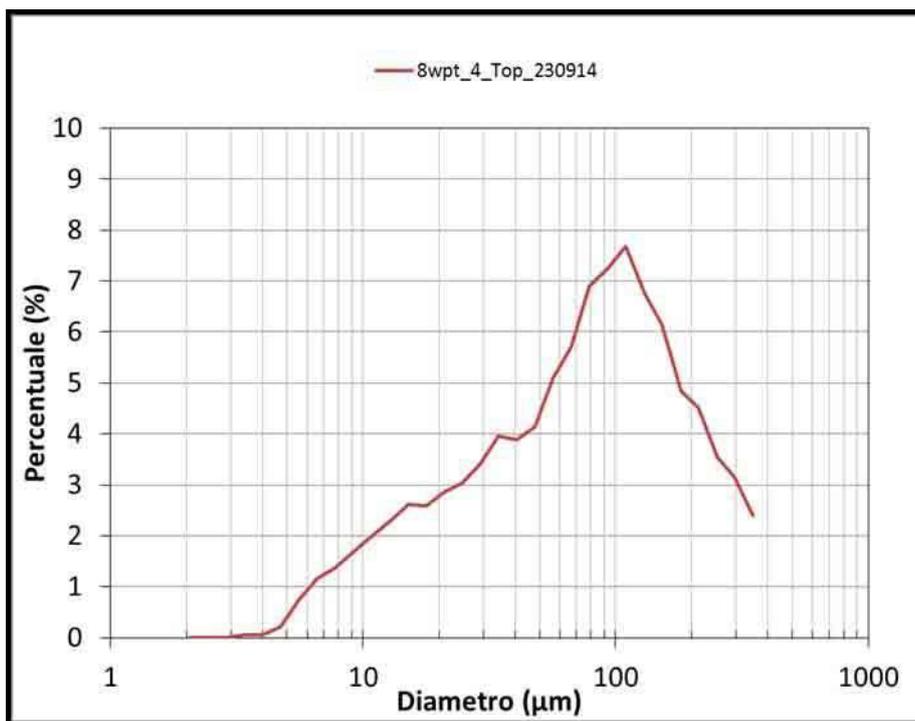


Figura 72. Distribuzione granulometrica, con diametro in micron (μm), nei sedimenti campionati nel punto di riferimento numero 8.

7.2.3 Stazione WS3

Proseguendo lungo la linea di riva della cassa di colmata B si incontra il punto di riferimento numero 3 (WS3). La sua locazione geografica è visibile in Figura 73. In questa zona sono stati prelevati due campioni di sedimento, alla base e alla sommità della scarpata di erosione della cassa di colmata B.

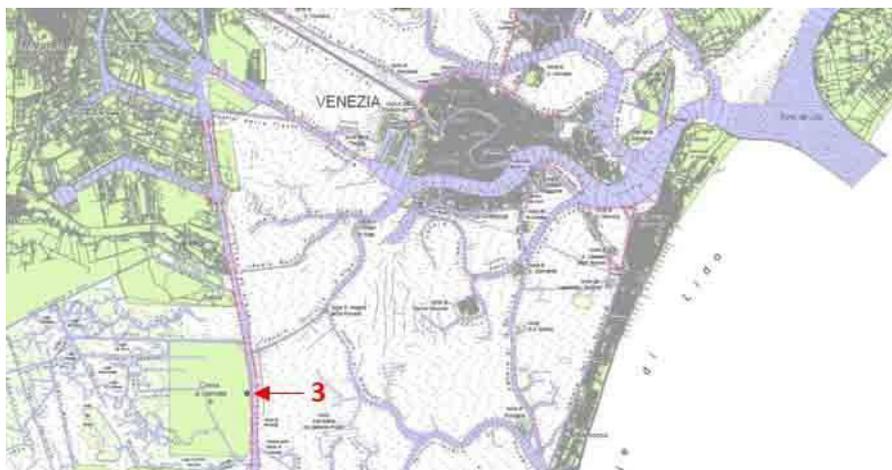


Figura 73. Mappa del punto di riferimento numero 3.

In Figura 74 (A) è rappresentata la posizione della stazione WS3, evidenziata dal cerchio rosso. Nell'immagine (B) sono indicati con la freccia rossa e blu i punti di prelievo dei campioni di sedimento numero 5 e 6.

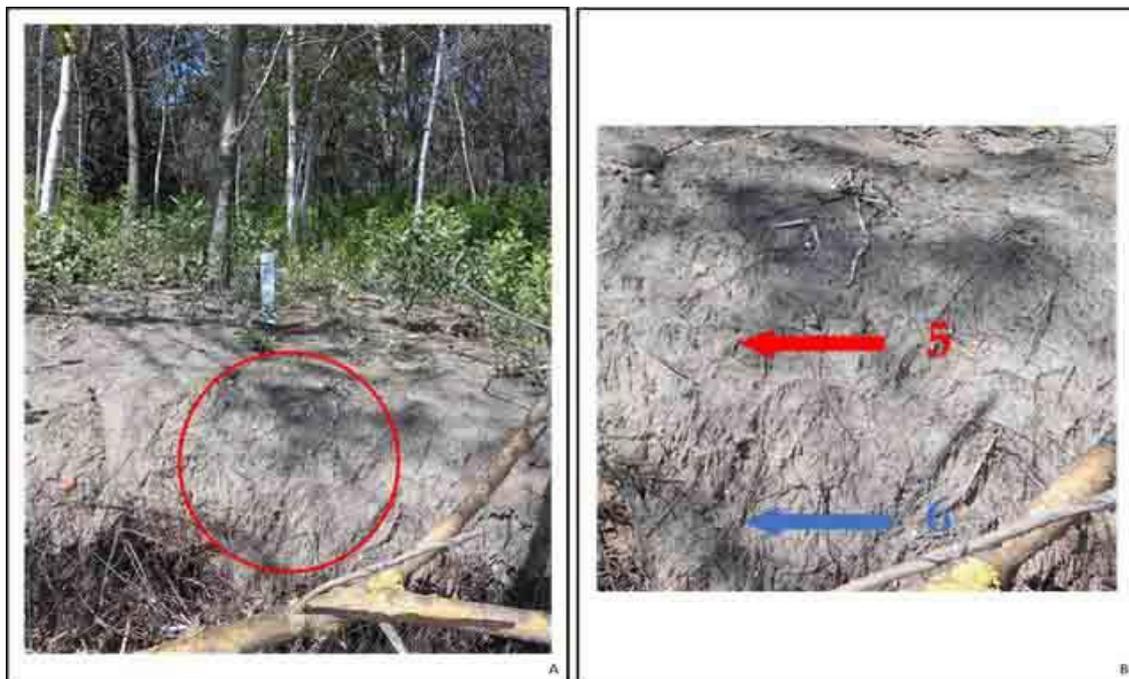


Figura 74. Punto di riferimento numero 3. Prelievo di due campioni. Zona di campionamento (A) e relativo dettaglio (B). Fotografie del 23 settembre 2014.

In Figura 75 è rappresentata la distribuzione granulometrica dei campioni raccolti nella stazione WS3.

Le curve del grafico, anche per questi campioni selezionati, si possono ricavare diverse informazioni. La curva rossa rappresenta la distribuzione granulometrica del campione numero 5 raccolto sulla superficie della zona boschiva della cassa di colmata B (3wpt_5_suolo_sup_230914). La distribuzione granulometrica è bimodale (mode a 86 μm e 16,4 μm) e rappresenta un sedimento eterometrico. Il valore di Sorting (σ) è di 3,09 e quindi il sedimento è poco selezionato. Il valore dell'asimmetria grafica inclusiva (Sk_G) è -1,14, valore che indica un'asimmetria verso la frazione più fine di sedimento. Il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è: **sabbia fangosa**.

Il sedimento descritto dalla curva in blu (3wpt_6_Base_230914) in Figura 75 si riferisce al campione numero 6 prelevato nello strato alla base della scarpata (Figura 74 (B)). La distribuzione granulometrica del sesto campione è plurimodale con tre mode (14,1 μm , 16,4 μm e 37,6 μm) e rappresenta un sedimento eterometrico. Il valore di Sorting (σ) è di 3,30, ed anche in questo caso, il sedimento è poco selezionato. Il valore dell'asimmetria grafica inclusiva (Sk_G) è di -0,60, valore che indica un'asimmetria verso la frazione più fine di sedimento. Il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è: **fango sabbioso**.

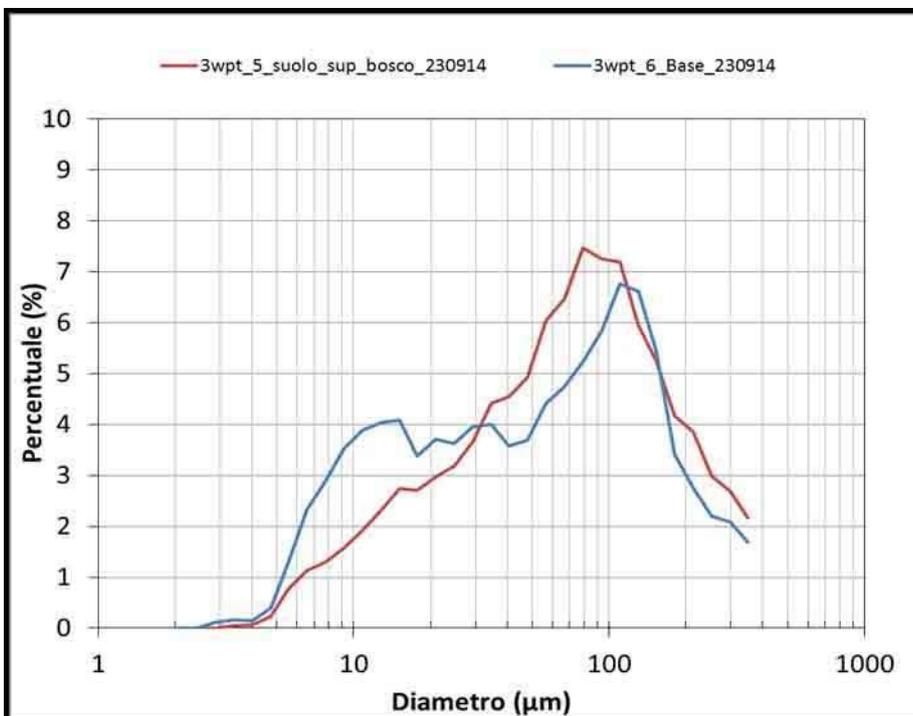


Figura 75. Distribuzione granulometrica, con diametro in micron (μm), nei sedimenti campionati nel punto di riferimento numero 3.

7.2.4 Stazione WS9

Proseguendo, da Nord verso Sud, lungo la linea di riva della cassa di colmata B, s'incontra il punto di riferimento numero 9 (WS9), la cui locazione geografica è visibile in Figura 76.



Figura 76. Mappa del punto di riferimento numero 9.

In quest'area, rappresentata in Figura 77, sono stati prelevati tre campioni.



Figura 77. Punto di riferimento numero 9. Prelievo di tre campioni. Fotografia del 23 settembre 2014.

In Figura 78, l'immagine (A) indica il campione numero 7, che rappresenta il globulo di fango (freccia verde), ritrovato alla base della scarpata.

Il campione numero 8, visibile nell'immagine (B), indica il sedimento che circonda il globulo (freccia blu) e il campione numero 9, visibile nell'immagine (C), rappresenta il sedimento campionato alla base della scarpata (freccia rossa).



Figura 78. Dettaglio dei campioni di sedimento prelevati nel punto di riferimento numero 9. Fotografie del 23 settembre 2014.

In Figura 79 è rappresentata la distribuzione delle particelle nei tre campioni raccolti nel punto di riferimento numero 9. L'esame delle curve di distribuzione rappresentate nel grafico consente di identificare alcune informazioni.

Il campione numero sette rappresenta il globulo di fango, ritrovato alla base della scarpata della cassa di colmata B, ed è rappresentato dalla curva in verde (9wpt_7_globo_fango_230914). La curva rappresenta un sedimento con uno spettro che ricopre poche classi e quindi è un sedimento poco assortito. La distribuzione granulometrica è unimodale (13,9 μm). Il valore di Sorting (σ) è di 1,59, si tratta cioè di un sedimento che è moderatamente ben selezionato in base ai valori riportati in Figura 60 (B). Riferendosi al valore dell'asimmetria grafica inclusiva (Sk_G) esso è pari 0,68, ossia la distribuzione presenta un'asimmetria verso la frazione più grossolana. Il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è: **fango**.

Il campione numero 8 è stato prelevato nel sedimento che circonda i globuli di fango all'interno della cassa di colmata B, ed è rappresentato dalla curva in verde (9wpt_8_Matrice_230914). Anche in questo caso la curva mostra una distribuzione unimodale con una sola moda (16,4 μm), e rappresenta un sedimento di tipo eterometrico. Si tratta di un sedimento poco selezionato con Sorting (σ) pari a 2,39. L'asimmetria grafica inclusiva (Sk_G) è uguale a 0,47, ossia la distribuzione

presenta un'asimmetria verso la frazione più grossolana di sedimento. Il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è: **fango sabbioso**.

Il campione numero 9 raccolto alla base del profilo della cassa di colmata B, è rappresentato dalla curva in rosso (9wpt_9_Base_230914) La distribuzione è plurimodale con tre mode (10 μm , 37,6 μm e 61,8 μm). Si tratta anche in questo caso di un sedimento di tipo eterometrico. Il parametro che descrive il Sorting (σ) assume il valore di 2,71. Quindi, anche in questo caso, il sedimento è poco selezionato. Il valore dell'asimmetria grafica inclusiva (Sk_G) risulta di 0,17, ossia la curva è simmetrica. Il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è: **fango sabbioso**.

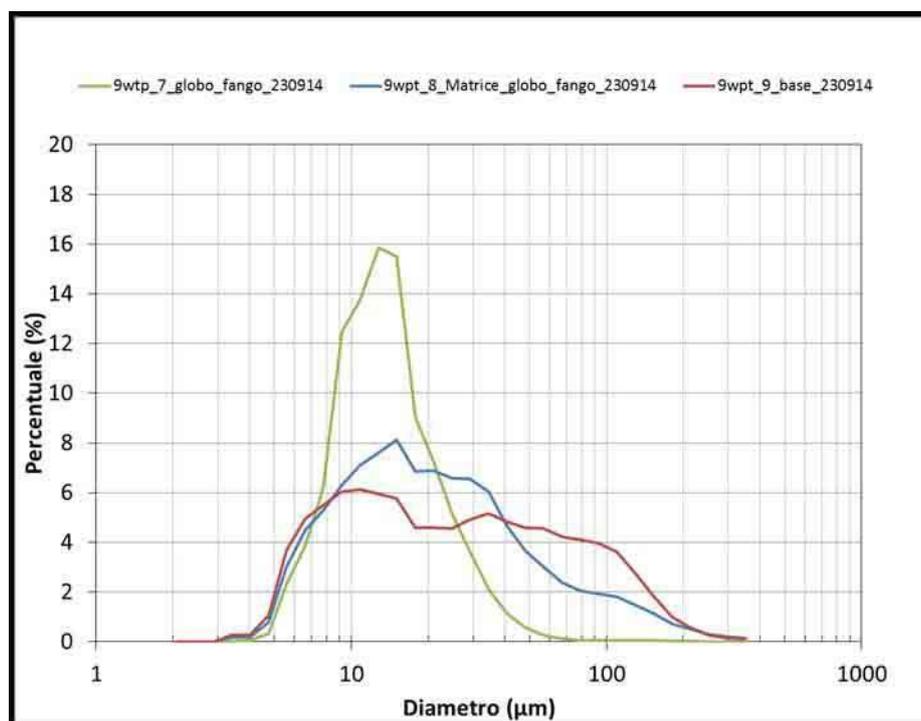


Figura 79. Distribuzione granulometrica, con diametro in micron (μm), nei sedimenti campionati nel punto di riferimento numero 9.

7.2.5 Stazione WS11

Procedendo sempre in direzione Sud, lungo la linea di riva della cassa di colmata B, nella zona centro-Sud, è stato collocato il punto di riferimento numero 11 (WS11), la cui locazione geografica è visibile in Figura 80.

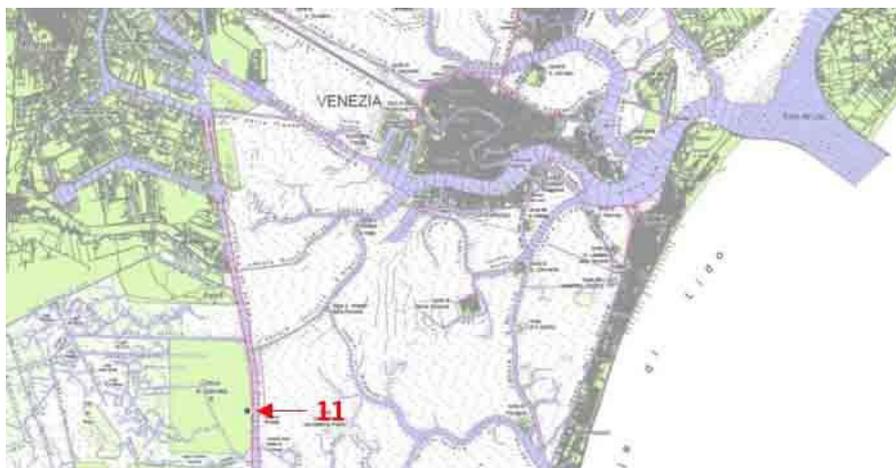


Figura 80. Mappa del punto di riferimento numero 11.

In quest'area, visibile in Figura 81, sono stati raccolti tre campioni all'interno della zona indicata dal cerchio in rosso.



Figura 81. Punto di riferimento numero 11. Prelievo di tre campioni. Fotografia del 23 settembre 2014.

In Figura 82, l'immagine (A) indica il campione numero 10, che rappresenta il sedimento prelevato alla base della scarpata della cassa di colmata B (freccia blu).

Il campione numero 11, visibile nell'immagine (B), indica il sedimento campionato nella zona superficiale della scarpata (freccia rossa) e il campione numero 12, visibile nell'immagine (C), rappresenta il sedimento prelevato da un globulo di fango, ritrovato alla base della scarpata (freccia verde).



Figura 82. Dettaglio dei campioni di sedimento prelevati nel punto di riferimento numero 11. Fotografie del 23 settembre 2014.

In Figura 83 è mostrata la distribuzione granulometrica del sedimento prelevato nei punti campionati. Dalle curve del grafico, anche per questi campioni selezionati, si possono ricavare diverse informazioni.

La curva blu rappresenta la distribuzione granulometrica del campione numero 10 raccolto alla base della scarpata della cassa di colmata B (11wpt_10_Base_Scarpata_230914). La distribuzione granulometrica è plurimodale con tre mode (37,6 μm , 61,8 μm e 16,4 μm), e rappresenta un sedimento eterometrico. Il valore di Sorting (σ) è di 2,65 e quindi il sedimento è poco selezionato. Il valore dell'asimmetria grafica inclusiva (Sk_G) è -0,32, valore che indica che la curva è simmetrica. Il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è: **fango sabbioso**.

Il sedimento descritto dalla curva in rosso (11wpt_11_top_scarpata_230914) nel grafico, si riferisce al campione numero 11 prelevato nello strato superficiale della scarpata. La distribuzione granulometrica dell'undicesimo campione è unimodale (16,4 μm). La curva rappresenta un sedimento con uno spettro che ricopre poche classi e quindi è un sedimento poco assortito. Il valore di Sorting (σ) è di 1,86, ed in questo caso, il sedimento è moderatamente selezionato, in base ai valori riportati in Figura 60 (B). Il valore dell'asimmetria grafica inclusiva (Sk_G) è di 1,56, valore che indica un'asimmetria verso la frazione molto grossolana di sedimento. Il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è: **fango**.

Il sedimento descritto dalla curva in verde (11wpt_12_globo_fango_230914) nel grafico, si riferisce al campione numero 12, un globulo di fango, prelevato nei pressi della base della scarpata. La distribuzione granulometrica del dodicesimo campione è unimodale (16,4 μm), lo stesso valore dell'undicesimo campione, descritto precedentemente. La curva rappresenta un sedimento con uno spettro che ricopre poche classi e, quindi, anche in questo caso, è un sedimento poco assortito. Il valore di Sorting (σ) è di 1,43, ed anche in questo caso, il sedimento è moderatamente selezionato. Il valore dell'asimmetria grafica inclusiva (Sk_G) è di 0,16, valore che indica una simmetria nel sedimento. Anche in questo caso, il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è: **fango**.

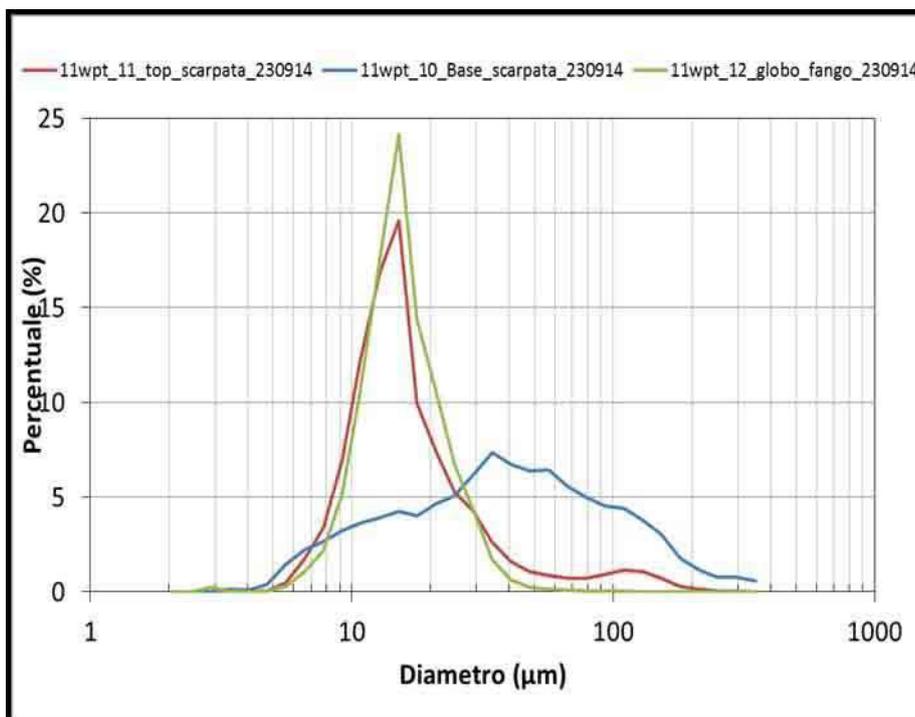


Figura 83. Distribuzione granulometrica, con diametro in micron (μm), nei sedimenti campionati nel punto di riferimento numero 11.

7.2.6 Stazione WS12

L'ultima zona di campionamento si riferisce al punto di riferimento numero 12, localizzato all'inizio dell'area Sud, lungo la sponda della cassa di colmata B, visibile in Figura 84.

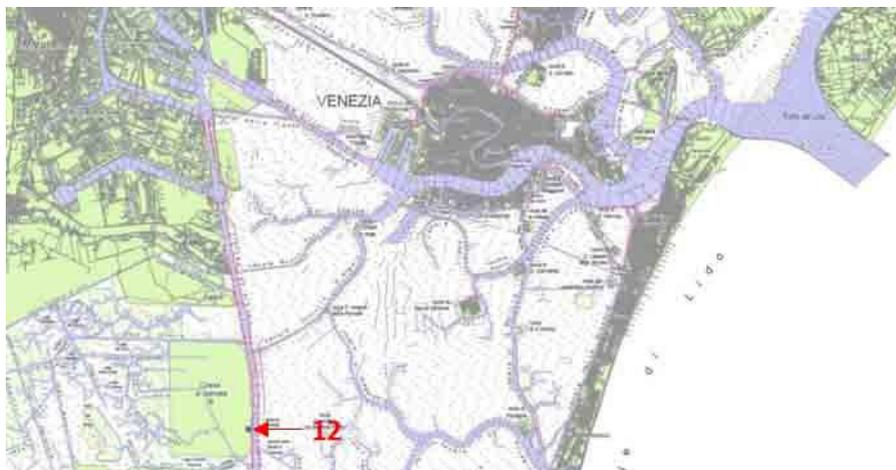


Figura 84. Mappa del punto di riferimento numero 12.

In quest'area, rappresentata in Figura 85, è stato analizzato il sedimento ritrovato nella spiaggia accanto alla base della scarpata della cassa di colmata B (cerchio blu), ed il sedimento campionato alla base della scarpata (cerchio verde).



Figura 85. Punto di riferimento numero 12. Prelievo di due campioni. Fotografia del 23 settembre 2014.

In Figura 86, l'immagine (A) indica il campione numero 13, che rappresenta il sedimento prelevato lungo la spiaggia accanto alla base della scarpata della cassa di colmata B (freccia blu).

Il campione numero 14, visibile nell'immagine (B), indica il sedimento campionato alla base della scarpata della cassa di colmata B (freccia verde).

