



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Geoscienze

Direttore Prof. Cristina Stefani

TESI DI LAUREA SPECIALISTICA

IN

GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**L'EVOLUZIONE DI UNA BARENA NEL
SETTORE MERIDIONALE DELLA LAGUNA DI
VENEZIA DURANTE GLI ULTIMI 1000 ANNI**

Relatore: Prof. Massimiliano Ghinassi

Laureando: Davide Stocco

ANNO ACCADEMICO 2014 / 2015

Indice

1	Introduzione	pg. 3
2	Inquadramento geologico	pg. 5
	2.1 Origine della Laguna di Venezia	pg. 5
	2.2 Evoluzione della Laguna negli ultimi 1000 anni	pg. 8
3	Metodologie	pg. 13
	3.1 Campionamento e analisi di Facies sedimentarie	pg. 13
	3.2 Contenuto in materia organica	pg. 15
	3.2.1 Attacco chimico	pg. 17
	3.2.2 Loi	pg. 27
	3.1 Datazioni al carbonio 14	pg. 30
4	Risultati	pg. 32
	4.1 Carota 28	pg. 32
	4.1.1 Facies sedimentarie	pg. 33
	4.1.2 Contenuto organico	pg. 35
	4.2.3 Età	pg. 36
	4.2 Carota 29	pg. 36
	4.2.1 Facies sedimentarie	pg. 38
	4.2.2 Contenuto organico	pg. 40
	4.2.3 Età	pg. 41

3.2 Carota 1	pg. 41
4.3.1 Facies sedimentarie	pg. 43
4.3.2 Contenuto organico	pg. 45
4.3.3 Età	pg. 46
5 Interpretazione e discussione	pg. 47
5.1 Storia deposizionale	pg. 47
5.2 Risposta del sistema di barena a forzanti antropiche	pg. 53
6 Conclusioni	pg. 59
Bibliografia	pg. 61

1. Introduzione

Le barene sono ambienti sedimentari presenti nei contesti lagunari di tutto il mondo che si caratterizzano per la ridotta elevazione al di sopra del livello medio mare. Le barene risultano emerse e sommerse giornalmente, in relazione all'alternarsi di bassa ed alta marea, e sono colonizzate da vegetazione alofila, la cui presenza influisce sulle dinamiche sedimentarie, sia in termini di produzione di sostanza organica, che in termini di smorzamento o concentrazione del flusso di marea, favorendo rispettivamente sedimentazione o erosione (Allen, 2000).

Questi ambienti sedimentari sono molto studiati nella Laguna di Venezia, originatesi circa 7500 anni fa, in seguito alla trasgressione marina successiva all'ultimo massimo glaciale. La Laguna di Venezia è un ambiente unico nel suo genere, fortemente condizionato fin dal Medioevo da interventi antropici che ne hanno mutato e controllato l'evoluzione, in vista degli interessi economici o politici delle nazioni che ne hanno reclamato il possesso. La prima fu la Repubblica di Venezia che, attraverso l'organo collegiale del Magistrato alle Acque, è intervenuta più volte e più o meno pesantemente sulla morfologia e sul regime idraulico del bacino lagunare. Tra gli interventi più importanti sicuramente l'estromissione di molte foci di immissari lagunari, tra cui il Fiume Brenta, Piave e Bacchiglione (D'Alpaos, 2010). La diversione di questi fiumi ha portato ad una drammatica diminuzione dell'apporto sedimentario in laguna che, coadiuvato da altri fattori geologici, quali la subsidenza locale, è risultato in una marcata trasgressione che ha considerevolmente ridotto l'estensione delle aree di barena (Zecchin et al., 2008; Zecchin et al., 2009). Di grande impatto sono stati anche gli interventi effettuati negli ultimi due secoli, quali la costruzione di linee di costa artificiali e lo scavo di canali navigabili, utilizzati dalle imbarcazioni per raggiungere i poli industriali di Mestre e Marghera, che hanno spesso incrementato l'attività dei processi erosivi (D'Alpaos, 2010).

Nei secoli la Laguna di Venezia ha visto una drastica diminuzione della superficie occupata dalle barene, la cui sopravvivenza è legata alla capacità di mantenersi ad

una quota al di sopra del livello medio mare, compensando il progressivo innalzamento del livello di base attraverso il contributo sedimentario di materiale organico e inorganico (Allen, 2000; Bartholdy, 2012). Le barene sono quindi costrette a fronteggiare fenomeni quali eustatismo e subsidenza locale, che le porterebbero ad annegare con la scomparsa del biota, che ne costituisce una parte essenziale. Con il venir meno di questo ambiente, inoltre verrebbero meno i contributi che esso offre al sistema costiero tra cui: la protezione dei territori retrostanti dalle inondazioni, attraverso lo smorzamento delle onde; il sequestro di contaminanti ed inquinanti assieme al sedimento fine; un habitat ricco di vita; una fonte di nutrienti (Allen, 2000).

Questa tesi si propone di indagare la risposta delle barene alla variazione di specifiche forzanti, tramite l'analisi di alcune carote recuperate nella parte Meridionale della Laguna di Venezia. Tra le forzanti considerate si elencano l'apporto sedimentario (associato principalmente al controllo antropico del reticolo idrografico locale) e l'eustatismo, che, come già specificato, sono determinanti nella sopravvivenza di una barena. L'apporto sedimentario è caratterizzato da una componente organica, data dalla vegetazione alofila, ed una inorganica, associata ai sedimenti immessi in laguna dai fiumi. Essendo la seconda variata nel tempo (come documentato da affidabili fonti storiche), la prima ha giocato un ruolo determinante per la preservazione dei sistemi di barena. Il contenuto di materia organica è stato misurato sia attraverso LOI (loss on ignition), che attraverso attacchi chimici. I dati ottenuti sono stati affiancati da diverse datazioni al radiocarbonio, che hanno permesso di inquadrare cronologicamente i depositi esaminati. Il contenuto di materiale organico e clastico, che caratterizza l'intervallo stratigrafico esaminato, verrà discusso in relazione ai principali interventi antropici effettuati nel settore Meridionale della Laguna di Venezia.

2. Inquadramento geologico

La Laguna di Venezia occupa una superficie di circa 550 km² ed è situata nella fascia costiera dell'alto Adriatico, tra la foce del fiume Brenta posta a sud e il tratto finale del Sile localizzato a nord. Il bacino lagunare si estende per una lunghezza di circa 55 km e per una larghezza di circa 13 km.

2.2. Origine della Laguna di Venezia

L'area occupata dalla Laguna di Venezia è parte di un bacino di avampaese compreso tra le catene montuose delle Alpi, a Nord-Nord-Ovest, e degli Appennini, a Sud-Sud-Ovest (fig. 1).

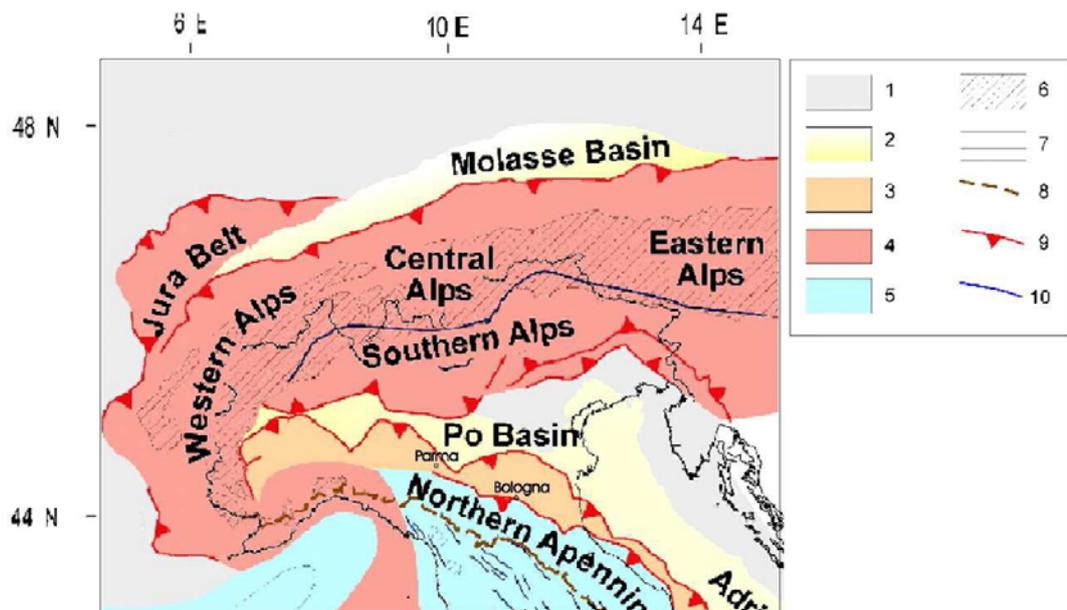


Figura 1. Mapa tettonica semplificata dell'Italia settentrionale da Carminati et al. (2004): (1) aree di avampaese, (2) depositi di avanfossa, (3) domini caratterizzati da regime tettonico compressivo negli Appennini, (4) unità della catena a thrust accumulate durante l'orogenesi alpina nelle Alpi ed in Corsica, (5) aree interessate da tettonica distensiva, (6) affioramenti di basamento cristallino, (7) regioni caratterizzate da crosta oceanica, (8) Apennines water divide, (9) thrust e (10) faglie.

Durante il Miocene e Pliocene, le maggiori fasi orogeniche che hanno interessato la catena Alpina ed Appenninica hanno causato la formazione di una flessura a livello litosferico, alla quale si è associata la formazione di una depressione

morfologica riempita da sedimenti, il cui spessore va ad assottigliarsi verso le catene montuose che la delimitano. Dopo la deposizione di sedimenti di mare basso, nel tardo Pliocene, tale bacino è stato interessato da un rapido annegamento che ha portato al raggiungimento di profondità batiali e conseguenti condizioni di sedimentazione condensata che caratterizzano il principio del Pleistocene. Questi eventi sono stati seguiti, fino al tardo Pleistocene, da un accumulo di una successione spessa circa 750 metri, che mostra una generalizzata tendenza regressiva da torbiditi bacinali a depositi deltaici e poi ad un'alternanza tra depositi continentali e di mare basso (Zecchin et al., 2008; Zecchin et al., 2009).

La successione pleistocenica presenta al tetto una unconformity che indica condizioni di esposizione subaerea, avvenuta durante l'ultimo massimo glaciale e che ha lasciato in eredità una topografia irregolare. La sequenza stratigrafica accumulatasi durante l'ultimo massimo glaciale consiste solamente di depositi continentali, caratterizzati da una dominante componente aggradazionale. Dati sismici e di sondaggio raccolti nell'area litoranea suggeriscono la dominanza di un ambiente di piana alluviale, interessata da pedogenesi, incisa localmente da canali fluviali. La tendenza aggradante della piana alluviale è in netto contrasto, in termini sequenziali, con l'abbassamento del livello del mare, avvenuto durante l'ultimo massimo glaciale. Tale comportamento trova spiegazione nel basso gradiente della pianura alluviale, nella subsidenza locale e nell'elevato apporto sedimentario fornito dai rilievi montani, che hanno prevenuto la possibile fase di bypass associata all'abbassamento del livello di base, indotto dalla caduta del livello eustatico (Zecchin et al., 2008; Zecchin et al., 2009).

La successione olocenica (fig. 2) poggiate sui depositi alluvionali ha uno spessore variabile. Tale spessore risulta maggiore nella Laguna Meridionale e vicino al litorale (20-22 metri), mentre si riduce nella parte marginale e offshore nel Mare Adriatico (1-2 metri). I depositi olocenici si sono accumulati in relazione alla risalita del livello del mare, che determinò la formazione di sistemi laguna-estuario-barriera nella piattaforma epicontinentale Adriatica settentrionale.

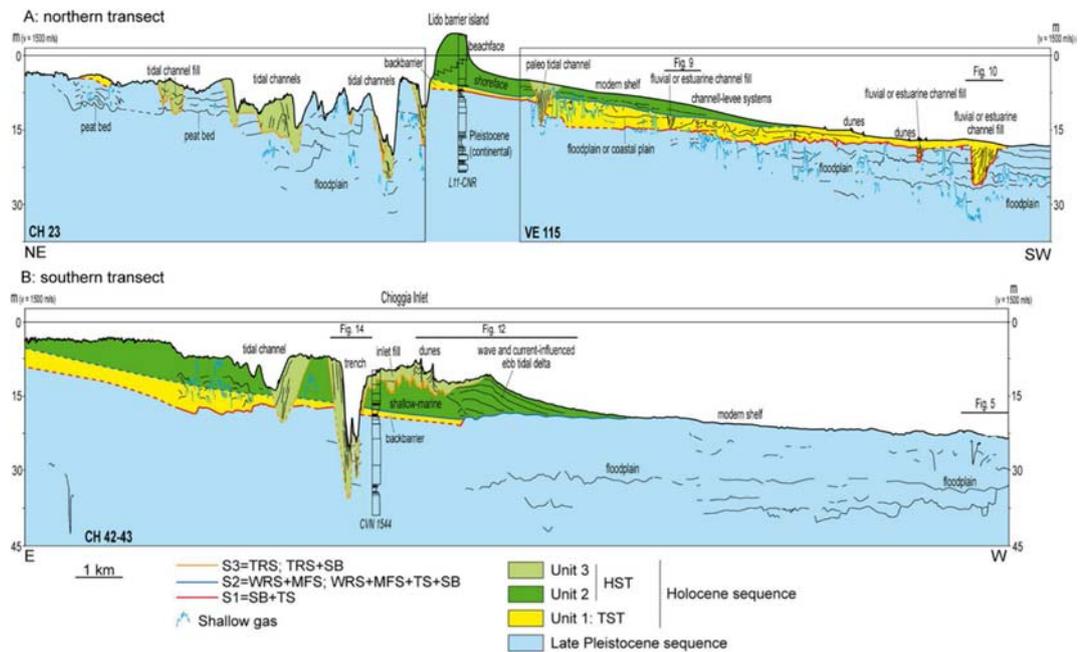


Figura 2. Successione tardo pleistocenica ed olocenica della laguna di Venezia (Zecchin et al., 2008).

Nella Laguna Meridionale sono state individuate (Zecchin et al., 2008; Zecchin et al., 2009) tre superfici chiave (S1-S3) e tre unità sismiche principali (H1-H3), indagate sia carotando i depositi sia attraverso profili sismici ad alta risoluzione.

S1 è una superficie che divide la successione continentale pleistocenica da quella olocenica ed è localmente evidenziata da uno strato di argilla sovraconsolidata, detta Caranto, associata ad un periodo di deposizione scarsa od assente tra i 13 ka ed i 7 ka fa. Nell'area lagunare questa superficie affiora dove i depositi olocenici sono meno spessi, in corrispondenza di incisioni di canali lagunari, che a volte la tagliano, o nei pressi del litorale dove l'azione erosiva delle onde è stata particolarmente efficace.

L'unità H1 poggia sulla superficie S1 e rappresenta l'unità più bassa della successione olocenica. Secondo alcuni autori (Tosi, 1994a; Brambati et al., 2003; Tosi et al., 2007a,b; Zecchin et al., 2008; Zecchin et al. 2009) è stata deposta a partire da 10-11 ka B.P. ed è composta da depositi sabbiosi di barre fluviali (localmente incassati nei sottostanti depositi pleistocenici) passanti verso l'alto a canali tidali e sedimenti fangosi di laguna. Il trend deposizionale evidenziato da questa unità è pertanto trasgressivo.

Al tetto dell'unità H1 si trova la superficie S2 che rappresenta il contatto tra depositi prevalentemente fluviali e paralici e quelli marini al di sopra, che è localmente rappresentato da uno strato centimetrico di detrito conchigliare. La superficie va a coincidere con il fondale marino moderno nelle località di offshore distale, marcata da una scarsa sedimentazione, mentre verso terra è difficilmente riconoscibile, a causa dell'incisione dei canali tidali e talvolta rielabora S1.

Al di sopra della superficie S2 è presente l'unità H2, più o meno distinguibile dall'unità precedente nei profili sismici, data la difficoltà nel riconoscimento di S2. In direzione del mare si ha un cuneo di sedimenti, da sabbiosi a fangosi, che si allunga parallelamente alla costa ed è spesso fino a 10 metri nella zona litorale di Lido. Questo corpo aggrada e prograda verso Sud-Est evidenziando una tendenza regressiva, che risulta associata comunemente allo sviluppo di piane fangose a bassa energia, piane tidali e sub-ambienti di palude salmastra nella laguna olocenica.

L'ultima superficie individuata, S3, è quella che definisce la base dei canali tidali e dei depositi della bocca di porto. È piuttosto irregolare e discontinua e mostra caratteristiche marcatamente erosive che portano a pensare ad una sua diacronia.

L'unità che poggia su S3 viene chiamata H3 e corrisponde ai depositi lagunari moderni. L'ambiente lagunare attuale presenta canali tidali attivi e parzialmente riempiti, che vanno ad incassarsi nei depositi di piana fangosa lagunare fino ad incidere, a tratti, il limite Pleistocene-Olocene. Le incisioni sono più profonde in prossimità delle bocche di porto, altamente dinamiche nell'evoluzione morfologica, a causa della forza erosiva delle correnti, o dove c'è stato intervento antropico.

2.2. Evoluzione della Laguna negli ultimi 1000 anni

L'evoluzione morfologica della Laguna di Venezia negli ultimi 1000 anni è stata pesantemente influenzata dall'azione dell'uomo, che l'ha modificata a seconda delle sue esigenze (fig. 3), soprattutto di carattere politico ed economico (D'Alpaos, 2010).



