

**RAPPORTO METEO MARINO - SULLA PRATICABILITÀ DEL SISTEMA PORTUALE - VALUTAZIONE SULLA POSSIBILITÀ DI RICADUTE DELL'INTRODUZIONE DELLE NUOVE OPERE SUGLI EQUILIBRI COSTIERI – NOTA INTEGRATIVA**

**PREMESSA**

Pur nella consapevolezza del fatto che lo specchio acqueo interessato dalle opere ricomprese nel progetto risulta far parte di un apprezzato porto naturale, e per questo notoriamente ben protetto dalle violente burrasche che interessano l'ambito delle bocche di Bonifacio<sup>1</sup>.

Si è tuttavia preventivamente condotto un doveroso approfondimento circa le effettive condizioni di ridosso del paraggio, eseguendo una verifica preliminare finalizzata a identificare e quantificare caratteristiche ed eventuali limiti dell'efficacia dell'effettiva protezione del paraggio dai regimi ondosi dell'area delle "Bocche di Bonifacio, prodotta dall'insieme costituito dall'arcipelago maddalenino insieme con la geografia del prospiciente segmento di costa sarda.

A tal fine, utilizzando la base dati fornita dal sito "Copernicus" (<https://www.copernicus.eu/en>)<sup>2</sup> sono stati selezionati due eventi meteo marini di picco particolarmente significativi per tale finalità e acquisiti i parametri caratteristici delle agitazioni registrate..

I valori energetici di burrasca sono quindi stati estesi, con l'impiego del codice numerico SWAN, fino agli specchi acquei definiti dall'arcipelago di La Maddalena.

Con una successiva elaborazione, la modellazione numerica ha consentito di determinare, con ottima confidenza, i valori energetici (cft segg. punti **A** e **B**) residui corrispondenza dello specchio acqueo ( $P_1$ ) interessato dalla realizzazione dell'opera portuale. I risultanti, riferiti ai due eventi di origine offshore assunti<sup>3</sup>.

**A** - Agitazioni residue associate alla visuale ~NW ( $\theta = 286,4^{\circ 4}$ ):  $H = 0,16$  [m] –  $T^4 = 9,9$  [s] -  $\theta^5 = 352^{\circ}$

**B** - Agitazioni residue associate alla visuale NNE ( $\theta = 23,3^{\circ}$ )  $H = 0,07$  [m] –  $T = 8,5$  [s] -  $\theta = 357$

L'insignificante entità dei valori ottenuti hanno potuto ampiamente fornire conferma della sostanziale indipendenza della acque protette, in particolare della rada di Palau, dalle condizioni di agitazione che si possono verificare all'esterno (bocche di Bonifacio) in occasione anche di eventi esterni di rilevante intensità.

Tale constatazione<sup>6</sup> ha consentito la legittima formulazione dell'essenziale assunto del fatto che le condizioni di interessanti il paraggio interessato dal progetto possono solo essere attribuibili a quelle che possono prodursi lo-

<sup>1</sup> Aspetto quest'ultimo che ha, tra l'altro, determinato l'insediamento stabile di una delle principali basi navali della Marina Militare Italiana e del relativo Arsenale.

<sup>2</sup> Copernicus è il programma di osservazione della Terra dell'Unione europea

<sup>3</sup> Altezza onde in origine uguali rispettivamente a  $H_{max} = 7,60$  m. e  $H_{max} = 6,40$  m.

<sup>4</sup> Periodo caratteristico

<sup>5</sup> Direzione d'avanzamento dei fronti d'onda

<sup>6</sup> inconsistente penetrazione delle burrasche esterne all'arcipelago Maddalenino nello specchio acqueo interessato dal progetto



zione dei moti ondosi forzati da venti di tempesta nell'arcipelago della Maddalena, e nelle loro azioni nella rada di Palau in corrispondenza della superficie liquida interessata dalla nuova opera di accosto in progetto.

