

CONVENZIONE

tra



**Area Marina Protetta Riserva Naturale dello Stato di Torre Guaceto
(Carovigno, Br)**

e



CoNISMa

Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Scienze del Mare

Politecnico di Bari

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio,
Edile e di Chimica (DICATECh)

Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste (LIC)

**“PRO.ACT NATURA 2000 – PROTECTION
ACTIONS FOR CROSS-BORDERS AND JOINT
MANAGEMENT OF MARINE SITES OF
COMMUNITY INTEREST (NATURA 2000)”**

Bari, febbraio 2014



Gruppo di Lavoro

**Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica
(DICATECh)**

Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste (L.I.C.)

ANALISI DELLA TENDENZA EVOLUTIVA STORICA DELLA LINEA DI RIVA
ATTRAVERSO L'INTERPRETAZIONE E LA MODELLAZIONE DEI DATI ESISTENTI

DEFINIZIONE DI UN INDICE DI EROSIONE

DEFINIZIONE DEL CLIMA METEOMARINO AL LARGO E SOTTO COSTA

DEFINIZIONE DEL BILANCIO DI MASSA

Prof. Ing. Antonio Felice Petrillo

Ing. Maria Francesca Bruno

Ing. Biagio Nobile

Geol. Roberto Francioso



INDICE

1. PREMESSA	3
2. CARATTERISTICHE GENERALI DEL SITO.....	6
3. CLIMA METEOMARINO	13
3.1. SETTORE DI TRAVERSIA E FETCH DEL PARAGGIO	13
3.2. RICOSTRUZIONE DEL CLIMA METEOMARINO AL LARGO	15
3.2.1. Metodo diretto	16
3.2.2. Elaborazione dei dati ondametrici.....	17
3.2.3. Relazione tra altezza d'onda e periodo di picco.....	23
3.2.4. Eventi estremi di moto ondoso al largo.....	25
3.2.5. Clima meteomarino equivalente del paraggio	32
3.2.6. Profondità di chiusura	34
3.3. MOTO ONDO SO SOTTOCOSTA.....	36
3.3.1. Generalità	36
3.3.2. Il modello matematico SWAN.....	36
3.3.3. Griglie di calcolo	38
3.3.4. Propagazione sottocosta degli eventi estremi	43
3.3.5. Propagazione sottocosta delle onde equivalenti	47
4. CORRENTI LONGITUDINALI	55
5. CORRENTI DI CIRCOLAZIONE	64
6. VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO	75
6.1. IL LIVELLO MEDIO DEL MARE	78
6.1.1. Il livello medio del mare	78
6.1.2. Storm surge	78
6.1.3. Wave setup.....	80
6.1.4. Analisi dei livelli di marea registrati nel basso Adriatico.....	85
6.1.5. Altezza di risalita (<i>runup</i>).....	91
6.2. STIMA DELLE AREE INONDABILI	92
6.2.1. Flo-2D.....	93
6.2.2. I risultati.....	93
Scenario 1 (50 cm di altezza della colonna d'acqua)	93
Scenario 2 (100 cm di altezza della colonna d'acqua).....	94



Scenario 3 (214 cm di altezza della colonna d'acqua).....	96
7. LA COSTA E I FENOMENI DI EROSIONE.....	102
7.1. EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA DELL'AREA MARINA PROTETTA DI TORRE GUACETO.....	104
7.1.1. ARCGIS	104
7.1.2. DSAS.....	105
7.1.3. I RISULTATI DELL'ANALISI.....	105
7.2. UN'INDICATORE PER LA VALUTAZIONE DELLA SENSIBILITA' ALL'EROSIONE DELLA COSTA DELL'AMP DI TORRE GUACETO	117
7.3. CONSIDERAZIONI SULLA SEDIMENTAZIONE SUI FONDALI	124
8. CONCLUSIONI.....	127
9. CONCLUSIONS	132
BIBLIOGRAFIA.....	137
ALLEGATI.....	141



1. PREMESSA

Un problema comune alle Aree Marine Protette (AMP) italiane è rappresentato dalle numerose attività antropiche che, pur essendo consentite all'interno dei confini della riserva (e.g. pesca professionale, pesca sportiva, frequentazione turistica, immersioni, ancoraggi), non sono adeguatamente regolamentate. Inoltre, la regolamentazione delle attività antropiche esterne alle AMP non tiene spesso conto della presenza di un'area protetta. La conseguenza è che le AMP sono soggette a impatti multipli che operano a diverse scale spaziali e che possono limitare il perseguimento degli obiettivi istitutivi e la tutela efficace della biodiversità marina.

Numerosi studi hanno messo in evidenza che l'AMP di Torre Guaceto (Carovigno, BR) rappresenta sicuramente un esempio di gestione efficace nel contesto mediterraneo ed extra-mediterraneo. Tuttavia, tali studi, uniti alle attività di monitoraggio pregresse, hanno identificato una serie di minacce per gli ecosistemi marini tutelati in questa AMP: (1) una presenza massiva dell'alga invasiva *Caulerpa racemosa* in tutta l'area; (2) una forte sedimentazione nel tratto di costa in cui si trova l'AMP, ascrivibile a (3) fenomeni di erosione costiera agenti nell'area, potenzialmente aggravati anche dalla (4) regressione delle praterie di *Posidonia oceanica*; (5) un elevato grado di fruizione dell'AMP per le attività di balneazione che potrebbe avere delle ripercussioni sugli habitat dell'intertidale roccioso (e.g. regressione della fascia a *Cystoseira*); (6) segni di necrosi su colonie di gorgonacei (e.g. *Eunicella* spp.) probabilmente legate a processi connessi con i cambiamenti climatici.

L'AMP di Torre Guaceto, inoltre, include il Sito di Importanza Comunitaria di Torre S. Giovanni, che richiede un monitoraggio sistematico per la valutazione dello stato delle praterie. I fondali protetti di Torre Guaceto sono caratterizzati anche da importanti concrezionamenti caratteristici delle formazioni coralligene, le quali, data la loro importanza strutturale e funzionale, potrebbero essere incluse in modo esplicito nella Direttiva Habitat, portando alla ridefinizione dei SIC mare, così come auspicato dalla UE.

Emerge chiaramente la necessità di produrre una regolamentazione adeguata seguendo uno schema logico preciso che prevede di:

- 1- documentare lo stato di salute di specie, habitat e popolamenti all'interno dell'AMP includendo nell'analisi controlli esterni e considerando i principali driver che insistono nell'area in esame,



- 2- prevedere lo studio della distribuzione spaziale delle diverse forme di pressione antropica all'interno dell'AMP, a terra e a mare, 3- impostare un monitoraggio condotto sulla base di un disegno rigoroso e di indicatori specifici di pressione (diversi a seconda degli habitat considerati) che potrà consentire una quantificazione degli impatti ed una gestione adattiva utile all'implementazione di opportune strategie di mitigazione.

In tale contesto si inserisce la Convenzione stipulata tra l'AMP di Torre Guaceto e il CoNISMa (Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Scienze del Mare) nell'ambito del progetto "PRO.ACT NATURA 2000 – Protection actions for cross-borders and joint management of marine sites of community interest (NATURA 2000)". La finalità della Convenzione in oggetto è fornire alle AMP le linee guida per la gestione dell'AMP di Torre Guaceto, tenuto conto di quanto già definito nel contesto nazionale ed europeo nel settore della pianificazione di aree sottoposte a regime di tutela.

Lo studio proposto è la base per programmare un riassetto territoriale atto a favorire l'integrazione delle esigenze umane con la complessa dinamica dei litorali nel quadro di una corretta gestione integrata dello spazio costiero ai sensi dei più recenti concetti di Integrated Coastal Zone Management (ICZM) e di Tourism Carrying Capacity Assessment (TCCA).



Figura 1.I - Area di studio

In considerazione delle caratteristiche del sito e delle disponibilità del progetto il Gruppo di Lavoro del Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica (DICATECh) del Politecnico di Bari, coordinato dal Prof. Antonio Felice Petrillo, ha realizzato:

1. La definizione del clima meteomarinico al largo e sotto costa attraverso:
 - Il reperimento ed analisi delle serie storiche dei dati anemometrici delle stazioni di Bari (Rete Mareografica Nazionale), Brindisi (rete Aeronautica Militare) e Monopoli (rete di monitoraggio della Regione Puglia); dei dati ondametrici della stazione di Monopoli (Rete Ondametrica Nazionale, rete ISPRA) e Brindisi (rete di monitoraggio della Regione Puglia); dei dati mareografici delle stazioni di Bari (Rete Mareografica Nazionale) e Brindisi (rete di monitoraggio della Regione Puglia);
 - Lo studio del clima meteomarinico al largo del paraggio, calcolo del clima meteomarinico medio e stima degli eventi estremi;



- La creazione di reticoli batimetrici, in grande e piccola scala, sulla base delle cartografia IIM e dei dati batimetrici acquisiti nel corso delle campagne di rilievo in situ, per lo studio delle trasformazioni del moto ondoso (onda media ed eventi estremi con tempo di ritorno pari a 5, 10, 20 e 50 anni) dal largo a sotto costa con l'ausilio di idoneo modello matematico;
- Lo studio delle correnti longitudinali per la valutazione dei processi di trasporto solido;
- Le analisi delle variazioni del livello marino: calcolo del wave setup, del wave runup, in condizioni estreme del moto ondoso, e con determinazione della massima altezza di risalita sulla spiaggia emersa;
- L'individuazione delle aree di allagamento da moto ondoso in concomitanza di eventi estremi ricorrendo ad un modello di calcolo bidimensionale.

2. L'analisi della tendenza evolutiva storica della linea di riva attraverso:

- l'interpretazione e la modellazione dei dati esistenti. A tal fine, sono stati raccolti e informatizzati i dati disponibili in letteratura sulle variazioni storiche della linea di riva dei tratti sabbiosi del litorale.

3. L'analisi della tendenza evolutiva storica della linea di riva attraverso un indicatore ambientale definito appositamente.

2. CARATTERISTICHE GENERALI DEL SITO

La Riserva Naturale dello Stato di Torre Guaceto si estende per circa 1.200 ha, con una costa che si sviluppa per 8.400 m. La riserva è l'unica, nell'Italia continentale, ad includere una parte marina e una terrestre. La riserva è in gestione ad un consorzio realizzato da WWF Italia e i comuni di Brindisi e Carovigno. Il Consorzio di Gestione è stato costituito nel dicembre 2000 con la finalità di gestire l'area protetta, sia terrestre sia marina denominata "Torre Guaceto", istituita con Decreto del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio 04.02.2000 (G.U. n. 124 del 30/05/2000).

La Riserva Marina è suddivisa in tre zone con un diverso grado di tutela e protezione: la Zona A, a protezione integrale, la Zona B, di riserva generale orientata e la Zona C, di riserva parziale (Fig.2.1).

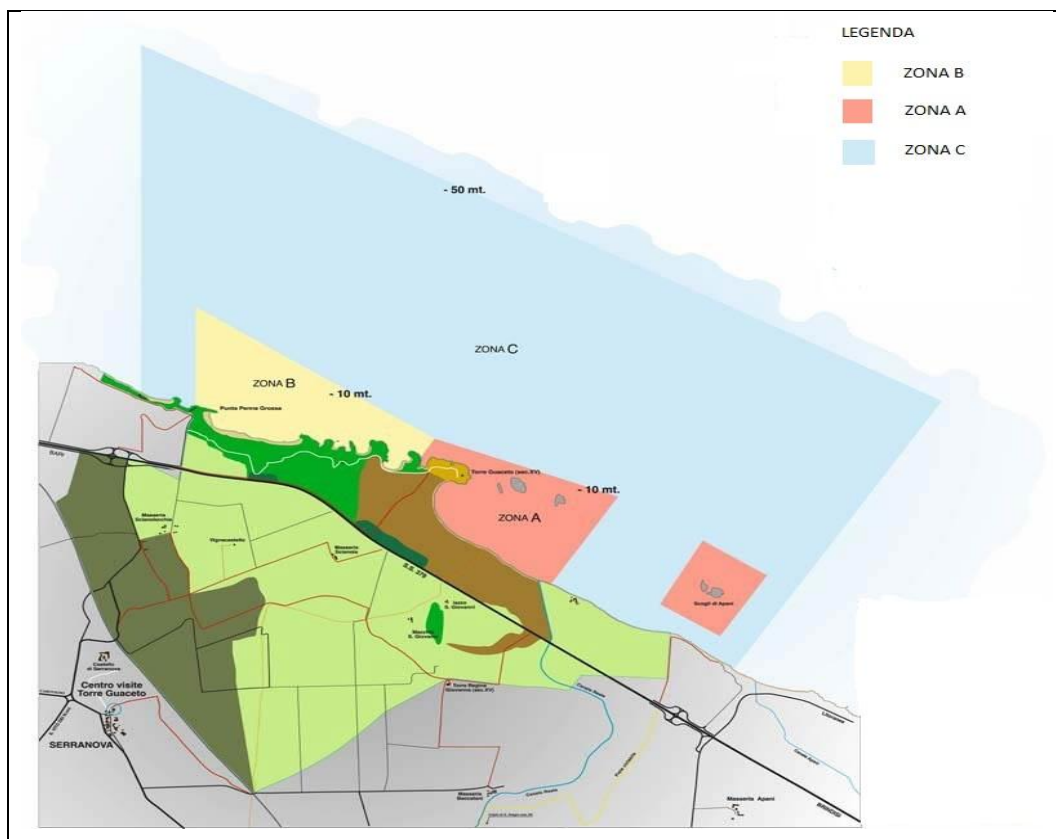


Figura 2.1 - Zonazione della riserva marina di Torre Guaceto

- ZONA A: è proibita la navigazione, l'approdo e la sosta di navi e natanti di qualsiasi genere e tipo, tranne per quelli debitamente autorizzati dall'Ente gestore per motivi di servizio nonché per eventuali attività di ricerca scientifica e di visite guidate, precedentemente autorizzate dallo stesso ente gestore. In tale zona sfocia il Canale Reale che rappresenta il bacino idrografico più importante della provincia di Brindisi e le cui sorgenti sono localizzate in prossimità di Villa Castelli e Francavilla Fontana.

- ZONA B: sono consentite e autorizzate, dall'Ente gestore, oltre alle attività previste per la Zona A, altre attività che permettono la fruizione e l'uso sostenibile dell'ambiente. Nella zona B la balneazione è consentita.

- ZONA C: è una zona buffer, ovvero, un'area di transizione che faccia da filtro e da mitigatore dei processi di disturbo. In tale zona ricade la maggior parte dell'estensione dell'Area Marina Protetta. In tale zona è possibile svolgere, oltre alle attività possibili nella zona A e B, anche le attività di pesca e la navigazione. Tali attività sono regolate dal decreto istitutivo e dal "disciplinare di attuazione del regolamento di esecuzione e organizzazione dell'Area Marina Protetta di Torre Guaceto".



Nell'ambito del Piano Regionale delle Coste della Regione Puglia, approvato con Del. G.R. Puglia n. 2273 del 13 ottobre 2011 in base alla L.R. n. 17 del 23/06/2006, il litorale pugliese è stato suddiviso in sette unità fisiografiche, dove ciascuna unità definisce un tratto di litorale delimitato da due sezioni attraverso le quali non vi è scambio longitudinale di sedimenti; ciascuna unità fisiografica, quindi, si evolve autonomamente rispetto ai tratti limitrofi.

L'area di Torre Guaceto ricade all'interno dell'unità fisiografica principale denominata "U.F. 3" che si estende dal molo di sottoflutto del porto di Bari fino a Punta Penne (Brindisi) per una lunghezza complessiva di circa 184 km.; il litorale in esame è ubicato in particolare nella sub-unità S.U.F. 3.2 che inizia al porto di Monopoli e si sviluppa fino a Punta Penne (Brindisi).

Il litorale a nord di Brindisi, a partire da Torre Guaceto, è costituito prevalentemente da falesia con spiaggia sabbiosa al piede, anche se non mancano tratti di falesia con ciottoli al piede. Vi sono poi dei tratti sabbiosi bassi, delimitati da formazioni rocciose.

Il Piano Regionale delle Coste ha individuato su tutta la fascia demaniale della costa pugliese differenti livelli di criticità all'erosione dei litorali e differenti livelli di sensibilità ambientale associata alle peculiarità territoriali del contesto.

La criticità all'erosione è stata definita in funzione di tre indicatori che individuano la tendenza evolutiva storica del litorale, la tendenza evolutiva recente e lo stato di conservazione dei sistemi dunali; la criticità all'erosione viene distinta in elevata, media e bassa.

La sensibilità ambientale è stata definita in funzione di una molteplicità di indicatori che rappresentano lo stato fisico della fascia costiera (comprendente l'area demaniale e il suo contesto territoriale di riferimento), in relazione al sistema delle norme di tutela che ne sottolineano la valenza ambientale; la sensibilità ambientale viene distinta in elevata, media e bassa.

Il tratto di costa in esame è stato classificato con una criticità all'erosione di ordine medio (C2), nella parte più a Nord, e di ordine basso (C3) nel tratto centrale e meridionale; per quanto riguarda la sensibilità ambientale il tratto dell'area marina protetta di Torre Guaceto ha una sensibilità alta (S1) (Fig 2.II).



Figura 2.II - Zonazione della riserva marina di Torre Guaceto secondo la normativa del Piano Regionale delle Coste della Regione Puglia

Le Norme Tecniche di Attuazione del Piano, per le coste classificate C3S1, ovvero, per circa il 90% della zona d'interesse, indicano che non siano previste particolari restrizioni d'uso, a meno che, l'attività di monitoraggio non avvalori a livello locale la classificazione effettuata su base regionale.

Possono essere previste, salvo disponibilità di zone appartenenti, per la stessa classe di criticità, ai livelli più bassi di sensibilità ambientale, in via prioritaria Spiagge Libere con Servizi (SLS) e, in via subordinata, Stabilimenti Balneari (SB). In entrambi i casi i servizi minimi di spiaggia devono essere molto contenuti ed essenzialmente limitati al chiosco bar-direzione e ai servizi igienico-sanitari, comunque definiti attraverso metodologie di verifiche di tipo ambientale.

Uno strumento ampiamente utilizzato per l'inquadramento geomorfologico dei litorali italiani è l'Atlante Italiano delle Spiagge (1997), compilato da ricercatori afferenti a diverse sedi universitarie e con il finanziamento del CNR. L'Atlante Italiano delle Spiagge dà un quadro omogeneo di tutti i litorali italiani; esso è costituito da 108 fogli in scala

1:100.000 compilati in un intervallo temporale che va dal 1981 al 1995; il litorale di Torre Guaceto è riportato nel foglio n. 191 dell'Atlante (Fig. 2.III).

