



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

**DISTRIBUZIONE SPAZIALE DEL COEFFICIENTE DI
DISPERSIONE INTERMAREALE NELLA LAGUNA DI VENEZIA
PASSATA, PRESENTE E FUTURA**

RELATORE: PROF. ANDREA DEFINA

CORRELATORE: ING. LUCA CARNIELLO

LAUREANDA: FEDERICA VINCI

ANNO ACCADEMICO 2012 - 2013

INDICE

CAPITOLO 1

<i>Introduzione</i>	1
---------------------------	---

CAPITOLO 2

<i>Evoluzione morfologica della laguna di Venezia</i>	3
---	---

2.1 LO STATO ATTUALE	“ 4
2.2 EVOLUZIONE MORFOLOGICA DELLA LAGUNA FINO AI GIORNI NOSTRI	“ 12
2.3 IPOTESI DELLA MORFOLOGIA LAGUNARE NEL 2050	“ 22

CAPITOLO 3

<i>La Dispersione Intermareale</i>	23
--	----

3.1 IL MODELLO DI DISPERSIONE INTERMAREALE. L'APPROCCIO LAGRANGIANO	“ 25
3.1.1 Le velocità residue	“ 26
3.1.2 La dispersione	“ 27
3.1.3 Il 'random walk'	“ 28
3.1.4 Il moto browniano	“ 29
3.2 IL PROCESSO DI DISPERSIONE	“ 34

CAPITOLO 4

<i>Metodi e Modelli di Calcolo.</i>	35
---	----

4.1 IL MODELLO IDRODINAMICO	“ 41
4.2 IL MODELLO DI MONITORAGGIO DELLE PARTICELLE	“ 43

CAPITOLO 5

<i>Analisi dei Risultati</i>	43
5.1 IL MODELLO LAGRANGIANO	“ 53
5.2 IL COEFFICIENTE DI DISPERSIONE MEDIO	“ 60

CAPITOLO 6

<i>Risultati a Confronto</i>	61
------------------------------------	----

CAPITOLO 7

<i>Conclusioni</i>	65
<i>Bibliografia</i>	67

1. INTRODUZIONE

L'ambiente lagunare, rappresentato in Figura 1, è una realtà articolata e complessa la cui esistenza e funzionalità è regolata da moltissimi fattori tra loro complementari.

Le acque di Venezia, in particolare, sono da sempre oggetto di studio ed interesse di numerosi esperti in materia, per l'importanza commerciale, sociale, ecologica e storica che questa città ancora possiede; nell'ultimo secolo quindi ci si è concentrati soprattutto sulla salvaguardia dell'ambiente di fronte al tanto imminente quanto discusso problema dell'acqua alta che affligge Venezia dalle sue origini e che ai nostri giorni rappresenta un pericoloso e a lungo termine memorabile danno.

La questione però andrebbe affrontata avendo una visione generale di quest'area partendo dalla sua genesi, analizzando dettagliatamente la sua evoluzione, valutando nel tempo il contributo dell'uomo volto alla tutela di Venezia (che non sempre ha portato a conseguenze positive) per infine avere una panoramica totale ed esaustiva della situazione ed operare in base a questa.

Quindi, oltre all'osservazione del naturale evento di marea devono essere presi in considerazione diversi parametri significativi per un accurato studio indirizzato alla tutela di Venezia. Per esempio: il processo di sommersione dovuto all'azione combinata dell'innalzamento del livello medio del mare (eustatismo) con la subsidenza; perciò si dovrebbero valutare l'entità del consolidamento dei materiali fini argillosi che caratterizzano il sottosuolo e come già accennato, il contributo dell'uomo che, a favore dello sviluppo industriale di Porto Marghera, ha sottratto dalle falde del sottosuolo notevoli quantità d'acqua depressurizzando l'ambiente e procurando la compattazione dei livelli.

In particolare, l'intervento umano e lo sfruttamento di questo territorio per fini economici, quali la costruzione di aree industriali, impianti di acque reflue urbane e campi agricoli nell'entroterra, hanno causato l'inevitabile inquinamento dell'ambiente acquatico.

Dal momento che le attività in quest'ambiente sono sempre più presenti e pressanti, si vuole mettere in luce, servendosi di un particolare parametro detto

coefficiente dispersivo intermareale, il ricambio idrico, e quindi la qualità delle acque, per fare una prima ipotesi sulla situazione che si verificherà nella laguna del 2050, confrontando poi i risultati con i dati estrapolati per lo stato attuale e per quelli ricavati dalla morfologia che caratterizzava il bacino nel 1901.

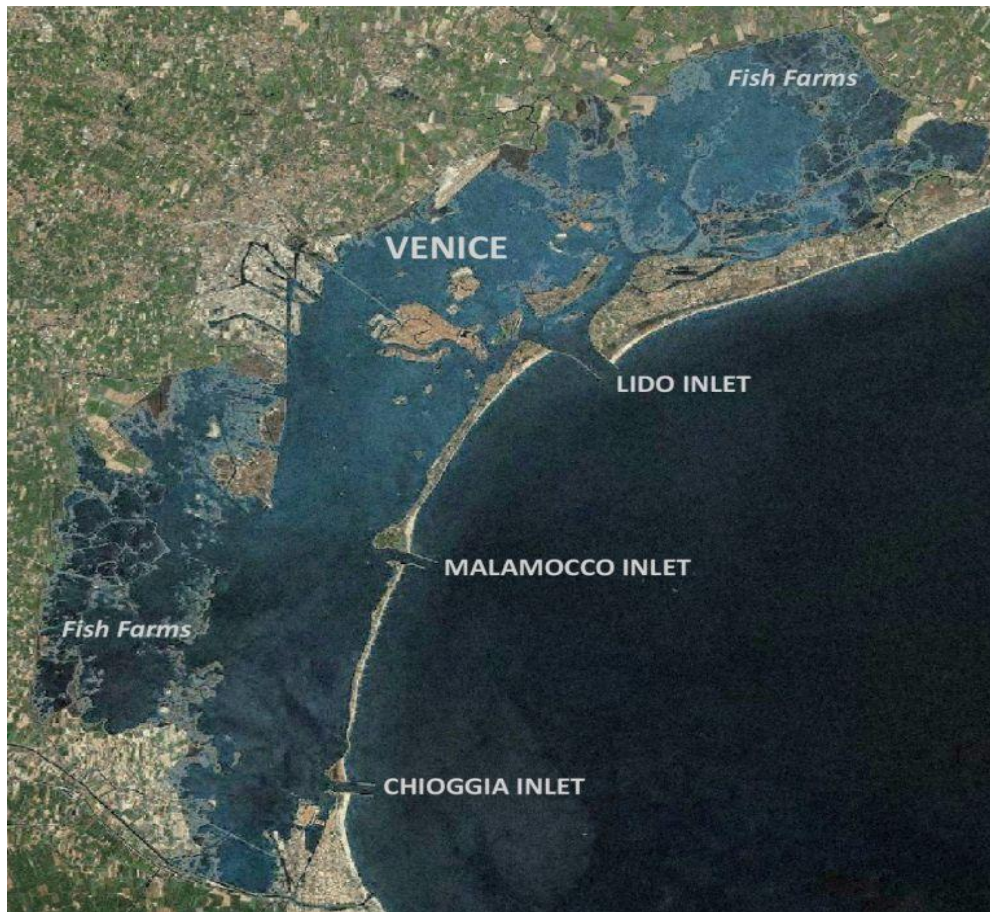


Figura 1 - Laguna di Venezia_2010

2. EVOLUZIONE MORFOLOGICA DELLA LAGUNA DI VENEZIA

2.1. Lo stato attuale

Secondo le attuali teorie le lagune costiere si sono formate ad opera del trasporto dei sedimenti portati dai fiumi che, per l'effetto combinato di svariati fattori, si accumulano in allineamenti paralleli alla costa, intrappolando tratti di mare.

La laguna di Venezia è la più vasta laguna italiana, presenta una superficie di 550 km², una larghezza media di 10 km e una lunghezza di circa 50 km, il suo bacino scolante è di 1870 km². La profondità della laguna è molto variabile: dai 15-20 m nei canali di porto, a 1-3 m negli specchi d'acqua, fino a pochi centimetri nei bassifondi. Essa comunica con il mare aperto attraverso le bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia, che conferiscono a questo sistema il carattere salmastro delle acque e la particolare conformazione delle terre emerse e dei fondali; le sue acque sono sottoposte quotidianamente ad un doppio ricambio ad opera del flusso mareale in entrata e in uscita che ne favorisce l'ossigenazione e il disinquinamento per diluizione.

L'evoluzione del sistema lagunare è dovuto sia a fattori naturali che antropici; questi ultimi comprendono, per esempio, la diversione di alcuni fiumi che sfociavano in essa, la riduzione della superficie lagunare utile all'espansione di marea a causa della costruzione di valli da pesca e casse di colmata ed infine il dragaggio dei canali che ha modificato l'idrodinamica interna.

La continua erosione della laguna di Venezia porterà, di questo passo, al progressivo approfondimento dei fondali e alla scomparsa di ghebi, velme e barene; ciò determinerà gravi conseguenze sull'intero ecosistema, come ad esempio la riduzione della biodiversità specifica di piante e animali e il degrado complessivo della qualità dell'ambiente.

Un accenno particolare lo si deve alle barene, ambienti caratterizzati da un elevato dinamismo, che svolgono un ruolo fondamentale sia come regolatrici dell'idrodinamica lagunare che come habitat per numerose specie di uccelli, ospitando una ricca vegetazione che aiuta la deposizione di sedimento. Sono

ambienti estremamente complessi, costantemente sottoposti a pressioni naturali e antropiche. Hanno il considerevole compito di moderare l'azione del moto ondoso e limitare, attraverso l'intrappolamento favorito dalla vegetazione che vi cresce, la dispersione dei sedimenti presenti in laguna.

Elemento maggiormente caratteristico delle barene è infatti la presenza della vegetazione alofila: piante capaci di svolgere il loro intero ciclo vitale in ambienti generalmente inhospitali per altre specie vegetali a causa dell'elevata concentrazione di sali nel suolo (salinità che può essere tre volte superiore a quella marina). Essa è capace di manifestare gli effetti cumulativi dei diversi fattori ambientali agenti sulla laguna e per questo può essere usata come indicatore dei processi ai quali partecipa.

2.2. Evoluzione morfologica della laguna fino ai giorni nostri

Prima di arrivare all'era moderna è interessante un breve accenno alla primitiva formazione della Laguna e mettere in luce le fasi evolutive che ha dovuto subire quest'ambiente per arrivare alla sua forma attuale.

Dopo l'ultima glaciazione, (würmiana), che ha avuto la sua massima espansione circa 20.000 anni fa iniziò il periodo postglaciale. Il livello medio del mare, al culmine dell'espansione glaciale di wurm, era più basso di 65/110 m rispetto al livello attuale.

La linea di costa era attestata all'altezza di Ancona/Pesaro e nel postglaciale cominciò ad avanzare progressivamente verso nord, sommergendo quella che per millenni era stata una grande piana fluviale e che attualmente occupa il bacino dell'Adriatico settentrionale.

Circa 18.000 anni fa, vigeva in quest'area un dominio fluvio-palustre subsidente, con una superficie morfologica incisa da canali e addolcita da acquitrini e bacini poco profondi.

Con la successiva fase alluvionale pleistocenica, la deposizione di una spessa coltre limosa e argillosa colmò le accidentalità morfologiche e livellò il territorio. I materiali fluviali sedimentarono soprattutto nelle zone depresse (bacini lacustri)

che, associati ad altri depositi, restarono esclusi dal successivo processo di sovraconsolidazione per essiccamento cui furono coinvolti i suoli delle aree emerse. La situazione morfologica si stabilizzò per molti millenni, durante i quali i terreni emersi, e soprattutto le più recenti alluvioni, furono assoggettati ad un prolungato essiccamento con ossidazione e consolidamento dei materiali. In questo periodo si formò quell'argilla sovraconsolidata che è conosciuta con il termine: "*caranto*".

Intorno a 6.000-7.000 anni fa il territorio lagunare fu raggiunto dall'ingressione marina olocenica; i paleosuoli pleistocenici vennero così sommersi e ricoperti da sedimenti litoranei o lagunari. La linea di spiaggia giunse sulla posizione degli attuali lidi; le acque marine, attraverso le aperture delle foci fluviali, si diffusero nel retrostante bacino palustre, creando una primordiale laguna. Nacquero così la laguna di Venezia e le lagune dell'area del nord Adriatico da Grado a Ravenna.

La laguna attualmente si trova di fronte ad un periodo evolutivo caratterizzato da forti fenomeni erosivi, concentrati in particolar modo nella parte centrale del bacino, delimitato dai canali che partono dalle bocche di Lido e Malamocco e dai canali scavati nel corso del XX secolo.

A causa di questi processi la morfologia sta evolvendo verso forme sempre più dissimili da quella originale, caratterizzata da fondali poco profondi e da una fitta rete di canali le cui ramificazioni sempre più piccole, partendo dalle bocche, assicuravano in tutto l'ambiente il ricambio delle acque.

Un tempo tutti gli elementi costituenti la laguna si compensavano fra di loro e nella loro diversità e complessità assicuravano la dispersione e il ricambio idrodinamico essenziale per la vita lagunare, anche nella zone più lontane dalle bocche.

Attraverso l'osservazione di carte storiche si vuole dare un rapido sguardo alla morfologia della laguna di una volta per individuare le più evidenti ed importanti modificazioni :



Figura 2 - Laguna di Venezia_1762 (Tratta da D'Alpaos, 2010)

In questa prima rappresentazione (Figura 2), datata 1762 e attribuita all'ammiraglio Angelo Emo, si nota già la deviazione imposta nel XVI secolo al Brenta per scaricare le sue torbide nella laguna di Brondolo (a sud di Chioggia) assieme al Bacchiglione e la creazione del canale artificiale Taglio Novissimo anch'esso con foce a Brondolo. Altri provvedimenti da segnalare sono il cambiamento di direzione del Piave, con lo spostamento definitivo della sua foce a Cortellazzo e quello del Sile imponendo la sua fuoriuscita, attraverso il vecchio alveo del Piave, in corrispondenza della foce di Jesolo, denominata appunto Piave Vecchia. Infine è visibile la dettagliata rappresentazione della cosiddetta Laguna Morta disegnata da specchi d'acqua, che si alternano alle superfici di barena tra i quali s'insinua una fitta rete di canali.



Figura 3 - Laguna di Venezia_1901 (Tratta da D'Alpaos, 2010)

Questa carta (Figura 3), che risale al 1901, è stata redatta sulla base dei rilievi eseguiti nei quattro anni precedenti ad opera del Genio Civile di Venezia.

Di rilevante importanza sono le opere realizzate alle bocche di porto. Prima fra tutte è stata la bocca di Malamocco confinata da due moli (il molo nord nel 1839 e poi quello sud meno proteso verso il mare); il risultato raggiunto è stato un approfondimento locale dovuto alle correnti che hanno rimosso i depositi di sabbia della barra di foce al fine di permettere l'ingresso in bacino ad imbarcazioni sempre più grandi.

La bocca di Lido invece, non ha potuto avere la stessa 'fortunata' sorte. Andando verso l'interno a partire dalla parte iniziale dei moli, più lunghi di quelli di Malamocco, si dipartono tre canali, di S.Nicolò, di S.Erasmo e di Treporti (che in origine generavano foci indipendenti). In questo primo tratto le profondità raggiunte sono soddisfacenti (10 metri per il canale di S.Nicolò e 6-7 metri per quello di Treporti) ma nella parte prospiciente il mare la corrente non è stata in grado di demolire la barra di foce in quanto, una decina di anni dopo si scoprì, eseguendo un dragaggio su ciò che restava della barra di foce, che quella zona era formata da un'argilla sovra consolidata (caranto) molto resistente all'azione tagliante della corrente. La profondità, che raggiungeva al massimo gli 8 metri, non

era sufficiente al transito delle navi con pescaggio maggiore che quindi continuavano ad entrare attraverso la bocca di Malamocco.



Figura 4 - Laguna di Venezia_1970 (Tratta da D'Alpaos, 2010)

Rilievo eseguito dall' Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque qualche anno dopo la grande alluvione del 1966 per analizzare i motivi alla base di quel disastro.

L'intervento degno di nota , come si può notare dalla mappa (Figura 4) è l'avanzamento del litorale di Punta Sabbioni rispetto la diga nord di Lido; questa manipolazione genera la mobilitazione, ad opera della corrente in passaggio attraverso la bocca, di sedimenti che andranno a limitare l'effetto erosivo (dovuto alla costruzione dei moli) della zona compresa tra le bocche di Lido e Malamocco.

Ora i fondali hanno profondità adeguate anche ai pescaggi maggiori (anche se nella bocca di Lido si dovrà continuare a dragare).

Salta all'occhio inoltre, rispetto alla carta precedente, la presenza del nuovo canale di collegamento Malamocco-Marghera. Questo canale navigabile non ha portato a troppe conseguenze positive: il primo tratto, profondo 14,5 metri e complessivamente rettilineo, segue l'andamento dei canali interni, mentre la seconda parte, che ha direzione trasversale rispetto i corsi d'acqua già esistenti e tocca profondità comprese tra i 12,5 e i 10 metri, provoca delle profonde modificazioni all'idrodinamica originale.

Avanza con i decenni anche la formazione della Zona Industriale di porto Marghera, cominciata nei primi anni venti, e ampliata nei decenni a seguire a scapito delle superfici di barena.

I risultati raggiunti da un confronto fra i vari periodi ha evidenziato un processo erosivo importante da attribuire principalmente all'intervento umano come lo scavo del Canale dei Petroli e la costruzione dei moli in corrispondenza delle bocche di porto che ha provocato un'asimmetria nel trasporto dei sedimenti per cui la maggior parte dei sedimenti usciti dalla laguna non vi rientra.

I valori riscontrati infatti superano di gran lunga quelli attribuibili al solo effetto naturale della subsidenza e dell'aumento del livello medio del mare.

