

PIANO REGOLATORE PORTUALE DEL PORTO DI LIVORNO 2012

Titolo elaborato:

STUDIO DELPOTENZIALE INSABBIAMENTO DEL CANALE DI ACCESSO

Scala:

1 0 0 1 0 R R 0 1 6 - 0 M A R

Committente:

AUTORITA' PORTUALE
DI LIVORNO

Progettisti:

MODIMAR S.r.l.
Prof. Ing. Alberto NOLI
TECHNITAL S.p.A.
SCIRO BUREAU VERITAS S.p.A.
ACQUATECNO S.r.l.

	marzo 2013	0	EMISSIONE	A. SANZONE	A. NOLI	M. TARTAGLINI
Rif. Dis.	Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Verificato:	Approvato:

Dimensioni foglio:

A4

Visto del Committente:

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

NUOVO PIANO REGOLATORE PORTUALE DEL PORTO DI LIVORNO 2012

STUDIO DEL POTENZIALE INTERRIMENTO DEL CANALE DI ACCESSO

INDICE

1	PREMESSE	1
2	SCOPO DELLO STUDIO	2
2.1	La configurazione portuale prevista da PRP	2
2.2	L'interrimento dei canali di accesso	4
2.3	Obiettivi dello studio	7
3	APPROCCIO METODOLOGICO	8
3.1	Stima dell'interrimento del canale di accesso	8
3.1.1	Metodo macroscopico	8
3.1.2	Metodo numerico di dettaglio	10
3.2	Dati di riferimento	13
3.2.1	Batimetria	13
3.2.2	Moto ondoso	14
3.2.3	Granulometria	14
3.3	Griglie di calcolo	17
3.4	Definizione degli scenari di simulazione	19
4	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	21
4.1	Considerazioni generali	21
4.2	Stima della deposizione annuale iniziale	22
4.3	Stima dei volumi di dragaggio su scala pluriennale	23
5	OSSERVAZIONI CONCLUSIVE	26
6	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	27
A.	RISULTATI NUMERICI	28

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

1 PREMESSE

La presente relazione illustra lo studio del potenziale interrimento del canale di accesso al bacino della Piattaforma Europa condotto nell'ambito della redazione del nuovo Piano Regolatore Portuale del Porto di Livorno.

L'obiettivo primario del presente studio è la stima dei volumi di dragaggio necessari, su scala pluriennale, per la manutenzione del canale di accesso all'imboccatura nord del porto di Livorno previsto dal nuovo Piano Regolatore Portuale.

Nel corso della relazione si fa ampio riferimento allo "Studio Meteomarino", allo "Studio della circolazione idrica e della qualità delle acque all'interno del porto di Livorno", allo "Studio della dinamica costiera" e allo "Studio sulla gestione dei materiali di dragaggio" condotti nell'ambito dello studio in epigrafe.

Il prossimo capitolo descrive nel dettaglio lo scopo dello studio. Segue un capitolo che illustra la metodologia utilizzata per il conseguimento dei risultati, riportati nel capitolo successivo. Alcune osservazioni conclusive chiudono la relazione.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

2 SCOPO DELLO STUDIO

2.1 La configurazione portuale prevista da PRP

Il Porto di Livorno costituisce il tratto meridionale dell'unità fisiografica della Toscana settentrionale che si estende tra Livorno e la Bocca di Magra. Tutto il bacino portuale, anche nella configurazione prevista dal nuovo Piano Regolatore Portuale, risulta interno al perimetro del Sito di Interesse Nazionale di Livorno, sancita con il Decreto Ministeriale 24 febbraio 2003.

Nella configurazione attuale, le opere foranee del Porto di Livorno sono costituite dalla Diga della Meloria e dalla Diga del Marzocco che delimitano il Bacino Santo Stefano e dalla Diga Curvilinea che delimita l'avamposto. La Diga della Vegliaia completa la configurazione portuale, immediatamente a Sud della Lanterna, posta sulla testata meridionale della Diga Curvilinea.

Con riferimento alla Figura 1, il nuovo Piano Regolatore Portuale prevede l'ampliamento del Porto di Livorno con la realizzazione di un ampio bacino esterno (Piattaforma Europa), posto immediatamente a Nord della Diga del Marzocco, fino alla foce del canale Scolmatore d'Arno. Il nuovo bacino portuale è delimitato da una diga ad andamento mistilineo che ha origine immediatamente a nord della seconda vasca di colmata sulla sponda sud del tratto focale del canale scolmatore d'Arno (diga nord) e da una diga curvilinea (Nuova Diga del Marzocco), radicata alla Diga Curvilinea, orientata lungo la direzione Est-Ovest, che sostituisce l'attuale Diga del Marzocco. La protezione dell'avamposto è completata da una diga rettilinea distaccata posta a nord del canale di accesso (diga distaccata nord), mentre la protezione del bacino interno della Piattaforma Europa è completata da un molo (molo petroli) radicato alla diga nord che insieme alla diga distaccata nord delimita l'imboccatura interna della Piattaforma Europa. Ai fini dello studio in epigrafe è importante rilevare la presenza del canale di accesso portuale caratterizzato da una profondità pari a 17,00 m che si estende dall'imboccatura interna fino a raccordarsi con la linea batimetrica naturale attraversando tutta l'estensione dell'avamposto. La lunghezza totale del canale è approssimativamente di 1550 m, di cui circa 500 m all'esterno dell'area portuale, per una larghezza di 250 m. In corrispondenza dell'imboccatura esterna il canale si apre così da realizzare un "cono di atterraggio". La superficie occupata dal canale

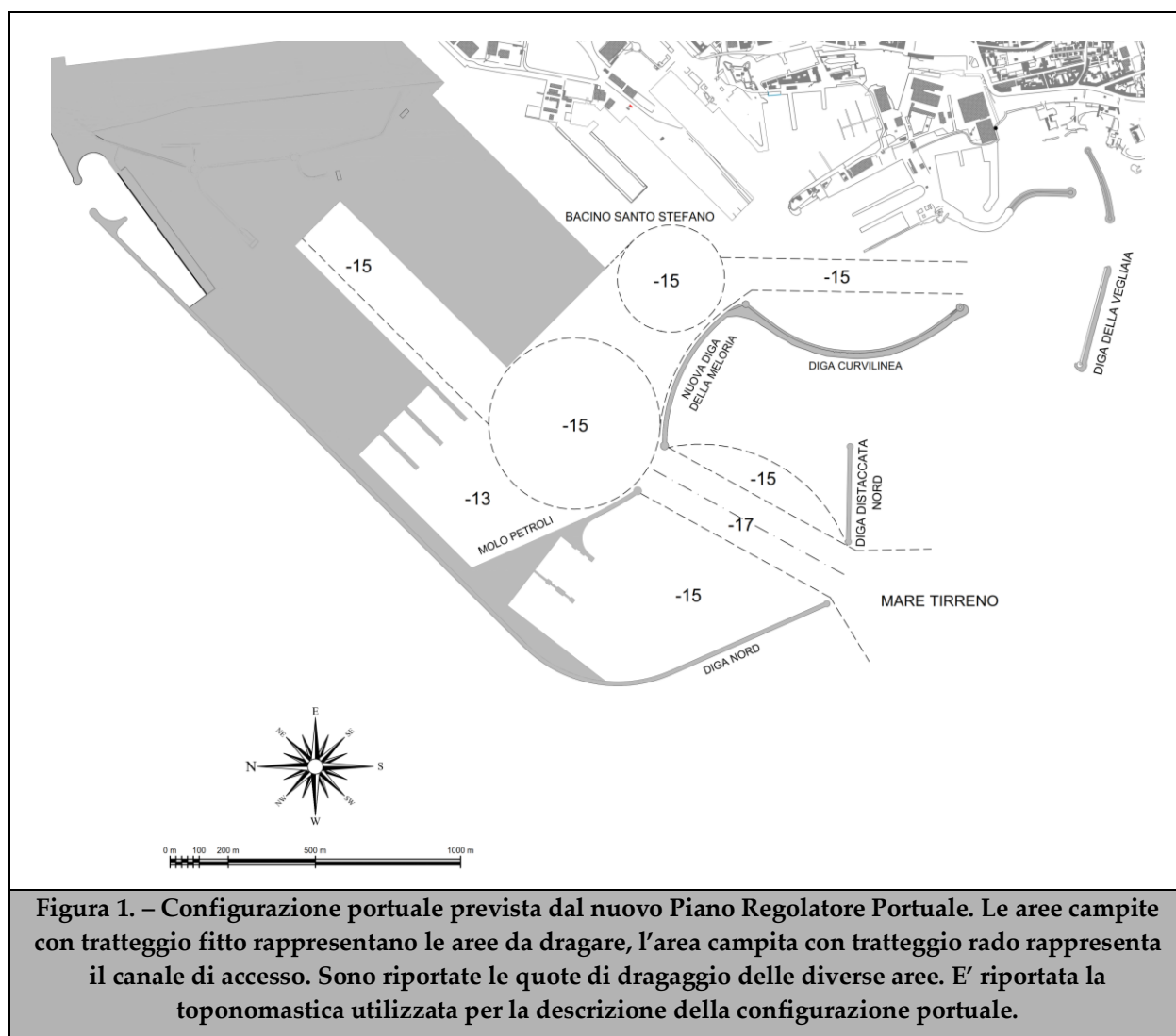
 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

risulta, pertanto, pari approssimativamente a 45 ha, di cui circa 21 ha all'esterno dell'area portuale.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

2.2 L'interrimento dei canali di accesso

In generale, la presenza di un canale di accesso può indurre fenomeni di deposizione di sedimento, tipicamente indicato come fenomeno di “intrappolamento”, indotti dall’aumento della profondità e, conseguentemente, dalla diminuzione della capacità di trasporto (van Rijn, 1986).

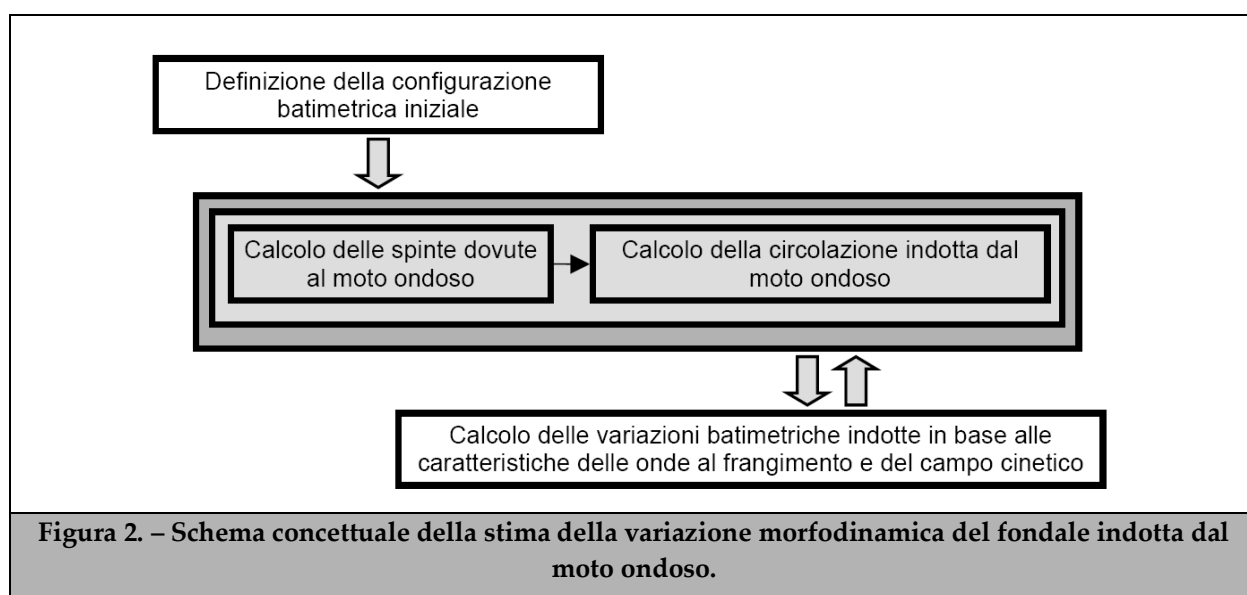


La quantità di sedimento “catturato” dal canale di accesso dipende dai parametri di configurazione geometrica identificabili nella sua larghezza, lunghezza e, principalmente, nella quota di dragaggio rapportata alla quota del fondale naturale (MarCom, 1995; 1997). Le forzanti ambientali che inducono il fenomeno sono riconducibili al clima meteomarinico (onde e maree) e ai sistemi di circolazione costiera che ne conseguono (Glosh et al., 2001).

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

Da un punto di vista fenomenologico, il canale di accesso può essere descritto, in prima approssimazione, come un'area confinata di profondità superiore rispetto a quella delle aree circostanti. Ciò induce una diminuzione della capacità di trasporto solido delle correnti litoranee che provoca la deposizione del sedimento.

Il trasporto solido è, come noto, costituito da una componente che si verifica in corrispondenza del fondale (trasporto di fondo) e da una frazione che si verifica sull'intera colonna d'acqua (trasporto in sospensione). Nelle zone costiere il principale responsabile dell'evoluzione morfodinamica dei fondali è riconducibile alla componente in sospensione (Goda, 2001), fatta eccezione per la zona immediatamente prossima alla linea di riva ove trasporto in sospensione e di fondo sono difficilmente discriminabili. Sinteticamente, il moto ondoso, a causa del fenomeno del frangimento, mette in sospensione il sedimento asportandolo dal fondo. Contemporaneamente il frangimento induce un sistema di correnti (circolazione costiera indotta) in grado di "trasportare" il sedimento risospeso (dispersione). L'evoluzione del fondale, in erosione o deposizione, è legato all'equilibrio dinamico tra la quantità di sedimento asportato dal fondo e quello che ivi si deposita. E' palese la dipendenza dell'evoluzione del fondale dalla velocità di deposizione e, conseguentemente, della granulometria che costituisce il fondale. La Figura 2 schematizza il complesso dei fenomeni appena descritti. La configurazione batimetrica influenza la propagazione del moto ondoso e, conseguentemente, le spinte dovute al moto ondoso responsabili dell'instaurarsi della circolazione costiera.



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

Il simultaneo verificarsi dei fenomeni di propagazione ondosa, dell'instaurarsi di un campo di circolazione costiera e dell'evoluzione morfodinamica dei fondali rende il problema intimamente correlato da un rapporto di causa-effetto reciproco: il moto ondoso, nella sua propagazione, induce una circolazione costiera che influisce sulla propagazione delle onde stesse. D'altro canto il fenomeno nella sua globalità, costituito dalla propagazione del moto ondoso e dalla circolazione costiera, induce delle variazioni batimetriche che influiscono, a loro volta, sul campo cinetico: i fenomeni sono dunque accoppiati. Tuttavia è d'uso comune, per estensioni del dominio di calcolo estese come quella presa in esame, utilizzare un approccio disaccoppiato, soprattutto se si considera che l'effetto delle variazioni del fondo sulla propagazione e il frangimento del moto ondoso si verificano su scale temporale nettamente differenti e che le variazioni del campo d'onda dovuto alla corrente indotta dal moto ondoso stesso sono anch'esse trascurabili per le intensità di corrente che si verificano nel caso in studio.

Oltre all'azione del moto ondoso è da ricordare la presenza delle oscillazioni di livello riconducibili alla componente astronomica di marea. Se da un lato le relative intensità di corrente sono notevolmente inferiori rispetto a quelle indotte dal moto ondoso frangente, dall'altro è da considerare la perpetuità delle maree astronomiche, con frequenze di accadimento notevolmente superiori a quelle degli eventi di moto ondoso in grado di "mobilizzare" il sedimento. In corrispondenza dell'imboccatura portuale di Livorno le correnti riconducibili alla marea astronomica sono quantificabili in circa 0,01 m/s (si veda "Studio della circolazione idrica e della qualità delle acque all'interno del porto di Livorno") rispetto alla quale la scala temporale della deposizione indotta è nettamente superiore rispetto a quella relativa all'azione del moto ondoso (van de Kreeke, 2002). Pertanto, nel seguito di questo studio, si prende in considerazione la sola azione del moto ondoso incidente trascurando l'effetto della marea astronomica.

Nel caso in esame, del canale di accesso alla nuova imboccatura nord del Porto di Livorno previsto dal nuovo Piano Regolatore Portuale, l'elevata profondità (17,00 m) permette di escludere fenomeni di frangimento in corrispondenza del canale. Inoltre l'estensione della fascia attiva risulta in quest'area piuttosto limitata con profondità di chiusura che non

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

raggiungono i 5,00 m (De Filippi et al., 2006; Lisi et al., 2010). Pertanto, la “fonte” di interrimento può essere identificata nel trasporto solido in arrivo nell’area ad opera delle correnti litoranee deviate dalle opere portuali e che viene successivamente depositato nel canale a causa dell’incremento di profondità.

2.3 Obiettivi dello studio

Da un punto di vista di gestione portuale, il fenomeno dell’interrimento dei canali di accesso descritti brevemente nel paragrafo precedente, impone la “manutenzione” del canale di accesso che, nel tempo, vede diminuire la sua profondità. In tal senso sono necessari una serie di strumenti, utilizzati nel presente studio e illustrati nel dettaglio nel seguito della presente relazione, che permettono, a diversi livelli di approfondimento, la stima dei volumi di dragaggio e degli intervalli temporali di manutenzione per preservare la fruibilità del canale di accesso e, conseguentemente, del Porto stesso.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

3 APPROCCIO METODOLOGICO

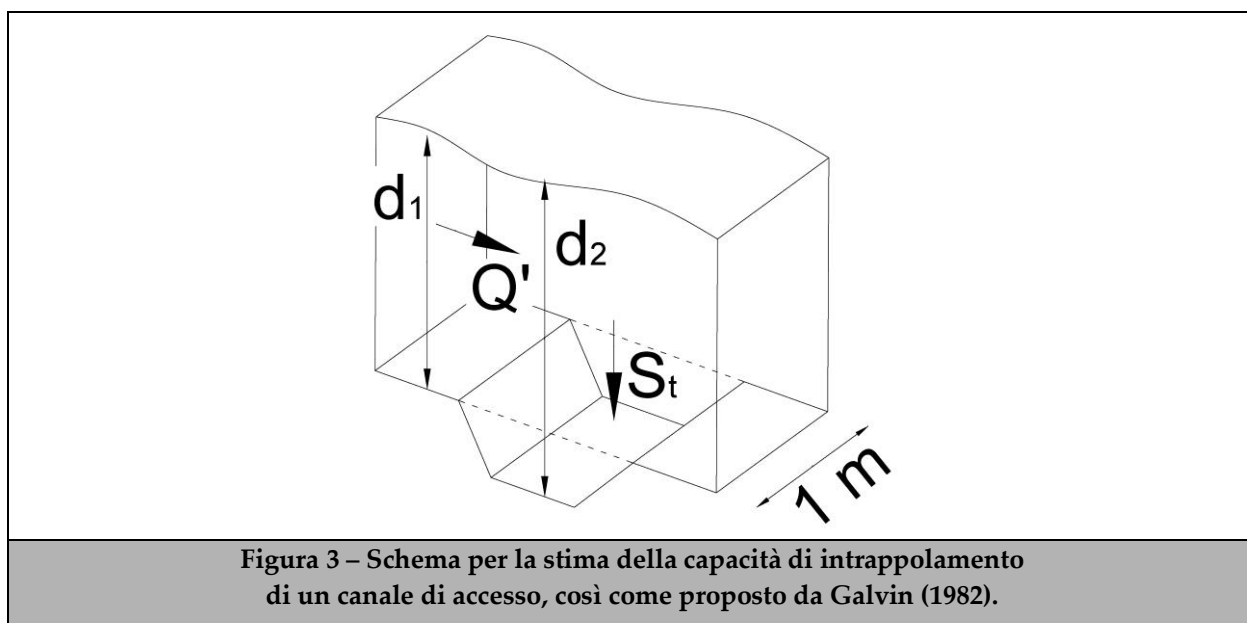
3.1 Stima dell'interrimento del canale di accesso

3.1.1 Metodo macroscopico

Come descritto nel capitolo precedente, l'obiettivo dello studio è quello di stimare quantitativamente il volume di sedimento da dragare e i relativi intervalli di manutenzione necessari a mantenere la fruibilità del canale di accesso alla nuova imboccatura nord del Porto di Livorno. In particolare si prende in considerazione la porzione terminale del canale, posta all'esterno dell'avamporto (Figura 1).