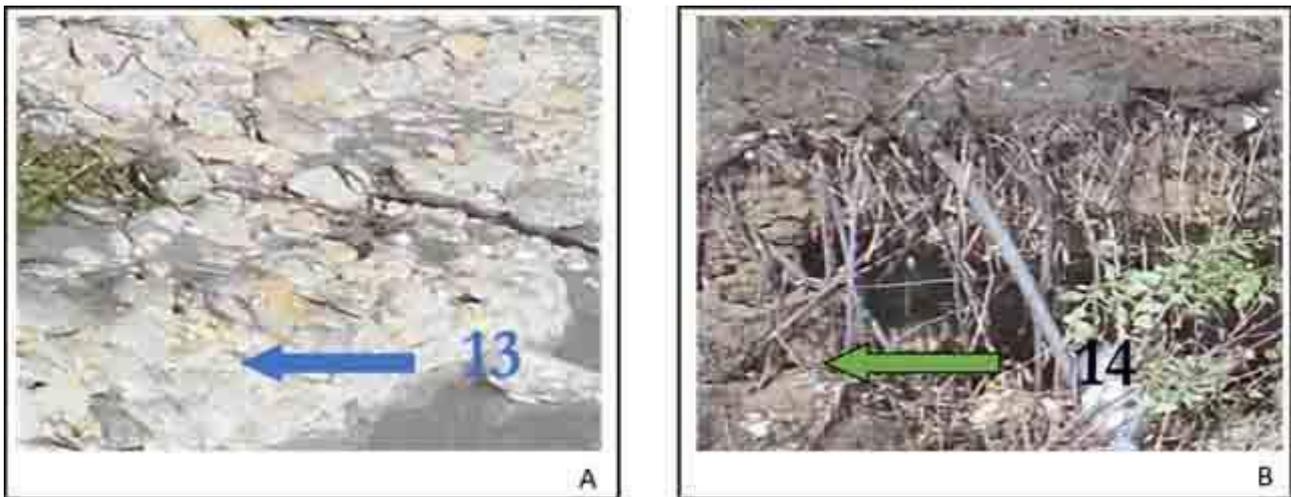


Figura 86. Dettaglio dei campioni di sedimento prelevati nel punto di riferimento numero 12. Fotografie del 23 settembre 2014.

In Figura 87 è indicata la distribuzione granulometrica dei due campioni prelevati nel punto di riferimento numero 12.

Dalle curve del grafico, anche per questi campioni selezionati, si possono ricavare diverse informazioni.

La curva blu rappresenta la distribuzione granulometrica del campione numero 13 raccolto nella matrice dei globuli di fango, appartenenti al sedimento ritrovato nei pressi della base della scarpata della cassa di colmata B (12wpt_13_Matrice_fango_230914). La distribuzione granulometrica è unimodale con una sola moda (16,4 μm). La curva rappresenta un sedimento con uno spettro che ricopre poche classi e, quindi, è un sedimento poco assortito. Il valore di Sorting (σ) è di 1,44 e quindi il sedimento è moderatamente ben selezionato. Il valore dell'asimmetria grafica inclusiva (Sk_G) è di 0,58, valore che indica che la curva è simmetrica. Il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è: **fango**.

Il sedimento descritto dalla curva in verde (12wpt_14_Base_230914) nel grafico, si riferisce all'ultimo campione, il numero 14, prelevato nello strato alla base della scarpata. La distribuzione granulometrica del quattordicesimo campione è bimodale (mode a 86 μm e 16,4 μm) e, rappresenta un sedimento eterometrico. Il valore di Sorting (σ) è di 2,63, ed in questo caso, il sedimento è poco selezionato. Il valore dell'asimmetria grafica inclusiva (Sk_G) è di -0,82 valore che indica un'asimmetria verso la frazione più fine di sedimento. Il gruppo tessiturale a cui appartiene questo sedimento è **sabbia fangosa**.

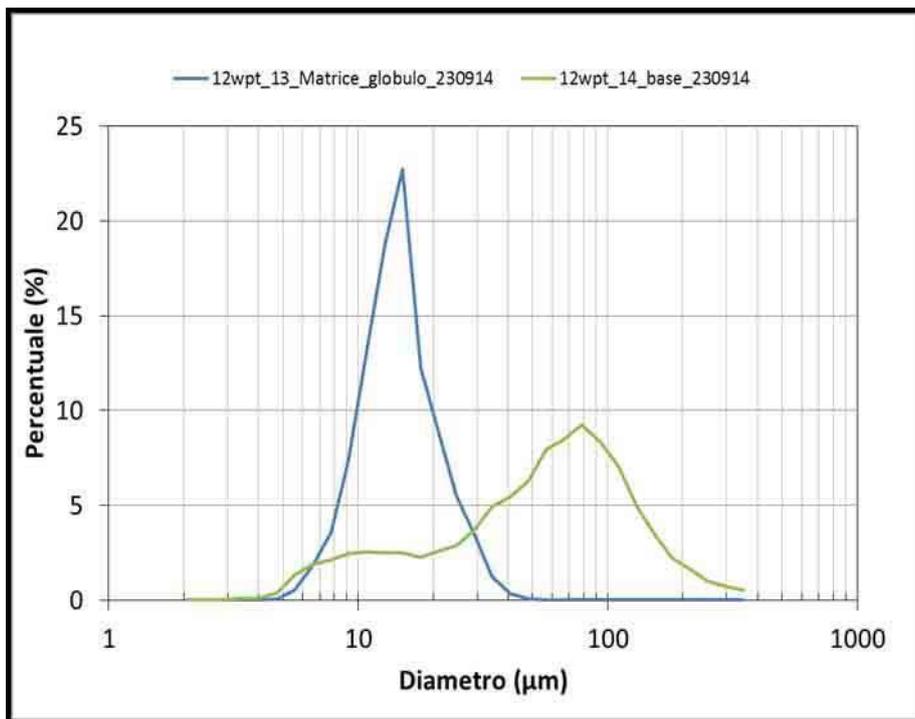


Figura 87. Distribuzione granulometrica, con diametro in micron (μm), nei sedimenti campionati nel punto di riferimento numero 12.

I sedimenti che sono stati prelevati dalla cassa di colmata B e sottoposti ad analisi, indicano una distribuzione granulometrica classificata in base al diagramma di Folk (1954) visibile in Figura 88. Dal diagramma si può osservare che la maggior parte dei campioni analizzati spaziano nella classe di silt e silt sabbioso, identificando il sedimento che caratterizza il fondale del canale Malamocco-Marghera. Solo alcuni campioni sono risultati con più del 50% di sabbia, ricadendo nel diagramma nell'area classificata come sabbia siltosa. Questi campioni sono stati ritrovati nel profilo superficiale Nord appartenente alla cassa di colmata B (punto di riferimento numero 8 e 3) ed alla base della scarpata centro-Sud del profilo della cassa di colmata B (punto di riferimento 12).

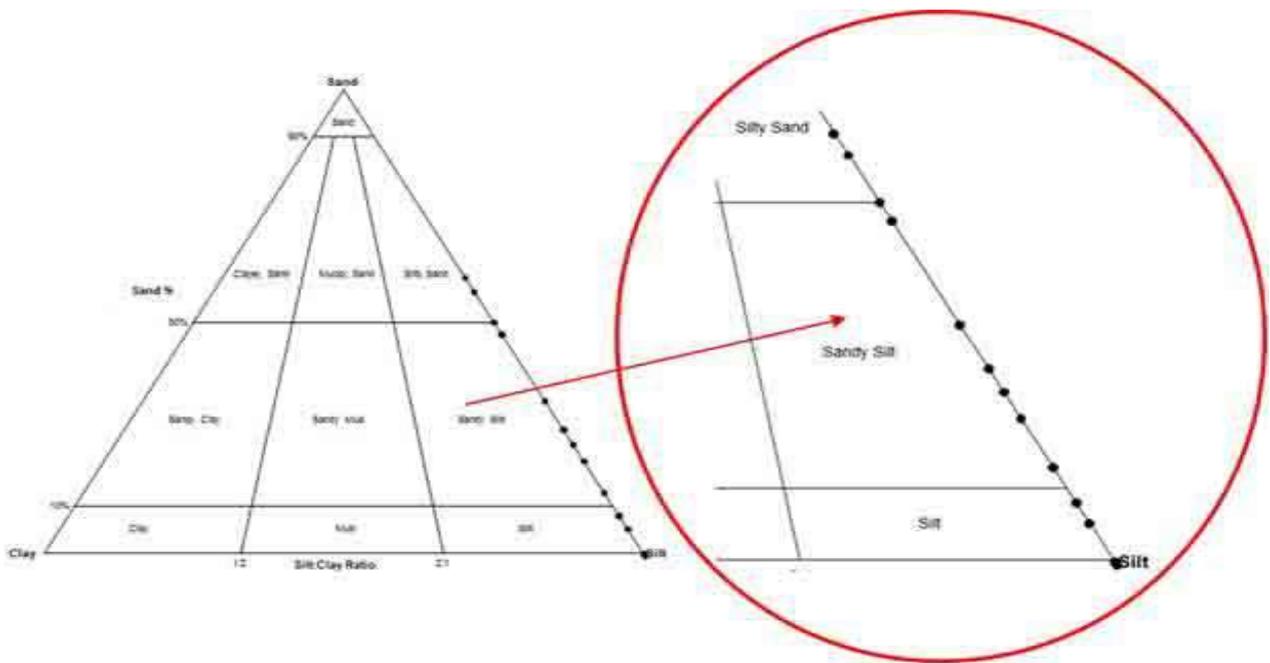


Figura 88. Diagramma di Folk (1954). Classificazione granulometrica del materiale appartenente al profilo della cassa di colmata B.

8. Risultati delle attività di campo e laboratorio

I dati raccolti nelle schede campo durante i mesi di campionamento sono stati elaborati ottenendo i valori rappresentati in Figura 89. Nel grafico si vuole rappresentare l'erosione della linea di riva della cassa di colmata B, per i dieci mesi di campionamento. Nell'asse delle ascisse (x) è rappresentato il tempo in mesi, mentre nell'asse delle ordinate (y) è visibile l'erosione, calcolata in metri. A destra del grafico la leggenda dei WS rappresenta ogni punto di riferimento, spiegato precedentemente (vedi capitolo 7), con la rispettiva erosione della linea di riva. E' importante evidenziare che le misurazioni sono state effettuate ogni mese o due di distanza, precisamente il:

1. 17 aprile 2014;
2. 13 maggio 2014;
3. 16 giugno 2014;
4. 16 luglio 2014;
5. 23 settembre 2014;
6. 4 novembre 2014;
7. 16 gennaio 2015.

Dallo studio dell'immagine si evidenzia che la stazione WS2 è la più soggetta ad erosione, essendosi, la linea di riva, erosa di 3,8 m in 10 mesi. Il punto di riferimento numero 2 si ritrova nell'area Nord, in prossimità alla zona centrale della cassa di colmata B. La stazione WS6, posizionata a Nord nella linea di riva della cassa di colmata B, è invece l'area soggetta a minor erosione con un arretramento di 1,08 m in dieci mesi. Le altre stazioni si caratterizzano per valori intermedi dell'erosione, con arretramenti compresi fra un minimo di 1,5 e un massimo di 3,5 m.

La stazione WS14 (punto di riferimento numero 14), la cui scheda campo è visibile in Allegato 3 (vedi capitolo 12.3), non è stata rappresentata nel grafico perché è stato possibile effettuare solo due misurazioni, da maggio a giugno 2014. Nell'intervallo di tempo compreso fra i due rilievi l'erosione è stata di 0,07 m, ma a partire dalla campagna di luglio i paletti di riferimento, per le misure, non sono più stati rinvenuti.

L'erosione nei punti individuati non è un processo costante e uniforme. In alcune stazioni di riferimento (WS1, WS2, WS3, WS4, WS5, WS7 e WS10) nell'arco di 9-10 mesi l'erosione è stata maggiore di 2,00 m. E' importante considerare che nel grafico il maggior picco di erosione è dato dal periodo novembre-gennaio. Questo periodo è caratterizzato dall'acqua alta più frequente di tutto l'anno (vedi capitolo 6).

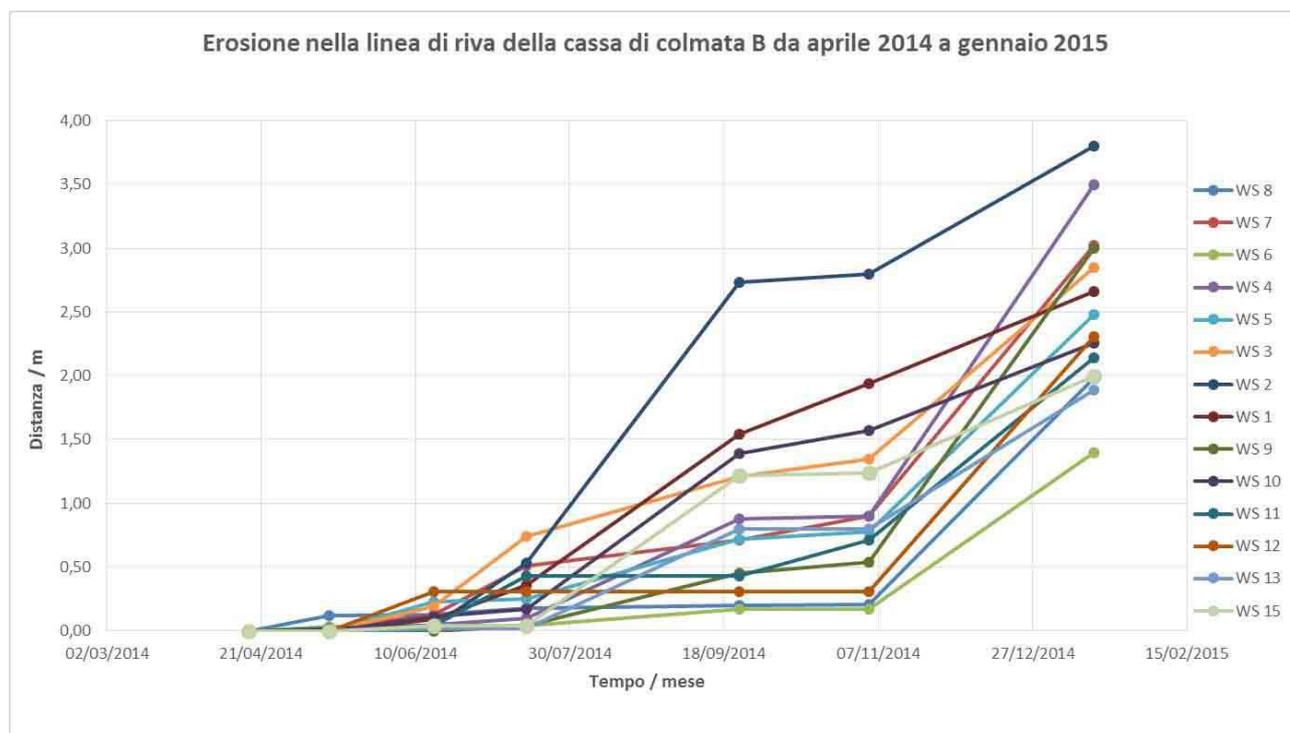


Figura 89. Erosione della linea di riva della cassa di colmata B da aprile 2014 a gennaio 2015, procedendo da Nord verso Sud.

Di seguito si vogliono considerare nel dettaglio alcune stazioni esemplificative: la stazione WS2, WS9, WS11 e WS15.

8.1. Stazione WS2

In Figura 90 è visualizzata l'area dov'è stata collocata la stazione di riferimento WS2. La prima fotografia (A) è stata scattata il 16 luglio 2014 e la collocazione del paletto di segnalazione, che porta il cartellino di riconoscimento, è indicato dal cerchio in rosso.

La fotografia (B) è stata scattata durante la campagna del 23 settembre 2014 e il cerchio in rosso indica la posizione dello stesso paletto dell'immagine (A) ma, come si può vedere, il terreno su cui

era collocato nella fotografia precedente è crollato ed il materiale eroso è stato rimosso dalle correnti associate al moto ondoso. La freccia in blu nella stessa immagine (B) indica la posizione del secondo paletto più interno nella stessa stazione di misura. Le fotografie (C) e (D) sono state scattate rispettivamente il giorno 4 novembre 2014 e 16 gennaio 2015. Nella fotografia di novembre è stata ritrovato solo il paletto più interno individuato dalla freccia blu, mentre il paletto con l'etichetta di identificazione è stato ritrovato lungo la spiaggia. Nella fotografia di gennaio il cerchio rosso nell'immagine (D) indica la posizione del paletto con l'etichetta di identificazione che era stato ritrovato lungo la spiaggia e accostato ad un albero interno alla riva per marcare la posizione della stazione nel caso di perdita del palo interno. Il secondo paletto più interno, visibile nell'immagine (C), (freccia blu) non è stato ritrovato nella campagna di gennaio 2015. L'arretramento totale di quest'area nell'arco dei dieci mesi di osservazione mesi è stata di 3,8 m.



Figura 90. Control Point 2 nel mese di luglio (A), settembre (B), novembre (C) dell'anno 2014 e gennaio 2015 (D).

8.2 Stazione WS9

In Figura 91 è riportata l'area dov'è stata collocata la stazione di riferimento WS9. La prima fotografia (A) è stata scattata il 16 luglio 2014 e la collocazione del paletto di legno, che porta il cartellino di riconoscimento, è indicata dal cerchio in rosso. La fotografia (B) è stata scattata durante la campagna del 23 settembre 2014 e il cerchio in rosso indica la posizione dello stesso paletto dell'immagine (A), ma con la presenza di un albero caduto. Le fotografie (C) e (D) sono state scattate rispettivamente il giorno 4 novembre 2014 e 16 gennaio 2015. In entrambe le immagini si vede la presenza sia dell'albero caduto che del paletto di riferimento sempre indicato dal cerchio rosso. L'erosione in questo intervallo di nove mesi di monitoraggio è risultata pari a 1,55 metri.

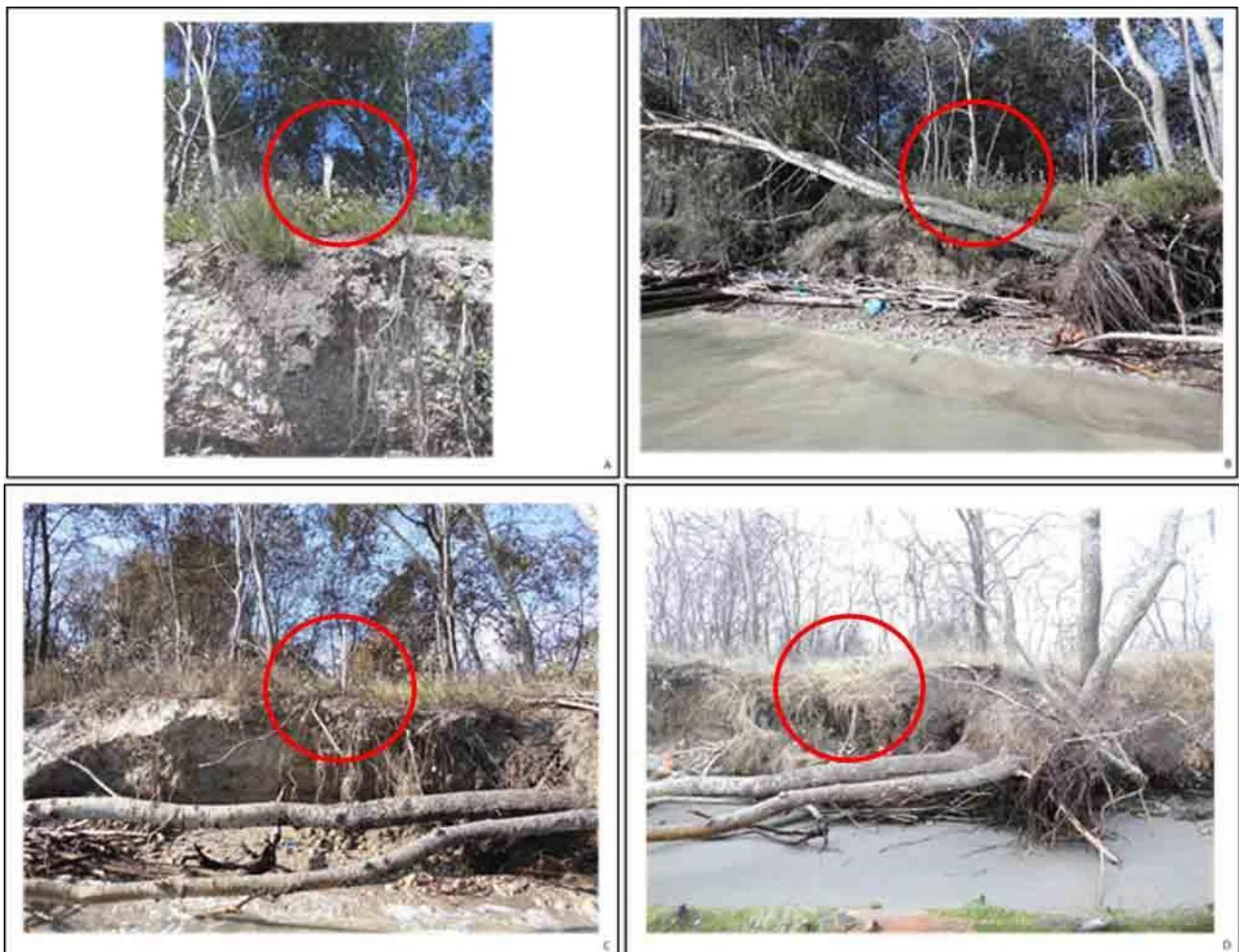


Figura 91. Control Point 9 nel mese di luglio 2014 (A), settembre 2014 (B), novembre 2014 (C) e gennaio 2015 (D).

8.3 Stazione WS11

In Figura 92 è rappresentata l'area dov'è stata collocata la stazione di riferimento WS11. La prima fotografia (A) è stata scattata il 16 luglio 2014 e la posizione del paletto di legno, che porta il cartellino di riconoscimento, è indicata dal cerchio in rosso. È interessante osservare nell'immagine il materiale eroso, crollato alla base della scarpata (freccia gialla). Quando questo avviene si crea una sorta di protezione temporanea della zona retrostante. Queste strutture, create con il materiale ceduto, impediscono temporaneamente che l'erosione ad opera delle onde delle navi continui alla base della scarpata lungo la linea di riva. Quando i materiali franati sono completamente rimossi dalle onde, l'erosione riprende nuovamente ad attaccare la scarpata. L'arretramento della sponda è quindi un fenomeno discontinuo e irregolare lungo la linea di riva della cassa di colmata B che procede per step successivi con tre fasi:

- 1) erosione al piede della scarpata;
- 2) franamento;
- 3) rimozione dei materiali alla base della scarpata che inibisce l'ulteriore erosione fino ad esaurimento del materiale accumulato.

Durante la fase 3 che può durare per un intervallo di tempo piuttosto prolungato l'erosione, alla base della scarpata è inibita e procede con maggiore intensità in altre zone lungo la sponda che non sono protette dall'accumulo di materiale. La fotografia (B) è stata scattata durante la campagna del 23 settembre 2014 e il cerchio in rosso indica la posizione dello stesso paletto dell'immagine (A), ma la freccia gialla indica che il materiale presente nell'immagine (A) è stato trasportato, verso il canale, dalla forza delle onde.

Le fotografie (C) e (D) sono state scattate rispettivamente il giorno 4 novembre 2014 e 16 gennaio 2015. In entrambe le immagini si vede la presenza del paletto di legno con il cartellino di identificazione. Come si può notare, però, nella seconda immagine è rimasto solo il paletto più interno (cerchio in rosso) con il cartellino di identificazione. L'erosione a cui è stata sottostata la linea di riva ha subito quindi un'accelerazione dato che il paletto più interno è stato rinvenuto a solo 0,32 m dal margine della scarpata. Da novembre a gennaio l'erosione è stata di 1,11 m e in totale nei nove mesi di monitoraggio ha raggiunto il valore di 1,82 m.



Figura 92. Control Point 11 nel mese di luglio 2014 (A), settembre 2014 (B), novembre 2014 (C) e gennaio 2015 (D).

8.4 Stazione WS15

In Figura 93 è visibile l'area dov'è stata collocata la stazione di riferimento WS15.

La prima fotografia (A) è stata scattata il 16 luglio 2014 ed il primo paletto di legno, che porta il cartellino di riconoscimento, è indicato dal cerchio in rosso. La fotografia (B) è stata scattata durante la campagna del 23 settembre 2014 e il cerchio in rosso indica lo stesso paletto dell'immagine (A), che però è crollato insieme alla sponda. Il paletto con l'etichetta di riconoscimento, ormai caduto lungo la riva, è stato riposizionato accanto al secondo paletto più interno rispetto la linea di riva della cassa di colmata B. Le fotografie (C) e (D) sono state scattate rispettivamente il giorno 4 novembre 2014 e 16 gennaio 2015. Malgrado la progressione dell'erosione della riva, nella

fotografia di novembre si poteva notare ancora la presenza di entrambi i paletti mentre nella foto del rilievo di gennaio entrambi i paletti sono stati rimossi insieme al terreno su cui erano infissi. La sequenza d'immagini presentate documenta l'intensità dell'erosione a cui è soggetto il tratto di riva in cui è localizzata questa stazione: nel periodo di nove mesi di osservazione l'arretramento totale è stato di 2,00 m.



Figura 93. Control Point 15 nel mese di luglio 2014 (A), settembre 2014 (B), novembre 2014 (C) e gennaio 2015 (D).

Considerando, in particolare, l'area di studio in Figura 94, si può osservare il colore rosso del sedimento che s'incontra immediatamente nell'area Nord della cassa di colmata B. Questo colore, rilevato solo in questa zona, testimonia la presenza di prodotti di scarto industriali già utilizzati per l'imbonimento di altre aree di Porto Marghera. Questi fanghi presentano un colore rosso perché sono costituiti da un residuo bauxitico (terra rossa) che deriva dalla lavorazione dell'alluminio, ed in questo residuo sono presenti alte concentrazioni di metalli pesanti con un pH basico (Paolini, 2012). Questi fanghi rossi furono usati per imbonire parte dell'area Nord della cassa di colmata B, la cui

morfologia è evidenziata in Figura 94 e 95. In Figura 94 è visibile (freccia in rosso) il deposito di materiale fangoso (bauxite mista ad altro materiale) ed è indicata con la freccia in blu la linea di riva presente nell'anno 1974 e con la freccia in giallo la linea di riva rilevabile nell'anno 2009 (vedi capitolo 5.2).

