

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE IDRAULICA

**Indagine numerica sulla validità di un modello
basato sul prisma di marea per la stima dei
tempi di ricambio in ambienti a marea**

Relatore: Prof. Ing. Defina Andrea

Correlatore: Dott. Ing. Daniele Pietro Viero

Laureando: Sabbadin Sabbadino Luca

Matricola: 1041331

Anno Accademico 2014 - 2015

Indice

1	Introduzione	3
2	Inquadramento morfologico e ambientale	7
2.1	Nascita e scomparsa delle lagune	7
2.2	La laguna di Venezia	9
2.2.1	Evoluzione storica della laguna di Venezia	10
2.2.2	Geografia lagunare	11
2.2.3	Morfologia lagunare	13
3	La marea nella laguna di Venezia	17
3.1	Le componenti della marea	17
4	Il tempo di ricambio	21
5	Modelli basati sul prisma di marea	27
5.1	Modello basato sul prisma di marea	28
5.1.1	Il coefficiente di ritorno	31
5.2	Modello a prisma di marea modificato	34
6	Il modello idrodinamico	39
6.1	Introduzione	39
6.2	Il dominio di calcolo (.geo)	42
6.3	Condizioni al contorno e istruzioni di calcolo (.sim)	47
6.4	Risultati della simulazione (.out)	50
7	Applicazione dei modelli	51
7.1	Andamento delle concentrazioni nel tempo (analisi globale)	52
7.2	Andamento delle concentrazioni nel tempo (analisi locale)	54
7.2.1	Valutazioni sull'idrodinamica adottata	59
7.2.2	Il coefficiente di ritorno	66
7.2.3	L'efficienza di mescolamento	71
7.2.4	Il parametro r	74
7.3	Calcolo del tempo di ricambio	76
7.3.1	Considerazioni sul tempo di ricambio	81
8	Comparazione tra i modelli	83
8.1	Caratteristiche della laguna	84
8.2	Applicazione al modello basato sul prisma di marea	86
8.3	Applicazione al modello basato sul prisma di marea migliorato	87
8.4	Comparazione tra modello idrodinamico e modello basato sul prisma di marea modificato	90

8.5	Comparazioni sul coefficiente di ritorno	93
9	Conclusioni	97
10	Bibliografia	99

1 Introduzione

Fin dall'antichità Venezia è stata dotata di un sistema naturale di depurazione dell'acqua molto efficace: la sua Laguna. Grazie infatti agli effetti delle maree e al risciacquo ciclico delle acque lagunari, la città si è potuta assicurare nei secoli l'allontanamento quotidiano delle acque reflue e un invidiabile sistema di depurazione, non meno efficace per molti aspetti a una moderna fognatura. La laguna di Venezia infatti scambia ciclicamente le sue acque con il Mare Adriatico attraverso tre bocche. Due volte al giorno, circa un terzo del volume dell'acqua presente in laguna viene espulso in mare quindi, una volta mescolatosi, reintrodotta in laguna.

Oggetto cardine di questa trattazione è riuscire a quantificare la forza depurativa della marea, chiarendo il concetto di "tempo di ricambio". Si tratta di una stima (in giorni) del tempo necessario affinché l'acqua "pulita" proveniente dal mare sostituisca una porzione rilevante dell'acqua "vecchia". In particolare si confronteranno i risultati ottenuti applicando un semplice modello analitico, basato sul prisma di marea, una versione migliorata dello stesso modello e quelli forniti da un modello idrodinamico bidimensionale che risolve le equazioni del trasporto a diffusione, sviluppato dal dipartimento ICEA dell'Università di Padova.

Questa analisi è di grande interesse poiché le zone lagunari sono ambienti particolari, in corrispondenza dei quali si realizza la confluenza tra terra e mare ed il mescolamento delle acque dolci con quelle salate. Esse danno vita ad un mosaico di habitat diversi che, soprattutto nelle regioni temperate, sono popolati da una sorprendente varietà di forme di vita che li rende classificabili tra gli ecosistemi a massima biodiversità. Costituiscono quindi, una risorsa di grande valore economico, culturale, scientifico e di studio.

Nella prima parte della trattazione è stato inserito un breve inquadramento morfologico e ambientale dell'area alla quale si applicherà lo studio, la laguna di Venezia, soffermandosi poi sulle caratteristiche delle maree, ed in particolare del loro comportamento all'interno della laguna.

Successivamente s'introduce il concetto di "tempo di ricambio" parametro fondamentale per l'analisi del ricambio dell'acqua e quindi della vitalità di un bacino. Infatti, questi ultimi, sono caratterizzati dalla presenza di moti di marea trasmessi dal mare e da gradienti di salinità e densità associati ad un progressivo mescolamento di acque fluviali ed acque marine, che rappresentano variabili dominanti per quanto riguarda il tempo di ricambio dell'acqua. La conoscenza, e la corretta valutazione del "tempo di ricambio", può quindi facilitare lo studio e soprattutto l'analisi dell'evoluzione delle stesse. Infatti la qualità delle acque dipende fortemente dalle caratteristiche morfologiche proprie dei bacini poco profondi e inoltre, la diffusione di un inquinante in essi è comandata dalla combinazione di molti fattori, tra i quali le correnti generate dalla marea, quelle generate dai venti e dagli afflussi fluviali. È quindi chiaro che l'elevata variabilità spaziale della laguna influenzi fortemente il trasporto e la diffusione dei soluti nel sistema.

Si è scelto poi di inserire alcuni cenni riguardanti le basi teoriche e matematiche su cui si fondano i modelli utilizzati per il calcolo del tempo di ricambio. In particolare si introducono i modelli semplificati (modello basato sul prisma di marea ed il modello basato sul prisma di marea migliorato), con i quali calcolare il "tempo di ricambio" risulta più agevole, richiedendo un minor sforzo computazionale. Oggetto dello studio è proprio dimostrare, se le semplificazioni che soggiacciono a questi modelli concettuali, vanno a falsare i risultati ottenuti, o se si riesca ad avere una buona approssimazione anche senza ricorrere a metodi numerici espliciti, che richiedono tutt'altro sforzo computazionale e complessità d'analisi. In seguito si espongono le peculiarità del modello idrodinamico agli elementi finiti sviluppato dal dipartimento ICEA dell'Università di Padova, che implementa la soluzione discreta del sistema di equazioni differenziali che governa il problema idrodinamico, del trasporto e della diffusione. Si è così in grado di stimare puntualmente, all'interno della laguna e per una circoscritta area di mare, i tiranti, le velocità e le concentrazioni di soluto disciolto.

A questo punto si vanno ad analizzare i risultati forniti dal modello idrodinamico per calcolare il tempo di ricambio nei vari scenari. In particolare si andranno ad analizzare due aspetti importanti: il "fattore di ritorno", parametro che considera la frazione di tracciante fuoriuscita durante la fase uscente della marea che rientra nella successiva fase entrante e l'efficienza di mescolamento, parametro che compare nella versione

migliorata del modello basato sul prisma di marea e che considera la non uniforme distribuzione spaziale della concentrazione all'interno della laguna. Questi due parametri sono fondamentali poiché la loro esclusione riduce il calcolo del tempo di ricambio ad un semplice rapporto tra il volume del bacino e la portata media dovuta al prisma di marea, con differenze anche di un ordine di grandezza rispetto al tempo di ricambio reale.

Infine si espongono i risultati ottenuti con l'applicazione dei vari modelli per il calcolo del tempo di ricambio oggetto d'analisi e le conseguenti conclusioni che si possono trarre dallo studio.

2 Inquadramento morfologico e ambientale

In questo capitolo si vogliono illustrare le peculiarità della laguna di Venezia, oggetto della trattazione, alla quale andremo ad applicare i modelli.

In un primo momento si descrive una laguna come forma costiera di una pianura alluvionale, al fine di comprendere come nasce e il suo possibile destino. In seguito si delinea l'evoluzione, la particolare morfologia del territorio e l'ambiente caratteristico, propri della laguna veneziana. Si forniscono poi alcune nozioni per quanto riguarda i fenomeni naturali e gli interventi antropici più importanti, che hanno mostrato evidenti conseguenze in laguna.

2.1 Nascita e scomparsa delle lagune

Le lagune sono aree costiere costituite da specchi d'acqua poco profondi, in comunicazione con il mare e da questo separate per mezzo di sottili barriere, generalmente sabbiose, in modo tale che il movimento dell'acqua all'interno di esse sia governato dalla marea. Le lagune di coste sabbiose sono solitamente formazioni transitorie, rappresentative di una particolare fase di un processo evolutivo costiero sottoposto all'azione di molteplici fattori, perciò sono in stato di perenne instabilità. I fattori principali che agiscono sull'evoluzione fisica delle lagune sono: il trasporto solido dei fiumi (oppure l'accumulo di sabbie provenienti dalla disgregazione di promontori costieri), le correnti marine litoranee, le maree, il moto ondoso e, talora, l'abbassamento del suolo e l'aumento del livello del mare.

I fiumi provenienti da rilievi montuosi di più recente formazione, e quindi soggetti a forte erosione, trasportano molto materiale solido; le sabbie e i limi, che ne costituiscono la parte più fina, riescono a giungere al mare, dando luogo a formazioni protese, i delta. Dalle foci dei fiumi le sabbie ancora in sospensione, o messe in sospensione dal moto ondoso, vengono trasportate dalle correnti costiere, laddove esistono, depositandosi poi, per effetto della gravità, in formazioni allungate dette barre o cordoni litoranei. Un tratto di costa compreso tra formazioni deltizie tende così a trasformarsi in un bacino parzialmente isolato dal mare tramite le barre costiere, cioè in

una laguna o, al limite, in un bacino totalmente chiuso da un'unica barra, cioè in uno stagno costiero. I varchi tra le barre costiere generalmente corrispondono a foci di fiumi rimasti inclusi all'interno del bacino lagunare; le formazioni deltizie di questi fiumi contribuiscono a costituire quell'alternarsi di terreni emersi, canali e specchi acquei tipico dei bacini lagunari. Le barre costiere, su cui il moto ondoso del mare antistante continua a depositare sabbie in forma di dune, si trasformano poi in lidi veri e propri; i varchi tra i lidi sono detti bocche di porto.

Le correnti di flusso e riflusso, che si producono tra mare e laguna quando il mare antistante è soggetto a oscillazioni di marea sufficientemente elevate, mantengono efficienti le bocche di porto, trasportando in mare anche parte dei sedimenti provenienti dai fiumi interni, in un certo modo ripulendo la laguna. L'attenuazione dei valori estremi del livello di marea nelle zone più interne della laguna è, di solito, una condizione necessaria (ma non sufficiente) affinché essa si conservi; nel caso opposto il mare prevale, erodendo, con correnti di marea troppo veloci, tutte le formazioni emerse, compresi i lidi stessi. Tra le altre cause che determinano la fine di una laguna possono esservi fattori eccezionali e di breve durata, come ad esempio mareggiate molto forti che, accumulando sabbie alle bocche portuali, possono rendere le correnti di marea troppo deboli per ripristinare i preesistenti varchi, innescando un processo di ulteriore accumulo di sabbie fino all'occlusione delle bocche. Anche il trasporto delle sabbie costiere dalle foci dei fiumi adiacenti, prevalendo sulle correnti attraverso le bocche, può portare all'ostruzione di quest'ultime. E così pure il trasporto solido dei fiumi all'interno di una laguna può lentamente provocarne l'interrimento.

Al contrario, un lento sprofondamento del sottosuolo lagunare può compensare l'apporto solido dei fiumi interni ed essere quindi il fattore determinante per la conservazione di una laguna.

Infine, anche l'aumento del livello del mare può favorire la formazione di bacini lagunari, secondo un meccanismo che produce dapprima l'innalzamento del letto del tratto terminale dei fiumi, poi, per la minore pendenza degli alvei, esondazioni e formazioni di paludi costiere e infine l'invasione marina trasforma le paludi in lagune.

Una laguna ha quindi tre possibili destini:

- se prevalgono i materiali solidi introdotti dai fiumi e dal mare, una laguna tende a interrarsi e a trasformarsi in terra emersa, con la scomparsa del

bacino stesso, così come oggi avviene sul delta del Po;

- se prevalgono invece le forze erosive delle onde e delle maree, cioè il bilancio complessivo dei sedimenti è negativo, una laguna si trasforma in un braccio di mare, attuale tendenza della laguna di Venezia;
- se erosione e sedimentazione si compensano, cioè esiste un corretto bilancio ripascimento-erosione (non locale ma per l'intero bacino lagunare), l'ambiente lagunare sopravvive, seppur in equilibrio precario e instabile.

Si può dunque concludere che i fattori che concorrono alla formazione di una laguna sono gli stessi che, prevalendo gli uni sugli altri, ne provocano la scomparsa.

2.2 La laguna di Venezia

Vista la nascita di una laguna e il suo carattere in costante evoluzione, dovuto allo scontro tra forze marine e continentali, si vuole ora dare una descrizione più approfondita in riferimento alla laguna di Venezia (Figura 1). Partendo da nozioni storiche riguardo alla sua nascita, si vuole poi definire lo stato attuale della laguna da un punto di vista della morfologia, dell'ambiente e degli elementi tipici che la caratterizzano.



Figura 1. La laguna di Venezia

2.2.1 Evoluzione storica della laguna di Venezia

La laguna di Venezia nasce sei mila anni fa, in seguito all'ultima glaciazione. L'azione combinata delle correnti costiere, moto ondoso, ed il protrarsi degli apparati deltizi dei fiumi portò alla formazione dei lidi, i quali delimitarono specchi d'acqua che assunsero le caratteristiche di ecosistema salmastro. Dopo l'anno 1000 d.C. la laguna presentava otto bocche di porto ed era compresa tra l'Adige a sud e il Piave a nord e al suo interno si immettevano i fiumi Bacchiglione, Brenta, Dese ed il Sile. In questo periodo era prevalente l'azione di apporto di materiali in sospensione da parte dei fiumi Tagliamento e Piave a nord, Adige e Po a sud, che accresceva i lidi e talora occludeva le bocche. Al fine di evitare l'interrimento della laguna, dal 1300 si intrapresero opere

di diversione dei fiumi, che si sono ultimate solo in epoca moderna. L'opera della Serenissima tuttavia, risolto il problema dell'interrimento da un lato, lasciava poco contrastata l'erosione marina dall'altro. Infatti attualmente ritroviamo un processo parallelo di erosione e di abbassamento del suolo, che sta trasformando la laguna da ambiente deltizio in un sistema sempre più simile a quello marino.

2.2.2 Geografia lagunare

L'ecosistema lagunare è composto da tre entità strettamente connesse da reciproci scambi: il bacino scolante, la laguna stessa ed il mare Adriatico, le cui maree governano la laguna con il flusso e riflusso delle acque attraverso le tre bocche di porto.

Il bacino scolante, identifica l'area nella quale scorrono tutte le acque dolci che affluiscono dalla terraferma in laguna ed è costituito da un territorio fortemente antropizzato nel quale si distinguono ambiti agricoli, industriali ed urbani. Dal punto di vista amministrativo il territorio del bacino interessa tre provincie: il 52% della provincia di Venezia, il 40% di quella di Padova e l'8% di quella di Treviso ed ospita un totale di 101 comuni. Le acque del bacino scolante defluiscono in laguna attraverso una complessa rete idrografica. I punti di immissione sono 29, costituiti dalle foci dei corsi d'acqua superficiali naturali e artificiali, a cui si aggiunge un numero rilevante di scarichi, intesi come punti di recapito di reti fognarie o di impianti di depurazione civili o industriali.

La laguna di Venezia è la più estesa laguna italiana ed ha una superficie di circa 550 km² dei quali 418 sono aperti alle escursioni di marea. È situata tra la foce del fiume Sile a nord-est e quella del Brenta a sud-ovest; ad est è delimitata dai cordoni litoranei di Cavallino, Lido, Pellestrina e Sottomarina mentre ad ovest confina con la terraferma (Figura 2)



Figura 2. Suddivisione morfologica della laguna di Venezia

I margini della laguna costituiscono oggi un perimetro rigidamente definito: verso il mare dal fronte dei “murazzi” e dalle bocche di porto, verso la terraferma in parte dalla “contaminazione”, che distingue l’ambito lagunare dall’entroterra, ed in parte dall’ininterrotto susseguirsi di insediamenti industriali, residenziali, agricoli e dalla presenza di infrastrutture, discariche, argini, idrovore e scolmatori.

Da un punto di vista idraulico, la laguna è formata da tre bacini comunicanti con il mare attraverso le bocche di porto del Lido (larga circa 800 m), Malamocco e Chioggia (larghe ciascuna circa 400 m). I tre bacini sono delimitati da due parti acque, attraverso i quali c’è trasporto d’acqua solo in casi eccezionali (per esempio con forte vento di Bora) e quindi l’acqua marina che entra da una bocca durante la fase di flusso, esce dalla stessa bocca in fase di deflusso. Questo avviene perché l’alta marea, così come la bassa, si presenta quasi nello stesso momento all’ingresso delle tre bocche di porto: queste, infatti, giacciono rispetto al moto oscillatorio della marea nell’Adriatico, su uguali linee cotidali o linee di equal fase (Cavazzoni, 1995).

I fondali della laguna di Venezia sono costituiti da sedimenti a diversa granulometria; procedendo dalle bocche di porto verso l’interno, si osserva una diminuzione progressiva della granulometria passando gradualmente da alte percentuali della frazione sabbiosa alla prevalenza di quella argillosa. Questo meccanismo è legato

alla velocità della corrente di marea e quindi alla capacità di trasporto del sedimento. L'energia della corrente di marea è massima alle bocche di porto e va smorzandosi verso l'interno del bacino lagunare in corrispondenza alla diminuzione della sezione dei canali, alle variazioni della profondità e della morfologia del fondo.

La laguna è un ambiente salmastro nel quale si mescolano acque d'ingressione costiera con acque di origine continentale. La salinità è variabile, a causa sia della variabilità delle maree, che dell'entità delle precipitazioni e dell'evaporazione. Essa presenta presso le bocche di porto, valori simili a quelli registrati in mare (anche superiori al 36‰) e valori più che dimezzati (a volte inferiori al 10‰) nelle zone più interne della laguna. Le salinità mediamente più basse, si trovano nella laguna settentrionale per lo sbocco dei fiumi Dese e Osellino e per la vicinanza delle foci del Sile e del Piave. Le escursioni stagionali di salinità sono dell'ordine del 10%. I valori più alti si riscontrano in corrispondenza dei periodi di magra dei corsi d'acqua (estate, inverno); d'estate, si possono toccare livelli di salinità anche maggiori di quelli marini a causa dell'intensa evaporazione. Le acque lagunari presentano inoltre una stratificazione verticale della salinità causata dall'incunarsi, durante la fase di marea entrante, delle acque marine più fredde e più salate sotto quelle lagunari più calde e più dolci (Nasci et al., 1982).

Anche la temperatura delle acque della laguna è notevolmente variabile, presentando un'escursione media fra estate ed inverno dell'ordine di 20°C. Essa in estate supera spesso i 30°C, mentre in inverno le acque possono persino gelare, soprattutto nelle zone di margine interno, dove il fondale è meno profondo e c'è prevalenza di acqua dolce. La variabilità della temperatura è dovuta al fatto che il riscaldamento delle acque lagunari avviene unicamente ad opera della radiazione solare e che il loro volume, piuttosto esiguo, presenta un'inerzia termica relativamente bassa cosicché gli scambi termici con l'atmosfera e con il fondo risultano estremamente veloci (Nasci et al., 1982).

2.2.3 Morfologia lagunare

La morfologia lagunare caratterizza l'ecosistema incidendo sia sulla produttività biologica, sia sull'autodepurazione e sulla circolazione delle acque. All'interno della conterminazione lagunare sono compresi bassifondi, velme, barene, isole, canali e valli arginate.

Il suolo del territorio lagunare è costituito dall'insieme delle terre emerse, di natura artificiale o naturale (litorali, casse di colmata, isole, argini) e copre circa l'8% di tutta la superficie della laguna. Il restante 92% è costituito da acqua che comprende i canali e i fondali, le velme e le barene quest'ultime sono parte del sistema acqua anche se, in alcuni casi, sono più alte sul livello del mare di zone del centro storico considerate terre emerse. Il criterio di assegnazione delle barene al sistema acqua, fa riferimento alla loro funzione di regolare l'idrodinamica lagunare.

Le acque del mare penetrano in laguna attraverso tre bocche di porto, denominate rispettivamente da quella più a nord a quella più a sud:

- porto di Lido,
- porto di Malamocco,
- porto di Chioggia.

Le correnti di marea entranti si espandono verso le estremità dei rispettivi bacini, attraverso una fitta rete di canali che si ramificano gradualmente e si restringono verso l'interno. I canali in parte si sovrappongono agli alvei degli antichi fiumi e sono il risultato dell'opera di modellazione della marea che ne determina anche l'esistenza. Ai canali naturali ad andamento tortuoso, si sono aggiunti negli anni i canali artificiali che hanno andamento rettilineo. Gli ultimi e più sottili rami dei canali, che solcano le barene e le velme, sono detti ghebi. Attraverso di essi la marea raggiunge le zone più interne, che in passato erano dette "laguna morta" perché, quando le bocche non erano sufficientemente ampie, risentivano solo marginalmente dell'azione vivificatrice della marea.

Come si può ben intuire quindi la profondità dei fondali in laguna è molto variabile: arriva a 15-20 m nei canali, a 1-3 m negli specchi d'acqua e a pochi centimetri nei bassifondi. Le aree adiacenti ai canali, con quota del suolo inferiore al livello medio del mare, sono chiamate bassifondi.

Le velme sono zone prive di vegetazione e normalmente sommerse che emergono solo in particolari condizioni di marea (basse maree di sizigie) e sono caratterizzate da terreni molli. Le paludi, il cui nome rimanda a quelle più antiche di origine fluviale, sono bacini minori, a forma di catino con fondale melmoso e costantemente sommerso. Le barene si presentano come estensioni tabulari a substrato prevalentemente costituito da sedimenti limoso-argillosi, popolate da vegetazione alofila, che per la maggior parte

del tempo emergono al di sopra del livello medio del mare e vengono sommerse completamente solo durante le alte maree di sizigie.

Le isole, costituite da terreni mai sommersi dalle alte maree e che quindi consentono l'instaurarsi di colture e di insediamenti umani stabili, si possono distinguere in base alla loro origine naturale o artificiale. Le isole naturali sono relitti di dune, cioè residui di antichi cordoni litoranei come nel caso delle Vignole o di Sant'Erasmo, oppure si sono generate in seguito all'opera di deposizione ed accumulo di materiali solidi trasportati dai fiumi, come nel caso di Burano e Torcello. Le casse di colmata, localizzate a sud del porto industriale, sono isole artificiali, formate negli anni '60 con il materiale di riporto proveniente dallo scavo del "Canale dei Petroli", realizzato per consentire l'accesso delle navi al porto industriale di Porto Marghera. Hanno forme geometriche regolari e si estendono su una superficie complessiva di $11,36 \text{ km}^2$, in precedenza occupata da barene. La costruzione delle casse di colmata ha provocato una drastica riduzione della quantità e qualità del ricambio idrico tra la "laguna viva" e gli specchi d'acqua alle spalle di esse. Oggi nelle casse di colmata B e D-E, sono stati aperti canali e ghebi e i materiali dragati sono stati utilizzati per la costruzione di nuove barene. È stato così ripristinato il ricambio idrico nelle zone retrostanti e si è avviata la rinaturalizzazione delle casse stesse.

Le valli da pesca sono aree separate dalla laguna aperta mediante arginature che ne determinano l'esclusione dai flussi e riflussi di marea. Sono bacini poco profondi di acque salse e salmastre e costituiscono ambienti molto particolari che, fin da tempi antichissimi, sono stati attrezzati per l'itticoltura e talvolta per la caccia. Al loro interno racchiudono specchi d'acqua, canali artificiali o naturali, barene e strutture per gestire gli apporti di acqua dolce o salata. Le valli sono 31, sia di proprietà demaniale che privata, e occupano una superficie totale di $92,22 \text{ km}^2$.

I cordoni litoranei o lidi, sottili strisce di terra che separano la laguna dal mare, si estendono per una cinquantina di chilometri tra le foci del fiume Brenta a sud-ovest e del Sile (Piave Vecchia) a nord-est e sono divisi dalle tre bocche di porto nei quattro segmenti di Sottomarina, Pellestrina, Lido e Cavallino.

3 La marea nella laguna di Venezia

Si introducono ora le peculiarità insite nell'analisi di un evento di marea nella laguna di Venezia. Si andranno ad analizzare i vari fattori che influenzano l'evento di marea, ed in fine l'interazione tra mare e laguna attraverso le tre bocche di porto.

3.1 Le componenti della marea

Le maree sono state definite come: movimenti periodici della superficie del mare, che sono direttamente correlati in ampiezza e fase ad alcune forze geofisiche (Pugh, 1987).

I livelli di marea sono dati dalla somma di due componenti principali: la marea astronomica, correlata al moto dei corpi celesti, principalmente Luna e Sole, e il contributo meteorologico dovuto allo stato dell'atmosfera. Il contributo meteorologico può assumere un ruolo rilevante negli eventi di marea e ha inoltre lo svantaggio, rispetto alla marea astronomica, di essere prevedibile con maggiore difficoltà e in tempi più ristretti. Essendo queste due componenti indipendenti fra di loro è applicabile la sovrapposizione degli effetti.

A Venezia la marea astronomica descrive una curva di tipo prevalentemente semidiurno, con due massimi e due minimi nelle 24 ore. Durante le fasi di luna nuova e di luna piena gli effetti del Sole e della Luna si sommano, determinando le massime oscillazioni di marea (sizigie). Nei periodi di primo e ultimo quarto, invece, la marea è meno ampia e meno regolare (quadratura) e possono esservi giorni con un solo minimo e un solo massimo.

Gli eventi di marea che superano con il loro livello al colmo i 110 cm sullo zero mareografico di Punta della Salute vengono denominati convenzionalmente eventi di acqua alta; a questa quota sorgono problemi di trasporto e di viabilità pedonale nei punti altimetricamente più depressi della città di Venezia.

Il vento nel caso del mare Adriatico, essendo quest'ultimo prevalentemente un bacino lungo e stretto ed inoltre chiuso all'estremità superiore, può provocare, qualora la direzione del vento sia longitudinale al bacino (scirocco), un accumulo d'acqua verso la parte settentrionale e quindi verso la laguna. Il fenomeno viene favorito dalla lunga

zona d'azione disponibile per il vento denominata fetch ed è ulteriormente amplificato a causa dei bassi fondali della parte settentrionale dell'Adriatico dove non si raggiungono i 50 metri. Il sopralzo dovuto al vento può superare anche il metro e provocare da solo fenomeni di inondazione.

Analogamente allo Scirocco, si può considerare anche il vento di Bora, quest'ultimo però non gode di un fetch molto elevato, ma può contare su altre due caratteristiche non trascurabili: l'intensità e la frequenza. La Bora può avere intensità spesso superiore allo Scirocco e inoltre ha frequenza di accadimento molto maggiore, tuttavia il suo effetto sulla marea è limitato a causa del fetch ridotto e dell'angolo tra la direzione di provenienza del vento e le bocche di porto.

Quando alla bora sull'alto Adriatico si associa lo Scirocco sul basso e medio Adriatico, si verifica la cosiddetta scontratura, cioè la convergenza di correnti marine provocate dall'attrito sul mare di venti da nordest e suddest. Questo fenomeno conosciuto anche come Bora scura ha fatto registrare i massimi eventi di marea eccezionale.

Quando invece il fenomeno si presenta in situazioni di alta pressione si definisce Bora chiara e il suo contributo sulla marea è poco rilevante. La componente che pesa l'effetto della pressione, ha anch'essa delle caratterizzazioni particolari nel caso della laguna di Venezia, dovute alla sua posizione geografica.

Le variazioni di pressione atmosferica oltre a produrre campi di vento sono causa diretta delle variazioni di livello del mare. Il concetto è assai semplice: dove l'atmosfera preme meno (basse pressioni locali), il mare tenderà a sollevarsi, quindi un'area di bassa pressione sul Nord Adriatico e una di alta nell'Italia meridionale provocano un effetto di spostamento della massa d'acqua nella direzione della pressione atmosferica minore. La variazione è di circa 1 cm per ogni millibar di variazione, si può arrivare cioè fino a 30 cm al passaggio di una perturbazione. Il gradiente barico elevato e il vento di scirocco sono dunque i fattori di maggior influsso per la marea di Venezia.

Analogamente al comportamento delle componenti appena descritte, c'è un'ulteriore fenomeno che in particolare per il mar Adriatico non può esser trascurato: le sesse. Le sesse sono delle oscillazioni libere caratteristiche dei bacini chiusi (come i grandi laghi) che rappresentano la risposta della massa d'acqua sollecitata ad impulsi dovuti a vento o a temporali e bufere.