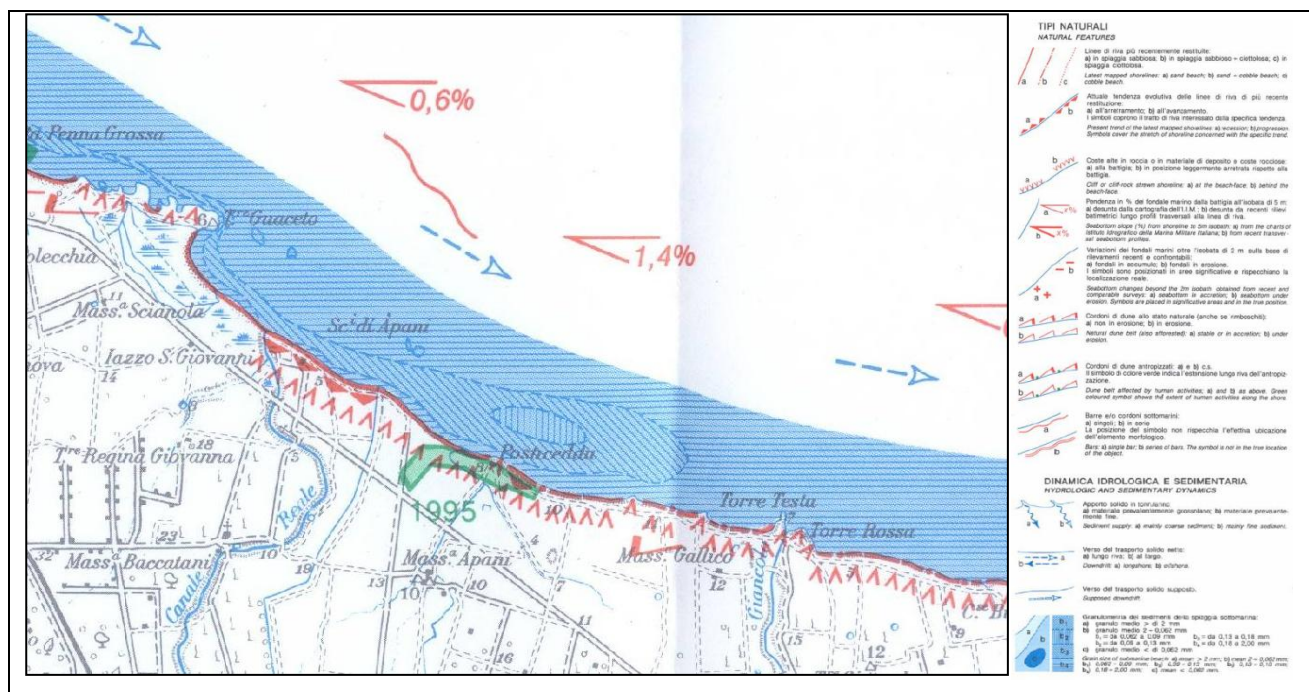


Figura 2.III - Inquadramento geomorfologico – Atlante delle Spiagge Italiane (CNR 1997)

La figura evidenzia che il litorale in prossimità di Torre Gauceto è costituito, soprattutto, da costa rocciosa in posizione arretrata rispetto alla linea di battigia; dall'Atlante Italiano delle Spiagge, risulta che la costa è stabile, ad eccezione del litorale più a sud della area protetta, lungo il quale sono stati individuati tratti di litorale in erosione. La pendenza media della spiaggia sommersa (dalla linea di battigia all'isobata di 5m) è variabile, ed è compresa tra 0.6% e 1.4%. Il verso prevalente del trasporto solido longitudinale è indicato da Nord verso Sud.

La figura, mostra, inoltre, che il tratto di Apani, a sud dell'Area Marina Protetta, ha subito una notevole espansione antropica intorno al 1995.

La Giunta Regionale Pugliese con Delibera n. 410 del 10/06/2011 (Bollettino Ufficiale n. 42 del 23/03/2011) ha approvato le Linee guida per l'individuazione di interventi tesi a mitigare le situazioni di maggiore criticità delle coste basse pugliesi.

Tale documento definisce i criteri con cui redigere i progetti relativi a tutti gli interventi, di natura pubblica e privata, di mitigazione del rischio erosione e dissesto per le coste basse. In particolare nell'allegato 3.1 delle Linee guida ("Individuazione di strutture di



mitigazione del rischio in ciascuna unità fisiografica”), sono specificate, per ciascun tratto di litorale pugliese, le tipologie di strutture compatibili con le dinamiche costiere in atto.

Per quanto riguarda il litorale a Nord di Brindisi, le Linee guida hanno evidenziato che negli ultimi decenni a causa delle notevoli sistemazioni dei terreni, dell'aumento uso del suolo e della notevole antropizzazione della fascia costiera, si è avuto un deficit sedimentario in tale sub-unità, con un generale trend all'arretramento della linea di riva, anche se di ridotta entità.

Spesso gli arretramenti sono evidenziati dalla scomparsa dei sedimenti dagli speroni rocciosi di chiusura delle cale e dal loro affioramento. Al fenomeno erosivo ha contribuito certamente anche l'innalzamento del livello medio mare che negli ultimi cinquant'anni è stato di circa 9 cm e può aver determinato un arretramento della linea di riva dei litorali sabbiosi compreso tra 4.5 e 9 m, valore significativo per tali litorali che avevano una larghezza della spiaggia emersa di poche decine di metri, e per le spiagge sabbiose al piede di coste rocciose o di falesie.

Alla luce della dinamica del litorale, della particolare configurazione della costa e della buona naturalità della stessa, le Linee guida sconsigliano di proteggere le spiagge con opere rigide; per i tratti con maggiore valenza socio economica si consigliano interventi locali di ripascimenti protetti della spiaggia con sabbia e/o con ciottoli.

Nell'ambito del Piano di Bacino Stralcio di Assetto Idrogeologico, approvato con delibera del Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino della Puglia n. 39 del 30/11/2005, lungo il tratto di costa in esame sono presenti zone a pericolosità geomorfologica (Fig.2.IV). L'immagine mostra che sono presenti aree caratterizzate da elevata o media pericolosità geomorfologica sia sul versante settentrionale di Torre Guaceto, che lungo il tratto di costa posto a Sud. Tali aree sono infatti caratterizzate da un progressivo arretramento della linea di riva con conseguente dissesto della falesia retrostante.

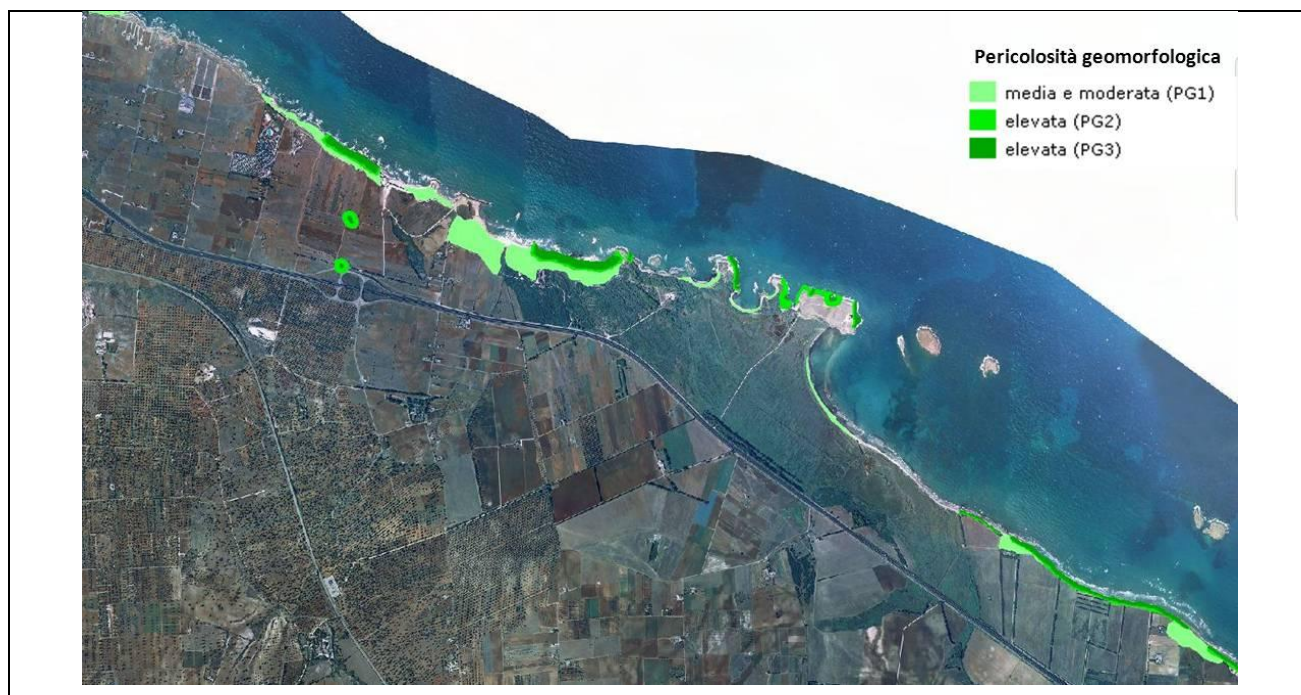


Figura 2.IV – Pericolosità geomorfologica (immagine estratta dal webgis del PAI Puglia)

3. CLIMA METEOMARINO

3.1. SETTORE DI TRAVERSIA E FETCH DEL PARAGGIO

Il settore di traversia di un paraggio A è dato dall'arco di circonferenza di centro A che comprendente tutte le direzioni da cui possono provenire le agitazioni ondose determinate dai venti foranei.

Il settore di traversia geografico del paraggio di Torre Guaceto comprende tutte le direzioni tra 300°N e 130°N. A partire da un punto fissato al largo del paraggio di Torre Guaceto sono stati tracciati i fetch geografici, dove per fetch geografico si intende la distesa di mare libero entro cui il vento spira con velocità e direzione costanti; il fetch geografico, quindi, rappresenta la porzione di mare, nella direzione del vento, sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso ad opera dell'azione esercitata dal vento. Nella Tab. 3.1.I è riportato il valore dei fetch geografici misurati in corrispondenza delle varie direzioni di provenienza dei venti foranei.

DIR. (°N)	FETCH GEOGRAFICI (km)	DIR. (°N)	FETCH GEOGRAFICI (km)	DIR. (°N)	FETCH GEOGRAFICI (km)
0	190	120	255	240	13
5	188	125	234	245	13
10	192	130	68	250	14
15	190	135	56	255	15
20	186	140	40	260	15
25	180	145	35	265	17
30	179	150	31	270	20
35	182	155	29	275	23
40	180	160	26	280	35
45	180	165	21	285	53
50	175	170	20	290	106
55	183	175	17	295	134
60	190	180	16	300	137
65	190	185	17	305	130
70	179	190	16	310	128
75	174	195	15	315	136
80	165	200	13	320	608
85	166	205	13	325	620
90	168	210	11	330	418
95	163	215	11	335	242
100	163	220	11	340	203
105	165	225	11	345	217
110	175	230	11	350	212
115	190	235	12	355	208

Tabella 3.1.I - fetch geografici nel paraggio di Apani



La distribuzione dei fetch presenta quattro zone ben distinte:

- il settore compreso tra 290°N e 315°N è caratterizzato da fetch dell'ordine di 140km, limitati dal promontorio del Gargano;
- alle direzioni 320°N e 325°N competono i fetch più sviluppati, circa 650km, che si estendono fino alla costa veneta;
- dalla direzione 330°N alla direzione 125°N i fetch risultano limitati dalle coste jugoslave e albanesi;
- i fetch dalle direzioni 130°N a 285°N, sono limitati dalle coste pugliesi.

Oltre al fetch geografico è stato calcolato anche il valore del fetch efficace che viene introdotto per considerare sia l'effetto della larghezza del fetch, sia l'effetto della dispersione direzionale dell'energia dell'onda sullo sviluppo e sulla propagazione dell'onda. L'uso dei fetch efficaci è particolarmente appropriato nei mari di dimensioni ridotte sottoposti a perturbazioni ondose di lunga durata.

I fetch efficaci $F_{e,w}$ sono stati calcolati ogni 5 gradi, utilizzando la relazione:

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)}$$

in cui:

- $F_{e,w}$ è la lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione ϕ_w ;
- F_i è la lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima ϕ_i ;
- ϕ_w è la direzione media (riferita al Nord geografico) di possibile provenienza del vento;
- $\phi_w - \theta \leq \phi_i \leq \phi_w + \theta$ è la direzione i-esima (riferita al Nord geografico) relativa ad un settore di ampiezza 2θ considerato nell'intorno della direzione ϕ_w ;
- θ è l'ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso (il metodo di Saville prevede un valore di $\theta = \pm 45^\circ$, mentre Seymour fa riferimento ad un valore di $\theta = \pm 90^\circ$;
- n è un termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume $n=2$).

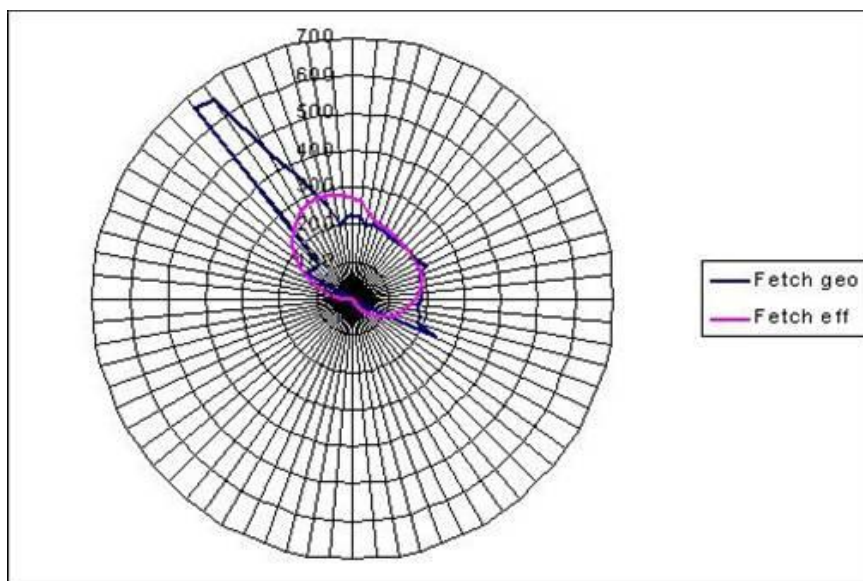


Figura 3.1.I - Distribuzione dei fetch geografici ed efficaci.

Nella figura 3.1.I sono stati rappresentati i valori dei fetch efficaci e geografici; il settore di traversia efficace, se si considera un valore minimo del fetch pari a 100km, risulta compreso nell'intervallo $289^{\circ}\text{N} - 116^{\circ}\text{N}$.

3.2. RICOSTRUZIONE DEL CLIMA METEOMARINO AL LARGO

Per ricavare la ricostruzione storica delle mareggiate al largo di un paraggio possono essere adottati sia metodi indiretti, a partire dai dati di vento disponibili in qualche stazione anemometrica vicina, sia metodi diretti, a partire da misure dirette dello stato ondoso.

In entrambi i casi è necessario disporre di serie storiche piuttosto lunghe per conferire affidabilità alle procedure di tipo statistico necessarie per la previsione degli eventi estremi e per la ricostruzione del clima ondoso medio.

Per la determinazione del clima meteomarino al largo di Torre Guaceto è stato applicato il metodo diretto utilizzando i dati registrati dalla boa ondometrica RON ormeggiata al largo di Monopoli.

Nello specifico è stato rilevato che il settore di traversia di Monopoli è pressoché identico a quello del paraggio di Torre Guaceto, con minime differenze relative alle sole direzioni comprese tra 290°N e 330°N . Vista inoltre la notevole vicinanza tra i due siti, per il paraggio di Torre Guaceto è stato adottato quindi lo stesso clima meteomarino ricostruito al largo del paraggio di Monopoli.

3.2.1. Metodo diretto

Per la determinazione del clima meteomarinario al largo di Torre Guaceto sono stati analizzati i dati registrati dalla boa ondometrica ormeggiata al largo di Monopoli, la quale è, peraltro, l'unica stazione ondometrica RON nel basso Adriatico.

La Rete Ondometrica Nazionale (R.O.N.), le cui boe sono dislocate lungo le coste italiane (figura 3.2.1.I), è attualmente gestita dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). Le boe ondometriche attualmente registrano in continuo, le misure vengono elaborate e restituite a cadenza semioraria. Le serie storiche rilevate dal 1989 al 2007 sono attualmente disponibili sul sito www.idromare.com.



Figura 3.2.1.I - Ubicazione delle boe della RON.

L'importanza di tali dati risiede nella continuità e nel buon rendimento con cui sono stati acquisiti. I dati durante il periodo di acquisizione sono stati acquisiti dalla boa con regolarità, ad eccezione del 2007 (Fig. 3.2.1.II), per cui la percentuale di dati mancanti risulta pari al 14.31% di tutte le osservazioni (Tab. 3.2.1.I).

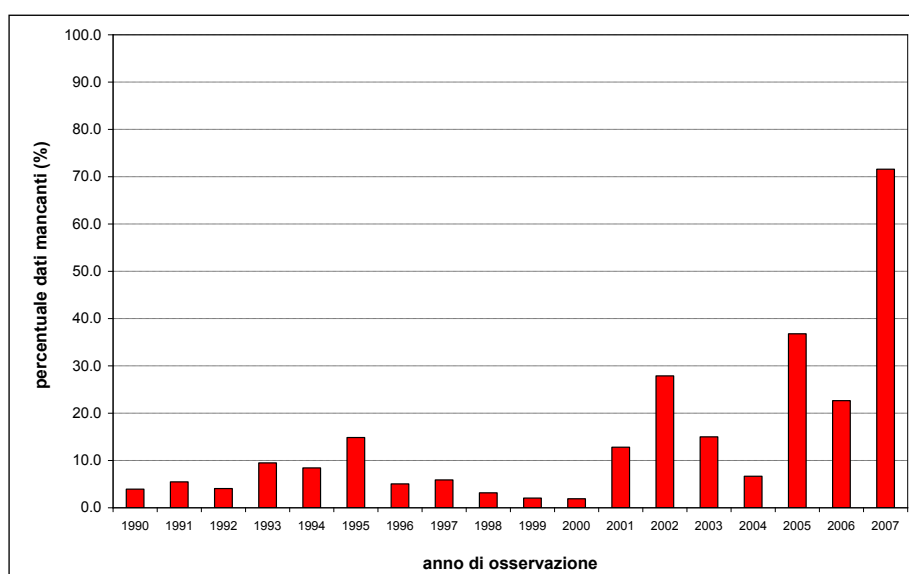


Figura 3.2.1.II - percentuale dei dati mancanti della boa di Monopoli



PERIODO DI OSSERVAZIONE	TOTALE DATI	DATI NON VALIDI	% DATI NON VALIDI	DATI VALIDI
1990 - 2007	52592	7525	14.31%	45067

Tabella 3.2.1.I - percentuale dei dati mancanti della boa di Monopoli

3.2.2. Elaborazione dei dati ondametrici

La prima operazione che è stata effettuata sui rilievi ondametrici della boa di Monopoli è il calcolo delle frequenze di apparizione dei singoli stati di mare registrati dalla boa classificati per direzione di provenienza ed intensità.

