



Doc. SICS_210_Integraz
Progetto messa in produzione pozzo
Agosta 1 Dir

INTEGRAZIONI ALLO STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

Allegato 7a.

**Attività 1 – Analisi dell’impatto di subsidenza
attesa dalla coltivazione del giacimento Agosta
sull’assetto idrodinamico delle Valli di Comacchio**

Luglio 2016

Contratto Aperto n. 2500017034

Attività 1

Analisi dell'impatto di subsidenza attesa dalla coltivazione del giacimento Agosta sull'assetto idrodinamico delle Valli di Comacchio

Rapporto finale

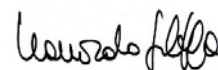
Giugno 2016

Coordinatore:

Prof. Daniele Masetti

Responsabile scientifico

Dr. Ing. Ph.D. Leonardo Schippa



Collaboratori:

Dr. Ing. Ph.D. Dario Bernardi

(modellazioni idrodinamiche)

Dott. Luca Gasperini

(rilievi batimetrici)

Dott. Fabrizio Del Bianco

(rilievi batimetrici)

EXECUTIVE SUMMARY

Indice

OBIETTIVI DELLO STUDIO.....	I
ANALISI DEL CONTESTO	II
GLI SCENARI E LE SIMULAZIONI IDRODINAMICHE.....	III
COMMENTO AI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI E CONCLUSIONI	VI
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI ESSENZIALI	IX

Obiettivi dello studio

Il presente studio si propone di valutare gli effetti della subsidenza attesa nell'ambito della finestra temporale 2017-2030 sull'assetto idrodinamico delle Valli di Comacchio dovuto alla coltivazione del Campo Agosta.

In particolare l'assetto idraulico del sistema è indagato considerando la presenza dei manufatti idraulici esistenti (i.e chiaviche, sifoni e idrovora a Stazione Foce) e dell'argine di separazione acque pubbliche e private in fase di realizzazione lungo la linea di confine tra le province di Ferrara e Ravenna.

Pertanto nello studio si sono considerate le seguenti configurazioni:

- **stato di fatto (SDF)**, così come oggi si presenta in considerazione dei contributi di scambio idrico dalle chiaviche esistenti (Leonarda, Pedona, Scirocca), dalla idrovora a stazione Foce e dai sifoni di collegamento a Reno (Case di Guardia e Casalino), e considerando altresì la presenza dell'argine di separazione tra le acque pubbliche e private che corre lungo il confine delle province di Ferrara e Ravenna (ad oggi lavori in corso di realizzazione).
- **stato previsionale di subsidenza al 2020 (SUBS2020)**, che proietta sull'orizzonte temporale dell'anno 2020 la batimetria delle Valli in considerazione dei risultati del modello geomeccanico sviluppato da ENI [1] in considerazione della presenza dei Campi di Agosta e Dosso degli Angeli nello scenario più cautelativo (scenario *upper*);

- **stato previsionale di subsidenza al 2030 (SUBS2030)** che considera la batimetria aggiornata attraverso l'utilizzo dei risultati del modello geomeccanico fornito da ENI [1], nello scenario più cautelativo (scenario *upper*).

Analisi del contesto

In via preliminare è stata condotta un'analisi sulle potenziali forzanti del sistema: scambi idrici attraverso chiaviche, sifoni ed idrovora, marea e vento. Inoltre è stata effettuata un'analisi dei bilanci idrologici in laguna al fine di valutare le potenziali escursioni di livello e quindi le più opportune condizioni iniziali da assumere nelle simulazioni idrodinamiche.

L'intensità delle forzanti è stata valutata sulla scorta dell'analisi delle serie storiche dei dati anemometrici ed idrometrici raccolti presso le stazioni di misura presenti nella porzione geografica limitrofa alle Valli ed al loro interno. Le escursioni di livello registrate all'interno delle Valli sono state confrontate con le risultanze del bilancio idrologico speditivo delle Valli, al fine di definire le opportune condizioni iniziali del sistema da applicare alla modellazione idrodinamica. Nel complesso sono state elaborate le registrazioni raccolte presso le stazioni multiparametriche di Volano, Guagnino, Porto Garibaldi, Fossa-Foce, Bellocchio e Volta Scirocco gestite da ARPAE.

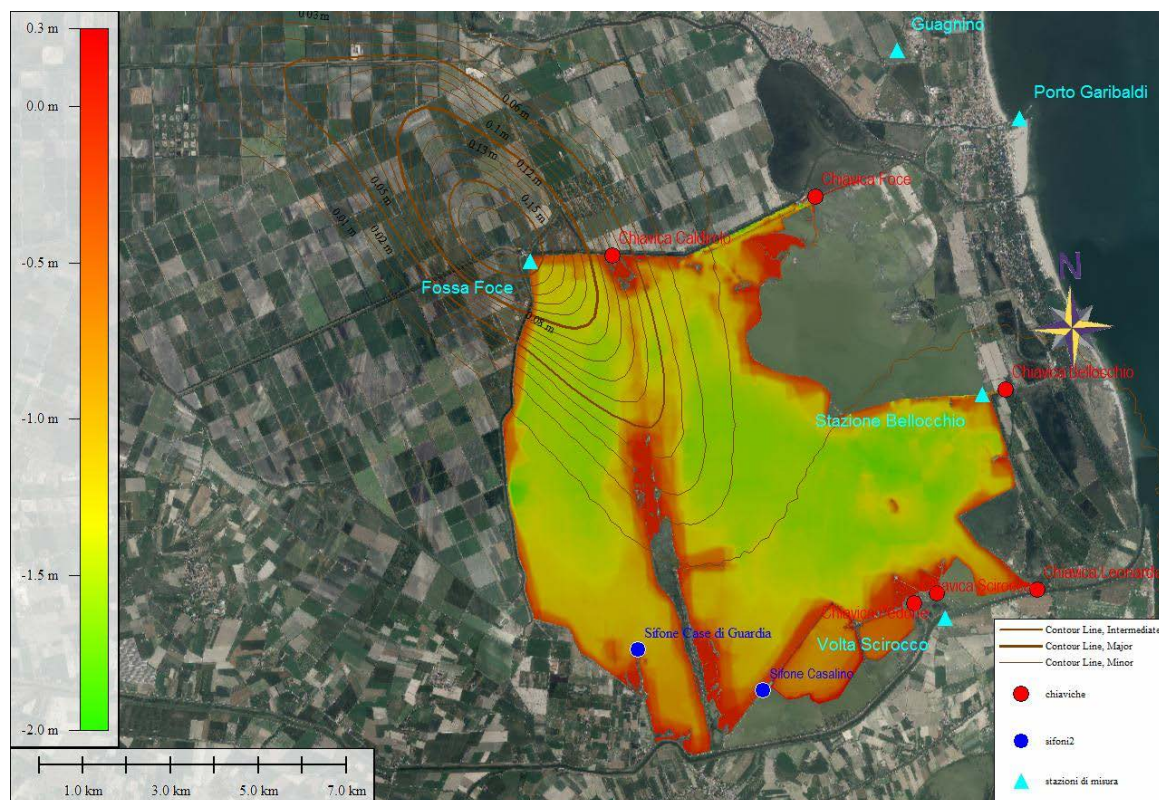


Figura 1 Corografia delle Valli.

I risultati dell'indagine hanno evidenziato che in riferimento alla finalità dello studio, la caratterizzazione dell'assetto idrodinamico delle valli può essere ricondotta alla presenza della forzante vento quale maggiormente significativa. I bilanci idrologici indicano una potenziale escursione di livello annuale delle Valli dell'ordine di 20 cm. Pertanto è apparso ragionevole assumere nelle simulazioni uno stato iniziale caratterizzato da livello statico in Valle corrispondente al livello medio del mare, o ad una quota ricompresa nell'ambito di tale oscillazione e come forzante principale l'azione del vento. Nonostante ciò, nelle simulazioni dello stato previsionale al 2030 è stata considerata anche la presenza della idrovora recentemente installata a stazione Foce (lombo nord-est della Valle Magnavacca), ancorchè il suo effetto sul sistema risulti molto marginale.

Il DEM delle Valli è stato ricostruito mediante una specifica campagna di rilievo (2016) ad integrazione di altre più recenti che hanno interessato diverse porzioni delle Valli nel periodo 2011-2014. La configurazione geometrica iniziale pertanto è convenzionalmente datata 2017, assumendo del tutto trascurabili le eventuali modificazioni di assetto batimetrico intervenute nell'ultimo lustro.

Gli scenari e le simulazioni idrodinamiche

L'assetto idrodinamico è stato ricostruito mediante un **modello idrodinamico 2-D** a fondo fisso alle acque basse. Il modello numerico ai volumi finiti è stato implementato a partire dalle equazioni di bilancio per la massa e per la quantità di moto scritte in forma conservativa. Il termine sorgente, che ricomprende la forzante vento (che nel caso di studio riveste un ruolo prevalente), è stato opportunamente trattato per garantire stabilità ed accuratezza al modello.

Lo **stato di fatto** considera la configurazione topo-batimetrica risultante dall'unione dei rilievi batimetrici effettuati complessivamente nel periodo 2011-2014-2016, convenzionalmente traslati al 2017 (anno di riferimento per gli scenari di subsidenza qui considerati) nonché la presenza (a geometria ultimata corrispondente a quella di progetto) dell'argine di separazione tra le acque pubbliche e private che corre lungo il confine amministrativo delle province di Ferrara e Ravenna che è attualmente in fase avanzata di costruzione.

Nonostante il cono di subsidenza qui considerato coinvolga la sola porzione nord-occidentale della Valle Lido di Magnavacca e Fossa di Porto (v. *Figura 1*), nello stato di fatto lo studio dell'assetto idrodinamico è stato esteso anche alle porzioni più meridionali della Valle, al fine di caratterizzare compiutamente l'assetto idrodinamico della Valle nel suo complesso.

Pertanto nelle simulazioni si identificano 4 porzioni del sistema delle valli (*Figura 2*) idraulicamente indipendenti sulle quali sono state attuate le simulazioni idrodinamiche:

- BACINO N (di fatto corrispondente al sistema delle acque pubbliche) che comprende la Valle

Fossa di Porto valle Cona e porzione della valle Lido di Magnavacca esterna all'argine di separazione in fase di costruzione,

- BACINO SE1 che comprende la porzione S-E della Valle Magnavacca, delimitata a nord dall'argine in costruzione (superficie circa 7.2 km²)
- BACINO SE2 suddiviso in due sottobacini:
 - BACINO SE2-A che coincide con la valle Lavadena (superficie circa 2.6 km²),
 - BACINO SE2-B che coincide con la valle Scirocca (superficie circa 1.0 km²)

Nello stato di fatto le modellazioni idrodinamiche hanno coperto un largo spettro delle possibili significative forzanti e condizioni al contorno, al fine di caratterizzare compiutamente l'effetto sull'assetto idrodinamico delle valli dovuto ai diversi contributi ed al tempo stesso individuare tra questi quelli più significativi da utilizzare nelle successive simulazioni nello stato previsionale.

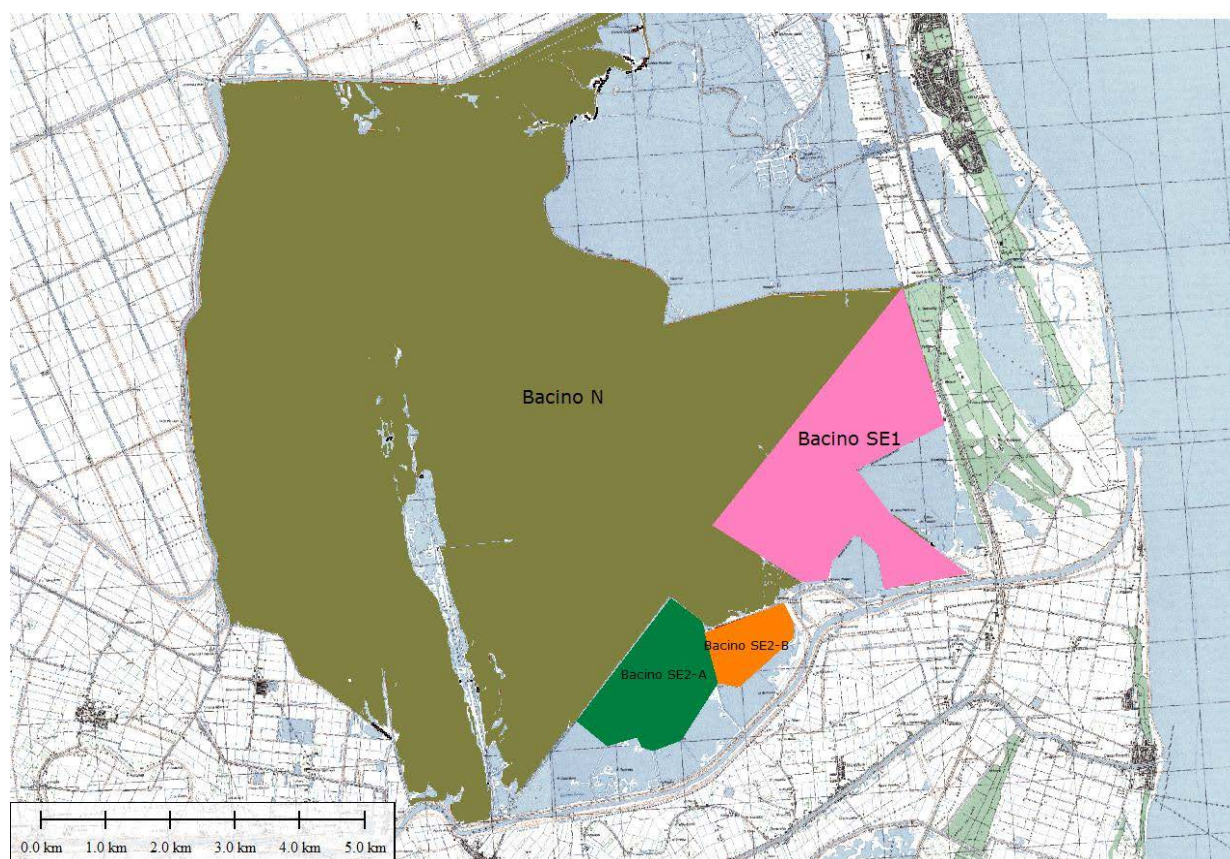


Figura 2 Delimitazione dei bacini idraulicamente indipendenti su cui sono state effettuate le simulazioni idrodinamiche nello stato di fatto (Bacini N, SE1, SE2-A, SE2-B) e nello stato previsionale (Bacino N).

Sono state considerate 2 diverse condizioni caratteristiche della forzante vento (vento ordinario che spira da Ovest e vento estremo da NE); l'azione di emungimento della idrovora installata a stazione Foce; il funzionamento dei sifoni (Casalino e Case di Guardia per il Bacino N) il funzionamento delle

chiaviche principali (Bellocchio e Foce-Fattibello per il bacino N; Pedone e Leonarda per il bacino SE1).

Nella configurazione dello **stato previsionale**, si considerano i due orizzonti temporali del 2020 e del 2030. Su tali orizzonti si proietta la batimetrica dello stato di fatto (convenzionalmente collocata all'anno 2017 che rappresenta lo stato di fatto) trasladola verticalmente di una quantità coerente con il cono di subsidenza differenziale stimato su questi orizzonti temporali.

Poiché gli effetti della subsidenza differenziale sulla finestra temporale del 2017-2020 e 2017-2030 non hanno alcun effetto apprezzabile sui bacini meridionali SE1, SE2-A e SE2-B, le simulazioni idrodinamiche nello stato previsionale sono state riferite al solo bacino N.

Gli effetti prodotti sul campo idrodinamico dal funzionamento dei manufatti idraulici (chiaviche, sifoni e idrovora) è molto modesto così come modesta o inapprezzabile risulta la variazione rispetto alla quiete sia in termini di campo di velocità e dislivelli del pelo libero. Pertanto le simulazioni nello stato previsionale si riferiscono solo alla forzante vento corrispondenti alle due configurazioni di vento estremo (che spira da NE) e frequente (che spira da O).

Nel solo scenario previsionale proiettato al 2030, per completezza di analisi, è stata condotta la simulazione anche considerando l'attivazione dell'idrovora a stazione Foce nella configurazione limite di portata sollevata pari a 10 m³/s.

Nelle *Tab. 1*, *Tab. 2* e *Tab. 3* si riporta il quadro sinottico delle simulazioni effettuate.

Bacino N	SDF_N_MCF chiavica Foce aperta
	SDF_N_MCB chiavica Bellocchio aperta
	SDF_N_IDR10.0 Idrovora stazione Foce attiva (Q=10 m ³ /s)
	SDF_N_MSCC sifoni Casalino e Case di Guardia attivi
	SDF_N_VNE11.7 vento estremo da NE v=11.7 m/s
	SDF_N_VW2.3 vento frequente da O v=2.3 m/s
Bacino SE1	SDF_SE1_VNE11.7 vento estremo da NE v=11.7 m/s
	SDF_SE1_VW2.3 vento frequente da O v=2.3 m/s
	SDF_SE1_MCPL chiaviche Pedona, Leonarda aperte
Bacini SE2	SDF_SE2_VNE11.7 vento estremo da NE v=11.7 m/s
	SDF_SE2_VW2.3 vento frequente da O v=2.3 m/s

Tab. 1. Quadro sinottico delle simulazioni nello stato di fatto (anno 2017)

Bacino N	SUBS20_N_VNE11.7 vento estremo da NE v=11.7 m/s
	SUBS20_N_VW2.3 vento frequente da O v=2.3 m/s

Tab. 2. SUBS2020- Quadro sinottico delle simulazioni nello **stato previsionale (anno 2020)**

Bacino N	SUBS2030_N_IDR10.0 Idrovora stazione Foce attiva (Q=10 m ³ /s)
	SUBS2030_N_IDR10.0 vento estremo da NE v=11.7 m/s
	SUBS2030_N_IDR10.0 vento frequente da O v=2.3 m/s

Tab. 3 SUBS2030. Quadro sinottico delle simulazioni nello **stato previsionale (anno 2030)**

Commento ai risultati delle simulazioni e conclusioni

Per la sollecitazione vento direzione NE si riporta nella *Figura 3* il confronto in termini di campo delle velocità tra la configurazione dello stato di fatto e quella previsionale. Le differenze sono sostanzialmente inapprezzabili.

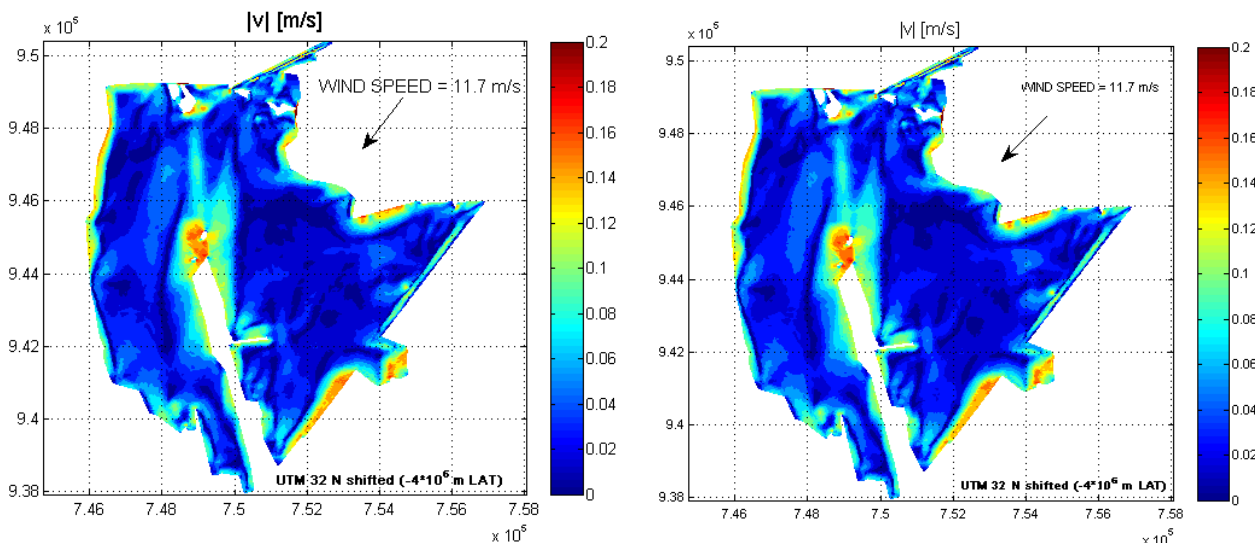


Figura 3 Vento da NE v=11.7 m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (*SDF_N_VNE11.7* a sx) e stato previsionale-scenario upper per anno 2030- (*SUBS2030_N_VNE11.7* a dx)

Anche analizzando i risultati in termini di linee di corrente le differenze appaiono inapprezzabili, sia nel sistema del bacino Nord nel suo complesso (*Figura 4*), sia riguardando nel dettaglio il vertice NO della Valle (*Figura 5*), sede dell'abbassamento più marcato (circa 15 cm nello scenario upper) dove permane una circolazione con verso antiorario che coinvolge la zona di bordo confinata dal perimetro occidentale della Valle e dai dossi presenti ad est.

D'altra parte anche l'andamento dei livelli (*Figura 6*) rimane invariato nei due scenari, a testimonianza della sostanziale invarianza del campo di moto nel suo complesso.

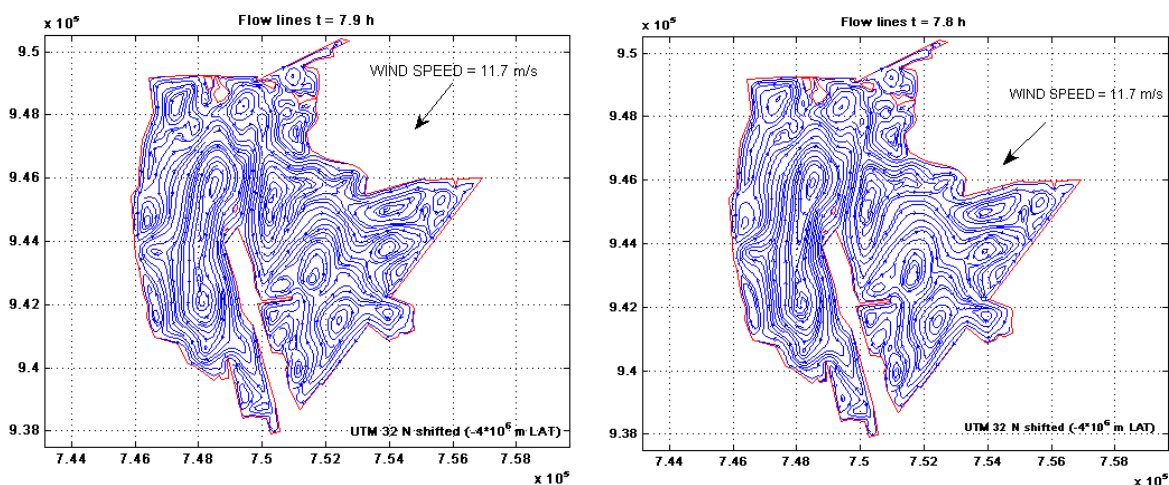


Figura 4 Vento da NE $v=11.7$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (SDF_N_VNE11.7 a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (SUBS2030_N_VNE11.7 a dx)

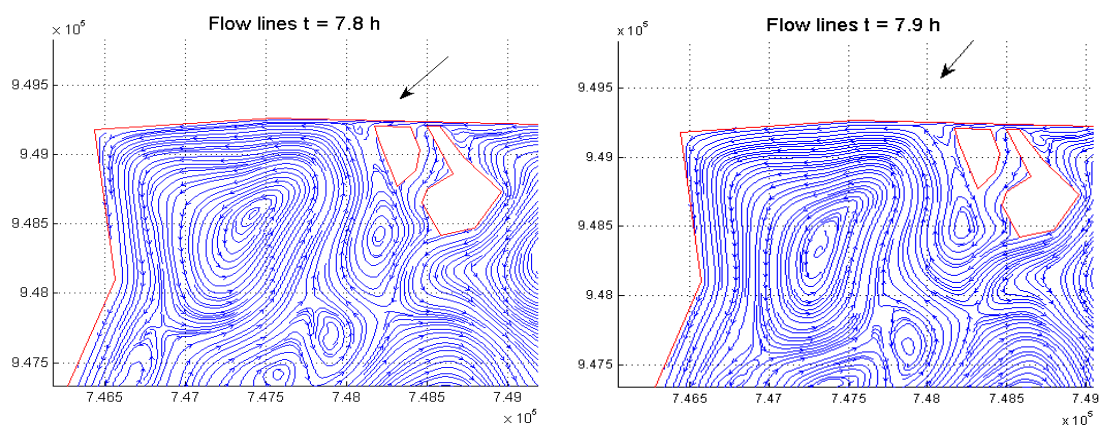


Figura 5 Vento da NE $v=11.7$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (SDF_N_VNE11.7 a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (SUBS2030_N_VNE11.7 a dx)

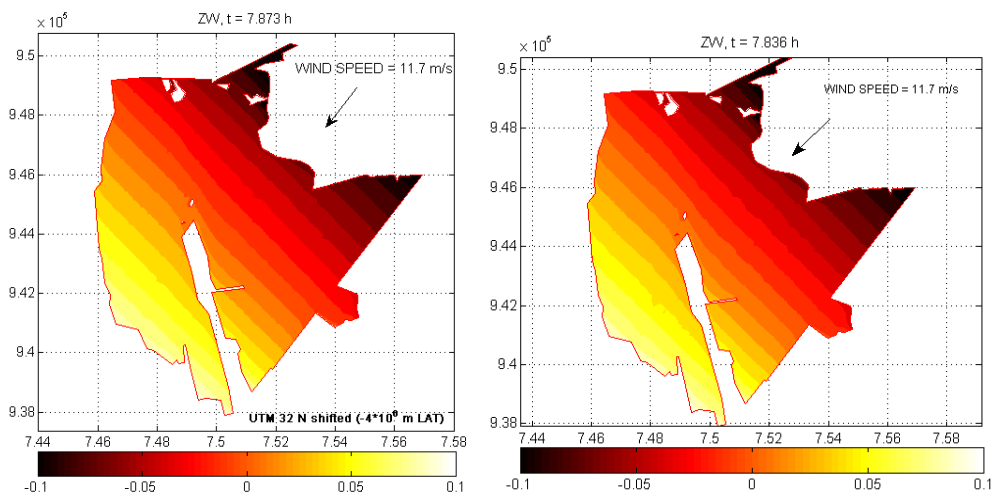


Figura 6 Vento da NE $v=11.7$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (SDF_N_VNE11.7 a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (SUBS2030_N_VNE11.7 a dx)

Il confronto tra i risultati ottenuti nelle simulazioni dei due scenari (stato di fatto e previsionale) per la sollecitazione associata alla forzante vento proveniente da Ovest e velocità 2.3 m/s, è significativo limitatamente all'assetto delle linee di corrente, che restituiscono una situazione sostanzialmente invariante sia in termini di verso di circolazione che di dimensione dei macrovortici principali all'interno della Valle (Figura 7).

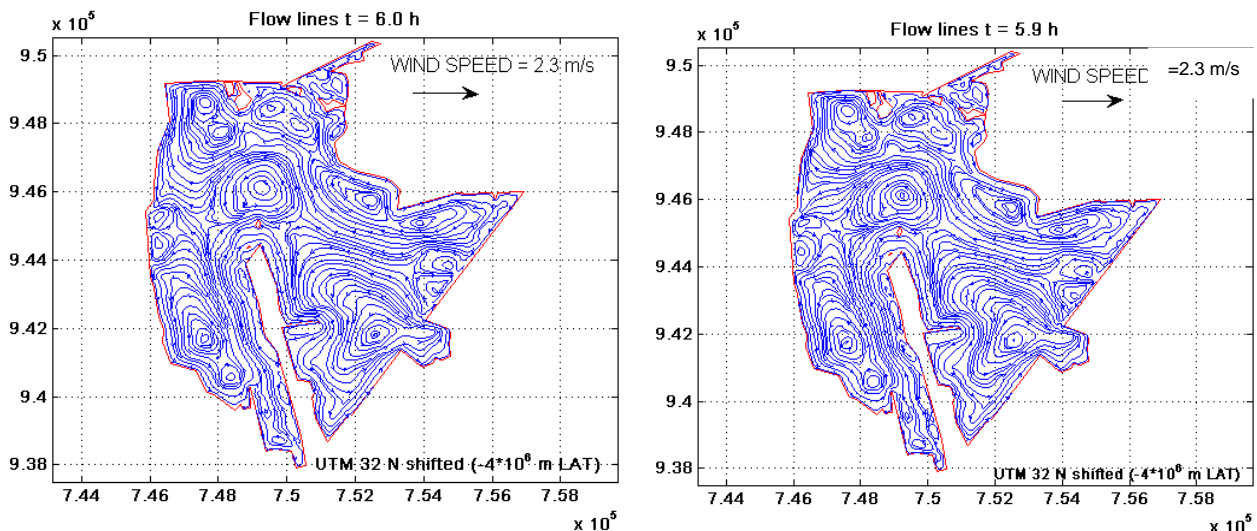


Figura 7 Vento da ovest $v=2.3$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (*SDF_N_VW2.3* a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (*SUBS2030_N_VW2.3* a dx)

Per quanto riguarda la simulazione che coinvolge l'idrovora Foce, si osserva che la subsidenza indotta tende a scemare in prossimità dell'estremo NO di Valle Cona e canale Foce; viceversa gli effetti apprezzabili dell'azionamento dell'idrovora si esauriscono lungo il canale Foce a breve distanza dalla macchina, in corrispondenza del vertice NE della Valle

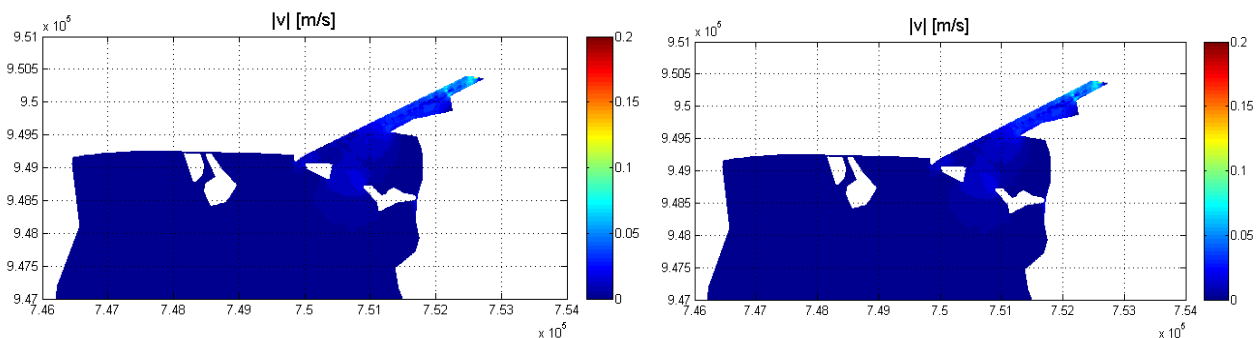


Figura 8 Idovora attiva a stazione foce. Confronto tra simulazione stato di fatto (*SDF_N_MIDRO10* a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (*SUBS2030_N_MIDRO10* a dx)

La deformazione dello stato di quiete in entrambi gli scenari corrispondenti allo SDF e SDP è apprezzabile solo fino alla porzione di Valle compresa tra i dossi che caratterizzano l'imbocco della Valle Cona nella sua porzione meridionale, all'esterno dell'impronta del cono di subsidenza (Figura

8). Le velocità modeste (inferiori a 0.1 m/s) sono da imputarsi anche ai recenti lavori di escavo del canale sublagunare Foce (effettuati in occasione del progetto LIFE).

In conclusione le simulazioni effettuate hanno mostrato una sostanziale invarianza dei risultati tra lo stato di fatto e di previsione sull’orizzonte temporale del 2030 nello scenario previsionale di subsidenza relativa massima (scenario *upper*).

La quota di subsidenza dovuta alla coltivazione di Agosta (considerato anche l’effetto prodotto dalla contestuale attività del pozzo Dosso degli Angeli), non è tale da influenzare l’assetto idrodinamico né per quanto riguarda il moto circolatorio (prevalentemente indotto dall’azione del vento), né per quanto riguarda il moto indotto dall’azionamento dei manufatti idraulici, ed in particolare della stazione di sollevamento di recente costruzione a Stazione Foce.

Riferimenti bibliografici essenziali

- [1]. ENI, Campi di Agosta e Dosso degli Angeli: studio di subsidenza - Management Summary, 2015

REPORT FINALE

Indice

1	PREMESSA	3
2	INQUADRAMENTO DEL SISTEMA	5
3	CARATTERIZZAZIONE TOPOGRAFICA, MORFOLOGICA, BATIMETRICA DELLE VALLI	13
3.1	RILIEVI 2011	13
3.2	RILIEVO 2014	20
3.3	RILIEVO 2016	26
3.3.1	<i>Pianificazione del rilievo e mezzi utilizzati</i>	28
3.3.2	<i>Acquisizione ed elaborazione dati</i>	29
4	GLI SCENARI DI SUBSIDENZA	36
5	IL MODELLO IDRODINAMICO	38
5.1	LINEAMENTI DEL MODELLO MATEMATICO E DELLA TECNICA DI INTEGRAZIONE NUMERICA	38
5.2	APPROFONDIMENTO SUI TERMINI SORGENTE	40
5.3	APPROFONDIMENTO SULLA MODELLAZIONE DEI MANUFATTI IDRAULICI (SIFONI E CHIAVICHE)	42
5.3.1	<i>Sifoni</i>	42
5.3.2	<i>Chiaviche</i>	42
6	ANALISI DELLE FORZANTI VENTO E MAREA	45
6.1	LE STAZIONI DI MISURA	45
6.2	ANALISI DEI DATI ANEMOMETRICI	47
6.2.1	<i>Suddivisione dei dati in base alla direzione</i>	48
6.2.2	<i>Suddivisione dei dati in base alle velocità</i>	49
6.2.3	<i>Interpretazione statistica del campione</i>	51
6.2.4	<i>Analisi statistica del quadrato della velocità</i>	54
6.3	ANALISI DEI DATI DI MAREA	55
6.3.1	<i>Analisi in frequenza dei dati</i>	55
6.3.2	<i>Interpolazione dei dati nell'onda di marea sintetica</i>	57
6.3.3	<i>Studio teorico sull'alterazione dell'onda di marea</i>	57
7	STUDIO SINTETICO SUL BILANCIO IDROLOGICO DELLE VALLI	62
7.1	VALUTAZIONE DELLE PRECIPITAZIONI (P)	63
7.2	VALUTAZIONE DELL'EVAPORAZIONE (E)	64
7.3	VALUTAZIONE DELL'INFILTRAZIONE EFFICACE	66
7.3.1	<i>Filtrazione dal F. Reno</i>	66
7.3.2	<i>Filtrazione da falda</i>	66

7.4	VALUTAZIONE DEGLI SCAMBI IDRICI ATTRAVERSO SIFONI E CHIAVICHE	67
7.5	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	68
8	GLI SCENARI E LE SIMULAZIONI.	71
8.1	GLI SCENARI CONSIDERATI	71
8.2	GRIGLIE DI CALCOLO.....	74
8.3	QUADRO SINOTTICO DELLE SIMULAZIONI NELLO STATO DI FATTO E NELLO STATO PREVISIONALE	75
9	SIMULAZIONI DELLO STATO DI FATTO (ANNO 2017)	77
9.1	SIMULAZIONI DELLO STATO DI FATTO SUL BACINO N (SDF_N).....	77
9.1.1	Apertura della Chiavica sul Canale Foce - Valle Fattibello (SDF_N_MCF).....	78
9.1.2	Idrovora attiva a Stazione Foce (SDF_N_IDR10.0).....	81
9.1.3	Apertura della Chiavica sul Canale Bellocchio (SDF_N_MCB).....	85
9.1.4	Sifoni attivi (SDF_N_MSCC).....	87
9.1.5	Venti estremi da Nord-Est (SDF_N_VNE11.7)	88
9.1.6	Venti frequenti da Ovest (SDF_N_VW2.3)	92
9.2	SIMULAZIONI DELLO STATO DI FATTO SUL BACINO SUD-EST 1 (SDF_SE1).	94
9.2.1	Venti estremi da Nord-Est (SDF_SE1_VNE11.7).....	95
9.2.2	Venti frequenti da Ovest (SDF_SE1_O2.3)	98
9.2.3	Apertura delle chiaviche Leonarda e Pedona (SDF_SE1_MCPL).....	99
9.3	SIMULAZIONI DELLO STATO DI FATTO SUI BACINI SUD-EST 2 (SDF_SE2).	102
9.3.1	Venti estremi da Nord-Est (SDF_SE2_VNE11.7).....	103
9.3.2	Venti frequenti da Ovest (SDF_SE2_VW2.3)	104
10	SIMULAZIONI NELLO STATO PREVISIONALE DI SUBSIDENZA (ANNO 2020)	106
10.1.1	Simulazioni con forzante Vento.....	107
10.1.2	Vento da Nord-Est (SUBS2020_N_VNE11.7).....	108
10.1.3	Vento da Ovest (SUBS2020_N_VW2.3).....	110
11	SIMULAZIONI NELLO SCENARIO PREVISIONALE DI SUBSIDENZA (ANNO 2030)	112
11.6.2	SIMULAZIONI CON FORZANTE VENTO	113
11.1.1	Vento da Nord-Est (SUBS2030_N_VNE11.7).....	113
11.1.2	Vento da Ovest (SUBS2030_N_VW2.3).....	116
11.1.3	1.6.3 Simulazioni con idrovora Foce attiva (SUBS2030_N_MCF10).....	117
12	CONFRONTO TRA LO STATO DI FATTO E LO STATO PREVISIONALE: CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	119
	ELENCO DELLE FIGURE E DELLE TABELLE	124
	BIBLIOGRAFIA.....	130
	APPENDICE A IL MODELLO IDRODINAMICO	

1 Premessa

Il presente contributo si propone di valutare gli effetti della subsidenza attesa sulla finestra temporale 2017-2030 sull'assetto idrodinamico delle Valli di Comacchio dovuto alla coltivazione del Pozzo Agosta.

In particolare l'assetto idraulico del sistema sarà indagato considerando la presenza dei manufatti idraulici esistenti (i.e chiaviche, sifoni e idrovora a Stazione Foce) e dell'argine di separazione acque pubbliche e private in fase di realizzazione lungo la linea di confine tra le province di Ferrara e Ravenna.

Pertanto nello studio proposto si sono considerate le seguenti configurazioni:

- stato di fatto (SDF), così come oggi si presenta in considerazione dei contributi di scambio dalle chiaviche esistenti (Leonarda, Pedona, Scirocca), dalla idrovora a stazione Foce e dai sifoni di collegamento a Reno (Case di Guardia e Casalino), e considerando altresì la presenza dell'argine di separazione tra le acque pubbliche e private che corre lungo il confine delle province di Ferrara e Ravenna (ad oggi lavori in corso di realizzazione).
- stato previsionale di subsidenza al 2020 (SUBS2020), che proietta sull'orizzonte temporale dell'anno 2020 la batimetria delle Valli in considerazione dei risultati del modello geomeccanico sviluppato da ENI [1] in considerazione della presenza dei Campi di Agosta e Dosso degli Angeli nello scenario più cautelativo (scenario *upper*);
- stato di subsidenza al 2030 (SUBS2030) che considera la batimetria ipotizzata attraverso l'utilizzo dei risultati del modello geomeccanico fornito da ENI [1], nello scenario più cautelativo(scenario *upper*).

La ricerca è stata pertanto articolata sulle seguenti macroattività:

- caratterizzazione topografica, morfologica, batimetrica delle Valli;
- implementazione di un modello idrodinamico bidimensionale per le Valli;
- caratterizzazione dell'assetto idrodinamico nello stato di fatto;
- caratterizzazione dell'assetto idrodinamico nello stato previsionale al 2020;
- caratterizzazione dell'assetto idrodinamico nello stato previsionale al 2030;
- confronto dei risultati tra lo stato di fatto e lo stato previsionale.

Per la ricostruzione della batimetria delle Valli è stata eseguita una campagna di rilievo *ad hoc* sulla porzione di Valle meridionale (i.e. Valle Lavadena, Valle Scirocca, Valle Padusa, e sulla porzione

sud-est della Valle Magnavacca ricompresa tra l'ansa del Diavolo del F.Reno e la Valle Smarlacca) ad integrazione di precedenti campagne di rilievo effettuate sulla rimanente porzione della Valle grande [2] [3], implementate dal rilievo di aggiornamento e dettaglio condotto sul margine Nord-Est della stessa, in prossimità del canale Foce [4].

Lo scenario previsionale di abbassamento è stato valutato sulla scorta dello studio effettuato da ENI ([1]), nel quale sono stati considerati gli effetti della presenza combinata dei due Campi di Dosso degli Angeli (in produzione per la fase di estrazione residua la cui chiusura è prevista per il 2027) e quello di nuova attivazione di Agosta (la cui messa in produzione è prevista per il 2017 e la chiusura per il 2030). Lo scenario a cui si fa riferimento è quello pessimistico (i.e. *upper*) tra i tre ivi considerati.

In via preliminare è stata condotta un'analisi sulle potenziali forzanti del sistema: scambi idrici attraverso chiaviche, sifoni ed idrovora, marea e vento. Inoltre è stata effettuata un'analisi dei bilanci idrologici in laguna al fine di valutare le potenziali escursioni di livello e quindi le più opportune condizioni iniziali da assumere nelle simulazioni idrodinamiche. I risultati dell'indagine hanno evidenziato che in riferimento alla finalità dello studio, la caratterizzazione dell'assetto idrodinamico delle valli può essere ricondotta alla presenza della forzante vento quale maggiormente significativa, con tempi di simulazione inferiori alle 12 ore, comunque sufficienti a stabilire condizioni stazionarie nella valle. I bilanci idrologici indicano una potenziale escursione di livello annuale delle Valli dell'ordine di 20 cm. Pertanto è apparso ragionevole assumere nelle simulazioni uno stato iniziale caratterizzato da livello statico in Valle corrispondente al livello medio del mare, o ad una quota ricompresa nell'ambito di tale oscillazione, e come forzante principale l'azione del vento. Nonostante ciò, nelle simulazioni è stata considerata anche la presenza della idrovora recentemente installata a stazione Foce (Iembo nord-est della Valle Magnavacca), ancorchè il suo effetto sul sistema risulti molto marginale.

2 Inquadramento del sistema

Le valli di Comacchio costituiscono il più vasto complesso (ca. 13000 ha) di zone umide salmastre della regione Emilia - Romagna. Sono formate da un sistema di sottobacini vallivi che possono essere gestiti indipendentemente, con profondità delle acque che arrivano attorno ai 2 m. I fondali sono per lo più costituiti da argille, limi e materiali bioclastici, più raramente da sabbie, e presentano pendenze piuttosto dolci.

All'interno di questo sistema è chiaramente identificabile lo specchio d'acqua più esteso (complessivamente circa 9000 ha), quello delle Valli denominate Fossa di Porto – Lido Magnavacca – Valle Cona, che originariamente erano separate ed ora costituiscono il bacino principale. Oltre a queste si trovano le Valli Campo, Fattibello e Capre e relitti di valli adiacenti quali quelle di Zavalea e valle Molino (v. Figura 2-1).

La suddivisione patrimoniale delle valli, venutasi a delineare entro i confini della Provincia di Ravenna, fa sì che le porzioni meridionali di Valle Lido Magnavacca siano ad oggi di proprietà di privati che le utilizzano per la vallicoltura.

Attualmente è in fase avanzata la costruzione di un argine di separazione tra “acque pubbliche” e “acque private” il cui tracciato segue la linea di separazione amministrativo territoriale delle province di Ferrara e Ravenna, risvoltando sugli argini a Reno in corrispondenza dell'ansa del Diavolo sul Fiume Reno. Il tracciato ipotizzato per l'arginatura consente la derivazione di acqua salata in corrispondenza della Chiavica Scirocca per il bacino principale, mentre le altre due chiaviche (Pedona e Leonarda) rimangono a servizio del bacino racchiuso dall'argine verso Reno.

Le valli di Fossa di Porto e Lido di Magnavacca sono separate dalla penisola di Boscoforte; la parte nord est è costituita dalle saline di Comacchio, in disuso dal 1985, a nord ovest si trova la valle Zavalea con acque debolmente salmastre ma non ricadente nel comprensorio; a nord delle saline vi è la valle di Fattibello, l'unica ad essere soggetta al flusso delle maree e quella che assume un ruolo di primaria importanza e sulla quale si articola il ricambio idrico dell'intera valle. Le comunicazioni con il mare avvengono attraverso il Canale di Porto Garibaldi, il canale Logonovo ed il canale Bellocchio-Gobbino; questi ultimi due canali presentano comunicazioni con il mare difficoltose a causa di frequenti insabbiamenti che si verificano alle foci per effetto del moto ondoso. In Figura 2-1 si riporta una ortofoto del sistema delle Valli.

L'idrologia del territorio delle Valli di Comacchio è individuata al margine meridionale, da una rete fluviale costituita dai tratti terminali del fiume Reno e del Canale destra Reno che scorrono in alvei pensili e da una rete di canali artificiali nel settore nord orientale. I canali artificiali costituiscono il collegamento al mare Adriatico mediante tre aperture: il porto canale di Porto Garibaldi, il canale

Logonovo ed il canale Gobbino. Il canale di porto Garibaldi è la parte terminale del canale navigabile Migliarino-Ostellato-Porto Garibaldi che attraversa la valle Fattibello e che, tramite il collegamento con il canale sub lagunare La Valletta, comunica con il canale Fosse Foce che scarica le acque della bonifica del Mezzano e sul quale inoltre, è ubicata la chiavica di Caldirolo che drena la valle di Fossa di Porto, una delle valli di Comacchio.



Figura 2-1. Sistema delle Valli di Comacchio.

Nel canale Logonovo si collega il canale della Foce, sul quale è posta la chiavica della stazione di pesca Foce; a monte di essa, il canale si divide in due rami: il primo, il canale Foce, dopo aver costeggiato il lato Nord della Valle, sfocia in Valle Cona (collegata a Valle di Lido Magnavacca attraverso ampie aperture naturali), l'altro ramo, prende il nome di canale Ungola e si dirama verso Sud Ovest al limite nord occidentale di Valle Campo.

Il canale Gobbino è il collegamento a mare più meridionale, che prima d'immettersi in Valle, all'altezza della stazione di pesca Bellocchio, si prolunga nel canale Bellocchio (il limite meridionale di Valle Campo) che drena Valle di Lido Magnavacca. I canali Logonovo e Gobbino sono collegati tra loro attraverso il canale delle Vene, che si sviluppa nell'entroterra del centro abitato di Lido di Spina in direzione Nord-Sud; su di esso affluiscono altri due canali: il canale delle Saline, ed il canale

Confina che drenano Valle Campo. Le foci dei canali Logonovo e Gobbino sono interessate da fenomeni di interrimento periodici, in conseguenza del moto ondoso e dell'accumulo di materiale da esso prodotto; tali fenomeni producono un'interruzione totale o parziale dei collegamenti con il mare Adriatico.

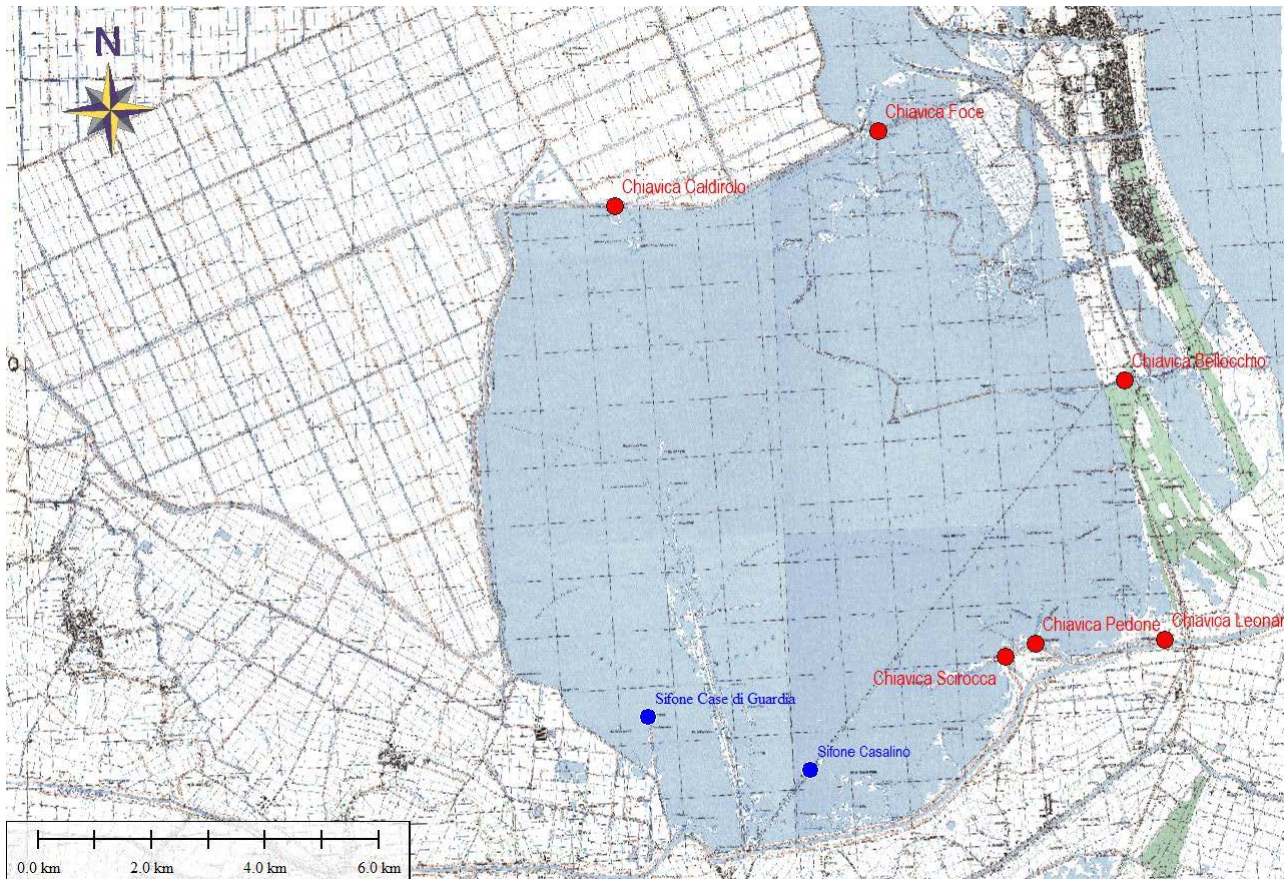


Figura 2-2 Ubicazione dei manufatti presenti sulle Valli (Sifoni e Chiaviche)

Gli scambi d'acqua delle Valli con il mare sono totalmente regolati da manufatti idraulici (chiuse, sifoni, paratoie e chiaviche), posizionati nei più importanti canali di cui sopra (Figura 2-2).

La gestione idraulica delle Valli è quindi soprattutto in funzione delle attività di pesca, caratterizzata da un periodo tardo autunnale, durante il quale viene fatta entrare acqua di mare per richiamare il pesce "adulto" dalle Valli al mare per la riproduzione e, di conseguenza, verso le postazioni di pesca (lavorieri) e un periodo tardo invernale-primaverile in cui si fanno defluire le acque di valle verso il mare per richiamare il novellame di pesce dall'Adriatico. In conseguenza di tale gestione i collegamenti con il mare sono parzialmente aperti nei mesi autunnali e primaverili, mentre in estate ed in inverno le Valli sono quasi completamente isolate dall'esterno. Oltre agli scambi idraulici con il mare, le filtrazioni con la falda freatica, ed i limitati apporti con i corpi idrici di superficie che le circondano, le Valli di Comacchio risentono anche dell'alimentazione e della sottrazione di volumi di acqua dovuti rispettivamente alle precipitazioni e all'evaporazione.

Lo scarico delle valli avviene sostanzialmente attraverso due chiaviche posizionate a nord, la chiavica di Caldirolo e quella di Foce (v.Figura 2-5 e Figura 2-7). Queste chiaviche mettono in comunicazione le valli di Comacchio con il mare attraverso il canale Fosse-Foce e la valle Fattibello, il loro funzionamento è a gravità, ovvero lo scarico avviene a mezzo di luci di fondo regolate da paratoie meccaniche. Lo scarico quindi, dipende dalla differenza di livello idrico tra le valli ed i corpi ricettori, che essendo collegati al mare sono soggetti alle oscillazioni di marea. Durante la maggior parte dell'anno la differenza di livello tra le valli ed il mare è negativa e pertanto, durante questi periodi le possibilità di scaricare acqua verso il mare risultano scarse e ciò si traduce in una minore circolazione dell'acqua con conseguenze sulla qualità delle acque stesse.

Un ulteriore collegamento è rappresentato dalla chiavica sul canale Bellocchio (Figura 2-7) lungo il primetro orientale della Valle. Come già accennato a causa dei frequenti interrimenti alla foce lo scambio idrico è molto compromesso.

Il carico dell'acqua viene effettuato dai sifoni sul Reno (sifone Casa di Guardia e sifone Casalino v.Figura 2-4) ubicati a monte della traversa sul fiume stesso. Da questi sifoni entra in valle acqua dolce mentre risultano scarsi gli apporti di acqua salata che dovrebbero avvenire attraverso, la chiavica Leonarda e le chiaviche di Pedone e Scirocca (v.Figura 2-3), che attingono acqua dall'ansa del Diavolo (a sud) attualmente in condizioni di notevole interrimento.

Di seguito si elencano i manufatti idraulici di cui sopra rimandando alle immagini di Figura 2-2, Figura 2-3, Figura 2-4, Figura 2-5, Figura 2-6 e Figura 2-7 per la loro collocazione.

- Chiavica Leonarda: punto di presa a gravità dal fiume Reno a valle della Traversa di Volta Scirocco;
- Chiavica Pedona: punto di presa a gravità dal fiume Reno a valle della Traversa di Volta Scirocco;
- Chiavica Scirocca: punto di presa a gravità dal fiume Reno a valle della Traversa di Volta Scirocco;
- Sifone Casalino: punto di presa a gravità da Reno, a monte della Traversa di Volta Scirocco, ad Est della penisola di Boscoforte;
- Sifone Casa di Guardia: punto di presa a gravità da Reno, a monte della Traversa di Volta Scirocco, ad Est della penisola di Boscoforte;
- Chiavica su Canale Foce – Valle Fattibello (zona Nord-Est);
- Impianto idrovoro sulla chiavica di Canale Foce
- Chiavica su Canale Bellocchio (zona Est);
- Chiavica Caldirolo su Canale Fosse-Foce (zona Nord); il suo scarso utilizzo ha suggerito di non prenderla in considerazione nell'ambito del presente lavoro.



Figura 2-3. Sistema Valli di Comacchio. Particolare Zona Sud-Est con ingressi chiaviche Pedona, Sciocca e Leonarda.



Figura 2-4. Sistema Valli di Comacchio. Particolare Zona Sud-Ovest con Ingressi sifoni Casa di Guardia e Casalino



Figura 2-5. Sistema Valli di Comacchio. Particolare Zona Nord –Est di Valle Cona con Chiavica su Canale Foce – Valle Fattibello.



Figura 2-6 Sistema Valli di Comacchio. Particolare Zona Nord di Valle Fossa di Porto con Chiavica Caldirolo.



Figura 2-7 . Sistema Valli di Comacchio. Particolare Zona Est con Chiavica su Canale Bellocchio.

Al fine di favorire lo scarico a mare è stata recentemente realizzata una stazione idrovora in corrispondenza del manufatto chiavica Foce (vertice Nord-Ovest della valle v. Figura 2-8) con una portata nominale di $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$ garantita dalla presenza di due macchine idrauliche. Nella relazione tecnica allegata al progetto della stazione di sollevamento (v.[5]) sono riportate le informazioni relative all'impianto. Qui si riporta uno stralcio significativo:

"[...] Si rende quindi necessario integrare gli attuali scarichi a gravità mediante sistemi con sollevamento meccanico atti a garantire, anche nei periodi di dislivelli negativi, lo scarico delle acque.[...] “sarà necessario realizzare due stazioni di sollevamento da posizionare in corrispondenza delle chiaviche di Caldirolo e Foce, in cui sono presenti i manufatti in cemento armato che ospitano le paratoie per le manovre idrauliche. La determinazione della portata delle stazioni di sollevamento è stata effettuata tenendo conto del quantitativo di acqua utile per garantire la circolazione idrica all'interno delle valli. [...] pertanto la portata complessiva giornaliera dovrà essere almeno pari a 815.000 m^3 , che corrispondono ad una portata di $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Le due stazioni di sollevamento avranno una portata di $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ciascuna, portata che sarà garantita da due pompe idrovore di almeno 2500 l/s e prevalenza adeguata.”

La stazione di sollevamento alla chiavica Caldirolo non è stata realizzata. Ciò nonostante, anche in occasione di un recente studio [4] era emersa l'opportunità di considerare negli scenari di simulazione una capacità di ricambio commisurata alla portata complessiva ($10 \text{ m}^3/\text{s}$) inizialmente

considerata nel progetto citato [5], immaginando un raddoppio della capacità di movimentazione delle acque da parte delle idrovore installate a stazione Foce. Tale condizione sarà pertanto assunta a riferimento nelle simulazioni svolte anche nell'ambito del presente studio.

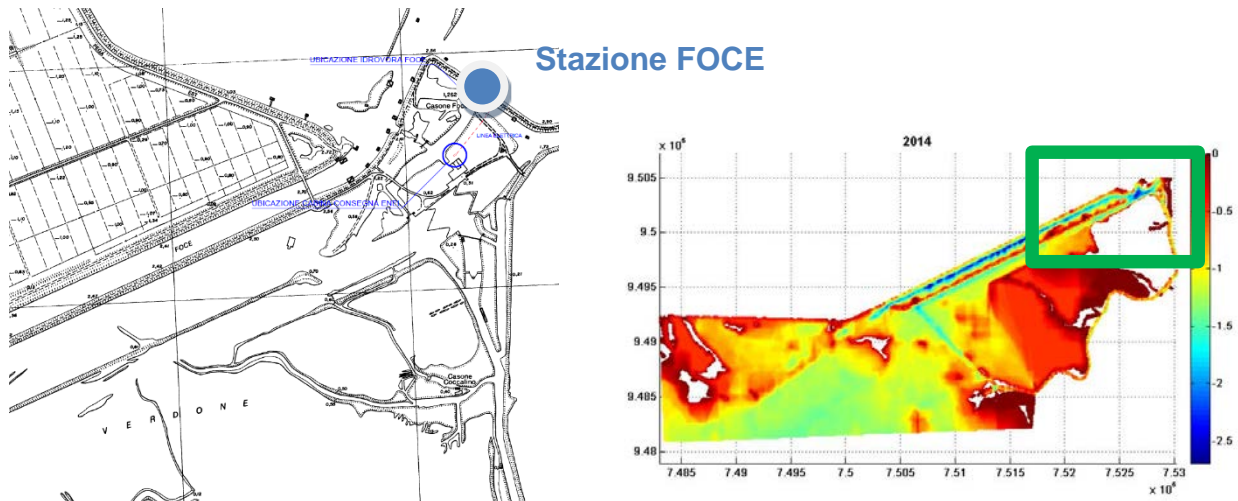


Figura 2-8 Ubicazione stazione di sollevamento Foce.

3 Caratterizzazione topografica, morfologica, batimetrica delle Valli

La caratterizzazione batimetrica delle Valli è stata effettuata sulla scorta di rilievi batimetrici effettuati in epoche diverse:

- Rilievo anno 2011 (Febbraio 2011 – Marzo 2011) – Batimetria della porzione della Valle grande (Valle Lido di Magnavacca, Lido Fossa di Porto a ovest, Valle Cona a nord) e rilievo di dettaglio della porzione NE (Valle Cona e canale Foce)
- Rilievo anno 2014 (Dicembre 2013 – Marzo 2014) – Batimetria di dettaglio della porzione NE della Valle Lido di Magnavacca, Valle Cona e canale Foce
- Rilievo 2016 (Novembre 2015 – Febbraio 2016) – Batimetria delle Valli meridionali Scirocca, Lavadena e Padusa e della porzione meridionale della Valle Lido di Magnavacca in prossimità dell’ansa del Diavolo.

Le acquisizioni e le elaborazioni dei dati sono stati effettuati attraverso l’utilizzo di coordinate Geografiche Lat e Lon (DD.ddddddd) su datum WGS84. Tutte le mappe sono riportate all’interno di questo elaborato in proiezione Diretta di Mercatore oppure con l’ausilio della proiezione UTM fuso 32N con datum WGS84. Per quanto riguarda i dati numerici di profondità in formato ASCII, successivamente utilizzati per la costruzione del modello idrodinamico della laguna, si è utilizzata la proiezione Universale Trasversa di Mercatore UTM sul fuso 32 N, con l’utilizzo del datum cartografico ED50 e con un offset di -4000000 metri sulla latitudine (coerente con le CTR regionali).

Le indagini sono state condotte con l’ausilio di imbarcazione a chiglia piatta e di un drone particolarmente adatto alle condizioni ambientali più difficili (bassi fondali estremi) equipaggiato con rilevatore acustico single beam.

L’insieme di queste campagne di rilievo ha consegnato una batimetria identificata come *Stato di Fatto* dell’intero ambito delle valli di Comacchio, che è stato convenzionalmente datata 2017 nell’ambito del presente studio, ritenendo ininfluenti le variazioni eventualmente intervenute nel corso dell’intervallo 2011-2017.

Di seguito si riportano gli elementi essenziali relativi alle attività di rilievo ed alle mappe batimetriche risultanti nei rilievi meno recenti (anni 2011 e 2014) rimandando a [2], [3] per approfondimenti ulteriori, mentre sarà documentata nel dettaglio l’attività svolta in occasione del presente studio (rilievo 2016).

3.1 Rilievi 2011

In occasione dello studio [2], è stata ricostruita una batimetria dettagliata su tutte le aree navigabili

del bacino della Valle grande (Lido di Magnavacca, Fossa di Porto, Cona), con oltre 260.000 punti rilevati. Durante le 10 giornate di acquisizione sono stati ottenuti circa 800 Km di linee ecografiche con singolo beam nelle Valli di Comacchio. Tale rilievo ha interessato la zona compresa tra la batimetrica -0,25 a circa -2,5 metri.

Il massimo tirante idrico in laguna durante i rilievi si aggirava intorno a 1.8 – 2.0 m. Nonostante la presenza di dossi e relitti arginali sublagunari, mediamente il fondo presenta un andamento regolare con variazioni molto graduali e dunque gradienti modesti.

Il rilievo è stato effettuato con imbarcazione a chiglia piatta Figura 3-1 ; il posizionamento è stato effettuato per mezzo di un ricevitore GPS Trimble DSM-232 collegato ad un'antenna esterna. Tale ricevitore è abilitato a ricevere il segnale dai satelliti geostazionari del sistema WAAS-EGNOS la cui elaborazione dei segnali trasmessi permette, attraverso una correzione differenziale, di ottenere errori contenuti nei 2 m. Nella Figura 3-2 sono riportate le linee di navigazione e di acquisizione dati effettuate.

Il trasduttore ecografico e l'antenna di posizionamento sono stati montati a poppa dell'imbarcazione su una stessa staffa per azzerare l'offset strumentale; il trasduttore ha mantenuto un affondamento di ca. 30 cm per tutta la durata del rilievo. Dopo un test strumentale è stata stimata una velocità massima di acquisizione (5-6 nodi), alla quale il trasduttore manteneva un buon affondamento e non risultava disturbato dalla turbolenza generata dallo spostamento dell'acqua.

I dati acquisiti attraverso l'ecoscandaglio sono stati elaborati ottenendo sezioni ecografiche georeferenziate in modalità “variable density” esportabili in formato raster. Le caratteristiche del segnale emesso dal trasduttore PSA900 hanno permesso di penetrare debolmente il sedimento, nelle zone a bassa riflettività superficiale.

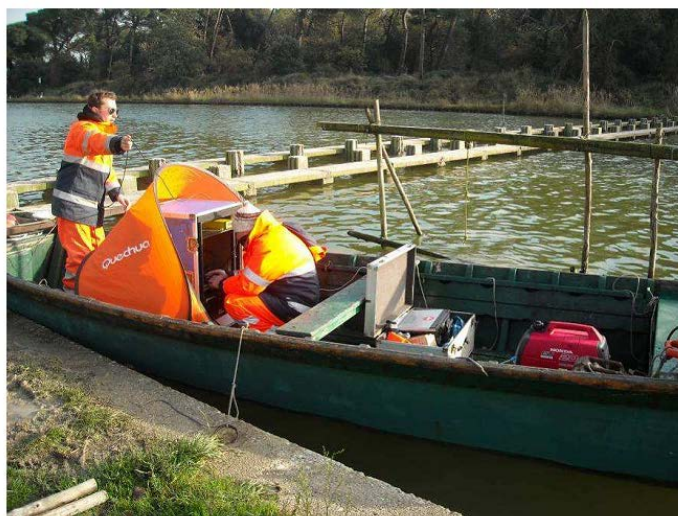


Figura 3-1 Rilievi 2011 – imbarcazione utilizzata per il rilievo batimetrico

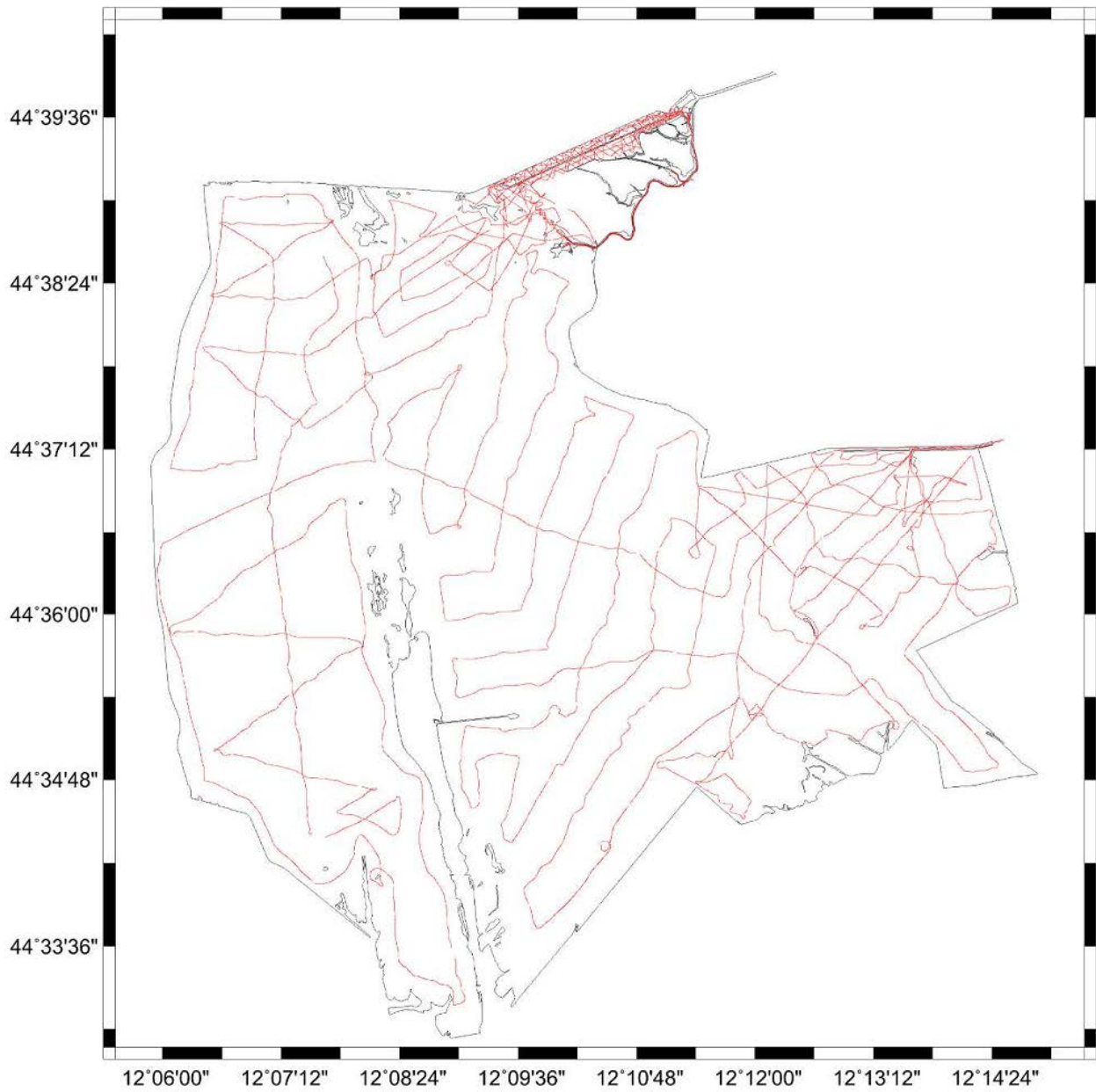


Figura 3-2 Rilievi batimetrici 2011 – linee di navigazione ed acquisizione punti.

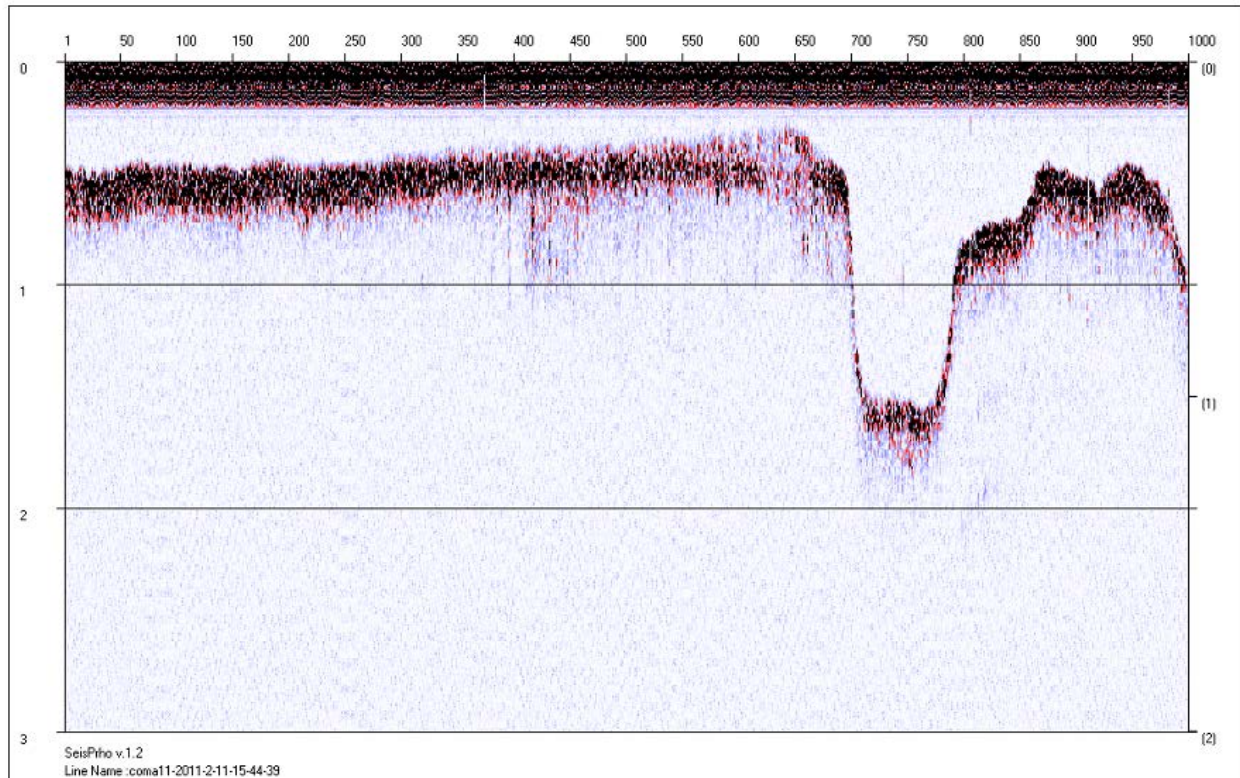


Figura 3-3 Rilievi batimetrici 2011 - Esempio di profilo ecografico rilevato e restituito

Per poter ricavare il dato batimetrico dagli ecogrammi ottenuti, tenendo conto dell'effetto di copertura da parte delle fanerogame e di altre possibili fonti di errore che possono presentarsi nei rilievi *super-shallow* [6], è stato eseguito il riconoscimento semiautomatico dei riflettori attraverso l'utilizzo delle funzioni di *picking* con l'utilizzo di software dedicato (i.e. Seisprho [7]). Sono stati così prodotti elaborati per ogni profilo batimetrico acquisito, contenenti coordinata del punto e profondità in tempi doppi (TWT) del riflettore individuato corrispondente al fondo-lago.