Figura 3. Laguna di Venezia, sono evidenziate le differenti località dove il fiume Brenta è stato spostato nel tempo ed alcune località chiave (Google Maps). Il rettangolo indica l'area di studio e di campionamento.

I primi interventi, che seguirono l'instaurarsi di piccoli centri abitativi nella laguna in seguito alle invasioni barbariche, furono soprattutto locali e di poco

impatto sulla morfologia del territorio. Invece, a partire dal XII secolo, il manifestarsi di importanti processi di interrimento, che influivano negativamente sul crescente sviluppo dei centri abitativi e sulle attività economiche e militari di quella che era diventata la Repubblica di Venezia, portò ad altrettanti importanti interventi, volti essenzialmente a garantire la sopravvivenza della laguna. I responsabili dei fenomeni di interrimento erano alcuni fiumi, che sfociavano nella laguna e che, durante gli eventi di piena, andavano a depositare il loro carico solido nel bacino.

A Fusina, quasi di fronte a Venezia, sfociava il ramo principale del Brenta, fiume sul quale la Serenissima intervenne più volte in un periodo di tempo plurisecolare. Le opere che vanno a modificare il suo percorso presero avvio nel 1300 AD quando, a seguito di nuove inalveazioni, realizzate dai padovani per mitigare le problematiche idrauliche che affliggevano il loro territorio, la sua foce fu spostata da Brondolo (più verosimilmente dal bacino di Malamocco), a Fusina.

Per questioni prettamente politiche, i Veneziani furono costretti ad attuare le prime opere contenitive del fenomeno nella laguna stessa, che si tradussero, a partire dal 1330 AD, nella costruzione sistematica di arginature intestate sulla terra ferma, ai margini del bacino lagunare. Queste avevano la funzione di allontanare le acque del Brenta dal bacino di S. Marco e convogliarle nel più lontano bacino di Malamocco, di fronte all'omonima bocca. Nella seconda metà del XV secolo, gli scarsi risultati dei provvedimenti intrapresi portarono ad una nuova idea, quella dell'estromissione dalla laguna dei fiumi maggiori e, in seguito, anche di quelli minori. Nel 1488 AD inizia l'epoca delle grandi diversioni, con l'approvazione e l'avvio dei lavori nei primi del Cinquecento, che porteranno la foce del Brenta da Fusina a Conche (1502-1507 AD), sempre all'interno della laguna, ma nel bacino di Chioggia. L'intervento seguiva alcune deviazioni parziali dell'alveo del fiume, effettuate nella seconda metà del Quattrocento, prima nel 1452 AD e poi nel 1457 AD. Le prime opere consistevano in tre diversivi in destra del Brenta all'altezza di Oriago (7,5 km a Nord-Ovest di Fusina, appena oltre i confini della carta qui riportata), mentre la seconda rappresentava un'importante deviazione a monte delle tre precedenti, ma

anche pre-configurava, in alcuni punti, quello che sarebbe stato il primo vero grande diversivo del fiume. Vennero realizzati 24 km di una nuova inalveazione tra S. Bruson di Dolo e Conche, a cui si accompagnarono l'intercettazione e deviazione di altri corsi d'acqua, tra i quali il Bacchiglione, portato a sua volta a sfociare assieme al Brenta nel bacino di Chioggia, in corrispondenza dell'odierno canale di Montalbano.

Il bacino di Chioggia però subì, negli anni successivi, un importante interrimento causato dagli apporti solidi del Brenta e del Bacchiglione. La loro estromissione dal bacino lagunare fu decisa quindi nel 1540 AD, portando i due fiumi a sfociare a Sud di Chioggia, lungo alvei separati, nella Laguna di Brondolo, e da questa al mare, attraverso l'omonima bocca. Venne anche deciso di edificare una palificata (1548 AD), poi diventata in realtà un argine in terra (1583 AD), per proteggere la laguna di Chioggia dagli apporti dei fiumi, sia in termini di sedimento che di acque dolci. Questo decretò inesorabilmente l'interrimento definitivo della Laguna di Brondolo.

Verso la metà del XVI secolo, la politica della Serenissima si mosse in direzione della completa estromissione dei fiumi dalla Laguna di Venezia, anche nella sua parte settentrionale. Il piano iniziale prevedeva lo spostamento a Nord del Piave e l'estromissione del Sile e di una serie di fiumi di minore importanza, che nascevano al limite delle risorgive e portavano ingenti portate liquide e solide al bacino lagunare. Il Marzenego fu deviato più a Nord verso Tessera, mediante la costruzione del canale dell'Orsellino (1507 AD) e aperto il Brenta Novissima o Novissimo (1610 AD), che portava da Mira (qualche chilometro ad Est di Oriago) a Brondolo. Pochi anni dopo (1613 AD), nel Novissimo furono deviate le acque di alcuni fiumi minori tramite il Taglio di Mirano. Tra questi il Muson Vecchio, il Bottenigo, il Volpego, il Pionca, il Tergola ed il Tergolino.

Altri interventi furono portati a termine sotto il governo austriaco nella Laguna Meridionale, con la reintroduzione del Brenta in laguna nei pressi di Fogolana, quasi di fronte a Chioggia, che avvenne nel 1840 AD. Questo portò all'impaludamento delle aree limitrofe, tanto che, nel 1896 AD, la foce fu ristabilita a Brondolo.

Nella Laguna Settentrionale le opere furono soprattutto volte a circoscrivere i problemi legati alla presenza del Piave. Tra queste, l'argine di S. Marco (1534-1543 AD), tra Ponte di Piave e Cava di Caligo, alcuni diversivi in sinistra idrografica per alleggerire le portate del fiume e lo scavo e sistemazione nei pressi di Jesolo di un canale, detto cava Zuccherina (oggi canale Cavetta), congiungente il Piave con la foce di Cortellazzo. Fu solo nel 1664 AD che avvenne la completa diversione del fiume, con lo spostamento della foce a Porto S. Margherita, dove era stabilito lo sbocco a mare del Livenza, che a sua volta fu deviato a foce Nicessolo, nella vicina Laguna di Caorle. L'allontanamento del Piave fu completato con la costruzione di un canale che terminava al canale Cin (Palazzetto), immettendosi in quella che era stata l'antica Laguna di Eraclea, tra la foce di Cortellazzo e quella di Porto S. Margherita, rispettivamente ad Ovest e ad Est. Nel 1683 AD tuttavia, a seguito di una rotta dei poco rilevati argini dell'ex Laguna di Eraclea, chiamata ora Lago del Piave, il Piave ristabilì naturalmente la sua foce a Cortellazzo. Per migliorare le condizioni sanitarie della Laguna Settentrionale infine, furono introdotte nell'alveo abbandonato del Piave le acque del Sile e di altri fiumi minori della pianura trevigiana, per esempio il Vallio, il Meolo ed il Musestre, mediante la costruzione, ai margini nord orientali, della laguna stessa dell'omonimo Taglio (1683 AD). Queste ultime opere, in particolare il Taglio del Sile, resero la situazione idraulica dell'entroterra tale da necessitare la costruzione di uno sfioratore, chiamato Businello, verso la laguna a valle di Porte Grandi (1695 AD) con la funzione di scolo delle acque.

Con la diversione dei fiumi ha inizio una generalizzata tendenza all'erosione dell'ambiente lagunare, a cui va aggiunto il contributo della subsidenza che interessa l'intero bacino. A ciò si devono aggiungere anche altri contributi antropici, quali lo scavo di canali. Oltre alla pesante diminuzione negli apporti solidi alla laguna, anche la mancanza di apporti di acqua dolce ha avuto gravi effetti, alterando localmente i preesistenti processi vegetativi sulle superfici occupate dalle barene, ed alterando, sia la loro capacità di intrappolamento dei sedimenti in sospensione che, la produzione di sedimento organico.

3. Metodologie

3.1. Campionamento e analisi di Facies sedimentarie

Essendo lo scopo principale di questo lavoro, quello di verificare l'evoluzione di una barena in seguito al variare di forzanti naturali ed antropiche, è stata fatta come primissima cosa una scelta dei siti più adatti al campionamento.

Il corso del Brenta è stato modificato artificialmente attraversando più fasi di immissione ed estromissione nel e dal bacino lagunare, andando ad interessare diverse zone fino ad arrivare ad una estromissione definitiva dalla laguna, avvenuta negli ultimi anni del XIX secolo. Dato che le carote interessano i depositi di barena di fronte dell'antica foce del Fiume Brenta, nei pressi di Conche (fig. 4), possiamo ritenere soddisfatta la premessa iniziale.

Una volta scelta la barena nei pressi di Conche, sono stati effettuati dei carotaggi. Nel presente lavoro di tesi sono considerate tre carote nominate, rispettivamente: 1, 28 e 29 (fig.4).



Figura 4. Posizione delle carote 1, 28 e 29 in prossimità della località di Conche (Google Maps).

Il carotiere utilizzato per il campionamento presenta come contenitore, un tubo di plastica dal diametro di 10 cm e lunghezza 1,5 m, inoltre lo spessore della parete è stato scelto il più sottile possibile, 1mm, per diminuire la forza d'attrito che si manifesta all'infissione dello strumento all'interno della barena. È stato preferito un carotaggio ad infissione piuttosto di uno a distruzione del campione, in quanto, l'indagine sull'evoluzione temporale dei processi sedimentari necessita di una

carota indisturbata, che permetta l'analisi delle facies sedimentarie e la lettura degli eventi, nell'ordine in cui si sono verificati. L'unico effetto apprezzabile è stato quello di un costipamento del sedimento a causa della pressione esercitata nell'infissione dello strumento, ma ciò non inficia i risultati ottenuti. Il fatto che sia una carota indisturbata permette di ottenere dei campioni e dei dati il cui livello stratigrafico sia noto, cosa che non sarebbe possibile se ci fosse del mescolamento dei differenti livelli stratigrafici durante il carotaggio, come nei metodi a distruzione.

Il tubo estratto dal carotiere è stato successivamente aperto in laboratorio, tagliandolo lungo la parete verticale con una piccola sega elettrica, e lasciato essiccare per qualche giorno.

La compattazione subita nel prelievo è stata corretta, decompattando le carote con un semplice procedimento matematico ed ipotizzando una compattazione uniforme per tutti i livelli che componevano la carota, assunto che sembra plausibile vista l'uniformità litologica che caratterizza le carote in esame. La proporzione è stata fatta tra la lunghezza per cui era penetrato il carotatore, annotata in campagna, e la lunghezza della carota misurata una volta che è stata aperta.

È stata infine eseguita l'analisi di facies delle carote ed il prelievo di campioni da destinare ad analisi successive.

L'analisi di facies è stata fatta su sezioni di carota umide, evidenziando in ognuna di esse la tipologia di sedimento, per esempio torba, fango e sabbia, e le strutture, quali lenti e livelli di sedimento e laminazioni. Da questa analisi sono stati ricavati dei log e in seguito le carote sono state fotografate, sia per intero, che nei particolari.

Il prelievo di campioni per le analisi relative al contenuto di sostanza organica è stato effettuato ogni tre centimetri ed i campioni, dello spessore di un centimetro, riflettono nella loro denominazione la carota e la quota da cui provengono. Per esempio, il campione 28.1 proviene dalla carota 28 e ne rappresenta tutto ciò che si è depositato tra i centimetri zero ed uno, a partire dalla parte superiore della carota. Ciascun campione è stato preso e messo in piccole buste di plastica a

chiusura ermetica, sulle quali è stata scritto il nome del campione con un pennarello indelebile, per poi essere congelato in freezer.

Il congelamento dei campioni è stato necessario per prevenire lo sviluppo di muffe, che sarebbero andate a falsare la quantità originaria di materia organica presente nel campione stesso e che è stata oggetto di studio successivo.

I campioni per le analisi al radiocarbonio sono rappresentati da frammenti vegetali e sono stati raccolti in diverse posizioni stratigrafiche nelle diverse carote, al fine di fornire un quadro cronologico più completo possibile per l'intervallo carotato.

3.2. Contenuto in materia organica

Il contenuto in materia organica viene misurato essenzialmente sottraendo al peso del campione prima delle analisi, quello che il campione presenta alla fine dei processi a cui viene sottoposto per consumare la materia organica che ne è parte. I metodi utilizzati in questa sede sono due: l'attacco chimico tramite acqua ossigenata diluita al 33% e la LOI (Loss On Ignition). Il primo metodo non è molto diffuso, mentre del secondo, molto più utilizzato, esiste una vasta bibliografia.

Entrambe le tecniche hanno un percorso comune nella fase iniziale della preparazione dei campioni, che verrà illustrato qui in seguito.

È stato preso un campione congelato e ne è stata prelevata una parte valutata sufficiente allo svolgimento delle analisi, tramite l'uso di un coltello e di pinzette. Dove possibile, ovvero quando il campione fosse stato in quantità più che sufficiente per le analisi, è stata rimessa nella busta la parte in avanzo del campione, facente funzione di testimone, che è stata poi congelata nuovamente. Tra un campione e l'altro si è avuta cura di pulire coltello e pinzette per evitare contaminazioni.

È stato preso un vetro da orologio, sulla cui superficie è stato posizionato un pezzo di nastro adesivo di carta che recava scritto con un pennarello indelebile la sigla del campione. Al di sopra del pezzo di nastro adesivo è stato appoggiato il rispettivo campione congelato. Su di uno stesso vetro da orologio sono stati messi più campioni, avendo cura che non entrassero in contatto l'uno con l'altro o che si

potessero muovere, perdendo così la corrispondenza con il nastro recante la propria denominazione.

Il vetro da orologio è stato poi posto in forno ad una temperatura di 40°C per ventiquattro ore (fig. 5). Questa fase ha permesso di scongelare il campione e di eliminare l'acqua libera presente. La temperatura è sufficientemente bassa da non causare reazioni chimiche che eliminino l'acqua presente nella struttura cristallina di alcuni minerali, in particolare quelli argillosi, e da non intaccare il quantitativo di materia organica presente.



Figura 5. Campioni informati sui rispettivi orologi.

Trascorso il periodo di tempo necessario a seccarlo, il campione è stato pesato sulla bilancia di precisione per valutarne il peso e nel contempo capire quale fosse il modo migliore di suddividerlo in parti da destinare alle differenti analisi che sarebbero seguite. In particolare un buon peso di campione secco che abbiamo stimato essere necessario per le analisi LOI è 1.3-1.4 grammi, mentre 1.5-1.6 grammi per l'attacco chimico con acqua ossigenata diluita al 33%. Tra una pesata e l'altra, e tra una partizione e l'altra, è necessario pulire gli strumenti ed operare con attenzione affinché non avvengano contaminazioni, anche minime, tra i campioni.

Le quantità di campione secco pesate sono state avvolte in fogli di alluminio, poi chiusi in nuove bustine in plastica a chiusura ermetica. Queste sono state subito

contrassegnate con la sigla del campione e con l'analisi a cui era stata destinata quella parte del campione (fig. 6).



Figura 6. Campione estratto dal forno e pronto per la pesatura. Accanto sono posizionate le buste, già contrassegnate, per conservare il campione destinato ad alcune analisi.

La parte destinata all'analisi tramite attacco chimico invece, non è stata chiusa in una busta come quella da analizzare con la LOI, ma ha seguito da qui un percorso differente.

3.2.1. Attacco chimico

L'introduzione del perossido di idrogeno è stata fatta da Robinson(1922) per le analisi tessiturali del suoli e questo reagente chimico divenne uno dei più utilizzati per la distruzione della materia organica. Quest'ultima, di contro, non può essere completamente rimossa da un campione di terreno tramite trattamenti di ossidazione (Mikutta et al., 2005). Inoltre, l'efficienza della rimozione dipende dalle condizioni della reazione (pH, temperatura, tempo di contatto, additivi chimici) e dalle proprietà del campione (mineralogia, contenuto e tipologia di materia organica), e in quest'ottica sono stati sperimentati diversi protocolli per migliorarne i risultati.

La maggior parte di tali protocolli per la preparazione del campione ad analisi tessiturali e mineralogiche propone l'uso di acqua ossigenata diluita al 30%wt, ma la concentrazione di H₂O₂ sembra non essere decisiva nell'efficienza della

rimozione di carbonio (McLean, 1931b; Mikutta et al., 2005). Tipicamente, i trattamenti cominciano a temperatura ambiente per poi subire un riscaldamento da 60°C fino a 90°C a causa della reazione di decomposizione della materia organica. La temperatura influenza il tempo di contatto necessario alla rimozione del carbonio organico dai suoli, ma questa richiede spesso diversi giorni e non esiste alcun indicatore affidabile che mostri se la reazione si sia esaurita. Tuttavia, una mancanza di schiuma visibile, seppur la schiuma possa derivare anche dalla decomposizione dell'H₂O₂ in eccesso, e un colore sbiadito del campione possono indicare il completamento della reazione.

La materia organica non può essere completamente rimossa dai campioni con questo tipo di trattamenti e sono molti i fattori che ne sono responsabili: reazioni all'interno del campione stesso, presenza di carbonati, composti organici resistenti all'attacco chimico e la protezione della materia organica da parte della superficie dei minerali. Il C organico rimosso dall'H₂O₂ varia tra il 20% (Bartlett et al., 1937; Mikutta et al., 2005) ed il 93% (Kahle et al., 2003; Mikutta et al., 2005), ed in alcuni casi la sua distruzione sembra essere facilitata da un ambiente acido (pH tra 6 e 7.5). La presenza di Mn ne riduce la rimozione, come la presenza di carbonato (Hosking, 1932; Anderson, 1963; Mikutta et al., 2005). L'introduzione di agenti chimici che distruggano gli aggregati, rilasciando la materia organica occlusa, e permettano il rilascio dei composti organici legati alla superficie dei minerali possono aumentare l'efficacia del trattamento (Sequi e Aringhieri, 1977; Mikutta et al., 2005).