Conseguentemente vengono simulati gli eventi di moto ondoso generati da venti estremi (assunti genericamente caratterizzati da velocità di 50 nodi<sup>8</sup>) associati a due settori di traversia principali già definiti nel documento principale e richiamati nella seguente Figura 1

**Settore di traversia A**, caratterizzato da un'apertura di 25 gradi, compreso tra le visuali di porto punta Sardegna (327°N) e l'estremità meridionale di Cala Francese (352°N) con un fetch utile di circa Km. 6,35.

**Settore di traversia B** con un'apertura di circa 12 gradi, compreso tra le visuali dell'estremità meridionale dell'isola di Santo Stefano (80°N) e Capo d'Orso (102°N) con un fetch efficace valutabile in circa 5,5 km.

La modellazione numerica quindi, partendo dall'applicazione virtuale, fornirà sull'intero ambito definito dall'arcipelago maddalenino e dal prospiciente segmento costiero della Sardegna, di due distinte condizioni di venti di burrasca rispettivamente costanti:

- per intensità (pari a 50 kn. per entrambe le condizioni)
- per direzioni di provenienza definite rispettivamente dalle due visuali mediane dei settori di traversia **A** e **B**

Al fine di consentire un definitivo raffronto con parametri d'onda ottenuti con le elaborazioni del documento principale (rapporto meteo-marino), tenendo conto della geografia delle terre emerse e delle batimetrie nell'area d'indagine, sono state ottenute, mediante un rigoroso approccio numerico basato su processi fisici, i medesimi parametri sopra citati.

## APPROCCIO NUMERICO

### N:B:

*Le elaborazioni numeriche sono state condotte con la collaborazione dell'ing. Anrea Raju - Ricercatore in costruzioni idrauliche, marittime e idrologia. Dipartimento di ingegneria civile, ambientale e architettura. Università di Cagliari*

### II MODELLO SWAN

SWAN è un modello d'onda di terza generazione, sviluppato presso la Delft University of Technology, che calcola il moto ondoso irregolare generato dal vento nelle regioni costiere e nelle acque interne.

L'obiettivo principale del modello SWAN è risolvere l'equazione del bilancio dell'azione d'onda spettrale senza alcuna restrizione a priori sullo spettro per l'evoluzione della crescita delle onde.

Questa equazione rappresenta gli effetti di propagazione spaziale, rifrazione, shoaling, generazione, dissipazione e interazioni onda-onda.

Con SWAN la propagazione delle onde viene calcolata dalle acque profonde fino alla zona dei frangenti. SWAN utilizza schemi impliciti, che sono più performanti in acque poco profonde rispetto a quelli espliciti.

In SWAN sono rappresentati i seguenti processi di propagazione delle onde:

1. propagazione attraverso lo spazio geografico,

---

<sup>8</sup> Nodo (kn) = miglia marine/ora = 1,86 km/h

2. rifrazione dovuta a variazioni spaziali del fondale e della corrente,
3. shoaling a causa delle variazioni spaziali del fondale e della corrente,
4. blocco e riflessioni da correnti opposte e trasmissione, blocco o riflessione su ostacoli.

I seguenti processi di generazione e dissipazione del moto ondoso sono rappresentati in SWAN:

- generazione per il vento,
- dissipazione per whitecapping,
- dissipazione per frangimento in acque basse
- dissipazione per attrito sul fondo
- interazione tra componenti d'onda.

#### **LIMITAZIONI DEL MODELLO**

Le principali limitazioni del modello SWAN sono dovute al fatto che esso fa parte della categoria dei codici numerici che mediano la fase dell'onda.

Ovvero, SWAN è capace di simulare solo i processi che evolvono su scale temporali superiori al periodo dell'onda. Di conseguenza, caratteristiche non lineari delle singole onde sono trascurate, come per esempio la forma asimmetrica delle onde che si propagano in acque costiere.

Inoltre, occorre ricordare che il modello SWAN non tiene in conto i possibili effetti transitori del moto ondoso, dovuto al fatto che è un modello che non risolve la fase dell'onda. Per cui esso non è capace di offrire informazione temporale sui fenomeni del moto ondoso come per esempio i processi legati all'aggruppamento del moto ondoso (in natura le onde più grandi tendono a manifestarsi in gruppi intervallati da periodo di relativa calma della durata tipica di alcuni minuti).

