



Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

**ANALISI DELLA DINAMICA DEI SEDIMENTI NELLA
LAGUNA DI VENEZIA DALL'INIZIO DELL'800 AD
OGGI**

Relatori:

Prof. Luca Carniello

Prof. Andrea D'Alpaos

Laureanda:

Laura Tommasini

(1035758)

ANNO ACCADEMICO 2013/2014

Indice

1	Introduzione	3
1.1	La Laguna di Venezia attuale.....	3
1.2	Evoluzione morfologica della Laguna di Venezia	7
1.3	Obiettivo e struttura della tesi	10
2	Metodi e modelli	15
2.1	Il modello morfodinamico	15
2.1.1	Reticoli di calcolo: Laguna del 1811, del 1901 e del 2012.....	30
2.2	Il processo di Poisson.....	34
2.2.1	Test di Kolmogorov-Smirnov	38
3	Analisi della dinamica dei sedimenti nella Laguna del 1811, del 1901 e del 2012 .	41
3.1	Determinazione della soglia di concentrazione	45
3.2	Analisi puntuale delle misure di concentrazione	55
3.3	Analisi spaziale delle misure di concentrazione	69
4	L'effetto stabilizzante della vegetazione sommersa	95
5	Conclusioni	101

1 Introduzione

1.1 La Laguna di Venezia attuale

La Laguna di Venezia attualmente si estende su una superficie di circa 540 km² delimitando un'area lunga circa 51 km e larga circa 12 km, che confina a sud con il corso terminale del Brenta (foce di Brondolo) e a nord con il tratto finale del Sile (foce di Piave Vecchia).

Il cordone litoraneo che separa la laguna dal mare aperto è interrotto da tre bocche di porto (bocca di Lido, bocca di Malamocco, bocca di Chioggia), che permettono la comunicazione tra ambiente lagunare e mare Adriatico e garantiscono che il movimento dell'acqua all'interno della laguna sia governato dalla marea (Figura 1-1).



Figura 1-1- Immagine satellitare della laguna di Venezia

La laguna è un ambiente di transizione tra terra ed acqua, caratterizzato da uno stato di perenne instabilità. La morfologia lagunare dipende infatti dal rapporto che viene ad instaurarsi tra apporti di materiali solidi dal mare o dai fiumi e l'azione erosiva delle onde e delle maree.

La comunicazione della laguna con il mare ne determina il carattere salmastro, garantendo la sopravvivenza delle peculiari caratteristiche biologiche. La quotidiana ingressione e regressione marina (periodicità mareale) attraverso le bocche, modifica e modella la

configurazione fisica della laguna. Il mare inoltre, nella complessa interazione tra i vari fenomeni, può rappresentare uno dei principali fattori di rischio nell'evoluzione del bacino lagunare se l'azione disgregatrice del moto ondoso e delle correnti dovesse prevalere su quella costruttrice.

All'interno del perimetro lagunare sono presenti: bassifondi, velme e barene, isole, valli da pesca, casse di colmata e canali. Le casse di colmata, le isole, i litorali e gli argini costituiscono le aree poste al di sopra del livello del mare che rappresentano l'8% di tutta la superficie lagunare. Il restante 92% è costituito dal sistema idraulico che comprende i canali (11,9%) e i bassifondi, velme e barene (80,1%). Le barene sono considerate parte del sistema idraulico, anche se generalmente sono più alte sul livello del mare e di alcune zone del centro storico considerate terre emerse. Il criterio di assegnazione fa infatti riferimento alla loro funzione, che è quella di regolare l'idrodinamica lagunare senza opporsi all'espansione delle maree.

Le barene, assieme alle velme e ai bassifondi, costituiscono uno degli ambienti più caratteristici, ma anche più fragili dell'ecosistema lagunare. Esse a seconda delle quantità di materiali (limo, sabbia e altri sedimenti) che acquistano o perdono, sono soggette a variazioni morfologiche.

Le **barene** che oggi ricoprono circa il 5-10% dell'intera laguna sono terre che vengono sommerse periodicamente durante le fasi di alta marea. Sono ambienti tra la terra e l'acqua, ospitano una vegetazione caratteristica delle zone salmastre e costituiscono un habitat caratteristico per fauna e avifauna lagunari. Le barene svolgono diversificate funzioni: regolano l'idrodinamica perché creano dei percorsi obbligati che facilitano la propagazione della marea e quindi contribuiscono a favorire il ricambio idrico; moderano l'azione del moto ondoso; limitano la dispersione a mare e in laguna dei sedimenti (Figura 1-2).



Figura 1-2 – Barene

Le **velme** sono zone lagunari fangose prive di vegetazione e normalmente sommerse, che si estendono lungo le sponde dei canali e dei ghebi ed emergono solo in occasione delle basse maree.

I **bassifondi** sono aree di laguna caratterizzate da profondità maggiori, tra i bassifondi sono comprese anche le velme. Nel ventennio 1970-1990 essi si sono approfonditi mediamente di 7 millimetri l'anno e in alcune zone anche di 30 millimetri.

I **canali** lagunari permettono il flusso e il riflusso dell'acqua, consentendo il ricambio idrico necessario e la stessa sopravvivenza della laguna. Sono caratterizzati da una profondità che varia tra i 15 m del canale artificiale Malamocco-Marghera e 1-2 m dei canali naturali. Agli originari canali naturali con andamento tortuoso, si è aggiunto negli anni lo scavo di canali artificiali, ad andamento rettilineo.

I **ghebi** sono piccoli e tortuosi canali naturali che solcano le barene, nei quali, tranne nei casi di basse maree eccezionali, c'è sempre un livello d'acqua, tale livello non è sufficiente però alla navigazione.

I **chiari** sono specchi d'acqua piovana o salmastra che si formano all'interno delle barene, spesso punto di arrivo di un ghebo (Figura 1-3).



Figura 1-3 - Barene, velme, ghebi e chiari.

Le **casce di colmata** sono isole artificiali create alla fine degli '60 con il materiale proveniente dallo scavo del Canale dei Petroli, realizzato per consentire l'accesso delle navi al porto industriale di Porto Marghera. Le casce di colmata sono state costruite in zone precedentemente occupate da barene, in previsione di un'ulteriore espansione, poi mai avvenuta, della zona industriale di Porto Marghera. La costruzione delle casce 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 delle casce di colmata stesse. Sono state oggetto di interventi di vivificazione e naturalizzazione e sono ora ambienti di interesse naturalistico e dal punto di vista dell'avifauna.

Le **isole** sono distinte in isole di origine naturale e isole di origine artificiale. Le isole naturali sono relitti di dune, cioè residui degli antichi cordoni litoranei come nel caso delle Vignole o di Sant'Erasmus, oppure sono il risultato dell'opera di deposizione e accumulo di materiali solidi trasportati dai fiumi, come nel caso di Burano o Torcello. Un consistente numero di isole è artificiale, la creazione di tali isole, a partire dal XIX secolo, ha trasformato il panorama insulare della laguna.

Il **cordone litoraneo** è una striscia di terra lunga circa 60 km che separa la laguna dal mare. Sono considerati parte del sistema dei litorali: il litorale di Jesolo, del Cavallino (Punta Sabbioni, inclusa l'isola di Treporti), del Lido, di Pellestrina, di Sottomarina (fino al fiume Brenta) e quello di Isola Verde. I litorali sono elementi sempre instabili, soggetti a processi evolutivi che ne modificano aspetto e struttura fisica a seconda del prevalere delle forze distruttive (cioè dei fenomeni erosivi dovuti all'azione disgregatrice di correnti e moto ondoso) o quelle costruttive (il ripascimento con nuova sabbia). Per queste ragioni, in origine, il litorale aveva un aspetto molto diverso da quello attuale: era infatti costituito da una zona di spiaggia più o meno estesa, da un sistema di dune con una ricca vegetazione costiera e più interamente da una zona di boscaglia. In tempi recenti la fascia a spiaggia, sottoposta a forti fenomeni erosivi, ha subito notevoli riduzioni mentre la zona delle dune è per la maggior parte scomparsa anche a causa della forte antropizzazione del territorio. Fin dai secoli passati, a seguito delle diversioni dei fiumi a mare si accentuarono i fenomeni erosivi sul cordone litoraneo con l'indebolimento progressivo dello stesso. Contro questo pericoloso processo a partire dal XVII secolo furono costruiti i murazzi, grandi opere di difesa in pietra d'Istria e pozzolana.

Le **bocche di porto** sono i varchi nel cordone litoraneo che mettono in comunicazione il mare Adriatico con la laguna, consentendo il flusso e il riflusso della marea. Le bocche di porto della laguna di Venezia nel passato erano più numerose. Attualmente sono tre, delimitate da

lunghe moli foranei: le bocche di porto di Lido (larga 800 m), Malamocco e Chioggia (larga ciascuna circa 400 m).

Attualmente, alle tre bocche di porto sono in corso i lavori di realizzazione del sistema Mose per la difesa di Venezia e della laguna dalle acque alte.

Le **valli da pesca** sono, infine, aree lagunari separate dalla laguna aperta mediante arginature che ne determinano l'esclusione dai flussi e riflussi di marea. Le valli da pesca sono bacini poco profondi di acque salate e salmastre e costituiscono ambienti molto particolari che, fin da tempi antichissimi, sono stati attrezzati per l'itticoltura e talvolta per la caccia. Oggi al loro interno viene praticato l'allevamento del pesce anche a livello industriale. Nella laguna di Venezia le valli sono 28, sia di proprietà demaniale che privata, ma in gran parte gestite da privati. Occupano circa 9000 ettari, un sesto dell'intera superficie lagunare. Sono composte da specchi d'acqua, canali artificiali o naturali, barene e strutture funzionali per gestire gli apporti di acqua dolce o salsa. Tra queste strutture sono comprese, le chiaviche (usate per il collegamento e l'interscambio idraulico), i lavorieri e le peschiere (per la cattura e l'allevamento del pesce), i casoni (edifici per il personale e le strutture direzionali e amministrative) e le botti (postazioni da caccia immerse nei bassi fondali). (Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti - Magistrato delle Acque di Venezia 2013).

1.2 Evoluzione morfologica della Laguna di Venezia

La laguna di Venezia ha subito nel corso degli anni, a partire dalle diversioni dei grandi fiumi (iniziata nel 1457 e terminata nel 1896), una complessa evoluzione morfologica.

Fino al momento in cui i fiumi, in modo particolare il Brenta, sfociavano in laguna, i processi di sedimentazione dominavano l'evoluzione morfologica di tale area provocando interrimenti e riduzione dei fondali degli specchi d'acqua. Si creavano in questo modo nuove barene, le quali espandevano così la loro superficie.

A seguito dell'allontanamento dei fiumi è venuto meno il cospicuo apporto di sedimenti dall'esterno e quindi i processi erosivi hanno cominciato a prevalere sui fenomeni di deposito e la tendenza evolutiva dell'intero sistema lagunare si è invertita.

In una lunga fase iniziale protrattasi circa fino alla fine dell'Ottocento, l'erosione si è manifestata con processi lenti e a prevalente sviluppo orizzontale. Durante questo periodo, la

quantità di sedimenti liberata dalla demolizione progressiva di una parte delle barene, che occupavano grandi superfici, è stata in grado di compensare dinamicamente i fenomeni di erosione in senso verticale, fornendo al sistema i volumi di materiale necessari per permettere ai bassifondi di conservare sostanzialmente le loro profondità primitive.

In una fase successiva, in pratica a partire dai primi decenni del Novecento, dopo il completamento dei tre moli alle bocche di porto, pur continuando i processi di demolizione delle barene con crescente intensità, e quindi i fenomeni erosivi a forte sviluppo orizzontale, i volumi di sedimenti liberati non sono stati più sufficienti per garantire la stabilità dinamica dei fondali. I fondali delle zone d'acqua hanno incominciato a erodersi, incrementando progressivamente le loro profondità, come risulta evidente per la parte centrale e meridionale della laguna (Carniello, Defina e D'Alpaos 2009b).

La frequenza delle aree occupate da barene è andata nel tempo diminuendo mantenendo circa la stessa quota. Le zone invece occupate da bassifondi hanno incrementato sia la frequenza totale sia la profondità (Figura 1-4).

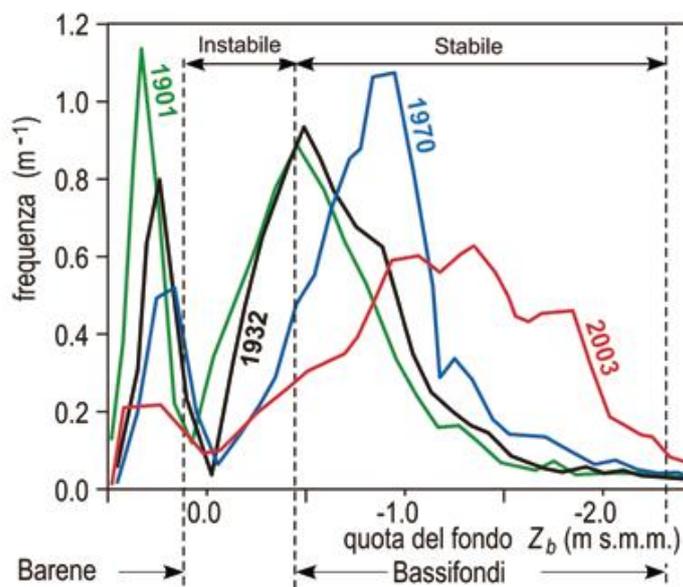


Figura 1-4 - Distribuzione delle frequenze delle superfici con quota assegnata all'interno della laguna centro meridionale (Carniello, Defina e D'Alpaos 2009b).

I processi erosivi più evidenti si possono riscontrare in modo particolare nella parte centrale del bacino lagunare all'interno del perimetro formato dai grandi canali che hanno origine dalle bocche di Lido e Malamocco e dai canali realizzati dall'uomo nel corso del XX secolo per permettere alle navi di maggiore pescaggio l'accesso ai porti interni (L. D'Alpaos 2010).

Come conseguenza di tali fenomeni progressivamente, ma inesorabilmente, la laguna va perdendo le sue forme originali, caratterizzate da fondali poco profondi, innervati da una fitta rete ramificata di canali, che porta i benefici effetti dell'alternarsi delle maree alle bocche e contribuisce al ricambio delle acque.

Un tempo la cosiddetta laguna morta, cioè quella fascia di laguna più prossima alla conterminazione, era ricca di barene; tra le barene, solcate dai molti piccoli canali, si interponevano i chiari d'acqua poco profondi, creando un tessuto morfologico estremamente articolato, a sua volta funzionale ad accrescere, dal punto di vista idrodinamico, il ruolo dei fenomeni dispersivi e quindi favorire un migliore ricambio delle acque nelle zone idraulicamente più lontane dalle bocche.

La tendenza all'approfondimento generalizzato dei fondali dovuto non solo all'azione congiunta dell'innalzamento del livello medio del mare e della subsidenza del suolo ha di fatto annullato l'antico ruolo idrodinamico dei canali lagunari nel controllo della propagazione della marea, modificando radicalmente il regime delle correnti di quasi tutta la laguna.

Le correnti di marea assumono un ruolo modesto nei processi di erosione, sono in grado di mobilitare e risospingere i sedimenti solo lungo i canali principali che si dipartono dalle bocche, e limitatamente ai tratti più prossimi a queste.

La causa determinante di questi fenomeni erosivi è l'azione del moto ondoso, sia esso generato dal vento o dai natanti in navigazione, capace di risospingere quasi ovunque in modo generalizzato i sedimenti più fini presenti nel fondo. Una volta risospesi, i sedimenti che non hanno modo di ridepositarsi sono trascinati dalle correnti di marea verso i canali e da questi ultimi progressivamente verso le bocche, essendo nei fenomeni di trasporto dominante la fase di riflusso su quella di flusso.

Il comportamento idraulico asimmetrico delle bocche armate assume un ruolo decisivo negli scambi laguna-mare. Nella fase di riflusso, infatti, la corrente in uscita genera un vero e proprio getto tra le dighe, che si proietta compatto in profondità nel mare antistante e trascina con sé i sedimenti trasportati in sospensione, depositandoli lontano dalla testate dei moli. Nella successiva fase di flusso, la corrente è richiamata verso la bocca da tutte le direzioni e solo una minima parte dei sedimenti espulsi in mare durante la fase di riflusso è reintrodotta in laguna, determinando come conseguenza un bilancio negativo negli scambi laguna-mare. Di qui la sistematica perdita netta di sedimenti fini, che da molti anni ormai interessa la laguna ed è alimentata dalla progressiva erosione dei suoi fondali. Tutto questo avveniva in misura molto

più contenuta antecedentemente alla costruzione dei moli alle bocche di porto, quando il comportamento delle bocche stesse in fase di flusso e di riflusso era sostanzialmente simmetrico e i sedimenti fini, trascinati in mare dalle correnti in uscita, erano nella loro quasi totalità reintrodotti in laguna durante la successiva fase di marea entrante. Si determinavano in tal modo negli scambi laguna-mare condizioni molto più equilibrate di quelle attuali, più favorevoli al mantenimento dei fondali interni, come di fatto è documentato dalla cartografia disponibile.

Al fine di comprendere meglio l'evoluzione nel tempo del degrado morfologico descritto, anche nell'ottica di proporre possibili interventi di salvaguardia, risultano utili la comprensione e la descrizione dei processi che governano la risospensione ed il trasporto solido all'interno della laguna attuale, ma anche delle lagune storiche.

1.3 Obiettivo e struttura della tesi

Questo lavoro di tesi nasce da degli studi precedenti dove si è stabilito che sia gli sforzi di attrito al fondo (D'Alpaos, Carniello e Rinaldo 2013), sia gli eventi di risospensione (Antico 2012) all'interno della laguna di Venezia attuale (2012) possono essere approssimati con un processo di tipo poissoniano, analogamente agli eventi di pioggia giornalieri di cui si occupano gli studi idrologici. Ciò consente di riprodurre un evento reale attraverso una distribuzione semplice, quella esponenziale, caratterizzata da un solo parametro.

Il carattere poissoniano degli sforzi di attrito al fondo permette di creare un quadro di riferimento teorico, che può essere utilizzato per modellare gli effetti generati dalle onde da vento in modo predittivo, comportando importanti conseguenze per le analisi quantitative dell'evoluzione biomorfodinamica dei bacini soggetti a marea nel lungo periodo. Si può inoltre determinare grazie allo studio sugli eventi di risospensione la probabilità di osservare un certo numero di eventi di risospensione in un determinato periodo (anno o stagione) e generare eventi sintetici statisticamente significativi dello stesso processo.

I fattori considerati per descrivere l'evoluzione dei bacini lagunari sono le correnti di marea e le onde da vento (si tralasciano il moto ondoso prodotto dai natanti e la risospensione legata a particolari tecniche di pesca usate all'interno del bacino lagunare, poiché considerati processi non naturali e difficilmente modellabili). Le prime influenzano maggiormente i fenomeni di risospensione in prossimità delle bocche; le seconde, invece sono quelle che

comportano la risospensione dei sedimenti nelle zone del bacino lagunare più lontane dalle bocche.

Il presente lavoro di tesi quindi, partendo dagli studi descritti, si pone come primo obiettivo di valutare se gli eventi di risospensione anche in alcune configurazioni storiche della laguna di Venezia possano essere approssimati attraverso dei processi di Poisson.

Si sono scelte in particolare tre configurazioni della laguna di Venezia ricostruite sulla base di mappe storiche. La prima fa riferimento alla carta idrografica della laguna di Venezia redatta da Augusto Dénaix (Laguna 1811) (Figura 1-5), la seconda alla carta idrografica ricostruita partendo dai rilievi eseguiti negli anni 1897-1901 (Laguna 1901) (Figura 1-6), mentre la terza alla rappresentazione attuale della laguna (Laguna 2012). La Laguna 2012 sostanzialmente coincide con la carta idrografica del 2003 (Figura 1-1), differisce solo la configurazione e la batimetria in corrispondenza delle bocche di porto per effetto dei lavori di costruzione del Mose.

Il secondo obiettivo del presente elaborato è quello di confrontare i risultati ricavati dall'analisi degli eventi di risospensione nelle tre configurazioni al fine di analizzare l'evoluzione storica di tali eventi anche nell'ottica di individuare una previsione per i futuri cambiamenti morfologici della laguna di Venezia.

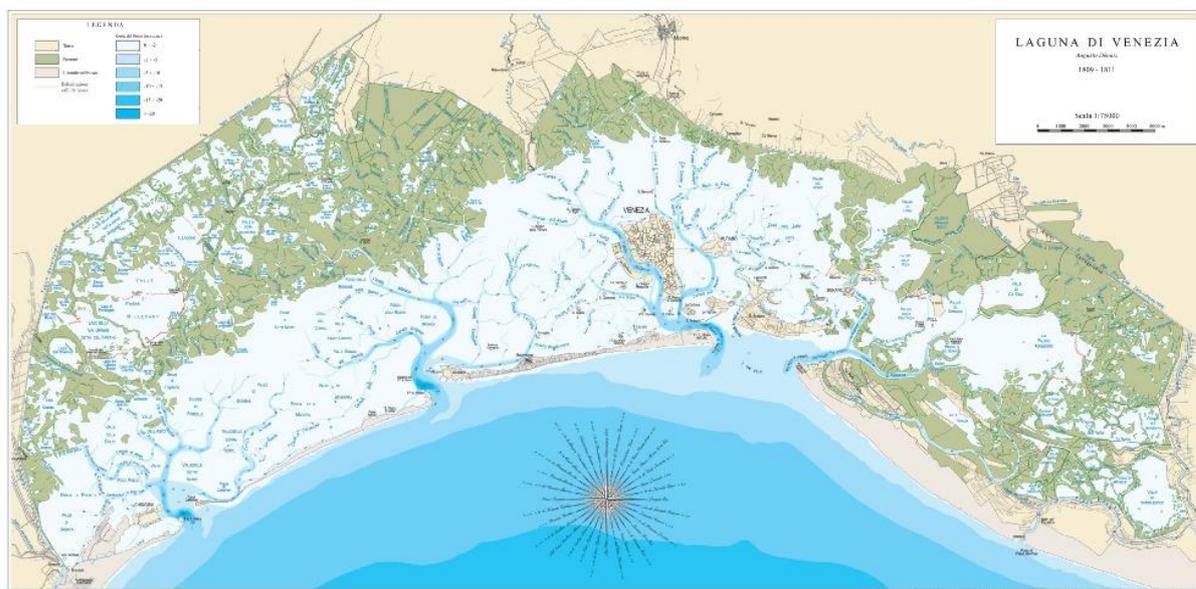


Figura 1-5 - Laguna 1811



Figura 1-6 - Laguna 1901

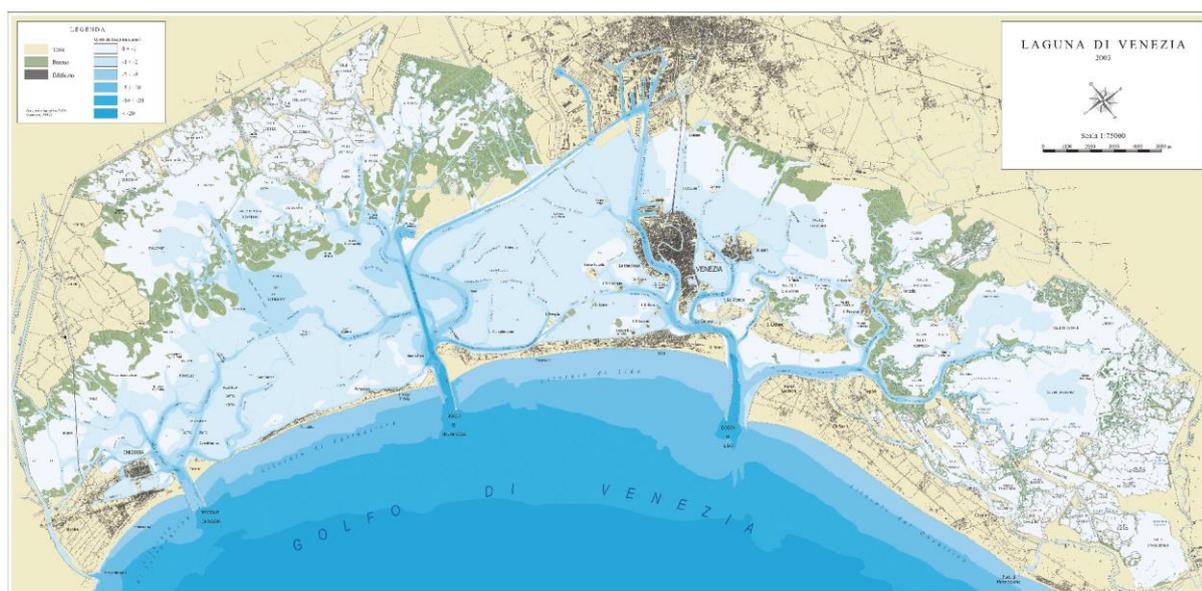


Figura 1-7 - Laguna 2003.

Nel seguito verranno descritti il modello morfodinamico utilizzato per le simulazioni e i processi di Poisson con il loro utilizzo nell'ambito di questo studio; nel capitolo successivo verranno analizzati i risultati del modello di trasporto solido (che costituisce uno dei moduli accoppiati del modello morfodinamico).

La simulazione numerica condotta per svolgere le analisi, fa riferimento, per tutte e tre le lagune, all'anno 2005, che si è dimostrato essere l'anno rappresentativo per le caratteristiche del vento nella Laguna di Venezia nell'ultimo decennio.

Dopo aver scelto una soglia di concentrazione adeguata si verificherà se gli eventi di risospensione per le tre configurazioni possano essere modellati o meno come un processo di Poisson, eseguendo il test di Kolmogorov-Smirnov (KS), che permetterà di verificare se il tempo di interarrivo degli eventi di risospensione (ma anche l'intensità e la durata degli stessi) sia una variabile aleatoria distribuita esponenzialmente.

Si svolgerà quindi un'operazione di confronto dei tempi di interarrivo, delle intensità e delle durate, si valuterà la loro variazione nel corso degli anni e la loro eventuale dipendenza dalla quota del fondo, infine si effettuerà un'analisi di queste tre variabili per determinare l'esistenza di una qualche correlazione temporale.

Infine si effettuerà un breve confronto tra la laguna del 2012 priva di vegetazione e la laguna del 2012 con la presenza di fanerogame, flora caratteristica dei bassifondi per evidenziare l'effetto della vegetazione stessa sugli eventi di risospensione.

2 Metodi e modelli

2.1 Il modello morfodinamico

Il modello morfodinamico utilizzato per questo lavoro di tesi è stato concepito e sviluppato dai ricercatori del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, per studiare l'evoluzione morfodinamica in ambienti lagunari poco profondi e caratterizzati da una topografia fortemente irregolare. E' stata dedicata particolare attenzione alla corretta rappresentazione dei processi fisici che influenzano l'evoluzione morfologica di questi ambienti, attraverso l'utilizzo di specifici modelli di sottogriglia.

Il modello impiegato è costituito da quattro moduli accoppiati che utilizzano la stessa griglia di calcolo:

- modulo idrodinamico;
- modulo di generazione e propagazione delle onde da vento;
- modulo di trasporto solido;
- modulo di evoluzione del fondo.

Il **modulo idrodinamico** è basato su uno schema numerico bidimensionale semi-implicito agli elementi finiti, che risulta particolarmente adatto nel caso di domini dalla morfologia complessa come la laguna di Venezia. Lo schema in questione risolve le equazioni delle onde lunghe in acque basse opportunamente modificate per tener conto degli effetti legati alla dinamica che si viene a creare a causa della transizione asciutto-bagnato; a questo scopo è stato introdotto un modello di sottogriglia in grado di descrivere i processi di sommersione ed emersione prendendo in considerazione le macroirregolarità della batimetria all'interno di un singolo elemento di calcolo (D'Alpaos e Defina 1993, D'Alpaos e Defina 1995, D'Alpaos e Defina 2007, A. Defina 2000, A. Defina 2003).

Le equazioni bidimensionali risolte dal modello idrodinamico sono le seguenti:

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{Y} \right) - \left(\frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{\tau_{wx}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

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

$$\eta \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad (3)$$

dove:

- t : tempo;
- q_x e q_y : portate in direzione x e y rispettivamente;
- R_{ij} : sforzi di Reynolds (i e j rappresentano alternativamente le coordinate x e y);
- $\tau_{b,curr} = (\tau_{b,x}, \tau_{b,y})$: sforzo di attrito al fondo prodotto dalle correnti di marea;
- $\tau_w = (\tau_{w,x}, \tau_{w,y})$: sforzo di attrito prodotto dal vento sulla superficie libera;
- ρ : densità dell'acqua;
- h : elevazione della superficie libera;
- g : accelerazione di gravità;
- Y : tirante equivalente, definito come il volume di acqua per unità di area istantaneamente presente all'interno dell'elemento di calcolo;
- η : frazione di dominio bagnato della singola cella di calcolo.

Le irregolarità del fondo, che influenzano notevolmente la dinamica e la continuità delle correnti in acque basse, sono state introdotte nel modello in chiave statistica ipotizzando che il loro andamento segua una distribuzione di probabilità di tipo gaussiano.

Le funzioni η e Y sono date dalle seguenti espressioni (A. Defina 2000):

$$\eta = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[\frac{2D}{a_r} \right] \right\} \quad (4)$$

$$Y = a_r \left\{ \eta \left(\frac{D}{a_r} \right) + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \exp \left[-4 \left(\frac{D}{a_r} \right)^2 \right] \right\} \quad (5)$$

dove:

- $erf[J]$: funzione errore;
- a_r : altezza tipica delle irregolarità del fondo (si può assumere pari all'ampiezza massima delle asperità oppure, pari a due volte la loro deviazione standard);
- $D=h-z_b$: tirante medio (z_b rappresenta l'elevazione media del fondo all'interno di una cella rispetto al piano di riferimento).

Nel caso di moto turbolento in regime di parete scabra, lo sforzo di attrito al fondo dovuto alla corrente può essere scritto come (A. Defina 2000):

$$\frac{\tau_{b,curr}}{\rho Y} = g \left(\frac{|q|}{k_s^2 H^{\frac{10}{3}}} \right) q \quad (6)$$

dove:

- $|q|$: norma euclidea del vettore q ;
- k_s : coefficiente di scabrezza secondo Strickler;
- H : tirante d'acqua equivalente che può essere approssimato tramite la seguente formula di interpolazione:

$$\frac{H}{a_r} \cong \frac{Y}{a_r} + 0.27 \sqrt{\frac{Y}{a_r}} e^{-\frac{2Y}{a_r}} \quad (7)$$

Lo sforzo di attrito del vento sulla superficie libera è dato dalla seguente relazione:

$$\tau_w = \rho_a c_d (1 - e^{e_w U_w}) U_{wind}^2 \quad (8)$$

dove:

- ρ_a : densità dell'aria (1.25 kg/m^3);
- c_d ed e_w sono due parametri che contribuiscono a definire il coefficiente di *drag* (in seguito a una specifica calibrazione, tali parametri sono stati assunti pari a $c_d=0.05$ ed $e_w=1.62 \cdot 10^{-6}$);
- U_{wind} : velocità del vento.

Nel modello si assume che la quota della superficie libera h vari linearmente tra i nodi di ogni singolo elemento, mentre le componenti della velocità integrate sulla verticale q_x e q_y vengono considerate costanti all'interno di ogni cella.

I livelli nodali calcolati dal modulo idrodinamico ad ogni passo temporale vengono utilizzati dal modello di moto ondoso per valutare la celerità di gruppo e l'influenza del fondale sulla propagazione delle onde.

Il **modulo di generazione e propagazione del moto ondoso** si basa sulla soluzione dell'equazione di conservazione dell'azione d'onda N definita come rapporto tra l'energia dell'onda E e la sua pulsazione σ , $N = E/\sigma$. La soluzione numerica fa ricorso ad uno schema esplicito ai volumi finiti upwind e adotta la stessa griglia di calcolo del modulo idrodinamico in modo da stimare correttamente le interazioni tra onde e marea.

La formulazione spettrale dell'equazione di conservazione dell'azione d'onda è la seguente (Hesselman K. 1973):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} c_{gx} N + \frac{\partial}{\partial y} c_{gy} N + N \frac{\partial}{\partial \sigma} c_{\sigma} N + \frac{\partial}{\partial \vartheta} c_{\vartheta} N = \frac{S}{\sigma} \quad (9)$$

dove il primo termine rappresenta la variazione locale dell'azione d'onda nel tempo; il secondo e il terzo termine rappresentano la propagazione dell'azione d'onda nello spazio (c_{gx} e c_{gy} sono le componenti secondo gli assi coordinati della celerità di gruppo, ossia della velocità con cui si propaga l'energia nello spazio); il quarto termine si riferisce alla variazione di N nel dominio delle frequenze; il quinto termine rappresenta il fenomeno della rifrazione indotta dal fondo e dalle correnti. Il termine a destra del segno di uguaglianza descrive i contributi esterni alla variazione locale dell'azione d'onda.

Quando si lavora su un dominio caratterizzato da forte irregolarità e da bassi fondali è possibile semplificare la precedente relazione introducendo due ipotesi semplificative (Carniello, Defina e D'Alpaos 2005, Carniello, Defina e D'Alpaos 2009a):

1. la prima ipotesi consiste nel trascurare le interazioni non lineari onda-onda e onda-corrente;
2. la seconda prevede che la direzione del moto ondoso sia pari, in ogni istante, a quella del vento.

Con queste semplificazioni è possibile trascurare il quarto e il quinto termine della (9).

Tali assunzioni nascono dal fatto che il moto ondoso che si vuole riprodurre è quello generato dal vento all'interno della laguna stessa; trattandosi di un moto ondoso in zona di

generazione è plausibile supporre che la sua direzione coincida con quella del vento. Con questa ipotesi implicitamente si trascura il fenomeno della rifrazione. In realtà per riprodurla correttamente sarebbe necessario un livello di descrizione della batimetria che non è possibile garantire a causa delle brusche e frequenti discontinuità del fondo.

Sulla base di queste assunzioni la (9) diventa:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} c_{gx} N + \frac{\partial}{\partial y} c_{gy} N = \frac{S}{\sigma} \quad (10)$$

dove l'espressione per la determinazione della celerità di gruppo è quella nota dalla teoria lineare:

$$c_g = \frac{1}{2} c \left(1 + \frac{2kY}{\sin h kY} \right) \quad (11)$$

dove c è la celerità di fase: $c = \frac{\sigma}{k}$.

Il modulo di moto ondoso risolve quindi l'equazione (11) e calcola l'altezza d'onda significativa H seguendo l'approccio della teoria lineare.

La soluzione dell'equazione (10) non è sufficiente a descrivere in maniera completa il moto ondoso, in quanto manca una relazione che fornisca il periodo dell'onda.

Per ottenere risultati accurati è stata introdotta una relazione empirica adimensionalizzata che lega il periodo di picco al tirante d'acqua locale e alla velocità del vento, (Young e Verhagen 1996) (Breugem e Holthuijsen 2007):

$$\tilde{T} = a \tilde{Y}^b \quad (12)$$

dove:

- $\tilde{T} = \frac{gT_p}{U_{wind}}$: periodo dell'onda adimensionalizzato;
- $\tilde{Y} = \frac{gY}{U_{wind}^2}$: tirante d'acqua adimensionalizzato;
- a e b sono dei parametri da calibrare in base alla località di studio. Per la laguna di Venezia un'apposita analisi ha permesso di stabilire che $a=3.5$ e $b=0.35$ (Carniello, Defina e D'Alpaos 2009a)

Considerando queste relazioni il periodo di picco è dato da:

$$T_p = a g^{(b-1)} U_{wind}^{(1-2b)} Y^b \quad (13)$$

Il termine S presente nella (10) è rappresentativo dei vari termini sorgente che tengono conto dei fenomeni fisici che contribuiscono alla variazione di energia del moto ondoso. I contributi contenuti in questo termine, espressi come una funzione dell'energia dell'onda, possono dare apporti in senso positivo come la generazione dovuta al vento (wind generation), oppure negativo come l'attrito con il fondo (bottom friction), il frangimento per raggiunta ripidità limite (whitecapping) e il frangimento per interazione con il fondale (breaking).

Le formulazioni utilizzate nel modello per la valutazione di questi termini sono presenti in letteratura (Carniello, Defina e D'Alpaos 2005, Booij, Ris e Holthuijsen 1999), e sono riassunte in Tabella 2-1.

La generazione delle onde da vento può essere modellata considerando la combinazione di due processi. Il primo è il fenomeno di risonanza tra la superficie libera e le fluttuazioni turbolente di pressione su di essa in grado di generare energia, anche a partire da una condizione di moto ondoso assente. Il secondo è il meccanismo di feedback che si innesca sulla superficie del mare una volta che sia stato prodotto del moto ondoso con il processo precedente: a causa del disturbo prodotto dalle fluttuazioni turbolente di pressione, la superficie del mare diviene corrugata e tale scabrezza accresce notevolmente l'intensità del trasferimento di energia dal vento al moto ondoso. La crescita corrispondente al primo processo (α) è di tipo lineare, quella relativa al secondo processo (β) è di tipo esponenziale.