La laguna centrale, quella più colpita dal fenomeno, vede la profondità media dei suoi fondali passare dagli appena 49cm nel 1901, ai 60 del 1932 per raddoppiare 30 anni dopo e raggiungere i 146cm nel 2003. (D'Alpaos, 2010)

Un rapido sguardo alle batimetrie (Figure 5,6,7) rispettivamente nel 1930, 1970, 2002 mette in luce l'approfondimento del fondo e quindi la crescente tendenza erosiva:

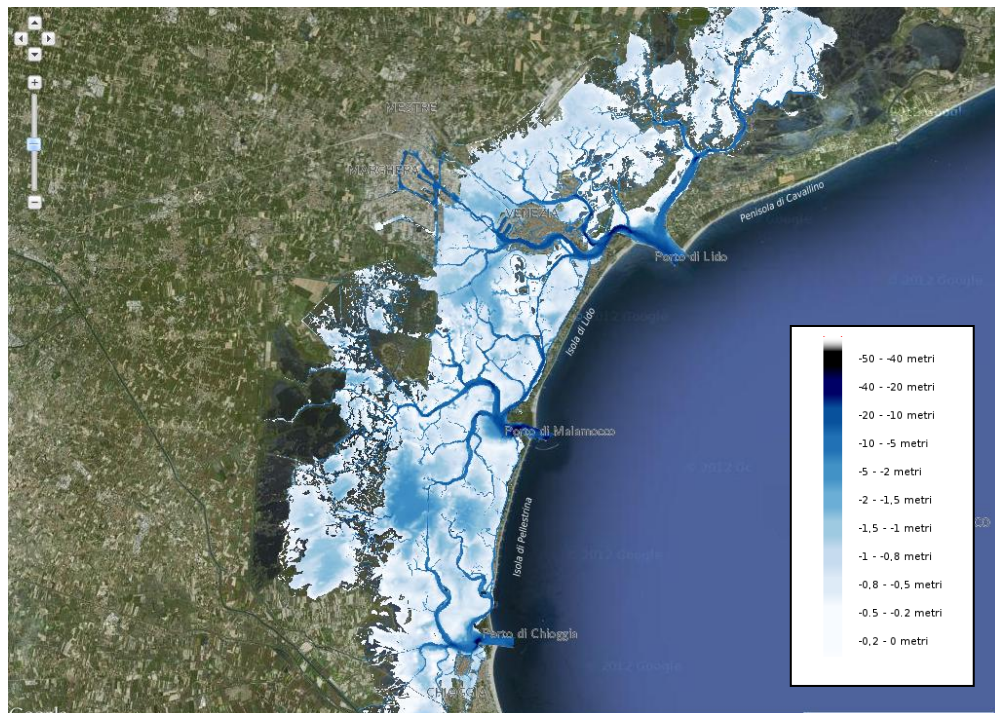


Figura 5 - Batimetria laguna di Venezia_1930



Figura 6 - Batimetria laguna di Venezia_1970

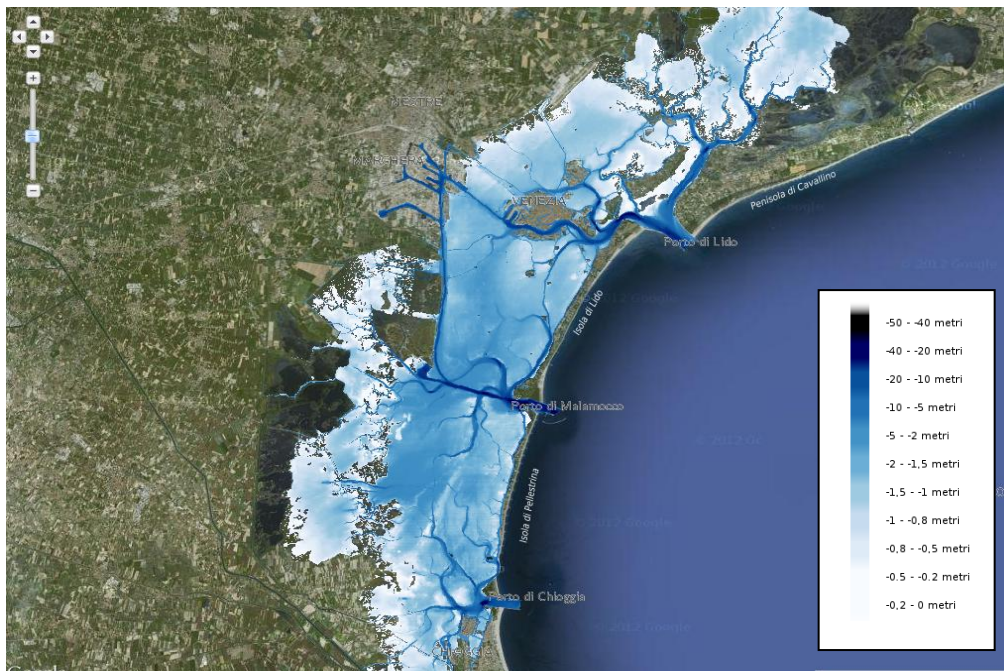


Figura 7 - Batimetria laguna di Venezia_2002

Evidenziata l'importanza delle barene è interessante precisare che si è passati da una superficie complessiva di circa 255 km² all'inizio del Seicento a poco meno di 170 km² nei primi anni del Novecento, per arrivare al 1901 con un'estensione di 158 km² e al 1970 con 64 km² di barene; questi dati corrispondono ad un tasso di erosione annua quasi quadruplicato rispetto a quello dei tre secoli precedenti. *(D'Alpaos, 2010)*

Alla luce di queste considerazioni è possibile trarre delle conclusioni sulla tendenza evolutiva della laguna fino ai giorni nostri e ipotizzare la situazione in un prossimo futuro.

La nascita del cambiamento, avvenuto tra il XVI e il XVII secolo, è da attribuire alla scelta di deviare i fiumi che sfociavano in laguna, come il Brenta, per evitare l'interrimento che minacciava Venezia causato dai sedimenti immessi dai corsi d'acqua. Dopo questo intervento però la tendenza evolutiva ha invertito rotta e, se nella fase iniziale i sedimenti liberati dal parziale disfacimento delle barene andavano a compensare i volumi erosi, a partire dal 1900 questi non erano più in grado di garantire la stabilità dei fondali.

A sostegno di questo andamento viene riportato un grafico in Figura 8 (la cui trattazione sarà spiegata più dettagliatamente nel prossimo paragrafo) riferito alla laguna centrale che rappresenta la frequenza con cui un'assegnata quota dei fondali si riscontra all'interno della laguna.

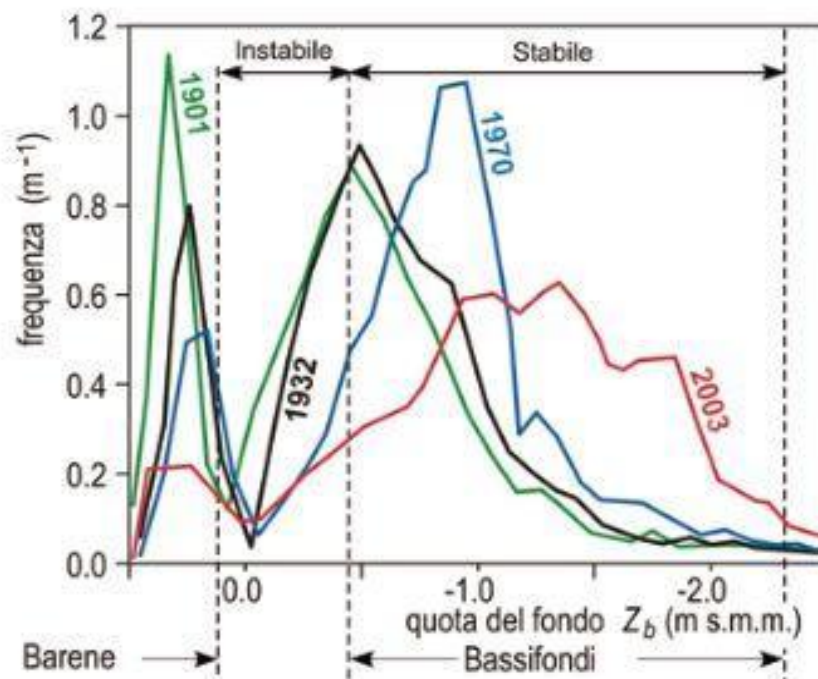


Figura 8 – Grafico frequenza/quota del fondo (D’Alpaos, 2010)

E’ evidente il tipico andamento delle curve, ciascuna delle quali presenta due picchi. Tali quote di massimo relativo rappresentano condizioni di stabilità del fondale; in particolare il primo picco è riferibile alla quota delle barene mentre il secondo corrisponde alle zone d’acqua stabili.

Col passare degli anni, la quota delle barene resta più o meno inalterata ma la frequenza del suo picco si riduce progressivamente, mentre il secondo punto di massimo si sposta verso profondità sempre maggiori; questi due risultati evidenziano rispettivamente che le superfici occupate dalle barene si stanno notevolmente riducendo e che è in atto un importante processo erosivo verticale che s’accentua in particolar modo a partire dal 1930.

2.3. Ipotesi della morfologia lagunare nel 2050

La tendenza evolutiva verificatasi nel corso dell'ultimo secolo, discussa e analizzata precedentemente, ha permesso di stimare, per mezzo di una interpolazione lineare, la batimetria da assegnare ad un'ipotetica laguna nel 2050.

Come descritto nel paragrafo precedente questo paesaggio è organizzato in una distribuzione bimodale delle quote del fondo, con i due picchi, corrispondenti alle barene e ai bassifondi. Il modello che ha permesso il confronto fra le diverse condizioni nei vari anni si basa sull'analisi dello sforzo di taglio delle onde da vento, ritenuto il principale fattore responsabile della risospensione dei sedimenti.

Si assume, in prima approssimazione, che l'altezza d'onda con fetch illimitato per una fissata velocità del vento, possa essere valutata imponendo l'equilibrio locale tra l'energia dell'onda generata dal vento che agisce sulla superficie libera, e la dissipazione di energia dovuta all'attrito col fondo al frangimento. La condizione di bilancio energetico permette di calcolare la velocità orbitale al fondo, secondo la teoria lineare, e quindi lo sforzo di taglio (τ_b) causato dalle onde. Il rapporto tra lo sforzo di taglio e la profondità dell'acqua, per qualsiasi velocità del vento fissata, è rappresentata da una curva con picco a una certa profondità d'acqua. (Figura 9)

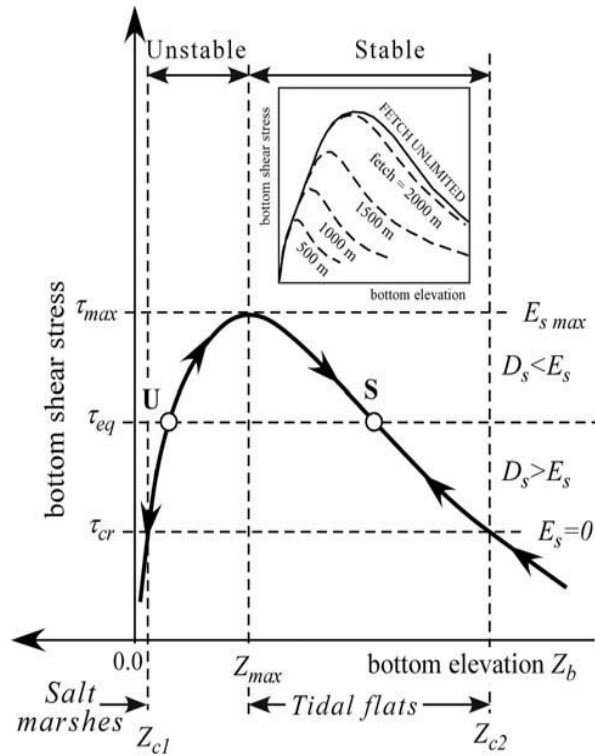


Figura 9 - Il modello di stabilità generato dalla distribuzione dello sforzo di taglio delle onde da vento in funzione della profondità del fondo (Carniello, Defina, D'Alpaos, 2009)

Il modello di stabilità poi descrive l'evoluzione temporale dell' elevazione del fondo, Z_b , riferito al livello del medio del mare, utilizzando l'equazione di Exner:

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} (1 - n) = D_s - E_s - (1 - n)R \quad [1]$$

dove n è la porosità, R è il tasso di aumento relativo del livello del mare relativo, D_s e E_s sono il tasso di deposito locale e di erosione. Il modello di stabilità presuppone che $(1 - n)R \ll D_s - E_s$, trascurando così, in prima approssimazione, il tasso d'aumento del livello del mare. Il modello assume inoltre che il tasso di erosione di sedimenti, E_s , sia proporzionale alla differenza tra lo sforzo di taglio al fondo (T_b) e la tensione di taglio critica per l'erosione dei sedimenti (T_{cr}). Sotto tale ipotesi, la curva in Figura 9 è un'approssimazione per il tasso di erosione al fondo.

La velocità di deposito dei sedimenti, D_s , comprende la rideposizione dei sedimenti erosi localmente e la deposizione di sedimenti convogliati dalle zone vicine.

Si definiscono E_{smax} , il tasso di erosione massimo corrispondente al picco della curva ($T_b = T_{max}$); se la percentuale di deposito D_s supera la percentuale di massima erosione (cioè, $D_s > E_{smax}$) nessun equilibrio è possibile e i bassifondi si abbassano e col tempo si trasformano in barene. Se $D_s < E_{smax}$ esiste un equilibrio dello sforzo di taglio al fondo T_{eq} tale che la deposizione e l'erosione si bilanciano tra loro (vale a dire, i punti U e S in Figura 9).

Quando $T_b < T_{eq}$ il deposito supera l'erosione e, secondo l'equazione scritta sopra, il fondo evolve verso quote più profonde. Al contrario, quando $T_b > T_{eq}$, l'erosione supera il deposito e la profondità del fondo diminuisce, in accordo con la direzione delle frecce nel grafico. Pertanto, qualsiasi punto S lungo il ramo destro della curva è un potenziale punto stabile mentre qualsiasi punto U sul ramo sinistro della curva è un punto instabile. Il ramo stabile della curva, caratteristico dei bassifondi, si estende dalla quota del fondo $Z_b = Z_{c2}$ al valore $Z_b = Z_{max}$ corrispondente al picco della curva. Un equilibrio stabile è anche possibile per $Z_b > Z_{c1}$, cioè, quando lo sforzo di taglio al fondo indotto dall'onda è ancora più piccolo della tensione tangenziale critica. Quest'ultimo intervallo di profondità corrisponde alle barene.

Bisogna sottolineare che il modello non può spiegare la configurazione stabile delle barene in quanto la loro variazione batimetrica è dovuta a fattori che non dipendono dall'effetto delle onde, come la vegetazione e la compattazione dei sedimenti; la maggior parte di queste cause non sono incluse nel metodo che di fatto si concentra sull'equilibrio morfodinamico dei bassifondi privi di vegetazione.

Sulla base di questa teoria è stato sviluppato il modello concettuale per descrivere a lungo termine l'evoluzione di un bacino in erosione come la laguna di Venezia.

Si identifica (Figura 10) una prima fase (fase 1), rappresentata dalle linee nere, nella quale le barene si deteriorano e progressivamente diminuiscono la loro estensione alimentando con i sedimenti i bassifondi adiacenti che, pertanto, sono in grado di mantenere la loro quota originale. Nella fase seguente (fase 2), con linee grigie,

poiché le barene si sono in gran parte ridotte, la quantità di sedimenti che possono fornire ai bassifondi non è più sufficiente a bilanciare l'erosione che li affligge. Come conseguenza, l'elevazione media dei bassifondi diminuisce:

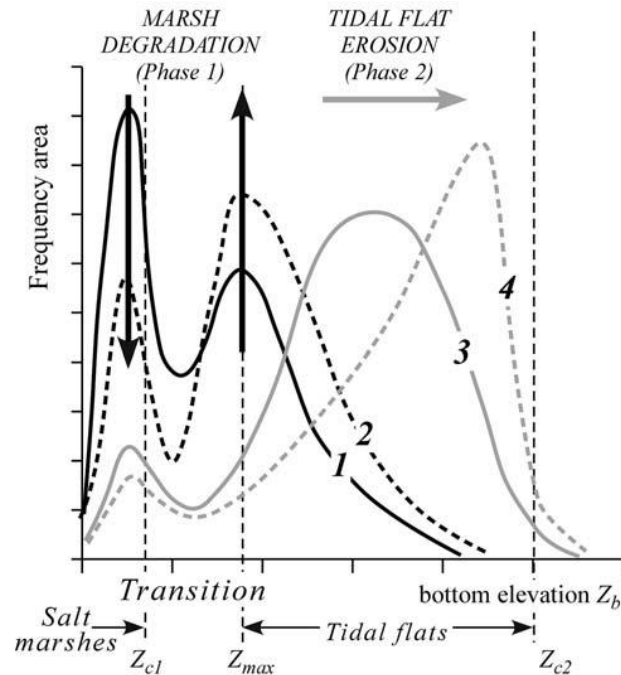


Figura 10 – Evoluzione di un bacino in erosione (Carniello, Defina, D'Alpaos, 2009)

In questo contesto si attesta l'affidabilità del modello, che richiede l'inserimento di più di due set di dati, con l'analisi delle quattro batimetrie disponibili per quest'area nel 1901, 1932, 1970 e 2003.

L'analisi dell'insieme dei dati disponibili ha permesso la costruzione della funzione di densità della profondità del fondo in tutto il bacino di Venezia, quindi anche per aree con fetch limitato, valutando tutte le reali cause dell'erosione: così come le onde da vento viene considerato anche il moto ondoso provocato dai natanti.

Per procedere con l'elaborazione dei dati è significativo specificare che le diverse condizioni morfologiche all'interno della laguna hanno richiesto che lo studio venisse riferito a due differenti parti della laguna, quella a nord e quella al centro-sud ed inoltre, è importante ricordare che, in un così lungo periodo di tempo, oltre ai cambiamenti ambientali hanno subito delle modifiche anche i confini stessi.

Pertanto l'analisi considera una sola, comune estensione del dominio, che è quella corrispondente alla laguna del 2003 che include tutte le precedenti configurazioni. La differenza spaziale e temporale delle mappe e la loro non estrema precisione hanno causato errori batimetrici e non omogeneità nelle indagini; a loro volta questi fattori non consentono un affidabile confronto punto per punto delle profondità del fondo per valutare l'evoluzione batimetrica locale. Per colmare questo deficit, la presente analisi media i dati su vaste aree (appunto la laguna centro meridionale e quella settentrionale) livellando così le incertezze locali e mettendo in evidenza la globale tendenza evolutiva.

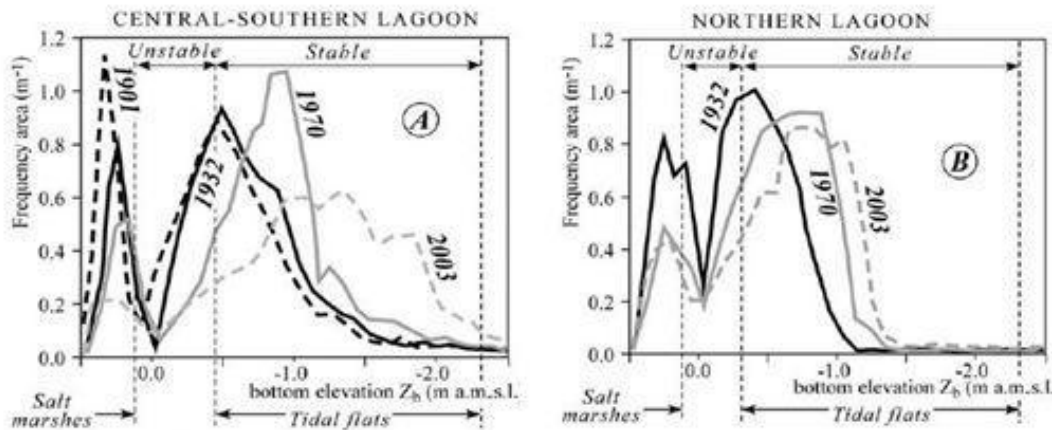


Figura 11 – Evoluzione del fondo a confronto (Carniello, Defina, D'Alpaos, 2009)

Si vuole analizzare con un grado di dettaglio maggiore il trend evolutivo questa volta considerando anche la parte settentrionale della laguna. Con riferimento al grafico in Figura 11 si legge che il 1901 mostra un picco nella frequenza della profondità dei bassifondi approssimativamente a $Z_b = -0.5m$. Nel corso del 19° secolo vaste aree della laguna sud erano state invase dalle barene e, in conformità con lo schema di evoluzione a lungo termine, si deduce che la fase 2 di erosione dei bassifondi non era ancora iniziata e l'elevazione del fondo $Z_b = -0.5m$ corrisponde approssimativamente alla profondità critica dei bassifondi Z_{max} .