#### **DOMINIO NUMERICO E SETUP DEL MODELLO**

La batimetria utilizzata per le simulazioni numeriche con SWAN è stata ricavata dalla piattaforma emodnet (<http://www.emodnet.eu/>), con risoluzione 115 m (un sedicesimo di primo di latitudine).

L'estensione del dominio numerico include tutto l'arcipelago della Maddalena. Lungo i contorni aperti del dominio numerico è stata imposta la condizione di onda pari a zero. Per cui il moto ondoso risultante dalle simulazioni è esclusivamente quello generato dal vento locale. Il vento ha intensità e direzione costante su tutto il dominio. Sono stati simulati i casi A e B con vento di 25.7 m/s (50 nodi) di intensità e con direzione, rispettivamente, di 340 e 91°. Il modulo ST6 è usato per simulare il trasferimento di energia dal vento e quindi la crescita del moto ondoso. Diversi studi, tra cui quello recente di Aydogan and Ayat [2021], hanno dimostrato l'affidabilità di questo modulo nel riprodurre una ampia gamma di stati di mare.

La simulazione viene eseguita in modalità stazionaria. In questa modalità, le forzanti e le condizioni al contorno non variano nel tempo. L'utente può influenzare il criterio per terminare la procedura iterativa nei calcoli SWAN.

Il criterio utilizza la derivata seconda, o curvatura, della curva di iterazione dell'altezza d'onda significativa. Come la soluzione della simulazione si avvicina alla piena convergenza, la curvatura della curva di iterazione tenderà a zero. SWAN interrompe il processo se la variazione assoluta dell'altezza d'onda da una iterazione alla successiva

e inferiore a 0.005 m o la variazione relativa di Hs da una iterazione alla successiva e minore di 0.01 e la curvatura della curva di iterazione dell'altezza d'onda normalizzata e minore di 0.005. Entrambe le condizioni devono essere soddisfatte in almeno il 95% di tutte le celle bagnate della griglia.

## ESITO DELLA SIMULAZIONE - CONSIDERAZIONI SOTTOSTANTI

In (pagina seguente) si riportano le figure ottenute in esito alle simulazioni numeriche eseguite.

I grafici riportano il campo di altezze d'onda in condizioni stazionarie<sup>9</sup>.

La Figura 2 mostra il campo di altezza d'onda su tutto il dominio numerico nel caso **A**, vento di 50 nodi proveniente da 340°.

Essendo la direzione del vento pari a 340°, l'altezza d'onda è minima (imposizione per l'elaborazione del modello) nel contorno Nord, e aumenta con l'aumento del fetch verso Sud.

Tuttavia la crescita dell'onda è limitata dalla presenza delle isole dell'arcipelago che offrono riparo agli specchi di mare situati sottovento.

La figura 3 mostra una porzione del dominio numerico facendo uno zoom del campo d'onda sempre per il caso **A**.

Al punto “**P**”, situato nei pressi dell'infrastruttura di Palau<sup>10</sup> in progetto, i parametri d'onda ricavati dall'output della modellazione risultano i seguenti:

- Caso A, altezza d'onda  $H = 1.63 \text{ [m]}^{11}$
- Caso A, periodo dell'onda  $T = 3.8 \text{ [s]}$
- Caso A, direzione di provenienza dell'onda  $\theta = 344^\circ$ .

La Figura 4 mostra il campo di altezza d'onda su tutto il dominio numerico nel caso **B**, vento di 50 nodi proveniente da 91°.

Essendo la direzione del vento pari a 91°, l'altezza d'onda è minima nel contorno E. Aumenta con l'aumento del fetch verso Ovest.

Come nel caso **A**, le isole offrono riparo agli specchi di mare ridossati .

La Figura 5 mostra una porzione del dominio numerico facendo uno zoom del campo d'onda sempre per il caso **B**.

Al punto “**P**”, i parametri d'onda forniti dal codice numerico sono risultati:

- Caso B, altezza d'onda  $H = 1.35 \text{ [m]}^{12}$
- Caso B, periodo dell'onda  $T = 3.2 \text{ [s]}$
- Caso B, direzione dell'onda  $\theta = 86^\circ$ .