In particolare il passaggio di una perturbazione e il suo rapido esaurirsi agisce sulla

marea con una sorta di stimolo impulsivo, lo *storm surge*, in seguito al quale, l'Adriatico, a causa della forma del bacino, si comporta come una cavità risonante ed al cessare dell'impulso la massa d'acqua per tornare ad una situazione di equilibrio compie una serie di oscillazioni longitudinali e trasversali dette sesse la cui ampiezza si smorza nel tempo. L'oscillazione fondamentale, longitudinale, ha un periodo di 22 ore circa.

Di quest'ultima componente bisogna tener conto nella previsione di marea, perché accade infatti abbastanza spesso che nei giorni successivi ad uno *storm surge*, grazie allo sfasamento di quasi 2 ore tra la periodicità della marea astronomica (circa 24 ore) e la sessa (circa 22 ore) l'oscillazione possa trovarsi in fase con il massimo di marea astronomica e provocare acqua alta, in alcuni casi con massimi del livello superiori a quello verificatisi durante la mareggiata.

Ai fini computazionali, come precedentemente accennato, si andrà a considerare solamente l'effetto della marea astronomica, più regolare e facilmente applicabile al modello idrodinamico.

4 Il tempo di ricambio

Preso un bacino in cui si riversa un tracciante, risulta interessante poter conoscere la storia temporale di quest'ultimo. In estuari e corpi idrici costieri, i processi di miscelazione governati dai moti oscillatori dipendono da diverse forzanti esterne, che causano una variazione considerevole nella dispersione di un tracciante. Quindi, non è sempre facilmente determinabile il tempo richiesto dal tracciante per lasciare il sistema. Questa misura temporale, è spesso utilizzata per rappresentare la scala temporale del processo fisico all'interno di bacini.

In letteratura si ritrovano diversi tempi scala, come per esempio “renewal time”, “flushing time”, “residence time”, “exposure time” e molti altri, che vengono utilizzati per studiare il ricambio idrico ed il trasporto tra bacino e mare aperto. Non si ritrova una definizione univoca per le diverse scale temporali o metodi standard per la loro determinazione. In molti casi, il concetto di base è vincolato da ipotesi che poi non vengono verificate al momento dell'applicazione. Ci si può avvicinare al problema in diversi modi, con l'utilizzo di traccianti, formule empiriche e di recente con l'utilizzo di metodi numerici. Sin dal 1950, nei diversi studi riguardanti bacini ed estuari (e.g. Ketchum, 1950; Cameron & Pritchard, 1963; Dyer, 1973) si utilizza il termine “tempo di residenza”, per esprimere diversi concetti:

- Il tempo impiegato per uscire dall'bacino
- Il tempo che l'acqua del fiume sosta nel bacino
- Il tempo che impiega un bacino a rinnovare l'acqua
- Il tempo che impiega un soluto con concentrazione iniziale pari ad 1 a ridurre la sua concentrazione a $1/e$ (pari a circa 0,37)

Tutte queste definizioni sono molto vaghe perché non sono riferite tutte allo stesso processo e danno quindi risultati molto differenti. Zimmerman (1976) definisce il tempo di ricambio come il tempo necessario ad una particella per raggiungere l'uscita. Takeoka (1984) estende la definizione da applicare ad un volume d'acqua nel modo che segue.

È noto dalla Meccanica Razionale e dall'Idraulica che le proprietà caratterizzanti un campo fluido (densità, velocità, quantità di moto, etc.) possono essere studiate seguendo

due metodi d'indagine cinematica: quello (detto euleriano) che si fonda sulla determinazione della velocità e delle sue variazioni in ogni punto del campo di moto e quello proprio della meccanica classica (detto metodo lagrangiano) che si basa sullo studio delle traiettorie delle singole particelle. Dovendo indagare sul destino di un tracciante inserito in un bacino si utilizza un metodo d'indagine euleriano, in modo tale da poter conoscere la concentrazione in ogni punto al variare del tempo.

Alla luce di ciò i modelli matematici utilizzati in seguito per valutare scale temporali, andranno a considerare ω come dominio di interesse, cioè il bacino, e Ω un dominio esteso, che include ω ed una porzione di mare collegata al bacino attraverso uno o più ingressi.

Si consideri di inserire un tracciante al tempo $t=0$ in modo che la sua distribuzione nel dominio ω sia $c_0(x, x_0) = c(x, x_0, t = 0) = \delta(x - x_0)$, con x posizione, x_0 il punto di iniezione, e δ funzione di Dirac generalizzata. Si può scrivere la concentrazione media del bacino come:

$$\bar{c}(x_0, t) = \frac{1}{\omega} \int_{\omega} c(x, x_0, t) d\omega \quad (1)$$

Takeoka (1984) definisce la funzione residuo $r(x_0, t)$ come

$$r(x_0, t) = \bar{c}(x_0, t) / \bar{c}_0(x_0) \quad (2)$$

Con $\bar{c}_0(x_0) = \bar{c}(x_0, t = 0)$, e dimostra che il “residence time” medio del tracciante iniettato è dato da

$$T_r(x_0) = \int_0^{\infty} r(x_0, t) dt \quad (3)$$

Il “residence time” definito in questo modo differisce dal “pulse residence time” ma è abbastanza comune nella letteratura recente (Sheldon e Alber, 2002; Orfila et al, 2005;.. Gourgue et al, 2007;.. Yuan et al, 2007; Camacho e Martin, 2013; Etemad-Shahidi et al, 2014). Dal punto di vista operativo l'equazione (3) implica che, per

valutare il “residence time” o “exposure time”, è necessario stimare l’andamento nel tempo della concentrazione di tracciante nel bacino per un lungo periodo di tempo, anche infinito. Questo ovviamente non ha senso, considerando anche il fatto che più la concentrazione diminuisce meno la funzione residuo è attendibile.

Si assume che la scala temporale dei fenomeni (residence time) sia molto maggiore del periodo di marea. Di conseguenza per stimare il “residence time” si analizza la concentrazione della marea media, che è governata dalla seguente equazione di conservazione (Martin e Mc Cutcheon, 1998):

$$\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} + \nabla \cdot [\langle u \rangle \langle c \rangle - D_T \nabla \langle c \rangle] = 0 \quad (4)$$

Dove $\langle c \rangle = \langle c(x, t) \rangle$ è la concentrazione locale della marea, $\langle u \rangle$ è la velocità euleriana e $D_T = D_T(x, t)$ è il tensore di diffusione che rappresenta la diffusione turbolenta e la correlazione tra deviazione di velocità e concentrazione della marea media.

Sostituendo la funzione residuo $\bar{c}(x_0, t)$ con la media della concentrazione della marea media $\langle \bar{c}(x_0, t) \rangle$. Questa sostituzione non va in alcuno modo ad influenzare il “residence time” calcolato con la (3).

Il comportamento della concentrazione $\langle \bar{c}(x_0, t) \rangle$ in un bacino, come conseguenza dell’iniezione ad impulso di concentrazione a $(x_0, t = 0)$, si rivela essere una funzione monotona decrescente del tempo che si può approssimare con una legge esponenziale (Delhez et al., 2004).

Con questa ipotesi, la funzione può essere scritta come

$$r(x_0, t) = \frac{\langle \bar{c}(x_0, t) \rangle}{c_0(x_0)} = \exp\left(-\frac{t}{T_r(x_0)}\right) \quad (5)$$

Il “residence time” si definisce con (5) attraverso una regressione esponenziale che interpola risultati del modello (ad esempio, Braunschweig et al, 2003;. Kenov et al, 2012;. Vai mez et al, 2014).

In alternativa, si osserva che quando $t = T_r(x_0)$ l’equazione (5) diventa

$$\langle \bar{c}(x_0, t) \rangle / c_0(x_0) = 1/e \quad (6)$$

Quindi si può definire il “residence time” come il tempo dopo il quale si ha una concentrazione inferiore alla soglia $1/e$. Questo tempo scala viene anche definito “e-folding residence time” (Shan et al., 2014).

L'ultima sostituzione è verificata anche quando la concentrazione di decadimento non è esattamente esponenziale (ad esempio Miller e McPherson, 1991; Abdelrhman, 2002, 2005; Jouon et al, 2006;.. Torr eton et al, 2007). Di conseguenza, poiché il termine “e-folding” è strettamente corretto solo nel caso di un decadimento esponenziale, si preferisce usare la soglia $1/e$ quando la scala temporale definisce il tempo tale per ridurre a $1/e$ il valore di concentrazione iniziale.

Ricordiamo qui che il “residence time” di una particella di acqua in un dominio ω misura il tempo impiegato dalla particella di lasciare ω per la prima volta. Per questo motivo, per stimare il “residence time”, le particelle con il tracciane devono essere esclusi dal computo la prima volta che fluiscono dal dominio. Il “exposure time” di una particella di acqua è definito come il tempo trascorso dalla particella all'interno del ω dominio, a prescindere delle sue escursioni temporanee di ω (Monsen et al, 2002;.. Delhez 2006, 2013; Wolanski, 2007; de Brauwere a al, 2011;.. de Brye at al, 2012).

Quando un modello numerico viene utilizzato per stimare il “residence time” la concentrazione lungo il confine aperto del dominio ω (cioè, agli ingressi bacino), deve essere impostato a zero o, in alternativa, la concentrazione nel sottodominio $\Omega - \omega$ deve essere impostato a zero a ogni passo temporale di calcolo. Per stimare il “exposure time”, il dominio di calcolo Ω , che comprende ω , deve essere molto più grande di ω . Dal punto di vista matematico, la dimensione di Ω deve essere infinita. Infatti, per un sistema chiuso, la distribuzione di concentrazione tende a diventare uniforme per un tempo infinito, indipendentemente dalle dimensioni di Ω , l'integrale in Eq. (3) diverge (Delhez, 2013). L'utilizzo del metodo “e-folding” (o con soglia $1/e$) consente di superare questo problema. In questo caso, però, bisogna fare attenzione a controllare l'impatto delle condizioni al contorno previste al confine aperto di Ω , cioè, dobbiamo fare in modo che Ω sia sufficientemente grande in modo che le condizioni limite prescritte influenzino in modo trascurabile la concentrazione nel bacino.

Puntiamo quindi a fare un po' di chiarezza per quanto riguarda i tempi scala di trasporto all'interno di un bacino:

1. il “flushing time” (tempo di lavaggio):

è il tempo richiesto a rimpiazzare l'acqua presente nell'interno o in una parte di bacino soggetta a corrente fluviale (nel caso vi sia una foce di un fiume) oppure soggetta al flusso e al riflusso della marea (nel caso non vi sia una foce di fiume) (Bowden, 1967; Dyer, 1973; Officer, 1976; Fischer et al., 1979). Il volume d'acqua marina e fluviale (nel caso vi sia la foce di un fiume) introdotto in un bacino a marea nella fase di flusso è definito prisma di marea e lo stesso volume viene rimosso nella fase di riflusso, pertanto il “flushing time” è definito come:

$$T_f = \frac{(V+P)T}{P} \quad (7)$$

Dove V è il livello in bassa marea dell'intero bacino, P è il prisma di marea e T il periodo dell'onda di marea.

2. il “residence time” (tempo di residenza)

Ipotizzando che tutte le particelle d'acqua nel bacino siano marcate da un tracciante virtuale, mediante un modello numerico se ne segue il comportamento. Il tempo di residenza viene calcolato come il tempo richiesto perché la massa totale del tracciante iniziale si riduca al valore di 1/e ($\cong 0,37$) (Sanford et al., 1992; Wang et al.; 2004; Luketina, 1998; Takeoka, 1984).

3. L' “exposure time” (tempo di esposizione)

Il tempo di residenza viene definito come il tempo che impiega una particella ad abbandonare il bacino, in fase di deflusso della marea, ma è possibile che questa particella rientri nel bacino alla marea entrante successiva. Il tempo di esposizione è quindi il tempo che la particella spende all'interno del bacino per poi non ritornarci più. Questo tempo quindi può essere maggiore del tempo di residenza, se le particelle che lasciano il bacino poi rientrano. Il rapporto tra le

particelle che rientrano e il numero di particelle che escono è legato al fattore di ritorno b .

In seguito i modelli che si andranno ad implementare calcoleranno quindi il tempo di ricambio come il tempo necessario affinché la concentrazione in un punto (tempo di ricambio locale) o media nell'intero bacino (tempo di ricambio globale) si riduca alla frazione $1/e$ (cioè 0,37) rispetto alla concentrazione iniziale.

5 Modelli basati sul prisma di marea

Il tempo di ricambio in un bacino, ossia il tempo che serve ad un bacino per ricambiare l'acqua al suo interno, è il parametro fisico che più influenza la qualità d'acqua di un sistema. Questo parametro è spesso difficile da valutare, per cui si sono creati dei modelli semplificati, anche chiamati modelli basati sul prisma di marea.

Al fine di ottenere un ricambio d'acqua all'interno di un bacino, è logico supporre lo scambio di un determinato volume di liquido con un ambiente esterno. Ai fini computazionali un volume costante comporta minori problematiche, quindi si è portati a considerare solamente l'effetto della marea astronomica. Vi sono però anche altri fattori che possono influenzare questo ricambio, tra cui il vento, la pressione atmosferica e l'innalzamento del livello del medio mare (Capitolo 3). Queste variabili non sono regolari o facilmente prevedibili come una marea astronomica, per questa ragione, nel implementare i modelli a prisma di marea molto spesso si considera solamente il prisma di marea generato da eventi astronomici.

Se si analizza il ricambio d'acqua all'interno di un bacino, questo è dovuto alla periodica intrusione e fuoriuscita di un "prisma di marea" dal bacino stesso. In una prima fase si ha l'entrata di un volume, con la relativa introduzione di "acqua nuova", che si miscela con l'acqua già presente all'interno del bacino. Al momento del reflusso della marea, esce dal bacino un volume d'acqua che contiene sia "acqua nuova", sia una frazione di acqua presente nel bacino prima dell'inizio del ricambio. Una frazione di questo volume si andrà a miscelare a sua volta con la parte di mare vicino alla bocca del bacino, il rimanente ritornerà nel bacino al ciclo di marea successivo. Il ricambio d'acqua generato dal ciclo di marea quindi, non dipende solamente dalla geometria del bacino, o dal livello di marea, ma anche dalla frazione di acqua uscente che ritorna, anche definita come fattore di ritorno (b). I modelli basati su questo meccanismo di ricambio vengono chiamati Modelli basati sul prisma di marea.

I modelli basati sul prisma di marea essendo dei modelli semplificati, si possono essere applicati solo in determinate circostanze. Un'errata formulazione del modello o il non rispetto delle ipotesi semplificative alla base della sua derivazione, può portare alla determinazione di valori del tempo di residenza falsati, come nel caso dell'assunzione

di un errato valore del fattore di ritorno (b) oppure di una distribuzione non uniforme della concentrazione in laguna.

I modelli basati sul prisma di marea si soffermano sulle prime due problematiche. La problematica riguardante l'efficienza di mescolamento, tra acqua del bacino e acqua proveniente dal mare, viene comunemente risolta considerando il modello applicabile solamente a piccoli bacini con correnti interne non trascurabili (assumendo perciò il perfetto mescolamento). Queste assunzioni però rendono i modelli applicabili solo in particolari casi e aumentano la possibilità di errore nel calcolo del tempo ricambio. Al fine di ovviare a questa problematica, si introduce un coefficiente ξ che tiene conto dell'efficienza di mescolamento all'interno del bacino. Questo modello più raffinato è qui denominato modello basato sul prisma di marea modificato.

5.1 Modello basato sul prisma di marea

Si vanno ora a definire i modelli basati sul prisma di marea, utilizzati per il calcolo del tempo di ricambio in un bacino. Il campo di applicazione di questi modelli riguarda bacini soggetti a cicli di marea e comunicanti con il mare attraverso una sezione definita.

Preso in considerazione un bacino d'acqua, con volume V ed area superficiale A , si ha che la profondità media risulta $h=V/A$. Si definisce poi il prisma di marea, come la differenza di volume, che si ha all'interno del bacino, nelle opposte situazioni di bassa e alta marea. Note quindi le caratteristiche del bacino, si può agevolmente calcolare il prisma di marea ($P=AR$), assumendo R come l'escursione tra le maree. S'ipotizza una marea che salga e scenda seguendo una curva sinusoidale con periodo T , quindi un corrispondente flusso ad andamento sinusoidale alle bocche del bacino. Si avrà anche un flusso netto a velocità costante di entrata nel bacino (I). Il sistema in analisi si assume stabile, quindi l'ampiezza ed il periodo sono costanti. Questa importante assunzione implica che il volume entrante sia sempre pari al volume effluente. Si definisce in fine il coefficiente di ritorno come una frazione d'acqua data al mare che rientra nella fase alluvionale successiva ($0 < b < 1$).

A fini concettuali si suppone di inserire un tracciante all'interno del bacino all'istante iniziale. Andando ora a valutare la concentrazione di questo tracciante

all'interno del bacino, dopo vari cicli di marea, si può valutare l'efficienza dello scambio tra bacino e mare. Assumendo che all'interno del bacino ci sia un buon livello di mescolamento, la concentrazione c del tracciante è funzione del solo tempo e non più dello spazio. La concentrazione di tracciante al di fuori del bacino sarà c_{ambient} mentre la concentrazione in afflusso sarà c_1 . Considerando queste concentrazioni costanti nel tempo, s'ipotizza una fonte di tracciante all'interno del bacino definita con S , in unità di massa per unità di tempo. Il tracciante inserito nel bacino non è conservativo, si inserisce dunque un tasso di decadimento k (s^{-1}), quindi la concentrazione al interno del bacino

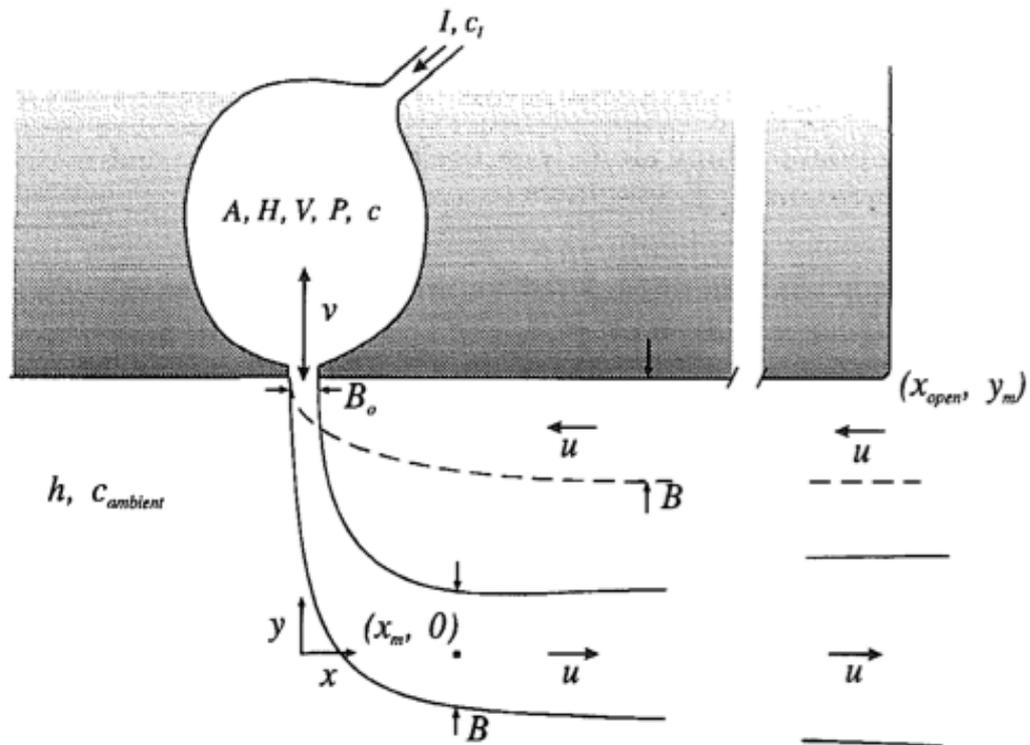


Figura 3. Schematizzazione del bacino

si può attenuare con un fattore kc indipendente dalle maree .

Il modello a prisma di marea è discontinuo. L'acqua viene espulsa dal bacino solo durante la fase di bassa marea mentre rientra solamente durante la fase alluvionale, quindi la miscelazione con l'acqua al di fuori del bacino e la diminuzione della concentrazione sono discontinui rispetto al tempo scala della marea. Tuttavia, Van de Kreeke (1983) dimostrò che nella maggior parte delle circostanze, la discontinuità del modello a prisma di marea è ben approssimata da un modello con afflusso e deflusso di

una portata continuo pari a $Q = P/T$. L'equivalente flusso di marea di tracciante uscente dal bacino è Qc , e il flusso di ritorno bQc , mentre il tracciante in mare che rientra è pari a $(1-b)Qc_{ambient}$. Si può quindi scrivere il flusso netto di massa tracciante, causato del deflusso, come $(1-b)Q(c-c_{ambient})$. Allo stesso modo, il deflusso netto di massa tracciante a causa dell'afflusso è $I(c-c_I)$.

Inserendo questi quattro fattori (sorgente, decadimento, flusso di marea, flusso netto) si scrive un equazione che governa il tempo di decadimento di c :

$$\frac{dc}{dt} = \frac{S}{V} - kc - \frac{(1-b)Q}{V}(c - c_{ambient}) - \frac{I}{V}(c - c_I) \quad (8)$$

Trovata l'equazione più generale che governa il problema, si possono derivare tutti casi particolari, ad esempio, imponendo un tracciante non conservativo e una sorgente all'interno del bacino si va a studiare la qualità dell'acqua.

Volendo indagare su tempo di ricambio di un bacino, introduciamo delle ipotesi, in modo da tarate l'equazione generale al caso in questione. Poniamo $c_{ambient} = c_I = 0$, la sorgente di tracciate all'interno del bacino $S = 0$ ed il tracciante conservativo quindi $k = 0$.

Si ottiene da (8) :

$$\frac{dc}{dt} = - \left[\frac{(1-b)Q}{V} \right] c \quad (9)$$

Risolvendo (9) con le condizioni iniziali $c = c_0$ e $t = 0$:

$$c = c_0 \exp \left[-\frac{t}{T_f} \right] \quad \text{dove} \quad T_f = \left[\frac{V}{(1-b)Q+I} \right] \quad (10)$$

Se ora si considera un solo ciclo di marea, si può imporre $I = 0$ e si ottiene da (10) l'espressione di T_f semplificata:

$$T_f = \frac{VT}{(1-b)P} \quad (11)$$

Il fattore T_f è un tempo, e rappresenta il tempo di lavaggio e viene anche definito come il tempo di residenza (Van de Kreeke 1983).

La maggior parte delle variabili introdotte nelle equazione (11) presentano valori che sono facilmente determinabili, o possono essere ricavati nota la geometria del bacino e le caratteristiche della marea. Tuttavia, il coefficiente di ritorno (b) dipende dalle caratteristiche che il flusso uscente dal bacino trova in mare. È quindi un errore fare affidamento sulle caratteristiche del bacino e assumere un valore di b arbitrario.

5.1.1 Il coefficiente di ritorno

Il coefficiente di ritorno (b) rappresenta il destino del prisma di marea quando fuoriesce dal bacino. Quindi b deve essere determinato dall'interazione tra il flusso uscente dal bacino e i flussi che presenta il mare (correnti costiere).

Questo fattore si può determinare per via analitica studiando la geometria del pennacchio effluente dalla bocca del bacino e le correnti costiere, e la loro interazione. Si è anche cercato di semplificare la determinazione di questo coefficiente, cercando di graficarne il comportamento in funzione dei parametri che più influenzano le sue variazioni.

In bibliografia si trovano molte altre soluzioni per la valutazione di b , che si equivalgono, si è voluta riportare una trattazione che non prevede una conoscenza eccessivamente approfondita delle caratteristiche all'uscita delle bocche del bacino.

Nel caso di una costa "aperta", il coefficiente di ritorno b è funzione di tre scale di lunghezza e una scala temporale. La scala temporale è il periodo di marea T , che può essere considerato fisso per un determinato bacino. Le scale di lunghezza sono la larghezza del pennacchio effluente di B , la distanza a largo della linea centrale y_m del pennacchio, e una scala di lunghezza caratteristica di diffusione che definiamo come il valore σ alla fine del ciclo di marea.

$$\sigma_T = \sqrt{2K_y T} = \sqrt{0.05 U h T} \quad (12)$$

Si può quindi esprimere b come funzione di due numeri adimensionali, y_m/B e σ_T/B . La relazione diventa:

$$b = f\left(\frac{\sigma_T}{B}, \frac{y_m}{B}\right) \quad (13)$$

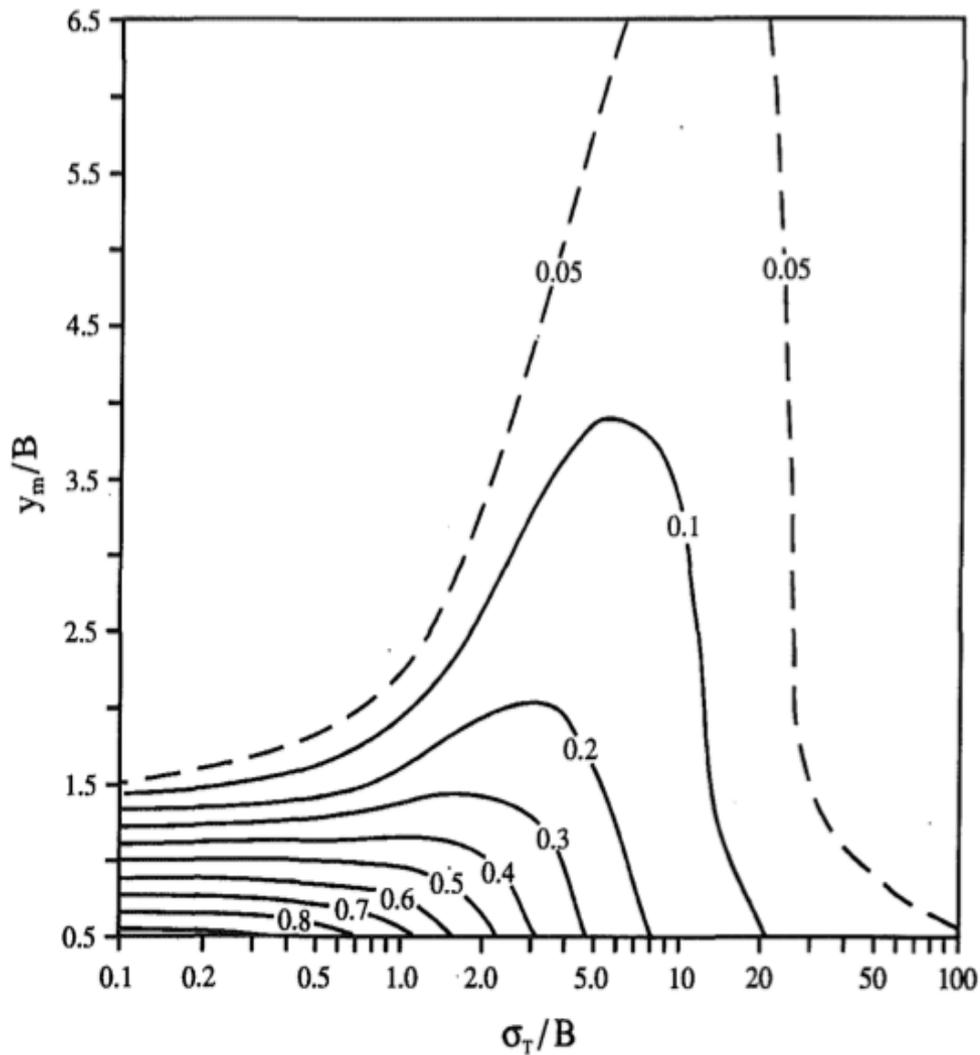


Figura 4. Valori del “return flow factor” messo in dipendenza con i due valori adimensionali y_m/B e σ_T/B

Il comportamento del coefficiente di diffusione in Figura 4 è facilmente comprensibile. Il parametro y_m/B rappresenta il rapporto tra la distanza del pennacchio in mare aperto per la larghezza iniziale del pennacchio. Il suo valore minimo è di 0,5, che corrisponde al che si appoggia alla costa. Questo produce il massimo fattore di ritorno per un dato valore di σ_T/B , poiché la massa d’acqua che rientra nel bacino alla marea successiva è coincidente con il pennacchio effluente. All’aumentare y_m/B per un

dato valore di σ_T/B il pennacchio si allontana dalla costa, e l'acqua che rientra è priva del tracciante contenuto nel pennacchio effluente della marea precedente. Ho quindi una diminuzione del coefficiente di diffusione. Il parametro y_m/B rappresenta l'effetto della diffusione laterale rispetto alla larghezza iniziale del pennacchio. Per valori bassi di y_m/B , il pennacchio quasi si appoggia alla costa, aumentare σ_T/B corrisponde ad un efficace diffusione del tracciante distante dalla bocca portando quindi ad una diminuzione di b . A valori più alti, y_m/B quando il pennacchio si separa dalla costa, aumentando σ_T/B può effettivamente aumentare il coefficiente di ritorno causando una maggiore diffusione di tracciante nell'area limitrofa alla bocca.