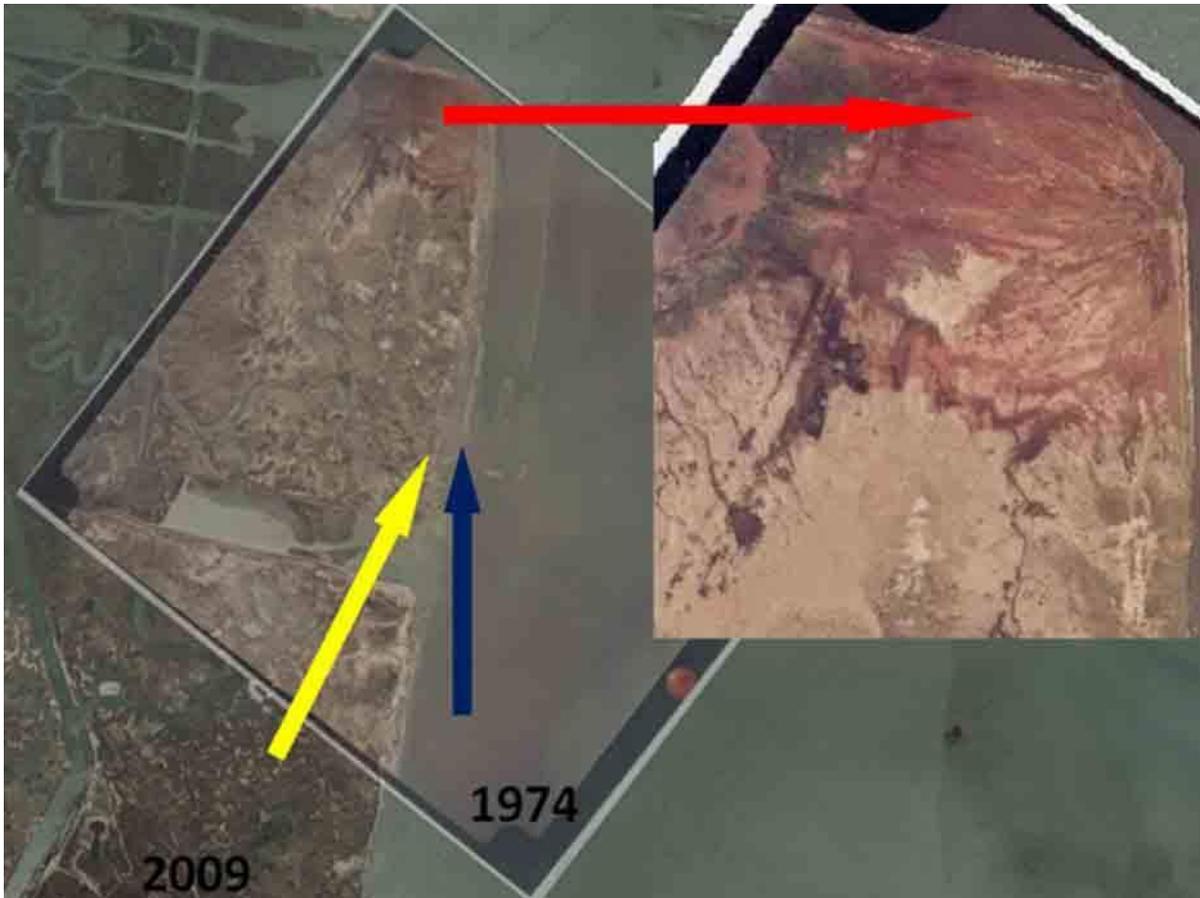


Figura 94. Fotografia aerea del 1974 georeferenziata su immagine satellitare del 2009. Area a Nord cassa di colmata B con relativo dettaglio delle terre rosse (freccia rossa). Freccia blu linea di riva del 1974, freccia gialla linea di riva del 2009.

In Figura 95 è rappresentata una fotografia dello stato attuale (16 luglio 2014) dell'area Nord della cassa di colmata B, la stessa area identificata in dettaglio nella precedente figura. L'immagine presenta una zona con uno stato avanzato di erosione ed oltre alla presenza della bauxite, sono visibili altri rifiuti solidi.



Figura 95. Linea di riva in erosione nell'area Nord (punto di riferimento numero 8) della cassa di colmata B. Fotografia del 16 luglio 2014.

La cassa di colmata B è un'area della Laguna centrale di Venezia (in precedenza occupata da barene) che fu imbonita con materiali di diversa provenienza fra cui appunto i residui della lavorazione dell'alluminio (vedi capitolo 4.1).

In Figura 96 è rappresentato uno schema stratigrafico dei fondali del settore centrale della Laguna di Venezia (immagine A) e la sequenza stratigrafica della cassa di colmata B (immagine B).

In questa figura è evidente la discordanza artificiale del profilo stratigrafico della cassa di colmata B (immagine B), riferita al punto di controllo numero 11, evidenziato dal cerchio in rosso (vedi capitolo 7). I sedimenti olocenici costituiti da sabbie, alla base della sequenza, sono il materiale naturale al di sopra del quale è stato riportato il materiale dei depositi pleistocenici derivanti dallo scavo del canale navigabile. Il canale Malamocco-Marghera è stato scavato fino a una profondità di 12 metri in laguna (vedi capitolo 4.2) e, come mostra l'immagine (A) in Figura 96, a tale profondità si rinvennero depositi pleistocenici. Durante i lavori di escavo del canale e costruzione della cassa di colmata B questo sedimento è stato collocato sopra le barene naturali presenti in quest'area della

laguna. In sintesi, durante la fase d'imbonimento delle aree preesistenti in laguna, si è realizzata artificialmente un'inversione nella sequenza stratigrafica locale (immagine B). Il sedimento pleistocenico proveniente dallo scavo del Canale dei Petroli, è stato depositato al di sopra delle barene e bassi fondi dell'area e la sua struttura, durante lo scavo e il trasporto (presumibilmente con draghe idro-refluenti) è stata fortemente modificata. Sono infatti visibili dei globuli di materiale fine piuttosto compatti e di dimensioni eterogenee incorporati in una matrice meno compatta ma costituito essenzialmente dagli stessi materiali, talora con un maggiore contenuto di sabbia.

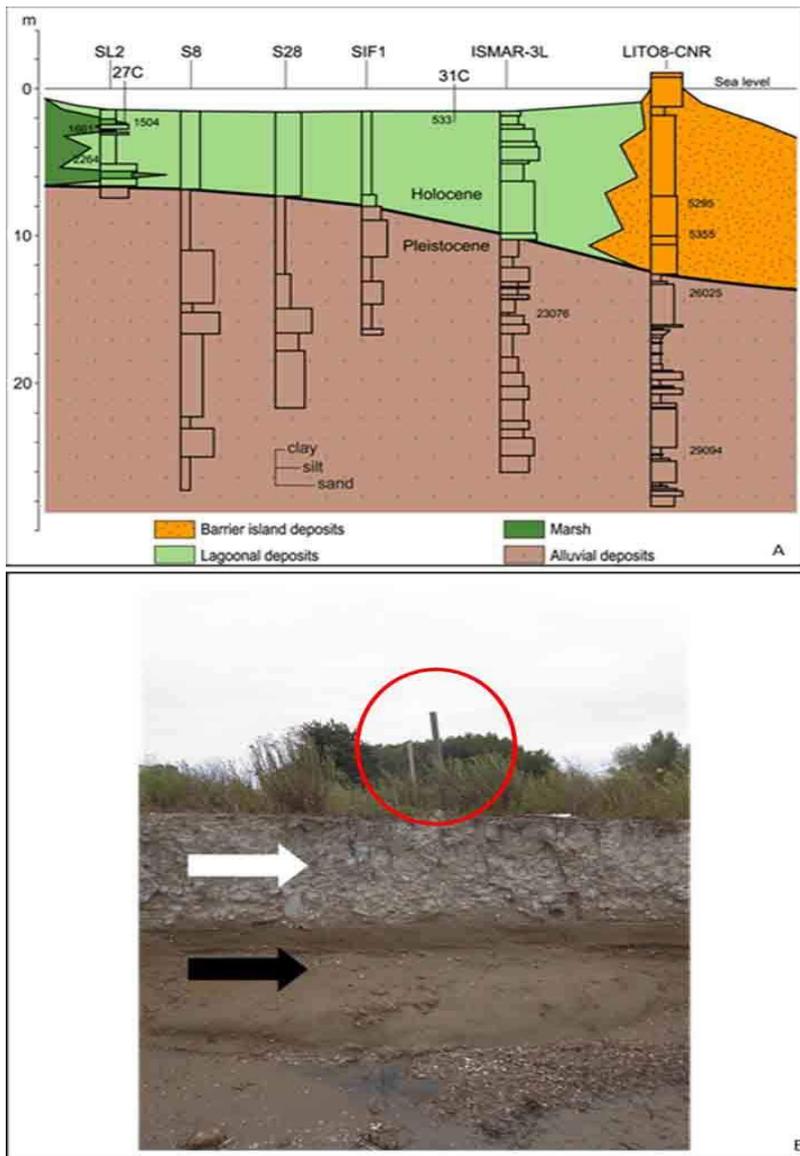


Figura 96. Stratigrafia della Laguna centrale (A) (Zecchin et al., 2014) e profilo cassa di colmata B nel Control Point 11 (B) (cerchio rosso). Fotografia del 16 giugno 2014.

In Figura 97 è visibile la fotografia aerea del 1961 antecedente alla costruzione della cassa di colmata B. In questa immagine è evidenziata dalla freccia in rosso la posizione geografica del punto di

riferimento numero 11, il cui profilo è visibile in Figura 96 (immagine B). In Figura 97 si può vedere chiaramente che la cassa di colmata B è stata costruita al di sopra di un sistema naturale costituito da barene (Motte di Volpego), velme e solcato da un reticolo di drenaggio costituito da numerosi canali di diverso ordine gerarchico fino ai ghebi di dimensioni molto piccole.



Figura 97. Fotografia aerea nell'anno 1961, la freccia rossa indica la posizione geografica del punto di riferimento numero 11.

In Figura 98 è visualizzato il profilo individuato lungo la zona centro-Sud, simile alla situazione presentata in Figura 96. In Figura 98 la freccia rossa indica il crollo di materiale dalla sponda della cassa di colmata B. I depositi naturali alla base della sequenza sono costituiti da sabbie con livelli di conchiglie, mentre alla sommità si rinvenivano i depositi provenienti dallo scavo del canale e conferiti durante l'imbonimento dell'area (vedi capitolo 7.2).



Figura 98. Stratigrafia della cassa di colmata B nell'area centro-Sud (A) e relativi dettagli (B-C). Fotografia del 16 giugno 2014.

Nelle più recenti immagini satellitari a disposizione (2012-2014), si ritrova un'altra conferma del fenomeno erosivo nell'arginatura della cassa di colmata B. La linea nera, indicata dalla freccia rossa, presente nell'immagine satellitare del 2012 (Figura 99 (A)), individua la presenza di alcune pietre appartenenti al muro, che negli ultimi anni si rilevano solo in alcuni tratti durante le condizioni di bassa marea. Questi resti si possono vedere nell'area Sud anche durante il passaggio di una nave, quando avviene la formazione dell'Onda di Bernuolli. In Figura 99 (B) è indicata, dalla freccia gialla, una parte dell'argine protettivo della cassa di colmata B, rimasto dopo l'erosione della conterminazione. La freccia rossa indica la sponda attuale della cassa di colmata B ritrovata durante le analisi in campo. Proprio le pietre alla base dell'argine a protezione della cassa si ritrovano sparse sul fondale.



Figura 99. Segni di resti dell'argine originale nell'immagine satellitare nell'anno 2012 (A). Presenza di parte dell'argine nell'area Sud (freccia gialla) e sponda attuale della cassa di colmata B. Fotografia del 16 gennaio 2015.

8.5 Quantità di sedimento eroso nella cassa di colmata B

Grazie all'utilizzo del programma QGIS si è potuto elaborare una stima preliminare della quantità di sedimento eroso nella cassa di colmata B, nell'arco dei quarant'anni studiati (1974-2014).

Innanzitutto sono state calcolate in QGIS le quote relative ad ogni punto di riferimento (WS) posizionato lungo la linea di riva della cassa di colmata B per l'anno 2014 ed in un secondo momento è stata calcolata la distanza tra ogni punto di riferimento. Nell'Allegato 5 (vedi capitolo 12.5) sono riportate le diverse tabelle che riportano i valori che sono stati usati per calcolare la quantità di sedimento eroso e la spiegazione del metodo di calcolo utilizzato.

Per mezzo della carta topografica regionale (CTR) dell'anno 1968 (quota media del volo 1750 metri) si è ricavato che la quota iniziale dell'argine della cassa di colmata B era di 2,00 metri. A questo valore è stata sommata la profondità stimata dell'arginatura della cassa di colmata B ottenuta dal coefficiente angolare del profilo di una sezione trasversale del canale Malamocco-Marghera effettuata nel 2014. Si assume, in prima approssimazione, che il profilo batimetrico del transetto rilevato nel 2014 si possa estendere all'intera area studiata. Per i calcoli vengono considerate anche le distanze, calcolate in QGIS, della linea di riva dell'anno 2014 dall'arginatura originaria dell'anno 1974.

Una volta ottenuti tutti i dati, sono state calcolate le aree di ogni sezione considerata avente forma di un trapezio scaleno. Alla fine è stato calcolato il volume stimato per ogni blocco in cui è stata idealmente suddivisa l'area studiata e valutato l'integrale. Il volume totale di sedimento eroso è di circa 700.000 m³ per la sezione studiata. Questo valore è in relazione ai quarant'anni trascorsi dal 1974 al 2014. La perdita annuale di sedimento è stimata circa di 17.500 m³. In relazione a questi calcoli, considerando la lunghezza totale della linea di riva della cassa di colmata B (2,4 km), si è calcolata una perdita di sedimento di 930.000 m³ nell'arco di quarant'anni ed una perdita annuale di sedimento di circa 23.000 m³.

Per quanto si tratti di una stima preliminare, per la quale si sono fatte alcune approssimazioni relativamente alle informazioni mancanti, il risultato ottenuto dà un'idea dell'ordine di grandezza dei volumi asportati dai processi erosivi in questo settore della laguna.

In Figura 100 si riportano le stime del volume di erosione per ognuno dei blocchi in cui è stata suddivisa la zona di indagine lungo la linea di riva della cassa di colmata B. I volumi dei blocchi corrispondono alle sezioni da Nord a Sud lungo la linea di riva della cassa di colmata B.

Dal grafico si può notare che i blocchi 11-12 hanno subito un'erosione maggiore rispetto agli altri blocchi per un valore complessivo di 266.720 m³. Questi blocchi corrispondono alla zona compresa tra il punto di riferimento numero 11-12 e 12-13 (WS11-WS12 e WS12-WS13), posizionati nell'area centro-Sud. Come si può notare l'area Nord della cassa di colmata B presenta un grado di erosione minore rispetto alla zona centrale e meridionale.

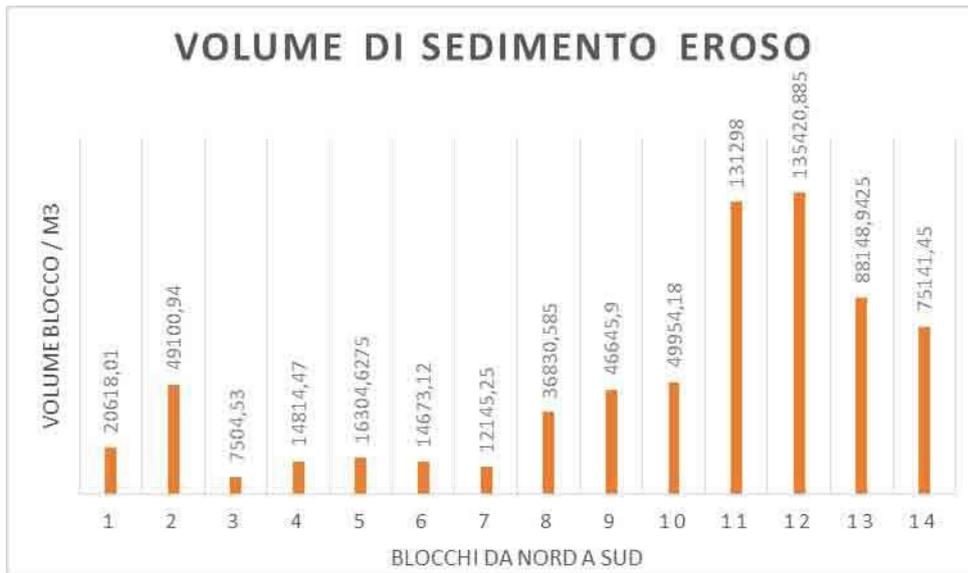


Figura 100. Volume di sedimento eroso nella cassa di colmata B.

9. Discussione

Il lavoro di tesi ha riguardato lo studio della cassa di colmata B, un'area lagunare limitrofa al canale Malamocco-Marghera, in particolare focalizzando l'attenzione sulla variazione della sua linea di riva. In questa zona è stato studiato l'effetto determinato dal passaggio delle navi che transitano in questo canale. Il canale Malamocco-Marghera è lungo 20 km, largo 200 metri e profondo 12 metri circa (Molinaroli et al., 2013). In esso transitano navi di grandi dimensioni che raggiungono anche i 300 metri di lunghezza nel caso delle navi cargo e le petroliere (vedi capitolo 4.2). Il cambiamento della profondità dei bassi fondi adiacenti ai canali durante gli ultimi quarant'anni (Saretta et al., 2010), indica una combinazione dei processi naturali con quelli "artificiali indotti", in risposta ai cambiamenti nell'idrodinamica, e alle attività svolte nell'area (come imbonimento di aree lagunari, pesca delle vongole, transito di navi e quant'altro). Con la realizzazione delle casse di colmata e del canale Malamocco-Marghera si è sottratto spazio alla naturale espansione dell'onda di marea. Ciò ha comportato variazioni sia sul fenomeno dell'acqua alta sia sull'efficacia del ricambio idrico in laguna (Saretta et al., 2010).

In un'area esposta ai processi erosivi, come la riva della cassa di colmata B, l'intenso traffico navale lungo il canale Malamocco-Marghera influisce notevolmente sulla morfologia dell'area. Le navi che transitano nel canale hanno sezioni di carena confrontabili con quelle della via navigabile e sono capaci di dislocare grandi volumi d'acqua durante la navigazione, generando così elevate velocità (D'Alpaos, 2010; Scarpa, 2014). Di conseguenza sono state studiate (Rapaglia et al., 2011) la risospensione, generata dal passaggio delle navi, e l'erosione dei fondali lagunari nelle aree limitrofe al canale di Malamocco-Fusina. A tale proposito il fattore maggiormente responsabile della formazione dell'Onda di Bernuolli è il *blocking coefficient* ($S = (B \cdot D / b \cdot d)$), considerato il rapporto tra:

- 1) il prodotto tra larghezza dello scafo ed il suo pescaggio ($B \cdot D$);
- 2) il prodotto tra larghezza e la profondità del canale navigato ($b \cdot d$) (Scarpa, 2014).

Al transitare di una nave nel suddetto canale si individuano gli effetti più rilevanti. Essi sono osservabili come variazioni immediate delle velocità di corrente con valori di picco raramente osservabili sui bassi fondali in condizioni naturali e sul trasporto di materiale solido al fondo ed in sospensione (Scarpa, 2014). Quando una nave transita nel canale si è potuto accertare che i sedimenti sono risospesi nel canale di navigazione e nelle aree a basso fondale adiacenti al canale,

mantenendosi, per lunghi periodi, al di sopra dei valori naturali, dopo il passaggio della nave stessa (Rapaglia et al., 2011).

L'impatto ambientale delle onde generate dalle navi ha ricevuto notevole attenzione nel recente periodo ma, ad eccezione di alcuni studi sulla risospensione e torbidità, effettuati nell'area di Fusina (Rapaglia et al., 2011; Göransson et al., 2014), esistono pochi studi relativi agli impatti delle onde di depressione sulla morfologia costiera.

L'uomo in passato, durante le fasi di realizzazione della città di Venezia, ha sempre cercato di imporsi sui processi naturali che agiscono in laguna, allo scopo di rendere il bacino lagunare adeguato per diverse attività: la navigazione, la pesca, il commercio e la produzione industriale.

La costruzione di frangiflutti alle bocche di porto durante il periodo 1808-1930, allo scopo di rendere i canali più adatti alla navigazione, ha comportato un'ulteriore possibilità di cambiamento della morfologia lagunare e dei litorali adiacenti alle bocche tidali. Anche lo scavo dei canali per la navigazione (1926-1970) ha avuto impatti significativi per i cambiamenti morfologici lagunari (Guerzoni e Tagliapietra, 2006). Una di queste importanti modificazioni è proprio la costruzione del canale Malamocco-Marghera, la cui edificazione è considerata da più parti la causa di significative variazioni delle condizioni idrodinamiche. La realizzazione di questo canale ha innescato delle grandi trasformazioni sulla morfologia lagunare, e sul tasso erosivo (Ravera, 2000) rispetto alle condizioni esistenti nel periodo precedente alla sua costruzione. La concomitanza delle diverse azioni operate dall'uomo e l'azione degli eventi naturali ha determinato l'insorgenza di importanti fenomeni erosivi in laguna.

Il sito oggetto di studio si trova direttamente prospiciente al canale Malamocco-Marghera, nella zona di Fusina, presso la cassa di colmata B. Proprio in questa zona di laguna le correnti di marea sono generalmente basse (inferiori a $0,05 \text{ m s}^{-1}$), a causa della posizione lontana dall'ingresso della bocca di Malamocco e della conformazione del tratto di canale, relativamente aperto. Bisogna considerare che i venti possono far aumentare le correnti di oltre $0,15 \text{ m s}^{-1}$ (Coraci et al., 2007). Tuttavia la laguna risulta essere un luogo naturalmente riparato dalle grandi onde prodotte dal vento, per la sua limitata estensione ed per la presenza di strutture morfologiche quali velme e barene (55 km).

Le lagune, come quella di Venezia, rappresentano pertanto un ecosistema complesso. L'ambiente lagunare è un habitat a bassa profondità (Neil et al., 2002). La risospensione diffusa dei sedimenti (causata dal passaggio delle navi), però, può essere comunque dannosa in quanto limita la luce che filtra negli strati d'acqua, che è essenziale per la produzione primaria ed il mantenimento

dell'ecosistema. La risospensione può inoltre portare alla diffusione dei contaminanti che sono associati ai sedimenti, qualora si tratti di un'area soggetta a contaminazione antropica, rilasciandoli nella colonna d'acqua (Streets and Holden, 2003). Proprio in questo contesto è molto importante conoscere e quantificare il ruolo giocato dalle onde prodotte dalle navi sulla rimobilizzazione dei sedimenti dei fondali nelle limitrofe aree lagunari, come quella oggetto di studio.

Il progetto iniziale di ampliamento dell'area Industriale di Marghera, con la costruzione delle nuove casse di colmata, fu abbandonato (vedi capitolo 4.1). La cassa di colmata B e D-E furono interessate dall'apertura di alcuni canali che erano già presenti in laguna prima della loro costruzione. Lo scopo era di riuscire a migliorare la circolazione idrodinamica, in particolare nell'area del Lago dei Teneri (vedi capitolo 4.1). Il fenomeno erosivo che ha progressivamente demolito la struttura di perimetrazione interessa in particolar modo la cassa di colmata B. Non si hanno informazioni sull'erosione della cassa di colmata D-E, ma campagne di monitoraggio effettuate vicino all'area hanno rilevato la presenza di teli a protezione dell'argine della cassa stessa e delle massicciate presso la riva. La cassa di colmata A, invece, è più vicina alle aree della II Zona Industriale e risulta quindi essere più protetta, perché è collocata in un tratto più interno della laguna.

Dallo studio delle immagini satellitari più recenti (2012-2014) e dall'osservazione in campo del profilo della cassa di colmata B, si è potuto ritrovare parte dell'arginatura originale. Non si hanno informazioni riguardanti il materiale che formò l'argine, ma alla base sicuramente erano state poste delle pietre (capitolo 8, Figura 99), oramai collassate per rimozione dei materiali sciolti al piede della sponda e della sua protezione.

La vegetazione in quest'area è cresciuta con maggior intensità negli ultimi anni, ma il verificarsi del fenomeno erosivo, dovuto all'ingente forza delle onde (create al passaggio delle navi) che s'infrangono contro la sponda, ha causato una diminuzione della crescita di piante lungo la stessa linea di riva. La vegetazione in quest'area di depositi artificiali (la cassa di colmata B), è molto superficiale e gli apparati radicali degli arbusti sono appena al di sotto della superficie e non possono costituire una difesa alla sponda della cassa. Anche le radici degli alberi non sono molto profonde, dovendo evitare la zona satura di acqua salata, soprattutto al margine, verso il canale, quindi non possono esercitare alcuna protezione alla base della sponda. La vegetazione presente nell'area collassa perché viene rimosso il terreno al di sotto di essa e frana insieme alla porzione superficiale del suolo e della sponda. L'intensità del fenomeno erosivo è testimoniata dalla presenza di molti alberi accumulati alla base della sponda dalla forte corrente longitudinale associata al moto ondoso delle navi (capitolo 7.1.5, Figura 66).