All'inizio del 20 ° secolo è stata completata la costruzione dei moli sulle tre bocche; di conseguenza, il flusso di sedimento uscente dalla laguna è aumentato esponenzialmente, aumentando la tendenza erosiva.

Nel periodo tra il 1901 e il 1932, a causa del deterioramento delle barene, il primo picco, che rappresenta le aree di barene, è ridotto in ampiezza, mentre il picco dei bassifondi è aumentato.

Nonostante la loro variazione di ampiezza, i due picchi mantengono la precedente altezza di fondo suggerendo così che i sedimenti provenienti dal processo di deterioramento delle barene hanno alimentato i bassifondi adiacenti contrastando la loro erosione.

La curva corrispondente al 1970 visualizza un' ulteriore lieve riduzione del picco delle barene mentre il picco dei bassifondi si sposta verso profondità maggiori. Negli anni tra il 1932 e il 1970, la regressione delle barene raggiunge un momento tale che la quantità di sedimenti forniti dal loro deterioramento non è sufficiente a contrastare l'erosione dei bassifondi che infatti risultano approfonditi. La stessa tendenza, costituita da riduzione delle barene e l'erosione dei bassifondi, viene visualizzata nella variazione della batimetria nel periodo 1970-2003.

Il picco dei bassifondi, mentre si sposta verso una quota inferiore, cambia la sua ampiezza il che suggerisce che il processo di erosione non è uniforme sul dominio. Per la parte settentrionale della laguna di Venezia, anche in questo caso coerente al modello concettuale le quote del fondo sono caratterizzati da una distribuzione bimodale.

Messe a confronto le due zone oggetto di studio si vede che per il bacino settentrionale il range di profondità del fondo instabile è più piccolo e l'altezza media dei bassifondi nel 1932 è leggermente superiore alla corrispondente quota per la laguna centro meridionale. Inoltre, l'elevazione del fondo corrispondente al picco dei bassifondi nel 1970 e nel 2003 mostra che il tasso di approfondimento dei bassifondi nella laguna nord è più lento rispetto a quello della laguna centrale e meridionale.

In generale, sembra che sia il nord che il centro-sud stiano ancora vivendo la fase 2 di erosione dei bassifondi, ma con due diverse velocità, e che, come conseguenza della continua perdita di sedimenti, i bassifondi si stiano spostando verso una configurazione di equilibrio stabile più profonda.

Le ragioni delle differenze tra le due parti di laguna sono diverse: nelle condizioni di fetch limitato, che caratterizza la laguna nord, l'ampiezza della curva di stabilità teorica si riduce, quindi, in media, la capacità erosiva dell'onda diminuisce; l'apporto di sedimenti alla laguna, anche se piccolo, in media, nutre prevalentemente la parte settentrionale della laguna; al nord il percorso che i sedimenti in sospensione devono fare per raggiungere la bocca di Lido è, in media, molto più lungo del percorso per arrivare alle bocche di Chioggia e Malamocco nel centro-sud della laguna.

Si può concludere che le curve di densità ricostruite per l'elevazione del fondo, estese oltre un secolo, fortemente dimostrano che il modello di evoluzione a lungo termine è appropriato per lo studio di tutto il bacino lagunare.

Da queste considerazioni, si è potuto formulare un pronostico per la configurazione futura della laguna.

Sulla base dei più recenti dati batimetrici, è stato valutato il tasso di dislivello locale del fondo all'interno della laguna. L'analisi viene effettuata considerando l'elevazione del livello medio del mare, Z_b , contemporaneamente al contributo di erosione e del relativo aumento del livello del mare. Inoltre ci si focalizza sui bassifondi e escludendo dall'analisi le barene e di canali più profondi soggetti all'effetto della marea. Al fine di livellare le imprecisioni batimetriche relative ai metodi di indagine, il tasso di variazione locale dell'altezza del fondo per bassifondi, dZ_b/dt , è mediato su una griglia triangolare di 1225 elementi avente un lato di media circa 900m. La figura mostra il tasso di dislivello del fondo, che si estende da -3 cm / anno (erosione) a 1 cm / anno (deposizione).

Si nota, in media, un basso tasso di erosione per la laguna nord, e per la parte meridionale della laguna al confine con la terraferma protetta dagli effetti del moto ondoso dalle barene. In questi luoghi si osserva anche un deposito moderato.

Una forte erosione si osserva invece nella zona centrale e meridionale della laguna e vicino a Venezia: in particolare nell'area che si trova vicino al porto S. Leonardo.

Ipotizzando che la tendenza evolutiva della profondità del fondo continuerà invariata nei prossimi decenni, è stata costruita la configurazione della laguna di Venezia nel 2050, a partire dalla batimetria del 2003. (Figura 12)

E' considerato un orizzonte temporale di alcuni decenni per assicurare che l'estrapolazione lineare sia ragionevolmente accettabile. (*Carniello, Defina, D'Alpaos, 2009*)

In conclusione la laguna che ci si aspetta da qui a qualche decina di anni sarà un ambiente sicuramente meno articolato, con una configurazione uniformata e profondità che raggiungeranno valori di 2.0-2,5 m, in accordo col modello di evoluzione sopra descritto. I fondali tenderanno a quote maggiori dove gli effetti del moto ondoso sono più insistenti. (*D'Alpaos, 2010*)

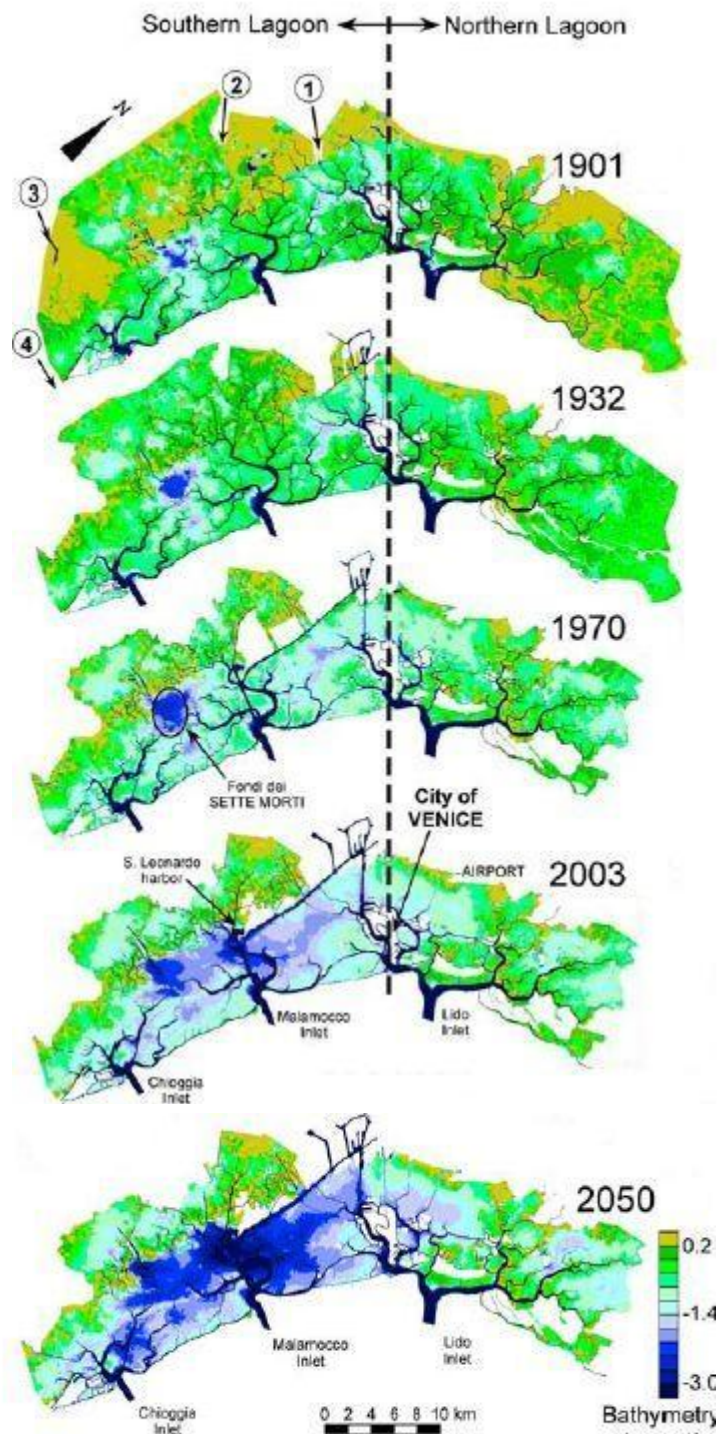


Figura 12 – Evoluzione delle batimetrie nel tempo (Carniello, Defina, D'Alpaos, 2009)

3. LA DISPERSIONE INTERMAREALE

La dispersione intermareale è il meccanismo dominante di mescolamento e di trasporto a lungo termine agente in laguna di Venezia e nasce dall'esigenza di descrivere un moto apparentemente caotico guardandolo da un punto di vista macroscopico con riferimento al tempo e allo spazio.

Ci sono due differenti approcci per affrontare lo studio del parametro in oggetto: il metodo euleriano e quello lagrangiano; non ce n'è uno migliore dell'altro ma semplicemente uno può essere più efficace dell'altro in un contesto piuttosto che in un altro.

In letteratura i modelli proposti sono caratterizzati da una formulazione finale di tipo euleriano ma la trattazione si basa sulla risoluzione dell'equazione di trasporto e diffusione:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u}^T \nabla C = \nabla^T K \nabla C \quad [2]$$

Con:

$C(x, t)$ = concentrazione media al fondo

$$\mathbf{K}(x, t) = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{12} & K_{22} \end{pmatrix}$$

$\mathbf{u}(x, t) = (u_1(x, t), u_2(x, t))^T$ = vettore velocità (mediato sulla profondità)

$\mathbf{x}(x, y)^T$ = coordinate cartesiane orizzontali

t = tempo

L'approccio euleriano non è consigliato per diverse ragioni: il primo problema che deve essere menzionato è la dimensione spaziale dell'onda di marea confrontabile con quella del campo di moto. Questa considerazione conduce ad un altro importante risultato: il moto delle particelle e la dispersione dipendono dalla fase del sistema, ossia i risultati dipendono da quando le particelle iniziano a muoversi

durante un ciclo di marea; inoltre il metodo richiede una discretizzazione spaziale sufficientemente fitta che evidentemente è molto complicata in un ambiente complesso come la laguna.

L'alternativa quindi è senz'altro appoggiarsi ad un metodo lagrangiano che più si presta a descrivere il problema della dispersione in ambienti caratterizzati da acque basse.

Questo criterio è uno strumento molto utile quando si ha a che fare con comportamenti a lungo termine di fenomeni di marea; infatti, è possibile utilizzare passi temporali senza dover ricorrere a sistemi lineari molto grandi. Il modello lagrangiano affronta il problema da un diverso punto di vista: le particelle di massa di soluto sono seguite durante i percorsi e i cicli di marea, assumendo che le stesse si muovano con una velocità somma di due termini: la velocità media di trasporto e le fluttuazioni dovute alla turbolenza.

3.1. Il modello di dispersione intermareale. L'approccio lagrangiano

Il modello lagrangiano segue nello spazio e nel tempo una particella di fluido caratterizzata da una massa unitaria di sostanza conservativa; questa si sposta con una velocità w somma del termine mediato sulla turbolenza W e del termine fluttuante w' :

$$w = W + w' \quad [3]$$

La posizione della particella nel tempo è data dall'equazione:

$$\frac{dx}{dt} = W + w' \quad [4]$$

La velocità locale ed istantanea W viene determinata mediante un modello idrodinamico, mentre per la valutazione della fluttuazione w' si fa ricorso alla teoria degli spostamenti aleatori secondo la quale w' può essere generata in modo casuale a partire da una distribuzione di densità gaussiana le cui caratteristiche sono strettamente legate al tensore della dispersione D .

Nella pratica se si ammettono all'istante t_0 un certo numero di particelle nella posizione x_0 , al tempo $t_1 = \Delta t + t_0$ si osserverà una nuvola di particelle il cui centro di massa si troverà nella posizione x_1 mentre la 'dispersione' dei punti attorno a x_1 è strettamente legata al tensore di dispersione medio incontrato dalle particelle.

L'integrazione dell'equazione [4] su un periodo di marea, tra gli istanti t_0 e $T + t_0$, costituisce il modello dispersivo lagrangiano intermareale: un impulso di concentrazione, ovvero la massa di sostanza conservativa che all'istante t_0 si trova nella posizione x_0 , all'istante $T + t_0$ si troverà nella posizione $x_T = x_0 + W_R(\tau_0) * T$ e avrà subito una dispersione dipendente da $D_T(\tau_0)$ essendo W_R e D_T rispettivamente la velocità residua lagrangiana e il tensore della dispersione, entrambi dipendenti dalla fase τ_0 .

In ogni punto del campo di moto è quindi possibile definire la trasformazione che una massa puntuale unitaria subisce in un periodo di marea. Tale funzione di trasferimento oltre a dipendere dalla posizione, come si è visto, viene a dipendere anche dalla fase τ_0 che può essere assimilata ad una proprietà invariante della sostanza immessa: ogni particella è così caratterizzata da una massa e dall'istante di immissione, ovvero dalla fase.

Data l'assenza di interazione fra le particelle, l'integrazione nel tempo (che avanza a passi temporali di un periodo di marea) si ottiene come convoluzione nello spazio tra la distribuzione di concentrazione al passo temporale precedente e le funzioni di trasferimento locali. Tale procedimento presenta non pochi vantaggi legati alla sovrapposibilità degli effetti.

Il problema più serio è determinato dal fatto che sia la velocità residua che il tensore della dispersione dipendono entrambi dalla fase.

3.1.1. Le velocità residue

Generalmente si definisce velocità residua lagrangiana il rapporto tra lo spostamento subito da una particella durante un ciclo di marea e il periodo T :

$$W_{R_0} = \frac{x_T - x_0}{T} \quad [5]$$

Tale definizione è certamente soddisfacente nell'ipotesi di assenza di fenomeni di dispersione. In presenza di dispersione si potrebbe pensare di definire la velocità residua con riferimento allo spostamento del centro di massa di una macchia di inquinante che all'istante t_0 è concentrata in un punto del campo di moto:

$$W_R = \frac{x_{C_T} - x_0}{T} \quad [6]$$

Solo se il campo di moto interessato dalla macchia durante la sua evoluzione mareale è caratterizzato da velocità medie W dipendenti esclusivamente dal tempo (omogeneità spaziale), allora lo spostamento del centro di massa coincide con la corrispondente traiettoria di una particella che si muove con velocità $W(t)$. In tal caso lo spostamento residuo si ottiene attraverso l'integrazione dell'equazione [4] nella quale vengono trascurate le fluttuazioni di velocità.

Diversamente, la velocità residua definita attraverso l'equazione [6] viene a dipendere dalla dispersione in quanto lo spostamento del centro di massa è determinato, istante per istante, dalla velocità media pesata W_C così definita:

$$W_C = \iint W * C \quad [7]$$

dove C è la distribuzione di probabilità istantanea di trovare una particella, ovvero la distribuzione spaziale di concentrazione di massa unitaria. La differenza $W_C - W$ è l'effetto prodotto dalla dispersione. Questo fatto, ovviamente, costituisce un'ulteriore complicazione del problema, caratterizzata dall'eterogeneità spaziale al crescere della quale presumibilmente cresce anche la differenza tra le velocità residue W_{R_0} e W_R .

In questo studio, quindi, le velocità residue verranno trascurate.

3.1.2. La dispersione

Il termine di dispersione tiene conto della diffusione delle particelle quando si considera l'integrazione nel tempo, in questo caso la scala temporale è un ciclo di marea (12 ore) e la dispersione è chiamata 'dispersione intermareale'. La dispersione delle particelle nel dominio indagato è essenziale dovuta a due termini: l'eterogeneità del campo di moto e la turbolenza; questi fattori portano ad avere rispettivamente differenti velocità in diverse posizioni del dominio causando lo spostamento delle particelle dalla posizione originale dopo il ciclo di marea, e lo scostamento della velocità dal valore medio poiché ha una grande influenza nel migliorare la dispersione della nuvola iniziale.

3.1.3. Il 'random walk'

Il modello di dispersione di un soluto in acque basse da un punto di vista lagrangiano viene gestito attraverso un moto browniano. Per modellare il moto aleatorio delle particelle nel sistema viene utilizzato un 'random walk'.

Il più semplice *random walk* può essere descritto nel seguente modo.

Una particella si muove lungo una linea con passi di lunghezza ξ e ogni passo può essere effettuato verso sinistra o verso destra con probabilità p e $q = 1 - p$ rispettivamente, dove $0 < p < 1$. Si ipotizzi che il generico spostamento venga compiuto istantaneamente, ad esempio all'inizio di ogni intervallo di tempo Δt ; si supponga inoltre che le possibili posizioni della particella appartengano all'insieme dei numeri interi; questo insieme è di solito denominato *integer lattice* in cui la particella farà un passo avanti (o indietro) all'infinito.

Si riporta in un grafico la posizione x_t di una particella; il percorso della particella è rappresentato da una spezzata (Figura 13) la cui equazione si può esprimere nel modo seguente: sia ξ_n il generico passo (variabile aleatoria indipendente) definito nel seguente modo:

$$\xi_n = \begin{cases} +1 & \text{con probabilità } p \\ -1 & \text{con probabilità } q \end{cases}$$

Sia x_t la posizione iniziale, allora la posizione al tempo t (cioè dopo n passi) sarà:

$$x_t = x_0 + \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n \quad [8]$$

Diverse particelle, tutte poste inizialmente in x_0 , si troveranno all'istante t in posizioni x_t generalmente diverse.

Il *random walk* è rappresentato (Figura 13) dalla sequenza di variabili aleatorie $\{x_t\}$ la quale è un processo stocastico a tempo discreto, cioè in ogni istante l'incremento $x_{t+\Delta t} - x_t$ non è influenzato dal passato.