La stima del sedimento intrappolato può essere effettuato a vari livelli di dettaglio. In prima approssimazione è possibile applicare una formulazione pratica il grado di valutare la capacità di intrappolamento per unità di estensione longitudinale S_t ($m^3/m/s$) del sedimento che, a causa del rallentamento della corrente fluida, tende a depositarsi sul fondo del canale di accesso (Galvin, 1982):

$$S_t = Q' \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^m \right] \quad (1)$$



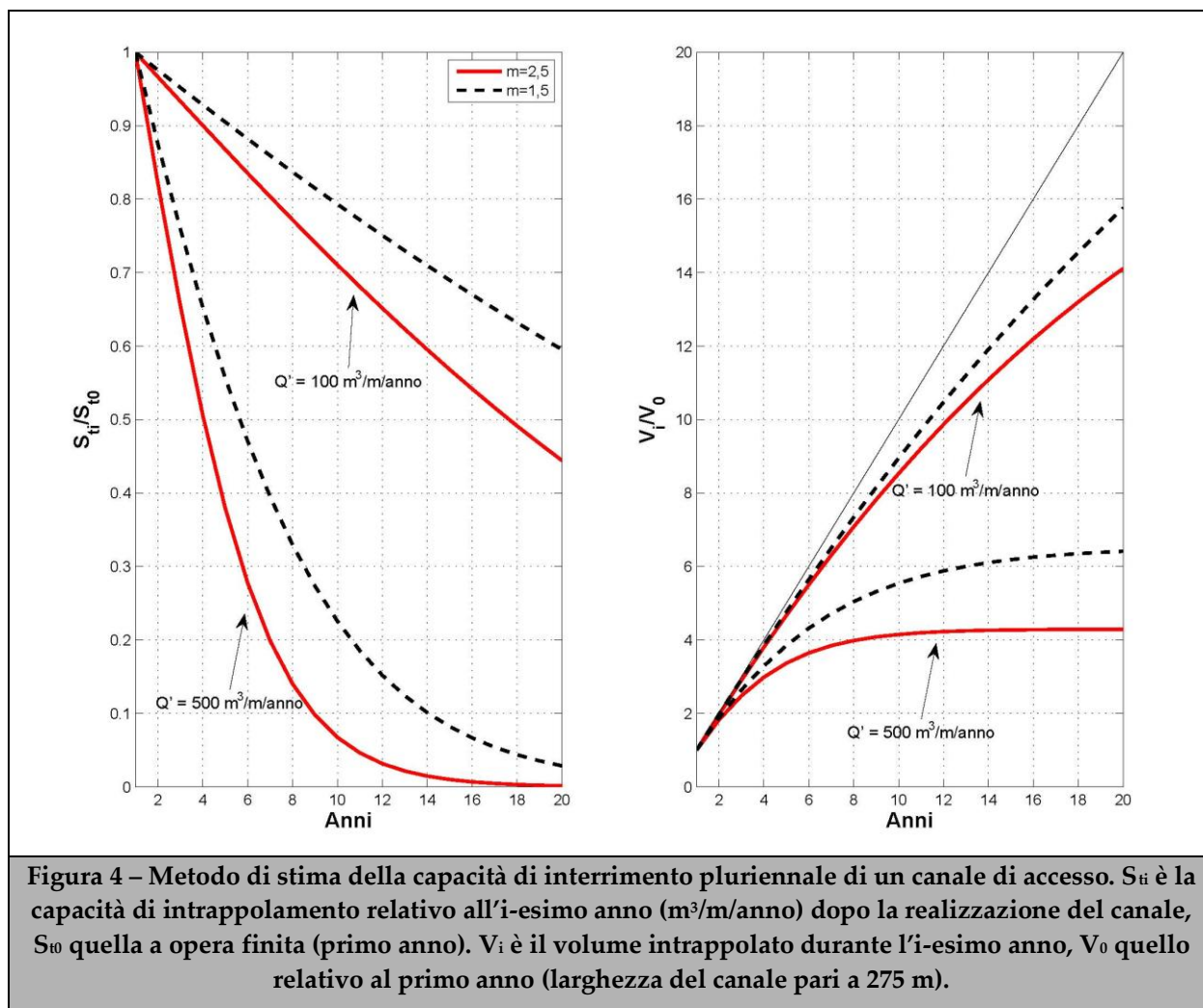
 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

nella quale il simbolo Q' indica il trasporto solido per unità di lunghezza in ingresso nell'area occupata dal canale ($m^3/m/s$), d_1 e d_2 le profondità prima e dopo il dragaggio del canale (schema in Figura 3). Il valore dell'esponente m è compreso tra 1,5 e 2,5. Si osserva che, poiché il rapporto d_1/d_2 è inferiore all'unità ($d_2 > d_1$) il valore 2,5 rappresenta una stima a favore di sicurezza poiché fornisce un valore della capacità di intrappolamento superiore rispetto a quello ottenuto con un valore dell'esponente m pari a 1,5. Per il caso in esame, la profondità del canale (d_2) è pari a 17,00 m, mentre quella dell'area circostante (d_1) è mediamente pari a 14,00 m. Da ciò discende che il canale "intrappola" una frazione del trasporto solido compresa tra il 25,3% ($m=1,5$) e il 38,5% ($m=2,5$). E' evidente che la stima della capacità di intrappolamento richiede la stima della portata solida unitaria in arrivo trasversalmente in corrispondenza del canale di accesso.

Si osserva che la relazione (1) permette di valutare l'evoluzione temporale della capacità di intrappolamento del canale al passare del tempo e, quindi, la stima dei volumi di dragaggio valutati su scala pluriennale. Infatti, man mano che il canale di accesso è interessato dal fenomeno dell'interrimento la profondità (d_2) tende a diminuire e quindi tende a diminuire anche la capacità di intrappolamento. A puro titolo di esempio, la Figura 4 mostra l'evoluzione temporale del rapporto S_{ti}/S_{t0} , tra la capacità di intrappolamento relativa all'i-esimo anno dopo la realizzazione del canale di accesso e quella relativa al primo anno, per il canale di accesso previsto dal Piano Regolatore Portuale del Porto di Livorno ($d_2=17,00$ m, $d_1 = 14,00$ m, larghezza del canale pari a 275 m). In generale, la capacità di intrappolamento del canale di accesso viene valutata sulla base della configurazione di progetto. Tuttavia la stima pluriennale dei volumi di dragaggio al passare degli anni può discostarsi da una semplice relazione lineare tra gli anni passati dalla realizzazione del canale (linea sottile nel grafico di destra di Figura 4). Tale differenza cresce al crescere della portata media annua in ingresso nel canale e, conseguentemente, dalla velocità con cui la profondità del canale diminuisce. In sostanza l'evolvere del fenomeno dell'interrimento del canale di accesso tende a "rallentare" il processo stesso. Si osserva che il grafico di destra riportato nella Figura 4 è utile ai fini gestionali del dragaggio del porto di accesso poiché, fissata la profondità al di sotto della quale è necessaria la manutenzione del canale e, conseguentemente, dei volumi da dragare, è possibile definire

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

l'intervallo di manutenzione (anni). Ancora una volta si evidenzia come sia necessaria la stima della portata solida unitaria Q' ($\text{m}^3/\text{m}/\text{anno}$) in arrivo trasversalmente in corrispondenza del canale di accesso. La metodologia utilizzata per la stima di Q' è illustrata nel seguente paragrafo.



3.1.2 Metodo numerico di dettaglio

Come dettagliato nei paragrafi precedenti, la stima dei volumi intrappolati nel canale di accesso richiede la stima della portata solida (sul fondo e in sospensione) in arrivo trasversalmente in corrispondenza del canale di accesso. Tale portata solida, come già anticipato, è da ricondurre

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

al sedimento risospeso ad opera del frangimento del moto ondoso e alla dispersione indotta dalla presenza del sistema di circolazione che ne consegue.

Nel presente studio si è utilizzato un approccio numerico che, definita la configurazione batimetrica e la sua discretizzazione in corrispondenza di una griglia uniforme, simula:

- la propagazione del moto ondoso;
- la risospensione indotta dal frangimento del moto ondoso;
- la circolazione costiera indotta dal moto ondoso frangente;
- la dispersione del sedimento in sospensione;
- la stima del trasporto solido di fondo;
- l'evoluzione del fondale.

Nel seguito si illustrano brevemente le caratteristiche dell'approccio numerico utilizzato.

La propagazione del moto ondoso viene calcolata risolvendo l'equazione di conservazione dell'azione d'onda. E' stato utilizzato il modello numerico SWAN (Simulating WAVes Nearshore), sviluppato dal Dipartimento di Meccanica dei Fluidi della Facoltà di Ingegneria Civile e Scienze Geologiche della Delft University of Technology. Il modello permette di simulare la propagazione delle onde verso riva, tenendo conto dei fenomeni indotti dal vento, dalle variazioni batimetriche del fondale, dalle interazioni tra onde e tra onde e correnti. Più in particolare il modello descrive i processi di propagazione del moto ondoso (fenomeni di rifrazione e shoaling legati alla variazione di corrente e profondità), i processi legati alla generazione delle onde da parte del vento, i fenomeni legati alle dissipazioni dell'energia (withcapping, frangimento, attrito sul fondo) ed alle interazioni non-lineari tra le frequenze che compongono lo spettro di moto ondoso durante l'evolversi del fenomeno propagativo.

A valle dell'utilizzo del modello di propagazione ondosa è stato utilizzato un modello di circolazione costiera che risolve le equazioni non lineari delle onde in acque basse. In questo modo sono note le caratteristiche del moto ondoso e il sistema di correnti nel dominio di calcolo. Tali informazioni sono utilizzate per la definizione della funzione sorgente q_t (dimensionalmente equivalente a una concentrazione mediata sull'intera colonna d'acqua) che "forza" l'equazione di dispersione integrata sulla verticale. Per la definizione della funzione sorgente si è utilizzata la formulazione proposta da Soulsby e van Rijn (Soulsby, 1997) che tiene

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

conto dell'azione combinata delle onde e delle correnti e che descrive sia la componente imputabile al trasporto di fondo, sia quella imputabile al trasporto in sospensione. La distribuzione della funzione q_t nel dominio di calcolo (x,y) è espressa come segue:

$$q_t = \frac{A_s + A_f}{h} \left(\sqrt{U^2 + \frac{0,018}{C_D} u_{rms}^2} - U_{cr} \right)^{2,4} \quad (2)$$

nella quale U indica la velocità media della corrente, u_{rms} è il valore medio quadratico della velocità orbitale indotta dalle onde, h è la profondità locale, U_{cr} è il valore critico dell'intensità di corrente oltre la quale si ha il movimento del sedimento, C_D è il coefficiente di resistenza relativo alla sola corrente e i parametri A_s e A_f tengono conto, rispettivamente, della componente in sospensione e di fondo del trasporto solido.

I valori di h derivano dalla discretizzazione della batimetria, quelli di u_{rms} dall'applicazione del modello di propagazione del moto ondoso e quelli di U dall'applicazione del modello di circolazione costiera.

Per quanto riguarda il valore critico della corrente U_{cr} oltre la quale si ha la movimentazione del sedimento, esso dipende dalla granulometria che costituisce il fondale (d_{50} , d_{90} , rispettivamente il diametro passante al 50% e al 90%) e dalla profondità locale (van Rijn, 1984a,b,c):

$$U_{cr} = 8,5(d_{50})^{0,6} \log_{10} \left(\frac{4h}{d_{90}} \right) \quad (3)$$

Il coefficiente di resistenza C_D relativo alla sola corrente è espresso come segue (Soulsby, 1997):

$$C_D = \left[\frac{0,40}{\ln(h/z_0) - 1} \right]^2 \quad (4)$$

nella quale z_0 è la misura della scabrezza del fondale ($z_0=0,006$ m).

Il termine A_f che fornisce il trasporto di fondo è pari a (Soulsby, 1997):

$$A_f = \frac{0,005h(d_{50}/h)^{1,2}}{[(\rho_s/\rho - 1)gd_{50}]^{1,2}} \quad (5)$$

nella quale ρ_s rappresenta la densità del sedimento e ρ quella dell'acqua.

Il termine A_s , che fornisce il contributo del trasporto in sospensione, è espresso dalla seguente relazione (Soulsby, 1997):

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

$$A_s = \frac{0,012 d_{50} D_*^{-0,6}}{[(\rho_s / \rho - 1) g d_{50}]^{1,2}} \quad (6)$$

nella quale il termine D_* è definito come segue:

$$D_* = \left[\frac{(\rho_s / \rho - 1) g}{\nu^2} \right]^{1/3} d_{50} \quad (7)$$

ove si è fatto uso del simbolo ν per indicare la viscosità cinematica dell'acqua.

La formulazione (2), con le definizioni (3)-(7), permette di definire il termine forzante dell'equazione di dispersione la cui soluzione numerica fornisce la distribuzione spaziale della concentrazione media sulla verticale C di sedimento nel dominio di calcolo. Tali valori, insieme ai risultati del modello di idrodinamica, permettono di valutare la variazione temporale della posizione del fondale z_b (Exner, 1925):

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{1}{1 - \lambda} \nabla^2 (hCU) \quad (8)$$

nella quale t è il tempo e λ la porosità.

Le simulazioni numeriche, definite nei paragrafi successivi, sono relative a una durata di un'ora. La capacità di intrappolamento media annua è definita moltiplicando il rateo orario di sedimentazione nel canale di accesso per la durata della condizione di moto ondoso considerata.

3.2 Dati di riferimento

L'approccio metodologico, di tipo numerico, descritto nel paragrafo precedente è stato implementato nel caso in esame del canale di accesso previsto dal nuovo Piano Regolatore Portuale del Porto di Livorno. Nel seguito si descrivono brevemente i dati utilizzati.

3.2.1 Batimetria

La batimetria dell'area di interesse è stata desunta dalla carta nautica n° 4 « Dal Gombo al Canale di Piombino » - scala 1:100.000, edita dall'Istituto Idrografico della Marina. Le opere

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

portuali e le profondità di dragaggio sono quelle previste nel nuovo Piano Regolatore del Porto di Livorno.

3.2.2 Moto ondoso

Il fenomeno dell'interrimento dei canali di accesso è governato dalle condizioni medie, non intense ma molto frequenti, piuttosto che dagli eventi estremi, intensi ma molto rari. Per la definizione delle condizioni di moto ondoso medie si è fatto riferimento allo "Studio Meteomarino" e allo "Studio della dinamica costiera" condotti nell'ambito dello studio in epigrafe.

Così come indicato dallo "Studio Meteomarino", il paraggio in esame risulta esposto prevalentemente agli stati di mare provenienti da Libeccio e da Ponente. Nello "Studio della dinamica litoranea" è definita una serie sintetica di onde rappresentativa dell'anno climatico medio, sulla base delle analisi effettuate nell'ambito dello "Studio Meteomarino". La tabella 1 riporta la frequenza relativa degli eventi di moto ondoso classificati per direzione di provenienza e di altezza d'onda significativa.

Tabella 1 – Frequenza relativa degli eventi di moto ondoso classificati per direzione e altezza d'onda significativa.							
H _s (m)	Direzioni di provenienza (°N)						
	195	215	235	255	275	295	315
5,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
4,00	0,00	0,00	0,17	0,27	0,00	0,00	0,00
3,00	0,00	0,00	0,89	0,79	0,21	0,00	0,00
2,00	0,17	0,41	4,01	2,23	0,31	0,17	0,21
1,00	1,54	2,77	10,86	10,55	2,95	1,78	1,03

3.2.3 Granulometria

Così come evidente dalle formulazioni del trasporto solido riportate nei paragrafi precedenti, uno dei parametri di maggiore influenza sul fenomeno di interrimento del canale di accesso è la distribuzione granulometrica del sedimento che costituisce il fondale dell'area di studio.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

Così come riportato anche nello “Studio sulla gestione dei materiali di dragaggio”, informazioni sulla granulometria dell’area sono note poiché tutto il bacino portuale, anche nella configurazione prevista dal nuovo Piano Regolatore Portuale, risulta interno al perimetro del Sito di Interesse Nazionale di Livorno, sancita con il Decreto Ministeriale 24 febbraio 2003. Pertanto, come previsto dall’attuale normativa, prima di procedere all’esecuzione di un qualsiasi tipo di intervento nell’area è necessario attuare il Piano di Caratterizzazione e procedere con il progetto di bonifica dei sedimenti. Il Piano di caratterizzazione ambientale dell’area marino costiera di competenza è stato approvato dalla Conferenza dei Servizi Decisoria del 9.11.2004.

Le attività di campionamento ed analisi dei sedimenti svolte ai sensi del Piano di Caratterizzazione redatto da ICRAM (ora ISPRA), hanno riguardato il prelievo 194 carote, di lunghezza compresa tra 2 e 4 m, e 28 campioni superficiali, per un numero totale di campioni analizzati pari a 795.

Tra le altre analisi, sulla totalità dei campioni destinati alle analisi è stata determinata la granulometria del sedimento, di interesse ai fini del presente studio di interrimento del canale di accesso.

La figura 5 mostra la distribuzione granulometrica dei sedimenti marini nelle aree indagate, in funzione dei contributi delle differenti classi granulometriche, quali ghiaia, sabbia e pelite, quest’ultima comprendente le classi granulometriche di silt e argilla.