Hosking (1932) ha riscontrato che una quantità maggiore di materia organica resiste al trattamento con H₂O₂ in suoli con un maggior contenuto argilloso, suggerendo che la materia organica possa essere protetta dai trattamenti ossidativi tramite l'interazione con i minerali del suolo ed in particolare con i meccanismi dell'intercalazione e dell'adsorbimento. Mikutta et al. (2004) ha dimostrato che la capacità dei minerali della frazione argillosa di proteggere la materia organica, diminuisce all'aumentare del C organico, legato alla superficie dei minerali. Eusterhues et al. (2003) portò ulteriori evidenze che l'efficienza nella rimozione del C dipenda dalla capacità di protezione che hanno i minerali e che sia legata

anche alla profondità del campione analizzato, essendo maggiore a profondità minori.

L'uso di attacchi chimici per distruggere la materia organica si basa sulla supposizione che i minerali rimangano inalterati da questi trattamenti. Tuttavia, avvengono comunque alcuni cambiamenti nella parte mineralogica del campione. Anche moderati riscaldamenti possono alterare le proprietà superficiali di ossidi ed idrossidi e così dare origine ad artefatti, almeno in suoli ricchi in componenti amorfi o debolmente cristallini. Inoltre miche, vermiculite, biotite, flogopite, smectite e montmorillonite (Mikutta et al., 2005) subiscono cambiamenti di vario tipo, anche strutturale. L'alterazione dei fillosilicati durante il trattamento con H₂O₂ dipende dalla presenza di catalizzatori, dall'esistenza di superfici interstrato accessibili nel minerale e dall'abbondanza della materia organica.

Inoltre i minerali puri, inalterati nel suolo e quindi senza modificazioni strutturali quali fratture, microfessure e zone di espansione come la materia organica adsorbita, sono poco intaccati dal trattamento con H₂O₂ (Mikutta et al., 2005). Nei suoli calcarei può avvenire una dissoluzione o corrosione di minerali carbonatici dovuta al basso pH dell'H₂O₂ e tipicamente gli ossidi di Mn vengono distrutti, così come i solfuri (Mikutta et al., 2005). I metalli rilasciati durante la degradazione della materia organica possono precipitare, ma non esiste alcuna percezione reale su questo processo e sui potenziali effetti che possa avere sulle proprietà dei minerali (Mikutta et al., 2005).

Queste considerazioni hanno permesso di operare con consapevolezza e di adottare una metodologia più appropriata. Nello specifico, la parte di campione pesata è stata messa in un becher di plastica gradato della capacità di due litri e poi sminuzzato e frantumato per aumentarne la superficie specifica. Successivamente, è stato apposto sulla parete esterna del becher il nastro adesivo di carta contrassegnato dalla denominazione propria del campione in esame (fig. 7) ed il becher è stato portato sotto alla cappa aspirante accesa.



Figura 7. Campione frammentato all'interno del becher, pronto per l'attacco chimico con acqua ossigenata diluita al 33%.

Lì, si sono svolte le successive operazioni nel rispetto delle norme vigenti del laboratorio che ospitava le analisi. I frammenti del campione sono stati sommersi completamente da acqua ossigenata diluita al 33% (fig. 8) ed è stata utilizzata una bacchetta in vetro per dare una prima mescolata al contenuto del becher e disgregare ulteriormente i frammenti più grossolani.



Figura 8. I campioni vengono sommersi con acqua ossigenata, sotto cappa aspirante.

L'acqua ossigenata è stata lasciata agire per un paio di giorni sotto cappa, per darle il tempo di consumare la sostanza organica (fig. 9). La valutazione dei giorni

utili per consumare la sostanza organica è stata effettuata di campione in campione, a seconda, di quanto il campione in esame avesse reagito, della presenza di schiuma e della quantità di materia organica stimata inizialmente.

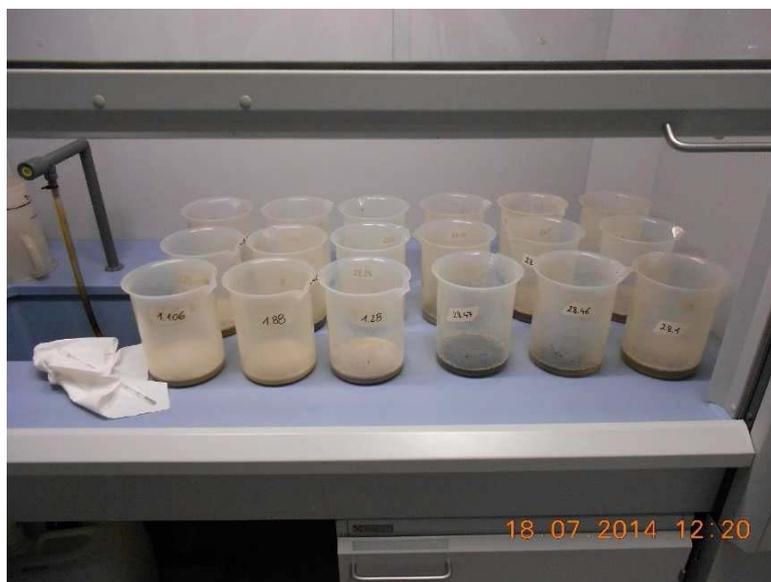


Figura 9. I campioni reagiscono all'acqua ossigenata, sotto cappa aspirante.

I becher, nella fase successiva, sono stati riempiti con acqua deionizzata fino alla loro capacità massima (fig. 10).



Figura 10. Diluizione dell'acqua ossigenata tramite acqua deionizzata, con cui vengono riempiti i becher.

Questo per diluire ulteriormente l'acqua ossigenata, estremamente aggressiva, e per creare una colonna d'acqua che permettesse la sedimentazione delle componenti del campione non disciolte e quindi le successive fasi dell'analisi. L'acqua deionizzata è stata preferita a quella di acquedotto non trattata per il fatto che, a differenza di quest'ultima, l'acqua deionizzata non presenta ioni in soluzione (per esempio ione calcio e ione carbonato), i quali potrebbero precipitare dalla soluzione andando a falsare le successive pesate con materiale esterno al campione e quindi, portando a sotto stimare la quantità di materia organica presente.

Il contenuto dei becher, sempre sotto cappa, è stato mescolato e lasciato reagire per un altro paio di giorni. Questa fase ha permesso anche al sedimento di depositarsi totalmente sul fondo.

Una volta passato questo periodo di tempo ed osservato che tutto il sedimento si fosse depositato, la successiva operazione ha previsto la riduzione della colonna d'acqua di ogni becher tramite il sifonamento, con un piccolo tubo di gomma flessibile. È stato preferito un tubo di piccolo diametro che, seppur allungando i tempi necessari allo svolgimento delle operazioni, permetteva un maggiore controllo sulle stesse e di estrarre più acqua rispetto ad un tubo di gomma con diametro maggiore. Il becher veniva spostato con estrema attenzione, per evitare urti o scossoni che riportassero in sospensione parte del sedimento, comportando così altri giorni di attesa per permetterne la rideposizione. Lo spostamento del becher aveva lo scopo di avvicinarlo al bordo del bancone per agevolare i passaggi successivi: un secchio veniva posto al di sotto del livello del bancone e quindi della base del becher stesso, creando così un dislivello idraulico (fig. 11).



Figura 11. Secchio e becher nella geometria sopra discussa. A fianco il tubicino di gomma per il sifonamento e acqua deionizzata all'interno dell'apposito contenitore.

Veniva riempito il tubo in gomma flessibile con acqua deionizzata, tappando prima un'estremità e poi l'altra con le dita. Un'estremità veniva immersa per poco più di un centimetro al di sotto della superficie dell'acqua presente nel becher e l'altra rivolta verso il secchio, avente funzione di raccogliere l'acqua estratta. Una volta aperte le estremità del tubo in gomma, il dislivello idraulico dato dalla geometria del secchio e del becher ha permesso all'acqua di scorrere da quest'ultimo al secondo. Questa operazione, estremamente importante, necessita di particolare cura ed attenzione: è necessario mantenere l'estremità del tubo sempre immersa poco più di un centimetro al di sotto della superficie dell'acqua e quindi calare il tubicino mano a mano che la superficie dell'acqua viene a calare, a causa dello svuotamento progressivo. La profondità è stata scelta per evitare di causare turbolenze che portassero in sospensione del sedimento ed in quel caso, di dover terminare le operazioni, estraendo immediatamente il tubicino, ed attendendo che si sia risedimentato. E' importante che il sedimento non ritorni in sospensione perché si rischierebbe di eliminarlo. Per ovviare a ciò, è sufficiente osservare il fondo del becher e, appena si scorgono dei movimenti sul fondo, togliere il tubicino immediatamente. L'estremità del tubicino deve sempre essere immersa, in quanto, se questa non lo fosse avremmo un riflusso di acqua all'interno del becher e quindi un sicuro ritorno in sospensione del sedimento con

tutto ciò che ne consegue. È opportuno estrarre quanta più acqua possibile dal becher per agevolare le successive operazioni. Se, in caso di dubbio o poca visibilità, non si riesce ad eliminare tutta l'acqua è meglio lasciarne una quantità maggiore per non rischiare di perdere del sedimento. Infatti in quest'ultimo caso la quantità di materia organica misurata sarebbe falsata in positivo, mentre, nel caso in cui sia presente una maggiore quantità d'acqua avremmo delle complicazioni nelle operazioni successive che si possono risolvere con alcune accortezze.

Trattati tutti i becher nella maniera sopra riportata, è stata presa una capsula in ceramica da laboratorio alla cui sommità è stato posizionato un setaccio a maglia 0.710 millimetri (fig. 12).



Figura 12. Capsula, becher e setaccio prima dell'operazione, liquido e sedimento sono nel becher.

Il becher è stato ben agitato in modo che il sedimento entrasse completamente in sospensione e quindi, versato rapidamente sul setaccio, in maniera tale che non potesse in parte depositarsi nuovamente, e di conseguenza nella capsula. Poi è stata versata dell'altra acqua deionizzata nel becher lungo le pareti per recuperare, aiutandosi con le dita protette dai guanti, eventuale altro sedimento rimasto all'interno del becher stesso. Il processo è stato ripetuto fino a che l'acqua al fondo del contenitore non è risultata perfettamente limpida (fig. 13). La quantità

di acqua deionizzata utilizzabile nell'ultima fase è tuttavia limitata in relazione alla capienza della capsula utilizzata ed è per questo che è essenziale trasferire quanta più acqua possibile nella fase precedente. La maglia del setaccio è stata scelta stimando che tutto ciò che fosse superiore a quella dimensione avesse origine organica, quali ad esempio frustoli vegetali o piccole radici non dissolte dall'attacco chimico con l'acqua ossigenata.



Figura 13. Capsula, becher e setaccio ad operazione avvenuta, liquido e sedimento sono ora nella capsula.

Ogni capsula è stata siglata tramite il trasferimento del nastro adesivo di carta dal becher alla capsula stessa e quindi messa in forno alla temperatura di 60°C per un tempo sufficiente a far evaporare l'acqua contenuta al suo interno (fig. 14). Il contenuto in acqua è stato verificato quotidianamente per evitare che il sedimento, una volta seccato, permanesse a quelle temperature per tempi lunghi. Ciò avrebbe potuto alterare la mineralogia del sedimento stesso, ma anche far aderire il sedimento alla parete della capsula in una maniera tale da non permettere di raschiarlo via completamente nel passaggio successivo. Mediamente il tempo necessario per completare questa fase è stata di un paio di giorni.



Figura 14. Capsule all'interno del forno.

Preso la capsula in ceramica dal forno è stata grattata la patina depositatasi sulla sua superficie durante il processo di essiccazione, tramite una spatolina metallica. La polvere così ottenuta è stata quindi versata, con l'ausilio di un pennellino, su un foglietto di alluminio ed infine pesata sulla bilancia di precisione, precedentemente tarata sul foglietto stesso. Il foglietto è stato piegato più volte in maniera tale da evitare una perdita della polvere raccolta precedentemente e poi è stato messo in una bustina di plastica a chiusura ermetica, subito siglata a seconda del campione in esame e contrassegnata con la fase del processo in atto (fig. 15). Spatolina e pennellino vanno puliti tra un campione e l'altro per evitare contaminazioni.

Un altro accorgimento da adottare è quello di riporre la capsula, una volta grattata l'incrostazione presente, nuovamente in forno. Questo perché il sedimento, di grana fine, assorbe umidità dall'aria alterando il suo peso reale, specialmente nelle giornate umide. Quindi, per ottimizzare tempi e risultati è bene lasciarlo qualche minuto all'interno del forno mentre si tara il foglietto di alluminio che si andrà ad utilizzare, estrarlo ed effettuare il processo di pesata il più velocemente possibile. Il primo valore che si stabilizza viene considerato quello reale, in quanto, una volta stabilizzatosi, il primo valore si vedrà in qualche istante un aumento progressivo e cospicuo del peso del campione.



Figura 15. Capsule già trattate e sedimento all'interno delle rispettive buste ermetiche.

3.2.2. Loi

Il metodo Loss on Ignition (LOI) è largamente usato per stimare la materia organica (OM) nel sedimento di ecosistemi marini e di acqua dolce.

Nonostante la diffusione della metodologia nella comunità scientifica, manca ancora una vera e propria procedura standardizzata. Le differenze nella temperatura di combustione, nella dimensione dei campioni, nel tempo di esposizione e nella posizione del campione nella muffola causano variabilità tra un laboratorio e l'altro, con una maggiore suscettibilità alla temperatura di 550°C piuttosto che a 950°C (Heiri et al., 2001). In ogni caso, dato un protocollo specifico, due sono le sorgenti maggiori di errore nella combustione: la potenziale perdita di CO₂ dai carbonati e la perdita di acqua di reticolo dai minerali argillosi (Barillé-Boyer et al., 2003).

La prima può essere ridotta significativamente adottando una temperatura di combustione inferiore a 500°C (Frangipane et al., 2009). La seconda, invece, può essere più o meno importante a seconda della tipologia di sedimento e, in particolare, è trascurabile per il particolato povero in argille. In un sedimento che invece sia ricco nella componente argillosa, come per esempio i depositi estuarini o costieri in genere, l'influenza dell'acqua di reticolo varia in relazione alla composizione specifica dello stesso, alle proporzioni e alla composizione dei

minerali argillosi e alla temperatura di combustione. Quest'acqua può costituire fino al 20% del peso dei minerali argillosi (Ball, 1964; Heiri et al., 2001).

Durante la combustione la materia organica inizia a bruciare a circa 200°C e risulta consumata circa a 550°C, mentre la maggior parte dei minerali carbonatici viene distrutta a temperature più elevate; calcite tra 800 e 850°C e dolomite tra 700 e 750°C (Santisteban et al., 2004). Tuttavia, minerali quali gesso, solfati e ossidi-idrossidi metallici possono contribuire a variazioni di peso tramite deidratazione o idratazione, mentre ed errori addizionali possono derivare dalla perdita di carbonio inorganico alle temperature tra 425 e 520°C in minerali quali siderite, rodocrosite e dolomite, ma anche dalla perdita di sali volatili (Heiri et al., 2001; Frangipane et al., 2009). Inoltre sembra che un riscaldamento in un forno convenzionale ad una temperatura inferiore a 150°C non sia in grado di estrarre acqua igroscopica ed intercristallina dalle argille e dai fillosilicati (Frangipane et al., 2009).

Alcuni risultati di Heiri et al. (2001) documentano che una o due ore di combustione possano non essere sufficienti per la sua completa distruzione in campioni di grandi dimensioni e ricchi in materia organica e che la LOI a temperature di 550°C sia dipendente dal peso del campione stesso.

Seppur questo metodo non sia affidabile a livello quantitativo ed i risultati dipendano dal contenuto organico, dalla componente argillosa (Santisteban et al., 2004) e da tutti i fattori precedentemente citati (Heiri et al., 2001), la metodologia LOI può essere un utile strumento per l'analisi della composizione dei sedimenti. Questo in vista di alcune assunzioni: i risultati sono qualitativamente validi, è necessaria una conoscenza della composizione mineralogica del sedimento e gli effetti della litologia siano adeguatamente investigati (Santisteban et al., 2004).

Inoltre, il metodo LOI può essere utilizzato per correlazioni tra carote con distinto segnale, data una buona consistenza dei risultati all'interno di uno stesso laboratorio (Heiri et al., 2001).

In questo lavoro i campioni hanno subito un pretrattamento che ha previsto un'asciugatura a 60°C per un tempo di 36 ore (Frangipane et al., 2009) e una successiva polverizzazione in un mortaio di porcellana per diminuire e uniformare

la grana. Questo è necessario per ottimizzare i risultati della combustione che, alla presenza di una grana più grossolana, potrebbe risultare incompleta risparmiando il volume centrale del granulo (Heiri et al., 2001).

Dei crogioli in ceramica sono stati nel frattempo messi nella muffola (fig. 16) ad asciugare per un'ora a 375°C e successivamente a raffreddare in un essiccatore per 30 minuti, in maniera tale da mantenerlo isolato dall'umidità esterna che verrebbe altrimenti assorbita nei pori della ceramica. Il crogiolo viene poi pesato per ottenerne la tara da utilizzare successivamente.