Per la maggior parte delle configurazioni, il pennacchio effluente non lascia mai la costa, quindi $y_m/B = 0,5$. Questo perché, come detto in precedenza, la velocità alla bocca deve essere superiore al 60 % della velocità della corrente costiera poiché il pennacchio si separi. In questo caso b non dipende da y_m/B , e può essere espresso come una funzione di solo σ_T/B . Questa dipendenza si esprime tracciando il grafico in Figura 5 che mostra chiaramente la rapida diminuzione b all'aumentare σ_T/B .

Si applicano le considerazioni appena esposte alla laguna di Venezia, in modo da trovare un valore per il coefficiente di ritorno. Osservando le simulazioni, si apprende che il pennacchio non si inserisce di molto in mare, quindi il rapporto y_m/B , si può ipotizzare inferiore a 0,5, dunque per il calcolo del coefficiente di ritorno si utilizza il grafico semplificato. Analizzando il braccio di mare Adriatico su cui affaccia la laguna, si nota che non vi sono importanti correnti costiere. Quindi si ipotizza un valore molto basso del parametro σ_T/B , essendo il rapporto tra le condizioni di mare all'esterno della bocca (velocità delle correnti) e la larghezza del pennacchio. Entrando con questi valori nella Figura 5 si trova un valore del coefficiente di ritorno pari a 0,9 (b).

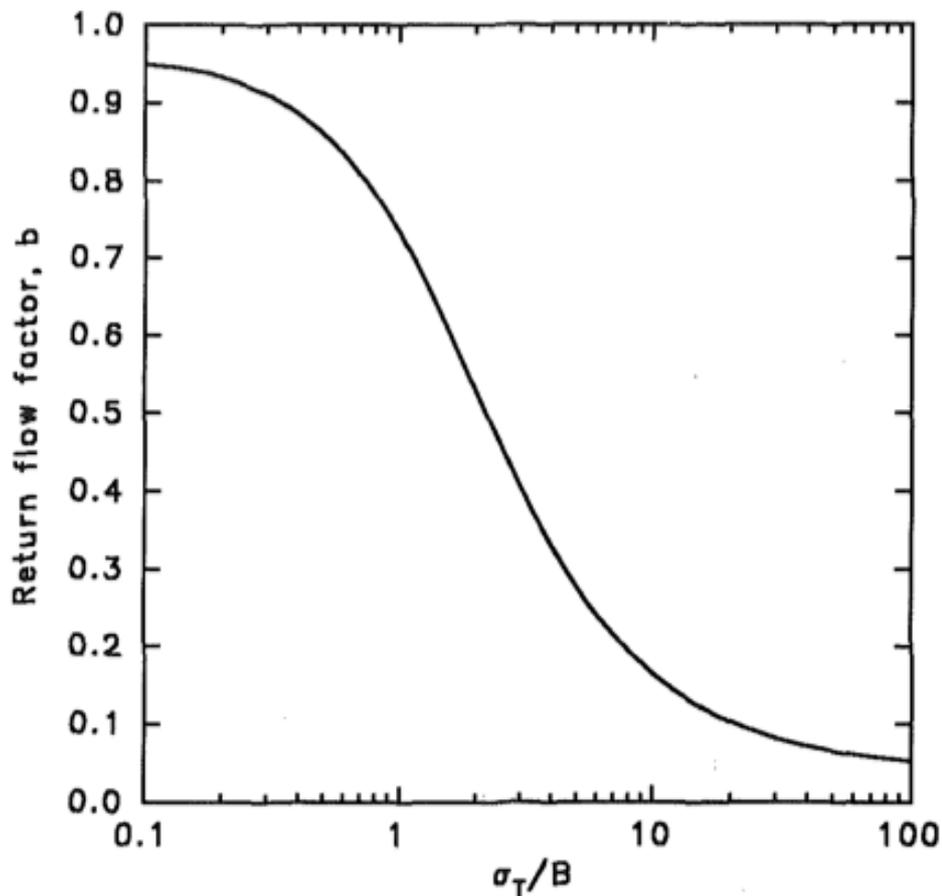


Figura 5. Return flow factor in funzione di solamente di σ_T/B avendo $y_m/B = 0.5$

5.2 Modello a prisma di marea modificato

Visto il modello a prisma di marea “classico” si vuole ora prendere in considerazione una versione modificata.

Nel modello a prisma di marea, si assume che il prisma di marea entrante, si mescoli perfettamente con l’acqua all’interno del bacino. Si vuole ora considerare un modello che tenga conto anche dell’effetto di mescolamento mediante la definizione e l’introduzione del parametro ξ , tra acqua nel bacino e acqua proveniente dal mare.

Si prenda in considerazione un bacino d’acqua, soggetto ad un ciclo di marea e comunicante con il mare attraverso una sezione ben definita. Per andare a considerare

l'effetto di mescolamento si introduce una concentrazione spazialmente mediata nel bacino. All'inizio della fase di riflusso la concentrazione vale:

$$c(t) = \frac{M(t)}{V_0 + P/2} \quad (14)$$

dove $M(t)$ è la massa totale del tracciante nel bacino, V_0 è il volume medio all'interno del bacino e P è il prisma di marea, cioè, il volume d'acqua che entra nel bacino (o esce dal bacino) durante un ciclo di marea. Il ΔM_e di massa che esce dal bacino durante la fase di riflusso può essere scritto come:

$$\Delta M_e = \int_0^{T/2} C_e(\tau) Q_e(\tau) d\tau = \int_0^{T/2} \xi(\tau) c(\tau) Q_e(\tau) d\tau \quad (15)$$

dove $C_e(t)$ è la concentrazione effluente, cioè, la concentrazione nel bacino vicino all'ingresso che probabilmente è inferiore alla concentrazione media $c(t)$ mentre $\xi(t) = C_e(t)/C(t)$ può essere considerato un fattore che monitora l'efficienza di miscelazione.

L'equazione (15) si può approssimare a

$$\Delta M_e \cong \xi c(t) P/2 \quad (16)$$

La concentrazione media alla fine del riflusso, $c(t + T/2)$ la si determina:

$$c(t + T/2) = \frac{M(t) - \Delta M_e}{V_0 - P/2} \quad (17)$$

Sostituendo la (14) e la (16) si ritrova:

$$c(t + T/2) = \frac{c(t)(V_0 + P/2) - \xi c(t)P}{V_0 - P/2} = c(t) \frac{V_0 + P/2 - \xi P}{V_0 - P/2} \quad (18)$$

La massa ΔM_f entrante nel bacino durante la fase d'inondazione si può scrivere come:

$$\Delta M_f = \int_{T/2}^T C_r(\tau) Q_f(\tau) d\tau \quad (19)$$

Dove $C_r(t)$ rappresenta la concentrazione del flusso di ritorno, cioè la concentrazione residua in mare, nelle vicinanze delle bocche del bacino durante la fase di inondazione. La (19) può essere approssimata a:

$$\Delta M_f \cong C_r P \quad (20)$$

Partendo dal presupposto che C_r possa essere approssimata come una frazione di b (concentrazione in mare), vale a dire:

$$C_r \cong b \frac{\Delta M_e}{P} = b \xi c(t) \quad (21)$$

Da qui:

$$\Delta M_f \cong b \xi c(t) P \quad (22)$$

La concentrazione media al termine della fase di inondazione, quindi alla fine dell'intero ciclo di

marea, si può calcolare come:

$$c(t+T) = \frac{M(t) - \Delta M_e + \Delta M_f}{V_0 + P/2} \quad (23)$$

da cui sostituendo la (14) (16) e la (20) si ottiene:

$$c(t+T) = \frac{M(t) - \Delta M_e + \Delta M_f}{V_0 + P/2} = \frac{c(t)(V_0 + P/2) - \xi c(t)P + b \xi c(t)P}{V_0 + P/2} \quad (2)$$

Raccogliendo $c(t)$:

$$c(t+T) = \frac{M(t) - \Delta M_e + \Delta M_u}{V_0 + P/2} = c(t) \frac{V_0 + P/2 - \xi P + b \xi P}{V_0 + P/2} \quad (3)$$

Sottraendo a tutti i membri $c(t)$ si ritrova:

$$c(t+T) - c(t) = c(t) \frac{V_0 + P/2 - \xi P + b\xi P - V_0 - P/2}{V_0 + P/2} \quad (26)$$

Dividendo per T si ottiene:

$$\frac{c(t+T) - c(t)}{T} = c(t) \frac{-\xi P + b\xi P}{T(V_0 + P/2)} \quad (27)$$

Ora si può raccogliere ΔV al numeratore del secondo membro e applicare il limite per T tendente a zero. Sapendo che il rapporto P/T è costante, si ottiene:

$$\lim_{T \rightarrow 0} \frac{c(t+T) - c(t)}{T} = \frac{dc}{dt} = -c(t)\xi \frac{1-b}{V_0} \left[\frac{P}{T} \right] \quad (28)$$

$$\frac{dc(t)}{dt} = -c(t)\xi \frac{1-b}{V_0} \left[\frac{P}{T} \right] \quad (29)$$

Integrando l'equazione si ha:

$$\ln c(t) = \xi \frac{1-b}{V_0} \left[\frac{P}{T} \right] t + cost \quad (30)$$

Dove per $t = 0$ secondi la concentrazione $c(t = 0) = c_0$ quindi la costante d'integrazione vale:

$$\ln c_0 = cost \quad (31)$$

Passando ora agli esponenziali e sostituendo la costante d'integrazione, si ricava l'equazione risolutiva del problema, che descrive la concentrazione $c(t)$ come:

$$\frac{c(t)}{c_0} = \exp \left\{ -\xi \frac{1-b}{V_0} \left[\frac{P}{T} \right] t \right\} \quad (4)$$

Facendo ora riferimento ad un particolare tempo di residenza T_e chiamato "e-folding residence time" e avente espressione:

$$T_r = \frac{V_0 T}{\xi(1-b)P} \quad (33)$$

Questo risultato è molto simile al tempo di ricambio calcolato con il modello a prisma di marea classico. Vi è però l'importante inclusione del termine ξ . Non

considerandolo tutto il processo risulta dipendere solo dal rapporto tra il volume del bacino e il volume del prisma di marea (a parte il *coefficiente di ritorno b*).

6 Il modello idrodinamico

Nel presente capitolo si va a descrivere il modello idrodinamico, sviluppato dal dipartimento ICEA dell'Università di Padova. Con gli output forniti da questo modello sarà possibile determinare gli andamenti dei parametri introdotti al capitolo precedente (fattore di mescolamento, coefficiente di riorno) ed avere una stima del tempo di ricambio nella Laguna di Venezia.

6.1 Introduzione

Al fine di studiare la capacità di ricambio idrico della Laguna di Venezia è necessario conoscere in modo preciso le caratteristiche idrodinamiche che si instaurano nel bacino quando questo è sottoposto all'azione periodica delle onde di marea.

Nell'analisi seguente, si assumono condizioni periodiche stazionarie, imponendo al modello una marea sinusoidale. Non si considera l'effetto del vento, la cui azione tende a incrementare anche sensibilmente i processi di mescolamento. D'altra parte, l'azione del vento è alquanto variabile e, per questo, più difficile da inquadrare e da descrivere in modo statisticamente significativo: per esempio, durante la stagione invernale i venti sono più forti e frequenti, mentre in quella estiva si è in presenza di venti più deboli.

Si va ad utilizzare il modello numerico, denominato 2DEF, che implementa la soluzione discreta del sistema di equazioni differenziali di De Saint Venant, che governano l'idrodinamica in ipotesi bidimensionali, e l'equazione del trasporto e della diffusione. Questo modello è stato sviluppato internamente al dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università di Padova.

Il modello idrodinamico risolve, mediante la tecnica agli elementi finiti, le equazioni per le onde lunghe in acque basse. Il modello prevede la discretizzazione del campo di moto mediante elementi triangolari 2D accoppiati ad elementi lineari 1D. Le equazioni del moto nelle direzioni orizzontali x , y mediate sulla verticale e l'equazione di continuità sono le seguenti: [D'Alpaose Defina, 1995; Defina, 2000] :

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{Y} \right) - \left(\frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{\tau_{wx}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (34)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{Y} \right) - \left(\frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{\tau_{wy}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (35)$$

$$\eta \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (36)$$

in cui h indica la quota idrometrica, x , y sono le ascisse spaziali orizzontali correnti, g è l'accelerazione di gravità, ρ la densità del fluido, t il tempo, q è la velocità integrata sulla verticale con componenti q_x e q_y secondo le due direzioni orizzontali, R_{ji} sono gli sforzi turbolenti (o di Reynolds) nel piano orizzontale, in cui i e j indicano le direzioni x o y e $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ è lo sforzo tangenziale al fondo espresso dalla seguente equazione:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = gY \left(\frac{|q|}{k_s^2 H^{10/3}} \right) q \quad (37)$$

in cui k_s è il coefficiente di scabrezza secondo Strickler.

Nelle equazioni (34), (35), (36) compaiono i termini η , Y e H , i quali nel tempo generico e per ciascun elemento indicato, rispettivamente, la frazione locale di dominio allargato, il volume d'acqua per unità di superficie e una profondità d'acqua equivalente, introdotta per descrivere l'effetto dei termini dissipativi quando il tirante si riduce e diventa confrontabile con le dimensioni delle irregolarità del terreno. Tali termini sono dati dalle seguenti espressioni [Defina, 2000]:

$$\eta(h) = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{2D}{a_r} \right) \right] \quad (38)$$

$$Y = \int_{-\infty}^h \eta \cdot dz = a_r \left(\eta \frac{D}{a_r} + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} e^{-4(D/a_r)^2} \right) \quad (39)$$

$$H \cong Y + 0,27\sqrt{Y a_r} \cdot e^{-2Y/a_r} \quad (40)$$

in cui $\operatorname{erf}(2D/a_r)$ è una funzione errore, $D = h - z_b$ è una profondità media data dalla differenza tra la quota della superficie libera e quella del fondo e a_r indica l'altezza massima delle irregolarità locali del terreno.

Il modello idrodinamico simula anche il trasporto e la diffusione di una sostanza conservativa o caratterizzata da una cinetica del primo ordine. L'equazione mediata sulla verticale che governa il fenomeno è la seguente:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \frac{q_x}{Y} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{q_y}{Y} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) = f(C) \quad (41)$$

in cui C è la concentrazione media sulla verticale del materiale trasportato, D è il tensore della diffusione e $f(C)$ descrive la cinetica della sostanza. Nel caso di sostanza conservativa (ad esempio un tracciante) si ha $f(C) = 0$.

Nel modello, il tensore D della diffusione si riduce al coefficiente di diffusione D che è assunto pari alla viscosità cinematica turbolenta, calcolata in ogni punto del dominio e ad ogni istante dal modulo idrodinamico. L'equazione (41) diventa :

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \frac{q_x}{Y} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{q_y}{Y} \frac{\partial C}{\partial x} - D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) = f(C) \quad (42)$$

Ed è risolta utilizzando il metodo ai volumi finiti. Alla precedente relazione vanno ovviamente associate le opportune condizioni al contorno.

Il modello di calcolo richiede innanzitutto la costruzione di un file .geo, contenente il dominio fisico di calcolo, costituito da un reticolo di nodi e maglie che riproducono col necessario grado di precisione la geometria del sito oggetto di studio, tanto più fitto quanto più necessaria è la raffinatezza di calcolo. Oltre a dominio di calcolo, è richiesto anche un file .sim con indicazioni sulle condizioni al contorno che caratterizzano il problema che si intende studiare e altre istruzioni sulle modalità di calcolo da adottare.

Per la visualizzazione e l'elaborazione dei dati e dei risultati relativi alle simulazioni effettuate con il modello di calcolo si utilizza un interfaccia grafica denominata Incidenze. Questo programma è un software che fornisce gli strumenti per la generazione, la visualizzazione e la modifica del reticolo di calcolo. Consente inoltre di visualizzare il file delle condizioni al contorno delle simulazioni (.sim) e i risultati ottenuti (.out), rappresentando graficamente i parametri idrodinamici forniti dal modello, quali, ad esempio, livelli, tiranti, portate, velocità, sforzi al fondo. Le rappresentazioni grafiche possibili includono diagrammi con andamento temporale dei parametri, profili longitudinali, mappe a colori e sequenze animate. Per l'analisi dei tempi-scala è importante valutare l'andamento nel tempo non tanto dei livelli, ma piuttosto delle concentrazioni, i cui valori, calcolati nelle simulazioni, si sono rielaborati

mediante un programma specifico (Concentrazioni.exe), in modo da poterli visualizzare in incidenze al posto dei livelli.

Nei seguenti paragrafi si fornisce una descrizione più dettagliata riguardante le specifiche modalità di creazione/compilazione dei file e delle condizioni al contorno adottate per il calcolo delle concentrazioni puntuali e nel tempo nella laguna e dalle quali si parte per l'analisi dei tempi di ricambio in ambienti a marea.

6.2 Il dominio di calcolo (.geo)

Il file .geo, fornito dal dipartimento ICEA dell'università di Padova, contiene la definizione planimetrica e batimetrica della laguna di Venezia relativa all'anno 2003.

La costruzione del dominio prevede la riproduzione dei confini dell'area d'interesse, dei contorni dei bacini idrici e degli elementi più salienti del paesaggio, al fine di ottenere una rappresentazione quanto più possibile aderente alla realtà. In questa fase ci si affida al supporto di specifica cartografia in formato vettoriale elaborata da enti istituzionali (Carte Tecniche Regionali) o ai risultati di studi e rilievi condotti direttamente in sito.

Successivamente viene eseguita una discretizzazione spaziale del dominio, mediante l'utilizzo del software Incidenze, creando degli elementi monodimensionali (nodi) e bidimensionali (maglie triangolari) che formano la mesh, su cui applicare le equazioni che descrivono il problema idraulico. La possibilità di definire il passo di discretizzazione spaziale (la dimensione media del lato delle maglie) consente di rappresentare in modo diverso, più o meno raffinato, parti diverse del dominio. Nei punti in cui è richiesta una maggiore accuratezza di calcolo si affina la mesh, in modo da ottimizzare il carico computazionale richiesto dal modello.

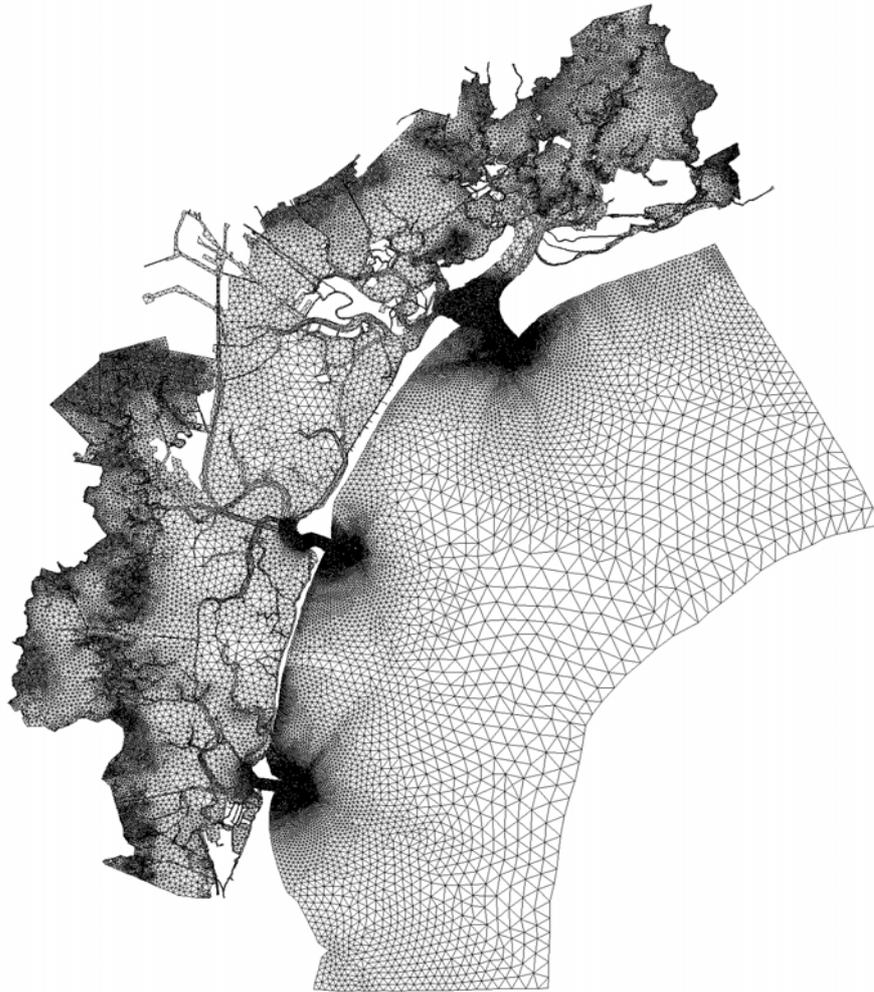


Figura 6 Mesc della laguna di Venezia

Il dominio di calcolo utilizzato è costituito da 98433 maglie triangolari e da 51724 nodi. Viene incluso un tratto costiero, le tre bocche e i territori lagunari che si estendono dalle bocche fino alle zone più interne della laguna.

Il grado di affinamento della mesh, che come si può notare dalla Figura 7 è molto più fittò per la rappresentazione delle bocche di porto, cioè l'ingresso della laguna, dove si attendono più intensi gradienti di velocità e dove, quindi, un maggiore dettaglio equivale ad un sensibile miglioramento nella stima delle caratteristiche del moto. Il grado d'affinamento è invece meno elevato per le maglie poste in mare aperto e nella parte più interna del bacino, dove ci si aspettano variazioni più graduali delle condizioni di moto.

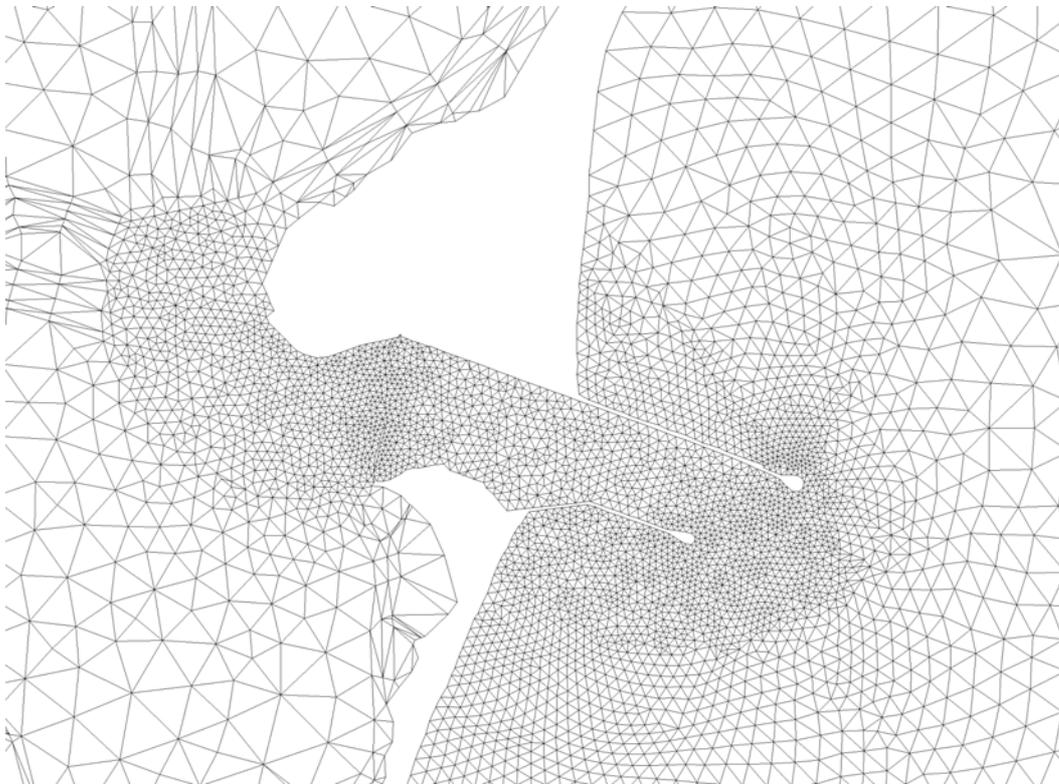


Figura 7 Dettaglio mesh alla bocca di Malamocco

Definita la geometria planimetrica, il file .geo necessita dell'assegnazione, ad ogni maglia del dominio, degli ultimi parametri che completano la descrizione fisica del territorio:

- la quota del fondo (h_f) rispetto al livello medio del mare, definito dal valore medio della maglia, cioè dalla quota del suo baricentro,
- il valore del coefficiente di Gauckler-Strickler (k_s), che tiene conto della resistenza al moto introdotta dalla scabrezza del fondo,
- il valore delle asperità del fondo (a_r), che caratterizza il modello di sottogriglia per le quote del fondo, consente di trattare in modo efficiente e continuo la transizione asciutto/bagnato. Diversamente, si tratta di un fenomeno di discontinuità che le sole equazioni del moto non permettono di gestire.

Nella Figura 8 sono rappresentati i valori della quota del fondo h_f , espressi in metri sopra il livello medio del mare, e si osserva che dalle tre bocche i canali si snodano e si ramificano, spingendosi nelle aree più interne del bacino, caratterizzate dalla presenza

di molte terre emerse. La laguna può essere suddivisa principalmente in quattro zone: la laguna superiore, che, dalla bocca di Lido è posta a nord, la laguna centrale, posta tra la bocca di Lido e la bocca di Malamocco, la laguna posteriore, che comprende la zona industriale, e la laguna inferiore, posta nella parte sud. Il colore rosso scuro evidenzia le aree più alte della laguna, le quali vengono allagate soltanto quando è presente l'alta marea. Queste zone, sono principalmente situate nella laguna superiore e posteriore. Per dare evidenza ai gradienti di profondità che si realizzano nell'interno dell'area lagunare si è imposto il valore minimo di -5 metri alla scala di rappresentazione cromatica. Tale valore viene superato lungo i canali principali interni e in mare aperto.

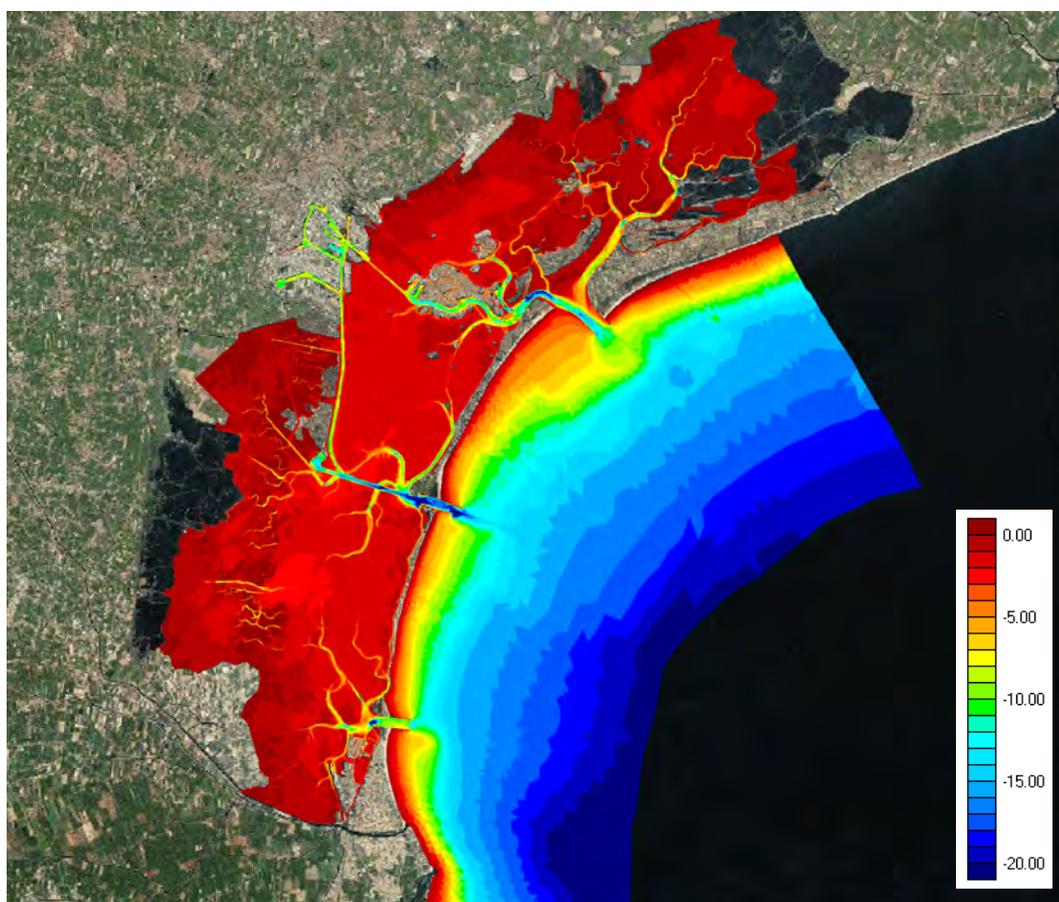


Figura 8 Rappresentazione delle quote del fondo (hf) nella laguna di Venezia

Nella Figura 8, il dominio è sovrapposto ad una rappresentazione del territorio ottenuta tramite ortofoto aeree: entrambi gli elementi sono georeferenziati secondo il sistema di riferimento Gauss-Boaga, consentendo una perfetta sovrapposizione delle immagini.