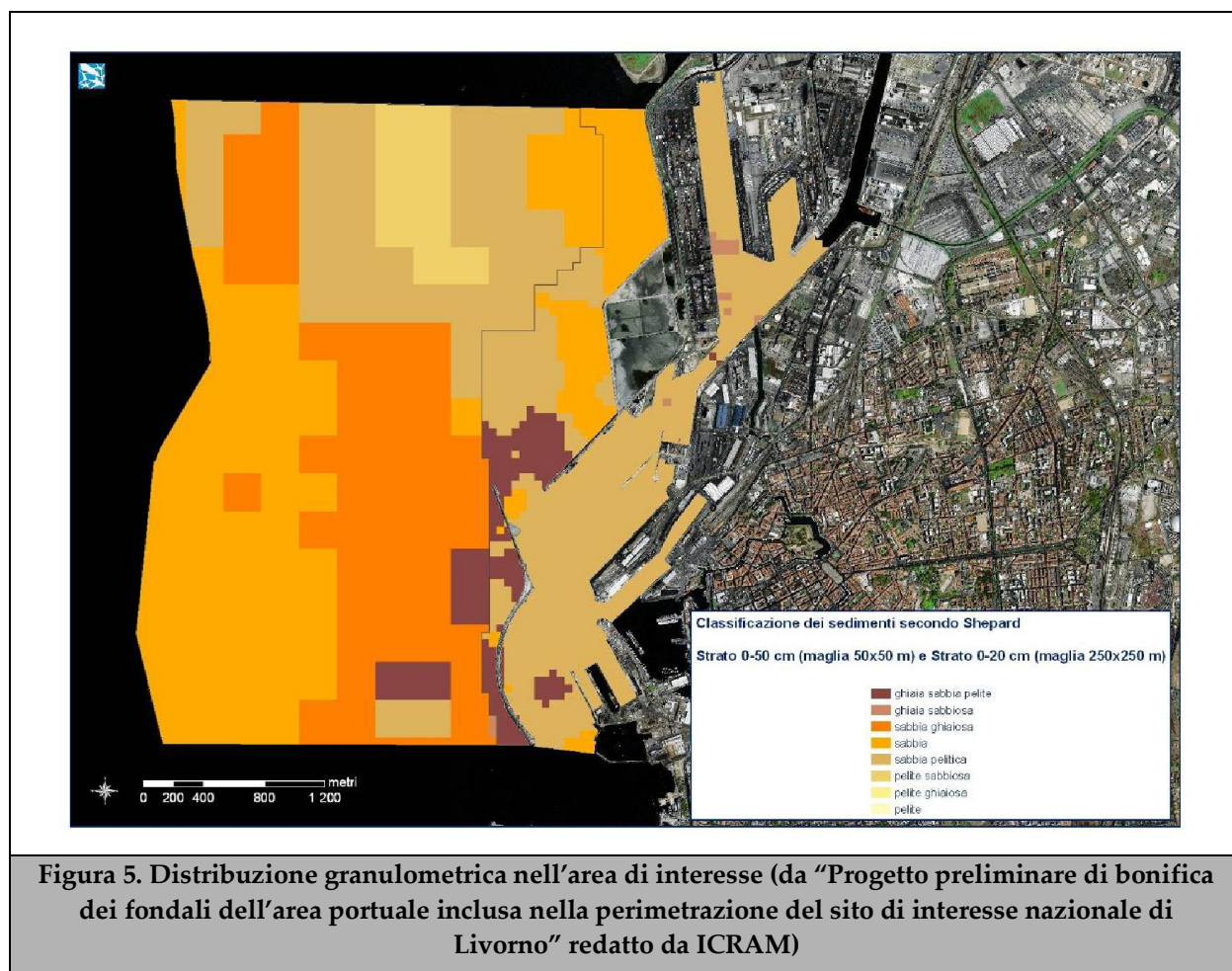
Così come descritto nel piano di caratterizzazione, dall’elaborazione dei risultati delle analisi granulometriche, la distribuzione tessiturale dei fondali all’interno dell’area portuale risulta abbastanza omogenea, con sedimenti di natura prevalentemente sabbioso pelitica su quasi tutto lo spessore indagato ed incrementi di una frazione più grossolana, limitatamente ad alcune aree (parte meridionale della Darsena Toscana e a ridosso della diga foranea).

All’esterno delle opere foranee (diga Curvilinea e diga della Meloria) risulta costituita da sedimenti prevalentemente sabbiosi, talora anche con una discreta componente più grossolana (sabbie ghiaiose). Nel settore settentrionale, oltre il limite delle opere foranee esistenti, dove è prevista la realizzazione della porzione più esterna della Piattaforma Europa (bacino di evoluzione, darsena prodotti pericolosi e terminale Ro-Ro esterno) ed il canale di accesso, le

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

indagini hanno riguardato solo lo strato superficiale di 20 cm di spessore. Peraltro, vista l'omogeneità riscontrata nell'area del porto, può essere ritenuto accettabile, in prima approssimazione, estendere anche a quest'area i risultati delle indagini eseguite nella restante porzione di area marina.

In estrema sintesi, per lo studio dell'interrimento del canale di accesso previsto dal nuovo PRP è possibile riferirsi alla classe granulometrica delle sabbie grossolane caratterizzate da diametri compresi tra 0,50 mm e 1,00 mm (sabbia grossolana secondo la scala Wentworth, USACE, 2002). A favore di sicurezza per la problematica in studio, si è scelto di utilizzare il diametro inferiore ($d_{50}=0,50$ mm) che massimizza la "mobilità" del sedimento del fondale. E' stata inoltre considerata una porosità in situ pari a 0,40, tipica di sedimenti mediamente addensati, e un d_{90} pari a 1,2 mm, relativa ad ammassi mediamente assortiti (Raabe, 1971; Soulsby, 1997).

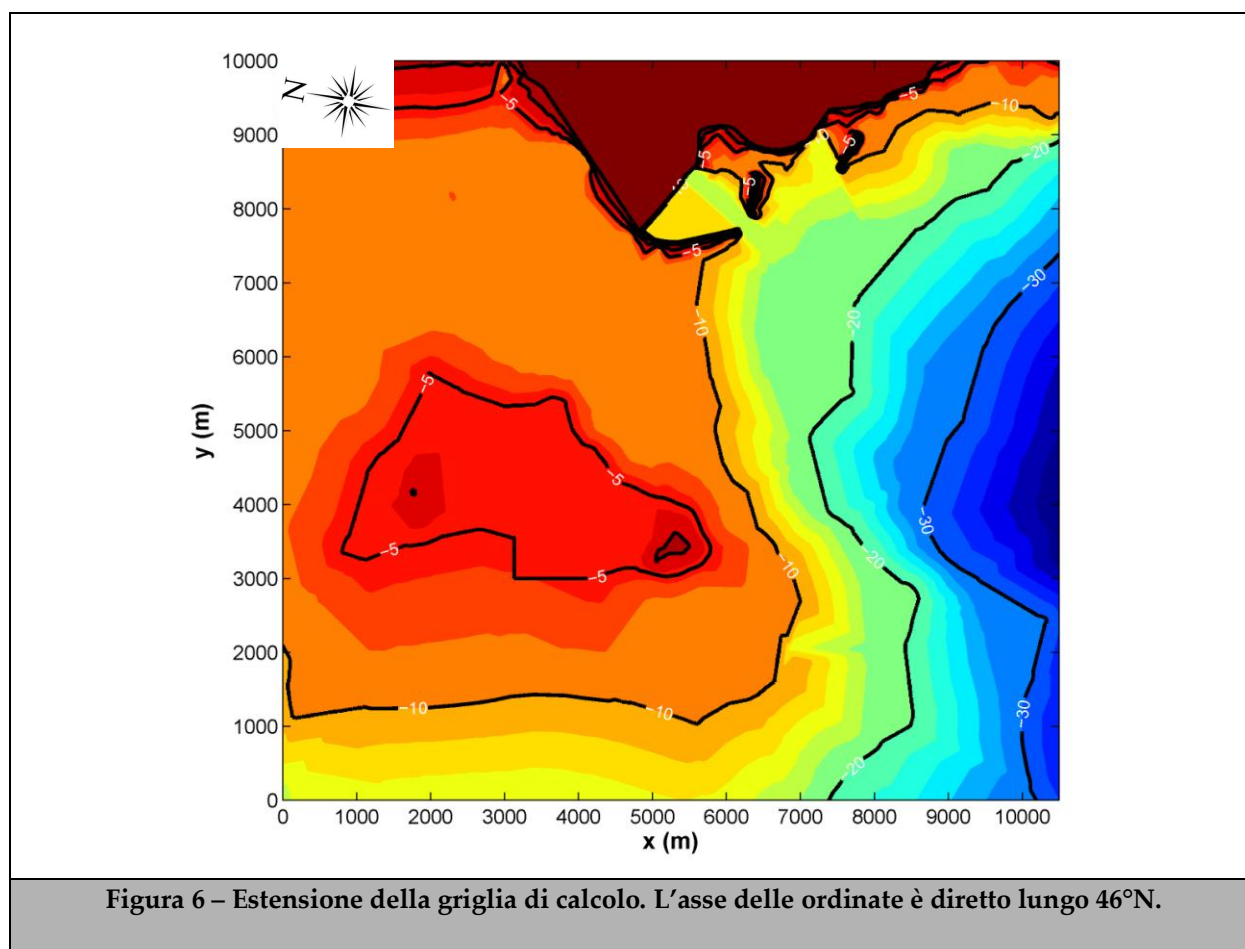


 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

3.3 Griglie di calcolo

Per effettuare le simulazioni numeriche, i dati batimetrici devono essere discretizzati su una griglia di calcolo. Nel presente studio si sono definite una serie di griglie uniformi (passo di discretizzazione costante nelle due direzioni ortogonali che costituiscono il sistema di riferimento cartesiano) al fine di effettuare un'analisi comparativa finalizzata alla scelta dell'“ottimo” passo di discretizzazione, compromesso tra affidabilità dei risultati numerici e tempi di calcolo.

Il dominio di calcolo (Figura 6) ha un'estensione di circa 10,50 km lungo l'asse delle ascisse e di circa 10,00 km lungo quello delle ordinate. La giacitura dell'asse delle ordinate è pari a 46°N.

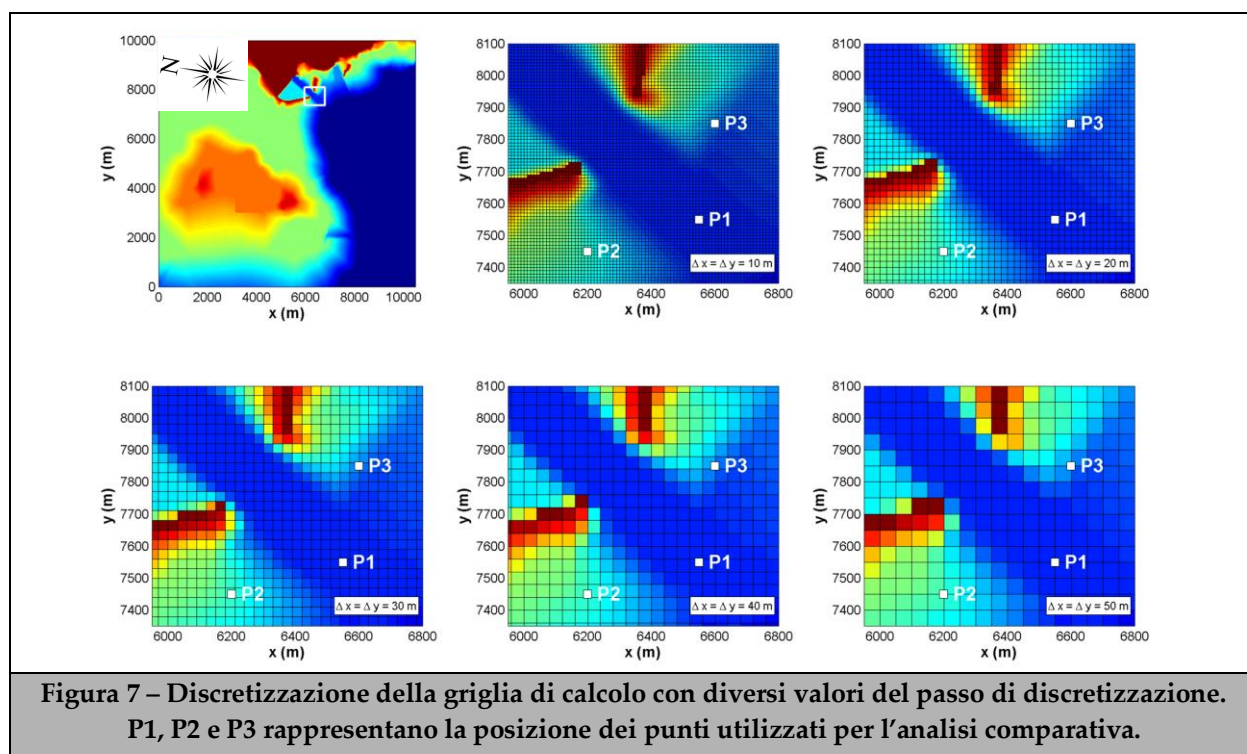


La tabella 2 mostra le grandezze caratteristiche delle 5 discretizzazioni della batimetria di calcolo, con passo di discretizzazione compreso tra 20 m e 60 m. Il numero di nodi di griglia è compreso tra i circa 29 000 della griglia più rada (passo di discretizzazione pari a 60 m,

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

dimensione della griglia 176x167) e i circa 263 000 della griglia più fitta (passo di discretizzazione pari a 20 m, dimensione della griglia 526x501). La figura 7 mostra un dettaglio dell'imboccatura portuale per ognuna delle diverse griglie considerate. Nei grafici sono riportate le posizioni di 3 punti (P1, P2 e P3) utilizzati per l'analisi comparativa dei risultati. La Tabella 3 mostra i relativi risultati in termini di altezza d'onda H e intensità della corrente |U| nei punti di confronto (P1, P2 e P3). La tabella riporta gli errori relativi (ε) rispetto ai risultati ottenuti con griglia più fitta (DX=DY=20 m). Sulla base dei risultati ottenuti, si è scelto di effettuare le simulazioni sulla griglia di calcolo discretizzata con passo uniforme pari a 30 m.

Tabella 2 – Parametri delle diverse discretizzazioni della batimetria di calcolo utilizzate per l'analisi comparativa della griglia di calcolo.					
ΔX	ΔY	NX	NY	NODI	Tempo di calcolo
(m)	(m)	()	()	()	(minuti)
20	20	526	501	263 526	199,3
30	30	351	334	117 234	58,12
40	40	263	251	66 013	26,69
50	50	211	201	42 411	14,74
60	60	176	167	29 392	8,76



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

Tabella 3 – Risultati dell’analisi comparativa effettuata per la scelta della discretizzazione della griglia di calcolo.						
DX=DY (m)	X (m)	Y (m)	U (m/s)	ε (°)	H (m)	ε (°)
20	6540	7540	0,00396	=	0,90600	=
	6200	7440	0,00296	=	0,89720	=
	6600	7840	0,00283	=	0,90484	=
30	6540	7530	0,00408	0,03128	0,90854	0,00280
	6180	7440	0,00281	-0,05200	0,89806	0,00096
	6600	7830	0,00282	-0,00308	0,90478	-0,00006
40	6520	7520	0,00295	-0,25399	0,91015	0,00458
	6200	7440	0,00430	0,45006	0,90096	0,00419
	6600	7840	0,00154	-0,45487	0,90511	0,00030
50	6550	7550	0,00413	0,04350	0,91224	0,00688
	6200	7450	0,00080	-0,73024	0,90310	0,00658
	6600	7850	0,00175	-0,38276	0,90673	0,00210
60	6540	7500	0,00554	0,39963	0,91672	0,01183
	6180	7440	0,00373	0,25810	0,90519	0,00891
	6600	7800	0,00263	-0,06984	0,90885	0,00443

3.4 Definizione degli scenari di simulazione

Definita la griglia di calcolo, così come descritto nel paragrafo precedente, l’ultimo passo da effettuare è la scelta degli scenari delle simulazioni.

Poiché, come già sottolineato, le correnti mareali e quelle indotte dal vento influenzano in maniera trascurabile il fenomeno di interrimento del canale di accesso rispetto all’azione del moto ondoso, gli scenari sono stati definiti in termini di caratteristiche sintetiche di eventi di moto ondoso (altezza d’onda significativa, periodo di picco e direzione di provenienza) rappresentative delle condizioni medie a cui è sottoposto il canale di accesso.

Sulla base della frequenza di accadimento delle classi di altezza d’onda e direzione (precedente Tabella 1) sono stati selezionati 11 stati di mare la cui frequenza di accadimento (cumulata) rappresenta circa il 90% degli eventi caratterizzati da altezze d’onda superiori a 0,50 m (definite come periodi di calma). La Tabella 4 mostra le caratteristiche sintetiche degli stati di mare simulati. Il valore del periodo di picco, in analogia con quanto effettuato nell’ambito dello

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

“Studio Meteomarino”, è stato dedotto dall’Atlante delle Onde nei Mari Italiani (Corsini et al., 2006).

Tabella 4 – Scenari di simulazione in termini di caratteristiche sintetiche del moto ondoso e frequenza di accadimento				
CONDIZIONE DI MOTO ONDOSO	H _s (m)	T _p (s)	Dir (°N)	F (%)
W01	1,00	6,69	215	2,77
W02		6,69	235	10,86
W03		6,69	255	10,55
W04		6,69	275	2,95
W05		6,69	295	1,78
W06	2,00	7,93	215	0,41
W07		7,93	235	4,01
W08		7,93	255	2,23
W09		7,93	275	0,31
W10	3,00	8,78	235	0,89
W11		8,78	255	0,79

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

4 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

4.1 Considerazioni generali

I risultati numerici per ognuno delle condizioni di moto ondoso incidenti definite in Tabella 4 sono riportati graficamente nell'Appendice A.

In linea generale, i risultati in termini di propagazione del moto ondoso (figure A.1-A-11 in Appendice) sono del tutto coerenti rispetto a quanto già riportato nell'ambito dello "Studio Meteomarino" e dello "Studio della dinamica costiera" condotti nell'ambito del Nuovo Piano Regolatore del Porto di Livorno. In particolare si evidenzia l'effetto della presenza delle secche della Meloria con evidenti fenomeni di rifrazione e dissipazioni energetiche dovute al frangimento. Inoltre si osserva che all'interno dell'avamporto non si osservano elevati valori dell'altezza d'onda significativa.

L'influenza delle secche della Meloria è evidente anche in termini di circolazione idrodinamica indotta dal moto ondoso (figure A.12-A.22 in appendice) in corrispondenza delle quali insorgono spinte dovute al moto ondoso che, in virtù dei gradienti di altezza d'onda, inducono l'instaurarsi di correnti con valor medio che può superare anche 1 m/s. I grafici riportati in appendice mostrano le aree interessate da velocità medie sulla verticale che eccedono il valore limite U_{cr} , fornito dall'equazione (3), oltre il quale le correnti sono in grado di mobilizzare il sedimento sul fondo. Ancora una volta si osserva che tali aree sono localizzate in corrispondenza delle secche della Meloria e soltanto per gli eventi più intensi nei pressi delle strutture portuali. Non si osservano elevati valori di intensità di corrente in corrispondenza dell'area circostante il canale di accesso, soprattutto per le condizioni di moto ondoso più frequenti ($H_s=1,00$ m, condizioni di moto ondoso W01, W02, W03, W04 e W05 in Tabella 4).

La deposizione oraria in corrispondenza dell'area occupata dal tratto terminale del canale di accesso risulta piuttosto limitata con valori che non superano un valore medio, valutato sull'intera area esterna, di $1,6 \cdot 10^{-2}$ cm/ora per le condizioni più frequenti, e di circa $1,9 \cdot 10^{-1}$ cm/ora per le condizioni più intense e meno frequenti. La deposizione non risulta tuttavia

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

distribuita uniformemente su tutta l'estensione esterna del canale di accesso, con una deposizione maggiore nel tratto prossimo all'imboccatura portuale.

4.2 Stima della deposizione annuale iniziale

Sulla base dei risultati numerici descritti qualitativamente nel paragrafo precedente si procede alla stima dell'interrimento del canale di accesso.