Figura 16. Muffola.

Un quantitativo di campione pari a circa 1 grammo è stato posto nel crogiolo e quindi è stata fatta una pesatura del crogiolo assieme al campione, prima della combustione in muffola. Poi, questo è stato collocato nella muffola che a partire da temperatura ambiente, quindi 20-25°C, è arrivata a 375°C, con un incremento di temperatura graduale di 5°C al minuto. Una volta raggiunti i 375°C, il campione è rimasto nella muffola per 16 ore (Frangipane et al., 2009), dopo le quali la temperatura veniva riportata a 150°C in maniera sempre graduale.

I crogioli venivano poi messi all'interno dell'essiccatore per 30 minuti, per raffreddare e per uniformare le condizioni rispetto alla pesata precedente alla

combustione. Infine, venivano pesati nuovamente, per ottenere il peso del campione successivamente alla combustione.

Grazie ai dati sulla tara e sul peso lordo di campione e crogiolo, è stato ottenuto il peso netto del campione precedente e successivo alla combustione e quindi il quantitativo di materia organica bruciata nel processo.

3.3. Datazioni al carbonio 14

La tecnica del radiocarbonio permette di datare qualsiasi materiale di origine organica e si basa sul lento decadimento del ^{14}C (isotopo radioattivo del carbonio). Il suo tempo di dimezzamento, 5730 ± 40 anni (Godwin, 1962; Hajdas, 2008), e la sua diffusione permettono importanti applicazioni geocronologiche ed ambientali (fig. 17).

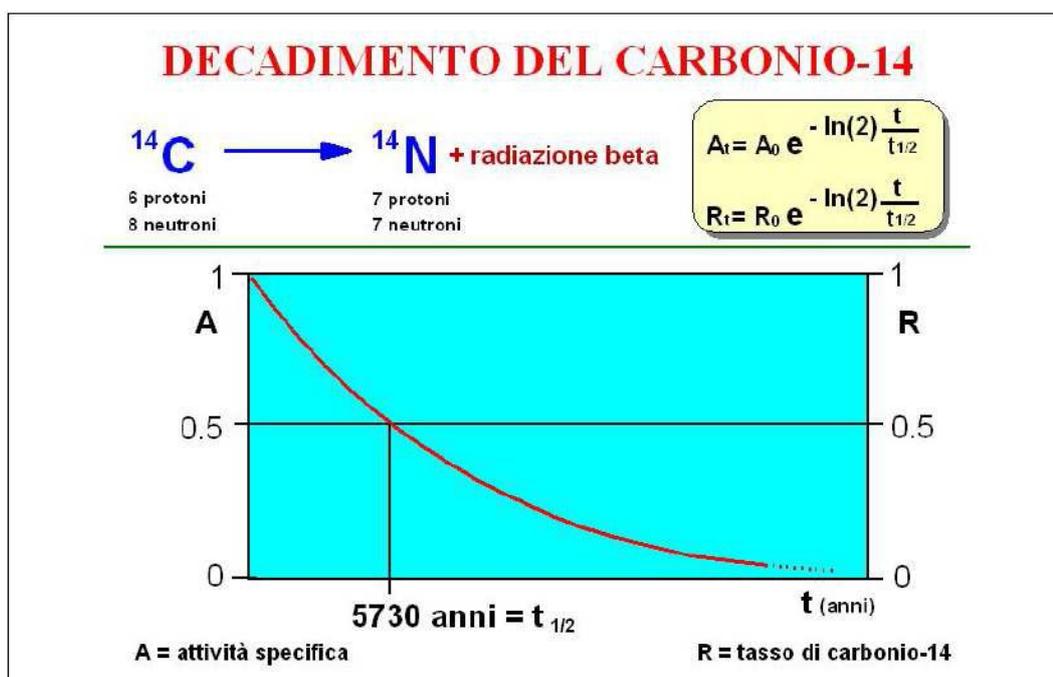


Figura 17. Decadimento del radiocarbonio, da Lazzati (2013).

Questo isotopo ha origine dall'interazione dei raggi cosmici, assunti in prima approssimazione costanti nel tempo, con l'atmosfera e si inserisce poi nel ciclo biochimico terrestre in tempi brevi, risultando pressoché omogeneo nei composti organici, inorganici e nell'atmosfera stessa. L'equilibrio dinamico tra

assorbimento di ^{14}C ed il suo decadimento sussiste solamente finché l'organismo è in vita e, alla sua morte o al seppellimento, il primo dei due processi viene meno. Il decadimento del radiocarbonio invece continua e misurando il tasso di decadimento (metodo convenzionale) o il numero rimanente di ^{14}C (metodo AMS, Accelerator Mass Spectrometry) è possibile stimare da quanto tempo sia stato interrotto lo scambio con l'atmosfera. Il tempo di dimezzamento del ^{14}C permette di applicare questa metodologia fino a 50000-55000 anni fa.

La datazione, detta convenzionale o età al radiocarbonio di Libby, si basa sul confronto tra la frazione di ^{14}C di un campione da datare con quella di materiale organico recente ("standard moderno"), ma fa degli assunti errati. Perciò, le datazioni ottenute vengono poi corrette per il frazionamento isotopico, per una eventuale variazione di ^{14}C dovuta all'effetto "serbatoio" associato al sistema da cui deriva il campione. Tale datazione viene poi calibrata matematicamente, su curve costruite sperimentalmente, dall'analisi di campioni di età nota per ottenere quella che si definisce data calibrata, e che restituisce l'anno in cui si è interrotto lo scambio tra organismo ed atmosfera, per esempio. Questa viene indicata con la sigla "cal", seguita da BC e AD a seconda dei casi.

Una parte importante delle analisi è la preparazione del campione, che consiste in un pretrattamento fisico, con l'asportazione meccanica di tutte le zone più esterne e più suscettibili all'inquinamento, e chimico, che varia in relazione alla natura del campione e alla tipologia di inquinanti che si sospettano essere presenti. Avviene poi il trattamento chimico che ha lo scopo di rendere il campione misurabile dagli strumenti, a seconda del metodo adottato nelle analisi (Hajdas, 2008).

La materia scelta per le datazioni, nel nostro caso, sono dei frammenti vegetali raccolti nelle carote a vari orizzonti di importanza stratigrafica o a livelli che potessero fornire un utile mezzo di interpretazione della successione.

4. Risultati

Le carote sono state campionate in una barena a settentrione della località di Conche, come riportato in fig. 4. Lo sviluppo delle barene nell'area di studio, ma generalmente anche per quanto riguarda l'intera laguna, è sostanzialmente parallelo alla linea di costa e al loro interno si innervano canali tidali meandriformi a differente scala (da metrica a decametrica). In particolare per quanto riguarda le carote analizzate, la distanza della carota 1 dai canali tidali che le sono prossimi, è di una decina di metri verso Nord, circa 7 metri verso Est e circa 5 metri verso Sud (in questo caso di tratta di un canale di ordine minore). La carota 29 invece, dista dal limite della barena approssimativamente 7 metri e 6 metri rispettivamente verso Nord e Ovest, mentre la carota 28 è stata campionata sul fianco di un canale alla distanza di poco meno di 8 metri in direzione Nord dalla barena.

La descrizione delle carote seguirà l'ordine stratigrafico, ovvero da quella che occupa la posizione stratigrafica più bassa (carota 28) a quella che occupa la posizione stratigrafica più alta (carota 1). La descrizione delle carote verrà effettuata dalla base verso il tetto, utilizzando gli spessori decompattati secondo il procedimento già spiegato nel capitolo riguardante le metodologie.

4.1. Carota 28

La carota (fig. 18B) è stata campionata all'interno di un canale tidale alla quota di -107 cm s.l.m. La lunghezza compattata della carota è risultata essere di 48 cm ed è stata decompattata a 150 cm. Questa è infatti la lunghezza del carotatore, che è penetrato completamente nel sedimento. La percentuale di compattazione è stata quindi del 67,3% e la quota reale della base della carota, ricalcolata, è stata individuata in -257 cm s.l.m.

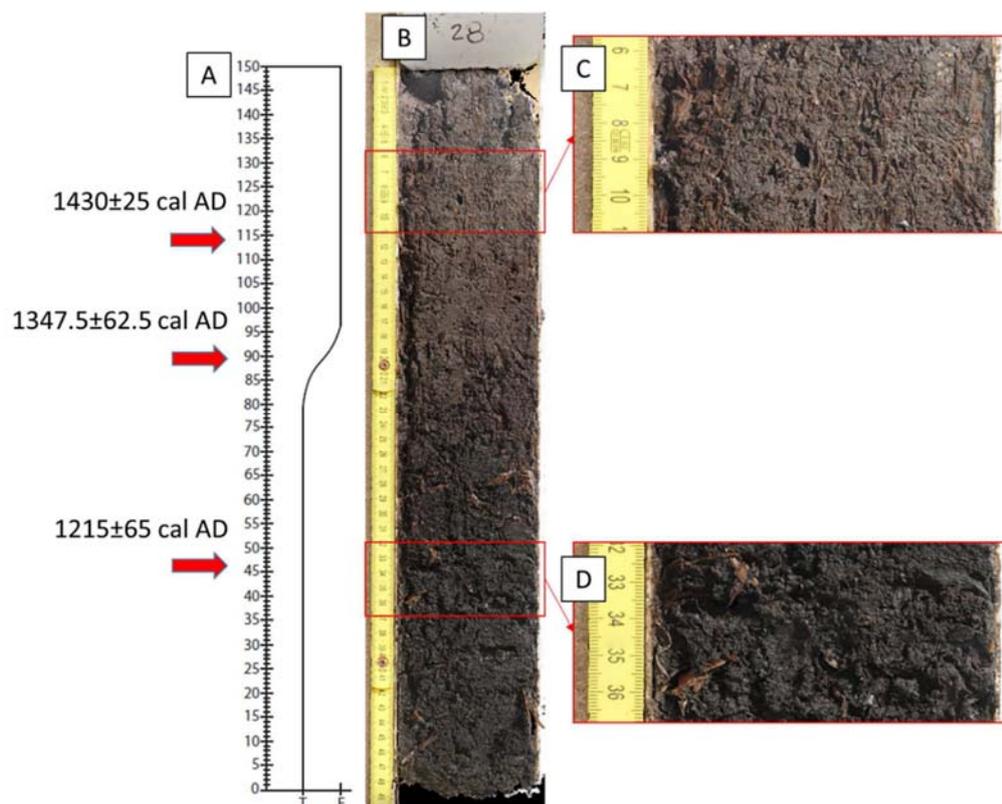


Figura 18. A. Visione complessiva della carota 28; B. Porzione stratigraficamente più elevata, notiamo gli apparati radicali ed i frammenti di canna di piccole dimensioni; C. Base torbosa con particolare sui frammenti di canna di dimensioni maggiori;

4.1.1. Facies sedimentarie

La parte basale, dal centimetro 0 al centimetro 81 circa, consiste di sedimento torboso, di un colore scuro tipicamente associato alla presenza di materia organica. Al suo interno sono evidenti frammenti di canna di spessore e lunghezza cospicui che arrivano rispettivamente fino al centimetro, a qualche centimetro e alcuni anche a 5 cm di lunghezza. La loro distribuzione è piuttosto omogenea all'interno di questa prima facies e non sono state individuate strutture o livelli delineati dal deposito di tali frammenti. Al tetto di questa prima facies si nota un cambiamento nella composizione del sedimento. Approssimativamente dal centimetro 81 infatti, il deposito, che nel suo complesso si può sempre definire torboso, si arricchisce nella componente fangosa e mostra livelli millimetrici ed intercalazioni di fango. Questo, sui toni del grigio-marrone, si distingue anche a livello cromatico dalla torba vera e propria, che si presenta invece di un grigio-

marrone dai toni molto scuri. Avviene pure un cambiamento nella tipologia di frammenti vegetali con l'avvicinamento al tetto della carota. Nel complesso i frammenti di canna presentano dimensioni ridotte rispetto a quelle centimetriche della prima facies, arrivando a dimensioni comprese tra qualche millimetro a non più del mezzo centimetro di spessore. Sono inoltre presenti, a differenza della facies basali, apparati radicali visibili ad occhio nudo che testimoniano la colonizzazione graduale da parte di vegetazione. Dal centimetro 97 fino al tetto della carota, la componente fangosa si stabilizza dopo il graduale aumento avuto nei centimetri precedenti e diventano più comuni i frammenti di canna, soprattutto della tipologia a dimensioni ridotte (seppur qualche esemplare di dimensioni anomale può essere visto lungo il bordo della carota stessa), e gli apparati radicali sopra citati. La distribuzione è sostanzialmente omogenea e presenta un motivo allungato in senso verticale, consistente quindi anche con la posizione di vita.

Il livello basale della carota, ricco in torba e frammenti di canna, documenta un ambiente in cui è avvenuto un forte accumulo di sostanza organica e che viene a crearsi se le condizioni di una palude costiera cambiano in maniera tale che l'influenza tidale sia tanto ridotta da permettere un impaludamento dell'area (Allen, 2000). Questa tipologia di deposito in particolare, previsto da Shennan (1986b) e Waller (1994) come una delle possibili facies torbose di una palude costiera lungo un transetto perpendicolare alla linea di costa, va a delineare una palude costiera a canneto. A sua volta, la presenza dei frammenti di canna ha delle forti implicazioni sulle condizioni ambientali, in quanto il canneto sembra proliferare in condizioni dove ci sia una sufficiente immissione di acque dolci che diminuiscano significativamente la salinità dell'acqua marina e un apporto di nutrienti (Pratolongo et al., 2009).

La parte superiore della carota manifesta un aumento del contributo fangoso nella successione e una chiara laminazione in cui si alternano livelli più ricchi in materia organica e lenti di fango. Inoltre, possiamo notare come ci sia una variazione nel contributo dato dalla vegetazione, che passa da frammenti di canna più che centimetrici a frammenti di canna di dimensioni ridotte e apparati radicali, consistenti con la posizione di vita delle piante stesse. In particolare questi ultimi

rappresentano l'incipiente colonizzazione dell'area da parte di vegetazione alofila. Queste caratteristiche vengono interpretate come un cambiamento dell'ambiente dalla parte basale a quella sommitale della carota. La palude costiera con salinità ridotta lascia qui spazio ad una barena. Infatti la laminazione orizzontale caratterizza peculiarmente tale ambiente (Allen, 2000; Bartholdy, 2012) tenendo conto che a seconda dei contesti, il contributo organico riveste diversa importanza, fino ad avere alcuni livelli particolarmente ricchi in materiale fibroso e radici. La sopravvivenza di una barena è garantita da una complessa interazione di più fattori. Uno di questi è appunto la vegetazione, che contribuisce direttamente ed indirettamente alla sedimentazione in molti modi (Allen, 2000) e che vede nelle piante alofile la sua maggiore componente, seppur le specie variano soprattutto in relazione alla fascia climatica occupata dalla barena. È quindi di grande importanza la variazione nella comunità vegetale che abbiamo tra una facies e l'altra e che permette di convalidare, assieme alla laminazione appunto, il passaggio da un ambiente all'altro.

4.1.2. Contenuto organico

Il contenuto organico viene misurato qui con il solo attacco chimico con acqua ossigenata diluita al 33% ed in un numero ridotto di campioni. I valori ottenuti variano approssimativamente tra il 44%wt ed il 97%wt (fig. 19) e solo in due campioni, 28.16 e 28.10, presenta valori inferiori al 58%wt, rispettivamente 45,87%wt e 44,85%wt. La quantità di materia organica alla base presenta valori significativamente più elevati che nel resto della carota, con valori che partono da 97,43%wt nel campione 28.40 e calano progressivamente fino all' 80%wt circa nel campione 28.19 (centimetro 59 circa). Nei due campioni successivi, approssimativamente al centimetro 53 e al centimetro 31, raggiungiamo il minimo di contenuto organico, come già descritto sopra, per poi avere una sua stabilizzazione a circa il 60%wt a partire dal campione 28.7, centimetro 25, fino al tetto della carota.