Nella Tab. 3.2.2.I sono riportati i risultati ottenuti ordinando le mareggiate per classi di altezza d'onda di 1.0m e per settori di provenienza di 30°, avendo assunto che le altezze d'onda inferiori a 0.25m sono calme; i dati elaborati sono stati rappresentati graficamente nel diagramma polare di Fig. 3.2.2.I (percentuale di apparizione – direzione – intensità) e nel grafico di Fig. 3.2.2.II (percentuale di apparizione – classe di altezza d'onda).

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)						totale
	0.25 - 0.50	0.50 - 1.50	1.50 - 2.50	2.50 - 3.50	3.50 - 4.50	4.50 - 5.50	
0	4.58	7.20	1.65	0.36	0.06	0.00	13.85
30	2.59	4.05	0.91	0.16	0.03	0.00	7.74
60	2.72	4.63	1.26	0.33	0.04	0.01	8.99
90	5.04	5.48	0.25	0.04	0.00	0.00	10.81
120	3.51	10.15	0.52	0.01	0.00	0.00	14.19
150	0.37	0.57	0.02	0.00	0.00	0.00	0.96
180	0.21	0.24	0.01	0.00	0.00	0.00	0.46
210	0.21	0.19	0.02	0.00	0.00	0.00	0.42
240	0.16	0.21	0.01	0.00	0.00	0.00	0.38
270	0.19	0.25	0.02	0.00	0.00	0.00	0.46
300	0.50	1.20	0.14	0.02	0.00	0.00	1.86
330	5.63	15.58	2.04	0.26	0.02	0.00	23.53
TOT	25.71	49.75	6.85	1.18	0.15	0.01	83.65

Tabella 3.2.2.I - percentuali annuali di apparizione del moto ondoso ordinate per classi di altezza d'onda e per direzione.

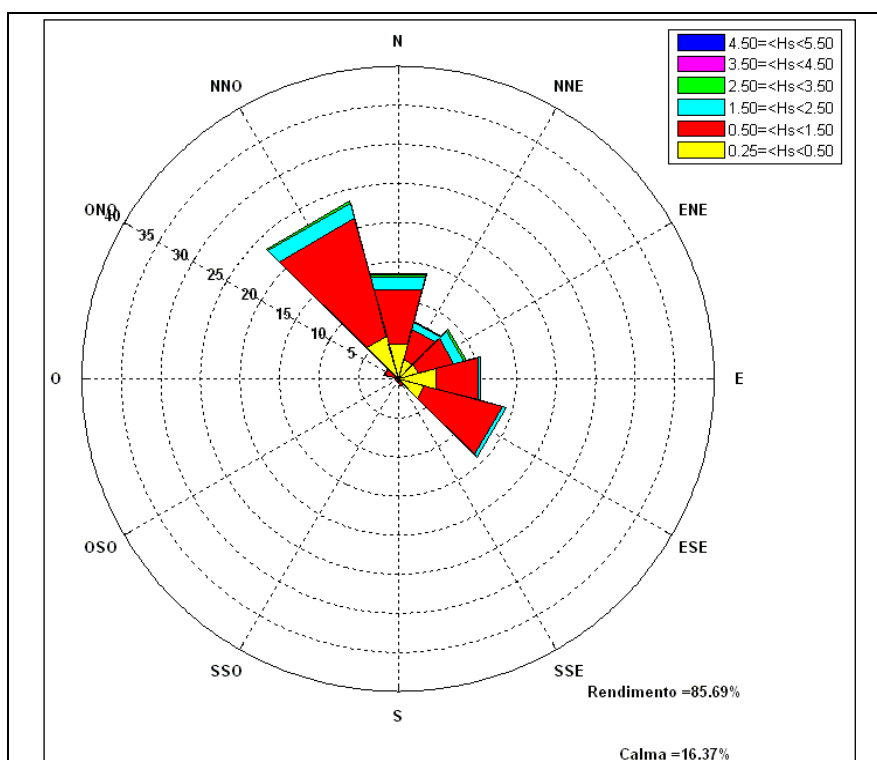


Figura 3.2.2.I - frequenze di apparizione annuali.

Dall'analisi delle registrazioni effettuate risulta che il settore di traversia del paraggio è costituito dalle direzioni comprese tra NNO e ESE. La massima frequenza di apparizione spetta alle mareggiate provenienti da NNO che fanno registrare una percentuale del 23.53%. Le mareggiate da ESE costituiscono il 14.19% dei dati registrati, mentre le mareggiate da Nord raggiungono il 13.85% di tutte le osservazioni. Le onde da Est sono piuttosto frequenti nel paraggio con una frequenza del 10.81%, mentre le onde da NNE e ENE fanno registrare percentuali tra il 7.74% e il 8.99%.

Se si classificano le onde secondo l'altezza significativa (fig. 3.2.2.II) si osserva che le onde con altezza significativa minore di 0.5m rappresentano il 25.71% di tutte le osservazioni, mentre le onde con altezza compresa tra 0.5 e 1.5m costituiscono il 49.75% delle registrazioni e sono le mareggiate più frequenti. Risulta, inoltre, che il 6.8% delle osservazioni compete ad onde con altezza compresa tra 1.5 e 2.5m. Le mareggiate con altezza compresa tra 2.5 e 3.5m sono poco frequenti nel paraggio e fanno registrare una percentuale del 1.18%. È stato anche osservato che lo 0.16% delle onde registrate nel paraggio ha altezza maggiore di 3.5m.

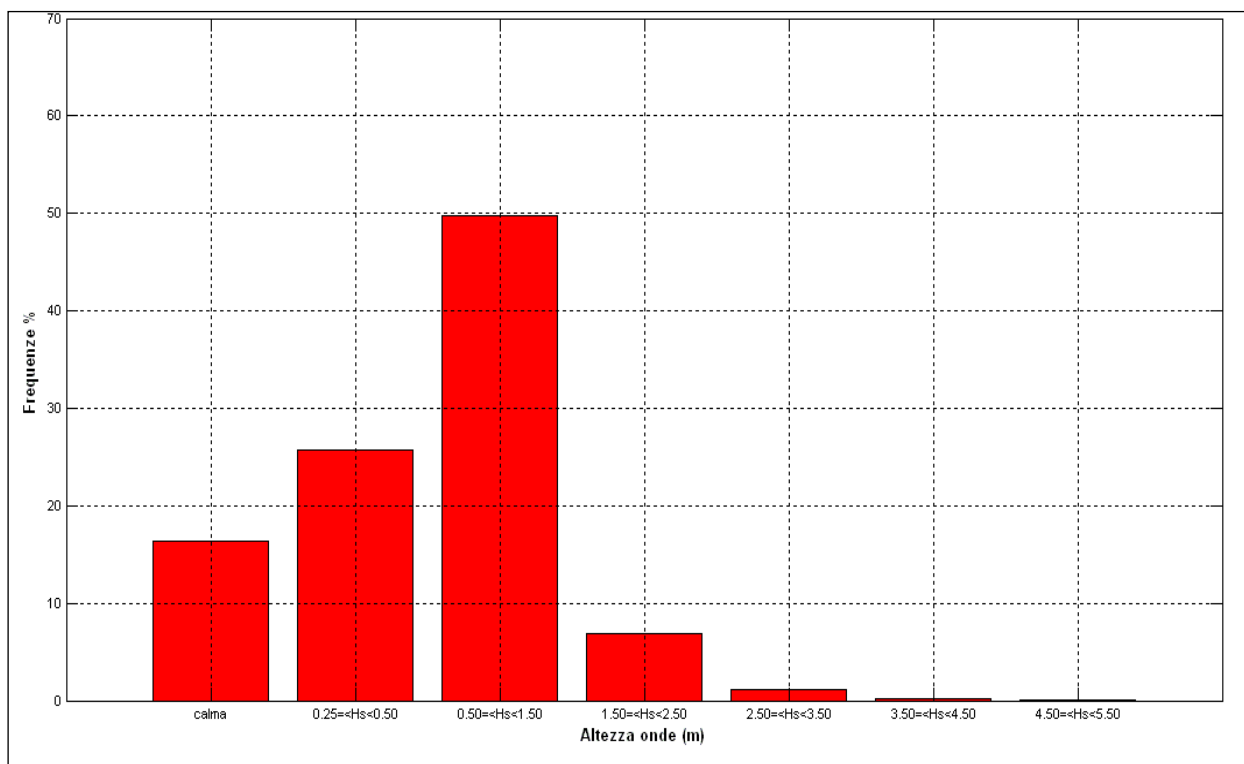


Figura 3.2.2.II - frequenze di apparizione annuali delle classi di altezza d'onda

Nella Tab. 3.2.2.II ed in Fig. 3.2.2.III i dati ondametrici della boa di Monopoli sono stati ordinati per periodo di picco e per direzione di provenienza della mareggiata. Dall'analisi dei dati si osserva che la frequenza di apparizione maggiore spetta alle onde con periodo compreso tra 3 e 7 secondi (67.68%); le onde con periodo di picco minore di 3 secondi rappresentano il 3.06% del totale, mentre le onde con periodo maggiore di 7 secondi costituiscono il 12.87%.

dir (°N)	periodo di picco T_p (s)						totale
	$T_p < 2.0$	$2.0 \leq T_p \leq 3.0$	$3.0 \leq T_p \leq 5.0$	$5.0 \leq T_p \leq 7.0$	$7.0 \leq T_p \leq 8.0$	$T_p \geq 8.0$	
0	0.01	0.23	5.64	5.72	1.33	0.91	13.84
30	0.00	0.08	2.48	3.53	1.00	0.62	7.71
60	0.00	0.09	2.26	4.20	1.50	0.93	8.98
90	0.00	0.63	4.31	3.90	1.06	0.91	10.81
120	0.00	0.53	6.71	5.43	1.02	0.49	14.18
150	0.00	0.14	0.34	0.26	0.09	0.14	0.97
180	0.00	0.09	0.11	0.10	0.03	0.14	0.47
210	0.00	0.06	0.08	0.09	0.03	0.16	0.42
240	0.00	0.03	0.10	0.09	0.03	0.13	0.38
270	0.00	0.04	0.14	0.13	0.03	0.11	0.45
300	0.00	0.17	0.77	0.59	0.09	0.25	1.87
330	0.02	0.94	10.97	9.73	1.11	0.76	23.53
TOT	0.03	3.03	33.91	33.77	7.32	5.55	83.61

Tab. 3.2.2.II - Percentuali di apparizione del moto ondoso per periodo di picco e per direzione

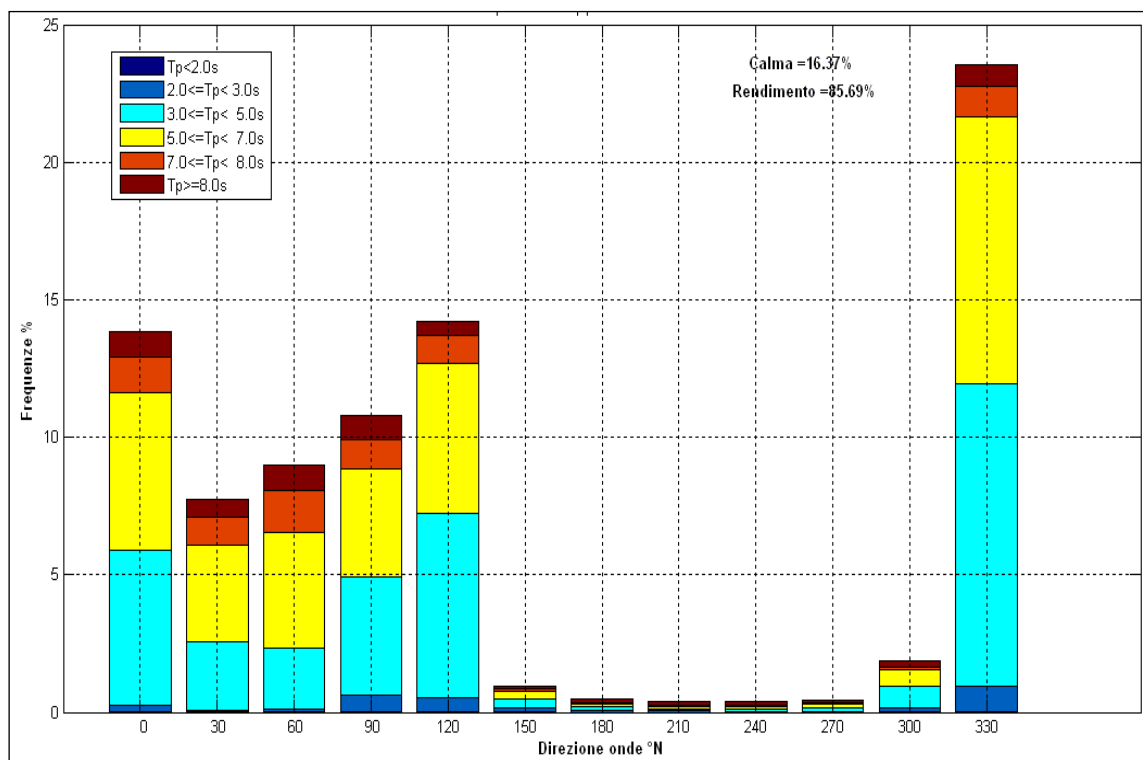


Figura 3.2.2.III - classificazione delle onde per periodo di picco e per direzione del moto ondoso.

Nelle tabelle, da 3.2.2.III a 3.2.2.VI, sono state riportate le percentuali di apparizione del moto ondoso suddivise per le quattro stagioni; le frequenze di apparizione stagionale sono state rappresentate nei grafici di Fig. 3.2.2.IV.

Se si analizzano i dati ondametrici registrati su base stagionale si osserva che:

- in inverno le frequenze di apparizione maggiori spettano alle mareggiate da NNO (21.20%) e da N (19.18%); le direzioni da NNE, da ENE, da Est e da ESE fanno registrare percentuali tra il 9.80% ed il 12.13%; il 54.88% delle onde ha altezza compresa tra 0.5 e 1.5m, mentre le onde di altezza superiore a 2.5m costituiscono il 2.90% delle osservazioni totali stagionali;
- in primavera le frequenze di apparizione maggiori spettano alle mareggiate da NNO (25.60%), seguite dalle onde da ESE (16.49%) e dalle onde da Est (11.29%); durante la stagione primaverile si registra la più alta percentuale di onde di altezza inferiore a 0.5m (30.36%);
- in estate le frequenze di apparizione maggiori provengono da NNO (32.42%), seguite dalle onde da Nord (13.50%); le altezze d'onda registrate in questa

stagione risultano di modesta entità ed infatti le onde con altezza inferiore a 0.5m, comprese le calme, costituiscono il 53.30% del totale delle osservazioni stagionali;

- in autunno le frequenze di apparizione maggiori spettano alle mareggiate da ESE (19.04%), mentre si riduce di molto la frequenza delle onde da NNO (14.83%) rispetto agli altri riferimenti stagionali; significativo è il valore della percentuale di onde di altezza superiore a 2.5m pari a 1.99%.

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)						totale
	0.25 - 0.50	0.5 - 1.50	1.50 - 2.50	2.50 - 3.50	3.50 - 4.50	4.50 - 5.50	
0	3.64	10.66	3.79	0.89	0.20	0.00	19.18
30	2.15	5.51	1.83	0.27	0.04	0.00	9.80
60	2.17	6.22	2.58	0.68	0.09	0.02	11.76
90	4.60	6.65	0.38	0.04	0.00	0.00	11.67
120	2.31	9.17	0.64	0.01	0.00	0.00	12.13
150	0.34	0.62	0.05	0.01	0.00	0.00	1.02
180	0.12	0.21	0.01	0.00	0.01	0.00	0.35
210	0.11	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18
240	0.11	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
270	0.19	0.28	0.01	0.00	0.00	0.00	0.48
300	0.41	1.02	0.25	0.02	0.00	0.00	1.70
330	3.41	14.38	2.79	0.55	0.06	0.01	21.20
TOT	19.56	54.88	12.33	2.47	0.40	0.03	89.67

Tabella 3.2.2.III - percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione invernale

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)						totale
	0.25 - 0.50	0.5 - 1.50	1.50 - 2.50	2.50 - 3.50	3.50 - 4.50	4.50 - 5.50	
0	4.62	4.37	0.61	0.09	0.02	0.00	9.71
30	2.67	2.40	0.40	0.03	0.00	0.00	5.50
60	3.01	2.29	0.34	0.03	0.00	0.00	5.67
90	6.23	4.99	0.07	0.00	0.00	0.00	11.29
120	4.73	11.40	0.36	0.00	0.00	0.00	16.49
150	0.35	0.47	0.03	0.00	0.00	0.00	0.85
180	0.25	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36
210	0.22	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31
240	0.17	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00	0.28
270	0.11	0.16	0.02	0.00	0.00	0.00	0.29
300	0.69	1.57	0.09	0.03	0.01	0.00	2.39
330	7.31	16.50	1.62	0.16	0.01	0.00	25.60
TOT	30.36	44.44	3.56	0.34	0.04	0.00	78.74

Tabella 3.2.2.IV - percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione primaverile



dir (°N)	altezza significativa Hs (m)						totale
	0.25 - 0.50	0.5 - 1.50	1.50 - 2.50	2.50 - 3.50	3.50 - 4.50	4.50 - 5.50	
0	6.61	6.33	0.54	0.02	0.00	0.00	13.50
30	3.10	3.07	0.12	0.00	0.00	0.00	6.29
60	2.34	2.50	0.19	0.00	0.00	0.00	5.03
90	4.32	2.08	0.04	0.00	0.00	0.00	6.44
120	3.41	5.44	0.01	0.00	0.00	0.00	8.86
150	0.23	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60
180	0.16	0.15	0.00	0.02	0.00	0.00	0.33
210	0.12	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26
240	0.12	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.20
270	0.16	0.17	0.02	0.00	0.00	0.00	0.35
300	0.54	1.52	0.08	0.01	0.00	0.00	2.15
330	8.63	21.54	2.14	0.11	0.00	0.00	32.42
TOT	29.74	43.38	3.15	0.16	0.00	0.00	76.43

Tabella 3.2.2.V - percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione estiva