L'attrito con il fondo è il fenomeno dissipativo di maggiore importanza nelle zone di basso fondale, che si realizza in corrispondenza del fondo a seguito del passaggio di un'onda. E' fondamentale sottolineare che la formulazione utilizzata non è più valida nel caso in cui si dovesse realizzare il frangimento: infatti in tal caso è lecito assumere che la maggiore causa di dissipazione è rappresentata proprio dal frangimento stesso. Per questa ragione, nel modello il termine S_{bf} viene moltiplicato per un fattore complementare alla probabilità di frangimento Q_b determinabile tramite la seguente relazione implicita:

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = - \left(\frac{H_{rms}}{h_{max}} \right)^2 \quad (14)$$

dove:

- H_{rms} : parametro caratteristico della distribuzione di Rayleigh, che nel presente modello risulta pari all'altezza d'onda monocromatica calcolata dal modello stesso per il singolo elemento del dominio di calcolo;
- $h_{max} = 0.78Y$ compatibile con il tirante Y .

In tal modo nel caso in cui si verifichi il fenomeno del frangimento, la dissipazione per attrito col fondo assume un'importanza sempre meno rilevante fino ad annullarsi in condizioni di frangimento certo ($Q_b=1$).

WIND GENERATION	$S_{wg} = \alpha + \beta \cdot E$	$\alpha(k) = \frac{80\rho_a^2\sigma}{\rho_w^2g^2k^2}c_d^2U^4$	k: numero d'onda $\sigma = 2\pi/T$ pulsazione T: periodo dell'onda ρ_a : densità dell'aria ρ_w : densità dell'acqua $c_d \cong 0.0012$ coeff. d'attrito U: velocità del vento in
		$\beta(k) = 5 \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{\sigma}{2\pi} \left(\frac{U_w \cos \delta}{c} - 0.90 \right)$	
BOTTOM FRICTION	$S_{bf} = -4c_{bf} \frac{\pi H}{T} \frac{k}{\sinh(kY) \sinh(2kY)} E$		H: altezza d'onda Y: tirante $c_{bf} = 0.015$
WHITECAPING	$S_{wc} = -c_{wc}\sigma \left(\frac{\gamma}{\gamma_{PM}} \right)^m E$		γ : indice di ripidità dell'onda $(\gamma = E\sigma^4/g^2)$ $\gamma_{PM} = 4.57 \times 10^{-3}$: valore teorico di γ per lo spettro
BREAKING	$S_{brk} = \frac{2}{T} Q_b \left(\frac{H_{max}}{H} \right)^2 E$		$H_{max} = 0.78 Y$: massima altezza d'onda Q_b : probab. di frangimento

Tabella 2-1 - Formulazioni utilizzate per i termini sorgente del moto ondoso (Booij , Ris e Holthuijsen 1999).

Il *whitecapping* è il processo di dissipazione legato al fenomeno di frangimento dell'onda per raggiungimento del limite di ripidità (secondo la teoria lineare il rapporto massimo tra ampiezza e lunghezza d'onda è pari a 1/7). In genere si ritiene che il whitecapping sia il fenomeno dissipativo dominante in campi di vento intenso e caratterizzato dall'alternarsi di forti raffiche. Sebbene risulti abbastanza chiaro il principio fisico secondo cui il fenomeno agisce, è molto complesso descrivere in maniera dettagliata il processo reale. Per questa ragione è stata utilizzata una relazione empirica ricavata da (Komen, Hasselmann e Hasselmann 1984), basata su un precedente studio (Hasselmann 1974).

Il frangimento per interazione col fondale è stato introdotto ipotizzando che la dissipazione legata al frangimento stesso è paragonabile a quella di un risalto idraulico seguendo l'approccio di Battjes J.A. (1978) e di LeMéhauté (1962). L'analisi della riduzione nello spazio dell'energia

del moto ondoso per il solo effetto del frangimento è stata appositamente studiata ed è stato evidenziato che un repentino cambiamento di fondale, situazione molto frequente in laguna, produce una sostanziale riduzione di energia nei primi metri a valle della discontinuità. Questo processo ha suggerito di effettuare una distinzione all'interno del fenomeno del frangimento individuandone una prima tipologia definita “di frontiera” e una seconda di “elemento”. All'interno del modello la prima tipologia di frangimento viene implementata lavorando sui termini convettivi che descrivono il flusso in ingresso all'elemento di valle. Il residuo effetto dissipativo, più distribuito nello spazio, viene descritto dal termine sorgente S_{brk} e si realizza sull'elemento stesso (Carniello, Defina e D'Alpaos 2005).

Analogamente a quanto fatto per il modulo idrodinamico, è possibile introdurre lo sforzo di attrito al fondo dovuto alla presenza del moto ondoso:

$$\tau_{b,wave} = \frac{1}{2} f_w \rho_w u_m^2 \quad (15)$$

con:

$$u_m = \frac{\pi H}{T \sinh(kY)}$$

f_w

$$= 1.39 \left[\frac{u_m T}{2\pi \frac{D_{50}}{12}} \right]^{-0.52} \quad (16)$$

dove:

- u_m : velocità orbitale massima al fondo in base alla teoria lineare;
- Y : tirante d'acqua;
- f_w : coefficiente di attrito;
- D_{50} : diametro medio dei sedimenti che costituiscono il fondale.

Lo sforzo di attrito al fondo dovuto alla combinazione del moto ondoso e delle correnti di marea risulta maggiore della somma dei singoli contributi a causa delle interazioni non lineari tra due processi all'interno dello strato limite.

Per descrivere lo sforzo di attrito medio globale, nel modello accoppiato è stata seguita la seguente formulazione (Soulsby 1995, Soulsby 1997) per la quale risulta:

$$\tau_{b,m} = \tau_{b,curr} \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_{b,wave}}{\tau_{b,curr} + \tau_{b,wave}} \right)^{3.2} \right] \quad (17)$$

Infine, lo sforzo di attrito massimo $\tau_{b,tot}$ è dato dalla somma vettoriale di $\tau_{b,m}$ e dallo sforzo dovuto al moto ondoso:

$$\tau_{b,tot} = \left[(\tau_{b,m} + \tau_{b,wave} \cos \Phi)^2 + (\tau_{b,wave} \sin \Phi)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

dove Φ è l'angolo tra la corrente e la direzione di propagazione del moto ondoso. Lo sforzo di attrito massimo $\tau_{b,tot}$ è il responsabile della mobilitazione dei sedimenti al fondo, pertanto tutti i ragionamenti sull'evoluzione e sulla stabilità morfologica sono basati su questa grandezza.

Il **modulo di trasporto solido** si basa sulla soluzione dell'equazione di avvezione e diffusione e consente di determinare la concentrazione di sedimenti in sospensione trascurando il trasporto solido al fondo. Il modello è in grado di riprodurre la granulometria del materiale che costituisce il fondale lagunare, che può avere globalmente sia comportamento coesivo che incoerente, attraverso l'introduzione di una miscela bi-granulare costituita da una classe di materiale più grossolano e incoerente (sabbia) e da una classe di materiale fine con comportamento coesivo (fango).

Il modulo di trasporto solido valuta i parametri fisici di interesse sulla stessa griglia di calcolo su cui operano i due moduli precedenti (idrodinamico e di moto ondoso), evitando il problema delle approssimazioni numeriche legate allo scambio dei dati tra i diversi moduli.

In un dominio di calcolo bidimensionale l'equazione del trasporto solido avvelativo-dispersivo assume la seguente formulazione:

$$\frac{\partial C_i Y}{\partial t} + \nabla q C_i - \nabla (D Y \nabla C_i) = E_i - D_i \quad i = s, m \quad (19)$$

dove:

- C : concentrazione di sedimenti mediata sulla verticale;
- $q=(q_x, q_y)$: portata liquida per unità di larghezza;
- Y : tirante d'acqua equivalente;
- D : tensore di diffusione (molecolare e turbolenta);
- E e D : rispettivamente tassi di risospensione (entrainment) e deposizione.

Il pedice i fa riferimento alle frazioni incoerente (sand-sabbia) e coesiva (mud- fango) del materiale che costituisce il fondo.

Nel modello si assume che il termine dispersivo sia trascurabile rispetto a quello avvevivo (Pritchard e Hogg 2003) per tale ragione il trasporto solido orizzontale viene considerato puramente avvevivo e la (19) si semplifica nel modo seguente:

$$\frac{\partial C_i Y}{\partial t} + \nabla q C_i = E_i - D_i \quad i = s, m \quad (20)$$

Per il processo di deposizione ci sono due formulazioni che consentono di determinare il flusso di deposito di sabbia e fango.

Nel caso di sabbia pura si considera la seguente relazione:

$$D_s = -w_s r_0 C_s \quad (21)$$

dove:

- w_s : velocità di sedimentazione di una particella di sabbia;
- C_s : valore della concentrazione di sabbia in sospensione e r_0 è un parametro che tiene conto del fatto che la concentrazione lungo la verticale non si distribuisce in maniera uniforme; per r_0 è possibile assumere un valore costante e pari a 1.4 (Parker, et al. 1987).

La deposizione della frazione puramente coesiva si può esprimere tramite la formula di Krone:

$$D_m = -w_m C_m \max \left\{ 0; 1 - \frac{\tau_{b,tot}}{\tau_{cr,dep}} \right\} \quad (22)$$

dove:

- w_m : velocità di sedimentazione di una particella di materiale coesivo (fango);
- C_m : concentrazione di fango in sospensione;
- $\tau_{b,tot}$: sforzo totale di attrito agente sul fondo;
- $\tau_{cr,dep}$: sforzo critico di deposizione, ovvero lo sforzo di attrito al di sotto del quale si ha la deposizione dei sedimenti coesivi.

I valori utilizzati per ottenere le velocità di sedimentazione, w_s e w_m , sono stati ricavati seguendo la formulazione di Van Rijn (1984a) che considera la caduta di una particella in acqua pulita e ferma, trascurando il processo di flocculazione. Diversi studi dimostrano che per

diametri delle particelle superiori a 20 μm l'effetto della flocculazione sulla velocità di sedimentazione risulta trascurabile.

Le espressioni (21) e (22) possono essere applicate anche ad una miscela di sabbia e fango qualora la concentrazione di materiale coesivo risulti inferiore alla “gel point concentration”, che rappresenta la minima concentrazione di fango necessaria per intrappolare al suo interno le particelle di sabbia; solo in tal caso, infatti, le due frazioni che compongono la miscela si comportano in modo indipendente l'una dall'altra.

Numerosi esperimenti hanno dimostrato che, in base al tipo di sedimenti, la gel point concentration si verifica per concentrazioni pari a circa 180 mg/l (Winterwerp 1999); poiché nella laguna di Venezia i valori di torbidità risultano generalmente inferiori a questa concentrazione limite, tranne in casi di eventi particolarmente intensi, nel modello vengono implementate le equazioni (21) e (22).

Il processo di erosione dei fondali risulta più complesso rispetto a quello di deposizione; esperimenti condotti su miscele di sabbia e fango hanno dimostrato che, a differenza di quanto avviene per il deposito, il comportamento di una miscela in fase di erosione non può essere descritto considerando separatamente i contributi delle due frazioni.

Un primo fattore da considerare è l'influenza della composizione del fondale sul valore dello sforzo critico al fondo, che è il valore oltre il quale può verificarsi la risospensione.

Sul fondale lagunare è sempre presente una certa quantità di fango pertanto il terreno può assumere sia carattere coesivo che incoerente; ciò che consente di distinguere i due comportamenti è la percentuale di fango sul totale. Studi condotti da Van Ledden (2003, 2004) hanno dimostrato che negli ambienti lagunari la percentuale di fango minimo affinché si abbia comportamento coesivo è pari a $p_{m,cr}=10\%$. Nel caso in cui la percentuale risulti inferiore, si assume, con buona approssimazione, che il fondale lagunare sia composto da materiale incoerente.

Secondo l'impostazione di Van Ledden, all'interno del modello vengono definiti uno sforzo di attrito critico per la sabbia pura $\tau_{cr,s}$ e uno per il fango puro $\tau_{cr,m}$: al variare della percentuale di fango p_m all'interno della miscela, lo sforzo di attrito critico varia monotonicamente tra gli estremi $\tau_{cr,s}$ e $\tau_{cr,m}$ secondo la seguente formula:

$$\tau_{cr} = (1 + p_m)\tau_{cr,s} \qquad p_m \leq p_{m,cr} \qquad (23)$$

$$\tau_{cr} = \frac{(1 + p_m)\tau_{cr,s} - \tau_{cr,m}}{(1 - p_{m,cr})} (1 - p_m) + \tau_{cr,m} \quad p_m \geq p_{m,cr} \quad (24)$$

Dopo aver individuato la tipologia di fondale e il relativo sforzo di attrito critico è possibile quantificare i flussi di erosione di sabbia e fango.

Per il fondale a comportamento incoerente $p_m \leq p_{m,cr}$, l'erosione della frazione sabbiosa viene determinata tramite la formula di Van Rijn (1984):

$$E_{s,nc} = (1 - p_m)w_s 1.5 \left(\frac{D_{50}}{Y} \right) \frac{T^{1.5}}{D^{0.3}} \quad (25)$$

dove:

- D_{50} : diametro caratteristico dei sedimenti che costituiscono il fondale;
- Y : tirante locale;
- T : parametro di trasporto;
- D : diametro adimensionale del sedimento.

Il parametro di trasporto è convenzionalmente definito come $T = \max(0; \tau_{b,tot}/\tau_{cr} - 1)$, tuttavia questa relazione si presta bene a descrivere l'incipiente risospensione dei sedimenti solo puntualmente, o comunque per aree di ridotta estensione tali da poter essere considerate omogenee in termini di sforzo di attrito critico. La naturale eterogeneità che invece caratterizza aree di dimensione non trascurabile come l'area del singolo elemento di calcolo ha suggerito di inquadrare tale stato di incipiente movimento seguendo un approccio statistico-probabilistico.

Nell'ipotesi di assumere una distribuzione log-normale all'interno della singola cella di calcolo sia per lo sforzo critico, sia per lo sforzo di attrito al fondo (τ_{cr} e $\tau_{b,tot}$ rappresentano i valori medi di tali distribuzioni), il processo di progressivo incipiente movimento all'interno del singolo elemento può essere descritto valutando il parametro di trasporto tramite la seguente relazione (Carniello, Defina e D'Alpaos 2012) :

$$T = -1 + \left(1 + \left(\frac{\tau_{b,tot}}{\tau_{cr}} \right)^\varepsilon \right)^{\frac{1}{\varepsilon}} \quad (26)$$

dove ε è un parametro adimensionale assunto pari a 2 in seguito ad un'analisi di sensibilità.

Il diametro adimensionale D si calcola come:

$$D = D_{50} \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (27)$$

dove:

- s : densità specifica;
- ν : coefficiente di viscosità cinematica;
- D_{50} : diametro medio dei sedimenti che, sulla base dei dati sperimentali, si assume pari a 200 μm per la frazione sabbiosa e pari a 20 μm per quella fangosa.

Per determinare il flusso di erosione del fango si deve tener presente che, in un fondale non coesivo, la frazione fangosa viene erosa molto facilmente, come suggerisce Murray (1977). Per questo caso specifico il modello utilizza la formulazione di Van Ledden (2003, 2004):

$$E_{m,nc} = \frac{p_m}{1-p_m} M_{nc} T \quad (28)$$

dove M_{nc} è uno specifico parametro di risospensione per la miscela non coesiva pari a:

$$M_{nc} = \frac{\alpha_{b1} \sqrt{(s-1)g D_{50,sand}}}{3 D_{sand}^{0.9}} \quad (29)$$

dove α_{b1} è un parametro solitamente stimato tramite calibrazione.

Per quanto riguarda il fondale a comportamento coesivo ($p_m \geq p_{m,cr}$) l'erosione di sabbia e fango può essere valutata usando la classica formula di Partheniades; per le due frazioni di sedimenti si ottiene:

$$E_{s,c} = (1-p_m) M_c \max \left\{ 0; \frac{\tau_{b,tot}}{\tau_{cr}} - 1 \right\} \quad (30)$$

$$E_{m,c} = p_m M_c \max \left\{ 0; \frac{\tau_{b,tot}}{\tau_{cr}} - 1 \right\} \quad (31)$$

dove M_c è uno specifico parametro di risospensione per la miscela coesiva, pari a:

$$M_c = M_m \left(\frac{M_{nc}}{M_m} \frac{1}{1-p_{m,cr}} \right)^{\frac{1-p_m}{1-p_{m,cr}}} \quad (32)$$

dove M_m è un altro parametro di calibrazione e rappresenta un parametro di risospensione specifico per il fango puro.

Riassumendo, i flussi di erosione per la sabbia e per il fango, a seconda che la miscela sia coesiva o incoerente, possono essere espressi secondo le seguenti relazioni:

Sabbia

$$E_s = (1 - p_m)w_s 1.5 \left(\frac{D_{50}}{Y} \right) \frac{T^{1.5}}{D^{0.3}} \quad p_m \leq p_{m,cr} \quad (33)$$

$$E_s = (1 - p_m)M_c \max \left\{ 0; \frac{\tau_{b,tot}}{\tau_{cr}} - 1 \right\} \quad p_m \geq p_{m,cr} \quad (34)$$

Fango

$$E_m = \frac{p_m}{1 - p_m} M_{nc} T \quad p_m \leq p_{m,cr} \quad (35)$$

$$E_{m,c} = p_m M_c \max \left\{ 0; \frac{\tau_{b,tot}}{\tau_{cr}} - 1 \right\} \quad p_m \geq p_{m,cr} \quad (36)$$

E' importante sottolineare che i tassi di erosione dati dalle precedenti relazioni rappresentano la risospensione di sabbia e fango e sono limitati dall'effettiva disponibilit  locale delle frazioni sabbiosa e fangosa della miscela bi-granulare.

Per quanto riguarda l'introduzione della miscela bi-granulare   necessario tener presente che il fondale lagunare, in generale,   costituito da una miscela di argilla fango e sabbia. Le pi  recenti campagne di misura condotte nella Laguna di Venezia (Amos, et al. 2004) hanno evidenziato che le aree situate nei pressi delle bocche di porto e lungo i canali principali presentano fondali costituiti prevalentemente da sabbie incoerenti, mentre le zone periferiche hanno fondali caratterizzati prevalentemente da materiale fine a comportamento coesivo.

In gran parte del bacino lagunare, tuttavia, i fondali sono costituiti da materiale a granulometria intermedia e il grado di coesione locale   correlato al rapporto esistente tra la frazione sabbiosa incoerente e la componente fangosa coesiva dei sedimenti.

Una serie di simulazioni preliminari condotte sul modello di trasporto solido hanno dimostrato che la composizione del fondale influenza in maniera notevole il risultato finale. Studi specifici sono stati condotti al fine di poter caratterizzare in modo ragionevole la distribuzione spaziale della composizione granulometrica del fondale lagunare. In particolare ci si   concentrati sulla ricerca di relazioni semplificative tra la composizione granulometrica del fondo e alcuni parametri topografici e idrodinamici facilmente valutabili (Pagan 2007, Carniello, Defina e D'Alpaos 2008), quali la velocit  della corrente, la quota del fondo, lo sforzo totale di attrito al fondo e la distanza dalle bocche di porto. Tra queste grandezze quelle che

hanno dimostrato avere una correlazione più evidente con il diametro caratteristico dei sedimenti (D_{50}) che compongono il fondale sono la quota del fondo e la distanza dalle bocche di porto. Si è evidenziato in particolare che per profondità inferiori a due metri circa, i diametri più frequenti sono quelli caratteristici delle classi granulometriche a carattere coesivo.

La composizione granulometrica del fondale per la laguna di Venezia è quindi determinata applicando tali relazioni empiriche che utilizzano la profondità locale e la distanza dalle bocche di porto.

Tale metodologia ha l'indubbio vantaggio di poter essere applicata anche per la determinazione della composizione granulometrica delle configurazioni storiche della laguna. Per queste ultime, non essendo disponibili misure di campo, l'ipotesi che le relazioni trovate per la laguna attuale possano essere applicate anche per le lagune del passato (caratterizzate da profondità decisamente più ridotte) risulta, di fatto, l'unica percorribile.

Il **modulo di evoluzione del fondo** si basa sulla soluzione dell'equazione di Exner e permette di determinare le variazioni delle quote e della composizione del fondale.

Nel modello vengono trascurati gli effetti della subsidenza e il processo di consolidamento delle miscele di sedimenti, perché considerati fenomeni a scala temporale molto lunga rispetto alla durata delle simulazioni condotte.

Considerando solo il trasporto dei sedimenti in sospensione (come già detto il trasporto al fondo viene trascurato), la variazione delle quote del fondale segue la variazione dei flussi di erosione e deposito di sabbia e fango secondo la seguente relazione:

$$(1 - n) \frac{\partial z_b}{\partial t} = (D_s - D_m) - (E_s - E_m) \quad (37)$$

dove:

- z_b : quota locale;
- n : porosità della miscela; tale valore viene assunto costante e pari a $n=0.4$ (sono stati trascurati i processi di compattazione);
- i termini al secondo membro dell'equazione rappresentano i flussi di deposito ed erosione precedentemente descritti.

Parallelamente alla variazione della quota batimetrica, il modello di evoluzione del fondo valuta il modificarsi della composizione granulometrica come conseguenza dei flussi verticali di erosione e deposito e del mescolamento dei sedimenti più superficiali; non si considerano,

però, i processi biologici e la produzione di suolo organico da parte dei microrganismi presenti sul fondale.

Ad ogni passo temporale la variazione di quota netta (dz_b/dt) è valutata come somma del contributo dovuto alla sabbia (dz_{bs}/dt) e al fango (dz_{bm}/dt):

$$\frac{dz_b}{dt} = \frac{dz_{bs}}{dt} + \frac{dz_{bm}}{dt} \quad (38)$$

con:

$$\frac{dz_b}{dt} = \frac{D_s - E_s}{1 - n}$$

$$\frac{dz_{bm}}{dt} = \frac{D_m - E_m}{1 - n}$$

Il modulo considera, infine, la presenza di uno strato attivo superficiale ben mescolato (Hirano 1971, Hirano 1972, Armanini 1995), il cui spessore Δz_{b0} può incrementarsi per effetto della deposizione, ma non può scendere al di sotto di un valore minimo assunto pari a 2 cm.

E' importante sottolineare che la scelta di assegnare allo strato attivo uno spessore di 2 cm è stata oggetto di un'analisi di sensibilità preventiva che ha evidenziato come questo valore abbia effetti trascurabili sulla soluzione. Lo stesso non accade per la composizione iniziale del fondo: per l'attendibilità dei risultati, infatti, è fondamentale assegnare all'intero dominio di calcolo una corretta composizione granulometrica.

2.1.1 Reticoli di calcolo: Laguna del 1811, del 1901 e del 2012

Il funzionamento del modello prevede la costruzione di un dominio di calcolo in grado di riprodurre in maniera soddisfacente il fenomeno reale che si intende studiare, al fine di ottenere risultati che possano ritenersi attendibili.

Come già premesso questo lavoro di tesi prende in considerazione tre diverse configurazioni della laguna di Venezia. Per ogni laguna il dominio di calcolo è schematizzato attraverso un reticolo di maglie triangolari e riproduce sia il bacino lagunare sia il tratto di mare Adriatico antistante le bocche di porto.

Il primo reticolo è formato da 81340 maglie e 42055 nodi (Figura 2-1 A). La batimetria fa riferimento alla carta idrografica redatta da Augusto Denaix tra il 1809 e il 1811, mappa che riporta per la prima volta le quote del fondo. In questa mappa le rilevazioni planimetriche come l'estensione e la posizione delle barene, dei bassifondi e della rete di canali sono precise, non

si può affermare lo stesso per quanto riguarda i dati forniti per le quote che sono molto accurati solamente per quanto riguarda la profondità dei canali principali. Ciò è dovuto allo scopo della mappa, nata per finalità militari e di navigazione. Per la definizione del dominio le restanti quote del fondo sono state ricavate attraverso la comparazione con batimetrie più recenti e tenendo conto dei fenomeni di subsidenza ed eustatismo. La carta di Augusto Dénaix risulta interessante anche perché fornisce una illustrazione accurata delle condizioni della laguna prima dei grandi interventi che saranno realizzati ad opera dell'uomo nel XIX e nel XX per favorire la navigazione

Il secondo reticolo preso in esame è composto da 80409 maglie e 41731 nodi (Figura 2-1 B) e fa riferimento alla batimetria della carta idrografica del 1901. La carta idrografica del 1901 è il primo rilievo dove viene riportato in forma generale ed estesa accanto alle profondità dei canali, quelle delle velme, degli specchi d'acqua posti in adiacenza dei canali stessi e le quote delle superfici occupate dalle barene. Fornisce quindi per la prima volta una rappresentazione complessiva e generale della batimetria della laguna, rispetto alla carta di Augusto Dénaix differisce principalmente per gli interventi realizzati dall'uomo alle bocche di Malamocco e di Lido per adeguarle alle esigenze della moderna navigazione. I moli costruiti in corrispondenza della bocca di Chioggia furono completati invece nel 1934.

Il terzo reticolo è formato da 103433 maglie e 54466 nodi (Figura 2-1 C). La batimetria del 2012 è sostanzialmente la stessa della carta idrografica del 2003 e differisce solamente in corrispondenza delle bocche di porto. Nel reticolo infatti si considera la batimetria dei fondali e le modifiche previste al termine dei lavori del Mose alle bocche di porto. La batimetria del 2003 è molto dettagliata e ricavata con tecniche diverse tra cui multibeam, single beam, GPS, ortofoto e rilievi topografici in situ.

Ogni elemento triangolare del reticolo è caratterizzato oltre che da un valore di quota del fondo anche da un coefficiente di scabrezza secondo Strickler (K_s) e da un valore a_r che rappresenta l'altezza delle irregolarità del fondale assunta pari a ± 30 cm per la laguna attuale e pari a ± 50 cm per le due lagune storiche. Le aree con valori elevati di scabrezza, cioè le zone idraulicamente più lisce, sono rappresentate dal mare e dai canali principali. Le zone con scabrezza minore sono le barene, mentre i valori intermedi caratterizzano le velme e i bassifondi.

Ogni maglia inoltre è caratterizzata da un valore percentuale di fango calcolato, come già anticipato, per ognuna delle tre configurazioni combinando le relazioni con la profondità locale e la distanza dalle bocche.

In Figura 2-1 oltre a riportare i reticoli di calcolo utilizzati si sono anche volute evidenziare le diverse entità morfologiche lagunari che caratterizzano la Laguna di Venezia. Si nota subito la notevole diminuzione nel corso degli anni delle aree occupate dalle barene.

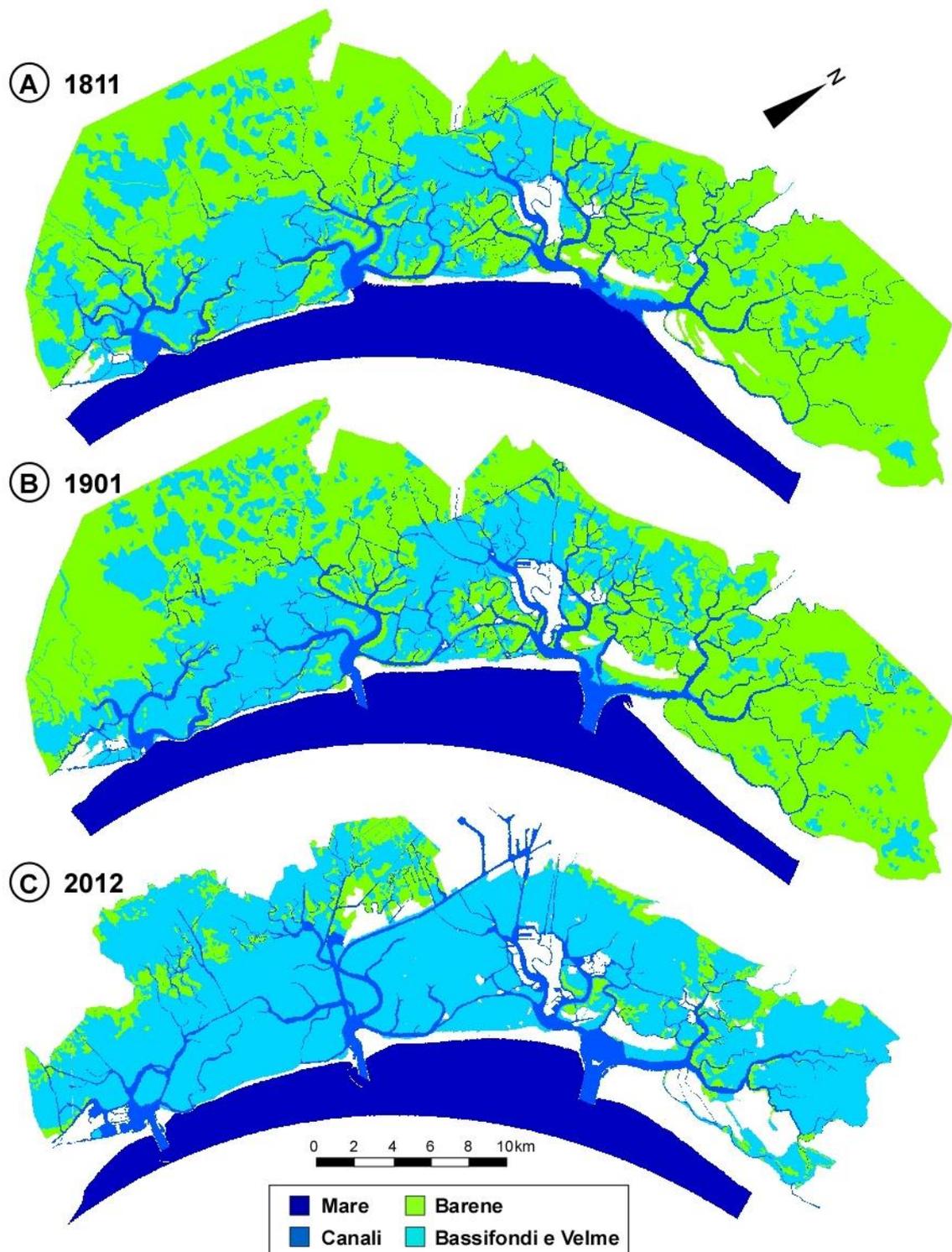


Figura 2-1 - Reticoli di calcolo utilizzati dove sono posti in evidenza i diversi tipi di forme lagunari. Bassifondi e velme sono indicate nello stesso modo in quanto aree poste sotto il livello del mare. (A) Laguna 1811 (Augusto Dénaix); (B) Laguna 1901; (C) Laguna 2012.

2.2 Il processo di Poisson

Il processo di Poisson è uno dei più importanti processi contatori. Tale processo è particolarmente utilizzato nello studio dei fenomeni naturali, in quanto consente di caratterizzare processi aleatori in modo semplice e diretto attraverso l'utilizzo di un unico parametro facilmente ricavabile a partire da misure di campo.

Un processo aleatorio $\{N(t), t \geq 0\}$ viene chiamato processo contatore se $N(t)$ rappresenta il numero totale di eventi che si sono verificati entro l'istante t .

Dalla definizione un processo contatore $N(t)$ deve soddisfare le condizioni seguenti:

- a) $N(t) \geq 0$;
- b) $N(t)$ è un valore intero;
- c) Se $s < t$ allora $N(s) < N(t)$;
- d) Per $s < t$, $N(s) - N(t)$ è uguale al numero di eventi che si sono verificati nell'intervallo compreso tra s e t .

Un processo contatore ha incrementi *indipendenti* se il numero di eventi che si verificano in intervalli di tempo disgiunti sono indipendenti. Questo vuol dire per esempio che il numero di eventi verificatisi entro l'istante 10 (cioè $N(10)$) deve essere indipendente dal numero di eventi trovati tra gli istanti 10 e 15 cioè $N(15) - N(10)$.

Un processo contatore ha incrementi *stazionari* se la distribuzione del numero di eventi trovati in un qualsiasi intervallo di tempo dipende soltanto dalla durata dell'intervallo. In altre parole se il numero di eventi nell'intervallo $(t_1 + s, t_2 + s)$ cioè $N(t_2 + s) - N(t_1 + s)$ ha la stessa distribuzione del numero di eventi trovati nell'intervallo (t_1, t_2) , cioè $N(t_2) - N(t_1)$, per ogni $t_1 < t_2$ e $s > 0$.

Il processo contatore $\{N(t), t \geq 0\}$ viene chiamato un processo di Poisson con intensità o parametro $\lambda > 0$ se sono soddisfatte le seguenti proposizioni:

1. $N(0) = 0$;
2. Per tutti i $t_0 = 0 < t_1 < \dots < t_n$, gli incrementi $N(t_1) - N(t_0), N(t_2) - N(t_1), \dots, N(t_n) - N(t_{n-1})$ sono variabili casuali indipendenti;
3. Il numero di eventi in un qualsiasi intervallo di durata t è una distribuzione di Poisson con media λt per ogni $s, t > 0$.

cioè:

$$P[N(t+s) - N(s) = n] = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad \text{per } n = 1, 2, 3 \dots n$$

E' da notare che dalla condizione (3) segue che un processo di Poisson ha incrementi stazionari e anche che $E[N(t)] = \lambda t$, ciò spiega perché λ è chiamato intensità del processo, λ infatti rappresenta il numero di arrivi per unità di tempo.

Per poter determinare se un processo arbitrario di conteggio è in realtà un processo di Poisson bisogna provare che le condizioni (1), (2) e (3) siano soddisfatte.

La condizione (1) afferma semplicemente che il conteggio degli eventi comincia nell'istante $t = 0$ e la condizione (2) può essere direttamente verificata dalla conoscenza del processo. Per dimostrare che la condizione (3) sia verificata è utile fornire un'altra definizione di processo di Poisson.

Il processo contatore $\{N(t), t \geq 0\}$ è detto un processo di Poisson con intensità λ , $\lambda > 0$, se:

1. $N(0) = 0$;
2. Il processo ha incrementi indipendenti e stazionari;
3. Per h piccolo $\Pr[N(h) = 1] = \lambda h + o(h)$;
4. Per h piccolo $\Pr[N(h) \geq 2] = o(h)$.

Data questa seconda definizione è dimostrato che è equivalente alla prima.

Il processo di Poisson è caratterizzato inoltre dalle seguenti proprietà:

- I. Considerando un processo di Poisson di parametro λ costante, allora la probabilità di avere un arrivo e uno solo nell'intervallo $(t; t+h)$ è uguale all'infinitesimo $\lambda h + o(h)$, mentre la probabilità di avere arrivi multipli è $o(h)$:

$$\Pr[N(h+t) - N(t) = 1] = \lambda h e^{-\lambda h} = \lambda h + o(h)$$

$$\Pr[N(h+t) - N(t) > 1] = o(h)$$

Mentre la probabilità che non si verificano eventi in un intervallo di tempo ridotto e arbitrario di ampiezza h è:

$$\Pr[N(h+t) - N(t) = 0] = e^{-\lambda h} = 1 - \lambda h + o(h)$$

- II. Sia $\{N(t), t \geq 0\}$ un processo di Poisson di intensità $\lambda > 0$ e si indichino con $t_0 = 0 < t_1 < t_2 < \dots$ i tempi successivi in cui si verificano gli eventi. Allora i

tempi di interarrivo $\tau_n = t_n - t_{n-1}$ sono variabili aleatorie indipendenti che seguono una distribuzione esponenziale con media $\frac{1}{\lambda}$;

- III. Se un evento del processo di Poisson $\{N(t), t \geq 0\}$, si è verificato durante l'intervallo $[0, t]$, il tempo in cui si verifica tale evento è uniformemente distribuito sull'intervallo $[0, t]$;
- IV. Se $X(t)$ e $Y(t)$ sono due processi di Poisson indipendenti tra loro, caratterizzati dai parametri λ_x e λ_y , allora anche $Z(t) = X(t) + Y(t)$ è un processo di Poisson di intensità $\lambda_x + \lambda_y$.

Un'altra importante caratteristica tipica dei processi poissoniani è quella di godere della proprietà di Markov o condizione di assenza di memoria. Si definisce processo stocastico markoviano, un processo nel quale la probabilità di transizione che determina il passaggio ad uno stato di sistema, dipende unicamente dallo stato di sistema immediatamente precedente (proprietà di Markov) e non dal come si è giunti a tale stato (in quest'ultima ipotesi si parla di processo non markoviano).

Nel presente lavoro di tesi si vuole valutare se gli eventi di risospensione possano essere approssimati con un processo di tipo poissoniano e quindi possano godere delle importanti proprietà di tale processo, tra cui quella citata sopra dell'assenza di memoria: la probabilità di osservare un certo numero di eventi in un prefissato intervallo temporale è indipendente dalla posizione di quest'ultimo, dipendono solo dalla sua durata. L'eventuale carattere poissoniano del processo di risospensione consentirebbe quindi di individuare in modo immediato le probabilità di osservare un certo numero di eventi di risospensione in un anno oppure durante una stagione.

I dati di concentrazione, che verranno trattati nel dettaglio nel capitolo successivo, sono analizzati mediante il **metodo "Peaks Over Threshold" (POT)** o "Metodo dei Picchi Sopra la Soglia": fissata una *soglia* di concentrazione C_0 si determinano tutti gli istanti temporali in cui la soglia viene superata (attraversamento verso l'alto, o "*upcrossing*") e tutti gli istanti temporali nei quali la concentrazione rientra nuovamente al di sotto della soglia (attraversamento verso il basso, o "*downcrossing*"). L'intervallo temporale tra due successivi *upcrossing* definisce il *tempo di interarrivo* tra due eventi di risospensione caratterizzati da un valore di torbidità superiore a C_0 , mentre l'intervallo temporale tra un *upcrossing* ed il successivo *downcrossing* definisce la *durata* di tali eventi. Viene definita invece *eccedenza sopra la soglia o intensità* la

distanza tra il picco di concentrazione considerato, sopra la soglia, e la soglia stessa, ovvero: $(C-C_0)_{\max}$ (Figura 2-2).