La Tabella 5 riporta i risultati numerici ottenuti in termini di capacità di intrappolamento ($m^3/anno$) e di variazione media della profondità ($cm/anno$). Si osserva che l'"efficacia" di ognuna delle condizioni di moto ondoso in termini di interrimento del canale di accesso è il risultato del rateo orario (m^3/ora in termini di volume sedimentario o cm/ora in termini di variazione media della profondità) e della relativa frequenza di accadimento che, insieme, concorrono alla stima del contributo annuo ($m^3/anno$ in termini di volume sedimentario o $cm/anno$ in termini di variazione media della profondità). Da ciò discende che le condizioni di moto ondoso più intense mostrano il più elevato rateo di deposizione orario (circa pari $1,9 \cdot 10^{-1} cm/ora$) a cui non corrisponde il più elevato contributo annuo a causa della limitata durata di tali eventi rispetto a quelli meno intensi e quindi caratterizzati da valori inferiori del rateo di deposizione orario. La condizione di moto ondoso più efficace in termini di interrimento del canale di accesso risulta essere quella caratterizzata da un'altezza d'onda significativa a largo pari a 2,00 m e una direzione di provenienza pari a $235^\circ N$, con una frequenza di accadimento di circa 350 giorni/anno.

In generale la deposizione annua nel canale di accesso risulta pari a circa $7.300 m^3$ a cui corrisponde una variazione media della profondità del canale di circa 4 cm. Tuttavia si ribadisce che l'utilizzo dei risultati numerici ottenuti fornisce la stima della variazione media annuale di profondità del canale di accesso nella configurazione prevista dal nuovo Piano Regolatore Portuale (configurazione iniziale). Nel corso degli anni il fenomeno di interrimento tende a diminuire per cui è necessario effettuare una stima pluriennale della deposizione di sedimento nel canale di accesso, prezioso ai fini gestionali del Porto, e riportata nel paragrafo seguente.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

Tabella 5 – Risultati delle simulazioni numeriche in termini di capacità di intrappolamento del canale di accesso e di variazione della profondità del canale.

Stato di mare	H _s	Tp	Dir	f		Capacità di intrappolamento		Variazione media della profondità	
	(m)	(s)	(°N)	(%)	(ore/anno)	m ³ /ora	m ³ /anno	cm/ora	cm/anno
W01	1,00	6,60	215	2,77	243	1,171	284,5	1,66E-03	0,16
W02		6,60	235	10,86	951	0,906	861,2	1,29E-03	0,48
W03		6,60	255	10,55	924	0,819	756,4	1,16E-03	0,42
W04		6,60	275	2,95	258	0,822	212,2	1,17E-03	0,12
W05		6,60	295	1,78	156	0,856	133,6	1,22E-03	0,07
W06	2,00	7,88	215	0,41	36	10,641	383,1	1,51E-02	0,21
W07		7,88	235	4,01	351	5,154	1809,2	7,32E-03	1,01
W08		7,88	255	2,23	195	4,023	784,5	5,71E-03	0,44
W09		7,88	275	0,31	27	3,791	102,4	5,38E-03	0,06
W10	3,00	8,74	235	0,89	78	13,054	1018,2	1,85E-02	0,57
W11		8,74	255	0,79	69	13,348	921,0	1,90E-02	0,52
				Totali			7266		4,07

4.3 Stima dei volumi di dragaggio su scala pluriennale

La stima dell'interrimento del canale di accesso nel suo tratto terminale deve essere effettuata su scala pluriennale al fine di fornire uno strumento pratico utile alla previsione di un piano di manutenzione del canale stesso.

I risultati illustrati nel paragrafo precedente vengono qui utilizzati per la definizione di una relazione tra la variazione della profondità del canale di accesso e gli anni passati dalla sua realizzazione (o dall'ultimo intervento di manutenzione che ne ha ripristinato la configurazione di progetto) secondo quanto previsto dal nuovo Piano Regolatore Portuale.

Come descritto nel paragrafo 2.1.1, la capacità di intrappolamento S_t può essere espressa in funzione del rapporto tra la profondità dell'area circostante il canale di accesso e quella del canale stesso (Galvin, 1982). L'analisi effettuata in questo studio fornisce una stima della capacità di intrappolamento S_t (m³/m/anno) relativa alla configurazione iniziale del canale di accesso. Invertendo l'equazione (1) è possibile stimare in via indiretta il trasporto solido medio annuo Q' (sul fondo e in sospensione) in arrivo in corrispondenza del canale di accesso:

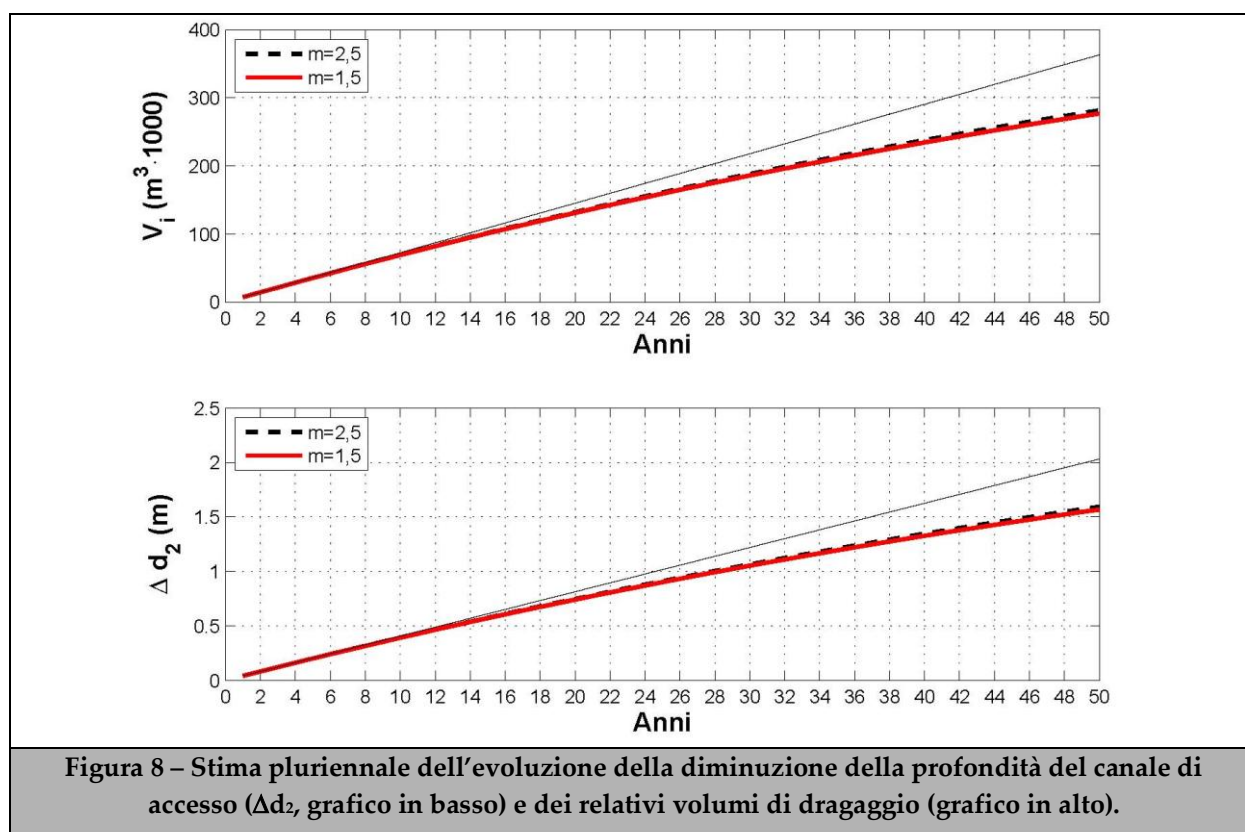
 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

$$Q' = \frac{S_t}{\left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^m\right]} \quad (9)$$

nella quale, si rammenta, il simbolo Q' indica il trasporto solido per unità di lunghezza in ingresso nell'area occupata dal canale ($m^3/m/s$), d_1 e d_2 le profondità prima e dopo il dragaggio del canale (schema in Figura 3). Il valore dell'esponente m è compreso tra 1,5 e 2,5.

Ipotizzando che il valore di Q' vari in misura trascurabile al variare della profondità del canale di accesso (invariante al procedere del fenomeno di intrappolamento), la (9) può essere utilizzata per valutare la variazione di profondità del canale di accesso in alternativa ad una tendenza lineare che assegni il valore della deposizione iniziale (in questo caso pari a circa 4 cm/anno) a tutti gli anni di esercizio del canale.

La Figura 8 mostra i risultati ottenuti per il canale di accesso del Porto di Livorno secondo la configurazione prevista dal nuovo Piano Regolatore Portuale sia in termini di variazione della profondità del canale (grafico in basso) sia in termini del volume di sedimento da dragare (grafico in alto).



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

Si osserva che, fissata la variazione della profondità Δd_2 , il volume di dragaggio deriva dalla configurazione geometrica del canale di accesso nel suo tratto terminale esterno all'imboccatura esterna. Le linee continue sottili nei grafici di Figura 8 mostrano la variazione lineare della variazione della profondità del canale, valida nel caso si assumesse costante la capacità di intrappolamento nel corso dell'esercizio.

Si sottolinea l'estrema utilità del grafico in Figura 8 ai fini della programmazione della manutenzione del canale di accesso. Fissato un valore critico della variazione media di profondità (Δd_2) il grafico in basso di Figura 8 fornisce una stima dell'intervallo di manutenzione, quello in alto il volume da dragare. A puro titolo di esempio, assegnando il valore di 1,00 m alla variazione critica della profondità del canale, i risultati dello studio mostrano che l'intervento di manutenzione andrebbe effettuato su un orizzonte temporale di circa 30 anni. Si osserva che utilizzando una variazione lineare della profondità tale orizzonte temporale risulterebbe pari a circa 24 anni. Assegnando il valore limite di 1,5 m alla variazione critica della profondità del canale l'orizzonte temporale di manutenzione sale a circa 45 anni, contro un valore di 35 anni nel caso di variazione lineare.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

5 OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

L'obiettivo dello studio illustrato nella presente relazione è la stima dei volumi di dragaggio necessari, su scala pluriennale, per la manutenzione del canale di accesso previsto dal nuovo Piano Regolatore Portuale del Porto di Livorno.

A tal fine è stato utilizzato un approccio numerico di dettaglio per la valutazione della capacità di intrappolamento del tratto terminale del canale di accesso relativo alla configurazione di progetto e, pertanto, valido soltanto per il primo periodo di esercizio.

Il metodo empirico proposto da Galvin (1982) ha permesso di valutare l'evoluzione del fenomeno di intrappolamento nel corso degli anni di esercizio del Porto. La Tabella 6 riporta la sintesi dei risultati dello studio, utili alla programmazione della manutenzione del canale di accesso, fornendo una stima dell'intervallo di manutenzione (in anni) e dei volumi di dragaggio, in funzione della variazione media della profondità del canale.

Tabella 6 – Sintesi dei risultati in termini di stima dell'intervallo di manutenzione e dei volumi di dragaggio in funzione della variazione media della profondità del tratto terminale del canale di accesso.

Δd_2 (m)	Stima dell'intervallo di manutenzione (anni)	Volume da dragare (m ³)
0,25	7	45 000
0,50	13	89 000
0,75	20	134 000
1,00	28	179 000
1,25	37	223 000
1,50	47	268 000

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Corsini S., Inghilesi R., Franco L., Piscopia R., 2006, *Atlante delle onde nei mari italiani*, APAT, Università di Roma Tre

De Filippi G., Duchini E., Pranzini E., 2008, *Closure depth estimation along the Tuscan coast aimed at short and long term coastal monitoring*, in "Beach Erosion Monitoring", Ed, Pranzini e Wetzel, Nuova Grafica Fiorentina

Exner, F.M., 1925, *Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen*, Sitzber, Akad, Wiss Wien, Math, Naturwiss, Part IIa, Bd, 134, 165–180 (in German)

Galvin, C., 1982, *Shoaling with bypassing for channels at tidal inlets*, Proc, 18th International Conference on Coastal Engineering

Glosh, L.K., Prasad, N., Joshi, V.B., Kunte, S.S., 2001, *A study on siltation in access channel to a port*, Coastal Engineering, 43, 59-74

Goda, Y., 2001, *A new approach to beach morphology with the focus on suspended sediment transport*, Proc, First Conf, Asian and Pacific Coastal Engineering, 1-24

Lisi I., Bruschi A., Del Gizzo M., Archina M., Barbano A, e Corsini S., 2010, *Le unità fisiografiche e le profondità di chiusura della costa italiana*, L'Aqua, 2-2010, 35-47

MarCom Working Group 30, 1995, *Joint PIANC-IAPH report on approach channels – preliminary guidelines (volume 1)*, Supplement to Bulletin nr, 87, PTC2 report of WG 30 First Report, ISBN 2-87223-068-8

MarCom Working Group 30, 1997, *Joint PIANC-IAPH report on approach channels - a guide for design (volume 2)*, Supplement to Bulletin nr, 95, PTC2 report of WG 30 Final Report, ISBN 2-87223-087-4, 108 pp,

Raabe O, G., 1971, *Particle size analysis utilizing grouped data and the log-normal distribution*, Aerosol Science, 2, 289-303

Soulsby, R., 1997, *Dynamics of marine sands*, Thomas Telford Publications, London, ISBN 0 7277 2584 X,

van de Kreeke J., Hoogewoningb S, E., Verlaan M., 2002, *An analytical model for the morphodynamics of a trench in the presence of tidal currents*, Continental Shelf Research, 22, 1811-1820

van Rijn, L, C., 1984a, *Sediment transport: part I: bed load transport*, Journal of Hydraulic Division Proc, ASCE, 110 (HY10), 1431-1456

van Rijn, L, C., 1984b, *Sediment transport: part II: suspended load transport*, Journal of Hydraulic Division Proc, ASCE, 110 (HY11), 1613-11641

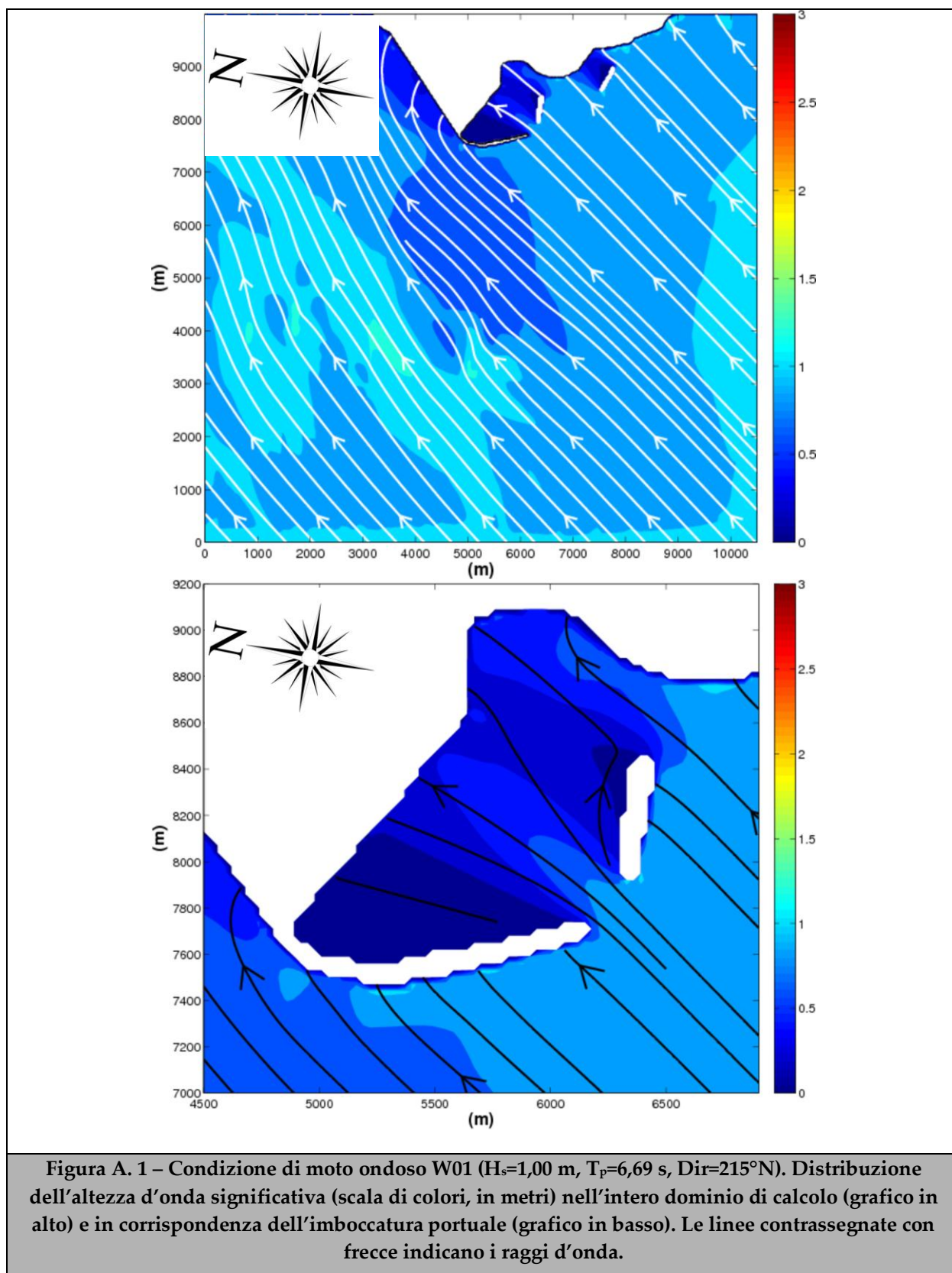
van Rijn, L, C., 1984c, *Sediment transport: part III: bed form and alluvial roughness*, Journal of Hydraulic Division Proc, ASCE, 110 (HY12), 1733-1754

van Rijn, L, C., 1986, *Sedimentation of dredged channels by currents and waves*, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 112, 541-559