I parametri d'onda ottenuti mediante le esposte simulazioni numeriche sono molto simili e coerenti con quelli ottenuti nel rapporto meteo-marino con metodologia empirica SMB.

<sup>9</sup> Per consentire una migliore lettura dei risultati, le medesime figure vengono riproposte in appendice

<sup>10</sup> Già assunto come riferimento nel precedente “rapporto meteomarinò”

<sup>11</sup> Valori ricavati con le elaborazioni esposte nel precedente documento (pag. 8)  $H = 1,59 \text{ [m]} - T 3,89 = \text{[s]}$

<sup>12</sup> Valori ricavati con le elaborazioni esposte nel precedente documento (pag. 9)  $H = 1,46 \text{ [m]} - T 3,68 = \text{[s]}$

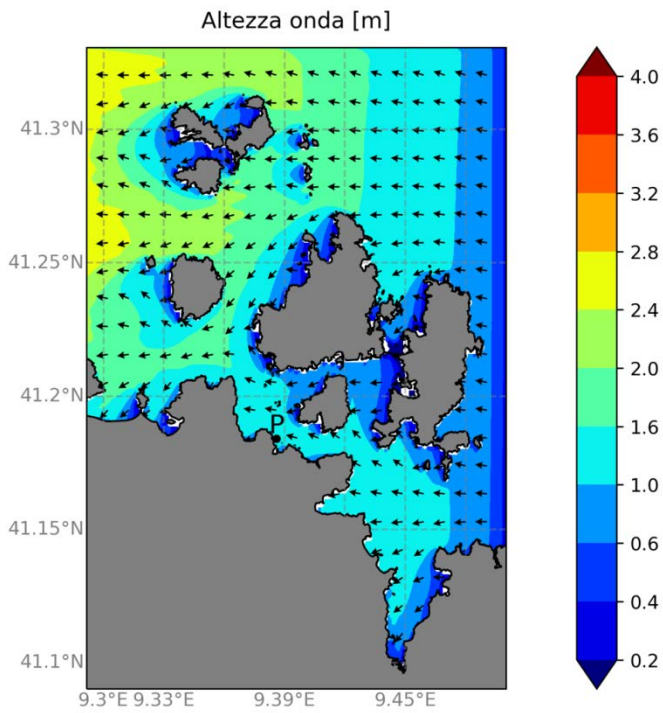


Figura 2 - campo di altezza d'onda su tutto il dominio numerico nel caso A, vento di 50 nodi proveniente da 340