Per la rappresentazione del coefficiente di Strickler, come si può vedere in Figura 9, si sono scelti cinque valori da assegnare alle maglie del dominio, in particolare si è

posto:

- $k_s = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ in mare aperto,
- $k_s = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ nei canali principali e in alcune aree della laguna centrale,
- $k_s = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ in gran parte del bacino,
- $k_s = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ in corrispondenza delle aree circostanti alle barene,
- $k_s = 40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ in corrispondenza alle barene.

Si ricorda che all'aumentare del valore del k_s diminuisce la resistenza al fondo e viceversa.

Al parametro a_r si è dato un valore costante, pari a 0,3, per tutti gli elementi triangolari.

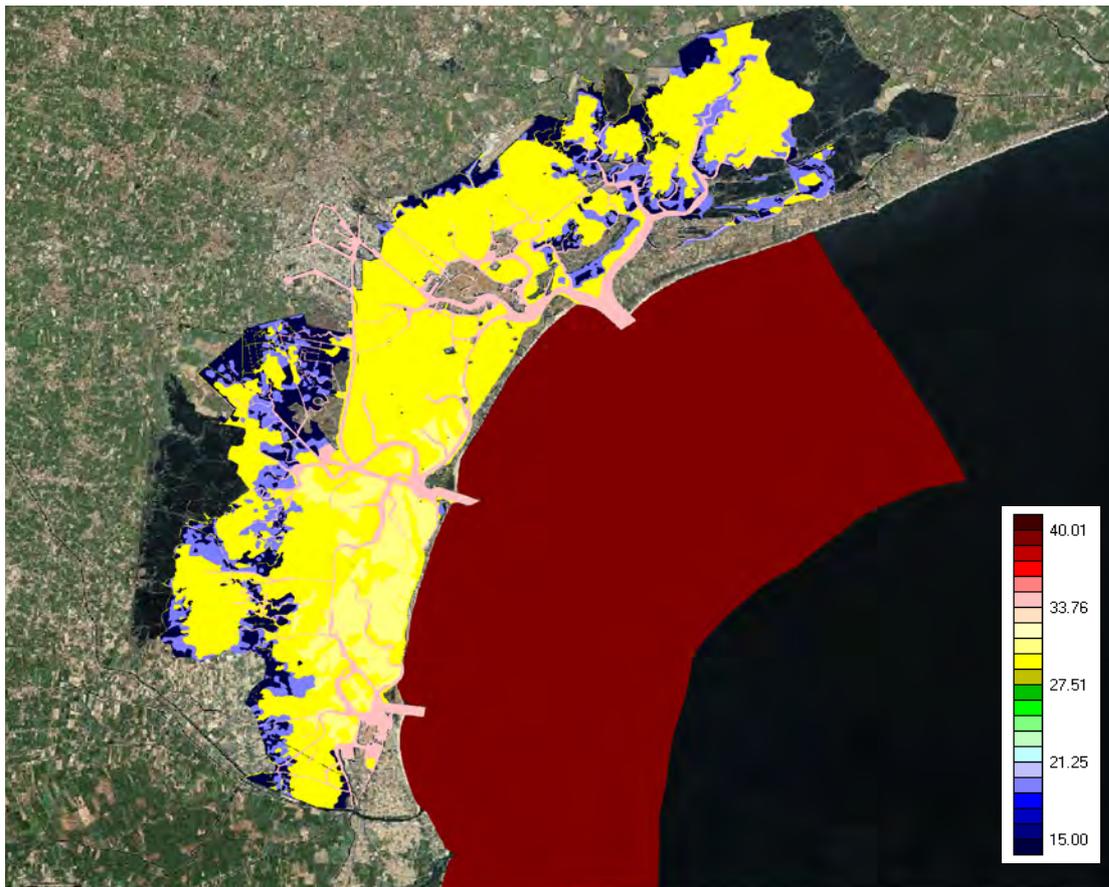


Figura 9 Distribuzione spaziale coef. k_s nella laguna di Venezia

6.3 Condizioni al contorno e istruzioni di calcolo (.sim)

Il file .sim è costituito da un file di testo attraverso il quale, rispettando una prestabilita formattazione, è possibile impartire istruzioni al software circa le modalità di calcolo e le condizioni al contorno da imporre al problema.

Si illustrano ora le caratteristiche più salienti del file, esplicando le scelte effettuate per le simulazioni. (Figura 10)

Dati generali della simulazione

Vengono date al sistema le informazioni più generali come, la durata della simulazione, il passo temporale di calcolo, il passo temporale di stampa dei risultati, e la stampa dei risultati a video (1/0). Successivamente vengono inseriti il nome del file .geo che contiene l'input della simulazione, ed il nome del file .out che contiene l'output della simulazione. Infine si può scegliere se calcolare l'idrodinamica o meno (0/1).

Lista delle variabili da stampare

Si vanno a definire i parametri che verranno calcolati dal modello, ad esempio i livelli, le portate, l'altezza d'onda, la concentrazione, le curvature.

Condizioni iniziali

In questa fase si definisce la lettura o meno del file di restart (0/1). In caso affermativo si indica il nome del file .bup che fotografa la situazione all'ultimo istante della simulazione corrente. Il.bup costituisce quindi un file output per la simulazione precedente, mentre è un file di input per quella corrente.

Tabelle dati variabili nel tempo

Si inseriscono il numero di tabelle, il passo temporale di lettura dei valori, il numero dei valori ed il nome della tabella. Successivamente si inseriscono i valori della tabella separati da spaziatura.

Condizioni al contorno

Vengono ora indicati i nodi del dominio di calcolo, così come numerati nel file .geo, sui quali applicare le condizioni al contorno relative ai livelli, definiti dalle tabelle del punto precedente.

Dati per il trasporto e la diffusione

Viene specificato se si vuole calcolare la diffusione (1/0) e il relativo file .out in caso affermativo. Vengono poi indicati i nodi del dominio di calcolo, così come numerati nel file .geo, sui quali applicare le condizioni al contorno relative alle concentrazioni. Si procede come al punto precedente immettendo il numero complessivo di nodi associati ad una determinata tabella (prima riga) e poi, su colonne separate, il numero identificativo del nodo, il numero identificativo della tabella associata e un coefficiente amplificativo, posto pari ad 1.

Dati relativi al moto ondoso

Dati relativi all'infiltrazione, dati relativi al trasporto solido, dati relativi al moto ondoso. Nel modello è prevista la possibilità di calcolare anche questi fenomeni (1/0), ma nel presente lavoro non sono oggetto di indagine.

```

simulazione taratura da 23/04/2009 12.00 a 25/04/2009 0.00
2.0 versione
***** DATI GENERALI DELLA SIMULAZIONE *****
2592000.0 2.0 1800.0 0.0 0.0 1 TT,dt,dtpert,dtconvet,dtRey,ivideo (,TTzero,nfileNoConv)
0.1 0.2 0.1 poroETA, Csmago, Cverticale (,ReyTauMAX)
Laguna2003.geo
marea0.3_entr_primi30gg_cmp.out
0 calcolo l'idrodinamica (,tollGCM)
***** LISTA DELLE VARIABILI DA STAMPARE *****
1 livello Ho
1 portate qx,qy,Q1D,Q tronchi speciali
0 eddy viscosity di maglia
0 sforzxy di reynolds
0 quota del fondo nodale
0 portate specifiche al fondo
0 concentrazione nodale sospensione
0 portata di filtrazione e volume immagazzinato
0 altezza d'onda
0 direzione dell'onda
0 radiation stresses
1 concentrazione nodale diffusione
0 accelerazioni convettive
0 curvature
0 vuoto
0 vuoto
0 vuoto
0 vuoto
0 vuoto
***** CONDIZIONI INIZIALI *****
-0.3 livello iniziale
0 eventuale correzione livelli
1 eventuale lettura da restart
Conc_t=0.byp nome file restart
***** TABELLE DATI VARIABILI NEL TEMPO *****
1 tabelle per l'assegnazione dei livelli e delle portate
180000. 10 tabella 1 concentrazioni in mare
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
***** CONDIZIONI AL CONTORNO *****
0 Numero di nodi con livello assegnato
0 Numero di nodi con portata assegnata
0 numero di nodi con scala portate
0 Numero di maglie speciali con tabella associata
0 Numero di tronchi speciali con tabella associata

***** DATI RELATIVI AL VENTO *****
0 se 0 il vento non È usato
1.62E-06 0.1 3 4
***** DATI RELATIVI ALL INFILTRAZIONE *****
0 se 0 non si considera filtrazione
0.00500 0.00050 10.00000 f0 f00 zita0
***** DATI RELATIVI AL TRASPORTO SOLIDO *****
0 0 2.00000 1800. SI/NO al fondo - SI/NO in sospensione - fattore temporale - Tsmooth
0.400000 0.1 2.65000 50.00 10. Poros,diam,densRel,sksvERO,cury
0.0 0.000000 1.0 Cdry,Co,perCstampa
0 numero di nodi con concentrazione assegnata
0 numero di nodi non erodibili
***** DATI PER IL TRASPORTO E DIFFUSIONE *****
1 1 calcolo la diffusione (,lettura idrodinamica da .OUT esterno, nel qual caso aggiungere sotto riga con nome file .out)
idrocinamica_entrante.out
0.0 0.0 6.0 1.000 0.0 DDo,DDry,Diff,DperStampa,Decadi
105 0 numero di nodi con concentrazione e flusso assegnati

***** DATI RELATIVI AL MOTO ONDOSO *****
0 non calcolo il moto ondoso
7.7 0.7 0.7 0.0015 periodo,fcRAD,fcVorb,CfricW
1 2 0 jTABHw,jTABteta,jWaWind
1 600.0 jIRS,dtpesoRS
1 600.0 jIVO,dtpesoVO
2 numero nodi con altezza e direzione fissa
3951
3949
0 600.000 se 1 leggi file radiation stress & tempo attivazione
boratau.out
0 600.000 se 1 leggi file velocita al fondo & tempo attivazione
boravel.out

```

Figura 10. Stampa a video del file .sim

6.4 Risultati della simulazione (.out)

I risultati delle simulazioni e il commento di questi saranno oggetto principale del capitolo successivo. In questo paragrafo si vuole tuttavia descrivere operativamente come si sono utilizzati i file .out.

Il file .out riporta i risultati del modello e, grazie ad Incidenze, aprendo prima il file .geo e poi l'out dei risultati, è possibile visualizzare nel dominio in istanti definito oppure in sequenze animate. La visualizzazione in incidenze però riguarda solo i livelli nel tempo, mentre è d'interesse per questa analisi l'andamento delle concentrazioni.

Per ovviare a ciò si deve utilizzare un programma, fornito dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, in grado di sostituire ai livelli le concentrazioni calcolate dal modello. L'input di tale programma è l'.out del modello, mentre l'output è un altro file .out che, aperto in Incidenze, permette di visualizzare le concentrazioni al posto dei livelli.

7 Applicazione dei modelli

Al fine di valutare l'influenza dell'efficienza di mescolamento introdotta nel modello a prisma di marea modificato, e la sua interazione con il parametro coefficiente di ritorno, si sono eseguite delle simulazioni utilizzando il modello idrodinamico illustrato al capitolo 6.

Il modello idrodinamico è stato applicato a simulazioni della durata di 60 giorni. Al fine di contenere le dimensioni del file.out, si eseguono i primi 30 giorni e poi i secondi 30 giorni. Essendo la laguna di Venezia influenzata da una marea con periodo 12 ore, si utilizza un'idrodinamica periodica della durata totale di 11,5 ore, sapendo che ora 0 e 12 coincidono.

Si è scelto di applicare il modello a due differenti ampiezza di marea. La prima serie di simulazioni è stata eseguita utilizzando un'escursione di marea di 60 cm (marea_0.3), mentre la seconda utilizzando una variazione di 100 cm (marea_0.5). Per questi due differenti scenari si è poi scelto di far variare la posizione di partenza dell'idrodinamica; in un caso con marea inizialmente entrante ed uno con marea inizialmente uscente. Al fine di isolare il parametro che computa l'efficienza di mescolamento si è scelto di ripetere tutte le simulazioni mantenendo la concentrazione di tracciante in mare sempre pari a zero.

Il modello idrodinamico fornisce un file .out che, attraverso un'ulteriore elaborazione, consente l'analisi dell'andamento delle concentrazioni nel tempo ed il calcolo del tempo di ricambio locale, cioè spazialmente distribuito all'interno del bacino. (capitolo 7.2).

In oltre viene creato un file testo contenente i valori di volume di tracciante mediati spazialmente sull'intera laguna, con passo temporale di mezzora. Con questi dati nel capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si andranno a valutare i processi di decadimento della concentrazione all'interno della laguna.

7.1 Andamento delle concentrazioni nel tempo (analisi globale)

Al fine di conoscere l'evoluzione della concentrazione media di soluto all'interno della laguna si vanno ad analizzare i volumi di tracciante in essa contenuti calcolati attraverso il modello idrodinamico. Servendosi di un foglio di calcolo (Excel) vengono uniti i dati relativi ai primi 30 e secondi 30 giorni. In seguito vi si applica una macro creata appositamente da dipartimento ICEA, la quale calcola, il tempo necessario affinché la concentrazione in laguna sia inferiore alla soglia $1/e$. Si ha quindi il valore del tempo di ricambio globale della laguna, espresso in giorni, per le diverse simulazioni effettuate.

Tempo di ricambio globale

Altezza di marea	entr	entr_Czero	usc	Usc_Czero
0,3	21,50	17,65	16,24	12,39
0,5	11,50	9,66	7,27	5,75

Subito si nota che la marea con ampiezza maggiore, avendo prisma di marea superiore, possiede un tempo di ricambio minore. Andando ad osservare poi i valori delle simulazioni aventi concentrazione in mare pari a zero ($b=0$) si trova una consistente differenza di giorni. Questo sta a dimostrare l'importanza non trascurabile del coefficiente di ritorno b .

Concentrazioni in laguna

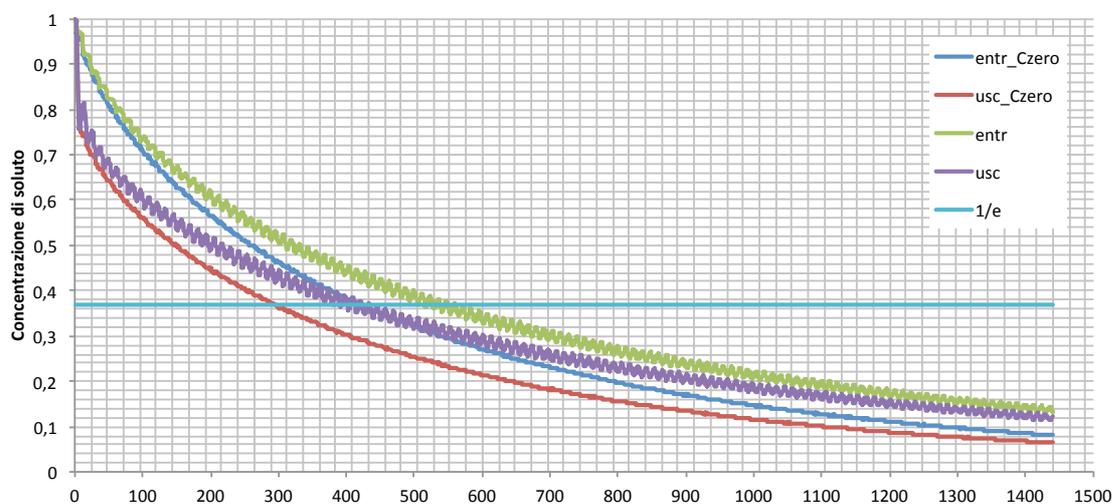


Grafico 1. Andamento concentrazioni medie in laguna

Nel Grafico 1 si ha l'andamento della concentrazione di soluto media all'interno della laguna di Venezia. Si nota subito che questo rapporto tra il volume di acqua in laguna ed il volume di soluto decade seguendo una legge esponenziale. Si è rappresentata con la linea azzurra la soglia dopo il quale si determina per definizione il tempo di ricambio.

Nelle simulazioni con idrodinamica inizialmente uscente la concentrazione media in laguna decade più velocemente. Infatti in queste inizialmente viene estratto un prisma di marea dalla laguna con concentrazione di soluto pari a uno. Nel caso d'idrodinamica entrante, invece, da prima entra un prisma di acqua "pulita", si miscela con il soluto, e successivamente esce. In questo caso viene estratto dalla laguna un volume di soluto inferiore essendo diluito con l'acqua "pulita" entrata inizialmente. Dovrà scorrere quindi più tempo al fine di ripulire la laguna.

Osservando le curve rappresentanti il decadimento della concentrazione media in laguna in cui la concentrazione di soluto in mare sia variabile, si nota un andamento "seghettato". Questo è dovuto al rientro di un volume di soluto ad ogni ciclo di marea, che fa aumentare la concentrazione media all'interno della laguna. Nel caso opposto in cui il coefficiente di ritorno sia posto nullo, invece, il volume di soluto può solo uscire dalla laguna, e quindi la concentrazione media di soluto in laguna decade seguendo una curva esponenziale senza presentare anomalie locali.

7.2 Andamento delle concentrazioni nel tempo (analisi locale)

Si effettua ora un'analisi locale dell'andamento delle concentrazioni di soluto in laguna. Mediante l'utilizzo del programma "concentrazioni.exe" fornito dal dipartimento ICEA, utilizzando come input i risultati delle simulazioni del modello idrodinamico, si costruisce un nuovo file .out contenente le concentrazioni al posto dei livelli e le portate di soluto (calcolate moltiplicando le portate liquide per la concentrazione media di elemento) al posto delle portate d'acqua. Inoltre, le concentrazioni possono essere mediate sul ciclo di marea (si parla in questo caso di concentrazione intermareale) utilizzando un altro programma visualizzando il file .out così generato tramite l'interfaccia Incidenze è possibile osservare come la concentrazione intermareale, inizialmente unitaria, decade monotonicamente nel tempo. È possibile poi estrarre le portate di soluto che transitano attraverso le tre bocche.

Si conoscono quindi le portate di soluto transitanti alle bocche con un time step di mezzora. Importando i dati in un foglio di calcolo (Excel) e applicandovi delle macro appositamente sviluppate dal dipartimento ICEA, dalle portate di soluto transitante alle tre bocche, si ricavano i volumi di soluto entranti, uscenti ed il loro rapporto, per ogni bocca ed ad ogni ciclo di marea.

Si è voluto riportare nelle seguenti figure (10,11,12,13) l'andamento temporale della concentrazione di soluto, per diversi istanti di tempo, nel caso di marea entrante con semi ampiezza 0,3 m. Queste immagini sono state create visualizzando i file .out tramite incidenze.

Si può osservare anche il diverso decadimento che si ha imponendo concentrazione nulla sul contorno del dominio (destra) e mantenendo la concentrazione di soluto pari a zero in mare, inibendo cioè il rientro di soluto attraverso le bocche (sinistra)

Come già visto, il caso in cui la laguna scambia con il mare volumi d'acqua con concentrazione di soluto pari a zero, il tempo di ricambio diventa inferiore. Questo lo si denota da una più rapida diluizione della concentrazione iniziale che si può apprezzare attraverso la scala cromatica utilizzata (rosso concentrazione 1, blu concentrazione 0).

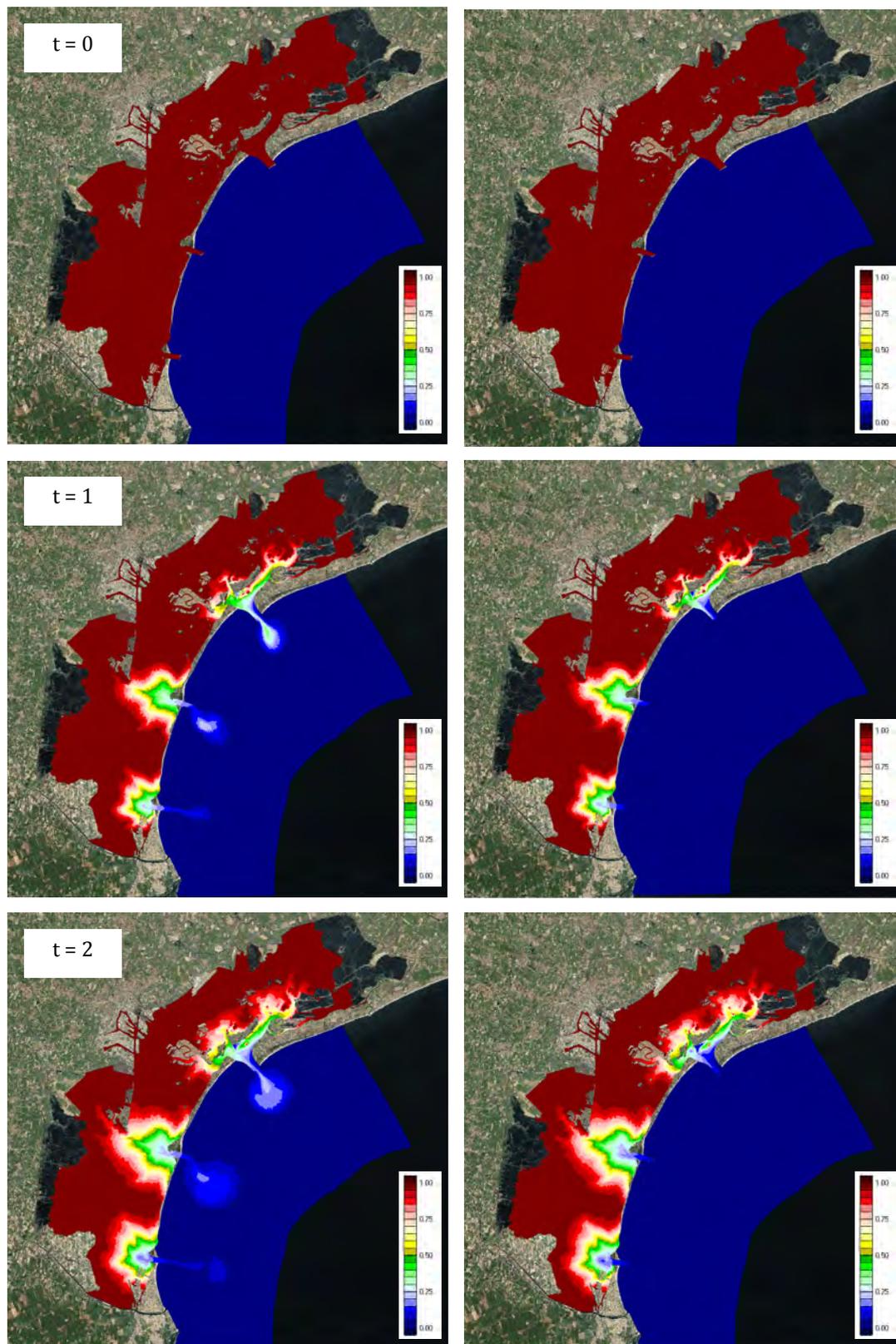


Figura 11. Andamento temporale della concentrazione di soluto, nel caso di marea entrante a 0,3 m, con concentrazione variabile (destra) con concentrazione in mare nulla (sinistra) (time- step 0, 1 e 2 giorni)

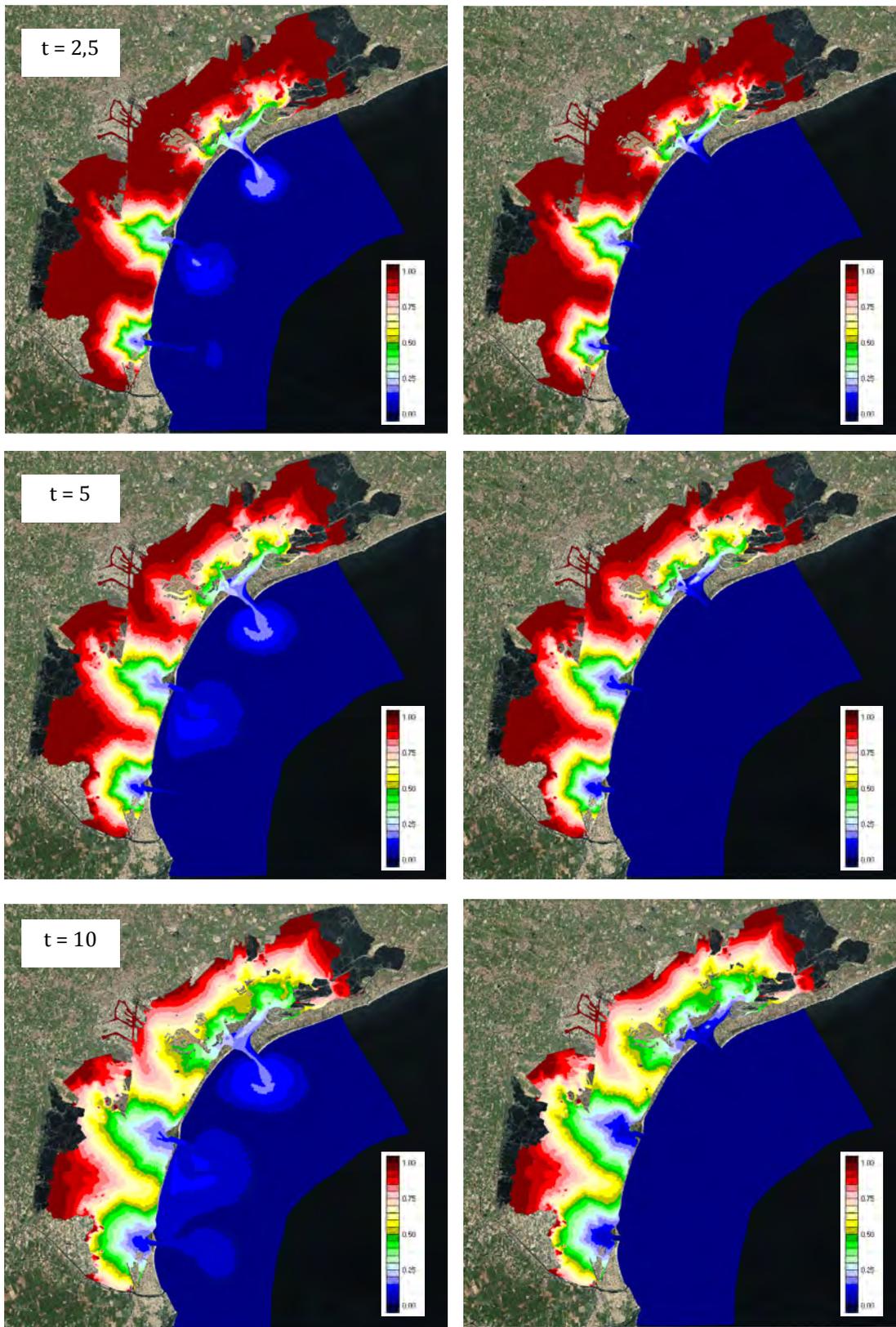


Figura 12. Andamento temporale della concentrazione di soluto, nel caso di marea entrante a 0,3 m, con concentrazione variabile (destra) con concentrazione in mare nulla (sinistra) (time- step 2,5, 5 e 10 giorni)