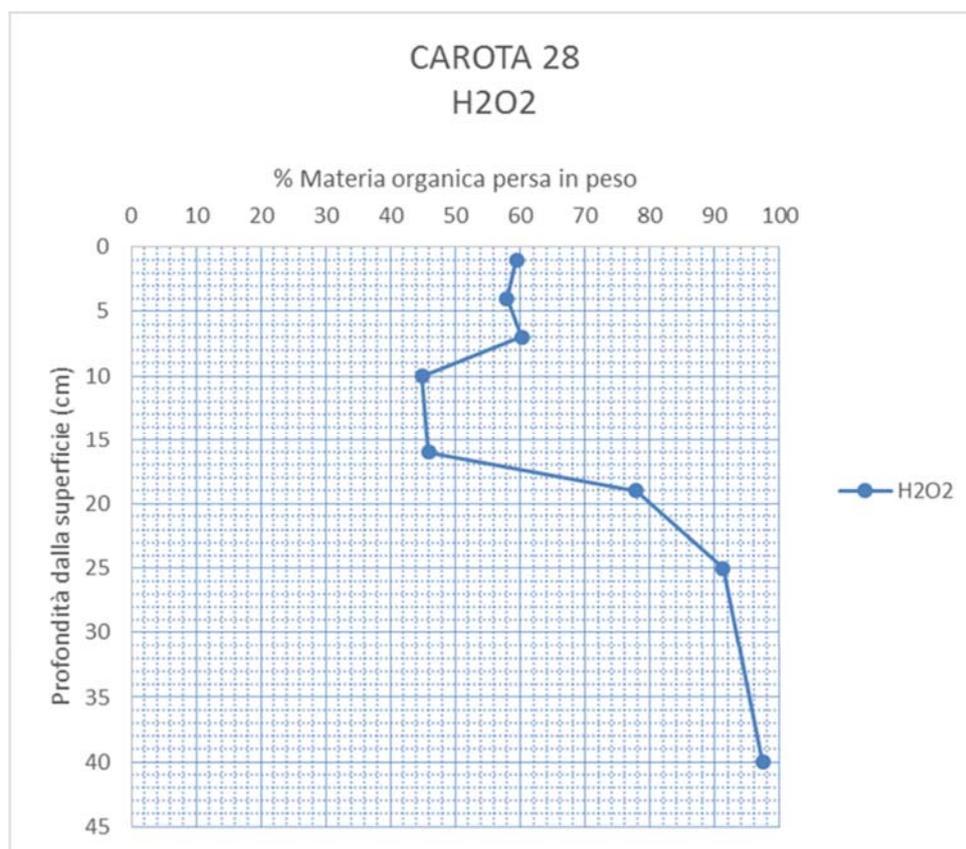


Figura 19. Grafico che mette in relazione il contenuto in materia organica e la profondità dei campioni nella carota 28.

4.1.3. Età

Tre campioni, costituiti da frammenti vegetali, hanno permesso di ottenere date al radiocarbonio. Nello specifico, un campione ubicato nella parte basale della carota, 28.33, ha fornito un'età di circa 800 anni, in quanto riferito all'anno 1215 AD. Al tetto dei depositi torbosi, un secondo campione, 28.19, è stato riferito circa all'anno 1350 AD. Infine, un terzo campione, 28.11, ubicato circa a 20 cm dal tetto della carota è riferibile circa all'anno 1430 AD.

4.2. Carota 29

La carota (fig. 20B) è stata campionata in una zona vegetata della barena alla quota di -8 cm s.l.m. Il carotiere anche in questo caso è penetrato completamente nel sedimento, per cui la lunghezza della carota estratta, 78 cm, è stata

decompattata a 150 cm ed è stata calcolata una percentuale di compattazione pari a 47,3%. La base della carota è stata quindi ubicata a -158 cm s.l.m.

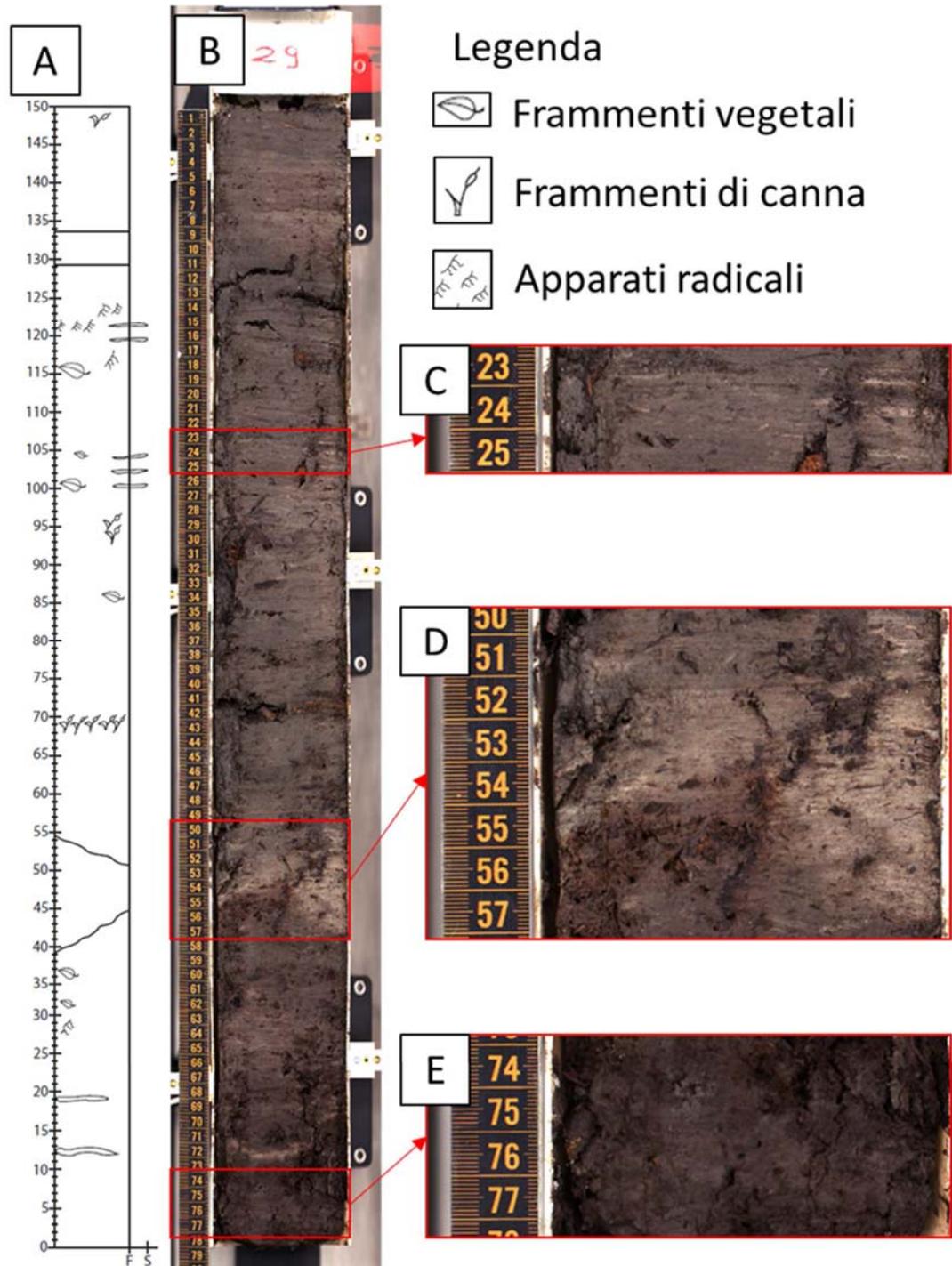


Figura 20. A. Visione complessiva della carota 29; B. Particolare, lenti millimetriche di sabbia fine; C. Strato di fango chiaro massivo che tende a chiudersi verso sinistra nella foto; D. Parte basale torbosa, simile alla parte sommitale della carota 28;

4.2.1. Facies sedimentarie

Il sedimento alla base della carota è simile a quello che è già stato analizzato al tetto della carota 28, con la presenza di apparati radicali e alcuni frammenti di canna di dimensioni consistenti con quelle già menzionate per la parte apicale della carota precedente (fig. 20E). Tuttavia in questo caso non mostrano un pattern ben definito nella loro disposizione ma sono piuttosto frammenti sparsi allungati in senso verticale. Avanzando verso il tetto, intercalate a questo tipo di deposito, abbiamo approssimativamente tra 11 e 13 centimetri e tra 17 e 19 centimetri delle lenti di sedimento fangoso massivo di una tonalità di grigio chiaro, rispettivamente di spessore poco più che centimetrico e di poco superiore al mezzo centimetro. Una decina di centimetri al di sopra dell'ultima delle due lenti si notano, al centimetro 29 alcuni apparati radicali e successivamente alcuni frustoli vegetali. Un piccolo strato di fango chiaro, che nuovamente non presenta particolari strutture, va dal centimetro 38 al 54 circa e tende a chiudersi, seppur non alla scala della carota, mantenendo comunque più di 5 cm di spessore (fig. 20D). Al suo interno, a differenza delle precedenti intercalazioni fangose, si notano apparati radicali e frammenti vegetali che sembrano mostrare una disposizione preferenziale in direzione diagonale allo strato che viene sottolineata dai toni più scuri, dovuti con ogni probabilità alla materia organica presente. Al centimetro 67 è presente un livello di un paio di centimetri di spessore, formato da frammenti di vegetali delle dimensioni già riscontrate precedentemente. Alcuni frammenti di canna sono localizzati anche al centimetro 92 e si sviluppano fino al centimetro 96, ma si notano altri contributi vegetali la cui origine non è facilmente risolvibile. Approssimativamente ai centimetri 100, 102 e 103 sono evidenti delle lenti di qualche millimetro di spessore di sabbia fine, ben cernita e di una tonalità chiara che le rende facilmente riconoscibili (fig. 20C). Alcuni frammenti vegetali si trovano al centimetro 115 e a qualche centimetro verso il tetto della carota si trovano anche degli apparati radicali che si sviluppano in verticale per poco più di un centimetro. Questi ultimi, pur assumendo una direzione verticale, delineano dei livelli orizzontali che interessano solo qualche centimetro dello spessore della carota. Alcune lenti di sabbia fine di caratteristiche analoghe a quelle viste in

precedenza si trovano ai centimetri 119 e 121, tra i livelli dati dalle radici. Tra i centimetri 129 e 135 circa si presenta uno strato di fango chiaro, senza strutture sedimentarie evidenti e con l'assenza di frammenti vegetali. Questa assenza si protrae fino al tetto della carota, dove si incontra solamente un frustolo verticale di qualche millimetro di spessore, chiaramente rimaneggiato in vista del contesto della parte apicale della carota 29.

La base della carota è simile al tetto di quella precedente per quanto riguarda la tipologia di deposito, e quindi, di ambiente che rappresenta. Tuttavia, rispetto alla parte sommitale della carota 28, si notano delle lenti di fango massivo di colore chiaro e di spessore che varia approssimativamente dal mezzo centimetro al centimetro e una minor frequenza dei frammenti di canna, che erano quantomeno comuni nella carota già analizzata. Queste lenti, che diventeranno veri e propri livelli decimetrici o centimetrici in posizioni stratigrafiche più elevate, manifestano un importante apporto di sedimento inorganico che si alterna a livelli organici. Questa alternanza di livelli inorganici ed organici è tipica di un ambiente di barena ben sviluppato, in cui l'apporto inorganico viene prevalentemente dal carico in sospensione associato alla fase di alta marea che sommerge la barena, mentre quello organico dalla vegetazione che la colonizza (Allen, 2000). Nella colonna d'acqua è presente il cosiddetto fango tidale (Allen, 2000), che rappresenta un miscuglio in varie proporzioni di diversi elementi tra cui flocculi polimineralici, grani minerali singoli ed altri aggregati provenienti da sorgenti di varia natura (es. apporti fluviali, sedimenti esposti sul fondo marino, parti dure di organismi che vivano nelle piane tidali adiacenti, contributi antropici) (Allen, 2000). Nelle fasi di alta marea, il livello dell'acqua si alza via via e va ad interagire in maniera complessa con l'apparato fogliare e gli steli delle piante alofile. Questa interazione complessa prevede, sia uno smorzamento della velocità della corrente, che permette il deposito delle particelle in sospensione, sia un intrappolamento da parte dello stesso apparato fogliare delle piante, ma anche un incanalamento dei flussi in alcune direzioni preferenziali (Allen, 2000). Le prime favoriscono la deposizione, mentre l'ultima, l'erosione. La sedimentazione, invece, è più uniforme quando l'alta marea supera la quota della vegetazione

colonizzatrice. Un'altra caratteristica che non compare nella carota precedente, sono le lenti di sabbia ben cernita e che probabilmente, rappresentano la rielaborazione di depositi precedenti da parte del moto ondoso, che tende a selezionare il sedimento sabbioso classandolo dal punto di vista granulometrico ed, a sospendere ed asportare la frazione limosa. La presenza di tali lenti di qualche millimetro di spessore, si può imputare ad eventi di tempesta che abbiano investito la costa, contribuendo all'apporto clastico con la rimobilizzazione ed il trasporto di sedimento al di sotto della profondità di base d'onda di bel tempo. Un'ultima considerazione può essere fatta sul frammento di canna localizzato al tetto della carota, i frammenti di canna infatti sono assenti da diverse decine di centimetri, mentre gli apparati radicali della vegetazione alofila sono dominanti. In questo contesto, data anche la posizione di questo frammento che non ricalca quella di vita, può essere considerato un frammento organico rielaborato da un processo di cannibalizzazione, magari di livelli inferiori della stessa barena.

4.2.2. Contenuto organico

Il contenuto organico è stato misurato sia con l'attacco chimico, che con il metodo LOI, ottenendo risultati che presentano andamenti assolutamente confrontabili (fig. 21). Per quanto riguarda l'attacco chimico con acqua ossigenata, la materia organica consumata dal processo varia tra il 25% ed il 55% in peso del campione, con una labile tendenza a diminuire gradualmente verso il tetto della carota stessa. I valori della percentuale di materia organica, presentano molte oscillazioni con un'ampiezza assoluta piuttosto elevata che arriva anche a 15 punti percentuali, pur attestandosi mediamente su valori inferiori ai 10. L'analisi LOI si presenta come la medesima curva, con lo stesso lieve calo in materia organica dalla base al tetto, ma che spazia tra il 15%wt ed il 36%wt di contenuto organico. I valori assoluti sono quindi minori sia per quanto riguarda la media aritmetica, circa 36%wt per l'attacco chimico, contro il 20%wt della LOI, che per quanto riguarda le oscillazioni che si attestano mediamente a qualche unità. A partire dal campione 29.58, in entrambe le curve viene ad annullarsi la lieve tendenza alla diminuzione

della percentuale della materia organica. I valori di questa infatti, pur oscillando, si mantengono mediamente stabili e prossimi ai valori medi di entrambe le analisi.

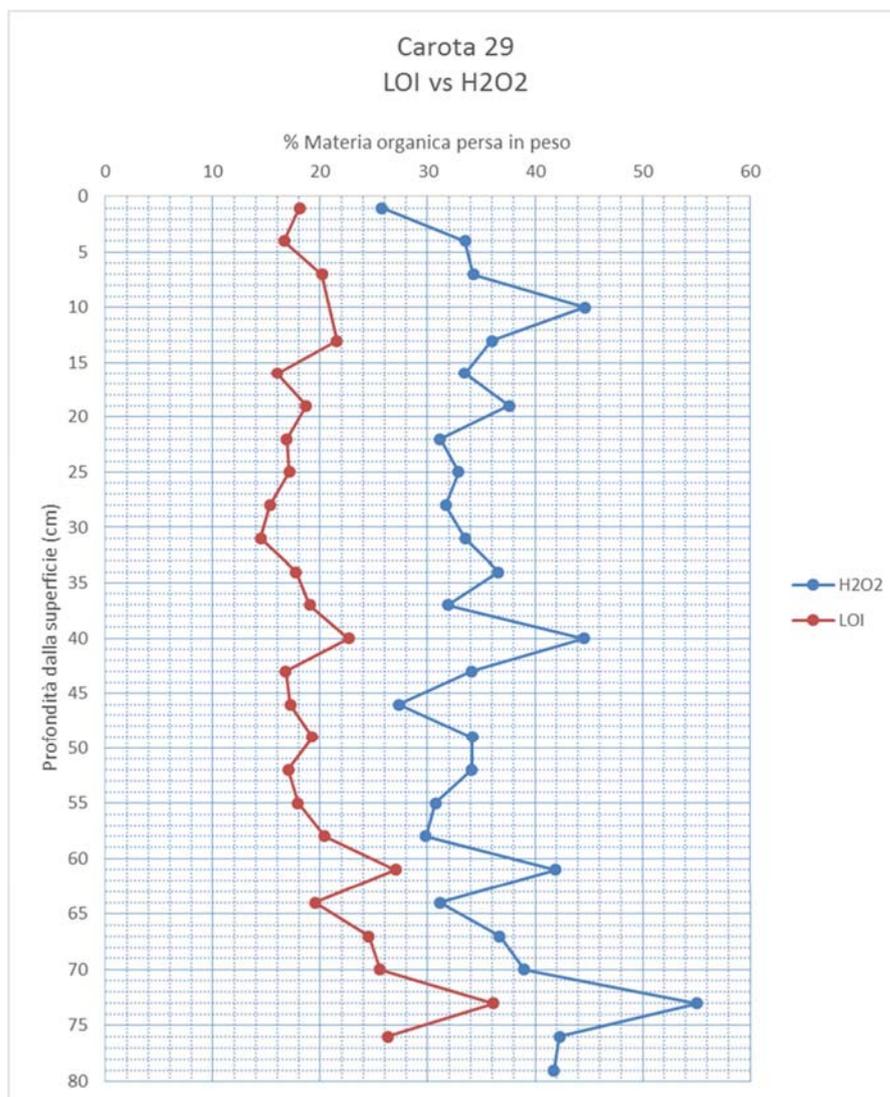


Figura 21. Grafico che mette in relazione il contenuto in materia organica (LOI, acqua ossigenata) e la profondità dei campioni nella carota 29.

4.2.3. Età

In questa carota non sono state effettuate datazioni assolute.

4.3. Carota 1

Anche la carota 1 (fig. 22B) è stata campionata in una zona vegetata della barena, ad una quota di +19 cm s.l.m. Il carotiere non è penetrato completamente, ma solo

fino al centimetro 137, per cui la carota estratta di 111 cm di lunghezza è stata decompattata a 137 cm. La base della carota è stata quindi calcolata alla quota -118 cm s.l.m. e la compattazione al 19% circa.