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

A. RISULTATI NUMERICI

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

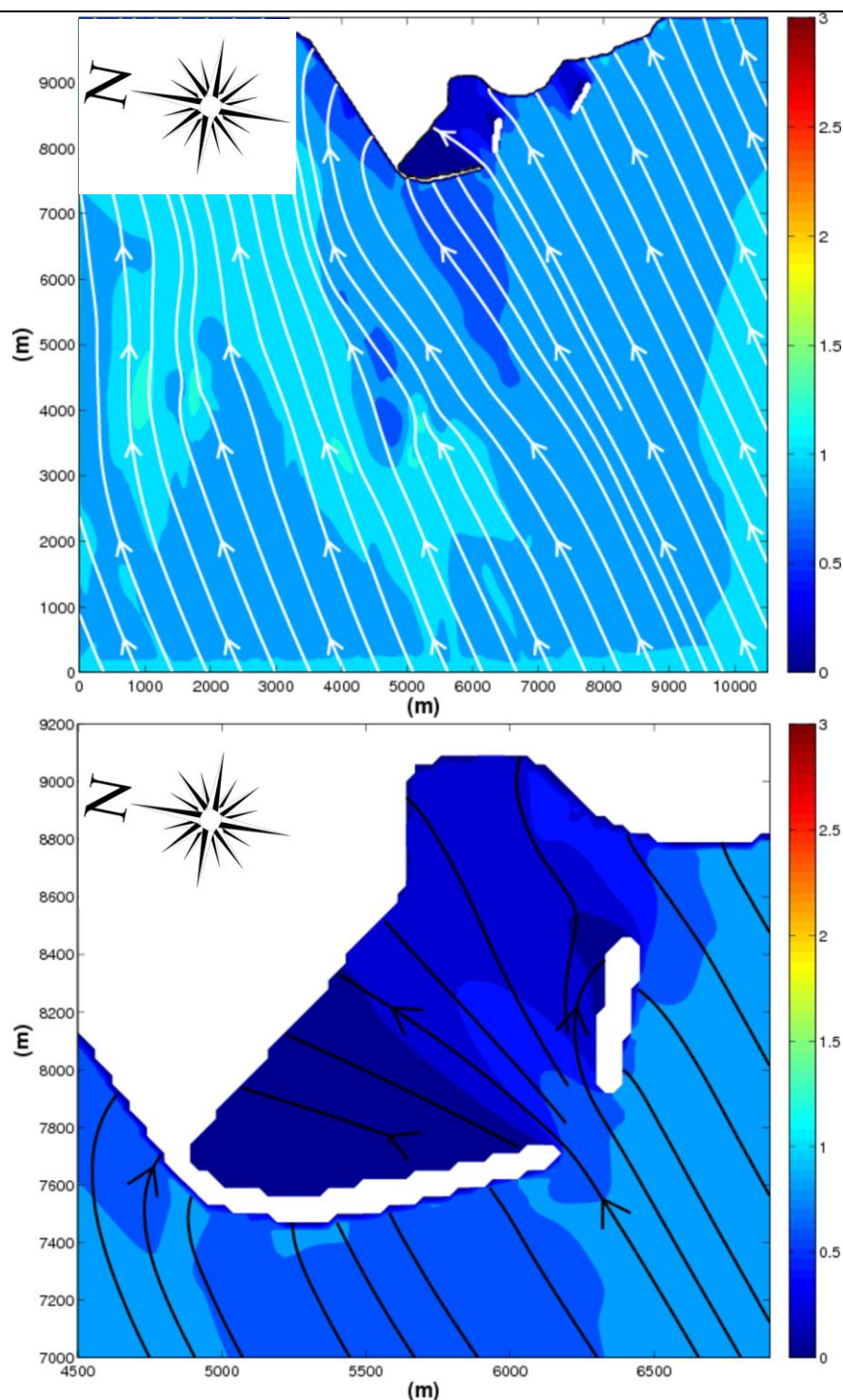


Figura A. 2 – Condizione di moto ondoso W02 ($H_s=1,00$ m, $T_p=6,69$ s, $Dir=235^\circ N$). Distribuzione dell'altezza d'onda significativa (scala di colori, in metri) nell'intero dominio di calcolo (grafico in alto) e in corrispondenza dell'imboccatura portuale (grafico in basso). Le linee contrassegnate con frecce indicano i raggi d'onda.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

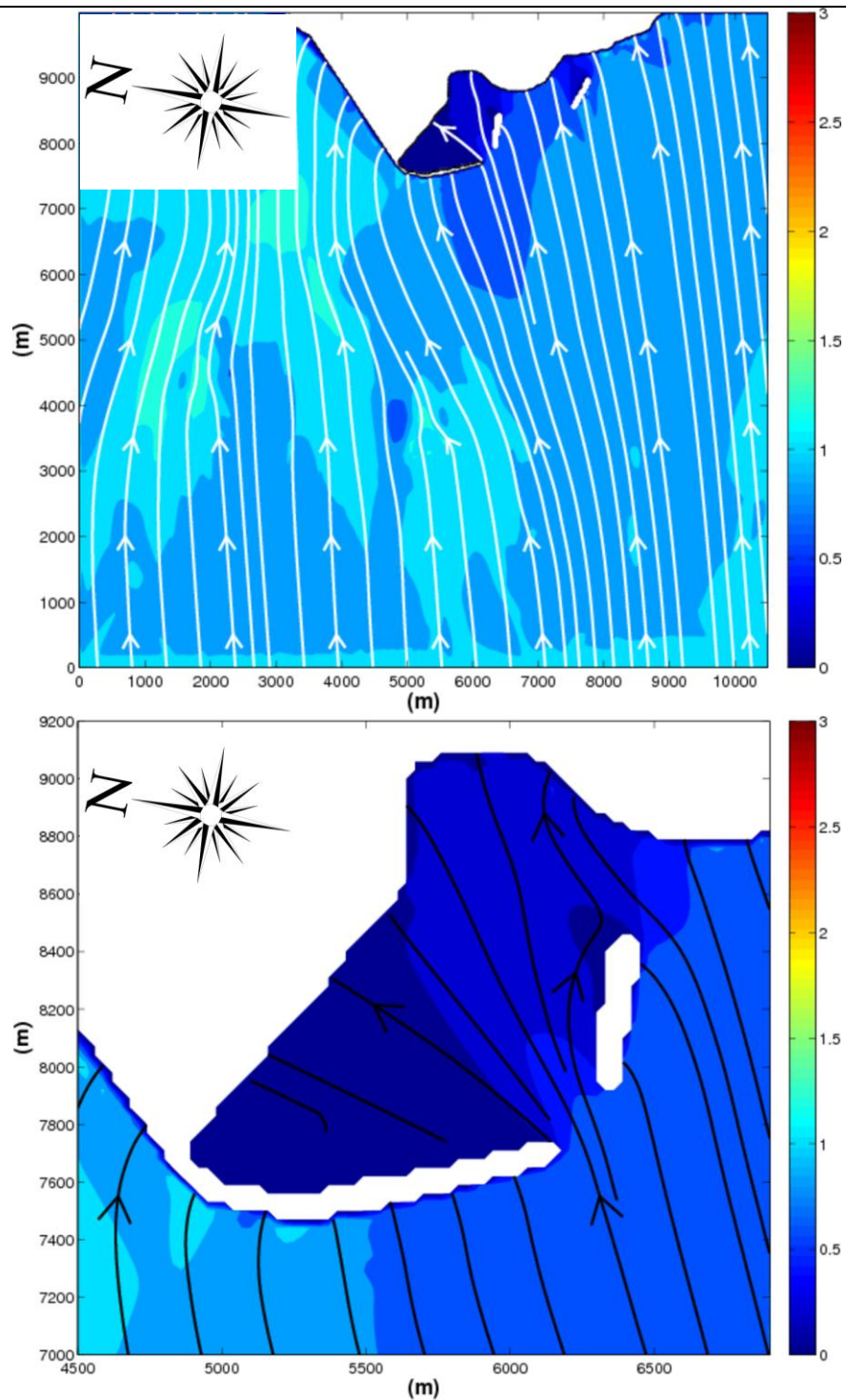
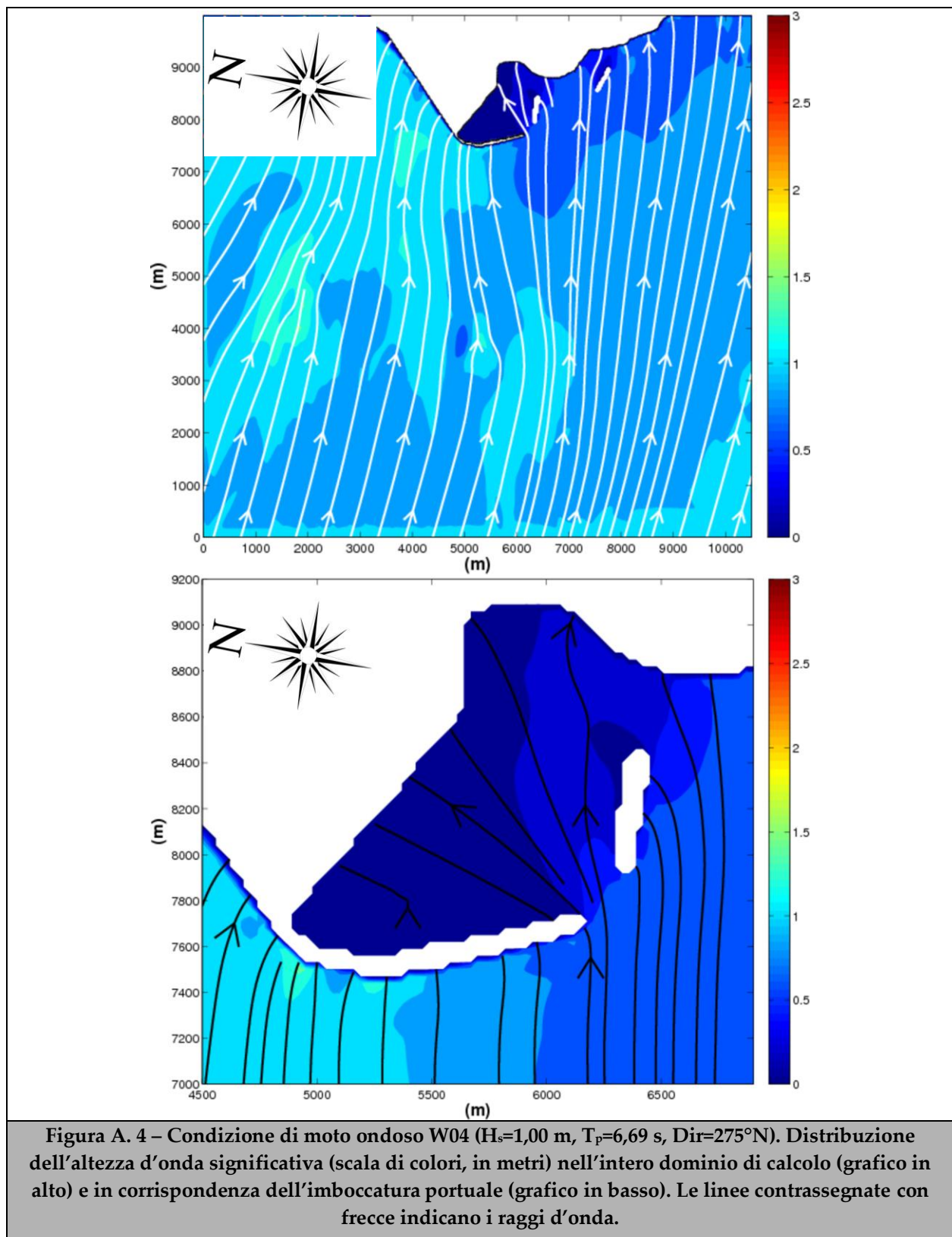
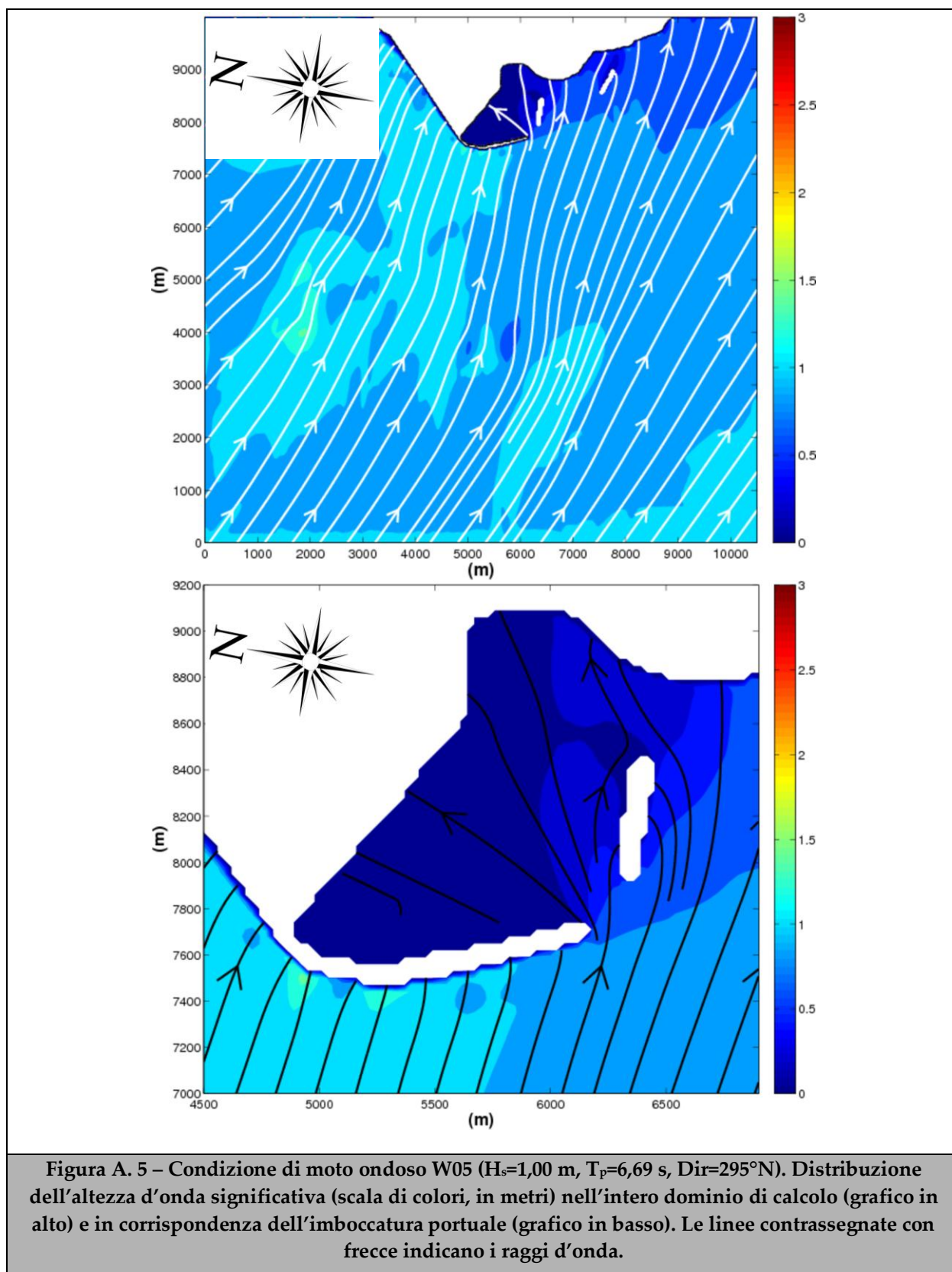


Figura A. 3 – Condizione di moto ondoso W03 ($H_s=1,00$ m, $T_p=6,69$ s, $Dir=255^\circ N$). Distribuzione dell'altezza d'onda significativa (scala di colori, in metri) nell'intero dominio di calcolo (grafico in alto) e in corrispondenza dell'imboccatura portuale (grafico in basso). Le linee contrassegnate con frecce indicano i raggi d'onda.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