Lo studio, intrapreso attraverso l'analisi storica delle fotografie aeree della cassa di colmata B (vedi capitolo 6), ha rilevato la presenza di una maggior erosione nella porzione centro-Sud, rispetto alla zona Nord dell'area investigata, (valori riportati nelle tabelle in Allegato 2). A Nord, durante i mesi di campionamento (da aprile 2014 a gennaio 2015), si è rinvenuta una maggiore presenza di vegetazione, rispetto all'area centro e Sud. Durante le uscite in campo, si è riscontrato che l'erosione maggiore è situata nella zona centro-Nord (vedi capitolo 8, Figura 89) e potrebbe essere causata dal cedimento degli apparati radicali ed alla stratigrafia e granulometria del profilo della cassa stessa. Dallo studio intrapreso attraverso l'analisi del materiale fotogrammetrico, nel periodo di tempo considerato 1974-2014, è risultato che il fenomeno di erosione è si è attuato durante tutto questo periodo, ma non in modo costante. I risultati ottenuti in dieci mesi di misurazioni in campo, confermano la velocità di regressione della riva, evidenziata attraverso l'analisi delle fotografie storiche ed attuali. L'erosione, però, nel breve periodo non è costante ma varia spazialmente e proprio il crollo di alberi lungo la sponda e la proprietà dei materiali che compongono i globuli di fango, che costituiscono la cassa di colmata B, determinano questa variabilità (capitolo 8, Figura 98). Dallo studio delle fotografie aeree (vedi capitolo 6) si è quantificato il valore d'erosione annuo della linea di riva della cassa di colmata B, che è risultato variare tra un minimo di 3 metri ad un massimo di 4 metri. A conferma di questi dati si è calcolata un'erosione massima di circa 3,8 metri nell'arco di dieci mesi di studio in campo (vedi capitolo 8, Figura 89). Si può notare che la velocità di regressione annua della linea di riva misurata nel periodo 1974-2014, si è mantenuta all'incirca di 4 m. L'erosione ha portato ad un progressivo allontanamento della linea di riva della cassa di colmata B dal canale navigabile e la costruzione di una nuova spiaggia (spiaggia creatasi con i sedimenti erosi della cassa di colmata B e dei depositi naturali sottostanti). La distanza creatasi tra il canale Malamocco-Marghera e la linea di riva della cassa di colmata B è aumentata nel periodo 1974-2014, però la velocità di erosione non si è ridotta. Questo fenomeno si è verificato proprio perché l'onda generata dalle navi in transito nel canale può propagarsi almeno fino a 150 m ([Scarpa, 2014](#)) e anche più dal margine del canale ([Rapaglia et al., 2011](#)).

I valori massimi di erosione (maggiori di 1 m in due mesi), misurati in campo in tutte le stazioni di riferimento, si riferiscono agli ultimi periodi di campionamento, cioè da novembre 2014 a gennaio 2015. Durante l'ultimo campionamento effettuato il giorno 16 gennaio 2015, otto stazioni di riferimento (su quindici) sono state ritrovate senza nessuna coppia di paletti di riferimento, posizionati nel mese di aprile (vedi l'Allegato 3, capitolo 12.3). L'incremento del fenomeno erosivo, in questo periodo, potrebbe essere messo in relazione ai fenomeni più intensi di acqua alta registrati

nei mesi di ottobre, novembre e dicembre dal Centro Previsioni e Segnalazioni Maree (www.comune.venezia.it). Dallo studio dell'area si è evidenziata una maggior erosione nella zona centro-Sud della cassa di colmata. Questa erosione potrebbe essere collegata, oltre che alla presenza di scarsa vegetazione (rispetto all'area Nord), anche al tipo di distribuzione dei sedimenti (profilo stratigrafico) che formano la base del profilo della cassa di colmata. Infatti, nella stazione di riferimento numero 12, collocata nell'area centro-Sud (di cui si è studiata la stratigrafia e la granulometria), la base della scarpata è formata da una tessitura caratterizzata da sabbia fangosa (vedi capitolo 7.2.6, Figura 87). La percentuale maggiore di sabbia in quest'area potrebbe essere legata alla composizione tessiturale naturale dell'area, precedente quindi alla costruzione della cassa di colmata. Infatti, questa parte della cassa risulta costruita al di sopra di barene naturali (vedi capitolo 8, Figura 97). Dal diagramma di Hjulstrom si deduce che la sabbia può essere erosa più facilmente rispetto al sedimento argilloso consolidato. Questo diagramma considera generalmente l'erosione, il trasporto e la deposizione delle particelle di sedimento in base alle loro dimensioni ed alla velocità della corrente. Se consideriamo una sezione stratigrafica della cassa di colmata in cui è presente alla base uno strato sabbioso e al tetto uno strato fangoso, l'evoluzione sarà la seguente: il sedimento alla base della scarpata della cassa viene eroso, si determina un crollo dei sedimenti del tetto, costituito da materiale fine compatto (silt e silt sabbioso). I materiali franati rimangono alla base della scarpata dove si è verificato il crollo e ne proteggono la base stessa dall'ulteriore arretramento, fino a quando le onde e le correnti associate non rimuovono e ridistribuiscono i materiali franati. Da quel momento in poi l'erosione può riprendere sul fronte. L'erosione procede più velocemente in aree caratterizzate da questo profilo stratigrafico. È questa situazione che caratterizza il fenomeno erosivo come discontinuo nello spazio e nel tempo, oltre che le caratteristiche dei depositi.

Durante il periodo 1970-2002 il 50% della laguna ha subito fenomeni di erosione, mentre solo il 25% è rimasto stabile ([Molinaroli et al., 2009](#)). La forma attuale della laguna è il risultato di grandi cambiamenti fisici subiti a seguito di lavori d'ingegneria, durante gli ultimi secoli, e d'interventi creati dall'uomo, nei recenti anni ([Serandrei-Barbero et al., 2006](#)).

Come conseguenza di questo processo erosivo, la Laguna di Venezia sta perdendo la sua forma originale, caratterizzata da fondali poco profondi, attraversati da una fitta rete di canali (che dalle bocche di porto si diramano verso il suo interno); da barene e velme nelle quali si ritrovano chiari d'acqua, di scarsa profondità. La laguna è un ambiente in continuo cambiamento, creato da molti fattori legati fra loro. Tra queste cause di cambiamento si considerano: l'abbassamento del suolo

(subsidenza), l'innalzamento del livello medio del mare (eustatismo), l'apporto di sedimenti fluviali, l'erosione. L'aumento nel tasso di erosione può essere una diretta conseguenza dell'azione di trasformazione della laguna che passa da un sistema molto complesso ed eterogeneo presente negli anni passati (vedi capitolo 3) ad un sistema dove predominano la perdita di sedimento (erosione), la subsidenza e l'eustatismo.

La Laguna di Venezia ha subito una perdita di circa 110 Mm³ di sedimenti, dove circa i 73 Mm³ (circa il 70 %) si sono persi negli anni 1927-2002. Inoltre un'ulteriore sottrazione di sedimenti dalla laguna, è stata causata dal dragaggio dei canali navigabili e dalla diretta deposizione dei sedimenti in aree confinate al di fuori della laguna (Saretta et al., 2010).

Questi risultati indicano un grande cambiamento morfologico nella laguna. Infatti, seguendo la sua storia, si è visto che fino a quando i fiumi sfociavano in laguna, in particolare il Brenta, erano maggiori i processi di sedimentazione. Il materiale immesso dai fiumi si depositava sui fondali del bacino fino a quando il loro volume aumentava a tal punto da trasformarli in barene. Con la deviazione dei fiumi è mancato il contributo esterno alla sedimentazione e la carenza degli apporti solidi ha preparato il terreno per i danni legati all'accelerazione dell'innalzamento del livello marino e dalla subsidenza intervenuti nell'epoca più recente. I fondali che hanno subito un maggiore approfondimento nell'epoca successiva al 1970 sono quelli delle aree della laguna centrale dove incide maggiormente l'effetto del moto ondoso e delle correnti generate dal passaggio delle navi. Il moto ondoso è capace di risospingere i sedimenti più fini presenti nei bassi fondali. In seguito i sedimenti più fini possono essere trascinati dalle correnti di marea verso i canali, verso le bocche di porto e, per finire, verso il mare aperto, apportando variazioni sulla profondità media della laguna. Parte del sedimento eroso, in particolare il materiale più grossolano, può anche essere richiamato verso il canale navigabile, dove in parte sedimenta, causando un aumento della quota della cunetta e un aggravio dei costi per la manutenzione e il dragaggio del canale navigabile (Umgiesser et al., 2004).

In base ai dati dell'Autorità Portuale, (Autorità Portuale di Venezia, 2010) il costo per il dragaggio e la messa a dimora di circa 790.000 m³ dei canali portuali interni è pari a 40 milioni di euro. Questa stima non tiene conto del costo degli interventi di ingegneria ambientale, nel caso del reimpiego dei materiali non contaminati per il ripristino della morfologia lagunare del sedimento dragato, né del costo inestimabile di una eventuale perdita di habitat dell'ecosistema lagunare.

Nel periodo compreso tra novembre 2004 e novembre 2007, è stato calcolato, sulla base di determinazioni sperimentali in continuo, lo scambio di sedimento laguna-mare attraverso le bocche

di porto (Defendi et al., 2010). Durante i tre anni di studio viene confermata la tendenza di erosione della laguna, con quantità di perdite di sedimenti, comprese tra 280.000 e 380.000 m³/anno. Questo valore è principalmente condizionato dalla maggior perdita di sedimenti dalla bocca di porto del Lido (240.000 e 253.334 m³/anno), rispetto alla bocca di Malamocco (12.000 e 32.000 m³/anno) e Chioggia (28.666 e 93.333 m³/anno).

Questa differenza può essere messa in relazione con l'attuale morfologia dei tre bacini (Lido, Malamocco e Chioggia). Il bacino afferente alla bocca del Lido è formato da bassi fondi e barene e sono presenti fiumi che apportano sedimenti nel bacino lagunare. Negli altri due bacini il minor scambio di sedimenti è in parte dovuto già alla scomparsa, nel secolo scorso, delle maggiori forme lagunari. In Figura 101, dall'immagine ripresa dagli astronauti a bordo della Stazione Spaziale Internazionale nel 2015, si può vedere chiaramente una maggior fuoriuscita di sedimenti dalla bocca di porto del Lido (freccia rossa), rispetto alla bocca di porto di Malamocco (freccia gialla), nonché la morfologia che contraddistingue la zona.

All'interno del cerchio in bianco si ritrovano le casse di colmata e parte del canale Malamocco-Marghera. Dall'insieme di tutte queste considerazioni si può valutare la quantità di sedimento eroso dalla cassa di colmata B (capitolo 8.5, Figura 100).

Per quanto riguarda il lavoro di tesi, secondo i dati a disposizione ed alle approssimazioni effettuate, la quantità di sedimento erosa dalla cassa di colmata B, nell'arco dei quarant'anni studiati (1974-2014), è stata calcolata essere di circa 933.000 m³, con un tasso annuale di circa 23.000 m³. Ipotizzando che questa quantità di sedimento si depositi annualmente nel canale e che solo una piccola parte venga trasportata a mare, le spese, assumendo gli stessi costi del dragaggio dei canali portuali e le spese per la rimozione dei materiali dal canale, risulterebbero ingenti, fino a più di 1 milione di euro per i circa 23.000 m³ di sedimento asportati annualmente dalla sponda di questo breve tratto di canale e 48 milioni di euro per il volume totale eroso dalla sola cassa di colmata B (circa 933.000 m³), senza tener conto dei costi aggiuntivi. Queste considerazioni sono state effettuate calcolando che la maggior parte del sedimento eroso si depositi nel canale navigabile e solo una piccola percentuale, la frazione più fine, raggiunga il mare attraverso le bocche di porto. Infatti, la velocità di corrente all'interno del canale navigabile non è elevata, ed essa viene alterata solo durante il passaggio di una nave. In Figura 101 si può notare che il trasporto di sedimenti dalla laguna verso il mare, attraverso la bocca tidale di Malamocco, è inferiore rispetto alla quantità che passa dall'altra bocca di porto.



Figura 101. Immagine satellitare della Laguna di Venezia. La freccia rossa indica la bocca di porto del Lido, la freccia gialla indica la bocca di porto di Malamocco e il cerchio in bianco indica la zona appartenente alle casse di colmata e al canale Malamocco-Marghera. Fonte: Samantha Cristoforetti, 28 gennaio 2015.

La continua erosione della sponda porterà il canale verso un nuovo assetto morfologico ed a condizioni di equilibrio dinamico differenti da quelle precedenti alla sua costruzione. A causa di una continua risospensione dovuta al passaggio di navi e alla mancanza di misure di mitigazione del fenomeno, il canale navigabile sarà sottoposto ad ulteriori apporti di sedimento che richiederanno opere di dragaggio, determinando maggiori costi ed ulteriori cambiamenti nel tempo. L'erosione della cassa di colmata B potrebbe essere arrestata da strutture capaci di apportare un sistema di protezione del bordo d'acqua (allo scopo di bloccare il fenomeno erosivo), ma soprattutto attraverso il controllo e la gestione del traffico navale regolando la velocità dei singoli natanti in base all'impatto che gli stessi possono generare ed in base al livello di marea (Rapaglia et al., 2011). Nella seconda metà del secolo scorso è aumentata l'attenzione, da parte di ricercatori italiani e internazionali, verso lo studio e l'approfondimento dei fenomeni che agiscono e regolano l'ambiente lagunare.

Tale interesse ha portato a sviluppare diversi studi e ricerche da parte di soggetti specializzati in diversi campi. Oltre agli studi di carattere prettamente scientifico compiuti da diversi organi di ricerca (Istituti universitari, CNR, ICRAM, CORILA, ecc.) e alle attività di controllo svolte dalle autorità

competenti (Istituto Superiore di Sanità, Regione, enti locali, ARPAV, Sezione Antinquinamento del Magistrato alle Acque), vanno considerati gli studi preliminari per l'organizzazione di interventi per la salvaguardia della laguna, richiesti dal Magistrato alle Acque al concessionario unico Consorzio Venezia Nuova.

E' necessario capire il modo di apportare modifiche alle condizioni attuali in laguna per impedire un ulteriore aumento dei fenomeni di degrado, in risposta alle pressioni ambientali ([HIGGINS et al., 2007](#)). Alcune componenti possono essere individuate tra:

- 1) presenza di specie invasive che alterano l'equilibrio delle barene;
- 2) impatti del cambiamento climatico ([Bromberg Gedan et al., 2009](#));
- 3) l'azione di erosione sulla morfologia dell'ambiente lagunare determinata dal traffico acquico e in particolare dalle navi.

Lo stesso fenomeno erosivo, che si è verificato nelle aree limitrofe a canali adibiti alla navigazione, non è solo circoscrivibile a Venezia. Uno studio ([Townsed et al., 2014](#)) ha calcolato l'erosione annua della linea di costa di una parte della baia Ovest di Galveston, attraversata dal canale navigabile Texas Gulf Intracoastal Waterway (GWWW), che collega il porto industriale al Golfo del Messico. La sezione e le caratteristiche del canale possono essere paragonate al canale Malamocco-Marghera. E' stato calcolato che nell'anno 2010, 72 milioni di tonnellate di navi cargo transitarono in questo canale. Il tratto di canale GWWW confina con la baia Ovest di Galveston, ed è attraversato da navi cargo e petroliere dirette all'area industriale. Nello studio riguardante il verificarsi del fenomeno erosivo vengono considerati sia l'erosione ad opera delle onde create dal vento, sia l'erosione creata, e dalle onde di marea e dalle onde create al passaggio delle navi. In questo studio non viene messo in evidenza il fenomeno erosivo creato dal transitare delle navi nel canale, ma vengono considerati nell'insieme più fattori per spiegare l'erosione della linea di costa. Importante è mettere in evidenza che l'erosione calcolata da questi autori è di un minimo di circa 2 m/anno ad un massimo di circa 3 m/anno. Questi dati sono inferiori alle stime di erosione calcolate per la linea di riva della cassa di colmata B, ma danno comunque un'idea sulla velocità di erosione di aree limitrofe a canali navigabili in un ambiente simile a quello della Laguna di Venezia.

In questi ambienti così lontani da un punto di vista geografico, ma in cui agiscono le stesse forzanti naturali ed antropiche, diventa molto importante studiare gli impatti erosivi che si verificano in aree limitrofe a canali che vengono attraversati più volte al giorno da navi mercantili dirette a porti

industriali. Infatti, il fenomeno erosivo che è stato studiato non è circoscrivibile solo alla Laguna di Venezia, ma anche a qualsiasi ambiente in cui è presente una simile morfologia e su cui persistono una combinazione di impatti naturali e antropici. In Tabella 2 vengono citati alcuni porti in Europa e nella costa Sud-Est ed Est degli Stati Uniti, dove si ritrovano situazioni simili a quella studiata.

Tabella 2. Porti dell'Europa e nella costa orientale degli Stati Uniti.

Port of Hamburg, Germany
Rotterdam, Holland
Amsterdam Westpoort, Holland
Baytown, Texas
Aransas Pass, Texas
Fort Lauderdale, Florida
Port Canaveral, Florida
Savannah, Georgia
Charleston, Carolina del Sud
Beaufort, Carolina del Sud
Baltimora, Maryland
Freeport, New York

10. Conclusioni

Le indagini sperimentali condotte in campo e il processamento delle immagini aeree e satellitari in ambiente GIS hanno rivelato alcuni aspetti importanti, che vengono qui riassunti, a conclusione del lavoro di tesi.

-Il traffico navale nel canale Malamocco-Marghera ha una diretta conseguenza sul controllo della morfologia delle limitrofe aree lagunari.

-L'erosione della linea di riva della cassa di colmata B è stata calcolata variare da un minimo di circa 3 m ad un massimo di circa 4 m all'anno. Questa velocità di arretramento è stata quantificata, sulla base dello studio affrontato, nell'analisi delle fotografie aeree e satellitari a disposizione nell'arco temporale 1974-2014.

-Il tasso di erosione studiato in campo durante i 10 mesi di monitoraggio ha dimostrato una velocità di arretramento massima di 3,8 m, in corrispondenza della stazione di riferimento numero 2, situata nell'area centro-Nord della cassa di colmata B. Questo dato conferma la velocità di erosione nel lungo periodo, valutata con lo studio del materiale fotogrammetrico.

-Le analisi dei sedimenti campionati nelle stazioni di riferimento lungo il profilo stratigrafico della cassa di colmata B, hanno individuato una granulometria del silt e silt sabbioso. Solo in alcune stazioni il sedimento aveva una composizione sabbiosa classificato come sabbia siltosa. Una maggior quantità di sabbia siltosa è presente alla base del profilo nell'area centro-Sud (stazione 12) e nello strato superficiale del profilo stesso in due stazioni nell'area Nord (stazione 3 e 8). L'area centro-Sud è risultata essere sottoposta ad una maggior erosione rispetto all'area Nord.

-La stima della quantità di sedimento eroso nell'arco di tempo considerato (1974-2014) è stata di 933.000 m³, con una quantità erosiva annuale pari a 23.000 m³.

In base alle osservazioni effettuate in campo, risulta evidente che è la stratigrafia, insieme alle proprietà dei materiali, a predisporre e a controllare l'evoluzione morfologica del sistema studiato e le sue variazioni spaziali, nel breve periodo (10 mesi) e nel lungo periodo (40 anni) presi in considerazione. Per quanto riguarda, invece, le variazioni temporali sembra esserci una correlazione con la velocità di arretramento e la frequenza degli episodi di acqua alta che portano il livello dell'acqua in prossimità della base della scarpata di erosione, consentendo un'ulteriore progressione del fenomeno erosivo.

E' facile comprendere che opere di questo tipo (la costruzione delle cassa di colmata) modificano profondamente e irrimediabilmente un territorio e lo trasformano con scavi, bonifiche ed attività industriali. L'assetto idrogeologico dell'ambiente viene profondamente trasformato da continue opere urbanistiche ed industriali, ai fini di un potenziamento economico e politico. Appare sempre più urgente la necessità di arrestare i fenomeni di erosione con interventi organici che, basandosi sull'approfondita conoscenza di tutte le componenti ambientali e delle dinamiche che ne regolano i rapporti, permettano il recupero ed una corretta gestione di una risorsa unica qual è la Laguna di Venezia. La recente discussione in merito ad un possibile potenziamento delle vie d'acqua della laguna verte sull'incompatibilità esistente tra le moderne navi da carico ed i bassi fondi dei canali attuali, pensati per i navigli con dimensioni e pescaggio molto differenti. Grazie a questo studio, ci si può rendere conto dell'evoluzione di un ambiente lagunare limitrofo ad un canale adibito alla navigazione.

Al fine di preservare l'area studiata da un'ulteriore erosione sarebbe importante gestire il traffico navale in modo adeguato. A tal fine dovrebbe esistere un modello di gestione non solo economico ma che tenga conto anche degli aspetti ambientali noti (livello di marea, vento) e tecnici (velocità dell'imbarcazione ed il *blocking coefficient* cioè il rapporto tra il prodotto tra larghezza dello scafo ed il suo pescaggio ed il prodotto tra larghezza e la profondità del canale navigato), cercando di utilizzare al meglio tutte le conoscenze disponibili per minimizzarli. L'interazione di questi fattori (economici e ambientali) sarebbe di fondamentale importanza per l'attuazione di un modello di gestione adeguato. Con questo lavoro di tesi si è cercato di mettere in evidenza che, una eccessiva escavazione del canale Malamocco-Marghera, (allo scopo di far transitare navi di maggior dimensioni-le navi crocieristiche), porterebbe ad un potenziamento dell'attività erosiva delle limitrofe aree lagunari, tali a portare una progressiva scomparsa della morfologia lagunare. Purtroppo, quasi sempre, l'uomo di oggi, agendo solo seguendo la logica del profitto economico, mira ad apportare cambiamenti spesso irreversibili di ambienti che dovrebbero essere tutelati.

11. Bibliografia e sitografia:

- APITZ, S.E., BARBANTI, A., BERNSTEIN, A.G., BOCCI, M., DELANEY, E., MONTOBBIO, L., 2007. THE ASSESSMENT OF SEDIMENT SCREENING RISK IN VENICE LAGOON AND OTHER COASTAL AREAS USING INTERNATIONAL SEDIMENT QUALITY GUIDELINES. *JOURNAL OF SOILS AND SEDIMENTS* 7 (5), 326–341.
- AUTORITÀ PORTUALE DI VENEZIA. VENEZIA PORTO VERDE, INIZIATIVE AMBIENTALI PER IL PORTO DI VENEZIA. A CURA DELLA DIREZIONE TECNICA-AREA AMBIENTE. VENEZIA, GENNAIO 2010, PP. 25-26.
- BASCHIERI P. (1996). CENNI GENERALI SULLA MORFOLOGIA LAGUNARE. IN: "LA LAGUNA DI VENEZIA: UN PATRIMONIO DA RISCOPRIRE". FORUM DELLA LAGUNA. VENEZIA, FILIPPI ED., PP. 58-64.
- BELLUCCI, L.G., FRIGNANI, M., COCHRAN, J.K., ALBERTAZZI, S., ZAGGIA, L., CECCONI, G., HOPKINS, H., 2007. ²¹⁰Pb AND ¹³⁷Cs AS CHRONOMETERS FOR SALT MARSH ACCRETION IN THE VENICE LAGOON AND LINKS TO FLOODING FREQUENCY AND CLIMATE CHANGE. *J. ENVIRON. RADIOACTIV.* 97, 85–102.
- BONOMETTO, L., 2005. FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF SALT MARSHES (BARENE) IN THE VENICE LAGOON AND ENVIROMENTAL RESTORATION SCENARIOS. IN: FLETCHER, C.A., SPENCER, T. (EDS.), FLOODING AND ENVIRONMENTAL CHALLENGES FOR VENICE AND ITS LAGOON: STATE OF KNOWLEDGE. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, CAMBRIDGE UK, PP. 473–486.
- BORTOLAMI, G., CARBOGNIN, L., AND GATTO, P., 1985, THE NATURAL SUBSIDENCE IN THE LAGOON OF VENICE, ITALY, IN LAND SUBSIDENCE, JOHNSON, A.I., CARBOGNIN, L., AND UBERTINI, L., EDS, IAHS PUBL. NO. 151, PP. 777-785.
- BOURNE, J., 2000, LOUISIANA'S VANISHING WETLANDS: GOING, GOING... *SCIENCE*, 289 (5486), 1860-1863.
- BRAMBATI, A., 1987, REGIME, BILANCIO SEDIMENTOLOGICO ED IPOTESI DI RIPASCIMENTO DEI LIDI DI VENEZIA: ATTI DEL VI CONGRESSO NAZIONALE DELL'O.N.G., FONDAZIONE CINI, VENEZIA, 25-27 SETT. 1987, PP. 153-209.
- BRAMBATI A., CARBOGNIN L., QUAIÀ T., TEATINI P., TOSI, L., 2003. THE LAGOON OF VENICE: GEOLOGICAL SETTING, EVOLUTION AND LAND SUBSIDENCE. *EPISODES*, VOL. 26, NO 3, 264-268.
- BROMBERG GEDAN, K., SILLIMAN, B.R., BERTNESS, M.D., 2009. CENTURIES OF HUMAN- DRIVEN CHANGE IN SALT-MARSH ECOSYSTEMS. *ANNUAL REVIEW OF MARINE SCIENCE* 1, 117–141.
- CARBOGNIN, L., MARABINI F., AND TOSI, L., 1995, LAND SUBSIDENCE AND DEGRADATION OF THE VENICE LITTORAL ZONE, ITALY, IN LAND SUBSIDENCE, BARENDIS, J.F., BROUWER, F.J.J. AND SCHROEDER, F.H., EDS, IAHS PUBL. NO. 234, PP. 391-402.
- CARBOGNIN, L. AND TARONI, G., 1996, EUSTATISMO A VENEZIA E TRIESTE NELL'ULTIMO SECOLO. ATTI ISTITUTO VENETO SS. LL. AA., CLASSE DI SCIENZE FIS.,MAT. E NAT., TOMO CLIV, PP. 33-52.