I file acquisiti sono stati sottoposti alla seguente procedura di elaborazione:

- esportazione della navigazione attraverso *Seisprho*;
- filtraggio del formato dei dati di navigazione attraverso procedure in linguaggio bash e perl;
- rappresentazione delle linee di navigazione attraverso GMT [8];
- restituzione grafica dei profili, digitalizzazione del fondale ed esportazione in formato bitmap dell'ecogramma;
- trasformazione dati di TWT georeferenziati in dati batimetrici attraverso l'applicazione della velocità di propagazione del suono;
- applicazione degli offset strumentali e di marea;
- creazione "grid" batimetrici in formato netcdf attraverso GMT.

I dati di velocità di propagazione del suono in acqua sono stati misurati all'inizio e alla fine di ogni giornata di misura, in una stazione di riferimento scelta per comodità presso la Stazione di Pesca di Foce. Le opportune correzioni sono state quindi applicate singolarmente ad ogni set di dati acquisiti in giornata. La media dei valori acquisiti per l'intero periodo è stata di 1442 m/s +/- 2 m/s.

Le correzioni apportate ai dati per variazioni del galleggiamento del natante (offset galleggiamento) e per variazioni di livello del bacino sono state misurate all'inizio e alla fine di ogni giornata di lavoro, e apportate ai dati in fase di elaborazione. Per quanto riguarda le correzioni del livello di marea è stato preso come riferimento il mareografo radar della stazione di Bellocchio, gestito da ARPAE-Fe (ex Ufficio della Provincia di Ferrara – Servizio Risorse Idriche e Tutela Ambientale). Tali livelli riportano l'altezza relativa dell'acqua al livello medio marino di riferimento. In Figura 3-4 e Figura 3-5 i riportano rispettivamente la mappa batimetrica e della riflettività del fondale

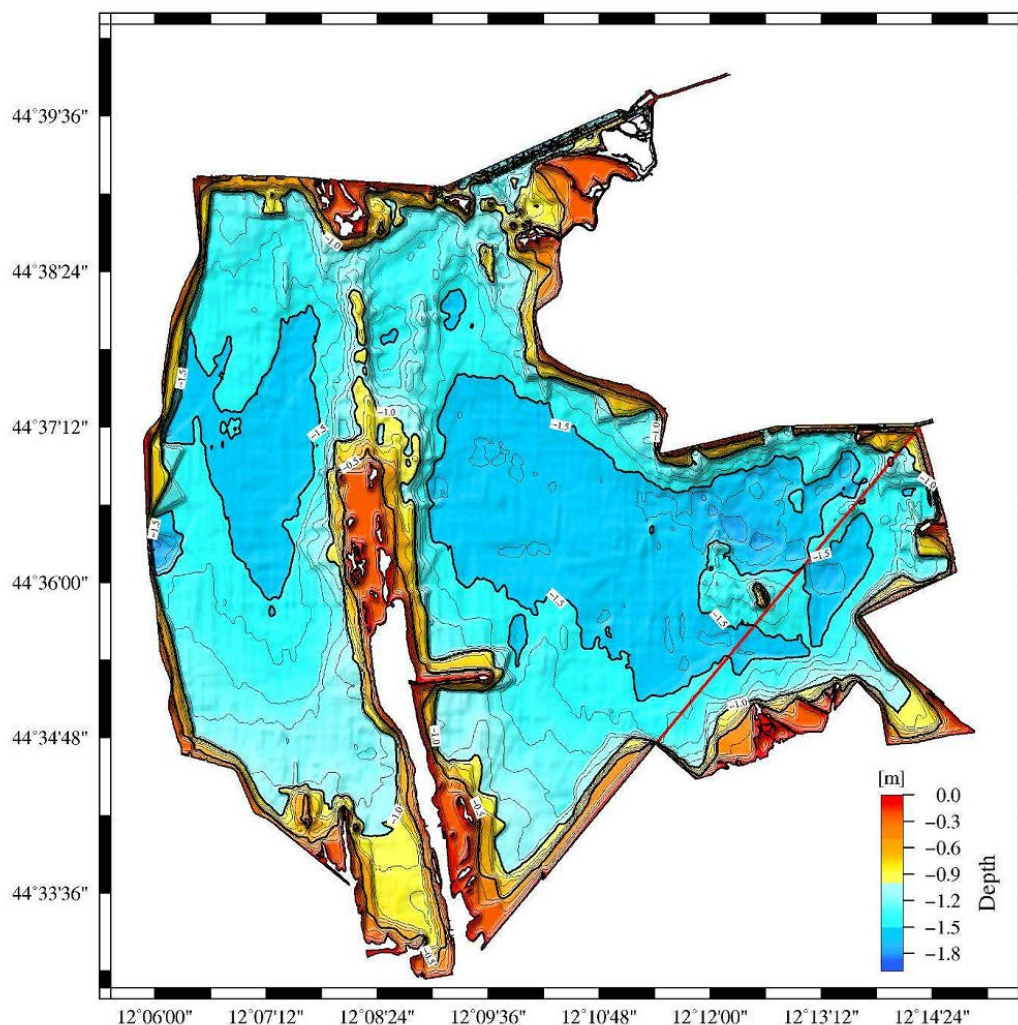


Figura 3-4 Rilievi 2011 – mappa batimetrica completa

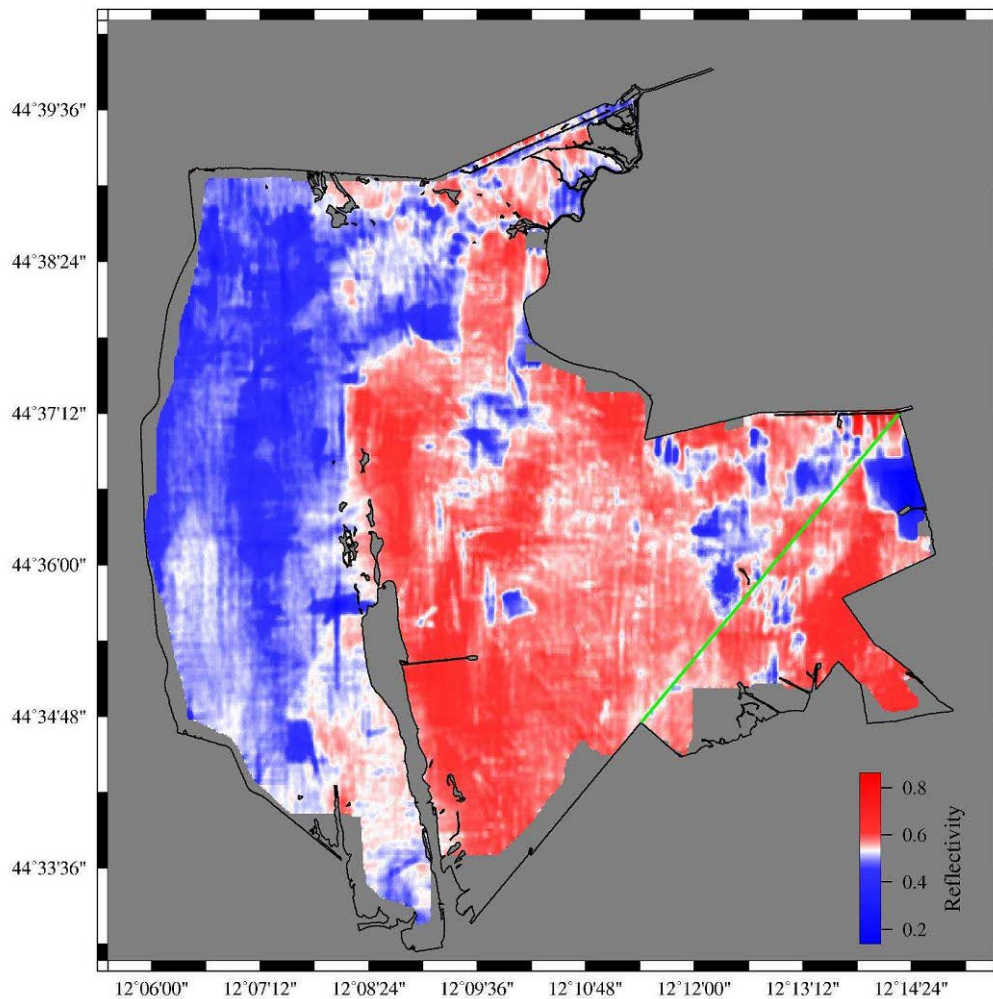


Figura 3-5 Rilievi batimetrici 2011 – Mappa della riflettività del fondo

Nella zona NE della valle (Valle Cona e canale Foce) è stata condotta un'indagine approfondita, con un raffittimento delle linee di rilievo, che hanno interessato il canale sub lagunare Foce, il canale Ungola e il canale Serilla Varco. La navigazione è risultata difficile per la numerosa presenza di secche e zone di scarsissima navigabilità. In Figura 3-6 viene riportato il dettaglio delle linee di navigazione di tale area.

Dall'esame della mappa batimetrica di dettaglio risultante (Figura 3-7) emerge che il canale sub lagunare Foce è caratterizzato da una profondità media di 1.2 m con presenza di alcune zone con profondità minore di 0.6-0.7 m dislocate alla base dell'argine che lo delimita a nord. Il canale Ungola presenta una profondità variabili con valori oscillanti tra 0.7 e 0.9 m e massimi di profondità di 1.2 m. Il canale Serilla Varco è stato individuato sul fondale con una profondità variabile tra 1.8 m e 0.9 m; il suo stato attuale risulta discontinuo e nei tratti parzialmente interrati il fondale risale a profondità tra 0.7 e 0.8 m in particolare dove si ricongiunge con il canale Ungola.

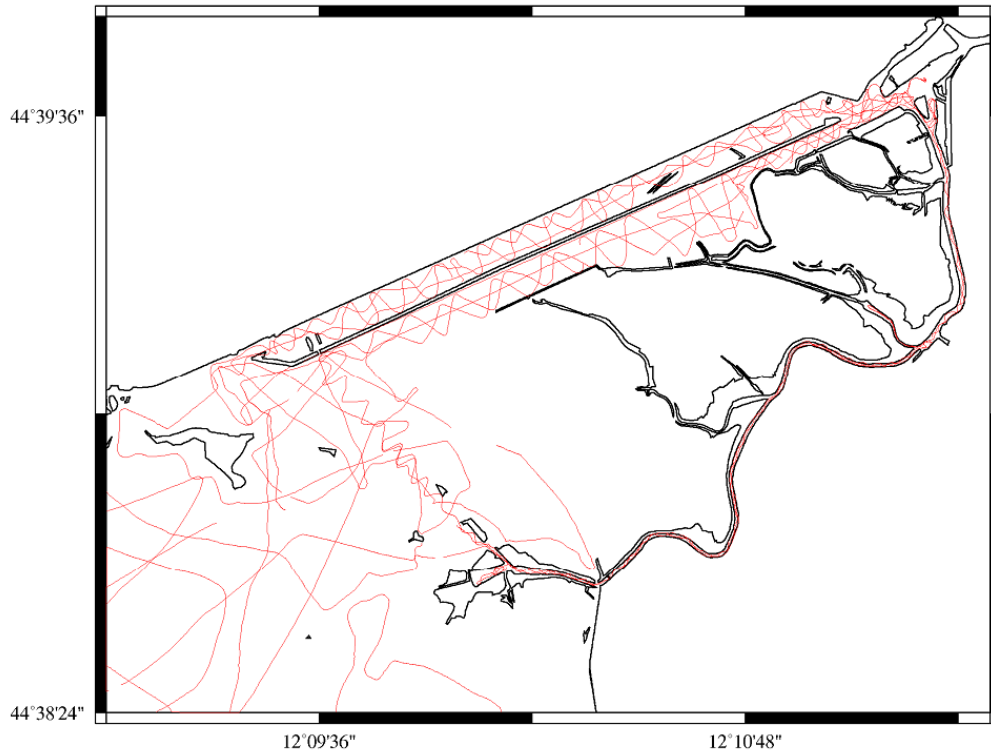


Figura 3-6 Rilievo 2011 – Linee di navigazione nella porzione NE della Valle (Valle Cona, Canale Foce)

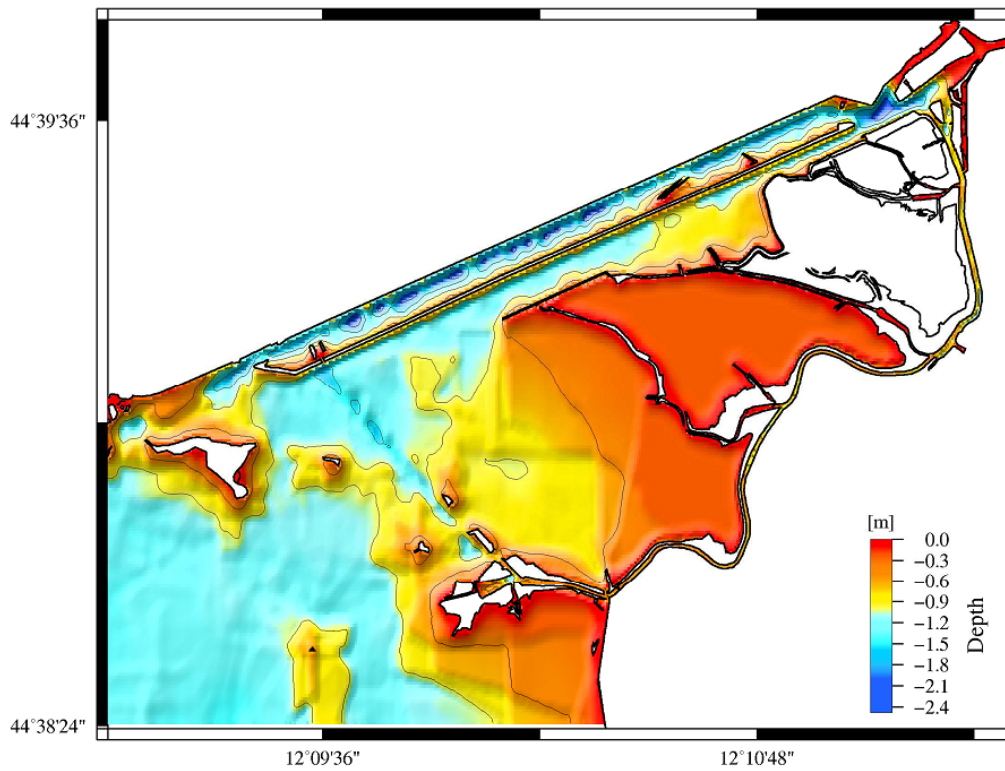


Figura 3-7 Rilievi batimetrici 2011 – Mappa batimetrica della porzione NE della valle (Valle Cona e canale Foce)

3.2 Rilievo 2014

In occasione dello studio [4] è stato condotto un rilievo morfobatimetrico ad alta risoluzione della porzione settentrionale accessibile delle Valli di Comacchio (Figura 3-8), motivato, tra l'altro, dai recenti interventi di escavo dei canali sublagunari effettuati in occasione del progetto LIFE dall'Ente Parco delta del Po, che hanno introdotto modifiche morfobatimetriche nella porzione NE della Valle rispetto all'assetto rilevato nella precedente campagna 2011.

Il dato di profondità, è stato depurato degli errori strumentali e dell'effetto delle variazioni di livello prodotte dalla marea o da altri fattori come l'apertura o la chiusura di chiaviche nel periodo di esecuzione del rilievo.

La pianificazione del rilievo e la scelta degli strumenti e delle modalità operative è stata fatta sulla base dell'esperienza maturata nel corso di precedenti rilievi ([2] [6]).

L'imbarcazione utilizzata è stata una barca di legno a fondo piatto, attrezzata con la strumentazione adatta e necessaria per acquisire i dati batimetrici. La base operativa è stata la Stazione di Foce (Figura 3-8).



Figura 3-8. Rilievi batimetrici 2014. Zona oggetto della campagna di rilievi integrativi

Il posizionamento è stato effettuato per mezzo di un ricevitore GPS Trimble DSM-232 collegato ad un'antenna esterna. Tale ricevitore è abilitato a ricevere il segnale dai satelliti geostazionari del sistema WAAS-EGNOS la cui elaborazione dei segnali trasmessi permette, attraverso una correzione differenziale, di ottenere errori contenuti nei 2 m.

È stato usato l'ecoscandaglio *single-beam* DATASONICS PSA900, caratterizzato da un'alta frequenza di emissione di 200 kHz, particolarmente indicata per acque basse [6].

Il trasduttore ecografico e l'antenna di posizionamento sono stati montati a poppa dell'imbarcazione su una stessa staffa per azzerare l'offset strumentale. Il trasduttore ha mantenuto un affondamento di 23 cm per tutta la durata del rilievo.

Le porzioni *ultra-shallow* della zona investigata che risultavano impossibili da navigare con l'imbarcazione classica sono state investigate con l'ausilio di un mezzo autonomo di superficie Figura 3-9 che è stato per l'occasione equipaggiato con la stessa strumentazione utilizzata per il rilievo da barca.



Figura 3-9 Rilievi batimetrici 2014 – Il mezzo autonomo di superficie impiegato per il rilievo delle porzioni di Valle caratterizzate da profondità particolarmente modeste.

E' stata rilevata l'intera superficie del settore lagunare indicato in Figura 3-10.

La nuova carta batimetrica del settore settentrionale delle Valli di Comacchio rappresenta il risultato dell'integrazione tra diverse tecniche di misura morfologica e morfo-batimetrica, trasportate in questo caso all'ambiente lacustre.

Le caratteristiche del segnale emesso dal trasduttore PSA900 hanno permesso di penetrare debolmente il sedimento, nelle zone a bassa riflettività superficiale (Figura 3-12).

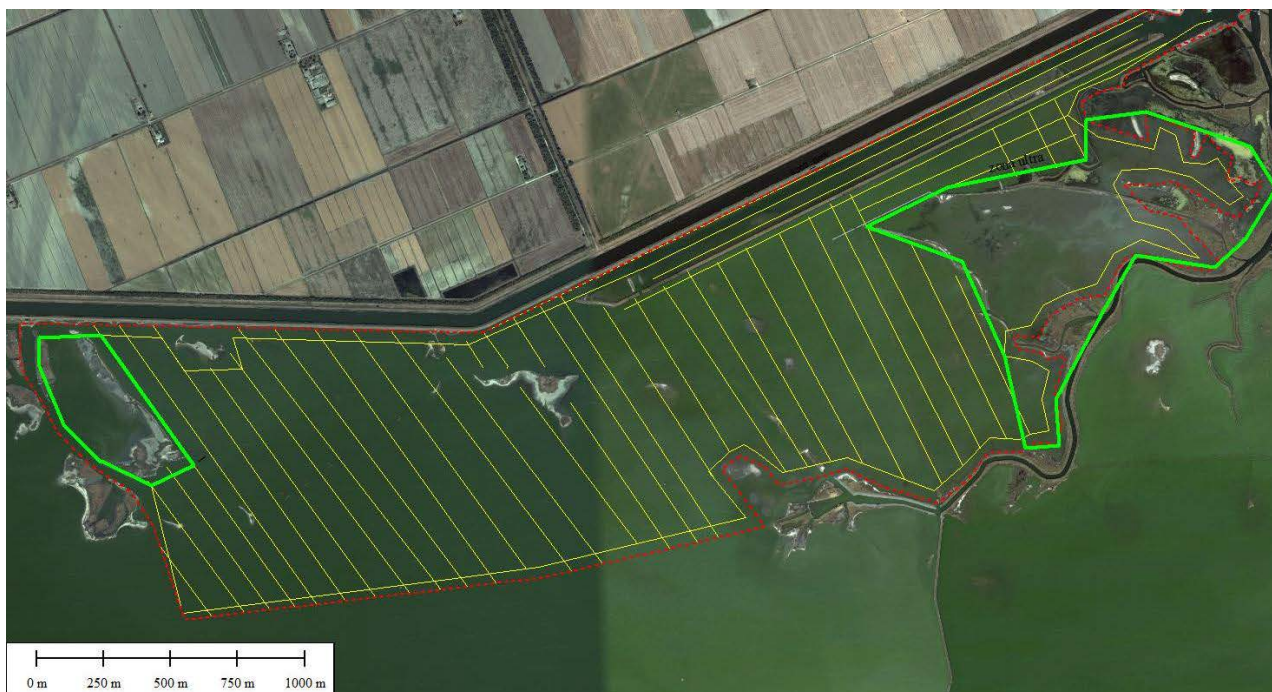


Figura 3-10 Rilievi batimetrici 2014 - Porzione settentrionale delle Valli oggetto della campagna di rilievi batimetrici integrativi

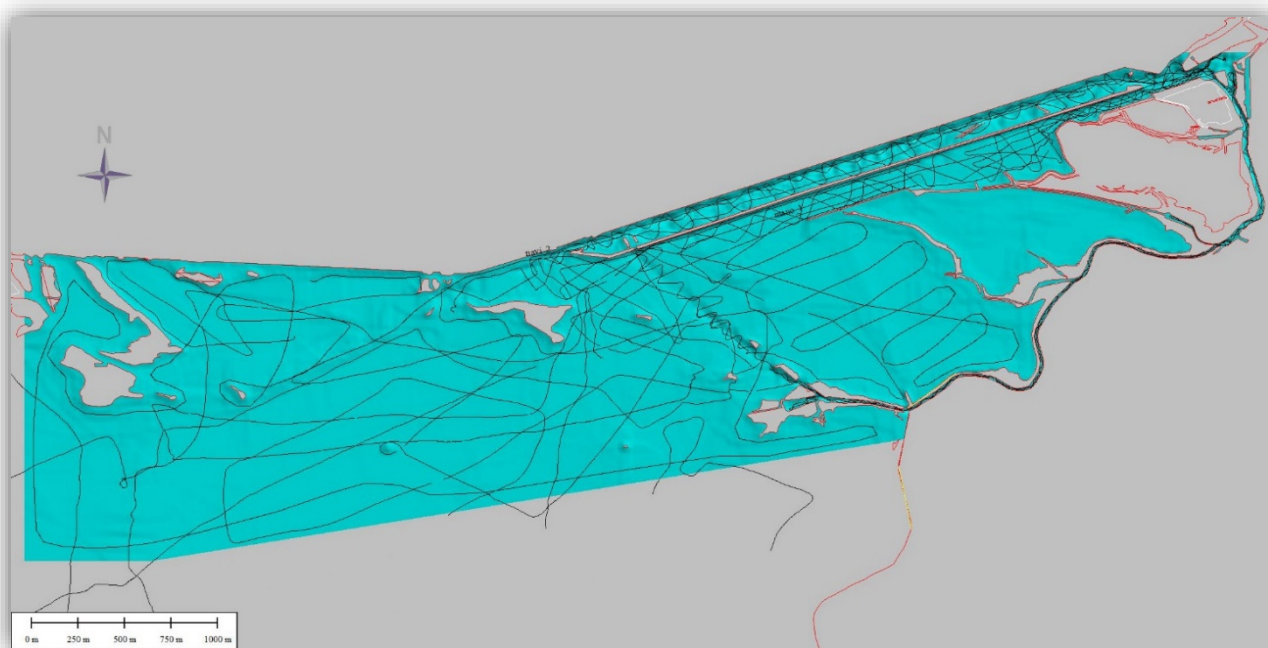


Figura 3-11 Rilievi batimetrici 2014 - Linee di navigazione coincidenti con i profili ecografici eseguiti durante la campagna

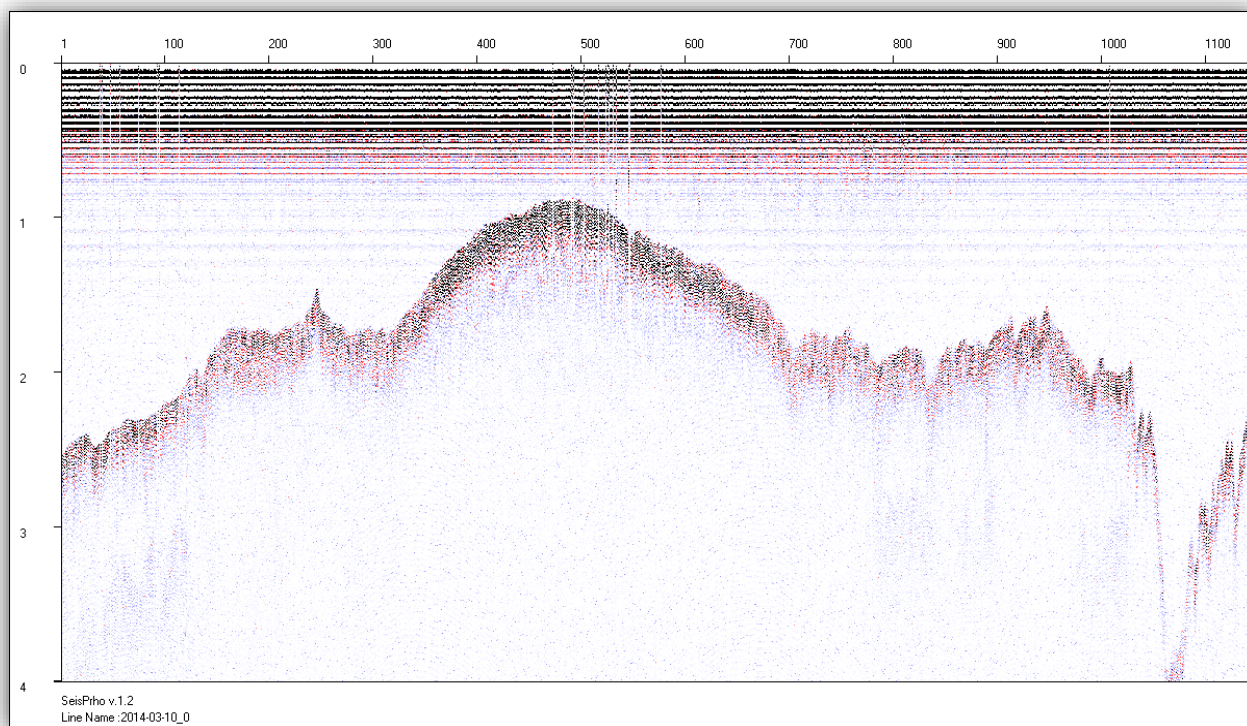


Figura 3-12. Rilievi batimetrici 2014 - Esempio di profili sismici elaborati e restituiti.

Il dato batimetrico è stato estrapolato dagli ecogrammi, tenendo conto dell'effetto di copertura da parte delle fanerogame e di altre possibili fonti di errore che possono presentarsi nei rilievi a bassa profondità *super-shallow* ([6]).

I dati di velocità di propagazione del suono in acqua sono stati misurati all'inizio e alla fine di ogni giornata di misura, in una stazione di riferimento scelta per comodità presso la Stazione di Pesca di Foce. Le opportune correzioni sono state quindi applicate singolarmente ad ogni set di dati acquisiti in giornata. La media dei valori acquisiti per l'intero periodo è stata di 1475 m/s +/- 2 m/s.

Sono state apportate le correzioni ai dati per quanto riguarda sia la linea di galleggiamento rispetto alla profondità del trasduttore (offset strumentale), che per quanto riguarda le correzioni del livello di marea. Tali correzioni sono state e apportate ai dati in fase di elaborazione post-acquisizione.

Per il livello di marea è stato preso come riferimento il mareografo radar della stazione di Bellocchio, gestito dalla ARPAE-Fe (ex ufficio Provincia di Ferrara – Servizio Risorse Idriche e Tutela Ambientale). Tali livelli riportano l'altezza relativa dell'acqua al livello medio marino di riferimento coerente con lo zero nazionale della rete IGM (medio marino).

Complessivamente sono stati rilevati circa 100 km di profili ecografici nella porzione settentrionale delle Valli di Comacchio con batimetriche variabili da -0,1 a circa -2,5 metri.

I dati ottenuti sono stati integrati con quelli della precedente campagna di acquisizione del 2011 i cui

dati puntuali grezzi, una volta corretti e riferiti allo stesso zero altimetrico, sono stati ricampionati e predisposti per essere utilizzati insieme a quelli di nuova acquisizione.

Dopo le opportune correzioni, l'elaborazione e la restituzione grafica di tali dati ha permesso di realizzare una mappa batimetrica a copertura completa dell'area di studio (Figura 3-13).

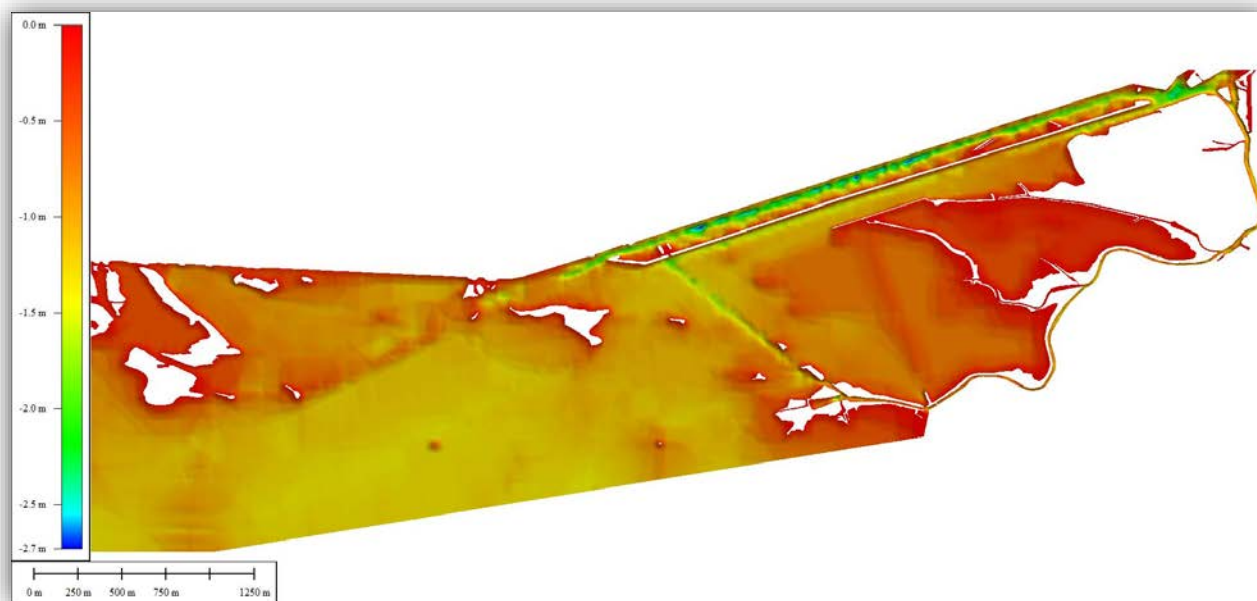


Figura 3-13. Rilievi batimetrici 2014 - Mappa batimetrica della porzione settentrionale delle valli di Comacchio

L'utilizzo dei dati del recente rilievo LIDAR messi a disposizione da ENI ha permesso l'integrazione dei dati morfobatimetrici con le porzioni non bagnate delle valli, in particolare le secche ed i canali emersi. Nelle aree lagunari si nota la mancanza di penetrazione del segnale se non in alcuni piccoli settori a NE, dove i fondali estremamente bassi < 10-15 cm, permettono la rilevazione del fondo.

All'interno dell'area "bagnata" sono presenti anche alcuni errori e falsi positivi di secche che sono stati verificati durante il rilievo per confermare la loro presenza. In Figura 3-14 sono stati riportati alcuni esempi nei quali si evidenzia la presenza di "falsi positivi" dei dati LIDAR, ovvero essi si riferiscono ai settori che presentano valori di quota maggiori di 0 m s.l.m., e che da un confronto con i dati batimetrici si sono rivelati essere degli errori. Diversamente, la stessa figura dimostra come al contempo, vi sia un buon riscontro con l'effettiva presenza di settori emersi che presentano quote maggiori di 0 m s.l.m. ai dati LIDAR.

I dati LIDAR sono stati quindi utilizzati a supporto della batimetria per l'individuazione degli "zeri" altimetrici di ausilio per la realizzazione della griglia, previo validazione di alcune zone in dubbio (Figura 3-15).

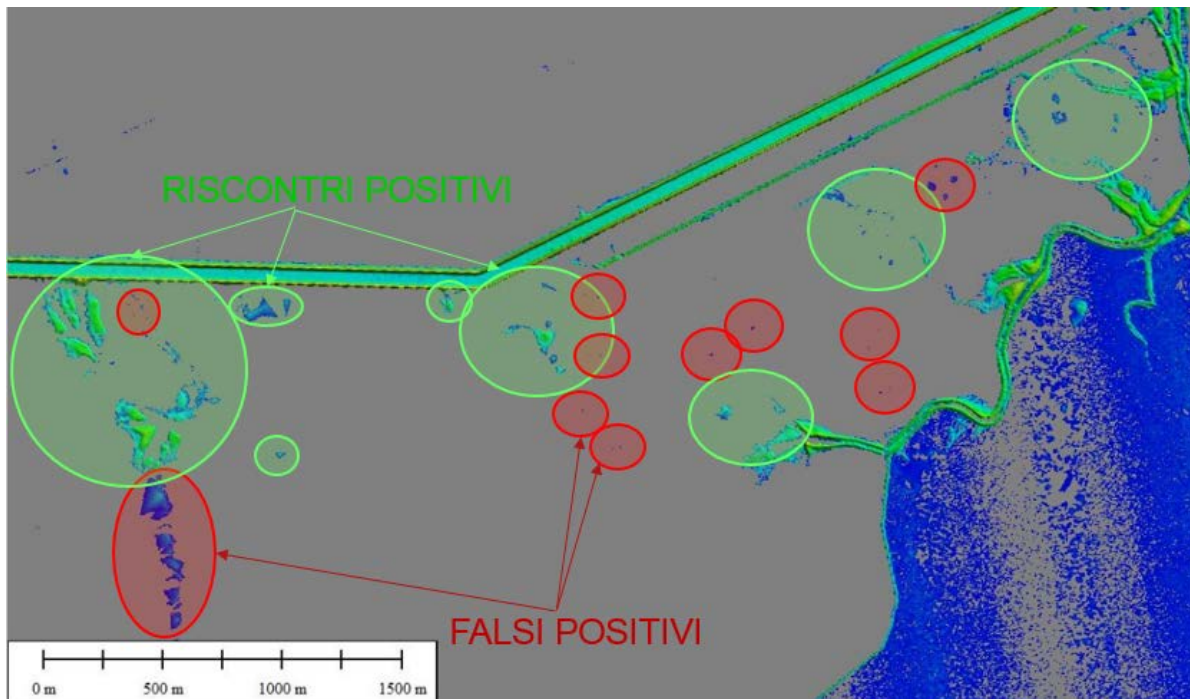


Figura 3-14. Rilievi batimetrici 2014 - Confronti con i dati LIDAR per i valori > 0 m s.l.m.



Figura 3-15. Rilievi batimetrici 2014 - Mappa dell'integrazione dei dati batimetrici con i dati LIDAR, sono rappresentate le curve di livello ogni 0.1m

Nella successiva Figura 3-16 si riporta il confronto tra le batimetrie rilevate nel 2011 e nel 2014. Sono evidenti i segni delle operazioni di escavo effettuate dopo il 2011 (in particolare sul canale Foce).

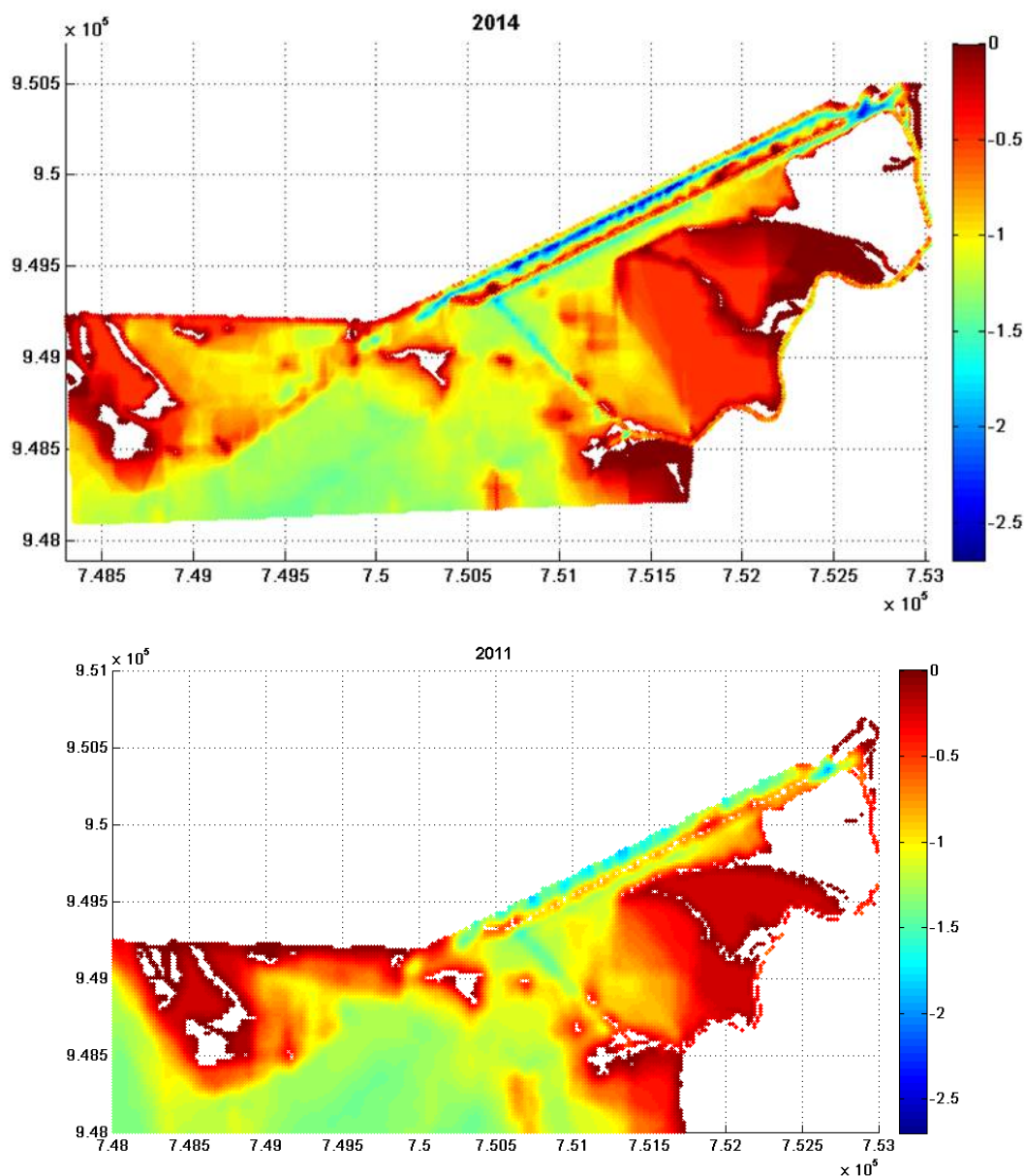


Figura 3-16. Lembo NE della laguna. Confronto tra i risultati delle indagini batimetriche 2014 (sopra) e 2011 (sotto).

3.3 Rilievo 2016

Tra il 18 Novembre 2015 e il Febbraio 2016, è stato effettuato un rilievo batimetrico di dettaglio nel settore meridionale delle Valli di Comacchio, in aree private (Figura 3-17) e delimitate da argini. Il rilievo ha avuto lo scopo di completare il quadro delle Valli impegnando il settore meridionale che a seguito della realizzazione dell'argine in fase di costruzione, rimarrà idraulicamente separato dalla Valle grande.

Inizialmente le proprietà interessate comprendevano anche le due porzioni di Valle Smarlacca (ad est); ma le condizioni idrometriche imposte dai gestori alla data del rilievo hanno impedito la

realizzazione dei rilievi su questa porzione della laguna.



Figura 3-17 Rilievi 2016 – Identificativi catastali delle aree interessate dal rilievo

Sulle aree effettivamente rilevate (Figura 3-18) i dati acquisiti sono profili ecografici *single-beam* ad alta risoluzione, acquisiti con tecniche non convenzionali in condizioni *ultra shallow* (< 1m), e con l'ausilio di un mezzo di superficie della classe SWAP. Il rilievo è stato esteso anche ad una porzione della valle Lido di Magnavacca al margine meridionale prospiciente l'ansa del Diavolocomo test di riscontro dei rilievi già effettuati nel 2011.

Il dato di profondità, è stato depurato degli errori strumentali e dell'effetto delle variazioni di livello prodotte dalla marea o da altri fattori come l'apertura o la chiusura di chiaviche nel periodo di esecuzione del rilievo.



Figura 3-18 Rilievo 2016 - . Dettaglio dell'area rilevata



Figura 3-20. Rilievo 2016 - Linee di navigazione coincidenti con i profili ecografici eseguiti durante la campagna

3.3.2 Acquisizione ed elaborazione dati

La dotazione di base del robot acquatico prevede un sistema innovativo a basso consumo energetico di profilatore batimetrico a 200 kHz per effettuare rilievi batimetrici e che integra un sistema di classificazione della riflettività del fondale. È stato usato l'ecoscandaglio *single-beam* DATASONICS PSA900 (Figura 3-21), caratterizzato da un'alta frequenza di emissione di 200 kHz, particolarmente indicata per acque basse.

Gli impulsi emessi formano un fascio conico di 8° , la *bottom-detection* automatica è stata disabilitata, e la lunghezza dell'impulso di emissione ridotta a $200 \mu\text{s}$ in modo da ottenere un limite inferiore di profondità di circa 0.2 m [6]. Il segnale ecografico è stato campionato a 1250 kHz di frequenza, 12 bit di risoluzione. La stringa NMEA183 è stata acquisita con un passo di 1 Hz, uguale alla frequenza di *pinging*.

Il trasduttore ecografico e l'antenna di posizionamento sono integrati nello scafo del mezzo autonomo e nel caso dell'acquisizione dei dati con l'imbarcazione sono stati montati su una stessa staffa per azzerare l'offset strumentale; il trasduttore ha mantenuto un affondamento di 5 cm sul mezzo autonomo e di 23 cm sull'imbarcazione per tutta la durata del rilievo. Tali valori di offset sono stati utilizzati per normalizzare i dati acquisiti.



Figura 3-21 Rilievi 2016 - Il trasduttore ultrasonico utilizzato per il rilievo.

I dati acquisiti attraverso l'ecoscandaglio sono stati elaborati in *post-processing* tramite software dedicato Seisprho ([7]) che ha permesso di ottenere sezioni ecografiche georeferenziate in modalità *variable density* esportabili in formato raster (bitmap). Le caratteristiche del segnale emesso dal trasduttore hanno permesso di penetrare debolmente il sedimento, nelle zone a bassa riflettività superficiale (Figura 3-22).

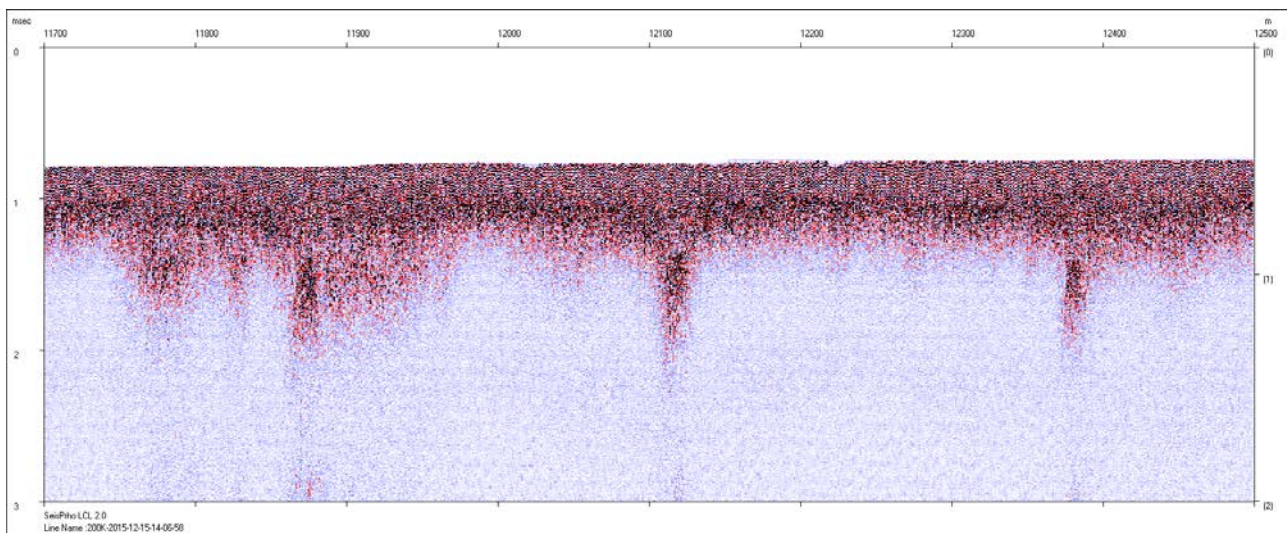


Figura 3-22 Rilievi 2016 - . Esempio di profili sismici elaborati e restituiti con Seisprho.

Per poter ricavare il dato batimetrico dagli ecogrammi ottenuti, tenendo conto dell'effetto di copertura da parte delle fanerogame e di altre possibili fonti di errore che possono presentarsi nei rilievi *super-shallow* [6], è stato eseguito il riconoscimento semiautomatico dei riflettori attraverso l'utilizzo delle funzioni di *picking* all'interno del software *Seisprho*. Sono stati così prodotti dei file (con estensione *dgt*) per ogni profilo batimetrico acquisito, contenenti coordinata del punto e profondità in tempi doppi (TWT) del riflettore individuato corrispondente al fondo-lago.

I file acquisiti sono stati sottoposti alla seguente procedura di elaborazione:

- esportazione della navigazione attraverso *Seisprho*;
- filtraggio del formato dei dati di navigazione attraverso procedure in linguaggio bash e perl;
- rappresentazione delle linee di navigazione attraverso GMT [8];
- restituzione grafica dei profili, digitalizzazione del fondale ed esportazione in formato bitmap dell'ecogramma;
- trasformazione dati di TWT georeferenziati in dati batimetrici attraverso l'applicazione della velocità di propagazione del suono;
- applicazione degli offset strumentali e di marea;
- creazione “grid” batimetrici in formato *netcdf* attraverso GMT.

I dati di velocità di propagazione del suono in acqua sono stati misurati all'inizio e alla fine di ogni giornata di misura, in una stazione di riferimento scelta per comodità presso la Stazione Bellocchio (Figura 3-23), partendo dai dati puntuali di temperatura sub superficiale dell'acqua (Figura 3-24) ed applicando le opportune trasformazioni atte ad ottenere una stima della velocità del suono. Le correzioni così ottenute sono state quindi applicate singolarmente ad ogni set di dati acquisiti nei diversi giorni. La media dei valori acquisiti per l'intero periodo è stata di 1475 m/s +/- 2 m/s.



Figura 3-23 Rilievi 2016 - Stazione Bellocchio (ARPAE) utilizzata per il monitoraggio dei dati di livello e di temperatura dell'acqua all'interno della Valle

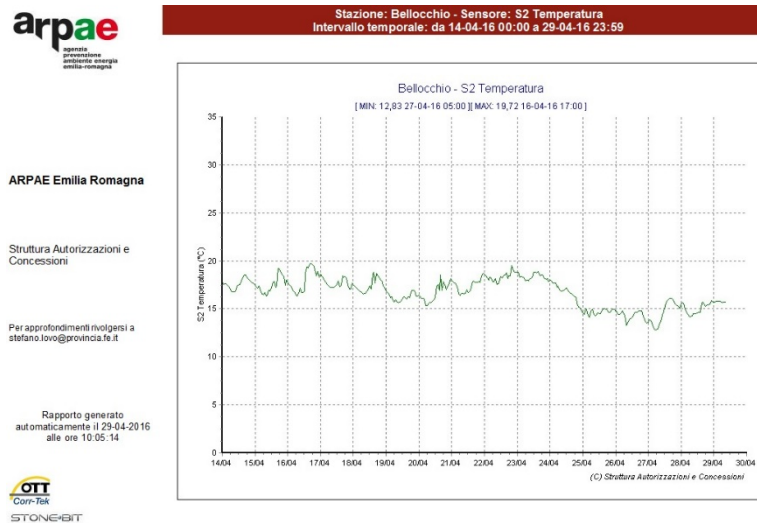


Figura 3-24 rilievi 2016 -. Esempio di dati della temperatura utilizzati per la stima della velocità del suono in acqua.

Sono state apportate le correzioni ai dati per quanto riguarda sia la linea di galleggiamento rispetto alla profondità del trasduttore (offset strumentale), che per quanto riguarda le correzioni del livello di marea. Tali correzioni sono state e apportate ai dati in fase di elaborazione post-acquisizione.

Per il livello di marea è stato preso come riferimento il mareografo radar della stazione di Bellocchio. Tali livelli riportano l'altezza relativa dell'acqua al livello medio marino di riferimento coerente con lo zero nazionale della rete IGM (medio marino) Figura 3-25.

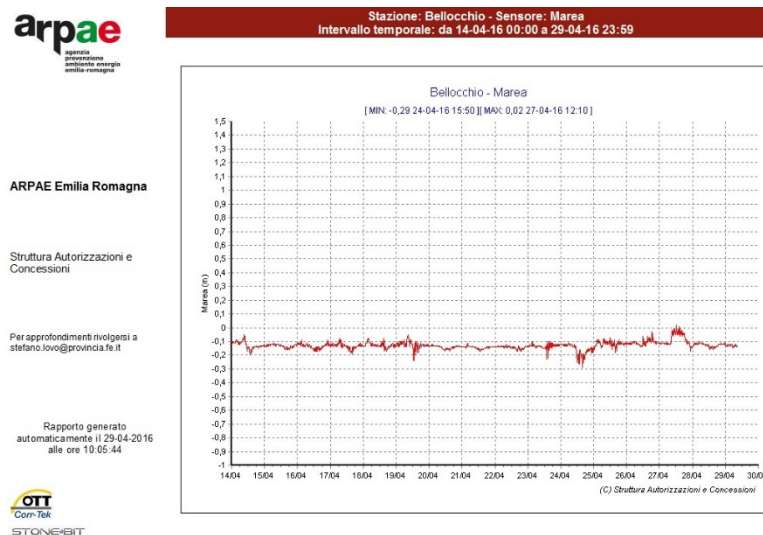


Figura 3-25 Rlievi 2016 - Esempio dei dati del mareografo di Bellocchio (fonte:

http://www.provincia.fe.it/settoreambient/servizio_risorse_idriche/pagine/acque_costiere/indice_acque_costiere/D_Bellocchio_LivMarea.jpg)

Le acquisizioni e le elaborazioni dei dati sono stati effettuati attraverso l'utilizzo di coordinate Geografiche Lat e Lon (DD.ddddddd) su datum WGS84. Tutte le mappe riportate all'interno di questo elaborato sono in proiezione Diretta di Mercatore.

Per quanto riguarda i dati numerici di profondità in formato ASCII per la costruzione delle griglie di calcolo del modello idrodinamico, si è fatto riferimento alla proiezione Universale Trasversa di Mercatore UTM sul fuso 32 N, con l'utilizzo del datum cartografico ED50 e con un offset di -4000000 metri sulla latitudine (coerente con le CTR regionali). Nelle Figura 3-26 e Figura 3-27 si riportano la batimetria risultante dai rilievi e le caratteristiche delle aree investigate, rispettivamente.



Figura 3-26 Rilievi 2016 – batimetria della porzione meridionale delle Valli di Comacchio



Figura 3-27 Rilievi 2016 – Caratteristiche delle aree di rilievo

4 Gli scenari di subsidenza

Gli scenari di subsidenza sono stati mutuati dallo studio fornito da ENI [1].

La valutazione di subsidenza attesa è stata effettuata tramite l'applicazione del modello poro-elastoplastico ad elementi finiti proprietario di Isamgeo Engineering GmbH. Le informazioni relative alla geometria dei due giacimenti, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle pressioni sono state ottenute dagli studi fluido-dinamici di giacimento realizzati da Eni S.p.A. con il codice di calcolo Eclipse [9]. Data la separazione delle strutture che ospitano i giacimenti di Agosta e Dosso degli Angeli, è esclusa la comunicazione idraulica tra i due giacimenti ed è perciò stato possibile eseguire due studi dinamici separati. L'interazione meccanica è tenuta in debita considerazione mediante la costruzione di un unico modello integrato che comprende entrambi i giacimenti. La data di fine produzione è stimata dal modello fluido-dinamico e, quindi, dipende anche dalla compressibilità dei pori. In Figura 4-1 è riportata l'ubicazione dei campi di Dosso degli Angeli e Agosta.

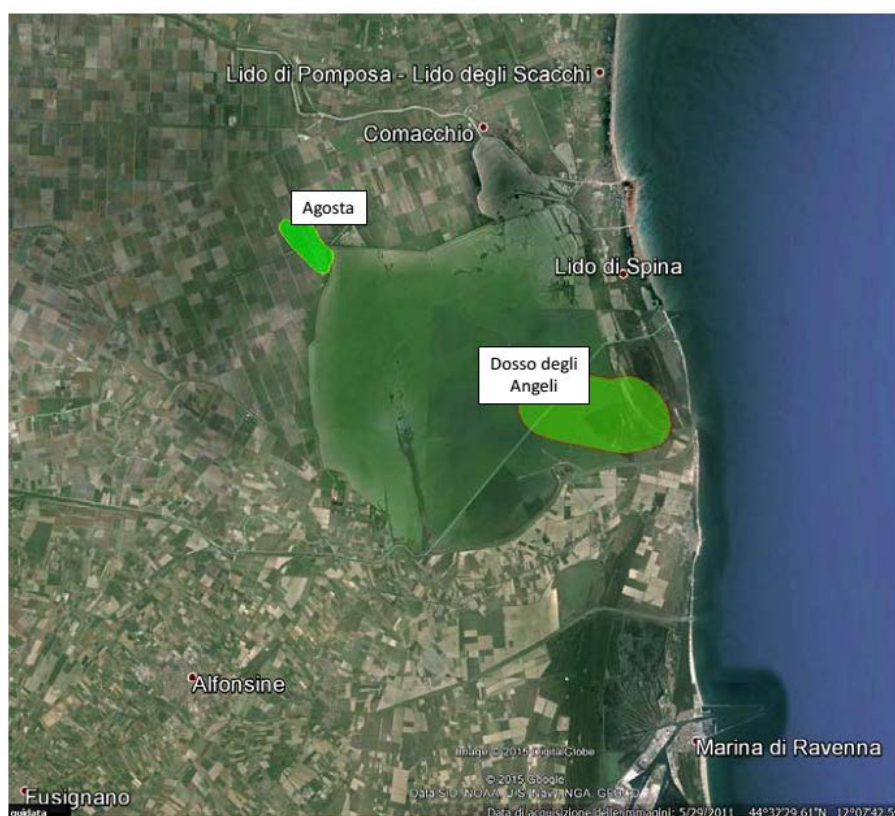


Figura 4-1 Ubicazione dei campi Dosso degli Angeli e Agosta

Per il campo di Agosta, sono stati considerati tre diversi scenari, basati sulla correlazione regionale [10]. Il termine della produzione è pertanto previsto tra il 2030 e il 2033. Per il giacimento di Dosso degli Angeli invece, date le numerose misurazioni disponibili (CGPS, dati InSar e livellazioni), è stato adottato un unico valore di compressibilità dei pori e la fine della produzione è prevista al 2027. La

simulazione è stata protratta per circa 30 anni dopo la chiusura dei campi in modo da considerare la propagazione del disturbo di pressione negli acquiferi connessi alla zona mineralizzata.

Per i dettagli si rimanda al citato rapporto [1]. Nelle Figura 4-2 Figura 4-3 si riportano i coni di subsidenza differenziali (rispetto all'anno 2017) previsti sui due orizzonti temporali all'anno 2020 e 2030, avendo assunto l'anno 2017 quale anno di avvio della produzione per il pozzo Agosta.

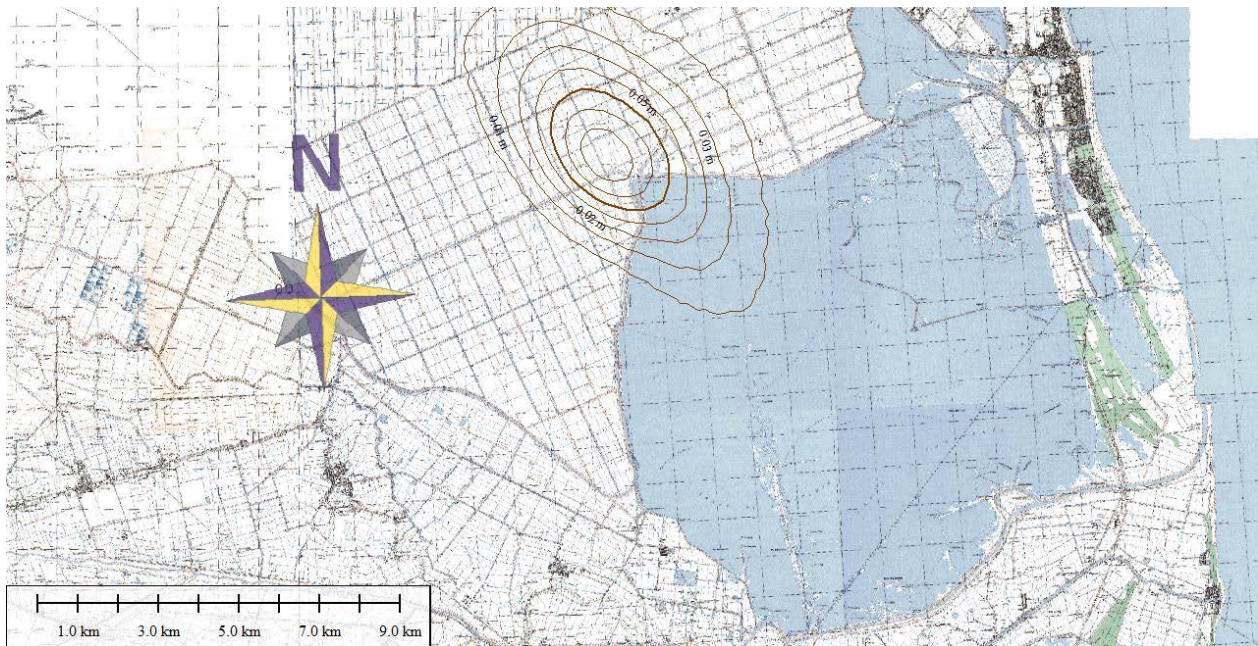


Figura 4-2 Andamento delle isolinee di subsidenza attesa all'anno 2020

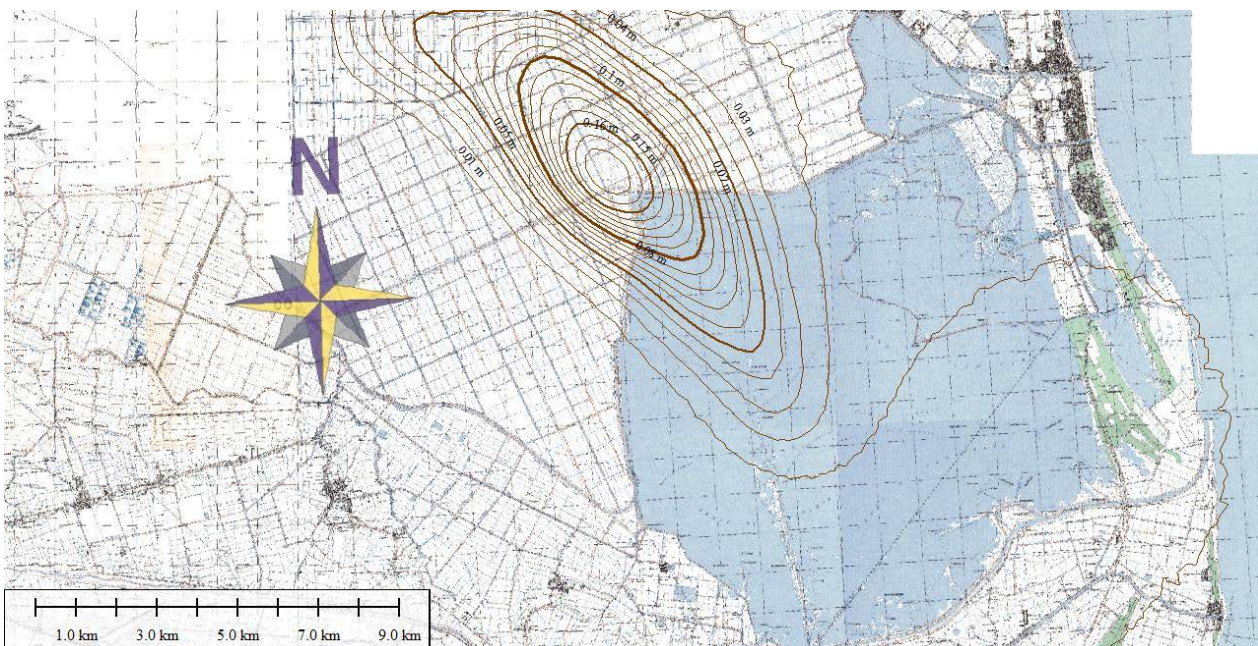


Figura 4-3 Andamento delle isolinee di subsidenza attesa all'anno 2030

5 Il modello idrodinamico

Le specificità dell'ambiente vallivo hanno condizionato la scelta del tipo di modello matematico e la tecnica di integrazione numerica. Essendo il contesto caratterizzato da fenomeni in cui la scala orizzontale è predominante rispetto alla scala verticale sono state fatte le seguenti scelte:

- modello idrodinamico bidimensionale alle acque basse, mediate sulla verticale,
- effetti trascurabili di variazione batimetrica indotti dal trasporto solido e dai bilanci sedimentari,
- termine sorgente associato alla presenza del vento come forzante del moto, della pendenza del fondo (pur modesta) e all'entità delle resistenze al moto.

La tecnica di integrazione scelta per l'implementazione del modello è ai volumi finiti (FVM) di tipo Godunov, caratterizzato da:

- soluzione discretizzata mediante medie di cella;
- schema basato sulle equazioni scritte in forma conservativa;
- possibilità di utilizzo di griglie non strutturate particolarmente adatte al contesto caratterizzato da contorni irregolari;
- facilità di implementazione.

Nella Appendice 1.A si riportano i dettagli del modello matematico e delle tecniche di integrazione numerica. Nel seguito se ne richiamano i lineamenti essenziali, utili alla comprensione delle sue principali peculiarità e della sua applicazione al caso di studio.

5.1 Lineamenti del modello matematico e della tecnica di integrazione numerica

Il modello implementato per le simulazioni idrodinamiche delle Valli di Comacchio si basa sulla teoria delle **equazioni alle acque basse** (*Shallow Water Equations*) bidimensionali. Le equazioni di bilancio si riferiscono alla conservazione della massa ed al bilancio della quantità di moto, proiettata nelle direzioni indipendenti del piano.

$$\frac{dU}{dt} + \frac{dE}{dx} + \frac{dG}{dy} + S = 0 \quad [1.1]$$

$$U = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{g}{2}h^2 \\ uvh \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{g}{2}h^2 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ gh_x \left[S_{0,x} - S_{f,x} + \frac{\tau_{wx}}{\gamma R} \right] \\ gh_y \left[S_{0,y} - S_{f,y} + \frac{\tau_{wy}}{\gamma R} \right] \end{bmatrix} \quad [1.2]$$

\mathbf{U} è il vettore delle variabili conservative; t è il tempo; \mathbf{E} e \mathbf{G} le componenti del flusso rispettivamente nelle direzioni x e y ; \mathbf{S} è il termine sorgente. Inoltre, g è il modulo dell'accelerazione di gravità, h la profondità, u e v le velocità mediate sulla verticale, s_{0x} (s_{0y}) la pendenza del fondo e s_{fx} (s_{fy}) la pendenza d'attrito, nella direzione x (y).

Il termine sorgente comprende, oltre ai termini di pendenza del fondo e pendenza di attrito, anche il vento sottoforma di tensione superficiale applicata alla superficie libera sulla cella.

L'integrazione numerica è basata sullo schema ai **volumi finiti di Godunov**, applicato ad una discretizzazione del dominio di calcolo realizzata con celle triangolari, aventi area Ω (Figura 5-1)

Definito $\mathbf{F} = [\mathbf{E}, \mathbf{G}]$:

$$\int_{\Omega} \partial \mathbf{U} / \partial t \, d\Omega + \int_{\Omega} \nabla \cdot \mathbf{F} \, d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{S} \, d\Omega \quad [1.3]$$

La versione semidiscreta di questa equazione risulta:

$$\frac{d\bar{\mathbf{U}}_i}{dt} = \mathbf{L}(\bar{\mathbf{U}}^n) \quad \text{con:} \quad \mathbf{L}(\bar{\mathbf{U}}^n) = -\frac{\Delta t}{\Omega} \sum_{k=1}^3 (\mathbf{F}_k^* \cdot \mathbf{n}_k) dl_k + \frac{\Delta t}{\Omega} \int_{\Omega} \mathbf{S} \, d\Omega \quad [1.4]$$

Dove l'apice n indica il tempo corrente; il pedice $k = 1, 2, 3$ si riferisce ai lati di ogni cella; \mathbf{F}_k^* è il flusso numerico mediato su ogni lato (ricavato dalla appropriata soluzione del problema di Riemann alle frontiere di cella); dl_k è la lunghezza del lato k -mo della cella; \mathbf{n}_k è il versore normale al lato della cella.

Per la soluzione del problema di Riemann è stato utilizzato il solutore approssimato HLLC.

Per raggiungere il secondo ordine di accuratezza nello spazio è stata utilizzata la tecnica MUSCL (*Monotone Upwind Scheme for Conservation Laws*) con la ricostruzione delle variabili nei punti medi dei lati della singola cella di calcolo (sulle frontiere della cella), a partire dai valori medi di cella delle variabili contenute in \mathbf{U} . La ricostruzione delle variabili all'interfaccia di cella porta la soluzione da costante a tratti a lineare a tratti.

Per incrementare l'ordine di accuratezza nel tempo è stato utilizzato un metodo di Runge – Kutta Strong Stability Preserving specifico per leggi di conservazione. Questo tipo di tecniche di integrazione temporale permettono di ottenere schemi ad alto ordine a partire da modelli accurati al primo ordine mantenendo le proprietà di stabilità di questi ultimi, una volta scelto opportunamente il passo temporale Δt di calcolo. Il passaggio *all'ordine di accuratezza due* nel tempo è dunque ottenuto mediante l'applicazione del metodo di Runge-Kutta al secondo ordine, che prevede il

calcolo della soluzione in due passi successivi.

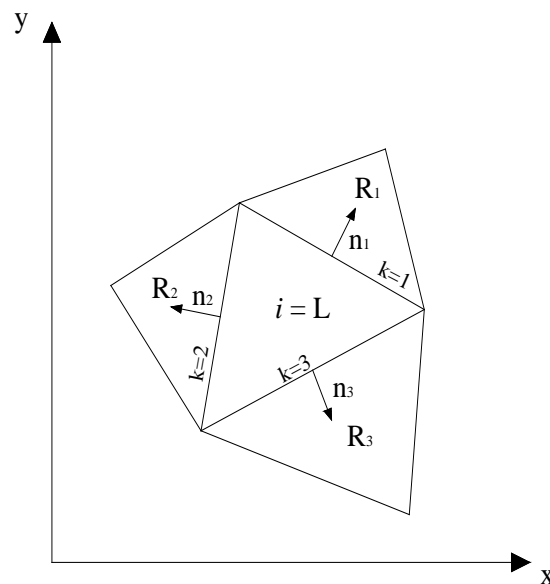


Figura 5-1 cella di calcolo triangolare e relazione con le celle adiacenti

I modelli alle acque basse sono tipicamente applicati a tronchi fluviali, estuari e zone costiere. Tali sistemi idrici sono delimitati da contorni che permettono lo scambio di portate liquide con zone limitrofe, non esplicitamente rappresentate dal modello di calcolo. Si rende indispensabile quindi l'introduzione di opportune condizioni al contorno: nel presente lavoro sono state utilizzate condizioni al contorno riflettenti per i contorni impermeabili non attraversati dal fluido, e condizioni al contorno di trasparenza per le porzioni di perimetro caratterizzate dalla presenza di chiaviche, canali, sifoni o idrovore.

In generale, le condizioni al contorno vengono implementate con l'inserimento di celle "fittizie" esterne rispetto al dominio di calcolo.

5.2 Approfondimento sui termini sorgente

Per la trattazione del termine sorgente relativo alla **pendenza del fondo** si è scelto di utilizzare la procedura che prende il nome di DFB (*Divergence Form for Bed Slope Source Term*).

L'applicazione numerica del termine sorgente in forma di divergenza, proposto con la tecnica DFB, ne prevede una discretizzazione lato per lato esattamente come effettuato per i termini di flusso.

La discretizzazione del termine sorgente relativo alla pendenza del fondo porta alla seguente scrittura:

$$\frac{\Delta t}{\Delta V} \int_{\Delta V} \mathbf{S}_0 dV = \frac{\Delta t}{\Delta V} \begin{bmatrix} 0 \\ \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} g h_k^2 \Big|_{\eta=\eta^*} \cdot n_x dS_k \\ \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} g h_k^2 \Big|_{\eta=\eta^*} \cdot n_y dS_k \end{bmatrix} \quad [1.5]$$

dove n_x e n_y sono le componenti cartesiane del vettore normale esterno e h_k è la stima della profondità sul k -esimo lato di cella.

Per completare l'illustrazione della tecnica DFB si rende necessario valutare il livello dell'acqua η^* all'interno della cella e le tre profondità h_k sui tre punti medi dei lati.

Per quanto riguarda la **pendenza d'attrito**, nel modello numerico è stata applicata la formula di resistenza di Manning.

Il termine sorgente $\mathbf{S}_f = [0 -ghs_{fx} -ghs_{fy}]^T$ è valutato in ogni cella della griglia di calcolo, tenendo conto che:

$$\begin{cases} S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \\ S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \end{cases} \quad [1.6]$$

dove u , v rappresentano le velocità della corrente nelle due direzioni del piano; h rappresenta la profondità nel centro cella; n il coefficiente di resistenza di Manning.

Per la trattazione degli effetti associati alla presenza del **vento**, si è scelto di procedere in modo semplificato considerando la distribuzione delle velocità costante lungo tutta la profondità.

Il vento nell'equazione di bilancio è rappresentato dal termine $\mathbf{S}_w = [0 ghS_{wx} ghS_{wy}]^T$

\mathbf{S}_w è valutato lungo le due direzioni principali, in ogni cella della griglia di calcolo.

$$\begin{cases} S_{wx} = \frac{\tau_{wx}}{\gamma h} = \frac{C_d \rho_a (w_x - u) \sqrt{(w_x - u)^2 + (w_y - v)^2}}{\gamma h} \\ S_{wy} = \frac{\tau_{wy}}{\gamma h} = \frac{C_d \rho_a (w_y - v) \sqrt{(w_x - u)^2 + (w_y - v)^2}}{\gamma h} \end{cases} \quad [1.7]$$

Dove ρ_a è la densità dell'aria; γ è il peso specifico dell'acqua; h rappresenta la profondità nel centro cella; u , v rappresentano le velocità della corrente nelle due direzioni principali; w_x , w_y rappresentano le velocità del vento nelle due direzioni principali ad una altezza di 10 m dal suolo; C_d è il coefficiente

dinamico ed esprime la quota parte di sforzo trasferito al fluido.

Il coefficiente dinamico può essere valutato secondo varie valutazioni empiriche, sviluppate in campo oceanografico. Per la sua semplicità di implementazione è stata scelta la formulazione di Demirbilek, Bratos e Thompson [12]:

$$C_d = (1,1 + 0,035 w) \times 10^{-3} \quad [1.8]$$

5.3 Approfondimento sulla modellazione dei manufatti idraulici (sifoni e chiaviche)

5.3.1 Sifoni

Per la stima di portata e livello in corrispondenza dei sifoni ci si è basati essenzialmente sulla relazione tecnica fornita dal Servizio Tecnico di Bacino, che descrive i manufatti di gestione delle acque [13].