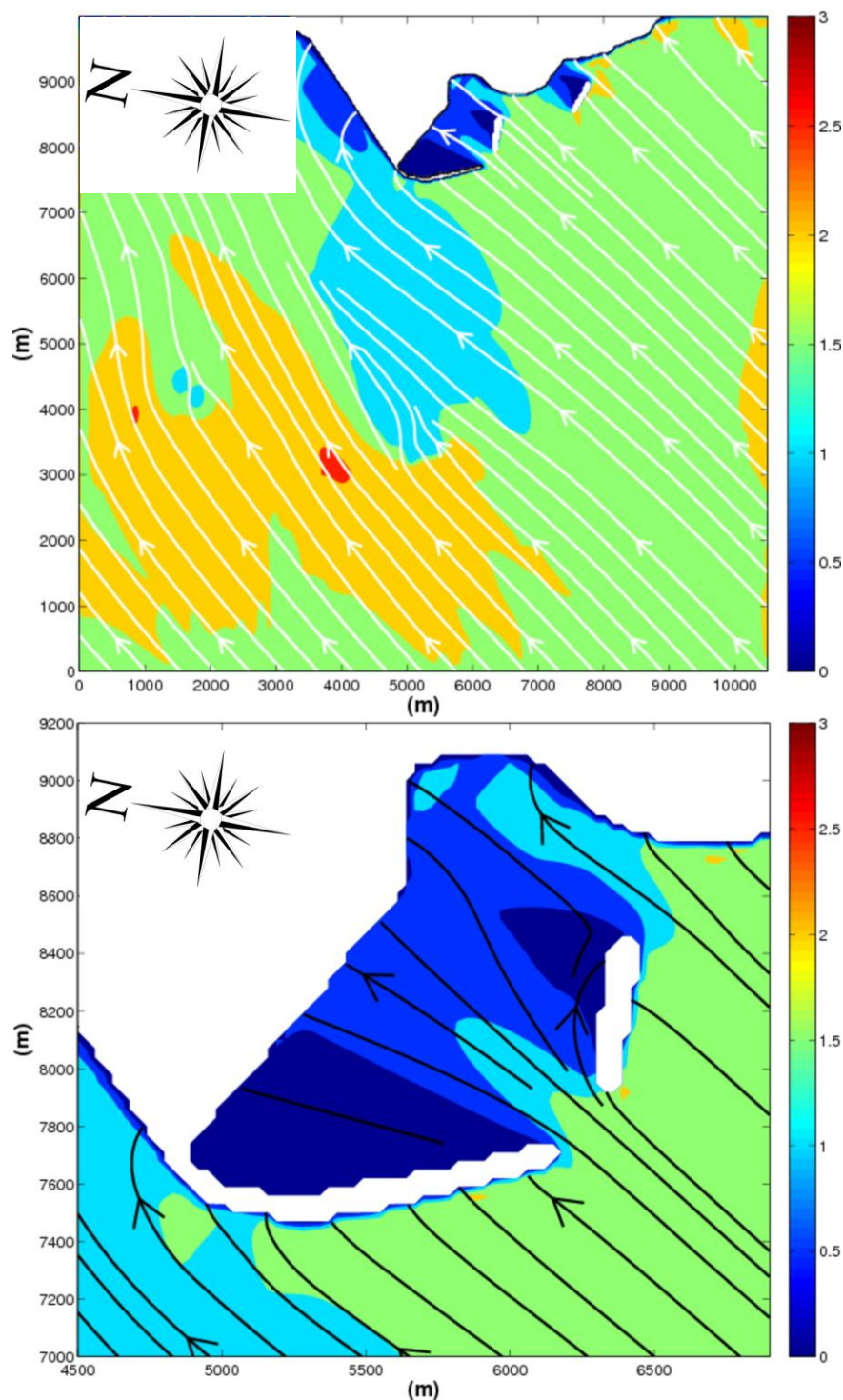
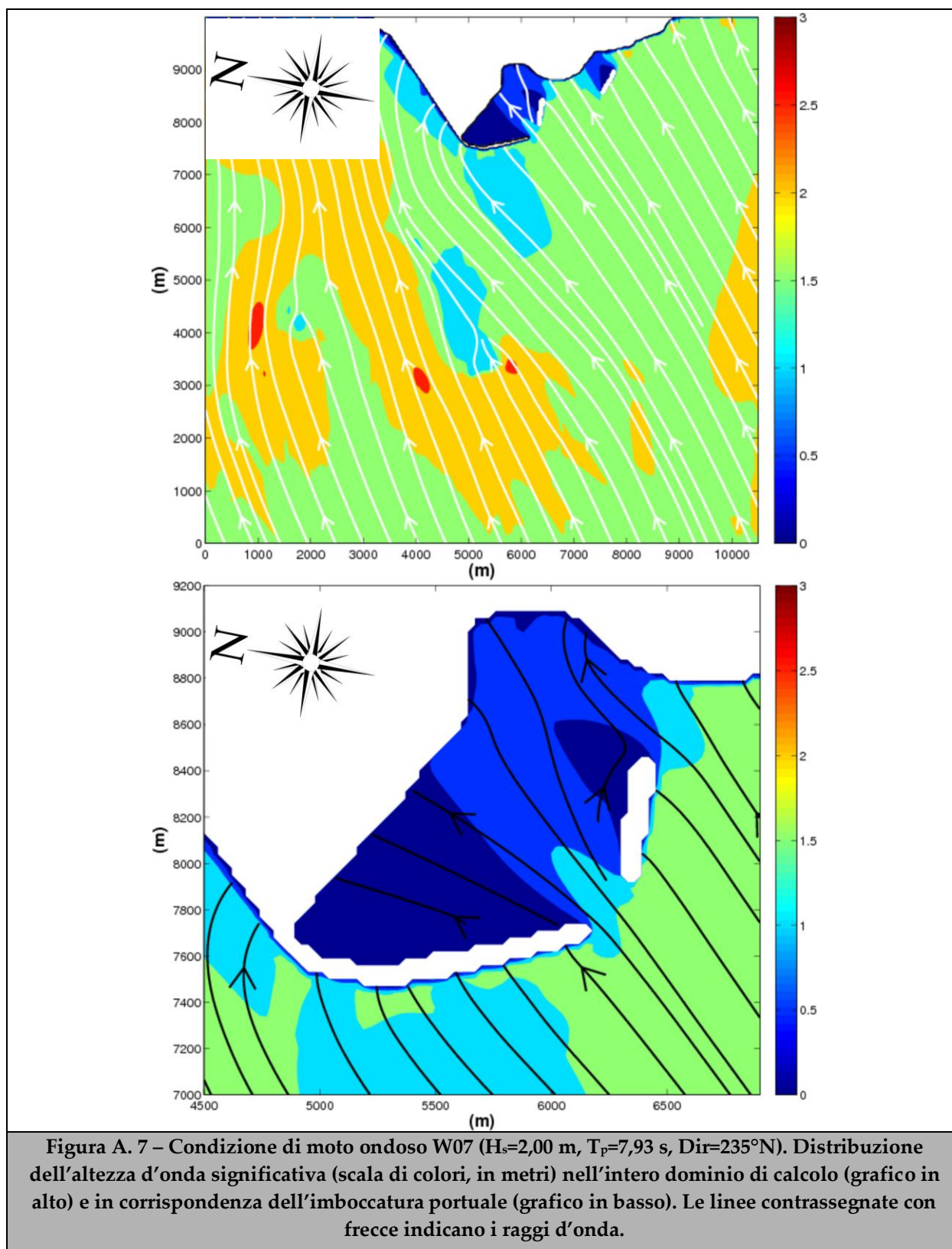
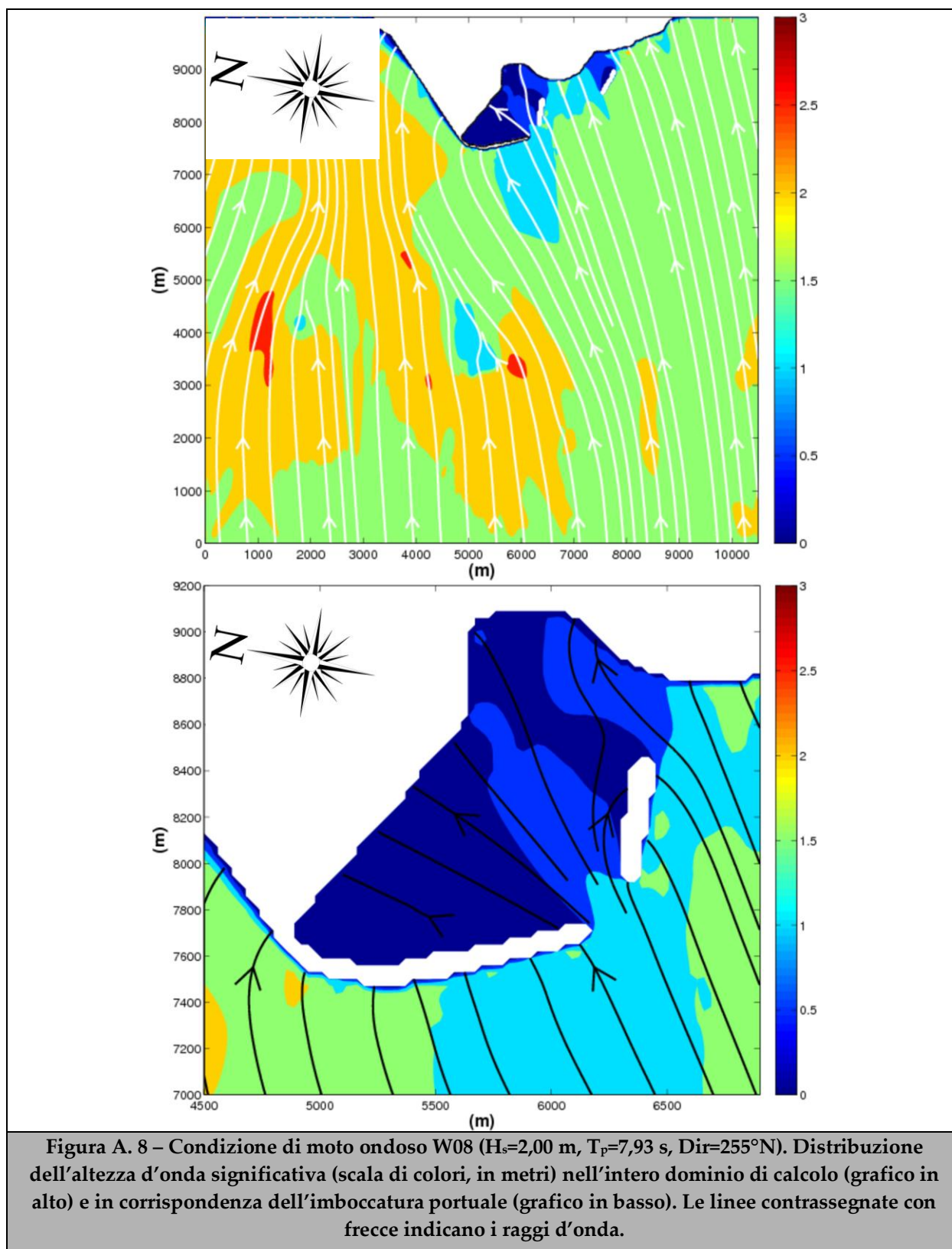


Figura A. 6 – Condizione di moto ondoso W06 ($H_s=2,00$ m, $T_p=7,93$ s, $Dir=215^\circ N$). Distribuzione dell'altezza d'onda significativa (scala di colori, in metri) nell'intero dominio di calcolo (grafico in alto) e in corrispondenza dell'imboccatura portuale (grafico in basso). Le linee contrassegnate con frecce indicano i raggi d'onda.

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

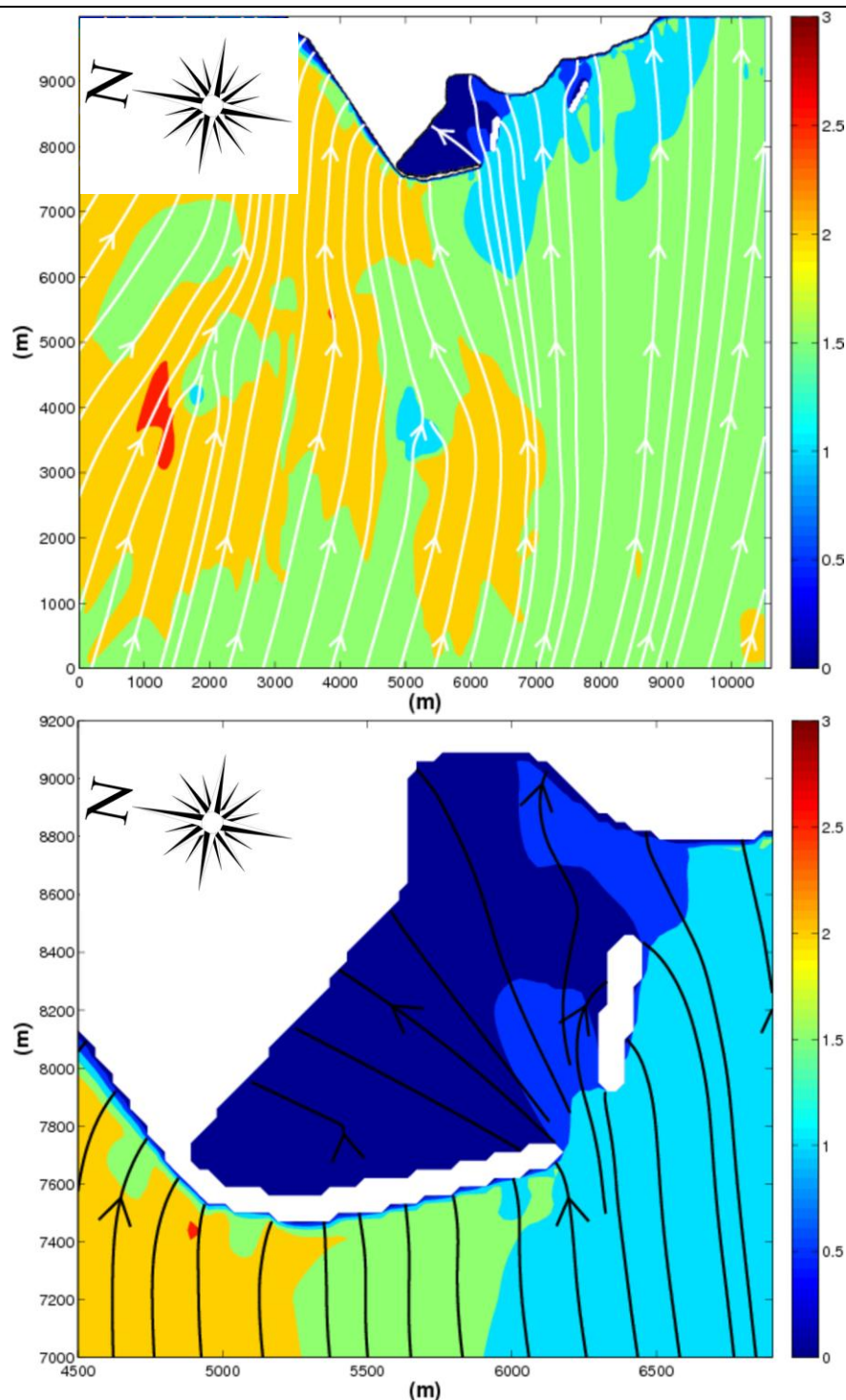
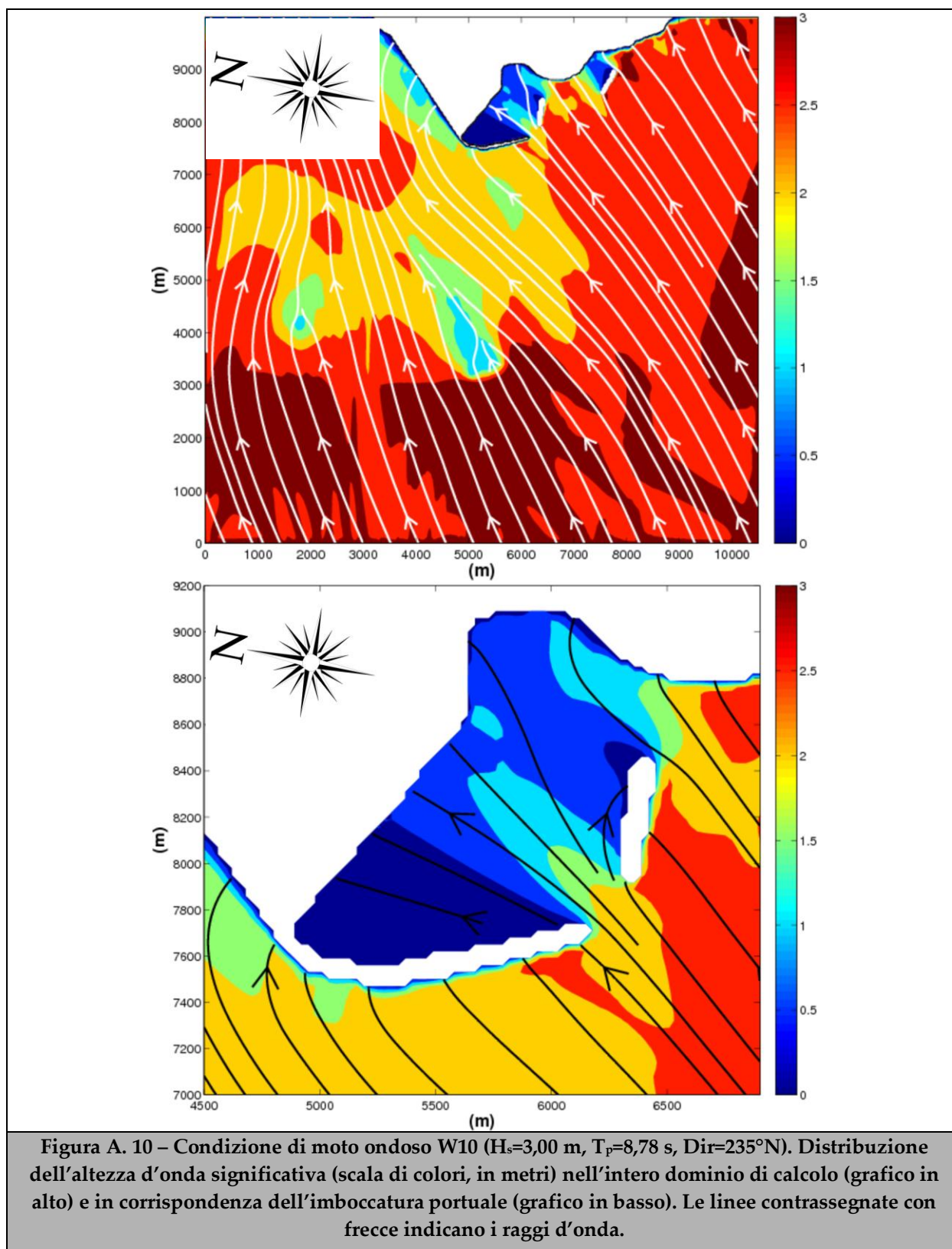
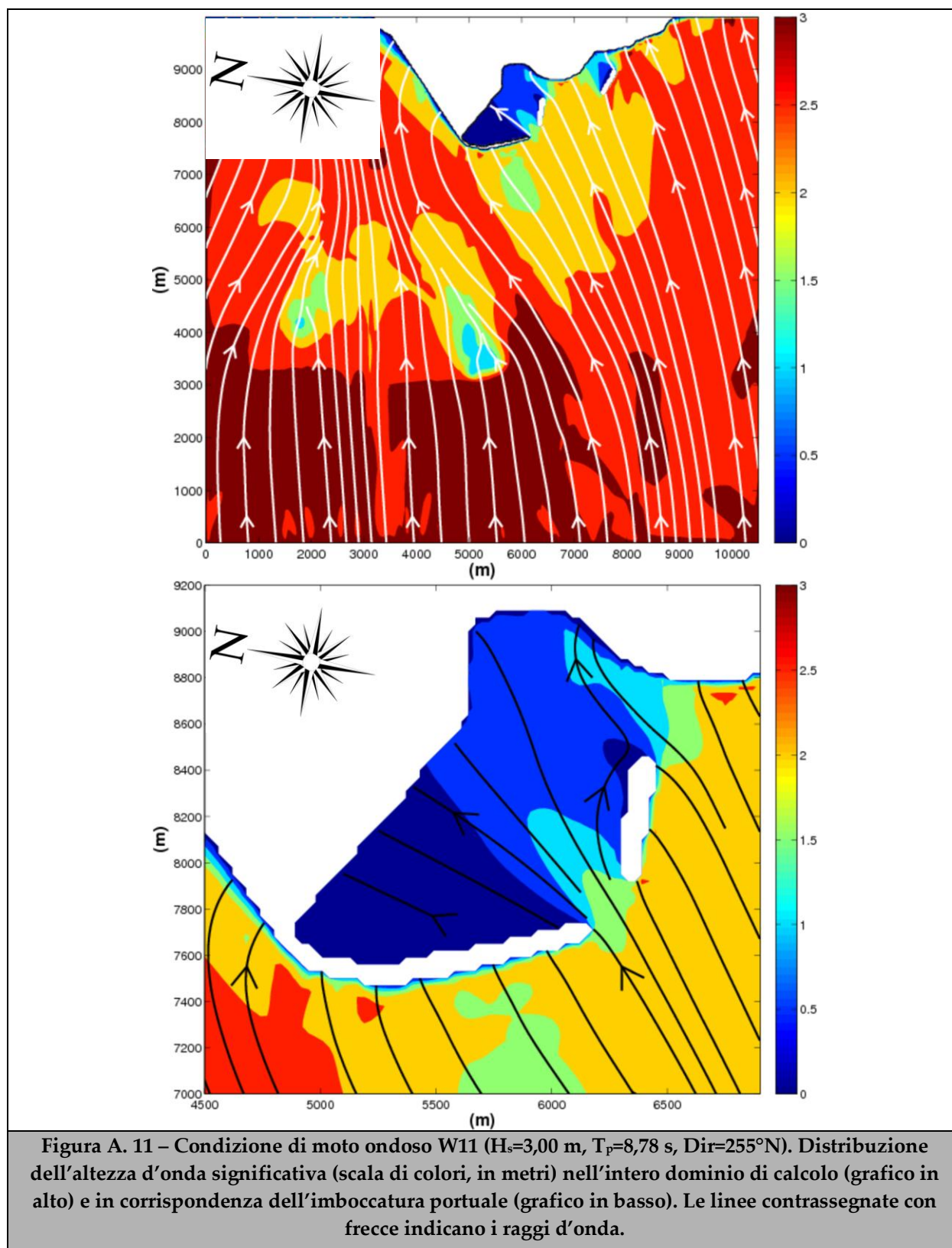


Figura A. 9 – Condizione di moto ondoso W09 ($H_s=2,00$ m, $T_p=7,93$ s, $Dir=275^\circ N$). Distribuzione dell'altezza d'onda significativa (scala di colori, in metri) nell'intero dominio di calcolo (grafico in alto) e in corrispondenza dell'imboccatura portuale (grafico in basso). Le linee contrassegnate con frecce indicano i raggi d'onda.