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)						totale
	0.25 - 0.50	0.5 - 1.50	1.50 - 2.50	2.50 - 3.50	3.50 - 4.50	4.50 - 5.50	
0	3.43	7.69	1.80	0.47	0.03	0.00	13.42
30	2.40	5.32	1.33	0.32	0.07	0.00	9.44
60	3.30	7.60	2.02	0.62	0.08	0.01	13.63
90	4.95	8.25	0.50	0.11	0.00	0.00	13.81
120	3.50	14.45	1.06	0.02	0.01	0.00	19.04
150	0.57	0.82	0.02	0.00	0.00	0.00	1.41
180	0.30	0.49	0.03	0.00	0.00	0.00	0.82
210	0.38	0.46	0.06	0.00	0.00	0.00	0.90
240	0.24	0.56	0.03	0.00	0.00	0.00	0.83
270	0.29	0.38	0.03	0.00	0.01	0.00	0.71
300	0.34	0.71	0.16	0.01	0.00	0.00	1.22
330	3.04	9.88	1.68	0.23	0.00	0.00	14.83
TOT	22.74	56.61	8.72	1.78	0.20	0.01	90.06

Tabella 3.2.2.VI - percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione autunnale

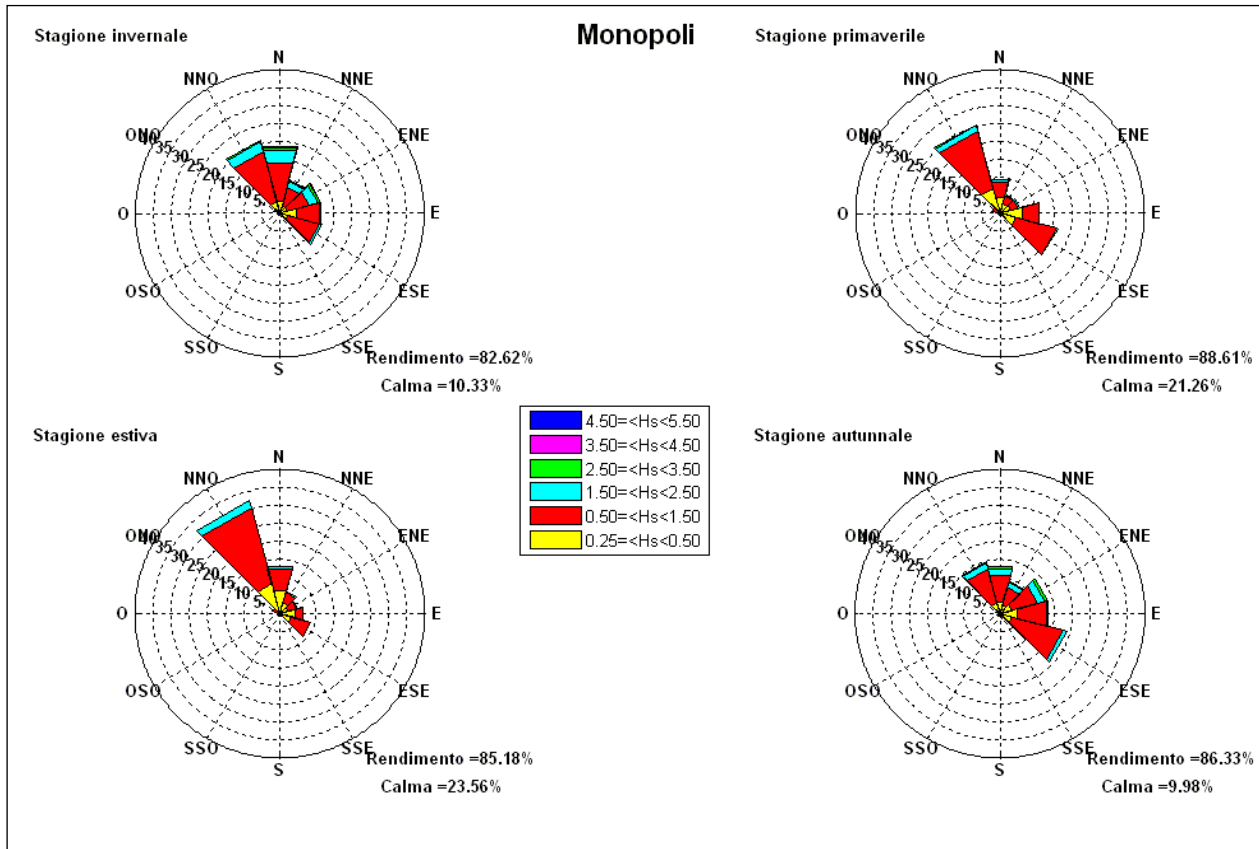


Figura 3.2.2.IV - frequenze di apparizione stagionali

3.2.3. Relazione tra altezza d'onda e periodo di picco

La correlazione tra l'altezza d'onda al largo e periodo di picco corrispondente è stata individuata attraverso l'analisi dei dati ricostruiti adottando la seguente formulazione matematica:

$$T = \alpha * H_s^\beta$$

dove:

- T è il periodo dell'onda espresso in secondi;
- H_s è l'altezza d'onda significativa espressa in metri;
- α, β sono dei coefficienti di correlazione.

I dati d'onda sono stati suddivisi per altezze congruenti, fissando un fattore di soglia pari a 0.25m, indipendentemente dalla direzione di provenienza. Per ogni altezza d'onda H_{si} sono state tabulate tutte le n direzioni di provenienza, i corrispondenti n periodi e gli m numeri di apparizione b_s . Si è ricavato allora il periodo riferito alla i -esima onda come:

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^m T_{sj} * b_s}{m} \quad \text{espresso in secondi.}$$

Una volta calcolato il periodo d'onda T_i per ogni altezza d'onda H_{si} è stata cercata la regressione fra i valori di T_i e i valori di H_{si} . I valori dei coefficienti di regressione sono riportati in Fig. 3.2.3.I per il periodo di picco T_p e per il periodo medio T_m .

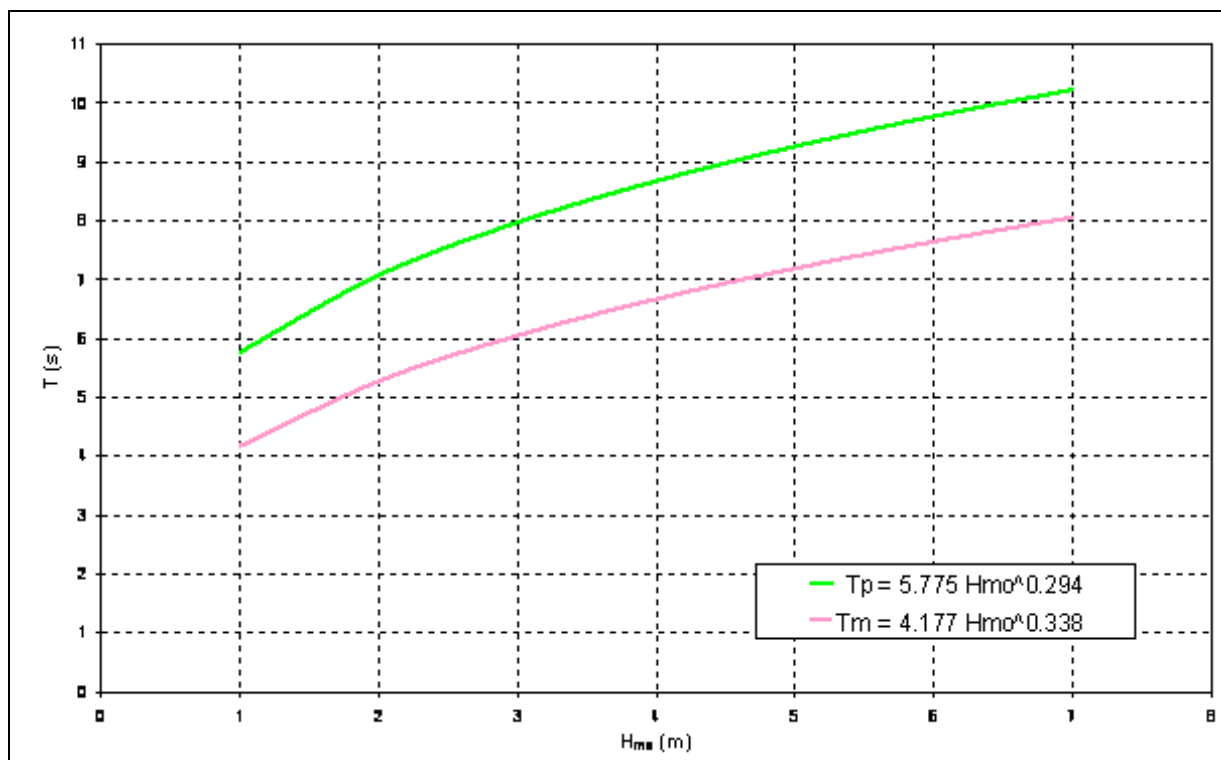


Figura 3.2.3.I - curva di regressione altezza - periodo di picco

Con questi coefficienti sono stati calcolati i valori dei periodi di picco relativi alle onde variabili fra 0.5m e 6.0m, separate da intervalli discreti di 0.5m (tab. 3.2.3.I).

H (m)	T _p (s)
0.5	4.71
1.0	5.78
1.5	6.51
2.0	7.08
2.5	7.56
3.0	7.98
3.5	8.35
4.0	8.68
4.5	8.99
5.0	9.27
5.5	9.53
6.0	9.78

Tabella 3.2.3.I - andamento di altezza e periodo di picco al largo.



3.2.4. Eventi estremi di moto ondoso al largo

Gli eventi estremi di moto ondoso non possono essere calcolati con metodi deterministici in quanto le altezze d'onda rientrano nella casistica degli eventi stocastici, per cui il margine di incertezza dei risultati ottenuti per il calcolo delle altezze d'onda massime è insito nel problema stesso.

I metodi probabilistici in uso consistono nella ricerca di una legge di distribuzione rappresentativa del campione di dati disponibile ed in una successiva estrapolazione di detta legge fino a tempi di ritorno congrui con l'importanza e le esigenze dello studio.

Per tempo di ritorno T_r si intende l'intervallo temporale fra due eventi di uguale intensità, ovvero, nel caso specifico, il tempo in cui una data altezza d'onda possa essere eguagliata o superata una sola volta.

Ovviamente, maggiori sono i tempi di ritorno considerati, maggiore deve essere la dimensione del campione analizzato, per non incorrere in una scarsa attendibilità dei risultati; sono generalmente accettate previsioni che superano di due o massimo tre volte la serie storica a disposizione.

Nel nostro caso il periodo di registrazione dei dati di moto ondoso (boa di Monopoli, 1990 - 2007, 18 anni) risulta sufficientemente lungo e affidabile per la determinazione degli eventi estremi che caratterizzano il paraggio in questione.

Ricorrendo a metodi propri dell'analisi probabilistica, la stima dell'altezza d'onda massima probabile è stata condotta secondo il seguente approccio:

- definizione dell'evento (eccedenze o massimi e quindi il livello di soglia o l'intervallo temporale);
- scelta della distribuzione probabilistica rappresentativa degli eventi statistici (campione degli eventi);
- valutazione del numero degli eventi nella vita presunta dell'opera;
- valutazione della distribuzione di probabilità dell'altezza d'onda massima.

Al fine di determinare le altezze d'onda significative a prefissato T_r , si fa riferimento al metodo di Goda (1988), basato sulle seguenti ipotesi:

- tutte le altezze d'onda significative del campione provengono da una singola popolazione statistica di eventi di mareggiate;

- le altezze d'onda di una mareggiata sono ragionevolmente rappresentate dall'altezza significativa;
- le altezze d'onda estreme facenti parte del campione non sono limitate da qualche fattore fisico, come ad esempio la profondità in acque intermedie o basse.

In particolare, Goda considera le seguenti funzioni di distribuzione a lungo termine:

$$F(H_s \leq \hat{H}_s) = e^{-e^{\left(\frac{\hat{H}_s - B}{A}\right)}} \quad \text{distribuzione di Fisher-Tippet I (FT-I o Gumbel)}$$

$$F(H_s \leq \hat{H}_s) = 1 - e^{-e^{\left(\frac{\hat{H}_s - B}{A}\right)^k}} \quad \text{distribuzione di Weibull}$$

dove:

$F(H_s \leq \hat{H}_s)$ è la probabilità che H_s non superi il valore di soglia di altezza significativa, $\hat{H}_s$;

B è il parametro del sito;

A è il parametro di scala;

k è il parametro di forma.

Il valore di k viene posto pari a 0.75, 1.00, 1.40 e 2.00; al variare di tale coefficiente, si esaminano 4 differenti distribuzioni a lungo termine di Weibull.

Il primo passo relativo all'applicazione della metodologia consiste nel prendere i valori di altezza d'onda significativa di input e posizionarli in ordine decrescente. Ad ogni valore di H_s viene assegnata una probabilità (plotting position) secondo le espressioni:

$$F(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0.44}{NT + 0.12} \quad (\text{secondo la Fisher-Tippet I})$$

$$F(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0.20 - \frac{0.27}{\sqrt{k}}}{NT + 0.20 + \frac{0.23}{\sqrt{k}}} \quad (\text{secondo la Weibull})$$

in cui:

$F(H_s \leq H_{sm})$ rappresenta la probabilità che l' m -esima altezza significativa non venga superata;

H_{sm} è l' m -esimo valore del campione delle altezze significative;



m rappresenta il numero degli eventi presenti nella classe di altezze d'onda significative considerate;

NT è il numero totale di tutti gli eventi presi in esame.

Per tutte le 5 distribuzioni (FT-I e Weibull con $k = 0.75, 1.00, 1.40$ e 2.00), sono stati considerati gli eventi con altezza al culmine della mareggiata superiore ad una soglia prefissata H_T (metodologia POT - *Atlante dei Mari Italiani*). I parametri A e B sono stati determinati verificando l'adattabilità ai dati delle 5 funzioni, attraverso un'analisi di regressione lineare effettuata con il metodo dei minimi quadrati e considerando le distribuzioni che offrono il più alto grado di correlazione.

Successivamente, i valori dell'altezza d'onda significativa, per differenti periodi di ritorno, sono calcolati, per le funzioni di probabilità considerate, mediante la seguente espressione:

$$H_{sr} = \hat{A}y_r + \hat{B}$$

dove:

$$y_r = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{\lambda T} \right) \right] \quad (\text{secondo la Fisher-Tippet I})$$

$$y_r = \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{\lambda T} \right) \right]^k \quad (\text{secondo la Weibull})$$

H_{sr} rappresenta l'altezza d'onda significativa, associata ad un periodo di ritorno T ;

λ (numero medio degli eventi per anno) = NT / K ;

K (lunghezza della registrazione dei dati di moto ondoso).

Il calcolo delle onde estreme è stato effettuato applicando il metodo POT sia all'intero paraggio, sia a ciascuno dei tre settori angolari in cui la traversia è stata suddivisa. La partizione del settore di traversia è quella riportata nell'*Atlante dei Mari Italiani* (Tab. 3.2.4.I), determinata sulla base della distribuzione geografica dei fetch, della frequenza di apparizione degli eventi ondosi e della direzione di provenienza dei picchi di mareggiata.

A ciascun settore di traversia è stata assegnata una diversa soglia H_T per la selezione della serie tronca (Tab. 3.2.4.I).



	H_T (m)
I settore: 310° - 10°	2.5
II settore: 10° - 70°	2.5
III settore: 70° - 130°	2.0
paraggio	3.0

Tabella 3.2.4.I - Valori di soglia adottati per l'applicazione del metodo POT

Tra le varie leggi di distribuzione esaminate è stata utilizzata la legge di distribuzione di Weibull che risulta essere quella che meglio si adatta ad interpretare la serie storica delle altezze d'onda significativa di valore superiore a quello delle soglie prefissate H_T .

Nella tabella 3.2.4.II sono riportati i parametri della legge di distribuzione adottata suddivisi per ciascun settore di traversia; tali parametri sono stati ricavati con il metodo dei momenti.

	k	A	B
I settore: 310° - 10°	1.40	0.7059	2.4628
II settore: 10° - 70°	1.40	0.9455	2.3406
III settore: 70° - 130°	0.75	0.3191	2.051
paraggio	1.40	0.6804	2.9293

Tabella 3.2.4.II - parametri della legge di distribuzione di Weibull

Nella tabella 3.2.4.III sono riportate le massime altezze significative al largo, relative all'intero paraggio, calcolate con la distribuzione di Weibull (Fig. 3.2.4.II) per assegnati tempi di ritorno T_r . Per i valori dei periodi di picco associati alle onde estreme così calcolate, è stata utilizzata la relazione altezza - periodo riportata nella figura 3.2.3.I.

Tempo di ritorno (anni)	H_{s max} (m)	T_p (s)
100	5.35	9.46
75	5.26	9.41
50	5.14	9.34
25	4.93	9.23
20	4.86	9.19
10	4.63	9.06
5	4.39	8.92
1	3.75	8.52

Tabella 3.2.4.III - eventi estremi relativi all'intero paraggio

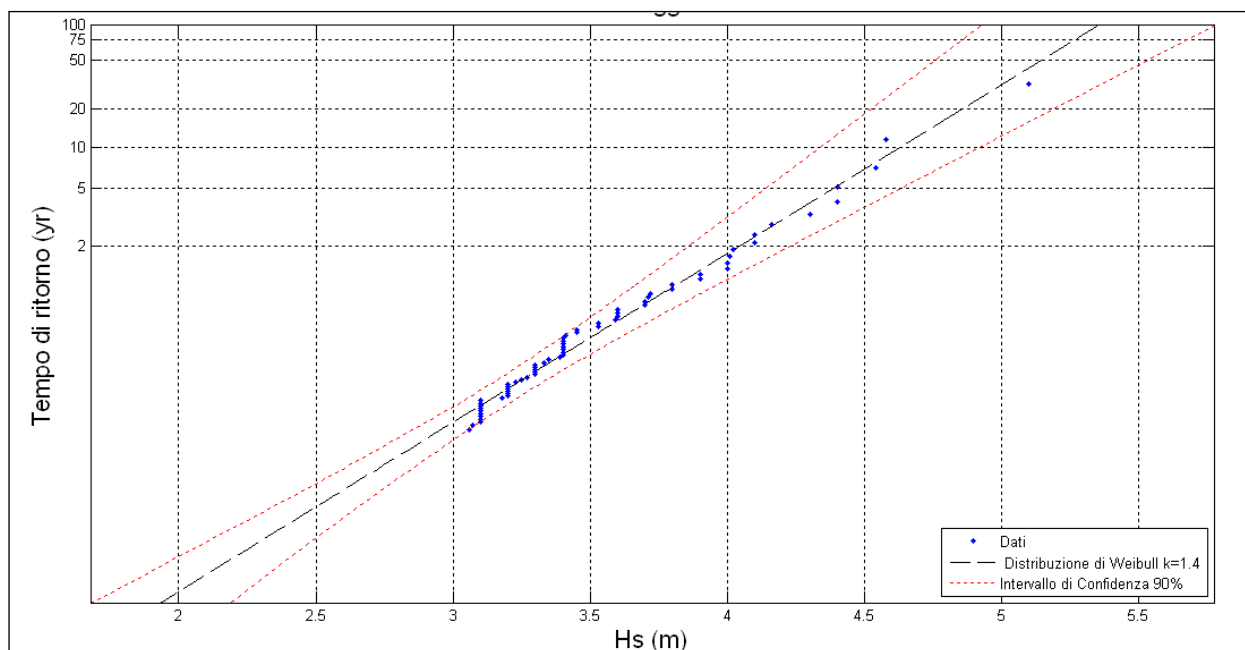


Figura 3.2.4.II - valori estremi di altezza d'onda nell'intero paraggio (distribuzione di Weibull)

La tabella 3.2.4.IV riporta le massime altezze significative relative al I° settore di traversia adottato, compreso tra le direzioni 310°N-10°N, e calcolate con la distribuzione di Weibull rappresentata in figura 3.2.4.III.