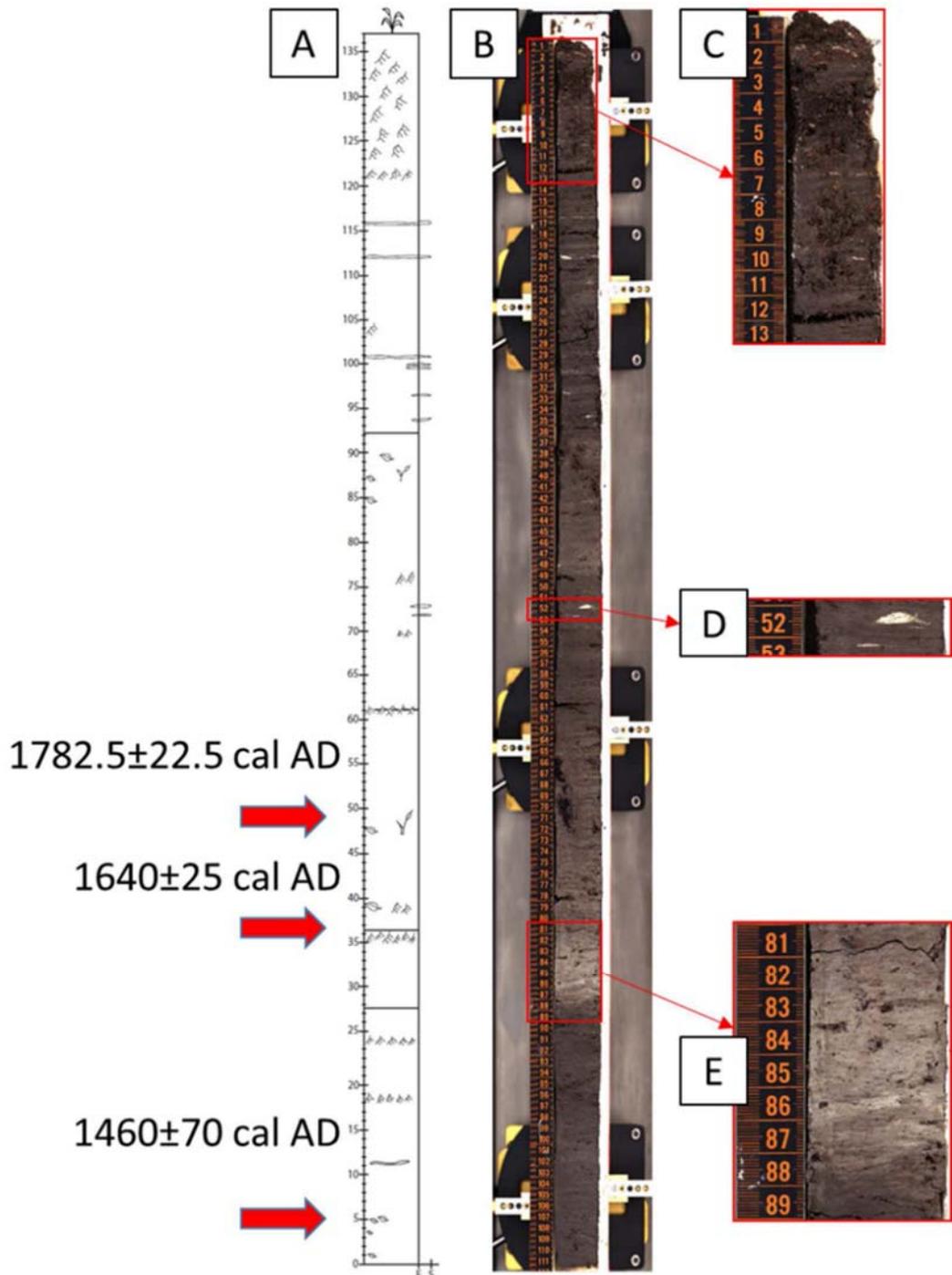


Figura 22. A. Visione complessiva della carota 1; B. Porzione al tetto della carota; C. Lenti millimetriche di sabbia; D. Strato di fango chiaro;

4.3.1. Facies sedimentarie

La carota alla base presenta uno strato di fango scuro debolmente laminato che arriva al centimetro 28 circa. Al suo interno si notano dei frammenti vegetali, probabilmente riconducibili a canne mediante di qualche millimetro di spessore, e tra i centimetri 11 e 12 una lente millimetrica di fango chiaro massiva. Per avere l'evidenza di apparati radicali, bisogna attendere dei livelli di più di mezzo centimetro di spessore, posti tra i centimetri 18 e 20 e successivamente tra i centimetri 24 e 26. Uno strato di fango chiaro di una decina di centimetri, va approssimativamente dal centimetro 28 al centimetro 37 (fig. 22E). Questo strato di fango è laminato e rari frammenti vegetali, al più di qualche millimetro, sono ubicati casualmente senza delineare nessun motivo. Al tetto di questo strato, abbiamo un livello di radici e, subito dopo, un nuovo strato che differisce dal precedente per un graduale passaggio da fango di tonalità più chiara a uno di tonalità più scura. La laminazione crea una successione di livelli millimetrici di fango più chiaro e fango più scuro, alcuni millimetrici e altri di qualche millimetro, fino al centimetro 62. Dominano, nella prima parte, i livelli chiari e nella seconda quelli scuri, dando così origine alla transizione da un tono all'altro. Alcuni apparati radicali e frammenti vegetali, da qualche millimetro a poco meno di un centimetro di lunghezza, sono posizionati a pochi centimetri dalla base dello strato ed un grande frammento di canna di un paio di centimetri di lunghezza si trova al centimetro 48 circa. Il tetto dello strato viene delineato da un livello di apparati radicali al centimetro 62. Lo strato successivo, che arriva approssimativamente fino al centimetro 93, presenta una laminazione nella sua parte inferiore mentre diviene più massivo in quella superiore. È generalmente povero in frammenti organici che si concentrano per lo più al tetto dello strato, dove, al centimetro 88 circa, si può vedere un frammento di canna della lunghezza di un paio di centimetri. Ai centimetri 73 e 74 sono localizzate delle lenti di sabbia fine ben cernita (fig. 22D), rispettivamente dello spessore di qualche millimetro e di più di mezzo centimetro, in particolare, quest'ultima presenta strutture sedimentarie che permettono di definirla come ripple, con l'evidenza di quello che potrebbe essere il lee side. Dal centimetro 93 uno strato di fango più

scuro e laminato arriva fino al tetto della carota, al centimetro 137. La laminazione è data da livelli di fango di spessore piuttosto variabile, da centimetrico a millimetrico, e di colore che varia nei toni del grigio scuro. Questa trama viene in parte obliterata nella parte apicale della carota dove, a partire da un livello ben delineato di apparati radicali al centimetro 121, ci sono diverse radici disposte piuttosto omogeneamente, anche se non presentano un vero e proprio motivo (fig. 22C). Anche in questo strato sono presenti delle lenti di sabbia fine, ben cernita e di spessore millimetrico, o al più di pochi millimetri, tuttavia si evidenziano anche veri e propri livelli millimetrici del medesimo sedimento. Queste lenti e livelli, segnalati nel log, si trovano tra i centimetri 94 e 95, 96 e 97, 99 e 100, 101, 110 e 112. La forma di alcune lenti ricorda quella di una ripple, ma non sono evidenti come nel caso precedente, strutture che possano chiarire la loro natura.

L'interpretazione della tipologia dei depositi è simile a quella della carota 29. Fin dal livello basale si notano laminazioni più o meno definite, in varie tonalità di grigio che stanno a rappresentare un'alternanza di sedimento più o meno ricco in materia organica. Una barena stabile infatti sopravvive, sia grazie al contributo inorganico, che a quello organico dato dalla vegetazione che la colonizza (Allen et al, 2000). Dal punto di vista dei frammenti vegetali, i frammenti di canna sono piuttosto scarsi, mentre predominano gli apparati radicali. Questo sta ad indicare un ambiente salmastro, in quanto le canne per sopravvivere hanno bisogno di un apporto di acqua dolce (Pratolongo et al., 2009) e la loro presenza sporadica può segnalare degli immissioni o dei deboli contributi fluviali in laguna. Come nella carota 29, anche nella carota 1 abbiamo delle lenti e livelli millimetrici, o al più di qualche millimetro di sabbia fine, ben cernita probabilmente grazie all'azione del moto ondoso. Questi sono espressione di eventi di tempesta che risospendono sedimenti depositi al di sotto del livello di base d'onda di bel tempo, trasportandoli in questo caso fin sulla superficie della barena. Questi livelli si concentrano soprattutto nella parte superiore della carota, quasi ad indicare una maggiore frequenza degli eventi di tempesta in tempi più recenti. Gli ultimi due decimetri della carota presentano una generale obliterazione delle strutture

sedimentarie, causata dall'azione degli apparati radicali della vegetazione alofila che colonizza attualmente la barena: ciò si spiega il fatto che il tetto della carota coincida con la superficie attuale della barena stessa.

4.3.2. Contenuto organico

Nell'analisi del contributo organico (fig. 23) si notano, sia per quanto riguarda la metodologia dell'attacco chimico con acqua ossigenata, che per la LOI, lievi oscillazioni attorno ad un valore medio, che si attesta rispettivamente attorno al 30% e al 15%, senza individuare una qualsiasi tendenza netta dalla base al tetto. I valori del contenuto organico misurato con l'acqua ossigenata diluita, variano tra il 43%wt al 20%wt, mentre per quanto riguarda la LOI la variazione è compresa tra 20%wt e 14%wt. L'attacco chimico con acqua ossigenata presenta quindi oscillazioni di ampiezza superiore a quelle date dall'analisi LOI, ma gli andamenti sono simili, seppur non identici come nel caso della carota 29, ed è evidente, soprattutto nell'analisi LOI, l'assenza di un'evoluzione in un senso o nell'altro del contenuto organico.

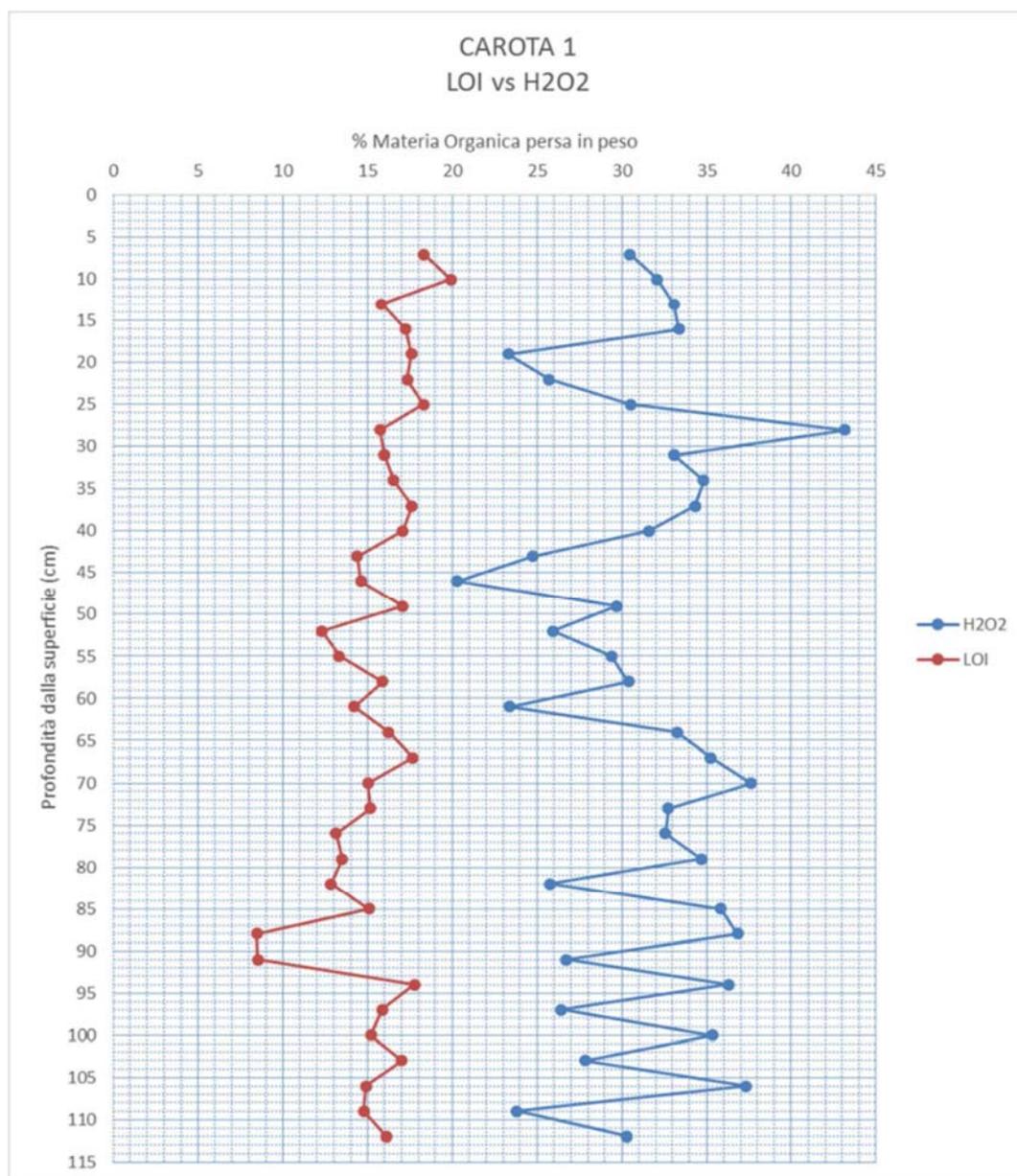


Figura 23. Grafico che mette in relazione il contenuto in materia organica (LOI, acqua ossigenata) e la profondità dei campioni nella carota 1.

4.3.3. Età

Tre campioni, costituiti da frammenti vegetali, hanno permesso di ottenere date al radiocarbonio. Nello specifico, un campione collocato in prossimità della base della carota è attribuibile circa all'anno 1460 AD. Altri due campioni, collocati rispettivamente a 70 ed 80 cm dal tetto della carota, sono attribuiti circa agli anni 1640 AD e 1780 AD.

5.1. Interpretazione e discussione

La sintesi dei dati raccolti con le differenti metodologie è stata condensata nella figura 24, dove compaiono sia la quantità di materia organica che, l'interpretazione in chiave ambientale delle facies viste nell'analisi delle tre carote.

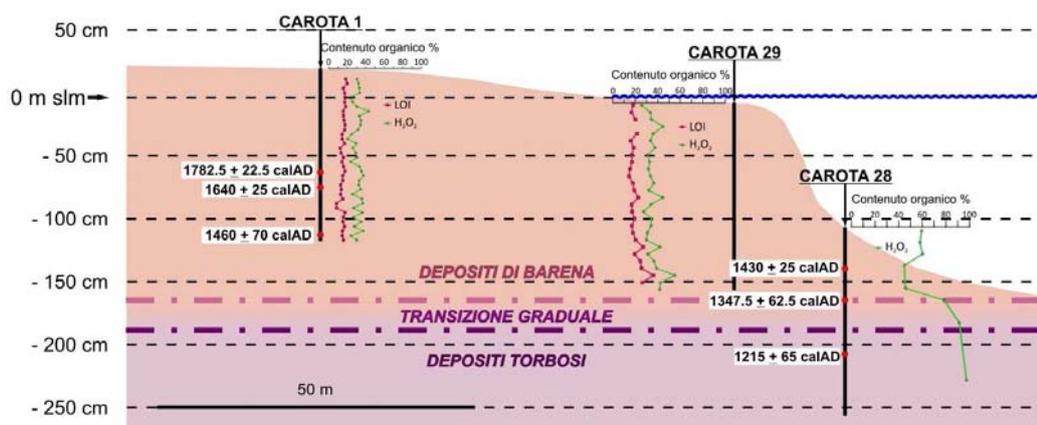


Figura 24. Sintesi dei dati raccolti.

5.2. Storia deposizionale

L'integrazione del dato di sottosuolo fornisce un quadro stratigrafico che vada dalla posizione stratigrafica più bassa, carota 28, a quella più elevata, carota 1.

La base della carota 28 viene calcolata a -257 cm s.l.m., mentre il suo tetto si trova a -107 cm s.l.m. Essendo la base della carota 29 localizzata alla quota -158 cm s.l.m., questa si sovrappone alla carota precedente per 51 cm.

La successione di facies vede alla base un intervallo torboso, interpretabile come una palude dulcicola, che le datazioni evidenziano essere già stabilita al 1215±65 cal AD e che non è già più presente nel 1347.5±62.5 cal AD. Ipotizzando che il tasso di sedimentazione sia stato costante in questo lasso di tempo (circa 130 anni), questo è stato calcolato essere di 3,26 mm/a, sicuramente sotto stimato a causa dell'autocompattazione che gli strati torbosi subiscono.

I depositi più propriamente torbosi, ricchi di frammenti di canna, passano ad un deposito dove la componente fangosa aumenta via via che aumenta la quota e

cominciano a comparire frammenti di canna di dimensioni più modeste ed alcuni apparati radicali. Questo viene identificato come un ambiente di transizione tra quello della palude costiera dulcicola, dominata dal canneto, ad uno di barena. L'interpretazione di tale cambiamento si basa su più fattori. La laminazione orizzontale, data dall'alternarsi di livelli e lenti di fango e di materia organica, è caratteristico di tale ambiente (Allen, 2000; Bartholdy, 2012). In particolare, in una barena dove sia importante il contributo organico, come è in questo caso (vedi contenuto di materia organica nei grafici), possono presentarsi livelli in cui si concentra del materiale fibroso di origine organica e delle radici. Un altro elemento che differenzia i due ambienti è il cambiamento nella comunità floristica con la scomparsa delle canne palustri e l'apparizione di elementi a basso fusto, che caratterizzano i contesti di barena.