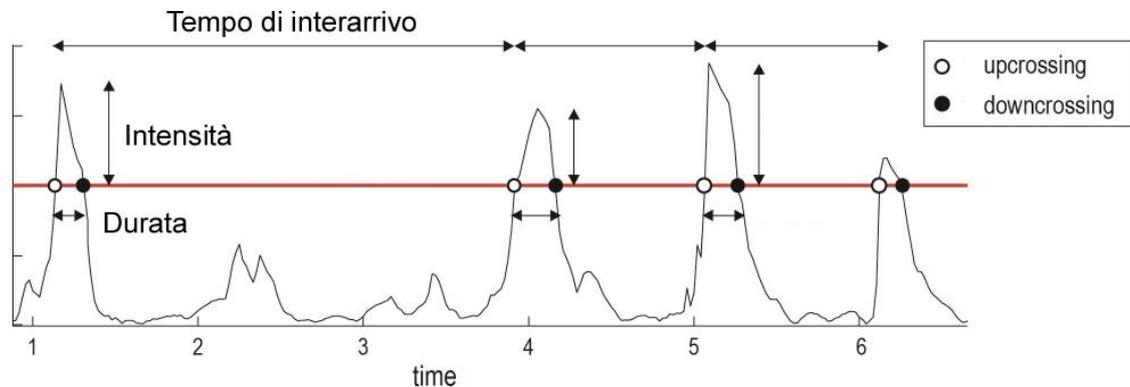


Figura 2-2 – Tempo di interarrivo, durata e intensità - Metodo "POT"

A causa delle componenti casuali che caratterizzano il segnale, i tempi di interarrivo, le durate degli eventi e gli eccessi sopra la soglia sono variabili aleatorie, di cui è possibile valutare la distribuzione di probabilità ed il valore medio.

Sfruttando dunque questo importante risultato della teoria degli estremi, si procede alla valutazione di una possibile approssimazione degli eventi di risospensione analizzati, con un processo di tipo poissoniano, per cui la distribuzione statistica dei tempi di interarrivo è di tipo esponenziale, ovvero caratterizzata dalla seguente equazione della densità di probabilità:

$$f(x) = \lambda e^{(-\lambda x)}$$

dove:

- x rappresenta il tempo di interarrivo considerato;
- λ è il parametro che caratterizza la distribuzione.

Con il parametro λ si può definire sia la media sia la varianza della distribuzione:

$$\mu = E(X) = \frac{1}{\lambda}$$

$$\sigma = E(X^2) = \frac{1}{\lambda^2}$$

Analogamente si esegue la medesima analisi dei tempi di interarrivo, anche per le durate degli eventi di risospensione e per le eccedenze sopra la soglia.

Ragionando su un segnale per il quale alla variabile aleatoria “tempo di interarrivo” si associano altre informazioni quali, come già menzionato, la durata e l’intensità, si può parlare di *Processo di Poisson marcato*. Affinchè il processo sia di Poisson marcato, è necessario che solamente i tempi di interarrivo abbiano una distribuzione esponenziale, le altre variabili possono assumere anche altre distribuzioni statistiche.

Si è voluto comunque valutare se il modello esponenziale fosse in grado di riprodurre anche le distribuzioni delle durate e degli eccessi sopra la soglia.

2.2.1 Test di Kolmogorov-Smirnov

Per verificare che effettivamente gli eventi di risospensione possano essere approssimabili con la distribuzione esponenziale si è utilizzato il **test di Kolmogorov-Smirnov (KS)**, un test statistico che permette di accettare o rifiutare l’ipotesi che la legge probabilistica ben si adatti al campione. Tale test viene anche detto “goodness-of-fit test” (prova della bontà di adattamento); è un test non parametrico che viene utilizzato nel caso di distribuzioni di probabilità continue e unidimensionali per il confronto di un campione con una distribuzione di probabilità di riferimento, oppure per la comparazione di due campioni.

In generale, permette di quantificare la distanza tra la funzione di distribuzione empirica del campione e la distribuzione di riferimento, come mostrato in Figura 2-3, oppure tra le funzioni di distribuzione empiriche dei due campioni (Figura 2-4).

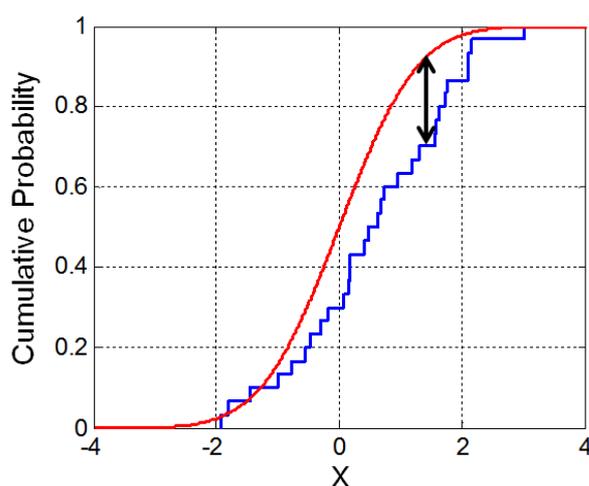


Figura 2-3 - La linea rossa riproduce la distribuzione cumulata di probabilità mentre la linea blu rappresenta la funzione di distribuzione cumulata empirica; la freccia nera invece è la distanza tra le due distribuzioni.

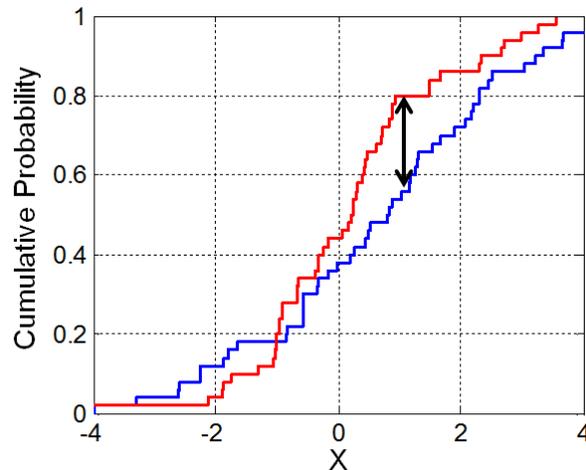


Figura 2-4 – Rappresenta il test KS in riferimento a due campioni. Le linee rossa e blu rappresentano le funzioni di distribuzione cumulata empiriche rispettivamente dei due campioni; la freccia nera invece è la distanza tra le due distribuzioni.

In seguito ci si soffermerà sul primo dei due casi sopraccitati, in quanto rientra nell'analisi di questo lavoro di tesi.

Sia X una variabile casuale generatrice continua, con funzione di ripartizione (o funzione di distribuzione cumulata) $F(x)$. Ci si prefigge come scopo quello di verificare che la variabile casuale X abbia distribuzione di probabilità uguale ad una data $F_0(x)$. In simboli, il problema di ipotesi è del tipo:

$$H_0: F(x) = F_0(x), \text{ per ogni } x;$$

contro

$$H_1: F(x) \neq F_0(x), \text{ per qualche } x.$$

Questo significa che l'ipotesi non si riferisce soltanto ad un parametro della variabile casuale X , ma all'intera sua distribuzione.

Sia allora $(X_1 \dots X_n)$ un campione casuale di ampiezza n della variabile casuale X . Sulla base di esso si vuole costruire un test per il problema di ipotesi. Poiché tale problema riguarda la funzione di ripartizione della variabile casuale X , è intuitivo basare la statistica test sulla funzione di ripartizione empirica. Dette quindi $(X_1 \dots X_n)$ le n variabili casuali campionarie ordinate, la funzione di ripartizione empirica è definita come (Stuart, Ord e Steven 1999):

$$F'_n(x) = 0 \quad \text{se } x \leq X(1)$$

$$F'_n(x) = \frac{k}{n} \quad \text{se } X(k) \leq x < X(k+1)$$

$$F'_n(x) = 1 \quad \text{se } x \geq X(n)$$

o analogamente in forma più compatta:

$$F'_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_X(i) \leq x$$

dove $I_X(i) \leq x$ è la funzione indicatrice.

La $F'_n(x)$ è una "stima campionaria" della "vera" funzione di ripartizione $F(x)$ della variabile casuale X .

Poiché $F'_n(x)$ stima la "vera" funzione di ripartizione $F(x)$, il test si basa sulla "distanza" tra $F'_n(x)$ e $F_0(x)$. Se $F'_n(x)$ e $F_0(x)$ sono "vicine" (cioè sono "sufficientemente simili") si accetta l'ipotesi nulla, mentre la si rifiuta se $F'_n(x)$ e $F_0(x)$ sono "lontane" (cioè se sono "molto dissimili"). Come "distanza" si usa la seguente definizione (Eadie, et al. 1971):

$$D_n = \sup_{-\infty < x < +\infty} |F'_n(x) - F_0(x)|$$

cioè la massima differenza (in valore assoluto) tra la funzione di ripartizione empirica $F'_n(x)$ e la funzione di ripartizione teorica (ipotizzata come vera) $F_0(x)$. Per valori "grandi" di D_n si rifiuta l'ipotesi nulla, mentre la si accetta per valori "piccoli" di D_n .

Si assume convenzionalmente che, affinché il test sia verificato, KS sia pari a 0 (D_n , piccolo) in caso contrario KS=1 (D_n , piccolo).

Si è scelto come livello di significatività quello più comunemente adottato, ovvero pari a 5% ($\alpha=0.05$).

Concludendo, se KS = 0 la distribuzione statistica dei tempi di interarrivo è esponenziale: gli eventi di risospensione possono essere approssimati con un processo poissoniano. In caso contrario gli eventi di risospensione non saranno approssimabili con tale processo.

3 Analisi della dinamica dei sedimenti nella Laguna del 1811, del 1901 e del 2012

Nel presente elaborato si è fatto ricorso al modello morfodinamico descritto nel capitolo precedente già sottoposto a processi di calibrazione delle parti che lo compongono.

Il modulo idrodinamico è stato più volte testato e validato nel corso degli anni, simulando la propagazione di diverse maree reali e confrontando i risultati del calcolo con misure di livello, velocità e portata calcolati con i valori misurati sul campo (D'Alpaos e Defina 1993, D'Alpaos e Defina 1995, D'Alpaos e Defina 2007).

Altri confronti con dati sperimentali sono stati ottenuti considerando anche l'effetto dovuto all'attrito del vento sulla superficie libera, simulando sia il set-up dovuto al vento sia il moto ondosso prodotto da diverse condizioni metereologiche reali (Carniello, Defina e D'Alpaos 2005, Carniello, Defina e D'Alpaos 2009a, Carniello, D'Alpaos e Defina 2011).

Il modulo di trasporto solido è stato calibrato in lavori recenti, in cui si è fatto ricorso alle misure di concentrazione di materiale solido presenti in laguna. Sono state condotte simulazioni numeriche (Carniello, Defina e D'Alpaos 2012) che hanno preso in considerazione eventi caratterizzati da condizioni metereologiche e di marea differenti. In un recentissimo lavoro (Carniello, Silvestri, et al. 2014) il modello di trasporto solido è stato validato considerando anche l'effetto stabilizzante della vegetazione sulla risospensione dei sedimenti nella laguna di Venezia, confrontando i risultati del modello matematico con quelli del telerilevamento.

Quindi, attraverso la modellazione matematica, e più precisamente attraverso l'utilizzo del modello del trasporto solido si sono ricavati i valori di concentrazione presi in considerazione nell'analisi delle tre lagune. Si è scelto direttamente il metodo numerico già largamente testato anche perché non sono disponibili misure di torbidità relative alle lagune storiche.

E' da rilevare inoltre (Antico 2012) che anche per la laguna attuale, pur essendo disponibili misure di torbidità in continuo, di fatto queste, per diversi motivi (interruzione del segnale, deriva dello stesso ecc.) non sono attendibili al fine di condurre misure dettagliate sull'andamento della torbidità nel tempo.

Si è assunto come intervallo temporale per la simulazione numerica un anno intero, in modo da poter ricoprire tutte le stagionalità e i relativi eventi, caratterizzati dall'intervallarsi di venti più o meno intensi o dalla totale assenza degli stessi. Per effettuare un confronto che tenesse conto delle sole caratteristiche morfologiche delle tre lagune, le forzanti imposte al sistema nei tre casi sono state assunte costanti e pari a quelle relative all'anno 2005.

L'anno 2005, in base ad un'analisi condotta calcolando le distribuzioni di probabilità delle velocità e delle direzioni del vento relative a registrazioni effettuate tra gli anni 2000 e 2008, era stato scelto come l'anno "rappresentativo" per le caratteristiche meteorologiche del vento della Laguna di Venezia. Infatti la distribuzione di probabilità del 2005 si è rivelata essere la più vicina alla distribuzione di probabilità media dell'intero periodo analizzato.

Le condizioni al contorno che costituiscono i dati di input del modello sono quindi: i livelli idrici forniti dalla piattaforma ISMAR-CNR (ubicata al largo del golfo di Venezia) e le misure di intensità e direzione del vento che si riferiscono alle registrazioni anemometriche della stazione di Chioggia.

Si riportano in seguito i grafici dei livelli [m s.m.m.], della velocità del vento e della direzione del vento [°N] per l'anno 2005 (Figura 3-1).

Si nota che i venti caratterizzati da intensità maggiori, con picchi che raggiungono e talvolta superano i 20 m/s, sono quelli che provengono da Nord e Nord-Est, ovvero i venti di Bora. Questi sono i maggiori responsabili dei processi di risospensione e quelli morfologicamente più significativi.

I venti di scirocco, invece, provengono da Sud-Est: sono caratterizzati da intensità inferiori e combinati con la crescita della marea sono una delle cause del fenomeno dell'acqua alta.

Inoltre, per poter effettuare un confronto omogeneo tra le tre Lagune, nei reticoli utilizzati per schematizzarle non si è considerata la presenza della vegetazione di fanerogame che cresce nei bassifondi. Tale vegetazione è molto importante nello studio degli eventi di risospensione poiché produce un effetto stabilizzante del terreno, limitando ove presente la concentrazione in sospensione. La localizzazione delle praterie di fanerogame è possibile solo attraverso campagne di monitoraggio, quindi, data l'impossibilità di individuarne la posizione per le lagune storiche, si è scelto di non includerle in nessuno dei reticoli di calcolo.

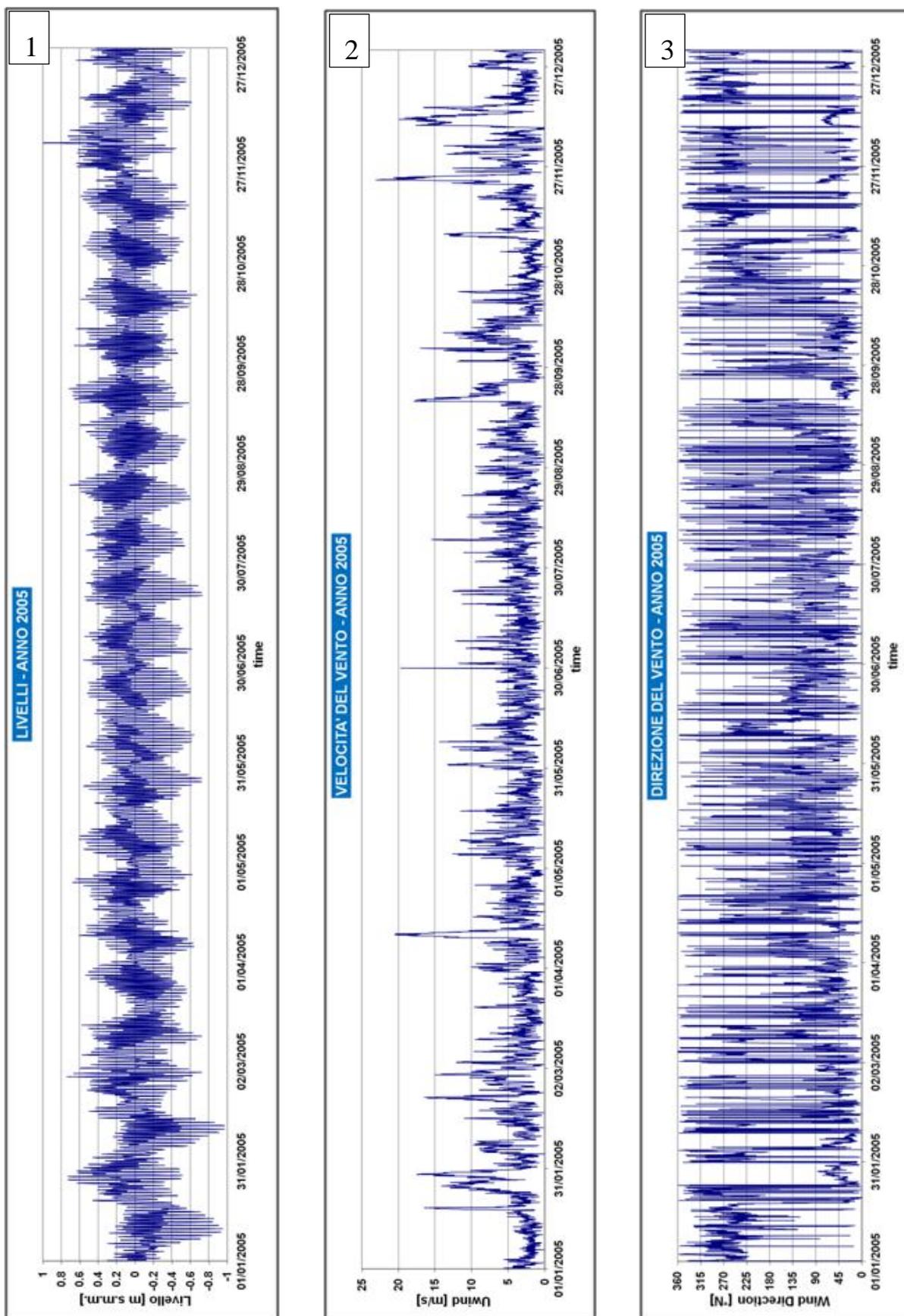


Figura 3-1 - Condizioni al contorno: 1) livelli piattaforma CNR; 2) velocità del vento; 3) direzione del vento.

Si è quindi ripetuta la simulazione utilizzando le caratteristiche relative all'anno 2005 per le tre Lagune. Ciascuno dei tre output del modello contiene le concentrazioni dei sedimenti in sospensione di tutto il dominio di calcolo per l'intera durata della simulazione. E' stato quindi possibile estrarre, in particolare, dei valori puntuali posti in corrispondenza di alcuni punti all'interno della laguna (Figura 3-2) riferiti a tutto il periodo analizzato con cadenza semioraria.

Le posizioni per le quali si è deciso di estrarre l'andamento della concentrazione al fine di condurre delle indagini puntuali preliminari coincidono, di fatto, con la posizione delle stazioni di monitoraggio del Magistrato delle Acque attualmente in servizio attivo (stazioni VE) e con la posizione di una stazione dismessa, ma situata in un'area interessante dal punto di vista del processo indagato (stazione 2BF).



Figura 3-2 - Ubicazione delle stazioni VE1-VE10 e 1BF-2BF all'interno della Laguna di Venezia

Le suddette stazioni presentano inoltre una distribuzione piuttosto uniforme all'interno della laguna. Per quanto riguarda la stazione 1BF, data la sua ubicazione (quasi coincidente con la stazione VE8), i valori ricavati mediante il modello rientrano nei dati di concentrazione ottenuti per la stazione VE8.

Prima di procedere all'analisi dei risultati, è stato necessario tener conto della presenza nel bacino lagunare di una concentrazione minima di sedimenti in sospensione anche in assenza di vento. Essa è dovuta principalmente alla presenza di materiale organico in sospensione che può essere visto come un "rumore di fondo" e che non viene considerato nel modello matematico.

Si è deciso quindi di incrementare i dati di un valore rappresentativo di tale effetto, che potesse risultare ragionevole e valido per tutte le undici stazioni di riferimento. Tale valore è stato dedotto analizzando i valori di torbidità misurati, concentrando l'attenzione sui periodi caratterizzati da assenza di vento. Siffatta analisi ha portato ad individuare in 10 mg/l l'incremento da attribuire alle concentrazioni in sospensione calcolate.

3.1 Determinazione della soglia di concentrazione

Come accennato in precedenza (paragrafo 2.2) i dati di concentrazione ricavati per le tre lagune sono stati analizzati mediante il metodo "Peaks Over Threshold" (POT). Si sono presi in considerazione dapprima i dati di concentrazione puntuali per poi passare all'analisi spazialmente distribuita sull'intera laguna.

Si riporta la definizione dei parametri che caratterizzano tale metodo:

- l'intervallo temporale tra due successivi upcrossing definisce l'*interarrivo* tra due eventi di risospensione caratterizzati da un valore di concentrazione superiore alla soglia C_0 ;
- l'intervallo temporale tra un upcrossing ed il successivo downcrossing definisce la *durata* di tali eventi;
- la distanza tra il picco di concentrazione considerato (sopra la soglia) e la soglia stessa, ovvero $(C-C_0)_{\max}$, definisce l'*eccedenza di concentrazione sopra la soglia* o *intensità* dell'evento.

Data la casualità che caratterizza le componenti del segnale, i tempi di interarrivo, le durate e le intensità degli eventi sono variabili aleatorie. E' possibile quindi valutarne la distribuzione

di probabilità ed il valore medio.

Per effettuare l'analisi mediante il metodo dei POT risulta importante individuare una soglia di concentrazione significativa per i processi erosivi. Questo richiede una qualche cautela, in quanto ad essa è associata una forte dose di incertezza.

La soglia di concentrazione, infatti, dovrebbe rappresentare una sorta di valore di fondo, che dovrebbe permettere di distinguere i veri e propri eventi di risospensione dovuti all'azione delle forzanti meteorologiche (ovvero gli eventi che si intendono analizzare nel presente lavoro) da valori di torbidità ben più bassi legati ad altri fattori quali, ad esempio, sostanze biologiche ed input di sedimenti dall'esterno.

Pertanto, la definizione di un unico valore di soglia per tutto il bacino lagunare e per le tre configurazioni considerate è in qualche misura arbitraria, potendo le caratteristiche locali dell'idrodinamica e della morfologia condizionare la distribuzione spaziale e temporale di tale valore.

Il valore di soglia C_0 scelto in un precedente lavoro di tesi (Antico 2012) era stato definito pari a 50 mg/l. Si è voluta però ripetere l'analisi soprattutto per valutare un valore di soglia che fosse significativo anche per le lagune storiche.

Dal punto di vista applicativo, si sono scelti quattro valori di C_0 , in modo da poter individuare l'effetto della soglia stessa sulla possibilità di descrivere gli eventi di risospensione come processi di tipo poissoniano. Le soglie di concentrazione considerate nelle analisi sono:

- $C_0 = 30$ mg/l;
- $C_0 = 40$ mg/l;
- $C_0 = 50$ mg/l;
- $C_0 = 60$ mg/l.

La serie di dati di concentrazione per le diverse stazioni, è stata preventivamente filtrata attraverso l'introduzione di una media mobile, caratterizzata da una finestra di ampiezza di 6 ore (tre ore prima e tre ore successive all'istante considerato). Tale intervallo temporale garantisce una media non troppo ampia, consentendo di non filtrare gli eventuali effetti riconducibili alla marea (caratterizzata da un periodo di 12 ore) e di mantenere quindi la periodicità del segnale.

L'utilizzo della media mobile permette di rimuovere i cosiddetti cross-up e cross-down "spuri" legati ad oscillazioni rapide del segnale collegate ad analoghe rapide variazioni presenti

nella forzante del vento e che avrebbero comportato eventi correlati tra loro appartenenti ad uno stesso evento di risospensione e dunque non inquadrabili nel processo di Poisson.

Per ogni stazione e per ciascun valore di soglia si sono ottenuti i seguenti parametri:

- Tempo di interarrivo medio (mean interarrival), espresso in giorni [gg];
- Durata media (mean duration), espressa in ore [h];
- Media degli eccessi sopra la soglia o intensità, ossia $(C-C_0)_{\max}$ (mean peak), espresso in [mg/l].

Questi parametri sono rappresentati al variare della soglia di concentrazione. Per fini semplificativi si è scelta come stazione rappresentativa la stazione VE1 riportando nelle figure 3-3; 3-4; 3-5 i grafici relativi alle tre configurazioni della laguna di Venezia.

Al crescere di C_0 si nota un incremento sia in termini di interarrivo medio, sia di durata media, che di intensità media.

Per $C_0 = 60$ mg/l, in particolare per la laguna del 1811 e del 1901, si riscontra una diminuzione di durate e intensità medie; ciò deriva dal fatto che, per valori di soglia elevati, c'è una perdita di significatività del numero di eventi. All'aumentare della soglia infatti gli eventi che superano il valore di soglia si riducono fino a diventare un numero troppo esiguo per essere considerato un campione rappresentativo.

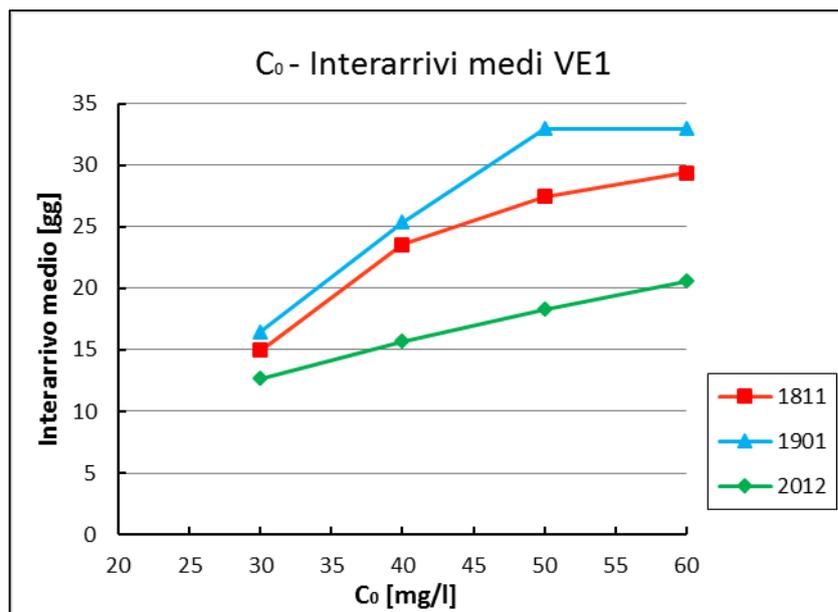


Figura 3-3 - Interarrivi medi al variare di C_0 della stazione VE1 per la laguna del 1811, del 1901 e del 2012.

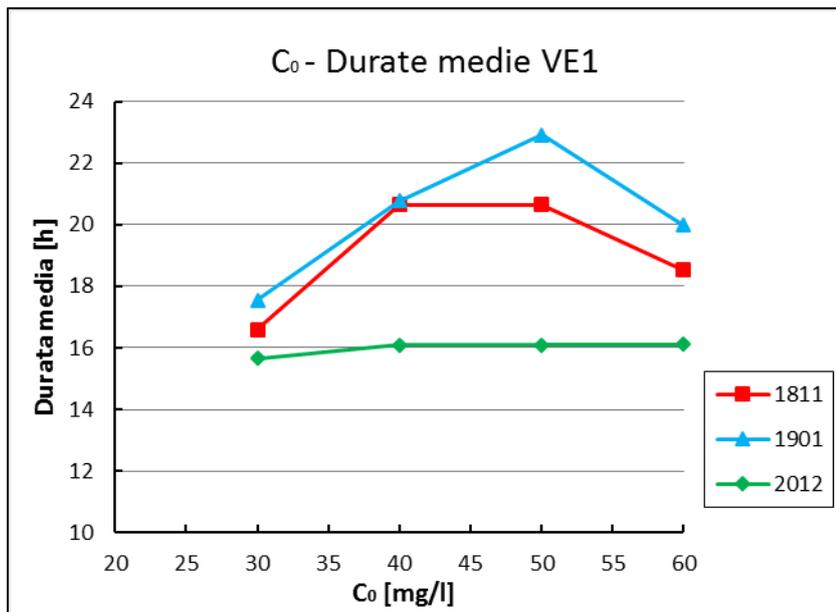


Figura 3-4 - Intensità medie al variare di C₀ della stazione VE1 per la laguna del 1811, del 1901 e del 2012.

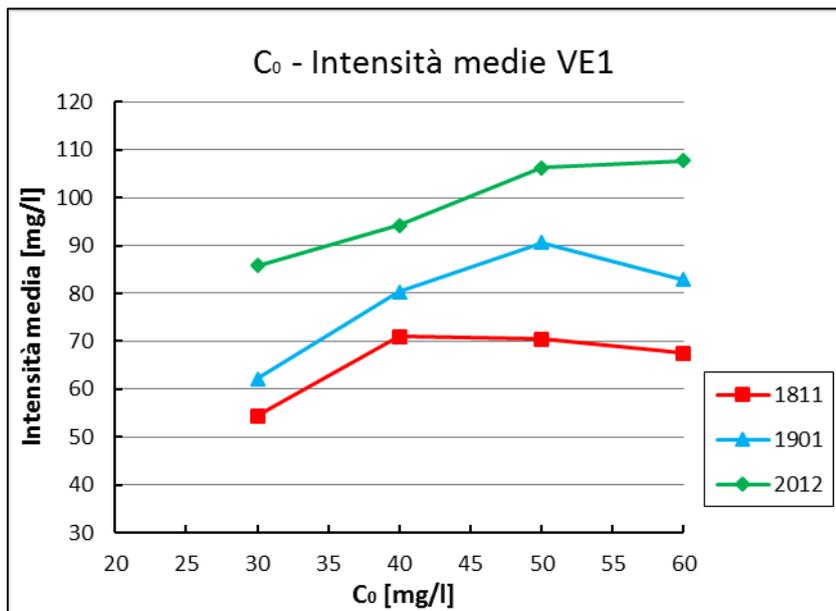


Figura 3-5- Durata medie al variare di C₀ della stazione VE1 per la laguna del 1811, del 1901 e del 2012

Per C₀ = 60 mg/l, in particolare per la laguna del 1811 e del 1901, si riscontra una diminuzione di durate e intensità medie; ciò deriva dal fatto che, per valori di soglia elevati, c'è una perdita di significatività del numero di eventi. All'aumentare della soglia infatti gli eventi che superano il valore di soglia si riducono fino a diventare un numero troppo esiguo per essere considerato un campione rappresentativo.

Come già discusso nel capitolo precedente, se la distribuzione statistica dei tempi di

interarrivo è di tipo esponenziale, gli eventi di risospensione possono essere approssimati con un processo di tipo poissoniano.

Inoltre, si è voluto testare se il modello esponenziale sia in grado di riprodurre anche le distribuzioni delle durate e delle intensità sopra la soglia.

Si ricorda che la distribuzione esponenziale è caratterizzata dalla seguente equazione della densità di probabilità:

$$f(x) = \lambda e^{(-\lambda x)}$$

dove:

- x rappresenta la variabile aleatoria considerata ovvero il tempo di interarrivo considerato o la durata o l'intensità sopra la soglia;
- λ corrisponde al parametro della distribuzione dal quale si può facilmente ricavare la media e la varianza ($\mu = 1/\lambda$; $\sigma = 1/\lambda^2$)

Per verificare se gli eventi di risospensione possano essere approssimabili con una distribuzione esponenziale, si è utilizzato il test di Kolmogorov-Smirnov (KS), con un livello di significatività del 5% ($\alpha=0.05$). Affinché il test sia soddisfatto è necessario che KS sia pari a 0; in caso contrario $KS=1$.

L'esito del test è stato tabulato per tutte le stazioni di misura in tre distinte tabelle per ognuna delle configurazioni utilizzate per la laguna (Figura 3-6). In rosso sono evidenziati i casi per i quali il test non viene verificato, in giallo quelli per cui il numero di eccedenze sopra soglia è minore di cinque mentre in grigio i casi in cui non viene fatto il test, poiché gli upcrossing sono nulli o uguali a uno.

Come già ricordato per poter definire il processo di Poisson il test deve risultare verificato per gli interarrivi e, se è positivo anche per durate e intensità significa che anche queste due variabili aleatorie sono distribuite esponenzialmente. Dalla Figura 3-6 si può osservare che, considerando in contemporanea tutte e tre le lagune, la concentrazione per cui il test risulta maggiormente soddisfatto per gli interarrivi è $C_0 = 40$ mg/l; fanno eccezione solamente la stazione VE9 per il 1811, e la stazione VE2 per il 1901.

	LAGUNA 1811											
	Co = 30 mg/l			Co = 40 mg/l			Co = 50 mg/l			Co = 60 mg/l		
	interarrival	intensity	duration									
VE1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE6	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
VE7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VE8	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
VE9	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
VE10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2BF	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

	LAGUNA 1901											
	Co = 30 mg/l			Co = 40 mg/l			Co = 50 mg/l			Co = 60 mg/l		
	interarrival	intensity	duration									
VE1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE2	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
VE3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VE5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
VE7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VE8	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
VE9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VE10	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2BF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	LAGUNA 2012											
	Co = 30 mg/l			Co = 40 mg/l			Co = 50 mg/l			Co = 60 mg/l		
	interarrival	intensity	duration									
VE1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE4	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
VE5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE8	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
VE9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VE10	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2BF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3-6 - Test di Kolmogorov-Smirnov; 0 = test verificato; 1 = test non verificato; col colore giallo sono evidenziati i casi in cui le eccedenze sopra soglia sono minori di cinque; col colore grigio sono evidenziati i casi in cui non si può effettuare il test poiché gli upcrossing sono nulli o uguali a 1.

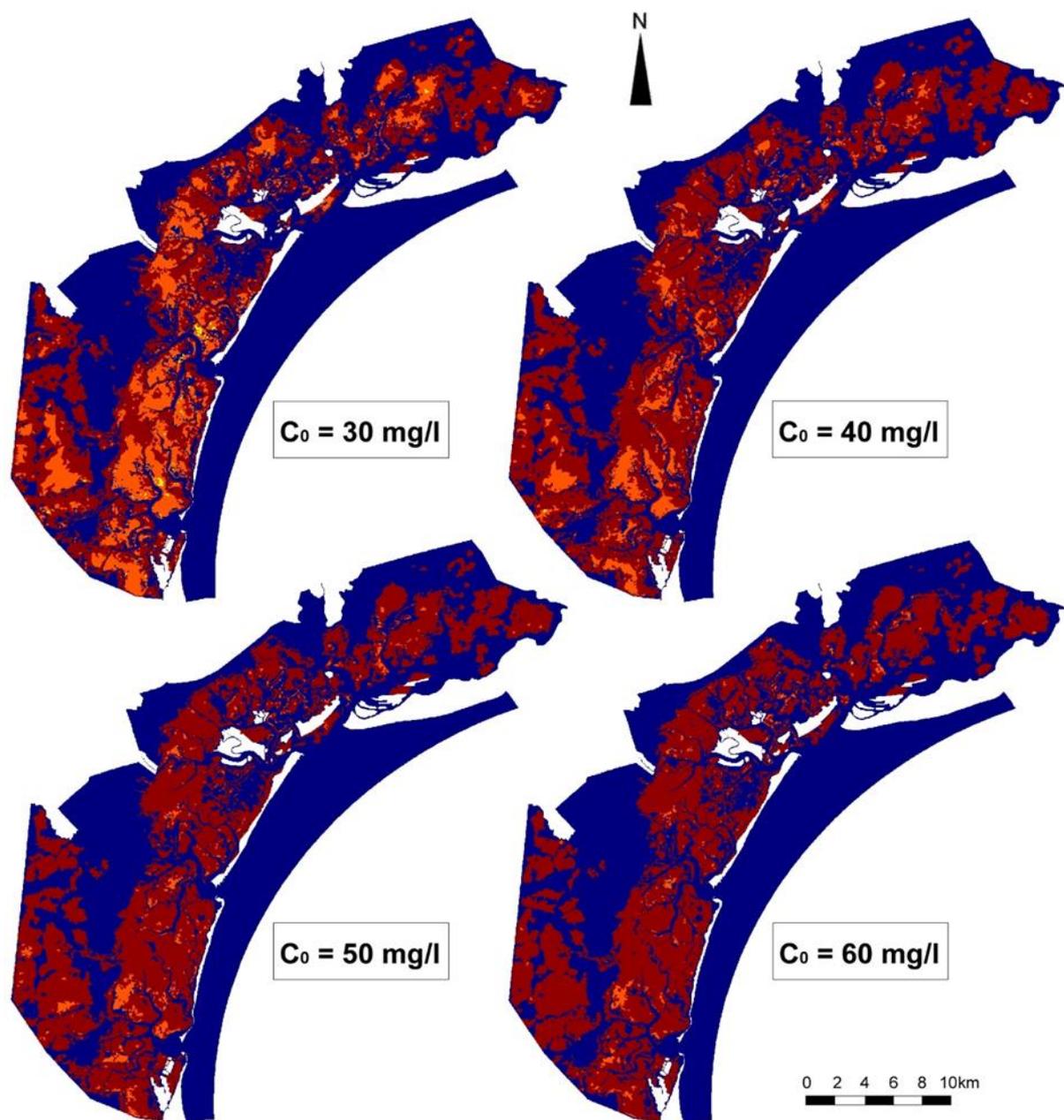
Si può notare che per soglie ridotte come $C_0 = 30 \text{ mg/l}$ il test non risulta sempre soddisfatto, mentre a partire da $C_0 = 50 \text{ mg/l}$ c'è un maggior numero di stazioni per cui il test non può essere effettuato. Se si abbassa troppo la soglia il rischio è di includere eventi deterministici come le deboli risospensioni dovute alle correnti di marea che non possono essere descritti con un processo poissoniano. Alzando invece la soglia il processo continua a rimanere poissoniano, ma il numero di eccedenze sopra soglia diminuisce. Questo perché all'aumentare della soglia bisognerebbe anche aumentare la durata della simulazione ovvero la lunghezza del segnale per avere un campione significativo.