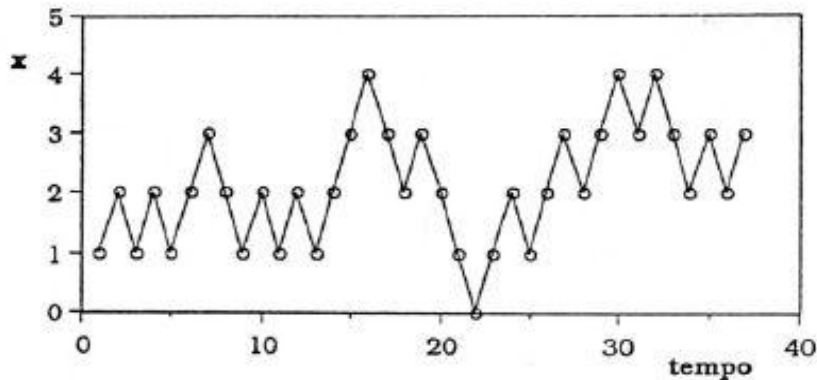


Figura 13 – Random Walk

3.1.4. Il moto browniano

Nel 1975 Robert Brown osservò che una particella libera sospesa in un liquido viene sottoposta a successivi impatti con le altre particelle libere, ottenendo così un movimento caratterizzato da un percorso irregolare. La particella si muoveva in uno spazio tridimensionale, qui si considera la proiezione delle traiettorie delle particelle libere su un unico asse. Conviene a questo punto introdurre una diversa unità di tempo e di lunghezza per caratterizzare meglio il processo che si vuole indagare. Sia δ la nuova unità di tempo, ovvero il tempo tra due impatti successivi e $\sqrt{\delta}$ la dimensione del generico passo; in tal caso si ha:

$$P(\xi_n = \sqrt{\delta}) = P(\xi_n = -\sqrt{\delta}) = \frac{1}{2}$$

$$\sigma^2(\xi_n) = \frac{1}{2}(\sqrt{\delta})^2 + \frac{1}{2}(-\sqrt{\delta})^2 = \delta$$

Nella posizione iniziale, cioè in $x_0 = 0$, l'equazione [8] può scriversi:

$$x_t = \sum_{n=1}^{t/\delta} \xi_n \quad [9]$$

Se δ è molto più piccolo di t , t/δ è grande e si può pensare di sostituirlo con l'intero più vicino, ottenendo:

$$\sigma^2(x_t) = \frac{t}{\delta} * \sigma^2(\xi_n) = t \quad [10]$$

Se t è fisso e δ tende a zero, secondo il teorema del limite centrale, x_t ha una distribuzione normale a media nulla. Ciò significa abbandonare lo schema approssimato, nel quale la particella si muove con passi di lunghezza finita pari a $\pm\sqrt{\delta}$ e considerare il processo come continuo.

Allora si può dire che il moto browniano è generato da una famiglia di variabili aleatorie $\{x_t\}$, funzione della variabile continua t in $[0, \infty[$ che soddisfa le seguenti condizioni:

- i. $x_0 = 0$ (condizioni iniziali fissate);
- ii. Gli incrementi $x_{t+\Delta t} - x_t$ in un insieme finito e arbitrario di intervalli disgiunti $(t, t + \Delta t)$, sono variabili causali indipendenti;
- iii. Per ogni $t \geq 0$ e $\Delta t \geq 0$, $x_{t+\Delta t} - x_t$ ha una distribuzione normale a media nulla.
- iv.

3.2. Il processo di dispersione

Indicata con x_t la coordinata di una particella sospesa in un liquido all'istante t , si assume che lo spostamento della particella sia la somma di due componenti: una media prodotta da una velocità macroscopica v e una dovuta alla componente fluttuante della velocità v' . Si suppone inoltre che la componente fluttuante dello spostamento $v' * \Delta t$ sia una variabile aleatoria la cui distribuzione può dipendere dalla posizione x della particella, dall'istante t nel quale è osservato lo spostamento e dall'intervallo di tempo Δt durante il quale lo spostamento è osservato.

Lo spostamento della generica particella può essere scritto approssimativamente nella forma:

$$x_{t+\Delta t} = x_t + [v(t, x_t) + v'(t, x_t)] * \Delta t \quad [11]$$

Se le particelle si muovono seguendo questa legge, per Δt che tende a zero, la distribuzione x_t all'istante t è la soluzione dell'equazione del trasporto e della dispersione, come risulta dalle considerazioni che seguono.

Si introduce la definizione:

$$c_{t,x} = \text{prob}(x_t = x) \quad [12]$$

Con riferimento all'esempio semplificato di *random walk* descritto nel paragrafo 3.1.4, la probabilità che una particella si trovi nella posizione x all'istante $t + \Delta t$ può essere scritta come:

$$c_{t+\Delta t,x} = p * c_{t,x-\xi} + q * c_{t,x+\xi} \quad [13]$$

sviluppando $c_{t,x-\xi}$ e $c_{t,x+\xi}$ in serie di Taylor:

$$c_{t,x-\xi} = c_{t,x} - \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_x \xi + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right|_x \xi^2 + \dots \quad [14]$$

$$c_{t,x+\xi} = c_{t,x} + \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_x \xi + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right|_x \xi^2 + \dots \quad [15]$$

e sostituendo nella [13] si trova:

$$c_{t+\Delta t,x} = p * \left[c_{t,x} - \frac{\partial c}{\partial x} \xi + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \xi^2 \right] + q * \left[c_{t,x} - \frac{\partial c}{\partial x} \xi + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \xi^2 \right] \quad [16]$$

ovvero,

$$c_{t+\Delta t,x} - c_{t,x} = -\xi * (p - q) \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{1}{2} \xi^2 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad [17]$$

dividendo per Δt e facendo tendere a zero Δt , mantenendo costanti i termini $a = \xi(p - q)/\Delta t$ e $b = \xi^2/\Delta t$ si trova:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -a * \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{1}{2} b * \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad [18]$$

dove a rappresenta lo spostamento del centro di massa e b il coefficiente di dispersione.

L'equazione ottenuta è la classica equazione di trasporto e dispersione che può essere ottenuta in modo analogo ipotizzando che il generico passo ξ anziché valere ± 1 , possa assumere valori qualsiasi caratterizzati da una distribuzione $p(\xi)$.

Sotto questa ipotesi, un'equazione analoga alla [13] si scrive:

$$c_{t+\Delta t,x} = \int_{-\infty}^{\infty} c_{t,x-\xi} * p(\xi) d\xi \quad [19]$$

sviluppando in serie di Taylor il termine $c_{t,x-\xi}$:

$$c_{t,x-\xi} = c_{t,x} - \frac{\partial c}{\partial x} \xi + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \xi^2 + \dots \quad [20]$$

sostituendola nell'equazione precedente si trova:

$$c_{t+\Delta t,x} = c_{t,x} * \int_{-\infty}^{\infty} p(\xi) d\xi - \frac{\partial c}{\partial x} * \int_{-\infty}^{\infty} \xi * p(\xi) d\xi + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \int_{-\infty}^{\infty} \xi^2 * p(\xi) d\xi \quad [21]$$

ovvero:

$$c_{t+\Delta t,x} - c_{t,x} = \frac{\partial c}{\partial x} * \bar{\xi} + \frac{1}{2} * \sigma_{\xi}^2 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad [22]$$

per un Δt piccolo si può scrivere:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial c}{\partial x} * v + \frac{1}{2} * \frac{\sigma_{\xi}^2}{\Delta t} * \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad [23]$$

Nella quale v è il rapporto tra lo spostamento medio e Δt e σ_{ξ}^2 è lo scarto quadratico dello spostamento rispetto al valore medio.

Se si pone:

$$D = \frac{1}{2} * \frac{\sigma_{\xi}^2}{\Delta t} \quad [24]$$

questa equazione rappresenta la classica equazione del trasporto e dispersione (per il caso monodimensionale) in cui D è il coefficiente di dispersione:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial c}{\partial x} * v + D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad [25]$$

essendo c la probabilità che una particella si trovi in una prefissata posizione x_t . In qualche modo c rappresenta il numero medio di particelle che si trovano in un intorno di x_t e quindi è significativo della concentrazione di particelle in questa posizione.

Essendo $\Xi = v' * \Delta t$, l'equazione [24] può essere scritta come:

$$D = \frac{1}{2} * \sigma_{v'}^2 * \Delta t \quad [26]$$

Quindi facendo spostare una particella con una velocità media v e una componente fluttuante v' si ottiene una soluzione lagrangiana dell'equazione di trasporto e dispersione.

4. METODI E MODELLI DI CALCOLO

Il coefficiente di dispersione intermareale e la sua distribuzione spaziale nel dominio sono stati descritti per mezzo dell' accoppiamento di un modello idrodinamico e un modello di monitoraggio delle particelle.

In questo capitolo si vuole descrivere il modello idrodinamico applicato alla laguna di Venezia, fare un rapido accenno ai file di input come la geometria, le condizioni iniziali e al contorno e presentare alcuni risultati probabili che si riscontreranno nel 2050. In seguito verrà definito il modello di dispersione nell'intero bacino attraverso l'inseguimento della particella, focalizzandosi sulla valutazione del coefficiente mediato in tutta la laguna.

4.1. Il modello idrodinamico

Per simulare il campo di moto nella laguna di Venezia, è stato utilizzato un modello vento-marea (WWTM - Wind Wave-Tidal Model). I modelli bidimensionali ad elementi finiti accoppiano un modulo di marea con la generazione dell' onda da vento e il modulo di propagazione. Per tale studio il vento non è stato considerato forza motrice del sistema, inoltre, il modello idrodinamico risolve le equazioni bidimensionali delle acque basse, al fine di affrontare bacini parzialmente bagnati e molto irregolari [Defina, 2000].

L'intera descrizione delle equazioni bidimensionali del flusso superficiale per le aree parzialmente asciutte è trattato in Defina (2000), mentre la validità del modello WWTM nella Laguna di Venezia, è stata effettuata in Carniello et al. (2005, 2011), D'Alpaos e Defina (2007).

Al fine di risolvere le equazioni che dominano il moto, è necessario avere i file di input, come la geometria del bacino, le condizioni iniziali e al contorno, i parametri coinvolti nel processo, la marea imposta, ecc.

Il file della geometria (Figura 14) comprende la griglia di calcolo che è composta da una maglia non strutturata della laguna di Venezia con 114.243 elementi triangolari e 59.705 nodi:

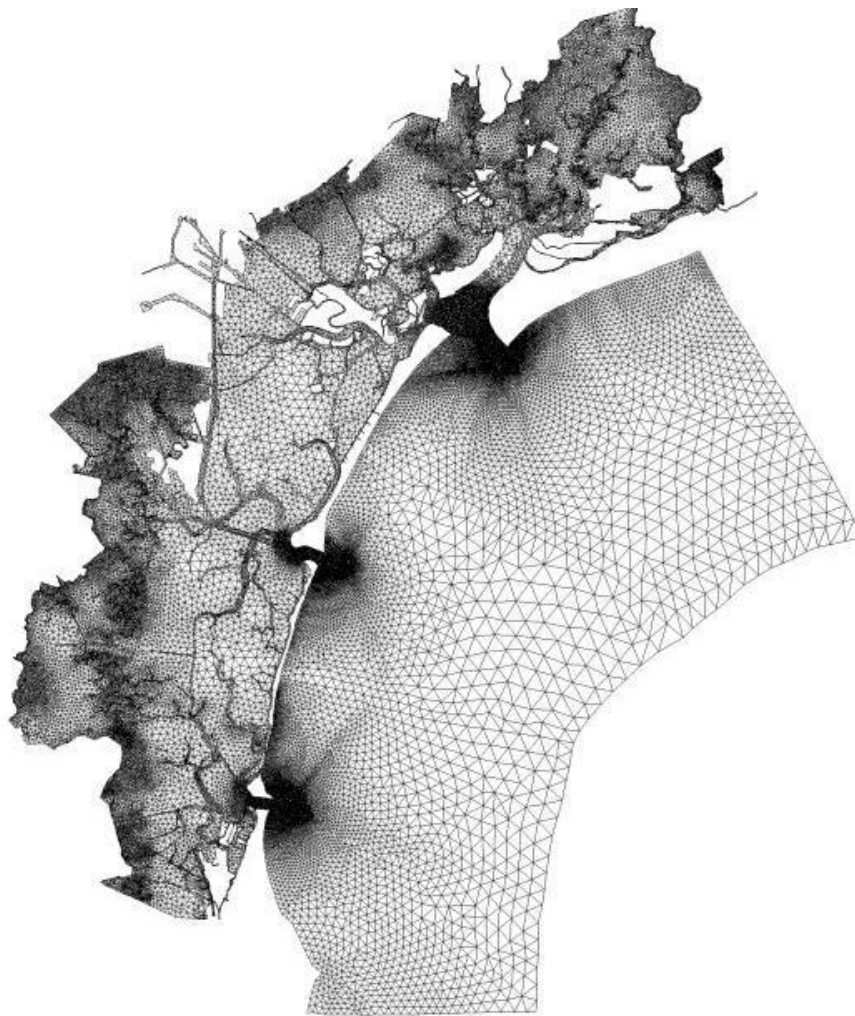


Figura 14 – Meshatura agli elementi finiti

Per completezza di informazioni si integra la trattazione con dei grafici che riportano rispettivamente i valori della profondità (Figura 15), espressi in metri sopra il livello medio del mare (m slm), e quelli delle scabrezze (Figura 16) che caratterizzano i fondali, assegnando dei valori standard alle zone con caratteristiche simili.

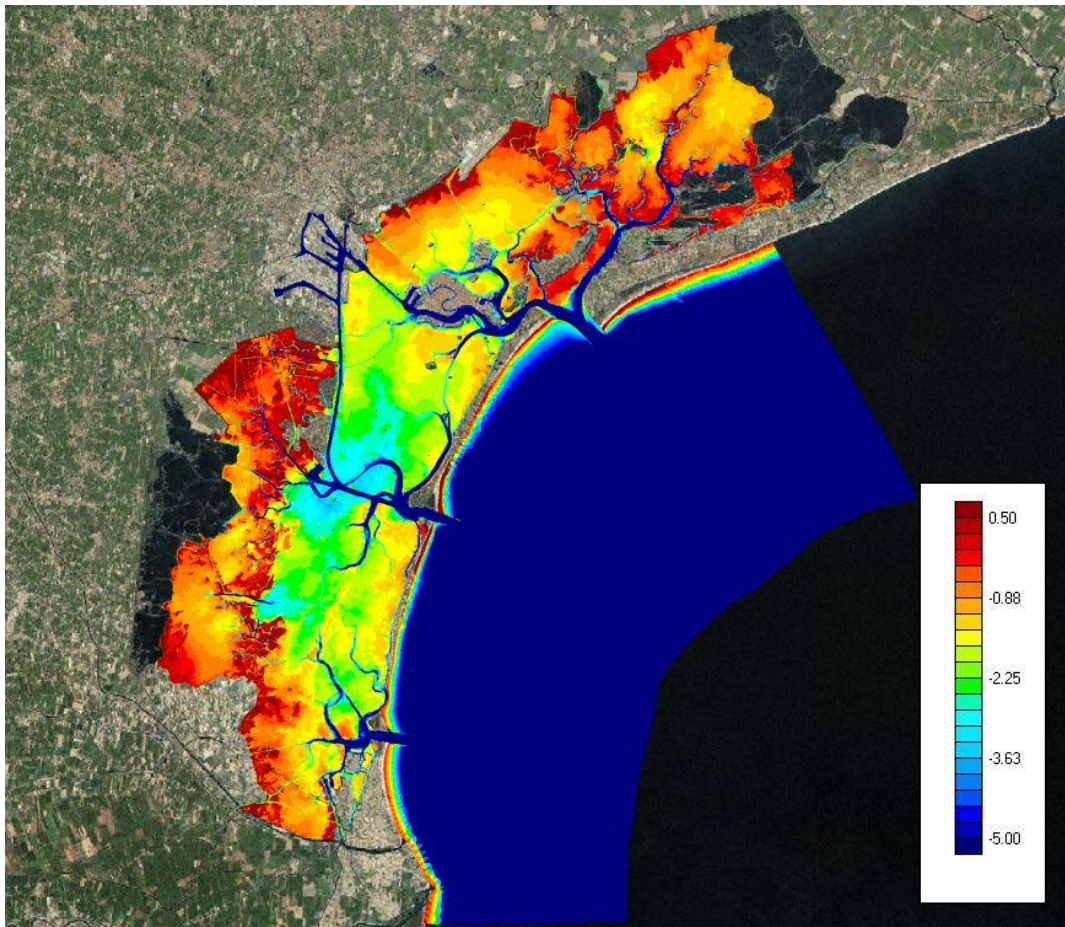


Figura 15 – File .geo con le quote del fondo (m, s.l.m.)

Si nota, ovviamente, come muovendosi dalle tre bocche di porto verso l'interno del bacino, la velocità decresce. Il colore rosso rappresenta le aree più alte della laguna che vengono sommerse solo nel caso di alte maree; sono situate nelle zone più a nord e nella parte occidentale della laguna centro meridionale.

Le parti caratterizzate da colore verde-giallo sono rappresentative delle batimetrie tipiche dei bassifondi che emergono durante il reflusso della marea.

In particolare la città di Venezia è circondata da canali profondi così come la zona industriale di Porto Marghera.

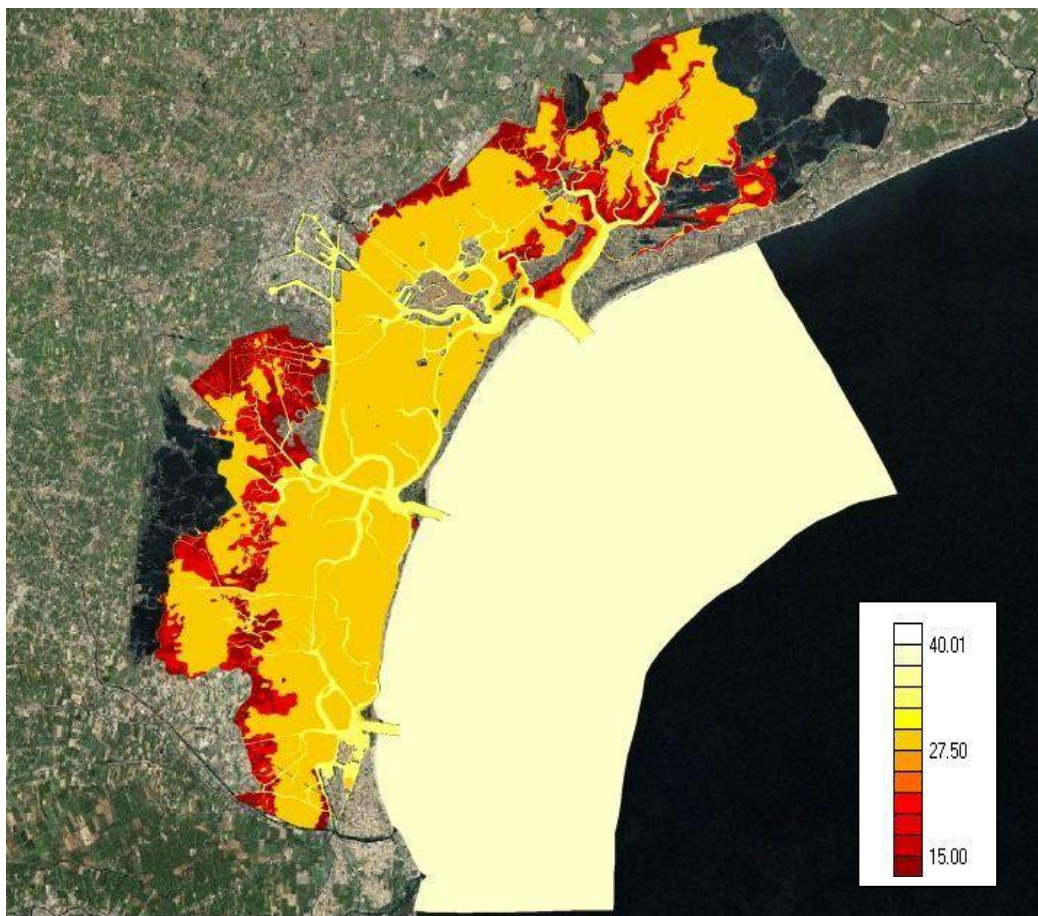


Figura 16 – File .geo con i valori di K_s assegnati ($m^{1/3}s^{-1}$)

Associando i seguenti valori :

- $K_s = 40 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ per il mare aperto
- $K_s = 35 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ per i canali principali
- $K_s = 30 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ per i bassifondi
- $K_s = 20 - 15 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ per le barene

Al fine di eseguire il modello idrodinamico è necessario un file di simulazione che includa il metodo di calcolo e le condizioni al contorno .