In particolare, da tale relazione si evince che i sifoni sono progettati per una portata massima pari a 2 m³/s per sifone.

A conferma dell'effettivo dimensionamento dei sifoni, è stata considerata una prova eseguita dagli operatori del parco nei mesi di Gennaio e Febbraio che è consistita nell'immissione in valle di 12'000'000 m³. Stimando che la prova sia durata per un periodo di circa 58 giorni, si è risaliti a una portata caratteristica media dei sifoni pari a 1,2 m³/s ciascuno, compatibile con la portata di progetto. Per le simulazioni è stata utilizzata una portata costante pari a 1,0 m³/s per sifone, per tenere conto di un fattore di contemporaneità e del loro effettivo stato manutentivo.

5.3.2 Chiaviche

Una prima analisi della geometria e del comportamento dei manufatti di scambio delle acque in corrispondenza dei canali ha mostrato che le chiaviche – quando aperte - non funzionano come una luce di fondo, ma come un restringimento localizzato. La circolazione delle acque non è quindi in nessun caso influenzata dalle paratoie, quando queste ultime sono sollevate: infatti il livello dell'acqua rimane sempre al di sotto del bordo inferiore della paratoia.

E' stata quindi utilizzata una relazione portata-livello per il caso di restringimento localizzato [14] per la quale noto il dislivello tra monte e valle e la geometria del restringimento si risale alla portata di efflusso Q.

$$Q = CA_v \sqrt{2g \left(\Delta h - h_f + \alpha \frac{v_m^2}{2g} \right)} \quad [1.9]$$

Δh , dislivello; h_f perdite di carico distribuite all'interno della strettoia; v_m velocità a monte; A_v area di valle; C coefficiente di efflusso.

Consideriamo per il nostro calcolo h_f trascurabile considerata la lunghezza limitata delle strutture.

Posto che la portata a valle e a monte sia la medesima, la relazione in (1.9) si può riscrivere come:

$$Q = CA_v A_m \sqrt{2g \frac{\Delta h}{A_m^2 - C^2 A_v^2}} \quad [1.10]$$

dove A_m rappresenta l'area bagnata a monte del manufatto. Il coefficiente di efflusso C dipende da vari fattori (geometria del restringimento, numero di Froude della corrente, ecc.):

$$C = C' K_f K_r K_w K_\varphi K_y K_x K_\vartheta K_e K_j \quad [1.11]$$

Parametro	Dipende da ...
C'	Geometria della strettoia
K_f	Numero di Froude
K_r, K_w	Arrotondamenti spigoli ingresso
K_φ	Inclinazione sbarramento
K_y	Inclinazione delle sponde
K_e	Eccentricità della strettoia
K_j	Presenza di pile o setti

Tab. 5-1 Parametri per la stima del coefficiente di efflusso delle chiaviche

Tenuto conto della geometria dei manufatti i fattori efficaci si riducono a C' , K_f , k_j . In Tab. 5-2 si riportano le caratteristiche geometriche dei manufatti e il valore del coefficiente di efflusso C per le chiaviche del sistema. I parametri non riportati in tabella sono ininfluenti.

Manufatto	B	b	L	N	b'	Fr	C'	K_f	K_j	C
Bellocchio	25.0	15.5	16.0	8	1.1	< 0.1	0.94	0.9	0.91	0.77
Foce-Fattibello	59.5	38.0	4.3	9	3.8	< 0.1	0.78	0.9	0.97	0.68
Leonarda	5.6	4.7	5.1	3	1.1	< 0.1	0.96	0.9	0.95	0.82
Pedona	5.1	4.7	9.0	2	2.0	< 0.1	0.98	0.9	0.95	0.84
Scirocca	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 5-2 Grandezze geometriche e valori dei parametri e dei coefficienti di efflusso per le chiaviche

dove: B larghezza canale prima della strettoia; b larghezza della strettoia, L lunghezza della strettoia; N numero di porte; b' larghezza della singola porta.

Le chiaviche, quando aperte, sono soggette alle oscillazioni di marea (nel modello idrodinamico sul lato di bordo è imposto il livello) e alla conseguente variazione nel tempo di tutte le grandezze fisiche.

La chiavica Scirocca, sul confine meridionale, è l'unica che mantiene un collegamento con la Valle Lido di Magnavacca nella sua porzione prevalente esterna all'argine in fase di costruzione, poiché le chiaviche Pedone e Leonarda sono a servizio del bacino delimitato tra il confine meridionale delle Valli e l'argine di separazione acque pubbliche e private. Il manufatto ha dimensioni molto più contenute rispetto alle altre due chiaviche (Foce-Fattibello e Bellocchio) di collegamento tra la Valle grande e il sistema delle acque salmastre esterne. Pertanto nelle simulazioni saranno considerati solo questi ultimi, che peraltro risulteranno condizionare modestamente l'assetto idrodinamico delle Valli.

6 Analisi delle forzanti vento e marea

6.1 Le stazioni di misura

La selezione delle stazioni di rilevamento è basata sulla loro posizione geografica e sulla tipologia e qualità dei dati misurati. In particolare, le stazioni scelte sono quelle geograficamente prossime all'area di studio che presentano caratteristiche meteorologiche analoghe a quelle delle Valli.

ArpaE-SIM registra dati che si riferiscono sia alle variabili meteorologiche tradizionali (temperature, precipitazioni, dati anemometrici, ecc.) sia alle grandezze idrometriche dei corsi d'acqua.

I dati disponibili derivano da misure effettuate in tempo reale con le apparecchiature elettroniche automatiche che costituiscono la rete regionale Rirer (Rete integrata regionale idropluviometrica dell'Emilia-Romagna), affidata ad ArpaE-Sim dalla Regione, ma anche da molte altre fonti, quali ad esempio le registrazioni storiche dell'ex Servizio idrografico e mareografico nazionale (Simn), i cui uffici di Parma e Bologna sono stati incorporati in ArpaE dal 2003. L'insieme dei rilievi utilizzati in questo studio sono stati resi disponibili principalmente da l'ArpaE-Sim della Regione Emilia-Romagna e ArpaE-ufficio di Ferrara (ex Ufficio Acque Costiere ed Economia Ittica della Provincia di Ferrara).

Per consentire l'accesso pubblico diretto dal sito web ai dati contenuti nel database di ArpaE-Sim, dal 18 aprile 2006 è attivo il sistema denominato Dexter.

Fra i compiti istituzionali dell' ex Ufficio Acque Costiere ed Economia Ittica della Provincia di Ferrara (oggi ufficio di Ferrara di ArpaE) rientra la gestione della rete di monitoraggio delle acque lagunari e costiere di pertinenza della Provincia. Di particolare rilevanza ai fini di questo studio sono risultate la stazione di Porto Garibaldi (mareografica integrata) e la stazione di Bellocchio (multiparametrica - interna alle Valli) entrambe attive dal 2009. In aggiunta è stata considerata anche la stazione idrometrica di Fossa-Foce, facente parte della rete di monitoraggio di ArpaE-Ufficio di Ferrara collocata all'estremità Nord – Occidentale del bacino, operativa da Marzo 2009 a Ottobre 2010 (sa ottobre 2010 dismessa); nonostante la limitata serie di dati disponibile è utile in termini di valutazione delle oscillazioni di quota all'interno delle Valli.

Per la valutazione dell'oscillazione stagionale dei livelli all'interno delle Valli si è fatto riferimento alla stazione di Bellocchio, collocata nelle vicinanze del manufatto Paisolo tra il canale Bellocchio e valle Campo. La stazione è munita di sonda multiparametrica e di un mareografo radar situati direttamente nel Canale Bellocchio. La stazione è rimasta inattiva nel periodo luglio 2014-ottobre 2015 a causa dei lavori di realizzazione dell'argine di separazione tra le acque pubbliche e private. A confronto sono stati utilizzati anche i dati registrati dalla stazione di Fossa-Foce, per per la verifica in termini

qualitativi delle oscillazioni stagionali di livello in valle.

Per la valutazione della marea, utile alla definizione della forzante associata alle portate in transito attraverso le chiaviche, sono state scelte si fa riferimento alla stazione di Porto Garibaldi (periodo di riferimento Feb. 2009-Feb 2011) in relazione all’azionamento delle chiaviche Bellocchio e Foce. Per l’azionamento delle chiaviche Scirocca, Pedona e Leonarda collocate immediatamente a valle dello sbarramento di Volta Scirocco, si fa riferimento ai dati di marea registrati alla stazione di Volta Scirocco collocata immediatamente a valle dello sbarramento (periodo di riferimento settembre 2008-settembre 2010)

Per i dati pluviometrici e termometrici si è fatto riferimento alla stazione di Guagnino e di Lido di Volano. La prima è prossima alle Valli ma la seconda è stata ritenuta più affidabile (anche per la serie storica più prolungata e continua). Pertanto sono stati elaborati i dati della stazione Lido di Volano relativi al quinquennio rappresentativo 2006–2011, previa analisi qualitativa comparativa con i dati pluviometrici e di temperatura raccolti alla stazione Arpa-SIM di Guagnino nel sottoperiodo Luglio 2010-Febbraio 2011. In particolare dal confronto tra i dati delle stazioni di Guagnino e Lido di Volano emerge che i dati della stazione di Volano, sebbene più distante dalle Valli rispetto a quella di Guagnino, sono ugualmente rappresentativi delle condizioni meteo-climatiche di interesse.

L’analisi dei dati anemometrici della stazione di Volano ha mostrato la loro inattendibilità e per tale ragione sono stati scartati. Le serie storiche effettivamente utilizzate relative alla intensità e alla direzione del vento sono ottenute dalla stazione di misura di Porto Garibaldi. E’ stata selezionata una annata rappresentativa compreso tra il 29 marzo 2009 e il 28 marzo 2011 per un totale di 104832 osservazioni con cadenza di 10 minuti. La misura della velocità del vento avviene ad una quota di 5 m.s.l.m.

I dati di riferimento delle stazioni di misura considerate sono riportati nella Tab. 6-1 mentre in Figura 6-1 si riporta l’ubicazione geografica delle stazioni.

<i>Stazione</i>	<i>Prov.</i>	<i>Comune</i>	<i>Lat</i>	<i>Long</i>	<i>Altitudine</i>	<i>Periodo oss. rappresentativo</i>
Volta Scirocco	Ra	Ravenna	44,57	12,22	6,00 m.s.l.m	2/9/2008 – 2/9/2010
Lido di Volano	Fe	Comacchio	44,49	12,15	3,00 m.s.l.m	2/9/2006 – 4/2/2011
Guagnino	Fe	Comacchio	44,68	12,21	1.00 m.s.l.m	4/7/2010 – 4/2/2011
Porto Garibaldi	Fe	Comacchio	44,40	12,14	1.00 m.s.l.m	29/3/2009 – 28/3/2011
Fossa-Foce	Fe	Comacchio	---	---	---	Mar 2009 – Ott 2010
Bellocchio	Fe	Comacchio	44,37	12,14	---	-----

Tab. 6-1– Caratteristiche delle stazioni di monitoraggio

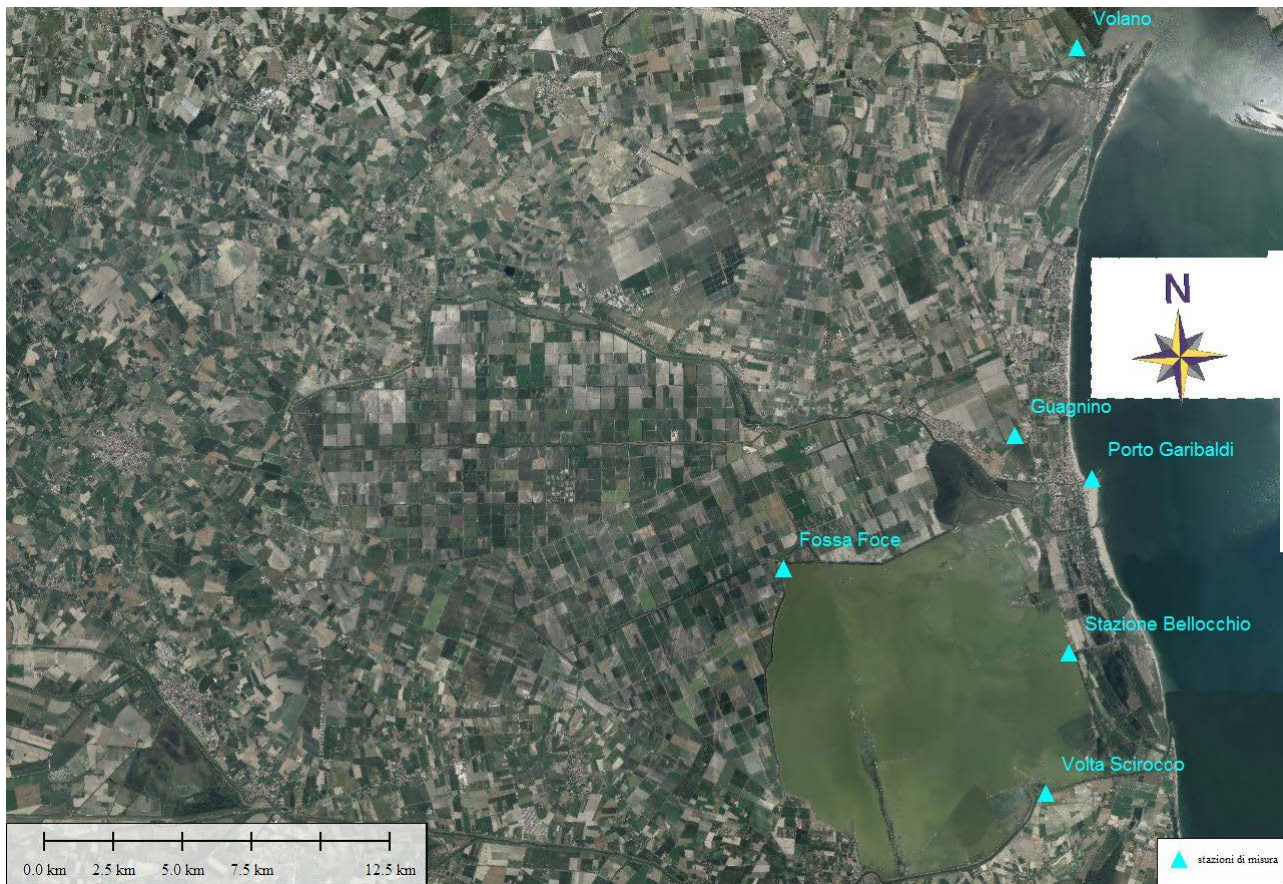


Figura 6-1. Ubicazione stazioni di monitoraggio e rilevamento dati.

6.2 Analisi dei dati anemometrici

I dati anemometrici registrati dalla stazione di Porto Garibaldi si presentano come serie temporali, con passo di campionamento di 10 minuti, del modulo della velocità (in m/s) e della direzione da cui spirava il vento (angolo orario con origine il nord geografico). Le misure vengono eseguite ad una quota di 5 m dal livello medio mare.

Il calcolo dei coefficienti di attrito utilizzati nella valutazione delle tensioni tangenziali si basano sui valori della velocità del vento ad una quota standard 10 m dal suolo, la prima operazione eseguita consiste nello stimare i valori della velocità del vento a 10 m a partire dalle misure a 5 m dal suolo. Assumendo una distribuzione logaritmica della velocità con la distanza dal suolo:

$$\frac{v(z)}{v_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

dove: z la distanza dal suolo, k la costante di von Karman, z_0 una distanza di riferimento dipendente dalla tipologia di superficie e v_* la velocità di attrito, la relazione fra le velocità a 5 m (v_5) e quella a 10 m (v_{10}) risulta essere:

$$\frac{v_{10}}{v_5} = \frac{\ln(z_{10}/z_0)}{\ln(z_5/z_0)} \quad [5.2]$$

essendo: $z_5 = 5$ m e $z_{10} = 10$ m. z_0 è assunto pari a 3×10^{-4} m [15] per misure anemometriche eseguite sul mare in prossimità della costa.

Poiché il fine di questo studio è la caratterizzazione dell'assetto idrodinamico rappresentativo delle Valli di Comacchio, e non dei moti di circolazione istantanei, si è ritenuto opportuno mediare nel tempo i dati anemometrici. Si ottiene in questo modo una forzante delle circolazioni anch'essa mediata. Tenuto inoltre in considerazione che il tempo di risposta caratteristico delle Valli è dell'ordine dell'ora, le analisi statistiche sono riportate a grandezze medie orarie. Il primo passo della procedura è stato quindi quello di valutare i valori mediati sull'ora (a passo orario) a partire dai valori di velocità e direzione del vento istantanei (a passo 10 minuti). Tale operazione è stata eseguita proiettando i vettori delle velocità istantanee sugli assi ovest-est e sud-nord, mediando le corrispondenti componenti di velocità e da queste poi calcolando nuovamente il modulo della velocità e la direzione oraria. La numerosità del campione si riduce in questo modo da 104832 a 17472 dati.

Successivamente i dati sono stati suddivisi in classi. Prima in base alla direzione, dividendo l'angolo giro in 8 settori (nord, nord-est, est, sud-est, sud, sud-ovest, ovest, nord-ovest) e poi in base alla velocità utilizzando 30 intervalli tra 0 e 18 m/s. I dati orari sono poi interpretati in forma statistica assumendo che la distribuzione di densità di probabilità della velocità nelle singole direzioni sia approssimabile dalla funzione di Weibull. Infine è stimata la probabilità associata a ciascuna classe di velocità.

I risultati di maggior interesse risultano essere la frequenza con cui si osserva il vento spirare nelle varie direzioni, i valori medi delle velocità, i valori medi del quadrato delle velocità (sempre suddivisi per direzione). Il quadrato della velocità è particolarmente significativo in quanto la tensione tangenziale esercitata dal vento sulla superficie libera, e quindi il suo effetto sui campi di moto, è proporzionale a tale grandezza.

6.2.1 *Suddivisione dei dati in base alla direzione*

Si sono divisi i valori medi orari in otto gruppi in base alla direzione, introducendo una classe per quei dati relativi all'assenza di vento (velocità nulla). La Tab. 6-2 riporta il numero di dati relativi a ciascuna direzione.

<i>Direzione</i>	<i>Vento</i>	<i>N° dati</i>	<i>%</i>
N	Tramontana	795	4.6
NE	Grecale	1831	10.5
E	Levante	2440	14.0
SE	Scirocco	2550	14.6
S	Mezzogiorno	1518	8.7
SO	Libeccio	1658	9.5
O	Ponente	4118	23.6
NO	Maestrale	2307	13.2
Velocità = 0 m/s		255	1.5

Tab. 6-2 Analisi dati anemometrici: distribuzione dei dati osservati in base alla direzione

La tabella evidenzia la alta frequenza dei venti che spirano da ovest (vento di Ponente). Questi in realtà sono quasi esclusivamente *brezze di terra* (con velocità inferiori a 20 km/h). Viceversa i venti che fanno registrare le maggiori intensità sono il Grecale e lo Scirocco.

Poiché l'obiettivo del presente studio è quello di evidenziare in termini comparativi (stato di fatto e stato previsionale) l'effetto associato alla subsidenza prevista sull'assetto idrodinamico all'interno delle valli, si sono considerati i venti di Ponente per la loro alta frequenza ed i venti di Grecale per la loro elevata intensità.

6.2.2 *Suddivisione dei dati in base alle velocità*

La suddivisione del campione di dati in classi procede con l'introduzione di 30 intervalli di velocità compresi fra 0 e 18 m/s. L'ampiezza di ciascun intervallo è di 0.6 m/s. Nelle Figura 6-2 e Figura 6-3 sono riportati i risultati in forma grafica, mentre la Tab. 6-3 seguente mostra la suddivisione in classi del campione di dati.

L'analisi dei dati mostra chiaramente la alta frequenza dei venti provenienti da ovest (per lo più brezze di terra). Si può invece notare come i venti più intensi siano quelli che spirano da nord-est anche se si presentano con minore frequenza relativa. Chiaramente, indipendentemente dalla direzione di provenienza, la probabilità campionaria associata alle basse velocità è molto più alta rispetto a quella dei fenomeni più intensi, suggerendo la correttezza della scelta di una distribuzione di probabilità teorica asimmetrica quale quella di Weibull.

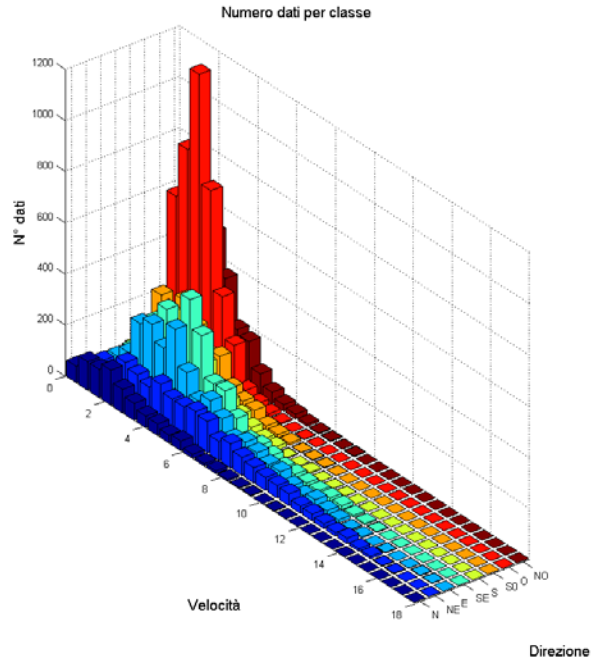


Figura 6-2 Analisi dati anemometrici: suddivisione in classi del campione

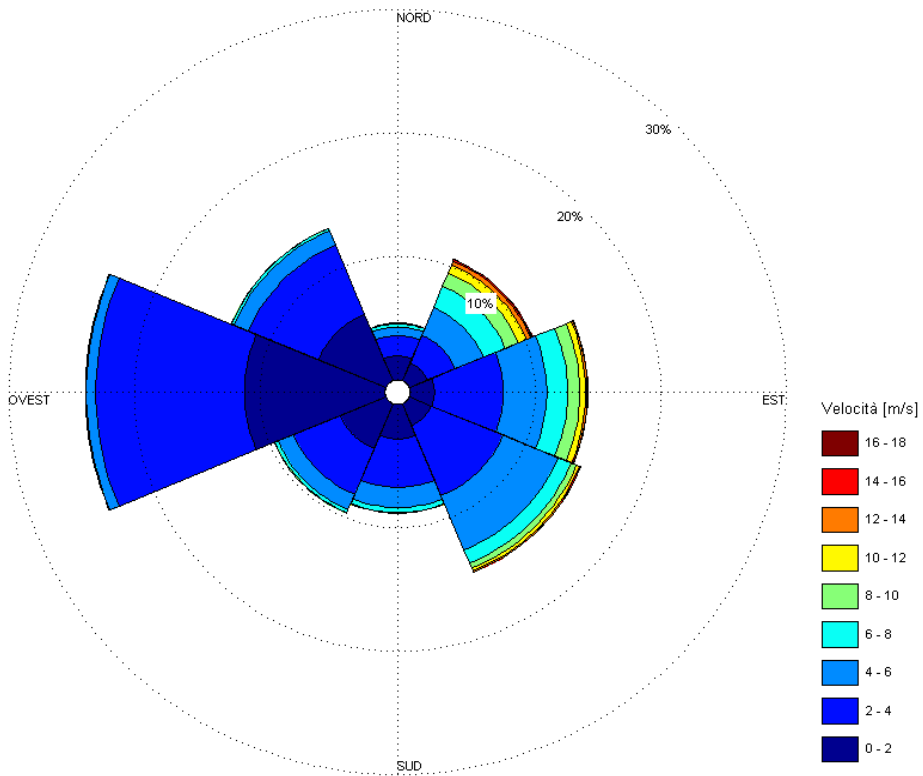


Figura 6-3 Rosa dei venti

Direzione	Velocità [m/s]																													
	0.3	0.9	1.5	2.1	2.7	3.3	3.9	4.5	5.1	5.7	6.3	6.9	7.5	8.1	8.7	9.3	9.9	10.5	11.1	11.7	12.3	12.9	13.5	14.1	14.7	15.3	15.9	16.5	17.1	17.7
N	64	111	111	137	92	67	47	45	31	38	16	9	10	6	4	3	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
N-E	40	92	91	145	127	109	149	121	120	132	122	74	94	71	60	52	50	46	28	27	19	14	22	10	9	3	3	0	0	1
E	41	90	133	275	302	240	342	202	121	152	111	61	78	67	50	52	26	18	31	18	12	4	5	0	3	0	1	3	0	0
S-E	33	94	135	263	338	277	435	325	166	168	90	35	44	33	18	20	16	14	16	15	7	5	3	0	1	0	0	0	0	0
S	53	145	202	272	207	167	163	106	76	53	32	16	15	3	0	5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S-O	105	261	224	299	225	150	170	77	54	48	16	12	8	2	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O	123	626	839	116	737	351	191	45	23	13	5	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N-O	112	332	388	522	371	201	184	87	45	26	19	9	4	3	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 6-3 Analisi dati anemometrici: suddivisione in classi del campione

6.2.3 Interpretazione statistica del campione

Al fine di quantificare queste osservazioni, basandosi sulla suddivisione in classi appena illustrata, vengono calcolate le usuali grandezze statistiche campionarie: media, deviazione standard, moda e mediana e parametro di asimmetria (coefficiente di Pearson) (v. Tab. 6-4).

Note le grandezze statistiche campionarie si procede alla loro interpretazione assumendo che i dati relativi all'intensità del vento siano caratterizzati da una distribuzione di probabilità approssimabile mediante la funzione di Weibull a due parametri. La distribuzione di Weibull è tipicamente impiegata nell'analisi di dati anemometrici per il buon accordo che presenta con i dati sperimentali.

[m/s]	Media	Deviazione standard	Moda	Mediana	Parametro di asimmetria
Nord	2.77	1.96	2.10	2.10	1.28
Nord-Est	5.46	3.31	3.90	5.10	0.67
Est	4.42	2.64	3.90	3.90	1.18
Sud-Est	4.02	2.13	3.90	3.90	1.35
Sud	2.94	1.66	2.10	2.70	0.89
Sud-Ovest	2.54	1.57	2.10	2.10	0.94
Ovest	2.10	0.96	2.10	2.10	0.73
Nord-Ovest	2.36	1.33	2.10	2.10	1.07

Tab. 6-4 - Grandezze statistiche campionarie

La distribuzione di densità di probabilità di Weibull a due parametri si presenta nella forma:

$$p(v) = \frac{n}{s} \left(\frac{v}{s}\right)^{(n-1)} e^{-\left[\left(\frac{v}{s}\right)^n\right]} \quad [5.3]$$

Dove $p(v)$ è la densità di probabilità associata alla velocità del vento v ; n è il parametro di forma; s è il parametro di scala. La corrispondente funzione probabilità cumulata $P(v)$ ha invece la forma:

$$P(v) = 1 - e^{-\left[\left(\frac{v}{s}\right)^n\right]} \quad [5.4]$$

La stima dei parametri n e s può essere agevolmente compiuta ricordando che, data la distribuzione di probabilità di Weibull, la media, \bar{v} , e la varianza, σ^2 (i.e. il quadrato della deviazione standard σ), sono date dalle relazioni:

$$\bar{v} = s \Gamma\left(1 + \frac{1}{n}\right) \quad [5.5]$$

$$\sigma^2 = s^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{n}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{n}\right)^2 \right] \quad [5.6]$$

essendo $\Gamma(x)$ la funzione gamma.

Sostituendo al primo membro delle equazioni [5.5] e [5.6] rispettivamente il valore medio e la varianza campionaria, si ottengono due equazioni indipendenti nelle uniche incognite n e s . Risolvendo questo sistema di due equazioni mediante una procedura iterativa si ottengono i coefficienti delle distribuzioni di Weibull per ogni specifica direzione. Il risultato di questa analisi è riportato nella tabella Tab. 6-5:

[m/s]	Nord	Nord-Est	Est	Sud-Est	Sud	Sud-Ovest	Ovest	Nord-Ovest
n	1.43	1.70	1.72	1.97	1.84	1.66	2.32	1.84
s	3.04	6.12	4.96	4.53	3.31	2.84	2.37	2.65

Tab. 6-5 – Analisi dati anemometrici: parametri della distribuzione di probabilità di Weibull

A conferma della buona rappresentatività della distribuzione statistica adottata, nella Figura 6-4 per ciascuna direzione, si riporta il confronto fra le probabilità di appartenenza a ciascuna classe, valutata facendo riferimento al campione di dati (i.e. numero di osservazioni che ricade nella data classe diviso il totale di osservazioni associata alla data direzione) e quella valutata facendo ricorso alla distribuzione di Weibull e ai parametri stimati (i.e. differenza fra i valori assunti dalla distribuzione cumulata di Weibull in corrispondenza degli estremi della classe stessa). Come è possibile osservare, l'accordo fra andamento teorico e osservato è più che soddisfacente.

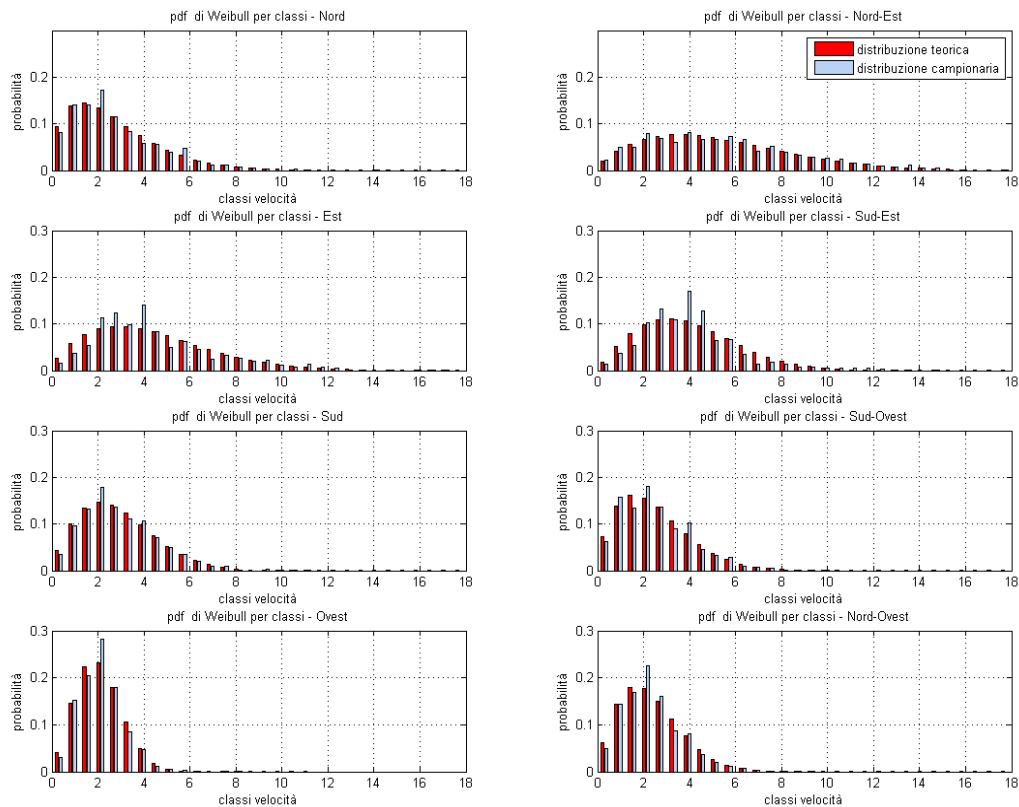


Figura 6-4 Analisi dati anemometrici. Confronto fra la probabilità campionaria e teorica di appartenenza a ciascuna classe

Una volta individuati i parametri della distribuzione statistica è possibile determinare i valori di probabilità associati a ciascuna direzione e a ciascuna intensità utilizzando la funzione distribuzione di probabilità [5.3]. Inoltre è possibile procedere alla determinazione della probabilità associata a qualunque classe ricorrendo alla funzione probabilità cumulata [5.4]. In questo ultimo caso, la probabilità è stimata come differenza fra i valori assunti dalla distribuzione cumulata di Weibull in corrispondenza degli estremi della classe stessa.

Nella tabella Tab.6-6 si riportano le probabilità (relativamente a ciascuna direzione) di avere misurazioni di velocità che ricadono nell'intervallo evidenziato.

%	Intervalli velocità [m/s]								
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18
Nord	42.22	34.96	15.67	5.28	1.45	0.34	0.07	0.01	0.00
Nord-Est	13.90	24.59	23.52	17.35	10.67	5.66	2.63	1.09	0.40
Est	18.87	31.01	25.20	14.70	6.71	2.48	0.76	0.20	0.04
Sud-Est	18.08	36.15	28.18	12.92	3.82	0.75	0.10	0.01	0.00
Sud	32.74	43.07	19.17	4.40	0.58	0.05	0.00	0.00	0.00
Sud-Ovest	42.67	40.17	14.01	2.76	0.34	0.03	0.00	0.00	0.00
Ovest	49.15	47.40	3.44	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nord-Ovest	44.83	43.31	10.75	1.06	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00

Tab.6-6-Analisi dei dati anemometrici. Probabilità associate a ciascuna direzione e intervallo di velocità

6.2.4 Analisi statistica del quadrato della velocità

Come accennato precedentemente, lo scopo di questo studio è l'analisi dei moti medi di circolazione nelle Valli di Comacchio, con particolare attenzione all'intensità media del rimescolamento delle acque. Verifiche preliminari, supportate da adeguate simulazioni numeriche hanno infatti permesso di individuare nelle azioni tangenziali del vento sulla superficie libera una fra le forzanti dei moti di circolazione più significative. L'azione esercitata è proporzionale al quadrato della velocità del vento. Nella Tab. 6-7 è riportato il valore (per ciascun quadrante) della radice quadrata del valore atteso del quadrato della velocità.

	Nord	Nord-Est	Est	Sud-Est	Sud	Sud-Ovest	Ovest	Nord-Ovest
Medie velocità [m/s]	3.39	6.38	5.15	4.55	3.37	2.99	2.31	2.70

Tab. 6-7 –Analisi dei dati anemometrici. Radice quadrata del valore atteso del quadrato della velocità

Da questi valori si estrapolano i valori significativi utilizzati nelle simulazioni idrodinamiche (Tab. 6-8). Ai valori medi viene aggiunto un valore significativo di evento estremo in direzione NE, ottenuto dal valore corrispondente al 95% della probabilità di non superamento (prob. cumulata) di Weibull, con i parametri prima calcolati (Tab. 6-5) per la direzione NE.

	Velocità [m/s]	Direzione provenienza
1. evento ordinario	6.4	Nord-Est
2. evento ordinario	5.1	Est
3. evento ordinario	2.3	Ovest
4. evento estremo*	11.7	Nord-Est

Tab. 6-8 Analisi dei dati anemometrici. Valori significativi della forzante vento.
(* probabilità di superamento 5% sulla funzione di probabilità cumulata di Weibull)

6.3 Analisi dei dati di marea

Nel seguito si illustrano le analisi effettuate sui dati di marea registrati alle stazioni di Volta Scirocco e Porto Garibaldi. Per quanto attiene la stazione di Volta Scirocco, le registrazioni coprono il biennio 2/9/2008-2/9/2010, mentre per la stazione di Porto Garibaldi è stato estrapolato un periodo rappresentativo di durata biennale (feb 2009 – feb. 2011) nell’ambito delle registrazioni disponibili (1/2/2009 - 1/12/2015).

La stazione di Volta Scirocco è stata scelta poiché essendo collocata immediatamente a valle della omonima traversa sul fiume Reno, restituisce i valori di marea da applicare direttamente alle chiaviche Scirocca, pedona e Leonarda. La stazione di Porto Garibaldi è stata scelta per ricavare gli andamenti di marea antistante il tratto di costa limitrofo alle Valli. Le oscillazioni di marea saranno poi opportunamente trasferite attraverso il sistema dei canali Logonovo-Navigabile sia all’interno della valle Fattibello per ricavare le oscillazioni di livello che influenzano il comportamento idraulico della chiavica Foce, sia lungo il canale Bellocchio per ricavare le oscillazioni di marea efficaci sulla chiavica Bellocchio.

L’andamento del livello di marea, benché contraddistinto da una spiccata periodicità, non presenta in generale un comportamento riconducibile ad una singola funzione sinusoidale. Dal punto di vista statistico il fenomeno può invece essere efficacemente rappresentato attraverso una sovrapposizione di armoniche caratterizzate da ampiezze e periodi di oscillazione diversi.

Per questo motivo, la procedura qui utilizzata nell’analisi dei dati consiste in due fasi: la prima fase prende in considerazione tutta la complessità del segnale rappresentato dal livello del mare, tramite uno studio in frequenza; la seconda fase consiste nella interpolazione dei dati in funzione dei periodi principali evidenziati nella fase precedente.

6.3.1 Analisi in frequenza dei dati

L’analisi in frequenza è stata applicata separatamente ai dati registrati nelle due stazioni di Porto Garibaldi e Volta Scirocco.

Di seguito si riporta a titolo di esempio l'analisi relativa ai dati della stazione di Porto Garibaldi. La ricerca è sviluppata per un numero di armoniche pari al numero di dati, in modo tale da operare in prima istanza una analisi completa del segnale. Successivamente saranno scartate le armoniche meno significative.

Il teorema di Nyquist afferma che, sotto le opportune ipotesi, il doppio della frequenza massima delle armoniche che costituiscono un segnale, corrisponde alla minima frequenza di campionamento necessaria a rappresentare correttamente il segnale stesso. In particolare, i dati di volta Scirocco sono campionati con frequenza di $5,56 \times 10^{-4}$ Hz (periodo 30 min) mentre quelli di porto Garibaldi sono campionati con frequenza $1,67 \times 10^{-3}$ Hz (periodo 10 minuti) e quindi la massima frequenza ricostruibile è di $2,78 \times 10^{-4}$ Hz (periodo 60 min) e $8,33 \times 10^{-4}$ Hz (periodo 20 minuti) rispettivamente. Tenendo in considerazione tale limite si può affermare che la frequenza di campionamento è senz'altro sufficiente allo scopo.

Eliminando i periodi più bassi, frutto di tutte le incertezza di cui i dati di origine sono affetti, e limitando lo studio alle armoniche con periodo compreso fra 1 ora e 48 ore (i periodi di oscillazione di maggiore interesse), è possibile individuare la porzione dello spettro significativo.

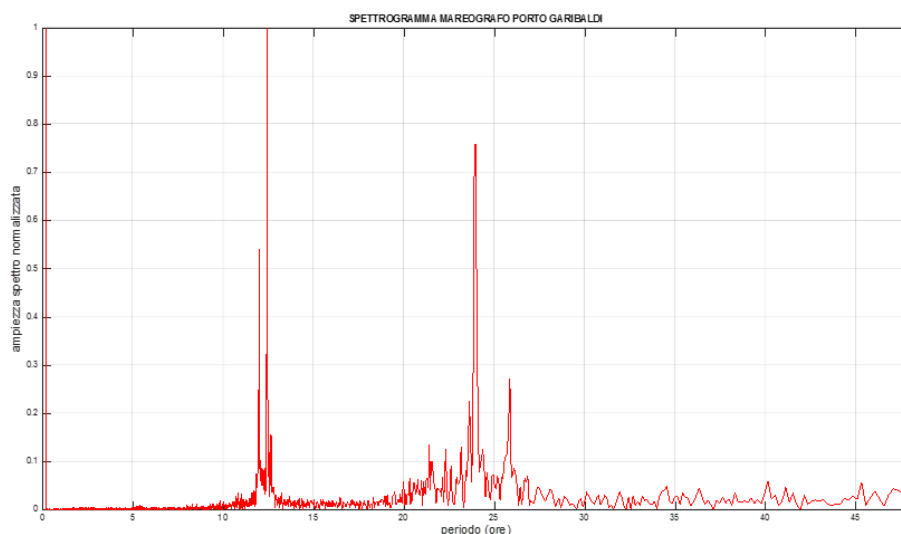


Figura 6-5 Porto Garibaldi – Analisi spettrale del segnale di marea

Dal grafico di Figura 6-5. è evidente che i periodi dominanti sono due; il primo è di circa 12 ore, il secondo è di circa 24 ore.

Nella applicazione del modello idrodinamico al caso di studio, si decide di fare ricorso ad onde di marea approssimate e sintetiche rappresentabili come singole armoniche. Per tale motivo e per le risultanze dell'analisi in frequenza appena descritta, si assumerà che l'andamento di marea teorico sia descrivibile mediante un'onda sinusoidale di periodo 12 ore.

6.3.2 Interpolazione dei dati nell'onda di marea sintetica

Come detto in precedenza, vista l'esigenza di utilizzare una curva sinusoidale semplice, si cerca di parametrizzare tale curva, basandoci sui dati in possesso e considerando il periodo del segnale ricavato dall'analisi in frequenza. In particolare è necessario individuare i valori più opportuni da assegnare ai parametri, a , p , rit , di una curva nella forma:

$$M(t) = a \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi}{p} (t - rit) \right) \quad [5.7]$$

dove: a è l'ampiezza dell'onda di marea; p è il periodo di oscillazione; rit è il ritardo del segnale; t è il tempo in ore; M il livello di marea nel tempo.

L'interpolazione dei parametri avviene in due fasi: una fase di stima e una di calibrazione.

La prima fase consiste nella stima dei parametri attraverso alcune semplici relazioni che si riportano di seguito.

$$a = \left(\frac{\max(m_c) - \min(m_c)}{2} \right) \quad [5.8]$$

$$rit = t(\max(m_c)) - \frac{p}{4} \quad [5.9]$$

Dove con m_c sono i dati di marea campionati. Con queste due relazioni, unitamente all'analisi in frequenza precedentemente descritta, si ha una stima dei tre parametri che definisce l'onda sintetica.

La fase di calibrazione è eseguita con il metodo di ricerca locale ovvero con la tecnica del gradiente univariato. Tale approccio consiste nell'ottimizzare singolarmente ciascun parametro fino a ricavare un insieme completo di parametri che minimizzano l'errore. Questo metodo nonostante la sua semplicità permette di ricavare ottimi risultati grazie anche alla buona stima iniziale.

Il risultato pertanto di quest'ultima analisi permette di ottenere i parametri definitivi utilizzati nel modello. Questi parametri sono riportati nella Tab. 6-9:

Parametro	Volta Scirocco	Porto Garibaldi
Periodo, p (ore)	12	12 ore
Ampiezza, a (m)	0.11	0.24
Ritardo, rit (ore)	-4.230	-4.682

Tab. 6-9 . Parametri dell'onda di marea sintetica

6.3.3 Studio teorico sull'alterazione dell'onda di marea

Il mare e la laguna interagiscono tra loro attraverso una serie di canali. E' stata approfondita questa interazione, studiando come l'onda di marea sintetica viene modificata e alterata attraversando i

collegamenti. L'obiettivo è ottenere un'onda di marea che possa rappresentare efficacemente la condizione al contorno da assegnare al bordo della laguna. In questo lavoro si segue l'approccio proposto da Keulegan [16].

Seguendo tale metodo l'onda risultante si assume ancora sinusoidale, con la medesima frequenza ma affetta dalla laminazione sull'ampiezza e da un ritardo.

Pertanto le due onde sono del tipo:

$$\eta_0 = a_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad [5.10]$$

$$\eta_b = a_b \sin\left(\frac{2\pi}{T} (t + \varepsilon)\right) \quad [5.11]$$

Dove a_0 e a_b sono la semi-escursione di marea; T : periodo dell'oscillazione, tipicamente di 12 ore; ε : ritardo (solitamente il tempo che intercorre tra l'osservazione del picco dell'onda sorgente e l'onda risultante); t : variabile temporale.

L'equazione (5.10) descrive l'andamento dell'onda di marea sorgente (mare), mentre l'equazione (5.11) esprime l'andamento del livello al bordo della laguna.

Il problema è stato studiato sotto le seguenti ipotesi:

- Sponde del canale verticali;
- Escursione di marea piccola paragonata ai tiranti presenti ($a_0 \ll \min(h)$);
- Superficie della valle orizzontale, marea in fase con la laguna;
- Livello medio della laguna pari al livello medio del mare;
- Termini inerziali trascurabili nel canale;
- Nessun afflusso importante di acqua dolce nella laguna (unico collegamento è il mare);
- Nessun flusso importante di stratificazione dovuto alla salinità;
- Onda di marea sorgente rappresentata attraverso una curva sinusoidale.

Queste ipotesi configurano una situazione di laguna profonda, collegata al mare tramite un canale breve (v. Figura 6-6). L'ipotesi sull'orizzontalità del livello nella laguna si ritiene soddisfatta se il tempo scala di adattamento della stessa (valutato come rapporto fra una lunghezza orizzontale tipica in laguna, L_b , e la celerità di propagazione delle onde, $\sqrt{gd_b}$ (ove d_b la profondità media della laguna e g l'accelerazione di gravità) è molto minore del periodo di oscillazione della marea T :

$$T \gg \frac{L_b}{\sqrt{gd_b}}$$

Essendo il periodo di oscillazione $T=12$ ore la disequaglianza rimane soddisfatta sia nel caso della Valle Grande sia nel caso della Valle Fattibello (i.e. le due lagune collegate a mare dai canali Bellocchio e Logonovo-Navigabile rispettivamente).

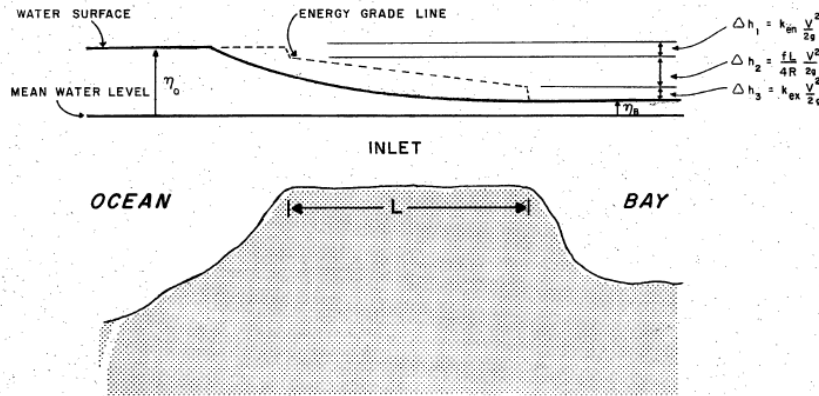


Figura 6-6: schema di funzionamento del sistema mare - laguna

Con riferimento allo schema di Figura 6-6 e sotto le ipotesi assunte è possibile scrivere il bilancio energetico tra il mare e la laguna:

$$\eta_0 + \alpha_0 \frac{v_0^2}{2g} = \eta_b + \alpha_b \frac{v_b^2}{2g} + \Delta h \quad [5.12]$$

Dove: η_0, η_b sono rispettivamente la quota del mare e della laguna rispetto al livello medio;

v_0, v_b , sono rispettivamente la velocità della corrente nel mare e della laguna;

α_0, α_b , sono i coefficienti di ragguglio delle distribuzioni delle velocità;

Δh (perdita di carico totale lungo il canale di collegamento mare-laguna) si può valutare attraverso l'espressione

$$\Delta h = \frac{v_c^2}{2g} \left(k_{en} + k_{ex} + \frac{fL}{4R} \right) \quad [5.13]$$

in cui k_{en}, k_{ex} sono i coefficienti di perdita di carico d'imbocco e di sbocco;

f è il coefficiente di perdite di carico distribuite di Darcy-Weisbach lungo il canale;

L : lunghezza del canale;

R : raggio idraulico del canale;

v_c : velocità all'interno del canale.

Trascurando le velocità della corrente nel mare ed in laguna, la (5.12) diventa:

$$\Delta h = \eta_0 - \eta_b \quad [5.14]$$

Sostituendo la (5.14) nella (5.13) si ottiene:

$$v_c = \sqrt{\frac{2g}{k_{en} + k_{ex} + \frac{fL}{4R}}} \sqrt{|\eta_0 - \eta_b|} \operatorname{sing}(\eta_0 - \eta_b) \quad [5.15]$$

Il tasso di crescita del livello nella laguna si ottiene dall'equazione di bilancio di massa:

$$Q = A_c v_c = A_b \frac{d\eta_b}{dt} \quad [5.16]$$

in cui A_c è l'area della sezione del canale e A_b è la superficie della laguna.

Sostituendo la (5.15) nella (5.16) si ottiene:

$$\frac{d\eta_b}{dt} = \frac{A_c}{A_b} \sqrt{\frac{2g}{k_{en} + k_{ex} + \frac{fL}{4R}}} \sqrt{|\eta_0 - \eta_b|} \operatorname{sing}(\eta_0 - \eta_b) \quad [5.17]$$

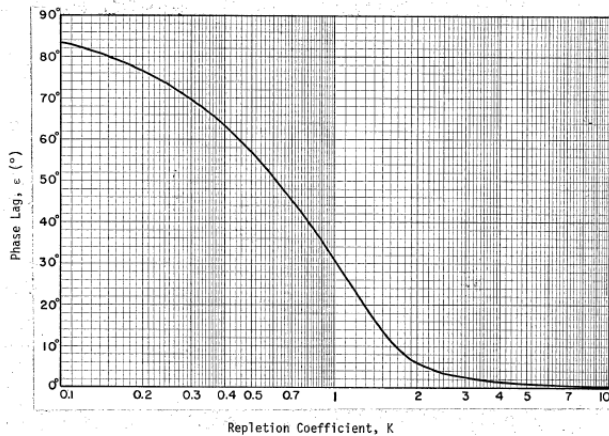
Introducendo il parametro di Keulegan (K):

$$K = \frac{T}{2\pi a_0} \frac{A_c}{A_b} \sqrt{\frac{2ga_0}{k_{en} + k_{ex} + \frac{fL}{4R}}} \quad [5.18]$$

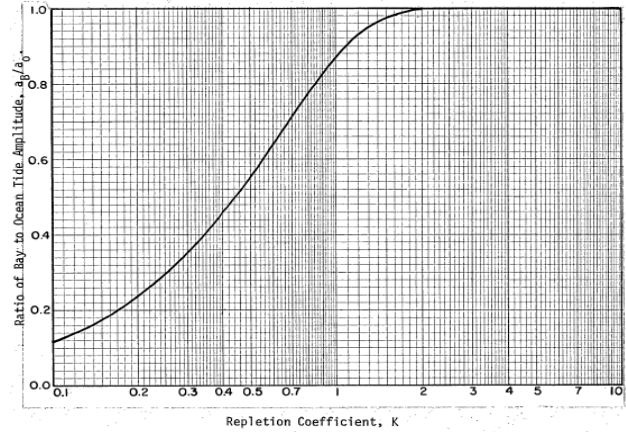
la (5.17) diventa:

$$\frac{d\eta_b}{dt} = \frac{2\pi\sqrt{a_0}}{T} K \sqrt{|\eta_0 - \eta_b|} \operatorname{sing}(\eta_0 - \eta_b) \quad [5.19]$$

La (5.19) è integrabile solo numericamente. In Figura 6-7 ([16]) sono riportati i normogrammi relativi ai parametri di laminazione e di ritardo (rispettivamente a_b/a_0 ed ε) in funzione del parametro K.



ε : ritardo in funzione di K



a_b/a_0 : laminazione in funzione di K

Figura 6-7 rapporto tra le ampiezze a_b/a_0 e ritardo ε in funzione del parametro K.

Lungo il perimetro meridionale della valle, in corrispondenza delle chiaviche Pedona, Leonarda e Scirocca, si è scelto di assegnare direttamente l'onda di marea sintetica ricavata dai dati di Volta Scirocco. Lungo il canale di Bellocchio sono stati ricostruiti i parametri da assegnare, mentre sulla chiavica Foce (in prossimità della valle Fattibello) è stato possibile effettuare l'indagine sui parametri utilizzando come bacino di comunicazione la valle Fattibello. La Tab. 6-10 riassume i dati di attenuazione e di ritardo da applicare alle varie condizioni al contorno.

Chiavica	K	a_b/a_0	ε [h]
Bellocchio	0.003	0,058	0,2
Foce-Fattibello	0.560	0,375	1,2
Leonarda	0.999	1,00	0,0
Pedona	0.999	1,00	0,0
Scirocca	0.999	1,00	0,0

Tab. 6-10: parametri per l'alterazione dell'onda di marea in corrispondenza degli ingressi sul contorno.

7 Studio sintetico sul bilancio idrologico delle valli

L'obiettivo è individuare gli ordini di grandezza dei volumi di scambio idrico in valle considerando, oltre agli apporti regolati attraverso canali e sifoni dei quali si è già trattato in precedenza, gli apporti delle precipitazioni e quelli provenienti da altre sorgenti non regolate.

Il modello idrodinamico, per necessari motivi di semplificazione, è opportuno che trascuri gli apporti che inducono effetti idrodinamici trascurabili. A tal fine si procede ad una quantificazione speditiva delle diverse componenti che partecipano al bilancio idrologico sulle Valli.

In particolare ci si sofferma sui seguenti apporti e prelievi:

Componenti in ingresso

1. P - Precipitazioni;
2. R - Ruscellamento proveniente dal bacino imbrifero della valle;
3. I - Infiltrazione efficace sul bacino idrogeologico;
4. S - Azionamento dei Sifoni;

Componenti in uscita

5. E - Evaporazione;
6. C - Azionamento globale dell'insieme delle chiaviche.

L'indagine descritta di seguito è sostanzialmente mirata alla valutazione degli ordini di grandezza dei volumi scambiati nell'arco dell'anno tra la valle e l'ambiente circostante, per valutare l'influenza relativa delle varie componenti nell'equilibrio idrologico.

Per eseguire lo studio, in modo corretto, si sono utilizzate le rilevazioni di due stazioni meteorologiche (per la loro collocazione si veda Figura 6-1), in particolare:

- Volano (ARPAR)
- Guagnino (ARPAE)

La stazione di Volano ha una serie storica più ampia e consolidata rispetto a quella di Guagnino. Per questa ragione lo studio delle precipitazioni è stato fatto sui dati della stazione di Volano anche se geograficamente più distante. I dati di Guagnino saranno utilizzati solamente per verificare la congruità delle misure della stazione di Volano con le precipitazioni che interessano le Valli. A tal fine è stato eseguito un confronto sui dati cumulati mensili di precipitazione nelle due stazioni, nel periodo 4/7/2010-4/2/2011 (v. Figura 7-1).

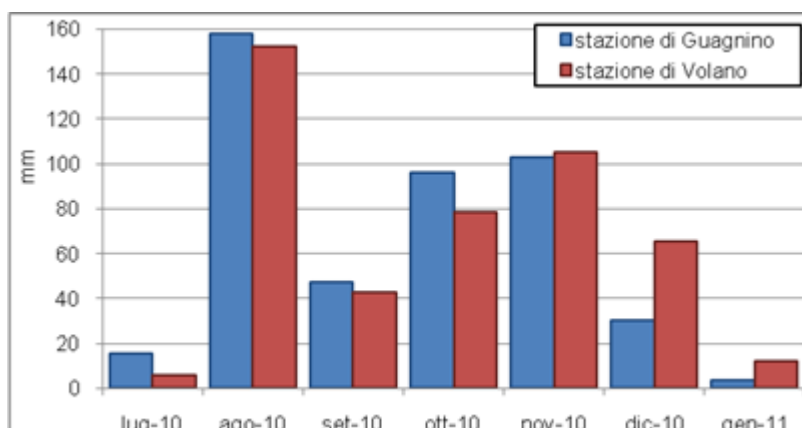


Figura 7-1 grafico di confronto delle precipitazioni cumulate mensili - Volano e Guagnino (Lug 2010-Feb 2011)

I volumi di pioggia mensili, molto simili tra le due stazioni nel periodo considerato, giustificano l'assunzione della stazione di Volano come rappresentativa dell'area di studio.

Il numero elevato di dati disponibili per la stazione di Volano ha consentito di estrapolare la finestra temporale 2 settembre 2006 - 4 febbraio 2011 (per un totale di 35004 rilevazioni) rappresentativa dell'andamento medio.

7.1 Valutazione delle precipitazioni (P)

Le letture a scansione oraria delle precipitazioni [mm] sono state accorpate in modo da ottenere il dato di pioggia cumulato su base mensile. Sono stati ottenuti i valori riportati in Tab. 7-1.

2006	P_c [mm]	P_{medio} [mm/h]	2007	P_c [mm]	P_{medio} [mm/h]	2008	P_c [mm]	P_{medio} [mm/h]	2009	P_c [mm]	P_{medio} [mm/h]	2010	P_c [mm]	P_{medio} [mm/h]
Gen			Gen	9.2	0.01	Gen	22.4	0.03	Gen	78.4	0.11	Gen	10.0	0.14
Feb			Feb	15.6	0.02	Feb	23.4	0.03	Feb	36.6	0.05	Feb	82.6	0.12
Mar			Mar	116.8	0.16	Mar	49.8	0.07	Mar	96.0	0.13	Mar	63.6	0.10
Apr			Apr	0.4	0.00	Apr	37.4	0.05	Apr	104.6	0.15	Apr	62.6	0.09
Mag			Mag	21.6	0.03	Mag	17.6	0.03	Mag	55.2	0.07	Mag	89.6	0.12
Giu			Giu	29.6	0.04	Giu	114.0	0.16	Giu	51.2	0.07	Giu	179.6	0.25
Lug			Lug	55.8	0.08	Lug	40.4	0.05	Lug	35.0	0.05	Lug	7.8	0.01
Ago			Ago	100.0	0.13	Ago	9.8	0.01	Ago	3.8	0.01	Ago	152.0	0.20
Set	94.4	0.24	Set	46.0	0.06	Set	75.0	0.10	Set	5.6	0.01	Set	43.0	0.06
Ott	27.2	0.04	Ott	96.0	0.13	Ott	25.0	0.03	Ott			Ott	78.8	0.11
Nov	14.8	0.02	Nov	15.2	0.02	Nov	90.0	0.13	Nov			Nov	105.4	0.15
Dic	5.2	0.01	Dic	62.6	0.08	Dic	77.2	0.10	Dic			Dic	65.6	0.09

Tab. 7-1 Stazione di Volano, tabella delle precipitazioni cumulate mensili e medie mensili (Set 2006 - Dic 2010)

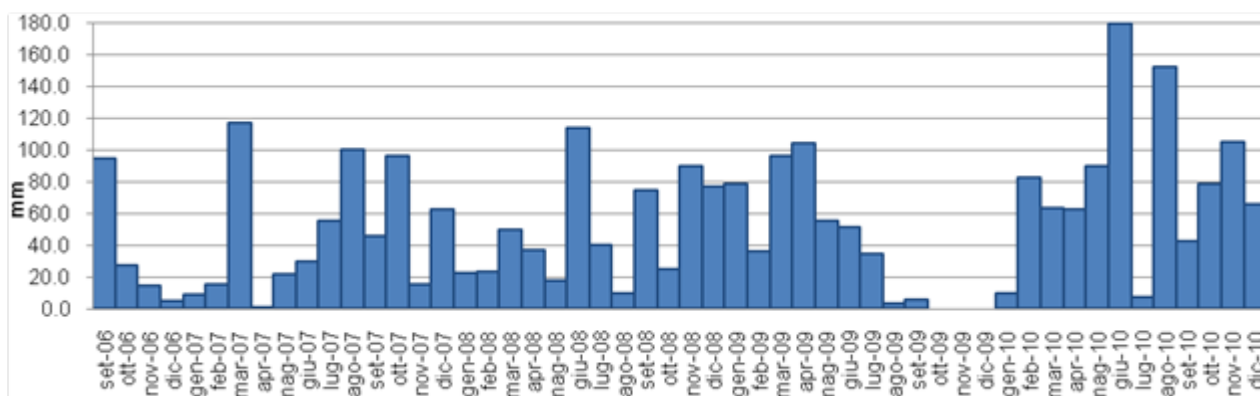


Figura 7-2 Stazione di Volano, grafico delle precipitazioni cumulate mensili dal settembre 2006 al dicembre 2010

Dai dati delle precipitazioni cumulate mensili è stata estratta la media cumulata mensile. Questa permette anche una stima del volume medio precipitato nell'arco di un anno che risulta pari a **658** mm (v. Figura 7-2e Figura 7-3).

	gen	feb	mar	apr	mag	Giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
P_{med,c.} [mm]	26,5	39,5	81,5	51,2	46,0	93,6	34,7	66,4	52,8	56,7	56,3	52,6

Tab. 7-2: Stazione di Volano, tabella delle precipitazioni medie cumulate mensili

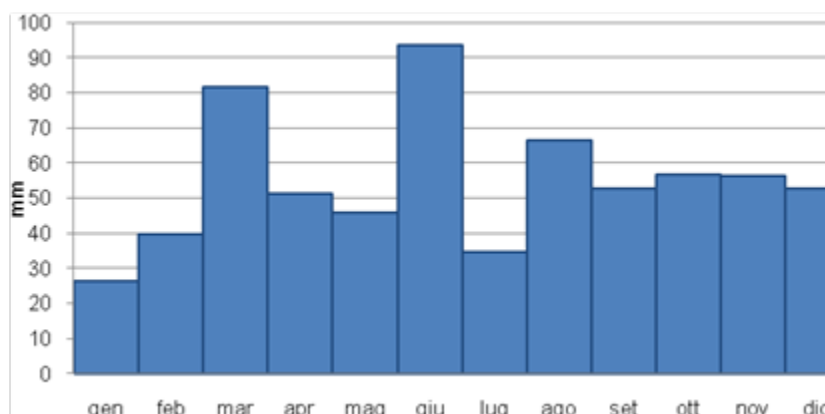


Figura 7-3 : Stazione di Volano, grafico delle precipitazioni medie cumulate mensili

7.2 Valutazione dell'evaporazione (E)

La perdita d'acqua per effetto dell'evaporazione, nel caso di un bacino così esteso, può risultare non trascurabile.

Per valutare l'evaporazione che lo specchio d'acqua subisce per effetto del vento e dell'irraggiamento solare, in assenza di specifiche e dirette misure dell'evaporazione, si utilizza una

correlazione applicabile agli specchi d'acqua in cui le variabili indipendenti sono la temperatura e la velocità del vento, nota come formula dei Servizi Idrologici URSS [17].

La formulazione sottostante è stata applicata mese per mese.

$$E = 0.80 * 0.15 n [P_{vs}(T) - P_v](1 + 0.072 v) \quad [6.1]$$

dove

n, numero di giorni nel mese;

P_v , pressione di vapore = 1 Pa;

P_{vs} , pressione di vapore saturo

$$P_{vs}(T) = 6.11 \frac{7.6 T}{235.7+T} \text{ [Pa];}$$

T, temperatura media mensile [°C/mese];

v: velocità del vento [m/s].

Con lo stesso principio adottato per le precipitazioni, a partire dai dati rilevati su base oraria, si calcola la temperatura media mensile v.Tab. 7-3 e la velocità media mensile del vento (Tab. 7-4). Dalla (6.1) si ottiene la stima dell'espressione media mensile (v. Tab. 7-5) . La somma dei valori medi mensili porta ad una evaporazione media annuale di circa **846.6 mm**.

	gen	feb	mar	apr	mag	Giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
Tmed [°C]	3,6	5,4	8,9	14,0	18,9	22,2	24,9	23,9	19,2	14,4	9,1	3,5

Tab. 7-3: Stazione di Volano, tabella delle temperature medie mensili

E' necessario valutare anche la velocità media mensile del vento (per il calcolo dell'evaporazione, la direzione del vento si considera irrilevante).

	gen	feb	mar	apr	mag	Giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
vmed [m/s]	2,31	2,37	2,71	2,08	1,98	1,58	1,34	1,32	1,62	1,79	2,06	2,27

Tab. 7-4: Stazione di Volano, tabella delle velocità medie mensili del vento (m/s).

	gen	feb	mar	apr	mag	Giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
E [mm]	30,0	34,8	46,5	64,7	89,1	107,8	125,9	118,2	89,2	65,2	45,5	29,7

Tab. 7-5: Stazione di Volano, evaporazione media mensile (mm)

La **differenza tra le precipitazioni e l’evaporazione è di poco inferiore ai 200 mm** (ancorché stimata in modo molto speditivo e prescindendo da molti fattori), valore compatibile con le oscillazioni del livello riscontrabili in Valle.

7.3 Valutazione dell’infiltrazione efficace

La valle non è alimentata direttamente da alcun corso d’acqua essendo tutti gli ingressi regolati. La componente di afflusso superficiale che alimenta il bacino è quindi del tutto trascurabile.

I flussi ipodermici al contrario richiedono qualche approfondimento ulteriore, essendo questi associati alla falda acquifera e al fiume Reno che corre lungo il perimetro meridionale delle valli.

7.3.1 Filtrazione dal F. Reno

La componente di filtrazione proveniente dal fiume Reno è stimabile attraverso la classica legge di Darcy:

$$Q = k \frac{\Delta h}{l} A \quad [6.2]$$

Dove: k: coefficiente di permeabilità [m/s];

Δh : differenza di carico tra monte e valle [m];

l: percorso di filtrazione [m];

A: area di filtrazione ortogonale al moto [m²].

Nel nostro caso l’argine si estende per circa 1,5 km, con spessore medio rappresentativo pari a circa 70 m. Il dislivello medio annuo tra Reno e bacino vallivo è stimato pari a 1,33 m. L’area su cui avviene il flusso è stimata pari a 750 m².

Il coefficiente di permeabilità k è stimato massimizzando prudenzialmente la portata ed è stato assunto pari a 10⁻⁶ m/s (supponendo il terreno sia composto da argilla molto permeabile).

Con questi dati si può valutare la portata media di filtrazione pari a 1.44 m³/s. Calcolando il volume annuale redistribuito sulla superficie del bacino si ottengono 0,0005 mm/mese, del tutto trascurabili rispetto agli altri volumi calcolati in precedenza.

7.3.2 Filtrazione da falda

Il volume che la valle perde o acquisisce mensilmente nell’interscambio con la falda circostante (assunta in equilibrio con la piezometrica all’interno delle Valli) si può valutare tramite una semplice relazione consolidata (trascurando i transitori sull’arco temporale mensile):

$$I = -k_f (P - E)$$

Dove I: volume infiltrato [mm]; P: volume precipitato [mm]; E: volume evaporato [mm]; k_f: coefficiente di infiltrazione potenziale.

I volumi di precipitazione ed evaporazione sono stati stimati precedentemente, mentre il coefficiente di infiltrazione potenziale viene assunto da letteratura pari a 0,2 (corrispondente a un valore medio in presenza di argille). In Tab. 7-6 si riportano i risultati.

	gen	feb	mar	apr	mag	giu	Lug	ago	set	ott	nov	dic
P [mm]	26,48	39,55	81,55	51,25	46,00	93,60	34,75	66,40	52,80	56,75	56,35	52,65
E [mm]	30,0	34,8	46,52	64,7	89,1	107,8	125,9	118,2	89,2	65,2	45,5	29,7
I [mm]	0,7	-0,9	-0,7	2,7	8,6	2,8	18,2	10,4	7,3	1,7	-2,2	-4,6

Tab. 7-6 : Stima dei contributi mensili da filtrazione

La presenza di valori sia positivi sia negativi evidenzia la presenza di flussi di alimentazione verso la falda e dalla falda verso la valle. Complessivamente, però, i volumi in gioco sono molto più piccoli di quelli calcolati per le precipitazioni e per l'evaporazione. **Il bilancio di volume specifico risulta pari ad un contributo positivo della falda verso la valle di 44 mm/anno.**

7.4 Valutazione degli scambi idrici attraverso sifoni e chiaviche

Lo scambio di volumi attraverso chiaviche e sifoni è di difficile valutazione poiché non esistono sistemi di misura idrometrici installati in corrispondenza di questi. Pertanto attraverso colloqui intervenuti con i tecnici dell'Ente Parco Delta del Po è stato possibile risalire ad una stima degli ordini di grandezza dei volumi di scambio. Il dato più significativo è riferito a una prova di riempimento pari a 12'000'000 m³ che sono stati fatti defluire in valle in un tempo pari a circa due mesi tra gennaio e febbraio per una portata media pari a circa 2,4 m³/s.

Dal censimento dei manufatti idraulici [13] è stato possibile ricostruire per il sifone “Casalino” ed il sifone “Casa di Guardia” la portata di funzionamento di progetto che risulta pari a 2 m³/s per entrambi i sifoni. Questo valore è coerente con i volumi di riempimento della valle citati in precedenza.

I sifoni non sono utilizzati regolarmente, ma vengono innescati in base alla necessità della valle. In particolare, per correzioni chimico-fisiche delle acque interne, nel periodo invernale (gennaio-febbraio) vengono attivati per riportare il livello della valle intorno al livello medio mare.

L'utilizzo dell'acqua del Reno è occasionale e limitata alle grandi necessità. L'acqua introdotta, non essendo filtrata né trattata, può infatti alterare negativamente la qualità dell'acqua delle valli.

Per una stima ragionevole degli apporti dai sifoni, si può considerare un funzionamento di 30 giorni all'anno alla portata di progetto (2 m³/s) per un volume complessivo pari a circa **10'368'000 m³/anno**.

Questo equivale ad una escursione media del livello di circa **130 mm/anno**, valore sostanzialmente coerente con i volumi di precipitazione ed evaporazione.

Il sistema di chiaviche è generalmente utilizzato per lo svuotamento della valle in comunicazione con il mare ed è illustrato più diffusamente nel par.2. Il loro funzionamento è implementato nel modello secondo quanto descritto al par. 5.3

Le principali chiaviche sono

- Scirocca, Passo Pedona e Leonarda (perimetro Sud)
- canale Bellocchio (perimetro Est)
- Fattibello (vertice Nord – Est)
- Fosse - Foce (Nord).

Le chiaviche sono collegate al mare attraverso una serie di canali, responsabili dell'effetto di smorzamento e ritardo dell'onda di marea in corrispondenza del contorno delle valli (del quale si è già trattato nel par.6.3)

La gestione delle chiaviche e le relative manovre dipendono essenzialmente da necessità legate all'attività ittica: le chiaviche vengono generalmente aperte nei mesi di settembre e ottobre, per facilitare la monta del pesce nelle stazioni di pesca.

Non sono disponibili in prossimità delle opere misurazioni idrometriche. L'indicazione tratta dai colloqui con testimoni ed operatori conferma che le chiaviche vengono generalmente aperte quando il livello in valle supera di circa 20 cm il livello medio mare, e lasciate aperte fino ad equilibrio idrostatico. Si stima rimangano aperte per circa un mese all'anno.

I contributi di deflussi potenziali associati ai manufatti assommano quindi, in volume specifico, a circa **200 mm/anno**.

7.5 Considerazioni conclusive

I contributi al bilancio idrologico delle Valli, riepilogati nella successiva Tab. 7-7, confermano che variazioni del livello dell'ordine dei 20 cm all'interno del bacino vallivo possono risultare come effetto delle precipitazioni, dell'evaporazione, dei moti di filtrazione e della gestione dei manufatti idraulici.

	Valore medio annuale approssimato [Volume specifico, mm]
P [Precipitazione]	660
E [Evaporazione]	-850
I [Filtrazione]	44
Sifoni	130
Chiaviche	-200
Totale	-216

Tab. 7-7: Tabella riepilogativa dei contributi medi annuali di volume specifico (mm) scambiati dalla Valle (+ingresso ; -uscita)

Tali oscillazioni attorno al livello medio sono peraltro confermate dai dati di livello acquisiti dalla stazione di misura “Fossa Foce” (Figura 7-4) collocata all'estremità Nord – Occidentale del bacino (facente parte della rete di monitoraggio di ArpaE - Ferrara) e operativa da Marzo 2009 a Ottobre 2010 , di cui si riporta in uno stralcio rappresentativo in Figura 7-5.