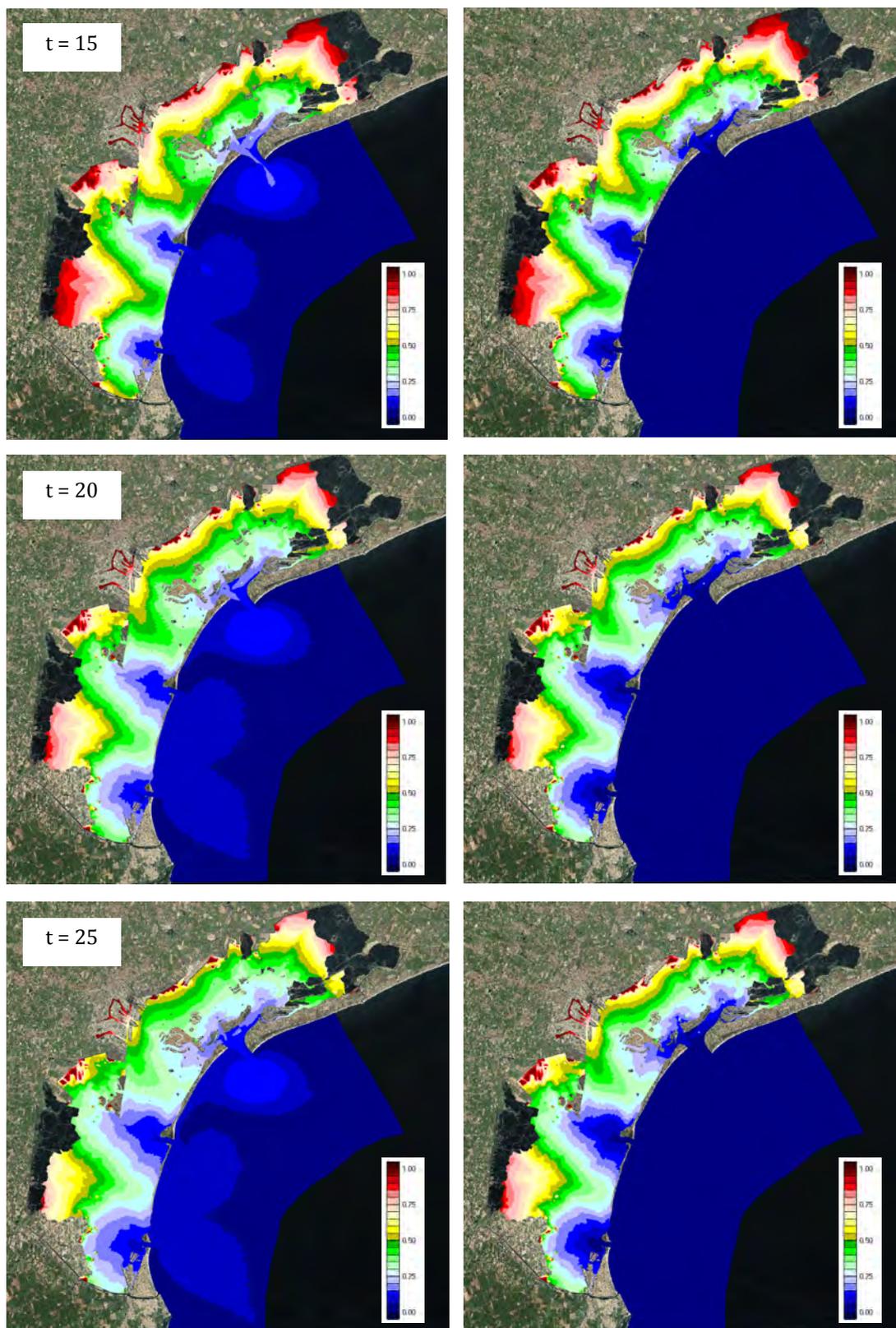


Figura 13. Andamento temporale della concentrazione di soluto, nel caso di marea entrante a 0,3 m, con concentrazione variabile (destra) con concentrazione in mare nulla (sinistra) (time- step 15, 20 e 25 giorni)

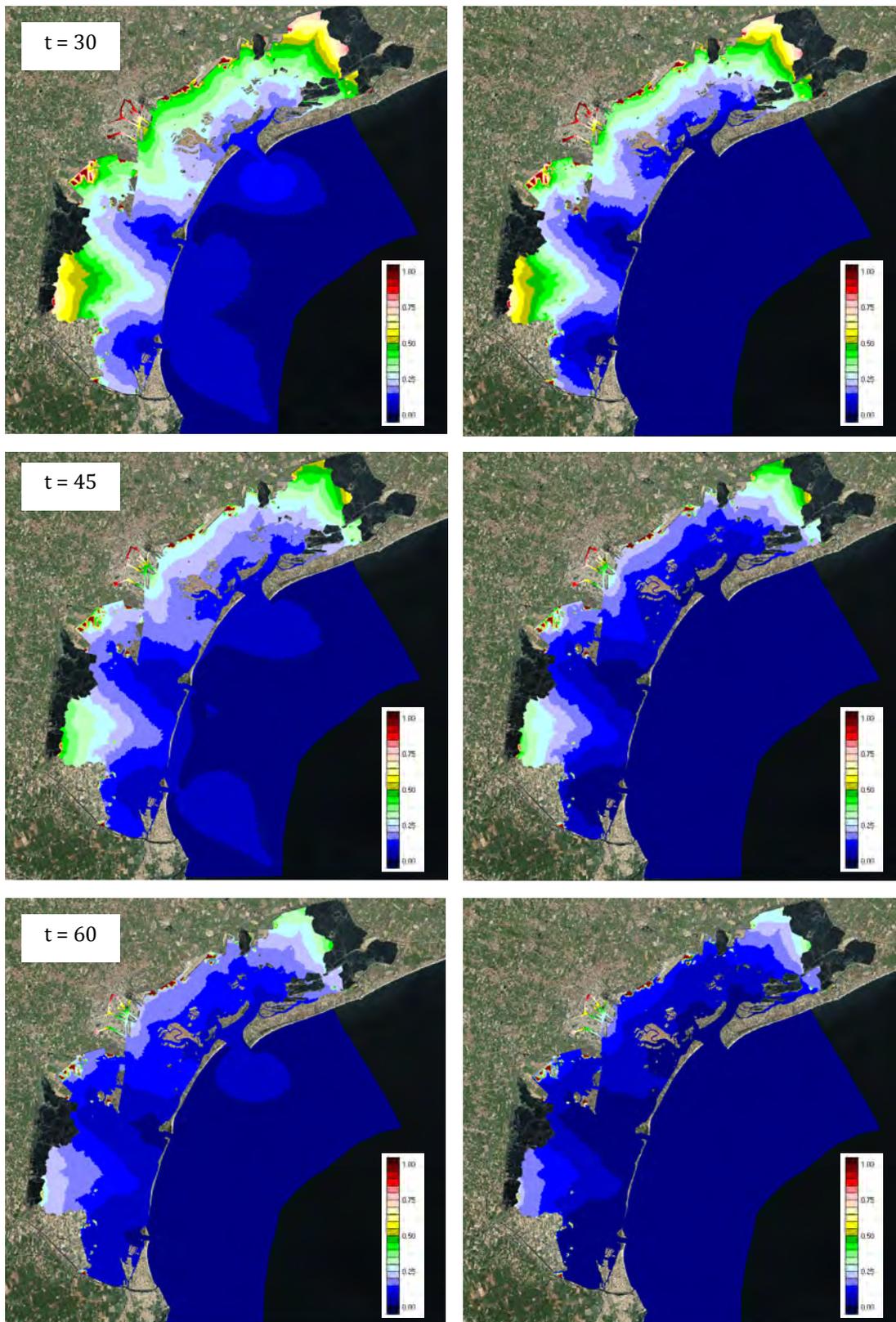


Figura 14. Andamento temporale della concentrazione di soluto, nel caso di marea entrante a 0,3 m, con concentrazione variabile (destra) con concentrazione in mare nulla (sinistra) (time- step 30, 45 e 60 giorni)

7.2.1 Valutazioni sull'idrodinamica adottata

Le simulazioni effettuate con il modello idrodinamico, oltre a considerare la concentrazione di soluto in mare variabile o nulla, considerano il caso di marea inizialmente entrante oppure uscente. L'input idrodinamico fornito al modello, al fine di rappresentare il comportamento di una marea astronomica, è stato costruito utilizzando una funzione sinusoidale. Al variare della fase iniziale, da un assegnato valore iniziale i livelli possono crescere (caso di marea entrante) oppure decrescere (caso di marea uscente).

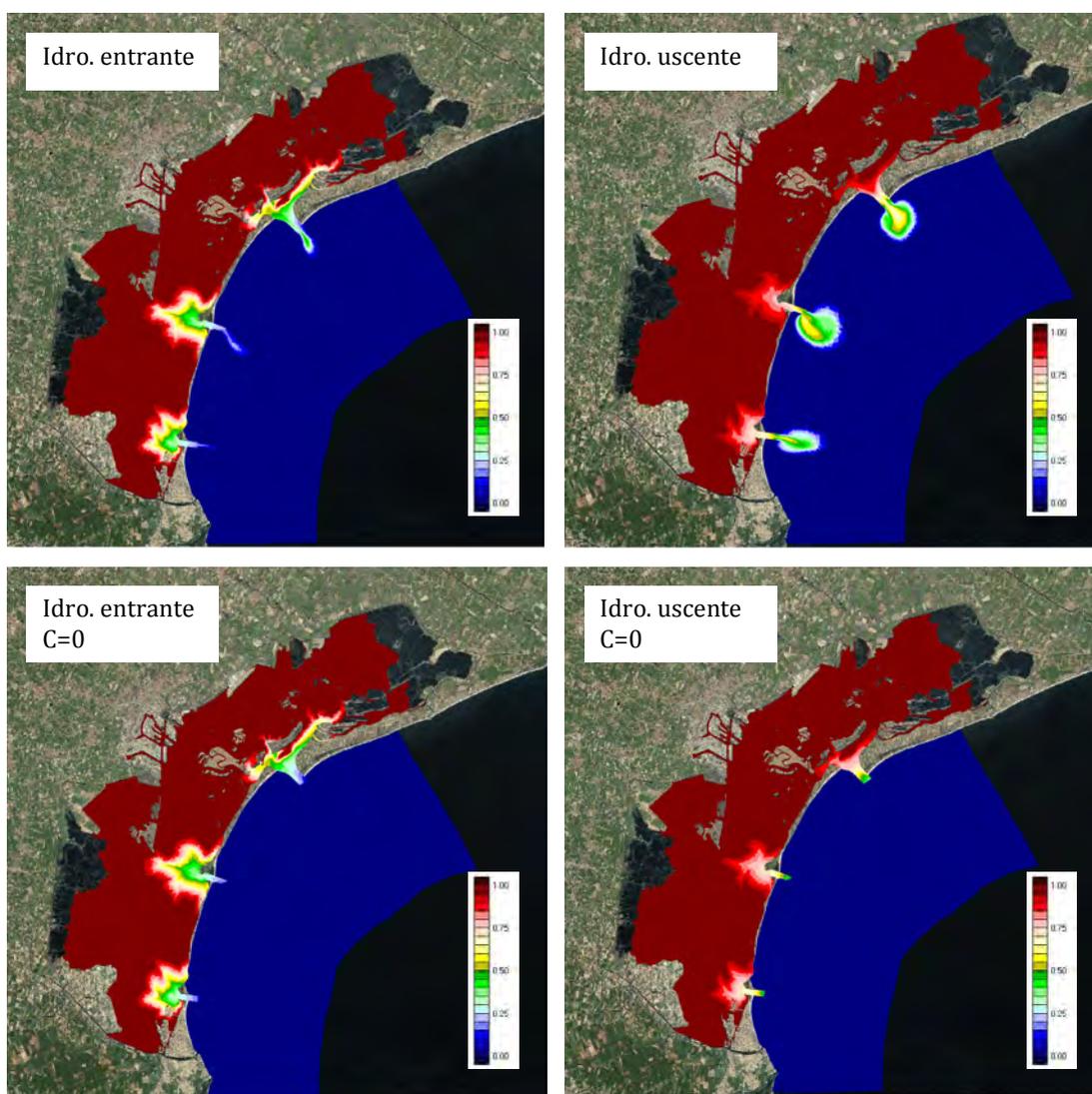


Figura 15. Andamento concentrazioni per differenti idrodinamiche al time-step 0,5 giorni

Al variare della fase iniziale, la laguna si comporta in modo differente all'intrusione del prisma di marea.

Analizzando la Figura 15, nel caso di un'idrodinamica entrante, sia imponendo la concentrazione di soluto in mare variabile che nulla, l'intrusione iniziale del prisma di marea è maggiore rispetto al caso con idrodinamica uscente.

Nel caso di idrodinamica entrante il prisma di acqua "pulita" una volta entrato, si miscela con l'acqua della laguna per poi fuoriuscire in mare, creando il pennacchio che si può ben distinguere. All'interno della laguna si ha una vasta area in cui la concentrazione iniziale (colore rosso) è stata diluita, con un solo ciclo di marea.

Nel caso di idrodinamica uscente, il prisma di marea viene estratto dalla laguna, e si miscela con l'acqua di mare creando il grande pennacchio, al momento del rientro, avrà acqua non più "pulita" ma con una percentuale di soluto al suo interno, quindi una volta in laguna il potere di decadimento della concentrazione, a parità di volume è inferiore, e si nota dall'inferiore area in cui la concentrazione è diminuita. Anche se l'area in cui la concentrazione diminuisce inizialmente è inferiore, il caso con idrodinamica uscente comporta tempi di ricambio inferiori. Se oltre ad osservare le aree interessate dal fenomeno, ci si sofferma sulla scala cromatica, e quindi sulla concentrazione puntuale, si intuisce immediatamente che il caso con idrodinamica uscente è più efficiente. Osservando il pennacchio in mare generato, oltre alle dimensioni maggiori, si nota una concentrazione di soluto elevata rispetto al caso d'idrodinamica entrante. D'altro canto però, all'interno della laguna, si ha una concentrazione inferiore in zone più estese nell'ipotesi di idrodinamica entrante. Questo dovrebbe far supporre un minor tempo di ricambio per il caso con idrodinamica entrante, essendo così efficiente dopo un solo ciclo di marea. Come già visto, però, non è affatto così. Questo fatto si può giustificare considerando l'inerzia posseduta dal fluido nelle diverse fasi del ciclo di marea.

Un esempio molto chiaro si ha considerando un ventilatore: quando l'acqua esce dal bacino è come se si mettesse la mano davanti ad un ventilatore, si percepisce una pressione data dal fluido (aria) dovuta alla velocità che possiede e dunque alla sua inerzia. Al momento in cui la marea rientra in laguna, di fatto l'acqua è ferma, e quindi viene pescata da tutte le direzioni ed inserita in laguna, come nel caso in cui si posizioni la mano dietro ad un ventilatore, non si percepisce un risucchio, appunto perché non vi è inerzia, ed il fluido (aria) privo di velocità viene richiamato da tutte le direzioni.

Tornado quindi all'analisi al momento in cui il prisma di marea fuoriesce dalla laguna, il fluido possiede una certa velocità e quindi si allontana dalla bocca, come si vede nelle figure 17,18,19. Al momento del rientro, viene richiamata alla bocca acqua da tutte le direzioni, e quindi parte del soluto che è in mare rimane fuori, essendo le zone limitrofe alla bocca prive di soluto (figure 17,18,19). Questo giustifica il fatto che il tempo di ricambio si inferiore con un idrodinamica inizialmente uscente, una volta fuori dalla laguna, il soluto, è difficile che rientri. Iniziare quindi eliminando dalla laguna un volume pari al prisma di marea con concentrazione di soluto pari a 1, anche se successivamente ne rientrerà una parte è sicurante una situazione vantaggiosa. Queste differenti dinamiche giustificano la differenza non trascurabile generata da un'idrodinamica inizialmente entrante oppure uscente.

Le differenze riguardanti i pennacchi; e le relative concentrazioni di soluto contenutevi, sono più evidenti nelle figure 17, 18 e 19 in cui vengono proposte delle viste di dettaglio delle bocche, dopo un solo ciclo di marea (istante 0,5 giorni).

Questa analisi giustifica la differenza nei tempi di ricambio calcolati dal modello idrodinamico, a parità di altre condizioni, e variando solamente la fase iniziale della marea.

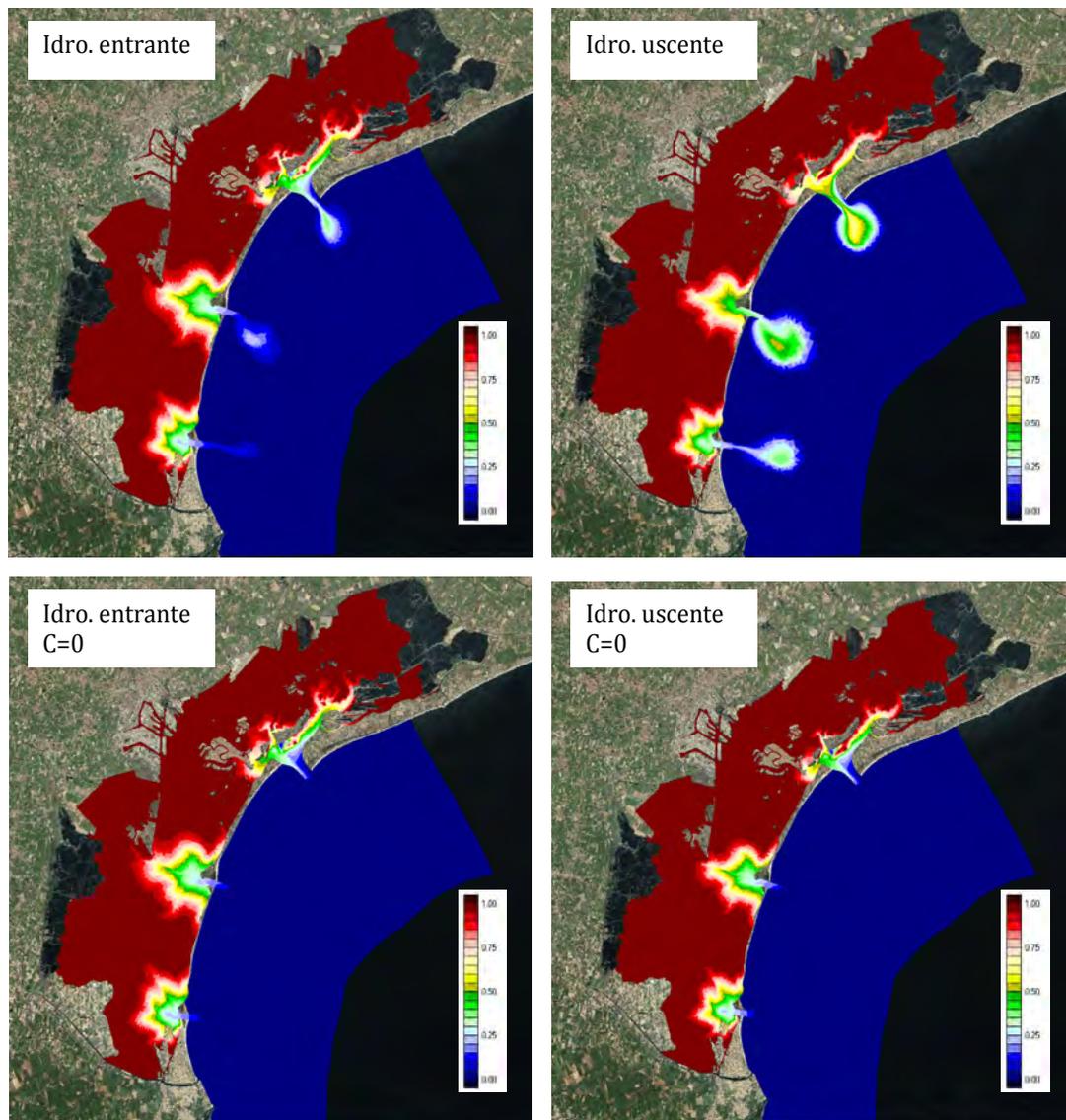


Figura 16 . Andamento concentrazioni per differenti idrodinamiche al time-step 1 giorno

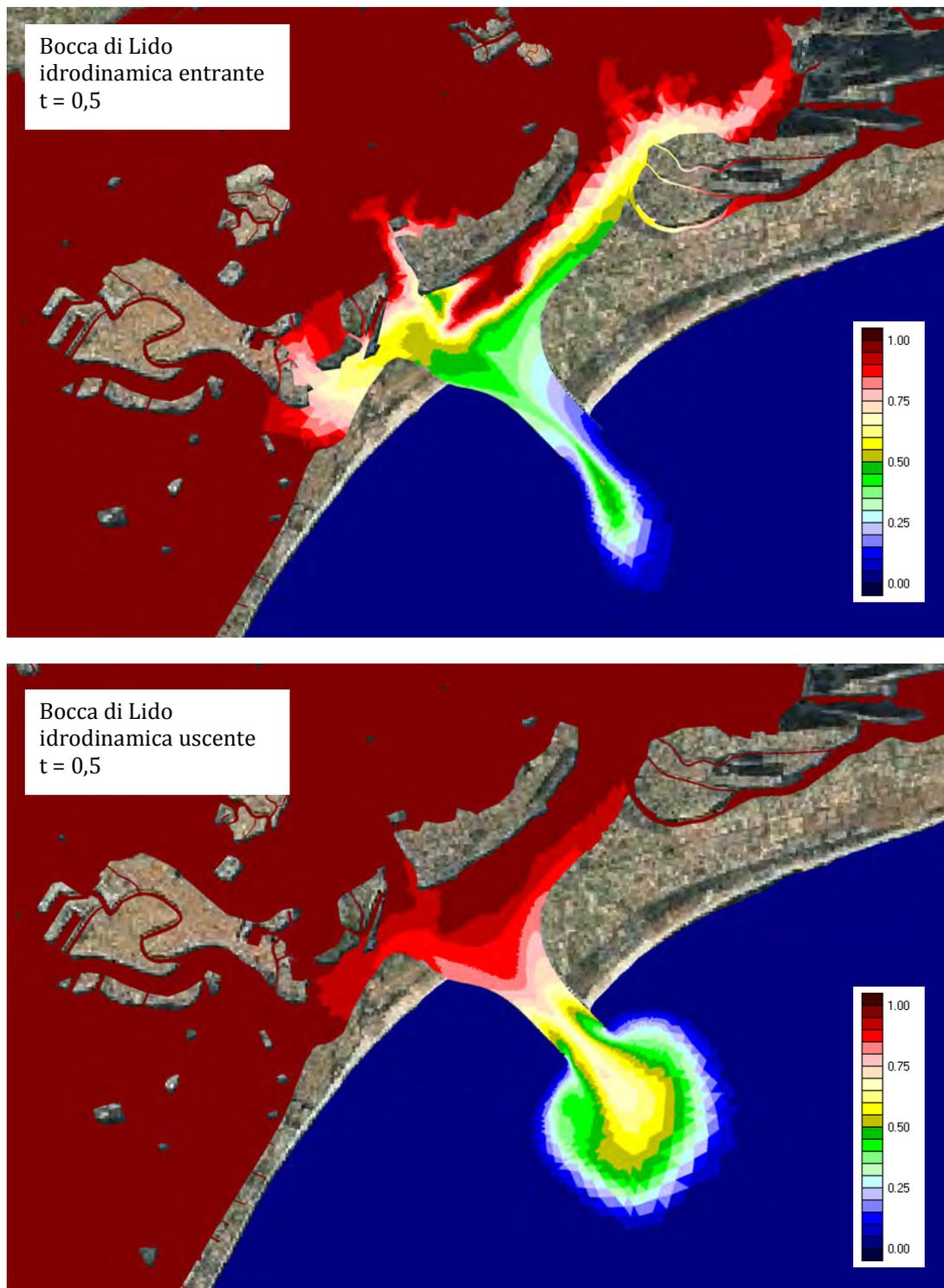


Figura 17. Dettaglio bocca di Lido

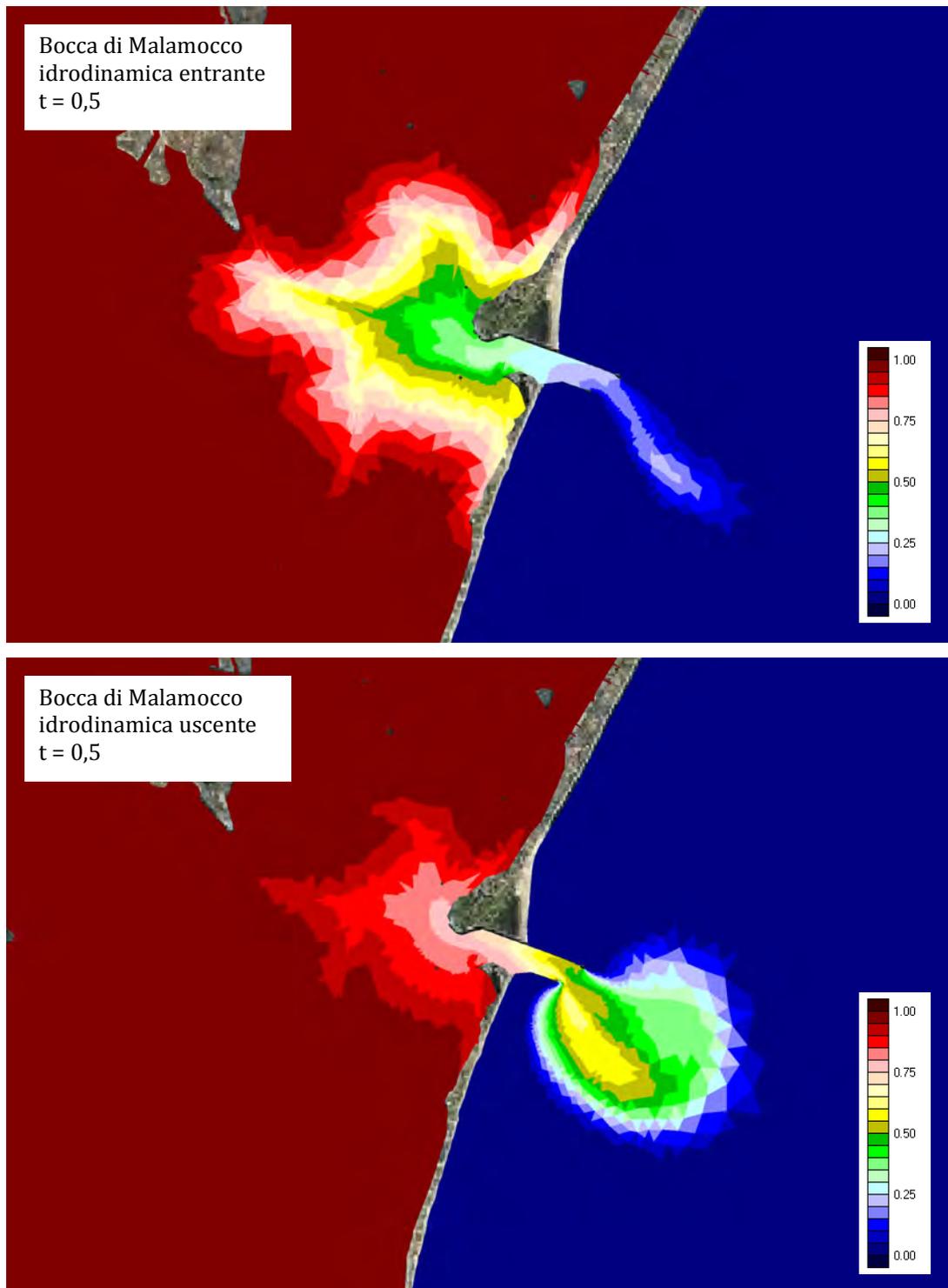


Figura 18. Dettaglio bocca di Malamocco

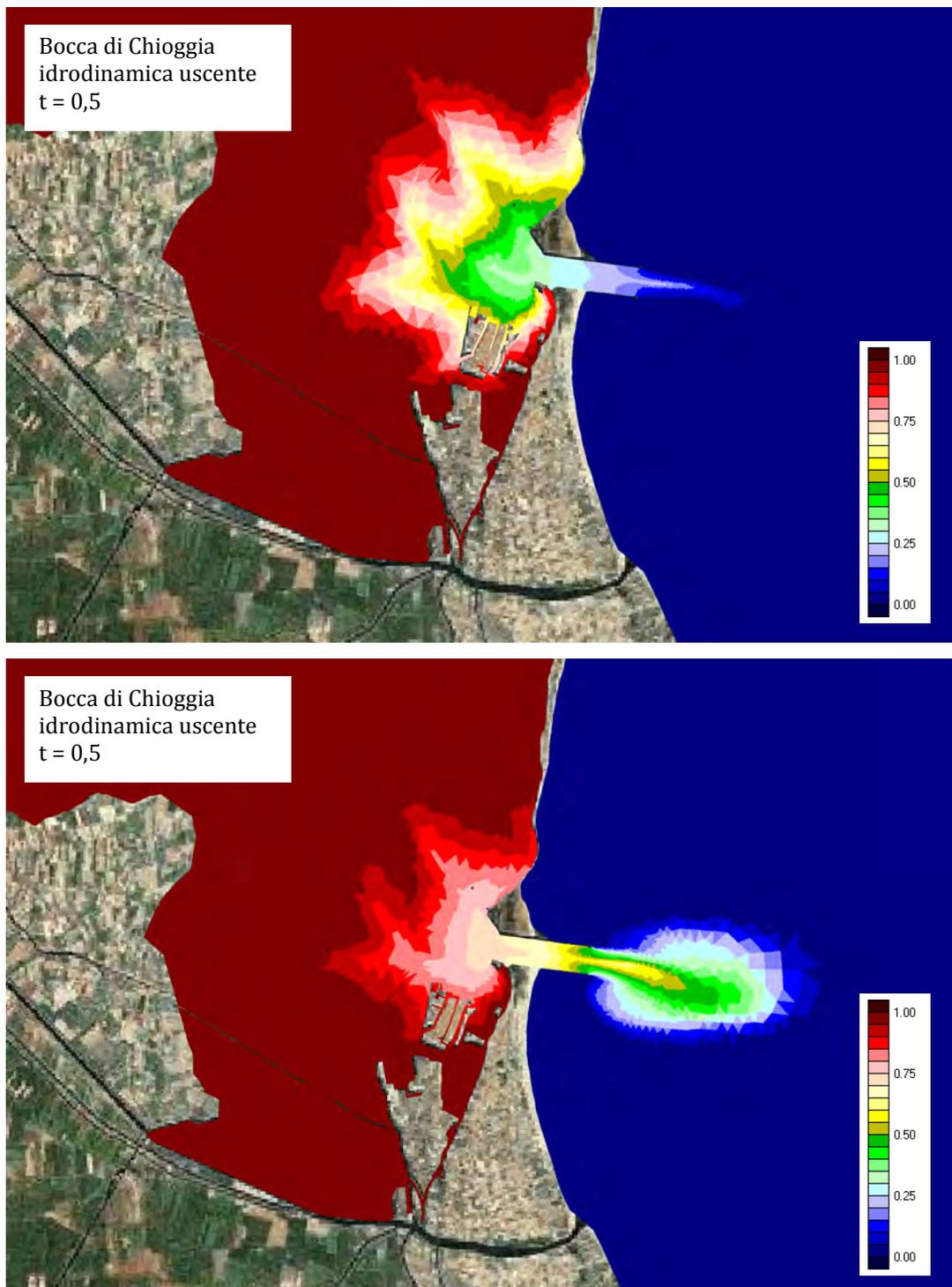


Figura 19. Dettaglio bocca di Chioggia

7.2.2 Il coefficiente di ritorno

Nel paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si è illustrato il procedimento per la determinazione del coefficiente di ritorno proposto Sanford in letteratura. Ora con i dati forniti dal modello idrodinamico, si vuole determinare il coefficiente di ritorno in modo differente, utilizzando la teoria dei modelli basati sul prisma di marea. Come visto nel capitolo 5.2 si definisce la con l'equazione (16) la massa di tracciante uscente dal bacino durante il ciclo di marea e con l'equazione (20) la massa di tracciante entrante nel bacino durante il ciclo di marea. Andando a rapportarli si trova:

$$\frac{\Delta M_f}{\Delta M_e} \cong \frac{\xi bc(t) P/2}{\xi c(t) P/2} \cong b \quad (43)$$

A questo punto è possibile ricavare il coefficiente di ritorno andando a fare il rapporto tra i volumi in entrata ed uscita di tracciante, nel bacino per ogni ciclo di marea.

$$b = \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (44)$$

Per analizzarne meglio l'andamento del coefficiente di ritorno se ne plotta il comportamento relativo ad ogni bocca di porto e la sua somma, per ogni ciclo di marea e per ogni scenario simulato.