- CARBOGNIN, L., TEATINI, P., AND TOSI, L., 2003, EUSTASY AND LAND SUBSIDENCE IN THE VENICE LAGOON AT THE BEGINNING OF THE NEW MILLENNIUM, JOURNAL OF MARINE SYSTEMS, IN PRESS.
- CAVAZZONI, S., 1995. LA LAGUNA: ORIGINE ED EVOLUZIONE. IN G. CANIATO, E. TURRI E M. ZANETTI (EDS.) LA LAGUNA DI VENEZIA, VERONA: UNESCO, CIERRE ED., PP. 41-67 .
- CIAVOLA, P., ORGANO, C., LEÓN VINTRÓ, L., MITCHELL, P.I., 2002. SEDIMENTATION PROCESSES ON INTERTIDAL AREAS OF THE LAGOON OF VENICE: IDENTIFICATION OF EXCEPTIONAL FLOOD EVENTS (ACQUA ALTA) USING RADIONUCLIDES. J. COASTAL RES., SPECIAL ISSUE 36, 139–147.
- CORACI, E., UMGIESSER, G., ZONTA, R., 2007. HYDRODYNAMIC AND SEDIMENT TRANSPORT MODELING IN THE CHANNELS OF VENICE (ITALY). ESTUAR. COAST. SHELF SCI. 75, 250–260.
- COSTA, F., ZULIANI, A., 2004. ANALISI DEGLI EFFETTI IDRODINAMICI INDOTTI NEI RII DI S.BASILIO, S.MARTIN, PONTE PICCOLO E S. EUFEMIA, IN CORRISPONDENZA DEL PASSAGGIO DELLE GRANDI NAVI DA CROCIERA NEL CANALE DELLA GIUDECCA E IN BACINO DI S. MARCO. RELAZIONE DI SINTESI. CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE ISMAR - ISTITUTO DI SCIENZE MARINE SEZIONE DI RICERCA DI VENEZIA, PP. 2.
- COVALLINI, F., BETTIOL, C., ZAGGIA, L., ZONTA, R., 2005. POLLUTANT LOADS FROM THE DRAINAGE BASIN TO THE VENICE LAGOON (ITALY). ENVIRONMENT INTERNATIONAL, 31 (7), 939-947.
- D'ALPAOS, L., 2010. L'EVOLUZIONE MORFOLOGICA DELLA LAGUNA DI VENEZIA ATTRAVERSO LA LETTURA DI ALCUNE MAPPE STORICHE E DELLE SUE CARTE IDROGRAFICHE. COMUNE DI VENEZIA, ISTITUZIONE CENTRO PREVISIONI E SEGNALAZIONI MAREE, LEGGE SPECIALE PER VENEZIA, 108, PP. 11-89.
- DAY, J.W., SCARTON, F., RIMONDO, A., ARE, D., 1998. RAPID DETERIORATION OF A SALT MARSH IN VENICE LAGOON. J. COAST.RES. 14, 583–590.
- DEFENDI, V., KOVAČEVIĆ, V., ARENA, F., ZAGGIA, L., 2010. ESTIMATING SEDIMENT TRANSPORT FROM ACOUSTIC MEASUREMENTS IN THE VENICE LAGOON INLETS. CONT. SHELF RES. 30, 883–893.
- DONNICI, S., SERANDREI-BARBARO, R., BINI, C., BONARDI, M., LEZZIERO, A., 2011. THE CARANTO PALEOSOL AND ITS ROLE IN THE EARLY URBANIZATION OF VENICE. GEOARCHAEOLOGY: AN INTERNATIONAL JOURNAL, VOL. 26, NO. 4, 514–543.
- ERM, A., ALARI, V., LISTAK, M., 2009. MONITORING WAVE-INDUCED SEDIMENT RESUSPENSION. EST. J. ENG. 15, 196–211.
- FAVERO V., PAROLINI R., SCATTOLIN M., 1988. MORFOLOGIA STORICA DELLA LAGUNA DI VENEZIA. ARSENALE EDITRICE (VENEZIA) PP 89.
- FAVERO, V., 1992. EVOLUZIONE MORFOLOGICA E TRASFORMAZIONI AMBIENTALI DALLA CONTERMINAZIONE LAGUNARE AL NOSTRO SECOLO. CON TERMINAZIONE LAGUNARE: STORIA, INGEGNERIA, POLITICA E DIRITTO NELLA LAGUNA DI VENEZIA. PROCEEDING OF THE CONFERENCE "CONVEGNO DI STUDI BICENTENARIO DELLA CON TERMINAZIONE LAGUNARE", VENICE, ITALY, PP. 165.

- GATTO, P., PREVIATELLO, P., 1974. SIGNIFICATO STRATIGRAFICO, COMPORTAMENTO MECCANICO E DISTRIBUZIONE NELLA LAGUNA DI VENEZIA DI UN'ARGILLA SOVRACONSOLIDATA NOTA COME "CARANTO". RAPPORTO TECNICO 70, CNR, ISTITUTO PER LO STUDIO DELLA DINAMICA GRANDI MASSE, VENEZIA, 45 PP.
- GATTO, P. AND CARBOGNIN, L., 1981, THE LAGOON OF VENICE: NATURAL ENVIRONMENTAL TREND AND MAN INDUCED MODIFICATION. HYDROLOGICAL SCIENCES BULLETIN, 26/4/12, PP. 379-391.
- GATTO P., 1984. IL CORDONE LITORANEO DELLA LAGUNA DI VENEZIA E LE CAUSE DEL SUO DEGRADO. COMMISSIONE DI STUDIO DEI PROVVEDIMENTI PER LA CONSERVAZIONE E DIFESA DELLA LAGUNA E DELLA CITTÀ DI VENEZIA. ISTITUTO VENETO DI SCIENZE, LETTERE ED ARTI, RAPPORTI E STUDI, V. IX, 163-193.
- GOLDBERG, E.D., 1995. EMERGING PROBLEMS IN THE COASTAL ZONE FOR THE TWENTY-FIRST CENTURY. MAR. POLLUT. BULL. 31, 152–158.
- GÖRANSSON .2014. A RESPONSE TO GÖRANSSON AND NILHON. EUROPEAN JOURNAL OF SPECIAL NEEDS EDUCACION, 2014. VOL. 29, No, 3, 328-282.
- GUERZONI, S., TAGLIAPIETRA, D., 2006. ATLANTE DELLA LAGUNA. VENEZIA TRA TERRA E MARE (ATLAS OF THE LAGOON: VENICE BETWEEN LAND AND SEA). MARSILIO, VENICE PP. 242.
- HAYES, K.R., SLIWA, C., 2003. IDENTIFYING POTENTIAL MARINE PESTS—A DEDUCTIVE APPROACH APPLIED TO AUSTRALIA. MAR. POLLUT. BULL. 46, 91–98.
- HIGGINS, S.A., JAFFE, B., FULLER, C.C., 2007. RECONSTRUCTING SEDIMENT AGE PROFILES FROM HISTORICAL BATHYMETRY CHANGES IN SAN PABLO BAY, CALIFORNIA. ESTUARINE COASTAL AND SHELF SCIENCES 73, 165–174.
- HOFMANN, H., LORKE, A., PEETERS, F., 2008. THE RELATIVE IMPORTANCE OF WIND AND SHIP WAVES IN THE LITTORAL ZONE OF A LARGE LAKE. LIMNOL. OCEANOGR. 53, 368–380.
- HOUSER, C., 2010. RELATIVE IMPORTANCE OF VESSEL-GENERATED AND WIND WAVES TO SALT MARSH EROSION IN A RESTRICTED FETCH ENVIRONMENT. J. COAST. RES. 26, 230–240.
- JAFFE, B.E., SMITH, R.E., FOXGROVER, A.C., 2007. ANTHROPOGENIC INFLUENCE ON SEDIMENTATION AND INTERTIDAL MUDFLAT CHANGE IN SAN PABLO BAY, CALIFORNIA: 1856–1983. ESTUAR. COAST. SHELF SCI. 73, 175–187.
- KENT, V.D., RIO D., MASSARI, F., KUKLA, G., AND LANCI, L., 2002, EMERGENCE OF VENICE DURING THE PLEISTOCENE. QUATERNARY SCIENCE REVIEW, V. 21, PP. 1719-1727.
- MADEKIVI, O. (ED.). ALUSTEN AIHEUTTAMIEN AALTOJEN JA VIRTASTEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET. VESI JA YMPÄRISTÖHALLINNON JULK. SARJA A, 1993, 166, 1–113.
- MOLINAROLI, E., GUERZONI, S., SARRETTA, A., MASIOL, M., PISTOLATO, M. THIRTY-YEAR CHANGES (1970 TO 2000) IN BATHYMETRY AND SEDIMENT TEXTURE RECORDED IN THE LAGOON OF VENICE SUB-BASINS, ITALY. MAR. GEOL. 258, 115–125, 2009.

- MOLINAROLI, E., SARRETTA, A., DE SOUZA GUIMARÃES, JORGE A., BOTTER, M., CASSIN, D., GUERZONI S., 2013. RELATIONSHIP OF MORPHO-SEDIMENTOLOGICAL VARIATIONS TO THE FATE OF Hg- AND Zn-POLLUTED SEDIMENTS IN THE CONTAMINATED SITE OF PORTO MARGHERA, LAGOON OF VENICE, ITALY. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL PROTECTION. 4, 37-49.
- NANSON, G.C., VON KRUSEN TIERNIA, A., BRYANT, E.A., RENILSON, M.R., 1994. EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF RIVER-BANK EROSION CAUSED BY BOAT GENERATED WAVES ON THE GORDON RIVER, TASMANIA. REG. RIVERS RES. MANAGE. 9, 1-14.
- NEIL, D.T., ORPIN, A.R., RIDD, E.V., YU, B.F., 2002. SEDIMENT YIELD AND IMPACTS FROM RIVER CATCHMENTS TO THE GREAT BARRIER REEF LAGOON. MAR. FRESHWATER RES. 53, 733-752.
- NEUMAN, D.G., TAPIO, E., HAGGARD, D., LAWS, K.E. AND BLAND, R.W., 2001. OBSERVATION OF LONG WAVES GENERATED BY FERRIES. CANADIAN JOURNAL OF REMOTE SENSING, 27, 361-370.
- OSBORNE, P.D., MACDONALD, N.J. AND PARKINSON, S., 2007, SEDIMENT TRANSPORT IN RESPONSE TO WAVE GROUPS GENERATED BY HIGH-SPEED VESSELS. IN: COASTAL SEDIMENTS '07, ASCE, 15P.
- PAOLINI, M., 2012. LA CONTAMINAZIONE CHIMICA DEL COMPLESSO SUPERFICIALE DI FALDE NELL'AREA INDUSTRIALE DI PORTO MARGHERA, CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALLA SUA EVOLUZIONE NELL'ULTIMO DECENNIO. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA, PP. 3-11.
- PARNELL, K.E., KOFOED-HANSEN, H., 2001. WAKES FROM LARGE HIGH-SPEED FERRIES IN CONFINED COASTAL WATERS: MANAGEMENT APPROACHES WITH EXAMPLES FROM NEW ZEALAND AND DENMARK. COASTAL MANAGEMENT 29 (3), 217 E 237.
- PERNELL, K.E.; McDONALD, S.C., AND BURKE, A.E., 2007. SHORELINE EFFECTS OF VASSEL WAKES, MARLBOROUGH SOUNDS, NEW ZELAND. JOURNAL OF COSTAL RESEARCH SI 50, 502-506.
- PARNELL, K., DELPECHE, N., DIDENKULOVA, I., DOLPHIN, T., ERM, A., KASK, A., KELPŠAITE, L., KURENNOY, D., QUAK, E., RÄÄMET, A., SOOMERE, T., TERENTJEVA, A., TORSVIK, T., ZAITSEVA-PÄRNASTE, I., 2008. FAR-FIELD VESSEL WAKES IN TALINN BAY. EST. J. ENG. 14, 273-302.
- PARNEL, K.E., (JAMES COOK UNIVERSITY AUSTRALIA), 2014. WHY SHIP-GENERATED WAKES MATTERS. IN COLLABORACION WHIT LUCA ZAGGIA AND THIS TEAM, CNR-ISMAR, VENEZIA ITALY; TARMO SOOMERE, WAVE ENGINEERING LABORATORY, TTU, TAILLINN, ESTONIA, PRESENTAZIONE IN POWER-POINT, SLIDE NO.52-53.
- PIANC, 2003. GUIDELINES FOR MANAGING WAKE WASH FROM HIGH-SPEED VESSELS. REPORT OF THE WORKING GROUP 41 OF THE MARITIME NAVIGATION COMMISSION. INTERNATIONAL NAVIGATION ASSOCIATION (PIANC), BRUSSELS. 32, 21-23.
- RADO, M., 2014. EVOLUZIONE TEMPORALE DELLE RETI DI CANALI A MAREA NELLA LAGUNA DI VENEZIA. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA, PP. 10-36.
- RAPAGLIA, J., ZAGGIA, L., RICKLEFS, K., GELINAS, M., BOKUNIEWICZ, H., 2011. CHARACTERISTICS OF SHIPS' DEPRESSION WAVES AND ASSOCIATED SEDIMENT RESUSPENSION IN VENICE LAGOON, ITALY. J. MAR. SYST.

- RAVENS, T.M., THOMAS, R.C., 2008. SHIP WAVE-INDUCED SEDIMENTATION OF A TIDAL BORE IN GALVESTON BAY. *J. WATERW. PORT COASTAL OCEAN ENG.* 134, 21–29.
- RAVERA, O., 2000. THE LAGOON OF VENICE: THE RESULT OF BOTH NATURAL FACTORS AND HUMAN INFLUENCE. *J. LIMNOL.*, 59 (1): 19-30.
- RICCIARDI, A., RASMUSSEN, J.B., 1998. PREDICTING THE IDENTITY AND IMPACT OF FUTURE BIOLOGICAL INVADERS: A PRIORITY FOR AQUATIC RESOURCE MANAGEMENT. *CAN. J. FISH. AQUAT. Sci.* 55, 1759–1765.
- ROCCAFORTE, P., MASCHIETTO, G., 2002. LA CASSA DI COLMATA “A” DELLA LAGUNA DI VENEZIA. GLI AMBIENTI, LA FLORA E LA FAUNA, PP. 6-15.
- RUSSELL, J.S., 1844. REPORT ON WAVES. REPORT OF THE 14TH MEETING OF THE BRITISH ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE. JOHN MURRAY, YORK, PP. 311–390.
- SARETTA, A., PILLON, S., MOLINAROLI, E., GUERZONI, S., FONTOLAN, G., 2010. SEDIMENT BUDGET IN THE LAGOON OF VENICE, ITALY. *CONT. SHELF RES.* 30, 934–949.
- SCARPA G., 2014 CARATTERISTICHE DELL’ONDA DI DEPRESSIONE GENERATE DAL TRAFFICO NAVALE E RISOSPENSIONE DEI SEDIMENTI IN UN CANALE NAVIGABILE CONFINATO IL CASO DEL CANALE MALAMOCCHIO-MARGHERA. UNIVERSITÀ CA’ FOSCARI DI VENEZIA, PP. 10-89.
- SCARTON, F., DAY, J.W., RIMONDO, A., CECCONI, G., ARE, D., 2000. EFFECTS OF AN INTERTIDAL SEDIMENT FENCE ON SEDIMENT ELEVATION AND VEGETATION DISTRIBUTION IN A VENICE (ITALY) LAGOON SALT MARSH. *ECOL. ENG.* 16, 223–233.
- SCHOELLHAMER, D.H., 1996. ANTHROPOGENIC SEDIMENT RESUSPENSION MECHANISMS IN A SHALLOW MICROTIDAL ESTUARY. *ESTUAR. COAST. SHELF Sci.* 43, 533–548.
- SCORTEGAGNA U., PRIMON S. (2008) LA LAGUNA DI VENEZIA: GENESI, EVOLUZIONE, NATURALITÀ E SALVAGUARDIA. CITTÀ DI VENEZIA, ASSESSORATO AMBIENTE – OSSERVATORIO NATURALISTICO DELLA LAGUNA. CENTRO STUDI RIVIERA DEL BRENTA. IN COLLABORAZIONE CON: COOP. HYLÀ – CAI – UFF. EDUCAZIONE AMBIENTALE – ISTITUZIONE PARCO LAGUNA. CORSO DIDATTICO FORMATIVO.
- SERANDREI BARBERO, R., ALBANI, A., DONNICI, D., PIZZETTO, F., 2006. PAST AND RECENT SEDIMENTATION RATES IN THE LAGOON OF VENICE (NORTHERN ITALY). *ESTUAR. COAST. SHELF Sci.* 69, 255–269.
- SFRISO, A., FACCA, C., MARCOMINI, A., 2005. SEDIMENTATION RATES AND EROSION PROCESSES IN THE LAGOON OF VENICE. *ENV. INT.*, SPECIAL ISSUE 31, 983–992.
- SOOMERE, T., 2005. WIND WAVE STATISTICS IN TALLINN BAY. *BOREAL ENV. RES.*, 10, 103–118.
- SOOMERE, T., 2005B. FAST FERRY TRAFFIC AS A QUALITATIVELY NEW FORCING FACTOR OF ENVIRONMENTAL PROCESSES IN NON-TIDAL SEA AREAS: A CASE STUDY IN TALLINN BAY, BALTIC SEA. *ENVIRONMENTAL FLUID MECHANICS* 5 (4), 293–323.

- SOOMERE, T., 2006. NONLINEAR SHIP WAKE WAVES AS A MODEL OF ROGUE WAVES AND A SOURCE OF DANGER TO THE COASTAL ENVIRONMENT: A REVIEW. *OCEANOLOGIA* 48, 185–202.
- SOOMERE, T., 2007. NONLINEAR COMPONENTS OF SHIP WAKE WAVES. *APPL. MECH. REV.* 60,120–138.
- SOOMERE, T., PARNELL, K., DIDENKULOVA, I., 2009. IMPLICATIONS OF FAST-FERRY WAKES FOR SEMISHeltered BEACHES: A CASE STUDY AT AEGNA ISLAND, BALTIC SEA. *J. COAST. RES.* 56, 128–132.
- STREETS, B.M., HOLDEN, P.A., 2003. A MECHANISTIC MODEL OF RUNOFF-ASSOCIATED FECAL COLIFORM FATE AND TRANSPORT THROUGH A COASTAL LAGOON. *WATER RES.* 37, 589–608.
- TOWNSEND, K., MAGLIO, C., THOMAS, R., THORNTON, D., MILLER, J., CAMPBELL, T., LIN, L., WILLEY, S., WOOD, E., 2014. REDUCING SHOALING IN THE TEXAS GIWW AND EROSION OF BARRIER ISLANDS ALONG WEST GALVESTON BAY. *TERRA ET AQUA*, NUMBER 136, PP. 20-29.
- UMGIESSER, G., SCLAVO, M., CARNIEL, S., BERGAMASCO, A., 2004. EXPLORING THE BOTTOM STRESS VARIABILITY IN THE VENICE LAGOON. *J. MAR. SYST.* 51, 161–178.
- VASCELLARI, F., 2002. CARATTERIZZAZIONE IDROLOGICA DELL'AREA COMPRESA TRA IL CANALE INDUSTRIALE SUD ED IL NAVIGLIO DEL BRENTA IN ZONA MALCONTENTA VENEZIA. UNIVERSITÀ CA' FOSCARI DI VENEZIA, PP. 4-16.
- WIBERG, P.L., SHERWOOD, C.R., 2008. CALCULATING WAVE-GENERATED BOTTOM ORBITAL VELOCITIES FROM SURFACE-WAVE PARAMETERS. *COMPUT. GEOSCI.* 34, 1243–1262.
- ZECCHIN, M., TOSI, L., CAFFAU, M., BARADELLO, L., DONNICI, S., 2014. SEQUENCE STRATIGRAPHIC SIGNIFICANCE OF TIDAL CHANNEL SYSTEMS IN A SHALLOW LAGOON (VENICE, ITALY). *THE HOLOCENE* 2014, VOL. 24(6) 646– 658.
- ZONTA, R., COLLAVINI, F., ZAGGIA, L., ZULIANI, A., 2005. POLLUTION IN THE VENICE LAGOON (ITALY): LOADS FROM THE DRAINAGE BASIN. IN: FLETCHER, C.A., SPENCER, T. (EDS.), *FLOODING AND ENVIRONMENTAL CHALLENGES FOR VENICE AND ITS LAGOON: STATE OF KNOWLEDGE*. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, CAMBRIDGE, PP. 581–592.
- ZULIANI, A., ZAGGIA, L., COLLAVINI, F., ZONTA, R., 2005. FRESHWATER DISCHARGE FROM THE DRAINAGE BASIN TO THE VENICE LAGOON (ITALY). *ENVIRONMENT INTERNATIONAL*, 31 (7), 929-938.

<https://www.port.venice.it/it/il-porto.html>

http://mapserver.iuav.it/website/foto_aeree/

<http://www.regione.veneto.it/web/ambiente-e-territorio/la-cassa-di-colmata-a>

<http://www.comune.venezia.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/61001>

<http://politicheambientali.provincia.venezia.it/pubblicazioni/rischio-idrogeologico/atti-del-convegno-la-laguna-dei-veneziani-e-le-casse-di-colmata>

<http://www.ecomuseoterredelbrenta.it/pagina.asp?ID=73>

<http://www.comune.venezia.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/2968>

<http://www.pcn.minambiente.it/GN/>

<http://www.mtcube.com/MANUALI/INTRAMONTABILI/GIS.PDF>

<http://www.silvenzia.it/>

12 Allegati

12.1 Allegato 1: informazioni relative alle fotografie aeree utilizzate nel lavoro di tesi.

1. Nome: 1954-55 GAI, data: 9 aprile 1954 - 14 ottobre 1955, committente: USA Army Map Service, ditta: Gruppo Aeronautico Italiano, tipo: analogico, focale (mm): 153,xx; 154,xx, quota media di volo (m): da 5000 a 10000, scala media dei fotogrammi: da 1:30000 a 1:62000, colore\bn: bn, formato (cm): 23 x 23, concessione S.M.A.: non disponibile, strisciate: 87, fotogrammi: 1539.

Fotogramma area oggetto di studio:

- nome volo: 1954-1955 GAI;
- data: 16 giugno 1955.



Figura 102. Fotogramma aereo, codice volo 1954gai_09_6002.

2. Nome: 1961 IGM, data: 18 giugno - 5 agosto 1961, committente: Istituto Geografico Militare, ditta: Istituto Geografico Militare, tipo: analogico, focale (mm): 152,27, quota media di volo(m): 4300, scala media dei fotogrammi: 1:28000, colore\bn: bn, formato (cm): 23 x 23, concessione S.M.A.: n.25-33 del 1980; n.452 del 1981, strisciate: 17, fotogrammi: 222.

Fotogramma area oggetto di studio:

- nome volo: 1961 IGM;
- data: 7 luglio 1961.

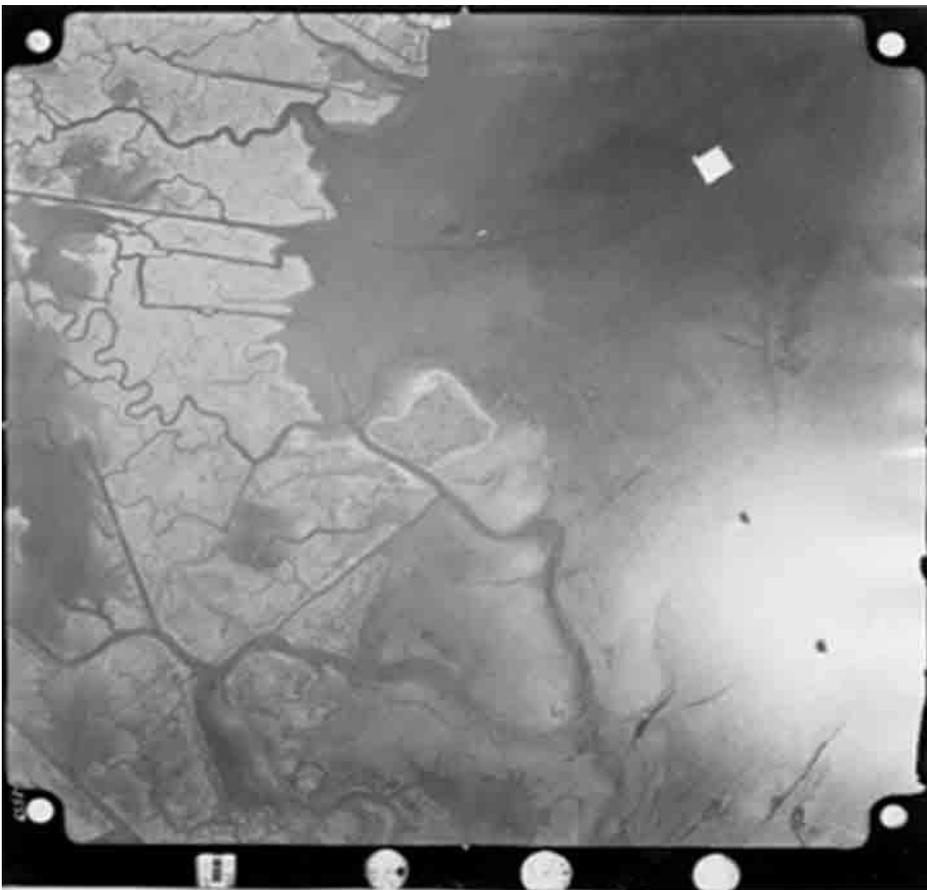


Figura 103. Fotogramma aereo, codice volo 1961igm_12_2559.

3. Nome: 1974 Montedison, data: 1974, committente: Montedison, ditta: Alifoto-Torino, tipo: analogico, focale (mm): 151,94, quota media di volo (m): 2200, scala media dei fotogrammi: 1:15000, colore\bn: colore, formato (cm): 23 x 23, concessione S.M.A.: non disponibile, strisciate: 8, fotogrammi: 144.

Fotogramma area oggetto di studio:

- nome volo: 1974 Montedison;
- data: 1974.