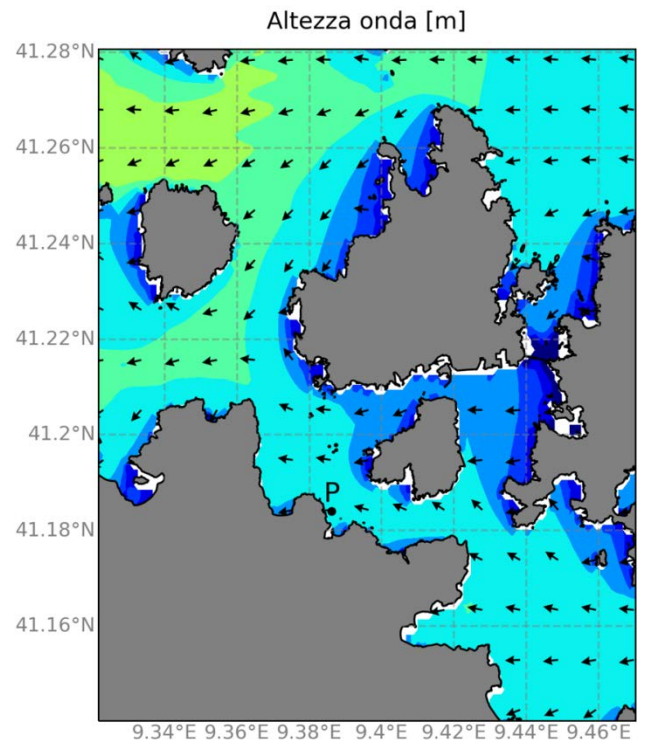


Figura 3 - porzione del dominio numerico di Figura 2 ingrandito

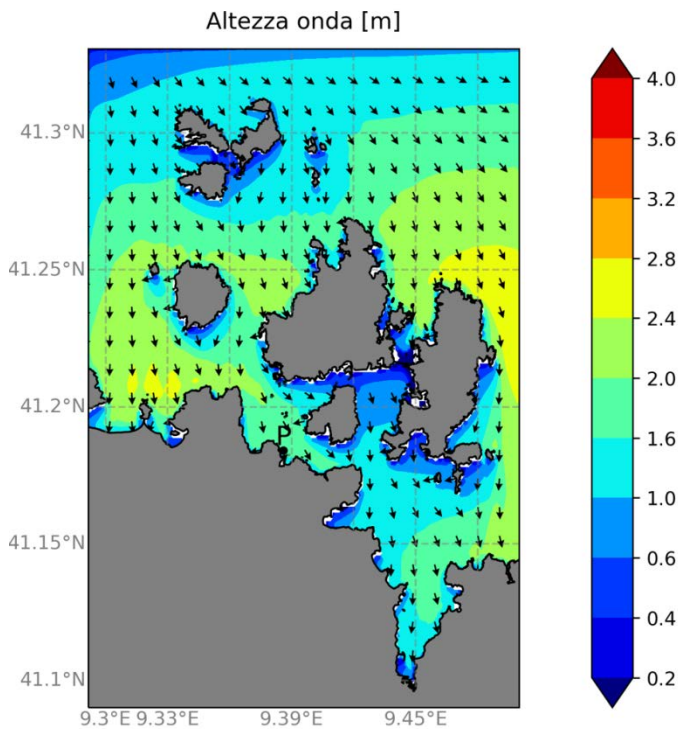


Figura 4 - campo di altezza d'onda su tutto il dominio numerico nel caso B, vento di 50 nodi proveniente da 91°

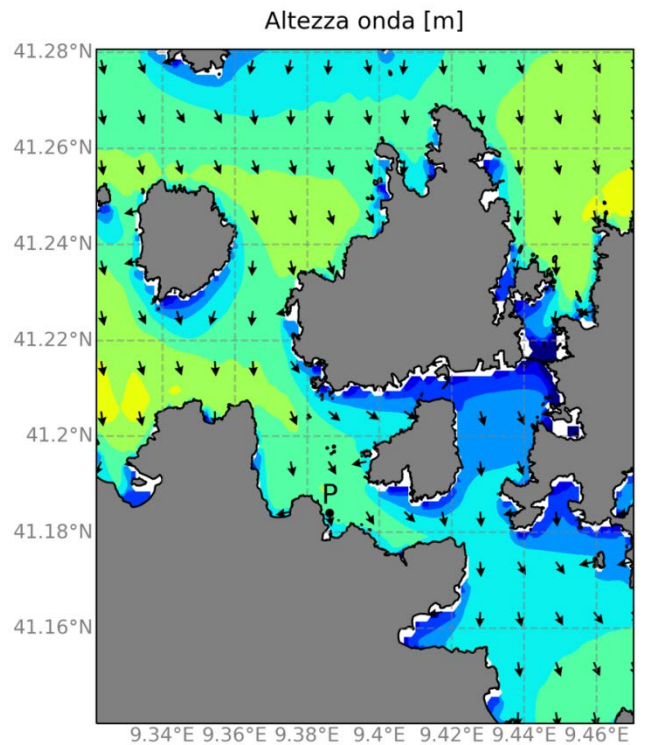


Figura 5 - porzione del dominio numerico di Figura 4 ingrandito

Nel caso A, il valore di altezza d'onda pari a 1.63 m e leggermente superiore al valore 1.59 m ottenuto con metodo SMB.

Invece, nel caso B, il valore di 1.35 m è leggermente inferiore al valore di 1.46 m del rapporto meteo-marino. Queste piccole discrepanze, sia positive che negative, sono dovute presumibilmente alla limitazione intrinseca nella formulazione empirica SMB che trascura la dinamica dei processi fisici.