Per i valori dei periodi di picco associati alle onde estreme così calcolate, è stata utilizzata la relazione altezza - periodo ricavata dall'analisi dei dati d'onda riferiti al solo I° settore, di seguito riportata:

$$T_p = 5.45 H_0^{0.279}$$

Tempo di ritorno (anni)	$H_{s \max}$ (m)	T_p (s)
100	5.00	8.54
75	4.91	8.50
50	4.79	8.44
25	4.56	8.32
20	4.49	8.29
10	4.26	8.17
5	4.01	8.03
1	3.35	7.64

Tabella 3.2.4.IV - eventi estremi relativi al I settore di traversia 310°N - 10°N

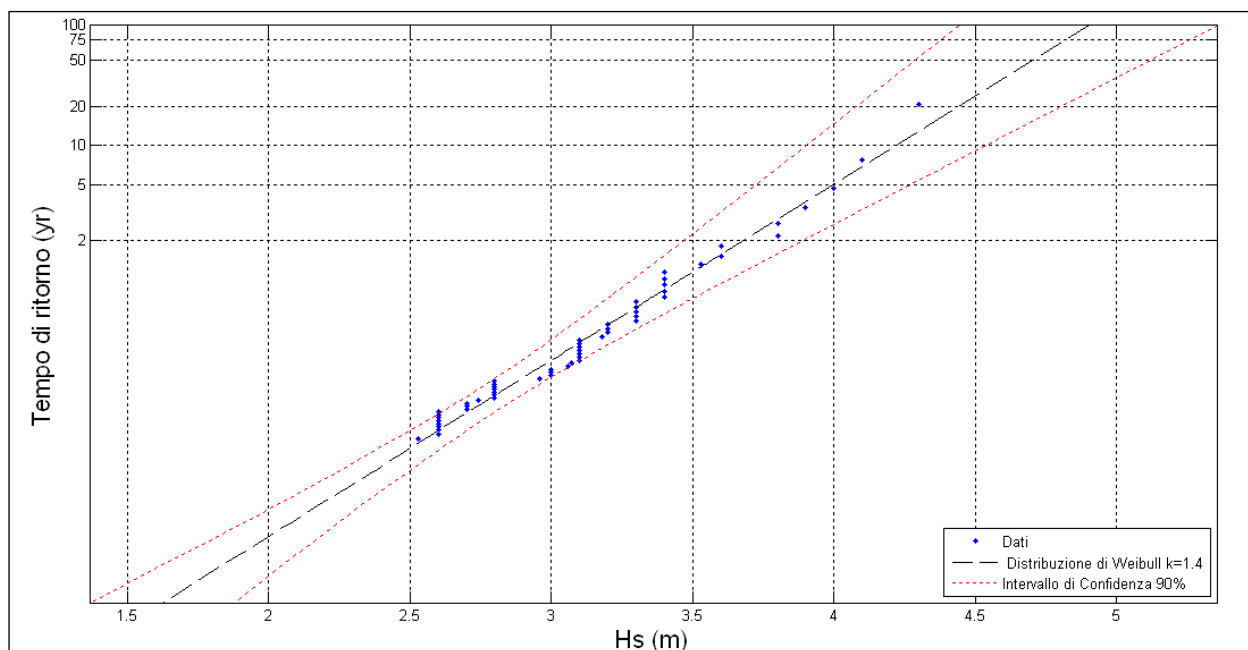


Figura 3.2.4.III - valori estremi di altezza d'onda nel I settore di traversia (distribuzione di Weibull)

La tabella 3.2.4.V riporta le massime altezze significative relative al II° settore di traversia adottato, compreso tra le direzioni 10°N-70°N, e calcolate con la distribuzione di Weibull rappresentata in figura 3.2.4.IV.

Per i valori dei periodi di picco associati alle onde estreme così calcolate, è stata utilizzata la relazione altezza - periodo ricavata dall'analisi dei dati d'onda riferiti al solo II settore, di seguito riportata:

$$T_p = 6.052 H_0^{0.272}$$

Tempo di ritorno (anni)	$H_{s \max}$ (m)	T_p (s)
100	5.60	9.67
75	5.49	9.62
50	5.31	9.53
25	5.01	9.38
20	4.91	9.33
10	4.59	9.16
5	4.25	8.97
1	3.33	8.39

Tabella 3.2.4.V - eventi estremi relativi al II settore di traversia 10°N - 70°N

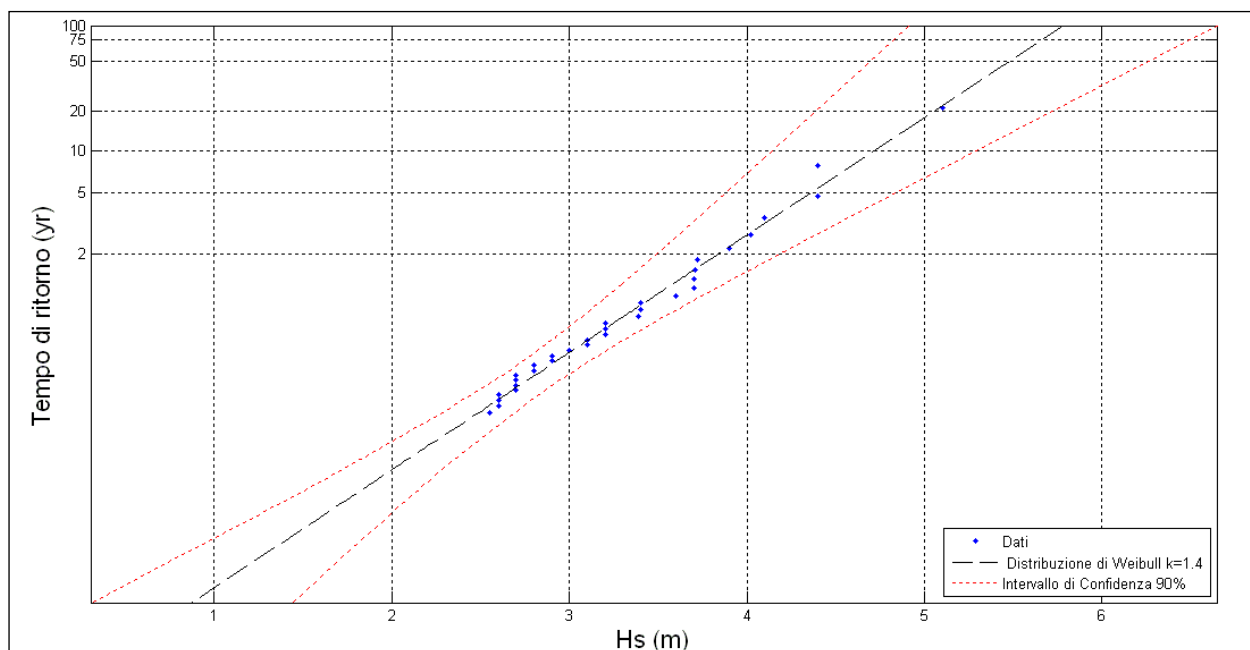


Figura 3.2.4.IV - valori estremi di altezza d'onda nel II settore di traversia (distribuzione di Weibull)

La tabella 3.2.4.VI riporta le massime altezze significative relative al III settore di traversia adottato, compreso tra le direzioni 70°N-130°N, e calcolate con la distribuzione di Weibull rappresentata in figura 3.2.4.V.

Per i valori dei periodi di picco associati alle onde estreme così calcolate, è stata utilizzata la relazione altezza - periodo ricavata dall'analisi dei dati d'onda riferiti al solo III° settore, di seguito riportata:

$$T_p = 5.774 H_0^{0.288}$$

Tempo di ritorno (anni)	$H_{s \max}$ (m)	T_p (s)
100	4.46	8.88
75	4.25	8.76
50	3.98	8.59
25	3.53	8.30
20	3.39	8.21
10	2.99	7.92
5	2.62	7.62
1	2.05	7.10

Tabella 3.2.4.VI - eventi estremi relativi al III settore di traversia 70°N - 130°N

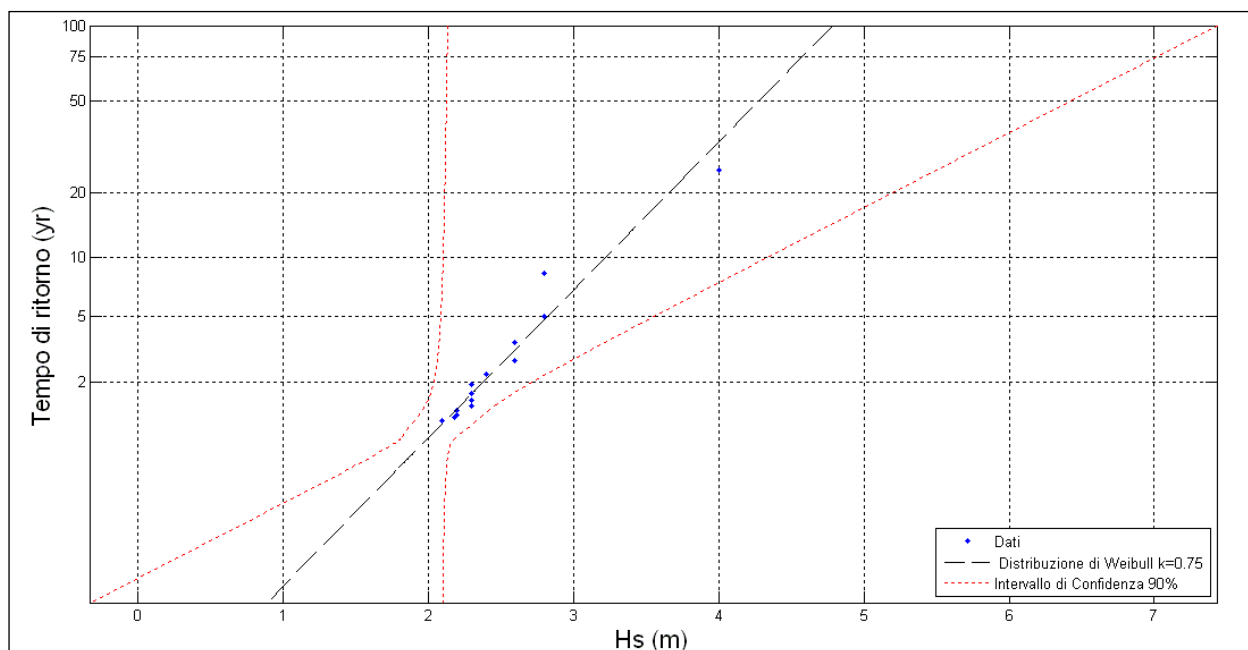


Figura 3.2.4.V - valori estremi di altezza d'onda nel III settore di traversia (distribuzione di Weibull)

Nella successiva tabella 3.2.4.VII sono stati stralciati dalle tabelle precedenti i valori di altezza d'onda, suddivisi per settore di traversia, associati al tempo di ritorno di 50 anni; i valori di altezza d'onda sottocosta corrispondenti saranno utilizzati per lo studio dell'ingressione marina nell'area costiera della spiaggia di Torre Guaceto.

settore di traversia	Tempo di ritorno 50 anni	
	$H_{s \max}$ (m)	T_p (s)
310° - 10°N	4.79	8.44
10° - 70°N	5.31	9.53
70° - 130°N	3.98	8.59

Tabella 3.2.4.VII - eventi estremi con $T_r=50$ anni suddivisi per settori di traversia

I valori massimi di altezza d'onda al largo si riferiscono al settore di traversia centrale compreso tra le direzioni 10°N e 70°N, seguiti dai valori relativi al I° settore di traversia (310°N – 10°N).

3.2.5. Clima meteomarinico equivalente del paraggio

Oltre alla modellazione del clima meteomarinico medio al largo, risulta utile conoscere ai fini della caratterizzazione della dinamica dei litorali in esame, il clima



meteomarinò equivalente annuale, ovvero la cosiddetta onda di modellazione o morfologica.

Il clima meteomarinò equivalente è stato valutato ricavando per ciascuna delle direzioni prescelte e per l'intero paraggio la mareggiata energeticamente equivalente all'intera serie storica disponibile.

L'onda di modellazione è caratterizzata da un'altezza d'onda H ed un periodo d'onda T , rappresentativi del contenuto energetico per il settore considerato. Tale onda è in grado di indurre effetti sul litorale equivalenti a quelli indotti da tutte le onde sulla base delle quali è stata calcolata.

L'altezza d'onda energeticamente equivalente per ciascuna direzione è stata calcolata con la relazione:

$$H_s = \sqrt{\frac{\sum_i H_{si}^2 \cdot T_{pi} \cdot t_i}{\sum_i T_{pi} \cdot t_i}}$$

in cui la sommatoria è estesa al numero di mareggiate che compete a ciascuna direzione considerata e H_{si} , T_{pi} e t_i sono rispettivamente l'altezza significativa, il periodo di picco e la durata di ciascuna mareggiata.

Analogamente il periodo da associare alla suddetta altezza d'onda è stato ricavato come media pesata dei periodi delle singole mareggiate rispetto alle relative durate secondo la relazione:

$$T_p = \frac{\sum_i T_{pi} \cdot t_i}{\sum_i t_i}$$

Per quanto riguarda l'individuazione dell'onda caratterizzante l'intero paraggio, si considerano ovviamente tutte le mareggiate calcolate nell'intero settore di traversia procedendo al calcolo dell'altezza e del periodo con la stessa metodologia innanzi descritta. In questo caso però si è reso necessario anche il calcolo della direzione di provenienza della mareggiata equivalente. A tale scopo, il flusso di energia è stato trattato come un vettore, le cui componenti hanno consentito di ricavare la direzione media con la seguente relazione:

$$\phi = \arctan \left[\frac{\sum_i H_{Si}^2 \cdot T_{pi} \cdot t_i \cdot \sin \theta_i}{\sum_i H_{Si}^2 \cdot T_{pi} \cdot t_i \cdot \cos \theta_i} \right]$$

Dallo studio del clima meteomarinario medio del paraggio risulta che alla direzione ENE compete l'altezza d'onda energeticamente equivalente più elevata (1.25m), con una frequenza di apparizione pari al 10.7%; le mareggiate equivalente da NNO (1.02m), da ESE (0.87m) e da Nord (1.14m) sono le più frequenti con percentuali di apparizione pari rispettivamente a 28.1%, 17.0% e 16.6%. L'onda caratteristica dell'intero paraggio ha un'altezza di 1.01m, periodo pari a 5.79s e direzione di provenienza 20°N (Tab. 3.2.5.I).

direzione (°N)	H _s (m)	T _p (s)
0	1.14	6.00
30	1.10	5.94
60	1.25	6.17
90	0.74	5.29
120	0.87	5.54
150	0.72	5.24
180	0.87	5.54
210	0.60	4.97
240	0.77	5.35
270	0.77	5.35
300	0.94	5.67
330	1.02	5.81
20	1.01	5.79

PARAGGIO

Tabella 3.2.5.I - Onde equivalenti annue

Le onde di modellazione sono in genere utilizzate per ottenere informazioni quali – quantitative sul trasporto solido costiero; si dimostra infatti che i flussi di energia per unità di lunghezza della cresta delle onde sono proporzionali, attraverso diversi fattori, al trasporto solido longitudinale.

3.2.6. Profondità di chiusura

E' stato eseguito il calcolo teorico della cosiddetta profondità di chiusura, o profondità di moto attivo dei sedimenti, che delimita lato mare la fascia litoranea interessata dal trasporto solido e da apprezzabili modifiche dei fondali per effetto di fenomeni di deposito o di erosione.

A tal fine è stata applicata la nota formula di Hallermaier che lega questa profondità all'altezza d'onda significativa superata 12 ore all'anno secondo la formula:



$$h_c = 2,28 H_o - 10,9 H_{so}^2 / L_o$$

o quella modificata da Berkemeier:

$$h_c = 1,75 H_o - 9,2 H_{so}^2 / L_o$$

dove:

- H_{so} rappresenta l'altezza d'onda significata al largo superata in media 12 ore/anno pari a circa 3.72m;
- $L_o = gT_m^2 / 2\pi$ è la lunghezza dell'onda di altezza H_o pari a circa 100.0m;
- $T_m = T_p / 1.25$ rappresenta il periodo medio dell'onda al largo superata in media 12 ore/anno pari a circa 8.0s.

Applicando la formula di Hallermaier si ottiene una profondità di chiusura h_c pari a circa 6.1m, mentre con la formula di Berkemeier si ottiene un valore minore pari a circa 4.5m.



3.3. MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA

3.3.1. Generalità

L'onda, nella sua propagazione da largo verso riva, subisce modifiche di forma, altezza, direzione e celerità. Le caratteristiche delle onde variano a causa di fenomeni quali lo shoaling, la rifrazione, la diffrazione, la riflessione e il frangimento, associati a fenomeni non-lineari dovuti alle interazioni fra le stesse onde, e tra le onde e le correnti.

Nella presente relazione attraverso l'applicazione di un idoneo modello matematico sono stati elaborati i piani d'onda che riproducono l'andamento dei raggi d'onda dal largo fino alla costa di Torre Guaceto.

3.3.2. Il modello matematico SWAN

La propagazione del clima ondoso da largo verso riva è stata simulata con il modello numerico SWAN, acronimo di Simulating WAves Nearshore, la cui implementazione è stata sviluppata dal Dipartimento di Meccanica dei Fluidi dell'Università di Delft. Lo SWAN permette di ottenere stime reali dei parametri d'onda in aree costiere, laghi ed estuari una volta note le condizioni del fondo, del vento e delle correnti. In particolare, il modello simula lo sviluppo degli spettri d'onda che viaggiano da acque profonde verso acque poco profonde, come nel caso del moto ondoso che si propaga verso riva.

Nel modello SWAN sono rappresentati i seguenti processi di propagazione d'onda:

- propagazione lungo lo spazio geografico;
- rifrazione dovuta a variazioni del fondale marino e della corrente;
- shoaling dovuto a variazioni del fondale marino e della corrente;
- bloccaggio e riflessione da parte di correnti in direzione opposta;
- trasmissione, bloccaggio o riflessione da parte di ostacoli.