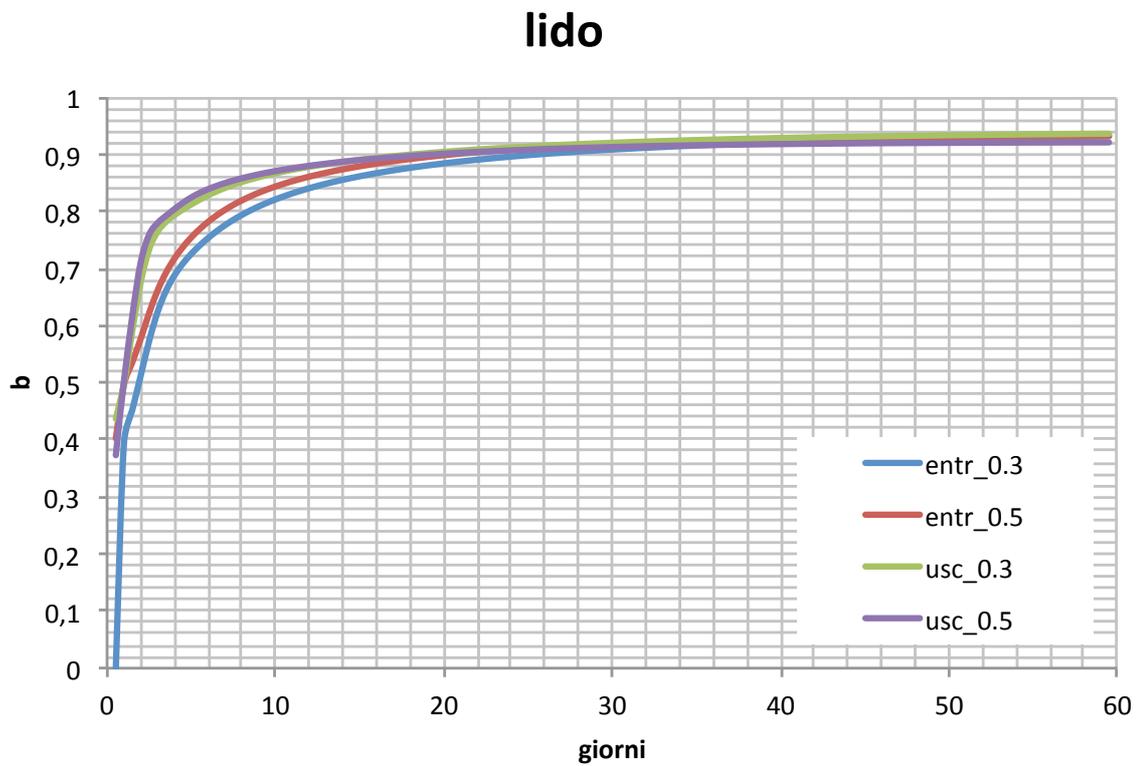


Grafico 2 Andamento del coefficiente di ritorno per la bocca di Lido

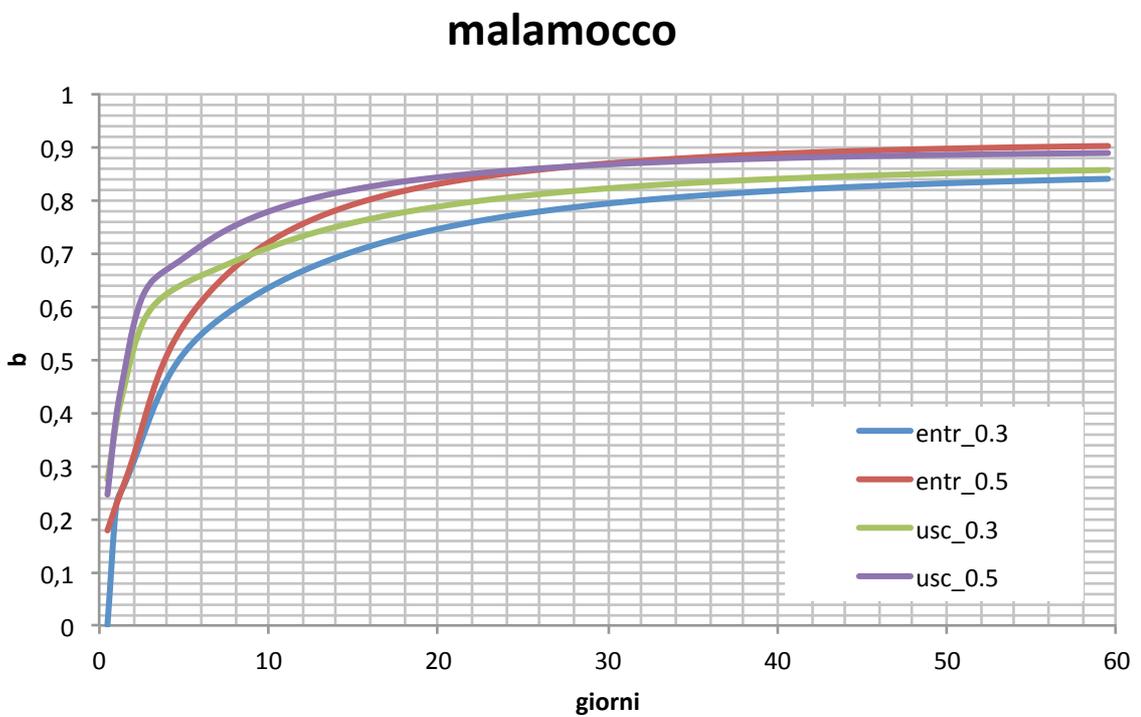


Grafico 3. Andamento coefficiente di ritorno per la bocca di Malamocco

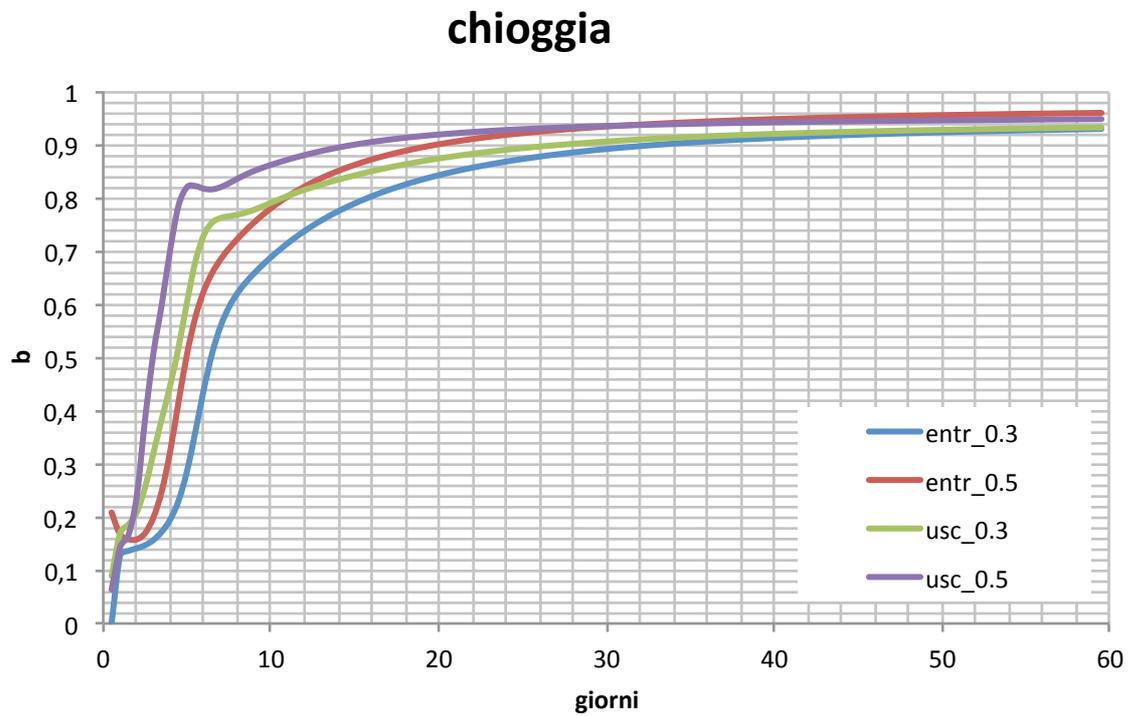


Grafico 3. Andamento del coefficiente di ritorno per la bocca di Chioggia

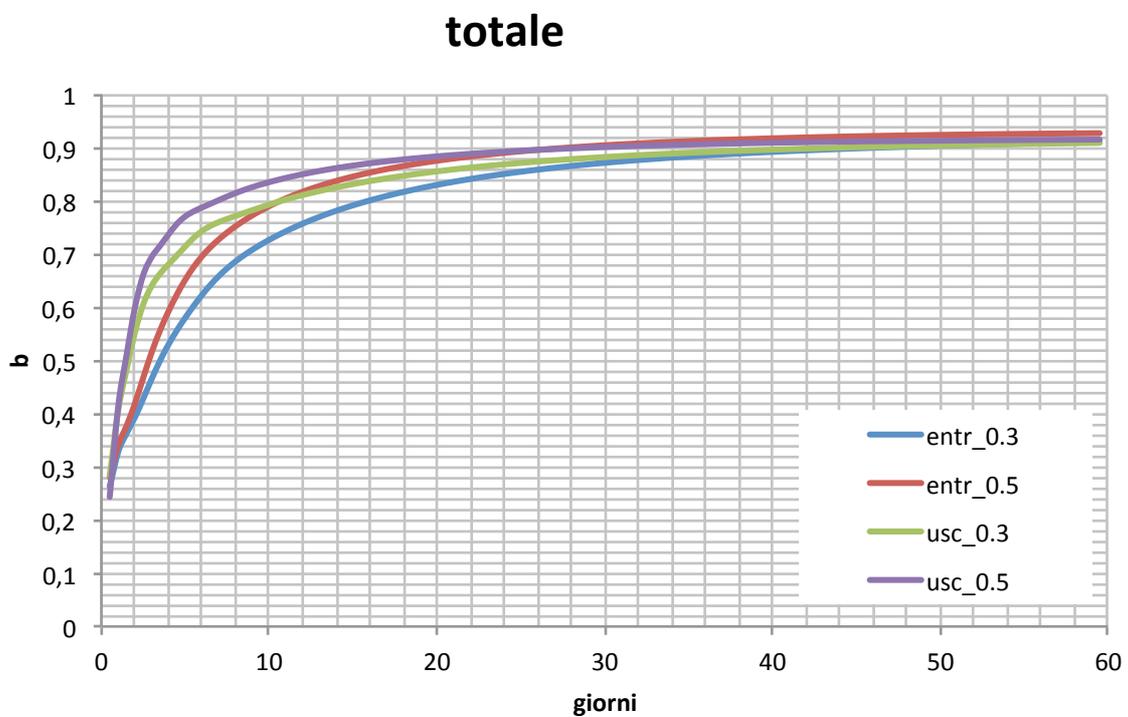


Grafico 5. Andamento del coefficiente di ritorno totale

7.2.2.1 Considerazioni sul coefficiente di ritorno

Andando ad analizzare i grafici proposti si vuole in prima analisi osservare il comportamento del coefficiente di ritorno per ogni bocca. Per le bocche di Lido e Malamocco si ha un andamento delle concentrazioni alle bocche molto simile, sia tra le bocche, sia variando idrodinamica iniziale e ampiezza di marea. Per quanto riguarda la bocca di Chioggia invece, si osservano delle anomalie: in particolare, le simulazioni uscenti portano ad un aumento del coefficiente di ritorno, rispetto alle simulazioni con marea inizialmente entrante. Questo fenomeno si può spiegare andando ad osservare la differente morfologia infatti, osservando la Figura 8 si nota che la bocca di Chioggia comunica con un area di laguna più ristretta, ed il canale che vi si dirama non è affusolato come quello della bocca di Lido e Malamocco. Questo comporta uno scambio leggermente più intenso con il mare, dovendo il prisma di marea compiere meno “strada”.

Se ora si sommano i flussi delle tre bocche e si procede a calcolare il coefficiente di ritorno complessivo, si ottiene un grafico che rispecchia fedelmente l’andamento che si osservava nei grafici riguardanti le singole bocche di Lido e di Malamocco. L’anomalia presentata dalla bocca di Chioggia non si percepisce, questo si spiega per il minor volume di soluto scambiato con il mare. Eseguendo successivamente il rapporto, se l’anomalia di Chioggia sparisce significa che il volume scambiato dalla bocca è molto inferiore alla somma dei volumi scambiati dalle altre due bocche.

Per quanto riguarda l’andamento del coefficiente di ritorno, come ci si aspetta varia dal valore minimo di zero al valore massimo sempre inferiore all’unità. Si ha un andamento crescente molto simile ad una curva esponenziale negativa. Infatti dopo una decina di giorni il coefficiente di ritorno si stabilizza su un valore di circa 0,9. A titolo esplicativo si riporta in **Errore. L’origine riferimento non è stata trovata.** l’andamento dei volumi di soluto che fuoriescono e rientrano alla bocca di Lido. Come si può notare inizialmente il volume che fuoriesce è nettamente maggiore del volume entrante e quindi il rapporto è piccolo (valori iniziali piccoli), mentre poi i valori dei volumi uscenti e rientranti quasi si eguagliano, producendo valori di b molto vicini all’unità. Questo perché dopo vari cicli di marea la concentrazione di soluto in laguna si è notevolmente abbassata, diventando piuttosto uniforme nell’intorno della bocca.

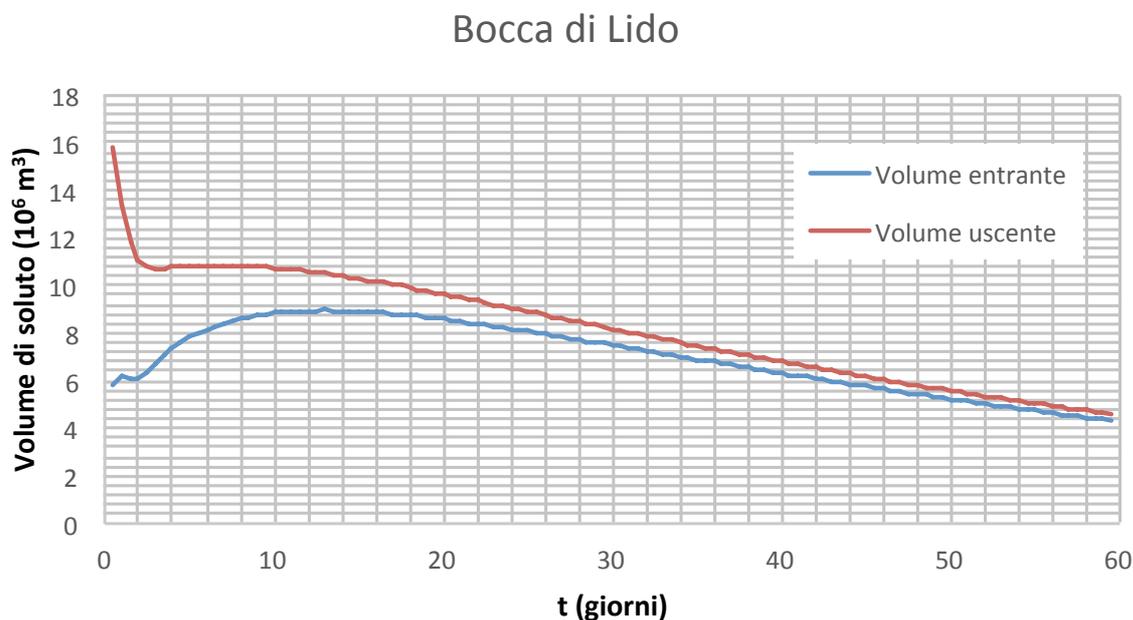


Grafico 6. Andamento dei volumi di soluto entranti ed uscenti dalla bocca di lido per una marea 0,3 entrante con concentrazione di soluto in mare variabile

In fine si osserva che all'aumentare dell'ampiezza di marea, il coefficiente di ritorno ha un incremento (rientra un volume maggiore di soluto), probabilmente come conseguenza del fatto che il volume del prisma di marea è maggiore. Dopo il ventesimo giorno invece si ha che il coefficiente di ritorno b , diventa indipendente dal prisma di marea che si considera. Questo si spiega sempre andando a visualizzare i volumi di soluto che transitano alle bocche che diminuiscono drasticamente.

7.2.3 L'efficienza di mescolamento

Il parametro introdotto nel modello a prisma di marea modificato, tiene conto della non uniforme distribuzione della concentrazione all'interno della laguna, come conseguenza del livello di mescolamento che si ha all'interno del bacino. Se ne vuole ora studiare il comportamento ricavandone i valori per ogni ciclo di marea, ottenuti dalle concentrazioni fornite dal modello idrodinamico. Il coefficiente di mescolamento, è calcolato come rapporto tra la concentrazione alle bocche durante la fase uscente e la concentrazione media nella laguna. La concentrazione media alla bocca (\bar{c}_b) per una singola fase uscente di marea, è pari a:

$$\bar{c}_b = \frac{V_{soluto}}{V_{h2o}} \quad (45)$$

dove V_{soluto} è il volume di soluto che fuoriesce per ogni ciclo di marea, e V_{h2o} è il volume d'acqua che fuoriesce, ad ogni ciclo di marea. Questi valori sono stati ricavati applicando una macro che calcola i volumi integrando rispettivamente le portate di soluto e le portate liquide. Allo stesso modo si può determinare una concentrazione mediata nello spazio (\bar{c}_{lag}) che a sua volta si determina facendo il rapporto tra il volume di soluto contenuto in laguna ed il volume d'acqua.

$$\bar{c}_{lag} = \frac{V_{soluto}}{V_{h2o}} \quad (46)$$

Il volume di soluto (V_{soluto}) ad ogni ciclo di marea si ricava dal file di output utilizzato anche per il calcolo del tempo di ricambio del capitolo 7.1 , mentre il volume di acqua (V_{h2o}) contenuto in laguna si ricava dall'idrodinamica.

Si può ricavare il valore dell'efficienza di mescolamento rapportando il \bar{c}_b che tiene conto della concentrazione in uscita ed il \bar{c}_{lag} che considera la concentrazione in laguna:

$$\xi = \frac{\bar{c}_b}{\bar{c}_{lag}} \quad (47)$$

È possibile plottare l'andamento del parametro che tiene conto dell'efficienza di mescolamento per i 60 giorni di durata della simulazione, per i vari scenari considerati.

marea uscente

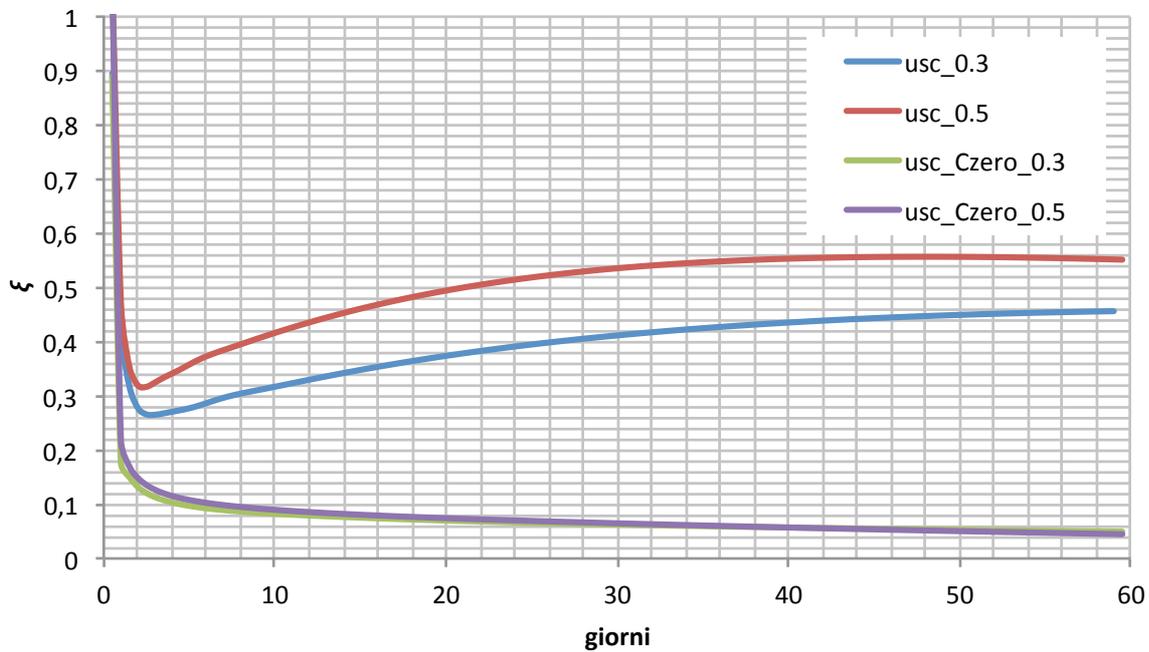


Grafico 7. Andamento dell'efficienza di mescolamento nel caso di marea inizialmente uscente

marea entrante

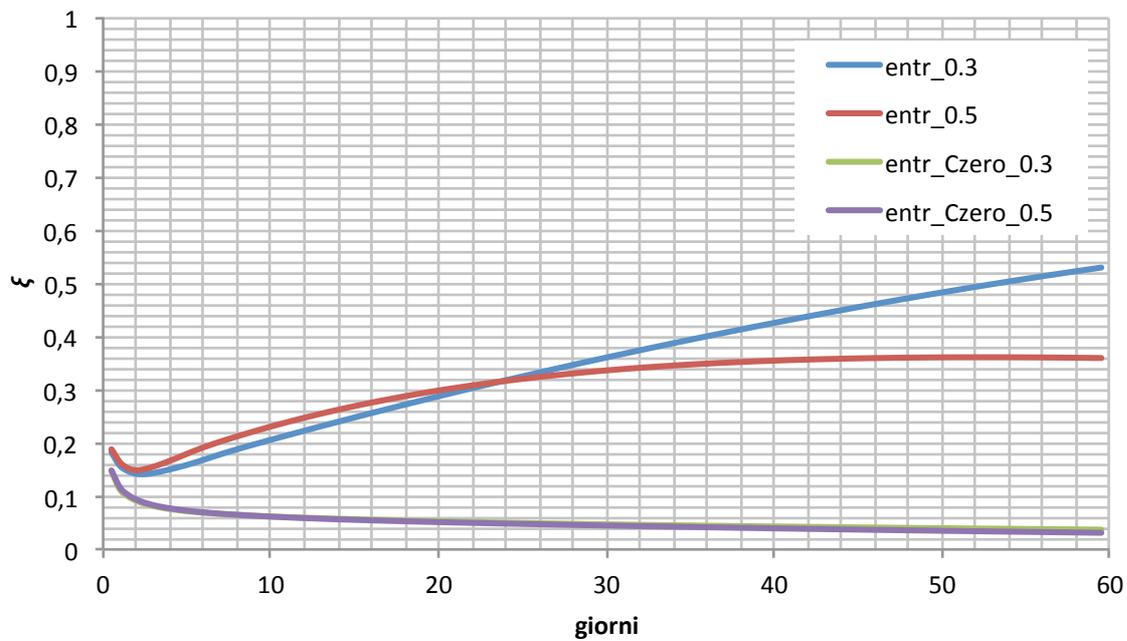


Grafico 8. Andamento dell'efficienza di mescolamento nel caso di marea inizialmente entrante

7.2.3.1 Considerazioni sull'efficienza di mescolamento

Andando ad analizzare l'andamento del coefficiente di mescolamento, si osserva che variando la fase iniziale della marea, le simulazioni eseguite ponendo la concentrazione in mare paria a zero (e , quindi, $b=0$) mostrano risultati analoghi. Si nota un andamento decrescente, che rimane tale anche variando il prisma di marea che viene scambiato con il mare. Di maggiore interesse è il comportamento al variare dell'idrodinamica e del prisma di marea con riferimento alle simulazioni in cui è ammesso il rientro di parte del soluto. La differenza che si ha nel considerare diverse fasi dell'idrodinamica iniziale comporta una variazione non indifferente nei valori dell'coefficiente di mescolamento. Questo si spiega andando ad osservare l'andamento delle concentrazioni con incidenze ad ogni ciclo di marea (capitolo 7.2.1).

Infatti con un idrodinamica inizialmente entrante, si ha l'entrata di un prisma di marea contenente "acqua pulita", invece con l'idrodinamica uscente, da subito esce dalla laguna un prisma di marea con un determinato contenuto di soluto, che rientrerà in parte al ciclo di marea successivo. Si ha quindi uno scenario completamente differente. Questo ci fa supporre che il coefficiente di mescolamento sia strettamente legato alla differenza di concentrazione tra l'acqua interna alla laguna e quella che rientra attraverso le bocche. Questo spiega anche la netta differenza di comportamento, nel caso in cui si scambiano con il mare sempre "acqua pulita".

Considerando l'idrodinamica inizialmente entrante, le curve che rappresentano l'andamento del coefficiente di mescolamento vengono quasi a sovrapporsi come accade per i casi in cui la concentrazione in mare sia mantenuta pari a zero. È quindi ragionevole supporre che questo parametro sia indipendente dall'ampiezza di marea, e quindi dal volume che viene scambiato con il mare ad ogni ciclo di marea.

Per quanto riguarda invece il caso con idrodinamica inizialmente uscente, i valori dell'efficienza di mescolamento per il caso con concentrazione di soluto in mare variabile, presentano un andamento simile, pur assumendo valori differenti. In particolare nel caso con ampiezza di marea maggiore, si hanno valori maggiori del coefficiente di mescolamento. Come visto nel paragrafo precedente il coefficiente di rientro aumenta all'aumentare del volume del prisma di marea scambiato. È quindi ragionevole il comportamento descritto dalle curve, ma in contrapposizione con quello che si osserva nel caso con idrodinamica inizialmente entrante.