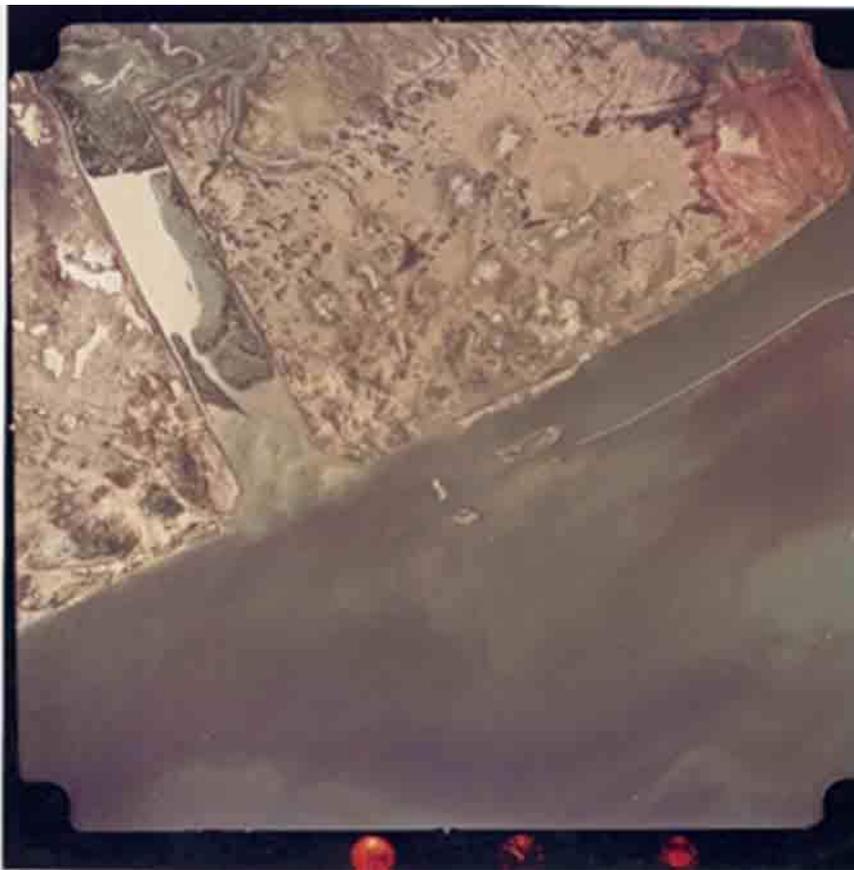


Figura 104. Fotogramma aereo, codice volo 1974montedison_4_8318.

4. Nome: 1978 Reven, data: giugno 1978, committente: Regione Veneto, ditta: CGR – Parma, tipo: analogico, focale (mm): 305,38, quota media di volo (m): 6000, scala media dei fotogrammi: 1:20000, colore\bn: bn, formato (cm): 23 x 23, concessione S.M.A.: n. 412 del 18/9/1978; n. 505 del 4/11/1978, strisciate: 22, fotogrammi: 493.

Fotogramma area oggetto di studio:

- nome volo: 1978 Reven;
- data: giugno 1978.

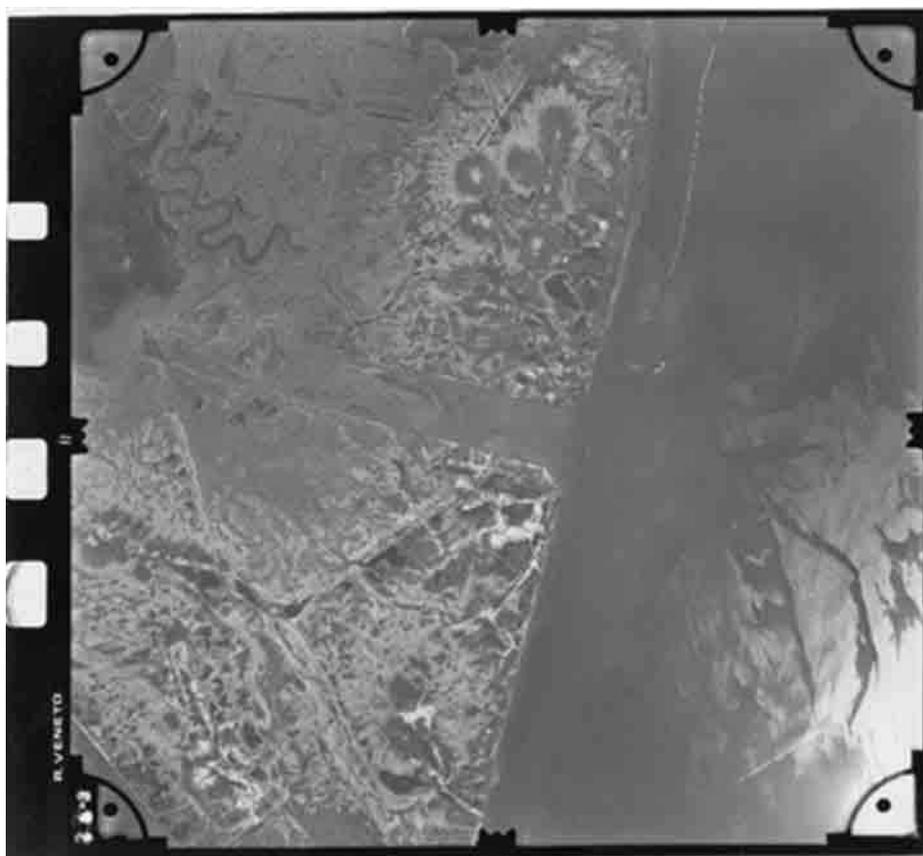


Figura 105. Fotogramma aereo, codice volo 1978_reven_11_243.

5. Nome: 1987 Reven, data: 22 aprile - 22 maggio 1987, committente: Regione Veneto, ditta: CGR – Parma, tipo: analogico, focale (mm): 151,77; 153,26, quota media di volo (m): 3000, scala media dei fotogrammi: 1:20000, colore\bn: colore, formato (cm): 23 x 23, concessione S.M.A.: n. 1339 del 30/12/1987, strisciate: 43, fotogrammi: 94.

Fotogramma area oggetto di studio:

- nome volo: 1987 Reven;
- data: 8 maggio 1987.

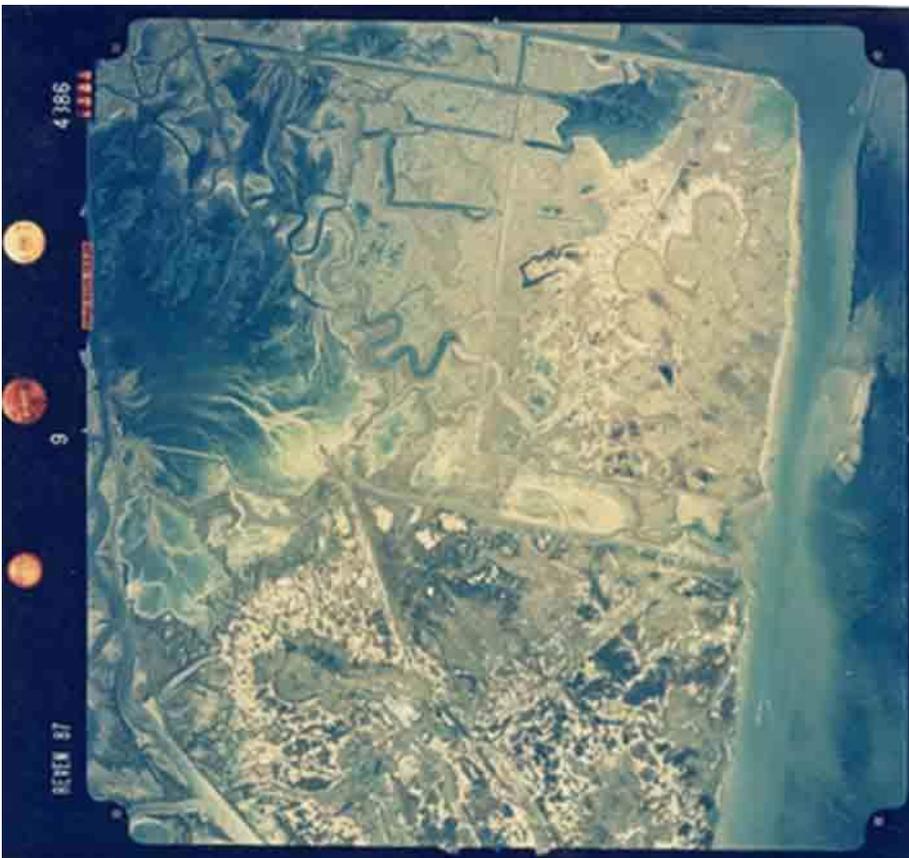


Figura 106. Fotogramma aereo, codice volo 1987reven_09_4386.

6. Nome: 1994 Reven Comune Venezia, data: 22 aprile - 3 maggio 1994, committente: Zollet, ditta: CGR – Parma, tipo: analogico, focale (mm): 153,93, quota media di volo (m): 3000, scala media dei fotogrammi: 1:20000, colore\bn: bn, formato (cm): 23 x 23, concessione S.M.A.: n. 291 del 15/6/1994, strisciate: 20, fotogrammi: 305.

Questo fotogramma non ricopre totalmente l'area di studio lasciando fuori dalla traiettoria di volo una porzione dell'area a Sud della cassa di colmata B.

Fotogramma area oggetto di studio:

- nome volo: 1994 Reven Comune di Venezia;
- data: 29 aprile 1994.



Figura 107. Fotogramma aereo, codice volo 1994venezia_09_298.

7. Nome: 2004 Reven Venezia, data: 4 luglio - 30 luglio 2004, committente: Regione Veneto, ditta: Rossi – Brescia, tipo: analogico, focale (mm): 303,98; 304,946, quota media di volo (m): 2750, scala media dei fotogrammi: 1:8600, colore\bn: colore, formato (cm): 23 x 23, concessione S.M.A.: abolita secondo D.P.R n.367 del 29 settembre 2000, strisciate: 30 fotogrammi: 731.

In questo caso per lo studio della cassa di colmata B, vengono utilizzati due fotogrammi (A e B) uniti per completare l'area.

Fotogrammi area oggetto di studio:

- nome volo: 2004 Reven Venezia;
- data: 4 luglio 2004.

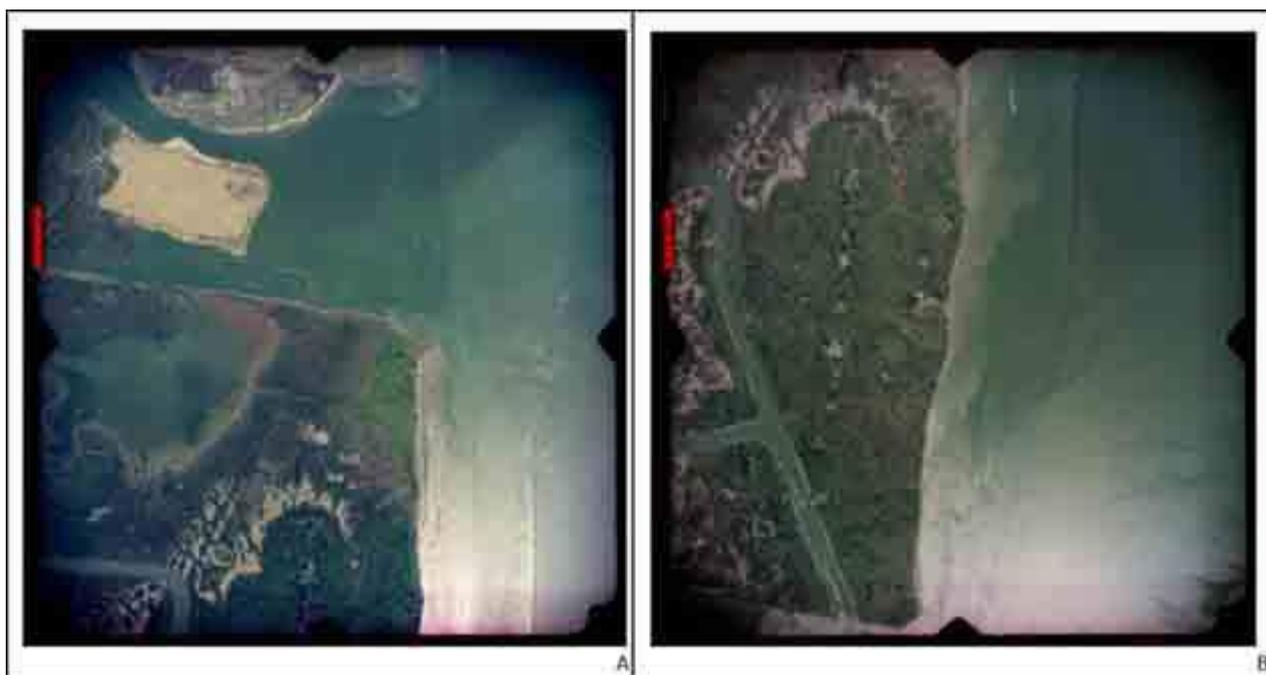


Figura 108. Fotogramma aereo, codice volo 2004venezia_15_214 (A) e fotogramma aereo, codice volo 2004venezia_16_10 (B).

8. Nome: 2005 Reven Venezia, data: 6 maggio - 22 giugno 2005, committente: Regione Veneto, ditta: CGR – Parma, tipo: analogico, focale (mm): 153,64, quota media di volo (m): 2500, scala media dei fotogrammi: 1:16000, colore\bn: colore, formato (cm): 23 x 23, concessione S.M.A.: abolita secondo D.P.R n.367 del 29 settembre 2000, strisciate: 28, fotogrammi: 602.

Anche in questo caso per studiare l'area sono usati due fotogrammi aerei (A e B).

Fotogrammi area oggetto di studio:

- nome volo: 2005 Reven Venezia;
- data: 12 maggio 2005.

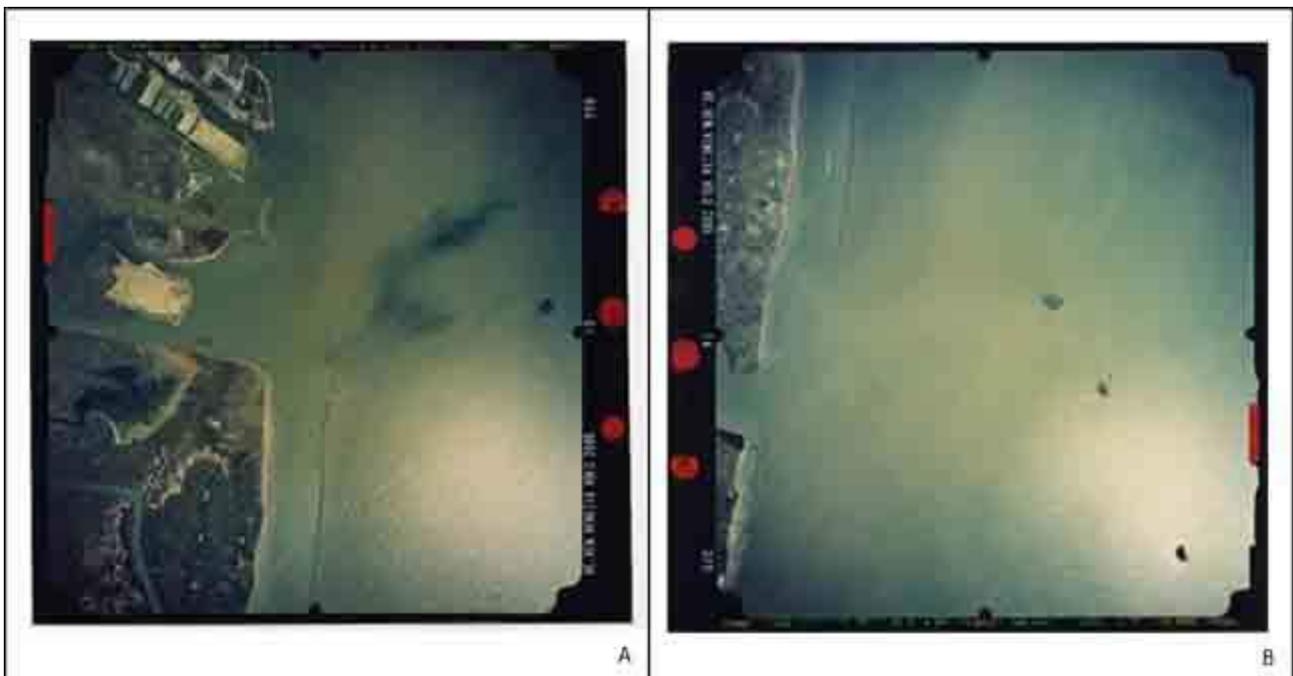


Figura 109. Fotogramma aereo, codice volo 2005venezia_13_358 (A) e fotogramma aereo, codice volo 2005venezia_14_379 B).

9. Nome: 2010 Reven area Venezia volo alto, data: 21 agosto - 21 settembre 2010, committente: Regione Veneto, ditta: Blom / CGR – Parma, tipo: digitale, focale (mm): 100,465, quota media di volo (m): 3030, pixel al suolo del fotogramma originale (cm): 18, pixel al suolo del fotogramma da scaricare (cm): 24, fotogramma originale (pixel): 17310 x 11310, fotogramma da scaricare (pixel): 12983 x 8483, colore\bn: colore, concessione S.M.A.: abolita secondo D.P.R n.367 del 29 settembre 2000, strisciate: 24, fotogrammi: 899.

Fotogramma area oggetto di studio:

- nome volo: area Venezia volo alto;
- data: 21 agosto 2010.



Figura 110. Fotogramma aereo, codice volo 2010venezia_va_10_451.

12.2 Allegato 2: Fotografie aeree e satellitari con le rispettive linee di riva. Le tabelle indicano l'erosione nei diversi periodi di tempo studiati.



Figura 111. Fotografia aerea nell'anno 1961 georeferenziata sull'immagine satellitare del 2012. In arancione l'area (380 ha) della cassa di colmata B.

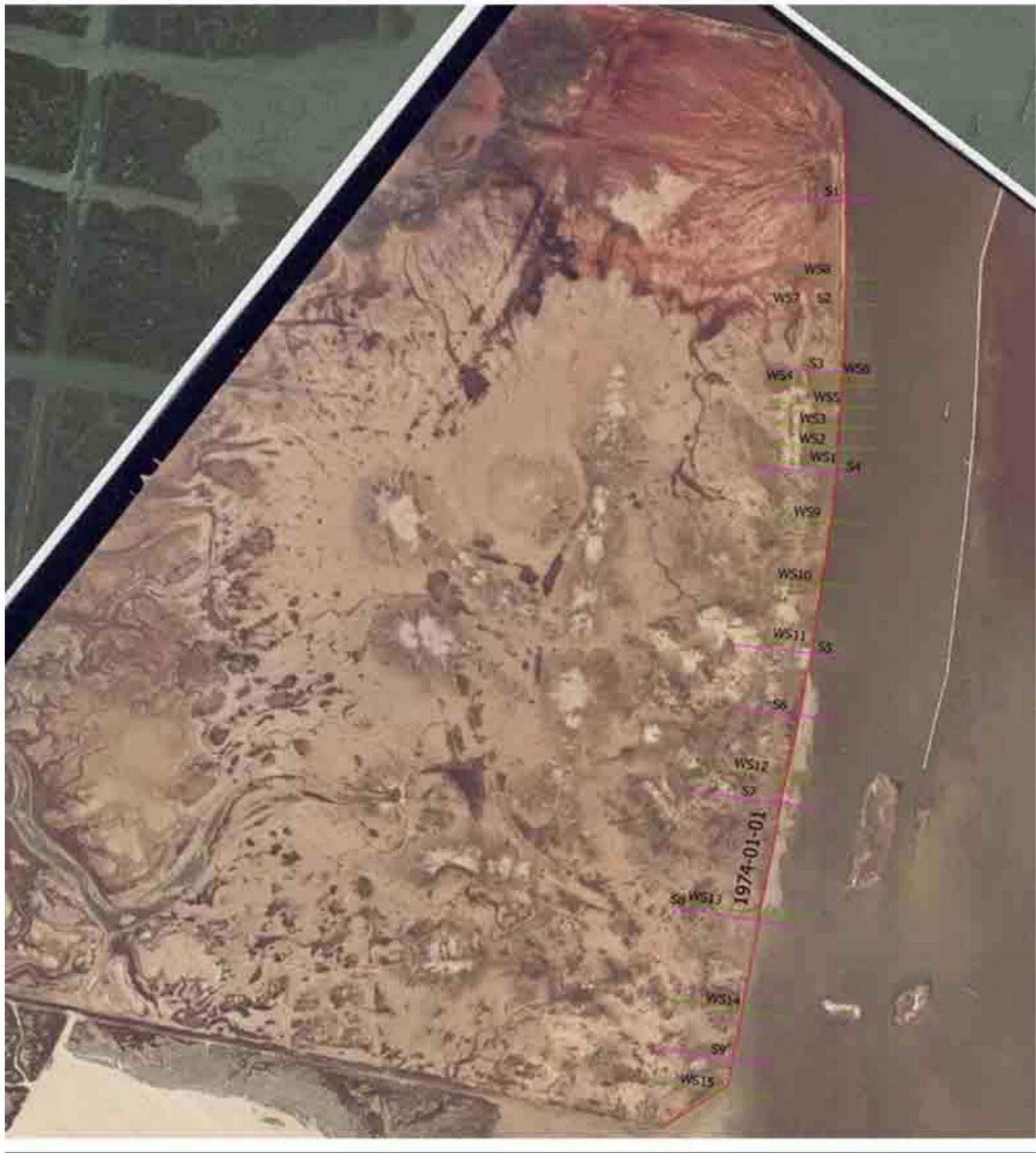


Figura 112. Fotografia aerea nell'anno 1974 georeferenziata sull'immagine satellitare del 2009. Linea di riva nel 1974 e sezioni (S1-S9) e (WS1-WS15).

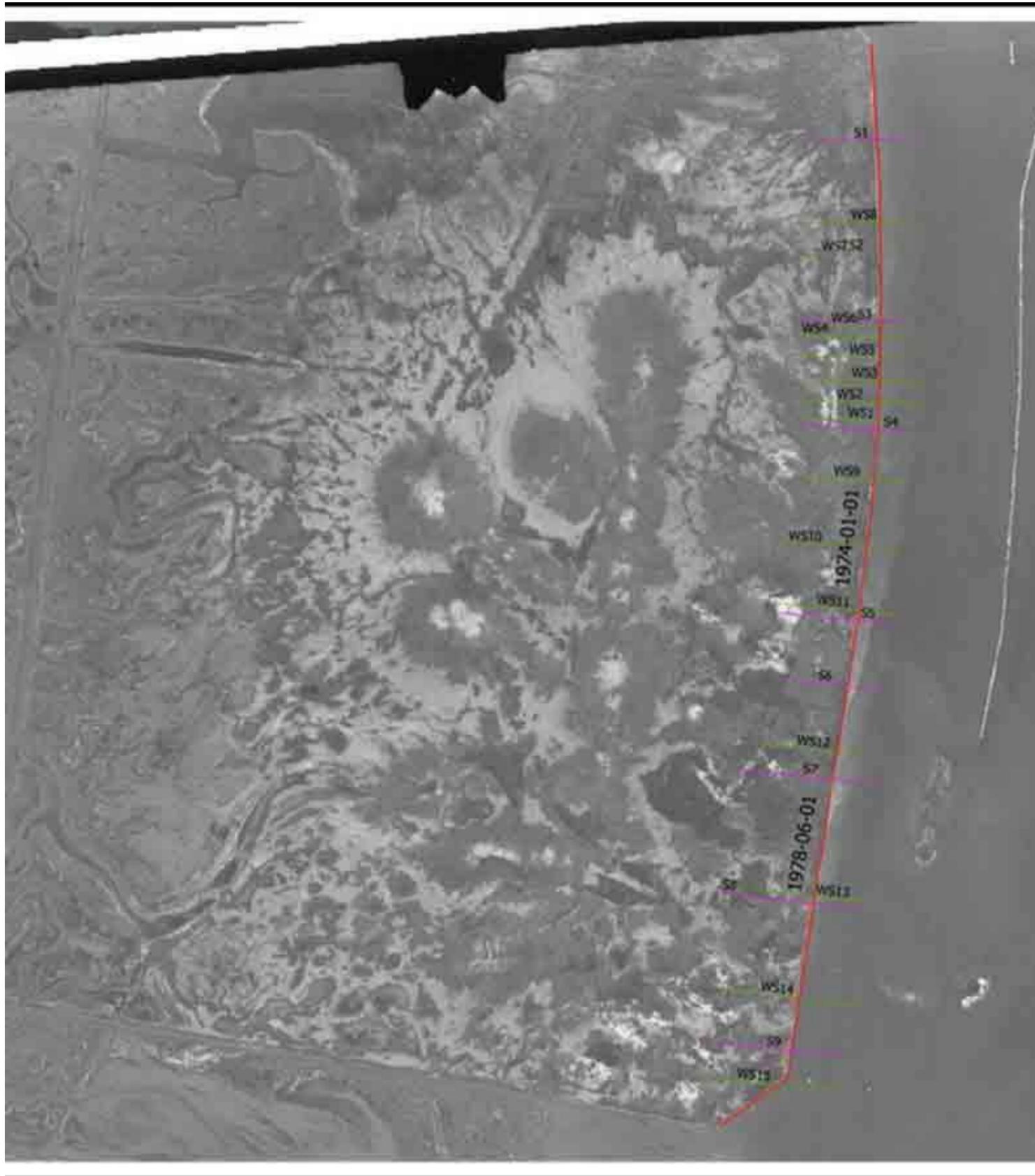


Figura 113. Fotografia aerea nell'anno 1978. Linea di riva nel 1974 e nel 1978, sezioni (S1-S9) e (WS1-WS15).

Tabella 3 Erosione nella linea di riva per le sezioni (S1-S9) nel periodo 1974-1978

Sezioni	Erosione linea di riva in metri
S1	3 m
S2	2 m
S3	1 m
S4	2 m
S5	10 m
S6	1 m
S7	1 m
S8	7 m
S9	16 m

Tabella 4. Erosione nella linea di riva per le sezioni (WS1-WS15) nel periodo 1974-1978.

WS	Erosione linea di riva in metri
WS8	2 m
WS7	2 m
WS6	1 m
WS4	1 m
WS5	1 m
WS3	2 m
WS2	2 m
WS1	2 m
WS9	0 m
WS10	1 m
WS11	1 m
WS12	0 m
WS13	2 m
WS14	11 m
WS15	3 m



Figura 114. Fotografia aerea nell'anno 1987. Linea di riva nel 1978 e nel 1987, sezioni (S1-S9) e (WS1-WS15).