Si è quindi valutato, effettuando il test di Kolmogorov-Smirnov per tutte le maglie del reticolo, se la soglia $C_0 = 40 \text{ mg/l}$ fosse idonea anche per l'intera laguna.

Nelle mappe (Figure 3-7; 3-8; 3-9) si sono volute distinguere le maglie con colori diversi. Sono evidenziate le maglie in cui il test non è verificato (blu), le maglie in cui il test è verificato sia per i tempi di interarrivo sia per le durate che per le intensità (rosso), le maglie in cui il test è verificato per i tempi di interarrivo e una solo delle altre variabili (intensità o durate) (arancione) ed infine le maglie in cui il test è verificato per i tempi di interarrivo e non è verificato per le intensità e per le durate (giallo).

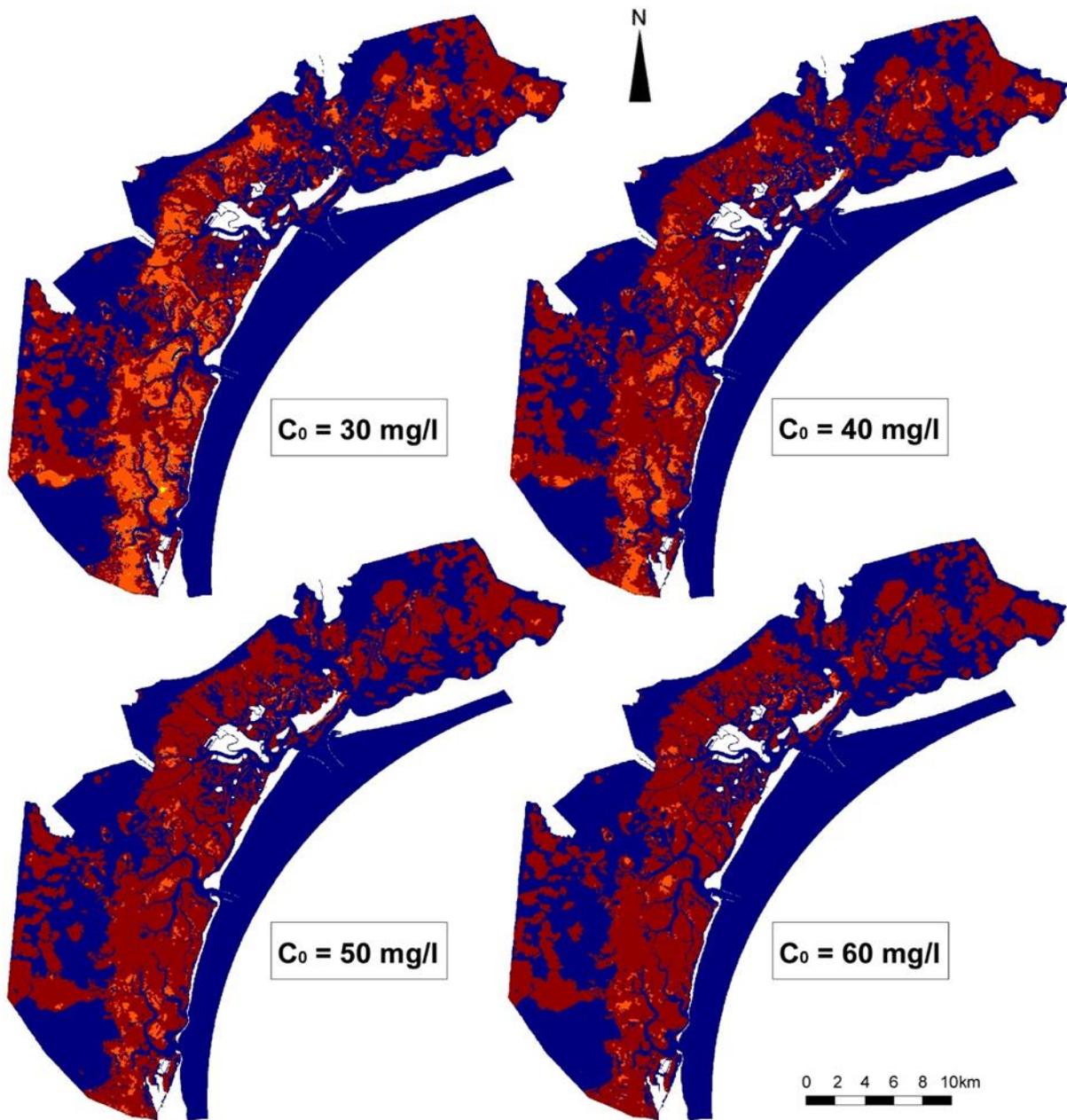
Dal confronto dei quattro valori di concentrazione soglia considerati e delle tre lagune si riscontra per $C_0 = 40$ mg/l il maggior numero di maglie dove il test è verificato per gli interarrivi. Rispetto alla soglia $C_0 = 50$ mg/l ci sono più maglie in cui il test non è verificato o per le intensità o per le durate. Ciò infatti non è rilevante ai fini dell'analisi, in quanto è sufficiente che il test sia verificato per i tempi di interarrivo per poter definire un processo di tipo poissoniano.

La scelta di una soglia di concentrazione che fosse idonea sia per la laguna 1811, sia per la laguna 1901 che per la laguna 2012, è ricaduta pertanto su $C_0 = 40$ mg/l.



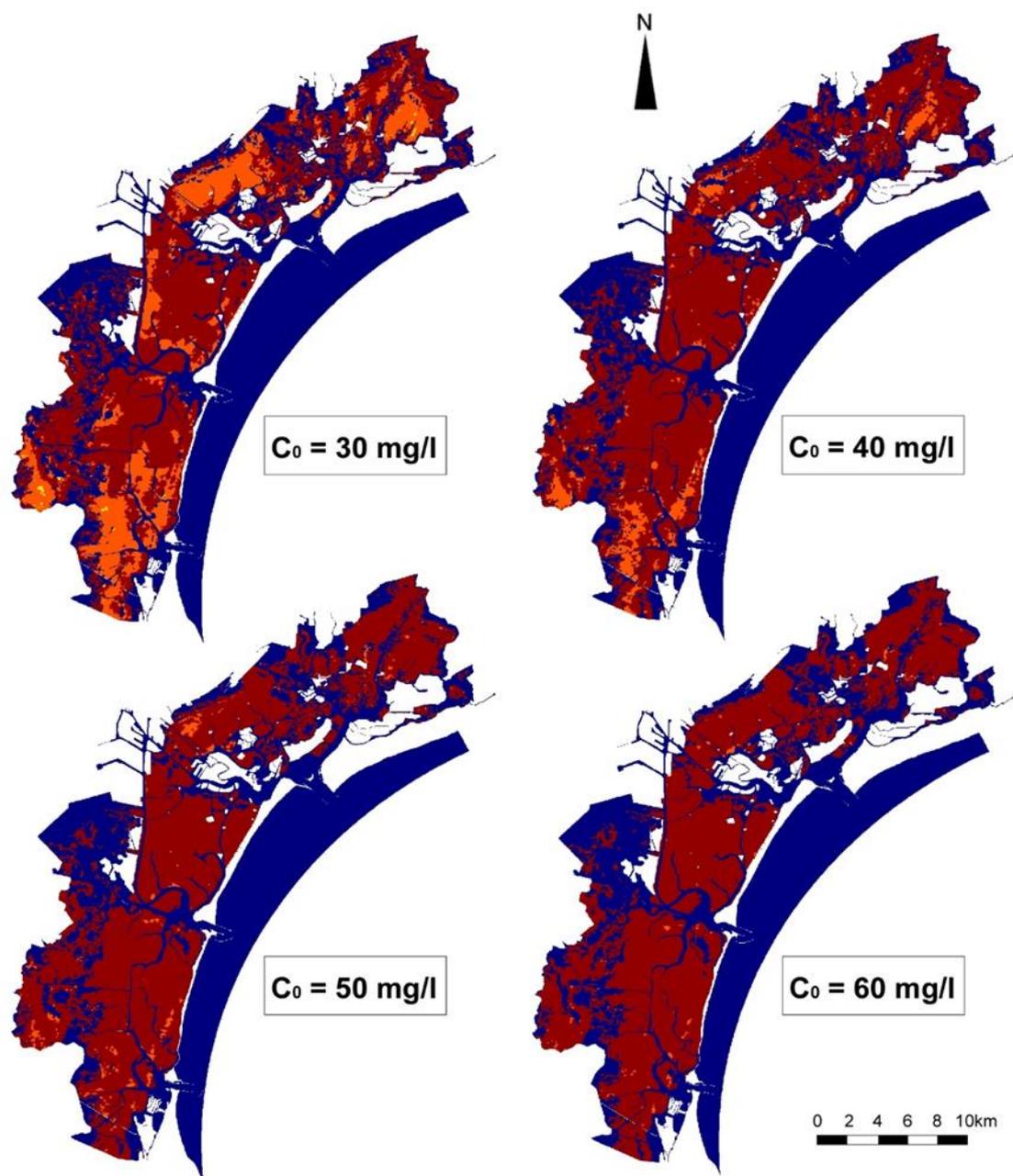
- Test di Kolmogorov-Smirnov non verificato
- Test di Kolmogorov-Smirnov verificato per interarrivi, intensità e durate
- Test di Kolmogorov-Smirnov verificato per interarrivi e per intensità o durate
- Test di Kolmogorov-Smirnov verificato per interarrivi e non verificato per intensità e durate

Figura 3-7 – Test di Kolmogorov- Smirnov per la laguna del 1811



- Test di Kolmogorov-Smirnov non verificato
- Test di Kolmogorov-Smirnov verificato per interarrivi, intensità e durate
- Test di Kolmogorov-Smirnov verificato per interarrivi e per intensità o durate
- Test di Kolmogorov-Smirnov verificato per interarrivi e non verificato per intensità e durate

Figura 3-8 – Test di Kolmogorov- Smirnov per la laguna del 1901



- Test di Kolmogorov-Smirnov non verificato
- Test di Kolmogorov-Smirnov verificato per interarrivi, intensità e durate
- Test di Kolmogorov-Smirnov verificato per interarrivi e per intensità o durate
- Test di Kolmogorov-Smirnov verificato per interarrivi e non verificato per intensità e durate

Figura 3-9 - Test di Kolmogorov- Smirnov per la laguna del 2012

3.2 Analisi puntuale delle misure di concentrazione

Dopo aver stabilito la soglia di concentrazione ottimale per l'applicazione del metodo "Peak Over Threshold" pari a $C_0 = 40$ mg/l si è effettuata l'analisi delle misure di concentrazione per tutte le stazioni delle tre lagune.

Nelle figure 3-10; 3-11; 3-12 sono riportati rispettivamente i tempi di interarrivo medi, le intensità medie e le durate medie.

Per le stazioni VE4, VE7, VE9 non è stato possibile riportare per tutte le lagune interarrivi, intensità e durate medie, in quanto in tali casi o gli eventi non superano la soglia o sono caratterizzati da un solo upcrossing, ciò è dovuto alla posizione geografica di tali stazioni.

La stazione VE4 è collocata infatti in prossimità della città di Venezia, risulta dunque protetta dai venti di bora. La stazione VE7 è ubicata nella laguna settentrionale, dove il fetch, il tratto di mare libero in cui spira il vento, è limitato dalla presenza di isole e barene. La stazione VE9 invece pur essendo localizzata nella laguna centro-meridionale, dove il vento di Bora è capace di generare un moto ondoso di fatto non limitato dal fetch, non risulta esposta al vento per la presenza di barene. Si nota inoltre in queste tre stazioni che mentre per le lagune storiche l'analisi non viene quasi mai effettuata, per il 2012 invece presentano gli interarrivi più alti, ciò è dovuto alla maggiore presenza di barene nelle lagune storiche che svolgevano una funzione di protezione

Per i tempi di interarrivo e per le durate non è possibile evidenziare un qualche trend negli anni caratteristico di tutte le stazioni prese in esame. Le intensità medie presentano al contrario una decisa tendenza all'aumento, poco marcata e altalenante tra il 1811 e il 1901, ben marcata invece tra il 1901 e il 2012.

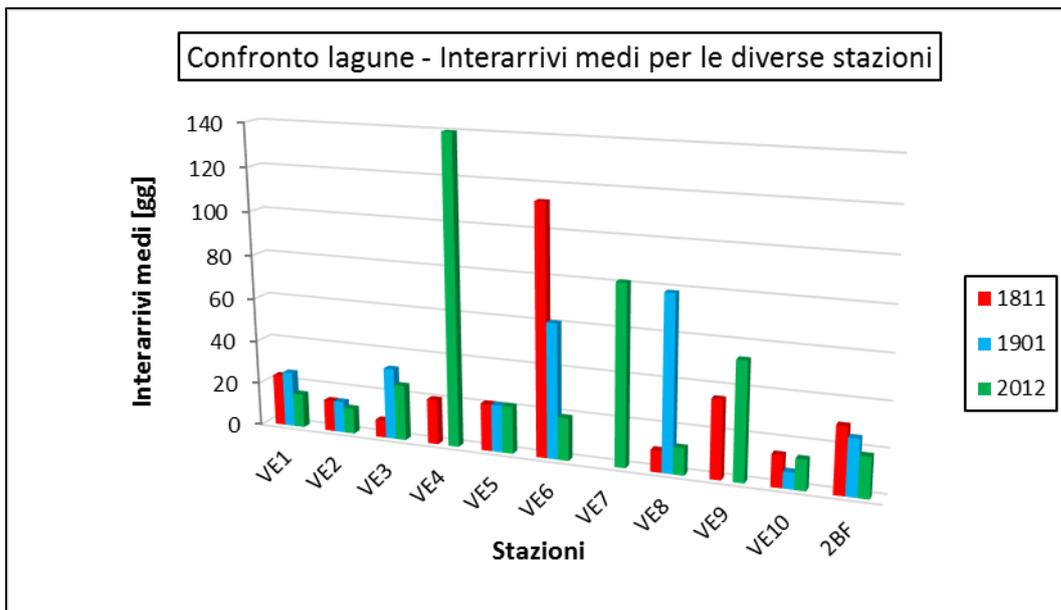


Figura 3-10 - Interarrivi medi al variare del reticolo considerato (1811, 1901, 2012) per tutte le stazioni.

Concentrazione C0 = 40 mg/l.

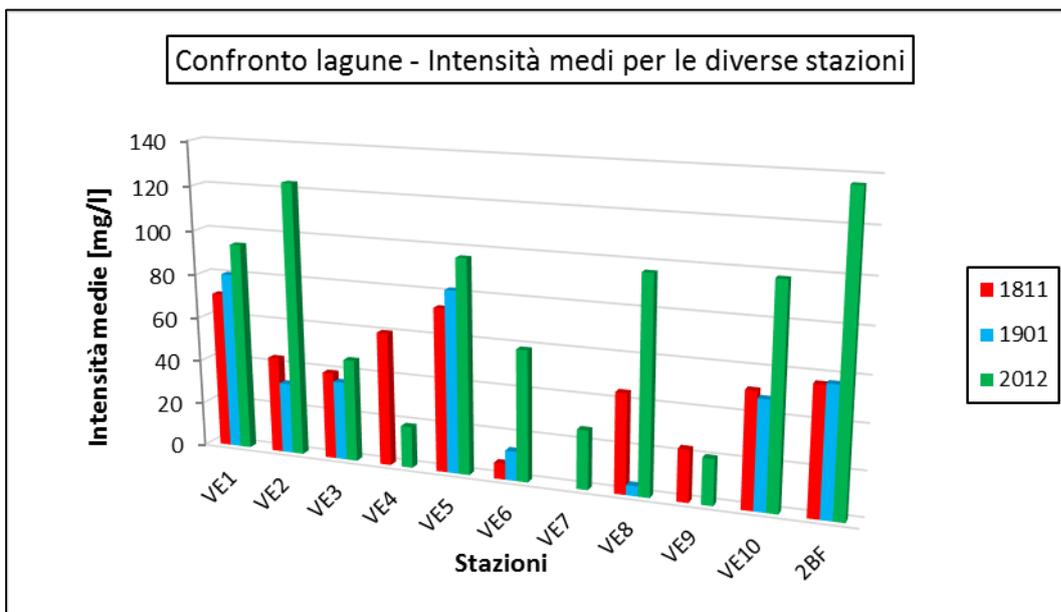


Figura 3-11 - Intensità medie al variare del reticolo considerato (1811, 1901, 2012) per tutte le stazioni.

Concentrazione C0 = 40 mg/l.

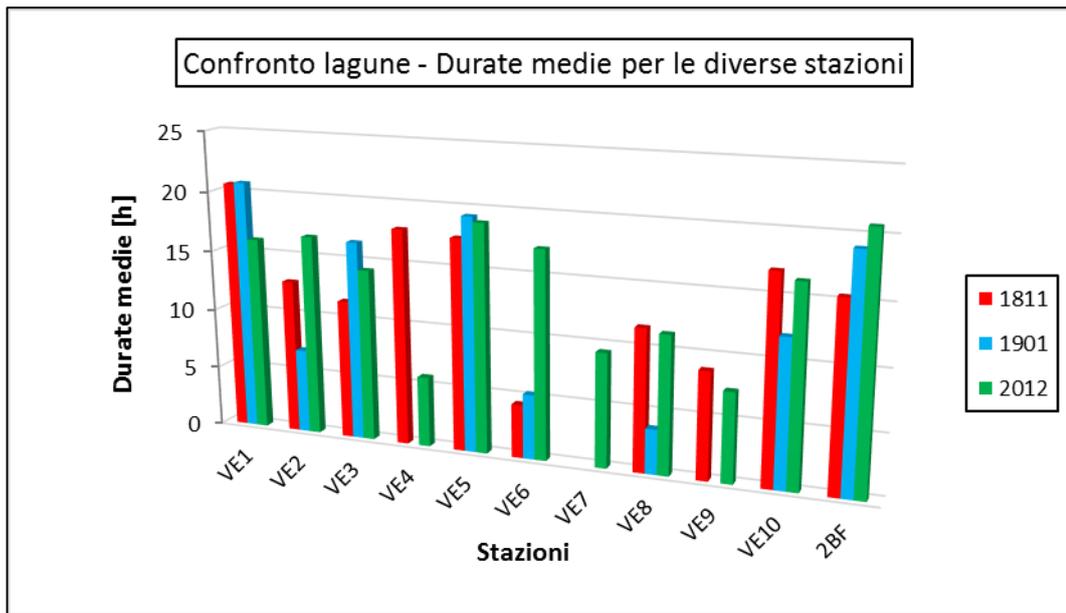


Figura 3-12 - Durate medie al variare del reticolo considerato (1811, 1901, 2012) per tutte le stazioni.
Concentrazione $C_0 = 40$ mg/l.

Si riporta nelle figure 3-13; 3-15; 3-17 l'evoluzione temporale della concentrazione di sedimenti in sospensione calcolati con il modello, rispettivamente per la laguna 1811, per la laguna 1901 e per la laguna 2012, considerando a titolo esemplificativo le tre stazioni: VE1, VE3, 2BF poste in corrispondenza di aree non direttamente soggette ad interventi da parte dell'uomo e che hanno mantenuto negli anni caratteristiche di esposizione simili. Tali stazioni sono infatti posizionate nella parte centro-meridionale della laguna che risulta essere la zona maggiormente soggetta ai venti di Bora e meno protetta dalle barene. In ciascun grafico viene rappresentata anche la soglia di concentrazione scelta ($C_0 = 40$ mg/l).

Si riportano inoltre nelle figure 3-14; 3-16; 3-17 le corrispondenti distribuzioni di probabilità ottenute a partire dai dati forniti dal modello e confrontate con le distribuzioni esponenziali. Sono rappresentate le distribuzioni di probabilità dei tempi di interarrivo, delle intensità dei picchi che eccedono la soglia e delle durate degli eventi sopra la soglia.

I pallini rappresentano per ogni valore di interarrivo, intensità e durata (x) la probabilità di superamento calcolata $P_c(X > x)$, ricavata attraverso la formula di Weibull:

$$P_c(X > x) = \frac{i}{N + 1} \quad i = 1, \dots, N$$

La curva teorica della probabilità di superamento $P_t(X > x)$ è stata ricavata dall'imposizione dell'uguaglianza fra la media campionaria dei dati e la definizione di media della distribuzione esponenziale $1/\lambda$:

$$P_t(X > x) = e^{-\lambda x}$$

dove $\lambda = 1/E(x)$ e x sono i valori di interarrivo, intensità e durata usati per creare le distribuzioni presi, con un determinato passo, nell'intervallo tra il massimo e il minimo valore misurato.

Si riscontra per tutte e tre le lagune una buona corrispondenza tra la curva teorica e i dei dati del modello segnale evidente che le distribuzioni di probabilità calcolate possono essere ben rappresentate da distribuzioni esponenziali. Questo risultato era tuttavia già stato evidenziato dal test di Kolmogorov-Smirnov.

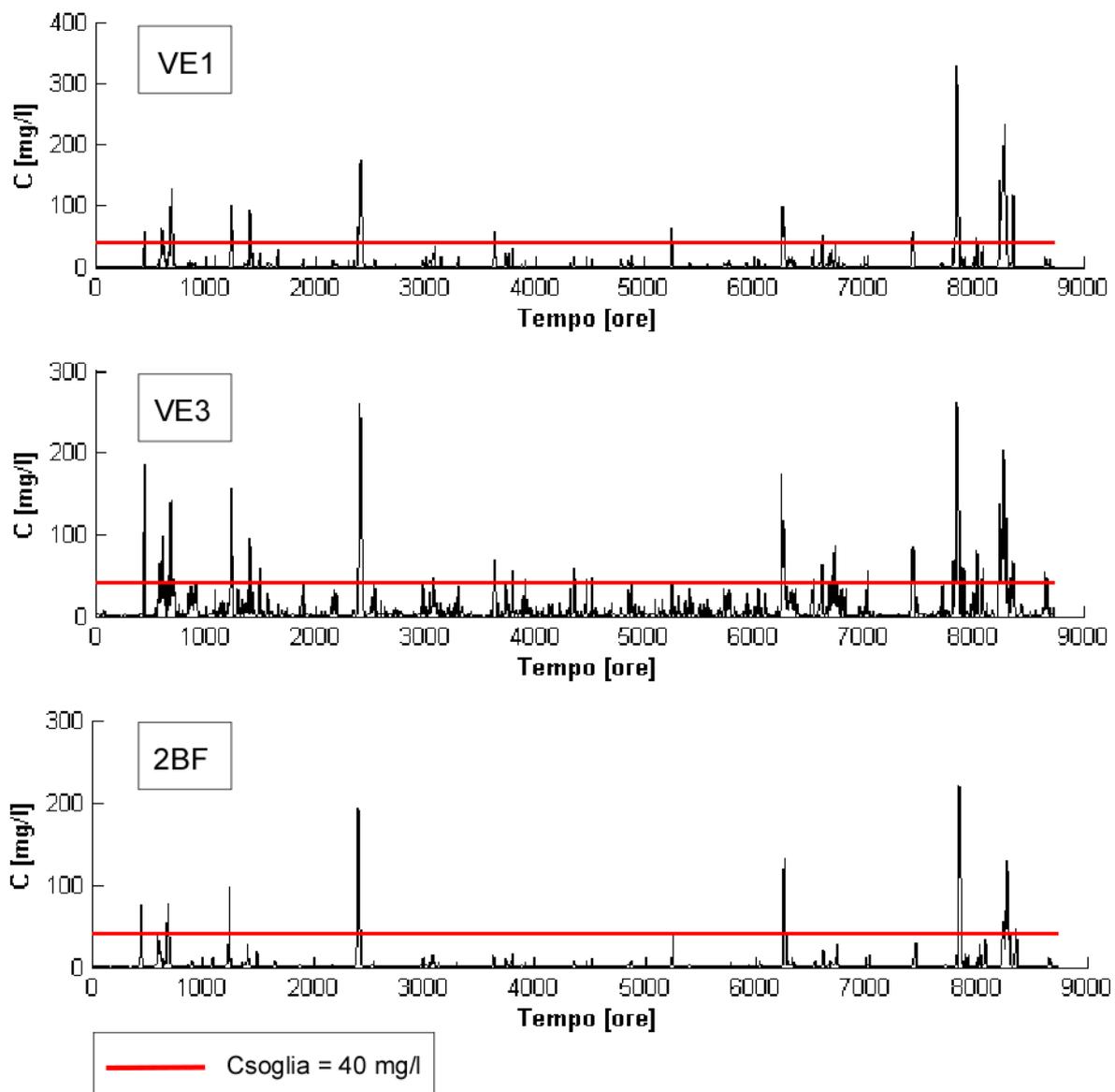


Figura 3-13 – Andamento della concentrazione dei sedimenti nel tempo per le stazioni VE1, VE3, 2BF relative alla Laguna del 1811 (Dénaix)

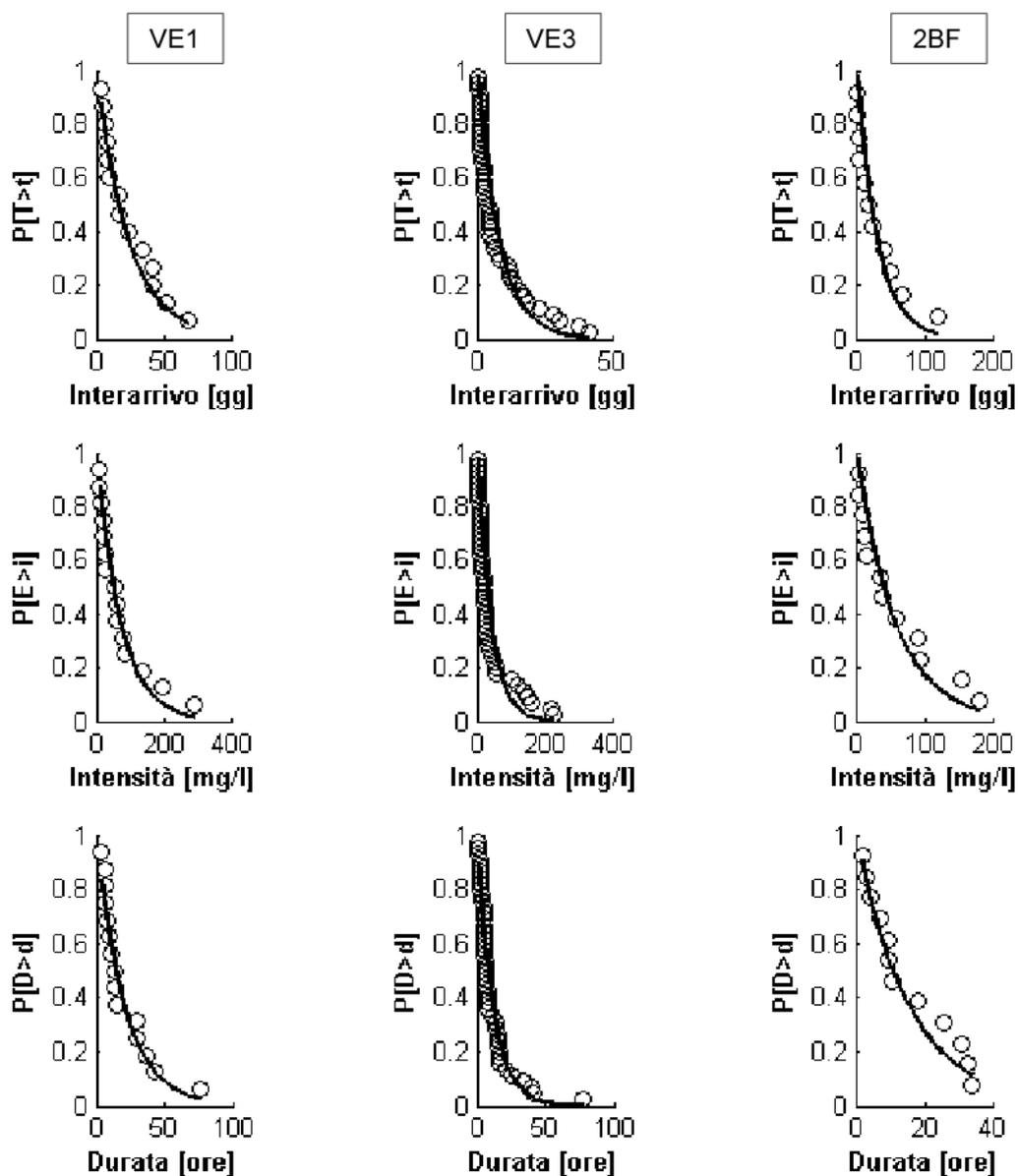


Figura 3-14- Grafici delle distribuzioni di probabilità per le stazioni VE1, VE3, 2BF dei tempi di interarrivo, delle intensità e delle durate relativi alla Laguna del 1811.

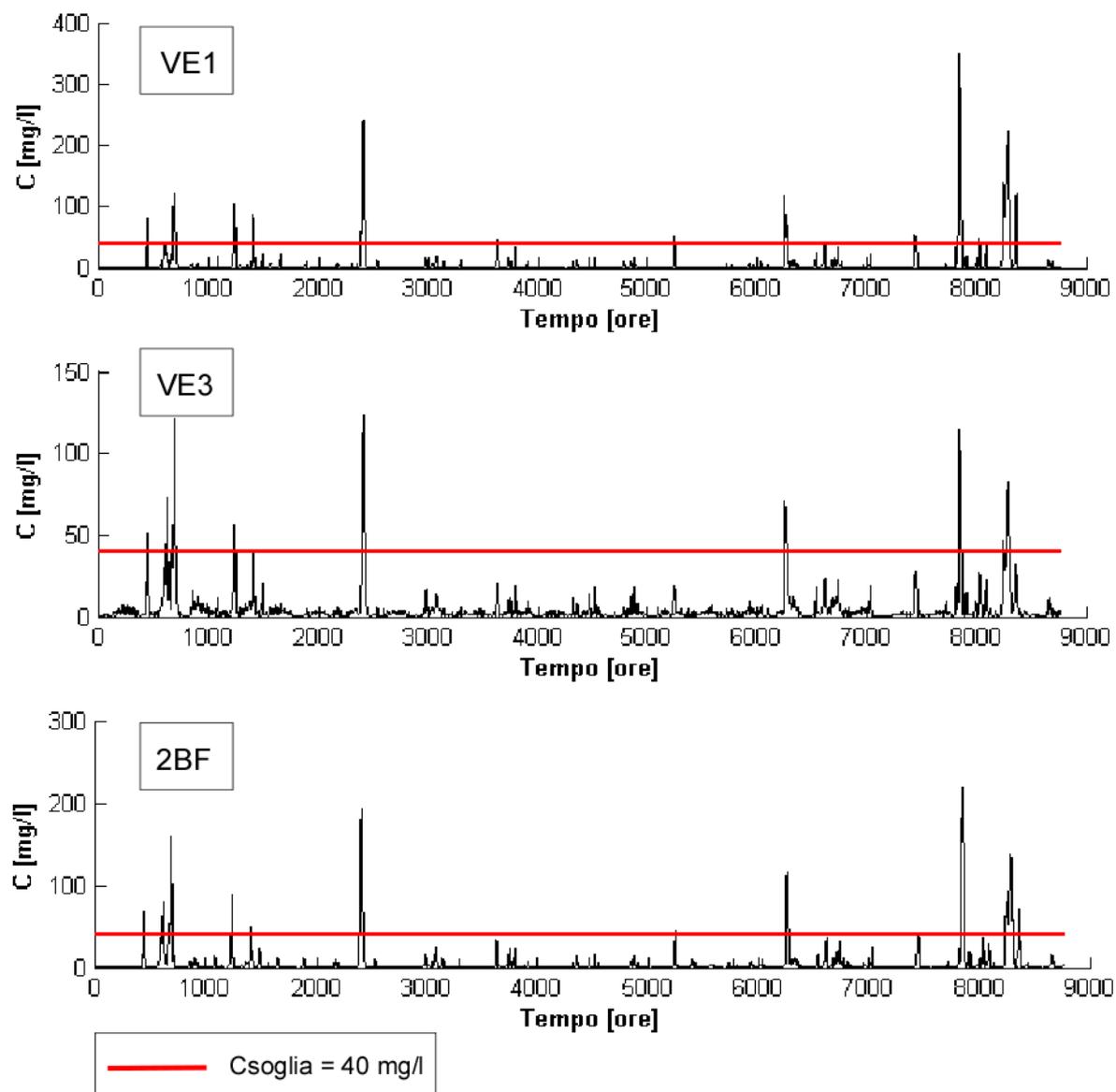


Figura 3-15 – Andamento della concentrazione dei sedimenti nel tempo per le stazioni VE1, VE3, 2BF relative alla Laguna del 1901.

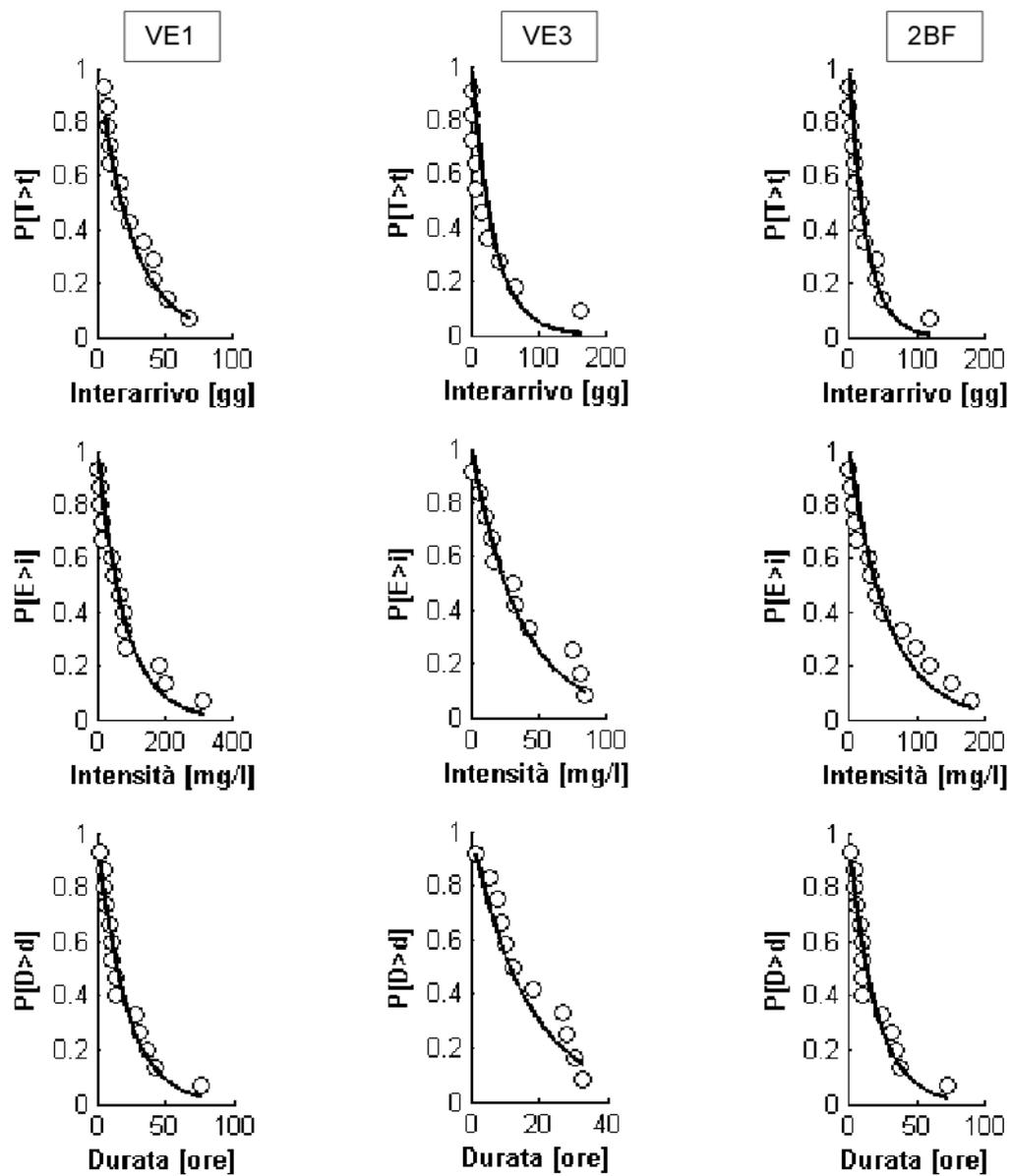


Figura 3-16 - Grafici delle distribuzioni di probabilità per le stazioni VE1, VE3, 2BF dei tempi di interarrivo, delle intensità e delle durate relativi alla Laguna del 1901.