Inoltre, nello SWAN vengono rappresentati i seguenti processi di generazione e dissipazione d'onda:

- generazione dovuta al vento;
- dissipazione dovuta alla rottura in cresta (whitecapping);
- dissipazione dovuta alla rottura d'onda indotta dalla profondità;
- dissipazione dovuta all'attrito sul fondo;
- interazioni onda-onda (quadruple e triple);



- diffrazione a tergo di ostacoli.

In funzione dei molteplici processi che l'algoritmo di calcolo del modello riesce a simulare, attraverso la sua applicazione nel caso del paraggio di Torre Guaceto è stato possibile riprodurre con buona approssimazione le trasformazioni delle onde dal largo fino alla costa in prossimità dell'area in esame.

Il modello SWAN può essere utilizzato in condizioni sia stazionarie sia non stazionarie, considerando coordinate sia cartesiane (nel caso di piccole scale) sia sferiche (nel caso di piccole e grandi scale).

Nel modello SWAN le onde sono descritte attraverso la densità d'azione spettrale dell'onda bidimensionale anche quando sono presenti fenomeni non lineari (ad esempio nella zona dei frangenti). La ragione fondamentale per l'utilizzo dello spettro anche in condizioni fortemente non lineari è che, anche in tali condizioni, è possibile definire con buona accuratezza la distribuzione spettrale del momento del secondo ordine delle onde (sebbene esso non è sufficiente per descrivere le onde da un punto di vista statistico). Lo spettro utilizzato in SWAN è la densità d'azione spettrale $N(\sigma, \theta)$ anziché la densità di energia spettrale $E(\sigma, \theta)$ poiché, in presenza di correnti, la densità d'azione spettrale viene conservata mentre non lo è la densità d'energia.

Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa σ e la direzione d'onda θ (la direzione normale alla cresta dell'onda di ogni componente spettrale). La densità d'azione è funzione della densità d'energia e della frequenza relativa:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

Nella presente modellazione, l'evoluzione dello spettro d'onda è descritta attraverso la seguente equazione del bilancio d'azione spettrale valida per coordinate cartesiane, che rappresenta l'equazione fondamentale di tutta la teoria dello SWAN:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial z} c_z N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

In tale equazione il primo termine di sinistra rappresenta la variazione della densità d'azione spettrale rispetto al tempo; il secondo, il terzo e il quarto termine rappresentano la propagazione dell'azione nello spazio geografico (con le velocità di propagazione c_x , c_y e c_z riferite, rispettivamente, alle direzioni x , y e z); il quinto termine rappresenta la variazione della frequenza relativa dovuta alle variazioni di profondità e delle correnti (con



la velocità di propagazione $c\sigma$ riferita allo spazio delle frequenze σ); il sesto termine, l'ultimo dei termini di sinistra dell'equazione, rappresenta la rifrazione indotta dalla profondità e dalla corrente (con la velocità di propagazione $c\theta$ riferita allo spazio delle direzioni d'onda θ).

Le espressioni per descrivere tali velocità di propagazione sono date dalla teoria dell'onda lineare di Stokes al 1° ordine. Il termine S , che è comunque funzione della frequenza e delle direzioni d'onda ($S = f(\sigma, \theta)$), presente nei termini a destra dell'equazione del bilancio d'azione spettrale, rappresenta il termine sorgente rispetto agli effetti della generazione, della dissipazione e delle interazioni non lineari onda-onda.

Le onde propagate con lo SWAN vengono definite da un valore di altezza d'onda, H_s , di periodo di picco, T_p , e di direzione di provenienza rispetto al Nord cartografico. Nelle propagazioni effettuate con lo SWAN è stato utilizzato uno spettro di tipo Jonswap con γ (coefficiente di picco dello spettro) pari a 3.3, assumendo un range di direzioni spettrali pari a 180° , una frequenza minima dello spettro $f_1 = 0.01$ Hz, e una frequenza massima $f_2 = 0.5$ Hz. Il frangimento del moto ondoso per raggiunto limite di profondità è stato definito nell'input del programma in base al rapporto limite $H_s/d = 0.78$, in cui d è la profondità.

L'applicazione del modello prevede la definizione di una griglia di base rappresentativa della batimetria del paraggio; l'output del modello consiste nella definizione delle condizioni ondose, in ciascun nodo della griglia di calcolo fissata, espresse in termini di altezza d'onda, periodo e direzione.

Nello specifico il modello SWAN è stato applicato per riprodurre le trasformazioni dal largo verso costa delle onde estreme con tempo di ritorno T_r pari a 50 anni, nonché per simulare la propagazione delle onde morfologiche o equivalenti del paraggio.

3.3.3. Griglie di calcolo

Il primo passo nello studio di propagazione del clima ondoso dal largo verso la riva con il modello SWAN ha riguardato la preparazione di griglie di calcolo ricavate dalla batimetria in corrispondenza del paraggio di Torre Guaceto.

Le quote batimetriche al largo sono state desunte dalle carte nautiche della zona prodotte dall'Istituto Idrografico della Marina. Sono state utilizzate le tavole IIM n. 29 e n. 30, in scala 1:100.000; le tavole IIM sono state informatizzate e georeferenziate secondo



la rappresentazione conforme di Gauss-Boaga con reticolato piano nel sistema nazionale (Gauss-Boaga) riferito all'ellissoide Roma 40.

Utilizzando un software commerciale di topografia, i punti batimetrici della tavola IIM sono stati opportunamente digitalizzati e quindi, attraverso l'interpolazione per triangolazione delle quote batimetriche, è stato ricostruito il modello digitale della batimetria da cui infine sono stati ricavati i valori di profondità nei nodi di griglie di calcolo prefissate.

Nella zona più prossima alla riva, le informazioni desunte dalla carta nautica IIM sono state integrate con i dati estratti da alcuni rilievi batimetrici di dettaglio disponibili.

Per l'applicazione del modello è stato necessario determinare griglie differenti a seconda della direzione di provenienza del moto ondoso al largo.

Nello specifico per le mareggiate con direzione compresa tra 330°N e 60°N sono state predisposte una griglia generale ed una di dettaglio orientate entrambe con l'asse delle X secondo la direzione 126°N , e con l'asse Y perpendicolare al primo ed orientato secondo la direzione 36°N . La griglia generale a maglia quadrata con passo di lunghezza pari a 100 m (figura 4.3.3.I.a, figura 4.3.3.II.a), è costituita da 480 righe (// asse X) e 1130 colonne (// asse Y) ed ha origine nel punto di coordinate Gauss-Boaga 2720200E, 4526900N.

La griglia di dettaglio per le direzioni 330°N – 60°N ha maglia quadrata con passo 10m ed è costituita da 180 righe e 600 colonne con origine posta alle coordinate 2754800E, 4511200N (figura 3.3.3.I.a, figura 3.3.3.III.a).

Per le mareggiate con direzione al largo compresa tra 60°N e 120°N , la griglia generale e quella di dettaglio sono state orientate con l'asse delle X secondo la direzione Est (90°N) e con l'asse Y orientato secondo la direzione Nord (0°N). In particolare la griglia generale con passo 100m è costituita da 740 colonne (// asse Y) e 476 righe (// asse X) ed ha origine nel punto di coordinate 2745600E, 4483100N (figura 3.3.3.I.b, figura 3.3.3.III.a). La griglia di dettaglio ortogonale ha maglia quadrata con passo 10m ed è costituita da 380 righe e 560 colonne con origine posta alle coordinate 2755200E, 4508200N (figura 3.3.3.I.b, figura 3.3.3.III.b).

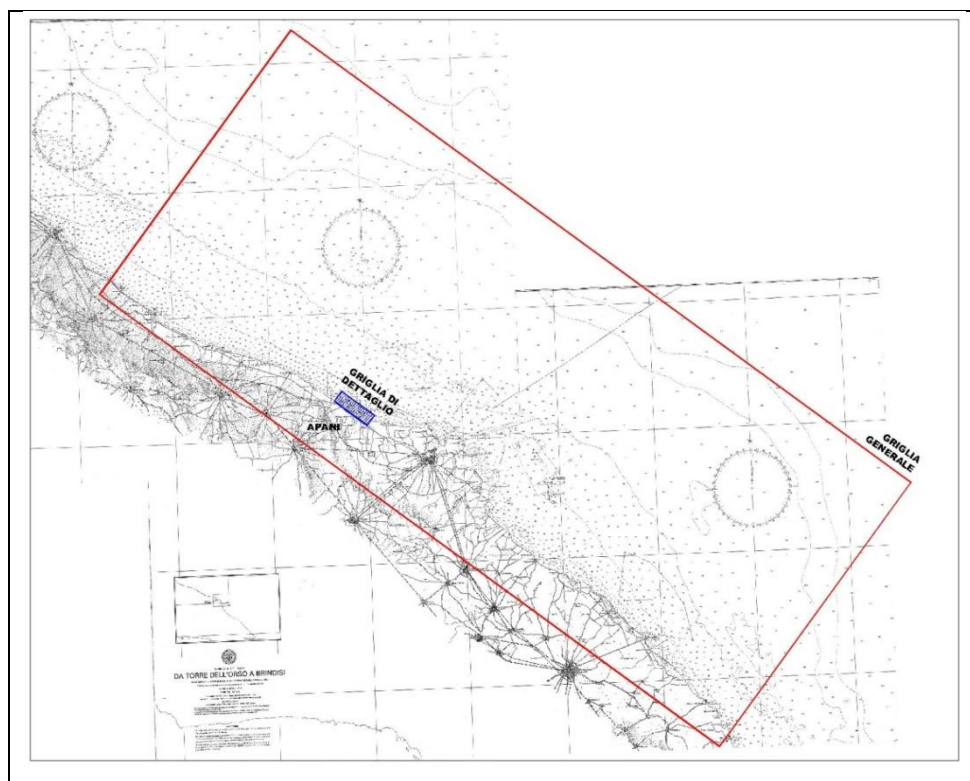


Figura 3.3.3.I.a - carta nautica IIM con individuazione delle griglie di calcolo per le mareggiate comprese tra 310° - 70° N

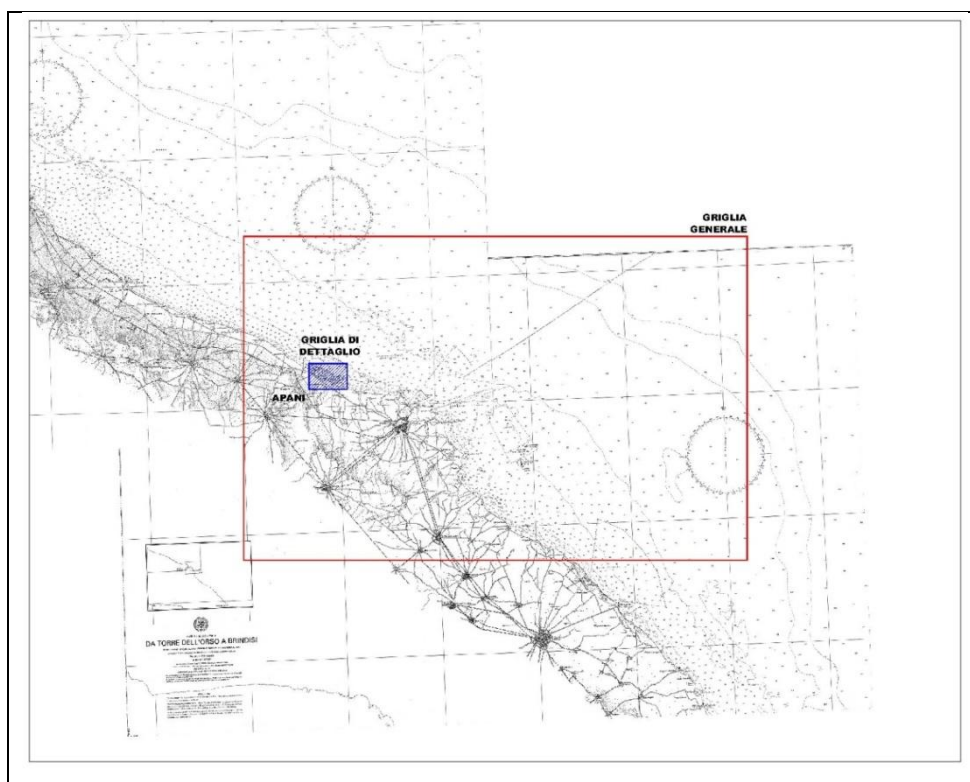


Figura 3.3.3.I.b - carta nautica IIM con individuazione delle griglie di calcolo per le mareggiate comprese tra 70° - 130° N

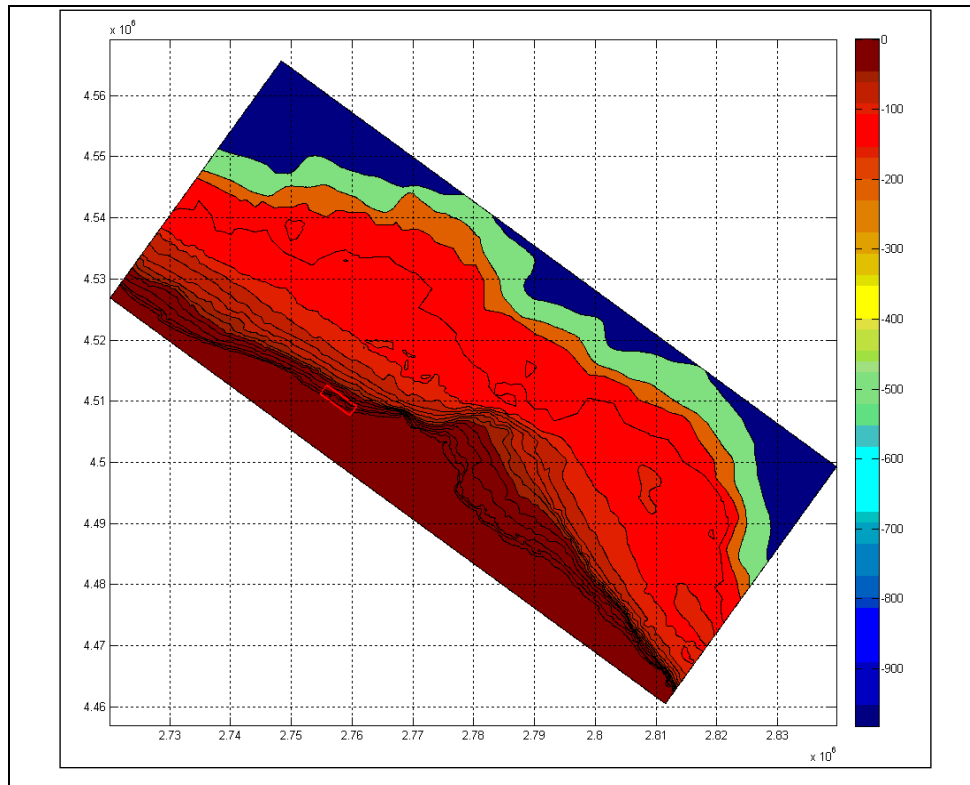


Figura 3.3.3.II.a - griglia generale implementata nel modello SWAN (mareggiate comprese tra 310° - 70°N).

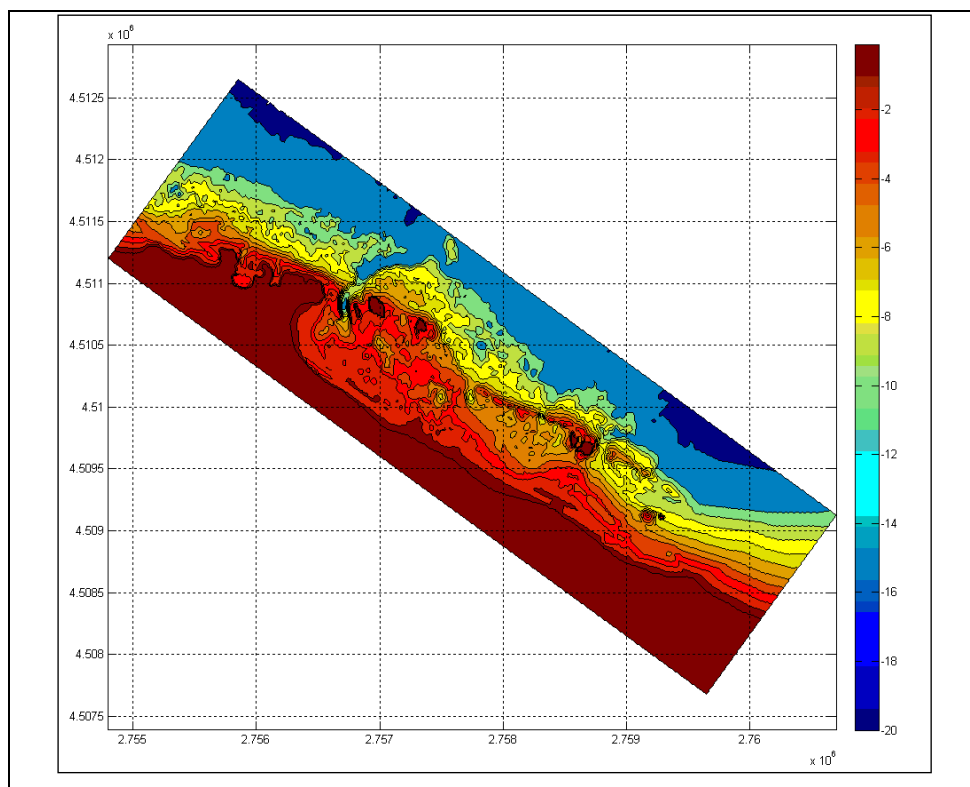


Figura 3.3.3.II.b - griglia di dettaglio implementata nel modello SWAN (mareggiate comprese tra 310° - 70°N).