L'affermazione di tale ambiente si collocherebbe, secondo una datazione fatta sul campione 28.19, circa nel 1347 cal AD. Nella stessa carota, campione 28.11, è stata effettuata una seconda datazione, sempre all'interno della facies pertinente all'ambiente di barena, ed è risultata una data calibrata corrispondente al 1430 AD circa. Dalle due datazioni possiamo calcolare un tasso di sedimentazione medio, che corrisponde a 3 mm/a, in linea con quello calcolato per la facies transizionale. L'ambiente di barena trova espressione anche nelle facies delle altre due carote. In particolare, la parte basale della carota 29 è simile al tetto della carota 28, ma all'aumentare della quota aumenta anche la componente fangosa e compaiono delle intercalazioni di fango chiaro, prima in forma di lenti di pochi millimetri al più e poi con uno strato di diversi centimetri. Non mancano, seppur distribuite non omogeneamente, radici, e frustoli vegetali che in taluni casi formano dei veri e propri orizzonti. Nella parte superiore della carota sono presenti anche alcune lenti e livelli di sabbia, che manifestano il contributo sedimentario di eventi di tempesta. La loro prima evidenza si ha circa a quota -58 cm s.l.m. e arrivano fino a qualche decimetro al di sotto del tetto della carota. In questa carota, costituita interamente da depositi di barena, non sono state effettuate datazioni al radiocarbonio e quindi non può essere attribuita un'età alle diverse quote.

La carota 1 arriva ad una quota di -118 cm s.l.m. alla base, mentre il tetto della carota 29 si trova a -8 cm s.l.m. Si sovrappongono quindi per 110 cm. La carota 1 si sovrappone, per quanto riguarda la quota, anche con la carota 28 per 1 cm.

La carota 1, a differenza della 29, è stata oggetto di tre datazioni effettuate sui campioni 1.70, 1.80 e 1.112. Questi mostrano rispettivamente un'età calibrata corrispondente al 1460 ± 70 AD, 1640 ± 25 AD, 1782 ± 22 AD. Il tasso di sedimentazione varia quindi fortemente: tra il 1460 AD ed il 1640 AD si accumulano 38 cm di depositi con un tasso di 2,1 mm/a, tra il 1640 ed il 1782 invece quest'ultimo diminuisce a 0,9 mm/a e infine tra il 1782 e l'attuale (2014) aumenta a 3,5 mm/a, corrispondente in pratica a quello che interessava l'area tra il 1215 ed il 1347 (3,26 mm/a) e poco maggiore a quello avuto tra il 1347 ed il 1430 (3 mm/a).

Queste datazioni confermano inoltre lo sviluppo della barena che a partire dal 1347 cal AD giunge fino all'attuale (2014), seppur con tassi di deposizione variabili. La successione è essenzialmente la medesima della carota 29, a cui si sovrappone per la maggior parte. Anche le quote a cui si presentano alcuni orizzonti o strati sono confrontabili, come quelle dei livelli di fango più pronunciati o gli intervalli con livelli di sabbia.

In sintesi, l'integrazione delle analisi sedimentologiche con le datazioni al radiocarbonio suggerisce l'instaurarsi di un ambiente di barena, a spese di una palude costiera, intorno al 1350 AD.

Lo studio di un'area come quella della Laguna di Venezia permette la taratura del dato stratigrafico attraverso le cronache storiche degli eventi e le antiche carte della laguna, alcune anche precedenti al XV secolo d.C. Questa è un'opportunità che offrono pochi contesti al mondo, in quanto la presenza umana nella regione è stata importante fin dall'epoca romana ed è diventata capillare dopo il mille, con i primi insediamenti urbani presso le isole lagunari e la successiva nascita della Serenissima Repubblica di Venezia. In quest'ottica si presenta quindi la possibilità di verificare gli eventi più importanti che hanno interessato il bacino lagunare, ed in particolare il sito oggetto di questa indagine, ed i loro effetti sulla successione sedimentaria.

Alla base della carota 28, la presenza di frammenti di canna, come già detto precedentemente, implica un apporto di acque dolci piuttosto consistente e un sufficiente apporto di nutrienti (Pratolongo et al., 2009). Gli apporti fluviali supposti in vista dell'analisi di facies effettuata possono essere imputati ad un corso fluviale che nelle "Note illustrative della carta geomorfologica della provincia di Venezia" (2004) viene individuato da un'integrazione di evidenze geologiche, geomorfologiche, storiche ed archeologiche. Infatti un fiume attivo in epoca romana scorreva da Noventa per Camin e poi Saonara, dove un corso d'acqua risulta attivo tra il X secolo a.C. ed il XI secolo d.C., seppur con una discontinuità dovuta probabilmente ad alcune avulsioni. Successivamente attraversava il dosso di Arzergrande e si immetteva nel bacino lagunare attraverso due rami, uno presso Fogolana e l'altro nei pressi di Casone Morosina. Questo fiume, che viene menzionato anche nelle cronache di alcuni storici romani, tra cui Plinio, è il "*Medoacus Minor*" ed è plausibilmente un antico ramo minore del fiume Brenta stesso. Al termine dell'epoca romana (tra il 450 AD ed il 650 AD), vista la scarsa manutenzione del territorio e probabilmente un intensificarsi delle precipitazioni, il territorio di Venezia fu colpito da alluvioni, anche violente (589 AD), e avulsioni fluviali (Pirazzoli et al., 1980). Queste provocarono un mutamento nell'idrografia e delle importanti immissioni di acqua dolce e sedimenti nel bacino lagunare, soprattutto in vicinanza delle foci dei fiumi, tra cui il Brenta, che si immetteva all'epoca appunto nella Laguna Meridionale, ma che estendeva la sua influenza anche alla laguna centrale, immettendovisi con alcuni rami. Questa immissione di acque dolci permise, probabilmente, la diffusione di paludi costiere e la proliferazione del canneto, che a sua volta intrappolò i sedimenti fluviali e partecipò alla formazione dei depositi litoranei di torba. La ramificazione di tale corso contribuiva, probabilmente, alla dispersione del carico sedimentario, favorendo lo sviluppo di aree palustri a cannuce rispetto a contesti di barena.

Il passaggio dall'ambiente di palude costiera all'ambiente di barena viene datato al 1347 cal AD circa dalle analisi effettuate. Tuttavia, tale cambiamento deve per forza di cose coincidere con un evento di grande portata che abbia interessato la

Laguna Meridionale e che potrebbe essere associato in una variazione dell'apporto di sedimento inorganico. Infatti si registra una diminuzione considerevole del contenuto organico (fig. 19), che passa rapidamente dal 91%wt al 45%wt circa nella transizione tra un ambiente e l'altro.

Negli ambienti di barena il sedimento inorganico può venire da più fonti. Allen (2000) ne individua cinque in particolare: apporto fluviale in vicinanza della costa; coste rocciose in stato di ritiro; formazioni sedimentarie o rocce esposte sul fondo del mare prossimo al sito; contributo di organismi che abbiano delle parti dure; fonte antropogenica. Nel caso della Laguna di Venezia, l'unico fattore che possa aver avuto un grande impatto sull'ambiente costiero, tale da mutarne gli equilibri, è l'apporto fluviale.

Nel 1300 AD il fiume Brenta, principale fonte di apporto clastico nella laguna, si immetteva però in laguna nei pressi di Fusina e nel 1330 AD grazie ad un'intestatura, nel bacino di Boccalama (D'Alpaos, 2010). Entrambe queste località sono site nella Laguna Centro-Settentrionale. Il fiume è stato deviato in prossimità di Conche solo attorno al 1502 AD e ha confluito in tale area fino al 1540 AD, quando è stato estromesso dalla Laguna di Venezia e spostato nella Laguna di Brondolo, poco a Sud di Chioggia.

In questo contesto, la datazione al radiocarbonio, che ha permesso di individuare l'instaurarsi di barena, non è consistente con quelle che sono le cronache storiche dell'immissione del Brenta nella Laguna Meridionale, fatto che, con ogni probabilità, ha permesso la messa in posto delle barene nei pressi di Conche. Non ci sono altri eventi precedenti che possano aver causato l'unico cambiamento di facies nella successione studiata, per cui si propone di attribuire all'orizzonte che rappresenta la transizione da un ambiente all'altro, un'età corrispondente ai primi del 1500, prescindendo da quelli che sono stati i risultati ottenuti nelle datazioni effettuate sui campioni 28.33 e 28.19. Queste infatti potrebbero essere state affette da qualche errore o state effettuate su frammenti vegetali rimaneggiati, mentre le fonti storiche e le evidenze delle altre analisi svolte avvalorano quest'ultima interpretazione fatta.

Il primo campione datato della carota 1 risale al 1460 ± 70 cal AD e possiamo quindi considerarlo contemporaneo all'immissione del Brenta nel bacino lagunare nei pressi di Conche. Proprio in quel periodo, secondo le considerazioni precedenti, si sarebbe affermata stabilmente la barena, che è sopravvissuta fino ad oggi, attraversando periodi di apporti più o meno importanti. Le altre due datazioni, 1640 ± 25 cal AD e 1782.5 ± 22.5 cal AD, infatti, sono precedenti alla seconda immissione del fiume in laguna, sempre nel bacino di Chioggia ma a Fogolana, avvenuta tra il 1840 AD ed il 1896 AD. I tassi di sedimentazione sono in linea con le osservazioni fatte sopra: nel primo intervallo di tempo la presenza del Brenta in prossimità dei siti campionati aumenta in maniera sensibile il tasso medio di deposizione ($2,1$ mm/a), che puntualmente cala in maniera cospicua nel periodo successivo ($0,9$ mm/a), in cui il fiume sfocia invece nella Laguna di Brondolo. Infine, nell'arco di tempo che comprende gli anni successivi al 1782 fino ai giorni nostri, il Brenta viene di nuovo a trovarsi nei pressi dell'area di studio e di nuovo il tasso di sedimentazione aumenta di molto ($3,5$ mm/a).

Possiamo quindi concludere che il nuovo cambiamento nella forzante, che ha permesso la nascita delle barene del sito studiato, non si è tradotta in un netto cambio di facies, come era precedentemente successo. Anzi, la successione verticale è sostanzialmente omogenea con variazioni di scarsa rilevanza e l'unico cambiamento apprezzabile è quello nel tasso di sedimentazione medio. Una volta che l'ambiente di barena si è stabilizzato, pertanto, le variazioni di apporto clastico contribuiscono alla variazione della sua estensione laterale, ma non causano significativi cambi nelle dinamiche deposizionali. Durante il XVI secolo infatti, il bacino di Chioggia subì interrimenti tali da far prendere la decisione di estromettere completamente il fiume Brenta dalla laguna e di immetterlo nella Laguna di Brondolo, poi scomparsa (D'Alpaos, 2010). Per quanto riguarda il secondo tentativo di incanalarlo verso la Laguna di Chioggia effettuato nel 1840 AD, gli effetti furono simili. La sua immissione nella laguna provocò lo sviluppo di un ventaglio alluvionale emergente che portò all'interramento di oltre 30 km² di laguna ed il parziale interrimento dei canali lagunari (Zunica, 1974; Note illustrative della carta geomorfologica della provincia di Venezia, 2004). In vista

di ciò, il Brenta fu estromesso definitivamente dalla laguna nel 1896 AD e reimpresso nella precedente foce, a Brondolo, dove è attualmente localizzato.

5.2. Risposta del sistema a forzanti antropiche

Un ambiente di barena è soggetto a delle forzanti individuate nei cambiamenti nel livello relativo del medio mare e nell'estensione di marea, nell'apporto sedimentario inorganico, nella produttività della vegetazione (sopra e sotto il livello del suolo) e nel tasso di autocompattazione alla superficie della barena (Allen, 2000). Queste forzanti, le prime due esterne al contesto della barena e le seconde due interne, hanno un peso più o meno importante a seconda dei casi e delle condizioni al contorno. Tuttavia, la variazione di anche uno solo dei fattori sopra elencati porta a pensare che si verificherà un cambiamento degli equilibri all'interno di questo delicato ambiente e quindi, che questo risponderà alle sollecitazioni in una qualsiasi maniera. In particolare, un lavoro sullo sviluppo delle barene nell'estuario di Plum Island (Massachusetts, USA) evidenzia come l'espansione della fascia interessata dalle barene possa essere legata anche ad un aumento dell'apporto sedimentario, piuttosto che al cambiamento nella velocità di risalita del livello medio mare (Kirwan et al., 2011). Infatti, le barene si sono diffuse rapidamente tra il XVIII ed il XIX secolo in risposta all'aumento degli apporti sedimentari associato all'insediamento dei coloni europei, quando il terreno venne deforestato e coltivato in maniera più intensa e quindi esposto ai processi erosivi. Casi simili si registrano peraltro nel Firth of Thames (Nuova Zelanda) e nella baia di San Francisco (California) (Kirwan et al., 2011).

Mudd (2011) evidenzia come un ambiente di barena possa rispondere ad un significativo incremento di apporto sedimentario (fig. Mudd). Da un lato abbiamo l'aumento dell'elevazione, sia della superficie della barena, che della piana subtidale che favorisce la colonizzazione della vegetazione alofila. In conseguenza aumentano l'efficienza nell'intrappolare sedimento, ma anche l'apporto organico in se stesso. Diminuisce invece il potere erosivo dei flussi di marea e delle onde, soprattutto al limite delle barene. Questo perché l'energia viene dissipata, prima dai fondali posti ad una quota più elevata, attorno al 25%

per un aumento di quota di 15 cm (Mariotti et al., 2010; Mudd, 2011), e poi, ulteriormente smorzati dall'azione delle piante. Stumpf (1983) concluse che, sia la turbolenza che la velocità di flusso, sono di un ordine di grandezza minore all'apice della vegetazione della barena rispetto ai canali tidali, risultato confermato da Wang et al. (1993), secondo cui la velocità delle correnti tidali sarebbe ridotta al 10-20% in maniera analoga. In un altro lavoro (Moller et al., 1999) si è riscontrato che le onde fossero attenuate in presenza di piante approssimativamente del 50% in più rispetto ad una piana sabbiosa della stessa profondità. Diminuisce anche il prisma tidale, ovvero la quantità di acqua che deve entrare ed uscire dall'estuario in un ciclo tidale. Tale diminuzione, dovuta all'aumento di quota precedentemente trattato, va a causare una riduzione nell'attrito al fondo e favorisce i processi deposizionali rispetto a quelli erosivi anche nella piattaforma subtidale (Mariotti et al, 2010, Mudd, 2011). Tutti questi aspetti portano ad un'espansione delle barene e dell'area che esse occupano.

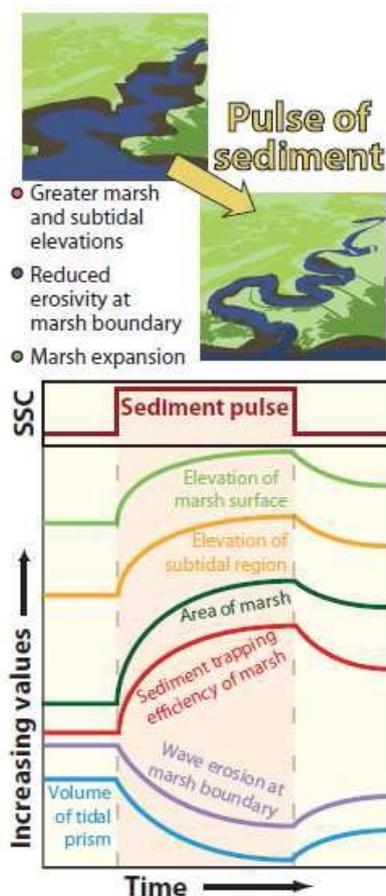


Figura 25. Tratto da Mudd(2011), risposta ad un aumento dell'apporto sedimentario.

Nel caso della Laguna di Venezia qui trattato, le carote mostrano una successione di facies tale per cui c'è un passaggio da un ambiente di palude costiera, documentata dal sedimento più torboso, ad un ambiente di transizione ed infine alla barena vera e propria che sopravvive anche attualmente.

Tale successione si è accumulata durante le diverse fasi di immissione ed estromissione del fiume Brenta in laguna. La presenza del fiume si traduce essenzialmente in un apporto di sedimento inorganico che può contribuire alla formazione delle barene e che le favorisce nel mantenersi al di sopra del livello medio mare, contrastando fenomeni quali l'innalzamento eustatico del livello del mare, la subsidenza e l'autocompattazione (Allen, 2000). Questo è un punto fondamentale, in quanto l'esistenza della barena è legata alla combinazione tra crescita della vegetazione, variazione del livello del mare, topografia, apporto sedimentario (organico e inorganico) e relazioni dinamiche (Bartholdy, 2012). Proprio la vegetazione esercita un ruolo fondamentale sia nell'intrappolare sedimento inorganico, oltre che nello smorzare la velocità dei flussi, che nel fissare e proteggere dall'erosione il terreno su cui cresce, ma anche nel contribuire essa stessa alla sedimentazione con apporti organici. La sopravvivenza della vegetazione coincide quindi con la sopravvivenza della barena stessa, in quanto, se quest'ultima si evolve, o attraverso una sedimentazione ridotta, o attraverso un incremento del tasso di risalita del livello medio mare, fino ad una profondità inferiore al livello medio di alta marea (Bartholdy, 2012), allora le piante alofile moriranno e la barena annegherà. L'annegamento spesso si traduce in una rapida perdita di elevazione della barena, poiché alla morte della vegetazione questa non esercita più il suo ruolo di protezione contro i processi erosivi, la laguna evolverà in una piana subtidale (Fagherazzi et al., 2006; Mudd, 2011).