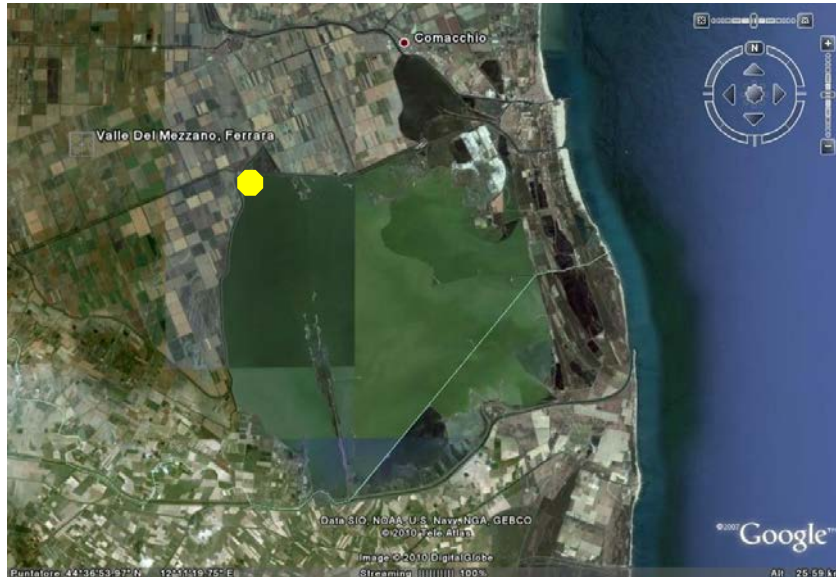


Figura 7-4 Ubicazione della stazione di Fossa Foce

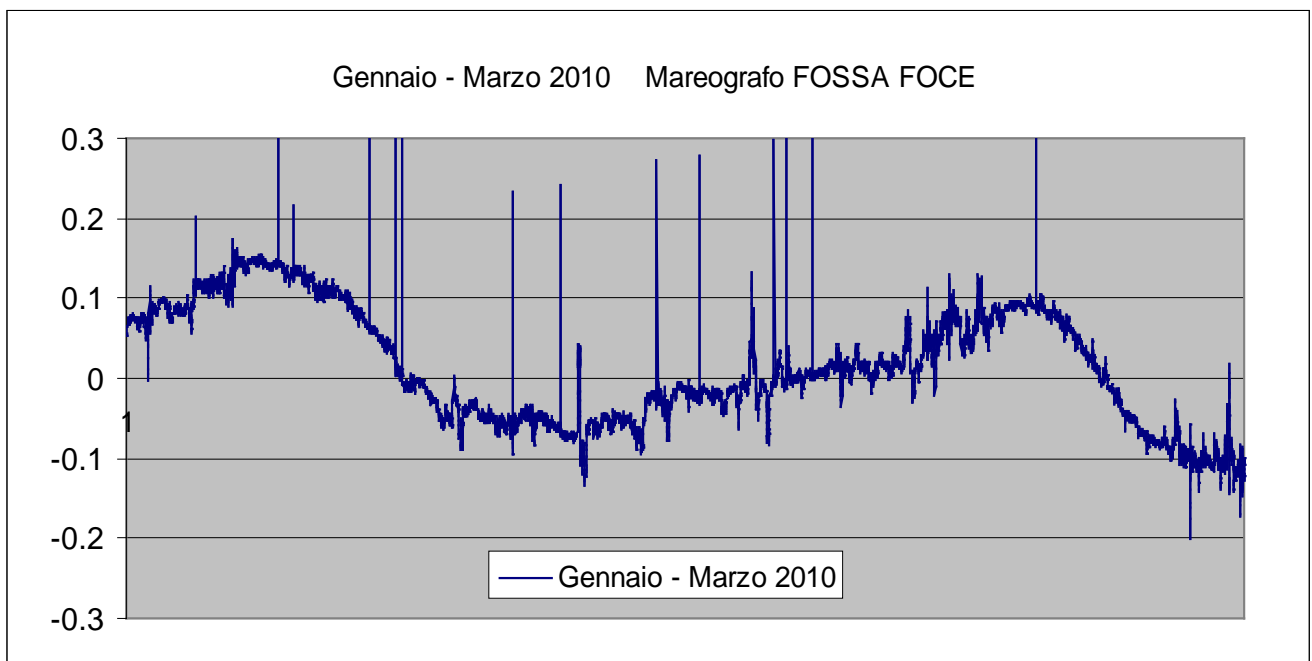


Figura 7-5 Estratto rappresentativo della serie temporale del livello registrato alla stazione di Fossa Foce

Evidentemente gli effetti dei bilanci idrologici vanno misurati e ripartiti nell'arco dei 12 mesi mentre gli effetti associati alla presenza del vento ed alla forzante di marea si misurano rispettivamente

nell’arco di qualche ora, ovvero di pochi giorni.

Pertanto in riferimento alle finalità del presente studio, la caratterizzazione dell’assetto idrodinamico delle valli può essere ricondotta alla presenza di queste ultime forzanti significative (vento e maree) con tempi di simulazione dell’ordine del giorno.

Alla luce delle considerazioni svolte e dei risultati ottenuti pare ragionevole assumere nelle simulazioni uno stato iniziale caratterizzato dal livello statico in valle corrispondente ad una quota 0.00 ± 0.20 m s.l.m.

8 Gli scenari e le simulazioni.

8.1 Gli scenari considerati

Lo **stato di fatto** considera la configurazione topo-batimetrica risultante dall'unione dei rilievi batimetrici effettuati complessivamente nel periodo 2011-2014-2016, convenzionalmente traslati al 2017 (anno di riferimento per gli scenari di subsidenza qui considerati) nonché la presenza (a geometria ultimata corrispondente a quella di progetto) dell'argine di separazione tra le acque pubbliche e private che corre lungo il confine amministrativo delle province di Ferrara e Ravenna che è attualmente in fase avanzata di costruzione.

Nonostante il cono di subsidenza qui considerato coinvolga la sola porzione nord-occidentale della Valle Lido di Magnavacca e Fossa di Porto (v. Figura 8-1), nello stato di fatto lo studio dell'assetto idrodinamico è stato esteso anche alle porzioni più meridionali della Valle, al fine di caratterizzare compiutamente l'assetto idrodinamico della Valle nel suo complesso.

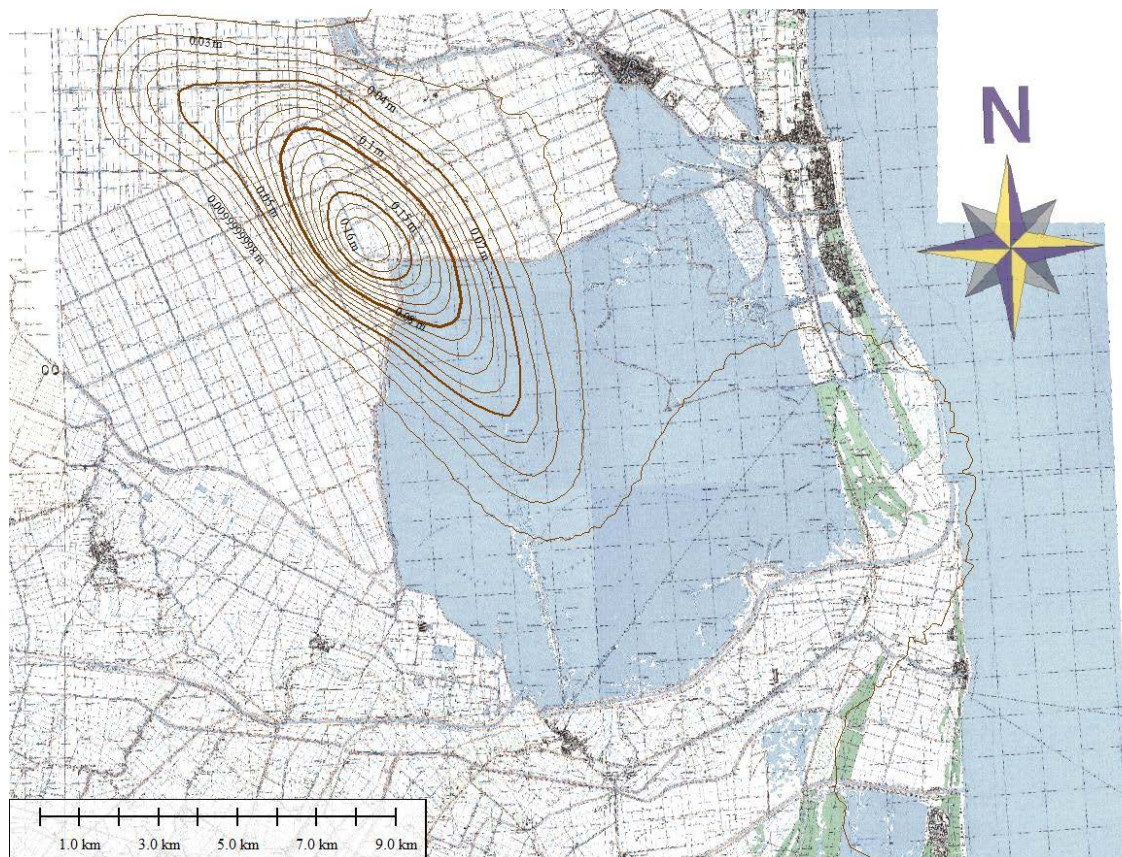


Figura 8-1 Cono di subsidenza differenziale relativo alla attività combinata del pozzo di Dosso degli Angeli e Agosta (scenario upper anno 2030-2017)

Pertanto nelle simulazioni si identificano 4 porzioni del sistema delle valli (Figura 8-2) idraulicamente indipendenti sulle quali sono state attuate le simulazioni idrodinamiche:

- BACINO N (di fatto corrispondente al sistema delle acque pubbliche) che comprende la Valle Fossa di Porto valle Cona e porzione della valle Lido di Magnavacca a nord dell'argine di separazione in fase di costruzione,
- BACINO SE1 che comprende la porzione S-E della Valle Magnavacca, delimitata a nord dall'argine in costruzione (superficie circa 7.2 km²)
- BACINO SE2 suddiviso in due sottobacini:
 - BACINO SE2-A che coincide con la valle Lavadena (superficie circa 2.6 km²),
 - BACINO SE2-B che coincide con la valle Scirocca (superficie circa 1.0 km²)

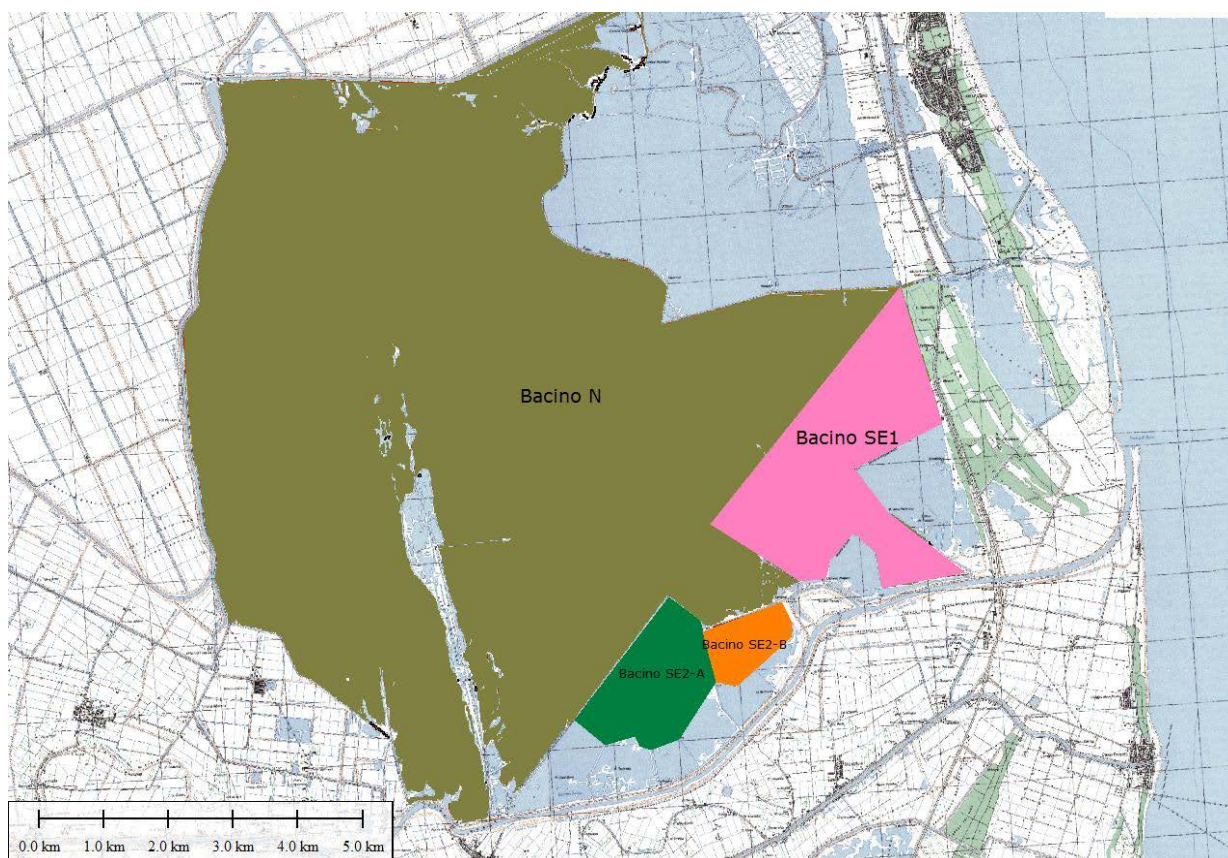


Figura 8-2 Delimitazione dei bacini idraulicamente indipendenti su cui sono state effettuate le simulazioni idrodinamiche nello stato di fatto (Bacini N, SE1, SE2-A, SE2-B) e nello stato previsionale (Bacino N).

La valle Padusa, confinante con il margine meridionale della Scirocca, è suddivisa in due bacini idraulicamente separati, di modesta estensione e profondità (v. Figura 8-3). Pertanto rimarranno esclusi dagli scenari considerati.

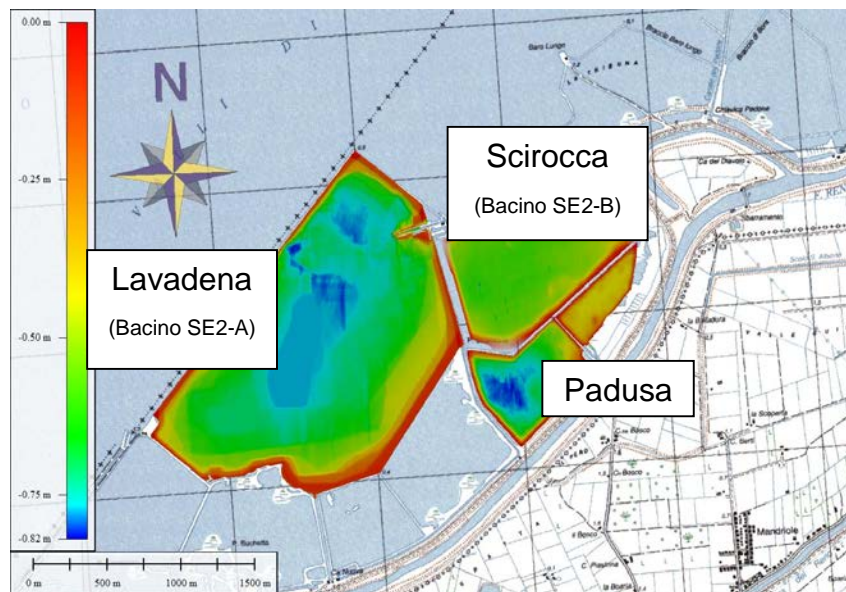


Figura 8-3 Batimetria delle Valli Scirocca, Lavadena e Padusa

Nello stato di fatto le modellazioni idrodinamiche hanno coperto un largo spettro delle possibili significative forzanti e condizioni al contorno, al fine di caratterizzare compiutamente l'effetto sull'assetto idrodinamico delle valli dovuto ai diversi contributi ed al tempo stesso individuare tra questi quelli più significativi da utilizzare nelle successive simulazioni nello stato previsionale.

sono state considerate 2 diverse condizioni caratteristiche della forzante vento (vento ordinario che spira da Ovest e vento estremo da NE); l'azione di emungimento della idrovora installata a stazione Foce; il funzionamento dei sifoni (Casalino e Case di Guardia per il Bacino N) il funzionamento delle chiaviche principali (Bellocchio e Foce-Fattibello per il bacino N; Pedone e Leonarda per il bacino SE1).

Nella configurazione dello **stato previsionale**, si considerano i due orizzonti temporali del 2020 e del 2030. Su tali orizzonti si proietta la batimetria dello stato di fatto (convenzionalmente collocata all'anno 2017 che rappresenta lo stato di fatto) trasladola verticalmente di una quantità coerente con il cono di subsidenza differenziale stimato (par.4) su questi orizzonti temporali.

Poiché gli effetti della subsidenza differenziale sulla finestra temporale del 2017-2020 e 2017-2030 non hanno alcun effetto apprezzabile sui bacini meridionali SE1, SE2-A e SE2-B, le simulazioni idrodinamiche nello stato previsionale saranno riferite al solo bacino N.

Gli effetti prodotti sul campo idrodinamico dal funzionamento dei manufatti idraulici (chiaviche, sifoni e idrovora) è molto modesto così come modesta o inapprezzabile risulta la variazione rispetto alla quiete sia in termini di campo di velocità e dislivelli del pelo libero. Pertanto le simulazioni nello stato previsionale si riferiscono solo alla forzante vento corrispondenti alle due configurazioni di vento

estremo (che spira da NE) e frequente (che spira da O).

Nel solo scenario previsionale proiettato al 2030, per completezza di analisi, è stata condotta la simulazione anche considerando l'attivazione dell'idrovora a stazione Foce nella configurazione limite di portata sollevata pari a $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

8.2 Griglie di calcolo

Per la costruzione delle griglie di calcolo all'interno dei bacini è stato utilizzato il software *gms* [18].

All'interno del bacino N (acque pubbliche) in adiacenza all'argine in fase di realizzazione si è considerata la presenza del canale sublagunare di progetto largo circa 50 m, parallelo all'arginatura, ad una distanza di circa 100 m dal piede di questa, con quota del fondo imposta pari a -2.5 m

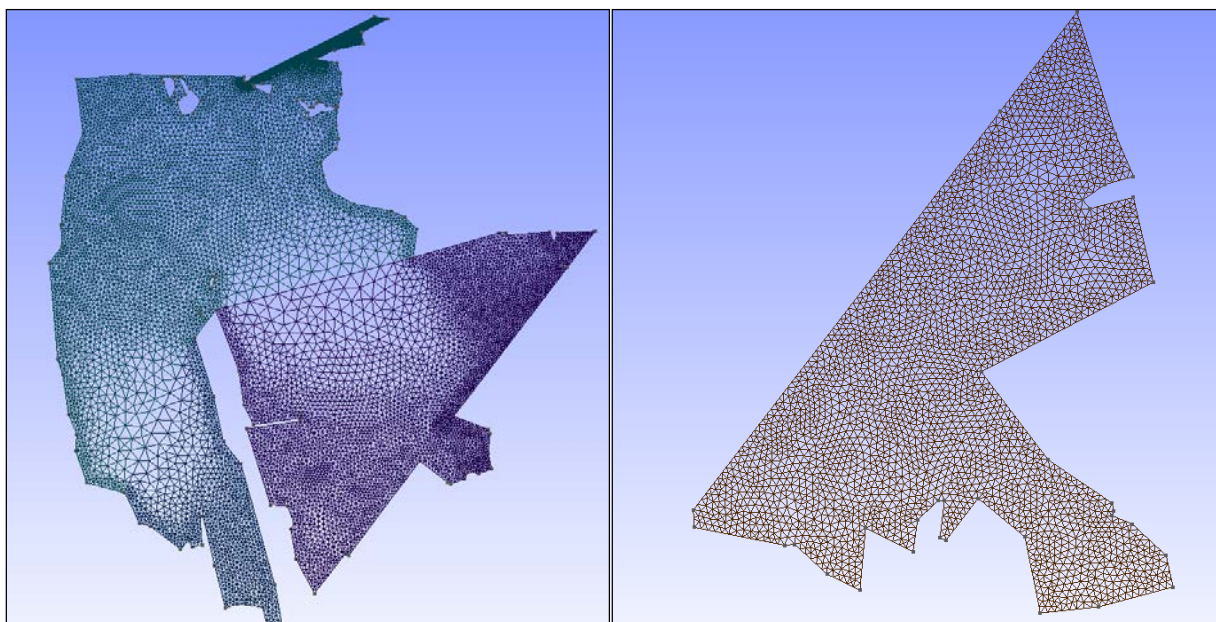


Figura 8-4. Mesh di calcolo bacino N (a dx) e bacino SE1 (a sx)

Nelle Figura 8-4 e Figura 8-5 riportano le griglie di calcolo ad elementi triangolari utilizzate per le simulazioni riguardanti i bacini vallivi. Per il bacino N sono stati utilizzati 11169 nodi per 23542 elementi triangolari. L'arginatura è modellata come una frontiera impermeabile di larghezza trascurabile rispetto all'estensione delle valli e dunque le simulazioni non sono influenzate dal tipo di scelta costruttiva. Il bacino SE1 a sud della nuova arginatura ha una estensione di circa 750 ha ed è in comunicazione con il fiume Reno (a valle della traversa di Volta Scirocco) attraverso le due chiaviche Pedona e Leonarda. La griglia di calcolo è costituita da 5788 triangoli e 2734 nodi. I bacini SE2-A e SE2B sono stati modellati mediante griglie di calcolo aventi rispettivamente 1212 nodi, 2431 elementi triangolari e 483 nodi e 6144 elementi triangolari rispettivamente.

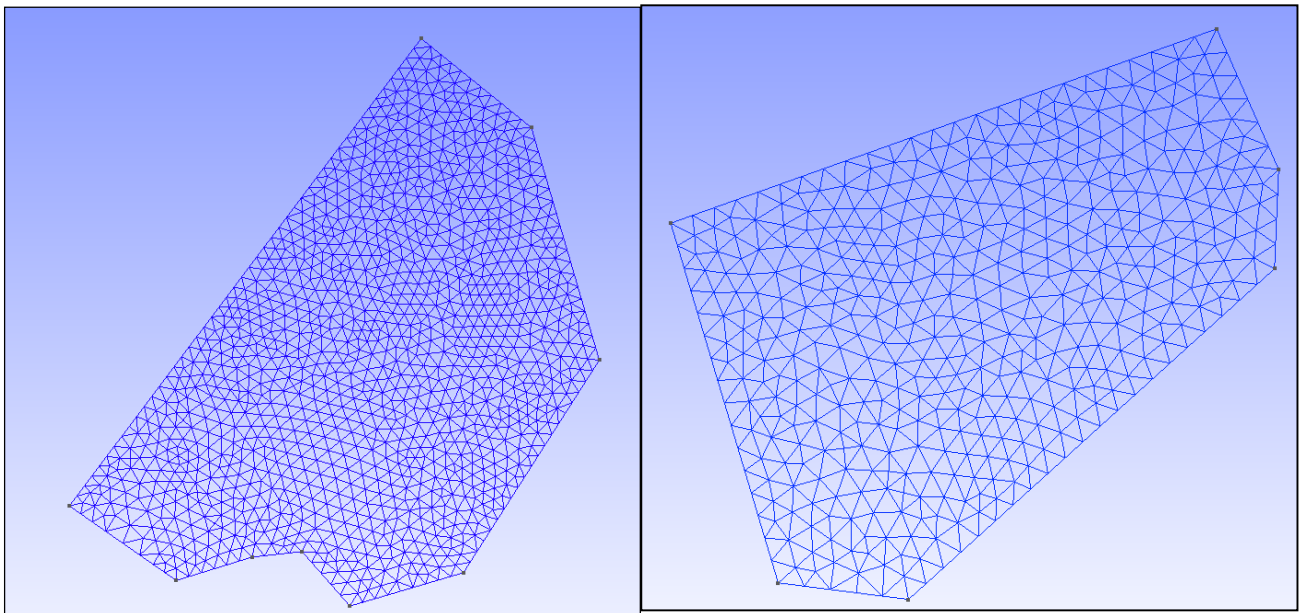


Figura 8-5. Mesh di calcolo bacino SE2-A (sx) e SE2-B (dx)

Nello stato previsionale (al 2020 e al 2030) le quote dei nodi delle griglie di calcolo sono stati traslati verticalmente nella misura dettata dai risultati del modello di subsidenza.

8.3 Quadro sinottico delle simulazioni nello stato di fatto e nello stato previsionale

A favore di chiarezza della lettura dei paragrafi seguenti, si anticipa il quadro sinottico delle simulazioni complessivamente effettuate nello stato di fatto e nei due scenari previsionali (orizzonte temporale anno 2020 ed anno 2030) che considerano la condizione peggiorativa in termini di subsidenza attesa (*i.e. scenario upper*). Le simulazioni effettuate vengono identificate con un codice (che serve da riferimento per la presentazione più dettagliata dei risultati nei paragrafi successivi) e riepilogate nelle seguenti Tab. 8-1-Tab. 8-3. .

PRIMA STRINGA (stato del sistema)

SDF_ /SDP = Stato di Fatto / Stato previsionale

SECONDA STRINGA (bacino)

N_/SE1/SE/2 = Simulazione riguardante il bacino Nord/Sud-Est1/Sud-Est2

(SE η - α _ = Simulazioni riguardanti i bacini SE 1, SE2-A e SE2-B)

TERZA STRINGA (forzante)

V = Vento. (sempre seguito dalla direzione di provenienza -NE- e dalla intensità -m/s-, ad esempio vento da NE con velocità 11.7 m/s : VNE11.7)

IDR10 = idrovora di stazione foce attiva alla portata di 10 m³/s

MCPL = Forzante di Marea alle Chiaviche Sud (Pedona e Leonarda)

MSCC = manovre ai sifoni casalino e case di guardia

MCB = manovra chiavica Bellocchio

MCF = manovra chiavica Foce

Nel caso dell'azione del vento, i manufatti (chiaviche e sifoni) sono considerati sempre inattivi.

Bacino N	SDF_N_MCF chiavica Foce aperta
	SDF_N_MCB chiavica Bellocchio aperta
	SDF_N_IDR10.0 Idrovora stazione Foce attiva (Q=10 m ³ /s)
	SDF_N_MSCC sifoni Casalino e Case di Guardia attivi
	SDF_N_VNE11.7 vento estremo da NE v=11.7 m/s
	SDF_N_VW2.3 vento frequente da O v=2.3 m/s
Bacino SE1	SDF_SE1_VNE11.7 vento estremo da NE v=11.7 m/s
	SDF_SE1_VW2.3 vento frequente da O v=2.3 m/s
	SDF_SE1_MCPL chiaviche Pedona, Leonarda aperte
Bacini SE2	SDF_SE2_VNE11.7 vento estremo da NE v=11.7 m/s
	SDF_SE2_VW2.3 vento frequente da O v=2.3 m/s

Tab. 8-1. Quadro sinottico delle simulazioni nello **stato di fatto (anno 2017)**

Bacino N	SUBS20_N_VNE11.7 vento estremo da NE v=11.7 m/s
	SUBS20_N_VW2.3 vento frequente da O v=2.3 m/s

Tab. 8-2. SUBS2020- Quadro sinottico delle simulazioni nello **stato previsionale (anno 2020)**

Bacino N	SUBS2030_N_IDR10.0 Idrovora stazione Foce attiva (Q=10 m ³ /s)
	SUBS2030_N_IDR10.0 vento estremo da NE v=11.7 m/s
	SUBS2030_N_IDR10.0 vento frequente da O v=2.3 m/s

Tab. 8-3 SUBS2030. Quadro sinottico delle simulazioni nello **stato previsionale (anno 2030)**

9 Simulazioni dello stato di fatto (anno 2017)

9.1 Simulazioni dello stato di fatto sul bacino N (SDF_N)

Il bacino Nord (i.e. Valle Lido di Magnavacca, Valle Lido di Campo e Valle Cona) è limitato a sud dalla presenza dell'argine in fase di costruzione che corre lungo il confine tra le Province di Ferrara e Ravenna. In tutte le simulazioni la batimetria convenzionalmente datata 2017 è ricostruita dall'unione dei rilievi batimetrici 2011, 2014, 2016, utilizzando i rilievi più recenti nel caso di sovrapposizione. Il bacino Nord è collegato con il sistema delle acque esterne attraverso le chiaviche Foce (sulla quale è installata anche l'idrovora), Bellocchio e Scirocca ed i sifoni Casalino e Case di Guardia. Nella Figura 9-1 è rappresentato il sistema ed i manufatti idraulici presenti ed attivi su tali bacini.

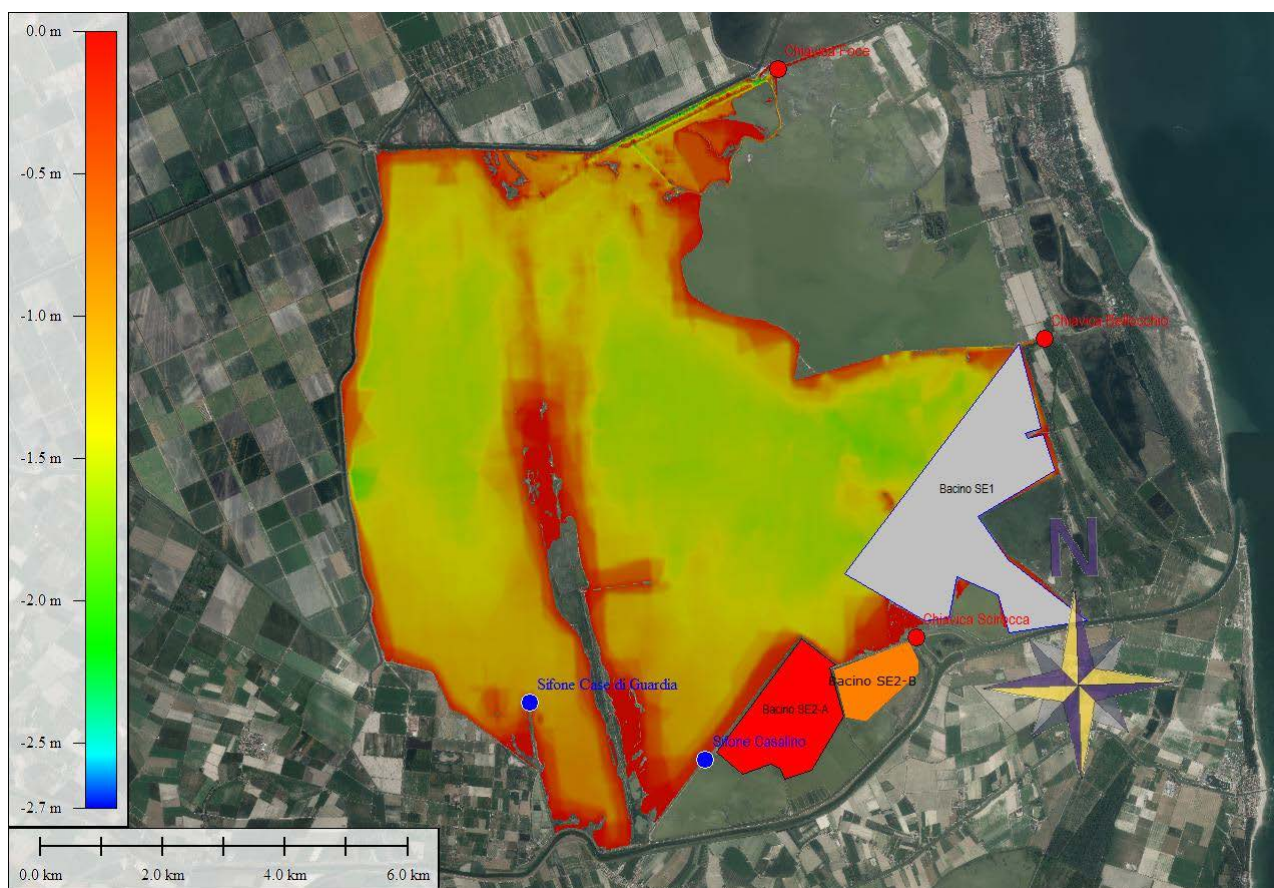


Figura 9-1 Batimetria del bacino N e manufatti idraulici presenti

Le simulazioni hanno riguardato la presenza dei manufatti idraulici (chiaviche Foce e Bellocchio, e sifoni Case di Guardia e Casalino) nonché la forzante vento. Poiché la chiavica Scirocca ha una capacità idraulica molto modesta a confronto di quella delle chiaviche Foce e Bellocchio, e poiché già gli effetti sul campo di moto di quest'ultime appaiono trascurabili, è stata omessa la simulazione

relativa alla derivazione dalla chiavica Scirocca. Per quanto riguarda la forzante vento, le simulazioni sono state protrate per una durata sul prototipo non inferiore a 12 ore e comunque sufficiente affinché si instauri una condizione di moto stazionario in laguna.

Le simulazioni complessivamente effettuate sono:

- **SDF_N_MCF** Scenario corrispondente all’azionamento della chiavica Foce.
- **SDF_N_MCB** Scenario corrispondente all’azionamento della chiavica Bellocchio.
- **SDF_N_IDR10.0** Scenario corrispondente all’azionamento dell’idrovora a stazione Foce.
- **SDF_N_MSCC** Scenario corrispondente all’azionamento dei sifoni Casalino e Case di Guardia.
- **SDF_N_VNE11.7** Scenario corrispondente all’azione del vento più intenso da NE ($v=11.7$ m/s).
- **SDF_N_VO2.3** Scenario corrispondente all’azione del vento più intenso da O ($v=2.3$ m/s).

9.1.1 Apertura della Chiavica sul Canale Foce - Valle Fattibello (SDF_N_MCF)

La chiavica Foce è collocata sul vertice nord-orientale della Valle e mette in comunicazione la porzione settentrionale della Valle Lido di Magnavacca con la valle Fattibello a nord. I volumi in ingresso sono veicolati all’interno della Valle attraverso il canale Foce che si sviluppa per circa 2.5 km lungo il margine settentrionale della Valle, con una larghezza di oltre 100 m. In prossimità dell’imbocco verso la stazione Foce, l’argine meridionale del canale Foce è interrotto (v. Figura 9-2). In Figura 9-3 è riportato il rilievo integrativo di dettaglio (anno 2014) che ha consentito una migliore rappresentazione della porzione NE del bacino.



Figura 9-2 Particolare della porzione nord-orientale della Valle in corrispondenza della chiavica Foce. Si distingue a nord canale Foce con l’argine che corre parallelo al margine settentrionale della Valle.

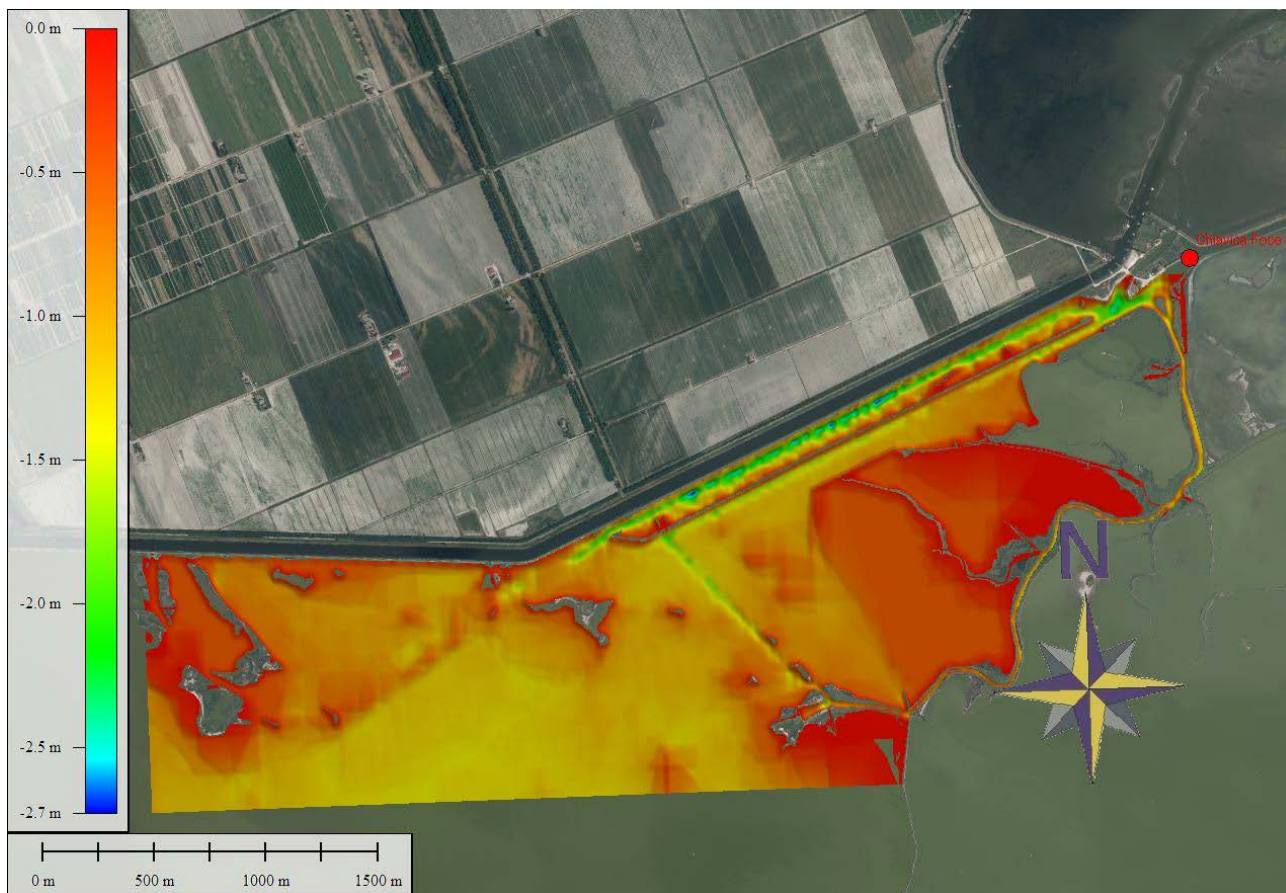


Figura 9-3 il rilievo batimetrico di dettaglio (anno 2014) in corrispondenza della porzione nord-orientale della Valle in prossimità della stazione Foce.

Viene applicata in corrispondenza della chiavica la condizione al contorno dell'onda di marea, ricavata secondo la trattazione esposta in precedenza con attenuazione e ritardo (v. par. 5.3). La simulazione ha una durata di 24 ore nel prototipo al fine di simulare due periodi di marea. La condizione iniziale è di quiete con livello uniforme su tutto il bacino pari a +0.00 m s.l.m.

L'escursione dell'onda di marea alla chiavica a seguito dell'attenuazione è di circa 18 cm. Il livello sulla cella contigua al bordo si adegua in modo istantaneo all'onda di marea senza laminazione. Nella Figura 9-4 e Figura 9-5 sono riportati i risultati più significativi.

In corrispondenza del minimo di marea, il valore massimo della velocità in prossimità della chiavica è inferiore 0,4 m/s. Il modulo della velocità tende rapidamente a smorzarsi allontanandosi dalla struttura. Il campo di moto mostra velocità apprezzabili solo all'interno del canale Foce e sul "corridoio" della valle Cona che è identificabile tra il varco presente tra i dossi a sud e il vertice a NE (Figura 9-6). L'effetto di distorsione sullo stato iniziale rimane confinato all'interno della Valle Cona.

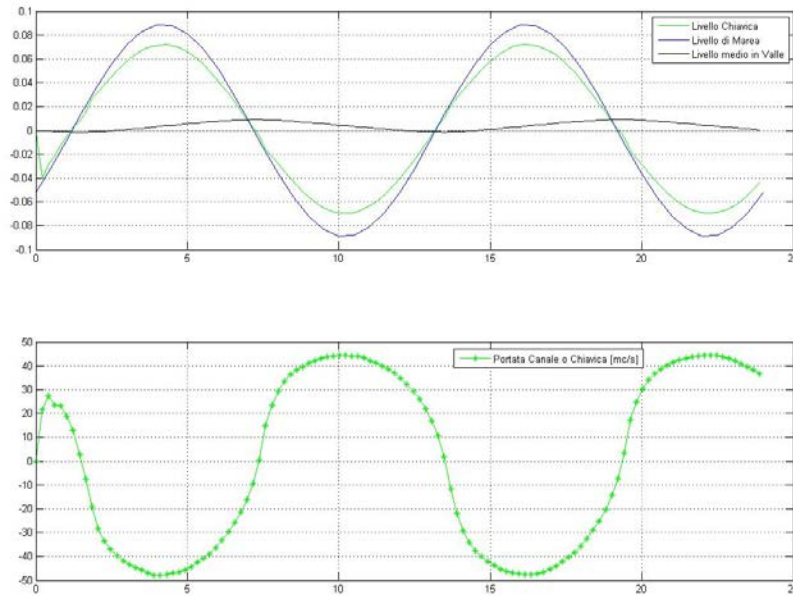


Figura 9-4 SDF_N_MCF Andamento livello (sopra) e portata (sotto)
Onda di marea e cella interna al dominio. (Portate negative se in ingresso alla Valle)

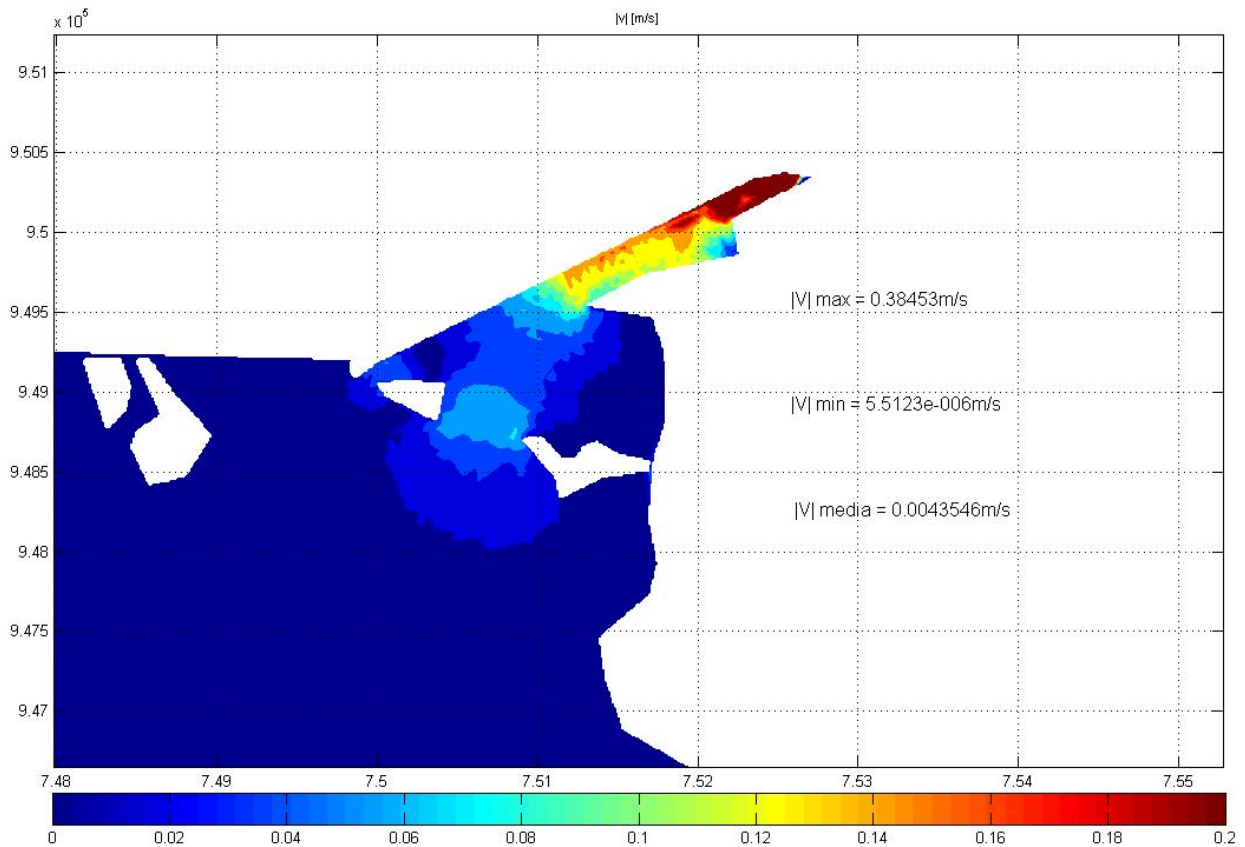


Figura 9-5 SDF_N_MCF Particolare della porzione NE del bacino. Modulo di velocità al minimo di marea



Figura 9-6 SDF_N_MCF Particolare della porzione NE del bacino. In evidenza il varco a sud della valle Cona.

9.1.2 Idrovora attiva a Stazione Foce (SDF_N_IDR10.0)

La condizione iniziale è fissata allo stato di quiete corrispondente al livello medio mare. La forzante è costituita dal sollevamento attuato dalla idrovora stazione Foce, con portata costante pari a $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'assetto idrodinamico scaturisce dall'applicazione della batimetria ottenuta dai rilievi effettuati nel 2011 sulla Valle grande (Valle di Porto e Lido di Magnavacca) successivamente integrati con i rilievi effettuati nel 2014 nella porzione nord orientale della laguna, al fine di ottenere un dato più aggiornato e raffittito in corrispondenza del tratto di canale foce e lungo lo stesso fino alla chiavica Foce di collegamento con la Valle Fattibello. Il rilievo effettuato nel 2014 con una maggiore densità di linee di navigazione, ha permesso di aumentare la quantità di dati disponibili per zona Nord-Est evidenziando, se confrontata con i rilievi del 2011, i nuovi lavori di escavazione dei canali sublagunari Foce (parallelo al margine settentrionale) e Ungola, (con direzione NS) effettuati nell'ambito del progetto LIFE da parte dell'Ente Regionale Parco Delta del Po . Nella Figura 9-7 si riportano a confronto le batimetriche ottenute nelle due campagne di rilievo (2011 e 2014).

Si analizzano i risultati in condizioni stazionarie. L'effetto sul campo idrodinamico dell'idrovora in azione è apprezzabile in termini di incremento delle velocità solo fino ad una distanza di qualche decina di metri dall'opera (Figura 9-8).

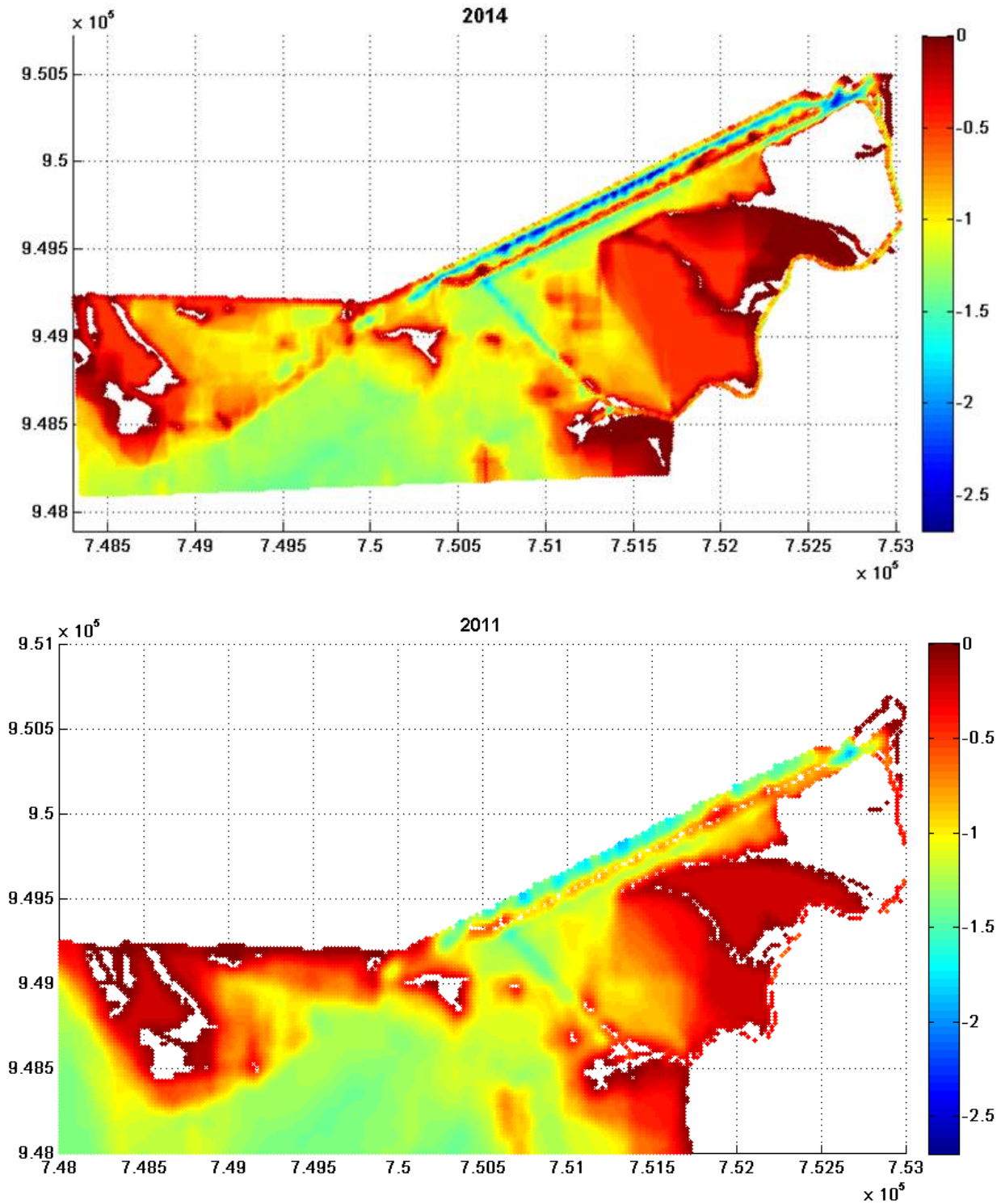


Figura 9-7. Lembo NE della laguna. Confronto tra i risultati delle indagini batimetriche 2014 (sopra) e 2011 (sotto).

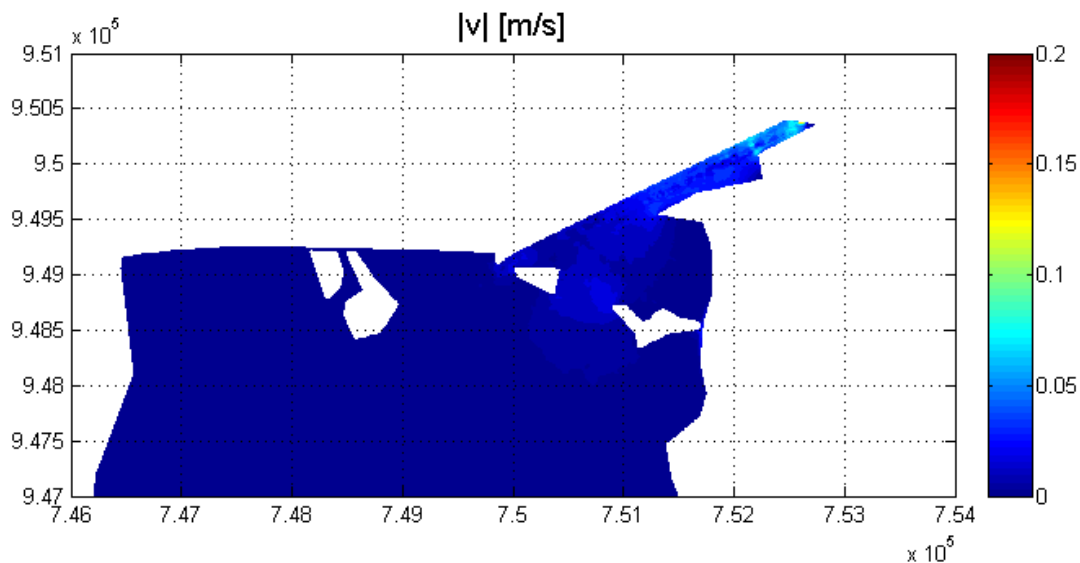


Figura 9-8 *SDF_N_IDR10.0* Stato di fatto. Idrovora attiva $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$. Effetto locale sul campo delle velocità mediate sulla verticale

E' possibile valutare qualitativamente la capacità da parte dell'idrovora di orientare le linee di flusso lungo il canale Foce, pur rimanendo gli effetti sul campo idrodinamico apprezzabili soprattutto nella zona settentrionale, come atteso (Figura 9-9 e Figura 9-10). L'«effetto di chiamata» da parte dell'idrovora aumenta all'aumentare della portata, fino a risultare apprezzabile anche a scala più grande per la portata imposta pari a $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 9-9), pur mantenendo moduli della velocità ovunque molto contenuti.

In Figura 9-10 è proposto un particolare del campo di moto nel margine settentrionale della Valle. Si apprezza che l'ordinato orientamento delle linee di flusso verso il vertice nord-orientale di chiavica Foce è contrastato sul lembo nord-occidentale dalla presenza di bassi fondali e dossi emergenti.

In Figura 9-11 si riportano gli andamenti nel tempo dei livelli (scostamenti molto contenuti rispetto alla quiete) e degli scambi globali di volumi verso l'esterno.

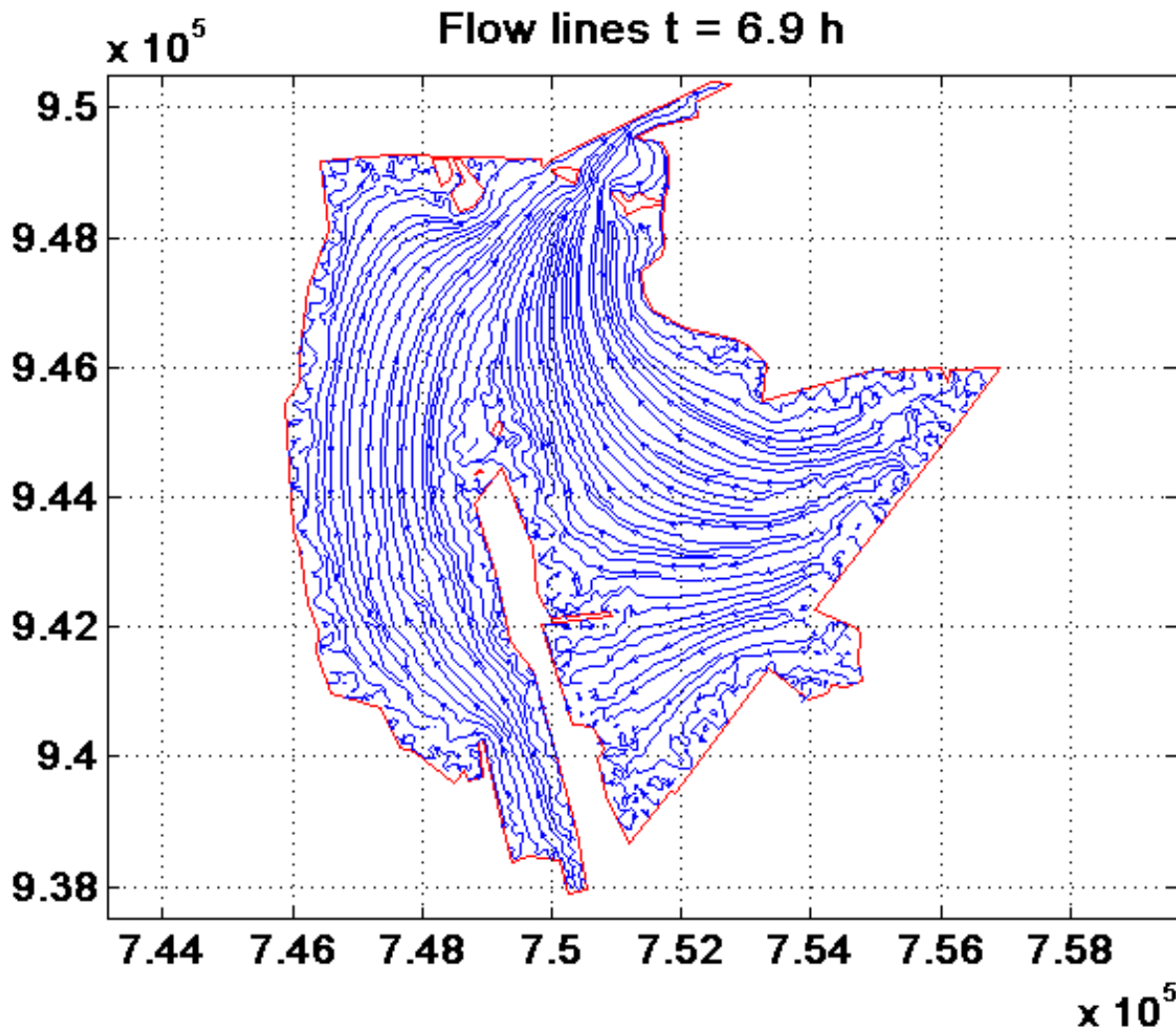


Figura 9-9 SDF_N_IDR10.0 Stato di fatto. Idrovora attiva $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$. Effetto globale sulle linee di corrente.

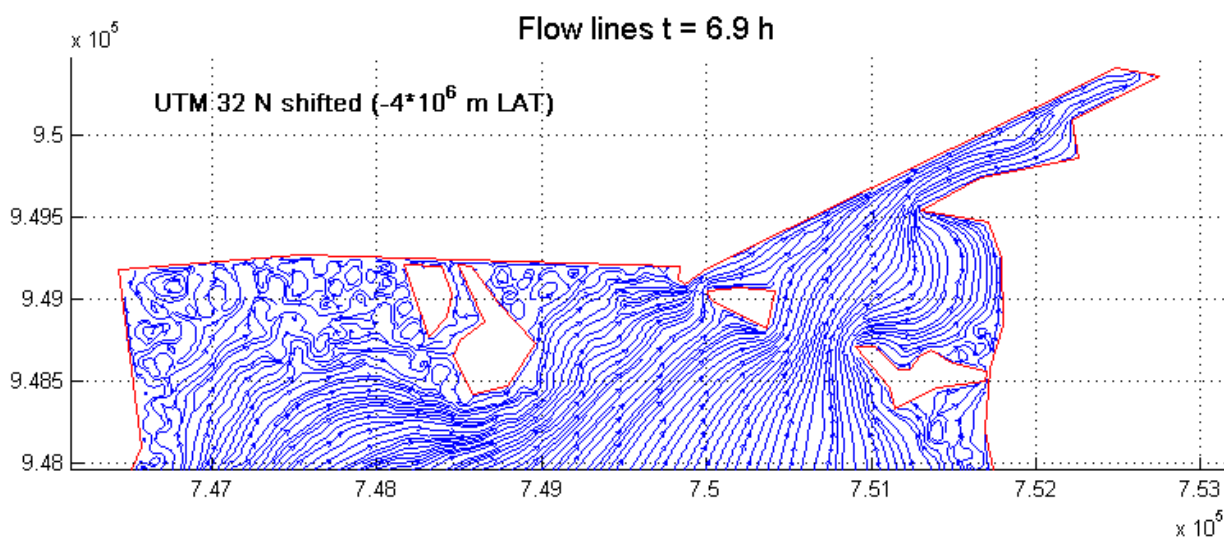


Figura 9-10 SDF_N_IDR10.0 Stato di fatto. Bacino N. Idrovora attiva $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$. Effetto locale sul campo di moto.

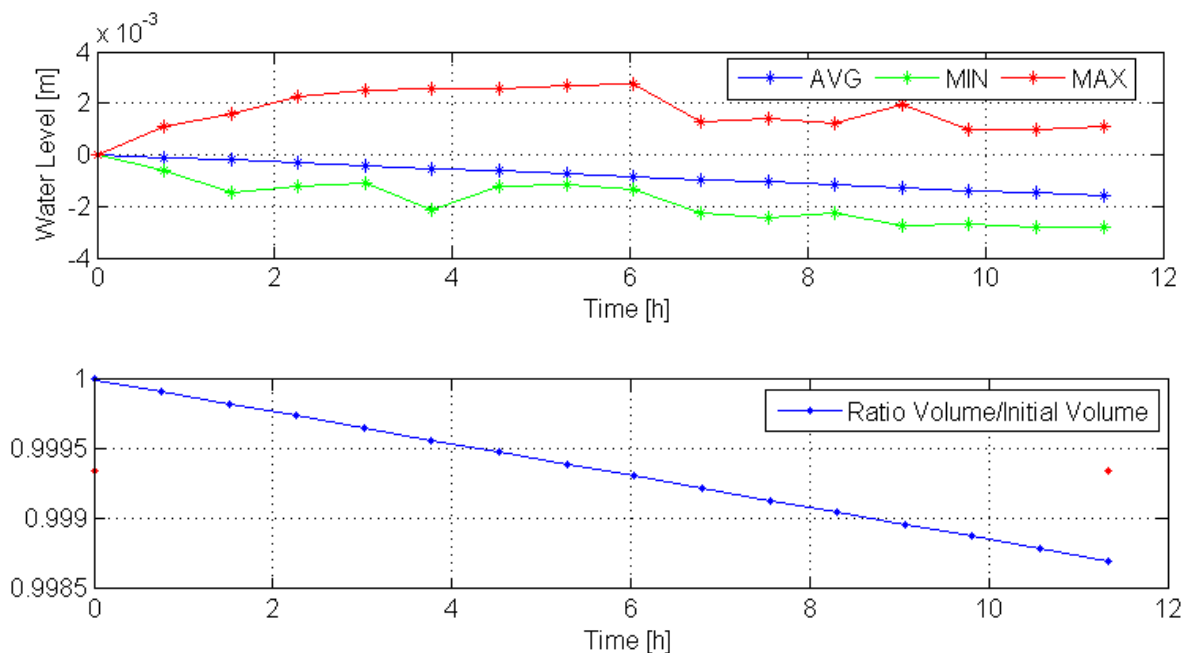


Figura 9-11 **SDF_N_IDR10.0** Stato di fatto. Bacino N. Idrovora attiva $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$.
Effetto sul livello e sullo scambio globale di volume.

9.1.3 Apertura della Chiavica sul Canale Bellocchio (SDF_N_MCB)

Come già visto in precedenza, l'onda di marea con l'attenuazione calcolata in corrispondenza del canale di Bellocchio presenta un'escursione inferiore a 3 cm (v. par. 6.3). Risultano effetti sulla valle molto limitati in termini di scambi idrici. La Figura 9-12 mostra la corografia del manufatto.



Figura 9-12 La chiavica Bellocchio ed il canale Bellocchio che si protende all'interno della valle lungo il confine meridionale della valle Smarlacca. Evidente il relitto dell'argine Magnambrutto in corrispondenza della sezione di valle del canale Bellocchio all'interno della Valle

I volumi d'acqua in transito attraverso la chiavica, vengono veicolati all'interno della Valle attraverso il canale Bellocchio che corre in fregio all'argine meridionale della valle Smarlacca per circa 800 m, consegnando i volumi alla valle in corrispondenza del relitto dell'argine Magnambrutto che originariamente risvoltava verso est in corrispondenza della sezione terminale del canale all'interno della valle (Figura 9-12).

In considerazione delle modeste velocità e dei limitati sovralti piezometrici all'interno del canale si trascurano gli effetti inerziali e resistivi, traslando quasi istantaneamente l'onda in ingresso alla sezione di valle del canale stesso, all'interno della Valle. Pertanto nel modello l'ingresso è schematizzato sul confine esterno della valle, rinunciando ad una descrizione di dettaglio del moto lungo il canale Bellocchio all'interno della Valle. La Figura 9-13 e Figura 9-14. Mostrano i risultati ottenuti in termini di variazioni di livello e volumi scambiati nonché in termini di campo delle velocità. Le velocità di picco sono inferiori a quelle registrate sulla chiavica a Sud (i.e. chiavica Scirocca) ed il raggio di influenza apprezzabile sul campo di moto è di poche centinaia di metri.

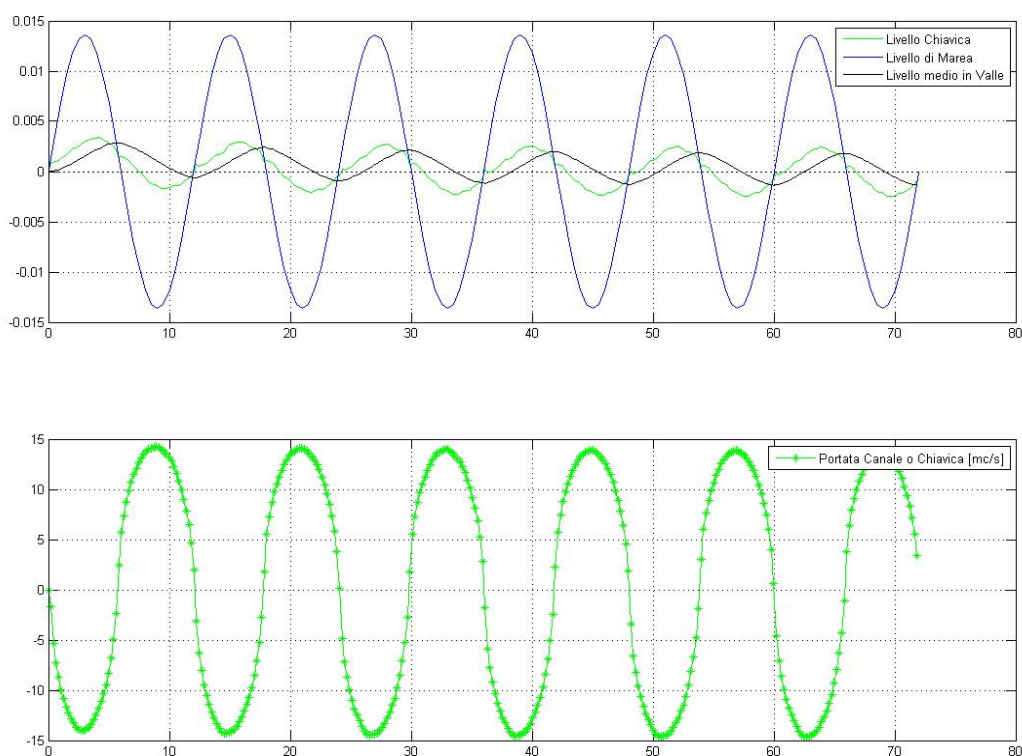


Figura 9-13 *SDF_N_MCB* andamento portata e livello (onda di marea e cella interna al dominio)

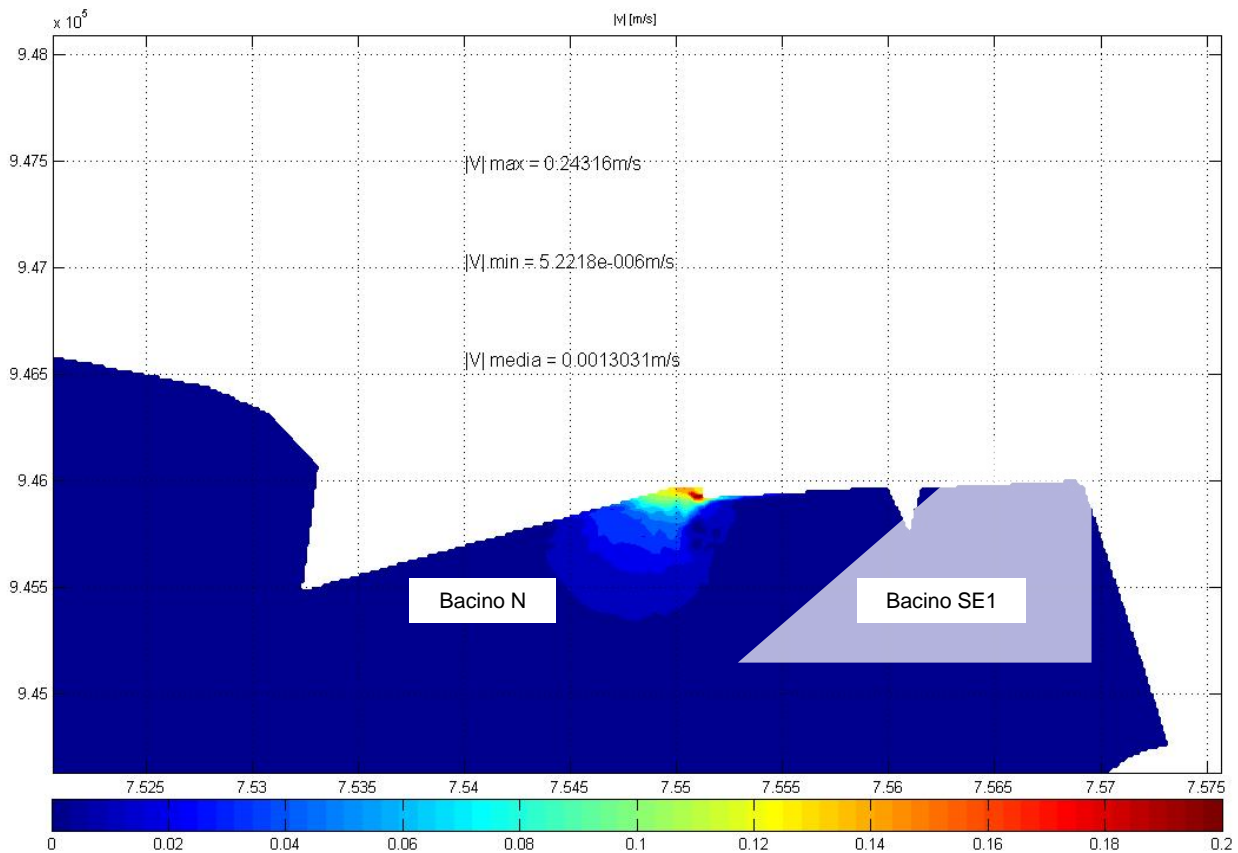


Figura 9-14 SDF_N_MCB particolare modulo velocità (m/s)

9.1.4 Sifoni attivi (SDF_N_MSCC)

In corrispondenza degli ingressi dei due sifoni (Casa di Guardia e Casalino) in collegamento con il Reno a monte della traversa di Volta Scirocco, si impone la portata entrante di $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (si veda par.5.3) per ciascuno dei sifoni.

La simulazione ha una durata di 72 ore. La condizione iniziale è di quiete, con livello uniforme su tutto il bacino pari a $+0.00 \text{ m s.l.m.}$ In 24 ore il volume contenuto aumenta del 2 per mille.

Si riportano nella Figura 9-15 i risultati più significativi della simulazioni in termini di livello, portata specifica e volume di ricarica della Valle.

Il campo di velocità risulta sostanzialmente inapprezzabile, se non nelle immediate vicinanze dei manufatti, perciò si omette la sua rappresentazione.

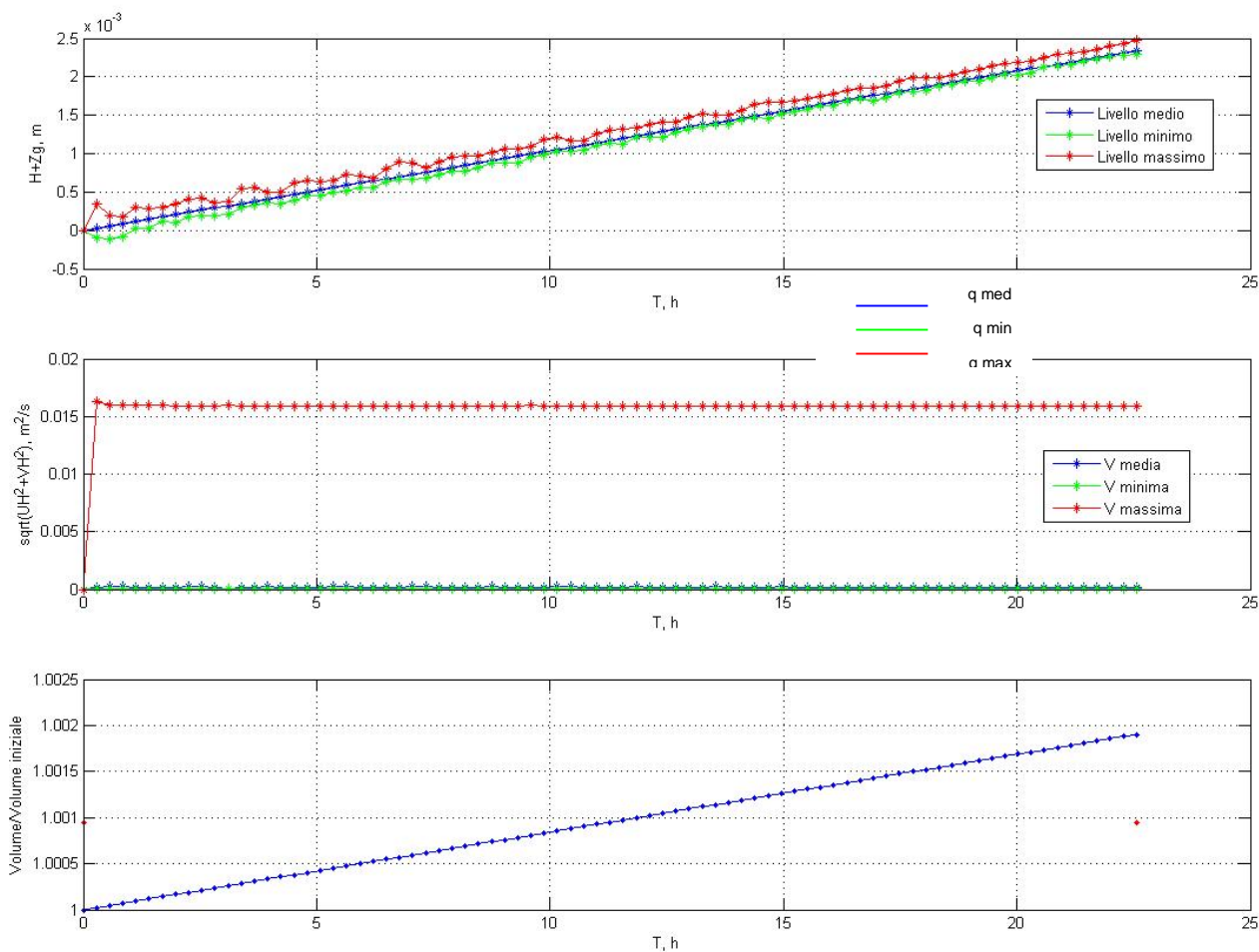


Figura 9-15 SDF_N_MSCC Andamento generale livello, portata specifica q (m^2/s), volume

9.1.5 Venti estremi da Nord-Est (SDF_N_VNE11.7)

La condizione iniziale del bacino corrisponde allo stato di quiete con piezometrica pari a +0.10 m s.l.m. La forzante è costituita dal vento che spira in direzione NE con velocità costante pari a 11.7 m/s. In questo caso è significativo riguardare i risultati in termini di livello, modulo delle velocità mediate sulla verticale e linee di corrente.