Inoltre un ruolo può aver giocato la geometria irregolare della costa che limita il fetch sul quale avviene la crescita del moto ondoso mediante il trasferimento di energia dall'atmosfera al mare.

In termini generali, le piccole discrepanze ottenute rientrano ampiamente nei range dei limiti fisiologici dei diversi procedimenti adottati e finiscono per validarsi a vicenda. Infatti le entità delle insensibili differenze ottenute non sono tali da determinare le condizioni di una revisione che delle conclusioni risultanti dal rapporto meteo-marino confermando quindi l'affidabilità delle stime dei parametri d'onda ottenuti in precedenza, nonché delle modellazioni locali di analisi delle penetrazioni delle agitazioni nella rada compresa tra Capo Faro e Punta Nera e quindi negli spazi portuali, già prodotte.

## CONCLUSIONI

---

---

Il presente documento si reputa esaustivo a riscontro della richiesta di approfondimenti avanzata dall'Organo Istruttore

Per quanto riguarda la richiesta di precisazioni sulle "conseguenze dell'intervento rispetto alla situazione iniziale, si rimanda alle argomentazioni già prodotte dalla pagina 22 alla pagina 28<sup>13</sup> del **rapporto meteo marino** già prodotto.

Da queste ultime, in estrema sintesi, risulta che, all'interno della rada compresa tra Capo Faro e Punta Nera (rada di Palau), la distribuzione energetica che interessa la costa risulta estremamente ridotta in dipendenza delle spiccate caratteristiche di ridosso del paraggio.

Quest'ultima evidenza, insieme con l'evidente spigolosità dei granelli granitici costituenti gli accumuli sabbiosi e l'inconsistente regime delle correnti conducono ad escludere la possibilità di sussistenza di rilevabili regimi di trasporto o scambio lungo costa di materiale detritico. Gli accumuli si possono quindi considerare sostanzialmente stabili

Essi possono venir considerati come formati da materiale derivante dai processi di degrado del materiale granitico e dalle attività di dilavamento e trasporto prodotti dagli agenti atmosferici (piogge ruscellamenti e vento), in relazione dell'orografia della fascia costiera.

L'azione dei deboli moti ondosi che incidono a costa si riduce sostanzialmente a una residua selezione granulometrica del materiale di spiaggia e all'asportazione della frazione limosa del detrito via via conferito.

L'ulteriore riduzione dell'azione dei moti ondosi a costa nella parte più interna della rada, prodotta dalla presenza delle nuove opere portuali, non si ritiene sensibilmente modificativa dei regimi in atto.

Né peraltro, per quanto risulta allo scrivente, sono reperibili dati conoscitivi e/o codici numerici in grado di produrre informazioni attendibili in presenza di azioni marine, quali quelle di interesse, particolarmente ridotte.

---

<sup>13</sup> CONSIDERAZIONI SUI POSSIBILI EFFETTI PRODUCIBILI DALLE NUOVE OPERE PORTUALI SULL'ASSETTO DEGLI ACCUMULI DETRITICI DI SPIAGGIA PRESENTI NELLA RADA DI PALAU

Oltre alle questioni riguardanti la stabilità degli accumuli detritici, l'unico prevedibile elemento modificativo implicato dall'attuazione dell'intervento può essere rappresentato dalle ricadute positive prodotte dalla struttura porosa in scogliera di massi naturali delle opere a mare.

Infatti l'esperienza ha costantemente dimostrato che la presenza dei vuoti della struttura della scogliera, insieme con l'impiego di materiale lapideo di cava, ricco di minerali e componenti solubili, produce rapidamente una nuova nicchia ecologica determinante il rapido e imponente sviluppo di flora e fauna marina.

Per quanto concernente l'eventualità di ricadute determinabili dalle opere in parola all'esterno della rada di Palau, considerata anche la sostanziale assenza di onde riflesse garantita dalla già citata struttura assorbente dei banchinamenti, si può dichiarare con certezza che, sotto il profilo meteo-marino, nessuna alterazione degli attuali equilibri costieri potrà risultare.