Tabella 5. Erosione nella linea di riva per le sezioni (S1-S9) nel periodo 1978-1987.

Sezioni	Erosione linea di riva in metri
S1	34 m
S2	63 m
S3	81 m
S4	72 m
S5	52 m
S6	71 m
S7	82 m
S8	73 m
S9	59 m

Tabella 6. Erosione nella linea di riva per le sezioni (WS1-WS15) nel periodo 1978-1987.

WS	Erosione linea di riva in metri
WS8	40 m
WS7	63 m
WS6	83 m
WS4	86 m
WS5	85 m
WS3	80 m
WS2	75 m
WS1	70 m
WS9	72 m
WS10	73 m
WS11	65 m
WS12	84 m
WS13	78 m
WS14	77 m
WS15	17 m



Figura 115. Fotografia aerea nell'1994. Linea di riva nel 1987 e nel 1994, sezioni (S1-S9) e (WS1-WS15).

Tabella 7. Erosione nella linea di riva per le sezioni (S1-S9) nel periodo 1987-1994.

Sezioni	Erosione linea di riva in metri
S1	29 m
S2	11 m
S3	5 m
S4	2 m
S5	10 m
S6	2 m
S7	2 m
S8	/
S9	/

Tabella 8. Erosione nella linea di riva per le sezioni (WS1-WS15) nel periodo 1987-1994.

WS	Erosione linea di riva in metri
WS8	18 m
WS7	11 m
WS6	6 m
WS4	4 m
WS5	2 m
WS3	1 m
WS2	3 m
WS1	2 m
WS9	2 m
WS10	8 m
WS11	9 m
WS12	1 m
WS13	/
WS14	/
WS15	/



Figura 116. Fotografie aeree nell'anno 2004. Linea di riva nel 1994 e nel 2004, sezioni (S1-S9) e (WS1-WS15).

Tabella 9. Erosione nella linea di riva per le sezioni (S1-S7) nel periodo 1994-2004 e nel periodo 1987-2004 per le sezioni (S8-S9).

Sezioni	Erosione linea di riva in metri
S1	26 m
S2	28 m
S3	27 m
S4	16 m
S5	44 m
S6	27 m
S7	45 m
S8	47 m
S9	32 m

Tabella 10. Erosione nella linea di riva per le sezioni (WS1-WS12) nel periodo 1994-2004 e nel periodo 1987-2004 per le sezioni (WS13-WS15).

WS	Erosione linea di riva in metri
WS8	47 m
WS7	27 m
WS6	24 m
WS4	22 m
WS5	24 m
WS3	25 m
WS2	21 m
WS1	21 m
WS9	23 m
WS10	36 m
WS11	43 m
WS12	39 m
WS13	48 m
WS14	29 m
WS15	50 m



Figura 117. Fotografie aeree nell'anno 2005. Linea di riva nel 2004 e nel 2005, sezioni (S1-S9) e (WS1-WS15).

Tabella 11. Erosione nella linea di riva per le sezioni (S1-S9) nel periodo 2004-2005.

Sezioni	Erosione linea di riva in metri
S1	1 m
S2	1 m
S3	0 m
S4	3 m
S5	1 m
S6	2 m
S7	5 m
S8	1 m
S9	3 m

Tabella 12. Erosione nella linea di riva per le sezioni (WS1-WS15) nel periodo 2004-2005.

WS	Erosione linea di riva in metri
WS8	1 m
WS7	0 m
WS6	0 m
WS4	0 m
WS5	0 m
WS3	0 m
WS2	1 m
WS1	2 m
WS9	0 m
WS10	1 m
WS11	1 m
WS12	1 m
WS13	2 m
WS14	1 m
WS15	3 m



Figura 118. Immagine satellitare nell'anno 2009. Linea di riva nel 2005 e nel 2009, sezioni (S1-S9) e (WS1-WS15).

Tabella 13. Erosione nella linea di riva per le sezioni (S1-S9) nel periodo 2005-2009.

Sezioni	Erosione linea di riva in metri
S1	2 m
S2	1 m
S3	1 m
S4	1 m
S5	3 m
S6	1 m
S7	8 m
S8	11 m
S9	6 m

Tabella 14. Erosione nella linea di riva per le sezioni (WS1-WS15) nel periodo 2005-2009.

WS	Erosione linea di riva in metri
WS8	0 m
WS7	1 m
WS6	0 m
WS4	1 m
WS5	1 m
WS3	2 m
WS2	1 m
WS1	1 m
WS9	0 m
WS10	1 m
WS11	4 m
WS12	4 m
WS13	8 m
WS14	4 m
WS15	7 m



Figura 119. Fotografia aerea nell'anno 2010. Linea di riva nel 2009 e nel 2010, sezioni (S1-S9) e (WS1-WS15).

Tabella 15. Erosione nella linea di riva per le sezioni (S1-S9) nel periodo 2009-2010.

Sezioni	Erosione linea di riva in metri
S1	4 m
S2	5 m
S3	7 m
S4	12 m
S5	9 m
S6	1 m
S7	22 m
S8	10 m
S9	6 m

Tabella 16. Erosione nella linea di riva per le sezioni WS (WS1-WS15) nel periodo 2009-2010.

WS	Erosione linea di riva in metri
WS8	1 m
WS7	5 m
WS6	6 m
WS4	5 m
WS5	13 m
WS3	13 m
WS2	16 m
WS1	13 m
WS9	6 m
WS10	5 m
WS11	8 m
WS12	20 m
WS13	13 m
WS14	13 m
WS15	8 m

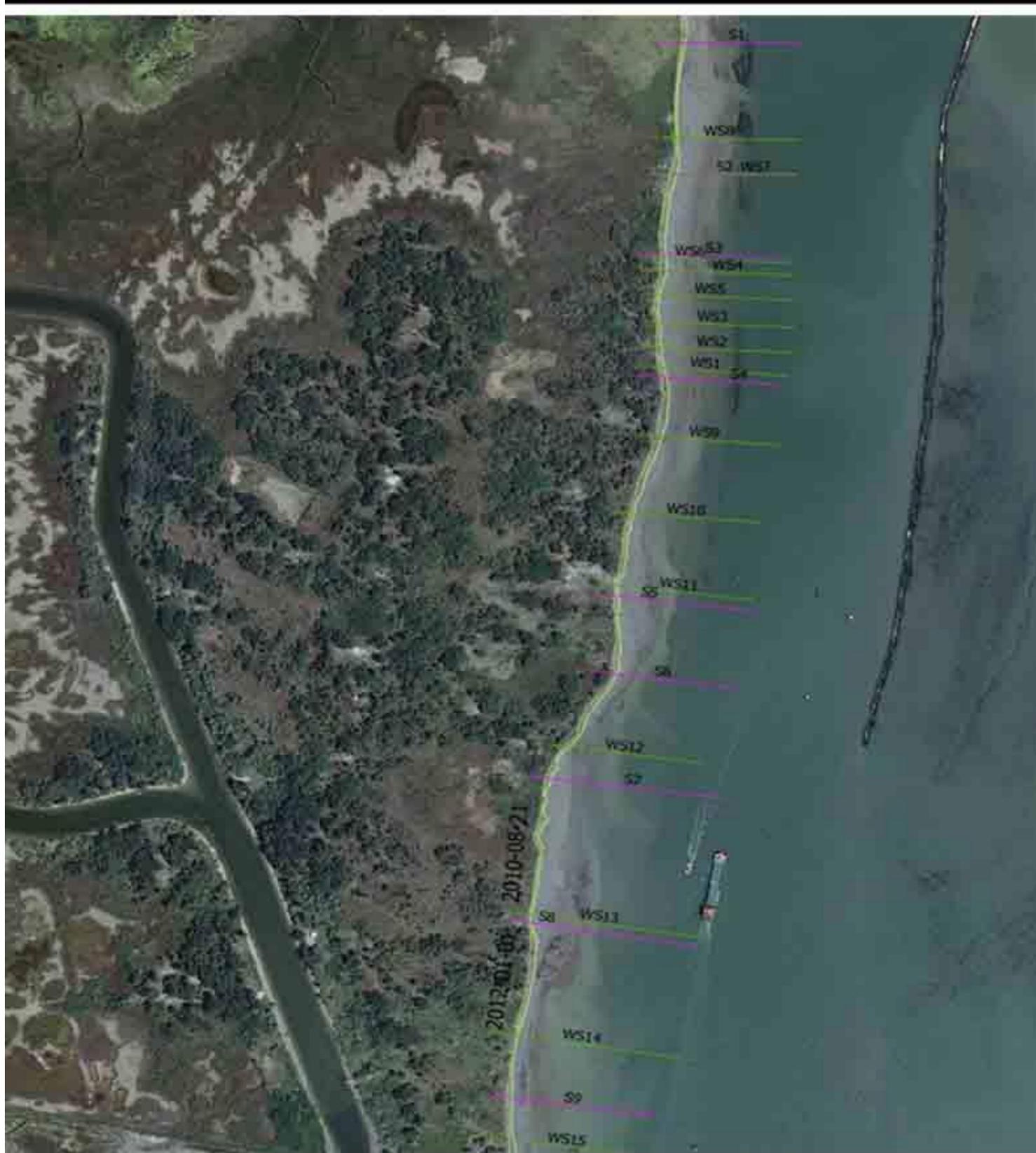


Figura 120. Immagine satellitare nell'anno 2012. Linea di riva nel 2010 e nel 2012, sezioni (S1-S9) e (WS1-WS15).

Tabella 17. Erosione nella linea di riva per le sezioni (S1-S9) nel periodo 2010-2012.

Sezioni	Erosione linea di riva in metri
S1	6 m
S2	9 m
S3	7 m
S4	9 m
S5	6 m
S6	5 m
S7	9 m
S8	3 m
S9	7 m

Tabella 18. Erosione nella linea di riva per le sezioni (WS1-WS15) nel periodo 2010-2012.

WS	Erosione linea di riva in metri
WS8	4 m
WS7	9 m
WS6	8 m
WS4	9 m
WS5	4 m
WS3	4 m
WS2	7 m
WS1	9 m
WS9	7 m
WS10	7 m
WS11	5 m
WS12	7 m
WS13	2 m
WS14	1 m
WS15	8 m



Figura 121. Immagine satellitare nell'anno 2014. Linea di riva nel 2012e nel 2014, sezioni (S1-S9) e (WS1-WS15).

Tabella 19. Erosione nella linea di riva per le sezioni (S1-S9) nel periodo 2012-2014.

Sezioni	Erosione linea di riva in metri
S1	4 m
S2	14 m
S3	6 m
S4	5 m
S5	2 m
S6	1 m
S7	0 m
S8	2 m
S9	5 m

Tabella 20. Erosione nella linea di riva per le sezioni (WS1-WS15) nel periodo 2012-2014.

WS	Erosione linea di riva in metri
WS8	1 m
WS7	14 m
WS6	8 m
WS4	7 m
WS5	3 m
WS3	7 m
WS2	6 m
WS1	7 m
WS9	4 m
WS10	8 m
WS11	3 m
WS12	7 m
WS13	2 m
WS14	7 m
WS15	11 m

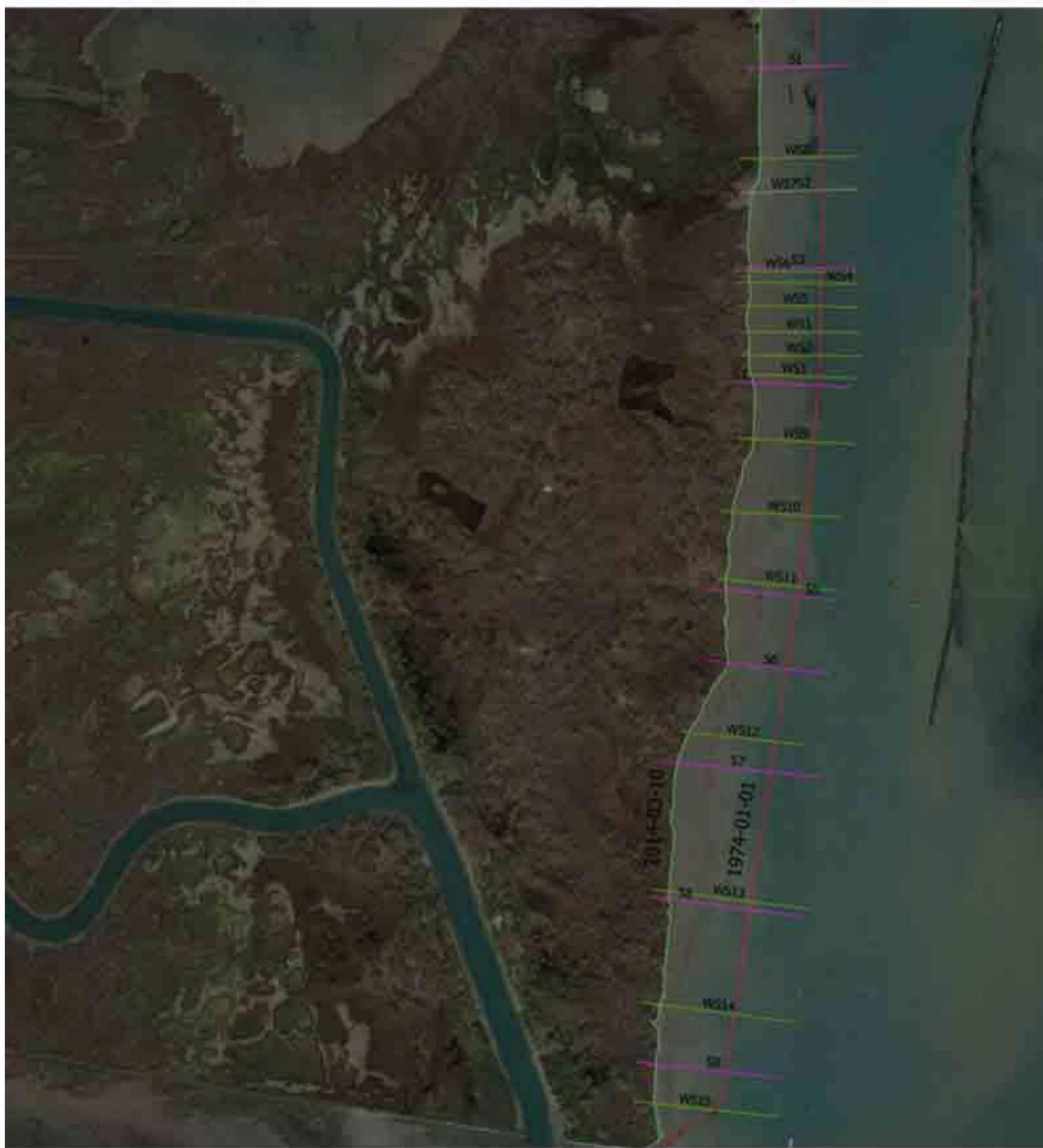


Figura 122. Immagine satellitare nell'anno 2014. Linea di riva nel 1974 e nel 2014, sezioni (S1-S9) e (WS1-WS15).

Tabella 21. Erosione totale nella linea di riva per le sezioni (S1-S9) nel periodo 1974-2014.

Sezioni	Erosione linea di riva in metri
S1	109 m
S2	134 m
S3	135 m
S4	122 m
S5	137 m
S6	111 m
S7	174 m
S8	154 m
S9	134 m

Tabella 22. Erosione totale nella linea di riva per le sezioni (WS1-WS15) nel periodo 1974-2014.

WS	Erosione linea di riva in metri
WS8	114 m
WS7	132 m
WS6	136 m
WS4	135 m
WS5	133 m
WS3	134 m
WS2	132 m
WS1	127 m
WS9	114 m
WS10	140 m
WS11	139 m
WS12	163 m
WS13	155 m
WS14	143 m
WS15	107 m

12.3 Allegato 3: Schede campo durante i 10 mesi di campionamento.

	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arsenale - Tesa 104 Castello 2737f - 30122 Venezia, Italy Tel +39 041 2407927 Fax +39 041 2407940 direttore@ismar.ansp.it C.F. 80054330566 - P.IVA 02116311006</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione: fotografia del 23 settembre 2014</p>			<p>COORDINATE</p>
			<p>WGS 84</p> <p>φ Lat.45.3964070185535 Δ Long.12.2577135176137</p> <p>Waypoint 7414</p> <p>Punto di riferimento 1</p>
<p>Inquadratura territoriale</p>			<p>Area studio: 16 luglio 2014</p>
			
<p>Data 1° rilievo:</p>	<p>17/04/2014</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>3.13</p>
<p>Data 2° rilievo:</p>	<p>13/05/2014</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>3.13</p>
<p>Data 3° rilievo:</p>	<p>16/06/2014</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>3.04</p>
<p>Data 4° rilievo:</p>	<p>16/07/2014</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>2.77</p>
<p>Data 5° rilievo:</p>	<p>23/09/2014</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>1.59</p>
<p>Data 6° rilievo:</p>	<p>04/11/2014</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>1.19</p>
<p>Data 7° rilievo:</p>	<p>16/01/2015</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>0.47</p>

Figura 123. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 1.

	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arsenale - Terra 104 Castello 2737/7 - 30122 Venezia, Italy Tel +39 041 2407927 Fax +39 041 2407940 direttore@ismar.cnr.it C.F. 50054330596 - P.IVA 02118311000</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione: fotografia del 16 gennaio 2015</p>			<p>COORDINATE</p>
			<p>WGS 84</p> <p>ϕ Lat. 45.3974335140131</p> <p>Δ Long. 12.257555871316</p> <p>Waypoint 7416</p> <p>Punto di riferimento 3</p>
<p>Inquadramento territoriale</p>			<p>Area studio: 4 novembre 2014</p>
			
<p>Data 1° rilievo:</p>	<p>17/04/2014</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>3.75</p>
<p>Data 2° rilievo:</p>	<p>13/05/2014</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>3.75</p>
<p>Data 3° rilievo:</p>	<p>16/06/2014</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>3.56</p>
<p>Data 4° rilievo:</p>	<p>16/07/2014</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>3.01</p>
<p>Data 5° rilievo:</p>	<p>23/09/2014</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>2.54</p>
<p>Data 6° rilievo:</p>	<p>04/11/2014</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>2.40</p>
<p>Data 7° rilievo:</p>	<p>16/01/2015</p>	<p>Misura in metri:</p>	<p>0.90</p>

Figura 124. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 3.

	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arsenalé - Testa 104 Castello 2737/f - 30122 Venezia, Italy Tel: +39 041 2407827 Fax: +39 041 2407940 direttore@ismar.cnr.it C.F. 89094330546 - P.IVA 02116311005</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione: fotografia del 4 novembre 2014</p>		<p>COORDINATE</p>	
 <p style="text-align: right;">A</p>		<p>WGS 84</p> <p>ϕ Lat. 45.3982754100545 Δ Long. 12.2573541028043</p> <p>Waypoint 7417</p> <p>Punto di riferimento 4</p>	
<p>Inquadratura territoriale</p>		<p>Area studio: 13 maggio 2014</p>	
		 <p style="text-align: right;">B</p>	
<p>Data 1° rilievo:</p>	<p>17/04/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>3.50</p>
<p>Data 2° rilievo:</p>	<p>13/05/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>3.50</p>
<p>Data 3° rilievo:</p>	<p>16/06/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>3.45</p>
<p>Data 4° rilievo:</p>	<p>16/07/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>3.40</p>
<p>Data 5° rilievo:</p>	<p>23/09/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.62</p>
<p>Data 6° rilievo:</p>	<p>04/11/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.60</p>
<p>Data 7° rilievo:</p>	<p>16/01/2015</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>

Figura 125. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 4.

	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arenale - Testa 104 Castello 2737/f - 30122 Venezia, Italy Tel: +39 041 2407927 Fax: +39 041 2407940 direttore@ismar.cnr.it C.F. 89094330566 - P.IVA 02116311005</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione: fotografia del 4 novembre 2014</p>		<p>COORDINATE</p>	
		<p>WGS 84</p>	
		<p>ϕ Lat. 45.3980267584076 Δ Long. 12.2590376527676</p>	
		<p>Waypoint 7419</p>	
		<p>Punto di riferimento 5</p>	
<p>Inquadratura territoriale</p>		<p>Area studio: 16 giugno 2014</p>	
			
<p>Data 1° rilievo:</p>	<p>17/04/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>3.03</p>
<p>Data 2° rilievo:</p>	<p>13/05/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>3.03</p>
<p>Data 3° rilievo:</p>	<p>16/06/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.80</p>
<p>Data 4° rilievo:</p>	<p>16/07/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.78</p>
<p>Data 5° rilievo:</p>	<p>23/09/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.31</p>
<p>Data 6° rilievo:</p>	<p>04/11/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.25</p>
<p>Data 7° rilievo:</p>	<p>16/01/2015</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.55</p>

Figura 126. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 5.

	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arenale - Testa 104 Castello 2737/f - 30122 Venezia, Italy Tel: +39 041 2407827 Fax: +39 041 2407940 direttore@ismar.cnr.it C.F. 89094330566 - P.IVA 02116311005</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione: fotografia del 4 novembre 2014</p>		<p>COORDINATE</p>	
 <p style="text-align: right;">A</p>		<p>WGS 84</p>	
		<p>ϕ Lat. 45.3989132396037 Δ Long. 12.2583652925953</p>	
		<p>Waypoint 7418</p>	
		<p>Punto di riferimento 6</p>	
<p>Inquadratura territoriale</p>		<p>Area studio: 16 gennaio 2015</p>	
		 <p style="text-align: right;">B</p>	
<p>Data 1° rilievo:</p>	<p>17/04/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>4.40</p>
<p>Data 2° rilievo:</p>	<p>13/05/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>4.37</p>
<p>Data 3° rilievo:</p>	<p>16/06/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>4.36</p>
<p>Data 4° rilievo:</p>	<p>16/07/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>4.36</p>
<p>Data 5° rilievo:</p>	<p>23/09/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>4.23</p>
<p>Data 6° rilievo:</p>	<p>04/11/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>4.23</p>
<p>Data 7° rilievo:</p>	<p>16/01/2015</p>	<p>Misura:</p>	<p>3.32</p>

Figura 127. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 6.

	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arsenalé - Tesa 104 Castello 2737/f - 30122 Venezia, Italy Tel: +39 042 2407927 Fax: +39 042 2407940 direttore@ismar.cnr.it C.F. 80034330586 - P.IVA 02115311009</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione: fotografia del 16 luglio 2014</p>		<p>COORDINATE</p>	
		<p>WGS 84 ϕ Lat. 45.3997754176095 Δ Long. 12.2579270481672</p> <p>Waypoint 7420</p> <p>Punti di riferimento 7</p>	
<p>Inquadramento territoriale</p>		<p>Area studio: 4 novembre 2014</p>	
			
<p>Data 1° rilievo:</p>	<p>17/04/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>3.02</p>
<p>Data 2° rilievo:</p>	<p>13/05/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>3.00</p>
<p>Data 3° rilievo:</p>	<p>16/06/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.89</p>
<p>Data 4° rilievo:</p>	<p>16/07/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.51</p>
<p>Data 5° rilievo:</p>	<p>23/09/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.31</p>
<p>Data 6° rilievo:</p>	<p>04/11/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.12</p>
<p>Data 7° rilievo:</p>	<p>16/01/2015</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>

Figura 128. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 7.

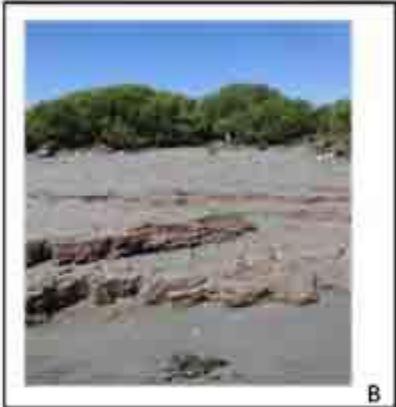
	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arsenale - Testa 104 Castello 2737/f - 30122 Venezia, Italy Tel: +39 042 2407927 Fax: +39 042 2407940 direttore@ismar.cnr.it C.F. 89034330586 - P.IVA 02115311009</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione: fotografia del 16 luglio 2014</p>		<p>COORDINATE</p>	
		<p>WGS 84 ϕ Lat. 45.4007932345051 Δ Long. 12.2593917685117</p>	
		<p>Waypoint 7421</p>	
		<p>Control Point</p>	
		<p>8</p>	
<p>Inquadramento territoriale</p>		<p>Area studio: 16 luglio 2014</p>	
			
<p>Data 1° rilievo:</p>	<p>17/04/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.98</p>
<p>Data 2° rilievo:</p>	<p>13/05/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.86</p>
<p>Data 3° rilievo:</p>	<p>16/06/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.85</p>
<p>Data 4° rilievo:</p>	<p>16/07/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.80</p>
<p>Data 5° rilievo:</p>	<p>23/09/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.78</p>
<p>Data 6° rilievo:</p>	<p>04/11/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.77</p>
<p>Data 7° rilievo:</p>	<p>16/01/2015</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>

Figura 129. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 8.

	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arsenalé - Testa 104 Castello 2737/f - 30122 Venezia, Italy Tel: +39 041 2407927 Fax: +39 041 2407940 direttore@ismar.cnr.it C.F. 89094330666 - P.IVA 02116311005</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione: fotografia del 4 novembre 2014</p>		<p>COORDINATE</p>	
		<p>WGS 84</p>	
		<p>ϕ Lat. 45.3959550427 Δ Long. 12.2588472</p>	
		<p>Waypoint 7454</p>	
		<p>Punto di riferimento 9</p>	
<p>Inquadramento territoriale</p>		<p>Area studio: 16 luglio 2014</p>	
			
<p>Data 1° rilievo: 17/04/2014</p>	<p>Misura: 0.00</p>		
<p>Data 2° rilievo: 13/05/2014</p>	<p>Misura: 3.00</p>		
<p>Data 3° rilievo: 16/06/2014</p>	<p>Misura: 3.00</p>		
<p>Data 4° rilievo: 16/07/2014</p>	<p>Misura: 2.96</p>		
<p>Data 5° rilievo: 23/09/2014</p>	<p>Misura: 2.55</p>		
<p>Data 6° rilievo: 04/11/2014</p>	<p>Misura: 2.46</p>		
<p>Data 7° rilievo: 16/01/2015</p>	<p>Misura: 1.45</p>		

Figura 130. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 9.