I valori maggiori delle velocità si riscontrano sempre in prossimità delle zone di bordo poco profonde. Per vento estremo si ottengono velocità mediate sulla verticale caratterizzate localmente da valori del modulo massimo compreso fino a 0.2 m/s e valori medi in laguna attorno a 0.05 m/s. In corrispondenza del canale sublagunare in adiacenza all'argine in costruzione, si registra un significativo aumento delle velocità. In effetti lungo la linea d'argine si hanno velocità ovunque superiori a 0.1 m/s e localmente fino a 0.15 m/s (Figura 9-16).

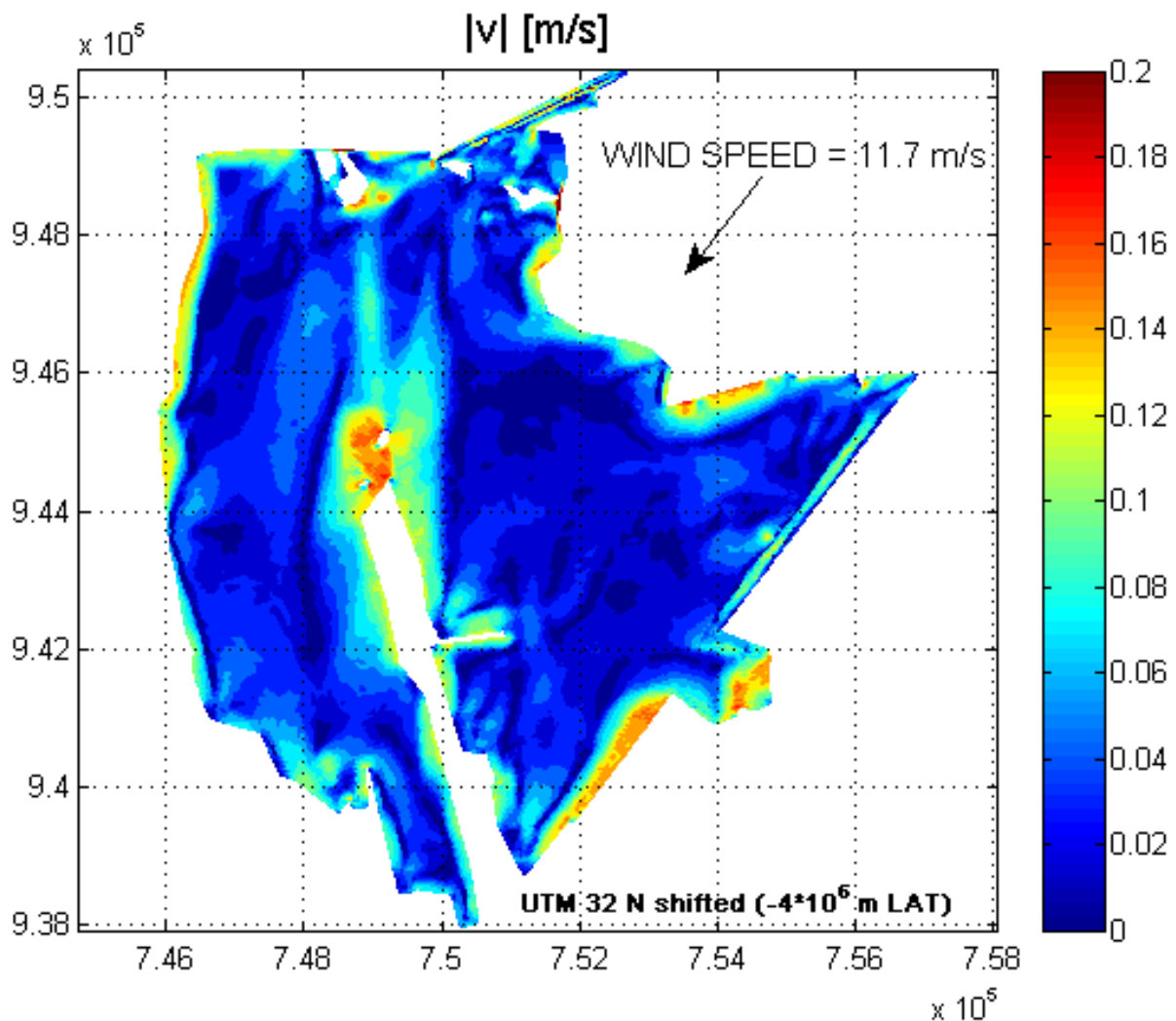


Figura 9-16 SDF_N_VNE11.7 Stato di fatto -vento estremo - Modulo delle velocità

Un'analisi in termini di linee di corrente (Figura 9-17, Figura 9-18) mostra che per questo vento estremo che spira da NE, si evidenzia una inversione del senso di circolazione lungo l'asse del canale sublagunare che corre in fregio all'argine (direzione NE) garantendo un ricambio idrico dei volumi d'acqua contenuti nella insenatura proprio in occasione degli eventi più intensi, cui corrisponde una maggiore efficienza dal punto di vista della movimentazione complessiva della massa idrica. Il punto di curvatura dell'argine in prossimità dell'ansa del Diavolo rappresenta un punto di divergenza per le linee di flusso provenienti da NO-SE.

In presenza di questo vento si osserva una circolazione più efficace che coinvolge l'intera Valle Lido di Porto con verso orario.

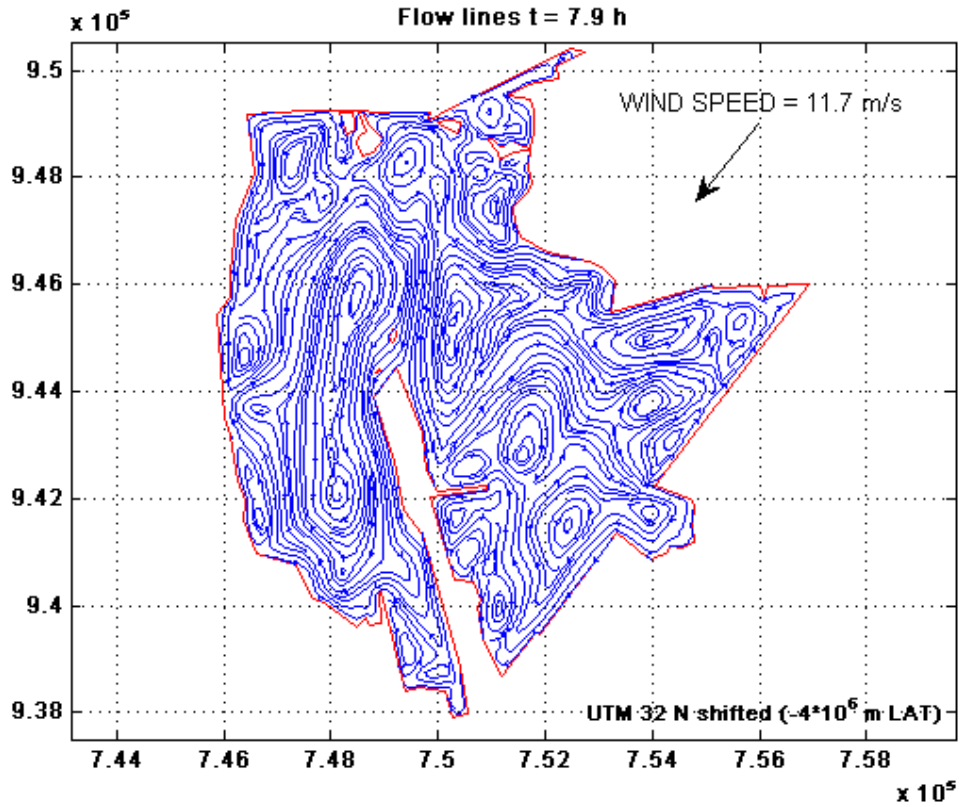


Figura 9-17 SDF_N_VNE11.7 (vento da NE 11.7 m/s) Linee di corrente, visione d'insieme

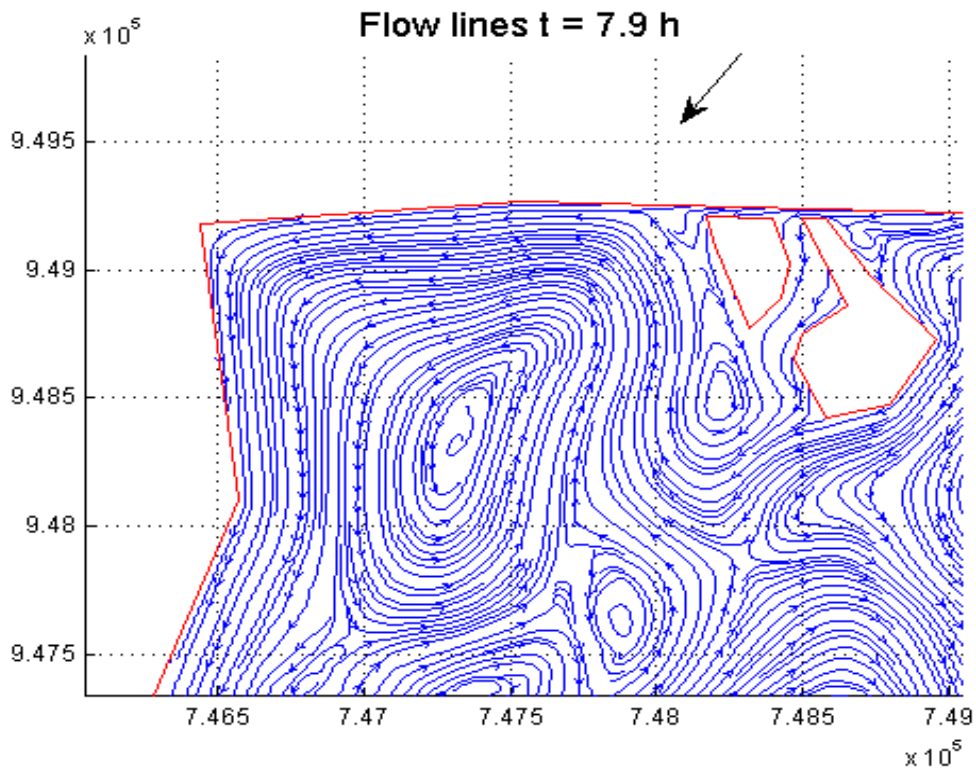


Figura 9-18 SDF_VNE11.7 Stato di fatto Vento estremo direzione NE v=11.7 m/s . - Linee di corrente, dettaglio zona Nord-Ovest

Le linee di livello si dispongono perpendicolarmente alla direzione del vento. Il dislivello tra margini opposti generato sulla superficie libera è attorno ai 20 cm (Figura 9-19).

Le Figura 9-20 e Figura 9-21 mostrano il particolare del campo di moto sul margine N-E della Valle, in corrispondenza del canale Foce. Lungo il canale si genera una circolazione con prevalente orientamento orario, con velocità relativamente sostenute (0.10-0.15 m/s) lungo il tratto maggiormente canalizzato (verso la stazione Foce).

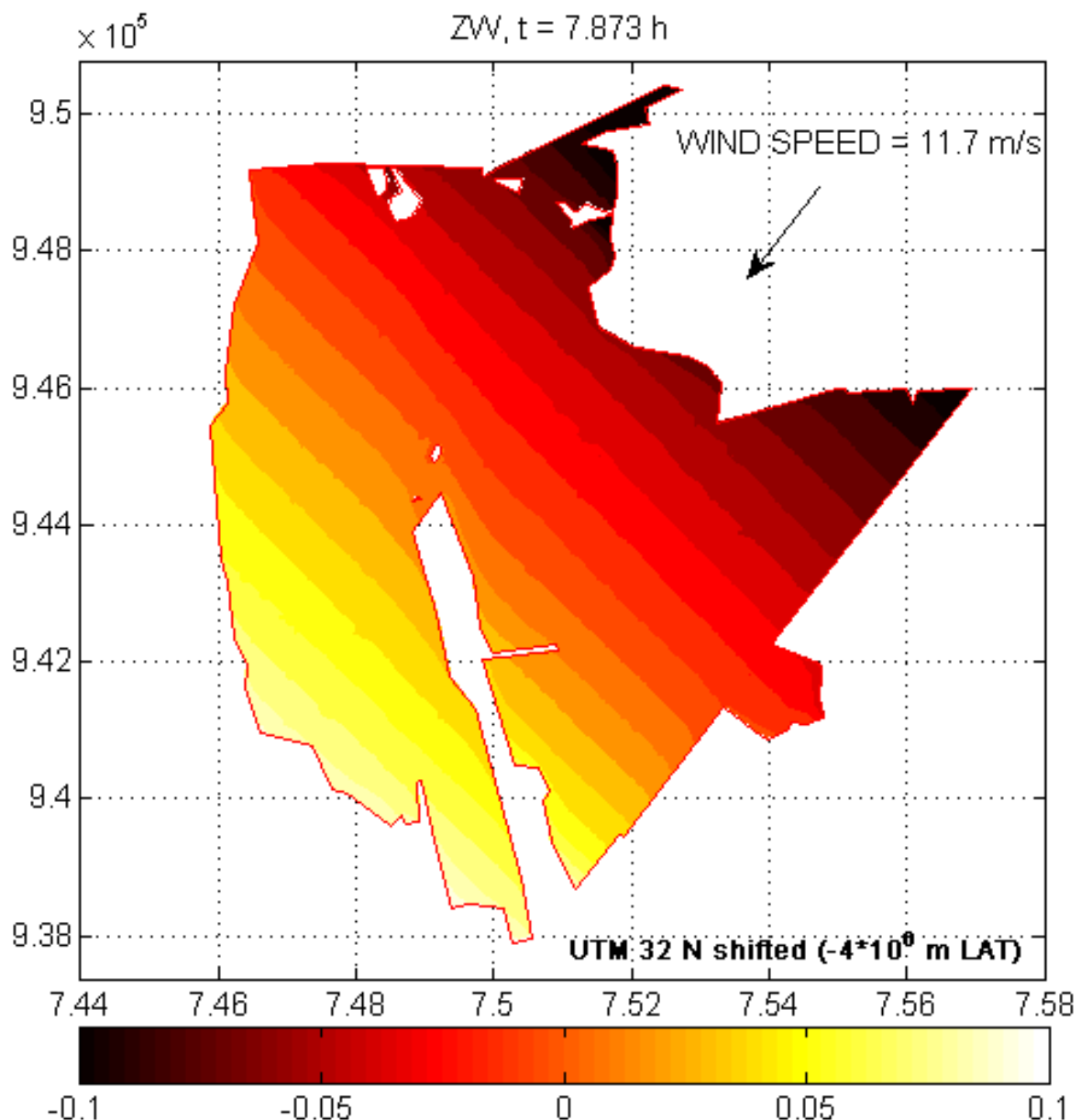


Figura 9-19 **SDF_N_VNE11.7** Stato di Fatto. Vento estremo direzione NE $v=11.7$ m/s.
Variazione di livello rispetto la quiete [m]

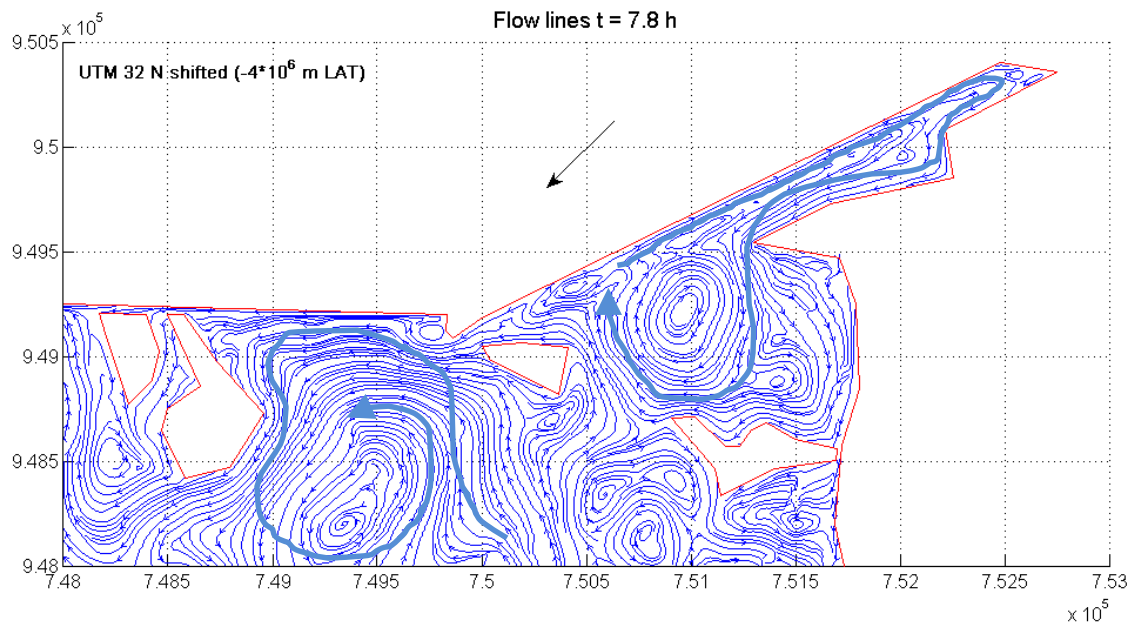


Figura 9-20 SDF_N_VNE11.7 Stato di fatto. Vento estremo direzione NE $v=11.7$ m/s.
Linee di corrente-particolare zona Foce

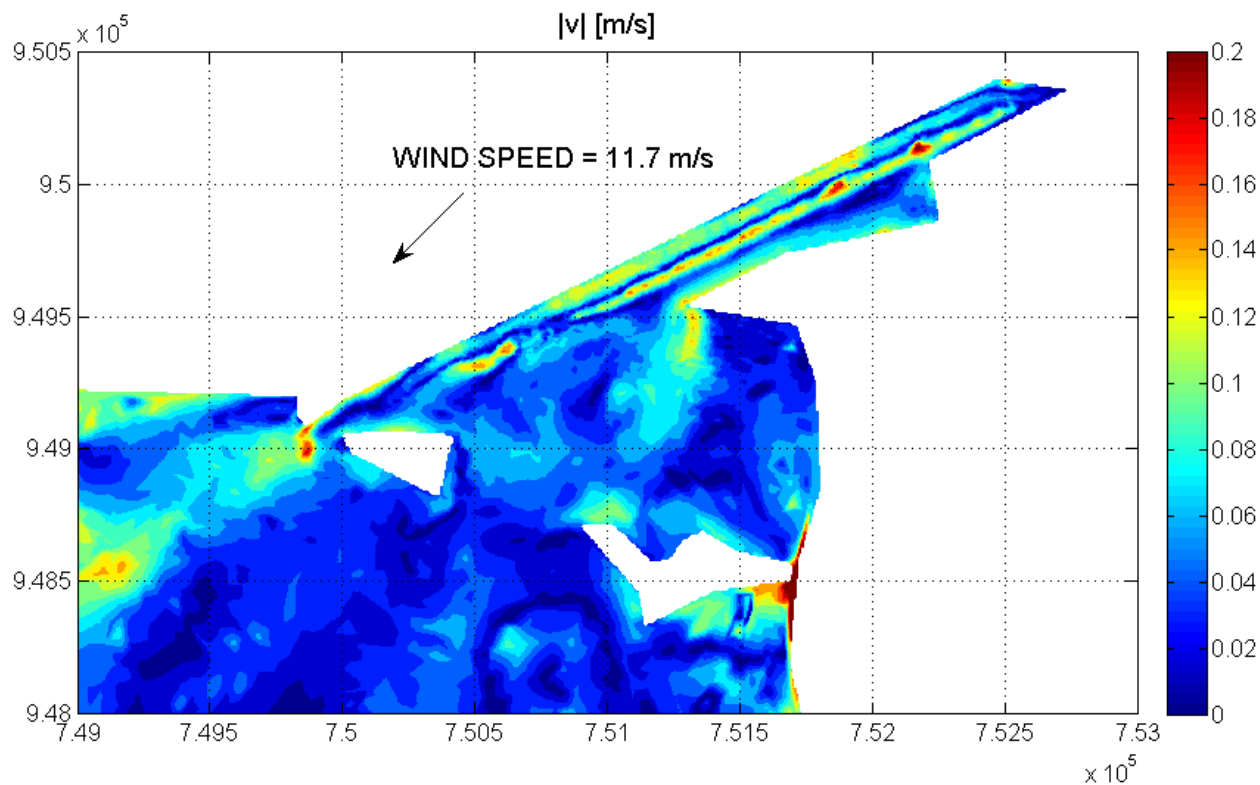


Figura 9-21 SDF_N_VNE11.7 Stato di fatto Vento estremo direzione NE $v=11.7$ m/s. Modulo delle velocità, particolare zona Foce

9.1.6 Venti frequenti da Ovest (SDF_N_VW2.3)

La condizione iniziale è di quiete con piezometrica pari a +0.00 m s.l.m. la forzante è costituita dal

vento frequente che spira da ovest con velocità pari a 2.3 m/s.

Dal punto di vista delle velocità queste simulazioni mostrano valori del modulo estremamente modesti e rivestono scarso interesse. Il dislivello generato sulla superficie è impercettibile, dell'ordine di 10^{-2} m.

Nel caso dei venti da Ovest (Figura 9-22), le correnti entrano nell'insenatura della Chiavica Scirocca da SW e ne escono con direzione N, dove si congiungono con le linee di corrente provenienti da NE che corrono parallele all'arginatura. Il senso del moto all'interno del canale sublagunare in fregio all'argine è dunque opposto alla direzione del vento, come era lecito attendersi.

La porzione occidentale del bacino coincidente con la valle Lido di Porto (ad ovest della penisola Boscoforte) è caratterizzata dalla presenza di zone di circolazione separate che tendenzialmente impediscono uno scambio completo dei volumi d'acqua con quelli della Valle Lido di Magnavacca, diversamente da quanto accade in presenza del vento più intenso proveniente da NE .

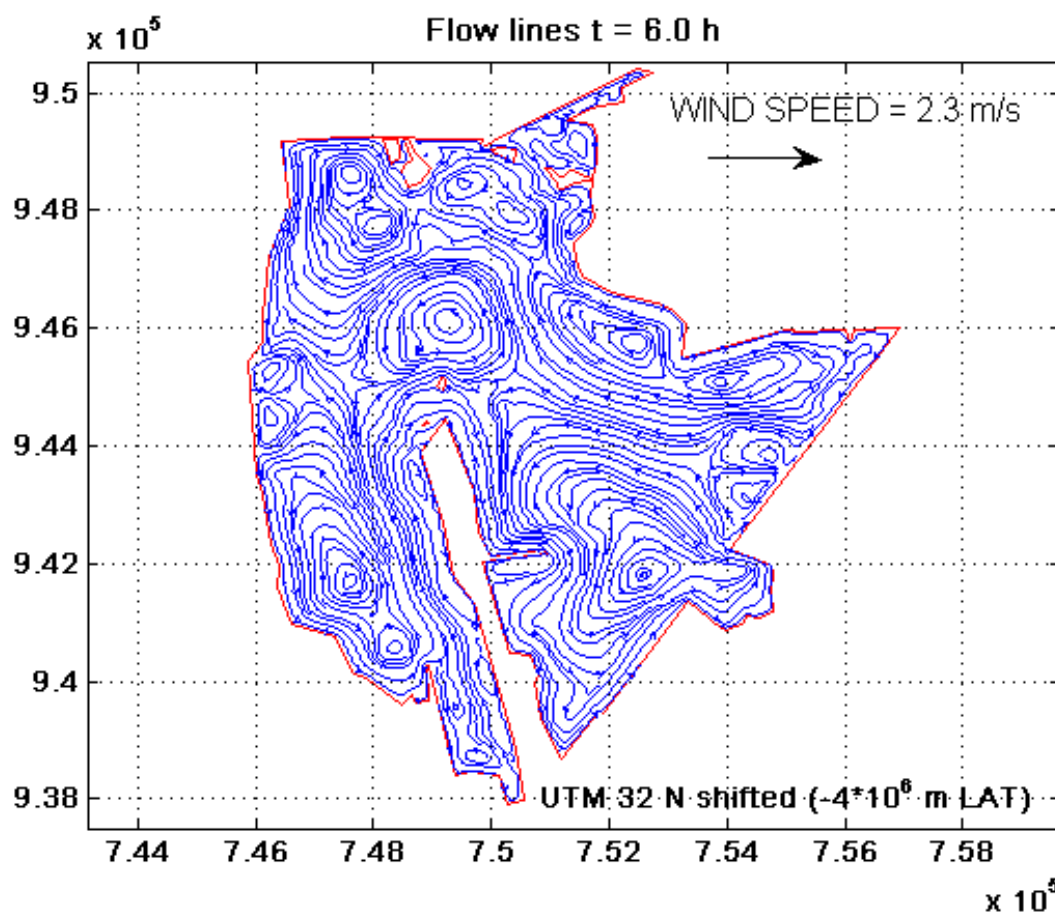


Figura 9-22 SDF_N_VW2.3 Stato di fatto. Vento da O 2.3 m/s. Linee di corrente, visione d'insieme

Riguardo la porzione Nord-Orientale (zona Foce), si evidenzia un sistema di circolazione complesso racchiuso da un vortice principale in senso antiorario (Figura 9-23). Nella porzione più orientale di

Valle Cona si instaura una circolazione con verso orario che ostacola gli scambi idrici con la Valle grande a sud.

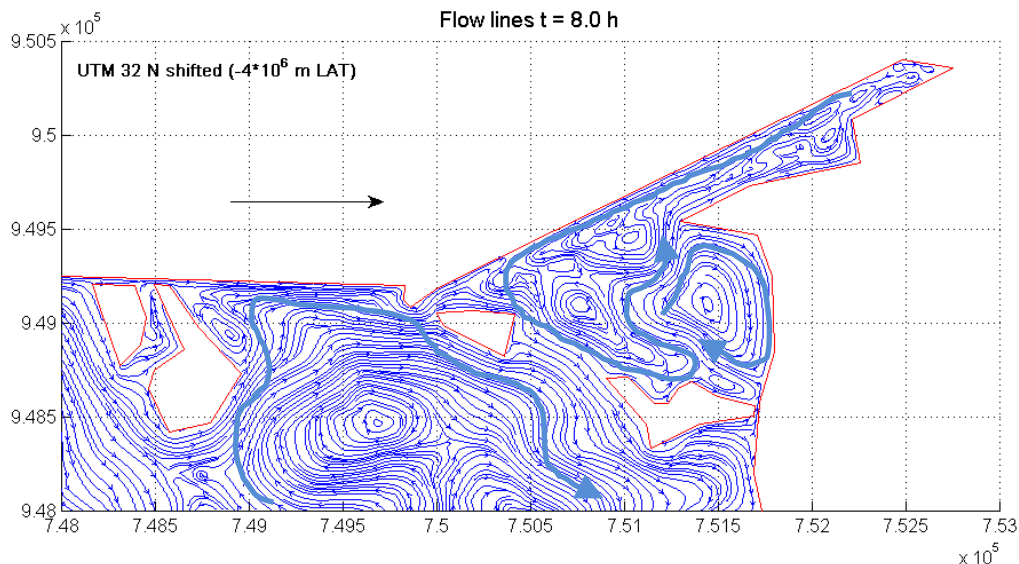


Figura 9-23 **SDF_N_VW2.3** Stato di fatto. Vento da O 2.3 m/s. Linee di corrente, particolare zona Nord-Est (canale Foce)

9.2 Simulazioni dello stato di fatto sul bacino Sud-Est 1 (SDF_SE1).

La presenza dell'argine in fase di costruzione lungo il confine Ferrara-Ravenna, determina la separazione di una porzione meridionale della Valle pari a circa 7.5 km^2 (Figura 9-24). Lungo il perimetro meridionale del bacino sono presenti la chiavica Pedone e Leonarda, al fine di favorire gli scambi con i volumi di acqua salata che risalgono dalla foce Reno fino alla traversa di Volta Scirocco.

Nello stato di fatto sono stati analizzati gli scenari associati all'apertura delle chiaviche Pedone e Leonarda localizzata sul confine meridionale del bacino nonché alla forzante vento nella configurazioni del vento più intenso e più frequente (in questi ultimi casi le simulazioni hanno la durata di 5 ore sufficienti a garantire condizioni di equilibrio stazionario):

- **SDF_SE1_VNE11.7** Evento estremo, direzione NE – SW, 11.7 m/s (probabilità di superamento 5% da funzione di probabilità cumulata di Weibull associata alla direzione NE).
- **SDF_SE1_VW2.3** Evento più frequente, direzione W – E, 2.3 m/s
- **SDF_SE1_MCPL** Apertura delle chiaviche a Sud (Pedone e Leonarda)



Figura 9-24 La porzione meridionale della valle racchiusa dall'argine (bacino SE1) e i manufatti idraulici attivi (chiaviche Pedona e Leonarda).

Si ricorda, come anticipato nel paragrafo 4, che i bacini Sud non sono influenzati dalla subsidenza attesa negli scenari previsionali qui considerati, tanto che secondo i risultati del modello geomeccanico [1] l'abbassamento relativo è ovunque inferiore al centimetro nello scenario più cautelativo proiettato al 2030. Questo valore non è tale da comportare alcuna modifica all'assetto idrodinamico per le forzanti analizzate. Quindi le simulazioni per i bacini Sud si limiteranno allo stato di fatto.

9.2.1 Venti estremi da Nord-Est (SDF_SE1_VNE11.7)

La condizione iniziale delle simulazioni è di quiete con piezometrica a quota +0.10 m s.l.m.

L'analisi dei risultati delle simulazioni mostra che per vento estremo (intensità pari a 11.7 m/s) la velocità massima in laguna è di poco inferiore a 0.2 m/s in corrispondenza dell'argine esistente sud-est di confine con la Valle Smarlacca, mentre la velocità media in laguna è di circa 0.05 m/s. Il dislivello massimo generato sulla superficie libera è di poco superiore a 5 cm. I valori maggiori delle velocità si riscontrano in corrispondenza delle zone di bordo meno profonde. Le Figura 9-25, Figura 9-26, Figura 9-27 e Figura 9-28 riportano i risultati in forma grafica. Il lembo di bacino più meridionale in prossimità dell'ansa del Diavolo nel F. Reno, mostra una ampia zona di ricircolo che limita gli scambi idrici con la rimanente porzione dello stesso.

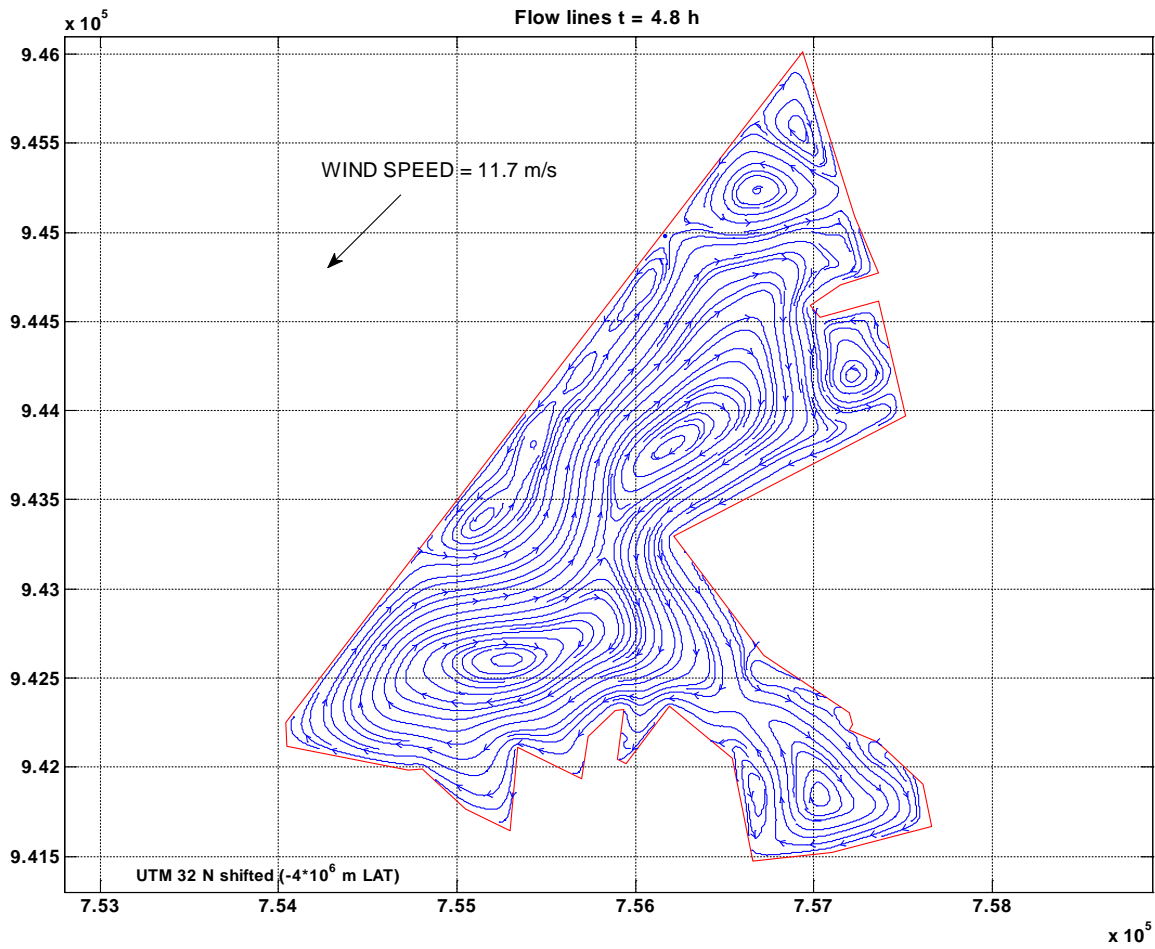


Figura 9-25 SDF_SE1_VNE11.7 Stato di fatto. Bacino SE1. Vento estremo da NE 11.7 m/s. Linee di corrente

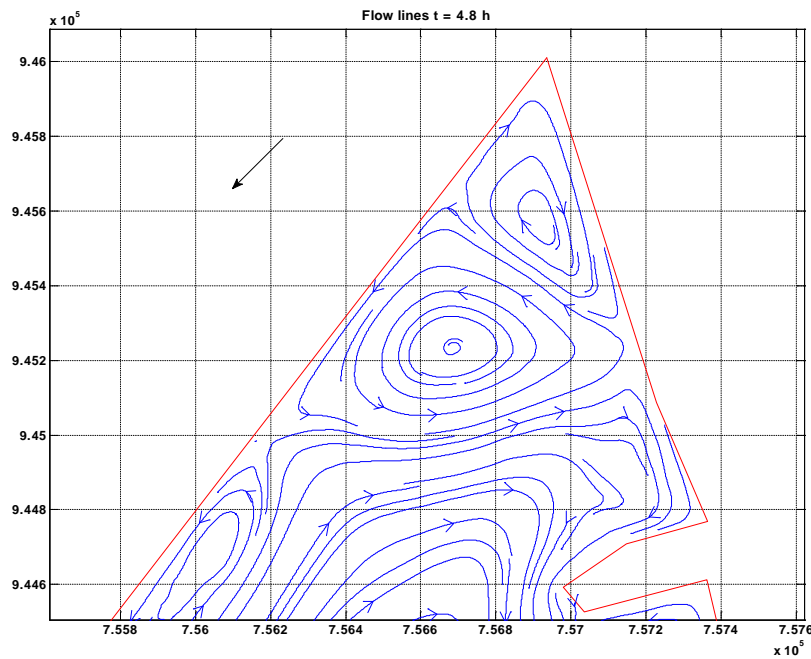


Figura 9-26 SDF_SE1_VNE11.7 Stato di fatto. Bacino SE1. Vento estremo da NE 11.7 m/s. Linee di corrente - particolare sul vertice nord-orientale.

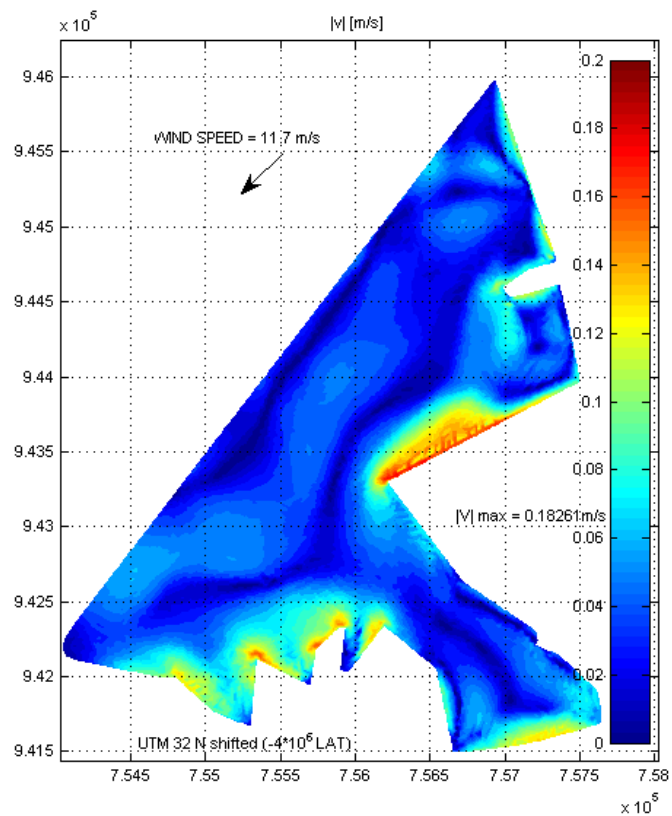


Figura 9-27 SDF_SE1_VNE11.7 Stato di fatto. Bacino SE1. Vento estremo da NE 11.7 m/s. Modulo delle velocità

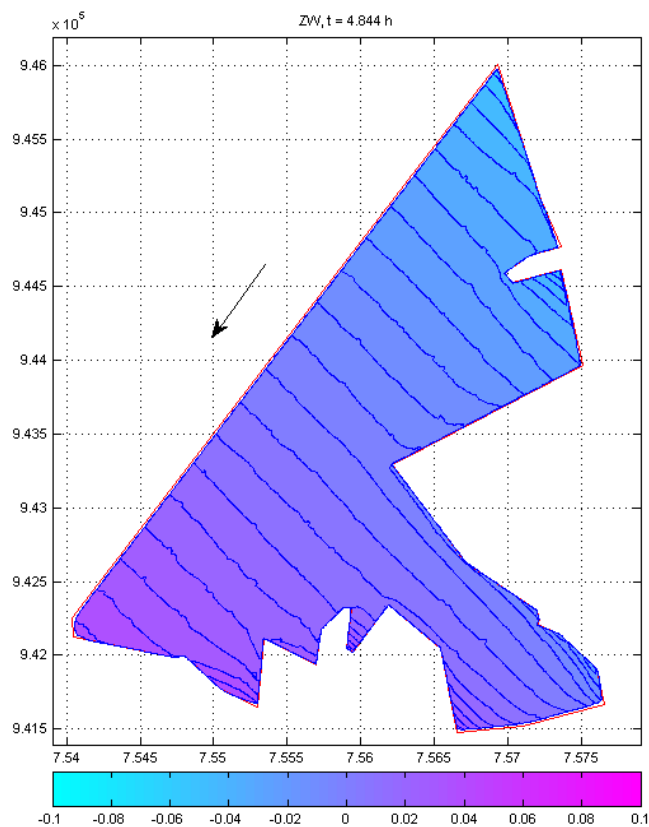


Figura 9-28 SDF_SE1_VNE11.7 Stato di fatto. Bacino SE1. Vento estremo da NE 11.7 m/s. Dislivello rispetto la quiete

9.2.2 Venti frequenti da Ovest (SDF_SE1_02.3)

La condizione iniziale delle simulazioni è di quiete con livello del pelo libero pari a +0.00 m s.l.m.

Questi scenari sono stati scelti per l'elevata frequenza di venti provenienti da Ovest, caratterizzati da bassa intensità. Nelle simulazioni si è assunto un valore costante del vento pari a 2.3 m/s.

Dal punto di vista del campo di moto delle velocità queste simulazioni rivestono limitato interesse. La velocità massima che si registra è molto modesta, pari a circa 0.06 m/s. Il dislivello generato sulla superficie libera tra margini opposti del bacino è irrilevante.

Nelle Figura 9-29 e Figura 9-30 si riportano i grafici delle linee di corrente omettendo i grafici di livello e velocità per i motivi appena esposti.

In corrispondenza del margine settentrionale costituito dall'arginatura, per venti da Ovest le linee di corrente hanno direzione NE nella parte settentrionale e SO in quella meridionale. All'estremo margine meridionale le linee di corrente hanno verso concorde a quello del vento.

I vertici del bacino si caratterizzano per la presenza di zone di ricircolo (di dimensioni variabili) che non favoriscono lo scambio dei volumi con la rimanente porzione del bacino.

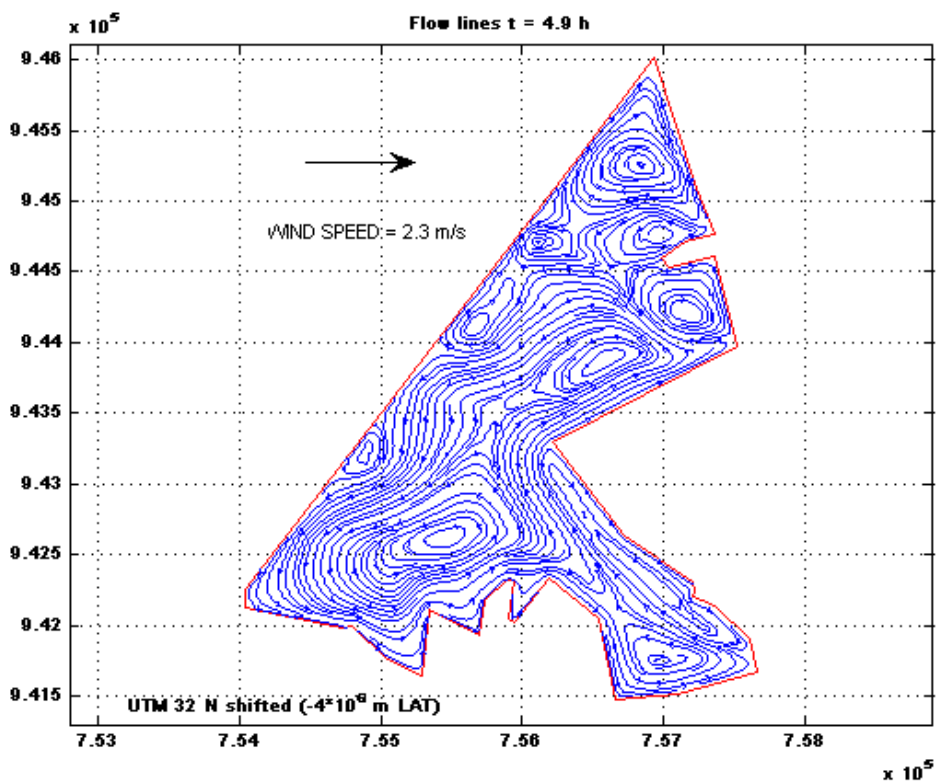


Figura 9-29. SDF_SE1_VW2.3 Linee di corrente

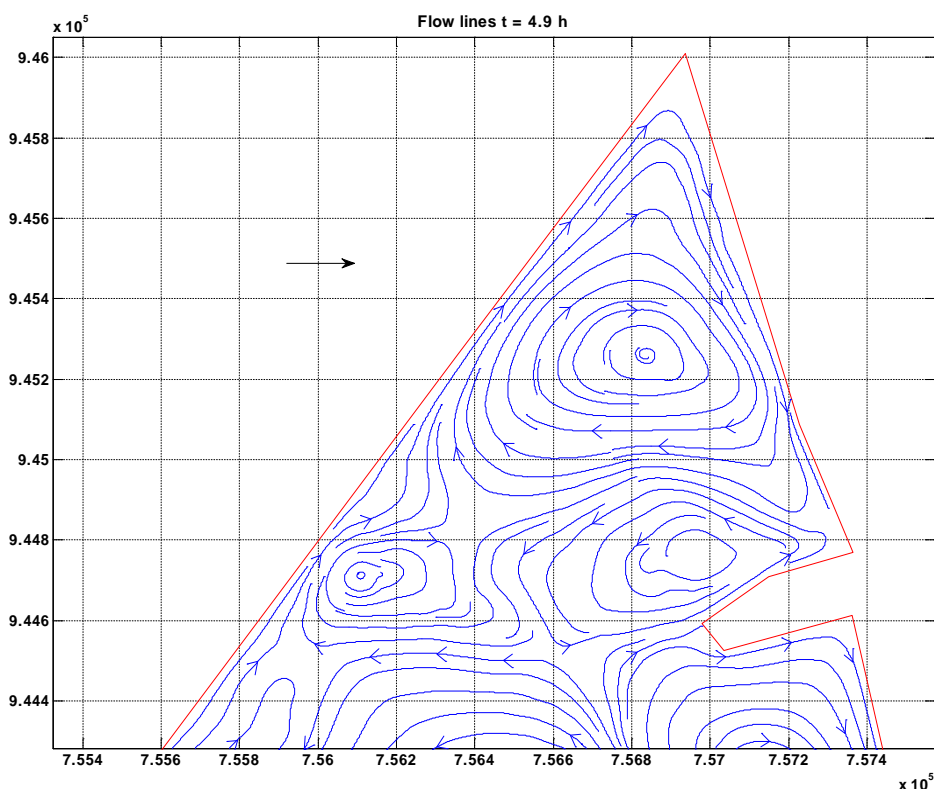


Figura 9-30 SDF_SE1_VW2.3 (vento da W 2.3 m/s) Linee di corrente - particolare

9.2.3 Apertura delle chiaviche Leonarda e Pedona (SDF_SE1_MCPL)

In considerazione della separazione del bacino SE dalla restante porzione della Valle Magnavacca, è rilevante indagare la configurazione del campo di moto nel bacino di acque private anche in conseguenza delle manovre alle chiaviche pedona e Leonarda.

Stante l'obiettivo del presente lavoro, si rinuncia alla rappresentazione del campo di moto effettivo lungo i canali che convogliano i volumi derivati dalle chiaviche verso la Valle (e viceversa). Pertanto nel modello la condizione al contorno è stata imposta lungo il perimetro della Valle in modo "puntuale".

La condizione al contorno imposta alle chiaviche è espressa in termini di oscillazione di livello prodotto dalla marea (v. paragrafo 6). In Figura 9-31 e Figura 9-32 (rispettivamente per la chiavica Leonarda e Pedona) si riportano l'andamento dei livelli e delle portate.

Le velocità massime in vicinanza delle chiaviche possono superare i 0.3 m/s al picco di portata in entrata. Ciò non ostante le velocità tendono a smorzarsi molto rapidamente allontanandosi dalla sezione di imbocco, diventando inapprezzabili a già a poche decine di metri dalla sezione di imbocco. I picchi di portata scambiati attraverso la chiavica Pedona hanno valore doppio rispetto a quelli relativi alla chiavica Leonarda.

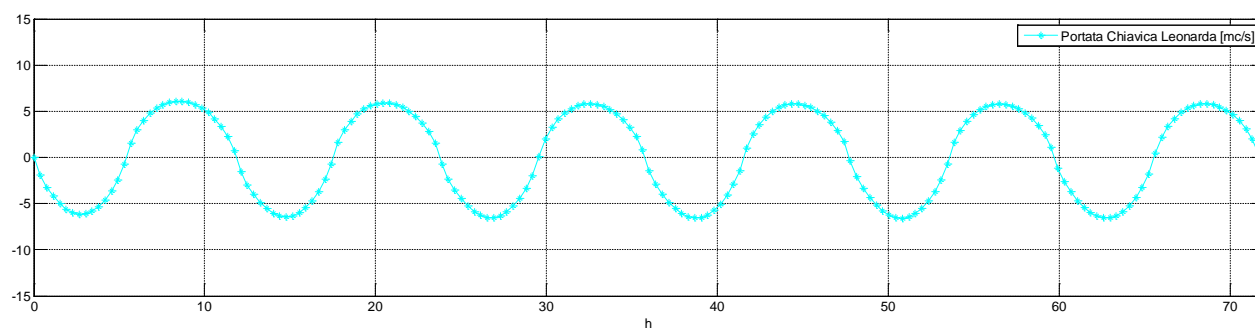
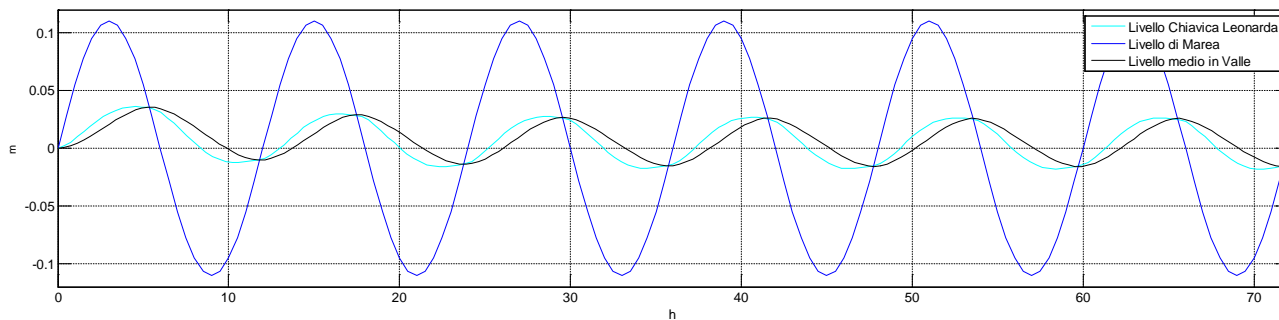


Figura 9-31 **SDF_SE1_MCS** (Bacino SE1 apertura chiaviche Sud) Dettaglio Chiavica Leonarda

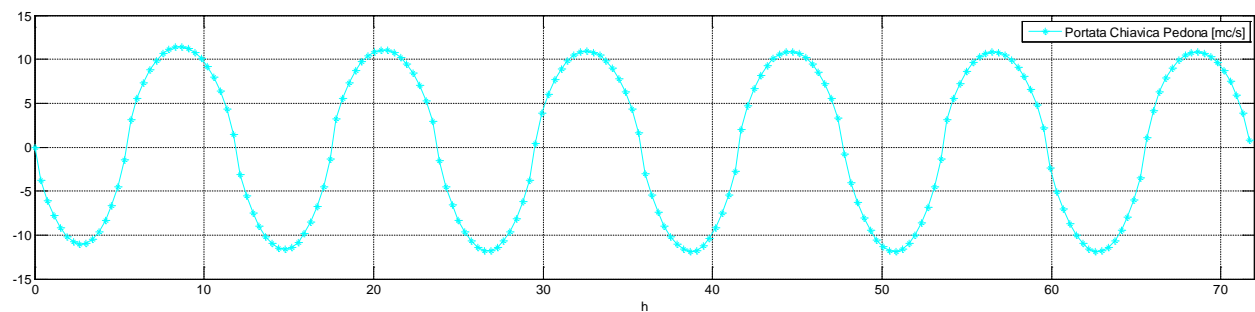
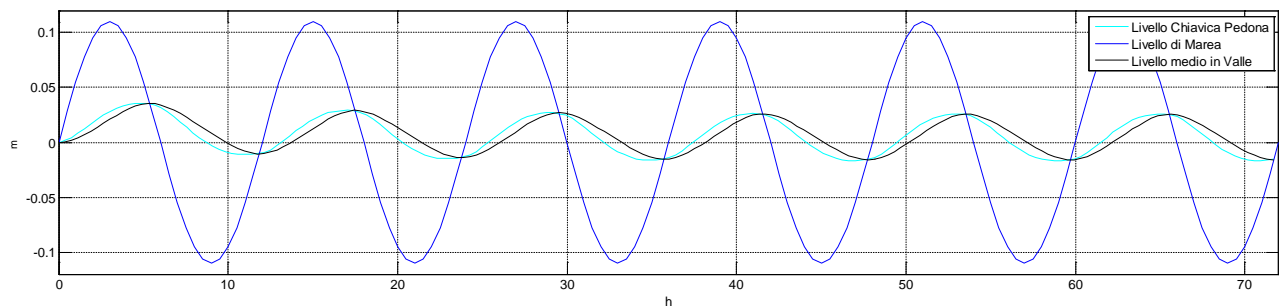


Figura 9-32 **SDF_SE1_MCS** (Bacino SE1 apertura chiaviche Sud) Dettaglio Chiavica Pedona

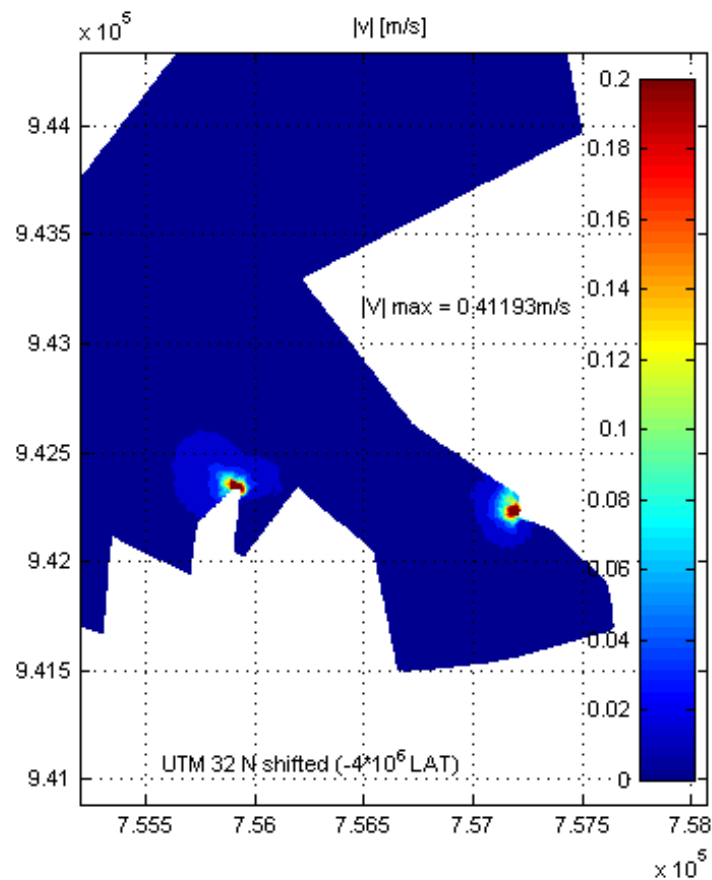


Figura 9-33 *SDF_SE1_MCS* Stato di fatto. Bacino SE1. Apertura Chiaviche Sud. Modulo velocità. Picco di portata in uscita (bassa marea)

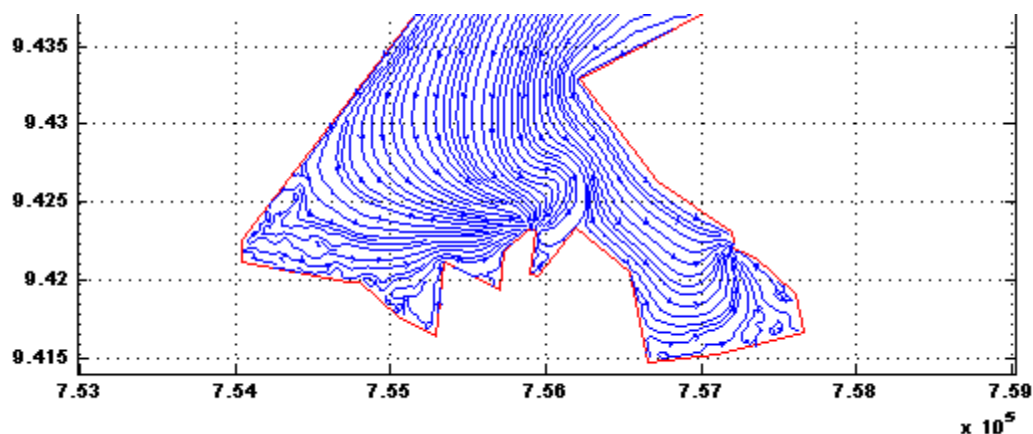


Figura 9-34 *SDF_SE1_MCS* Stato di fatto. Bacino SE1. Apertura Chiaviche Sud.. Linee di flusso locali in condizione di bassa marea (portate in uscita).

L'effetto dell'azione delle chiaviche sul campo della circolazione si manifesta con un ordinato orientamento delle linee di corrente, soprattutto in occasione delle basse maree. Il volume complessivamente scambiato attraverso le due chiaviche attive contemporaneamente, è pari a circa il 3% del totale contenuto nel bacino ad ogni ciclo di marea di 12 ore

9.3 Simulazioni dello stato di fatto sui bacini Sud-Est 2 (SDF_SE2).

I piccoli bacini meridionali (Valle Scirocca e Lavadena) già prima della realizzazione dell'argine in fase di ultimazione, erano idraulicamente separati dal sistema principale della valle Lido di Magnavacca. Nella configurazione dello stato di fatto pertanto mantengono tale caratteristica e le modellazioni sono state condotte separatamente per ciascuno di essi (Figura 9-35, in considerazione delle forzanti stabilite. In assenza di manufatti idraulici significativi, sono stati considerati solo i due scenari di vento (frequente ed estremo); infatti la chiavica Scirocca è caratterizzata per capacità di efflusso relativamente modesta e non viene qui considerata.



Figura 9-35 Batimetrica delle valli private a Sud-Est (bacini SE2).

I due bacini (bacino SE2-A Valle Scirocca a ovest - bacino SE2-B Valle Lavadena a est) sono separati e autonomi.

Dunque gli scenari analizzati sono i seguenti:

- **SDF_SE2_VNE11.7** Evento estremo, direzione NE – SW, 11.7 m/s (probabilità di superamento 5% da funzione di probabilità cumulata di Weibull associata alla direzione NE). Tutte le simulazioni hanno la durata di 5 ore.
- **SDF_SE2_VW2.3** Evento più frequente, direzione W – E, 2.3 m/s

9.3.1 Venti estremi da Nord-Est (SDF_SE2_VNE11.7)

La condizione iniziale delle simulazioni è la quiete con piezometrica a quota +0.10 m s.l.m. Le simulazioni sono state protrate per una durata non inferiore alle 6 ore (del prototipo) al fine di garantire il raggiungimento di uno stato stazionario.

Per vento estremo (intensità pari a 11.7 m/s) la velocità massima calcolata (Figura 9-36) è pari a circa 0.18 m/s; in corrispondenza dei bassifondali lungo gli argini perimetrali; la velocità media nei bacini è di circa 0.05 m/s.

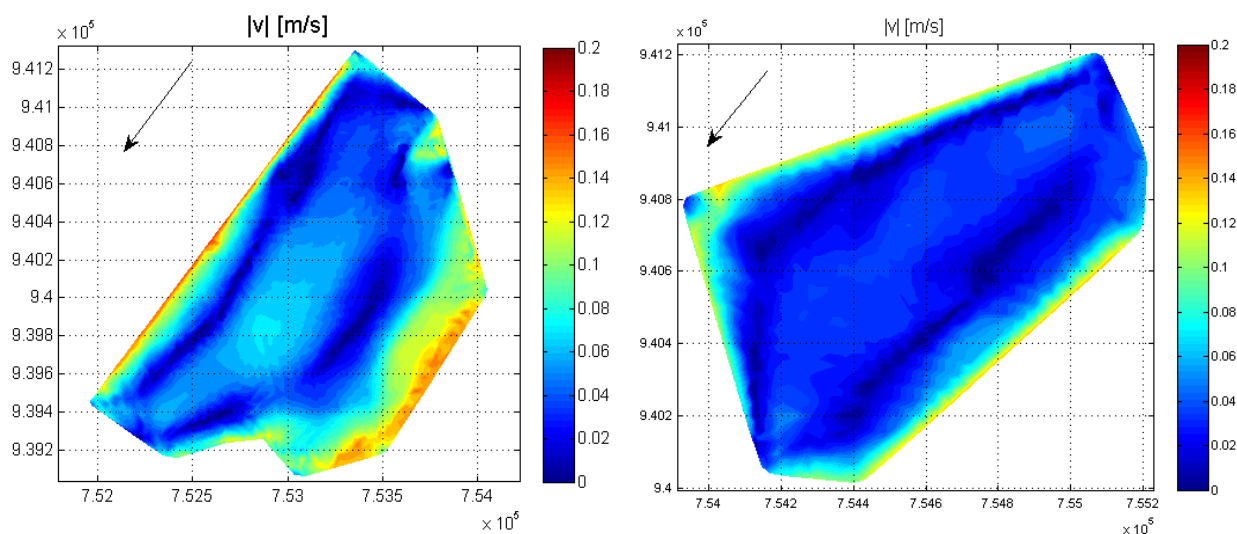


Figura 9-36 SDF_SE2_VNE11.7 Stato di fatto. Bacini SE2 (SE2-A sx-SE2-B dx). Vento da NE 11.7 m/s. campo delle velocità mediate sulla verticale

Per entrambi i bacini si evidenzia una linea di flusso in direzione SO-NE opposta al verso del vento (Figura 9-37), che separa due ampie zone di ricircolo a nord (verso antiorario) e a sud (verso orario). Il massimo sovrizzo del pelo libero è contenuto nell'ordine di 5-8 cm sul margine sud ovest dei bacini (Figura 9-38). Il dislivello totale è contenuto nell'ordine dei 15 cm.

In entrambi i bacini si evidenziano sempre zone a circolazione antioraria ed oraria nella porzione settentrionale e meridionale di ogni bacino, rispettivamente.

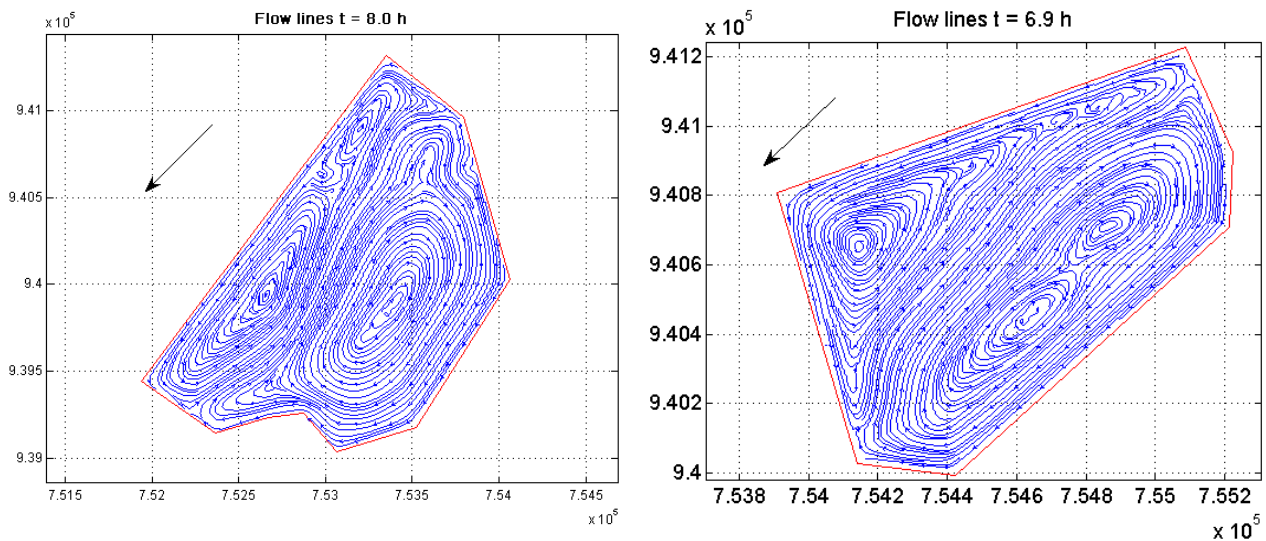


Figura 9-37 SDF_SE2_VNE11.7 Stato di fatto. Bacini SE2 (SE2-A sx; SE2-B dx). Vento da NE 11.7 m/s.
Linee di corrente

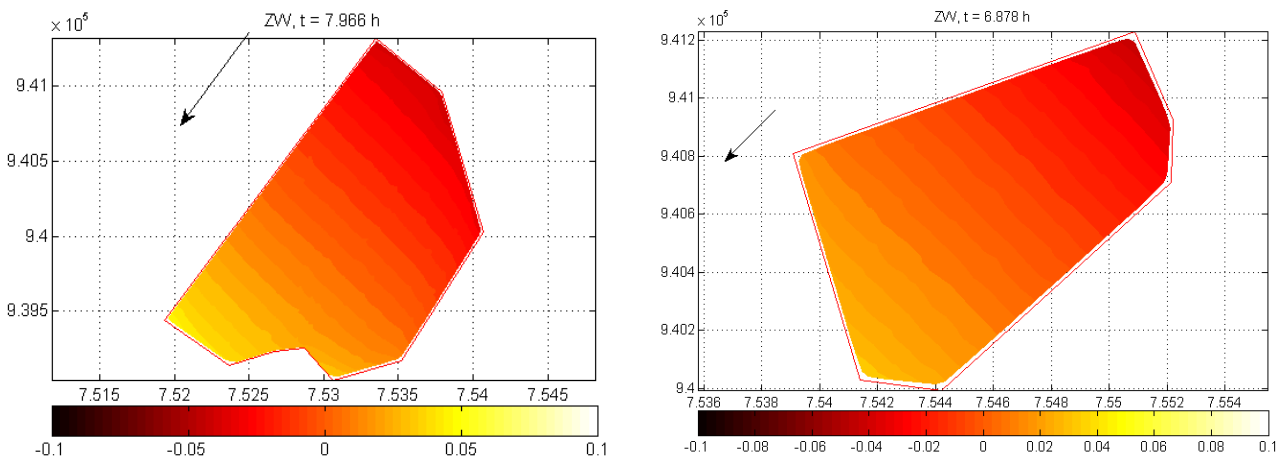


Figura 9-38 SDF_SE2_VNE11.7 Stato di fatto. Bacini SE2 (SE2-A sx; SE2-B dx). Vento da NE 11.7 m/s.
Dislivello rispetto la quiete (m)

9.3.2 Venti frequenti da Ovest (SDF_SE2_VW2.3)

La condizione iniziale delle simulazioni è la quiete con piezometrica a quota +0.10 m s.l.m. Le simulazioni sono state protrate per una durata non inferiore alle 6 ore (del prototipo) al fine di garantire il raggiungimento di uno stato stazionario. Anche per questi bacini i moduli delle velocità ed i dislivelli raggiunti sono tanto modesti da riuscire quasi inapprezzabili. Si riporta in Figura 9-39 il campo di moto in termini di linee di corrente.

In questo scenario le porzioni meridionali dei bacini sono caratterizzate da una ampia zona di ricircolo con verso antiorario. Nella porzione settentrionale il ricircolo avviene con verso orario ed è caratterizzato da una geometria più frammentata.

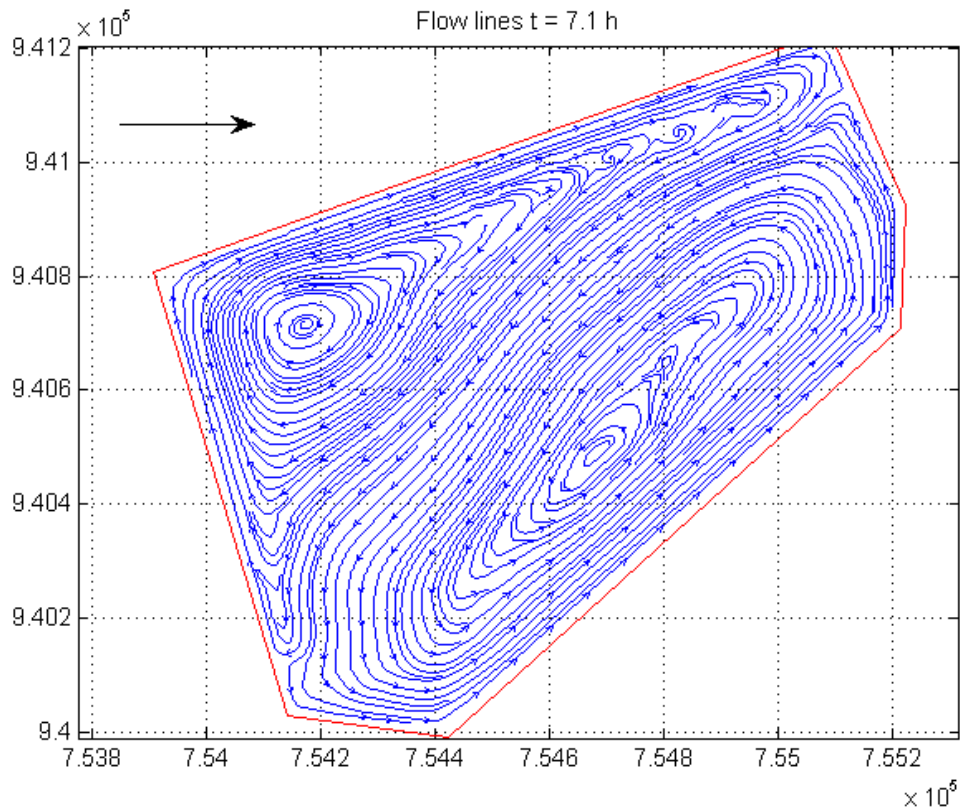
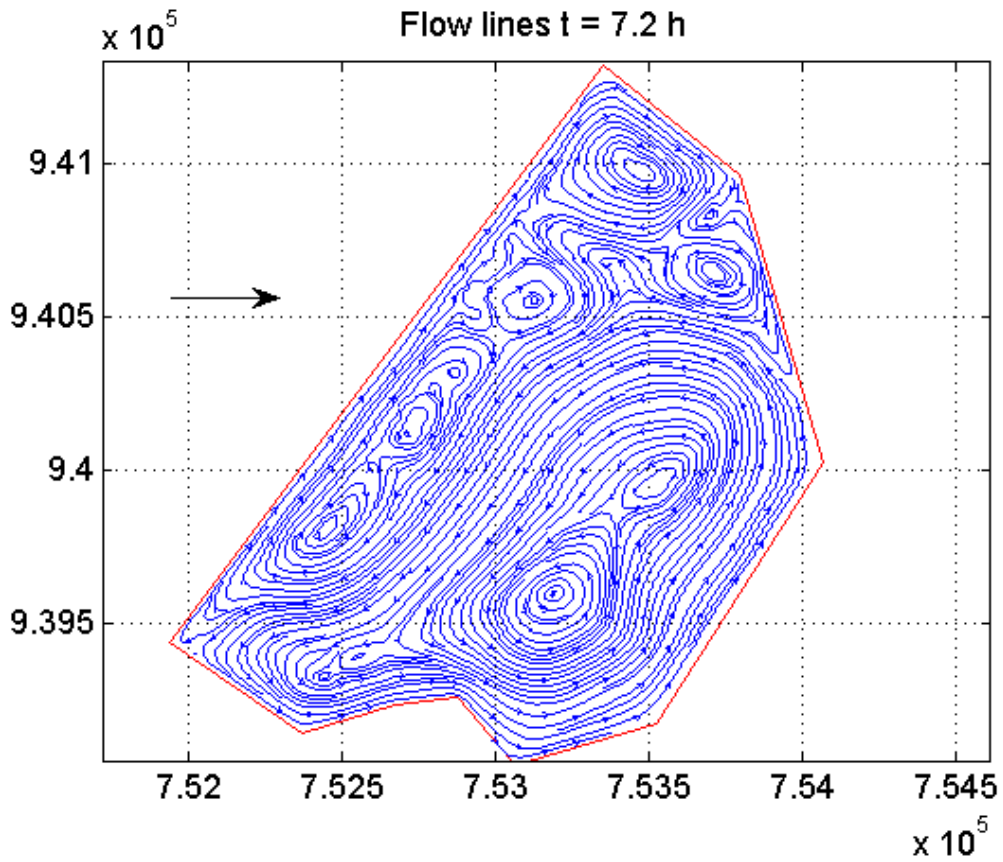


Figura 9-39 SDF_SE2_VW2.3 Stato di fatto. Bacini SE2 (SE2-A sopra; SE2-B sotto). Vento da O 2.3 m/s. Linee di corrente

10 Simulazioni nello stato previsionale di subsidenza (anno 2020)

Il modello batimetrico della laguna è ottenuto per traslazione verticale del modello DTM convenzionalmente datato 2017, ottenuto per unione dei rilievi batimetrici svolti in occasioni successive all'interno del periodo 2011-2016 (par. 3). L'entità della traslazione è commisurata ai risultati degli scenari di subsidenza qui considerati.