In particolare, in questo caso, si fa riferimento ad una simulazione della durata complessiva di 172.800 secondi corrispondente a 48 ore, con un passo di integrazione pari a 1 secondo.

Si impone una marea sinusoidale nei 105 nodi al contorno verso il mare Adriatico (Figura 17), l'elevazione del livello varia secondo l'equazione:

$$h = lm + A * \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad [27]$$

dove:

$h = \text{livello dell' acqua}(m)$

$lm = \text{livello medio dell' acqua}(m) = 0$

$A = \text{ampiezza di marea} = 0,5m$

$t = \text{passo temporale} = 1800s$

$T = \text{periodo di marea semidiurno} = 12h$

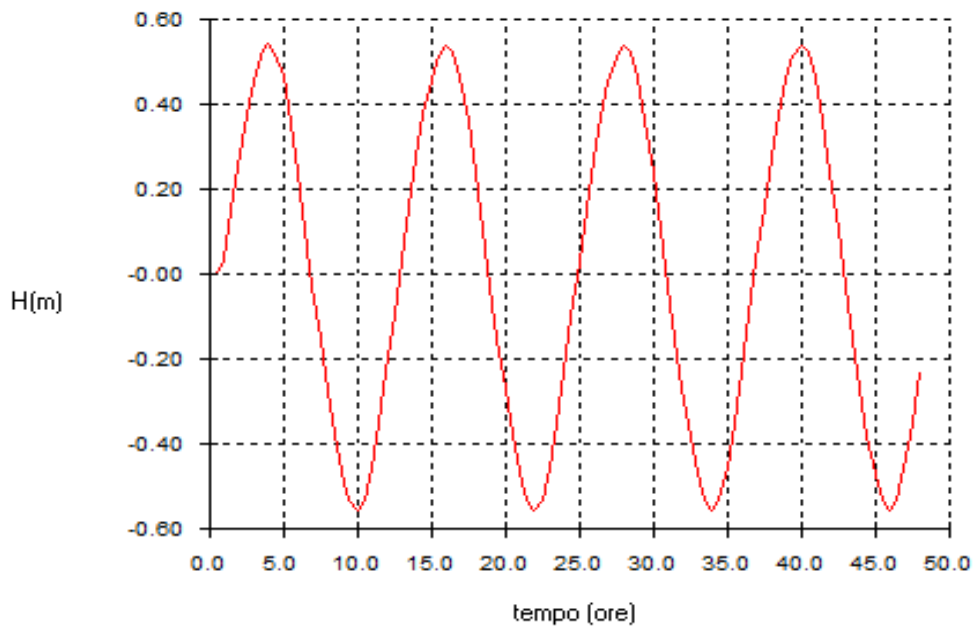


Figura 17 – Marea sinusoidale imposta

I livelli dell'acqua cambiano in un bacino poco profondo a seconda delle oscillazioni di marea. Si riporta nella figura che segue (Figura 18) le variazioni dei livelli, in accordo con l'idrodinamica lagunare, rispettivamente a 24, 27, 30 e 33 ore dall'inizio del ciclo.

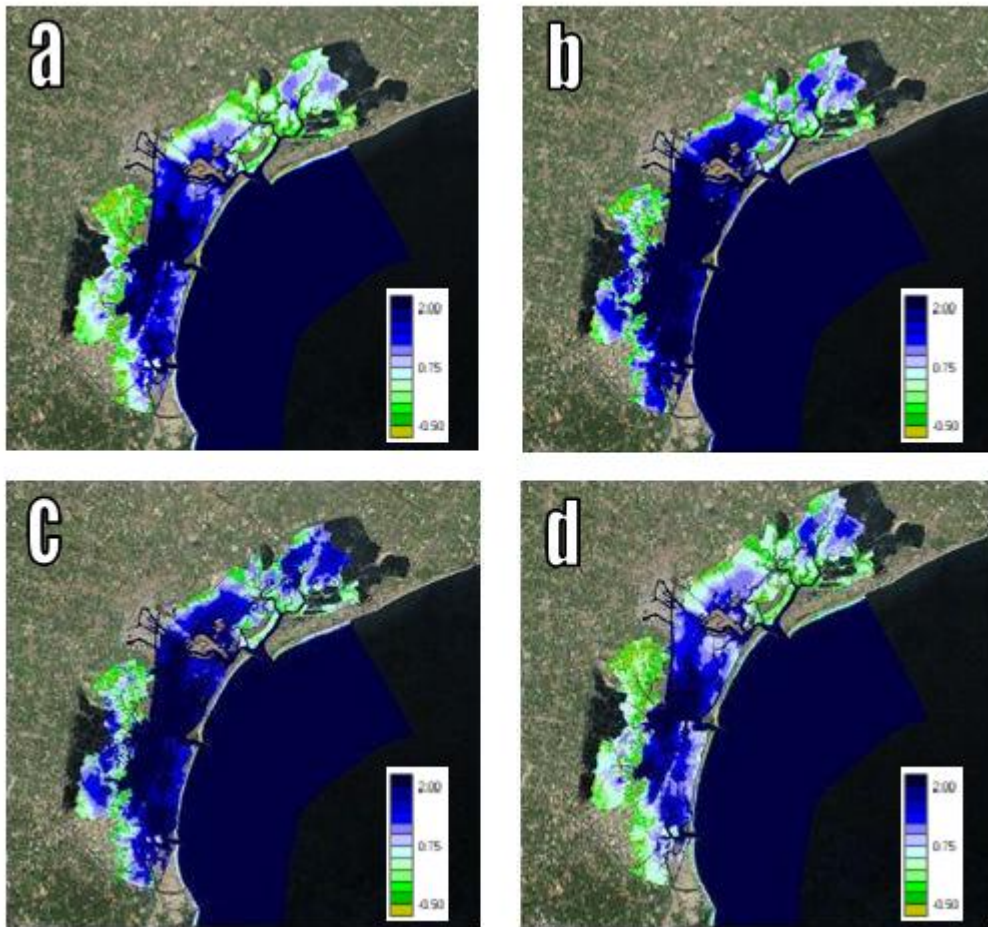


Figura 18 – Variazione dei livelli in laguna per diversi tempi (m s.l.m.)

a)t=24ore; b)t=27ore; c)t=30ore; d)t=33ore

I livelli dell'acqua variano nel bacino seguendo il flusso della marea. E' evidente che quando l'acqua è in ingresso nella laguna, il colore che caratterizza il bacino è il blu scuro, ad indicare che la profondità è in aumento; viceversa, nella fase di fuoriuscita dell'acqua la laguna torna ad avere profondità meno elevate.

Sotto (Figura 19) viene riportata la distribuzione spaziale delle velocità, rispettivamente nell'immagine di sinistra quando il flusso è diretto verso l'interno del bacino e in quella di destra dove la marea è in uscita verso il mare.

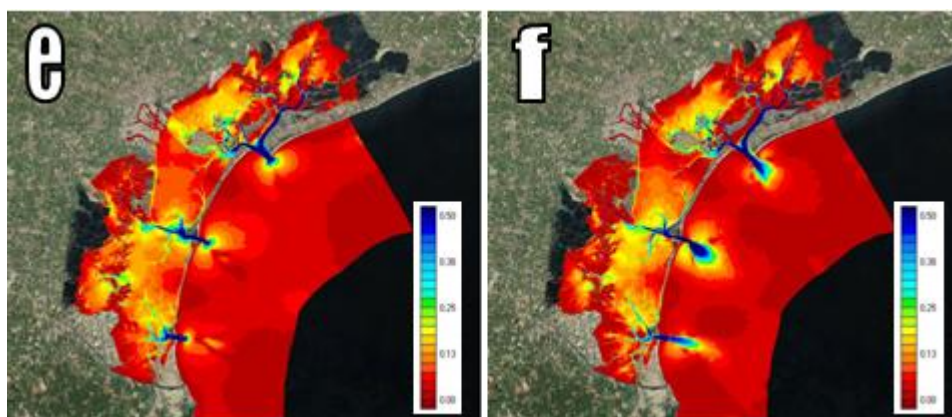


Figura 19– Distribuzione spaziale della velocità (m/s)
 e)marea in entrata in laguna; f)marea in uscita dalla laguna

4.2. Il modello di monitoraggio delle particelle

Per simulare il modello di rilevamento delle particelle viene richiesto come file input l'idrodinamica, dalla cui simulazione viene estratta una parte, in particolare un ciclo di marea di 12 ore.

Il coefficiente di dispersione intermareale e la sua distribuzione spaziale dipendono dalla fase della marea, perciò si è suddiviso il periodo in 4 fasi con 3 ore di distanza l'una dall'altra. Le particelle sono state rilasciate quando il livello dell'acqua è uguale a 0 e la marea è in aumento nel bacino (si chiama $t=0$ il tempo iniziale).

Le particelle si diffondono e disperdono nel bacino a seconda della posizione di immissione. Pertanto, le simulazioni sono state effettuate per chiarire la dipendenza del modello dalla posizione iniziale delle particelle nel dominio.

Il modello di tracciamento è stato applicato considerando i traccianti in diverse aree della laguna. Praticamente, la laguna di Venezia è stata suddivisa in tre grandi regioni (meridionale, centrale e settentrionale), e in seguito sono state rilasciate in ciascun sottobacino quattro o cinque 'macchie' di contaminanti. La simulazione ha proseguito per una durata complessiva di 72 ore. Per questo calcolo non è stato considerato l'effetto della fase in cui si trova la marea.

Per quanto riguarda il calcolo del coefficiente di dispersione [m^2/s] si usa la formulazione utilizzata introdotta nel paragrafo 3 e, qui, arrangiata per il caso bidimensionale dove:

$$D = \frac{1}{4} \frac{\Delta\sigma^2}{T} \quad [28]$$

Posto:

T = ciclo di marea (12 ore)

$\Delta\sigma^2$ = differenza tra gli scarti quadratici medi delle nuvole

Il coefficiente di dispersione medio potrebbe essere visto come un parametro di stima della velocità di diffusione delle particelle in un bacino di acqua poco profonda. I traccianti che si diffondono con più facilità avranno un maggior valore del coefficiente rispetto alle particelle che risultano intrappolate nel sistema e non si possono diffondere. Per i risultati della discussione è stato utilizzato il $\text{LOG}_{10}(D)$. Il coefficiente tiene conto dell'effetto di dispersione in entrambe le direzioni x e y , determinando un coefficiente isotropo.

5. ANALISI DEI RISULTATI

5.1. Il modello lagrangiano

Si procede quindi col modello lagrangiano lasciando 5 nuvole nella parte settentrionale della laguna. Ognuna di queste racchiude 1.000 particelle in un raggio imposto di 10 metri.

I risultati della dispersione di particelle nel dominio sono mostrati nelle figure che seguono (Figure dalla 20 alla 31). Sono riportati quattro diversi momenti della simulazione (ogni 24 ore), in particolare, per $t = 0$ (tempo iniziale), $t = 24$ ore, $t = 48$ ore, $t = 72$ ore.



Figura 20 – Laguna nord _ Dispersione delle particelle a $t=0$ ore



Figura 21 – Laguna nord _ Dispersione delle particelle a t=24 ore



Figura 22 – Laguna nord _ Dispersione delle particelle a t=48 ore



Figura 23 – Laguna nord _ Dispersione delle particelle a t=72 ore

Risulta evidente la diversa entità della dispersione delle macchie a partire dalle 48 ore dopo l'inizio della simulazione. La macchia 3 e la 5, che si trova in prossimità della città di Venezia, si diffondono con più facilità a causa della maggiore profondità dei canali e delle correnti che aiutano la dispersione delle particelle. Le macchie 1 e 2, situate nella parte più settentrionale della laguna, anche dopo 72 ore, non mostrano una dispersione notevole, in particolare la macchia 1 sembra essere intrappolata all'interno dell'area di rilascio. La macchia numero 4 mostra un accenno di dispersione dopo le 48 ore.

Spostandosi dalla bocca di Lido verso il nord l'effetto delle correnti di marea influenza sempre di meno l'effetto della dispersione che è evidentemente maggiore in prossimità della bocca di porto.