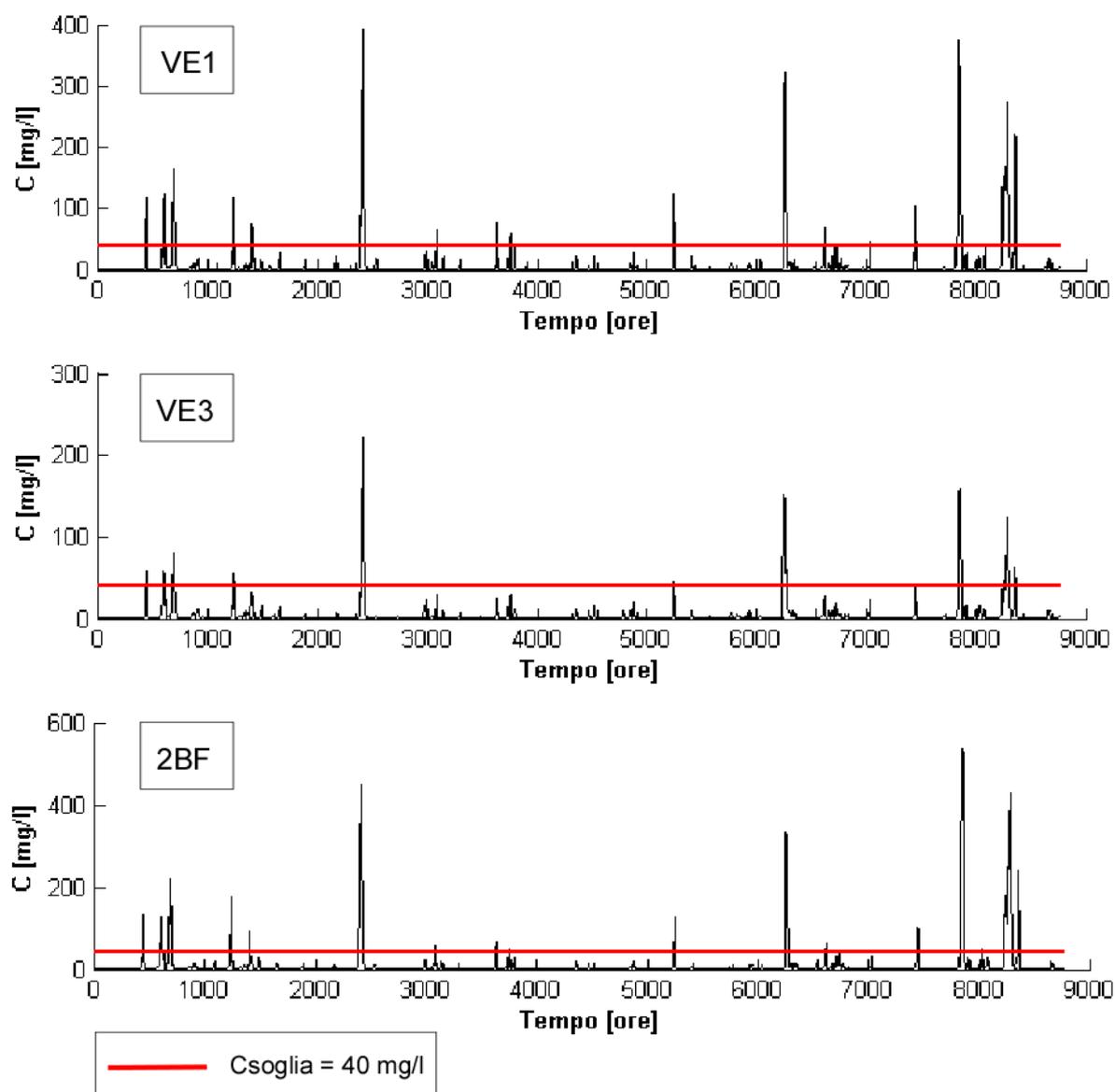


Figura 3-17 – Andamento della concentrazione dei sedimenti nel tempo per le stazioni VE1, VE3, 2BF relative alla Laguna del 2012.

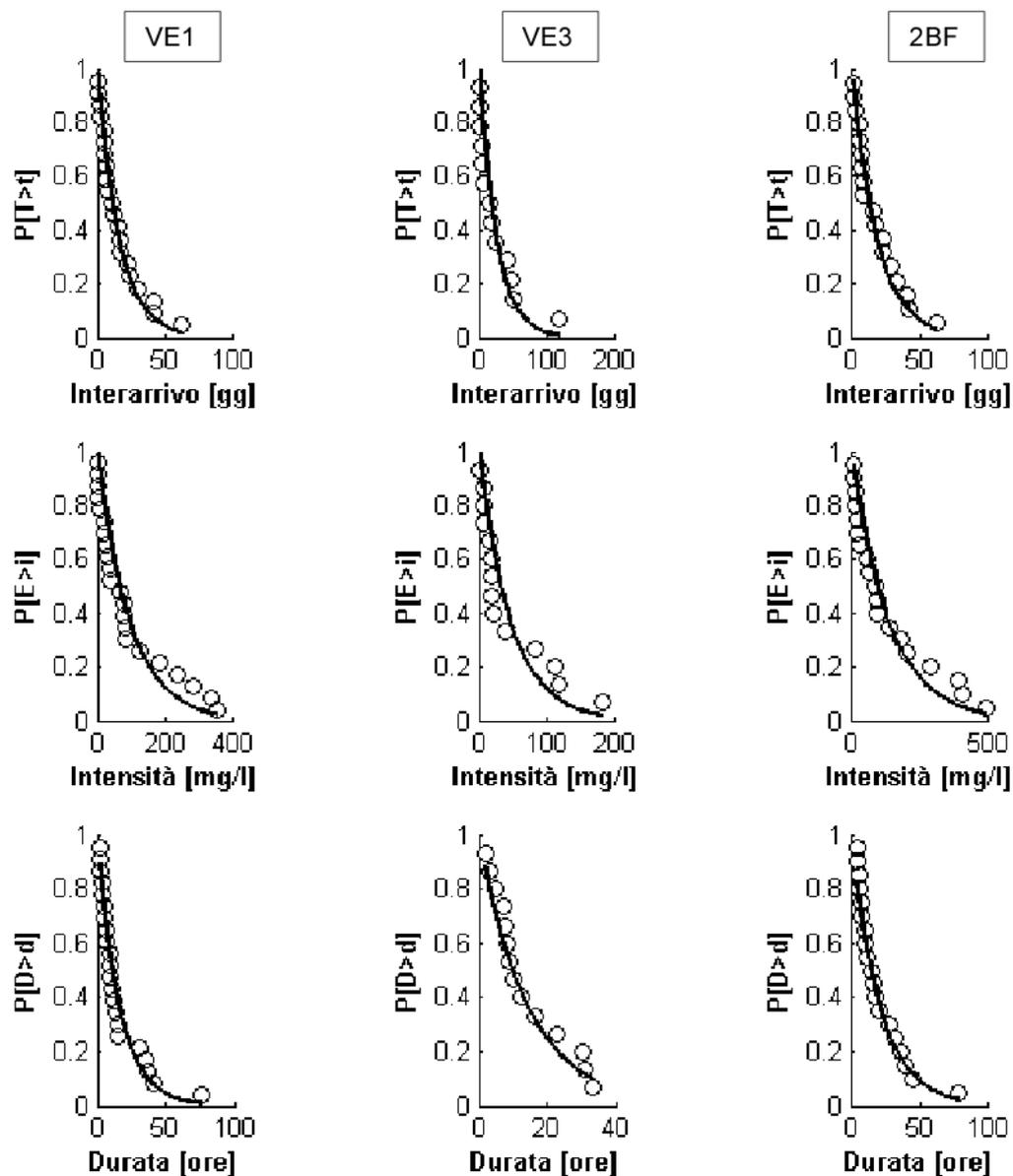


Figura 3-18 - Grafici delle distribuzioni di probabilità per le stazioni VE1, VE3, 2BF dei tempi di interarrivo, delle intensità e delle durate relativi alla Laguna del 2012.

Dopo aver svolto l'analisi delle misure di concentrazione per le tre lagune attraverso il metodo "Peak Over Threshold" e dopo aver confermato che gli eventi di risospensione possono essere modellati con un processo di tipo poissoniano, non solo per la laguna 2012, ma anche per le lagune storiche del 1811 e del 1901, si è voluta approfondire l'analisi dei tempi di interarrivo, delle intensità e delle durate.

Si è voluta studiare in particolare la distribuzione dei tempi di interarrivo medi, delle intensità e delle durate medie al variare negli anni della quota del fondo. La quota del fondo,

come già confermato in studi precedenti (Carniello, Defina e D'Alpaos 2012) è una variabile che ha subito un'evidente modificazione dal 1811 ad oggi.

In uno studio precedente (Fagherazzi, et al. 2006) inoltre è stato sviluppato un modello concettuale per studiare la distribuzione degli sforzi di attrito al fondo come funzione dell'elevazione del fondo, che generalmente dipendono dalla velocità del vento, dal fetch e dalla profondità dell'acqua. Tale studio pone in evidenza come per definiti valori di velocità del vento e di fetch la relazione tra sforzo di attrito al fondo e profondità dell'acqua sia rappresentata da una curva che presenta un picco in corrispondenza di aree con profondità intermedie tra quelle tipiche delle barene o meglio del medio mare e le quote dei bassifondi più profondi presenti in laguna ($h_f \approx -2,5$ m s.m.m.). Sia per piccole che per grandi profondità le onde prodotte dal vento non producono infatti sforzi di attrito al fondo apprezzabili.

La ricerca di una dipendenza tra la quota del fondo e le variabili ricavate dal metodo dei POT nasce dalla necessità di studiare l'evoluzione morfologica nel tempo in modo sempre più accurato. Infatti facendo riferimento ad un determinato punto caratterizzato da dei determinati parametri λ e da una quota del fondo iniziale, si è voluto capire se si possano usare gli stessi valori di λ per generare eventi sintetici di risospensione qualora questo punto subisse nel tempo un processo di interrimento o di erosione.

Un approccio diverso sarebbe quello di ricorrere all'ergodicità spaziale. Si considerano due maglie posizionate inizialmente in aree con caratteristiche comparabili, ma a quote diverse, la prima maglia posta ad una quota inferiore e la seconda a quota superiore rispetto la prima. Se la seconda maglia dovesse negli anni subire un processo di erosione e raggiungere la quota iniziale della prima per il principio di ergodicità ci si potrebbe avvalere dei parametri iniziali della prima per generare sequenze Poissoniane nella nuova configurazione.

Avendo, in questo caso, l'effettiva evoluzione storica (e altimetrica) del singolo punto è possibile non dover ricorrere all'ipotesi di ergodicità la quale, di fatto, è spesso assunta in prima approssimazione e nell'impossibilità di procedere altrimenti.

Si è quindi effettuato uno studio preliminare di tale dipendenza e si sono riportati nelle figure 3-19; 3-20; 3-21 rispettivamente i tempi di interarrivo medi, le intensità medie e le durate medie in funzione delle quote, relativi alle tre stazioni VE1, VE3 e 2BF scelte come esemplificative. Si nota per le stazioni VE1 e VE3, passando dal 1811 al 2012, un approfondimento del fondo, mentre per la 2BF il fondo mantiene una quota pressoché costante pari a 2 m s.m.m.. La stazione 2BF infatti è localizzata in una zona denominata "fondo dei sette

morti”. Tale area ha mantenuto negli ultimi tre secoli una profondità costante tra i 2 e i 2,5 m, subendo solamente un aumento della superficie occupata. Questo è dovuto alla sua posizione geografica, posto in corrispondenza del partiacque tra il bacino di Malamocco e Chioggia dove il tasso di deposito è trascurabile, lontana dai grandi canali che trasportano sedimenti e dove la profondità è tale che le onde non sono più in grado di mobilitare i sedimenti al fondo.

Dall’osservazione degli interarrivi medi si nota per tutte e tre le stazioni dal 1901 al 2012 una diminuzione dei tempi di interarrivo. Per le intensità medie si riscontra invece un aumento dal 1811 al 2012 più marcato tra il 1901 e il 2012, per la stazione 2BF le intensità relative al 1811 e al 1901 coincidono a prova della debole variazione morfologica verificatasi durante questo secolo. Le durate medie sembrano non risentire della variazione delle quote del fondo, presentano infatti andamenti discordi, in particolare per la stazione 2BF si riscontra un aumento delle durate mentre per le VE1 e VE3 invece le durate dapprima aumentano per poi diminuire.

Si nota inoltre che la stazione 2BF anche se caratterizzata da circa la stessa quota del fondo subisce in ogni caso una variazione delle tre variabili considerate, questo è dovuto probabilmente alla variazione della morfologia complessiva che caratterizza questa zona.

Dall’analisi dei risultati relativi alle tre stazioni riportate non sembra potersi evincere un trend univoco che leghi la variazione dei parametri considerati all’evoluzione della quota del fondo. Il motivo può essere ascritto al fatto che l’evoluzione di tali variabili è probabilmente legato all’evoluzione morfologica dell’intero paesaggio piuttosto che della quota locale.

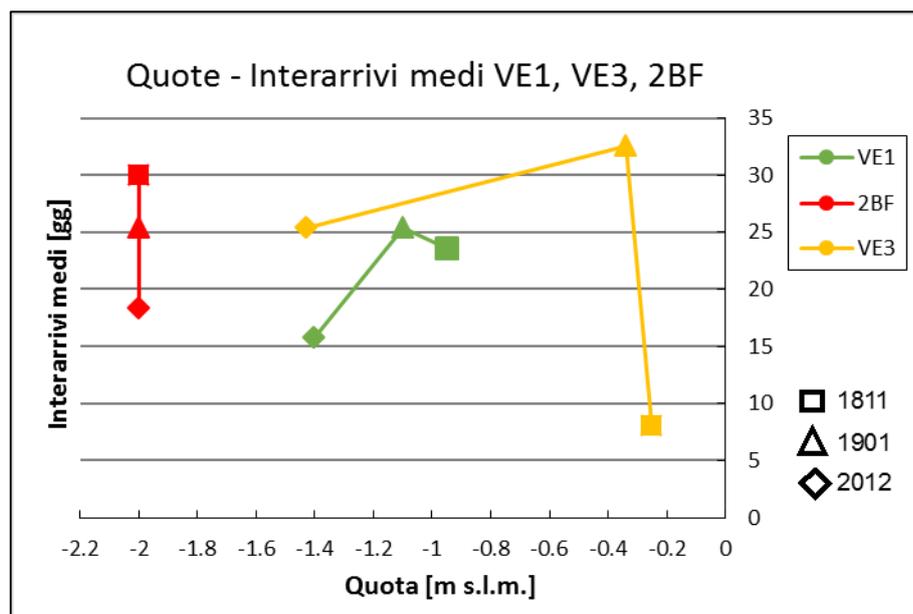


Figura 3-19 – Tempi di interarrivo medi rappresentati al variare della quota della stazione di riferimento. Le quote sono quelle relative alle lagune del 1811, del 1901 e del 2012. Concentrazione C0 = 40 mg/l.

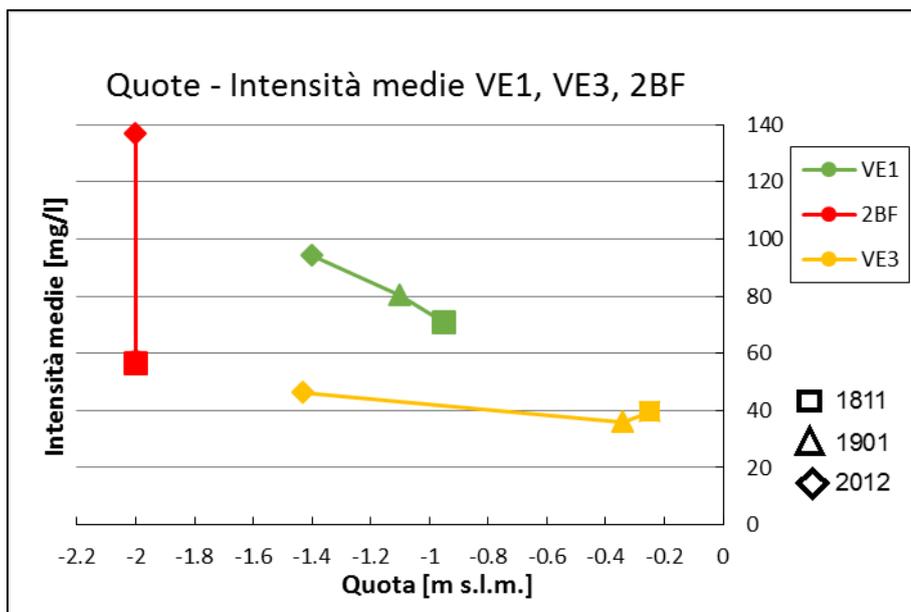


Figura 3-20 - Intensità media rappresentata al variare della quota della stazione di riferimento. Le quote sono quelle relative alle lagune del 1811, del 1901 e del 2012. Concentrazione $C_0 = 40$ mg/l.

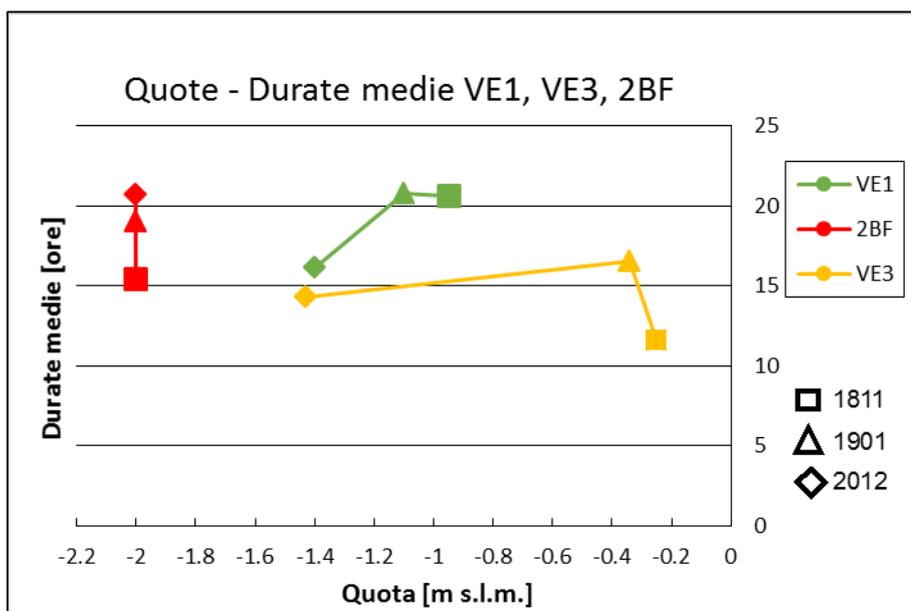


Figura 3-21 - Durata media rappresentata al variare della quota della stazione di riferimento. Le quote sono quelle relative alle lagune del 1811, del 1901 e del 2012. Concentrazione $C_0 = 40$ mg/l.

Per approfondire lo studio dei tempi di interarrivo, intensità e durate si sono ricavati i coefficienti di correlazione, detti anche indici di correlazione che esprimono una eventuale relazione di linearità tra due variabili statistiche.

Date due variabili statistiche X e Y il coefficiente di correlazione è definito come:

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

dove:

- σ_{XY} è la covarianza,
- σ_X, σ_Y sono le deviazioni standard delle due variabili.

Il coefficiente assume sempre valori compresi tra -1 e 1:

$$-1 \leq \rho_{XY} \leq 1$$

A seconda del valore che assume il coefficiente di correlazione si distinguono tre casi:

1. Se $\rho_{XY} > 0$, le variabili X e Y si dicono direttamente correlate;
2. Se $\rho_{XY} = 0$, le variabili X e Y si dicono incorrelate o scorrelate;
3. Se $\rho_{XY} < 0$, le variabili X e Y si dicono inversamente correlate.

Inoltre per la correlazione diretta (e analogamente per quella inversa) si distingue:

- a. Se $0 \leq \rho_{XY} \leq 0,3$ si ha correlazione debole;
- b. Se $0,3 \leq \rho_{XY} \leq 0,7$ si ha correlazione moderata;
- c. Se $\rho_{XY} \geq 0,7$ si ha correlazione forte.

Accoppiando quindi le tre variabili statistiche oggetto di studio si sono calcolati tre coefficienti di correlazione:

- Durata-Intensità;
- Durata-Interarrivo;
- Intensità-Interarrivo.

Bisogna precisare che nello studio con il metodo dei POT degli eventi di risospensione il numero di durate calcolate è pari al numero di intensità, mentre i tempi di interarrivo sono sempre inferiori di un valore. Si è deciso quindi nel calcolo dei coefficienti di correlazione Durata-Interarrivo e Intensità-Interarrivo di eliminare il primo valore rispettivamente di durata (D1) e intensità (P1) confrontando il primo tempo di interarrivo (Int1) con D2 e P2 (Figura 3-22).

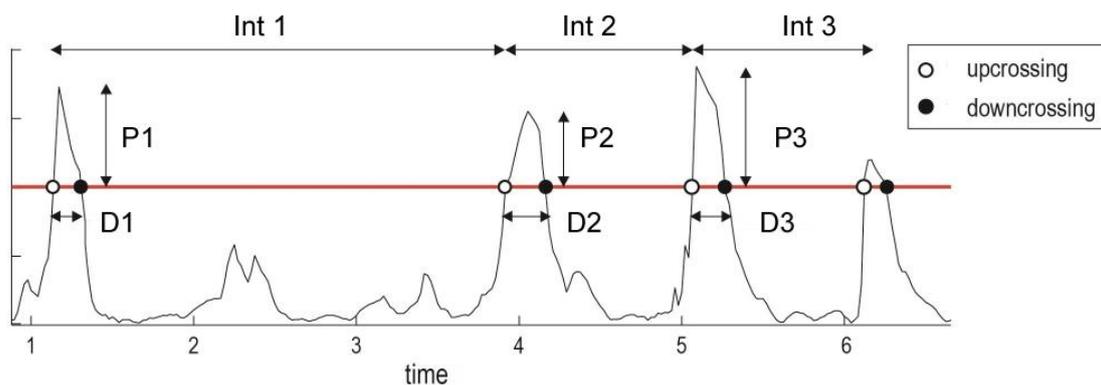


Figura 3-22 - Tempi di interarrivo (Int), intensità (P) e durate (D).

Tali coefficienti di correlazione così ricavati sono stati tabulati nelle tabelle 3-1; 3-2; 3-3 relative rispettivamente alla laguna del 1811, del 1901 e del 2012.

LAGUNA 1811			
	Durata-Intensità	Durata-Interarrivo	Intensità-Interarrivo
VE1	0.763	-0.146	-0.213
VE3	0.835	0.289	0.344
2BF	0.859	0.041	0.259

Tabella 3-1 - Coefficienti di correlazione della laguna 1811 per le stazioni VE1, VE3 e 2BF.

LAGUNA 1901			
	Durata-Intensità	Durata-Interarrivo	Intensità-Interarrivo
VE1	0.758	-0.217	-0.212
VE3	0.696	0.502	0.123
2BF	0.718	-0.120	-0.147

Tabella 3-2 - Coefficienti di correlazione della laguna 1901 per le stazioni VE1, VE3, 2BF.

LAGUNA 2012			
	Durata-Intensità	Durata-Interarrivo	Intensità-Interarrivo
VE1	0.819	0.133	0.360
VE3	0.932	-0.088	0.043
2BF	0.851	0.074	0.196

Tabella 3-3 - Coefficienti di correlazione della laguna 2012 per le stazioni VE1, VE3, 2BF.

I risultati mostrano che il coefficiente di correlazione Durata-Intensità è prossimo a uno, quindi per queste due variabili si ha correlazione forte. Per durate maggiori si riscontrano intensità maggiori. I coefficienti di correlazione Durata-Interarrivo e Intensità-Interarrivo presentano invece valori prossimi allo zero, tali variabili avendo correlazione diretta o indiretta debole, possono quindi essere definite scorrelate.

3.3 Analisi spaziale delle misure di concentrazione

Dopo aver svolto l'analisi puntuale delle misure di concentrazione, focalizzata su una serie di punti rappresentativi, si è passati all'analisi spazialmente distribuita. Si è studiata la variabilità spaziale dei tempi medi di interarrivo, delle eccedenze medie sopra la soglia e delle durate medie delle risospensioni dei sedimenti su tutta la superficie della laguna mantenendo come soglia di concentrazione 40 mg/l.

E' necessario precisare che la risospensione dei sedimenti generata dalle onde da vento come lo sforzo di attrito al fondo, dipende dall'intensità del vento, dal fetch e dalla profondità dell'acqua. Quest'ultima è connessa alla batimetria e ai livelli di marea locali, il fetch invece dipende dalla morfologia del bacino e dal tirante d'acqua.

Per tutte e tre le lagune considerate bisogna sottolineare inoltre che studi recenti (Carniello, Defina e D'Alpaos 2009b) evidenziano un comportamento morfologicamente differente tra i fondali in laguna nord e quelli appartenenti alla porzione centro-meridionale. I primi appaiono caratterizzati da tiranti più ridotti e da una velocità di erosione generalmente minore, rispetto a quelle che si osservano nel bacino centro-sud della laguna. Ne deriva quindi che la laguna di Venezia possa essere suddivisa in due parti morfologicamente omogenee. Nella porzione a sud

di Venezia, la Bora è libera di generare un moto ondoso di fatto non limitato dal fetch, mentre nella porzione a nord di Venezia, il fetch risulta limitato dalla presenza di numerose isole e barene, prevenendo quindi la formazione di un moto ondoso intenso e morfologicamente significativo.

Tenendo conto di queste osservazioni, per le tre lagune, la distribuzione delle caratteristiche degli eventi di risospensione sul territorio lagunare risulta quindi molto articolata. Questo emerge dalle figure 3-23; 3-24; 3-25; 3-26 in cui sono riportati, nell'ordine i tempi medi di interarrivo, le eccedenze medie di concentrazione sopra la soglia, le durate medie di tali eventi e le zone lagunari in cui è verificato o meno il test di Kolmogorov-Smirnov.

Si nota inoltre che per le lagune del 1811 e del 1901 tali distribuzioni spaziali risultano più eterogenee rispetto al 2012, questo è dovuto all'ambiente più naturale e morfologicamente più articolato che caratterizza le lagune storiche.

Bisogna precisare che, volendo concentrare l'analisi sulle aree di bassofondo e barena, le maglie appartenenti ai canali sono state considerate maglie in cui il test KS non è verificato. E' lecito assumere questo in quanto in corrispondenza dei canali le eccedenze presenti sono principalmente causate dalle correnti di marea, che non possono essere modellate con un processo di Poisson. Per i tempi di interarrivo (Figura 3-23) sono stati riportati i valori di interarrivo medio per le maglie dove gli interarrivi verificano il test KS, cioè dove gli eventi di risospensione possono essere modellati come un processo di Poisson. In Figura 3-24 si sono riportati i valori di intensità media relativi alle maglie in cui è il test KS è verificato sia per gli interattivi che per le intensità. Per le durate (Figura 3-25) è stato seguito un ragionamento analogo alle intensità. Tali criteri verranno utilizzati anche per le analisi successive.

Dalla Figura 3-23 si nota che nelle tre lagune le zone protette dal vento di Bora grazie alla presenza di barene, isole e strutture artificiali si riscontrano i tempi di interarrivo più elevati. Ciò accade soprattutto in laguna nord-orientale e nelle porzioni lagunari collocate ad ovest (in particolare nelle zone riparate dalla terraferma e dalle paludi). Al contrario, tempi di interarrivo ridotti si ritrovano in porzioni dove il fetch è illimitato. La laguna del 2012 inoltre, rispetto alle lagune storiche, è caratterizzata da tempi di interarrivo più uniformi nelle aree centrale e meridionale. Nelle lagune storiche si nota infatti, come già evidenziato, una laguna meno profonda e più articolata dal punto di vista morfologico che produce interarrivi più frequenti, ma con eventi meno intensi.

Per tutte e tre le lagune si può affermare che i valori più elevati di durate e intensità si riscontrano in laguna centro meridionale, piuttosto che in laguna nord, a causa del fetch

illimitato che caratterizza tale porzione lagunare.

Dalla Figura 3-24 si nota che le intensità medie della laguna del 2012 sono in modo rilevante maggiori rispetto a quelle delle lagune storiche.

Dall'osservazione delle durate medie invece non si evidenziano particolari variazioni tra il 1811 e il 2012.

Per quanto riguarda il test di Kolmogorov-Smirnov (Figura 3-26) si sono evidenziate in maniera diversa le porzioni di laguna in cui gli eventi di risospensione non possono essere modellati con un processo di Poisson. Si notano le aree in cui il test non è effettuato per la mancanza di eccedenze sopra soglia, che corrispondono alle zone dove sono situate le barene. In prossimità delle barene, infatti, la risospensione dei sedimenti si annulla per la ridotta profondità dell'acqua. Si osservano le maglie in cui gli eventi di risorpensione non sono poissoniani perché il test KS non è verificato per i tempi di interarrivo. Sono infine, come spiegato in precedenza, compresi i canali tra le maglie in cui gli eventi non sono modellati come un processo di Poisson.

Tra le aree invece in cui le risospensioni possono essere modellate come un processo poissoniano si distinguono quelle in cui il test KS è verificato per interarrivi, intensità e durate e quelle in cui il test è verificato per gli interarrivi però non è verificato o per le intensità o per le durate. Dal confronto tra le figure 3-24 e 3-25 si nota che per le intensità rispetto alle durate c'è un maggior numero di maglie in cui il test KS non è verificato.

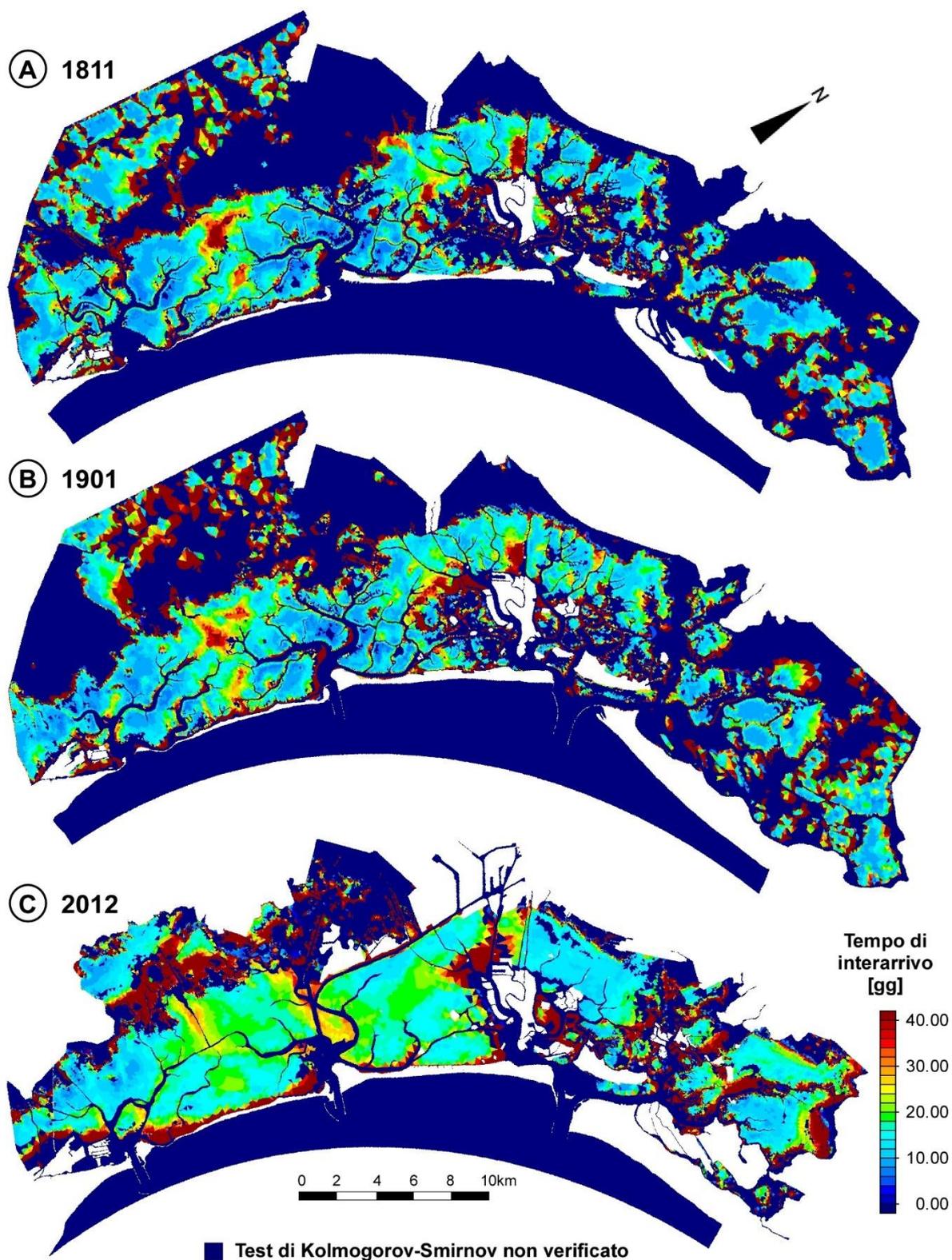


Figura 3-23 - Distribuzione spaziale dei tempi di interarrivo medi delle eccedenze sopra la soglia $C_0 = 40$ mg/l nella laguna di Venezia nel (A) 1811, (B) 1901, (C) 2012. E' riportato il tempo di interarrivo medio per i siti dove i tempi di interarrivo seguono la distribuzione esponenziale e quindi dove gli eventi di risospensione possono essere modellati con un processo di Poisson.

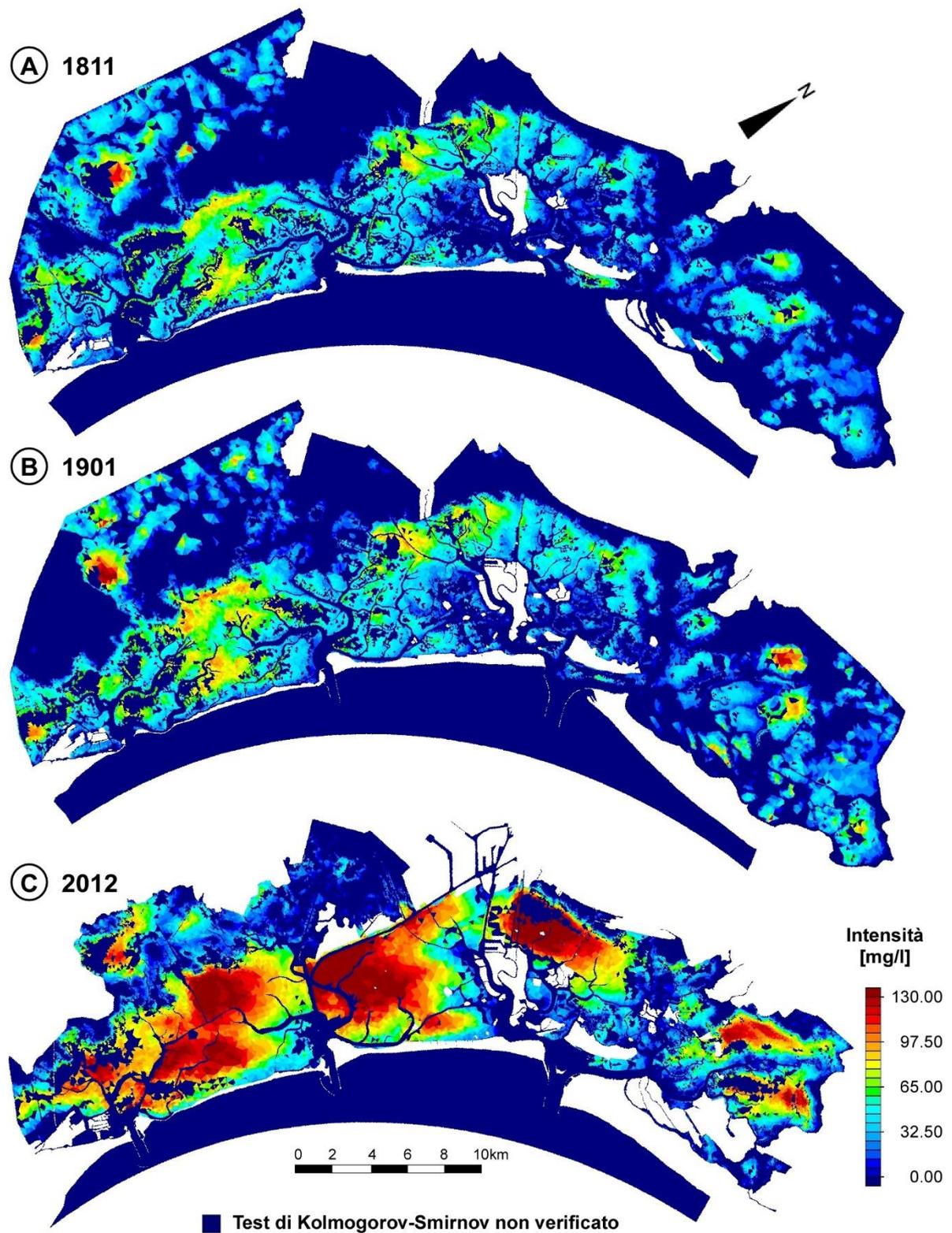


Figura 3-24 - Distribuzione spaziale delle intensità medie delle eccedenze sopra la soglia $C_0 = 40$ mg/l nella laguna di Venezia nel (A) 1811, (B) 1901, (C) 2012. E' riportata l'intensità media per i siti in cui le intensità seguono la distribuzione esponenziale e contemporaneamente gli eventi di risospensione possono essere modellati con un processo di Poisson.