	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arsenalé - Testa 104 Castello 2737/f - 30122 Venezia, Italy Tel: +39 041 2407827 Fax: +39 041 2407940 direttore@ismar.cnr.it C.F. 89094330666 - P.IVA 02116311005</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione: fotografia del 16 luglio 2014</p>			<p>COORDINATE</p>
			<p>WGS 84</p> <p>ϕ Lat. 45.39473482</p> <p>Δ Long. 12.25838073</p> <hr/> <p>Waypoint</p> <p>7455</p> <hr/> <p>Punto di riferimento</p> <p>10</p>
<p>Inquadramento territoriale</p>			<p>Area studio: 13 maggio 2014</p>
			
<p>Data 1° rilievo:</p>	<p>17/04/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>
<p>Data 2° rilievo:</p>	<p>13/05/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.26</p>
<p>Data 3° rilievo:</p>	<p>16/06/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.15</p>
<p>Data 4° rilievo:</p>	<p>16/07/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.09</p>
<p>Data 5° rilievo:</p>	<p>23/09/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.87</p>
<p>Data 6° rilievo:</p>	<p>04/11/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.69</p>
<p>Data 7° rilievo:</p>	<p>16/01/2015</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>

Figura 131. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 10.

	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arsenalé - Testa 104 Castello 2737/f - 30122 Venezia, Italy Tel: +39 041 2407927 Fax: +39 041 2407940 direttore@ismar.cnr.it C.F. 89094330666 - P.IVA 02116311005</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione: fotografia del 16 luglio 2014</p>			<p>COORDINATE</p>
			<p>WGS 84</p> <p>ϕ Lat. 45.393575891223</p> <p>Δ Long. 12.2581469563098</p> <p>Waypoint</p> <p>7456</p> <p>Punto di riferimento</p> <p>11</p>
<p>Inquadramento territoriale</p>			<p>Area studio: 4 novembre 2014</p>
			
<p>Data 1° rilievo:</p>	<p>17/04/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>
<p>Data 2° rilievo:</p>	<p>13/05/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.14</p>
<p>Data 3° rilievo:</p>	<p>16/06/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.10</p>
<p>Data 4° rilievo:</p>	<p>16/07/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.71</p>
<p>Data 5° rilievo:</p>	<p>23/09/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.71</p>
<p>Data 6° rilievo:</p>	<p>04/11/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.43</p>
<p>Data 7° rilievo:</p>	<p>16/01/2015</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.32</p>

Figura 132. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 11.

	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arsenalé - Testa 104 Castello 2737/f - 30122 Venezia, Italy Tel: +39 041 2407827 Fax: +39 041 2407940 direttore@ismar.cnr.it C.F. 89094330566 - P.IVA 02116311005</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione</p>		<p>COORDINATE</p>	
		<p>WGS 84</p>	
		<p>ϕ Lat. 45.39104717 Δ Long. 12.25736254</p>	
		<p>Waypoint 7457</p>	
		<p>Punto di riferimento 12</p>	
<p>Inquadratura territoriale</p>		<p>Area studio: 16 luglio 2014</p>	
			
<p>Data 1° rilievo:</p>	<p>17/04/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>
<p>Data 2° rilievo:</p>	<p>13/05/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.31</p>
<p>Data 3° rilievo:</p>	<p>16/06/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.00</p>
<p>Data 4° rilievo:</p>	<p>16/07/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.00</p>
<p>Data 5° rilievo:</p>	<p>23/09/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.00</p>
<p>Data 6° rilievo:</p>	<p>04/11/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.00</p>
<p>Data 7° rilievo:</p>	<p>16/01/2015</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.35</p>

Figura 133. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 12.

	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arsenalé - Testa 104 Castello 2737/f - 30122 Venezia, Italy Tel: +39 041 2407827 Fax: +39 041 2407940 direttore@ismar.cnr.it C.F. 89094330566 - P.IVA 02116311005</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione: 23 settembre 2014</p>		<p>COORDINATE</p>	
		<p>WGS 84</p>	
		<p>ϕ Lat. 45.388290810162</p>	
		<p>Δ Long. 12.2567509901747</p>	
		<p>Waypoint 7458</p>	
<p>Punto di riferimento</p>		<p>13</p>	
<p>Inquadratura territoriale</p>		<p>Area studio: 4 novembre 2014</p>	
			
<p>Data 1° rilievo:</p>	<p>17/04/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>
<p>Data 2° rilievo:</p>	<p>13/05/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.89</p>
<p>Data 3° rilievo:</p>	<p>16/06/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.87</p>
<p>Data 4° rilievo:</p>	<p>16/07/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.87</p>
<p>Data 5° rilievo:</p>	<p>23/09/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.09</p>
<p>Data 6° rilievo:</p>	<p>04/11/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.09</p>
<p>Data 7° rilievo:</p>	<p>16/01/2015</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>

Figura 134. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 13.

	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arsenalé - Testa 104 Castello 2737/f - 30122 Venezia, Italy Tel: +39 041 2407927 Fax: +39 041 2407940 direttore@ismar.cnr.it C.F. 89094330566 - P.IVA 02116311005</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione: fotografia del 16 giugno</p>			<p>COORDINATE</p>
			<p>WGS 84</p> <p>ϕ Lat. 45.3864406065515</p> <p>Δ Long. 12.2565422807005</p> <p>Waypoint</p> <p>7459</p> <p>Punto di riferimento</p> <p>14</p>
<p>Inquadramento territoriale</p>			<p>Area studio: 16 gennaio 2015</p>
			
<p>Data 1° rilievo:</p>	<p>17/04/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>
<p>Data 2° rilievo:</p>	<p>13/05/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.60</p>
<p>Data 3° rilievo:</p>	<p>16/06/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.53</p>
<p>Data 4° rilievo:</p>	<p>16/07/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>
<p>Data 5° rilievo:</p>	<p>23/09/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>
<p>Data 6° rilievo:</p>	<p>04/11/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>
<p>Data 7° rilievo:</p>	<p>16/01/2015</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>

Figura 135. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 14.

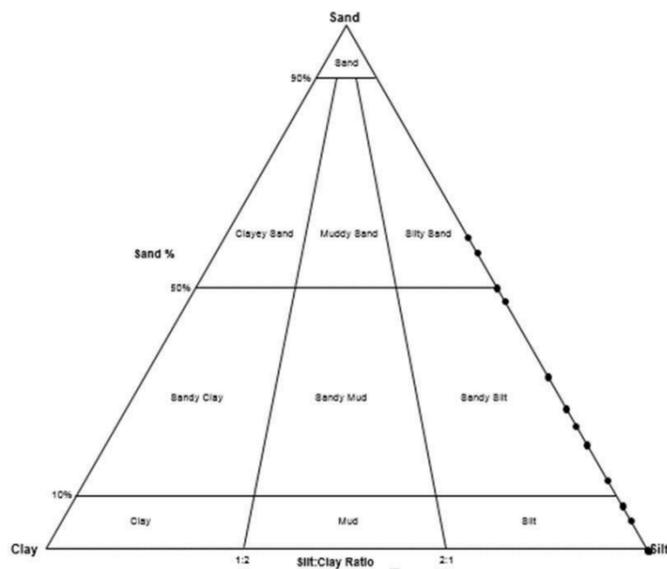
	<p>Consiglio Nazionale delle Ricerche ISMAR - Istituto di Scienze Marine Arenale - Testa 104 Castello 2737/f - 30122 Venezia, Italy Tel: +39 041 2407927 Fax: +39 041 2407940 direttore@ismar.cnr.it C.F. 89094330566 - P.IVA 02116311005</p>		<p>PROGETTO: Effetti morfologici del traffico navale nelle aree lagunari prossime al canale Malamocco-Marghera</p>
<p>Località: La cassa di colmata B, a Sud di Fusina</p>			
<p>Sito di misurazione: fotografia del 16 luglio 2014</p>			<p>COORDINATE</p>
			<p>WGS 84</p> <p>ϕ Lat. 45.384679386908</p> <p>Δ Long. 12.2566161172208</p> <p>Waypoint</p> <p>7460</p> <p>Punto di riferimento</p> <p>15</p>
<p>Inquadratura territoriale</p>			<p>Area studio: 16 luglio 2014</p>
			
<p>Data 1° rilievo:</p>	<p>17/04/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>
<p>Data 2° rilievo:</p>	<p>13/05/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>2.00</p>
<p>Data 3° rilievo:</p>	<p>16/06/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.96</p>
<p>Data 4° rilievo:</p>	<p>16/07/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>1.96</p>
<p>Data 5° rilievo:</p>	<p>23/09/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.78</p>
<p>Data 6° rilievo:</p>	<p>04/11/2014</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.76</p>
<p>Data 7° rilievo:</p>	<p>16/01/2015</p>	<p>Misura:</p>	<p>0.00</p>

Figura 136. Scheda campo relativa al punto di riferimento numero 15.

12.4 Allegato 4: Risultati del programma GRADISTAT. Statistiche usate riguardanti le analisi granulometriche effettuate sui campioni raccolti nel profilo della cassa di colmata B, il 23 settembre 2014.

		7wpt_3Base_230914	7wpt_2Intermedio_230914	7wpt_1_Top_230914	8wpt_4_Top_230914	3wpt_5 suolo sup bosco_230914	3wpt_6 Base_230914	9wpt_7 globo fango_230914
	SAMPLE TYPE:	Trimodal, Poorly Sorted	Bimodal, Poorly Sorted	Bimodal, Poorly Sorted	Trimodal, Poorly Sorted	Bimodal, Poorly Sorted	Polymodal, Poorly Sorted	Unimodal, Moderately Well Sorted
	TEXTURAL GROUP:	Sandy Mud	Mud	Sandy Mud	Muddy Sand	Muddy Sand	Sandy Mud	Mud
METHOD OF	MEAN (\bar{x}_p):	29,60	20,86	26,46	61,75	58,86	46,06	14,85
MOMENTS	SORTING (σ_g):	2,848	2,106	2,522	3,230	3,093	3,301	1,598
Geometric (mm)	SKEWNESS (Sk_g):	0,019	0,574	0,365	-1,190	-1,144	-0,603	0,688
	KURTOSIS (K_g):	2,407	3,101	2,339	4,834	4,927	3,107	4,700
FOLK AND	MEAN: (\bar{x}_p):	Coarse Silt	Coarse Silt	Coarse Silt	Very Fine Sand	Very Fine Sand	Very Coarse Silt	Medium Silt
WARD METHOD	SORTING:	Poorly Sorted	Poorly Sorted	Poorly Sorted	Poorly Sorted	Poorly Sorted	Poorly Sorted	Moderately Well Sorted
(Description)	SKEWNESS:	Symmetrical	Coarse Skewed	Coarse Skewed	Fine Skewed	Fine Skewed	Fine Skewed	Coarse Skewed
	MODE 1 (mm):	9,985	16,45	13,95	120,0	86,00	141,5	13,95
	MODE 2 (mm):	37,60	31,85	37,60	37,60	16,45	16,45	
	MODE 3 (mm):	61,80			16,45		37,60	
	% GRAVEL:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% SAND:	27,8%	9,0%	20,8%	61,0%	57,9%	48,6%	0,6%
	% MUD:	72,2%	91,0%	79,2%	39,0%	42,1%	51,4%	99,4%
	% V COARSE GRAVEL:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% COARSE GRAVEL:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% MEDIUM GRAVEL:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% FINE GRAVEL:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% V FINE GRAVEL:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% V COARSE SAND:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% COARSE SAND:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% MEDIUM SAND:	1,9%	0,2%	0,6%	9,3%	8,0%	6,1%	0,0%
	% FINE SAND:	7,4%	1,5%	5,8%	23,8%	20,7%	19,7%	0,2%
	% V FINE SAND:	18,5%	7,2%	14,4%	27,8%	29,2%	22,8%	0,4%
	% V COARSE SILT:	21,2%	20,0%	20,5%	17,0%	19,6%	16,2%	6,1%
	% COARSE SILT:	19,2%	29,6%	23,0%	11,9%	12,5%	15,6%	35,2%
	% MEDIUM SILT:	21,9%	35,4%	29,3%	7,8%	7,6%	15,1%	51,3%
	% FINE SILT:	9,7%	6,0%	6,5%	2,2%	2,3%	4,3%	6,8%
	% V FINE SILT:	0,2%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,3%	0,0%
	% CLAY:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

		9wpt_8_Matrice_top_argilla_230914	9wpt_9-Base_sabbia_230914	11wpt_10_Base_scarpata_230914	11wpt_11_top_scarpata_230914	11wpt_12_globo_argilla_230914	12wpt_13_Matrice_argilla_230914	12wpt_14_sabbia_base_230914
	SAMPLE TYPE:	Unimodal, Poorly Sorted	Trimodal, Poorly Sorted	Trimodal, Poorly Sorted	Unimodal, Moderately Sorted	Unimodal, Moderately Well Sorted	Unimodal, Moderately Well Sorted	Bimodal, Poorly Sorted
	TEXTURAL GROUP:	Sandy Mud	Sandy Mud	Sandy Mud	Mud	Mud	Mud	Muddy Sand
METHOD OF	MEAN (\bar{x}_g):	23,11	27,39	39,16	18,53	16,85	15,75	51,55
MOMENTS	SORTING (σ_g):	2,391	2,711	2,653	1,861	1,439	1,447	2,635
Geometric (mm)	SKEWNESS (S_k^g):	0,474	0,177	-0,328	1,563	0,162	0,585	-0,826
	KURTOSIS (K_g):	3,003	2,096	3,123	6,025	4,657	6,580	3,659
FOLK AND	MEAN: (\bar{x}_g):	Coarse Silt	Coarse Silt	Very Coarse Silt	Coarse Silt	Coarse Silt	Coarse Silt	Very Coarse Silt
WARD METHOD	SORTING:	Poorly Sorted	Poorly Sorted	Poorly Sorted	Moderately Sorted	Moderately Well Sorted	Moderately Well Sorted	Poorly Sorted
(Description)	SKEWNESS:	Coarse Skewed	Symmetrical	Symmetrical	Very Coarse Skewed	Symmetrical	Symmetrical	Fine Skewed
	MODE 1 (mm):	16,45	9,985	37,60	16,45	16,45	16,45	86,00
	MODE 2 (mm):		37,60	61,80				16,45
	MODE 3 (mm):		61,80	16,45				
	% GRAVEL:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% SAND:	13,9%	24,5%	34,0%	6,0%	0,2%	0,1%	51,1%
	% MUD:	86,1%	75,5%	66,0%	94,0%	99,8%	99,9%	48,9%
	% V COARSE GRAVEL:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% COARSE GRAVEL:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% MEDIUM GRAVEL:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% FINE GRAVEL:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% V FINE GRAVEL:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% V COARSE SAND:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% COARSE SAND:	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	% MEDIUM SAND:	0,7%	0,6%	2,2%	0,1%	0,0%	0,0%	2,3%
	% FINE SAND:	4,2%	7,0%	10,7%	2,4%	10,7%	0,1%	14,0%
	% V FINE SAND:	9,0%	16,9%	21,1%	3,5%	0,2%	0,0%	34,8%
	% V COARSE SILT:	20,0%	20,2%	27,9%	8,3%	5,1%	3,7%	23,6%
	% COARSE SILT:	29,4%	20,3%	19,6%	39,9%	52,5%	45,9%	11,3%
	% MEDIUM SILT:	27,8%	24,6%	14,2%	43,4%	40,5%	47,6%	10,1%
	% FINE SILT:	8,7%	10,2%	4,3%	2,4%	1,4%	2,6%	3,8%
	% V FINE SILT:	0,2%	0,2%	0,1%	0,0%	0,2%	0,0%	0,1%



12.5 Allegato 5: Metodo per il calcolo della quantità di sedimento eroso.

Allo scopo di calcolare la quantità di materiale eroso da una sezione della cassa di colmata B è necessario conoscere la profondità dell'argine, la cui parte emersa ha un'altezza nota di 2,00 metri. A questo valore è stata sommata la profondità stimata dell'arginatura della cassa di colmata B ottenuta dal coefficiente angolare del profilo di una sezione trasversale del canale Malamocco-Marghera effettuata nel 2014. Si assume, in prima approssimazione, che il profilo batimetrico del transetto rilevato nel 2014 si possa estendere all'intera area studiata. Pertanto si è moltiplicato la variazione del profilo batimetrico per il coefficiente angolare dello stesso, come si può vedere in Figura 36. Si è stimato che l'argine era profondo 2,5 metri e dunque la sua lunghezza totale era approssimativamente di 4,5 metri. Grazie a questo dato si è approssimata la sezione della zona erosa ad un trapezio, avente come basi l'argine e il profilo attuale della sponda, e come lati obliqui il prolungamento del profilo batimetrico e la retta che congiunge la sponda alla cima dell'argine (Figura 36).

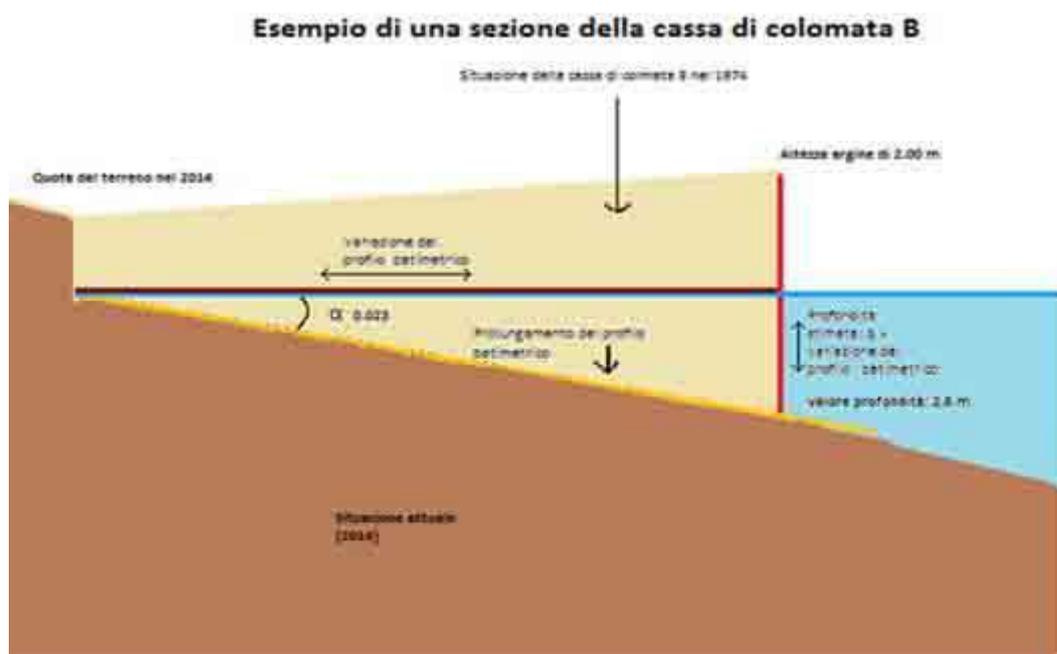


Figura 137. Disegno della sezione della cassa di colmata B con prolungamento del profilo batimetrico per l'individuazione della profondità dell'argine.

Per approssimare il volume della quantità di materiale eroso, si è suddivisa la zona considerata in 14 blocchi, prendendo le opportune misurazioni per calcolare l'area della sezione (Figura 36) in

ciascuno dei 15 punti di riferimento (WS) (altezza del profilo di sponda, distanza tra la linea di riva attuale e la linea di riva del 1974). In Tabella 21 sono riportati i valori utilizzati.

	WS8	WS7	WS6	WS4	WS5	WS3	WS2	WS1	WS9	WS10	WS11	WS12	WS13	WS14	WS15	
Valori di quota in metri	1.24	0.46	0.51	0.56	0.49	0.48	0.55	0.55	0.51	0.94	1.34	1.26	1.17	1.04	3.28	
Distanza dal punto precedente in metri		0	69	147	22	44	49	44	37	121	140	127	304	301	211	185
Distanza dalla linea di riva in metri		114	132	136	135	133	134	132	128	114	140	139	163	155	143	107
Area sezione in metri quadrati		327.18	327.36	340.68	341.55	331.835	333.66	333.3	323.2	285.67	380.8	405.88	469.44	439.425	396.11	416.23
Area media di ogni sezione in metri quadrati		0	327.27	334.02	341.115	3.366.925	3.327.475	333.48	328.25	304.385	333.185	393.34	473.66	4.544.325	4.177.675	406.17

Essendo note le distanze tra le coppie di WS si è stimato il volume di ciascuna dei 14 blocchi moltiplicando la distanza tra due i due WS che la delimitano per il valor medio delle aree delle sezioni stimate negli stessi.

	WS8	WS7	WS6	WS4	WS5	WS3	WS2	WS1	WS9	WS10	WS11	WS12	WS13	WS14	WS15	
Volumedi ogni blocco in metri cubi		0	225 81.63	491 00.94	750 4.53	148 14.47	163 04.63	146 73.12	121 45.25	368 30.59	466 45.9	499 54.18	133 048.6	136 784.2	881 48.94	751 41.45

In Figura 37 si riportano i disegni di quattro blocchi e due sezioni come esemplificazione per i calcoli effettuati.

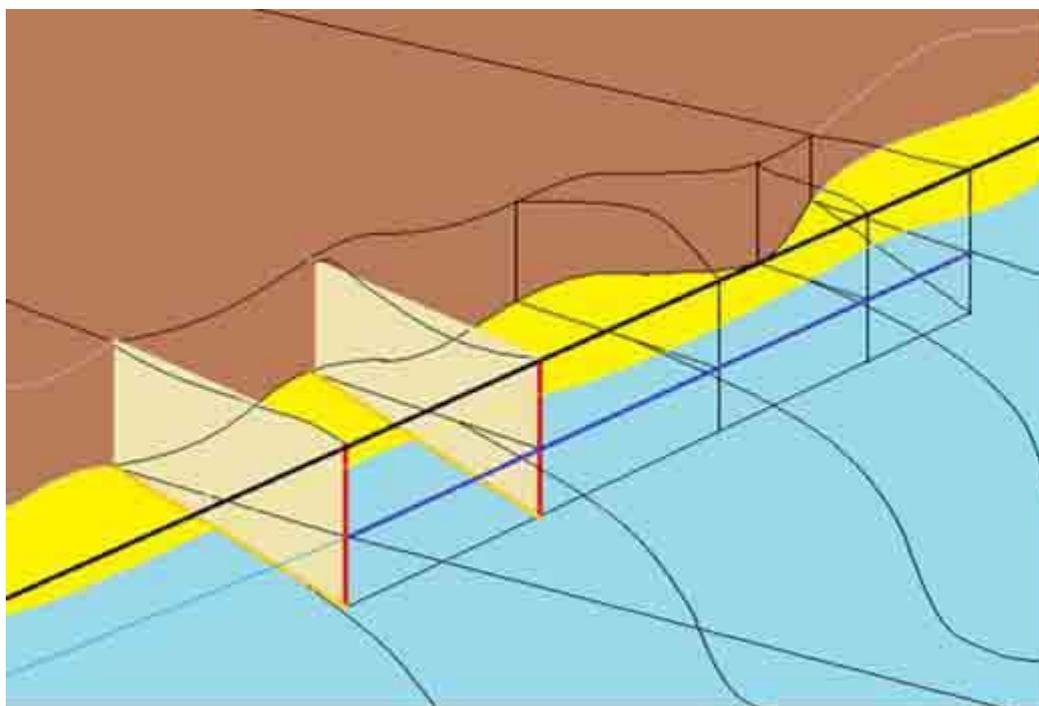


Figura 138. Disegno del profilo della linea di riva della cassa di colmata B e l'esemplificazione del metodo usato.

Il volume totale è ottenuto sommando i volumi dei diversi blocchi. Il valore totale di erosione è stato di 703 678.4 m³.

13. Ringraziamenti

Un sincero ringraziamento va a tutti coloro che, in momenti e modi diversi, mi hanno dato il loro aiuto e mi hanno assistito nella stesura di questo lavoro di tesi.

Un sentito grazie va al mio relatore, Professoressa Emanuela Molinaroli, per la continua disponibilità, gli infiniti consigli ed insegnamenti e per le molteplici revisioni di tutte le parti della tesi.

Vorrei esprimere tutta la mia gratitudine al mio correlatore, il Professore Luca Zaggia, per l'attenzione con cui mi ha seguito nel lavoro, sostenendomi con il suo entusiasmo e motivandomi a non mollare mai.

Un infinito grazie al Dottor Giuliano Lorenzetti per la grandissima pazienza, per la dedizione, ed il supporto, con cui ha saputo ascoltarmi e pazientare sul mio lento apprendimento nell'uso del programma QGIS.

Meritano un ringraziamento particolare Francesca e Loris, facenti parte dello staff del CNR-ISMAR di Venezia, e con loro tutti i collaboratori che mi hanno dato la possibilità di relazionarmi con il mondo del lavoro e della ricerca.

Ringrazio Gian Marco Scarpa per avermi aiutato durante questo percorso e per la sua collaborazione fondamentale nell'uso del drone, attraverso il quale ho realizzato le fotografie aeree in campo.

Un grazie va ai miei genitori che hanno dato un contributo fondamentale agli studi, pazientando ed sostenendomi, dandomi il loro supporto durante questa fase impegnativa della mia vita.

Grazie a mia sorella Irene per avermi aiutata ad usare al meglio le mie potenzialità.

Ringrazio di cuore Martin, Rudy, Valentina N., Barbara, Giorgia, Patty, Valentina M., Miriam e tutti i miei amici.

Questa tesi non sarebbe mai stata scritta senza la generosa collaborazione di molte persone che hanno condiviso con me le loro conoscenze ed esperienze.

Venezia, 24 febbraio 2015

Maria Sofia Gionta