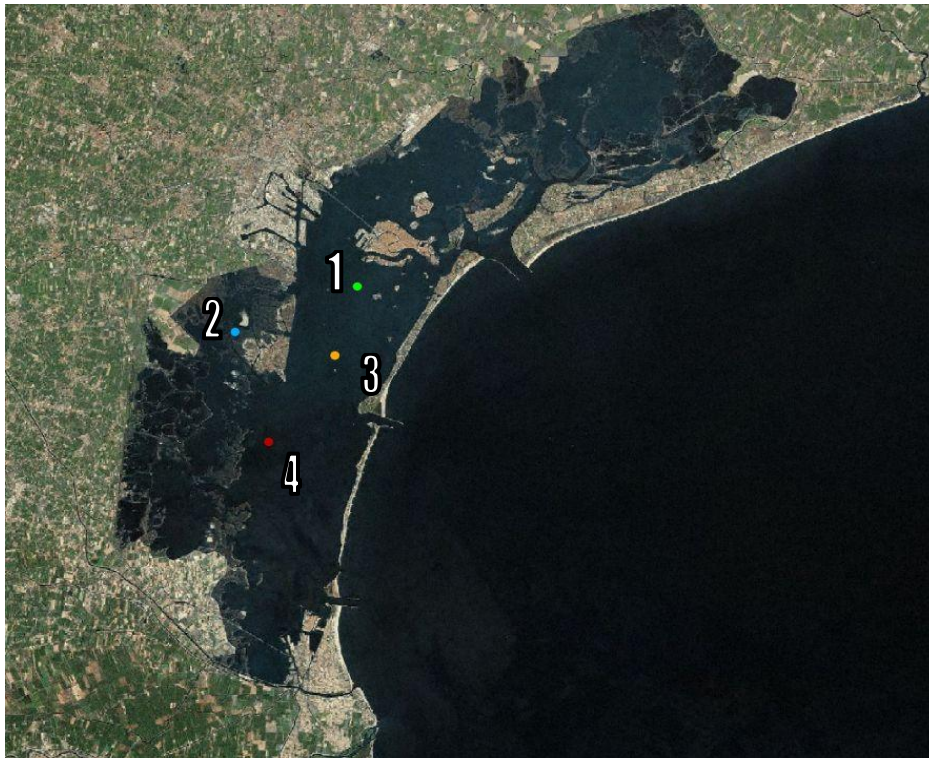


Figura 24 – Laguna centro _ Dispersione delle particelle a t=0 ore

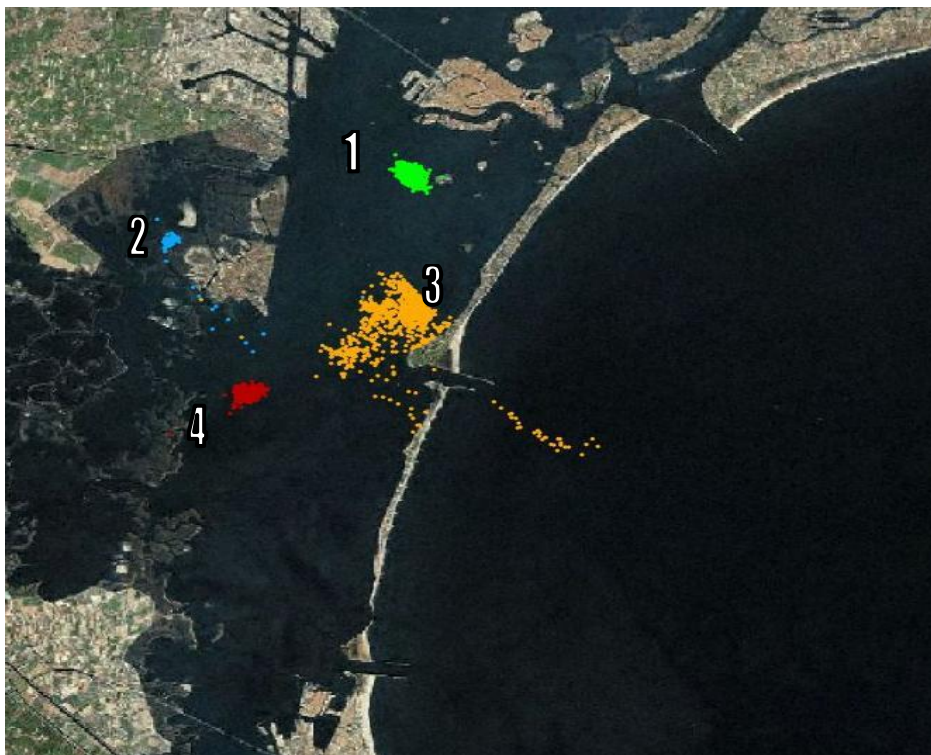


Figura 25 – Laguna centro _ Dispersione delle particelle a t=24 ore

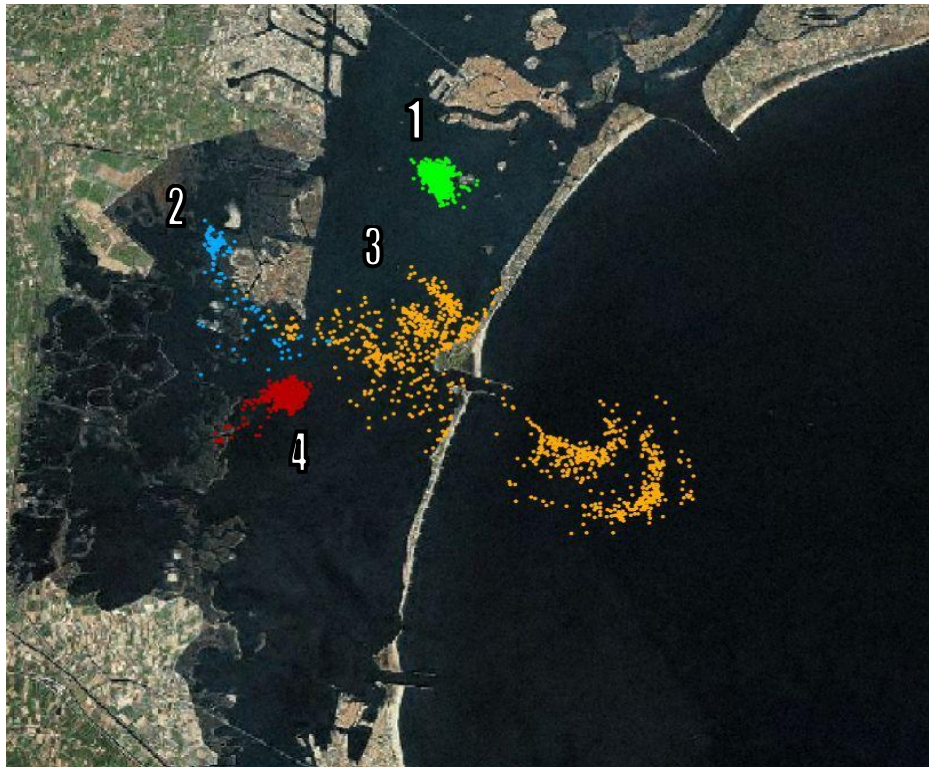


Figura 26 – Laguna centro _ Dispersione delle particelle a t=48 ore

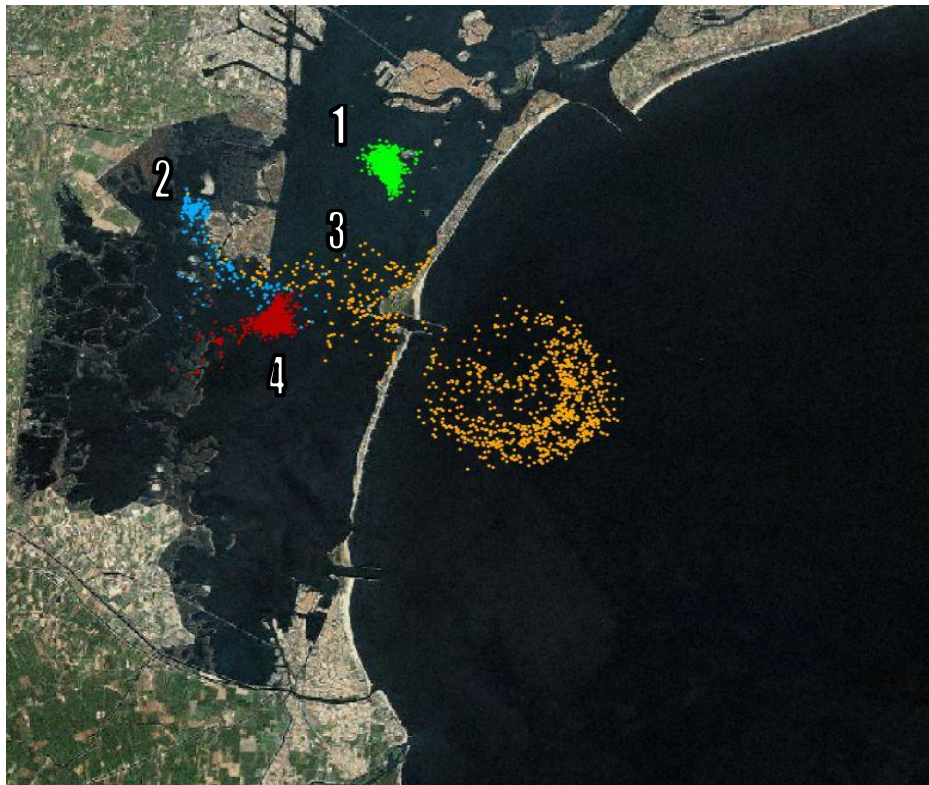


Figura 27 – Laguna centro _ Dispersione delle particelle a t=72 ore

Per quanto riguarda la parte centrale della laguna sono state rilasciate, a titolo esemplificativo, 4 macchie usando il medesimo approccio usato per la parte nord della laguna. Come da previsione la macchia 3 si disperde molto di più delle altre già dopo 24 ore. Le forti correnti che attraversano la bocca di Malamocco incrementano l'effetto dispersivo tanto da portare, dopo 72 ore, la maggior parte delle particelle dal bacino al mare.

Ciò non accade alle altre 3 macchie. In particolare la macchia 1 e la macchia 4 subiscono un effetto dispersivo molto ridotto ma la 2, nonostante posizionata in una zona caratterizzata dalla presenza di barene, si disperse abbastanza, andando a mescolarsi con le particelle della macchia 3.



Figura 28 – Laguna sud _ Dispersione delle particelle a t=0 ore

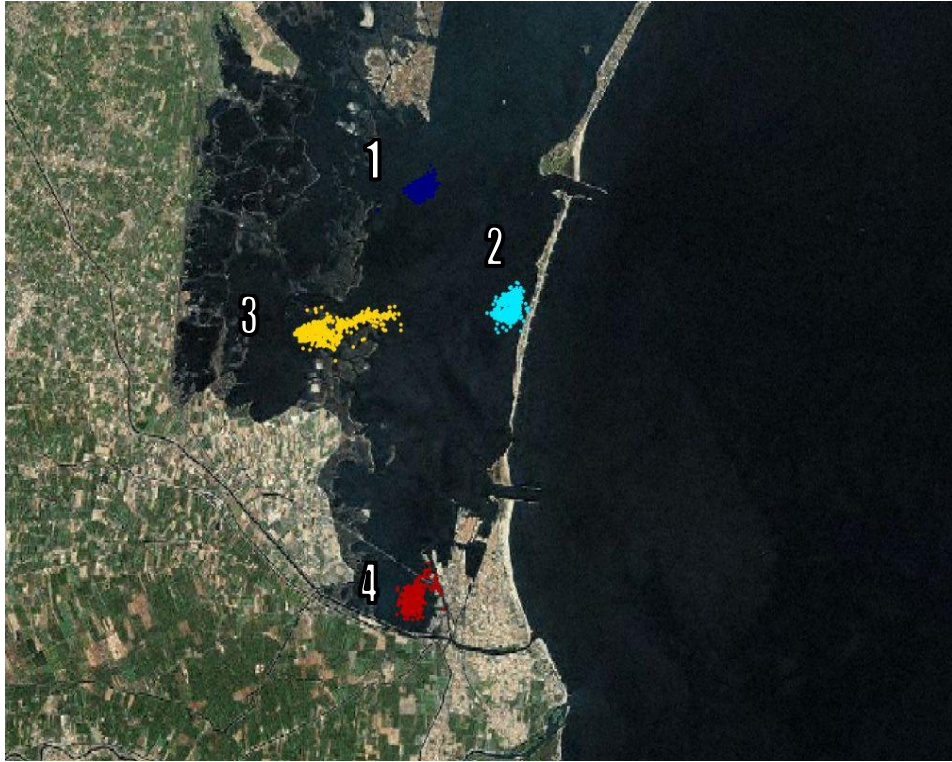


Figura 29 – Laguna sud _ Dispersione delle particelle a t=24 ore

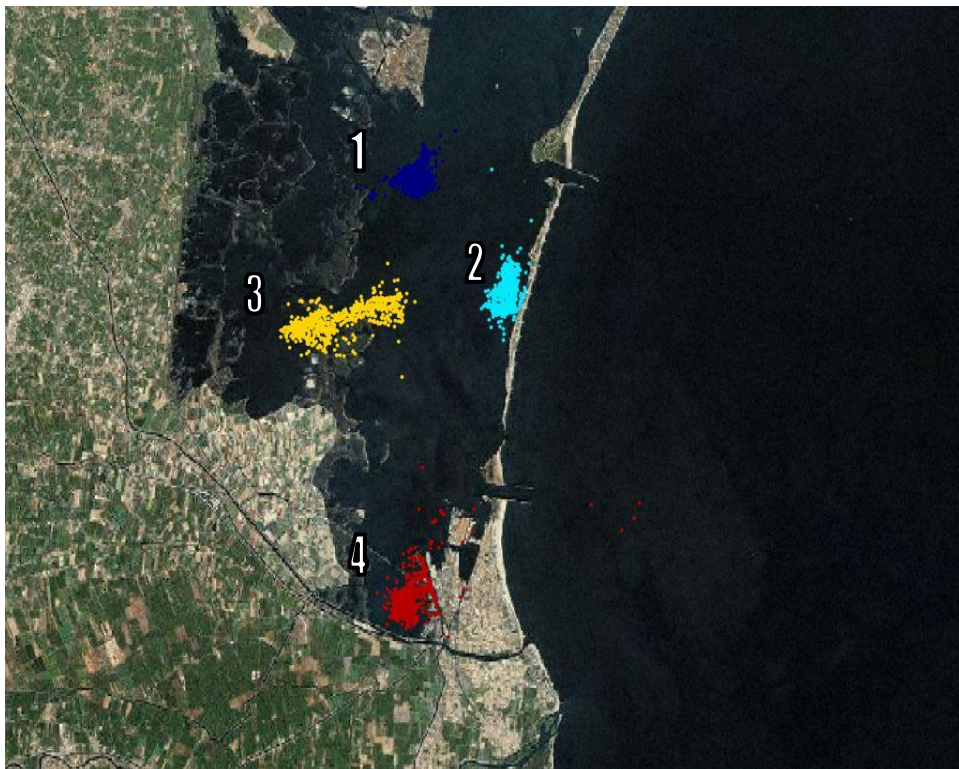


Figura 30 – Laguna sud _ Dispersione delle particelle a t=48 ore

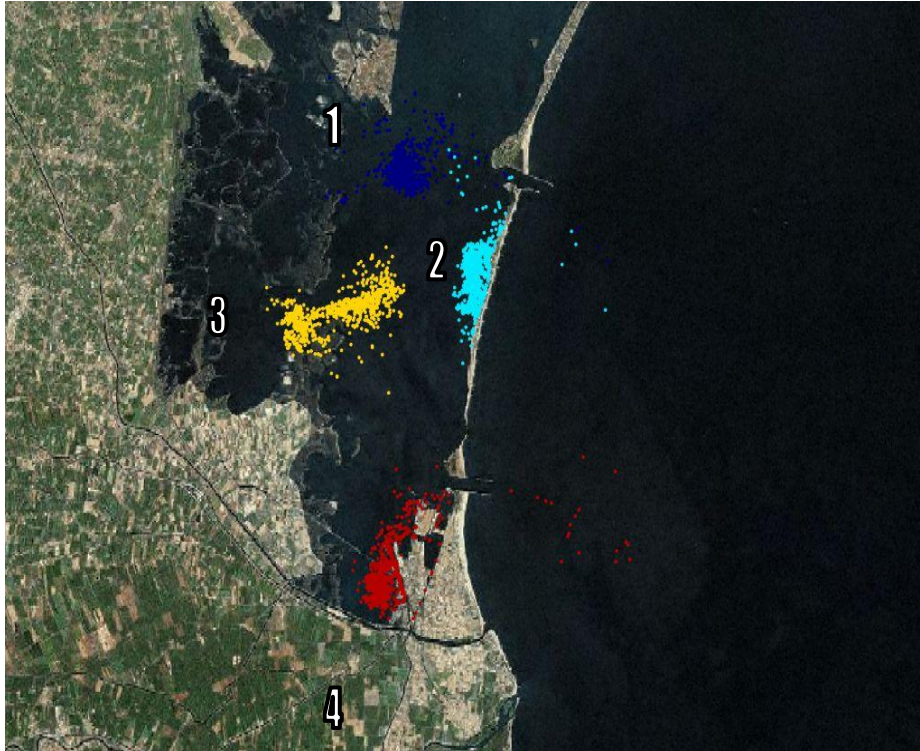


Figura 31 – Laguna sud _ Dispersione delle particelle a t=72 ore

Anche la parte meridionale della laguna è stata studiata seguendo lo stesso approccio e rilasciando 4 macchie di particelle. Per ognuna di queste si nota una sostanziale similitudine per l'entità della dispersione. Particolarmente intensa è la dispersione della macchia 3 che per la posizione iniziale, in prossimità di barene, in teoria dovrebbe mostrare una diffusione minore. La spiegazione va ricercata nella presenza, nella zona in cui viene rilasciata la macchia 3, di un canale, particolarmente attivo, che mette in comunicazione la zona retrostante la fascia di barene con la laguna viva.

Il coefficiente di dispersione può essere interpretato come una misura della velocità di dispersione di un tracciante. Pertanto valori più elevati implicano maggiore capacità di ricambio idrico.

I risultati del modello confermano le aspettative presentando coefficienti di dispersione elevati nei pressi delle bocche di porto e lungo i canali principali che si diramano da esse e valori minori nelle zone più remote della laguna.

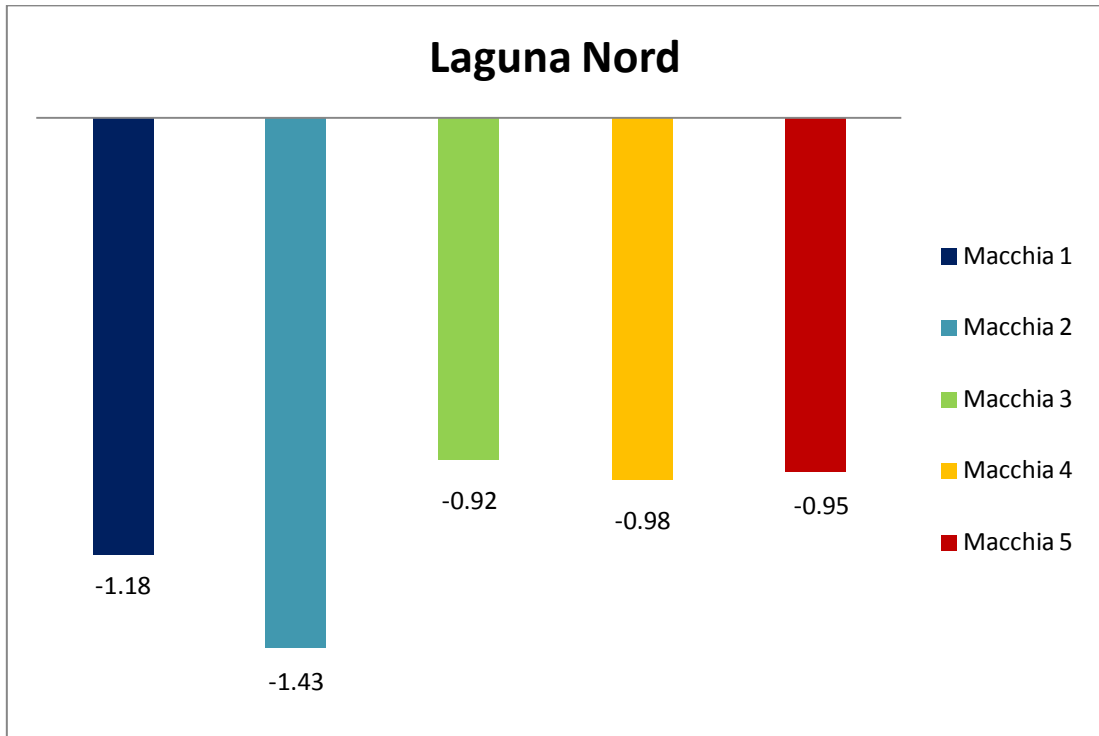


Figura 32 – Coefficiente di dispersione Log(D) _ Sottobacino nord

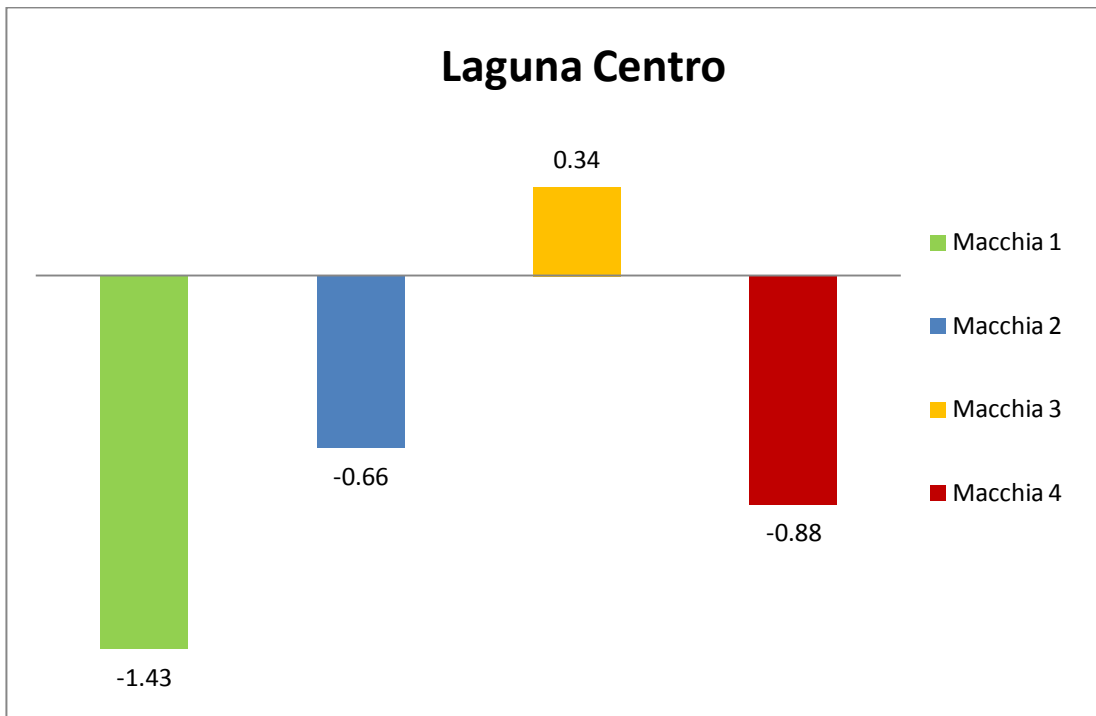


Figura 33 – Coefficiente di dispersione Log(D) _ Sottobacino centro

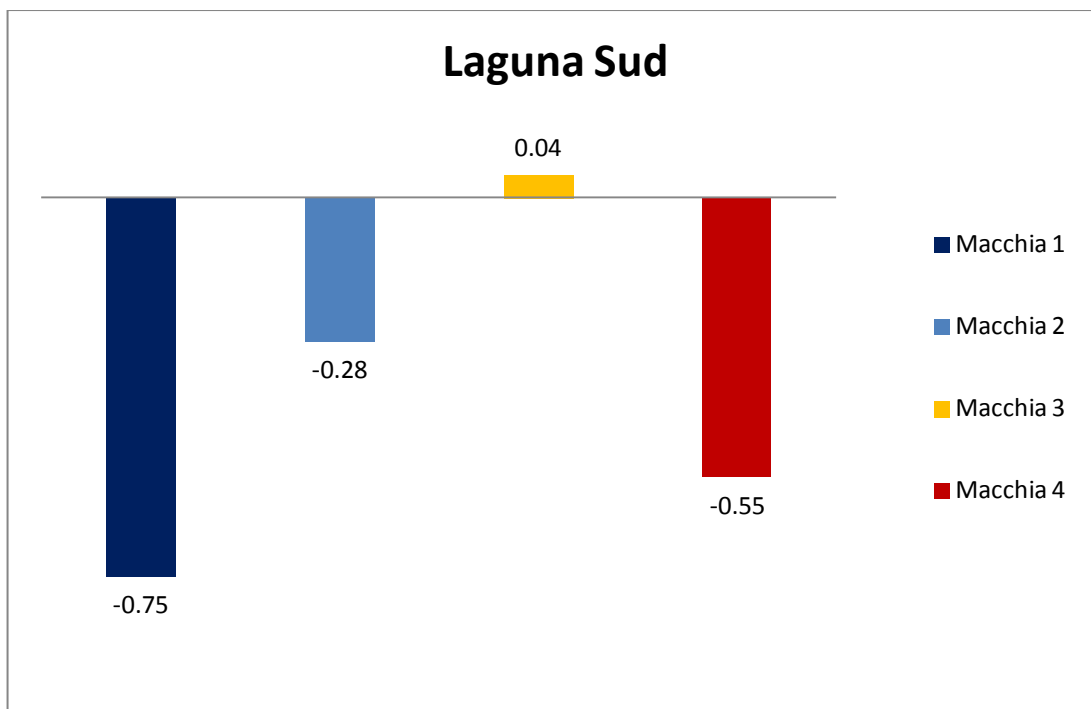


Figura 34 – Coefficiente di dispersione Log(D) _ Sottobacino sud

Per ciascuna delle macchie considerate negli esempi precedenti è stato valutato il coefficiente di dispersione intermareale per un singolo ciclo di marea (prime 12 ore della simulazione) così come descritto in precedenza (paragrafo 3.2). Nelle Figure 32-34 vengono riportati, in scala logaritmica, tali valori.