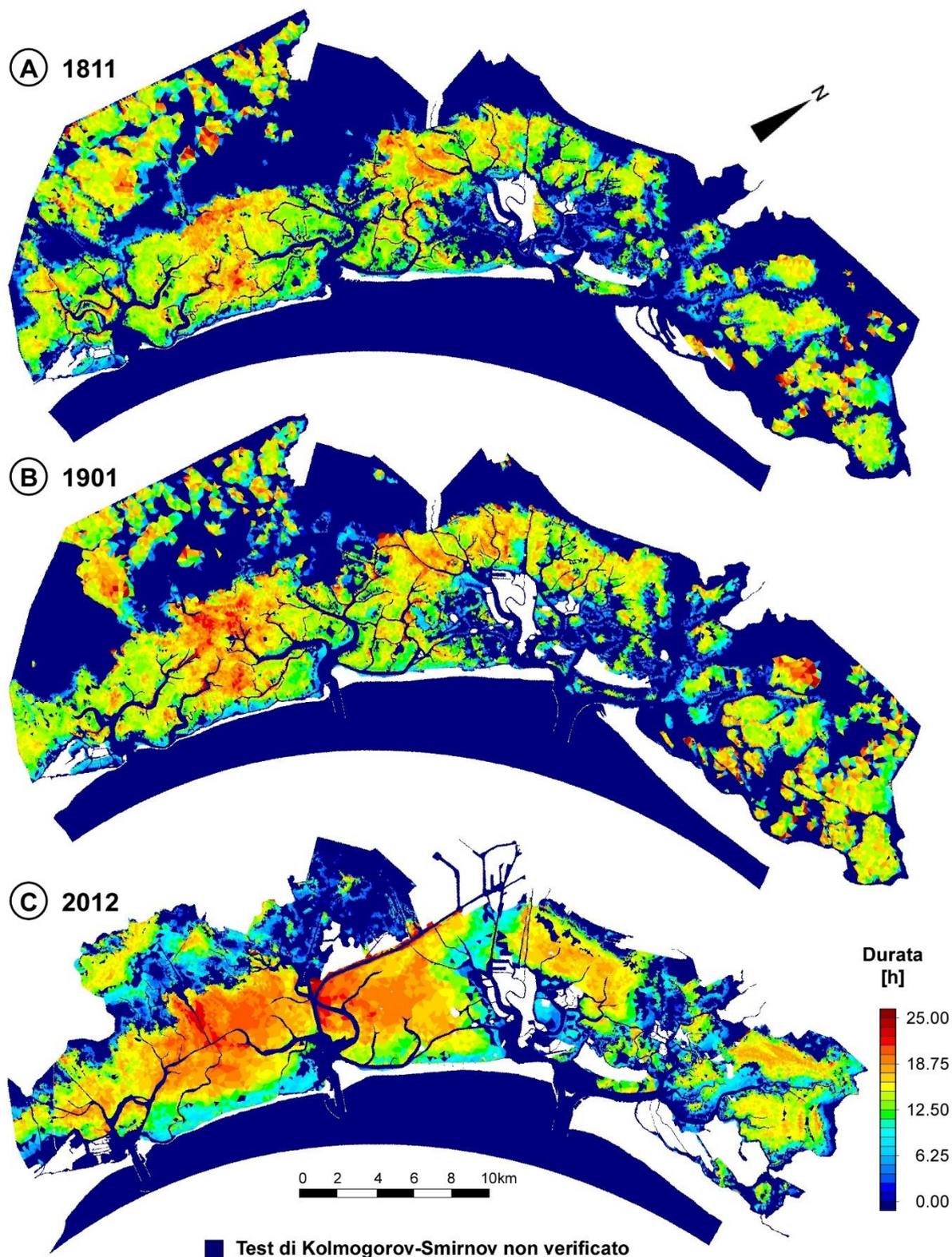


Figura 3-25 - Distribuzione spaziale delle durate medie delle eccedenze sopra la soglia $C_0 = 40 \text{ mg/l}$ nella laguna di Venezia nel (A) 1811, (B) 1901, (C) 2012. E' riportata l'intensità media per i siti in cui le durate seguono la distribuzione esponenziale e contemporaneamente gli eventi di risospensione possono essere modellati con un processo di Poisson.

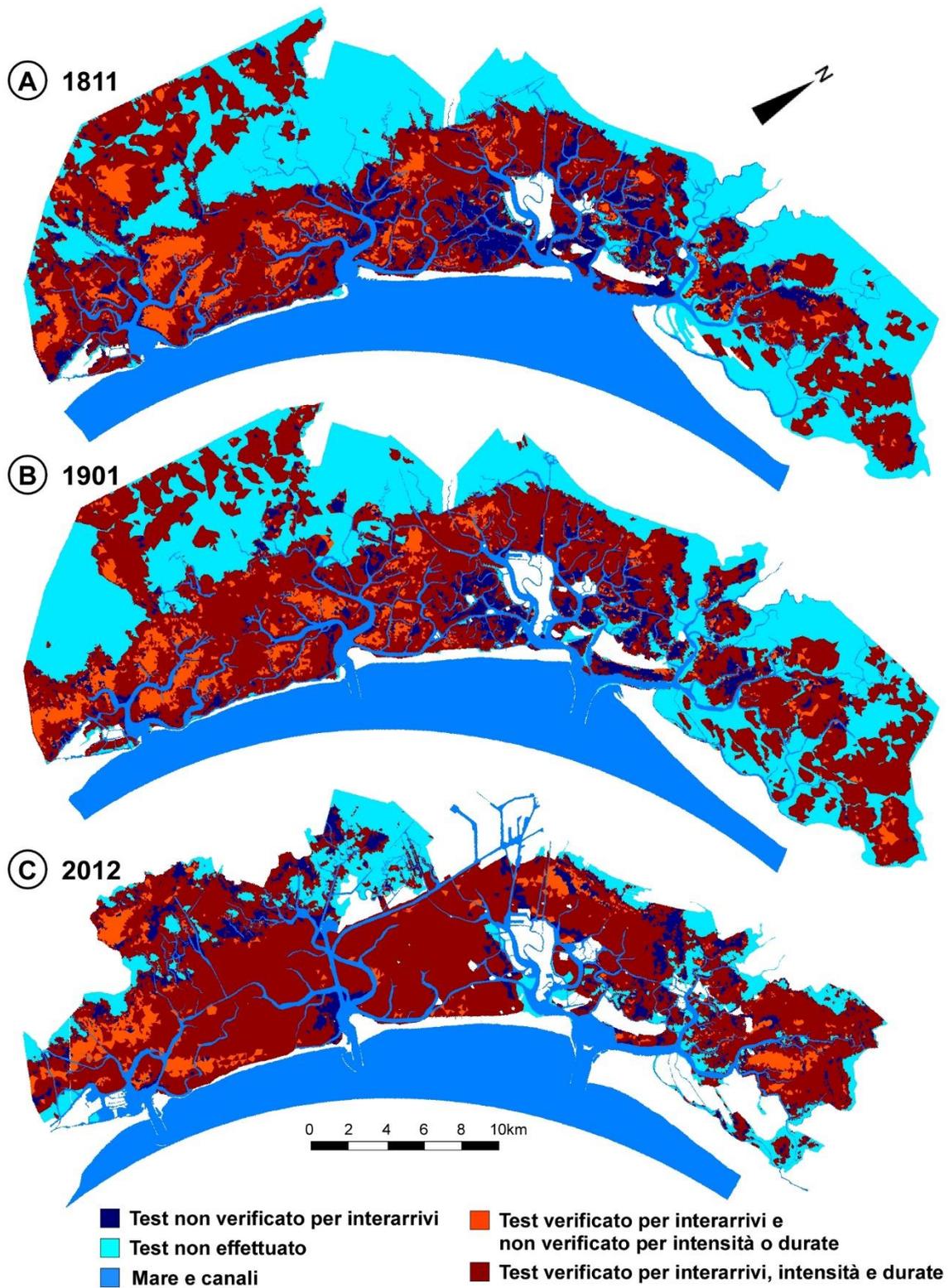


Figura 3-26 - Test di Kolmogorov-Smirnov nella laguna di Venezia nel (A) 1811, (B) 1901, (C) 2012, sono evidenziate le aree dove il test è verificato, dove non è verificato, dove non è effettuato e quelle escluse dall'analisi (mare e canali).

Come per le analisi puntuali anche per le analisi spaziali si sono analizzate le caratteristiche degli eventi di risospensione in funzione delle quote. Inizialmente si è considerata l'intera laguna (figure 3-27; 3-28; 3-29), in seguito si è concentrata l'analisi sulla porzione di laguna viva, più omogenea in termini di esposizione dei venti, posta nella parte centro-meridionale della laguna di Venezia (figure 3-31; 3-32; 3-33).

In tali grafici, per una più immediata comprensione, si sono suddivise le quote in intervalli costanti (20 cm), quindi si è calcolato il valore medio di quote e interarrivi (analogamente per intensità e durate) dei punti che ricadono in un determinato intervallo (BINNING). Per tali valori così ricavati (punti rossi), si è calcolata, per ogni intervallo, la deviazione standard degli interarrivi in modo da avere un indice della dispersione di tali dati.

Per i grafici relativi all'intera laguna sia per i tempi di interarrivo (Figura 3-27) che per le durate (Figura 3-29) non si riescono a trarre informazioni significative. Le intensità medie (Figura 3-28) invece, come già evidenziato nelle analisi precedenti, raggiungono valori più elevati nel 2012. Si nota inoltre che tra 0 e -2m circa le intensità aumentano al diminuire della quota. Passato questo valore di quota si registra un'inversione di tendenza, le intensità iniziano a diminuire al diminuire della quota. Per le lagune del 1811 e del 1901, prima della diminuzione, le intensità mantengono valori costanti tra -1,2 e -2m circa, anche se la scarsità di punti caratterizzati da tale quota in queste configurazioni della laguna rende poco significativo il risultato. Ad ogni modo questo andamento, influenzato dalla profondità, decisamente più evidente nella laguna del 2012 dipende dal comportamento dello sforzo di attrito in funzione delle quote (Fagherazzi, et al. 2006), infatti intorno ai -2m si registra il valore critico di attrito al fondo, al di sotto di questa quota la risospensione è debole e continua ad affievolirsi all'aumentare della profondità.

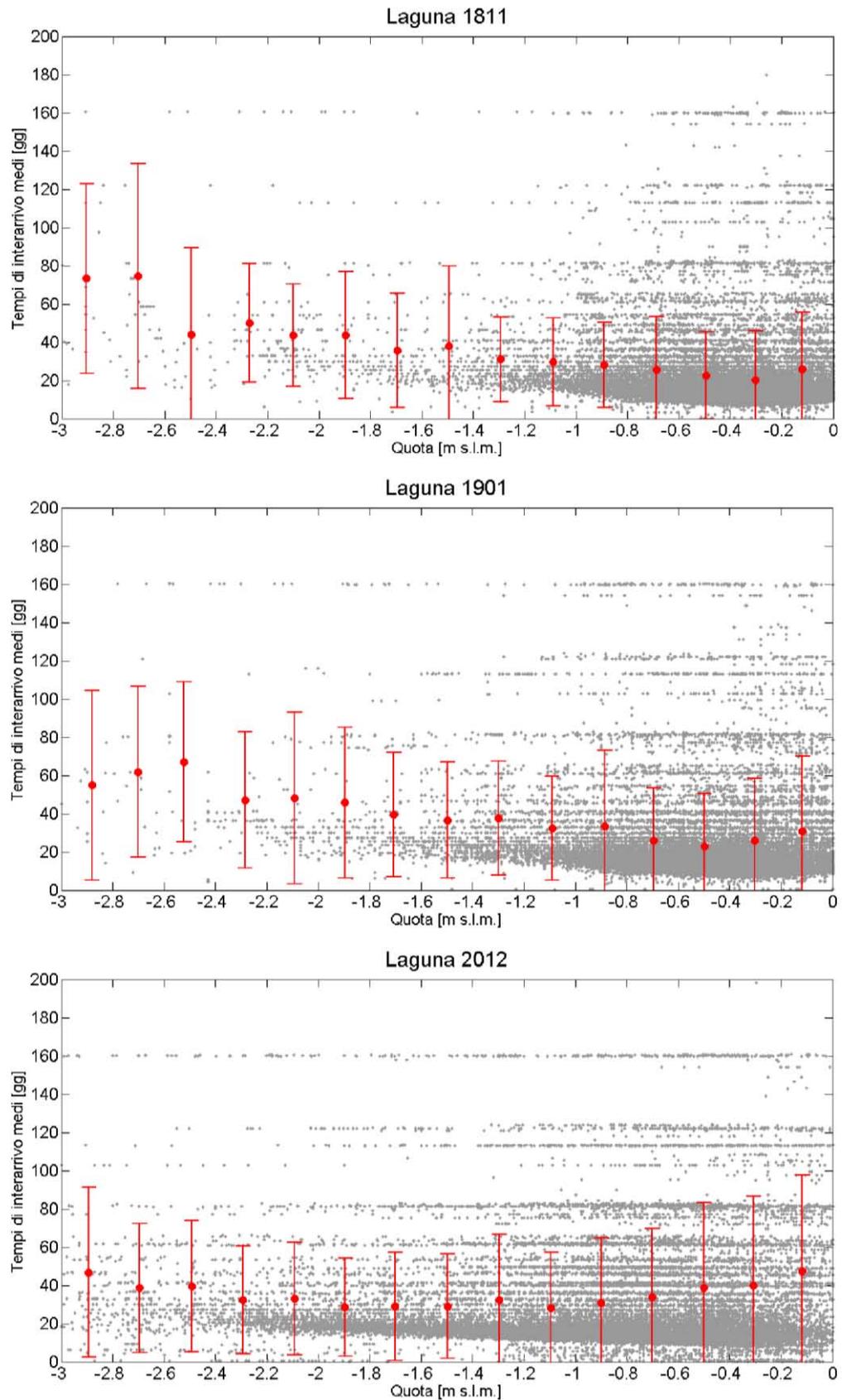


Figura 3-27 – Grafici che rappresentano i tempi di interarrivo medi in funzione delle quote per il 1811, il 1901 e il 2012. Il punto rosso ha come coordinate la media delle quote (x) e la media della media degli interarrivi (y) per quel determinato intervallo, con la relativa deviazione standard.

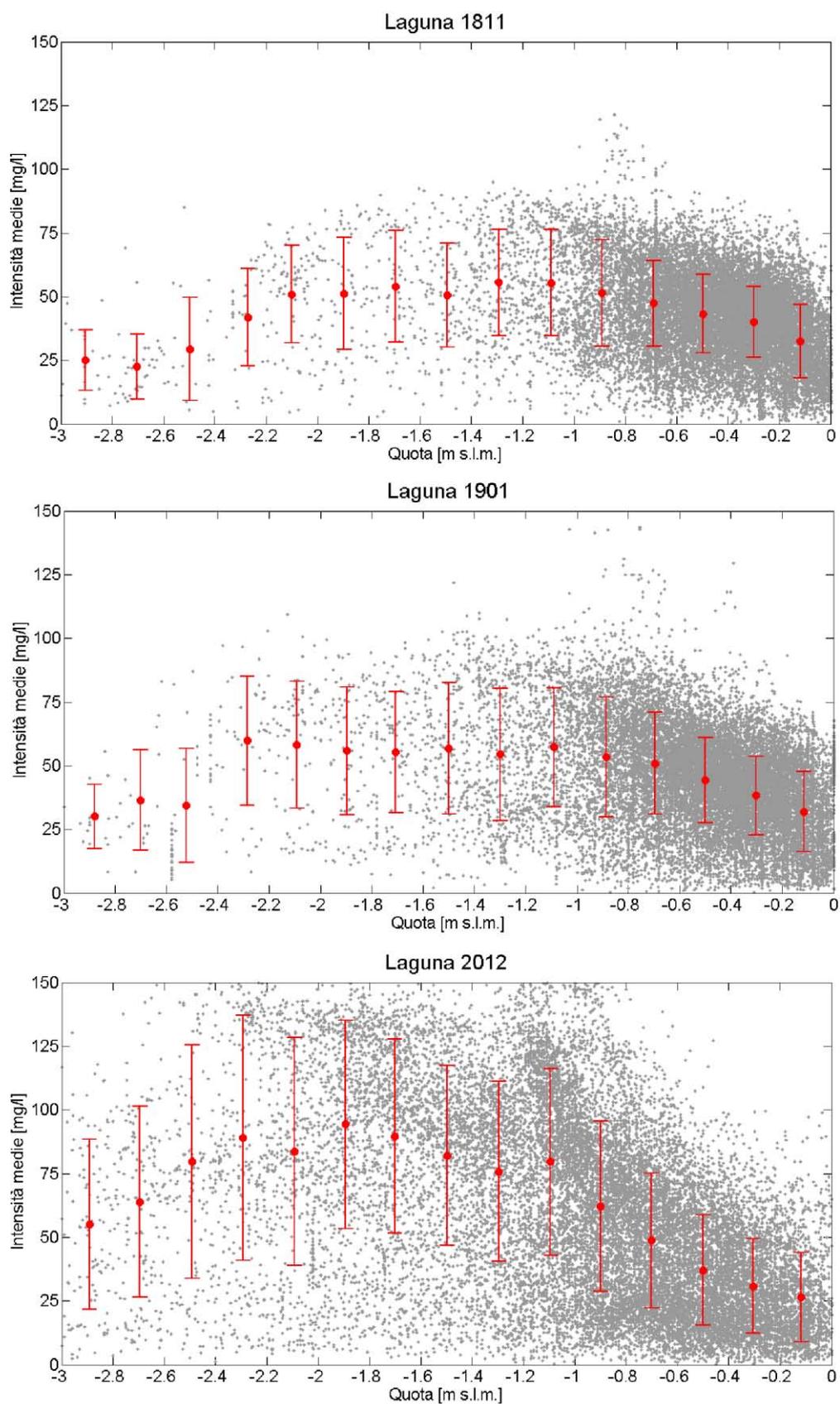


Figura 3-28 -Grafici che rappresentano le intensità medie in funzione delle quote per il 1811, il 1901 e il 2012.

Il punto rosso ha come coordinate la media delle quote (x) e la media della media delle intensità (y) per quel determinato intervallo, con la relativa deviazione standard.

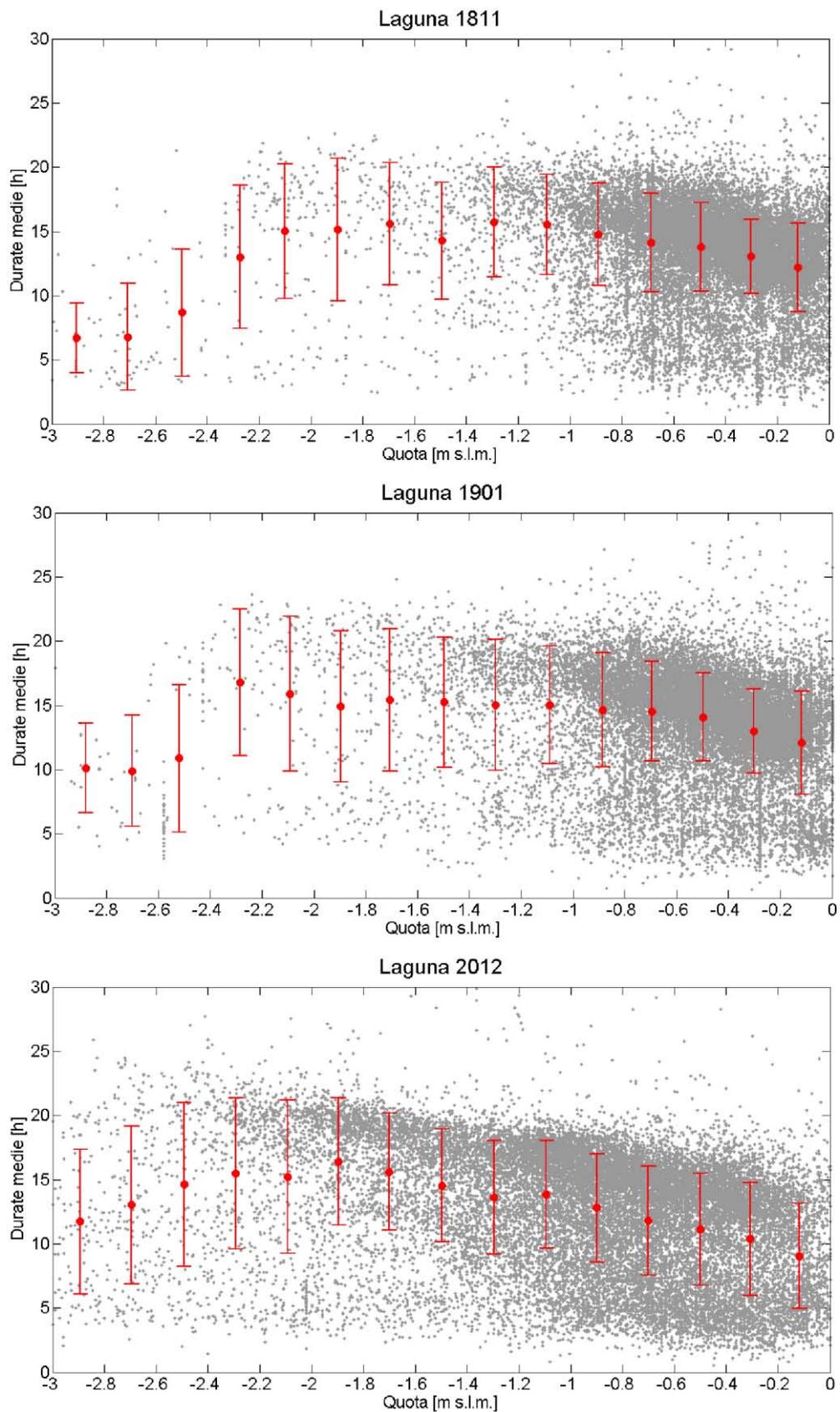


Figura 3-29 - Grafici che rappresentano le durate medie in funzione delle quote per il 1811, il 1901 e il 2012. Il punto rosso ha come coordinate la media delle quote (x) e la media della media delle durate (y) per quel determinato intervallo, con la relativa deviazione standard.

Data la dispersione dei dati riferiti all'intera laguna misurata dalla deviazione standard si è effettuata, come già anticipato, la stessa analisi per le aree evidenziate in Figura 3-30. Si sono scelte tali aree in quanto sono zone più omogenee dal punto di vista morfodinamico e sono quelle caratterizzate da un fetch illimitato e meno protette dalle barene.

I risultati delle analisi condotte su tali aree sono riportate nelle figure 3-31, 3-32; 3-33 e evidenziano per tutte le caratteristiche degli eventi di risospensione una diminuzione della variabilità, la deviazione standard è infatti più ridotta.

Si nota per i tempi di interarrivo medi della laguna del 2012 (Figura 3-31) che l'approfondimento della laguna rende indifferenti i tempi di interarrivo medi in funzione delle quote. Nel 1811 e nel 1901 invece le quote, generalmente inferiori, denotano una, sia pur non decisamente marcata, influenza sui tempi di interarrivo rispetto al 2012. Nel 2012 l'effetto della quota viene meno per la generale tendenza all'appiattimento dei fondali di tali aree (laguna centrale e meridionale) che si sovrappone all'approfondimento.

Per le intensità medie (Figura 3-32) si riscontra una sostanziale costanza al variare della quota per le lagune del passato con un leggero incremento dei valori tra il 1811 e il 1901. Passando poi alla laguna attuale, decisamente più profonda soprattutto nelle zone analizzate, il valore dell'intensità media risulta decisamente maggiore e presenta un incremento in funzione della profondità fino a quote pari a circa 2,5 m s.m.m.

Per quanto riguarda le durate medie (Figura 3-33) si può affermare che tra il 1811 e 1901 rimangono sostanzialmente invariate e anche per il 2012 si attestano sugli stessi valori delle lagune storiche.

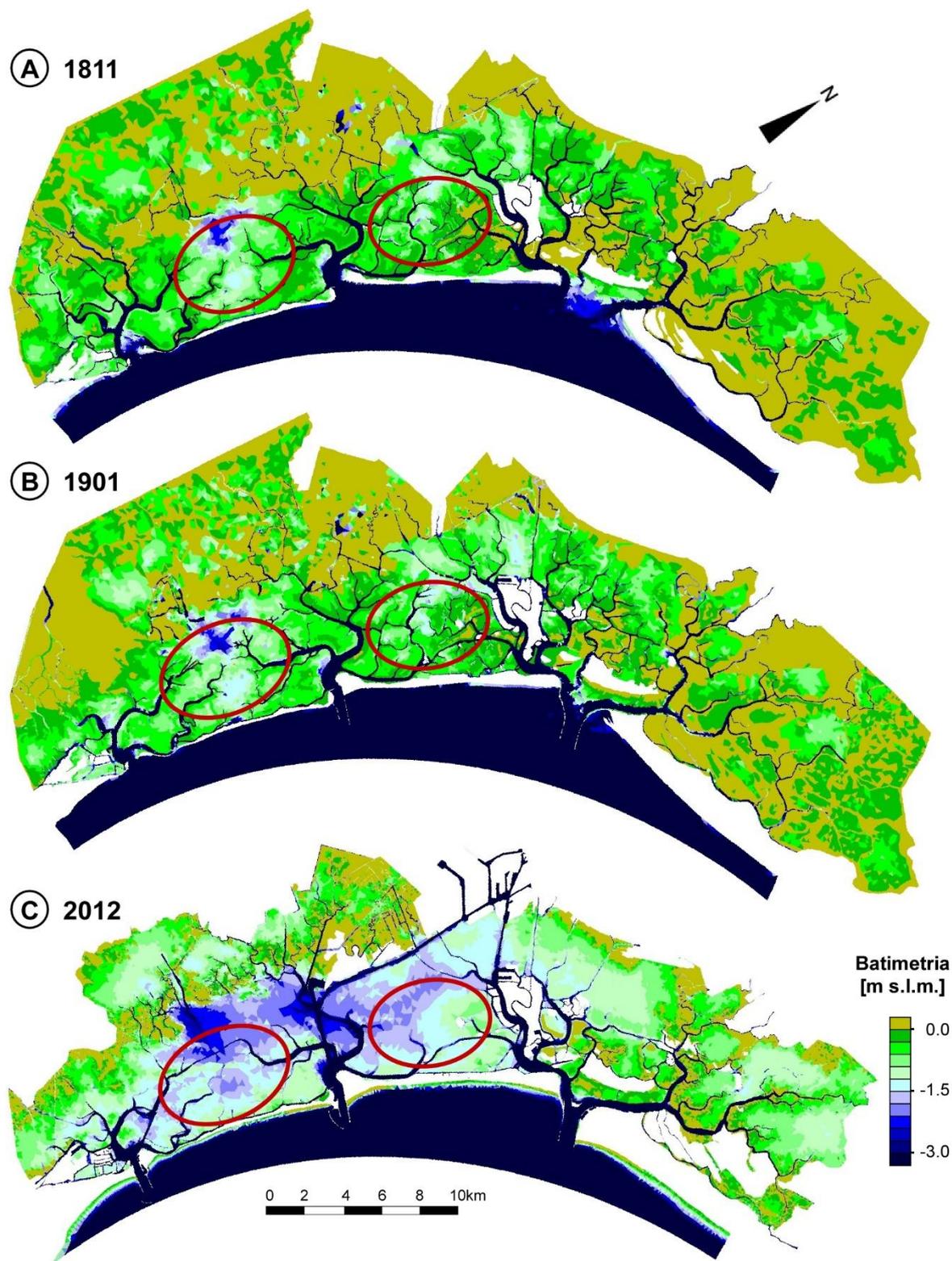


Figura 3-30 – Batimetrie della laguna del 1811 (A), del 1901 (B) e del 2012 (C). Sono evidenziate le aree della laguna centrale tra le bocche di Lido e di Malamocco e meridionale tra le bocche di Malamocco e di Chioggia.

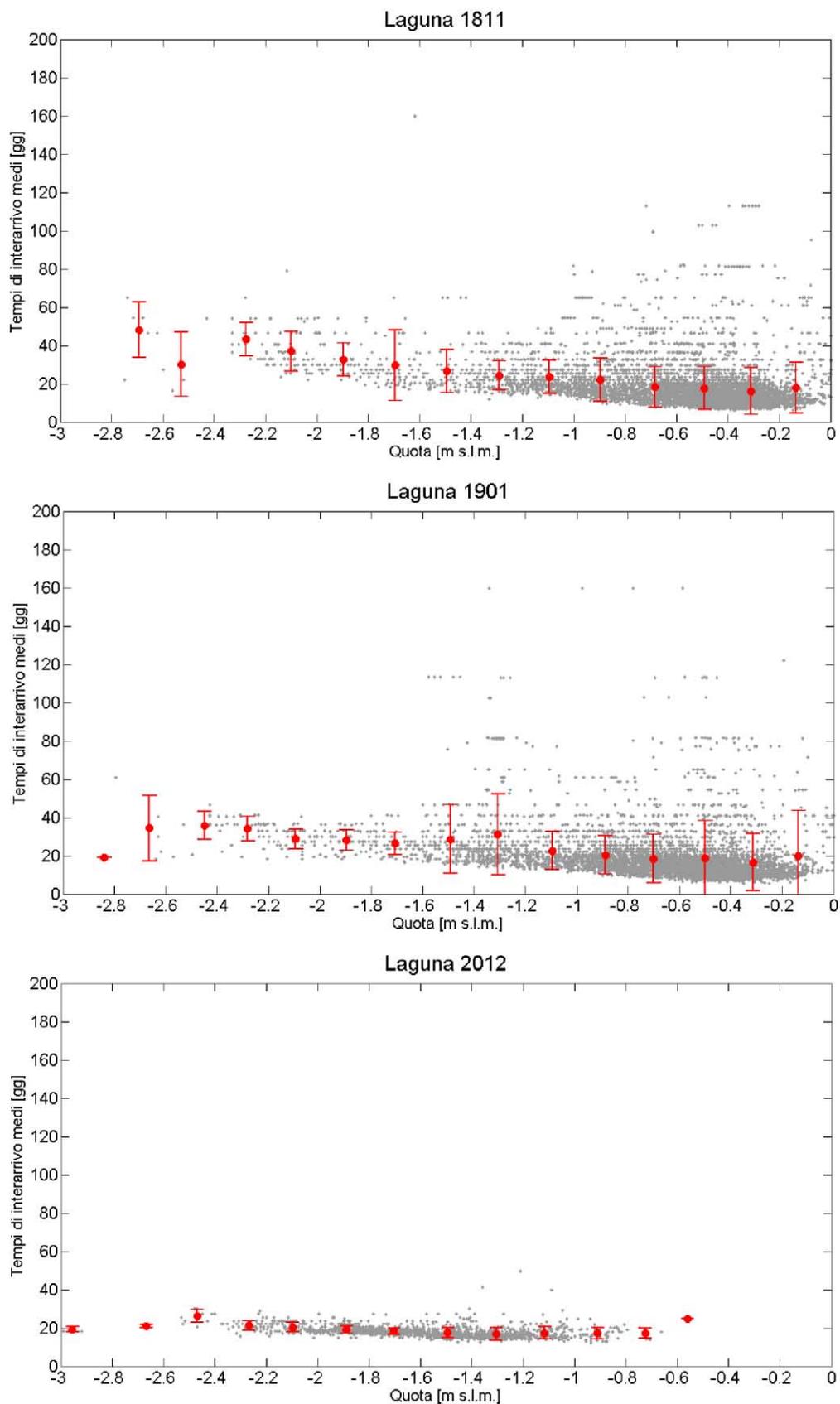


Figura 3-31 – Grafici dei tempi di interarrivo in funzione delle quote delle lagune del 1811, del 1901 e del 2012. Sono state considerate due porzioni della laguna, l'area compresa tra le bocche di Lido e di Malamocco e l'area tra le bocche di Malamocco e di Chioggia.

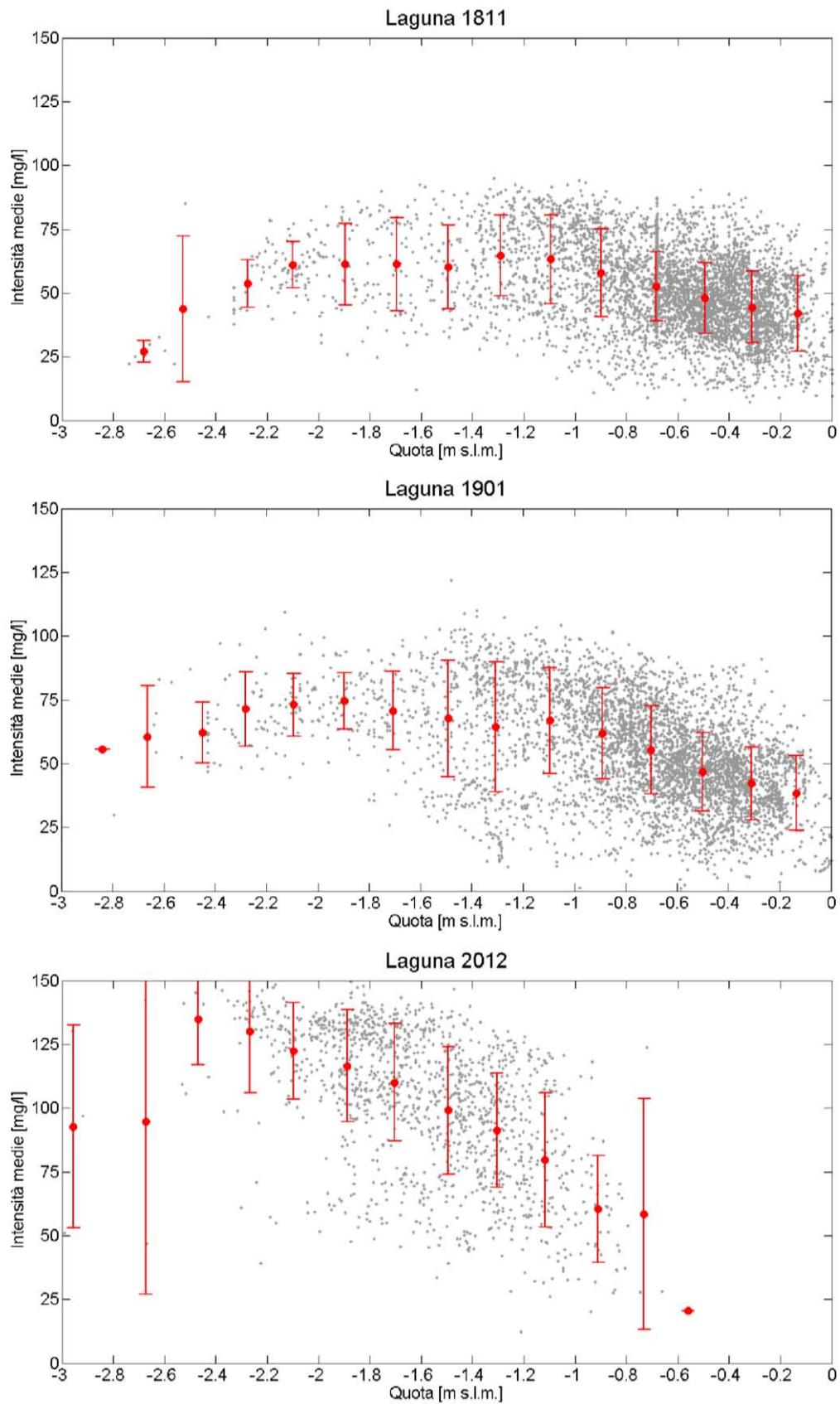


Figura 3-32 – Grafici delle intensità medie in funzione delle quote delle lagune del 1811, del 1901 e del 2012. Sono state considerate due porzioni della laguna, l’area compresa tra le bocche di Lido e di Malamocco e l’area tra le bocche di Malamocco e di Chioggia.