Poiché il cono di subsidenza (v. Figura 10-1) esaurisce i propri effetti 4-5 km a sud del vertice nord occidentale della valle, l'unico bacino ad essere coinvolto da tale fenomeno è il bacino della valle Lido di Magnavacca-Valle di Porto (Bacino N). pertanto le simulazioni si limiteranno a questo contesto lagunare.

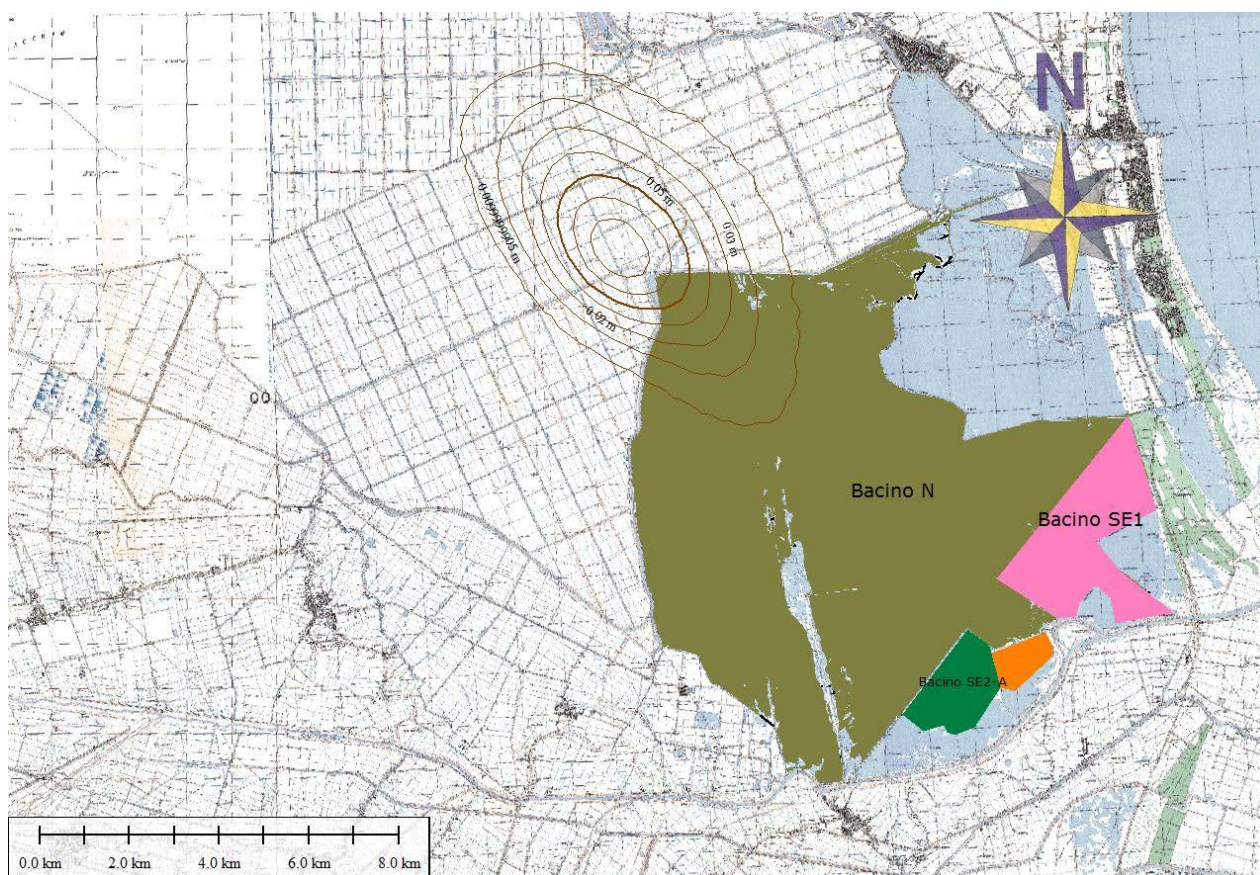


Figura 10-1 Scenario di subsidenza relativa anni 2020-2017 (scenario upper)

L'esame delle simulazioni dello stato di fatto ha evidenziato che le forzanti più significative in termini di modifica dell'assetto idrodinamico rispetto alla quiete, sono quelle associate alla azione del vento (in particolare il vento estremo proveniente da NE). Pertanto le simulazioni si limiteranno alla ricostruzione degli scenari sottoposti a queste forzanti (Tab. 10-1).

Bacino N	SUBS2020_N_VNE11.7 vento estremo da NE $v=11.7$ m/s
	SUBS2020_N_VW2.3 vento frequente da O $v=2.3$ m/s

Tab. 10-1. SUBS2020- Quadro sinottico delle simulazioni nello stato previsionale (anno 2020)

In analogia con le simulazioni condotte nello stato di fatto le forzanti (vento e manufatti idraulici) sono considerati separatamente, pertanto le simulazioni condotte con la forzante vento, comporta che tutti i manufatti idraulici siano considerati inattivi. D'altra parte i principali manufatti che insistono sul bacino N (i.e. Sifone Casa di Guardia e Casalino, chiavica Scirocca e Foce e idrovora Foce) esauriscono i propri effetti in prossimità dei manufatti stessi, pertanto la combinazione del loro funzionamento con la presenza del vento non appare significativa ai fini del presente studio. Inoltre lo scenario di subsidenza considerato (all'anno 2020) introduce modeste variazioni all'assetto batimetrico delle valli; in considerazione di ciò e della successiva finestra temporale che sarà considerata in riferimento alla subsidenza (i.e. 2030), non appare giustificato un ventaglio di scenari più ampio rispetto a quello qui considerato.

10.1.1 Simulazioni con forzante Vento

Le simulazioni hanno durata di almeno 5 ore sul prototipo, e comunque sempre sufficienti affinché si instauri una condizione di moto stazionario.

Ci si soffermerà con maggior dettaglio sulla zona Nord-Occidentale, perché è la porzione di Valle effettivamente soggetta al fenomeno della subsidenza (Figura 10-2).

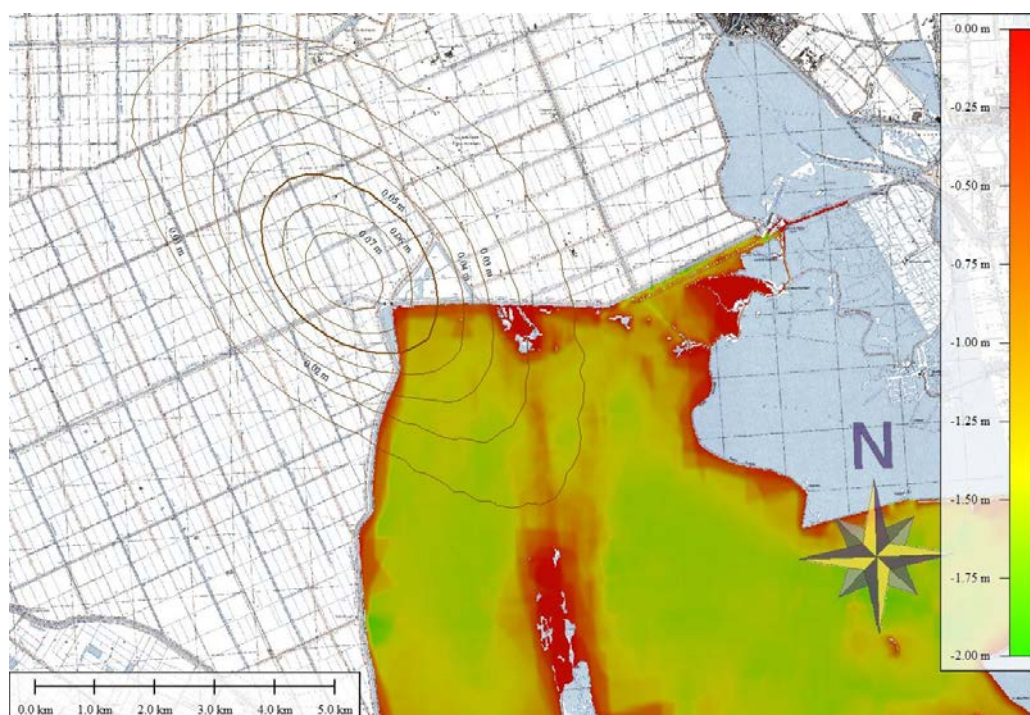


Figura 10-2 Scenario di subsidenza differenziale anni 2020-2017 (scenario upper) e andamento batimetrico della valle

10.1.2 Vento da Nord-Est (SUBS2020_N_VNE11.7)

La modifica alla batimetria introdotta nello scenario previsionale proiettato al 2020 non introduce, nel campo di moto complessivo, nessuna variazione di rilievo rispetto allo stato di fatto. Nel paragrafo 9.1, al quale si rimanda, è stata svolta una dettagliata analisi della circolazione idrodinamica in corrispondenza dei venti da NE. L'analisi non viene riproposta nella sua completezza, ci si limita a ripresentare alcune immagini con qualche commento e un dettaglio sulla zona Nord-Occidentale.

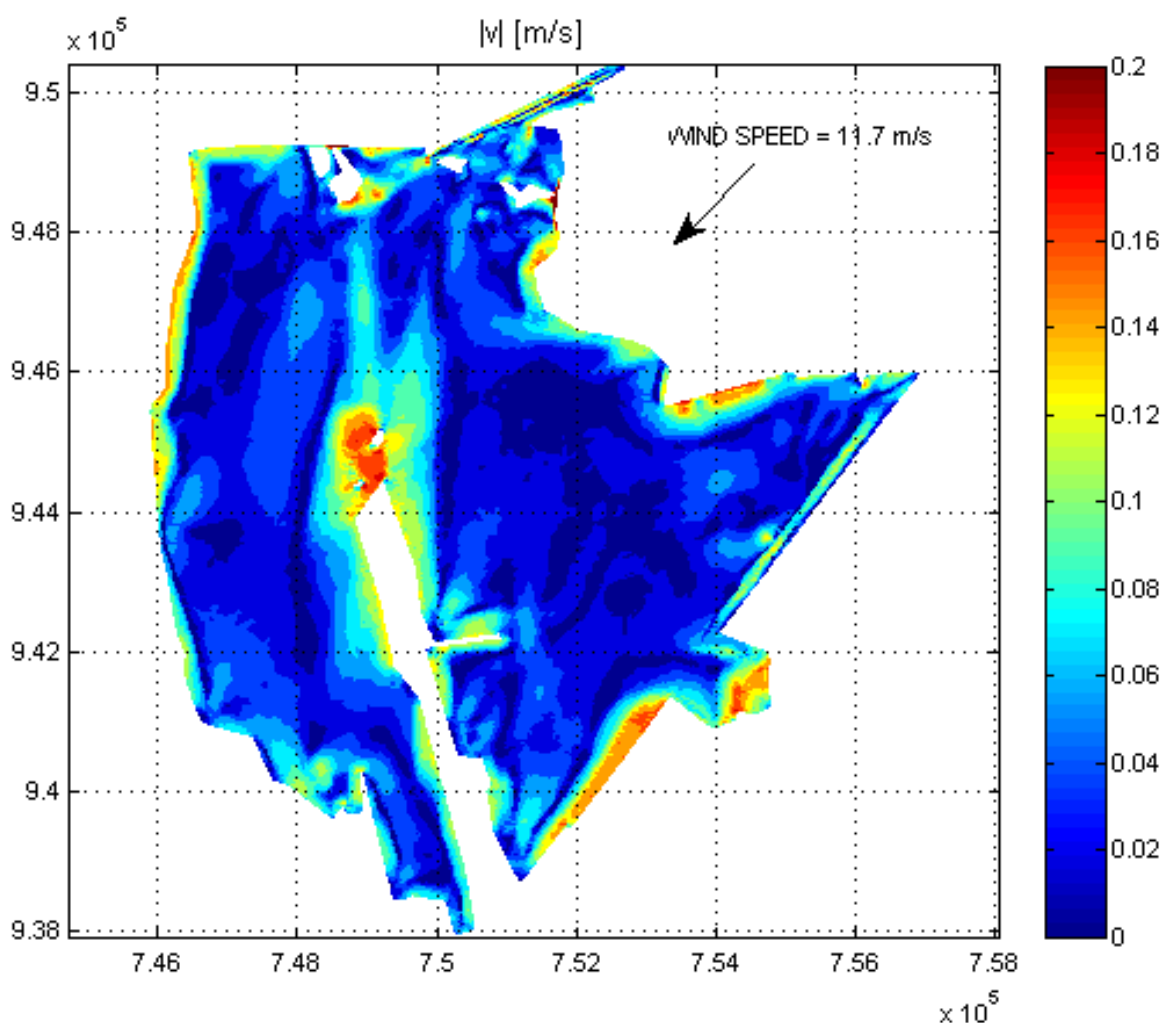


Figura 10-3 SUBS2020_N_VNE11.7 Modulo delle velocità

I valori maggiori delle velocità si riscontrano sempre in prossimità delle zone di bordo poco profonde. Per vento estremo si ottengono velocità massime intorno a 0.2 m/s e medie attorno a 0.05 m/s (Figura 10-3).

La presenza del canale sublagunare sul margine meridionale in adiacenza all'argine di separazione, induce un senso di circolazione lungo l'asse del canale (direzione NE) contrario alla direzione del

vento, garantendo un ricambio idrico dei volumi d'acqua contenuti nella insenatura proprio in occasione degli eventi più intensi, cui corrisponde una maggiore efficienza dal punto di vista della movimentazione complessiva della massa idrica.

Il punto di curvatura dell'argine rappresenta un punto di divergenza per le linee di flusso provenienti da N. Anche nella zona Nord-Orientale si sviluppa una corrente di direzione contraria al vento all'interno del Canale Foce e la circolazione all'interno della zona è oraria (Figura 10-4).

Il massimo sovrizzo del pelo libero si ha sul perimetro occidentale della Valle con prevalenza non superiore a 10 cm (Figura 10-5) rispetto allo stato di quiete.

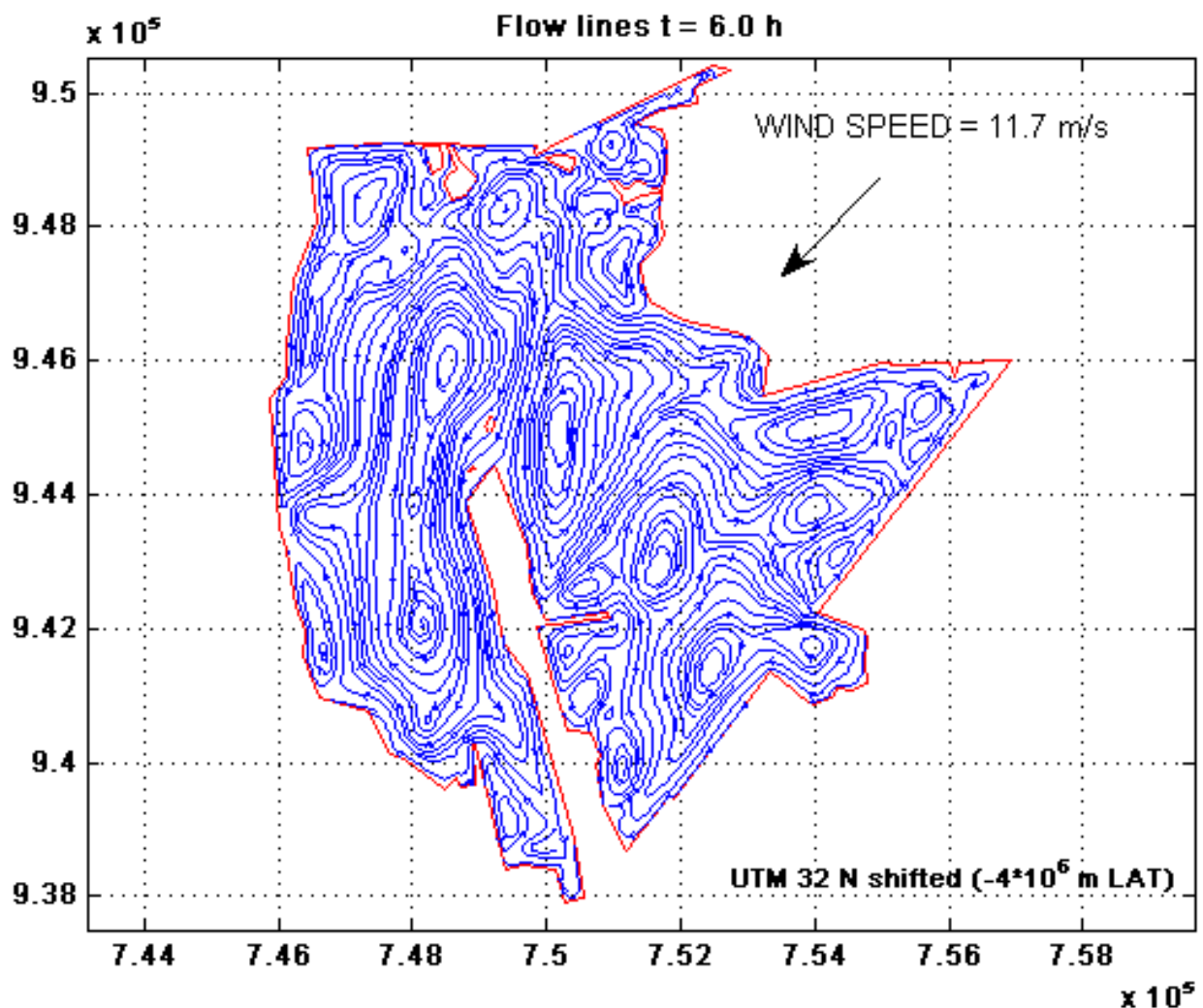


Figura 10-4 SUBS2020_N_VNE11.7 Linee di corrente

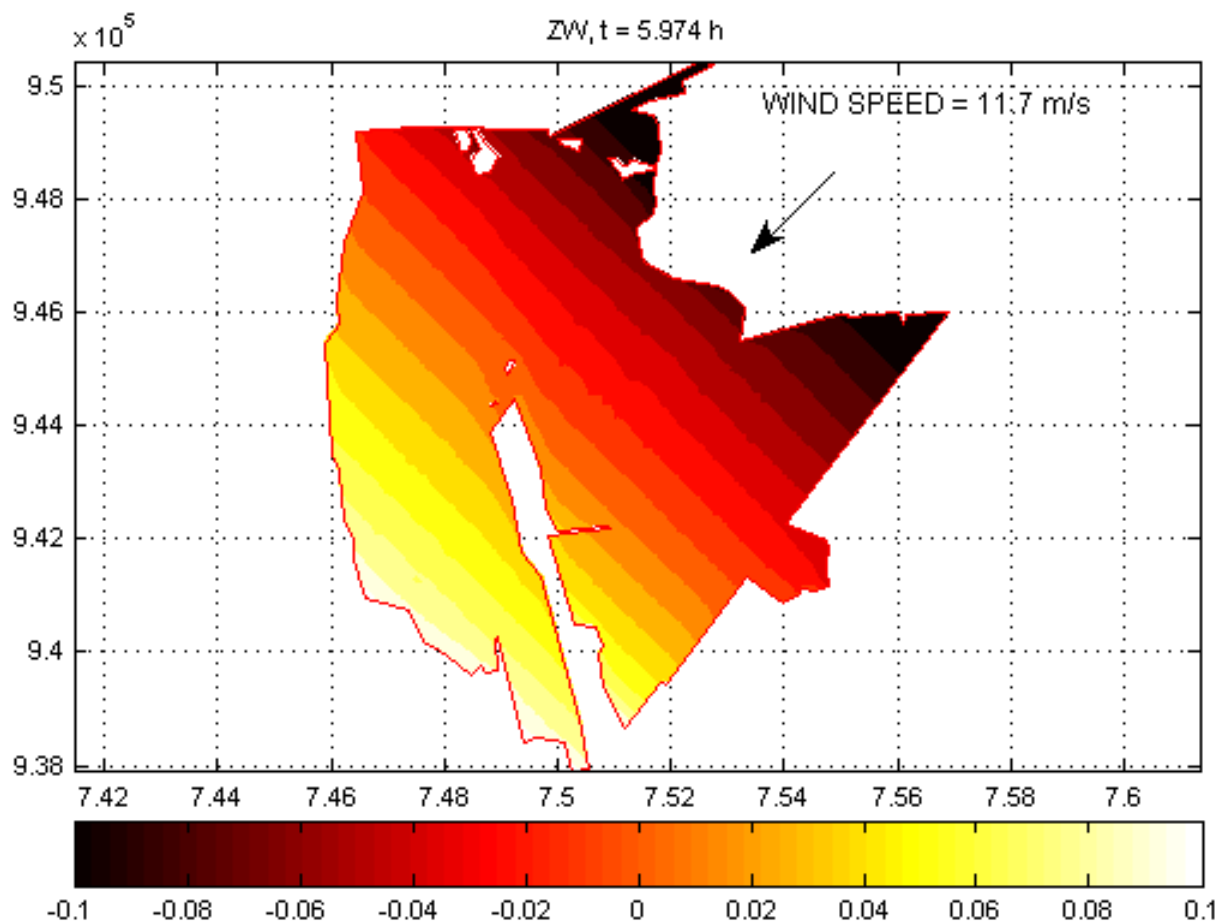


Figura 10-5 *SUBS2020_N_VNE11.7* Dislivello rispetto la quiete

Nel complesso non si apprezzano variazioni rispetto lo stato di quiete.

10.1.3 Vento da Ovest (*SUBS2020_N_VW2.3*)

I risultati della simulazione mostrano che le velocità mediate sulla verticale sono ovunque molto modeste ed i dislivelli del pelo libero inapprezzabili.

Nel caso dei venti da Ovest, le correnti entrano nell'insenatura della Chiavica Scirocca a Sud da SW e ne escono con direzione N, dove si congiungono con le linee di corrente provenienti da NE che corrono parallele all'arginatura. Il senso del moto all'interno del canale sublagunare è dunque opposto alla direzione del vento (Figura 10-6).

Riguardo la porzione Nord-Orientale (zona Foce), si evidenzia un sistema di vortici complesso racchiuso da un vortice principale in senso antiorario, con moto nel canale Foce in direzione opposta rispetto al vento, del tutto analogo a quello già riscontrato in occasione della simulazione dello stato di fatto (*SDF_N_VW2.3*).

Nel complesso non sono apprezzabili variazioni rispetto allo scenario corrispondente nello stato di

fatto.

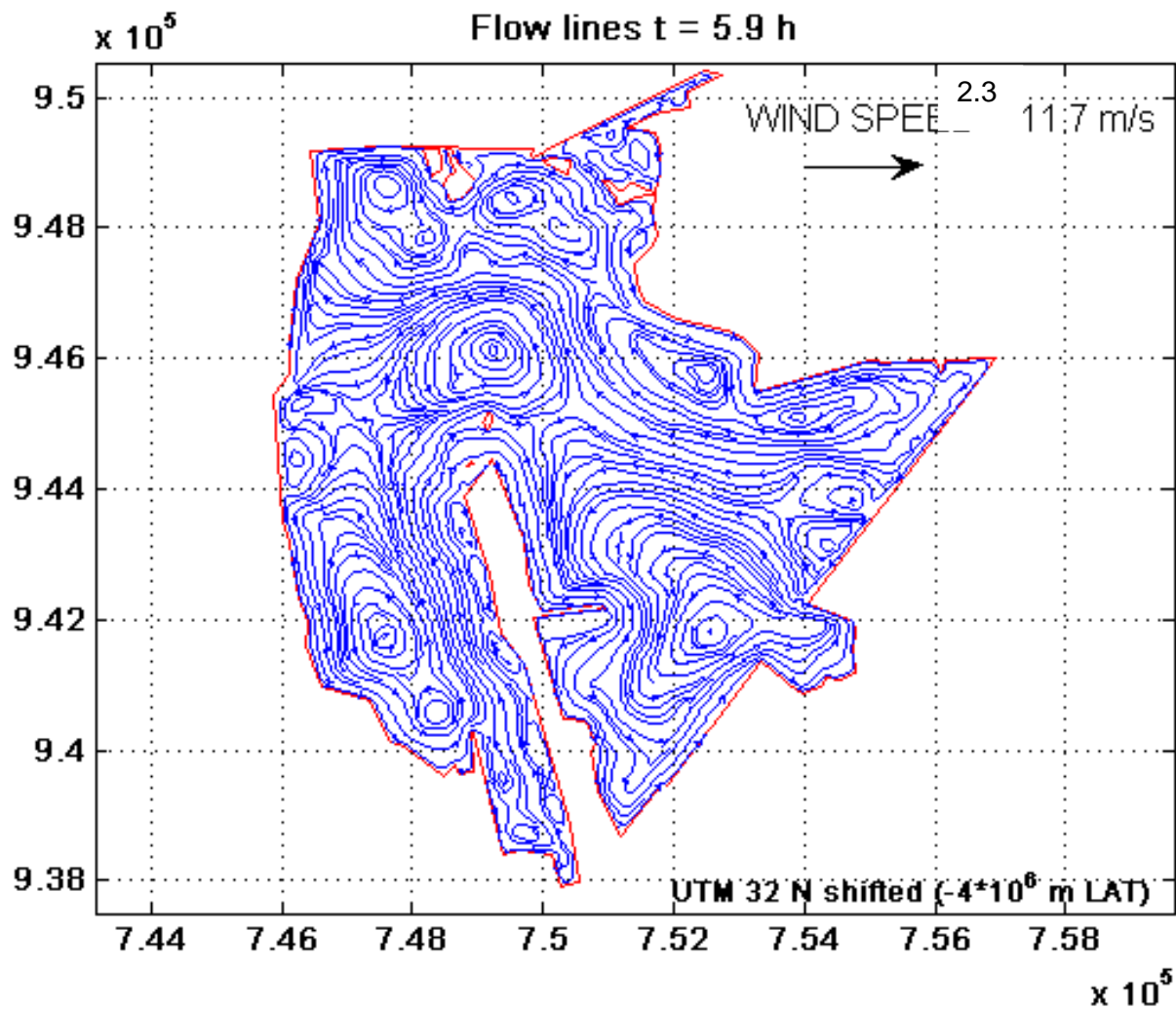


Figura 10-6 SUBS2020_N_VW2.3 Linee di corrente

11 Simulazioni nello scenario previsionale di subsidenza (anno 2030)

Lo scenario di subsidenza relativa proiettata al 2030 consegna un’abbassamento all’interno delle Valli che coinvolge la porzione settentrionale della Valle Lido di Magnavacca e Fossa di Porto, attenuandosi progressivamente da nord a sud fino ad esaurirsi al limite settentrionale della penisola di Boscoforte. Gli abbassamenti previsti nella finestra temporale 2017-2030 registrano in questa porzione territoriale il valore massimo di 15 cm in corrispondenza del lembo di Valle all’estremità NO, prospiciente il pozzo Agosta (Figura 11-1).

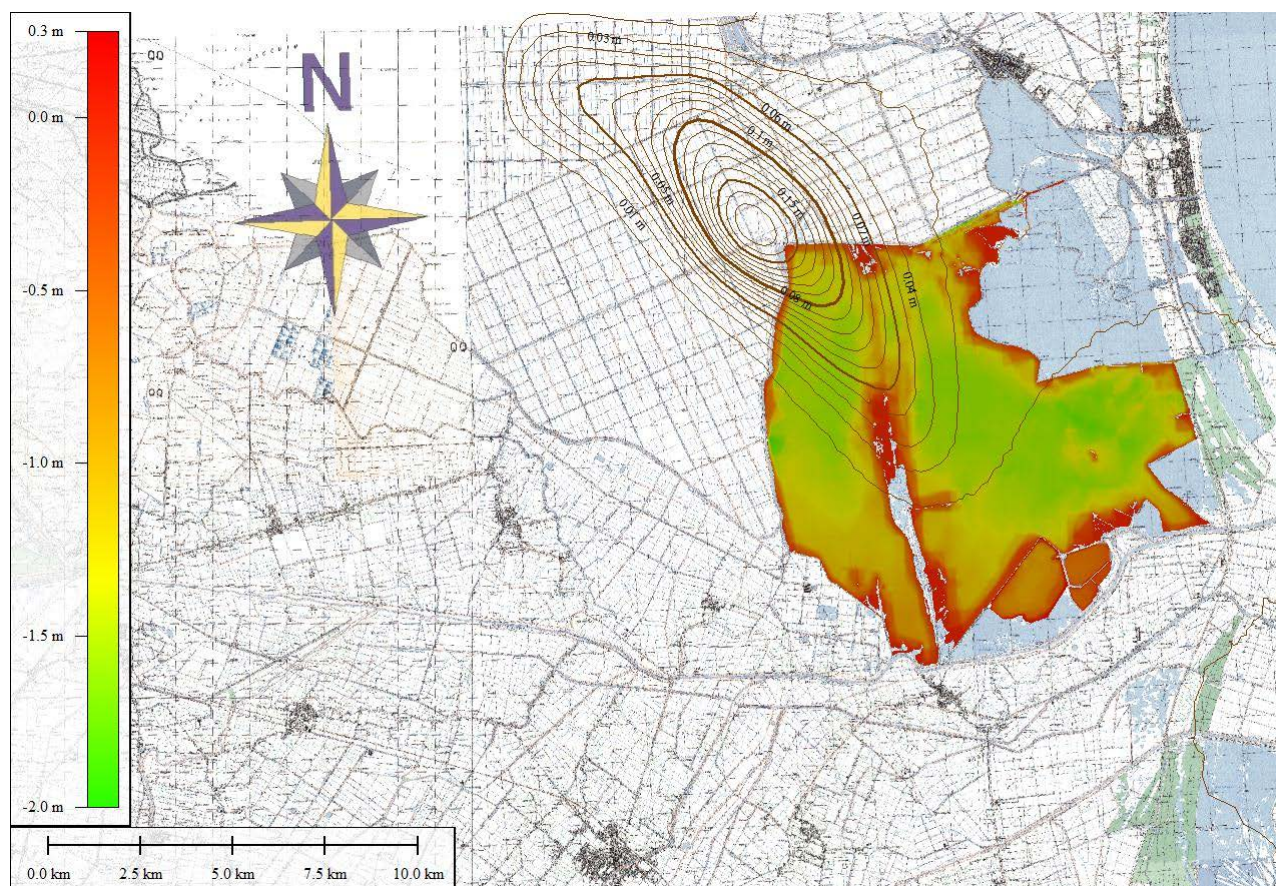


Figura 11-1 Scenario di subsidenza differenziale anni 2030-2017 (scenario upper) e andamento batimetrico delle Valli

La porzione di Valle coinvolta dagli abbassamenti dovuti alla subsidenza coinvolge il margine nord-occidentale della Valle Lido di Magnavacca e Lido Fossa di Porto, estendendosi ad est fino al limite della Valle Cona (Figura 11-2). Nonostante ciò in via cautelativa le simulazioni riferite a questo scenario di subsidenza considereranno anche l’attivazione dei manufatti idraulici posti alla stazione Foce-Fattibello. In particolare sarà considerata l’attivazione della idrovora con portate sollevate pari a $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

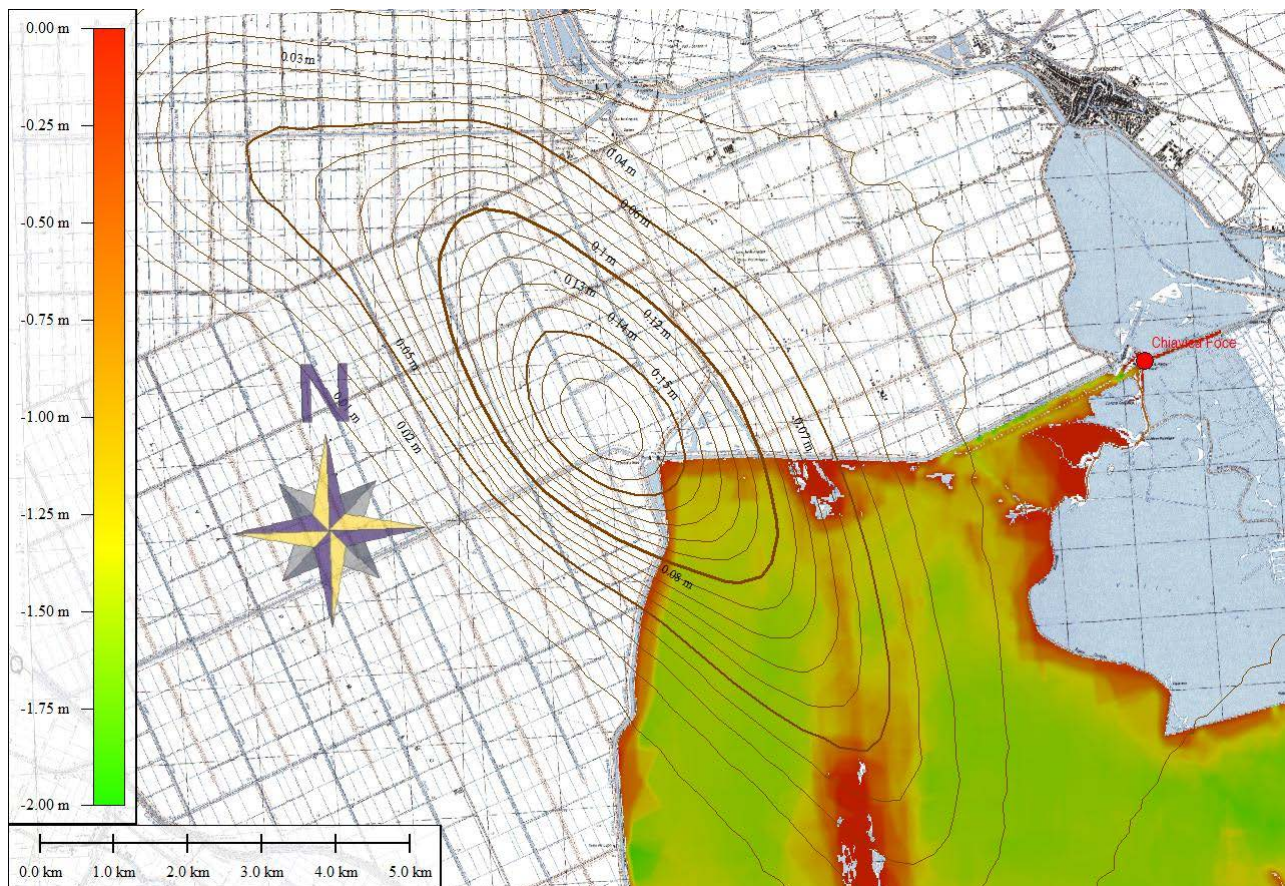


Figura 11-2 Andamento della subsidenza attesa al 2030 e batimetria delle Valli (particolare della porzione N delle Valli)

Il quadro sinottico delle simulazioni è riportato in Tab. 11-1.

Si ricorda che per le simulazioni con forzante vento, tutti i manufatti sono considerati sempre inattivi e viceversa.

Bacino N	SUBS2030_N_IDR10.0 Idrovora stazione Foce attiva ($Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$)
	SUBS2030_N_VNE11.7 vento estremo da NE $v=11.7 \text{ m/s}$
	SUBS2030_N_VO2.3 vento frequente da O $v=2.3 \text{ m/s}$

Tab. 11-1 SUBS2030. Quadro sinottico delle simulazioni nello stato previsionale (anno 2030)

1.6.2 Simulazioni con forzante Vento

Le simulazioni hanno la durata superiore alle 8 ore, sempre sufficienti affinché si instauri una condizione di moto stazionario. La condizione iniziale è fissata allo stato di quiete con quota del pelo libero pari a 0.0 m s.m.

11.1.1 Vento da Nord-Est (SUBS2030_N_VNE11.7)

La modifica alla batimetria introdotta nello scenario di previsione sull'orizzonte temporale del 2030

non introduce, nel campo di moto complessivo, variazioni di rilievo rispetto allo stato di fatto. Pertanto l'analisi condotta nel paragrafo 9.1 non viene riproposta nella sua completezza, ci si limita qui a presentare alcune immagini con qualche commento e un dettaglio sulla zona Nord-Occidentale.

L'andamento delle velocità (Figura 11-3) conferma velocità medie dell'ordine di qualche cm/s sull'intero bacino, con picchi prossimi a 0.2 m/s in corrispondenza dei margini caratterizzati da modeste profondità.

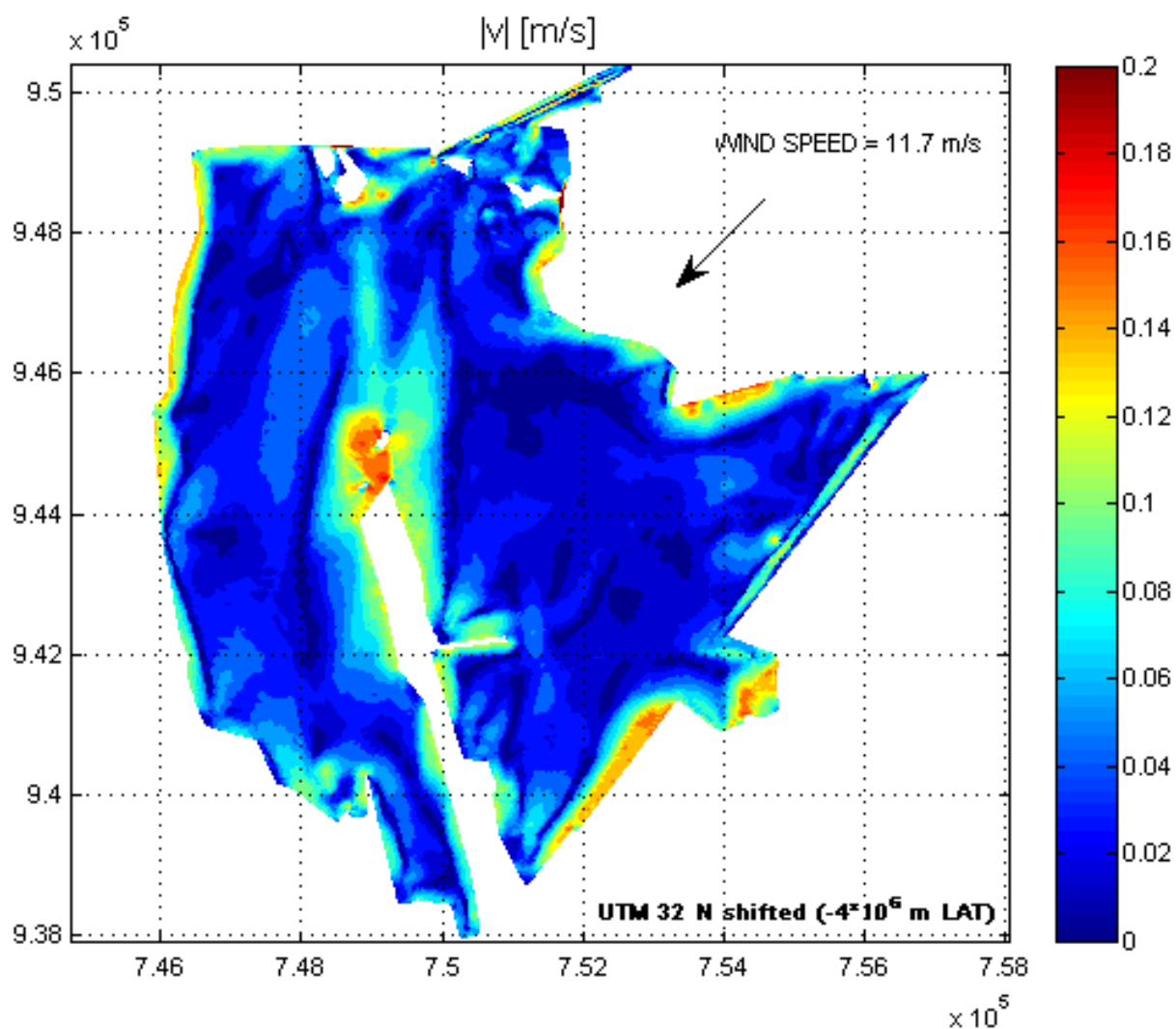


Figura 11-3 *SUBS2030_N_VNE11.7* Andamento dei moduli delle velocità

La Figura 11-4 evidenzia le ampie zone di ricircolo all'interno del bacino, mentre la Figura 11-5 riporta il dettaglio relativo al vertice NO, ove si apprezza la presenza di un ampio vortice con verso antiorario che tende ad ostacolare lo scambio dei volumi d'acqua con la rimanente porzione di Valle.

Anche in questo caso si evidenzia la presenza di un moto circolatorio antiorario che impegna per intero il vertice. I dislivelli generati confermano una prevalenza non superiore a 0.1m sul margine

estremo sud-occidentale del bacino Figura 11-6. Il massimo dislivello tra i lembi estremi delle Valli è dell'ordine di 0.2 (Figura 11-6)

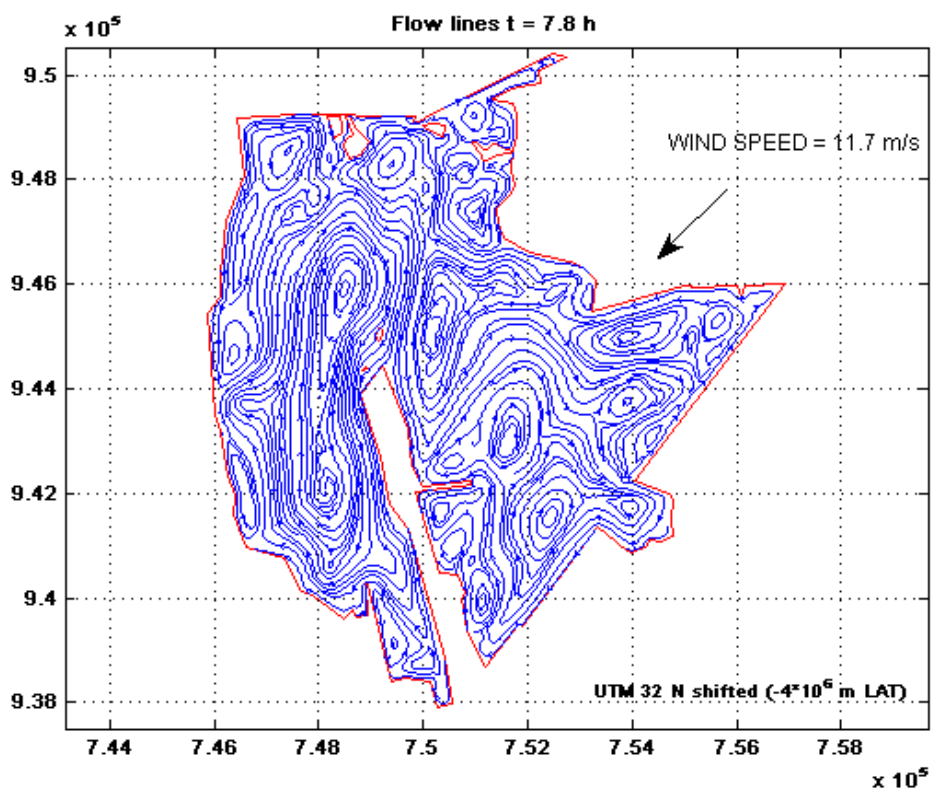


Figura 11-4 SUBS2030_N_VNE11.7 Andamento delle linee di corrente

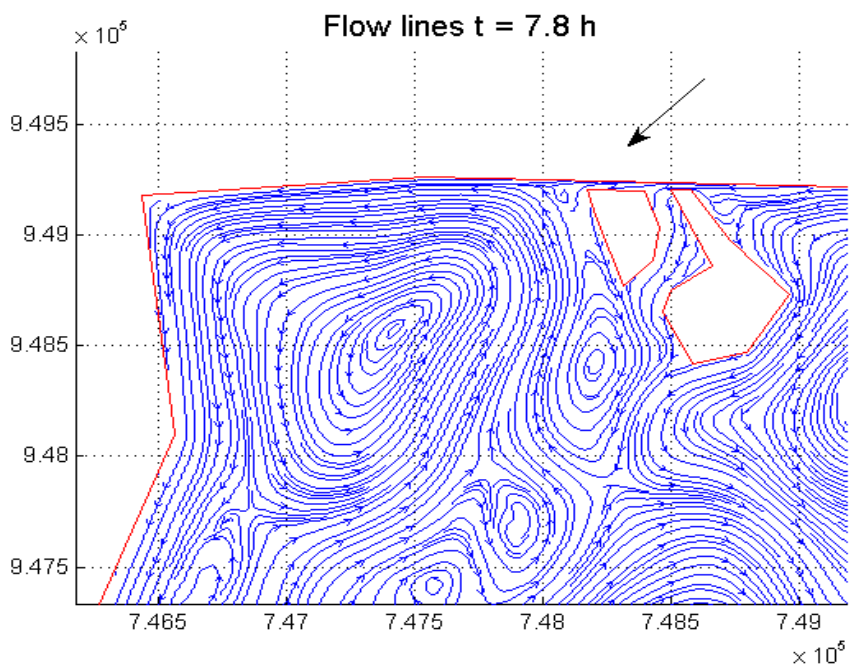


Figura 11-5 SUBS2030_N_VNE11.7 Linee di corrente particolare zona Nord Ovest

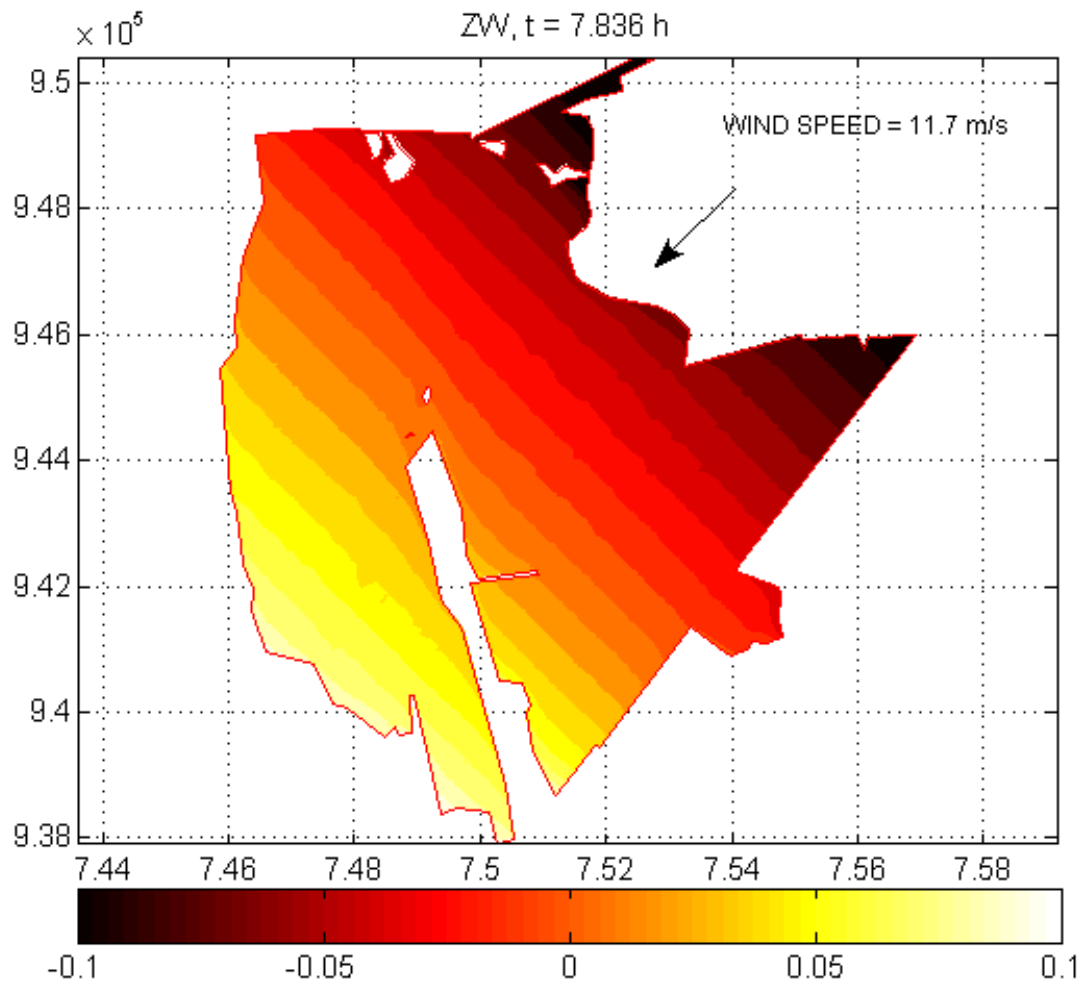


Figura 11-6 *SUBS2030_N_VNE11.7* Dislivello della superficie libera rispetto la quiete

11.1.2 Vento da Ovest (*SUBS2030_N_VW2.3*)

Lo scenario è stato scelto per l'elevata frequenza di venti provenienti da Ovest, ancorché caratterizzati da bassa intensità. Dal punto di vista delle velocità queste simulazioni hanno valori del modulo modesti e rivestono limitato interesse. Il dislivello generato dal vento tra margini opposti della laguna non supera i 2 cm. Pertanto rimane significativo analizzare l'andamento delle linee di corrente che nella porzione settentrionale del bacino mostrano una circolazione prevalente oraria. Immediatamente a nord della penisola Boscoforte si evidenzia una circolazione antioraria (Figura 11-7)

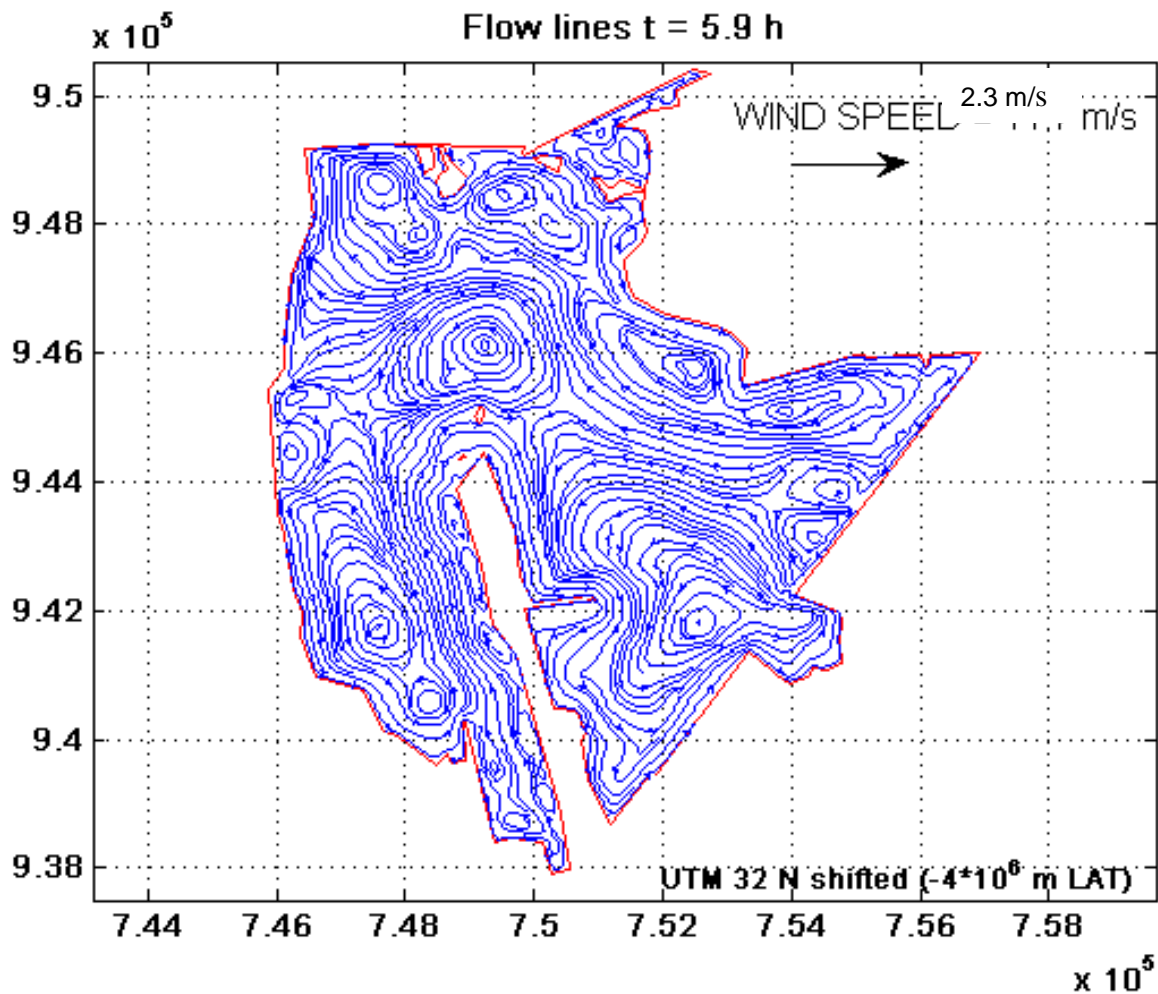


Figura 11-7 SUBS2030_N_VW2.3 Linee di corrente

11.1.3 1.6.3 Simulazioni con idrovora Foce attiva (SUBS2030_N_MCF10)

Come per lo stato di fatto, si ipotizza l'azionamento dell'idrovora recentemente installata a Stazione Foce con portata nominale pari a 10 m³/s. Lo stato iniziale corrisponde alla quiete con quota del pelo libero pari a 0.0 m s.m.

Si analizzano i risultati in condizioni stazionarie allo scopo di documentare l'invarianza dei risultati rispetto alle simulazioni dello stato di fatto.

La subsidenza, come prevedibile data la modesta entità, non è tale da influenzare il campo di moto rispetto allo stato di fatto: le linee di flusso si orientano verso la stazione di sollevamento, attraverso il canale foce e le aree limitrofe nella Valle Cona. I dossi presenti sul margine settentrionale costituiscono un ostacolo significativo per la corrente. I campi di velocità evidenziano moduli compresi tra 0.05 e 0.10 m/s lungo il canale Foce in prossimità dell'idrovora (Figura 11-8). Allontanandosi da questa, i moduli diminuiscono progressivamente fino a diventare inapprezzabili

sul margine occidentale della Valle Cona (Figura 11-9).

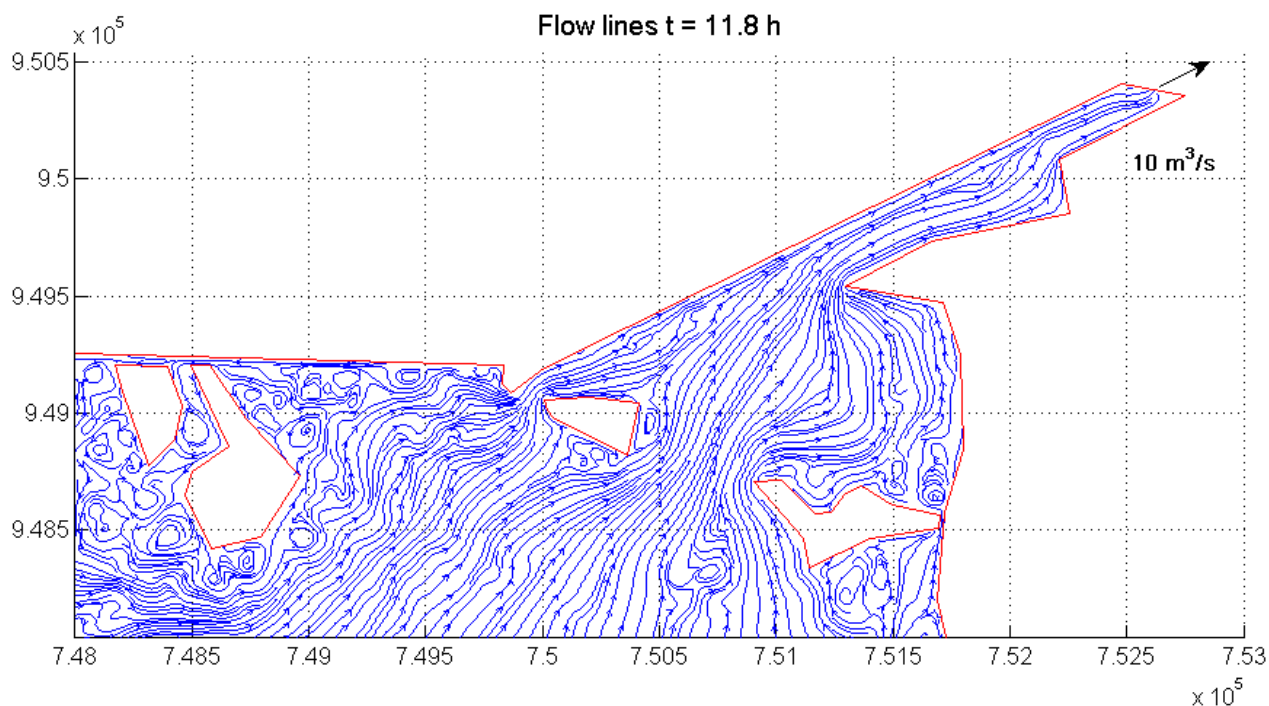


Figura 11-8 *SUBS2030_N_IDR10.0* Linee di corrente, particolare zona Nord-Est (Valle Cona e canale Foce)

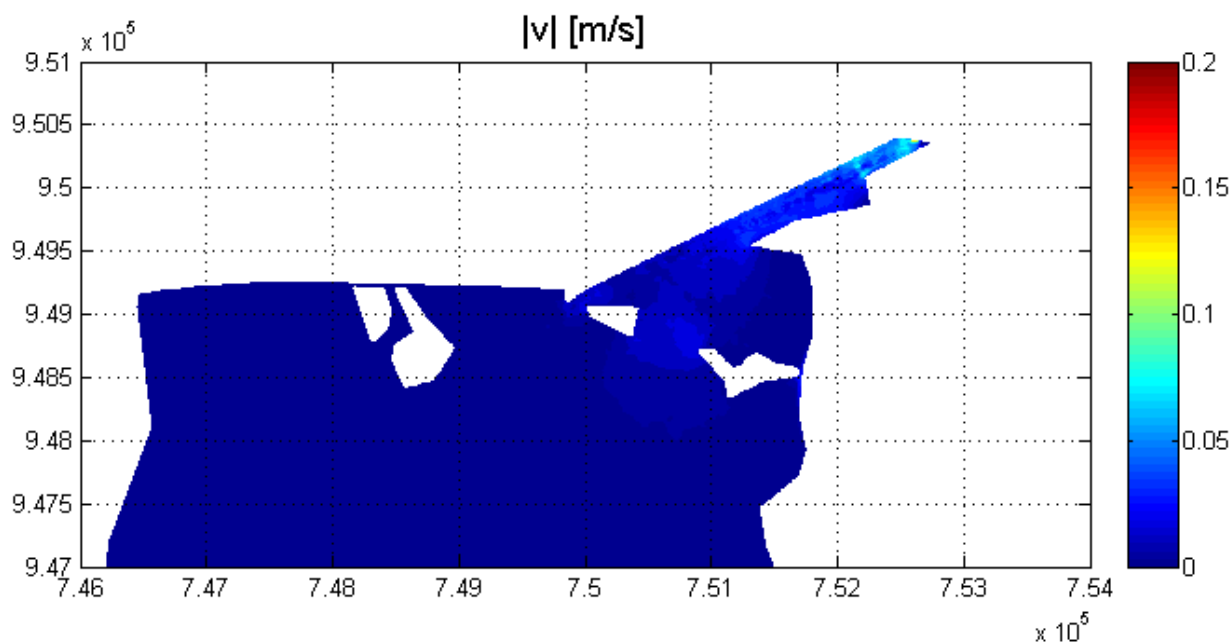


Figura 11-9 *SUBS2030_N_IDR10.0* Modulo di velocità, particolare zona Nord-Est (Valle Cona e canale Foce)

12 Confronto tra lo stato di fatto e lo stato previsionale: considerazioni conclusive.

Le modellazioni effettuate nello stato di fatto (con assetto batimetrico convenzionalmente datato 2017), restituiscono un quadro esaustivo dell'assetto idrodinamico nelle Valli nel loro complesso. Sono stati considerati sia i bacini a nord dell'argine di separazione in fase di costruzione, sia i bacini a sud di questo.

Le forzanti considerate sono state sia le sollecitazioni indotte dal vento (per vento più frequente da Ovest e più intenso da NE) sia le sollecitazioni indotte dalle manovre di apertura dei manufatti idraulici presenti.

Lo scenario di subsidenza attesa (nella configurazione pessimistica: scenario *upper*, [1]) evidenzia un cono di subsidenza con forma allungata in direzione NO-SE con centro in prossimità del pozzo Agosta, che impegna la sola porzione settentrionale della Valle Lido di Magnavacca, Lido Fossa di Porto e solo marginalmente valle Cona-canale Foce. Gli scostamenti verticali massimi attesi sull'orizzonte temporale del 2030 restituiscono un abbassamento di 15 cm in corrispondenza del lembo settentrionale della valle prospiciente il pozzo Agosta (Figura 12-1) che vanno poi scemando in corrispondenza del lembo settentrionale della penisola di Boscoforte.

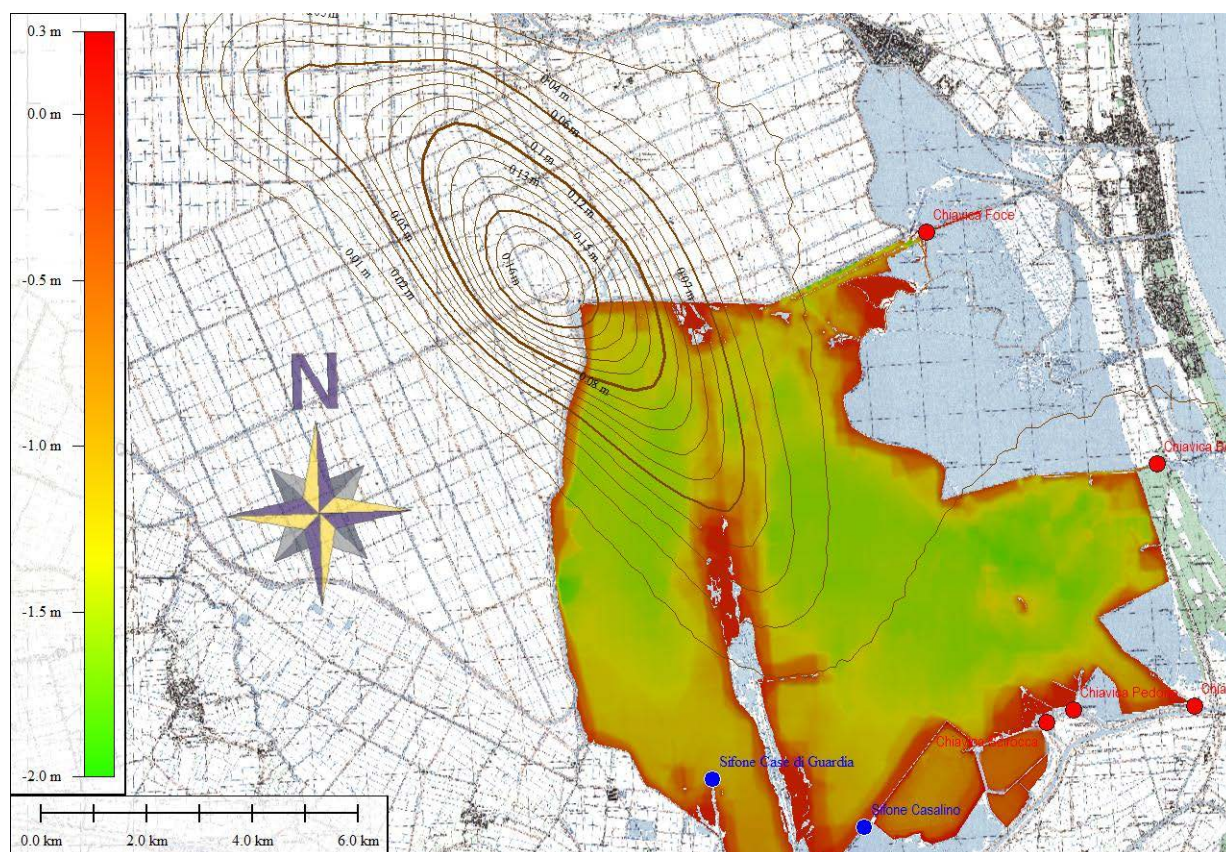


Figura 12-1 Batimetria delle Valli e cono di subsidenza (scenario upper anno 2030)

Poiché il cono di subsidenza riferito al 2020 è interamente ricompreso all'interno di quello proiettato al 2030 e poichè quest'ultimo è più gravoso del precedente, si considerano in questa sede i soli scenari riferiti all'anno 2030.

L'analisi dei risultati delle simulazioni dello stato di fatto, sovrapposte allo scenario previsionale adottato, hanno suggerito l'opportunità di considerare nelle simulazioni dello stato previsionale il solo bacino Nord (i.e la valle grande a nord dell'argine in costruzione), poiché i bacini a sud dell'argine non sono interessati dagli effetti della subsidenza relativa.

Inoltre l'analisi dei risultati in termini di forzanti (vento e manufatti idraulici), hanno evidenziato che la forzante vento è relativamente molto più significativa, agli effetti dell'assetto idrodinamico, delle forzanti associate alle manovre idrauliche sui manufatti, che esauriscono il loro effetto a breve distanza da questi all'interno dello specchio d'acqua. In particolare appare significativa la forzante associata al vento estremo di Grecale.

Ciò non ostante è stata effettuata anche una simulazione che coinvolge l'attivazione della idrovora Foce al fine di valutare tali effetti combinati con la modesta subsidenza che interviene sulla porzione della Valle Cona e canale Foce.

Per la sollecitazione vento direzione NE si riporta nella Figura 12-2 il confronto in termini di campo delle velocità tra la configurazione dello stato di fatto e quella previsionale. Le differenze sono sostanzialmente inapprezzabili.

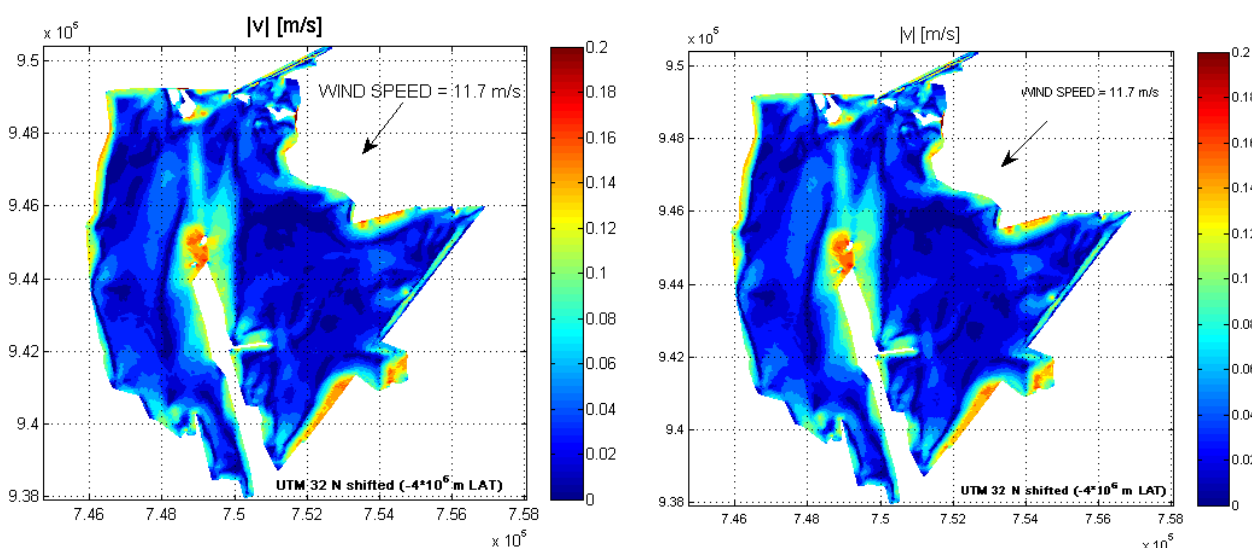


Figura 12-2 Vento da NE $v=11.7$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (*SDF_N_VNE11.7 a sx*) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (*SUBS2030_N_VNE11.7 a dx*)

Anche analizzando i risultati in termini di linee di corrente le differenze appaiono inapprezzabili, sia nel sistema del bacino Nord nel suo complesso (Figura 12-3), sia riguardando nel dettaglio il vertice

NO della Valle (Figura 12-4), sede dell'abbassamento più marcato (circa 15 cm nello scenario upper) dove permane una circolazione con verso antiorario che coinvolge la zona di bordo confinata dal perimetro occidentale della Valle e dai dossi presenti ad est.

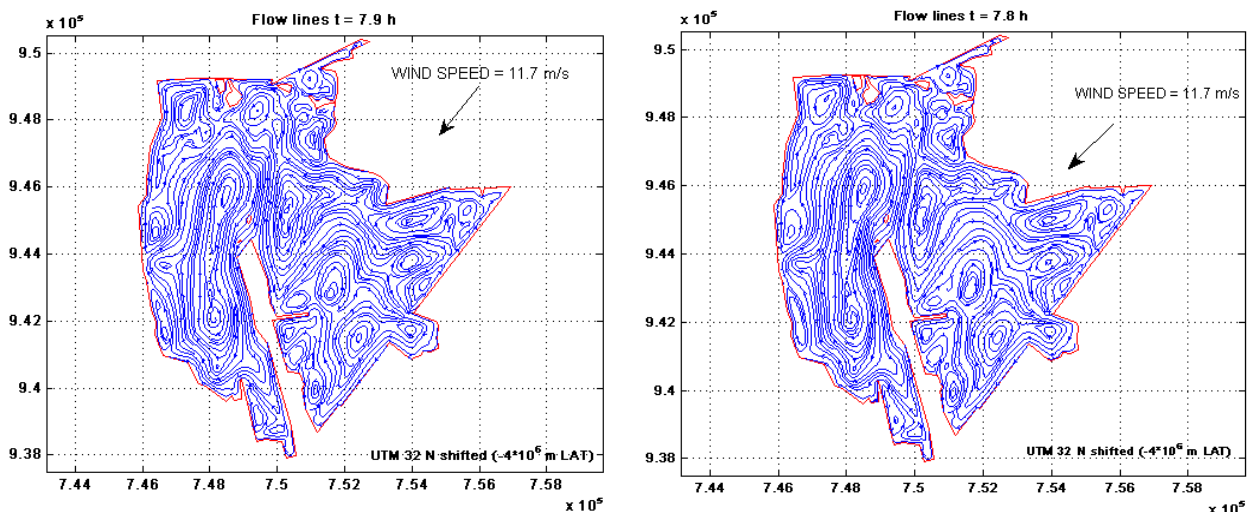


Figura 12-3 Vento da NE $v=11.7$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (*SDF_N_VNE11.7* a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (*SUBS2030_N_VNE11.7* a dx)

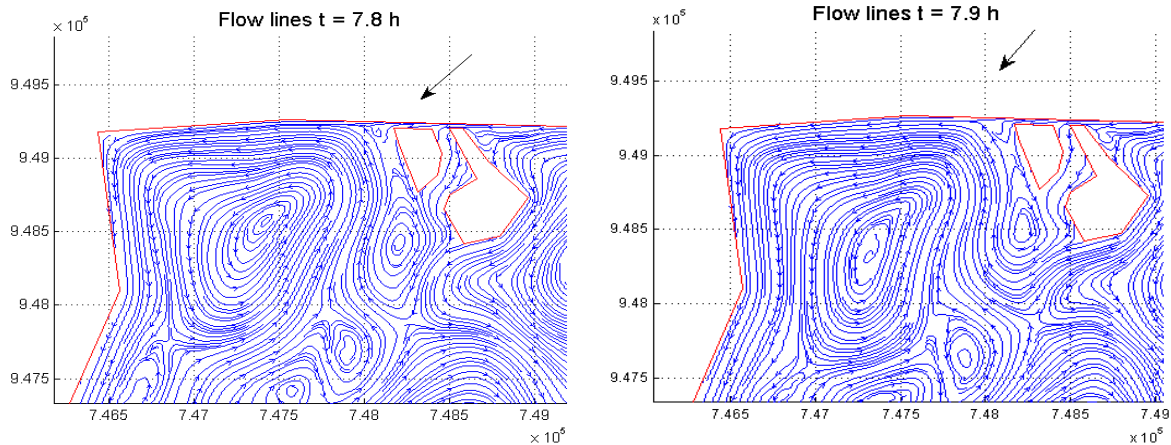


Figura 12-4 Vento da NE $v=11.7$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (*SDF_N_VNE11.7* a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (*SUBS2030_N_VNE11.7* a dx)

D'altra parte anche l'andamento dei livelli (Figura 12-5) rimane invariato nei due scenari, a testimonianza della sostanziale invarianza del campo di moto nel suo complesso.