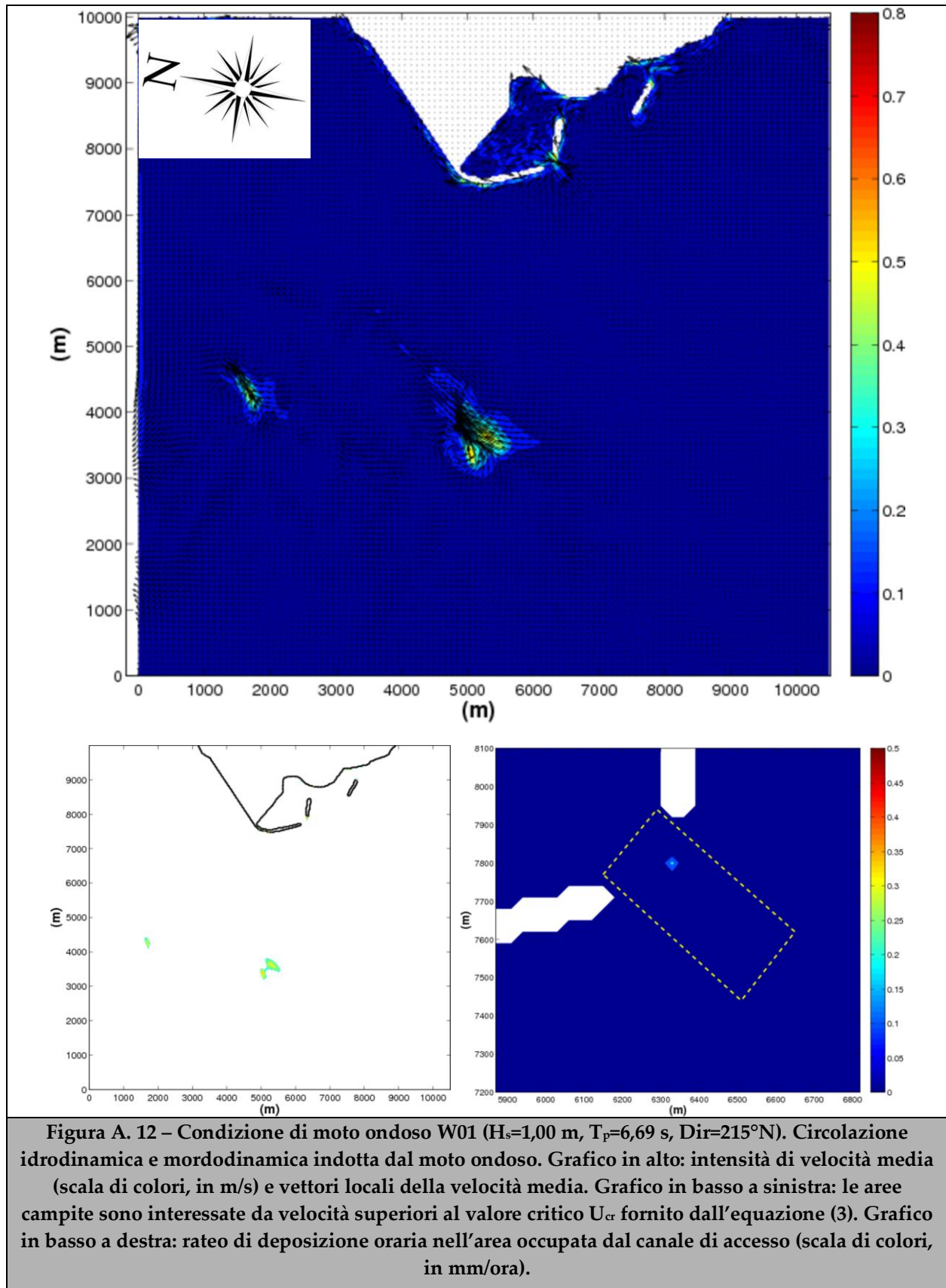
 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



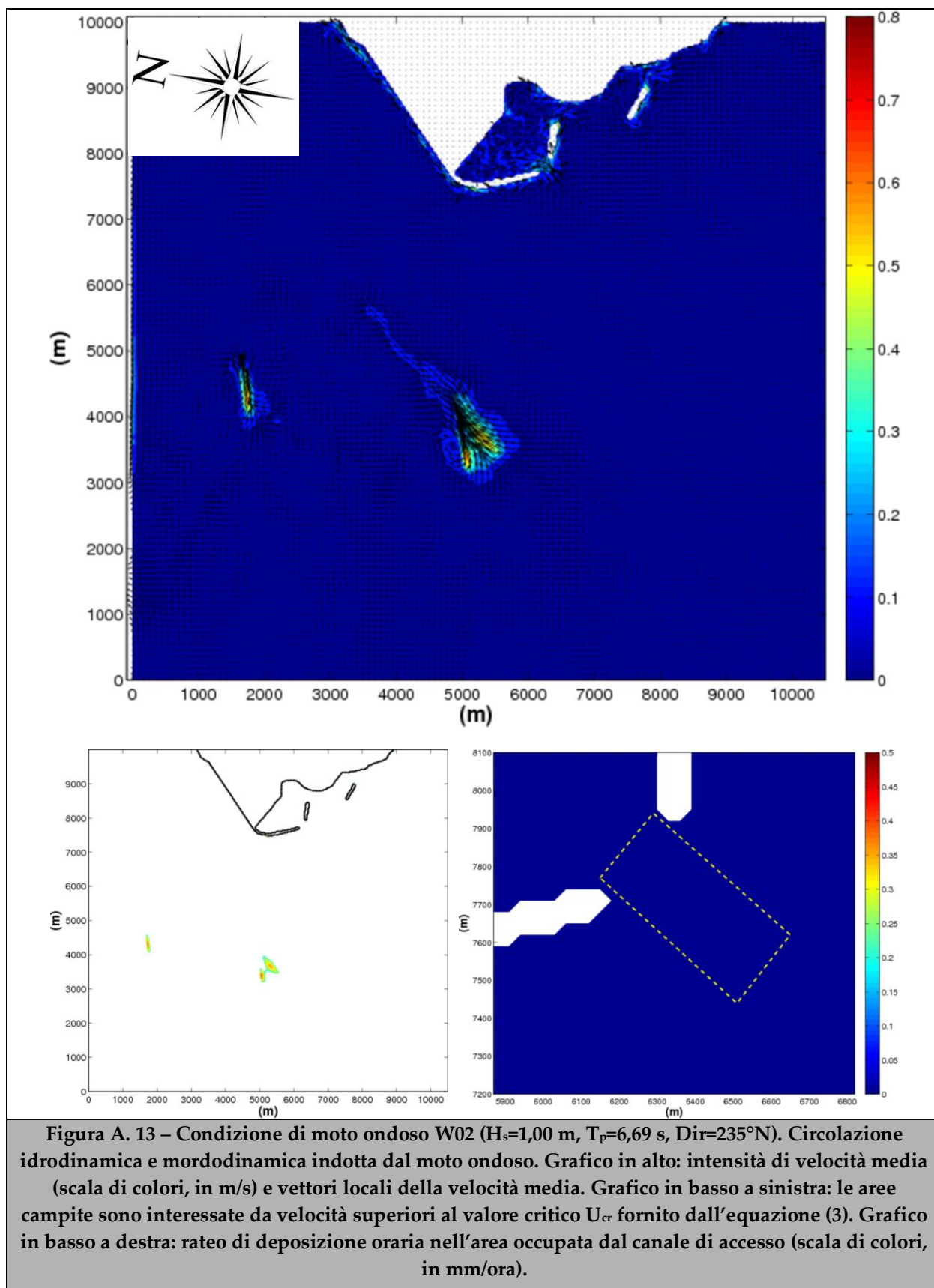
 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

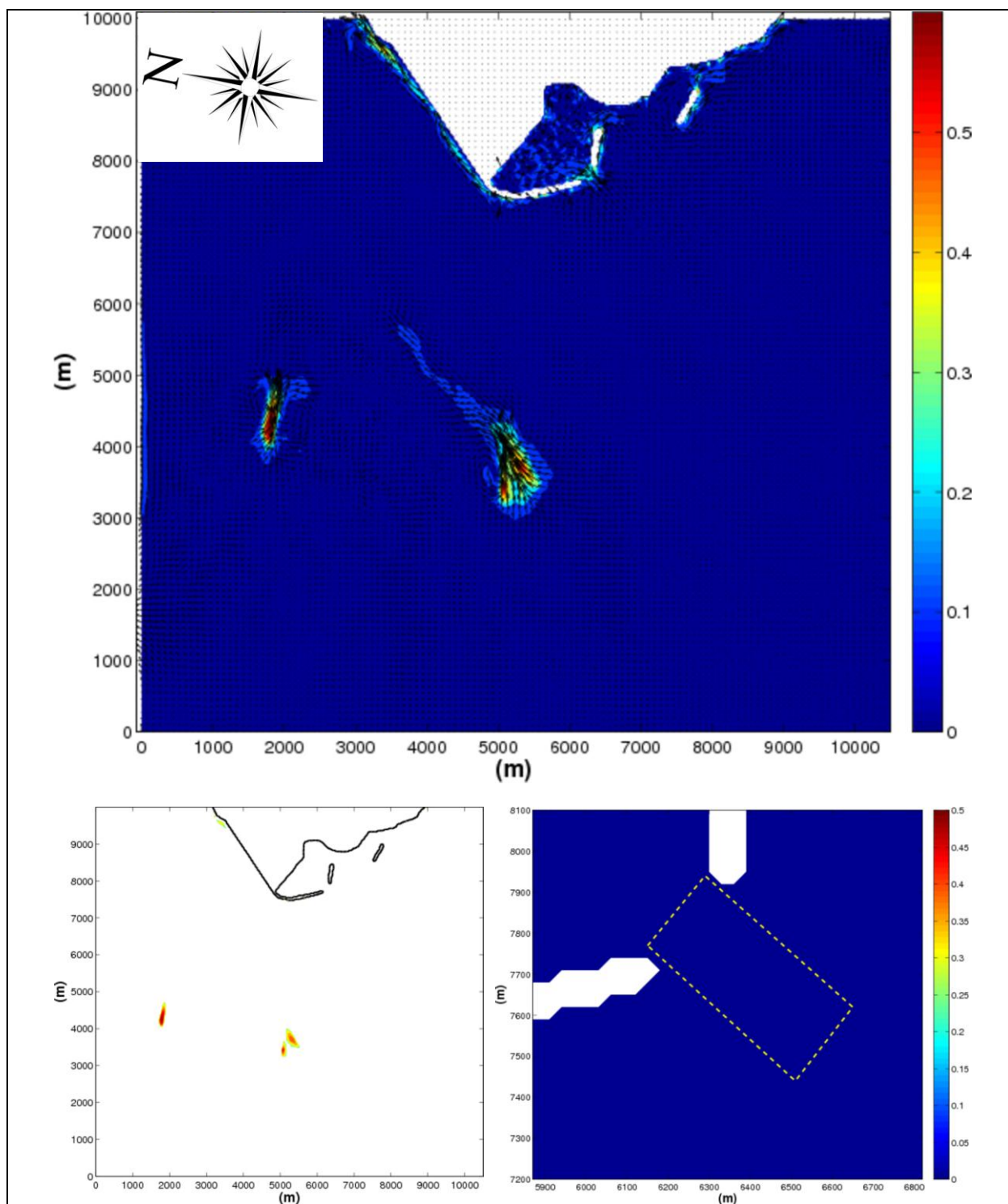
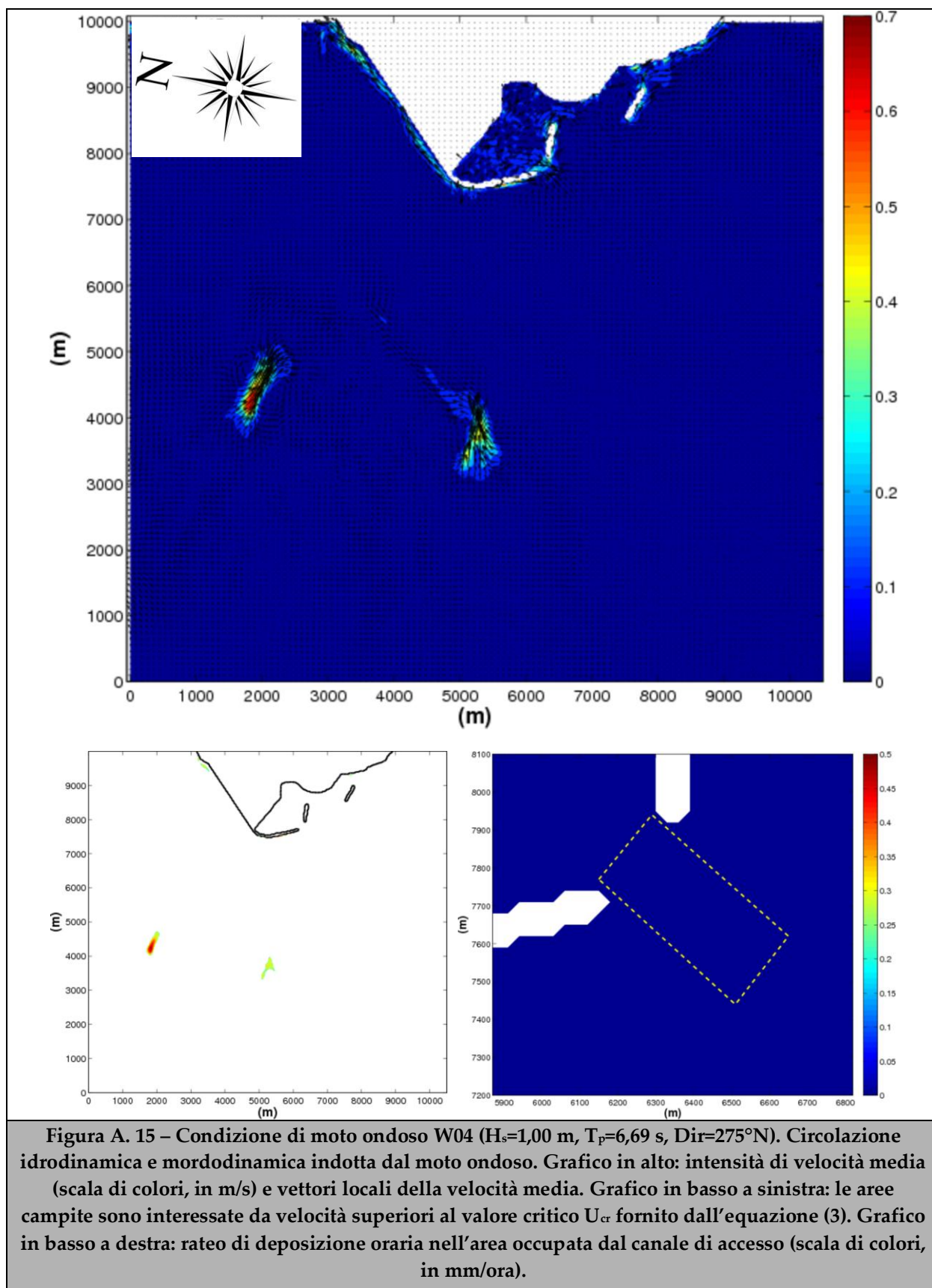


Figura A. 14 – Condizione di moto ondoso W03 ($H_s=1,00$ m, $T_p=6,69$ s, $Dir=255^\circ N$). Circolazione idrodinamica e morfodinamica indotta dal moto ondoso. Grafico in alto: intensità di velocità media (scala di colori, in m/s) e vettori locali della velocità media. Grafico in basso a sinistra: le aree campite sono interessate da velocità superiori al valore critico U_{cr} fornito dall'equazione (3). Grafico in basso a destra: rateo di deposizione oraria nell'area occupata dal canale di accesso (scala di colori, in mm/ora).