Considerando la simulazione eseguita per la laguna nord, il coefficiente più elevato è stato stimato per la nuvola 3 che è chiaramente quella che si diffonde di più delle altre e a seguire la numero 5, posizionata vicino a Venezia. Le altre macchie hanno valori più bassi in accordo con la loro poca diffusione.

Spostandosi nella parte centrale della laguna è stato ottenuto il valore in assoluto più elevato del coefficiente per la nuvola 3, quella posta in prossimità della bocca di Malamocco, evidentemente la parte idraulicamente più attiva dell'intero bacino lagunare.

La parte meridionale della laguna conferma ancora una volta i risultati ottenuti precedentemente. La macchia 3 mostra la maggiore diffusione, le altre raggiungono

valori minori anche se nel complesso più attive rispetto alle aree settentrionale e centrale.

5.2 Il coefficiente di dispersione medio

La distribuzione spaziale del coefficiente di dispersione intermareale viene effettuata considerando 1125 nuvole localizzate in tutto il dominio, come illustrato in Figura 35:



Figura 35 – Distribuzione spaziale delle particelle in tutto il dominio

Dopo aver posizionato le particelle in laguna, è stato utilizzato il modello lagrangiano per valutare la distribuzione spaziale del coefficiente in tutta la laguna in dipendenza dalla fase della marea. La procedura è stata ripetuta nel suo complesso per quattro volte modificando l'istante, nel corso della marea, in cui sono state introdotte le particelle.

Al fine di verificare la dipendenza dalla fase di marea, è stata eseguita una simulazione. Si va a considerare un'ipotetica macchia di inquinante all'interno del dominio alla quale viene applicato il modello lagrangiano per i tempi iniziali $t=0$, $t=3$, $t=6$ e $t=9$. La Figura 36 illustra le quattro diverse fasi usate come differenti condizioni iniziali.

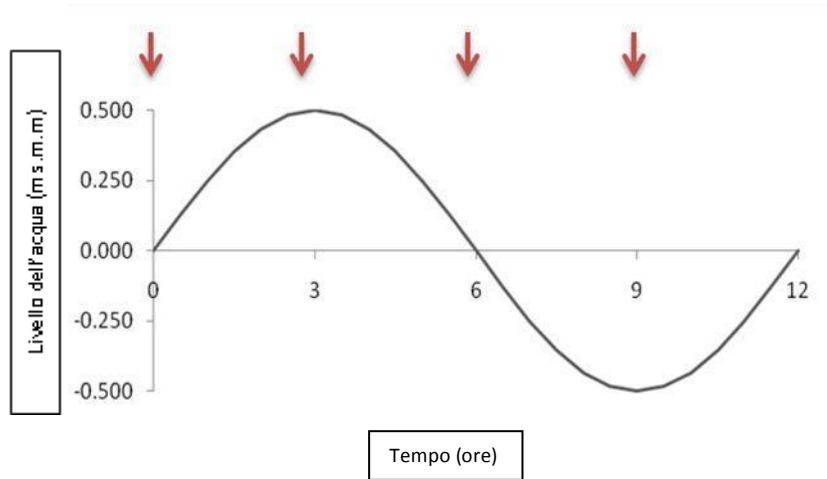


Figura 36 – Marea utilizzata per stimare il coefficiente di dispersione intermareale ai tempi iniziali $t=0$, $t=3$, $t=6$, $t=9$

La prima simulazione è stata effettuata iniettando la massa a $t=0$ quando l'acqua sta entrando in laguna e il livello è in aumento. La seconda è stata calcolata utilizzando come tempo iniziale $t=3$ ore: il livello dell'acqua sta diminuendo e l'acqua viene portata fuori dalle bocche di porto. Le ultime due simulazioni sono state eseguite per gli istanti iniziali $t=6$ ore e $t=9$ ore. La durata delle simulazioni è di 24 ore.

Poi è stato calcolato il coefficiente di dispersione per i diversi casi; la tabella 1 ne riporta i risultati.

Fase di marea (h)	D (m^2/s)
$t=0$	0.85
$t=3$	3.72
$t=6$	3.93
$t=9$	0.42

Tabella 1- Coefficiente di dispersione per gli sfasamenti di marea

La Figura 37 mostra nella colonna di sinistra la posizione iniziale della nuvola, mentre a destra la dispersione dopo 24 ore dall'istante iniziale. La posizione iniziale è la stessa per le quattro fasi della marea; nella colonna di sinistra è raffigurata anche la distribuzione del coefficiente intermareale precedentemente calcolato. Come previsto, le particelle iniettate al tempo $t=0$ e $t=9$ sono meno diffuse rispetto a quelle rilasciate a $t=3$ e $t=6$. Questo fatto è confermato dai valori dei coefficienti di dispersione intermareale ed è visibile osservando la dispersione durante le 24 ore di simulazione.

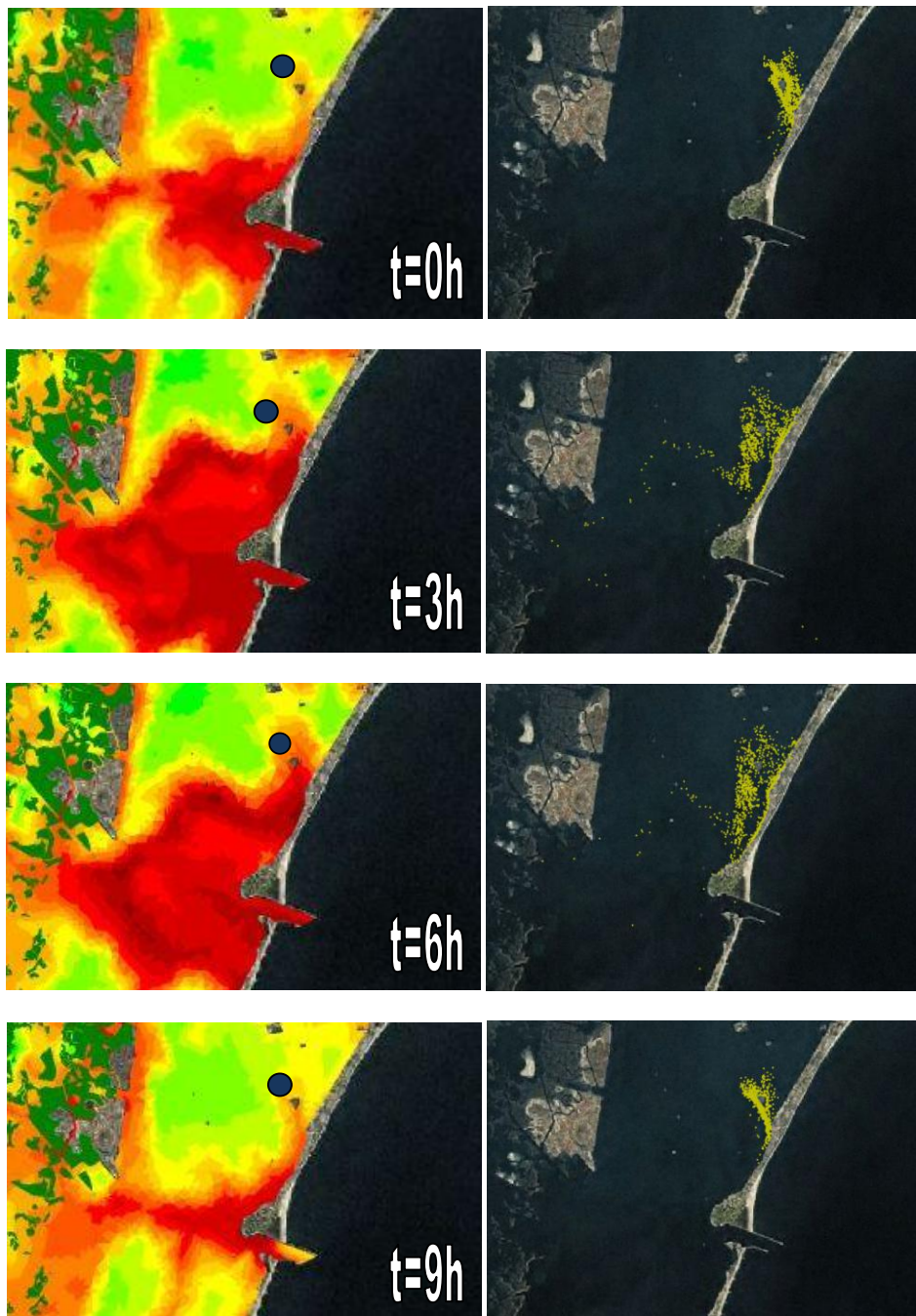


Figura 37 – Dipendenza del coefficiente di dispersione intermareale dalla fase (a destra dopo 24 ore)

La Figura 38 mostra la distribuzione spaziale del coefficiente di dispersione in laguna per la prima fase di marea considerata, cioè $t = 0$ (fase di flusso in aumento).

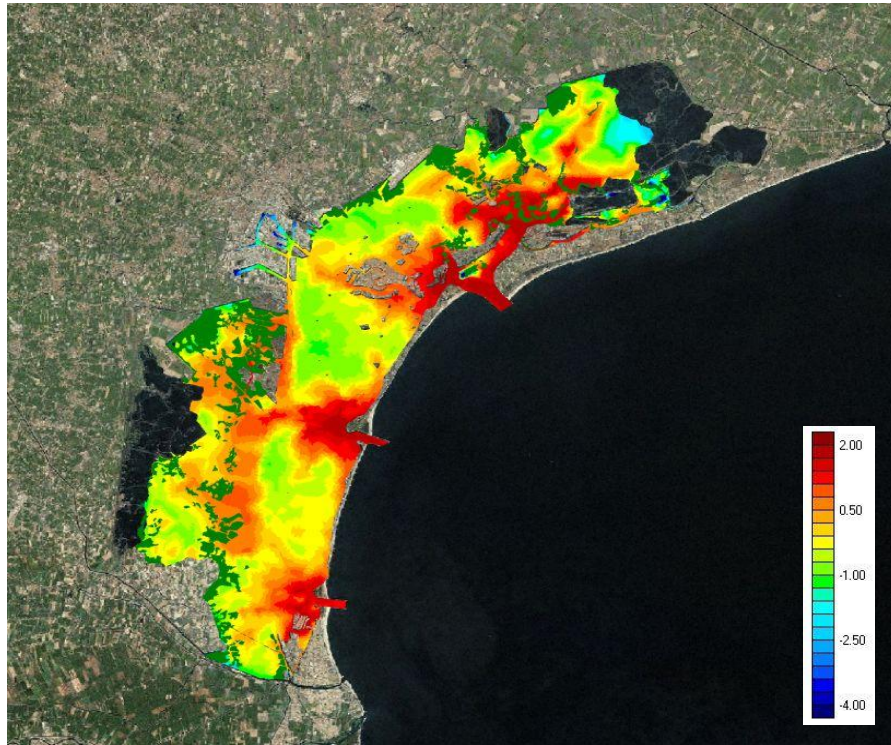


Figura 38 – Distribuzione spaziale del coefficiente intermareale [m^2/s]. ($t=0$ ore)

Come previsto, i valori più elevati del coefficiente di dispersione si ottengono nelle zone limitrofe alle tre bocche di porto. Infatti (Figura 38) i canali più profondi sono caratterizzati da velocità maggiori che aiutano la dispersione delle particelle.

Muovendosi verso l'interno del bacino si nota un livellamento dei valori del coefficiente, una riduzione particolare nelle aree prospicienti le isole di Lido e Pellestrina e a ridosso dell'area industriale di Porto Marghera. Vicino la città di Venezia e di Chioggia sembrano esserci valori abbastanza elevati di dispersione. Particolarmente bassi risultano i valori di dispersione all'estremo nord della laguna.

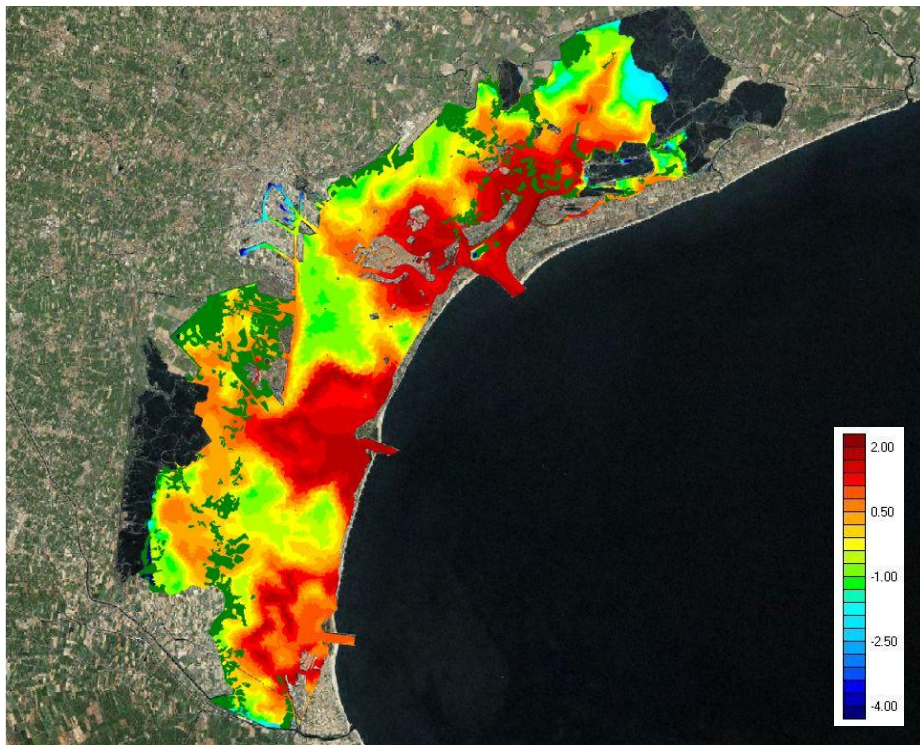


Figura 39 – Distribuzione spaziale del coefficiente intermareale [m^2/s]. (t=3ore)

Come già accennato le simulazioni sono state effettuate anche per diversi momenti di immissione, (Figure 39,40,41) facendo riferimento al primo caso ($t = 0$) poi sono state avviate altre tre simulazioni con uno sfasamento di tre ore, e quindi $t = 3$ ore (massimo livello di marea), $t = 6$ ore (massimo riflusso) e $t = 9$ ore (minimo livello di marea). La posizione iniziale delle macchie di particelle è la stessa per tutte le fasi. Come da previsione la distribuzione spaziale del coefficiente dipende dallo sfasamento di marea. E' evidente per tutte le fasi la tendenza generale di un alto coefficiente dispersivo vicino le bocche di porto, attorno alla città di Venezia e nella parte sud ovest del bacino, in prossimità delle barene. Lontano dalle aperture e nella zona nord, contigua all'entroterra, i coefficienti di dispersione, in tutti i casi analizzati, diminuiscono sensibilmente.

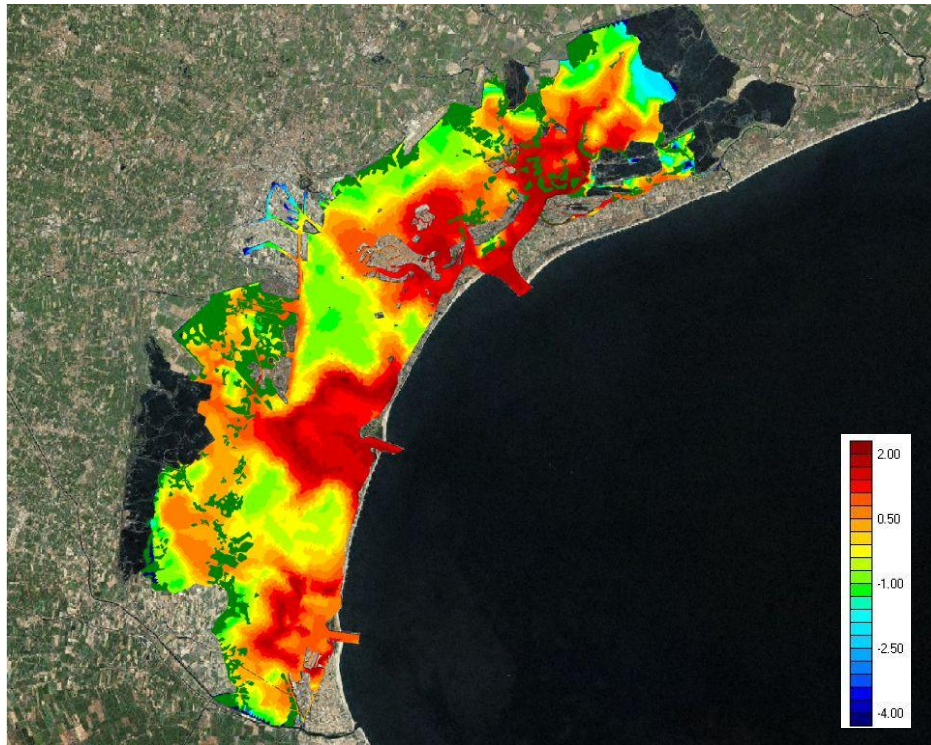


Figura 40 – Distribuzione spaziale del coefficiente intermareale [m^2/s]. (t=6ore)

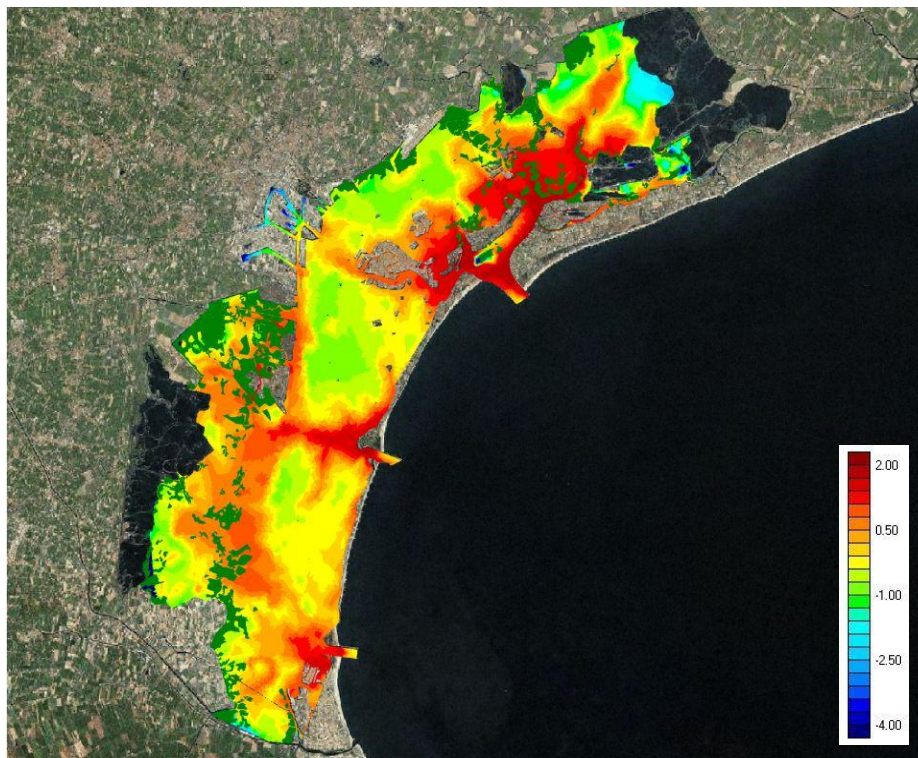


Figura 41 – Distribuzione spaziale del coefficiente intermareale [m^2/s]. (t=9ore)

E' stato infine valutato il coefficiente di dispersione su tutta la laguna mediato sulle quattro fasi discusse prima. La Figura 42 evidenzia come vi sia uno stesso trend evidenziato nelle fasi separate: le aree vicino le bocche sono maggiormente soggette a dispersione piuttosto che il perimetro della laguna verso terra. Come prima l'area vicino a Marghera subisce poca dispersione così come le zone in corrispondenza dei spartiacque.