Questo rende l'efficienza di mescolamento un parametro difficile da stimare, che necessita di ulteriori indagini per definirne il comportamento. L'unica considerazione che si può avanzare, è che l'efficienza di mescolamento sembrerebbe insita nelle caratteristiche della laguna. L'efficienza di mescolamento è minore con la concentrazione in mare posta a zero, perché rientrando sempre acqua "pulita" la concentrazione di bocca è sempre inferiore alla concentrazione in laguna. Mentre nel caso in cui vi possa rientrare del soluto, l'efficienza aumenta, con andamenti differenti a seconda dei casi, ma aumenta, questo perché rientrando del soluto, la differenza tra la concentrazione media in laguna e la concentrazione alla bocca è piccola. Questa affermazione potrebbe non trovare riscontro se vi fosse una notevole differenza tra i tempi di ricambio delle diverse simulazioni, e quindi si sarebbe portati a dire che a seconda della concentrazione di soluto la laguna si mescoli più efficientemente o meno. Invece i tempi di ricambio sono simili, e dunque possiamo affermare che l'efficienza di mescolamento è indipendente dalla concentrazione in laguna, ma propria delle caratteristiche morfologiche e delle correnti interne.

7.2.4 Il parametro r

Andando a graficare i valori di ξ e b ricavati con il modello idrodinamico si possono notare gli andamenti dei singoli parametri, ma si possono trarre delle osservazioni più interessanti unendoli. Si studia quindi il comportamento di un nuovo parametro r :

$$r = \xi(1 - b) \quad (48)$$

Questo nuovo parametro raggruppa semplicemente i coefficienti oggetto del nostro studio come li ritroviamo nella formulazione del modello a prisma di marea modificato:

$$T_e = \frac{V_0 T}{\xi(1 - b)P} \quad (49)$$

Nei grafici (9) e (10) si espone l'andamento di r per le simulazioni effettuate.

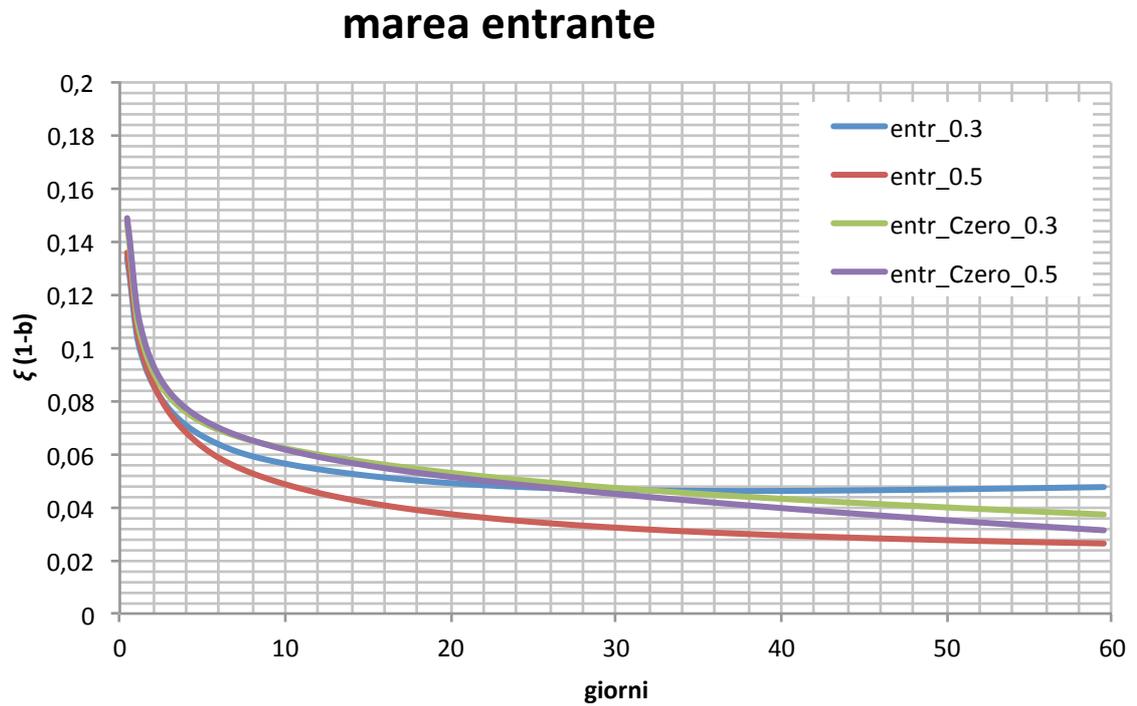


Grafico 9. Andamento del parametro r nel caso di marea inizialmente uscente

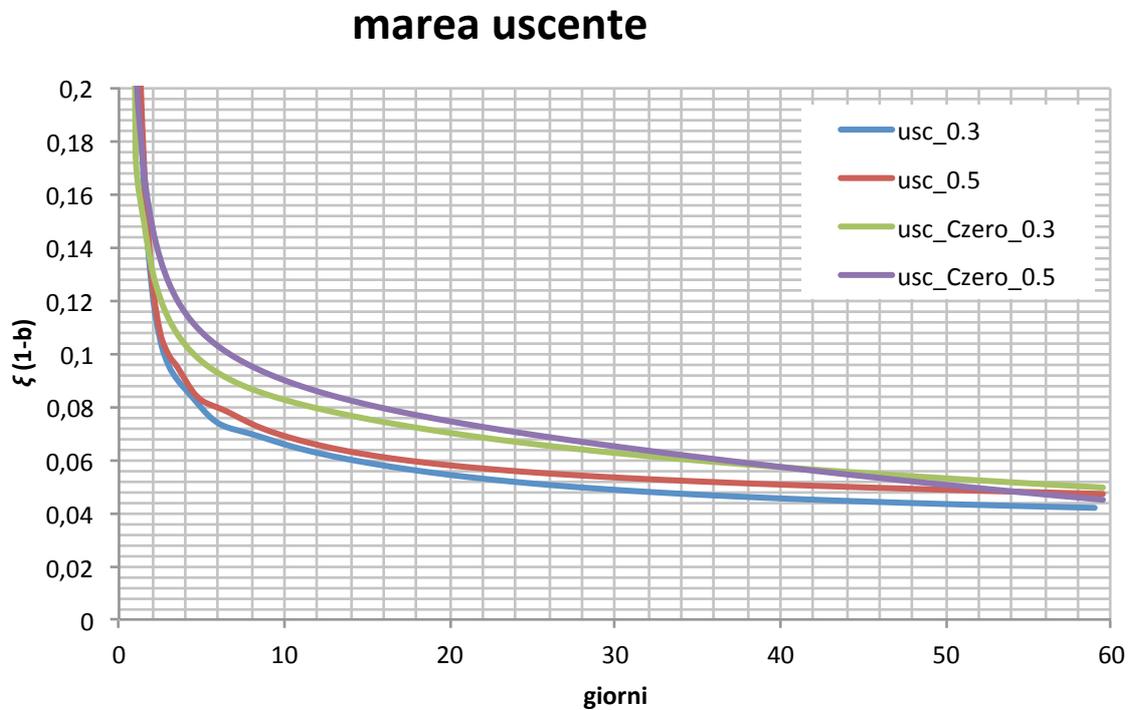


Grafico 10. Andamento del parametro r nel caso di marea inizialmente entrante

7.2.4.1 Considerazioni sul parametro r

Il parametro r è stato introdotto al fine di osservare il comportamento dei due parametri, il coefficiente di mescolamento e di ritorno, introdotti nel modello basato sul prisma di mare modificato. Nei grafici proposti, in prima analisi si nota un andamento molto simile tra le varie simulazioni, sia nel caso di marea entrante che nel caso di marea uscente. Si può allora affermare che la fase iniziale non va ad influenzare l'andamento complessivo del parametro r .

Di maggiore interesse è invece l'andamento del parametro r , molto simile sia nel caso di concentrazione in mare variabile, sia posta pari a zero. Questo particolare andamento porta a delle considerazioni molto interessanti al variare delle condizioni in mare,

Queste curve presentano andamenti simili e valori leggermente differenti dal caso in cui la concentrazioni in mare sia variabile o posta nulla. Questo è dovuto al fatto che nel caso di concentrazione in mare nulla, il mare scambia "acqua pulita" e quindi l'efficienza di miscelazione diminuisce drasticamente, essendo la concentrazione alla bocca crollata a causa del continuo scambio con il mare di acqua pulita, quindi ci si aspetta che la curva sia più bassa. Nel caso in cui la concentrazione in mare sia variabile, continua a rientrare del soluto ad ogni ciclo di marea, quindi il coefficiente di mescolamento è alto essendo il gap tra la concentrazione alla bocca e media della laguna piccolo, per cui la curva in questione si pone leggermente al di sopra della simulazione con concentrazione in mare pari a zero.

7.3 Calcolo del tempo di ricambio

Partendo sempre dagli output del modello idrodinamico nel caso si voglia calcolare il tempo di ricambio, occorre considerare la concentrazione media all'interno del bacino ad ogni ciclo di marea. A questo scopo è stato fornito dal dipartimento ICEA un programma "concentrazioneintermareale.exe", il quale restituisce un file .out che con passo temporale pari a 0,5 giorni (ciclo di marea) fornisce l'andamento nel tempo della concentrazione locale. Si uniscono i file .out ricavati, in modo tale da avere un unico file .out con i dati riguardanti l'andamento delle concentrazioni per 60 giorni.

Successivamente un altro programma restituisce un file che caricato in Incidenze insieme al appropriato geo, permette di visualizzare la distribuzione spaziale dei livelli, di visualizzare la mappa con i tempi di ricambio espressi in giorni.

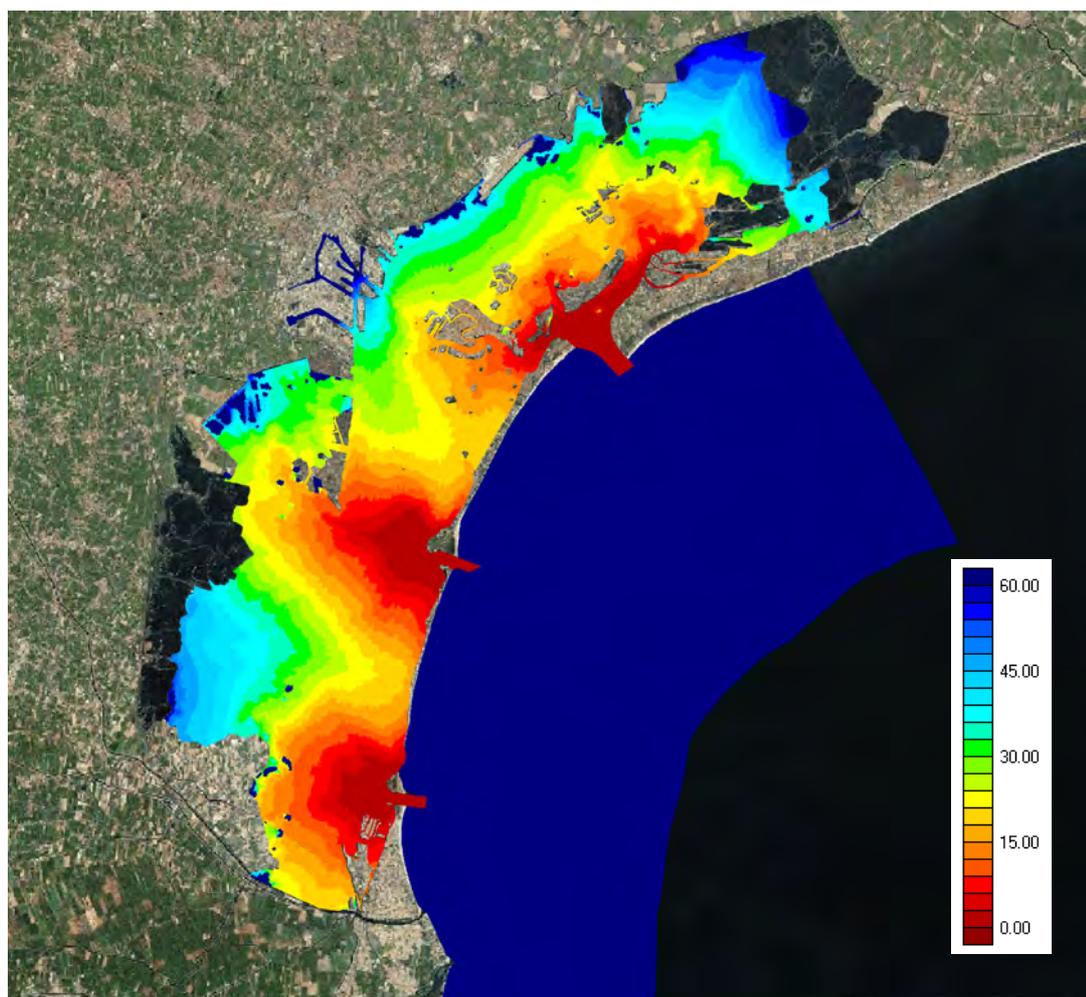


Figura 20 Distribuzione spaziale del tempo di ricambio per una marea inizialmente entrante, con ampiezza pari a 0,3 m (scala in giorni)

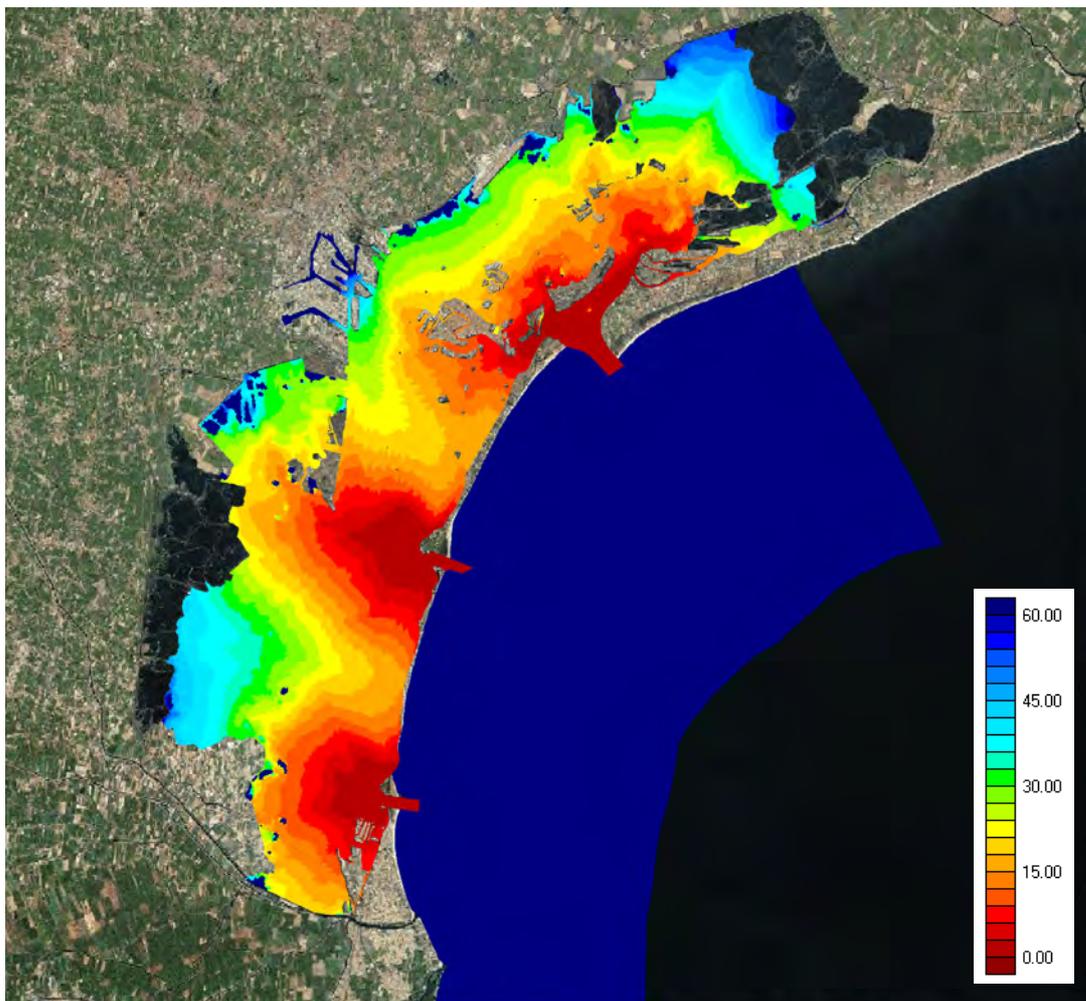


Figura 21 Distribuzione spaziale del tempo di ricambio per una marea inizialmente entrante, con "return flow factor" posto pari a 0 e un ampiezza di marea di 0,3 m (scala in giorni)

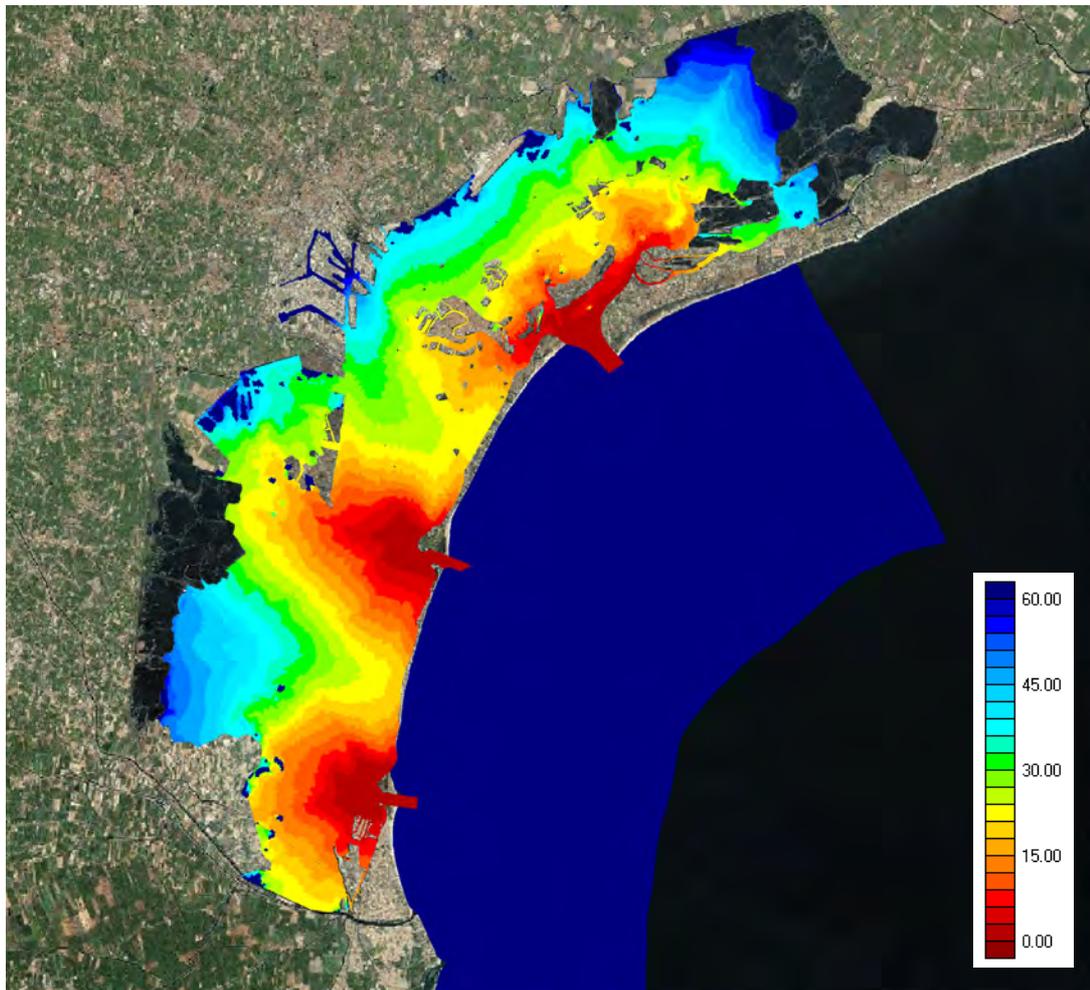


Figura 22 Distribuzione spaziale del tempo di ricambio per una marea inizialmente uscente, con ampiezza di marea pari a 0,3 m (scala in giorni)

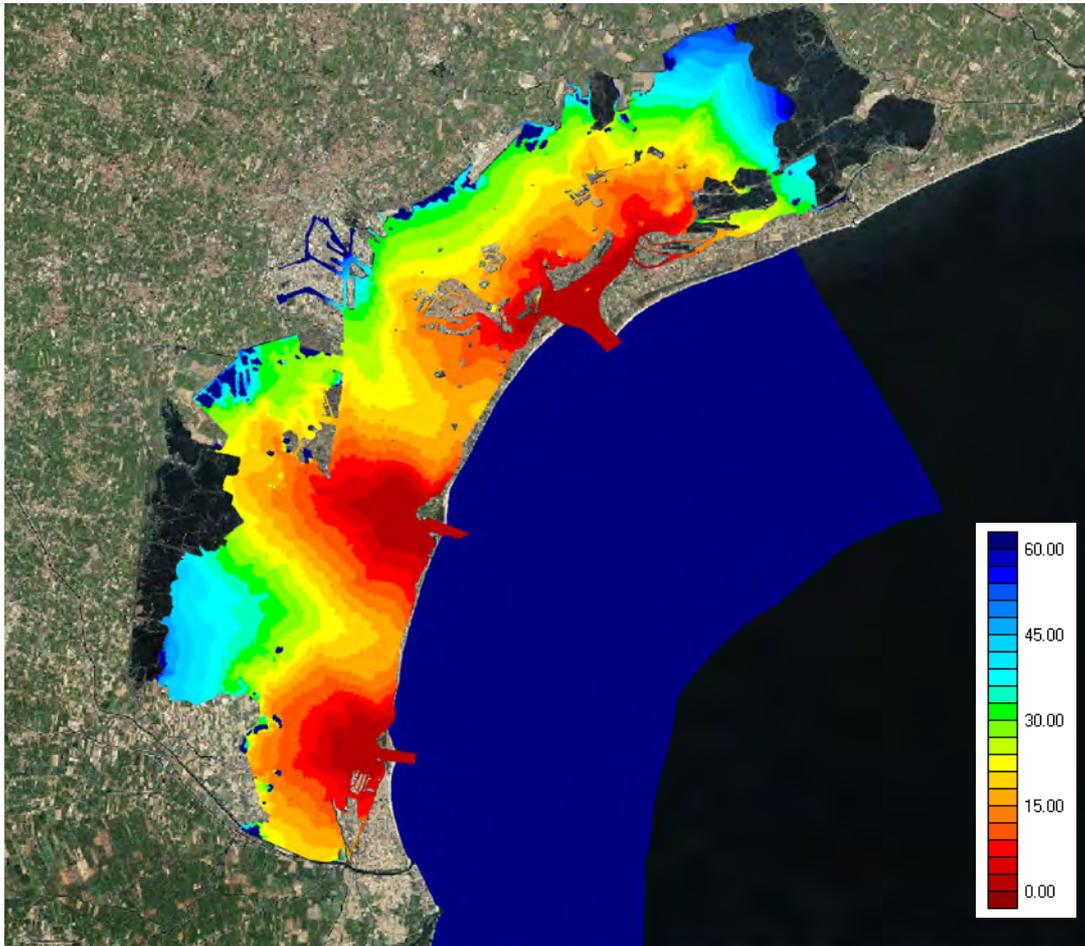


Figura 23 Distribuzione spaziale del tempo di ricambio per una marea inizialmente uscente, con "return flow factor" pari a 0 e ampiezza di marea posto a 0,3 m (scala in giorni)

7.3.1 Considerazioni sul tempo di ricambio

Conoscere la distribuzione spaziale del tempo di ricambio richiede un grande onere computazionale, ma allo stesso tempo svela le dinamiche diffusive che si hanno all'interno della laguna. Ci si sofferma ad analizzare il caso con semi ampiezza di marea pari a 0.3 m. In prima approssimazione osservando le figure 20 e 21, si nota una somiglianza, con le figure 22 e 23, dovuta al fatto che i due gruppi di simulazioni si diversificano solo per la fase iniziale della marea. Infatti, mentre nello studio dell'andamento dei vari parametri effettuato in precedenza, si evidenziavano notevoli differenze di comportamento dovute all'idrodinamica iniziale, in queste rappresentazioni, nelle quali si considera solamente la distribuzione del tempo di ricambio, le differenze vengono annullate.

Come è logico aspettarsi, si hanno dei tempi minori di ricambio quando la concentrazione in mare è mantenuta pari a zero. Questo comporta ad ogni ciclo di marea uno scambio con il mare di volumi di "acqua pulita" velocizzando il decadimento della concentrazione in laguna.

Altra considerazione degna di nota riguarda l'apparente divisione della laguna di Venezia in tre sottobacini. Effettivamente osservando le figure 20,21,22,23 si nota una netta suddivisione, infatti ogni bocca scambia acqua con una determinata area di laguna, senza avere importanti interazioni con le bocche limitrofe. Questo fenomeno si può spiegare ragionando sui tempi scala, e quindi sul periodo (T) della marea che interessa la laguna di Venezia. Infatti ogni 12 ore si presenta una marea entrante, che sei ore dopo inizierà la fase di reflusso, quindi in questo tempo la marea non ha abbastanza tempo per insinuarsi sino alle aree di influenza delle altre bocche. Altra argomentazione a sostegno di questa tesi nasce osservando la Figura 8 del capitolo 6.2 dove si vede chiaramente la distribuzione delle quote del fondo. Si nota che dalle bocche si diramano all'interno della laguna dei canali molto profondi, mentre le quote del fondo nelle zone circostanti a quest'ultimi sono notevolmente inferiori.. Questo fa in modo che si abbia una netta divisione della laguna, e anche una buona intrusione del prisma di marea, migliorando il mescolamento tra le acque presenti in laguna e le acque marine. Tutto questo produce ovviamente una riduzione del tempo di ricambio.

Nel capitolo successivo si andranno a confrontare questi valori ottenuti con il modello idrodinamico, con i valori ottenuti con l'applicazione dei modelli basati sul prisma di marea.

8 Comparazione tra i modelli

Si vuole a questo punto, utilizzando i dati raccolti dalle simulazioni eseguite con il modello idrodinamico, andare a stimare i valori di efficienza di mescolamento e coefficiente di ritorno utilizzando le basi teoriche proprie dei modelli basati sul prisma di marea, per poi farne un confronto.

Alle simulazioni fino ad ora utilizzate, si aggiungono due simulazioni eseguite per marea entrante ed uscente, per le due ampiezze di marea considerate in precedenza, ma variandone la fase iniziale.

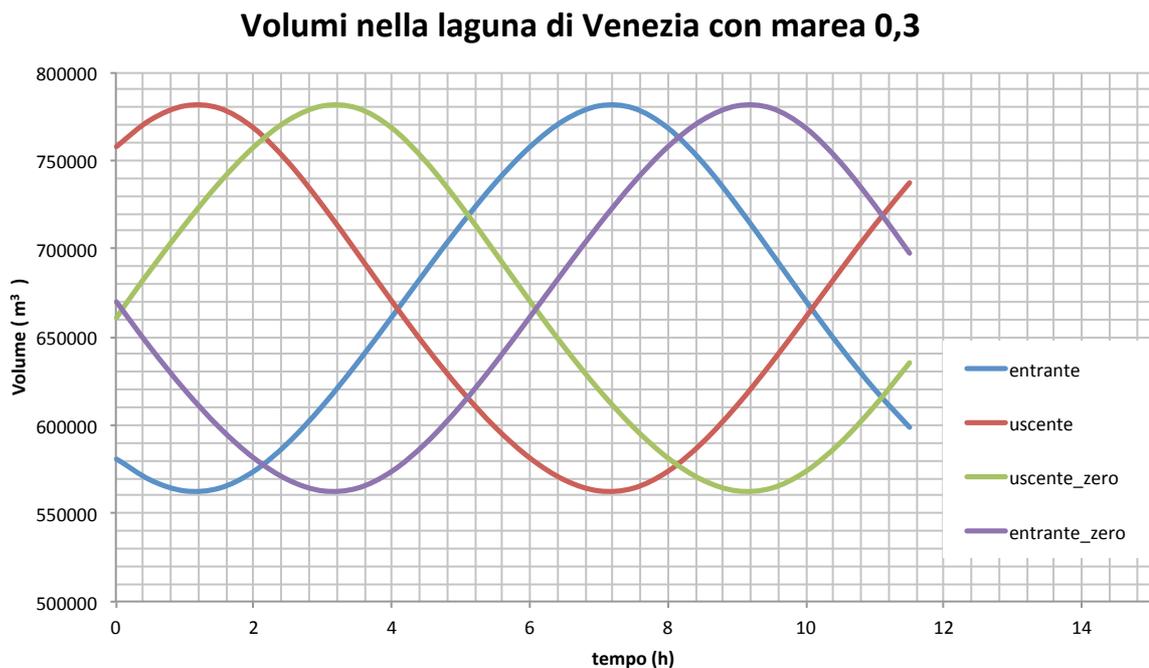


Grafico 11. Andamento sinusoidale dei volumi all'interno della laguna di Venezia

Come già visto nel capitolo 7.2.1, la fase iniziale dell'idrodinamica che si adotta nelle simulazioni provoca effetti differenti.