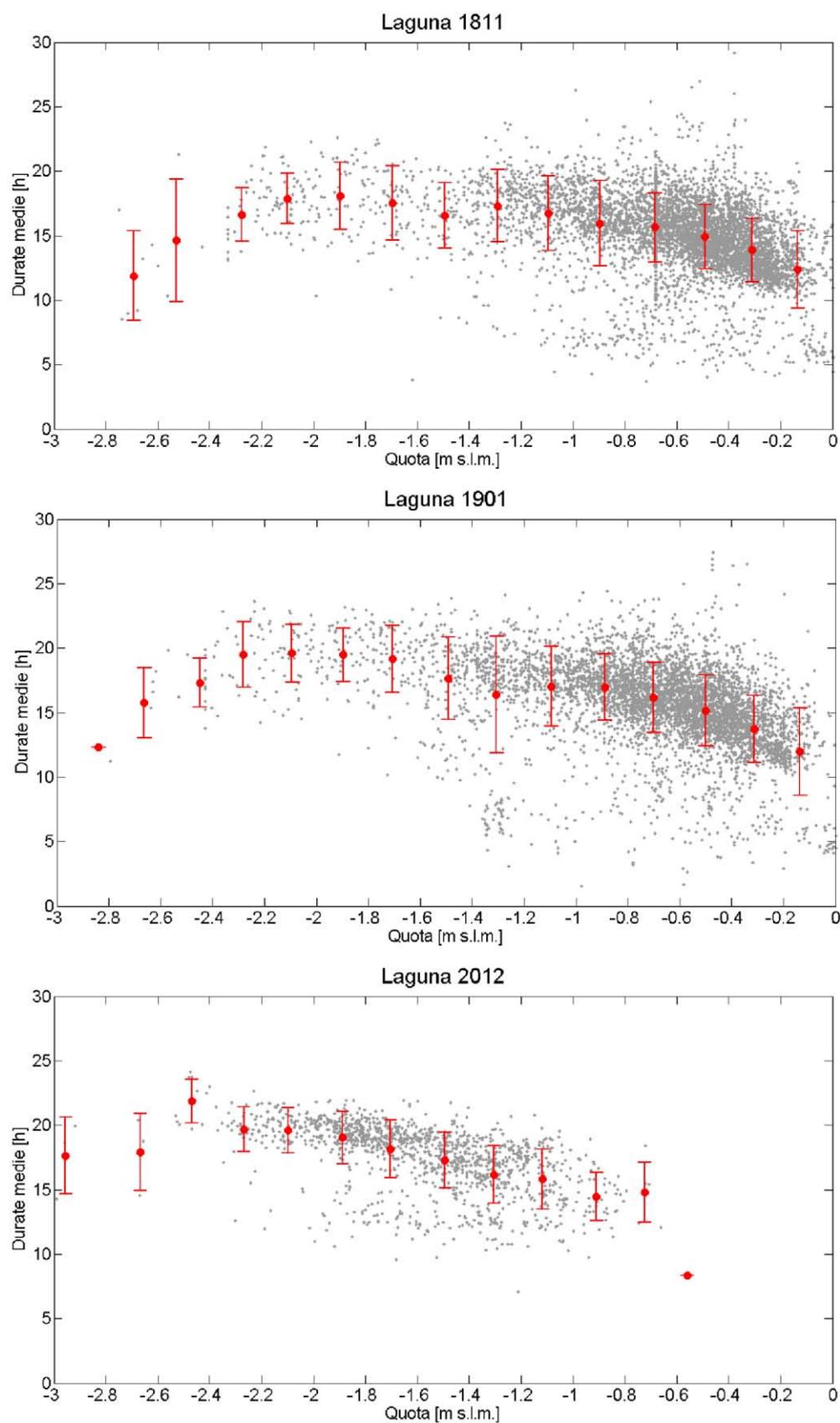


Figura 3-33 – Grafici delle durate medie in funzione delle quote delle lagune del 1811, del 1901 e del 2012. Sono state considerate due porzioni della laguna, l'area compresa tra le bocche di Lido e di Malamocco e l'area tra le bocche di Malamocco e di Chioggia.

Si è inoltre proceduto ad effettuare un confronto più diretto della variazione storica delle caratteristiche degli eventi di risospensione tenendo conto anche della necessità di confrontare delle zone omogenee che hanno mantenuto dall'800 ad oggi circa le stesse caratteristiche di esposizione ai venti. Si sono scelte quattro aree, due localizzate nella parte centro meridionale della laguna dove il fetch risulta illimitato, due localizzate invece nella parte più a nord della laguna dove il fetch è limitato dalla presenza di isole e barene. A titolo esemplificativo si è riportata nella Laguna del 2012 la posizione di tali aree, che è la stessa per le altre due lagune considerate (Figura 3-34).

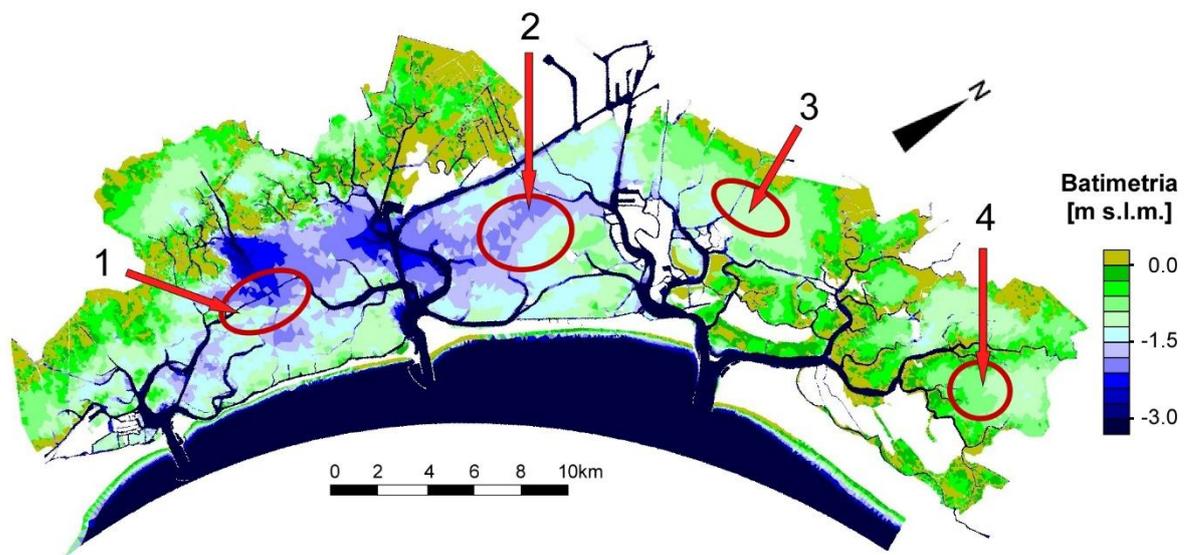


Figura 3-34 - Posizione nella Laguna del 2012 delle zone considerate nell'analisi.

Per queste quattro zone si sono ricavati dai risultati del modello i valori di interarrivo, intensità e durata medi delle singole maglie. Tali valori sono stati usati per creare una griglia regolare di passo 200 m, è possibile così effettuare un confronto più preciso tra le tre lagune considerate ed avere lo stesso numero di dati. In questo modo si ha l'informazione di quota, interarrivo medio, intensità media, durata media per tutte le caselle della griglia.

Avendo a disposizione questi dati sono stati creati ancora una volta dei grafici con le caratteristiche degli eventi di risospensione in funzione delle quote, però per una stessa area sono stati confrontati i dati relativi alle tre lagune (figure 3-35; 3-36; 3-37). Per una comprensione più immediata è stata calcolata la media di quote e interarrivi (intensità e durate) che nei grafici sono evidenziati con dei cerchi pieni.

I risultati mostrano per gli interarrivi una lieve diminuzione dal 1811 ad oggi (Figura 3-35).

Questo trend è confermato in tutti e quattro i casi sia per le aree più esposte ai venti che per quelle a nord meno esposte. Si può inoltre affermare, immaginando delle rette passanti per tre punti, che le pendenze soprattutto per le zone uno e due siano simili.

L'andamento delle intensità (Figura 3-36) conferma nuovamente nelle quattro aree un deciso aumento nel 2012. Anche per le durate si riscontra un leggero aumento dall'inizio 800 ad oggi (Figura 3-37).

Questi risultati confermano il complessivo trend erosivo che caratterizza da circa un secolo la laguna di Veneta, l'unica eccezione riguarda l'area numero quattro posta in corrispondenza della Palude Maggiore, tale area infatti nel 1901 presenta profondità minori rispetto al 1811 influenzando di conseguenza gli interarrivi, le intensità e le durate. L'anomalia di questa zona rispetto alle altre aree può essere dovuta al fatto che la precisione della quota nei bassifondi non è elevata.

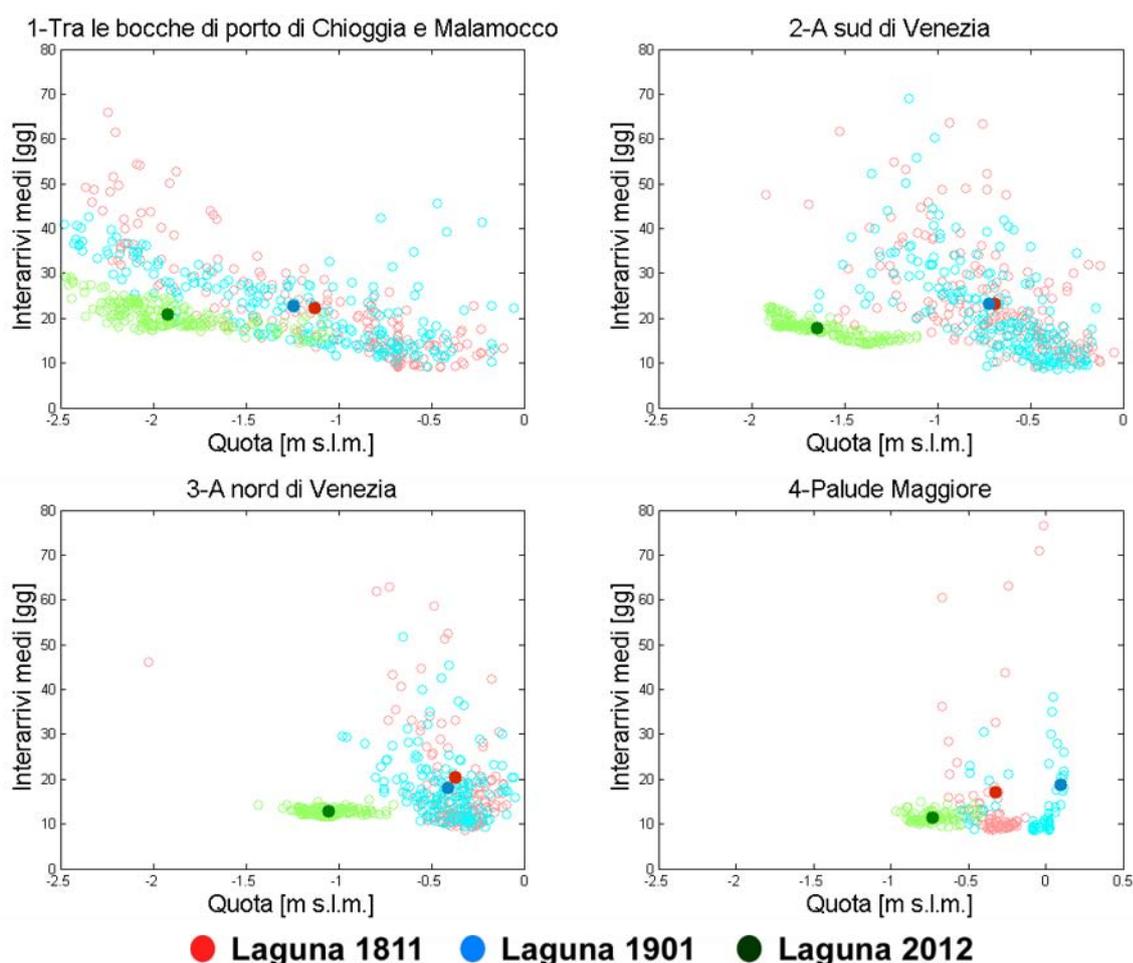


Figura 3-35 – Tempi di interarrivo medi in funzione delle quote per le quattro aree scelte nelle lagune del 1811 del 1901 e del 2012 (cerchi vuoti) e media dei dati a disposizione (cerchi pieni).

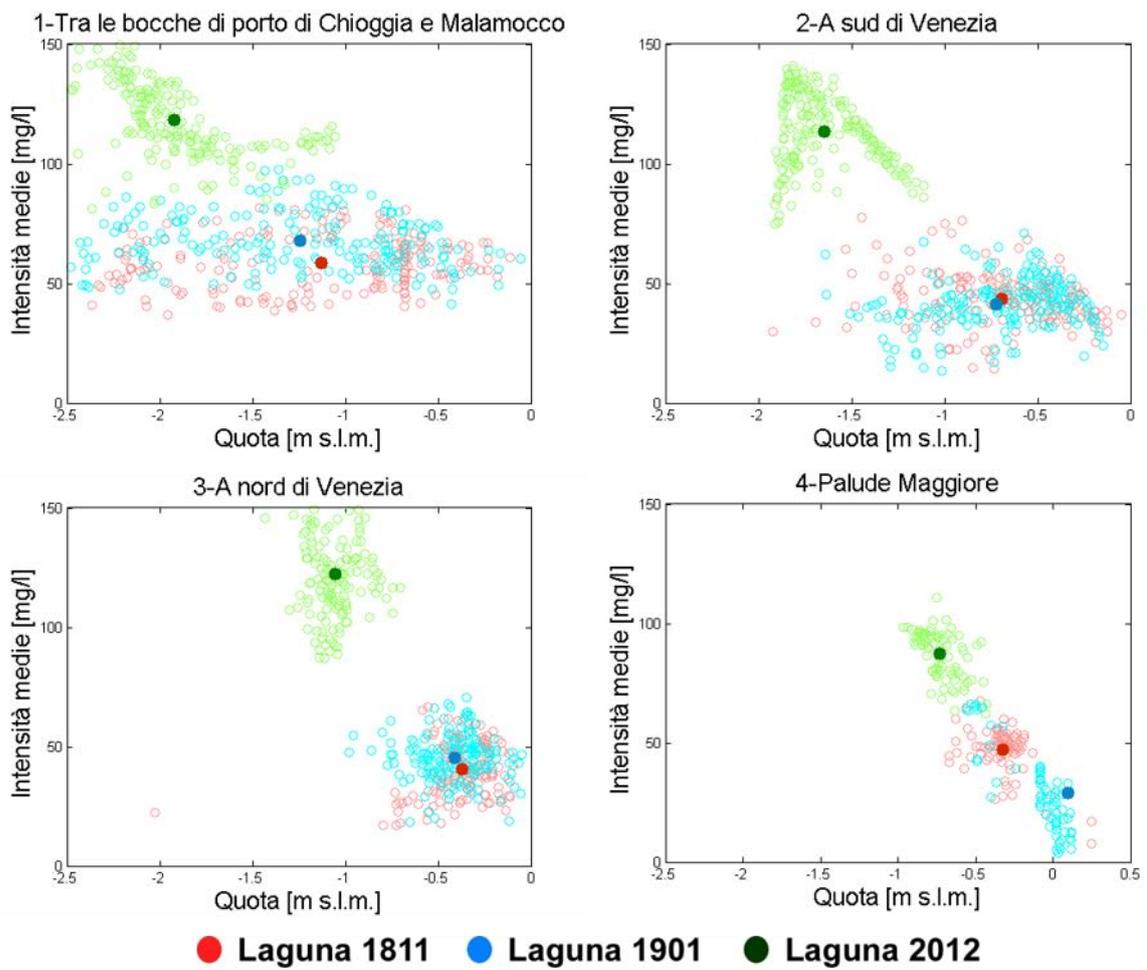


Figura 3-36 – Intensità medie in funzione delle quote per le quattro aree scelte nelle lagune del 1811 del 1901 e del 2012 (cerchi vuoti) e media dei dati a disposizione (cerchi pieni).

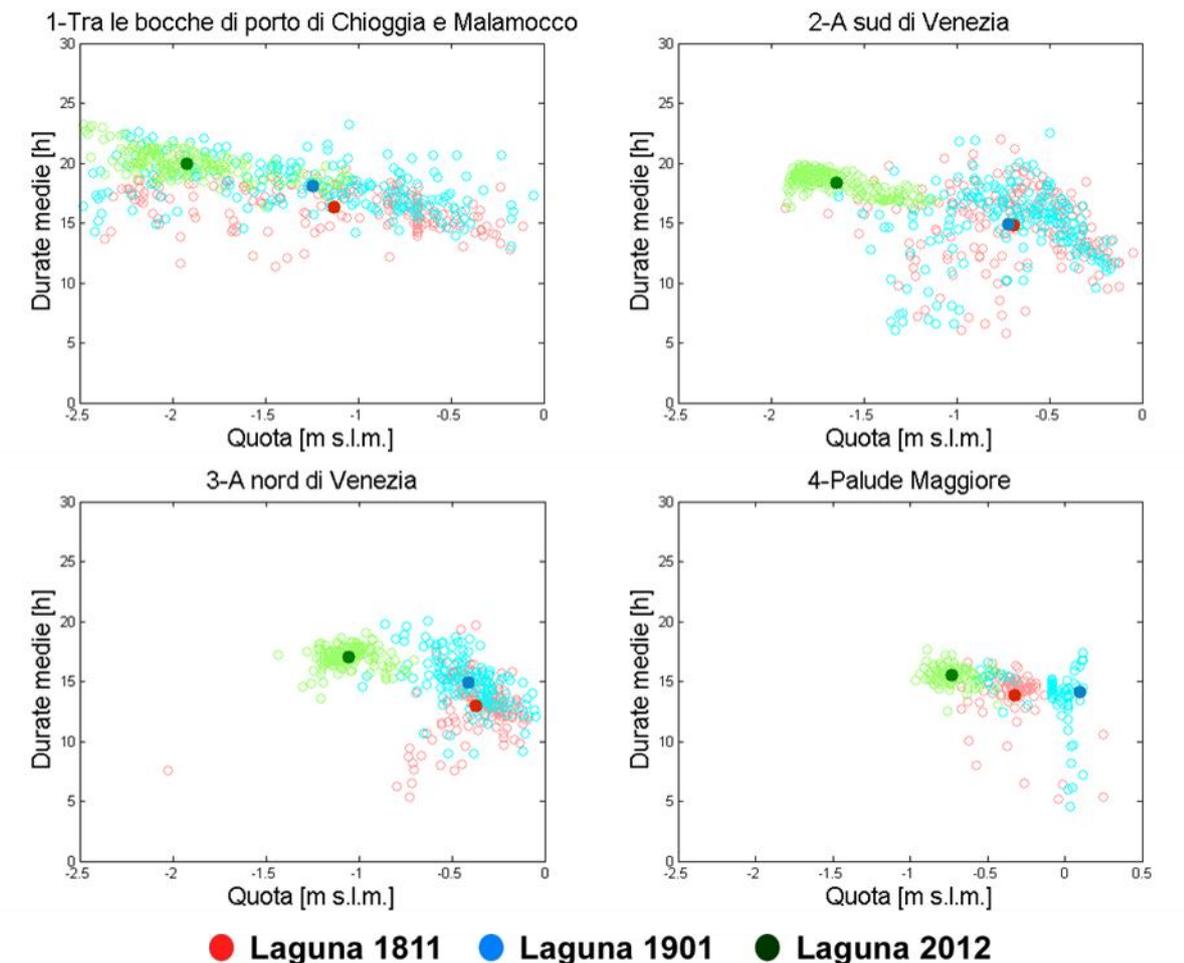


Figura 3-37 - Durate medie in funzione delle quote per le quattro aree scelte nelle lagune del 1811 del 1901 e del 2012 (cerchi vuoti) e media dei dati a disposizione (cerchi pieni).

Come per le analisi puntuali anche per quelle spaziali si sono calcolati i coefficienti di correlazione applicando gli stessi criteri. I risultati per le tre lagune sono riportati nelle figure 3-38 (Laguna 1811); 3-38 (Laguna 1901); 3-40 (Laguna 2012).

Si sono considerate per l'intera laguna le maglie in cui gli eventi di risospensione possono essere modellati come un processo di Poisson cioè tutte quelle in cui il test KS è verificato per i tempi di interarrivo.

Per le tre lagune si può affermare che i coefficienti di correlazione Intensità-Durata essendo prossimi a uno evidenziano una correlazione tra le due variabili. I coefficienti di correlazione Durata-Interarrivo e Intensità-Interarrivo sono prossimi a zero sottolineando quindi una scorrelazione tra queste coppie di variabili. Questo risultato conferma quello precedentemente ottenuto per le analisi puntuali.

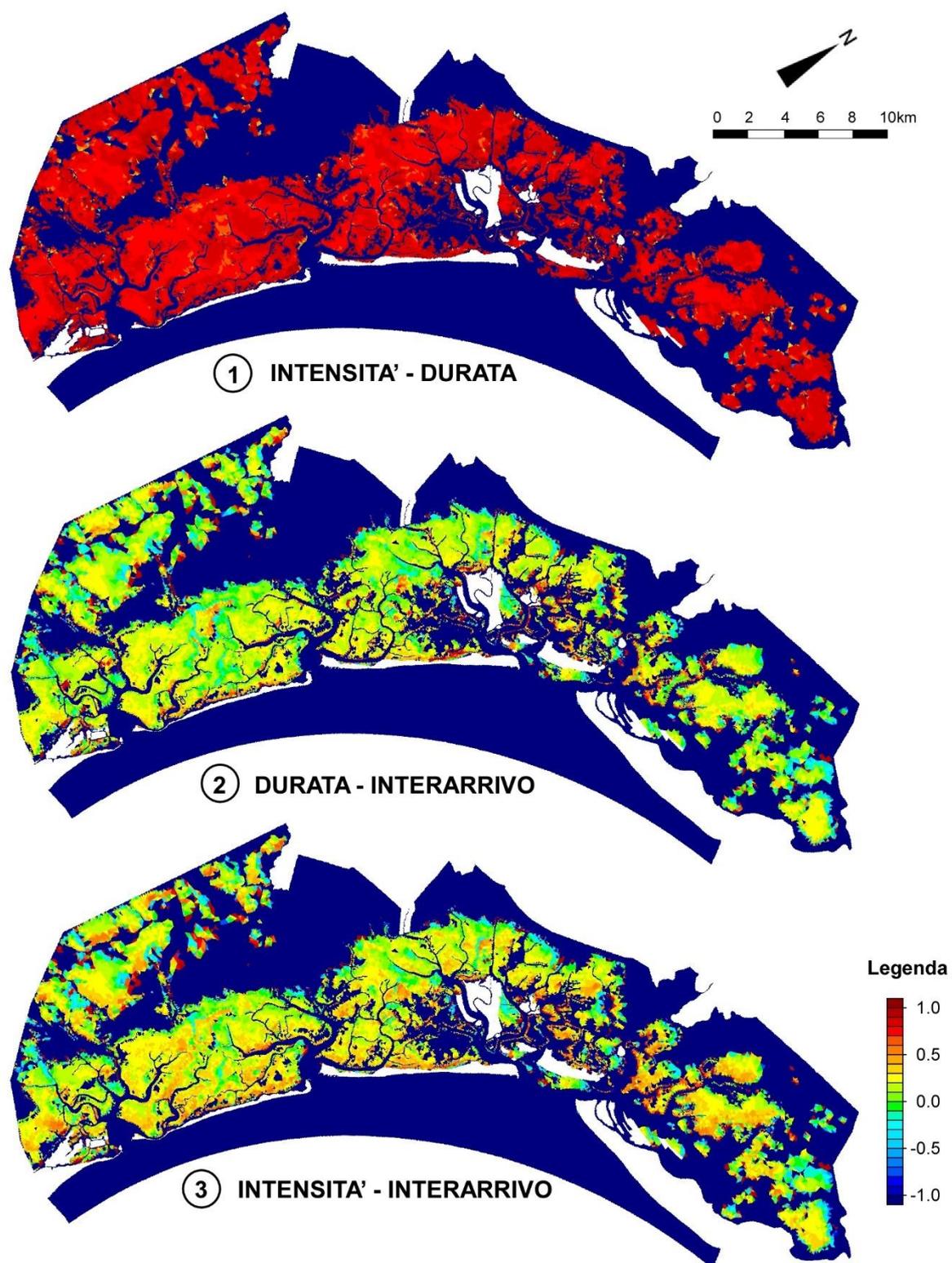


Figura 3-38 – Coefficienti di correlazione Laguna 1811

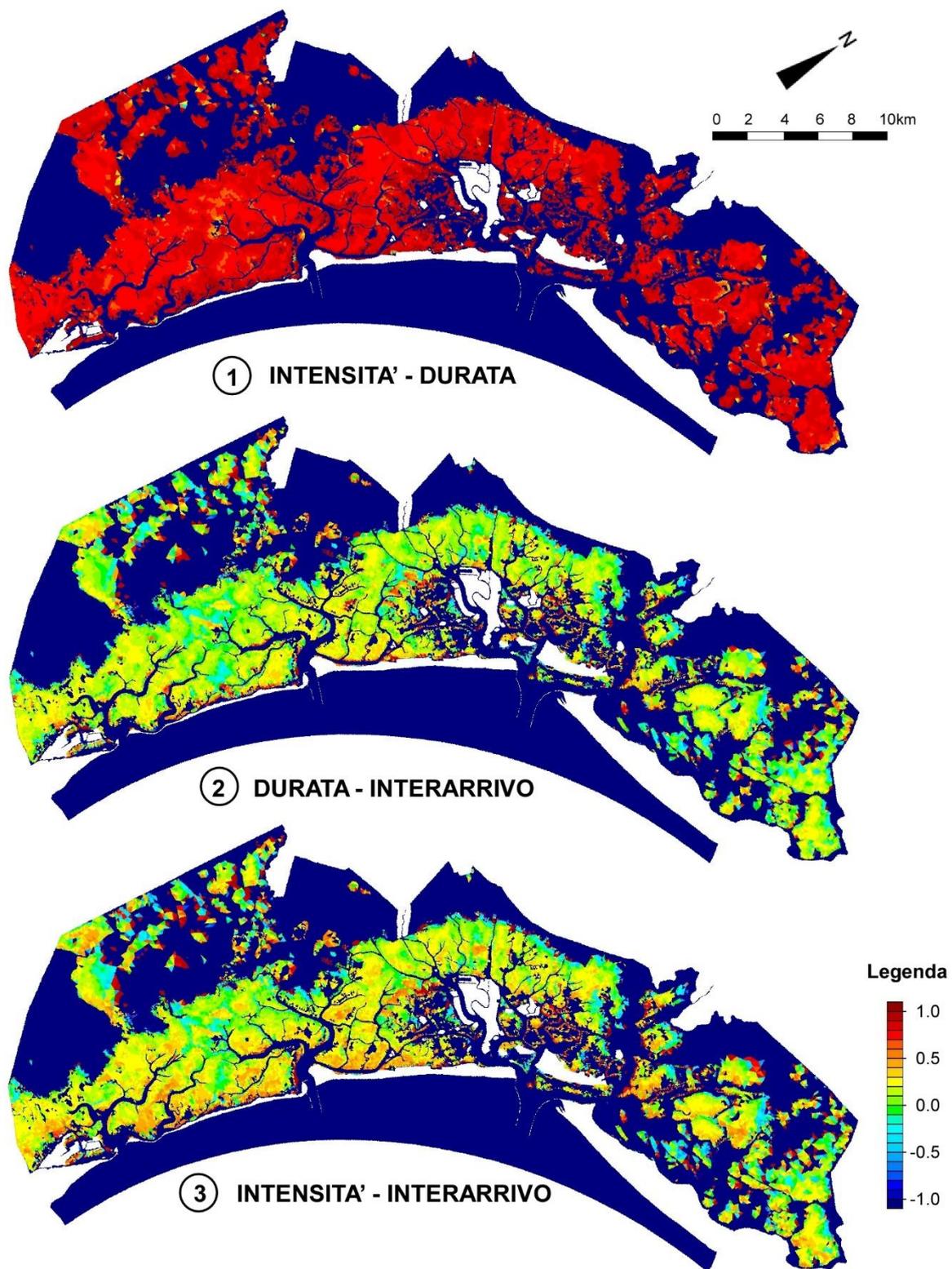


Figura 3-39 - Coefficienti di correlazione Laguna 1901

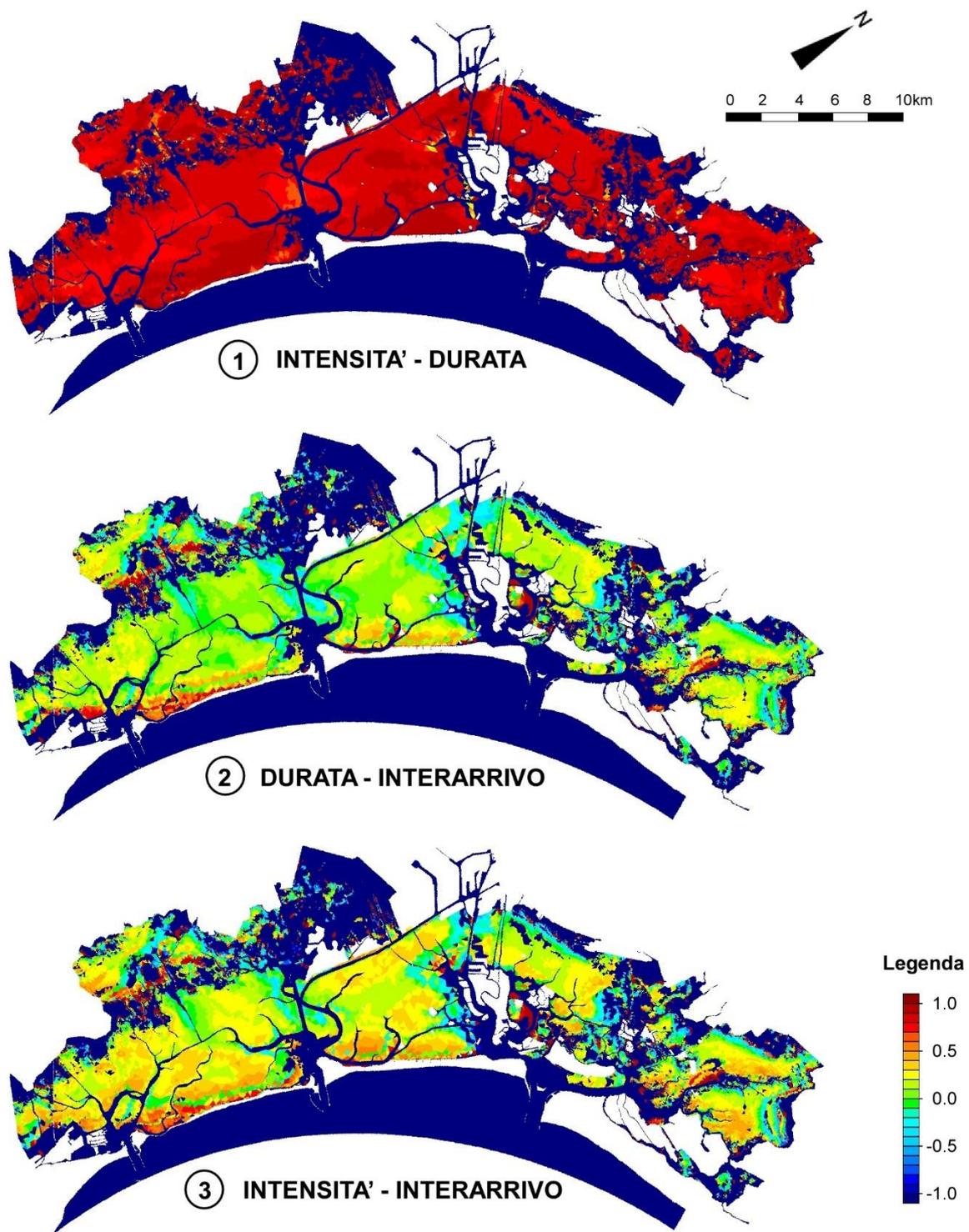


Figura 3-40 - Coefficienti di correlazione Laguna 2012

Si è inoltre rappresentata la frequenza per le tre lagune dei tempi di interarrivo medi (Figura 3-41), delle intensità medie (Figura 3-42) e delle durate medie (Figura 3-43). Si sono suddivise tali variabili in intervalli e per ogni intervallo si è calcolata la frequenza campionaria come:

$$f_E = \frac{n_E}{N}$$

dove:

- n_E = numero di volte che la variabile ricade in un determinato intervallo;
- N = numero totale delle osservazioni della variabile.

Dall'osservazione della frequenza dei tempi medi di interarrivo (Figura 3-41) si nota che le tre curve sono quasi coincidenti, il 2012 presenta una frequenza leggermente inferiore per gli interarrivi più bassi e di poco superiore per quelli più alti.

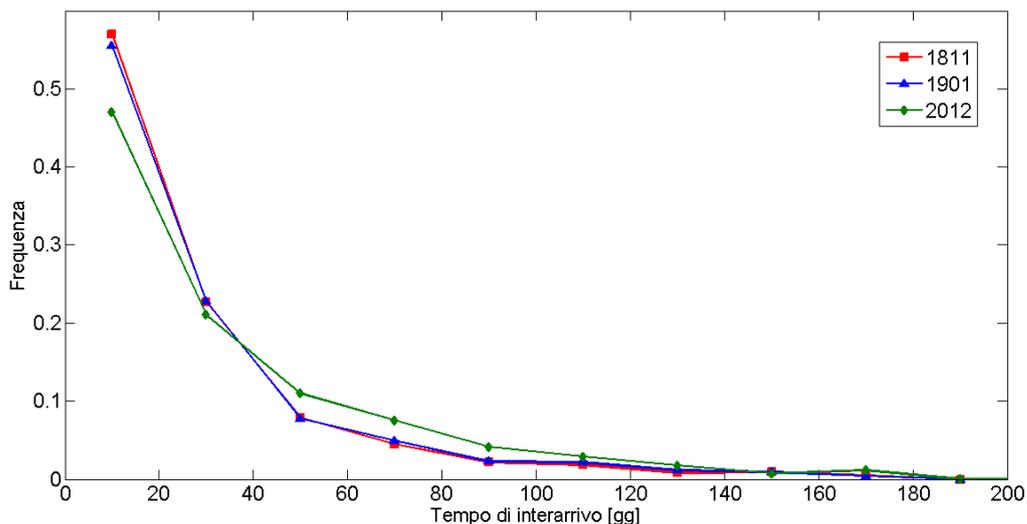


Figura 3-41 – Confronto della frequenza dei tempi di interarrivo medi dell'intera laguna (1811, 1901, 2012) con intervallo di ampiezza 20 giorni. Sono considerate le maglie in cui il test KS è verificato per gli interarrivi.

Per la frequenza delle intensità medie (Figura 3-42) si riscontra per la laguna del 2012 un aumento della frequenza delle intensità al di sopra dei 70 mg/l e una diminuzione al di sotto di tale valore. Questo risultato conferma il già evidenziato aumento delle intensità medie nella laguna del 2012 rispetto alle lagune storiche.

Dall'osservazione della frequenza delle durate medie (Figura 3-43) si nota una curva bimodale per tutte e tre le lagune, effetto evidentemente dovuto alle caratteristiche delle forzanti. La curva della laguna del 2012, rispetto a quelle lagune storiche, presenta un innalzamento del primo picco e un abbassamento del secondo, manifestando una tendenza ad

eguagliarsi.

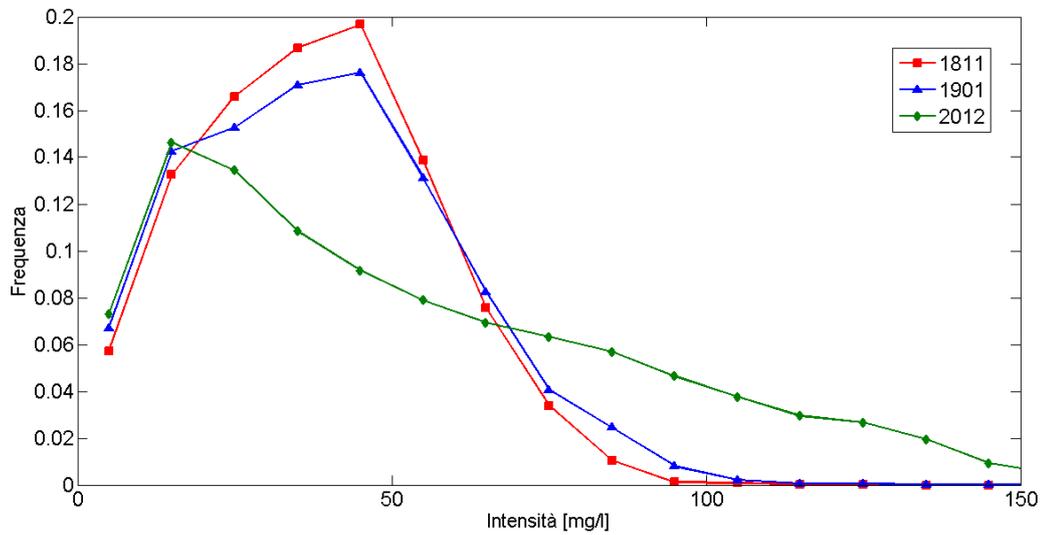


Figura 3-42 - Confronto della frequenza delle intensità medie dell'intera laguna (1811, 1901, 2012) con intervallo di ampiezza 10 mg/l. Sono considerate le maglie in cui il test KS è verificato sia per gli interarrivi che per le intensità.