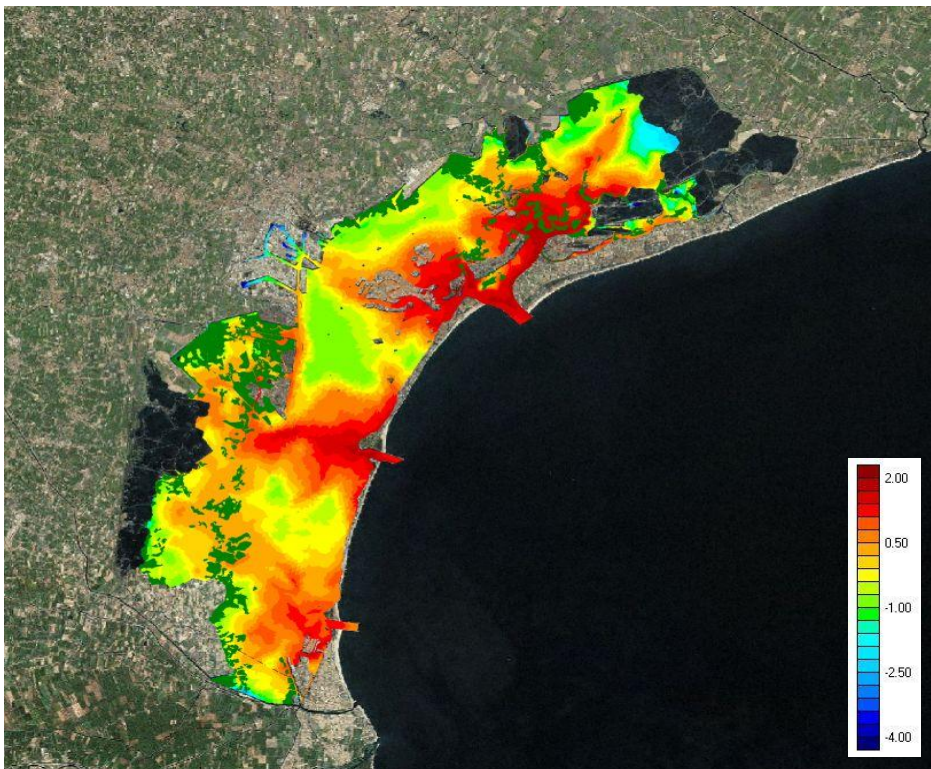


Figura 42 – Coefficiente di dispersione mediato sulle fasi di marea [m^2/s]

6. RISULTATI A CONFRONTO

Si vuole ora analizzare i risultati raggiunti e fare un paragone, in relazione al coefficiente dispersivo, tra la situazione attuale, quella che si prospetta nel 2050 e quella ricavata nel 1901.

I valori ottenuti per la laguna moderna sono tratti dall'elaborato di tesi '*Spatial distribution of tidally-averaged diffusion coefficient in the Venice lagoon*' di Zoccarato (2012) mentre quelli parziali della laguna del 1901 sono di Larese.

In Figura 43 vengono raggruppati lungo la colonna di sinistra i risultati ottenuti per le quattro fasi di marea analizzate prima (partendo dall'alto, rispettivamente per $t=0$, $t=3$ ore, $t=6$ ore e $t=9$ ore) mentre a destra i valori ricavati per la laguna di Venezia riferiti alla batimetria attualmente esistente (Zoccarato, 2012).

Dal confronto fra le due lagune è subito evidente che nel futuro ci si troverà di fronte ad una sostanziale e diffusa riduzione del coefficiente per qualsiasi fase della marea analizzata: si ampliano le zone colorate di verde dove i valori erano già bassi e si attenuano quelle rosse scuro dove il coefficiente diventava più significativo.

Entrando più nello specifico è da sottolineare la diminuzione dell'effetto dispersivo in prossimità di tutte tre le bocche di porto, più accentuato nella parte centro meridionale del bacino ovvero nella bocca di Chioggia e Malamocco. La laguna nord sembra subire meno tale tendenza alla diminuzione anche se si nota comunque un rallentamento nella dispersione proprio attorno alla città di Venezia.

Se si analizzano i risultati preliminari ottenuti per la configurazione che aveva la laguna nel 1901 è ancora più visibile il cambiamento subito da quest'ambiente nel corso degli anni.

La Figura 44 mette a confronto la distribuzione spaziale del coefficiente di distribuzione intermareale nel tre lagune considerate (1901, 2003, 2050) per la fase di marea 6 ore dopo l'istante iniziale (fase di massimo riflusso); è manifesto come la dispersione raggiungesse, nel 1901, valori maggiori in tutto il dominio considerato. L'alto grado di dispersione mette in risalto tutti i piccoli canali che irroravano la laguna e che assicuravano a tutto l'ambiente un riciclo di acqua necessario alla salute e alla sopravvivenza dell'ecosistema lagunare.

Si può pensare al coefficiente di dispersione come un parametro rappresentativo della qualità delle acque in laguna; si deduce quindi che l'attuale ricambio idrico sia minore rispetto a quello di un secolo fa e che, se non si inverte la tendenza evolutiva, fra 50 anni la situazione sarà ancora peggiore. Sempre meno ricircolo di acqua col mare e sempre meno scambi, cosicché un'ipotetica macchia di inquinante resterebbe dentro il bacino più a lungo non riuscendo a purificarsi ed ossigenarsi con l'acqua del mare.

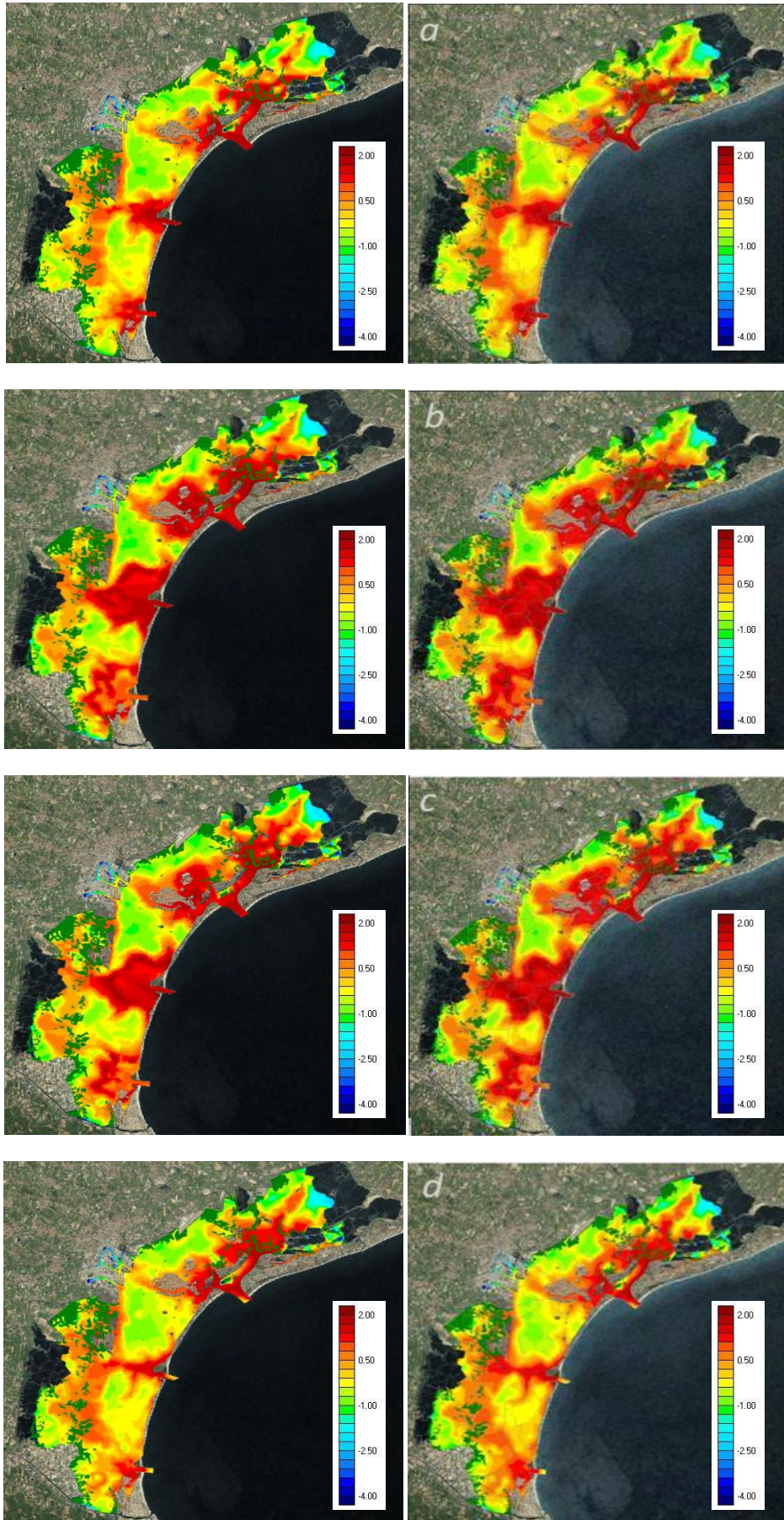


Figura 43 – A sinistra: dispersione nel 2050 – A destra: dispersione laguna al 2003(Zoccarato)

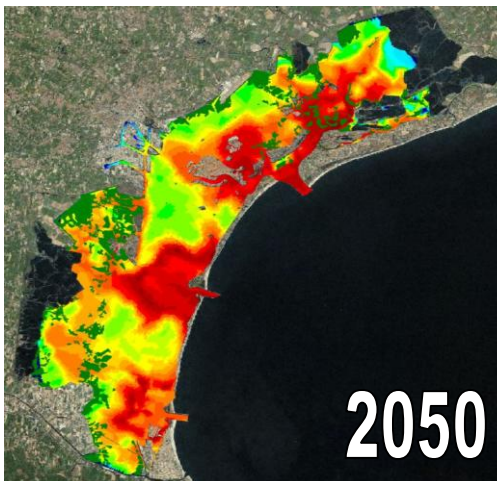
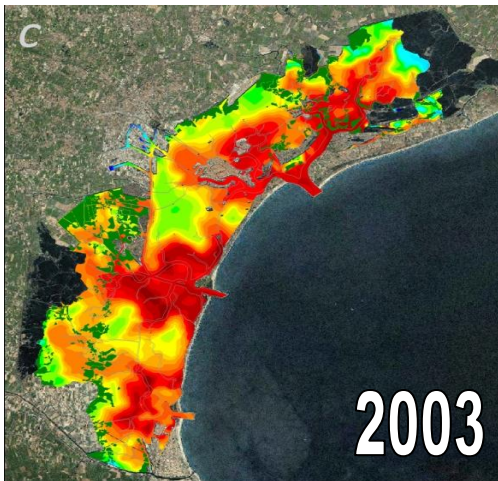
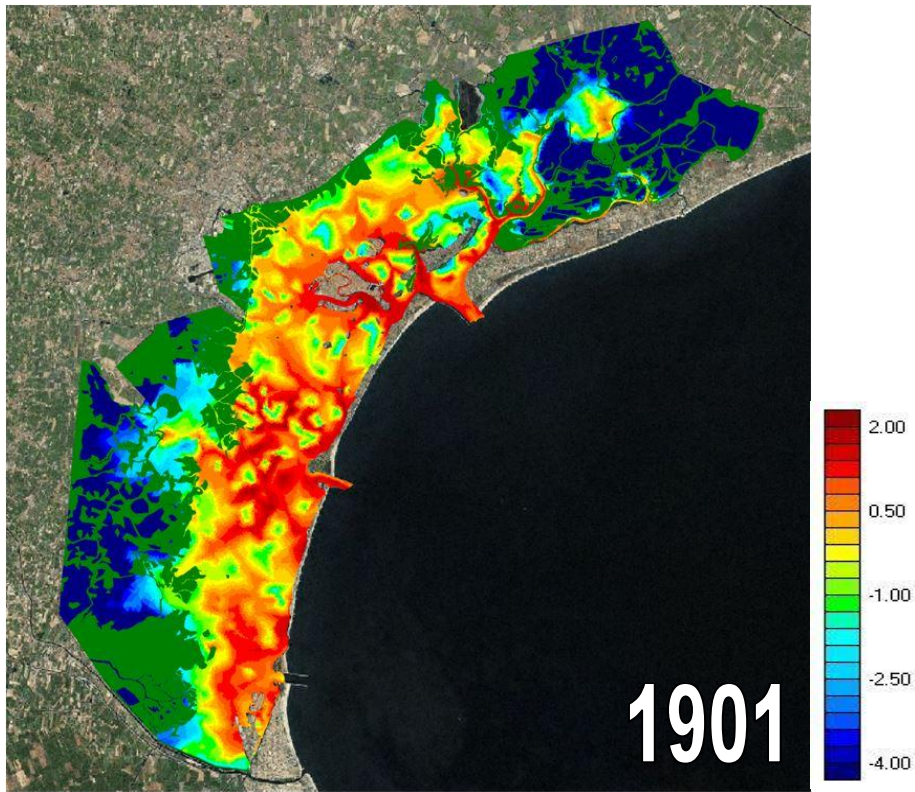


Figura 44 – Distribuzione spaziale del coefficiente di dispersione intermareale a confronto

7. CONCLUSIONI

In questo studio è stato proposto il coefficiente di dispersione intermareale come strumento per studiare i movimenti e gli scambi idrici in un campo di moto decisamente complesso come la laguna di Venezia.

La trattazione è riferita ad una batimetria futura. L'ipotesi di una configurazione lagunare al 2050 è basata sull'analisi della velocità di erosione dei fondali delle batimetrie disponibili per la laguna di Venezia nell'ultimo secolo. Per interpolazione lineare dei dati ricavati si è potuta creare una proiezione dei fondali dell'ambiente lagunare.

I processi di miscelazione in ambienti lagunari caratterizzati da una morfologia molto irregolare sono dovuti alla sinergia di molteplici fattori che agiscono e interagiscono allo stesso tempo. La distribuzione spaziale del coefficiente di dispersione intermareale fornisce una stima della velocità di dispersione di un tracciante iniettato nel bacino, pertanto analizzando il processo di dispersione si può dare una misura della salute dell'acqua nel dominio : valori più elevati del coefficiente di dispersione stanno ad indicare un migliore ricambio idrico.

L'indagine è stata effettuata nella laguna di Venezia accoppiando un modello idrodinamico con un modello lagrangiano.

Poi è stata dimostrata la dipendenza del coefficiente di dispersione dalla fase di marea. Le particelle iniettate in istanti diversi si diffondono in modo diverso. Come previsto, le particelle rilasciate durante la fase di flusso (livello dell'acqua in aumento nella laguna), sperimentano un grado di dispersione minore rispetto a quelle rilasciate durante la fase di riflusso (il livello d'acqua diminuisce nella laguna). Inoltre il coefficiente oggetto di studio è influenzato, oltre che dal momento d'iniezione della particella, anche dalla posizione di questa. E' deducibile che una macchia rilasciata in una zona idraulicamente più attiva, come può essere quella in prossimità delle bocche di porto, subisca maggiormente l'effetto della dispersione piuttosto che una macchia rilasciata in aree lagunari come le barene.

Grazie ai risultati ottenuti nell'elaborato di tesi da *C. Zoccarato* per lo stato della laguna attuale (2010) e i risultati parziali di un'altra mia collega (*Larese*) è stato

possibile confrontare la distribuzione spaziale del coefficiente di dispersione intermareale nei 3 diversi momenti storici.

Paragonando le simulazioni si può dedurre che la laguna futura sarà sicuramente meno attiva di quella attuale. La Figura 44 evidenzia chiaramente la netta differenza della distribuzione in laguna.

E' probabile che, se non si invertirà la tendenza evolutiva, la dispersione entro il bacino sarà sempre minore con un conseguente aumento dell'inquinamento nelle acque veneziane.

BIBLIOGRAFIA

L. CARNIELLO, A. DEFINA, L. D'ALPAOS, 2009 – *Morphological evolution of the Venice lagoon: Evidence from the past and trend for the future*. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 114.

L. D'ALPAOS, L. CARNIELLO, A. DEFINA, 2009 – *Mathematical modelling of tidal flow over salt marshes and tidal flats with applications to the Venice lagoon*. In COASTAL WETLANDS: AN INTEGRATED ECOSYSTEM APPROACH, ELSEVIER, Amsterdam.

A. DEFINA, 2000 – *Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas*. WATER RESOURCES RESEARCH, Vol. 36, No. 11.

A. DEFINA, L. CARNIELLO, S. FAGHERAZZI, L. D'ALPAOS, 2007 – *Self-organization of shallow basins in tidal flats and salt marshes*. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, Vol. 112.

L. D'ALPAOS, 2010 – *L'evoluzione morfologica della Laguna di Venezia attraverso la lettura di alcune mappe storiche e delle sue carte idrografiche*. Comune di Venezia - Istituzione centro previsioni e segnalazioni maree - Legge speciale per Venezia

Siti web

www.silvenezia.it

www.comune.venezia.it

www.istitutoveneto.it