 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

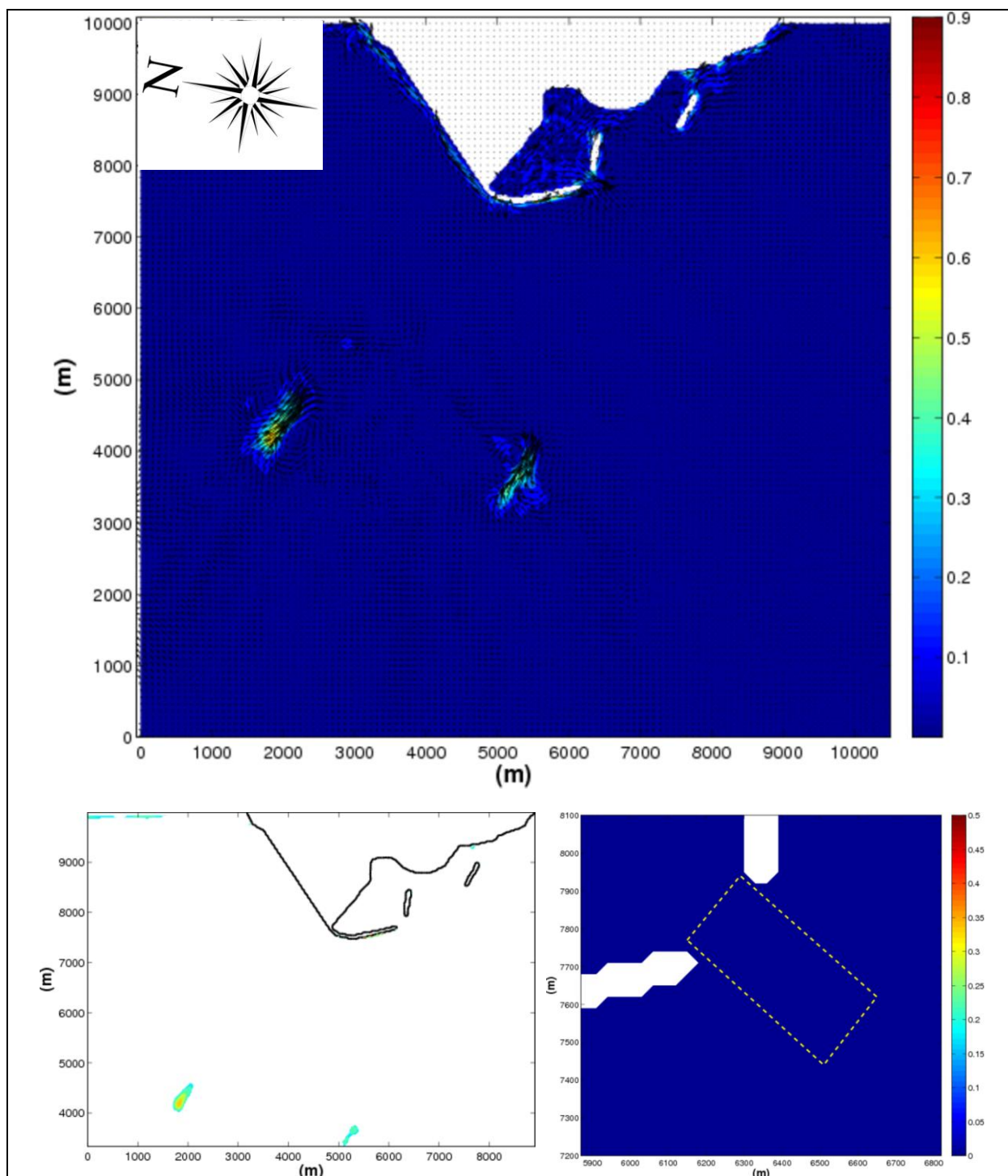
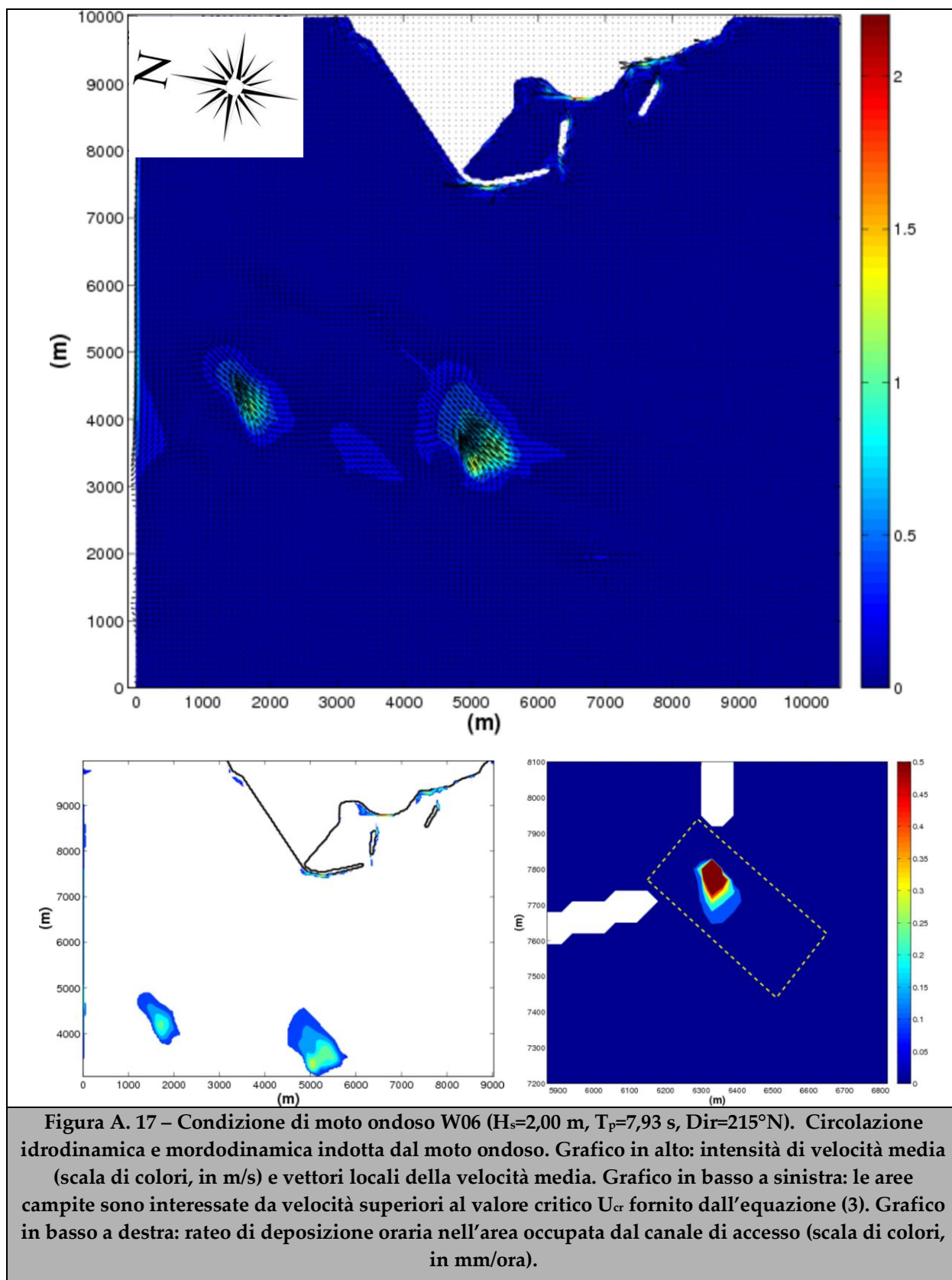
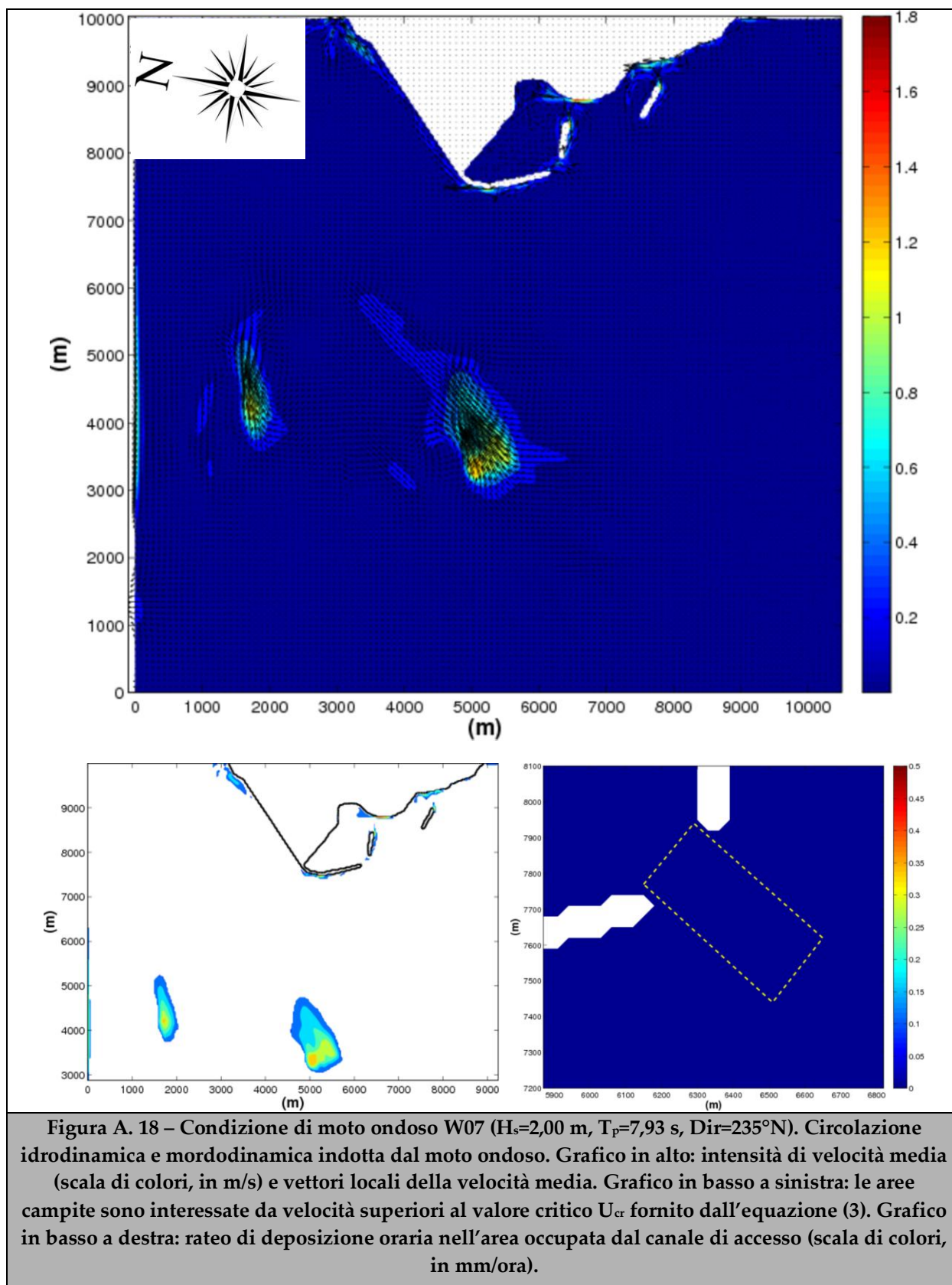


Figura A. 16 – Condizione di moto ondoso W05 ($H_s=1,00$ m, $T_p=6,69$ s, $Dir=295^\circ N$). Circolazione idrodinamica e morfodinamica indotta dal moto ondoso. Grafico in alto: intensità di velocità media (scala di colori, in m/s) e vettori locali della velocità media. Grafico in basso a sinistra: le aree campite sono interessate da velocità superiori al valore critico U_c fornito dall'equazione (3). Grafico in basso a destra: rateo di deposizione oraria nell'area occupata dal canale di accesso (scala di colori, in mm/ora).

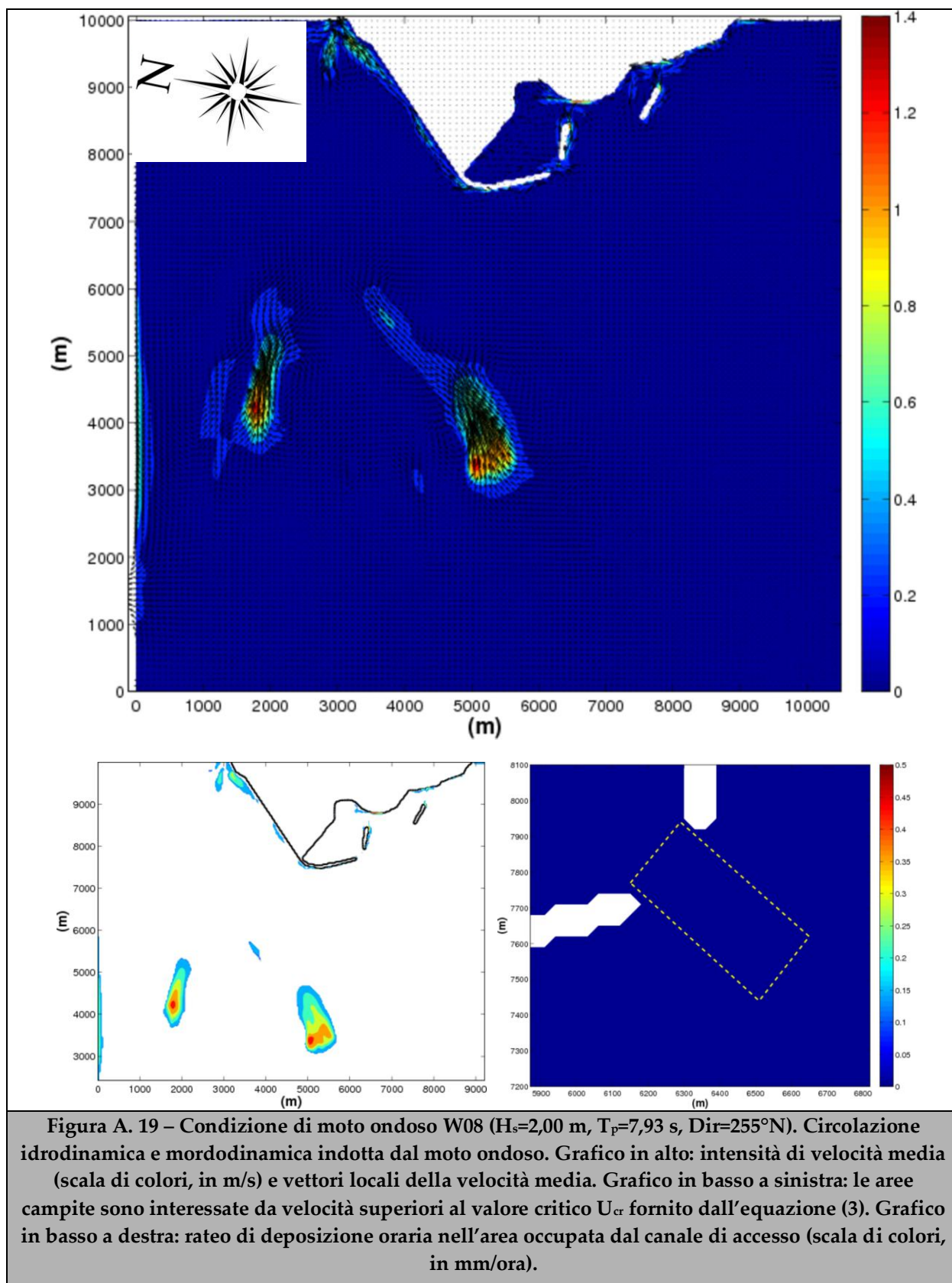
 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



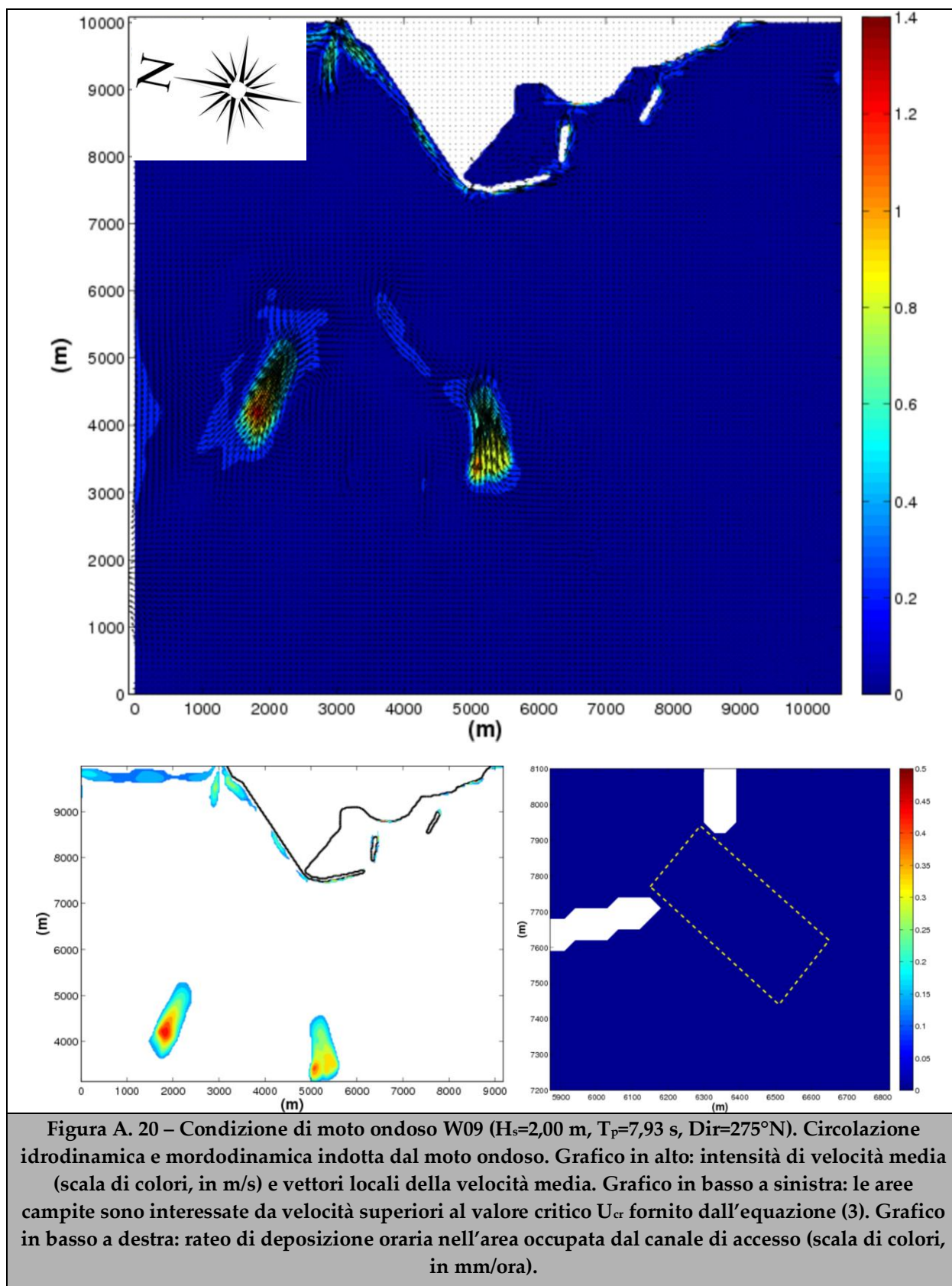
 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



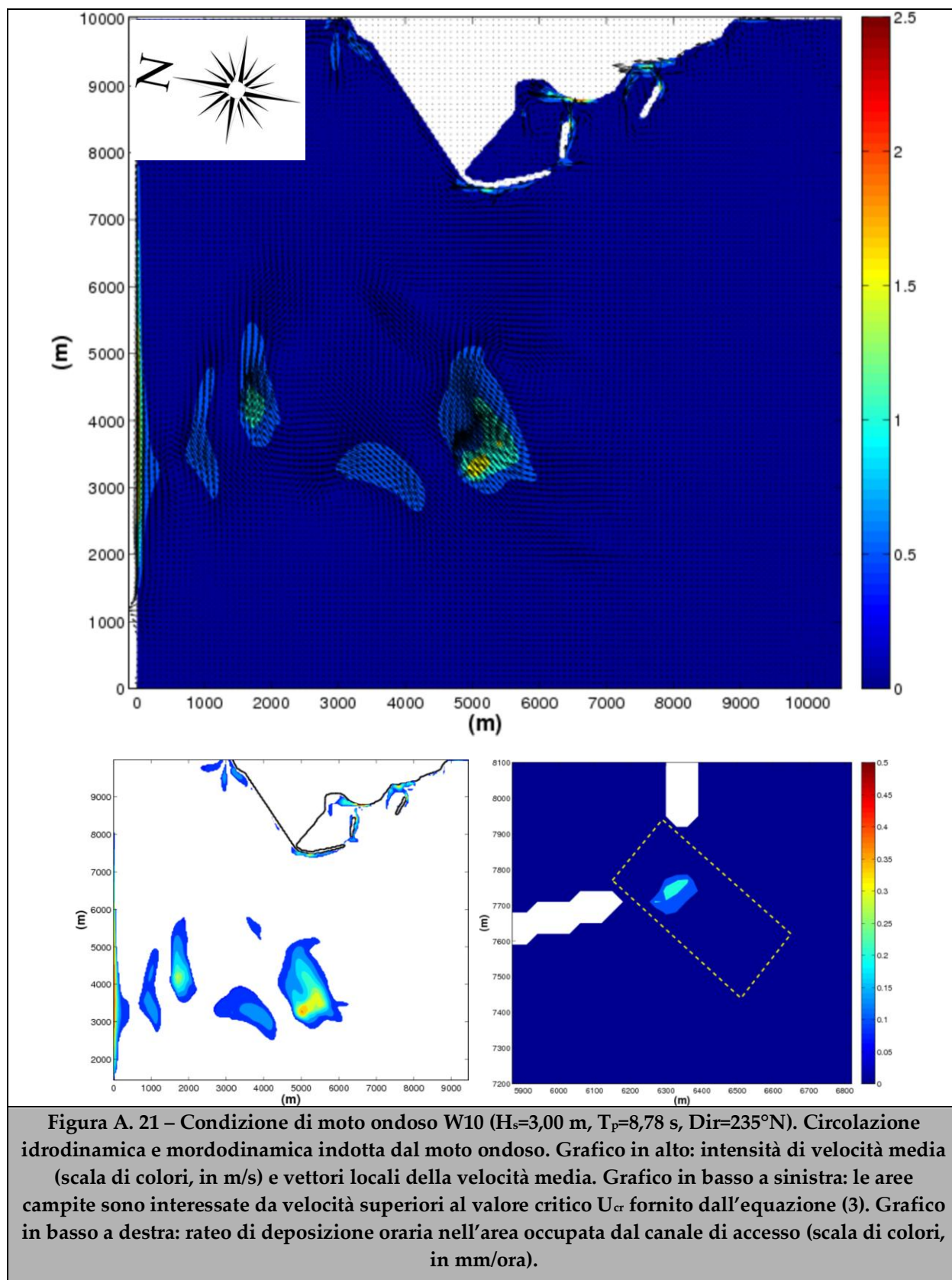
 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR



 Autorità Portuale di Livorno Piano Regolatore Portuale 2012	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio del potenziale interrimento del canale di accesso					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	016	-0	MAR