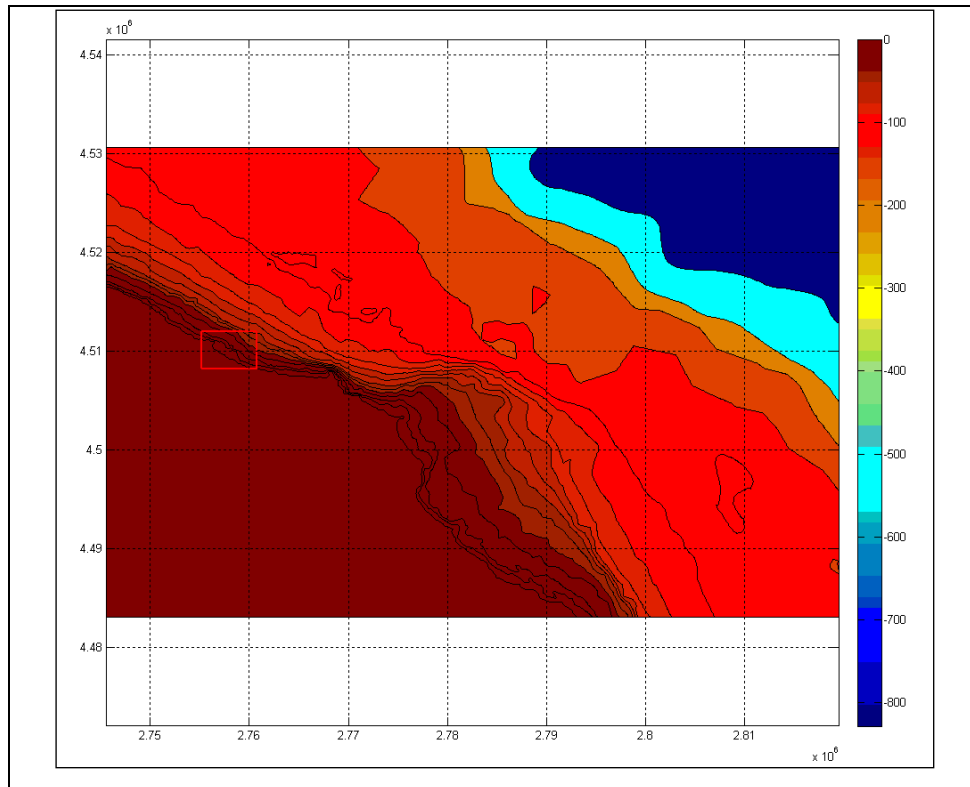


Figura 3.3.3.III.a - griglia generale ortogonale implementata nel modello SWAN (mareggiate comprese tra 70° - 130°N).

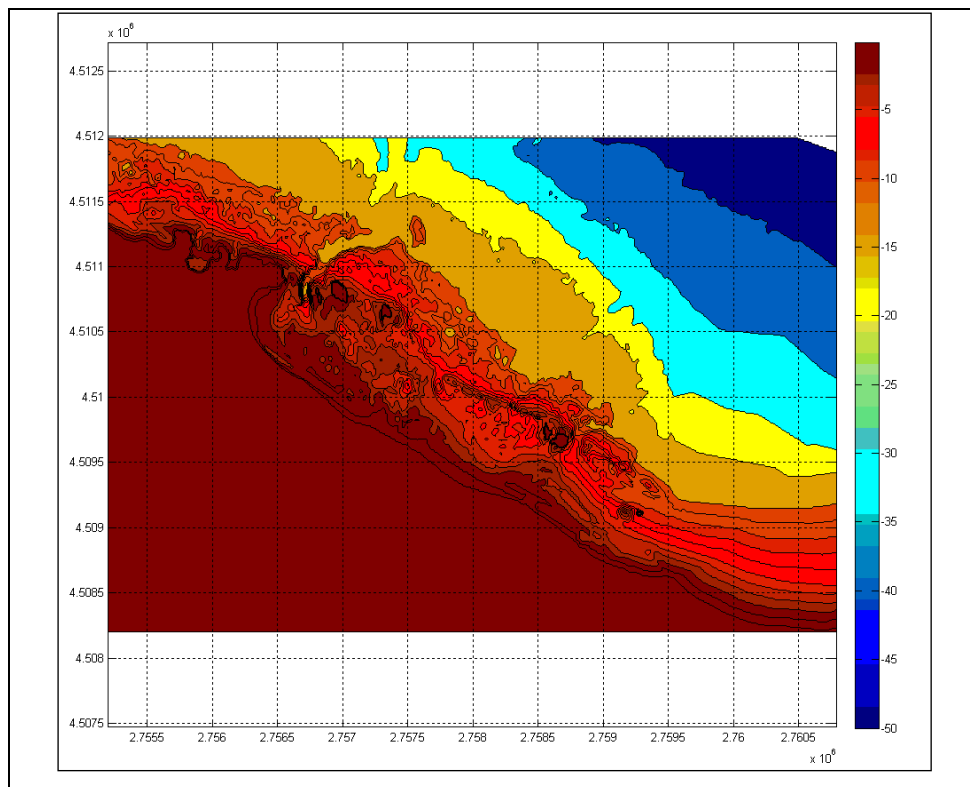


Figura 3.3.3.III.b - griglia di dettaglio ortogonale implementata nel modello SWAN(mareggiate comprese tra 70° - 130°N)

3.3.4. Propagazione sottocosta degli eventi estremi

La propagazione da largo verso riva degli eventi estremi di moto ondoso associati ai periodi di ritorno più significativi, risulta utile nel dimensionamento e nella verifica delle strutture costiere, in cui sono necessari i valori delle onde di progetto che possono direttamente incidere su di esse.

Nel presente studio sono state propagate le onde riportate in tabella 3.3.4.I:

dir (°N)	Tempo di ritorno T_r 50 anni	
	$H_s \text{ max (m)}$	$T_p \text{ (s)}$
330	4.79	8.44
0	4.79	8.44
30	5.31	9.53
60	5.31	9.53
90	3.98	8.59
120	3.98	8.59

Tabella 3.3.4.I - eventi estremi di moto ondoso al largo simulati con il modello SWAN

Le figure da 3.3.4.I a 3.3.4.VI rappresentano le mappe di agitazione ondosa ricostruite con il modello a partire dai valori di altezza d'onda di cui alla tabella precedente.

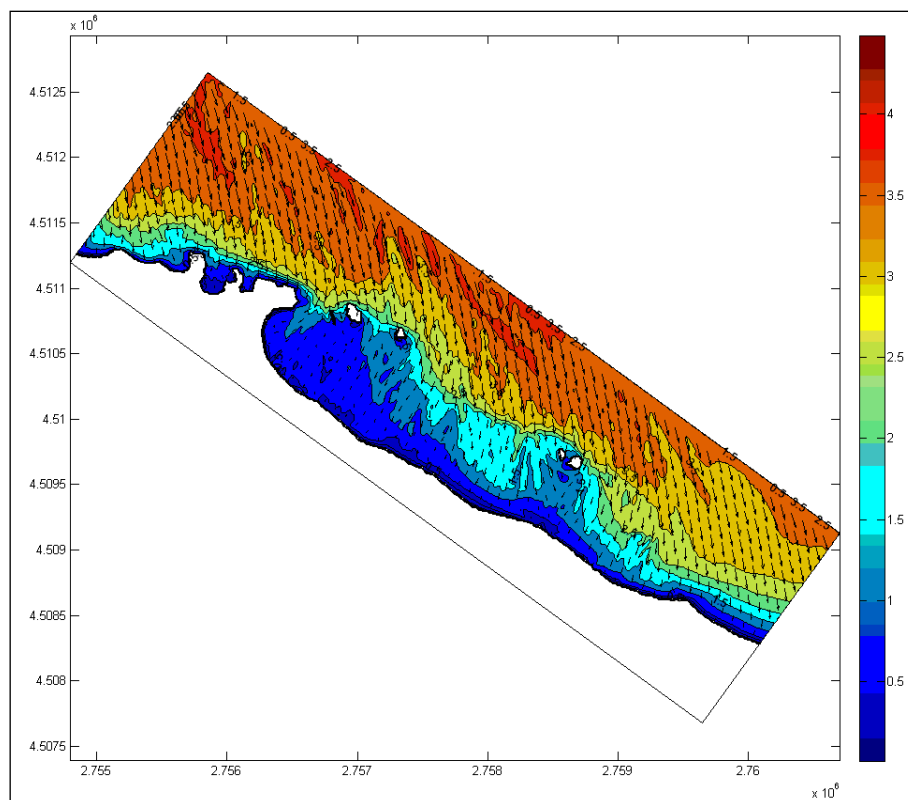


Figura 3.3.4.I - propagazione del moto ondoso da 330°N – $T_r = 50$ anni

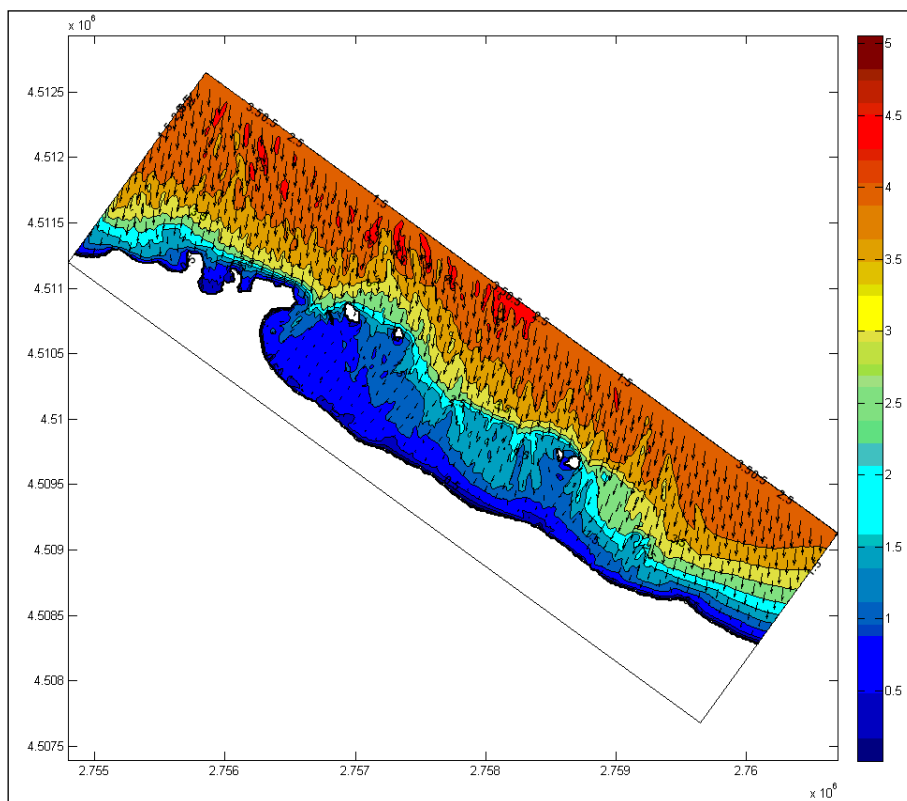


Figura 3.3.4.II - propagazione del moto ondoso da 0°N - Tr = 50 anni.

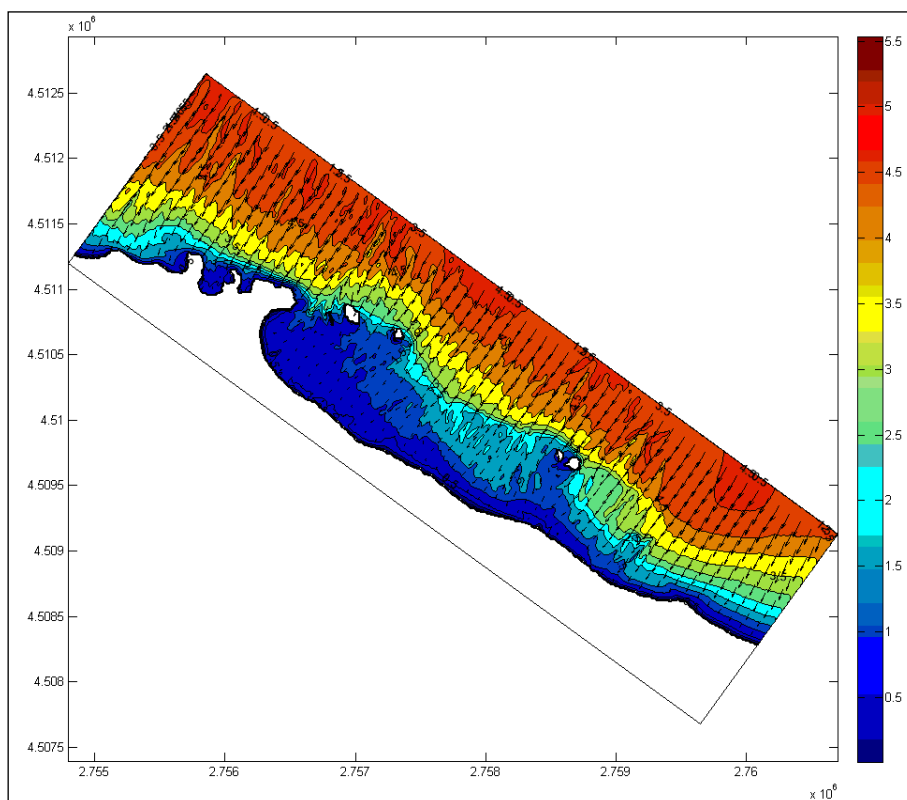


Figura 3.3.4.III - propagazione del moto ondoso da 30°N - Tr = 50 anni.

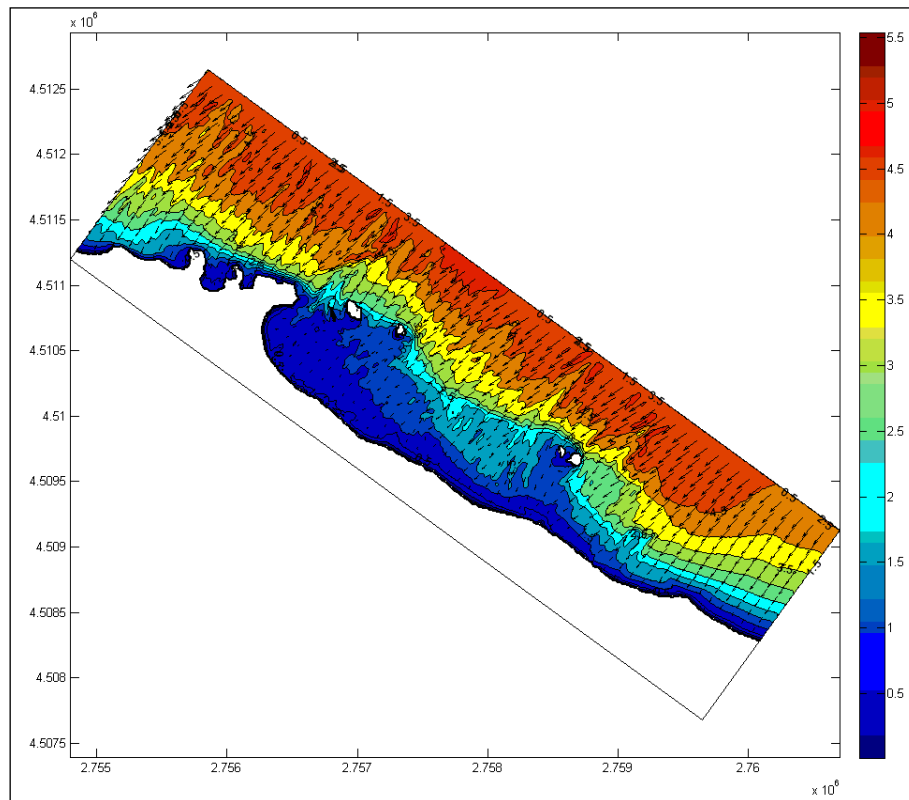


Figura 3.3.4.IV - propagazione del moto ondoso da 60°N - Tr = 50 anni.

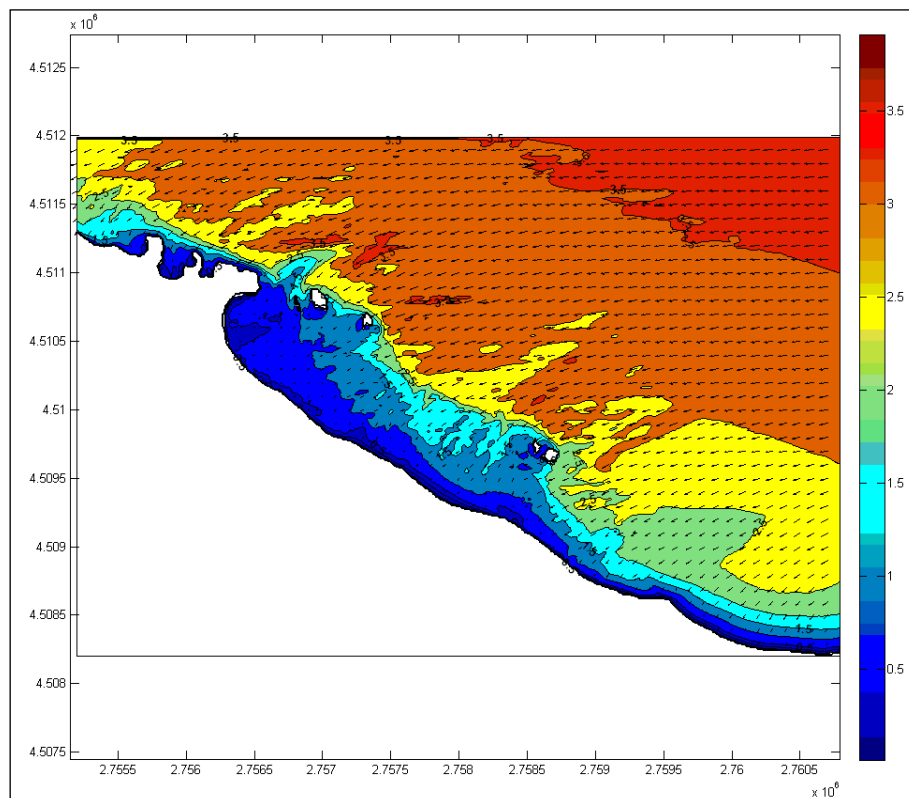


Figura 3.3.4.V - propagazione del moto ondoso da 90°N - Tr = 50 anni.

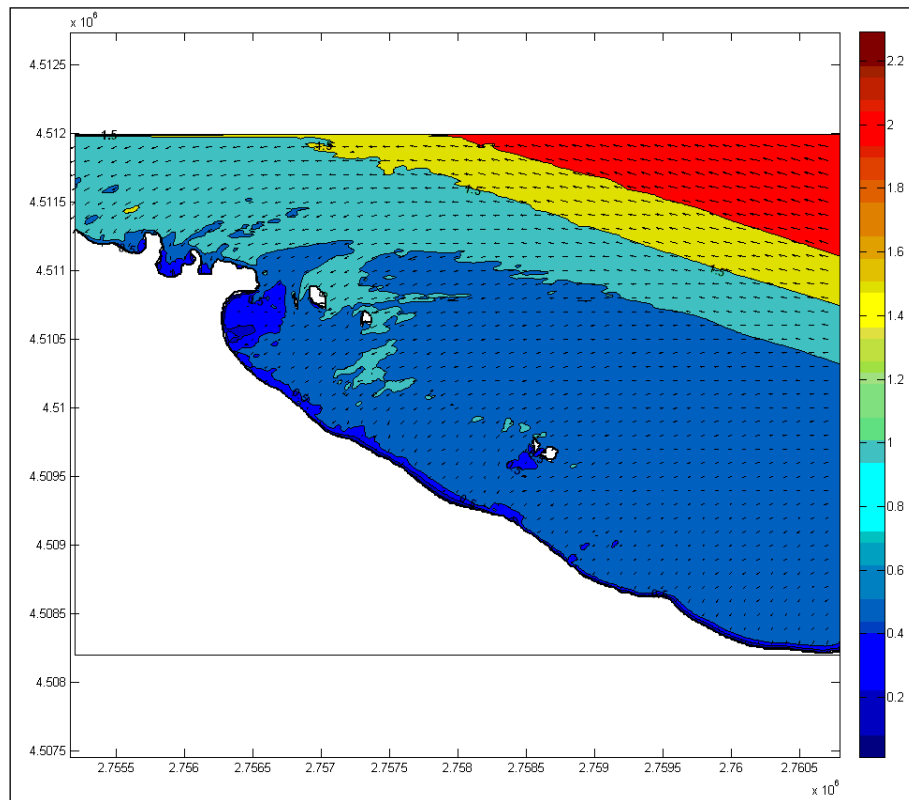


Figura 3.3.4.VI - propagazione del moto ondoso da 120°N - $T_r = 50$ anni

Dai piani d'onda precedentemente riportati sono stati estrapolati i valori di altezza d'onda calcolati in un punto di misura (A) ubicato ad una profondità di circa -10m nello specchio acqueo antistante l'area in esame (Fig. 3.3.4.VII). Nella tabella 3.3.4.II sono riportati i valori di altezza d'onda nel punto di misura suindicato per ciascuna delle mareggiate considerate.