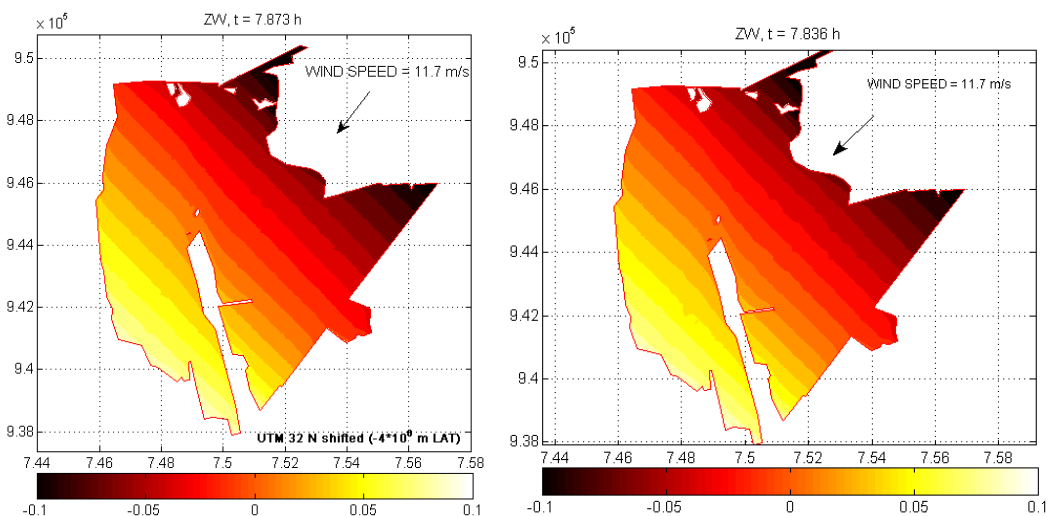


Figura 12-5 Vento da NE $v=11.7$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (SDF_N_VNE11.7 a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (SUBS2030_N_VNE11.7 a dx)

Il confronto tra i risultati ottenuti nelle simulazioni dei due scenari (stato di fatto e previsionale) per la sollecitazione associata alla forzante vento proveniente da Ovest e velocità 2.3 m/s, è significativo limitatamente all'assetto delle linee di corrente, che restituiscono una situazione sostanzialmente invariante sia in termini di verso di circolazione che di dimensione dei macrovortici principali all'interno della Valle (Figura 12-6).

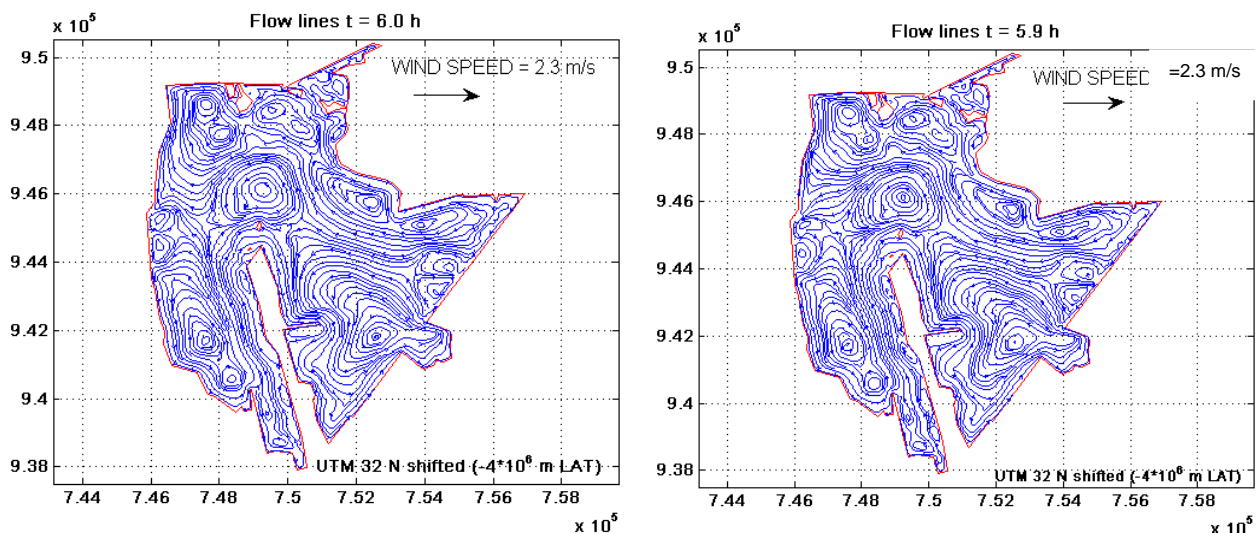


Figura 12-6 Vento da ovest $v=2.3$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (SDF_N_VW2.3 a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (SUBS2030_N_VW2.3 a dx)

Per quanto riguarda la simulazione che coinvolge l'idrovora Foce, si osserva che la subsidenza indotta tende a scemare in prossimità dell'estremo NO di Valle Cona e canale Foce; viceversa gli effetti apprezzabili dell'azionamento dell'idrovora si esauriscono lungo il canale Foce a breve distanza dalla macchina, in corrispondenza del vertice NE della Valle

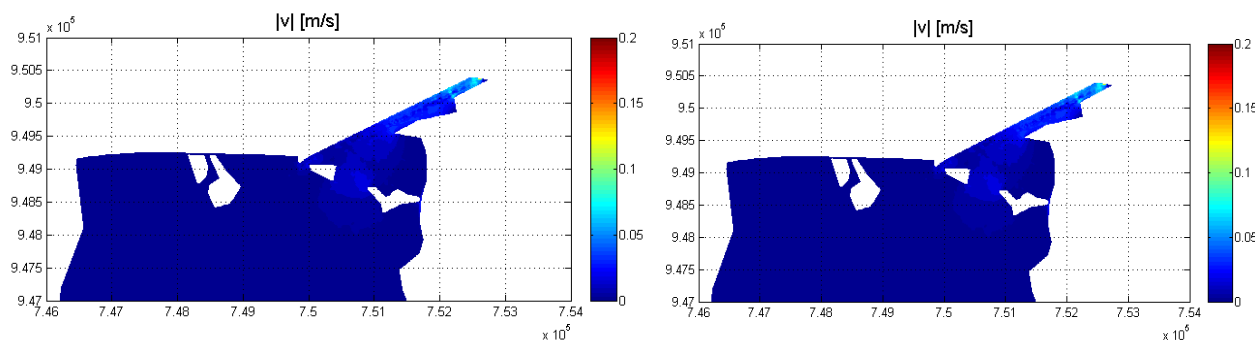


Figura 12-7 Idovora attiva a stazione foce. Confronto tra simulazione stato di fatto (*SDF_N_MIDRO10* a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (*SUBS2030_N_MIDRO10* a dx)

La deformazione dello stato di quiete in entrambi gli scenari corrispondenti allo SDF e SDP è apprezzabile solo fino alla porzione di Valle compresa tra i dossi che caratterizzano l'imbocco della Valle Cona nella sua porzione meridionale, all'esterno dell'impronta del cono di subsidenza (Figura 12-7). Le velocità modeste (inferiori a 0.1 m/s) sono da imputarsi anche ai recenti lavori di escavo del canale sublagunare Foce (effettuati in occasione del progetto LIFE).

In conclusione le simulazioni effettuate hanno mostrato una sostanziale invarianza dei risultati tra lo stato di fatto e di previsione sull'orizzonte temporale del 2030 nello scenario previsionale di subsidenza relativa massima (scenario *upper*).

La quota di subsidenza dovuta alla coltivazione di Agosta (considerato anche l'effetto prodotto dalla contestuale attività del pozzo Dosso degli Angeli), non è tale da influenzare l'assetto idrodinamico né per quanto riguarda il moto circolatorio (prevalentemente indotto dall'azione del vento), né per quanto riguarda il moto indotto dall'azionamento dei manufatti idraulici, ed in particolare della stazione di sollevamento di recente costruzione a Stazione Foce.

Elenco delle figure e delle tabelle

<i>Figura 2-1. Sistema delle Valli di Comacchio.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2-2 Ubicazione dei manufatti presenti sulle Valli (Sifoni e Chiaviche)</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2-3. Sistema Valli di Comacchio. Particolare Zona Sud-Est con ingressi chiaviche Pedona, Scirocca e Leonarda.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2-4. Sistema Valli di Comacchio. Particolare Zona Sud-Ovest con Ingressi sifoni Casa di Guardia e Casalino</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2-5. Sistema Valli di Comacchio. Particolare Zona Nord –Est di Valle Cona con Chiavica su Canale Foce – Valle Fattibello.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2-6 Sistema Valli di Comacchio. Particolare Zona Nord di Valle Fossa di Porto con Chiavica Caldirolo.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2-7 . Sistema Valli di Comacchio. Particolare Zona Est con Chiavica su Canale Bellocchio.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2-8 Ubicazione stazione di sollevamento Foce.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3-1 Rilievi 2011 – imbarcazione utilizzata per il rilievo batimetrico.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3-2 Rilievi batimetrici 2011 – linee di navigazione ed acquisizione punti.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3-3 Rilievi batimetrici 2011 - Esempio di profilo ecografico rilevato e restituito</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3-4 Rilievi 2011 – mappa batimetrica completa</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3-5 Rilievi batimetrici 2011 – Mappa della riflettività del fondo</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3-6 Rilievo 2011 – Linee di navigazione nella porzione NE della Valle (Valle Cona, Canale Foce) ...</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3-7 Rilievi batimetrici 2011 – Mappa batimetrica della porzione NE della valle (Valle Cona e canale Foce).....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3-8. Rilievi batimetrici 2014. Zona oggetto della campagna di rilievi integrativi.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3-9 Rilievi batimetrici 2014 – Il mezzo autonomo di superficie impiegato per il rilievo delle porzioni di Valle caratterizzate da profondità particolarmente modeste.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3-10 Rilievi batimetrici 2014 - Porzione settentrionale delle Valli oggetto della campagna di rilievi batimetrici integrativi</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3-11 Rilievi batimetrici 2014 - Linee di navigazione coincidenti con i profili ecografici eseguiti durante la campagna</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3-12. Rilievi batimetrici 2014 - Esempio di profili sismici elaborati e restituiti.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3-13. Rilievi batimetrici 2014 - Mappa batimetrica della porzione settentrionale delle valli di Comacchio</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3-14. Rilievi batimetrici 2014 - Confronti con i dati LIDAR per i valori > 0 m s.l.m.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3-15. Rilievi batimetrici 2014 - Mappa dell'integrazione dei dati batimetrici con i dati LIDAR, sono rappresentate le curve di livello ogni 0.1m</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3-16. Lembo NE della laguna. Confronto tra i risultati delle indagini batimetriche 2014 (sopra) e 2011 (sotto).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3-17 Rilievi 2016 – Identificativi catastali delle aree interessate dal rilievo.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3-18 Rilievo 2016 - . Dettaglio dell'area rilevata.....</i>	<i>27</i>

Figura 3-19 Rilievi 2016 - Robot acquatico utilizzato per il rilievo.....	28
Figura 3-20. Rilievo 2016 - Linee di navigazione coincidenti con i profili ecografici eseguiti durante la campagna	29
Figura 3-21 Rilievi 2016 - Il trasduttore ultrasonico utilizzato per il rilievo.	30
Figura 3-22 Rilievi 2016 - . Esempio di profili sismici elaborati e restituiti con Seisprho.	30
Figura 3-23 Rilievi 2016 - Stazione Bellocchio (ARPAE) utilizzata per il monitoraggio dei dati di livello e di temperatura dell'acqua all'interno della Valle	31
Figura 3-24 rilievi 2016 -. Esempio di dati della temperatura utilizzati per la stima della velocità del suono in acqua.	32
Figura 3-25 Rilievi 2016 - Esempio dei dati del mareografo di Bellocchio (fonte: http://www.provincia.fe.it/settoreambiente/servizio_risorse_idriche/pagine/acque_costiere/indice_acque_costiere/D_Bellocchio_LivMarea.jpg)	32
Figura 3-26 Rilievi 2016 – batimetria della porzione meridionale delle Valli di Comacchio.....	34
Figura 3-27 Rilievi 2016 – Caratteristiche delle aree di rilievo	35
Figura 4-1 Ubicazione dei campi Dosso degli Angeli e Agosta.....	36
Figura 4-2 Andamento delle isolinee di subsidenza attesa all'anno 2020	37
Figura 4-3 Andamento delle isolinee di subsidenza attesa all'anno 2030	37
Figura 5-1 cella di calcolo triangolare e relazione con le celle adiacenti	40
Tab. 5-1 Parametri per la stima del coefficiente di efflusso delle chiaviche.....	43
Tab. 5-2 Grandezze geometriche e valori dei parametri e dei coefficienti di efflusso per le chiaviche.....	43
Tab. 6-1– Caratteristiche delle stazioni di monitoraggio	46
Figura 6-1. Ubicazione stazioni di monitoraggio e rilevamento dati.	47
Tab. 6-2 Analisi dati anemometrici: distribuzione dei dati osservati in base alla direzione.....	49
Figura 6-2 Analisi dati anemometrici: suddivisione in classi del campione.....	50
Figura 6-3 Rosa dei venti.....	50
Tab. 6-3 Analisi dati anemometrici: suddivisione in classi del campione.....	51
Tab. 6-4 - Grandezze statistiche campionarie.....	51
Tab. 6-5 – Analisi dati anemometrici: parametri della distribuzione di probabilità di Weibull.....	52
Figura 6-4 Analisi dati anemometrici. Confronto fra la probabilità campionaria e teorica di appartenenza a ciascuna classe.....	53
Tab.6-6-Analisi dei dati anemometrici. Probabilità associate a ciascuna direzione e intervallo di velocità	54
Tab. 6-7 –Analisi dei dati anemometrici. Radice quadrata del valore atteso del quadrato della velocità	54
Tab. 6-8 Analisi dei dati anemometrici. Valori significativi della forzante vento. (* probabilità di superamento 5% sulla funzione di probabilità cumulata di Weibull).....	55
Figura 6-5 Porto Garibaldi – Analisi spettrale del segnale di marea	56
Tab. 6-9 . Parametri dell'onda di marea sintetica	57
Figura 6-6: schema di funzionamento del sistema mare - laguna	59
Figura 6-7 rapporto tra le ampiezze a_b / a_0 e ritardo ε in funzione del parametro K.....	61
Tab. 6-10: parametri per l'alterazione dell'onda di marea in corrispondenza degli ingressi sul contorno.	61

Figura 7-1 grafico di confronto delle precipitazioni cumulate mensili - Volano e Guagnino (Lug 2010-Feb 2011)	63
Tab. 7-1 Stazione di Volano, tabella delle precipitazioni cumulate mensili e medie mensili (Set 2006 - Dic 2010)	63
Figura 7-2 Stazione di Volano, grafico delle precipitazioni cumulate mensili dal settembre 2006 al dicembre 2010	64
Tab. 7-2: Stazione di Volano, tabella delle precipitazioni medie cumulate mensili	64
Figura 7-3 : Stazione di Volano, grafico delle precipitazioni medie cumulate mensili	64
Tab. 7-3: Stazione di Volano, tabella delle temperature medie mensili	65
Tab. 7-4: Stazione di Volano, tabella delle velocità medie mensili del vento (m/s)	65
Tab. 7-5: Stazione di Volano, evaporazione media mensile (mm)	65
Tab. 7-6 : Stima dei contributi mensili da filtrazione	67
Tab. 7-7: Tabella riepilogativa dei contributi medi annuali di volume specifico (mm) scambiati dalla Valle (+ingresso ; -uscita)	68
Figura 7-4 Ubicazione della stazione di Fossa Foce	69
Figura 7-5 Estratto rappresentativo della serie temporale del livello registrato alla stazione di Fossa Foce	69
Figura 8-1 Cono di subsidenza differenziale relativo alla attività combinata del pozzo di Dosso degli Angeli e Agosta (scenario upper anno 2030-2017)	71
Figura 8-2 Delimitazione dei bacini idraulicamente indipendenti su cui sono state effettuate le simulazioni idrodinamiche nello stato di fatto (Bacini N,SE1, SE2-A, SE2-B) e nello stato previsionale (Bacino N)	72
Figura 8-3 Batimetria delle Valli Scirocca, Lavadena e Padusa	73
Figura 8-4. Mesh di calcolo bacino N (a dx) e bacino SE1 (a sx)	74
Figura 8-5. Mesh di calcolo bacino SE2-A (sx) e SE2-B (dx)	75
Tab. 8-1. Quadro sinottico delle simulazioni nello stato di fatto (anno 2017)	76
Tab. 8-2. SUBS2020- Quadro sinottico delle simulazioni nello stato previsionale (anno 2020)	76
Tab. 8-3 SUBS2030. Quadro sinottico delle simulazioni nello stato previsionale (anno 2030)	76
Figura 9-1 Batimetria del bacino N e manufatti idraulici presenti	77
Figura 9-2 Particolare della porzione nord-orientale della Valle in corrispondenza della chiavica Foce. Si distingue a nord canale Foce con l'argine che corre parallelo al margine settentrionale della Valle.	78
Figura 9-3 il rilievo batimetrico di dettaglio (anno 2014) in corrispondenza della porzione nord-orientale della Valle in prossimità della stazione Foce	79
Figura 9-4 SDF_N_MCF Andamento livello (sopra) e portata (sotto) Onda di marea e cella interna al dominio. (Portate negative se in ingresso alla Valle)	80
Figura 9-5 SDF_N_MCF Particolare della porzione NE del bacino. Modulo di velocità al minimo di marea..	80
Figura 9-6 SDF_N_MCF Particolare della porzione NE del bacino. In evidenza il varco a sud della valle Cona.	81
Figura 9-7. Lembo NE della laguna. Confronto tra i risultati delle indagini batimetriche 2014 (sopra) e 2011 (sotto).	82

Figura 9-8 SDF_N_IDR10.0 Stato di fatto. Idrovora attiva $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$. Effetto locale sul campo delle velocità mediate sulla verticale	83
Figura 9-9 SDF_N_IDR10.0 Stato di fatto. Idrovora attiva $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$. Effetto globale sulle linee di corrente.	84
Figura 9-10 SDF_N_IDR10.0 Stato di fatto. Bacino N. Idrovora attiva $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$. Effetto locale sul campo di moto.	84
Figura 9-11 SDF_N_IDR10.0 Stato di fatto. Bacino N. Idrovora attiva $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$. Effetto sul livello e sullo scambio globale di volume.....	85
Figura 9-12 La chiavica Bellocchio ed il canale Bellocchio che si protende all'interno della valle lungo il confine meridionale della valle Smarlacca. Evidente il relitto dell'argine Magnambrutto in corrispondenza della sezione di valle del canale Bellocchio all'interno della Valle	85
Figura 9-13 SDF_N_MCB andamento portata e livello (onda di marea e cella interna al dominio)	86
Figura 9-14 SDF_N_MCB particolare modulo velocità (m/s).....	87
Figura 9-15 SDF_N_MSCC Andamento generale livello, portata specifica $q \text{ (m}^2/\text{s)}$, volume.....	88
Figura 9-16 SDF_N_VNE11.7 Stato di fatto -vento estremo - Modulo delle velocità	89
Figura 9-17 SDF_N_VNE11.7 (vento da NE 11.7 m/s) Linee di corrente, visione d'insieme	90
Figura 9-18 SDF_VNE11.7 Stato di fatto Vento estremo direzione NE $v=11.7 \text{ m/s}$. - Linee di corrente, dettaglio zona Nord-Ovest.....	90
Figura 9-19 SDF_N_VNE11.7 Stato di Fatto. Vento estremo direzione NE $v=11.7 \text{ m/s}$. Variazione di livello rispetto la quiete [m].....	91
Figura 9-20 SDF_N_VNE11.7 Stato di fatto. Vento estremo direzione NE $v=11.7 \text{ m/s}$. Linee di corrente-particolare zona Foce	92
Figura 9-21 SDF_N_VNE11.7 Stato di fatto Vento estremo direzione NE $v=11.7 \text{ m/s}$. Modulo delle velocità, particolare zona Foce	92
Figura 9-22 SDF_N_VW2.3 Stato di fatto. Vento da O 2.3 m/s. Linee di corrente, visione d'insieme	93
Figura 9-23 SDF_N_VW2.3 Stato di fatto. Vento da O 2.3 m/s. Linee di corrente, particolare zona Nord-Est (canale Foce)	94
Figura 9-24 La porzione meridionale della valle racchiusa dall'argine (bacino SE1) e i manufatti idraulici attivi (chiaviche Pedona e Leonarda).	95
Figura 9-25 SDF_SE1_VNE11.7 Stato di fatto. Bacino SE1.Vento estremo da NE 11.7 m/s. Linee di corrente	96
Figura 9-26 SDF_SE1_VNE11.7 Stato di fatto. Bacino SE1.Vento estremo da NE 11.7 m/s. Linee di corrente - particolare sul vertice nord-orientale.	96
Figura 9-27 SDF_SE1_VNE11.7 Stato di fatto. Bacino SE1.Vento estremo da NE 11.7 m/s. Modulo delle velocità	97
Figura 9-28 SDF_SE1_VNE11.7 Stato di fatto. Bacino SE1.Vento estremo da NE 11.7 m/s. Dislivello rispetto la quiete.....	97
Figura 9-29. SDF_SE1_VW2.3 Linee di corrente	98
Figura 9-30 SDF_SE1_VW2.3 (vento da W 2.3 m/s) Linee di corrente - particolare.....	99

Figura 9-31 SDF_SE1_MCS (Bacino SE1 apertura chiaviche Sud) Dettaglio Chiavica Leonarda	100
Figura 9-32 SDF_SE1_MCS (Bacino SE1 apertura chiaviche Sud) Dettaglio Chiavica Pedona	100
Figura 9-33 SDF_SE1_MCS Stato di fatto. Bacino SE1. Apertura Chiaviche Sud. Modulo velocità. Picco di portata in uscita (bassa marea)	101
Figura 9-34 SDF_SE1_MCS Stato di fatto. Bacino SE1. Apertura Chiaviche Sud.. Linee di flusso locali in condizione di bassa marea (portate in uscita).	101
Figura 9-35 Batimetrica delle valli private a Sud-Est (bacini SE2). I due bacini (bacino SE2-A Valle Scirocca a ovest - bacino SE2-B Valle Lavadena a est) sono separati e autonomi.....	102
Figura 9-36 SDF_SE2_VNE11.7 Stato di fatto. Bacini SE2 (SE2-A sx-SE2-B dx). Vento da NE 11.7 m/s. campo delle velocità mediate sulla verticale.....	103
Figura 9-37 SDF_SE2_VNE11.7 Stato di fatto. Bacini SE2 (SE2-A sx; SE2-B dx). Vento da NE 11.7 m/s. Linee di corrente	104
Figura 9-38 SDF_SE2_VNE11.7 Stato di fatto. Bacini SE2 (SE2-A sx; SE2-B dx). Vento da NE 11.7 m/s. Dislivello rispetto la quiete (m).....	104
Figura 9-39 SDF_SE2_VW2.3 Stato di fatto. Bacini SE2 (SE2-A sopra; SE2-B sotto). Vento da O 2.3 m/s. Linee di corrente	105
Figura 10-1 Scenario di subsidenza relativa anni 2020-2017 (scenario upper).....	106
Tab. 10-1. SUBS2020- Quadro sinottico delle simulazioni nello stato previsionale (anno 2020).....	107
Figura 10-2 Scenario di subsidenza differenziale anni 2020-2017 (scenario upper) e andamento batimetrico della valle	107
Figura 10-3 SUBS2020_N_VNE11.7 Modulo delle velocità	108
Figura 10-4 SUBS2020_N_VNE11.7 Linee di corrente	109
Figura 10-5 SUBS2020_N_VNE11.7 Dislivello rispetto la quiete	110
Figura 10-6 SUBS2020_N_VW2.3 Linee di corrente.....	111
Figura 11-1 Scenario di subsidenza differenziale anni 2030-2017 (scenario upper) e andamento batimetrico delle Valli.....	112
Figura 11-2 Andamento della subsidenza attesa al 2030 e batimetria delle Valli (particolare della porzione N delle Valli).....	113
Tab. 11-1 SUBS2030. Quadro sinottico delle simulazioni nello stato previsionale (anno 2030)	113
Figura 11-3 SUBS2030_N_VNE11.7 Andamento dei moduli delle velocità	114
Figura 11-4 SUBS2030_N_VNE11.7 Andamento delle linee di corrente	115
Figura 11-5 SUBS2030_N_VNE11.7 Linee di corrente particolare zona Nord Ovest.....	115
Figura 11-6 SUBS2030_N_VNE11.7 Dislivello della superficie libera rispetto la quiete	116
Figura 11-7 SUBS2030_N_VW2.3 Linee di corrente.....	117
Figura 11-8 SUBS2030_N_IDR10.0 Linee di corrente, particolare zona Nord-Est (Valle Cona e canale Foce)	118
Figura 11-9 SUBS2030_N_IDR10.0 Modulo di velocità, particolare zona Nord-Est (Valle Cona e canale Foce)	118
Figura 12-1 Batimetria delle Valli e cono di subsidenza (scenario upper anno 2030)	119

<i>Figura 12-2</i> Vento da NE $v=11.7$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (SDF_N_VNE11.7 a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (SUBS2030_N_VNE11.7 a dx).....	120
<i>Figura 12-3</i> Vento da NE $v=11.7$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (SDF_N_VNE11.7 a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (SUBS2030_N_VNE11.7 a dx).....	121
<i>Figura 12-4</i> Vento da NE $v=11.7$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (SDF_N_VNE11.7 a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (SUBS2030_N_VNE11.7 a dx).....	121
<i>Figura 12-5</i> Vento da NE $v=11.7$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (SDF_N_VNE11.7 a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (SUBS2030_N_VNE11.7 a dx).....	122
<i>Figura 12-6</i> Vento da ovest $v=2.3$ m/s. Confronto tra simulazione stato di fatto (SDF_N_VW2.3 a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (SUBS2030_N_VW2.3 a dx).....	122
<i>Figura 12-7</i> Idovora attiva a stazione foce. Confronto tra simulazione stato di fatto (SDF_N_MIDRO10 a sx) e stato previsionale-scenario upper anno 2030- (SUBS2030_N_MIDRO10 a dx)	123

Bibliografia

- [1]. ENI, Campi di Agosta e Dosso degli Angeli: studio di subsidenza - Management Summary, 2015
- [2]. Parco regionale Delta del Po, Progetto di ricerca per lo studio dell’assetto idrodinamico delle Valli di Comacchio e degli effetti indotti dalla proposta di intervento “P.d.I.P. Valle Furlana e Fiume Reno da S. Alberto al Passo di Primaro”, 2011
- [3]. Convenzione di Ricerca Parco Delta Po ER - CFR, “Analisi degli effetti sul campo di moto in ambito lagunare prodotti dalla realizzazione di dossi e barene: il caso studio delle Valli di Comacchio”, *Rapporto Scientifico* – Responsabile scientifico Schippa L., 2013
- [4]. ENI, “Studio degli effetti della subsidenza indotta dalla coltivazione residua del giacimento di idrocarburi denominato “Dosso degli Angeli” sull’assetto idrodinamico delle valli di comacchio”. *Rapporto Scientifico*. Responsabile scientifico Schippa L. , 2014
- [5]. Ente di gestione Parchi e Biodiversità – Delta del Po, Progetto: Interventi di miglioramento della Circolazione Idraulica delle Valli di Comacchio, progetto esecutivo Stazione di Foce, allegati generali, Relazione Tecnica (Gennaio 2012).
- [6]. Gasperini L., Extremely shallow-water morphobathymetric surveys: The Valle Fattibello (Comacchio, Italy) testcase, *Marine Geophysical Researches*, p.26:97-107, 2005.
- [7]. Gasperini L. and Stanghellini G., 2009. SeisPrho: an interactive computer program for processing and interpretation of high-resolution seismic reflection profiles, *Computers and Geosciences*, 35,1497-1504.
- [8]. Wessel P. and Smith W.H.F., 1995. New version of the Generic Mapping Tool released, *EOS Trans. AGU*, p.329, 1995.
- [9]. Eclipse™, Schlumberger, versione 2012.2.
- [10]. T. Hueckel, G. Cassiani, J.H. Prévost and D.A. Walters: *Field Derived Compressibility of Deep Sediments of the Northern Adriatic. Land Subsidence*, Special Volume, Proc. 7th Int. Symp. on Land Subsidence, Shanghai, 2005.
- [11]. Valiani A. e Begnudelli L., “Divergence form for bed slope source terms (DFB) in shallow water equation”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004.
- [12]. Demirbilek, Z., Bratos, S., Thompson, E. , “Wind Products for Use in Coastal Wave and Surge Models”, *Miscellaneous Paper CERC – 93 -7*, US Army Corps of Engineers, 1993.
- [13]. Veronese, T. “Le Valli di Comacchio, censimento dei manufatti idraulici principali e

censimento dei lavori a finalità idrauliche eseguiti negli ultimi 17 anni". Consorzio del Parco Regionale del delta del PO, Progetto Europeo "Integrated Management of Wetlands", Interreg II C – CADSES 1997/1999

- [14]. Chow V. T., *Open channel Hydraulics*, McGraw-Hill Intern. Ed., 22 print, 1986.
- [15]. Wieringa, J., "*Representative Roughness Parameters for Homogeneous Terrain, Boundary Layer Meteorology*", 63: 323 -363, 1993.
- [16]. Keulegan, G. H., "*Tidal Flow in Entrances: Water Level Fluctuations of Basins in Communication with the Seas*" Committee on Tidal Hydraulics Technical Bulletin No. 14, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, July 1967
- [17]. Kuzmin, P. O. "*Hydrophysical investigations of land waters*", Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ., 3, 468-478, 1957.
- [18]. <http://geuz.org/gmsh/> (Software gmsh).
- [19]. Gasperini L., G.Matteucci, M.Molari, F.Frascari e G.Biasini. 1999a. Cenni evolutivi e caratteristiche morfologiche della valle fattibello. *Laguna*, 5, suppl.: 6-9.
- [20]. Gasperini L., L.Masini e G.Matteucci, 1999b. Soluzioni tecnologiche innovative per la prospezione geofisica in ambiente lagunare. *Laguna*, 5, suppl. 7-9.
- [21]. Del Bianco F., Gasperini L., et al. 2011 – Rapporto Tecnico sulle indagini morfobatimetriche delle Valli di Comacchio – Ismar CNR Rapporto Tecnico n. 119 pp.29
- [22]. *Del Bianco F., Gasperini L., Stanghellini G., Priore F. 2014 – Rapporto tecnico sulle analisi morfobatimetriche della porzione settentrionale delle Valli di Comacchio – Ismar CNR Rapporto Tecnico.*

Appendice A: il modello idrodinamico

Indice

1	INTRODUZIONE	2
2	LE EQUAZIONI ALLE ACQUE BASSE PER IL MODELLO IDRODINAMICO DELLE VALLI DI COMACCHIO	4
2.1	EQUAZIONE DI CONTINUITÀ O DI CONSERVAZIONE DELLA MASSA	4
2.2	EQUAZIONE DELLA QUANTITÀ DI MOTO	6
2.3	IL MODELLO DELLE SWE IN FORMA COMPATTA	7
3	SCHEMA DI INTEGRAZIONE NUMERICA DEL MODELLO IDRODINAMICO.....	9
3.1	INTRODUZIONE	9
3.2	IL METODO DEI VOLUMI FINITI (FVM)	10
3.3	LO SCHEMA AI VOLUMI FINITI DI TIPO GODUNOV	11
3.3.1	<i>Solutore HLLC.....</i>	<i>13</i>
3.3.2	<i>Incremento dell'ordine di accuratezza nello spazio</i>	<i>16</i>
3.3.3	<i>Calcolo del gradiente</i>	<i>18</i>
3.3.4	<i>Limitatori di pendenza</i>	<i>19</i>
3.3.5	<i>Ricostruzione delle variabili conservative all'interfaccia.....</i>	<i>19</i>
3.3.6	<i>Incremento dell'ordine di accuratezza nel tempo.....</i>	<i>21</i>
3.3.7	<i>Termini Sorgente.....</i>	<i>22</i>
	Pendenza del fondo: il metodo DFB	22
	Pendenza d'attrito: la formula di resistenza	23
	Forzante vento.....	24
3.3.8	<i>Celle parzialmente sommerse</i>	<i>26</i>
3.3.9	<i>Condizioni al contorno</i>	<i>26</i>
	Condizione al contorno di riflessione.....	26
	Condizione al contorno di permeabilità.....	28
	Condizione al contorno di ingresso (Inflow)	30
	Condizione al contorno di uscita (outflow).....	30
4	VALIDAZIONE DEL MODELLO IDRODINAMICO	31
4.1	CASI TEST PRELIMINARI	31
4.2	VALIDAZIONE DEL MODELLO: L'EFFETTO DEL VENTO.....	34
4.3	VALIDAZIONE DEL MODELLO: OTTIMIZZAZIONE DELLE GRIGLIE DI CALCOLO.....	35
4.4	VALIDAZIONE DEL MODELLO TEST PRELIMINARI SU DATI BATIMETRICI FITTIZI	37
	BIBLIOGRAFIA APPENDICE A.....	40

1 Introduzione

Alcune specificità dell'ambiente vallivo hanno diretto la scelta del tipo di modello matematico e successivamente la tecnica di integrazione numerica.

I problemi di fluidodinamica in cui la scala orizzontale è predominante rispetto alla scala verticale sono molto frequenti; e possono essere studiati utilizzando le equazioni alle acque basse (SWE, Shallow Water Equations) mediate sulla verticale. Si ritiene sufficiente quindi una rappresentazione del moto tramite valori mediati sulla profondità senza tener conto della loro variazione lungo l'asse verticale.

Per le modeste velocità e quindi i modesti effetti di interazione con il fondo si ritiene di non aggiungere al modello un'equazione di bilancio che tenga conto della variazione di quota batimentrica, adottando perciò un modello a fondo fisso.

L'assenza di una direzione predominante nel moto (come è per fiumi e canali) impone l'adozione di un modello bidimensionale.

La presenza del vento come forzante del moto, della pendenza del fondo (pur modesta) e l'entità delle asperità del fondo implicano la presenza di un termine sorgente nelle equazioni di bilancio e la necessità di un suo corretto trattamento.

Altri aspetti del moto in valle attengono in misura maggiore alla scelta del tipo di schema numerico e saranno richiamati nel seguito.

Il modello implementato per le simulazioni idrodinamiche delle Valli di Comacchio si basa sulla teoria delle equazioni alle acque basse bidimensionali (mediate sulla verticale).

Le equazioni di bilancio si riferiscono alla conservazione della massa ed al bilancio della quantità di moto, proiettata nelle direzioni indipendenti del piano:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} = \mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_f$$

dove: \mathbf{U} è il vettore delle variabili conservative; t è il tempo; \mathbf{E} e \mathbf{G} le componenti del flusso rispettivamente nelle direzioni x e y ; \mathbf{S} è il termine sorgente.

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + 1/2gh^2 \\ uvh \end{bmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + 1/2gh^2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ ghs_{0x} \\ ghs_{0y} \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}_f = \begin{bmatrix} 0 \\ ghs_{fx} \\ ghs_{fy} \end{bmatrix}$$

g è il modulo dell'accelerazione di gravità, h la profondità, u e v le velocità mediate sulla verticale, s_{0x} (s_{0y}) la pendenza del fondo e s_{fx} (s_{fy}) la pendenza d'attrito, nella direzione x (y).

L'integrazione numerica è basata sullo schema di Godunov [A-6] , applicato ad una discretizzazione realizzata con celle triangolari, aventi area Ω .

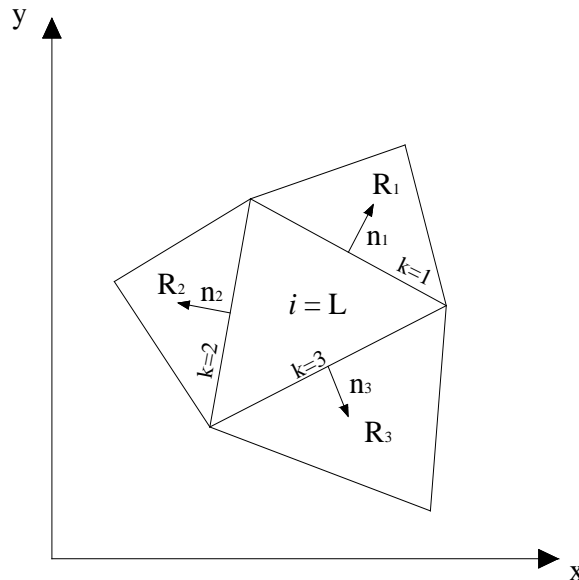


Figura 1-1: cella di calcolo triangolare e relazione con le celle adiacenti

Definito $\mathbf{F} = [\mathbf{E}, \mathbf{G}]$:

$$\int_{\Omega} \partial \mathbf{U} / \partial t \, d\Omega + \int_{\Omega} \nabla \cdot \mathbf{F} \, d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{S} \, d\Omega$$

La versione semidiscreta di questa equazione risulta:

$$\frac{d\bar{\mathbf{U}}_i}{dt} = \mathbf{L}(\bar{\mathbf{U}}^n) \quad \text{con:} \quad \mathbf{L}(\bar{\mathbf{U}}^n) = -\frac{\Delta t}{\Omega} \sum_{k=1}^3 (\mathbf{F}_k^* \cdot \mathbf{n}_k) dl_k + \frac{\Delta t}{\Omega} \int_{\Omega} \mathbf{S} \, d\Omega$$

Dove l'apice n indica il tempo corrente; il pedice $k = 1, 2, 3$ si riferisce ai lati di ogni cella; \mathbf{F}_k^* è il flusso numerico mediato su ogni lato (ricavato dalla appropriata soluzione del problema di Riemann alle frontiere di cella); dl_k è la lunghezza del lato k -mo della cella; \mathbf{n}_k è il versore normale al lato della cella.

Con riferimento alla letteratura scientifica specialistica [A-9, A-11, A-14, A-18, A-19] sono considerati in dettaglio i seguenti aspetti, che contribuiscono ad incrementare la stabilità e la flessibilità di applicazione del modello:

- Solutori approssimati del problema di Riemann;
- Accuratezza al secondo ordine;
- Implementazione del metodo VFR (*Volume – Free Surface relationships*) per la trattazione conservativa delle leggi di bilancio all'interfaccia asciutto-bagnato.
- Trattazione adeguata dei termini sorgente.

2 Le equazioni alle acque basse per il modello idrodinamico delle Valli di Comacchio

Le equazioni alle acque basse (SWE) formano un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali di tipo iperbolico che esprime la conservazione della massa e della quantità di moto nell'ambito di fenomeni di moto vario a superficie libera.

Per la loro scrittura ed integrazione sulla profondità della corrente si adottano le seguenti ipotesi semplificative [A-2]:

- profondità piccola rispetto alle dimensioni lineari orizzontali;
- perdite di carico associate all'attrito al fondo valutate tramite formulazioni classiche valide per i moti stazionari e uniformi;
- distribuzione della pressione idrostatica su ogni verticale;
- fluido incomprimibile.

2.1 Equazione di continuità o di conservazione della massa

La massa di un fluido presente in un volume di controllo V all'istante t vale:

$$M = \int_V \rho dV \quad [A-2.1]$$

dove con M si indica la massa del fluido e con ρ la relativa densità. La conservazione della massa può essere scritta nella forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = Q_{Me} - Q_{Mu} \quad [A-2.2]$$

dove con $\partial M / \partial t$ si indica la variazione di massa nel tempo, con Q_{Me} e Q_{Mu} rispettivamente la *portata in massa* in ingresso ed in uscita al volume di controllo V .

Con riferimento ad un tronco elementare di corrente di area Ω (rappresentato in Figura 1-2, all'istante t e all'ascissa s), e lunghezza infinitesima ds , la massa risulta $M = \rho\Omega ds$. Quindi l'equazione di bilancio restituisce:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho\Omega) ds \quad [A-2.3]$$

La portata netta in massa che attraversa le sezioni trasversali distanti ds è

$$Q_{Me} - Q_{Mu} = -\frac{\partial}{\partial s}(Q_M)ds = -\frac{\partial}{\partial s}(\rho Q)ds \quad [A-2.4]$$

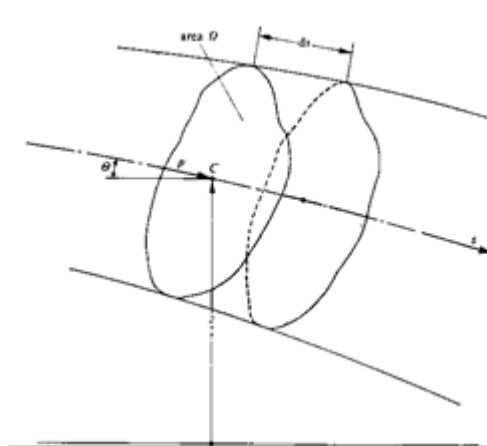


Figura 1-2.1 Tronco elementare di corrente

Sostituendo la [A-2.4] e la [A-2.3] nella [A-2.2], l'equazione di continuità assume in definitiva la forma:

$$\frac{\partial(\rho Q)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \Omega)}{\partial t} = 0 \quad [A-2.5]$$

dove x rappresenta la proiezione sull'orizzontale di s . Nel caso di piccole pendenze le due quantità possono confondersi dando luogo all'espressione [A-2.5].

Nel caso di fluido incomprimibile ($\rho = \text{costante}$), l'equazione di continuità si semplifica in:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad [A-2.6]$$

Sotto l'ipotesi di canale rettangolare, l'espressione [A-2.6] si modifica in:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad [A-2.7]$$

dove con h si indica la profondità della corrente e con u la velocità della corrente in direzione del moto (direzione x).

L'equazione [A-2.7] può essere scritta in forma conservativa come:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = 0 \quad [A-2.8]$$

dove uh rappresenta la portata specifica (portata per unità di larghezza) nella direzione del moto.

L'estensione al moto bidimensionale (2D) comporta:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad [A-2.9]$$

dove con v si indica la velocità della corrente nella direzione y , ortogonale alla direzione x .

L'equazione [A-2.9] può essere scritta in forma conservativa come:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad [A-2.10]$$

dove uh , vh rappresentano rispettivamente la portata specifica (portata per unità di larghezza) nella direzione x e y .

2.2 Equazione della quantità di moto

Si consideri un moto monodimensionale in canale rettangolare e un volume di controllo nella direzione del moto (figura 1-2.2.).

La proiezione dell'equazione vettoriale di bilancio di quantità di moto nella direzione del moto porta alla seguente scrittura:

$$\Pi_{1x} - \Pi_{2x} + \Pi_{bx} - \Pi_{fx} + \Pi_{wx} = M_{2x} - M_{1x} \quad [A-2.11]$$

LHS = RHS

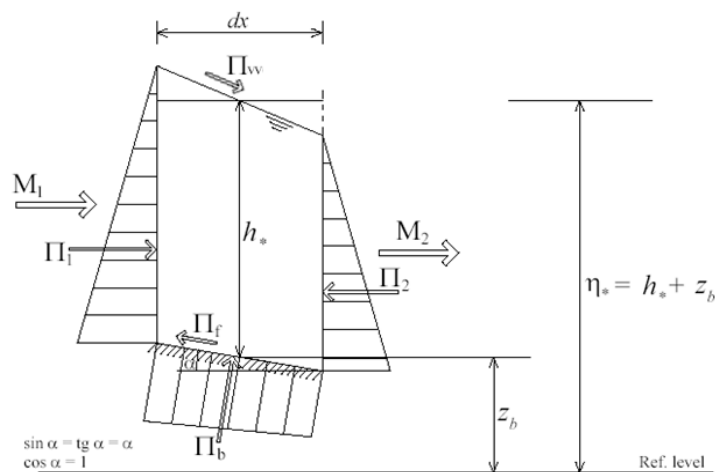


Figura 1-2.1 Volume di controllo

Le componenti del primo membro sono rispettivamente: le forze di pressione sulla verticale 1, le forze di pressione sulla verticale 2, la componente lungo x della pressione al fondo, della resistenza al fondo e la componente lungo x della tensione sulla superficie (dovuta all'azione del vento). Il secondo membro contiene invece i momenti quantità di moto rispettivamente sulla verticale 2 e sulla verticale 1. Dal punto di vista analitico i termini sopra descritti assumono la seguente forma:

$$\begin{aligned}
 \Pi_{1x} &= \frac{1}{2} \rho g h_1^2 & \Pi_{fx} &= \rho g h_* S_f dx & M_{1x} &= \rho u_1^2 h_1 \\
 \Pi_{2x} &= \frac{1}{2} \rho g h_2^2 & \Pi_{wx} &= \tau_w dx & M_{2x} &= \rho u_2^2 h_2 \\
 \Pi_{bx} &= \rho g h dx \tan(\alpha)
 \end{aligned}
 \tag{A-2.12}$$

dove g rappresenta l'accelerazione di gravità, h_1 e h_2 rappresentano le profondità della corrente nelle sezioni 1 e 2, u_1 e u_2 sono le velocità normali alle due sezioni, dx è la distanza fra le sezioni di calcolo, α rappresenta la pendenza del fondo (di modesta entità), τ_w rappresenta le tensioni che vengono scambiate tra aria e acqua, ed infine il termine S_f rappresenta la pendenza d'attrito.

La profondità h_* è una profondità 'media' ed assume un valore $h_* \in [h_1, h_2]$.

Se si opera il passaggio al limite, per un dx molto piccolo, l'equazione [A-2.11] nel caso non stazionario diventa:

$$\frac{d(uh)}{dt} + \frac{d}{dx} \left(u^2 h + \frac{1}{2} g h^2 \right) = g h_* \left[\left(-\frac{dz_b}{dx} \right) - S_f + \frac{\tau_w}{\gamma R} \right]
 \tag{A-2.13}$$

Questa equazione valida nel caso monodimensionale (1D) viene riscritta nelle direzioni x e y nel caso bidimensionale (2D):

$$\frac{d(uh)}{dt} + \frac{d}{dx} \left(u^2 h + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{d}{dy} (uvh) = g h_* \left[\left(-\frac{dz_{b,x}}{dx} \right) - S_{f,x} + \frac{\tau_{w,x}}{\gamma R} \right]
 \tag{A-2.14}$$

$$\frac{d(uh)}{dt} + \frac{d}{dx} (uvh) + \frac{d}{dy} \left(v^2 h + \frac{1}{2} g h^2 \right) = g h_* \left[\left(-\frac{dz_{b,y}}{dy} \right) - S_{f,y} + \frac{\tau_{w,y}}{\gamma R} \right]
 \tag{A-2.15}$$

dove con $s_{0x} = -\partial z_{b,x} / \partial x$ e $s_{0y} = -\partial z_{b,y} / \partial y$ si rappresentano rispettivamente le pendenze del fondo in direzione x e y e con $s_{f,x}$ e $s_{f,y}$ si rappresentano le pendenze d'attrito in un sistema di riferimento cartesiano.

2.3 Il modello delle SWE in forma compatta

Il sistema di equazioni [A-2.10, A-2.14 e A-2.15] può essere scritto in forma compatta e conservativa come:

$$\frac{dU}{dt} + \frac{dE}{dx} + \frac{dG}{dy} + S = 0
 \tag{A-2.16}$$

$$U = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{g}{2}h^2 \\ uvh \end{bmatrix} \quad G I = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{g}{2}h^2 \end{bmatrix} \quad S J = \begin{bmatrix} 0 \\ gh_* \left[S_{o,x} - S_{f,x} + \frac{\tau_{w,x}}{\gamma_R} \right] \\ gh_* \left[S_{o,y} - S_{f,y} + \frac{\tau_{w,y}}{\gamma_R} \right] \end{bmatrix} \quad [A-2.17]$$

Che restituisce un sistema di equazioni di bilancio non omogeneo ovvero caratterizzate da un termine sorgente non nullo.

3 Schema di integrazione numerica del modello idrodinamico

3.1 Introduzione

I metodi numerici sostituiscono al problema *continuo* rappresentato dalle equazioni alle derivate parziali (PDEs) un problema *discreto* ottenuto suddividendo il dominio di calcolo in elementi finiti.

In un semplice approccio alle differenze finite, i valori delle variabili di stato rappresentano valori puntuali su un dominio costituito da una griglia definita per punti, mentre in uno schema ai volumi finiti le grandezze discrete rappresentate come grandezza medie “di cella” definite all’interno di celle o volumi di controllo.

Volendo rappresentare, in un approccio generale, soluzioni che ammettono discontinuità, si devono affrontare due problemi:

- i) la formulazione delle equazioni che governano il fenomeno;
- ii) lo schema numerico utilizzato per risolvere le equazioni.

Riguardo il primo punto, per la corretta descrizione delle brusche discontinuità le equazioni debbono essere scritte in forma conservativa.

La tecnica di integrazione scelta per l’implementazione del modello è il metodo ai volumi finiti (FVM) di tipo Godunov, caratterizzato da:

- soluzione discretizzata mediante medie di cella;
- schema basato sulle equazioni scritte in forma conservativa;
- possibilità di utilizzo di griglie non strutturate;
- facilità di implementazione.

La grande estensione del bacino in esame e le irregolarità del contorno rendono ideale l’utilizzo di un metodo ai volumi finiti con una griglia non strutturata. In particolare la griglia di calcolo utilizzata è a celle triangolari.

Un’altra motivazione che guida la scelta dello schema è da ricercarsi nella combinazione tra semplicità di implementazione, stabilità e accuratezza nei risultati ottenuti, con la possibilità inoltre di raffinare la discretizzazione (aumentare il numero delle celle) ove necessario, in zone di particolare interesse.

Uno schema di tipo Godunov è uno schema di tipo *upwind*, ovvero permette la discretizzazione della soluzione in accordo al segno della celerità di propagazione delle piccole perturbazioni [A-19]., Lo

schema di tipo Godunov accurato al primo ordine può essere ricondotto ad uno schema CIR (i.e. schema upwind costruito da Courant, Isaacson e Rees [A-3]).

3.2 Il metodo dei volumi finiti (FVM)

Il metodo dei volumi finiti può essere applicato per l'integrazione delle equazioni alle acque basse estese al caso monodimensionale (1D) e bidimensionale (2D).

Si consideri la parte omogenea dell'equazione alle acque basse in forma compatta:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = 0 \quad [\text{A-3.1}]$$

oppure esplicitando le componenti del flusso \mathbf{F} :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = 0 \quad [\text{A-3.2}]$$

Si consideri il generico volume di controllo ΔV , *volume finito*, sul quale integrare le equazioni del moto:

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} dV + \int_{\Delta V} \nabla \mathbf{F} dV = 0 \quad [\text{A-3.3}]$$

Applicando il teorema della divergenza alla [A-3.3] si trasforma l'integrale di volume applicato al gradiente del flusso in un integrale applicato alla frontiera Δs del dominio di calcolo:

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} dV + \oint_{\Delta s} (\mathbf{F} \cdot \bar{\mathbf{n}}) ds = 0 \quad [\text{A-3.4}]$$

Il primo integrale rappresenta l'integrale di volume della variazione locale del vettore delle variabili conservative, mentre il secondo integrale rappresenta il flusso normale alla superficie del volume di controllo, di massa e quantità di moto. È utile una precisazione sulla terminologia usualmente impiegata in letteratura. Nel caso 2D il “volume di controllo” ΔV è la superficie di cella, mentre il flusso $\mathbf{F} \cdot \bar{\mathbf{n}} = (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}_x + \mathbf{G} \cdot \mathbf{n}_y)$ è l'integrale sul perimetro della cella stessa. In figura 3-1 si riporta un esempio di volume di controllo nel caso 2D con riferimento alle mesh non strutturate:

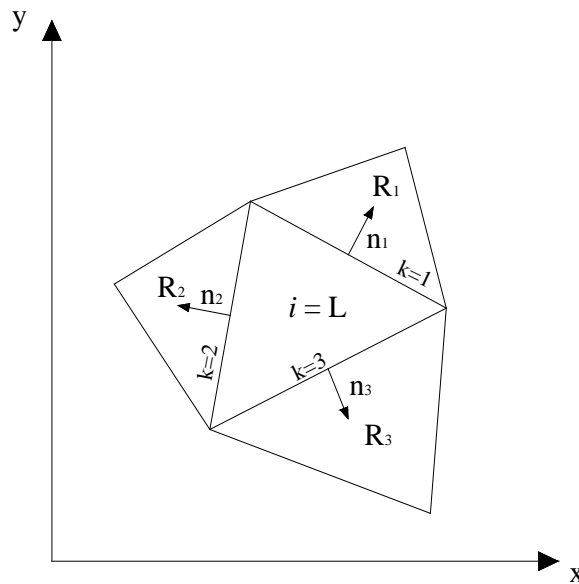


Figura 3-1 Isolamento della singola cella di calcolo in una mesh non strutturata

Riprendendo l'equazione [A-3.4], si introduce per il vettore \mathbf{U} un valore spaziale medio, costante sulla cella in un dato istante t :

$$\bar{\mathbf{U}} = \frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} \mathbf{U} dV \quad [\text{A-3.5}]$$

mentre per l'integrale flusso si procede per via discreta, lato per lato, sommando i valori mediati sul lato di cella. Il valore medio del flusso numerico sul singolo lato sarà calcolato come:

$$\mathbf{F}_k \cdot \bar{\mathbf{n}}_k = \frac{1}{\Delta S_k} \int_{\Delta S_k} (\mathbf{F} \cdot \bar{\mathbf{n}}) ds \quad [\text{A-3.6}]$$

dove $k = 1, 2, 3$ rappresenta il generico lato di cella.

Con le semplificazioni [A-3.5] e [A-3.6] si ottiene la seguente espressione,

$$\frac{d}{dt} \bar{\mathbf{U}} + \sum_{k=1}^m (\mathbf{F}_k \cdot \bar{\mathbf{n}}_k) \Delta S_k = 0 \quad [\text{A-3.7}]$$

dove l'indice k è relativo al lato della cella (in generale i diversi schemi ai volumi finiti [A-19] si differenziano per l'espressione del flusso numerico \mathbf{F} all'interfaccia).

3.3 Lo schema ai volumi finiti di tipo Godunov

I metodi di tipo Godunov (1959) devono la loro recente popolarità alla loro grande versatilità che ne permette l'applicazione a problemi di natura molto diversa quali l'interazione di onde di superficie o la modellazione di fenomeni di trasporto dei sedimenti, anche a fondo mobile. Essi hanno la capacità di cogliere esattamente la corretta celerità di propagazione delle onde anche in presenza di risalti

idraulici, mobili o stazionari, senza dare origine a oscillazioni antifisiche.

Le caratteristiche peculiari dello schema di Godunov si possono sintetizzare affermando che in tali modelli le variabili conservative sono costanti nello spazio nelle singole celle e che lo schema si fonda sulla soluzione di un problema di Riemann all'interfaccia delle celle (si veda la definizione di problema di Riemann data nei prossimi paragrafi).

Le prime applicazioni del metodo FVM di Godunov [A-6] prevedevano il ricorso alla soluzione esatta del problema di Riemann. Successivamente l'incremento dall'ordine di accuratezza delle tecniche numeriche utilizzate e lo sviluppo di solutori approssimati del problema di Riemann (e.g.[A-8], [A-11]), hanno consentito la semplificazione complessiva dei modelli senza ridurre la qualità della soluzione.

Il passaggio ad elevati ordini di accuratezza è stato necessariamente accompagnato da opportune tecniche per la soppressione delle oscillazioni spurie in prossimità dei risalti idraulici. In particolare è stato con l'introduzione dei metodi TVD (*Total Variation Diminishing*) che si è riusciti ad ottenere risultati soddisfacenti con modelli di ragionevole semplicità [A-9].

Lo schema di tipo Godunov su cui si basa il modello di calcolo è di tipo *upwind*, ovvero tiene correttamente in conto le direzioni di propagazione delle onde elementari nella definizione di vari componenti dello schema.

Tralasciando per un momento i termini sorgente, si consideri la legge di conservazione scalare ed omogenea:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = 0 \quad [\text{A-3.8}]$$

Riepiloghiamo brevemente i passi essenziali del metodo.

Innanzitutto va definita una soluzione costante a tratti nello spazio relativa al tempo $n \cdot \Delta t$. La relazione fra la soluzione esatta e le medie di cella si ottiene integrando nel tempo e nello spazio la [A-3.8].

Si consideri il volume di controllo $I = [x_{i-1/2}, x_{i+1/2}]$.

L'integrazione nello spazio porta a:

$$\int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} dx + \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} dx = 0 \quad [\text{A-3.9}]$$

$$\frac{d}{dt} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \mathbf{U}(x, t) dx + \mathbf{F}(\mathbf{U}(x_{i+1/2})) - \mathbf{F}(\mathbf{U}(x_{i-1/2})) = 0 \quad [\text{A-3.10}]$$

La successiva integrazione rispetto al tempo conduce a:

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} \left(\frac{d}{dt} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \mathbf{U}(x,t) dx \right) dt + \int_{t_n}^{t_{n+1}} (\mathbf{F}(\mathbf{U}(x_{i+1/2})) - \mathbf{F}(\mathbf{U}(x_{i-1/2}))) dt = 0 \quad [\text{A-3.11}]$$

Definendo ora l'integrale nello spazio delle variabili conservative come media di cella e l'integrale nel tempo dei flussi come una media temporale tra l'istante t_n e t_{n+1} :

$$\bar{\mathbf{U}}_i = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \mathbf{U}(x,t) dx \quad [\text{A-3.12}]$$

$$\bar{\mathbf{F}} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_n}^{t_{n+1}} \mathbf{F}(\mathbf{U}(x,t)) dt \quad [\text{A-3.13}]$$

si ottiene la seguente espressione:

$$\bar{\mathbf{U}}_i^{n+1} = \bar{\mathbf{U}}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [\bar{\mathbf{F}}(\mathbf{U}(x_{i+1/2})) - \bar{\mathbf{F}}(\mathbf{U}(x_{i-1/2}))] \quad [\text{A-3.14}]$$

L'avanzamento nel tempo è ottenuto di volta in volta tramite la soluzione del problema di Riemann all'interfaccia delle singole celle.

Il problema di Riemann è un problema alle condizioni iniziali in cui una frontiera (che nel riferimento locale è posta a $x = 0$) separa due stati costanti :

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \\ U(x, 0) = \begin{cases} U_L & x \leq 0 \\ U_R & x > 0 \end{cases} \end{cases} \quad [\text{A-3.15}]$$

La soluzione esatta di questo problema è di difficile trattazione e comporta in genere un onere computazionale elevato. Spesso per il calcolo dei flussi \mathbf{F} alle frontiere di cella si utilizzano perciò solutori approssimati del problema: nel nostro caso è stato scelto il solutore HLLC [A-19]. Il calcolo dei flussi numerici, indicati con \mathbf{F}^* , consente di calcolare la soluzione \mathbf{U} al passo temporale successivo attraverso le espressioni sotto riportate, valide rispettivamente per il caso 1D e 2D:

$$\bar{\mathbf{U}}_i^{n+1} = \bar{\mathbf{U}}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [\mathbf{F}_{i+1/2}^* - \mathbf{F}_{i-1/2}^*] \quad 1\text{D} \quad [\text{A-3.16}]$$

$$\bar{\mathbf{U}}_i^{n+1} = \bar{\mathbf{U}}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta V} \sum_{k=1}^n (\mathbf{F}_k^* \cdot \mathbf{n}_k) ds_k \quad 2\text{D} \quad [\text{A-3.17}]$$

dove:

\mathbf{U}_i = media di cella

\mathbf{F}^* = flusso numerico HLLC

\mathbf{n}_k = normale al lato k -esimo

ds_k = lunghezza del lato k -esimo

3.3.1 Solutore HLLC

Il solutore HLLC [A-18] è una variante del solutore HLL [A-9].

Il solutore HLL riduce tutte le possibili configurazioni che si possono originare a partire dai due stati costanti U_L e U_R a due onde di shock, con origine sulla frontiera, che si muovono con celerità S_L e S_R , e separano U_L e U_R da uno stato intermedio indicato con U^* (normalmente detto *stato star*). U^* è esprimibile analiticamente una volta stimate S_L e S_R .

Utilizzando la medesima terminologia, nel solutore HLLC si distinguono due differenti *stati star*, separati da una ulteriore onda che si muove con celerità S^* (Figura 3-2):

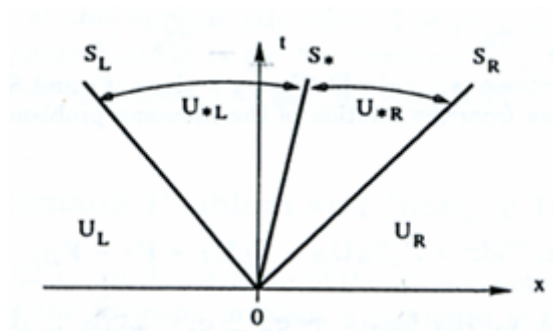


Figura 3-2 Schema del solutore HLLC del problema di Riemann nel piano x-t

In aggiunta alle celerità di propagazione S_L e S_R del solutore HLL, si rende necessaria la stima della celerità S^* dell'onda intermedia. Nella soluzione esatta del problema di Riemann si ha che $S^* = u_*$, dove u_* è la stima della variabile velocità nello stato intermedio U^* , ottenuta con le espressioni seguenti:

$$u_* = \frac{1}{2}(\bar{\mathbf{v}}_L + \bar{\mathbf{v}}_R) \cdot \bar{\mathbf{n}} + \sqrt{gh_L} - \sqrt{gh_R} \quad [A-3.18]$$

$$c_* = \sqrt{gh_*} = \frac{1}{2}(\sqrt{gh_L} + \sqrt{gh_R}) + \frac{1}{4}(\bar{\mathbf{v}}_L - \bar{\mathbf{v}}_R) \cdot \bar{\mathbf{n}}$$

Assumendo quindi nota la celerità di propagazione dell'onda intermedia, il flusso numerico HLLC può essere scritto come:

$$\mathbf{F}_{i+\frac{1}{2}} = \begin{cases} \mathbf{F}_L & \text{se } S_L \geq 0 \\ \mathbf{F}_{*L} & \text{se } S_L \leq 0 \leq S_* \\ \mathbf{F}_{*R} & \text{se } S_* \leq 0 \leq S_R \\ \mathbf{F}_R & \text{se } S_R \leq 0 \end{cases} \quad [A-3.19]$$

I termini di flusso nella regione intermedia sono ottenuti applicando la condizione di Rankine-Hugoniot [A-19]:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{*L} - \mathbf{F}_L &= S_L (\mathbf{U}_{*L} - \mathbf{U}_L) \\ \mathbf{F}_{*R} - \mathbf{F}_R &= S_R (\mathbf{U}_{*R} - \mathbf{U}_R) \end{aligned} \quad [A-3.20]$$

mentre le variabili di stato nelle regioni intermedie, nel caso 2D, sono ottenute da:

$$U_{*k} = h_k \begin{pmatrix} \frac{S_k - u_k}{S_k - S_*} \\ S_* \\ v_k \end{pmatrix} \quad [A-3.21]$$

dove il pedice k indica prima il valore a sinistra (L) e poi il valore a destra (R) rispetto alla frontiera di calcolo.

La relazione [A-3.21] si ottiene manipolando le relazioni dei flussi nella regione intermedia ed imponendo $S_* = u_*$.

Si osserva che la formulazione del metodo HLLC può essere notevolmente semplificata avvalendosi della soluzione del metodo HLL. Infatti se si considera la proiezione monodimensionale del problema lungo x la terza componente del flusso (i.e. huv) può essere espressa in termini della prima componente del flusso (hu) e della variabile v (velocità nella direzione y) , come

$$F(3) = F(1) \cdot v.$$

Le prime due componenti del flusso HLLC sono esattamente quelle del flusso HLL monodimensionale, mentre la terza componente assume i seguenti valori:

$$F_{i+\frac{1}{2}}^3 = \begin{cases} F_{i+\frac{1}{2}}^1 \cdot v_L & \text{se } u_* \geq 0 \\ F_{i+\frac{1}{2}}^1 \cdot v_R & \text{se } u_* \leq 0 \end{cases} \quad [A-3.22]$$

E' dunque la terza componente del flusso a cambiare attraversando l'onda di celerità S_* .

Nel modello numerico qui presentato si sfrutta questa proprietà per ottenere una formulazione semplice. In particolare, focalizzando l'attenzione sul generico lato k della cella triangolare, si procede nel seguente modo:

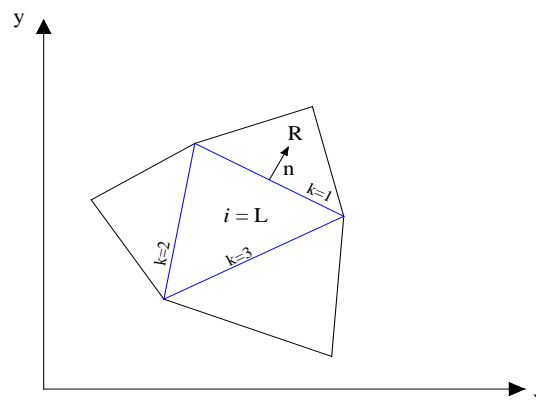


Figura 3-3 Schema di calcolo per la determinazione dei flussi alla frontiera di cella.

- determinazione di \mathbf{U}_L , vettore delle variabili conservative ricostruito sul lato k della cella di calcolo i . Per notazione, le variabili di stato a sinistra della frontiera (indice L) sono relative alla cella di calcolo, mentre i valori a destra (indice R) sono di volta in volta quelli delle tre celle adiacenti a quella di calcolo;
- identificazione di \mathbf{U}_R , ricostruito sul lato k della cella adiacente condiviso con la cella i ;
- applicazione della matrice di rotazione \mathbf{T} ad \mathbf{U}_L e \mathbf{U}_R , in modo da riscrivere tali quantità nel sistema di riferimento solidale al lato della cella. Il sistema di riferimento solidale alla cella ha un asse perpendicolare ed uno parallelo al lato stesso. Si ottengono i valori $\hat{\mathbf{U}}_L$ e $\hat{\mathbf{U}}_R$;
- determinazione dei flussi nel sistema di riferimento ruotato $\hat{\mathbf{F}} = \mathbf{F}(\hat{\mathbf{U}}_L)$ e $\hat{\mathbf{F}} = \mathbf{F}(\hat{\mathbf{U}}_R)$;
- stima delle grandezze S_L , S_R , u^* , c^* , le quali, a loro volta, devono essere proiettate nel sistema di riferimento solidale al lato della cella di calcolo.
- applicazione della seguente procedura (con $S^* = u^*$)

$$\hat{\mathbf{F}}_{i+\frac{1}{2}} = \begin{cases} \hat{\mathbf{F}}_L & \text{se } S_L \geq 0 \\ \hat{\mathbf{F}}^* & \text{se } S_L < 0 \text{ e } S_R > 0 \\ \hat{\mathbf{F}}_R & \text{se } S_R \leq 0 \end{cases}$$

con:

$$\hat{\mathbf{F}}^* = \frac{S_R \hat{\mathbf{F}}_L - S_L \hat{\mathbf{F}}_R + S_L S_R (\hat{\mathbf{U}}_R - \hat{\mathbf{U}}_L)}{S_R - S_L}$$

La terza componente del flusso sarà quindi modificata con l'espressione [A-3.22], in quanto il termine di flusso è ancora 1D.

$$\hat{\mathbf{F}}_{i+\frac{1}{2}}^3 = \begin{cases} \hat{\mathbf{F}}_{i+\frac{1}{2}}^1 \cdot \hat{\nu}_L & \text{se } u_* \geq 0 \\ \hat{\mathbf{F}}_{i+\frac{1}{2}}^1 \cdot \hat{\nu}_R & \text{se } u_* \leq 0 \end{cases}$$

Applicando ora a $\hat{\mathbf{F}}$ la matrice \mathbf{T}^{-1} si otterrà l'espressione del flusso HLLC nel caso 2D.

3.3.2 Incremento dell'ordine di accuratezza nello spazio

Per raggiungere il secondo ordine di accuratezza nello spazio è stata utilizzata la tecnica MUSCL (*Monotone Upwind Scheme for Conservation Laws*) [A-21] con la ricostruzione delle variabili nei punti medi dei lati della singola cella di calcolo (sulle frontiere della cella), a partire dai valori medi di cella delle variabili contenute in \mathbf{U} .

La ricostruzione delle variabili all'interfaccia di cella porta la soluzione da costante a tratti a lineare a tratti: ad esempio, la figura 3-4 raffigura lo schema di ricostruzione nel caso 1D.

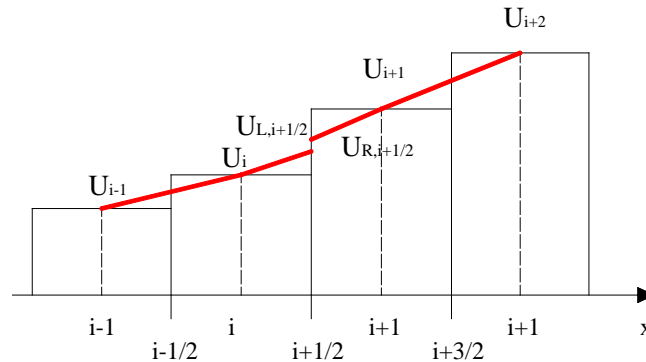


Figura 3-4 Ricostruzione delle variabili all'interfaccia; caso 1D.

Il problema di Riemann all'interfaccia sarà risolto utilizzando i valori ricostruiti delle variabili conservative, alla sinistra e alla destra di ogni lato della cella di calcolo.

Per applicare la tecnica MUSCL si rende necessario calcolare la pendenza del piano passante per i baricentri delle tre celle adiacenti a quella di calcolo rispetto al riferimento cartesiano, e successivamente il gradiente delle variabili conservative riferite ai centri cella.

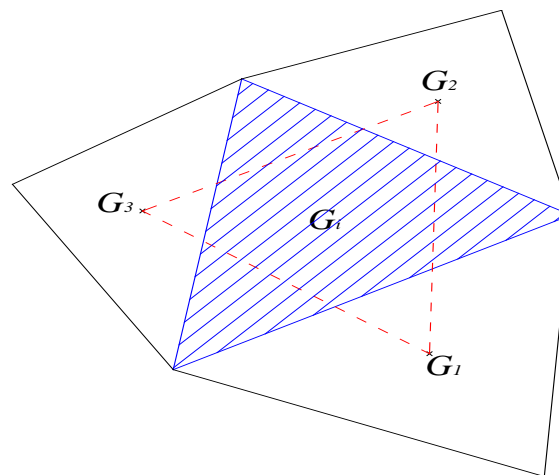


Figura 3-5 In blu è rappresentata la cella di calcolo; in nero sono rappresentate le tre celle su cui è calcolato il gradiente; le linee tratteggiate rappresentano il piano passante per i tre baricentri.