Per tale ragione, e in ogni caso, non si vede quindi utilità alcuna in un piano di monitoraggio in tal direzione. Ove, nonostante quanto sopra, venisse ravvisata la necessità/opportunità di un tale piano, l'unica modalità di acquisizione dati che può venir presa in considerazione potrebbe essere orientata all'impiego di traccianti radioattivi da seguire per un arco temporale esteso almeno al decennio successivo alla messa in servizio delle nuove opere.

Valga la quanto sopra quale riscontro alle questioni sollevate al riguardo.

Sassari addì



Ing. Antonio Ruju

## SOMMARIO

Premessa	1
analisi numerica della generazione di moti ondosi nell'arcipelago maddalenino con sspecificata determinazione dei parametri ondametrici in interferenti con le previste opere poortuali di palau	2
introduzione	2
Approccio numerico	3
N:B: 3	
Il modello SWAN	3
Limitazioni del modello	4
Dominio numerico e setup del modello	4
Esito della simulazione – considerazioni sottostanti	5
Conclusioni	6

### Riferimenti bibliografici:

B. Aydogan and B. Ayat. Performance evaluation of swan st6 physics forced by era5 wind fields for wave prediction in an enclosed basin. Ocean Engineering, 240:109936, 2021. ISSN 0029-8018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109936>

.URL **Errore.** Riferimento a collegamento ipertestuale non valido.  
[www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801821012816](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801821012816).



## APPENDICE

Rappresentazione delle figure colorazioni distintive accese per agevolazione lettura

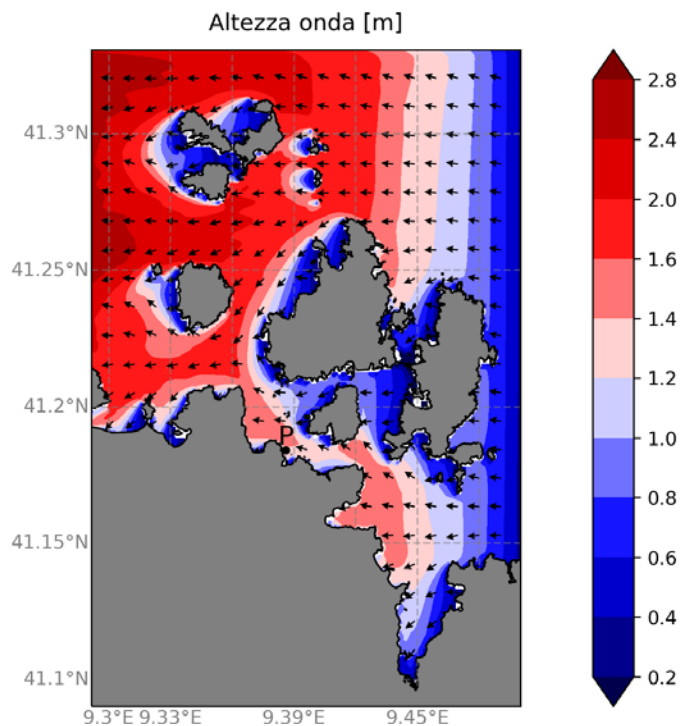


Figura 6 - campo di altezza d'onda su tutto il dominio numerico nel caso A, vento di 50 nodi proveniente da 340