L'accrezione verticale delle barene consiste nel cambio di elevazione, come funzione dall'accumulo netto dovuto sia all'apporto sedimentario esterno che all'apporto organico interno dato dalle piante, quindi, la somma dei due contributi va presa in considerazione per la sopravvivenza dell'ambiente di barena, al contrario, la sopravvivenza di questa implica che la somma dei due contributi sia stata sufficiente a mantenerla al di sopra del livello medio mare.

Ecco quindi, che nella barena studiata, vista in quest'ottica e visto l'alternarsi tra presenza ed assenza del fiume Brenta, debbano essersi innescati dei processi tali per cui, la deficienza di sedimento inorganico dovuto all'apporto fluviale sia stata compensata per scongiurare l'annegamento.

Kirwan (2011) evidenzia come una barena, una volta innescatesi i feedback che la caratterizzano, possa mantenersi al di sopra del livello medio di alta marea anche con un apporto inorganico inferiore a quello necessario perché si sviluppi. Mentre la riduzione nella concentrazione del sedimento tende ad abbassare la quota relativa al medio mare delle zone vegetate e più erosivi i canali, la sommersione dell'area di barena stimola la crescita della vegetazione che si concretizza in un intensificarsi dell'accrezione verticale (maggior apporto organico e capacità di intrappolamento), ma anche in un contrasto all'erosione del suolo (Kirwan et al., 2011). Tuttavia, viene sottolineato anche, come le osservazioni di campagna indichino che ci sia un limite oltre il quale i feedback ecogeomorfici non riescano più a supportare l'esistenza della barena.

In questo contesto, date le premesse qui sopra analizzate, ci si aspettava un incremento nella percentuale di materia organica contenuta nei campioni nei periodi in cui il fiume Brenta ed il suo carico di sedimenti fossero lontani dall'area di studio. Dovrebbe essere stato questo aumento a compensare la diminuzione nel contributo inorganico.

Tuttavia, dalle analisi effettuate, questa si è rivelata un'ipotesi non veritiera. Non solo non si nota un aumento nella percentuale di materia organica nei periodi di estromissione del fiume dalla laguna, ma non si rivela neppure nessuna forte tendenza nell'intera storia deposizionale dei siti studiati, sia per quanto riguarda le analisi LOI che per l'attacco chimico con acqua ossigenata. Le curve delle due analisi sono sostanzialmente parallele l'una all'altra ed il contenuto organico è stabile nella successione: le carote 1 e 29 si attestano attorno allo stesso valore, mentre, per la parte superiore della carota 28 abbiamo valori più elevati. Da ciò emerge una assoluta indifferenza alla variazione della forzante qui presa in considerazione (i.e. immissione ed estromissione del Brenta) da parte dell'ambiente di barena. Secondo Mariotti e Carr (2014), una barena può

mantenere un equilibrio verticale mentre si ritira orizzontalmente e si riduce l'area che occupa, in relazione ai processi erosivi che ne possono interessare il limite. Questi processi, assieme all'erosione al fondo delle piane tidali e alla generazione di onde, danno un rapporto di feedback positivo che può causare un collasso della barena (Mariotti e Fagherazzi, 2013). Un minor apporto sedimentario può generare un approfondimento della piana tidale, che inibisce l'espansione della barena favorendone il ritiro. Infatti, un approfondimento della piana tidale ha come effetto anche quello di aumentare il potenziale erosivo delle onde che colpiscono il bordo della barena. Il ritiro di quest'ultima inoltre aumenta l'area occupata dalla piana tidale e di nuovo la forza delle onde, in un rinnovarsi del ciclo. Questo processo, favorito dalla risalita relativa del mare che approfondisce i fondali, è controllato principalmente dall'apporto sedimentario e, a testimonianza di ciò, il sistema risponde attraverso un ritiro orizzontale, anche in assenza di risalita relativa del livello del mare (Mariotti et al., 2013).

Tuttavia, in questo contesto sono proprio i processi erosivi a garantire un flusso di sedimenti dalla piana tidale alla barena. In altri termini, tutti i processi che riducano il rimaneggiamento nella piana tidale antistante la barena riducono anche la disponibilità di sedimento e ne promuovono l'annegamento. Solo un elevato apporto sedimentario può prevenire sia l'annegamento, che il ritiro di questa. In caso contrario, che qui è rappresentato dallo spostamento della foce del fiume Brenta, una piana tidale ed una barena in erosione possono fornire sedimento che aiuti a contrastare l'annegamento della barena stessa. Quest'ultima, nella sua evoluzione è quindi fortemente connessa all'estensione della piana tidale: se questa è ridotta anche il flusso sarà tale e viceversa. Ricordiamo anche che, se la barena annega e la vegetazione muore, vengono a mancare tutti quei processi che ne garantiscono l'accrezione verticale, prescindendo dall'estensione della piana tidale (Mariotti e Carr, 2014).

Nelle modellizzazioni (Mariotti e Carr, 2014), per un ampio intervallo di parametri, il ritiro orizzontale della barena avviene per un apporto sedimentario esterno che non causi il suo annegamento. Questo invece, diviene il processo

dominante nel caso in cui la risalita del livello relativo del mare sia elevata e l'apporto sedimentario alloctono sia basso.

Uno scenario in cui ci sia un ritiro orizzontale che favorisce il mantenimento dell'elevazione della barena, non può essere realistico nel lungo termine, in quanto vi sarebbe l'erosione completa della stessa. Comunque, tale processo permette la sopravvivenza del sistema per un tempo considerevole, anche alcune migliaia di anni. In un arco di tempo così ampio, le forzanti a cui è soggetto il bacino possono variare in maniera considerevole, come è successo nel caso veneziano, permettendo anche un passaggio da espansione a ritiro e viceversa (Mariotti e Carr, 2014).

Il mantenimento di un equilibrio verticale nella barena dell'area di studio può essere quindi spiegato tramite questi processi. Consistentemente tale equilibrio verrebbe mantenuto a discapito dell'estensione areale di questo ambiente, che è ciò che avviene nella Laguna di Venezia attualmente. Lo smantellamento del limite della barena dovrebbe fornire un apporto tale da supplire all'apporto fluviale che viene a mancare, almeno per quanto riguarda la verticale, garantendo la sopravvivenza della barena stessa attraverso un fenomeno di cannibalizzazione.

6. Conclusioni

Le principali conclusioni tratte da questo lavoro posso essere riassunte nei seguenti punti:

- 1) La successione presa in esame è rappresentata da depositi torbosi palustri dello spessore di circa 90 centimetri, caratterizzati da frammenti di canna di grandi dimensioni, alla base. Questi depositi passano verso l'alto ad una facies transizionale dello spessore di una decina di centimetri. Tale facies è caratterizzata dall' aumento di livelli di fango e dalla comparsa di vegetazione alofila. Al di sopra di questi depositi sono presenti sedimenti di barena spessi circa 170 centimetri. Questi sono laminati, con l'alternarsi di livelli in fango più chiaro e più scuro. La laminazione è interrotta a tratti da orizzonti di radici, da frammenti vegetali, ma anche da strati di fango massivo, di colore più chiaro. Ad una cinquantina di centimetri dal tetto della successione, appaiono lenti ed orizzonti di sabbia fine, ben cernita, che in alcuni casi sono delineate da strutture tipo ripple, probabilmente prodotti durante eventi di tempesta, quando la superficie della barena era spazzata da correnti generate da moto ondoso.
- 2) Dall'integrazione di età al radiocarbonio e del dato storico, risulta che la barena si sia sostituita alla palude costiera attorno al 1500 AD. Tale cambiamento sarebbe derivante da un aumento dell'apporto sedimentario clastico, possibilmente associato all'immissione in laguna del fiume Brenta, che proprio attorno al 1500 AD è stato immesso nei pressi dell'area di studio.
- 3) Il contenuto in materia organica rimane sostanzialmente invariato nelle carote 29 ed 1 dalla base al tetto dei depositi di barena. Le oscillazioni del contributo organico, seppur presenti, non evidenziano alcuna tendenza. Ciò permette di affermare che, il sistema di barena una volta che si è sviluppato, si mantiene stabile anche con un apporto sedimentario ridotto (estromissione del Brenta dalla laguna), in linea con quanto affermato da altri autori (Kirwan et al.,

2011; Mudd, 2011), e che non avvengono significative variazioni nelle dinamiche deposizionali.

In queste condizioni, la barena è stabile solo da un punto di vista dell'accrescimento verticale, mentre, per quanto riguarda l'estensione areale può essere interessata sia da progressiva espansione, che contrazione.

- 4) I due metodi utilizzati nella valutazione della componente organica, LOI e attacco chimico, evidenziano contenuti di sostanza organica diversi, ma trend di variazioni molto simili. Tuttavia, entrambi i metodi presentano vantaggi e svantaggi.

L'attacco chimico con acqua ossigenata sembra in grado di rimuovere una maggior quantità di sostanza organica dai sedimenti. Inoltre, l'oscillazione più ampia della curva suggerisce al pari una maggiore sensibilità del metodo. Un ulteriore aspetto positivo è la possibilità di eseguire ulteriori analisi granulometriche sulla frazione inorganica residua. Il consumo della materia organica tramite questa metodologia richiede però una spesa di tempo ingente, che la rende particolarmente svantaggiosa nel caso di analisi su molti campioni.

Tra gli aspetti a favore del metodo LOI c'è invece una maggiore rapidità e praticità nelle analisi, che si somma all'ampia diffusione del metodo, rendendo possibile il confronto tra risultati ottenuti da studi diversi.

Bibliografia

Allen, J.R.L. Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Reviews* 19 (2000) 1155-1231.

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

Barillé-Boyer, A., Barillé, L., Massé, H., Razet, D., Héral, M. Correction for particulate organic matter as estimated by loss on ignition in estuarine ecosystems. *Estuarine, coastal and shelf science* 58 (2003) 147-153.

Barlett, J.B., Rubble, R.W., Thoma, R.P. The influence of hydrogen peroxide treatment on the exchange capacity of Maryland soils. *Soil Sci.* 44 (1937) 123-128.

Bellucci, L.G., Frignani, M., Cochran, J.K., Albertazzi, S., Zaggia, L., Cecconi, G., Hopkins, H. ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs as chronometers for salt marsh accretion in the Venice Lagoon – links to flooding frequency and climate change. *Journal of Environmental Radioactivity* 97 (2007) 85-102.

Bondesan, A., Meneghel, M., et al, *Geomorfologia della provincia di Venezia. Note illustrative della carta geomorfologica della provincia di Venezia.* 2004.

Brambati, A., Carbognin, L., Quaia, T., Teatini, P., Tosi, L. The Lagoon of Venice: geological setting, evolution and land subsidence. *Episodes* 26 (2003), 264–268.

D'Alpaos, L. Fatti e misfatti di idraulica lagunare, la laguna di Venezia dalla diversione dei fiumi alle nuove opere alle bocche di porto. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti 44 Memorie (2009).

Eusterhues, K., Rumpel, C., Kleber, M., Kögel-Knabner, I. Stabilization of soil organic matter by interactions with minerals as revealed by mineral dissolution and oxidative degradation. *Org. Geochem.* 34 (2003) 1591-1600.

Fagherazzi, S., Carniello, L., D'Alpaos, L., Defina, A. Critical bifurcation of shallow microtidal landforms in tidal flats and salt marshes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 103 (2006), p. 8337–8341.

Frangipane, G., Pistolato, M., Molinaroli, E., Guerzoni, S., Tagliapietra, D. Comparison of loss on ignition and thermal analysis stepwise methods for determination of sedimentary organic matter. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems* 19 (2009) 24-33.

Godwin, H. Half-Life of Radiocarbon. *Nature*, 195 (1962): 984.

Hajdas, I. Radiocarbon dating and its applications in Quaternary studies. *Quaternary Science Journal* 57 (2008) 2-24.

Heiri, O., Lotter, A. F., Lemcke, G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of paleolimnology* 25 (2001) 101-110.

Hosking, J.S. The influence of hydrogen-ion concentration on the decomposition of soil organic matter by hydrogen peroxide. *J. Agric. Sci.* 22 (1932) 92-100.

Kahle, M., Kleber, M., Torn, M.S., Jahn, R. Carbon storage in coarse and fine clay fractions of illitic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67 (2003) 1732-1739.

Kirwan, M. L., Murray, A. B., Donnelly, J. P., Corbett, D. R. Rapid wetland expansion during European settlement and its implication for marsh survival under modern sediment delivery rates. *Geology* (2011); 39; 507-510.

Mariotti, G., Carr, J. Dual role of salt marsh retreat: long-term loss and short-term resilience. *Water Resources Research*, 50 (2014), 2963-2974.

Mariotti, G., Fagherazzi, S. Critical width of tidal flats triggers marsh collapse in the absence of sea-level rise. *PNAS*, vol. 110, no. 14 (2013), 5353-5356.

Mariotti, G., Fagherazzi, S., Wiberg, P.L., McGlathery, K.J., Carniello, L., and Defina, A. Influence of storm surges and sea level on shallow tidal basin erosive processes: *Journal of Geophysical Research*, v. 115 (2010), p. C11012.

Mclean, W. The nature of soil organic matter as shown by the attack of hydrogen peroxide. *J. Agric. Sci.* 21 (1931b) 595-611.

Mikutta, R., Kleber, M., Kaiser, K., Jahn, R. Review: Organic matter removal from soils using hydrogen peroxide, sodium hypochlorite, and disodium peroxodisulfate. *Soil Science Society of America Journal*, Volume 69, January-February 2005.

Möller, I., Spencer, T., French, J.R., Leggett, D.J., Dixon, M. Wave transformation over salt marshes: a field and numerical modelling study from North Norfolk, England. *Estuar Coastal Shelf Sci.* 49 (1999):411-426.

Mudd, S. M. The life and death of salt marshes in response to anthropogenic disturbance of sediment supply. *Geology* (2011); v. 39; no. 5; p. 511-512.

Pratolongo, D. P., Kirby, J. R., Plater, A., Brinson, M. M., Temperate coastal wetlands: morphology, sediment processes and plant communities. Coastal wetlands: an integrated ecosystem approach (2009).

Reed D.J., Spencer, T., Murray, A., French, J.R., Leonard, L. Marsh surface sediment deposition and the role of tidal creeks: implications for created and managed coastal marshes. *J. Coast Conserv.* 5 (1999):81–90.

Robinson, G.W. Note on the mechanical analysis of humus soils. *J. Agric. Sci.* 12 (1922) 287.

Santisteban, J. I., Mediavilla, R., López-Pamo, E., Dabrio, C. J., Zapata, M. B. R., García, M. J. G., Castaño, S., Martínez-Alfaro, P. E. Loss on ignition: a qualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments? *Journal of paleolimnology* (2004).

Sequi, P., Aringhieri, R. Destruction of organic matter by hydrogen peroxide in the presence of pyrophosphate and its effect on soil specific surface area. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41 (1977) 340-342.

Shennan, I. Holocene sea-level changes in the Fenland. II: Tendencies of sea-level movement, altitudinal change, and local and regional factors. *Journal of Quaternary Science* 1 (1986b), 155}1179.

Stumpf, R.P. The process of sedimentation on the surface of a salt marsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 17 (1983), 495}508.

Tosi, L. L'evoluzione paleoambientale tardo-aternaria del litorale veneziano nelle attuali conoscenze. *Il Quaternario* 7 (1994°), 589–596.

Tosi, L., Rizzetto, F., Bonardi, M., Donnici, S., Serandrei Barbero, R., Toffoletto, F. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. 128 - Venezia. APAT, Dipartimento Difesa del Suolo, Servizio Geologico d'Italia, Casa Editrice SystemCart, Roma (2007a), pp. 164, 2 allegati cartografici.

Tosi, L., Rizzetto, F., Bonardi, M., Donnici, S., Serandrei Barbero, R., Toffoletto, F. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. 148–149 - Chioggia-Malamocco. APAT, Dipartimento Difesa del Suolo, Servizio Geologico d'Italia, Casa Editrice SystemCart, Roma (2007b), pp. 164, 2 allegati cartografici.

Waller, M. The Fenland Project number 9: environmental change in the Fenland. Chelmsford, Essex County Council (1994).

Wang, F.C., Lu, T., Sikora, W.B. Intertidal marsh suspended sediment transport processes. Terrebonne Bay, Louisiana. *Journal of Coastal Research* 9 (1993), 209–220.

Zecchin, M., Baradello, L., Brancolini, G., Donda, F., Rizzetto, F., Tosi, L. Sequence stratigraphy based on high-resolution seismic profiles in the late Pleistocene and Holocene deposits of the Venice area. *Marine Geology* 253 (2008) 185-198.

Zecchin, M., Brancolini, G., Tosi, L., Rizzetto, F., Caffau, M. Baradello, L. Anatomy of the Holocene succession of the southern Venice lagoon revealed by very high-resolution seismic data. *Continental Shelf Research* 29 (2009) 1343-1359.

Zunica, M. La bonifica Delta Brenta. Un esempio di trasformazione del paesaggio nella Laguna di Venezia. *Rivista Geografica Italiana*, Annata LXXXI- Fasc. 3 (1974), Arti Grafiche Giorgi & Gambi, Firenze, 60 pp.