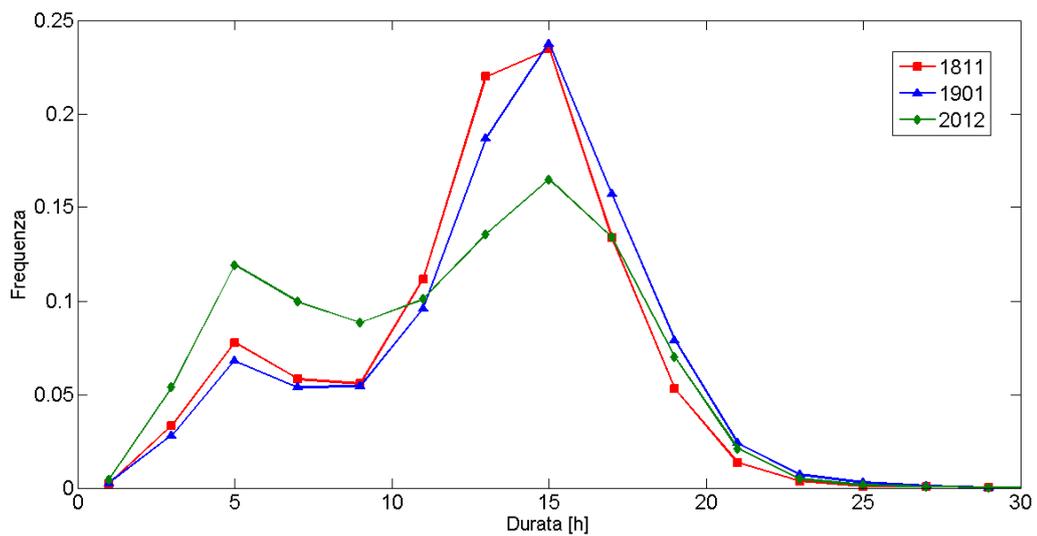


Figura 3-43 - Confronto della frequenza delle durate medie dell'intera laguna (1811, 1901, 2012) con intervallo di ampiezza 10 ore. Sono considerate le maglie in cui il test KS è verificato sia per gli interarrivi che per le durate.

4 L'effetto stabilizzante della vegetazione sommersa

In questo lavoro di tesi, come già sottolineato, per poter effettuare un confronto più omogeneo possibile tra le tre configurazioni della laguna prese in esame non si è considerata la presenza della vegetazione sommersa la cui distribuzione spaziale è, di fatto, impossibile da conoscere per le lagune storiche. Si è voluto tuttavia in questo ultimo capitolo, per completezza di risultati, evidenziare l'effetto che produce negli eventi di risospensione tale vegetazione per la laguna del 2012. La laguna del 2012 infatti è l'unica per la quale sono a disposizione campagne di monitoraggio che localizzano in modo certo le praterie di fanerogame che costituiscono la vegetazione sommersa. Tali praterie sono localizzate in prossimità dell'isola di Pellestrina tra la bocca di porto di Chioggia, a sud, e la bocca di Malamocco, a nord (Figura 4-1).

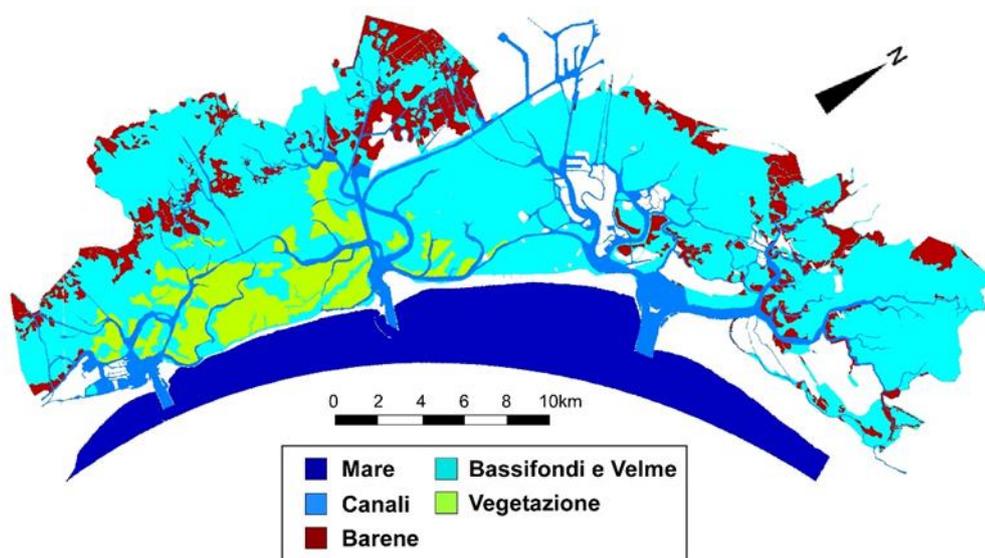


Figura 4-1 - Distribuzione spaziale delle diverse forme lagunari

Si sono quindi confrontate le caratteristiche degli eventi di risospensione con e senza la presenza della vegetazione sommersa mantenendo come soglia di concentrazione $C_0 = 40$ mg/l. Le simulazioni con la vegetazione erano già state svolte in un precedente lavoro di tesi (Antico 2012).

Si fa notare che il modello numerico concettualizza l'effetto stabilizzante della vegetazione annullando la risospensione ove essa è presente

Dal confronto delle due schematizzazioni della Laguna si nota che la presenza della vegetazione produce tempi di interarrivo medi molto alti (Figura 4-2) e valori di intensità (Figura 4-3) e durate (Figura 4-4) medie ridotti, anche se non nulli.

E' opportuno osservare, infatti, che il valore della concentrazione in sospensione in un dato punto non è legato solo alla risospensione locale di sedimenti, ma anche al flusso di sedimenti da e verso le aree limitrofe. E' logico pertanto attendersi che solo al centro di praterie vegetate piuttosto estese gli eventi di risospensione sopra soglia siano annullati, mentre nelle zone periferiche essi possono essere ancora presenti sia pur con entità ridotta.

Dal test di Kolmogorov-Smirnov (Figura 4-5), a conferma dell'effetto positivo della vegetazione, risulta che nelle parti centrali delle aree vegetate il test non è verificato per la mancanza di eccedenze sopra soglia.

La presenza di vegetazione sul fondale lagunare è quindi un fattore determinante, che comporta una stabilizzazione del fondale stesso, riducendo drasticamente, fino ad annullarla, la risospensione dei sedimenti.

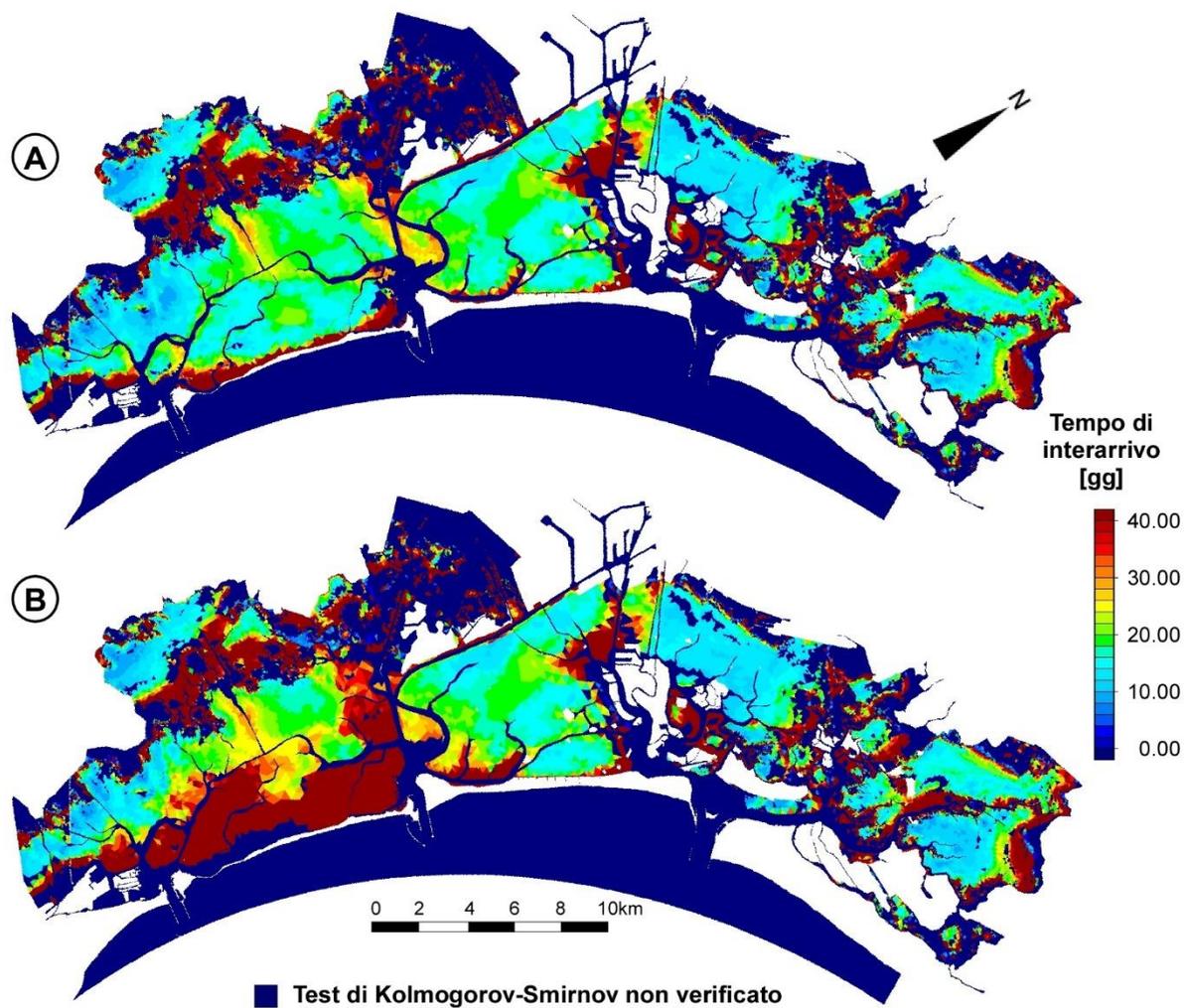


Figura 4-2 – Confronto dei tempi di interarrivo medi nella laguna di Venezia del 2012. In A) non è considerata la presenza di fanerogame in B) è considerata.

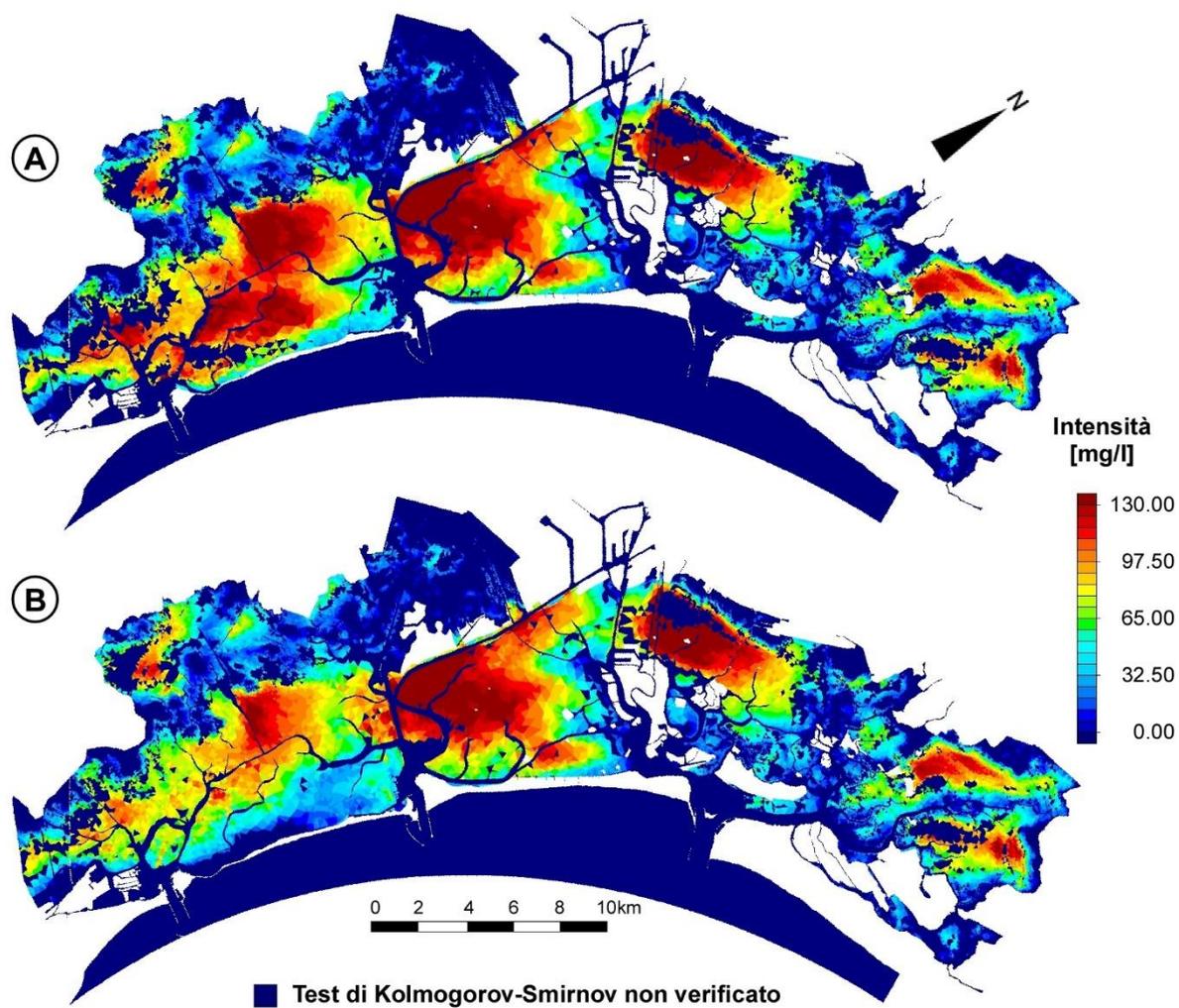


Figura 4-3 – Confronto delle intensità medie nella laguna di Venezia del 2012. In A) non è considerata la presenza di fanerogame in B) è considerata.

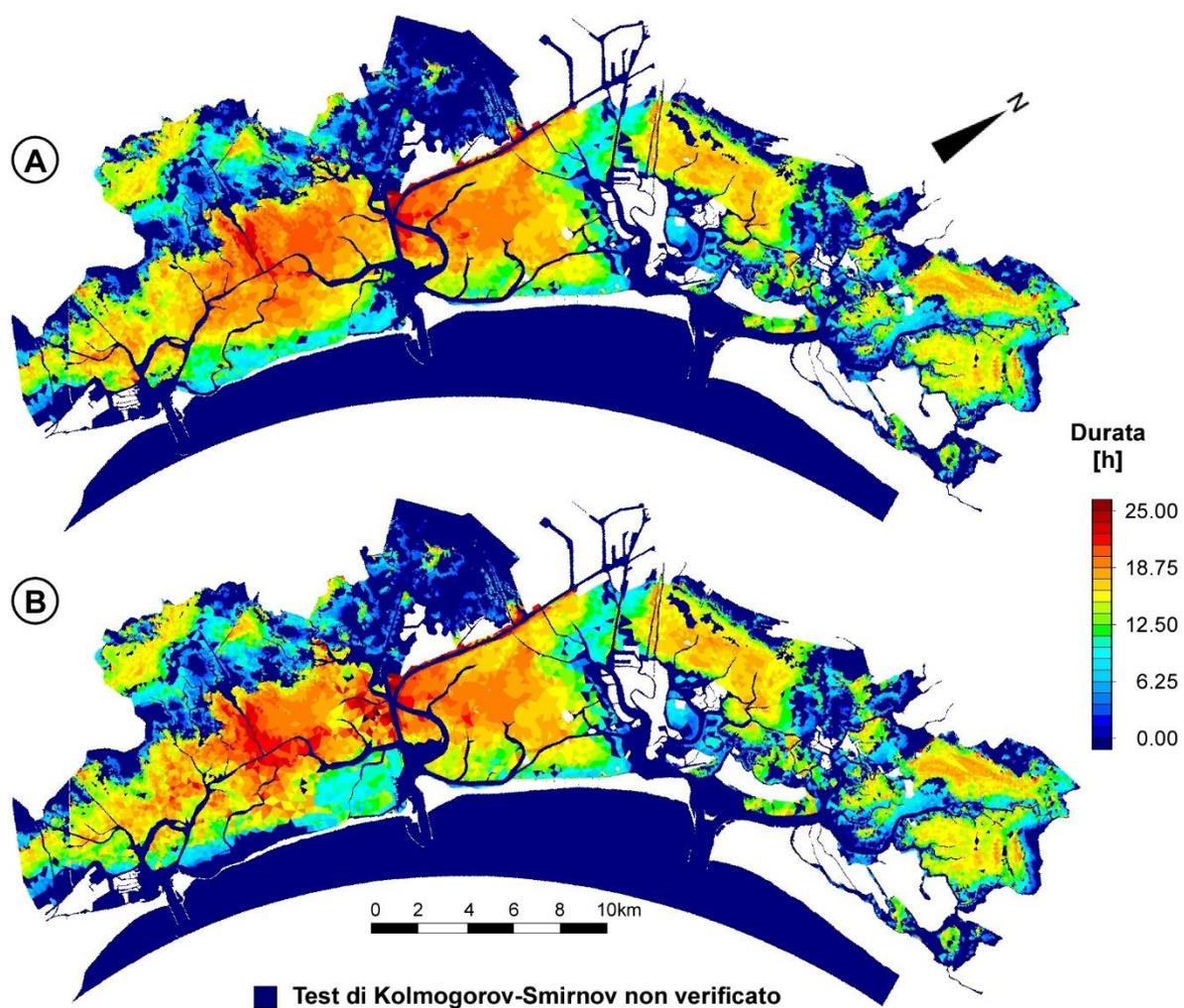


Figura 4-4 – Confronto delle durate medie nella laguna di Venezia del 2012. In A) non è considerata la presenza di fanerogame in B) è considerata.

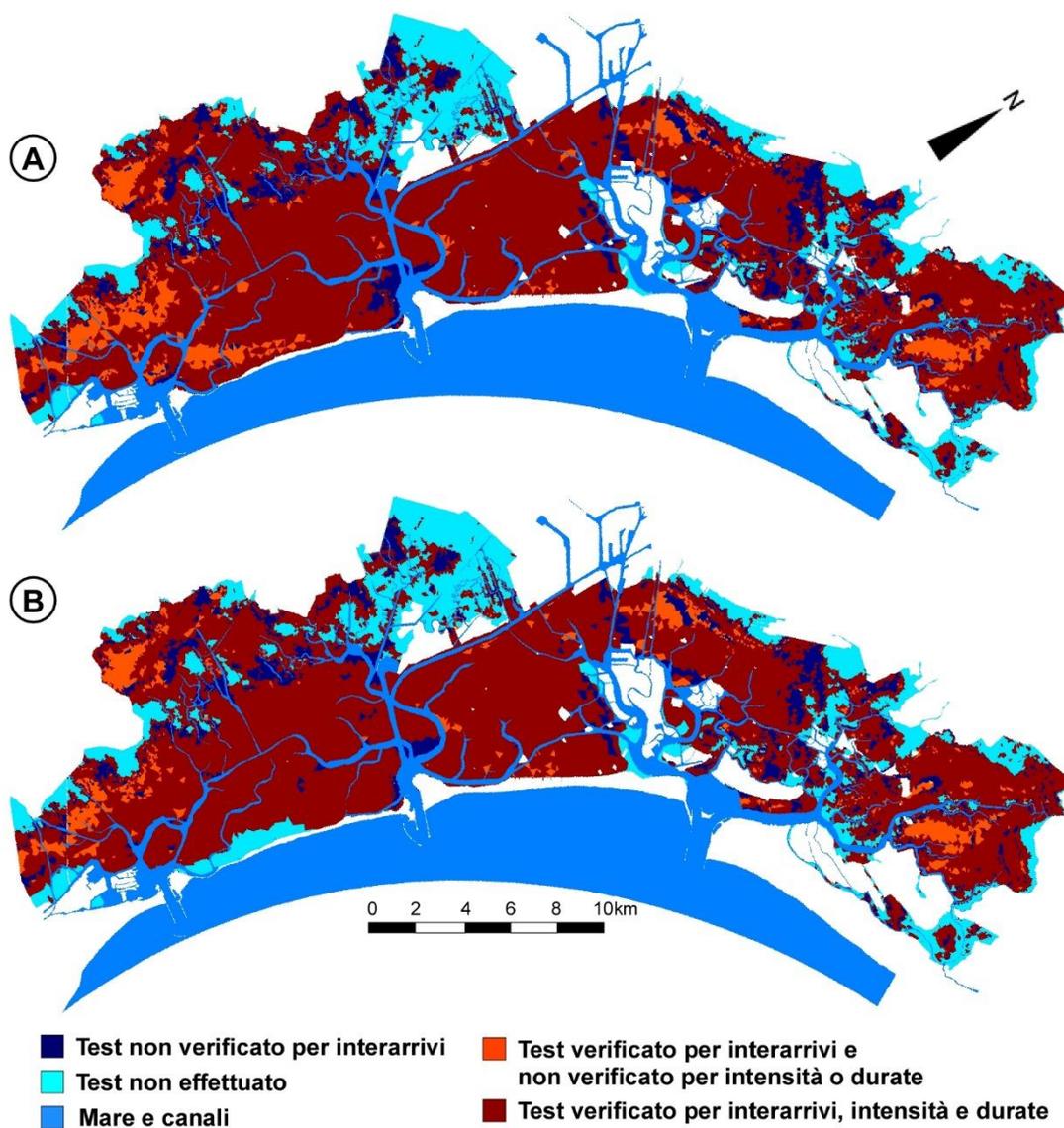


Figura 4-5 - Confronto del test di Kolmogorov-Smirnov nella laguna di Venezia del 2012. In A) non è considerata la presenza di fanerogame in B) è considerata.

5 Conclusioni

Molti studi e monitoraggi hanno messo in luce come la laguna di Venezia stia sperimentando un lento e inesorabile processo di erosione e di degrado morfologico. Ciò si è riscontrato in particolar modo nella zona della laguna centro meridionale, dove la perdita della conformazione originale nel tempo si fa sempre più marcata. Si è visto come tra i fenomeni naturali le onde da vento siano certamente la causa principale dell'arretramento generalizzato dei margini delle barene e della risospensione dei sedimenti dai bassifondi. I sedimenti risospesi sono poi trasportati dalle correnti di marea, che a loro volta influenzano sia i processi erosivi sia il tasso di deposito dei sedimenti stessi in aree più profonde e nei canali oltre al loro trasporto verso il mare.

Il presente lavoro di tesi si è focalizzato sulla concentrazione dei sedimenti fini in sospensione all'interno del bacino lagunare, causata dalle onde da vento e dalle correnti di marea.

Si sono analizzate in particolare le caratteristiche degli eventi di risospensione di tre configurazioni della laguna di Venezia, si è valutato dapprima se gli eventi di risospensione anche nelle lagune storiche potessero essere approssimati con un processo di Poisson, si sono in seguito svolte diverse analisi per valutare come variano queste caratteristiche dal 1811 ad oggi.

A seguito delle analisi effettuate si può concludere che anche per le lagune storiche come per la laguna attuale, nella maggior parte del bacino lagunare, gli eventi di risospensione possono essere approssimati con un processo di Poisson. Si è confermato che le porzioni di laguna in cui gli eventi di risospensione non possono essere modellati come un processo di Poisson per tutte e tre le configurazioni, sono principalmente rappresentate dalle barene, dalla rete di canali e dalle zone situate nei pressi delle bocche di porto. In prossimità delle prime non si riscontrano eccedenze sopra soglia per la loro ridotta profondità. È importante sottolineare che da un'analisi preliminare si è evidenziato come nei canali principali, in generale, gli eventi di concentrazione sopra soglia non siano processi di Poisson in ragione, evidentemente, del fatto che, in tali aree la concentrazione in sospensione dei sedimenti sia prevalentemente legata

al flusso delle correnti di marea che sicuramente non sono un processo casuale. Si è pertanto deciso di escludere tutti i canali principali dalla nostra analisi.

Per tutte e tre le lagune nelle zone protette dal vento di Bora, grazie alla presenza di barene, isole e strutture artificiali si riscontrano tempi di interarrivo più elevati. Per la laguna del 2012 è evidente che tempi di interarrivo maggiori si localizzano in laguna nord-orientale e nelle porzioni di laguna collocate ad ovest. Al contrario, tempi di interarrivo ridotti sono localizzati in aree dove il fetch è illimitato. Per le lagune storiche queste considerazioni rimangono ancora valide anche se l'ambiente più naturale e più ricco di barene produce una distribuzione dei tempi di interarrivo meno uniforme.

Sia nelle analisi puntuali che in quelle spaziali è risultato evidente che i valori di eccedenze sopra soglia nella laguna attuale sono maggiori rispetto a quelle delle lagune storiche, questo è dovuto alla mancanza dell'effetto protettivo svolto dalle barene.

Lo studio delle quote ha evidenziato che non è immediato definire la dipendenza che esiste tra le quote del fondo e le caratteristiche degli eventi di risospensione. In particolare tra quote e durate da una prima analisi non si è riuscito a definire nessun rapporto chiaro. Tra quote e interarrivi, considerando una porzione di laguna ridotta ed omogenea in termini di esposizione, per il 2012 si è visto che gli interarrivi sono indifferenti al variare della quota. L'andamento delle intensità in funzione delle quote dipende dall'andamento degli sforzi di attrito al fondo, infatti intorno ai -2,5 m s.m.m. si registra il valore massimo del fondale sotto il quale il moto ondoso non è più in grado di far sentire i suoi effetti (Fagherazzi, et al. 2006).

La difficoltà di determinare una dipendenza tra quote del fondo e caratteristiche degli eventi di risospensione è dovuta anche alla complessità di tale analisi. Un ruolo importante infatti è ricoperto dalla morfologia dell'area attorno al punto in cui si vogliono misurare tali caratteristiche.

Tenendo conto di questa difficoltà dalla successiva analisi di aree non molto estese ed omogenee si può affermare che i tempi di interarrivo nel 2012 per tali aree sono mediamente diminuiti mentre le durate e le intensità sono mediamente aumentate a conferma del trend erosivo che caratterizza la laguna Veneta.

Con queste analisi iniziali si può dedurre quindi che interarrivi e durate sono poco influenzati dall'evoluzione morfologica i primi infatti nell'ultimo secolo sono di poco diminuiti, mentre le seconde sono lievemente aumentate e che le intensità invece sono influenzate dall'evoluzione morfologica complessiva essendone sia la causa che l'effetto.

Dall'analisi dei coefficienti di correlazione si nota che esiste una correlazione forte tra durate e intensità.

L'andamento delle frequenze conferma le osservazioni già fatte per le intensità, per gli interarrivi si può affermare che non hanno subito nel tempo variazioni di frequenza. Le durate evidenziano invece un andamento bimodale dovuto alle forzanti.

Infine, il confronto effettuato considerando o meno la presenza di vegetazione sommersa conferma l'effetto stabilizzante della vegetazione sul fondale.

L'analisi svolta attraverso l'utilizzo del modello approfondisce la conoscenza degli effetti che producono le onde da vento nell'evoluzione morfodinamica della laguna di Venezia. Il carattere poissoniano degli eventi di risospensione risulta significativo. Si possono infatti generare, attraverso le realizzazioni di Monte Carlo, eventi sintetici di risospensione, caratterizzati da un tempo di interarrivo medio, una durata media e un'eccedenza media sopra la soglia statisticamente equivalenti a quelli reali e, con essi, forzare modelli di evoluzione a lungo termine.

L'analisi svolta sulle medie delle caratteristiche degli eventi di risospensione è un'ulteriore indagine utile per gli studi a lungo termine. Attraverso uno studio più approfondito dell'evoluzione storica di tali caratteristiche e delle variabili dalle quali dipendono si potrà comprendere con più precisione come modificare i parametri con cui forzare i modelli di evoluzione a lungo termine per studiare l'evoluzione morfologica della laguna.

Bibliografia

- Amos, C.L., et al. «The stability of tidal flats in Venice Lagoon - the results of in-situ measurements using two benthic, annular flumes.» In *Journal of Marine Systems*, 51, 211-241. 2004.
- Antico, F. *Analisi della dinamica dei sedimenti nella Laguna di Venezia*. Tesi di laurea specialistica, 2012.
- Armanini, A. «Non-uniform sediment transport: dynamics of the active layer.» In *Journal of Hydraulic Research*, 33(5), 611-622. 1995.
- Battjes J.A., Janssen J.P.F.M. «Energy loss and set-up due to breaking of random waves.» In *Proceedings of 16th International Conference on Coastal Engineering*, 569-587. New York: Am. Soc. Of Civ. Eng., 1978.
- Booij , N., R.C. Ris, e L.H. Holthuijsen . «A thrd-generation wave-model for costal regions - 1. Model description and validation.» In *Journal of Geophysical Reserch-Oceans*, 104(C4), 7649-7666. 1999.
- Breugem , W.A., e L.H. Holthuijsen. «Generalized shallow water wave growth from Lake George.» In *Journal of waterway, Port, Costal and Ocean Engeneering*, Vol 133(3), doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(2007) 133:3(177). 2007.
- Carniello, L., A. D'Alpaos, e A. Defina. «Modeling wind-waves and tidal flow in shallow microtidal basins.» In *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, doi:10.1016/j.ecss.2011.01.001., doi:10.1016/j.ecss.2011.01.001. 2011.
- Carniello, L., A. Defina, e L. D'Alpaos. «A combinated wind wave-tidal model for the Venice Lagoon, Italy.» In *Journal of Geophysical Reserch-Earth Surface*, 110, F04007, doi:10.1029/2004JF000232. 2005.
- Carniello, L., A. Defina, e L. D'Alpaos. «Modeling sand-mud transport induced by tidal currents and wind wave in shallow microtidal basins: Application to the Venice Lagoon (Italy).» In *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 102-103; 105e115. 2012.
- Carniello, L., A. Defina, e L. D'Alpaos. «Morphological evolution of the Venice Lagoon:evidence to the past and trend for the future.» In *Journal of Geophysical Research- Earth Surface*, 144, F04002, doi:10.1029/2008JF001157. 2009b.

-
- Carniello, L., A. Defina, e L. D'Alpaos. «Simulation of wind Waves in shallow microtidal basins: application to the Venice Lagoon.» In *River, Costal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2009*, 907-912, ISBN 878-0-415-55426-8, vol.2. London: Vionnet C.A., Garcia M.H., Perillo G.M.E., Taylor and Francis Group, 2009a.
- Carniello, L., A. Defina, e L. D'Alpaos. «Un modello di trasporto solido in sospensione per miscele bi-granulari: prime applicazioni alla laguna di Venezia.» In *Atti del XXXI° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, 204. Perugia: Morlacchi Editore, 2008.
- Carniello, L., S. Silvestri, M. Marani, A. D'Alpaos, V. Volpe, e A. Defina. «Sediment dynamics in shallow tidal basins: In situ observations, satellite retrievals, and numerical modeling in the Venice Lagoon.» In *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 119, doi:10.1002/2013JF003015. 2014.
- D'Alpaos, A., L. Carniello, e A. Rinaldo. «Statistical mechanics of wind wave-induced erosion in shallow tidal basin: Inferences from the Venice Lagoon.» In *Geophysical Reserch Letters*, 40, 1-6, doi:10.1002/grl.50666. 2013.
- D'Alpaos, L. *L'evoluzione morfologica della Laguna di Venezia attraverso la lettura di alcune mappe storiche e delle sue carte idrografiche*. Comune di Venezia Istituzione Centro Previsioni e Segnalazione Maree Legge speciale per Venezia, 2010.
- D'Alpaos, L., e A. Defina. «Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow Lagoons: a review of open issues and application to the Venice Lagoon.» In *Computers and Geosciences*, 33, 476-496, doi:10.1016/j.cageo.2006.07.009. 2007.
- D'Alpaos, L., e A. Defina. «Modellazione matematica del comportamento idrodinamico di zone a barena solcate da una rete di canali minori.» In *Rapporti e Studi, Ist. Veneto di Scienze, Lettere ed Arti*, XII, 353-372. 1995.
- D'Alpaos, L., e A. Defina. «Venice Lagoon hydrodynamics simulation by coupling 2D and 1D finite element models.» In *Proceedings of the 8th Conference of Finite Elements in Fluids. New Trend and Application*, 917-926. Barcellona (Spagna), 20-24 Settembre, 1993.
- Defina, A. «Two Dimensional Shallow Flow Equations for Partially Dry Areas.» In *Water Resources Research*, 36(11), 3251-3264. 2000.

-
- Defina, A. «Numerical experiments on bar growth.» In *Water Resources Research*, 36(11), ESG2-1-ESG2-12. 2003.
- Defina, A., L. D'Alpaos, e B. Matticchio. «A new set of equation for very shallow water and partially dry areas suitable to 2D numerical models.» In *Proceedings of the Specialty Conference on "Modelling of flood Propagation Over Initially Dry Areas"*, 72-81. Milano, 29 Giugno - 1 Luglio: Molinaro P. e Natale L., 1994.
- Eadie, W.T., D. Drijard, F.E. James, M. Roos , e B. Sadoulet. *Statistical Methods in Experimental Physics*. Amsterdam: North-Holland. pp. 269–271, 1971.
- Fagherazzi, S., L. Carniello, L. D'Alpaos, e A. Defina. «Critical bifurcation of shallow microtidal landforms in tidal flats and salt marshes.» In *PNAS*, vol. 103, 8337-8341. 2006.
- Hasselmann, K. «On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping.» In *Boundary-Layer Meteorology*, 6, 1-2, 107-127. 1974.
- Hesselman K., et al. «Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP).» In *Deutsches Hydrographisches Zeitschrift Supplement*, 12(A8), 1-95. 1973.
- Hirano, M. «River bed degradation with armouring.» In *Transactions Japan Society of Civil Engineering*, 3, 194-195. 1971.
- Hirano, M. «Studies on variation and equilibrium state of a river bed composed of non-uniform material.» In *Transaction Japan Society of Civil Engineers*, 4, 128-129. 1972.
- Komen, G.J., K. Hasselmann, e S. Hasselmann. «On the existence of a fully developed wind-sea spectrum.» In *Journal of Physical Oceanography*, 14, 1271-1285. 1984.
- LeMéhauté, B. «On non.saturated breakers and the wave run-up.» In *Proceedings of 8th International Conference on Coastal Engineering*, 77-92. Mexico City: Am. Soc. Of Civ.Eng., 1962.
- Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti - Magistrato delle Acque di Venezia, concessionario Consorzio Venezia Nuova. www.salve.it. 2013.
- Murray, W. A. «Erosion of coarse sand-clayey silt mixtures.» In *Journal of Hydraulic Division*, 103(HY10), 1222-1227. 1977.

-
- Pagan, A. *Caratterizzazione della distribuzione dei sedimenti nella laguna di Venezia per un modello di evoluzione morfologica*. Tesi di laurea specialistica, 2007.
- Parker, G., M. H. Garcia, Y Fukushima, e W. Yu. «Experiments on turbidity currents over an erodible bed.» In *Journal of Hydraulic Research*, 25(1), 123-147. 1987.
- Pritchard, D., e A.J. Hogg. «Cross-shore sediment transport and the equilibrium morphology of mud flats under tidal current.» In *Journal of Geophysical Reserch - Earth Surface*, 108(C10), 3313, doi:10.1029/2002JC001570. 2003.
- Soulsby, R.L. In *Dynamics of Marine Sand: A Manual for Pratical Applications*. London: Thomas Telford, pp.248, 1997.
- Soulsby, R.L. «Bed shear-stresses due to combined waves and current.» In *Advances in Coastal Morphodynamics*, 4-23. Deft, Netherlands: Stive M.J.F. et al., Deft Hydraul, 1995.
- Stuart , A., K. Ord , e A. Steven . *Classical Inference and the Linear Model. Kendall's Advanced Theory of Statistics 2A*. London: Arnold. pp. 25.37–25.43, 1999.
- Van Ledden M., Wang Z.B., Winterwerp H., De Vriend H. «Sand-Mud morphodynamics in a short tidal basin.» In *Oceans Dynamics*,54, 385-391, doi:10.1007/s10236-003-0050-y. 2004.
- Van Ledden, M. *Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins*. Ph.D. Thesis, T.U. Deft, Dep. of Civil Engineering and Geosciences, report 03-2, ISSN 0169-6548, 2003.
- Van Rijn, L. C. «Sediment Transport, Part I: Bed load transport.» In *Journal ofHydraulic Engineering*, 110(11), 1431-1456. 1984a.
- Van Rijn, L. C. «Sediment Transport, Part II: Suspended load transport.» In *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), 1431-1456. 1984b.
- Winterwerp, J.C. *On the dynamics of high-concentrated mud suspension*. PhDthesis, Deft University of Technology, Deft, 1999.
- Young , I.R., e L.A. Verhagen . «The growth of fetch limited waves in water of finite depth. Parth 1: Total energyand peak frequency.» In *Costal Engineering*, 29(1-2), 47-78. 1996.

Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto i miei relatori, il Prof. Luca Carniello e il Prof. Andrea D'Alpaos, per avermi seguita nello svolgimento di questo lavoro, per la professionalità e la grande disponibilità dimostratemi.

Ringraziamenti sentiti vanno alla mia famiglia che mi è stata vicina in questo percorso di studi. Ai miei genitori Lorella e Lorenzo, a mio fratello Andrea, ai miei nonni Rosina e Carino, a mia zia Chicca, va la mia riconoscenza per avermi sostenuta e sopportata con affetto.

Ringrazio ancora i miei amici e i miei compagni di Università con cui ho condiviso fatiche e soddisfazioni, che hanno contribuito a rendere più piacevole questo percorso di studi.

Desidero ringraziare in modo particolare Nicola per l'aiuto e i consigli e per avermi accompagnata in questi anni.