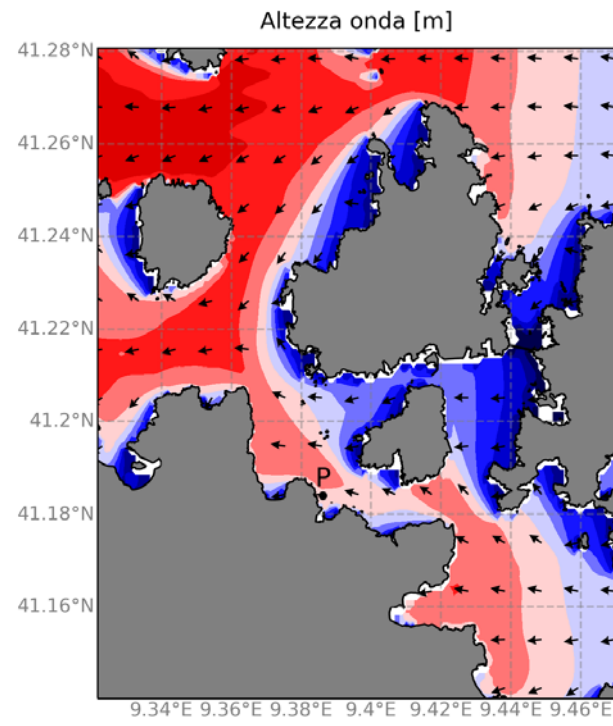


Figura 7 - porzione del dominio numerico di Figura 2 ingrandito

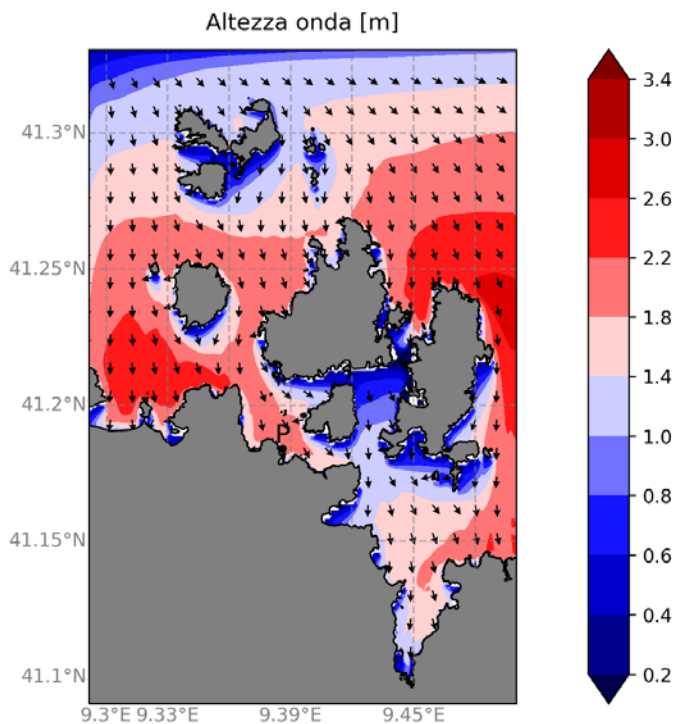


Figura 8 - campo di altezza d'onda su tutto il dominio numerico nel caso B, vento di 50 nodi proveniente da 91°

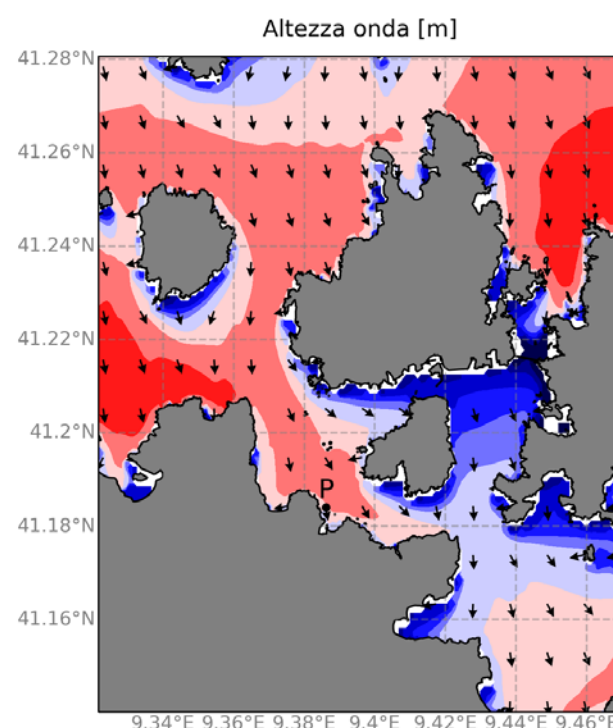


Figura 9 - porzione del dominio numerico di Figura 4 ingrandito