Attraverso il modello idrodinamico si ricavano i volumi di soluto all'interno della laguna per i vari scenari. Successivamente questi vengono processati attraverso una macro appositamente costruita per avere come output, il tempo di ricambio con il

coefficiente di ritorno pari a zero (ci riferiamo in questo caso a RT) ed il tempo di ricambio considerando invece il coefficiente di ritorno (ET). I risultati ottenuti esprimono il tempo di ricambio in giorni:

Marea 0,3

	entr	entr_zero	usc	usc_zero	media
RT	17,66	16,62	12,40	13,13	14,95
ET	21,50	20,38	16,40	17,11	18,81

Marea 0,5

	entr	entr_zero	usc	usc_zero	media
RT	9,66	9,39	12,40	5,75	7,67
ET	11,51	11,36	7,28	7,64	9,45

Questi tempi di ricambio derivanti dall'elaborazione dei dati forniti dal modello idrodinamico, esprimono i giorni necessari al ricambio dell'acqua nella laguna, per i vari scenari scelti.

Nei seguenti sotto capitoli si utilizzano i tempi di ricambio riportati nella precedente tabella, al fine di ricavare il coefficiente di ritorno e l'efficienza di mescolamento. Successivamente con i dati trovati si calcola nuovamente il tempo di ricambio per i differenti scenari. Si potrà così osservare se i modelli basati sul prisma di marea introdotti nel capitolo (5) riescano a modellare in maniera discreta il fenomeno in studio.

8.1 Caratteristiche della laguna

Al fine di poter applicare i modelli basati sul prisma di marea, è necessario il calcolo dei vari dati necessari. Si esporranno di seguito i valori scelti per T, V e P.

Il periodo T è posto costante e pari a 12 ore ed il prisma di marea P è noto dall'idrodinamica. Per quanto riguarda il volume d'acqua contenuto in laguna, lo si può ricavare dal .geo utilizzando incidenze. Si riferisce il volume della laguna al momento

iniziale della simulazione ($t=0$), oppure alla quota di medio mare ($h=0$). Avrò quindi un valore del volume di marea che non dipende dalla simulazione ($V_{h=0}$) ma solo dalla geometria che rimane sempre invariata, ed un valore diverso per ogni simulazione ($V_{t=0}$) essendo calcolato partendo dall'idrodinamica. Nella tabella seguente vengono esposti i valori (m^3) trovati:

Volume (m^3) in laguna di Venezia per una marea 0,3

	entr	entr_zero	usc	usc_zero	media
$V_{t=0}$	5,81E+08	6,70E+08	7,67E+08	6,61E+08	6,81E+08
$V_{h=0}$	6,67E+08	6,67E+08	6,67E+08	6,67E+08	6,67E+08

Volume (m^3) in laguna di Venezia per una marea 0,5

	entr	entr_zero	usc	usc_zero	media
$V_{t=0}$	5,72E+08	5,95E+08	8,00E+08	5,73E+08	6,86E+08
$V_{h=0}$	6,67E+08	6,67E+08	6,67E+08	6,67E+08	6,67E+08

Per quanto riguarda il prisma di marea invece si ha un valore per marea a 0,3 m ed uno per l'evento di marea a 0,5 m. Si ritrovano i seguenti volumi (m^3):

(P) prisma di marea (m^3)

H di marea	entr	entr_zero	usc	usc_zero	media
0,3	2,22E+08	2,22E+08	2,22E+08	2,22E+08	2,22E+08
0,5	3,23E+08	3,23E+08	3,23E+08	3,23E+08	3,23E+08

Si procede di seguito con l'applicazione ai modelli.

8.2 Applicazione al modello basato sul prisma di marea

Prendendo in considerazione il modello basato sul prisma di marea (Sanford et al., 1992), il tempo di ricambio per un piccolo bacino ben miscelato si calcola come:

$$T_r = \frac{V T}{(1 - b)P} \quad (50)$$

Partendo da questa equazione possiamo ricavare il valore del coefficiente di ritorno (b), scrivendo RT, il tempo di ricambio considerando nullo il coefficiente di diffusione e ET, il tempo di ricambio considerandolo.

$$RT = \frac{V T}{P} \quad (51)$$

$$ET = \frac{V T}{(1 - b)P} \quad (52)$$

Si ricava agevolmente:

$$b = \frac{ET - RT}{ET} \quad (53)$$

Per ogni simulazione eseguita:

(b) coefficiente di ritorno

H di marea	entr	entr_zero	usc	usc_zero	media
0,3	0,18	0,18	0,24	0,23	0,21
0,5	0,16	0,17	0,21	0,23	0,19

Si procede ora al calcolo dei tempi di ricambio, applicando la formulazione proposta da Sanford (equazione 21) per i modelli basati sul prisma di marea.

Tempo di ricambio in laguna (giorni) con marea 0,3

	entr	entr_zero	usc	usc_zero	media
$V_{t=0}$	1,64	1,74	2,27	2,16	1,93
$V_{h=0}$	1,83	1,84	1,97	1,96	1,89

Tempo di ricambio in laguna (giorni) con marea 0,5

	entr	entr_zero	usc	usc_zero	media
$V_{t=0}$	1,05	1,11	1,57	1,56	1,31
$V_{h=0}$	1,23	1,25	1,31	1,34	1,27

Si nota subito che i tempi di ricambio calcolati sono diversi di circa un ordine di grandezza, rispetto a quelli ottenuti con il modello idrodinamico. Il perché è insito nelle ipotesi che stanno alla base del modello. Come detto nel capitolo 5.1, i modelli basati sul prisma di marea ben si applicano a bacini di piccole dimensioni ed ipotizzando un perfetto mescolamento. I tempi forniti dal modello idrodinamico invece essendo simulazioni numeriche, rappresentano in modo abbastanza fedele la realtà, dunque in prima analisi si può dire che la discrepanza di risultati è data da un'assunzione errata che fa il modello, il perfetto mescolamento.

8.3 Applicazione al modello basato sul prisma di marea migliorato

Nel sotto capitolo 5.2 si è introdotto il modello basato sul prisma di marea modificato, dove non si va più a supporre il perfetto mescolamento del bacino, ma si introduce un parametro che ne computa l'andamento (ξ) arrivando infine a:

$$T_r = \frac{V T}{\xi(1 - b)P} \quad (54)$$

Questi tempi sono stati calcolati utilizzando i dati forniti dalle simulazioni del modello idrodinamico, si possono anche scrivere utilizzando l'equazione (54) propria del modello basato sul prisma di marea modificato.

$$RT = \frac{V T}{\xi_0 P} \quad (55)$$

$$ET = \frac{V T}{\xi(1 - b)P} \quad (56)$$

Con i valori ottenuti dal modello numerico, utilizzando le equazioni (55) e (56) si possono ricavare i valori del coefficiente di diffusione (b) e l'efficienza di miscelazione (ξ).

Esplicitando l'efficienza di mescolamento dall'equazione (54) si ha:

$$\xi_0 = \frac{V T}{RT P} \quad (57)$$

(ξ_0) Efficienza di mescolamento per marea 0,3

	entr	entr_zero	usc	usc_zero	media
$V_{t=0}$	0,08	0,09	0,14	0,13	0,1
$V_{h=0}$	0,09	0,09	0,12	0,11	0,1

(ξ_0) Efficienza di mescolamento per marea 0,5

	entr	entr_zero	usc	usc_zero	media
$V_{t=0}$	0,09	0,10	0,22	0,20	0,14
$V_{h=0}$	0,11	0,11	0,18	0,18	0,13

Si calcolano ora i valori del parametro (r) introdotto al capitolo 7.2.4. Partendo dalle equazioni (55) (56) si può scrivere facendone il rapporto:

$$\frac{RT}{ET} = \frac{(VT) \cdot \xi(1-b)P}{(\xi_0 P) \cdot (VT)} = \frac{\xi(1-b)}{\xi_0} \quad (58)$$

$$\xi(1-b) = \frac{RT}{ET} \xi_0 = r \quad (59)$$

Si hanno tutti i dati per ricavare il parametro r:

$(\xi(1-b))$ parametro r per marea 0,3

	entr	entr_zero	usc	usc_zero	media
$V_{t=0}$	0,06	0,07	0,11	0,10	0,08
$V_{h=0}$	0,07	0,07	0,09	0,09	0,08

$(\xi(1-b))$ parametro r per marea 0,5

	entr	entr_zero	usc	Usc_zero	Media
$V_{t=0}$	0,08	0,08	0,17	0,16	0,11
$V_{h=0}$	0,09	0,09	0,14	0,14	0,11

Si possono quindi calcolare i tempi di ricambio applicando il modello basato sul prisma di marea migliorato:

Tempo di ricambio in laguna (giorni) con marea 0,3

	entr	entr_zero	usc	usc_zero	media
$V_{t=0}$	21,50	20,38	16,40	17,11	18,81
$V_{h=0}$	21,50	20,38	16,40	17,11	18,81

Tempo di ricambio in laguna (giorni) con marea 0,5

	entr	entr_zero	usc	usc_zero	media
$V_{t=0}$	11,51	11,36	7,28	7,64	9,45
$V_{h=0}$	11,51	11,36	7,28	7,64	9,45

Si ritrovano gli stessi identici tempi avendo utilizzato i dati ricavati dai tempi di partenza.

8.4 Comparazione tra modello idrodinamico e modello basato sul prisma di marea modificato

Come appena visto, il modello basato sul prisma di marea modificato, si adatta in maniera efficiente ai risultati del modello idrodinamico, avendo una componente che tiene conto del non perfetto mescolamento all'interno della laguna. È quindi difficoltoso determinare un valore rappresentativo dell'efficienza di mescolamento.

Si rappresentano quindi i valori del coefficiente di mescolamento forniti dall'analisi del modello idrodinamico ed i valori trovati nel sotto-capitolo precedente.

Per quanto riguarda i valori del coefficiente di mescolamento (ξ) si possono andare a graficare solamente i casi in cui il coefficiente di ritorno è nullo. In questo modo, essendo noto b e pari a zero, è agevole ricavare un valore di (ξ) invertendo la formula del modello basato sul prisma di marea modificato. Osservando i grafici, si nota che il valore del coefficiente di mescolamento medio non è rappresentativo del campione.

marea 0,3 entrante

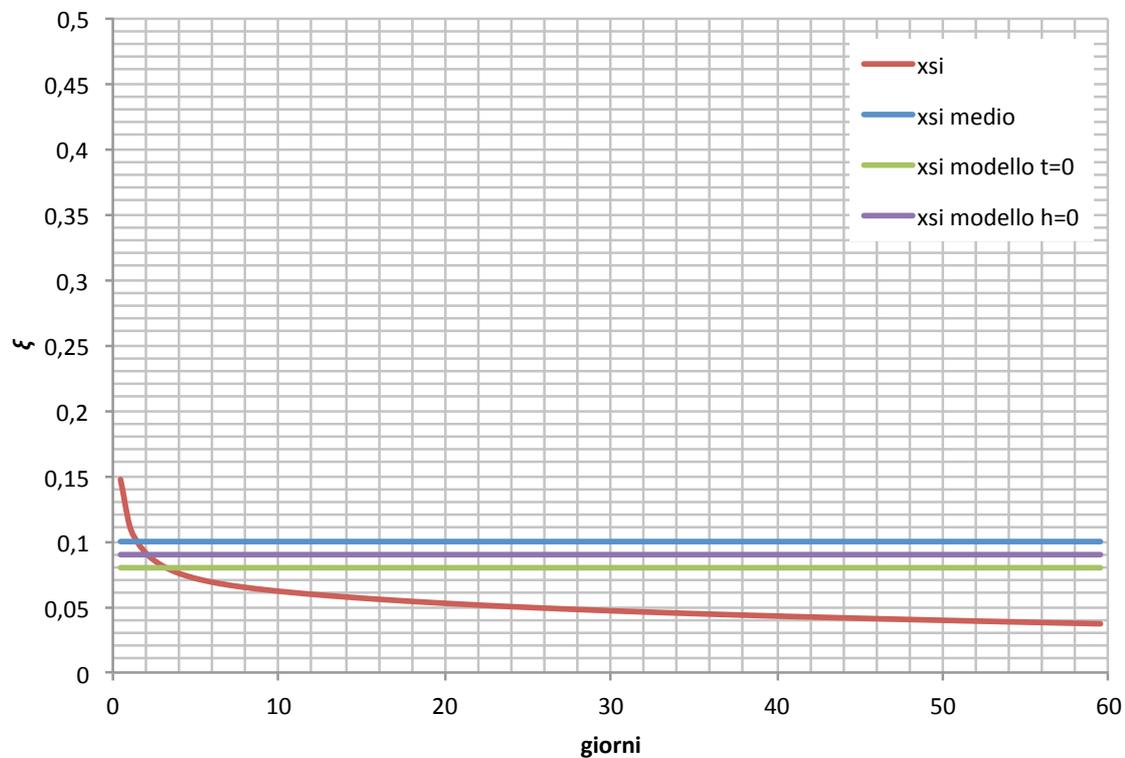


Grafico 12. Andamento dell'efficienza di mescolamento e valori medi calcolati a confronto per una marea 0,3 entrante

Marea 0,3 uscente

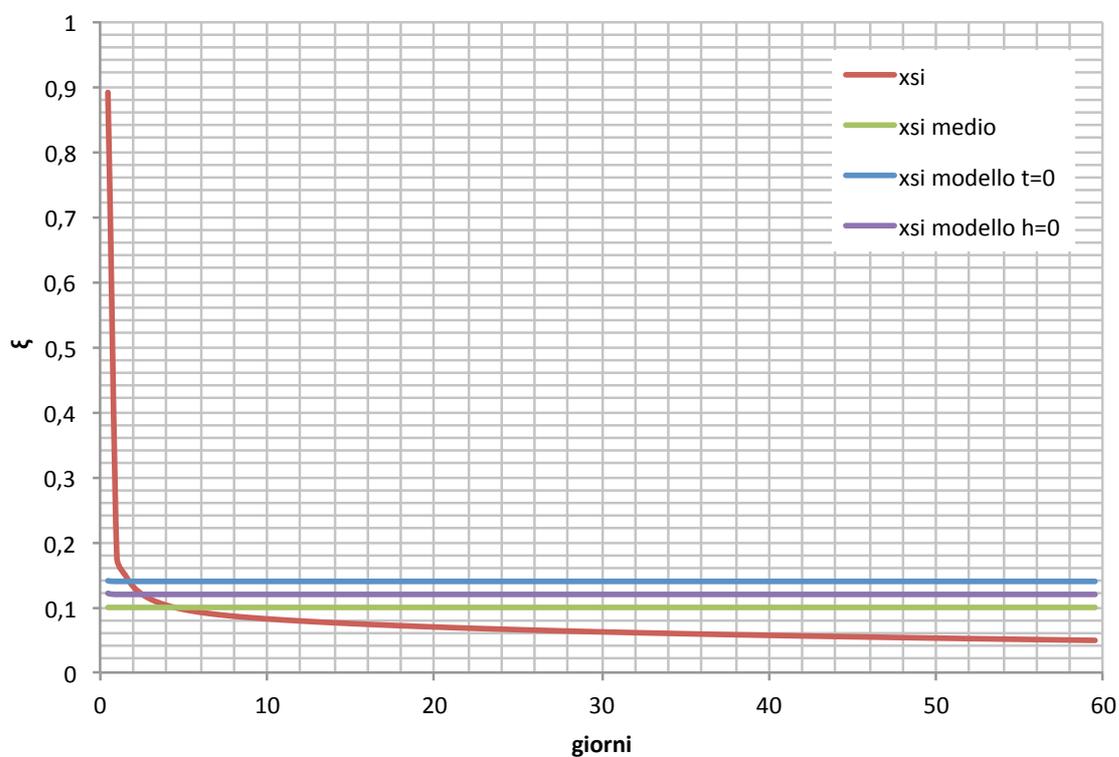


Grafico 13. Andamento dell'efficienza di mescolamento e valori medi calcolati a confronto per una marea 0,3 uscente

8.5 Comparazioni sul coefficiente di ritorno

In questo lavoro si sono espone le differenti modalità di valutazione del coefficiente di ritorno. Si vuole ora, osservare i differenti risultati che si ottengono applicando l'analisi alla laguna di Venezia.

Seguendo la trattazione proposta da Sanford, esposta nel capitolo 5.1.1, si è arrivati a definire per la laguna di Venezia un coefficiente di ritorno pari a 0,9.

Seguendo l'approccio del modello idrodinamico, invece come esposto nel capitolo 7.2.2 si è ricavato l'andamento di b per ogni ciclo di marea.

Si vuole ora calcolare un valore medio di b , ma che tenga conto dei volumi di soluto che attraversano la bocca, dunque non un semplice rapporto, come fatto per la determinazione di b , ma utilizzando una media pesata.

Coefficiente di ritorno (b)

	entr 0,3	entr 0,5	usc 0,3	usc 0,5
b_{pesato}	0,78	0,79	0,78	0,83

Si vanno quindi a rappresentare i valori ottenuti per i casi di marea 0,3 entrante ed uscente.

Coefficiente di ritorno marea 0,3 uscente

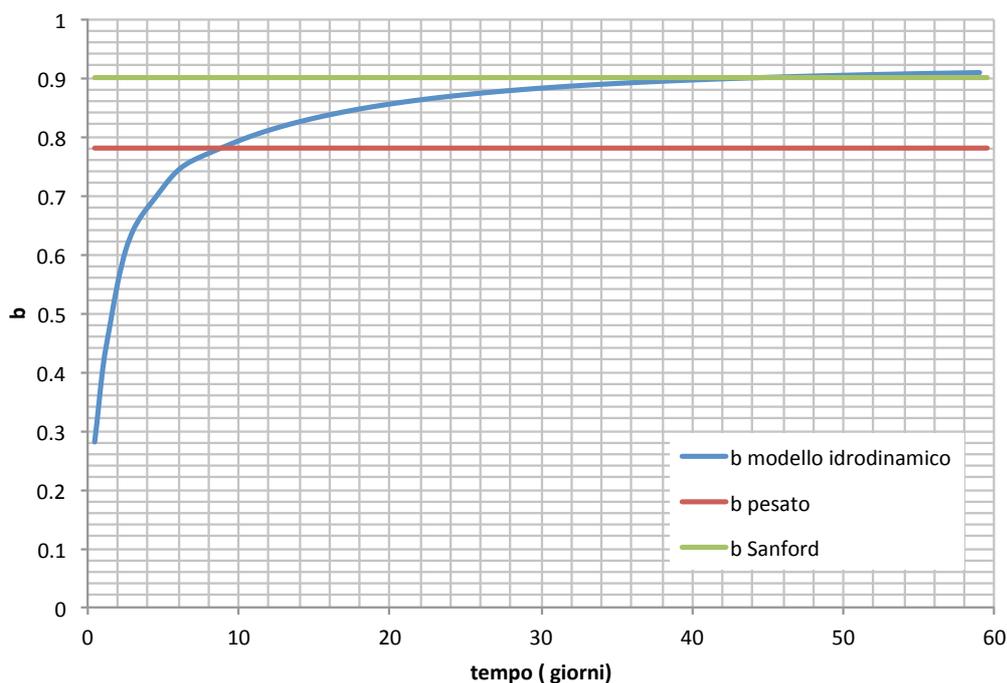


Grafico 14. Andamento del coefficiente di ritorno e valori medi calcolati a confronto per una marea 0,3 uscente

Coefficiente di ritorno marea 0,3 entrante

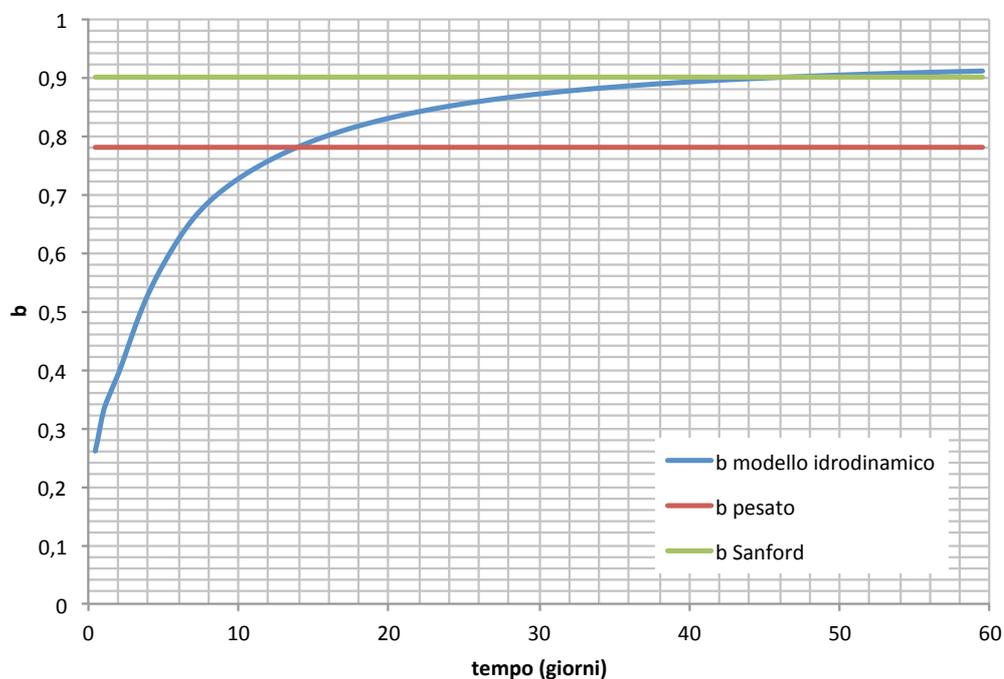


Grafico 15. Andamento del coefficiente di ritorno e valori medi calcolati a confronto per una marea 0,3 entrante

Si osserva immediatamente che il valore di Sanford del coefficiente di ritorno non rappresenta per niente l'andamento reale di questo coefficiente, cosa che invece si riesce a fare utilizzando una media pesata dei valori del coefficiente di ritorno.

Con questi due valori del coefficiente di ritorno si calcolano i tempi di ricambio utilizzando il modello basato sul prisma di marea di Sanford, applicato alla laguna di Venezia.

Tempi di ricambio (giorni)

	entr 0,3	entr 0.5	usc 0.3	usc 0,5
$b_{sanford}$	13,46	8,86	17,31	12,39
b_{pesato}	6,12	4,03	7,87	7,29
modello idrodinamico	21,50	11,51	16,24	7,28

Andando ad osservare i risultati ottenuti con il modello basato sul prisma di marea di Sanford si nota una differenza con i tempi di ricambio forniti dal modello idrodinamico. Questo è dovuto al fatto che il modello di Sanford ipotizza un perfetto mescolamento all'interno del bacino, cosa che invece non avviene. Anche il coefficiente di ritorno calcolato con il metodo proposto da Sanford, si basa su ipotesi errate, infatti, si ha un coefficiente di ritorno pari a 0,9, quindi significa che del soluto che viene scambiato con il mare la quasi totalità rientra. Cosa che non si verifica nella realtà riprodotta dal modello idrodinamico.

Anche i risultati ottenuti con il coefficiente di ritorno pesato sono errati,. Questo perché sono stati utilizzati in un modello, che non può essere applicato ad un bacino come quello della laguna di Venezia.

9 Conclusioni

Nel presente lavoro si sono presi in considerazione due differenti tipologie di modelli per la stima dei tempi di ricambio all'interno di un bacino a marea; un modello idrodinamico bidimensionale e un modello semplificato, basato sul prisma di marea (in due diverse versioni). I primi, con onere computazionale nettamente superiore, sono stati utilizzati per analizzare l'efficacia dei secondi, di applicazione relativamente più semplice.

Il tutto viene applicato alla laguna di Venezia, un ambiente delicato in continuo mutamento, ma dall'enorme. Per questo motivo è fondamentale avere a disposizione strumenti di analisi efficaci ed efficienti.

L'obiettivo principale del presente lavoro è stato quello di validare l'efficacia dei modelli basati sul prisma di marea, attraverso un'indagine numerica compiuta attraverso un modello idrodinamico.

L'analisi è stata eseguita utilizzando con un modello idrodinamico agli elementi finiti che simula i processi diffusivi, da cui risultati si è potuta studiare l'entità del mescolamento all'interno del bacino, e i flussi entranti ed uscenti. Alla fine delle simulazioni effettuate si sono ricavati i parametri che costituiscono i modelli basati sul prisma di marea, in modo tale da poterne valutare l'andamento.

Successivamente si sono calcolati i tempi di ricambio per la laguna di Venezia, sempre partendo dai dati del modello idrodinamico, in modo tale da poter ricavare i parametri dei modelli basati sul prisma di marea, e così ricavare una stima della loro entità. Si è considerato, il modello basato sul prisma di marea nella sua versione classica, in cui si considera solo il coefficiente di ritorno, ma si ipotizza un perfetto mescolamento del bacino e successivamente il modello basato sul prisma di marea modificato, nel quale è presente un parametro aggiuntivo, che tiene conto della non uniforme distribuzione della concentrazione all'interno del bacino (coefficiente di mescolamento).

Confrontando i risultati si è potuto trattare alcune considerazioni sul modello basato sul prisma di marea modificato e sul comportamento dei parametri che vi rientrano. È stato dimostrato che la non uniforme distribuzione della concentrazione all'interno della laguna gioca un ruolo non trascurabile nel determinare il tempo di ricambio.

Si può quindi affermare che il modello basato sul prisma di marea modificato ha maggior potenzialità di descrivere il fenomeno reale, poiché considera una ulteriore variabile (il mescolamento) che influenza significativamente il tempo di ricambio all'interno di un bacino.

Rimane comunque di difficile caratterizzare l'andamento dei parametri del modello semplificato. D'altra parte, come indicazione finale, è possibile affermare che l'utilizzo del parametro r , che di fatto racchiude insieme il coefficiente di mescolamento il coefficiente di ritorno, assume valori che, per le diverse condizioni considerate, variano meno rispetto a quelli degli altri coefficienti considerati separatamente.

10 Bibliografia

- [1] Arega F., Armstrong S., A.W. Badr, 2008. Modeling of residence time in the East Scott Creek Estuary, South Carolina, USA. South Carolina Department of Natural Resource, Land, Water and Conservation Division, Columbia, SC, USA, *Journal of Hydro-environment Reserch*, 100-102
- [2] Bolin, B., Rodhe, H., 1973. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus* 25, 58e62.
- [3] Cucco A., Umgiesser G., Ferrarin C., 2009. Eulerian and Lagrangian transport time scales of a tidal active costal basin. *Ecological Modelling*. 917-919
- [4] Cucco, A., Umgiesser, G., 2006. Modeling the Venice Lagoon residence time. *Ecological Modelling* 193, 34-51.
- [5] D'Alpaos, L., Defina, A., 1995. Modellazione matematica del comportamento idrodinamico di zone di barena solcate da una rete di canali minori (Mathematical modeling of tidal flow over salt marshes dissected by an intricate network of channels), Istituto Veneto di SS.LL.AA., *Rapporti e Studi*. XII, 353–372.
- [6] Defina, A., 2000a. Two dimensional shallow flow equations for partially dry areas. *Water Resources Research* 36 (11), 3251–3264. Defina, A., 2000b. Alcune considerazioni sulla modellazione matematica di correnti bidimensionali caratterizzate da piccoli tiranti (A note on the mathematical modeling of very shallow flows). *Atti del XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche I*, 255–262.
- [7] Sanford et al., Lawrence P. 1992. Model for estimating tidal flushing of small embayments. *J. Waterway, Port, Costal, Ocean Eng.* 635-646
- [8] Viero P., Defina A., 2015. Water age, local flushing time, residence and exposure

time in semi-enclosed, tidal basins with negligible freshwater inflow. Preprint submitted to Estuarine, Coastal and Shelf Science. 1-9

[9] Takeoka, H., 1984 a. Exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Res.* 3 (4), 327-341. Takeoka, H., 1984 b. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Res.* 3 (3), 311–326.

[10] Bolin, B., Rodhe, H., 1973. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus* 25, 58e62.

[11] Zimmerman, J.T.F., 1988. Estuarine residence times. In: Kjerfve, B. (Ed.), *Hydrodynamics of Estuaries 1, Estuarine Physics*. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, pp. 76e84.