Nel modello è stata utilizzata la seguente procedura:

- calcolo del gradiente sui valori delle variabili conservative relative alle tre celle adiacenti a quella di calcolo;
- limitazione delle pendenze del piano passante per i suddetti punti;
- ricostruzione delle variabili all'interfaccia di cella;

3.3.3 Calcolo del gradiente

La determinazione del gradiente è avvenuta calcolando l'equazione del piano passante per i tre baricentri delle celle adiacenti a quella di calcolo. L'equazione del piano per i tre baricentri è data da:

$$\det \begin{vmatrix} x & y & q & 1 \\ x_1 & y_1 & q_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & q_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & q_3 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad [\text{A-3.23}]$$

dove (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) rappresentano le coordinate dei vertici della cella di calcolo e q_1 , q_2 e q_3 rappresentano la generica variabile conservativa riferita al baricentro delle celle adiacenti a quella di calcolo. L'equazione del piano assumerà la forma:

$$q = -x \frac{a}{c} + y \frac{b}{c} + \frac{d}{c} \quad [\text{A-3.24}]$$

dove i coefficienti a , b , c rappresentano i determinanti dei minori relativi alla prima riga della matrice [A-3.23]. La pendenza rispetto agli assi x e y risulterà infine pari a δ_x, δ_y :

$$\delta_x = \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{a}{c} = \frac{(y_2 - y_3)q_1 + (y_3 - y_1)q_2 + (y_1 - y_2)q_3}{x_1y_2 + y_1x_3 + x_2y_3 - x_3y_2 - x_1y_3 - x_2y_1} \quad [\text{A-3.25}]$$

$$\delta_y = \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{b}{c} = \frac{(x_3 - x_2)q_1 + (x_1 - x_3)q_2 + (x_2 - x_1)q_3}{x_1y_2 + y_1x_3 + x_2y_3 - x_3y_2 - x_1y_3 - x_2y_1} \quad [\text{A-3.26}]$$

Il valore di $\left[\delta_x q, \delta_y q \right]^T$ costituisce un valore di pendenza non limitata. Si osserva che con tale procedura si ottengono tre valori di pendenza, uno per ogni variabile conservativa.

Attenzione particolare deve essere posta affinché non si generino oscillazioni spurie della soluzione e pendenze del piano eccessivamente elevate, che potrebbero rendere instabile lo schema di calcolo.

A tale scopo si rende necessario limitare il gradiente sopra calcolato utilizzando dei limitatori di flusso (*Flux Limiter Approach*) o di pendenza (*Slope Limiter Approach*).

In questo caso sono stati applicati dei limitatori di pendenza il cui trattamento è riportato nel paragrafo successivo. Il nuovo valore del gradiente per la generica variabile conservativa sarà

$$\begin{bmatrix} \overline{\delta_x q} \\ \overline{\delta_y q} \end{bmatrix} = \Phi_q \begin{bmatrix} \delta_x q \\ \delta_y q \end{bmatrix} \quad [\text{A-3.27}]$$

dove Φ_q è la funzione limitante e $\left[\overline{\delta_x q}, \overline{\delta_y q} \right]^T$ rappresenta il gradiente limitato.

3.3.4 Limitatori di pendenza

Schemi ai volumi finiti ad alto ordine di accuratezza utilizzano dei limitatori di pendenza, *Slope Limiter Approach*, applicati al piano costruito sulle variabili conservative (si veda [A-19] e la bibliografia ivi riportata per una revisione completa dell'argomento). Questi variano la dissipazione numerica al fine di evitare il formarsi di oscillazioni spurie. L'effetto di pendenze eccessivamente elevate è la generazione di errori numerici negli schemi ad alta risoluzione [A-12].

Sul modello è stato implementato il limitatore *Superbee* [A-19], per la sua capacità di rimanere stabile anche con valori elevati del numero di *Courant–Friedrichs–Lewy* (CFL).

Il limitatore di pendenza del piano per la generica variabile conservativa q è definito come:

$$\Phi_q = \begin{cases} 0 & \text{se } r_k \leq 0 \\ 2r_k & \text{se } 0 \leq r_k \leq 1/2 \\ 1 & \text{se } 1/2 \leq r_k \leq 1 \\ \min\{r_k, \xi_R(r_k), 2\} & \text{se } r_k \geq 1 \end{cases} \quad [\text{A-3.28}]$$

dove:

$$\begin{aligned} \xi_R(r_k) &= \frac{2\beta_{i+1/2}}{1+r_k} & \beta_{i+1/2} &= \frac{2}{1-c} \\ r_k &= \frac{\Delta_{i+1/2}}{\Delta_{i-1/2}} & \Delta_{i-1/2} &= q_{LR,k} - q_L \\ \Delta_{i+1/2} &= q_R - q_{LR,k} & q_{LR,k} &= \frac{q_{L,k} + q_{R,k}}{2} \end{aligned}$$

Con q_L , q_R si indicano rispettivamente le variabili conservative calcolate nel baricentro della cella di calcolo e nella cella adiacente a questa; $q_{L,k}$, $q_{R,k}$ rappresentano le variabili conservative ricostruite a destra e sinistra del k -esimo lato della cella considerata; $q_{LR,k}$ rappresenta la media delle variabili conservative ricostruite nel punto medio del lato k della cella di calcolo; infine, c rappresenta il numero CFL.

Il calcolo di $q_{L,k}$, $q_{R,k}$ è stato effettuato utilizzando il gradiente non limitato delle variabili conservative.

3.3.5 Ricostruzione delle variabili conservative all'interfaccia

Come riportato al paragrafo precedente la ricostruzione delle variabili all'interfaccia è stata effettuata con la tecnica MUSCL.

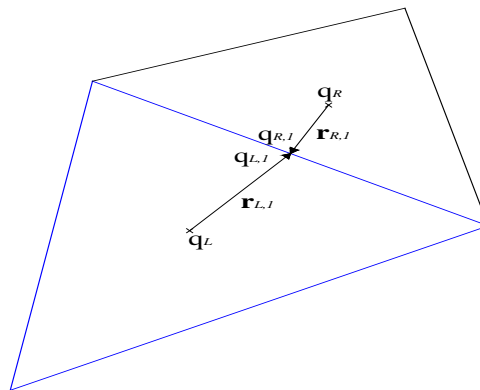


Figura 3-6 Schema di ricostruzione delle variabili conservative nei punti medi dei lati della cella di calcolo

$$q_{L,1} = q_L + \mathbf{r}_{L,1} \left(\overline{\nabla q} \right)_L \quad [\text{A-3.29}]$$

$$q_{R,1} = q_R + \mathbf{r}_{R,1} \left(\overline{\nabla q} \right)_R \quad [\text{A-3.30}]$$

$q_{L,1}$ e $q_{R,1}$ rappresentano i valori della generica variabile conservativa ricostruita a sinistra (L) e destra (R) del lato di calcolo; q_L e q_R rappresentano rispettivamente i valori della variabile conservativa nel centro cella di L e R; $\mathbf{r}_{L,1}$ e $\mathbf{r}_{R,1}$ rappresentano il vettore che unisce il baricentro delle celle L, R con il punto medio del lato; infine $(\overline{\nabla q})_L$, $(\overline{\nabla q})_R$ rappresentano i gradienti limitati della generica variabile conservativa q_L , q_R nelle rispettive celle L, R.

Il calcolo del flusso numerico attraverso il lato è effettuato utilizzando i valori $q_{L,1}$ e $q_{R,1}$ e calcolando la soluzione del problema di Riemann. Una volta determinati i flussi numerici attraverso i tre lati della cella L, è possibile calcolare la nuova soluzione costante a tratti utilizzando la relazione [A-3.7].

Per ottenere un valore accurato delle variabili conservative all'interfaccia, al modello è stato applicato il *Surface Gradient Method* [A-25], che prevede il calcolo del gradiente in termini di livello anziché di profondità. Questo metodo permette una miglior valutazione dei flussi, ed è applicabile a moti stazionari e non stazionari.

Il livello η_i per la generica cella i è calcolato come:

$$\eta_i(x, t) = h_i(x, t) + z_{G,i} \quad [\text{A-3.31}]$$

dove con h_i e $z_{G,i}$ si indicano rispettivamente la profondità e la quota del fondo riferite al baricentro della cella di calcolo.

Una volta disponibili i valori di livello al centro di ogni cella della mesh, il procedimento di ricostruzione delle variabili nei punti medi dei lati è rispondente alla procedura descritta in precedenza. Il gradiente delle variabili conservative sarà calcolato sul vettore $\mathbf{U} = [\eta \text{ } u_h \text{ } v_h]^T$ delle singole celle, nel seguente modo:

- 1) calcolo dei livelli in corrispondenza del baricentro di ogni cella;
- 3) calcolo del gradiente limitato delle variabili conservative per ogni cella della mesh;
- 3) ricostruzione delle variabili conservative nei punti medi dei lati di ogni cella.

3.3.6 Incremento dell'ordine di accuratezza nel tempo

Per incrementare l'ordine di accuratezza nel tempo è stato utilizzato un metodo di Runge – Kutta Strong Stability Preserving specifico per leggi di conservazione ([A-14], [A-7], [A-10]). Tali tecniche di integrazione temporale permettono di ottenere schemi ad alto ordine a partire da modelli accurati al primo ordine mantenendo le proprietà di stabilità di questi ultimi, una volta scelto opportunamente il passo temporale Δt di calcolo.

Il modello al primo ordine di riferimento in questo lavoro è ottenuto con l'introduzione delle tecniche di limitazione delle pendenze descritte precedentemente. Con l'introduzione di tali tecniche è stato infatti possibile costruire un modello stabile, ovvero privo di oscillazioni in corrispondenza delle discontinuità della soluzione.

Il passaggio *all'ordine di accuratezza due* nel tempo è ottenuto mediante l'applicazione del metodo di Runge-Kutta al secondo ordine, che prevede il calcolo della soluzione in due passi distinti:

$$\begin{aligned} \text{passo } n^{\circ}1 \quad \mathbf{U}^{(1)} &= \mathbf{U}^n + \Delta t \cdot \mathbf{L}(\mathbf{U}^n) \\ \text{passo } n^{\circ}2 \quad \mathbf{U}^{n+1} &= \frac{1}{2}\mathbf{U}^n + \frac{1}{2}\mathbf{U}^{(1)} + \frac{1}{2}\Delta t \cdot \mathbf{L}(\mathbf{U}^{(1)}) \end{aligned} \quad [\text{A-3.32}]$$

L'operatore $\mathbf{L}(\mathbf{U}^n)$ è definito come:

$$\mathbf{L}(\mathbf{U}^n) = \frac{1}{A_i} \left[- \sum_{k=1}^3 F_{i,k} \bar{n}_{i,k} l_{i,k} + S_0 - S_f + S_w \right] \quad [\text{A-3.33}]$$

dove \mathbf{S}_0 , \mathbf{S}_f e \mathbf{S}_w rappresentano i termini sorgente legati alla pendenza del fondo, alla pendenza d'attrito e agli sforzi generati dal vento.

Va precisato che il ricorso a schemi accurati al secondo ordine permette di ottenere errori di calcolo paragonabili a schemi accurati al primo ordine ma ricorrendo a griglie decisamente più rade (con un minor numero di elementi). Complessivamente i tempi computazionali della simulazione con schemi ad alto ordine di accuratezza risultano di conseguenza minori. Tale peculiarità rende il modello di calcolo particolarmente adatto al contesto in esame in riferimento alla grande estensione del dominio di simulazione.

Al modello numerico qui presentato è applicata una tecnica SSPRK22 (due passi di calcolo e secondo ordine di accuratezza) con CFL limitato a 0.5.

3.3.7 Termini Sorgente

In tutte le applicazioni pratiche riguardanti eventi naturali, in cui si deve riprodurre il comportamento di un fluido in movimento sopra una batimetria irregolare caratterizzata da una scabrezza non nulla, le pendenze del fondo e le perdite di carico non sono più trascurabili; pertanto si rende necessario un trattamento del termine sorgente per ottenere risultati significativi.

Per la trattazione del termine sorgente si è scelto di utilizzare la procedura che prende il nome di DFB (*Divergence Form for Bed Slope Source Term*) [A-17].

Questa tecnica è basata sulla scrittura del termine sorgente in forma di divergenza. Il nuovo trattamento del termine sorgente richiede il minimo sforzo computazionale mantenendo una sorprendente semplicità rispetto ai metodi tradizionali di trattamento del termine sorgente.

Per l'implementazione della pendenza d'attrito è stata semplicemente utilizzata una formula di tipo Manning.

La presenza del vento, assolutamente rilevante in un contesto come quello analizzato, è trattata applicando una tensione superficiale sul pelo libero della cella.

Pendenza del fondo: il metodo DFB

Rimandando alla letteratura scientifica per i dettagli e la trattazione analitica del problema, si riporta qui solamente la parte di implementazione numerica.

Integrando le SWE su un generico volume di controllo si ottiene:

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} dV + \int_{\Delta V} \nabla \cdot \mathbf{F} dV = \int_{\Delta V} \mathbf{S} dV \quad [\text{A-3.34}]$$

dove ΔV è il volume di controllo della cella i . L'applicazione del teorema della divergenza al termine di flusso porta alla seguente scrittura:

$$\bar{\mathbf{U}}_i^{n+1} = \bar{\mathbf{U}}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta V} \sum_{k=1}^n (F_k^* \cdot \bar{\mathbf{n}}_k) ds_k + \frac{\Delta t}{\Delta V} \int_{\Delta V} \mathbf{S} dV \quad [\text{A-3.35}]$$

dove ds_k ($k = 1, 2, 3$) rappresenta volta per volta la lunghezza dei lati della cella i -esima ed $\bar{\mathbf{n}}_k$ è il vettore normale esterno al k -esimo lato di cella.

L'applicazione numerica del termine sorgente in forma di divergenza, proposto con la tecnica DFB, ne prevede una discretizzazione lato per lato esattamente come effettuato per i termini di flusso.

La discretizzazione dell'ultimo termine del secondo membro nell'equazione [A-3.35] porta alla

seguente scrittura:

$$\frac{\Delta t}{\Delta V} \int_{\Delta V} \mathbf{S}_0 dV = \frac{\Delta t}{\Delta V} \begin{bmatrix} 0 \\ \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} g h_k^2 \Big|_{\eta=\eta^*} \cdot n_x dS_k \\ \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} g h_k^2 \Big|_{\eta=\eta^*} \cdot n_y dS_k \end{bmatrix} \quad [\text{A-3.36}]$$

dove n_x e n_y sono le componenti cartesiane del vettore normale esterno e h_k è la stima della profondità sul k -esimo lato di cella.

Per completare l'illustrazione della tecnica DFB si rende necessario valutare il livello η^* e le tre profondità h_k . In particolare η^* è valutato come la profondità media di cella più la quota di centro cella, mentre le h_k ($k = 1, 2, 3$) sono calcolate come differenza fra η^* e la quota media del fondo valutata sul punto medio del k -esimo lato della cella. Per una spiegazione più esaustiva del metodo applicato si rimanda a [A-20].

Pendenza d'attrito: la formula di resistenza

Nel modello numerico è stata applicata la formula di resistenza di Manning.

Il termine sorgente $\mathbf{S}_f = [0 \ -ghs_{fx} \ -ghs_{fy}]^T$ è valutato in ogni cella della griglia di calcolo, tenendo conto che:

$$\begin{cases} S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \\ S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \end{cases} \quad [\text{A-3.37}]$$

dove u , v rappresentano le velocità della corrente nelle due direzioni del piano; h rappresenta la profondità nel centro cella; n il coefficiente di resistenza di Manning.

Una scrittura in termini di variabili conservative $\mathbf{U} = [h \ uh \ vh]^T$ porta a:

$$\begin{cases} S_{fx} = \frac{n^2 U_2 \sqrt{U_2^2 + U_3^2}}{U_1^{10/3}} \\ S_{fy} = \frac{n^2 U_3 \sqrt{U_2^2 + U_3^2}}{U_1^{10/3}} \end{cases} \quad [\text{A-3.38}]$$

essendo U_1 , U_2 e U_3 le componenti del vettore delle variabili conservative.

Forzante vento

Per la trattazione degli effetti associati alla presenza del vento, si è scelto di procedere in modo piuttosto semplificato. L'approssimazione più forte consiste nel considerare la distribuzione delle velocità nella cella costante lungo tutta la profondità.

Il vento nell'equazione di bilancio è rappresentato dal termine $\mathbf{S}_w = [0 \text{ ghS}_w \text{ ghS}_w]^T$

S_w è valutato lungo le due direzioni principali, in ogni cella della griglia di calcolo, come:

$$\begin{cases} S_{w;x} = \frac{\tau_{w;x}}{\gamma h} = \frac{C_d \rho_a (w_x - u) \sqrt{(w_x - u)^2 + (w_y - v)^2}}{\gamma h} \\ S_{w;y} = \frac{\tau_{w;y}}{\gamma h} = \frac{C_d \rho_a (w_y - v) \sqrt{(w_x - u)^2 + (w_y - v)^2}}{\gamma h} \end{cases} \quad [\text{A-3.39}]$$

Dove ρ_a è la densità dell'aria; γ è il peso specifico dell'acqua; h rappresenta la profondità nel centro cella; u, v rappresentano le velocità della corrente nelle due direzioni principali; w_x, w_y rappresentano le velocità del vento nelle due direzioni principali ad una altezza di 10 m dal suolo; C_d è il coefficiente dinamico ed esprime la quota parte di sforzo trasferito al fluido.

Il coefficiente dinamico può essere valutato secondo varie valutazioni empiriche, sviluppate in campo oceanografico.

Si riportano di seguito le relazioni che sono state prese in considerazione:

1. Wilson (1960) [A-19]

$$C_d = \begin{cases} 1,1 \times 10^{-3} & \text{se } w \leq 2,8 \text{ m/s} \\ (0,855 + 0,0872 w) \times 10^{-3} & \text{se } 2,8 \leq w \leq 20,0 \text{ m/s} \\ 2,6 \times 10^{-3} & \text{se } w \geq 20,0 \text{ m/s} \end{cases} \quad [\text{A-3.40a}]$$

2. IOS (Institute of Oceanographic Sciences, UK)

$$C_d = (0,63 + 0,066 w) \times 10^{-3} \quad [\text{A-3.40b}]$$

3. Garrat (1977) [A-5]

$$C_d = (0,75 + 0,067 w) \times 10^{-3} \quad [\text{A-3.40c}]$$

4. Heaps (1975) [A-9]

$$z = 15 \text{ m}$$

$$C_d = \begin{cases} 0,565 \times 10^{-3} & \text{se } w \leq 5,00 \text{ m/s} \\ (-0,12 + 0,137 w) \times 10^{-3} & \text{se } 5,00 \leq w \leq 19,22 \text{ m/s} \\ 2,513 \times 10^{-3} & \text{se } w \geq 19,22 \text{ m/s} \end{cases} \quad [\text{A-3.40d}]$$

5. Rijkswaterstaat (1975) $z = 10 \text{ m}$

$$C_d = \begin{cases} 1,7 \times 10^{-3} & \text{se } w \leq 15 \text{ m/s} \\ (-0,7 + 0,16 w) \times 10^{-3} & \text{se } 15 \leq w \leq 20 \text{ m/s} \\ 2,5 \times 10^{-3} & \text{se } w \geq 20 \text{ m/s} \end{cases} \quad [\text{A-3.40e}]$$

6. Demirbilek, Bratos, e Thompson (1993) $z = 10 \text{ m}$

$$C_d = (1,1 + 0,035 w) \times 10^{-3} \quad [\text{A-3.40f}]$$

Rappresentando graficamente le formule prese in considerazione si ottengono i seguenti andamenti:

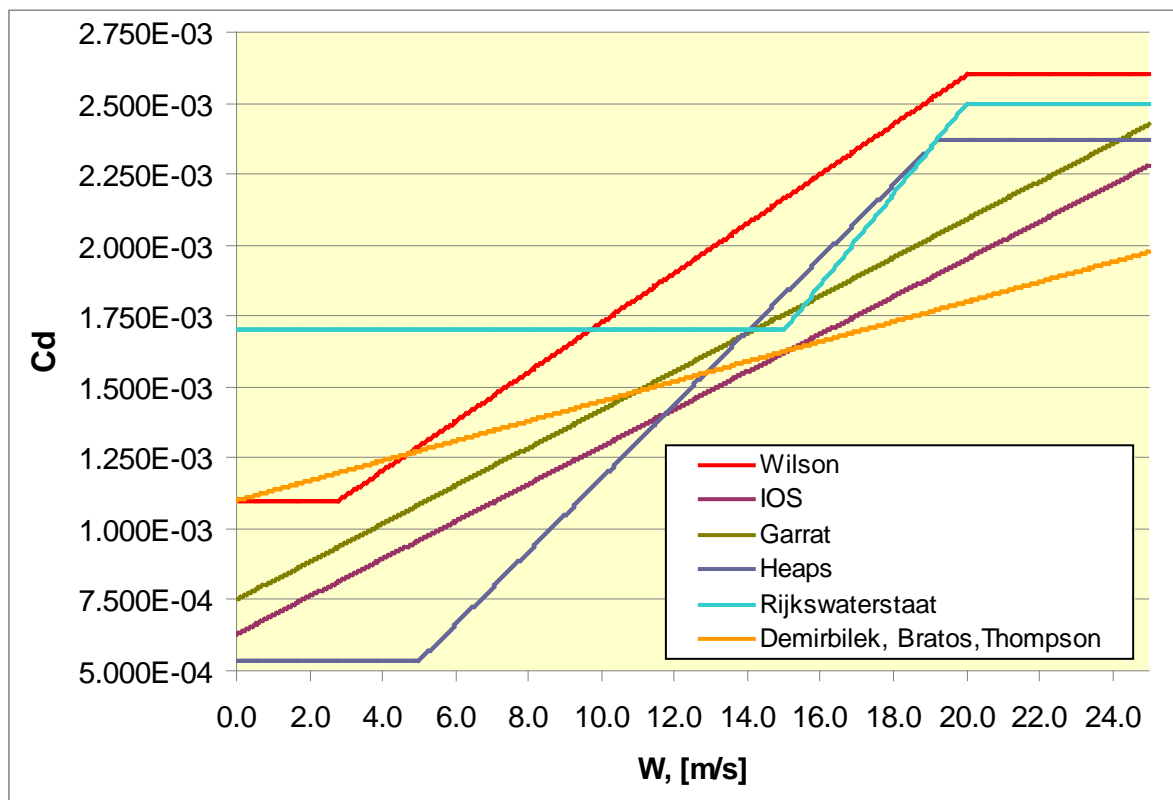


Figura 3-7 Andamento del coefficiente dinamico adimensionale C_d per la valutazione dello stress indotto dal vento in funzione della velocità, secondo differenti formulazioni

Per la sua semplicità di implementazione e visto che l'andamento del coefficiente dinamico è intermedio tra quelli rappresentati (per la fascia di velocità di interesse), è stata scelta la formulazione di Demirbilek, Bratos e Thompson [A-4].

3.3.8 Celle parzialmente sommerse

Gli schemi ai volumi finiti hanno la caratteristica di identificare il volume di fluido contenuto in ogni cella con la profondità media. Per le celle parzialmente sommerse, ovvero con sufficiente volume fluido da bagnare solo uno o due dei tre vertici, il volume di fluido contenuto in ogni cella di calcolo è impropriamente rappresentato dalla semplice profondità valutata al centro della cella stessa. Per questa ragione le celle parzialmente bagnate sono trattate in modo specifico. Al modello è stata applicata la tecnica VFRs (*Volume / free-surface relationships*) [A-1]. Gli schemi ai volumi finiti associano la profondità mediata sulla cella, una grandezza correlata al volume di fluido immagazzinato, con la profondità in corrispondenza del baricentro della cella stessa. Tale relazione è ben posta nelle celle sommerse mentre nelle celle parzialmente sommerse (contenenti sufficiente fluido da bagnare almeno un vertice ma non tutti), la media della profondità è mal rappresentata dalla profondità in corrispondenza del baricentro della cella stessa. Ad esempio è intuitivo il fatto che una cella può contenere acqua anche se la quota del pelo libero è inferiore alla quota del fondo nel baricentro della cella. Nell'approccio VFRs viene fatta distinzione fra la profondità e il livello in corrispondenza del baricentro, associandole solamente attraverso opportune relazioni analitiche derivanti dalla corretta computazione del volume di fluido contenuto nella cella parzialmente bagnata nelle diverse configurazioni possibili. Per una spiegazione più esaustiva del metodo si rimanda a [A-1].

3.3.9 Condizioni al contorno

I modelli alle acque basse sono tipicamente applicati a tronchi fluviali, estuari e zone costiere. Tali sistemi idrici sono caratterizzati dalla presenza di contorni che permettono lo scambio di portate liquide con zone limitrofe, non esplicitamente rappresentate dal modello di calcolo. Si rende indispensabile quindi l'introduzione di condizioni al contorno sullo stato del moto.

Nell'utilizzo del modello si è resa necessaria l'implementazione delle seguenti condizioni al contorno:

- condizioni al contorno riflettenti (contorni impermeabili non attraversati dal fluido);
- condizioni al contorno di trasparenza ovvero contorni permeabili (valide per corrente lenta [A-13]);

In generale, le condizioni al contorno vengono implementate con l'inserimento di celle “fittizie” esterne rispetto al dominio di calcolo.

Condizione al contorno di riflessione

La condizione al contorno di riflessione o di contorno verticale impermeabile viene rappresentata imponendo una profondità e velocità tangenziali simmetriche rispetto al contorno e velocità normali antisimmetriche.

A seguire si riporta uno schema tipico dell'applicazione di celle fittizie su una griglia strutturata:

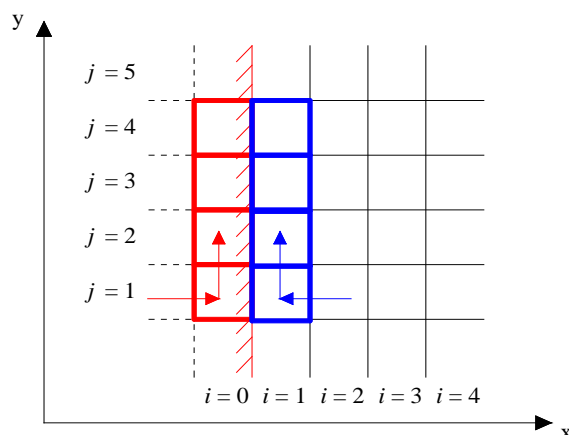


Figura 3-8 Trattazione delle condizioni al contorno: schema di utilizzo delle celle fittizie

La retta verticale passante per $i = 0$, (vedi Figura 3-8) separa le celle fittizie (a sinistra della retta) dalle celle appartenenti alla griglia di calcolo (a destra della retta).

Assumendo che la curvatura del dominio di calcolo sia sufficientemente piccola da poter essere discretizzata per punti, la profondità h , la velocità in direzione parallela al moto u e la velocità in direzione ortogonale al moto v assumono per le celle fittizie i seguenti valori:

$$\begin{aligned} h_{0,1} &= h_{1,1} \\ u_{0,1} &= u_{1,1} \\ v_{0,1} &= -v_{1,1} \end{aligned} \quad [A-3.41]$$

L'attenzione va sempre focalizzata sul lato della cella di calcolo che si trova sul contorno.

Note le componenti di velocità (nel sistema di riferimento principale) nella cella appartenente al dominio, si determinano le componenti del vettore velocità nel sistema di riferimento solidale al lato di cella.

La componente normale cambia segno, mentre la componente tangenziale mantiene il proprio segno. Una volta effettuata questa procedura non rimane altro che riportare i valori di velocità nel sistema di riferimento cartesiano. Per maggiore chiarezza si riporta la procedura utilizzata.

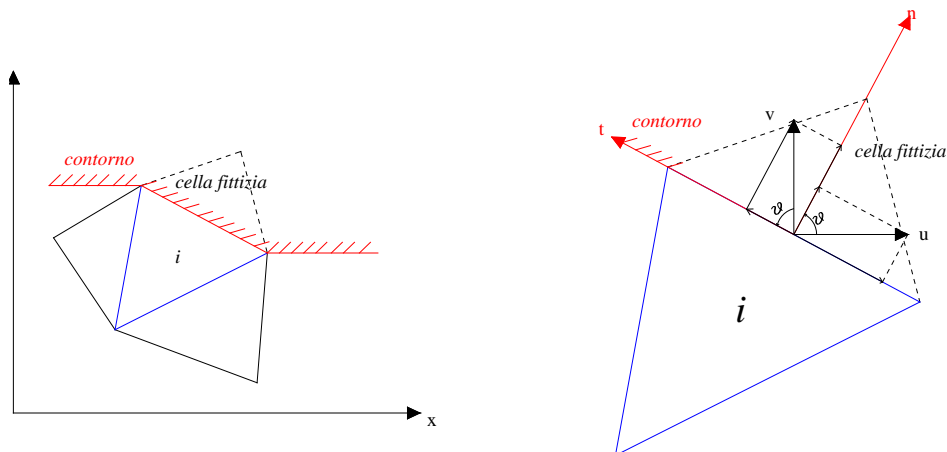


Figura 3-9. Trattazione delle condizioni al contorno. Scomposizione del vettore velocità nel sistema di riferimento solidale al lato di cella

Come si osserva dalla Figura 3-9, la cella i è la cella interna al dominio. L'angolo ϑ è misurato a partire dall'asse x in senso antiorario.

Si procede nel seguente modo:

1. scomposizione del vettore velocità nella componente normale e tangente al lato di cella

$$\begin{aligned} v_n^f &= u \cos \vartheta + v \sin \vartheta \\ v_t^f &= v \cos \vartheta - u \sin \vartheta \end{aligned} \quad [\text{A-3.42}]$$

dove con v_n^f e v_t^f si indicano rispettivamente la velocità normale e tangente riferite alla cella fittizia.

2. si aggiustano i segni della velocità normale e tangente al lato di cella tenendo in appropriata considerazione le condizioni di antisimmetria per la componente normale (si procede al cambiamento di segno) e di simmetria per la componente tangenziale (si mantiene il segno)

$$\begin{aligned} v_n^f &= -u \cos \vartheta + -v \sin \vartheta \\ v_t^f &= v \cos \vartheta - u \sin \vartheta \end{aligned} \quad [\text{A-3.43}]$$

3. si riportano le componenti di velocità nel sistema di riferimento cartesiano x_0y , applicando alla componente normale e tangente della velocità una rotazione verso destra.

$$\begin{aligned} u^f &= -u + 2(\sin \vartheta u - \cos \vartheta v) \sin \vartheta \\ v^f &= -v + 2(\cos \vartheta v - \sin \vartheta u) \sin \vartheta \end{aligned} \quad [\text{A-3.44}]$$

Si sono così ottenute, nel sistema di riferimento cartesiano, le componenti del vettore velocità nella cella fittizia. La profondità in quest'ultima sarà uguale a quella della cella di calcolo.

Condizione al contorno di permeabilità

La condizione al contorno su porzioni di perimetro permeabile sono ottenute usando funzioni di flusso che minimizzano la riflessione non fisica di onde in uscita dal dominio sulle celle allineate con i contorni aperti [A-13]. Va subito precisato che una condizione al contorno così costruita è valida solamente nel caso di corrente lenta.

Lo scopo del metodo è quella di permettere alle onde di abbandonare il dominio di calcolo lasciando quest'ultimo imperturbato. Utilizzando le condizioni al contorno di ingresso/uscita si scrivono le variabili di Riemann lungo le caratteristiche entranti nel dominio. Utilizzare le variabili di Riemann lungo le curve caratteristiche permette di calcolare il flusso di fluido attraverso il lato di cella.

Si ipotizzi che il lato della cella sul contorno sia in corrispondenza di un ingresso; si veda la Figura 3-10. La cella interna al dominio computazionale è indicizzata con il pedice R, mentre le variabili sulle caratteristiche in ingresso sono indicizzate con il pedice L. Focalizzando l'attenzione sul lato di cella, lo stato a sinistra è definito dall'invariante di Riemann $R^+ = u^\perp + 2c$, lo stato a destra è definito da $R^- = u^\perp - 2c$, mentre la terza componente della variabile di Riemann è definita da $R^0 = u^\parallel$. Basandosi su queste variabili è possibile calcolare velocità e profondità al confine della griglia di calcolo come:

$$\begin{aligned} (u_\perp)_I &= \frac{1}{2} (R_L^+ + R_R^-) \\ (u_\parallel)_I &= \{R_L^0 \text{ se } (u_\perp)_I > 0; R_R^0 \text{ se } (u_\perp)_I < 0; \} \\ (h)_I &= \frac{1}{16g} (R_L^+ - R_R^-)^2 \end{aligned} \quad [A-3.45]$$

Queste equazioni possono essere facilmente ricavate dallo schema di Figura 3-10, dove $(u_\perp)_I$, $(u_\parallel)_I$, $(h)_I$ rappresentano lo stato della soluzione al livello temporale incognito e u_\perp , u_\parallel , h lo stesso stato al livello temporale noto.

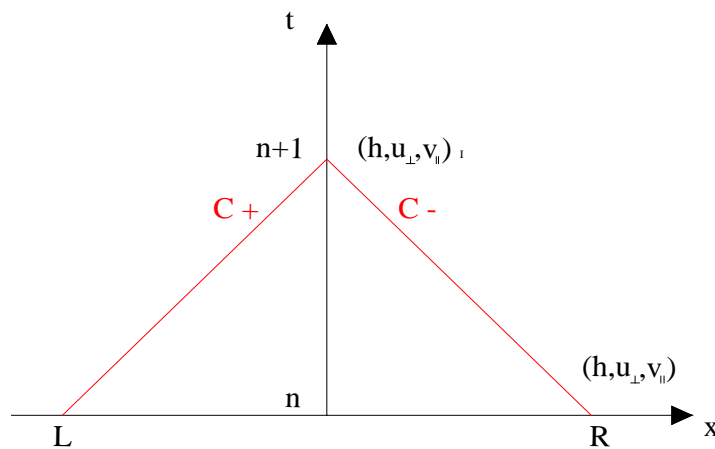


Figura – 3-10 Trattazione delle condizioni al contorno. Schema di ricostruzione delle variabili di stato al bordo del dominio computazionale nel piano x-t

Condizione al contorno di ingresso (Inflow)

Al confine di ingresso viene solitamente definita una portata specifica $p = p^*$ e $q = q^*$, dove p^* e q^* sono funzioni del tempo definite lungo la porzione di perimetro aperto all'ingresso delle portate liquide. Per convenzione, è assunto che la parte interna del dominio sia definita con il pedice R e la parte esterna sia definita con L. In questo caso, R_R^- è valutato nella parte interna della cella di calcolo e R_L^+ e R_L^0 sono valutati da p^* e q^* lungo il contorno.

La portata specifica normale al lato di calcolo e valutata al livello temporale incognito (I) risulta:

$$(q^\perp)_I = (u^\perp)_I(h)_I = \frac{1}{32g} (R_L^+ - R_R^-)^2 (R_L^+ + R_R^-) \quad [A-3.46]$$

dove, $(q^\perp)_I = p^* n_x + q^* n_y$ e R_R^- è noto, l'equazione (3.46) può essere risolta in R_L^+ . Riconoscendo che il contorno deve essere in grado di lasciare passare la perturbazione, l'invariante di Riemann R_L^+ è valutato dell'equazione (3.46) purché noto R_R^- , calcolato rispetto allo stato indisturbato. L'equazione (3.46) diventa:

$$p^* n_x + q^* n_y = \frac{1}{32g} (R_L^+ - R_R^-)^2 (R_L^+ + R_R^-) \quad [A-3.47]$$

Questa equazione è un'equazione cubica in R_L^+ ; la soluzione avente significato fisico è quella corrispondente alla radice positiva. Noti R_L^+ e R_R^- è possibile calcolare l'espressione del flusso al contorno d'ingresso facendo riferimento alla variabile di stato definita dalle equazioni [A-3.45]

Condizione al contorno di uscita (outflow)

In uscita dal dominio di calcolo è solitamente specificata una profondità della corrente, definita come $h = h^*$, funzione del tempo lungo il contorno aperto al deflusso delle portate. Sia L la parte interna al dominio di calcolo ed R la parte esterna. In questo specifico caso sono note le espressioni di R_L^+ e R_L^0 , calcolate nella parte interna alla griglia di calcolo, mentre risulta incognita R_R^- , che deve essere valutata da h^* . R_R^- è valutato da:

$$(h)_I = \frac{1}{16g} (R_L^+ - R_R^-)^2 \quad [A-3.48]$$

dove $(h)_I = h^*$ e $R_L^+ = (R_L^+)_U$. $(R_L^+)_U$ è valutato, come per le condizioni al contorno d'ingresso, con i valori relativi allo stato indisturbato U_U al tempo $t = 0$. R_R^- assume il seguente valore:

$$R_R^- = (R_L^+)_U - 4\sqrt{gh^*} \quad [A-3.49]$$

4 Validazione del modello idrodinamico

4.1 Casi test preliminari

Sono stati eseguiti vari test per verificare il corretto funzionamento del modello implementato.

Esso risulta caratterizzato da una notevole versatilità e permette la corretta riproduzione di onde, anche di piccola ampiezza, senza una eccessiva dissipazione numerica.

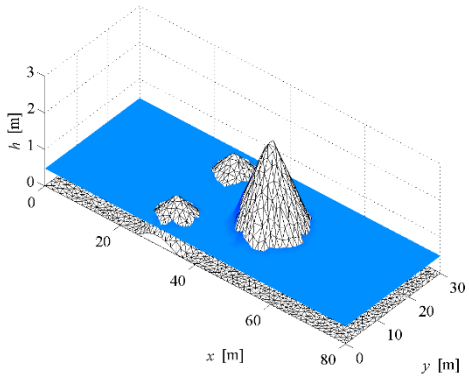
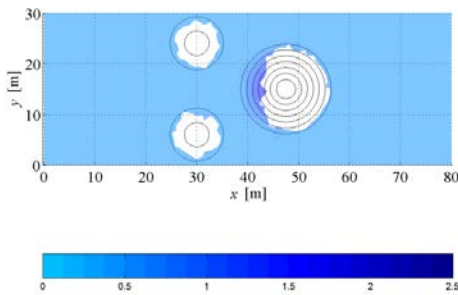
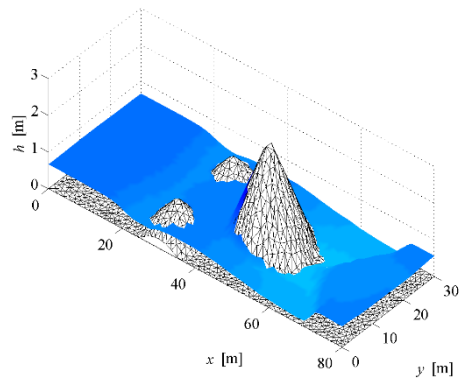
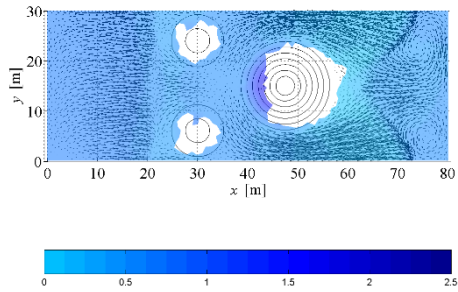
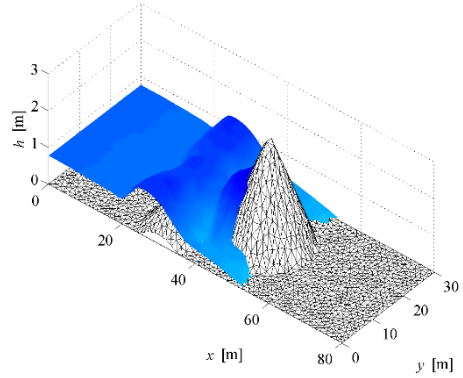
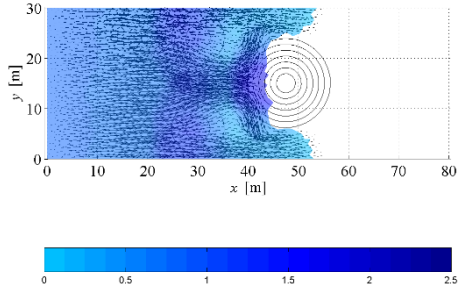
L'implementazione di un termine sorgente che descrive l'azione delle tensioni tangenziali sulla superficie libera consente, pur nei limiti di uno schema in cui le grandezze idrodinamiche sono mediate sulla verticale, di cogliere gli effetti fondamentali del vento sulla circolazione in valle. Inoltre il corretto trattamento delle interfacce asciutto/bagnato assicura buoni risultati anche in situazione di parziale sommergenza del fondo.

I casi test sintetici reperibili in letteratura sono concepiti per evidenziare specifici limiti del modello (e.g. corretta propagazione di onde di piccola ampiezza, movimento del fronte asciutto/bagnato, propagazione di onde frangenti, correnti indotte dall'azione sulla superficie libera ad opera del vento, etc.).

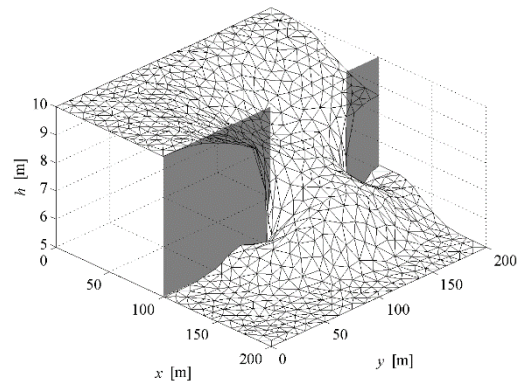
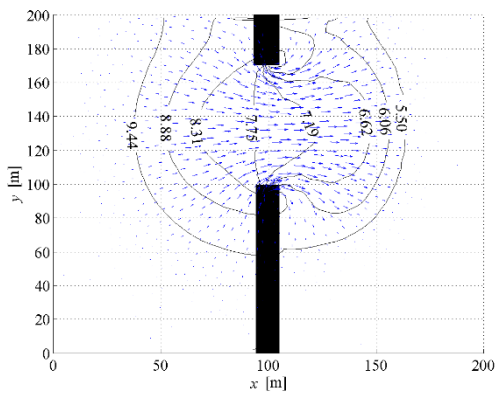
Tali casi test sono in genere caratterizzati da geometrie estremamente semplici, per evitare il sovrapporsi di effetti che possono mascherare eventuali difetti del modello e per avere a disposizione soluzioni di riferimento (analitiche o ottenute mediante altri modelli numerici di comprovata affidabilità).

In particolare sono stati riprodotti esempi di crolli diga bidimensionali schematici su letto bagnato (verifica della propagazione di onde frangenti) e su letto asciutto (verifica della propagazione di interfacce asciutto/bagnato), il crollo di una diga circolare, e la riproduzione dello stato asintotico stazionario della corrente su una soglia di fondo, con diverse condizioni al contorno (verifica del corretto bilanciamento del termine sorgente, implementazione, transizione dello stato critico, implementazione delle condizioni al contorno etc.). Tali test (non riportati per ragioni di sintesi) hanno dimostrato l'affidabilità del modello adottato.

Di seguito si richiamano graficamente, a titolo puramente esemplificativo, alcuni risultati ottenuti in ambiti applicativi. In particolare si fa riferimento ai casi di crollo diga su letto bagnato e letto asciutto, anche in presenza di ostacoli; a seguire è riportata l'applicazione ad una rottura arginale, l'inondazione della piana ferrarese dovuta ad una ipotetica rottura dell'argine destro del Po per una piena avente una portata di picco di 6300 m³/s ed una durata di 112 ore (stime relative alla piena del 1951).



Propagazione dell'onda rilasciata a seguito del crollo diga. (isopse, campo di velocità e piezometrica)



Isopse di profondità e campo di velocità.

Vista 3D della superficie bagnata

Figura 4-1: casi test preliminari (sintesi)

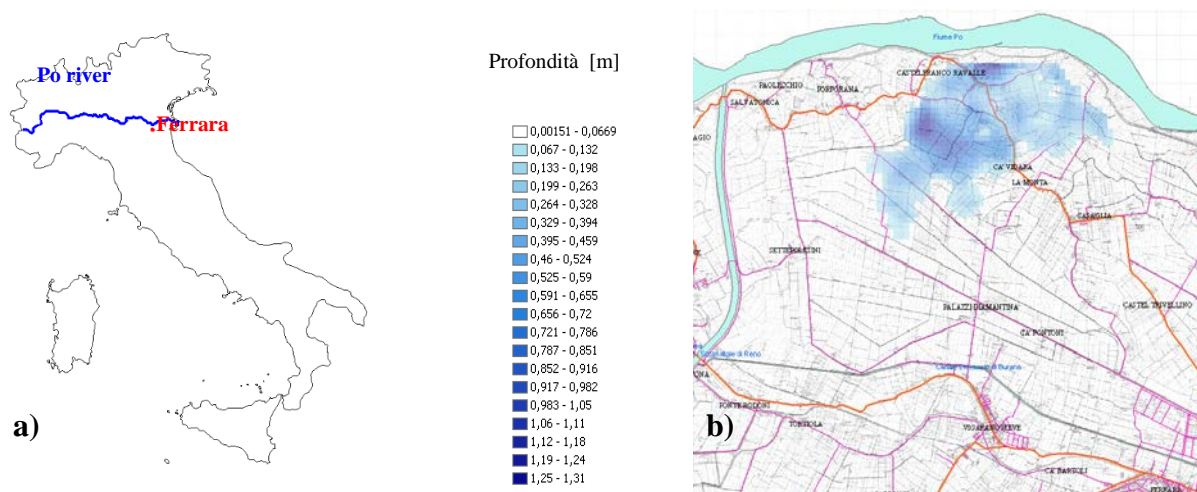
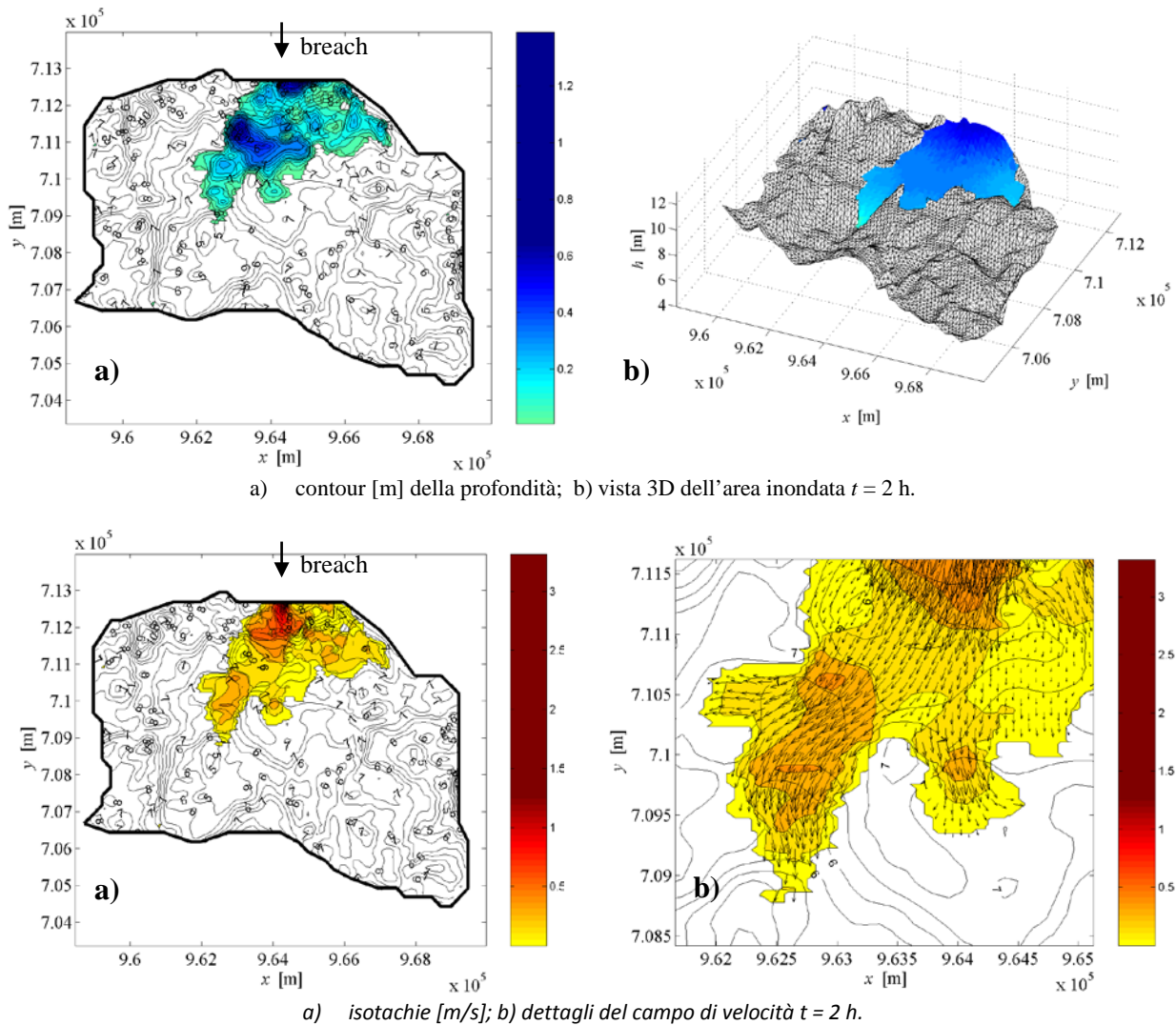


Figura 4-2 esondazione di corso d'acqua naturale (Fiume Po lato ferrarese)

4.2 Validazione del modello: l'effetto del vento

È stata eseguita una serie di test preliminari in presenza di vento proveniente da diverse direzioni, su vasca circolare o di forma geometrica semplice, con diverse configurazioni del fondo. I risultati sono quelli attesi.

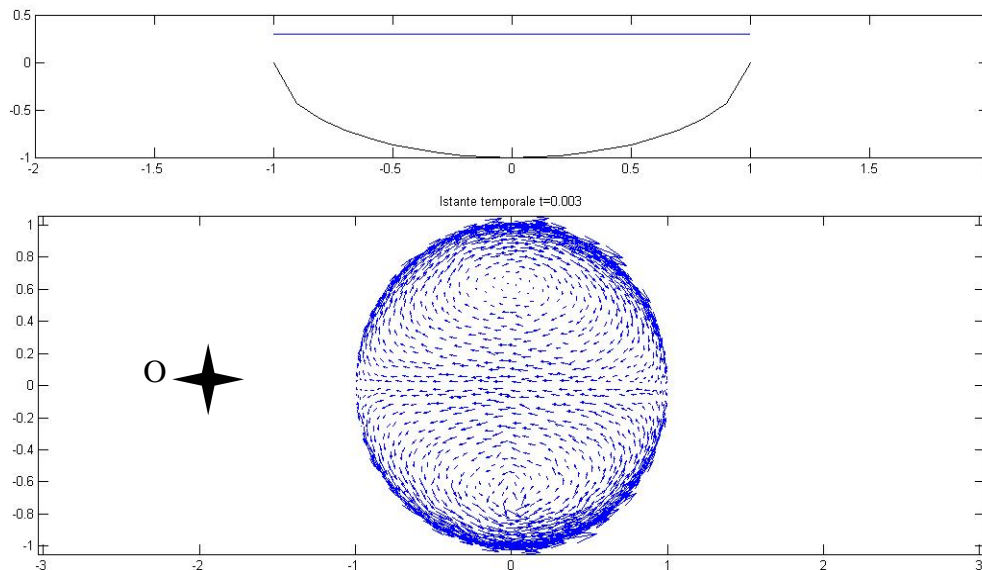


Figura 4-3 Validazione del modello idrodinamico in presenza di vento. Specchio d'acqua circolare, vento da Ovest

In figura 4-3 si osserva il comportamento tipico di uno specchio d'acqua battuto da vento di intensità costante, da Ovest.

Si nota che il flusso concorde alla direzione del vento si verifica nelle zone perimetrali, mentre nella zona centrale si crea un flusso di ritorno, che è strettamente legato alla batimetria del bacino ed ha luogo nelle aree caratterizzate da profondità più elevata.

Il pelo libero, per effetto del vento, si inclina. Il sistema raggiunge uno stato di equilibrio quando l'inclinazione del pelo libero si stabilizza e diventa sostanzialmente costante, mentre il flusso di ricircolo forma due vortici che separano la corrente di andata e quella di ritorno, garantendo la conservazione della massa.

In condizioni analoghe, ma con fondo piatto, si può osservare che la configurazione finale del livello è molto simile a quella appena descritta, ma senza alcun tipo di corrente. All'avvicinarsi della condizione di equilibrio, la velocità delle correnti si riduce, fino a diventare prossima a zero. Pertanto su un fondo piatto il sistema si riconduce a uno stato di quiete.

In generale si assume che in presenza di una configurazione semplice è piuttosto facile prevedere a priori il comportamento del sistema: nelle zone a profondità minore si verifica il flusso concorde al

vento, mentre per i tiranti maggiori si verifica la corrente di ritorno.

In configurazioni più articolate, come nel caso di batimetrie reali, in cui le concavità possono essere molteplici, non si può prevedere a priori l'andamento delle correnti generate dal vento, e solo la modellazione numerica consente effettivamente di caratterizzare l'assetto circolatorio.

4.3 Validazione del modello: ottimizzazione delle griglie di calcolo

In via preliminare sono stati eseguiti anche alcuni test su configurazioni più prossime a quelle oggetto di studio. Nello specifico, è stata definita una prima griglia di calcolo su un bacino semplificato di dimensioni effettive e complessità del contorno paragonabili alle Valli di Comacchio.

Nella fase iniziale si è scelto di testare il modello in riferimento alla sola complessità planimetrica, considerando quindi il fondo piano, per indagare l'efficienza della mesh di celle triangolari utilizzata.

Con questi primi test sono state inoltre individuate le zone che necessitano di un maggior raffittimento degli elementi, in modo da ottenere una corretta rappresentazione.

Le mesh testate sono molte, di diversa complessità: a partire da un contorno definito attraverso venti nodi circa è stata successivamente dettagliata la descrizione del contorno e sono state isolate le zone impermeabili.

Uno dei risultati di questa prima verifica è stata la definizione del grado di raffittimento ottimale della griglia per ottenere il miglior compromesso fra tempi di calcolo ed una accurata riproduzione delle circolazioni in valle.

Le figura 1-4.4 – 1-4.6 riportano di seguito alcuni esempi delle mesh schematiche utilizzate e quindi la loro evoluzione.

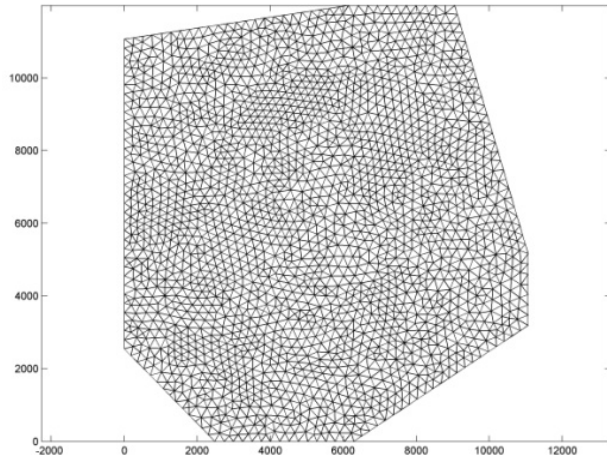


Figura 4-4 Mesh preliminare, studi per verifica del modello

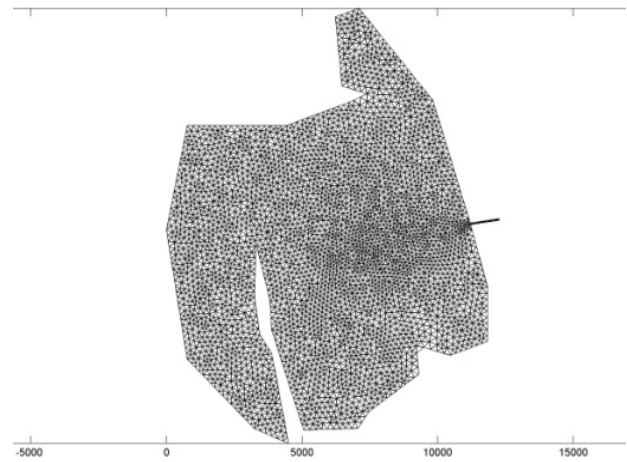


Figura 4-4 Mesh preliminare; studi per verifica delle condizioni al contorno

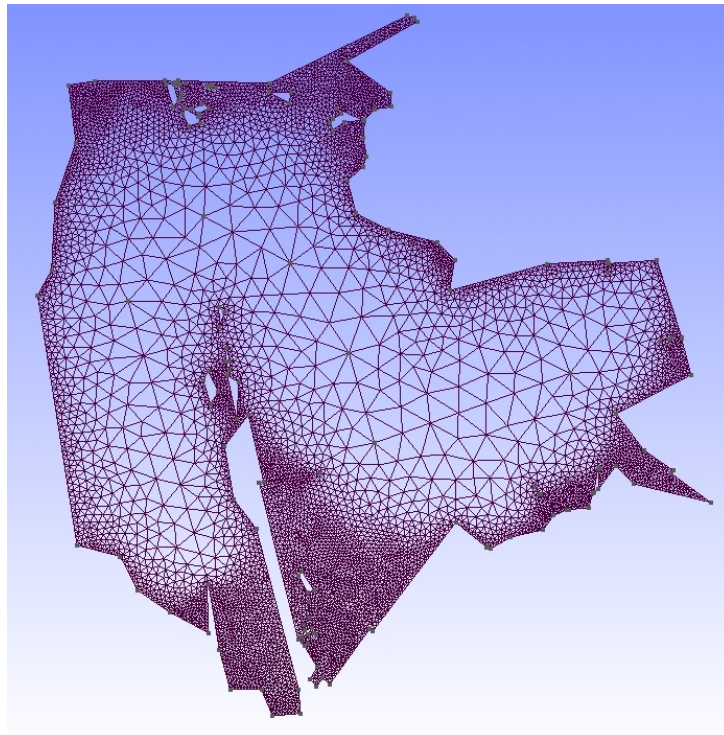


Figura 4-5: Griglia di calcolo di primo tentativo.

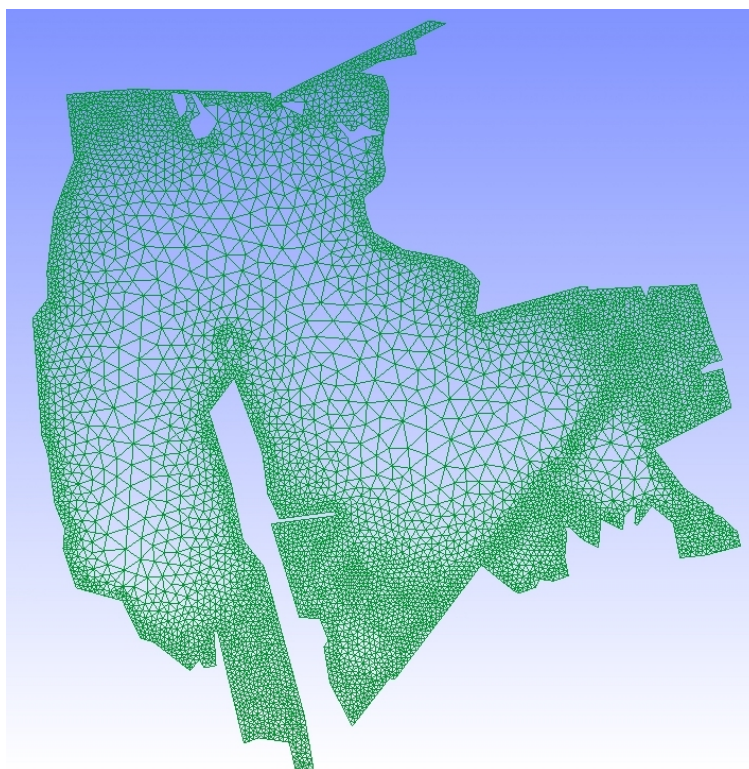


Figura 4-6: Raffittimento della griglia di calcolo.

La geometria della griglia è stata successivamente adeguata alla effettiva batimetria di rilievo, individuando le aree asciutte (dossi, barene) da escludere dal calcolo.

La dimensione caratteristica degli elementi nelle zone di raffittimento è di circa 75 m mentre al massimo è di 350 m nelle zone lontane dal contorno.

4.4 Validazione del modello test preliminari su dati batimetrici fittizi

Nella fase di sviluppo del modello sono stati effettuati test su di una griglia di calcolo con perimetro effettivo delle valli ma fondo piatto o a paraboloide, in modo da testare la corretta implementazione del termine sorgente.

Un primo test è stato condotto assumendo direzione del vento est-ovest, con velocità pari a 10,5 m/s.

Nel grafico sottostante si evidenziano le linee di flusso in azzurro e i vettori del campo di velocità, con colore proporzionale all'intensità.

Anche in questo caso, come per i bacini di forma semplificata, rimane confermata la generale tendenza per cui le correnti con verso concorde alla direzione del vento si sviluppano lungo il bordo mentre al centro della valle si instaura una corrente di ritorno. La superficie libera si inclina con aumento del livello nella zona occidentale.

A partire da una condizione iniziale caratterizzata da superficie libera orizzontale e velocità ovunque nulle, la condizione di equilibrio (stazionaria, essendo costante l'intensità del vento) si raggiunge dopo poche ore di simulazione.

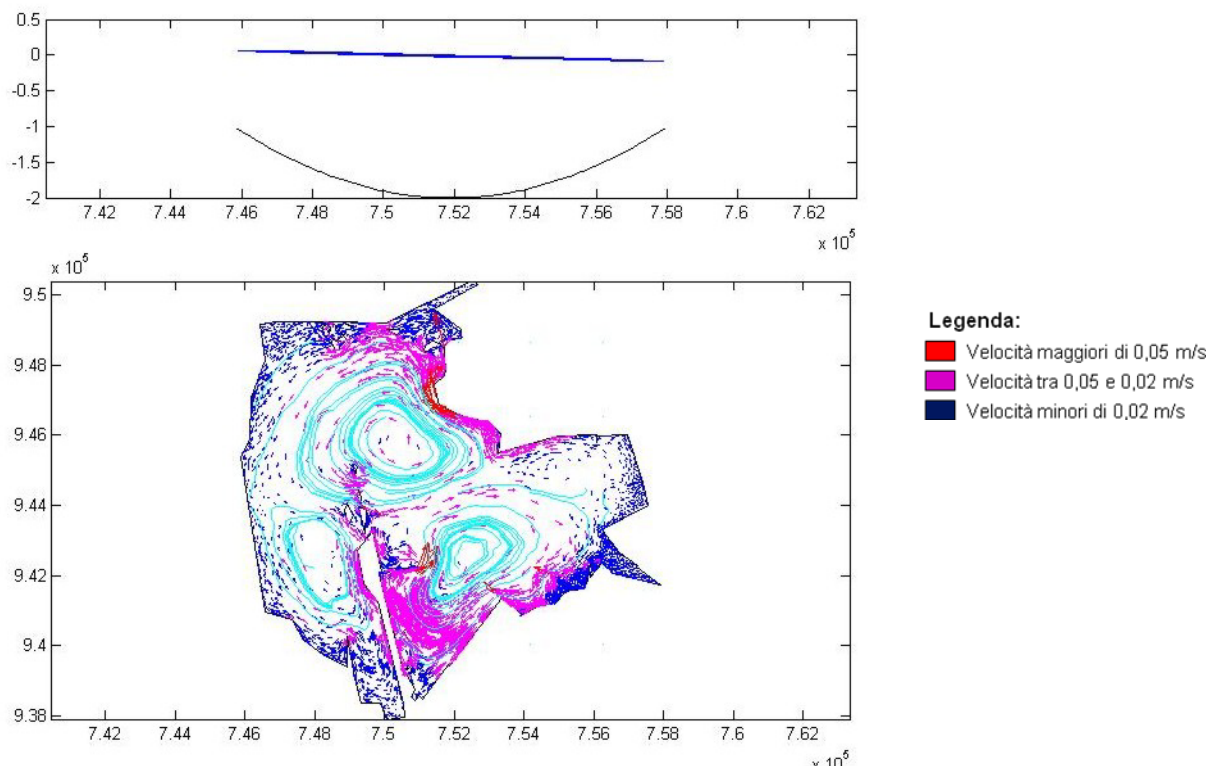


Figura 4-8. Validazione del modello idrodinamico. Simulazione preliminare con fondo parabolico (vento).

Si nota che la circolazione avviene con velocità molto basse nonostante la velocità del vento sia elevata. Si osserva un aumento delle velocità in prossimità delle isole e dei pennelli, per la presenza di restringimenti che inducono incrementi localizzati della velocità.

E' stata effettuata anche una seconda simulazione, allo scopo di verificare la corretta simulazione dell'azionamento delle chiaviche e dei sifoni sul contorno. A tale scopo sono stati impostati un ingresso fittizio a Nord e un'uscita fittizia a Sud; al fine di indagare l'assetto idrodinamico è stata poi simulata una portata di $100 \text{ m}^3/\text{s}$ stazionaria in ingresso.

Correttamente, la superficie libera tende ad alzarsi in prossimità dell'ingresso ed ad abbassarsi in prossimità dell'uscita. Il volume all'interno del bacino rimane costante e si instaura una corrente da Nord a Sud. Le velocità maggiori si concentrano in prossimità dei varchi del contorno (la simbologia di rappresentazione in figura 4-9 è la stessa adottata in figura 4-8).

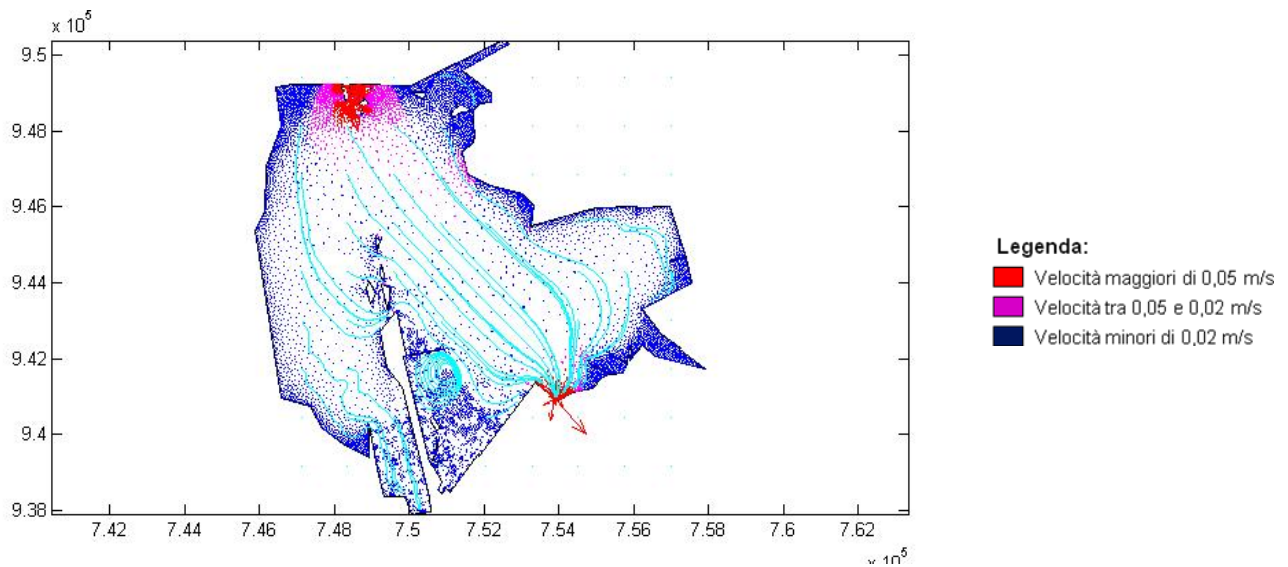


Figura 4-9. Validazione del modello idrodinamico. Simulazione preliminare con fondo parabolico (ingresso –uscita 100 m^3/s).

Complessivamente i test preliminari condotti hanno confermato la validità del modello in ragione di comportamenti simulati corrispondenti a quelli attesi.

Inoltre, i risultati hanno evidenziato che – stante le dimensioni superficiali del bacino – anche in presenza di forzanti significative (venti superiori ai 10 m/s e portate in ingresso di 100 m^3/s) l'effetto sul campo idrodinamico è piuttosto modesto. Inoltre, per quel che riguarda gli ingressi e le uscite in prossimità del contorno, gli effetti sono limitati alle zone circostanti i punti di immissione. Le perturbazioni sulla restante parte del dominio sono di piccola entità o difficilmente apprezzabili.

Bibliografia Appendice A

- [A-1]. Begnudelli L. e Sanders B.F., “*Unstructured Grid Finite Volume Algorithm for Shallow-Water Flow and Transport*”. Journal of Hydraulic Engineering, 132(4), 371-384, 2006.
- [A-2]. Chow V. T., Open channel Hydraulics, McGraw-Hill Intern. Ed., 22 print, 1986.
- [A-3]. [Courant, R.](#), Isaacson, E., e Rees, M., “*On the Solution of Nonlinear Hyperbolic Differential Equations by Finite Differences*”, Comm. Pure Appl. Math., 5, 243-255, 1952.
- [A-4]. Demirbilek, Z., Bratos, S., Thompson, E. , “*Wind Products for Use in Coastal Wave and Surge Models*”, Miscellaneous Paper CERC – 93 -7, US Army Corps of Engineers, 1993.
- [A-5]. Garratt, J. F., “*Review of drag coefficients over oceans and continents*”, Mon. Weather Rev., 105, 915-929, 1977.
- [A-6]. Godunov, S., “*A difference scheme for numerical computation of discontinuous solution of hydrodynamic equations*”, Math. Sbornik, Vol. 43, 271-306, 1959.
- [A-7]. Gottlieb S., Shu C.W. e Tadmor E., “*Strong Stability-Preserving High-Order Time Discretization Methods*”, SIAM Review; 43, 89-112, 2001.
- [A-8]. Harten, A., Lax, P. D., e van Leer, B. 1983. “*On upstream differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation laws*”, SIAM Rev.25(1), 35-61,1983.
- [A-9]. Heaps, N. S. , Jones, J. E., “*Storm surge computations for the Irish Sea using a three-dimensional numerical model*”, Mem. Soc. r. Sci. Liege, Ser. 6, 7:289-333
- [A-10]. Ketcheson D.I. e Robinson A.C., “*On the practical importance of the SSP property for Runge-Kutta time integrators for some common Godunov-type schemes*”, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 48, 271-303, 2005.
- [A-11]. Roe, P. L. e Pike J., “*Efficient construction and utilisation of approximate Riemann solution*”. Computing Methods in Applied Science and Engineering. Nort-Holland, 1984.
- [A-12]. Sanders B.F. e Bradford S.F., “*Impact of Limiters on Accuracy of High-Resolution Flow and Transport Models*”, Journal of Engineering Mechanics, 2004.
- [A-13]. Sanders B.F., “*Non-reflecting boundary flux function for finite volume shallow-water models*”, Advances in Water Resources, 25, 192-202, 2002.
- [A-14]. Shu C.W., “*Essentially Non-Oscillatory and Weighted Essentially Non-Oscillatory Schemes for Hyperbolic Conservation Laws*”, ICASE report n° 97-65, 1997.
- [A-15]. Toro, E. F., Spruce, M. e Speares W., “*Restoration of Contact Surface in the HLL-Riemann Solver*”. Shock Waves, 4, 25-34, 1994.
- [A-16]. Toro, E.F., *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, 2009.
- [A-17]. Valiani A. e Begnudelli L., “*Divergence form for bed slope source terms (DFB) in shallow water equation*”, Journal of Hydraulic Engineering, 2004.

- [A-18]. van Leer, B., “*Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, V. A Second Order Sequel to Godunov's Method*”, J. Com. Phys., 32, 101–136, 1979.
- [A-19]. Wilson, B. W. (1960), “*Note on Surface Wind Stress over Water at Low and High Wind Speeds*”, J. Geophys. Res., 65(10), 3377–3382.
- [A-20]. Zhou, J. G., Causon, D. M., Mingham, C. G. e Ingram, D. M., “*The Surface Gradient Method for the Treatment of Source Terms in the Shallow-Water Equations*”, J. Comput. Phys., 168, 1-25, 2001.