Figura 3.3.4.VII - punto di misura in prossimità dell'area in esame

Tali valori sono stati utilizzati per l'applicazione del modello con cui è stato determinato il wave setup dovuto alle onde, ovvero la variazione del livello marino associata alla propagazione del moto ondoso durante le mareggiate nella zona più prossima alla riva.

onda al largo			punto di misura (A)		
H (m)	T (s)	dir (°N)	H (m)	T (s)	dir (°N)
4.79	8.44	330	3.70	8.39	356
4.79	8.44	0	4.19	8.39	16
5.31	9.53	30	4.53	9.56	38
5.31	9.53	60	4.37	9.56	57
3.98	8.59	90	2.67	8.39	73
3.98	8.59	120	0.66	8.39	77

Tabella 3.3.4.II – Altezze d'onda nel punto di misura in prossimità dell'area in esame.

3.3.5. Propagazione sottocosta delle onde equivalenti

Nei precedenti paragrafi è stata già richiamata l'importanza dell'individuazione delle onde di modellazione ai fini della determinazione del trasporto solido longitudinale. Attraverso il modello matematico SWAN sono stati riprodotti i piani d'onda relativi alle onde di modellazione, o morfologiche, riportate nella tabella 3.3.5.I.

	direzione (°N)	H _s (m)	T _p (s)	durata (%)
	0	1.14	6.00	13.85
	30	1.10	5.94	7.74
	60	1.25	6.17	8.99
	90	0.74	5.29	10.81
	120	0.87	5.54	14.19
	330	1.02	5.81	23.53
PARAGGIO	20	1.01	5.79	-

Tabella 3.3.5.I: onde equivalenti annue.

Nelle figure da 3.3.5.I a 3.3.5.VII sono riportate le mappe di agitazione ondosa ottenute con le condizioni ondose al largo di cui alla precedente tabella. Le figure riportano, per ciascuna onda esaminata, i piani d'onda riferiti alla griglia generale ed a quella di dettaglio indicate nel paragrafo 3.3.3.

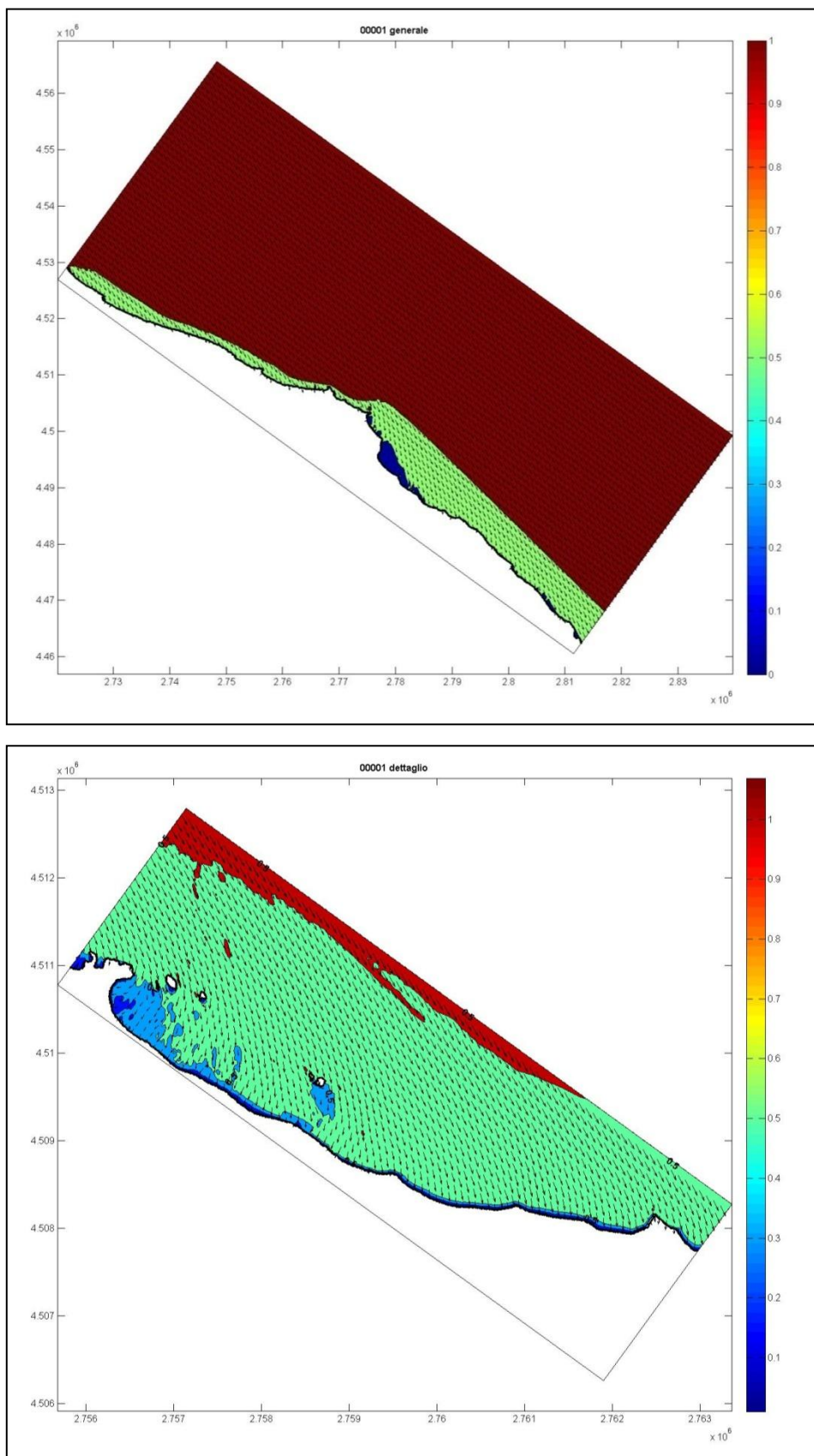


Figura 3.3.5.I: onda equivalente da NNO (330° N) – $H_s = 1.02\text{m}$, $T_p = 5.81\text{s}$.

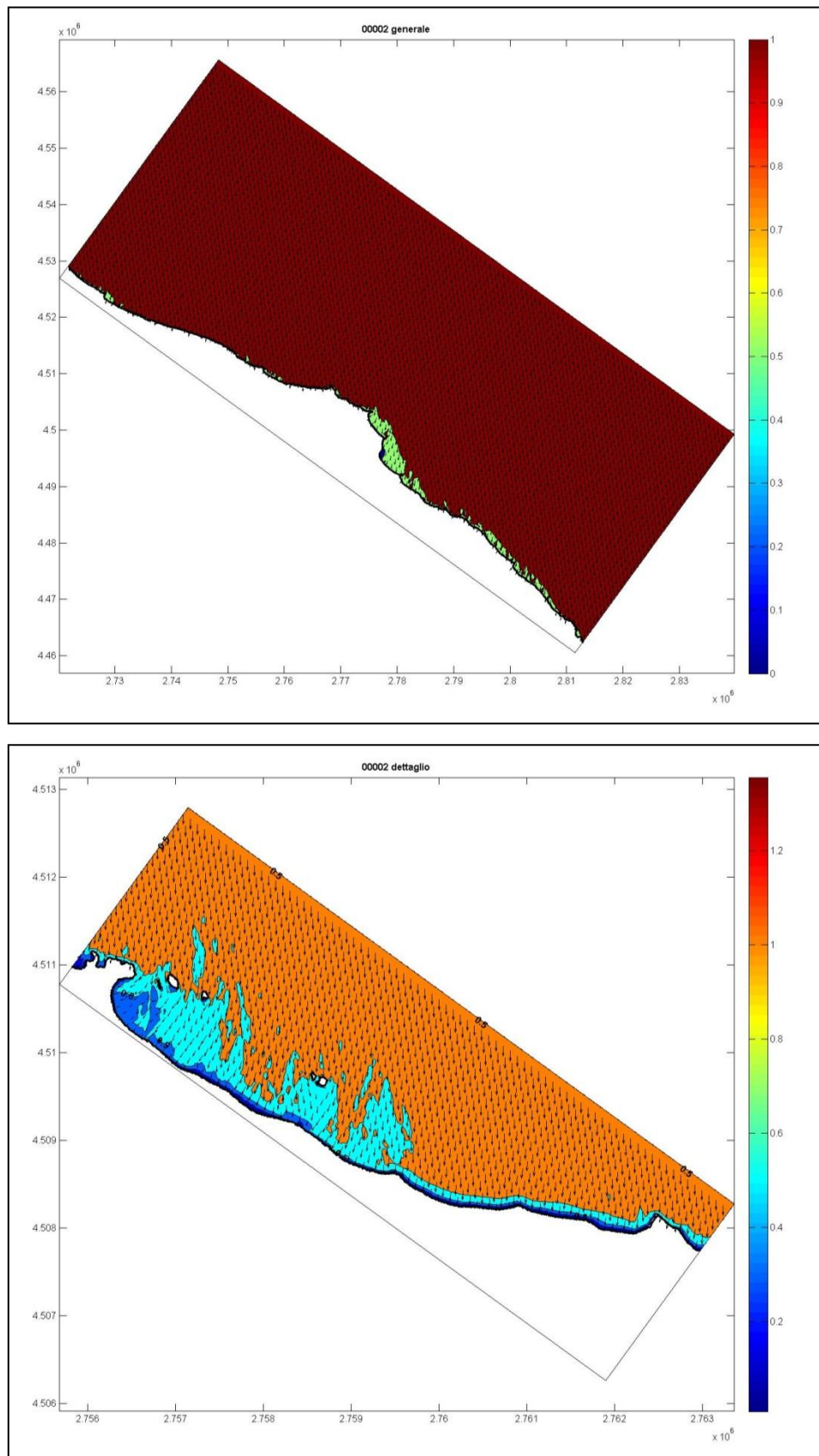


Figura 3.3.5.II: onda equivalente da Nord ($0^\circ N$) – $H_s = 1.14m$, $T_p = 6.00s$.

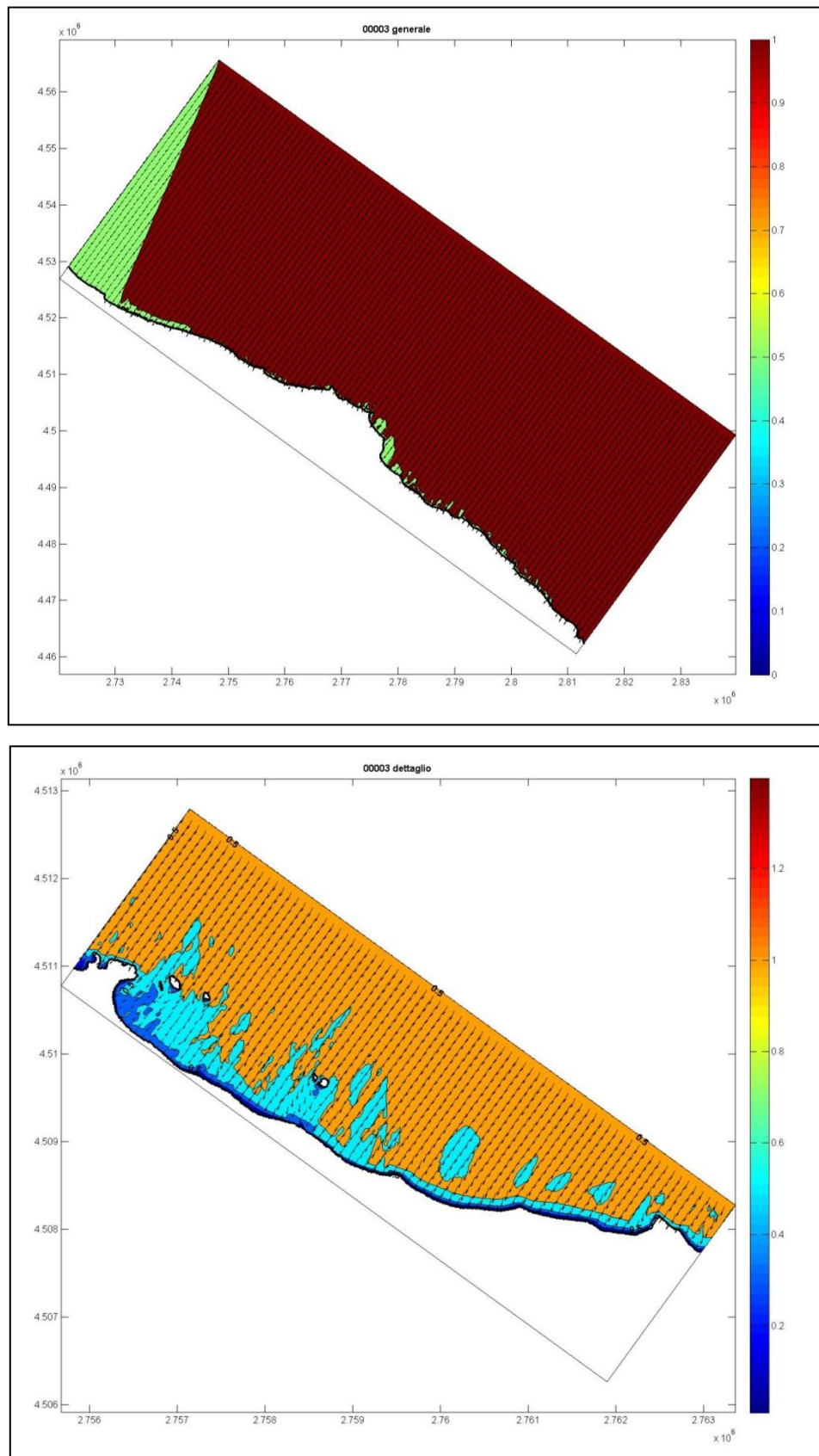


Figura 3.3.5.III: onda equivalente da NNE (30°N) – $H_s = 1.10\text{m}$, $T_p = 5.94\text{s}$.

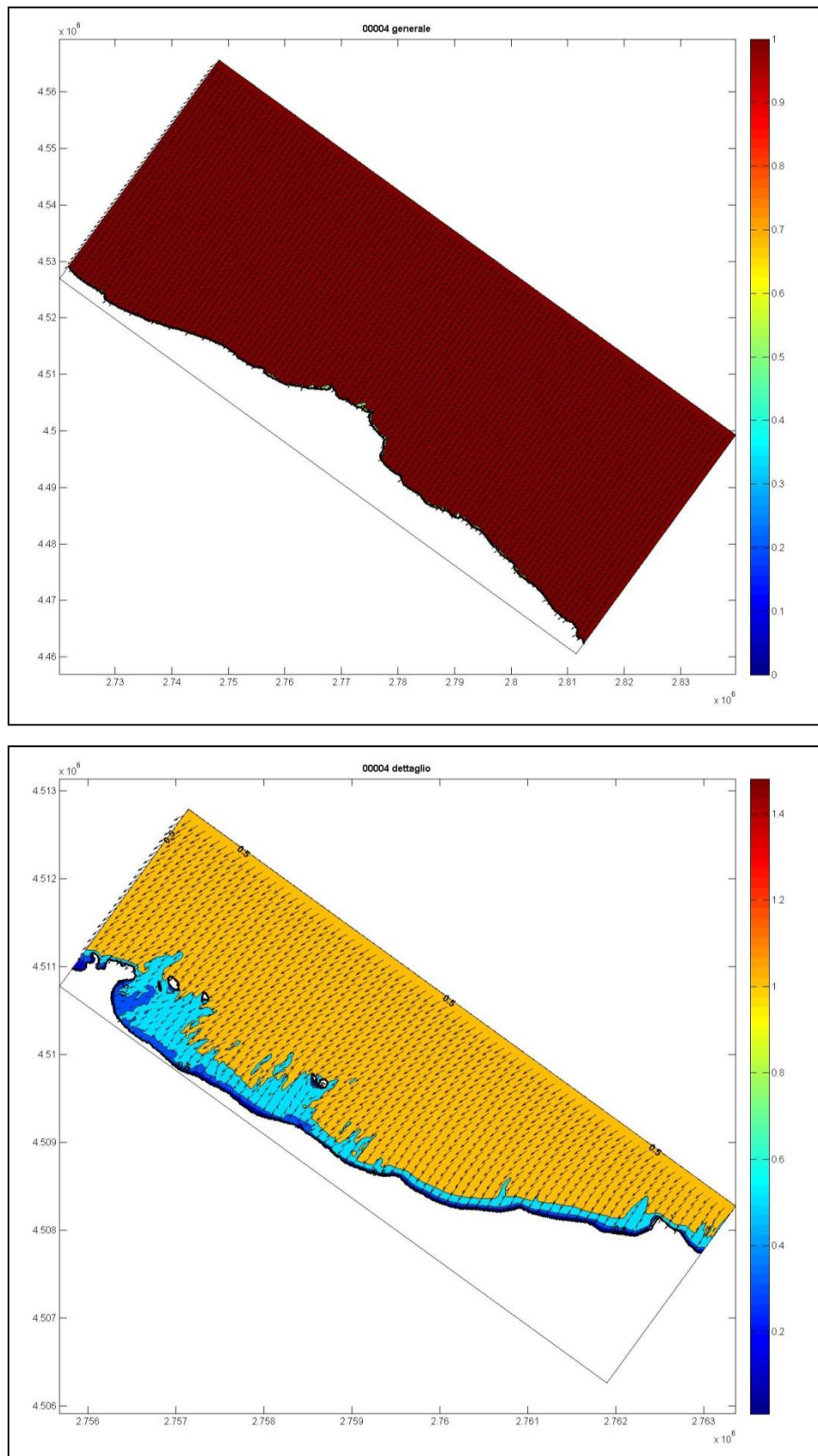


Figura 3.3.5.IV: onda equivalente da ENE (60°N) – $H_s = 1.25\text{m}$, $T_p = 6.17\text{s}$.

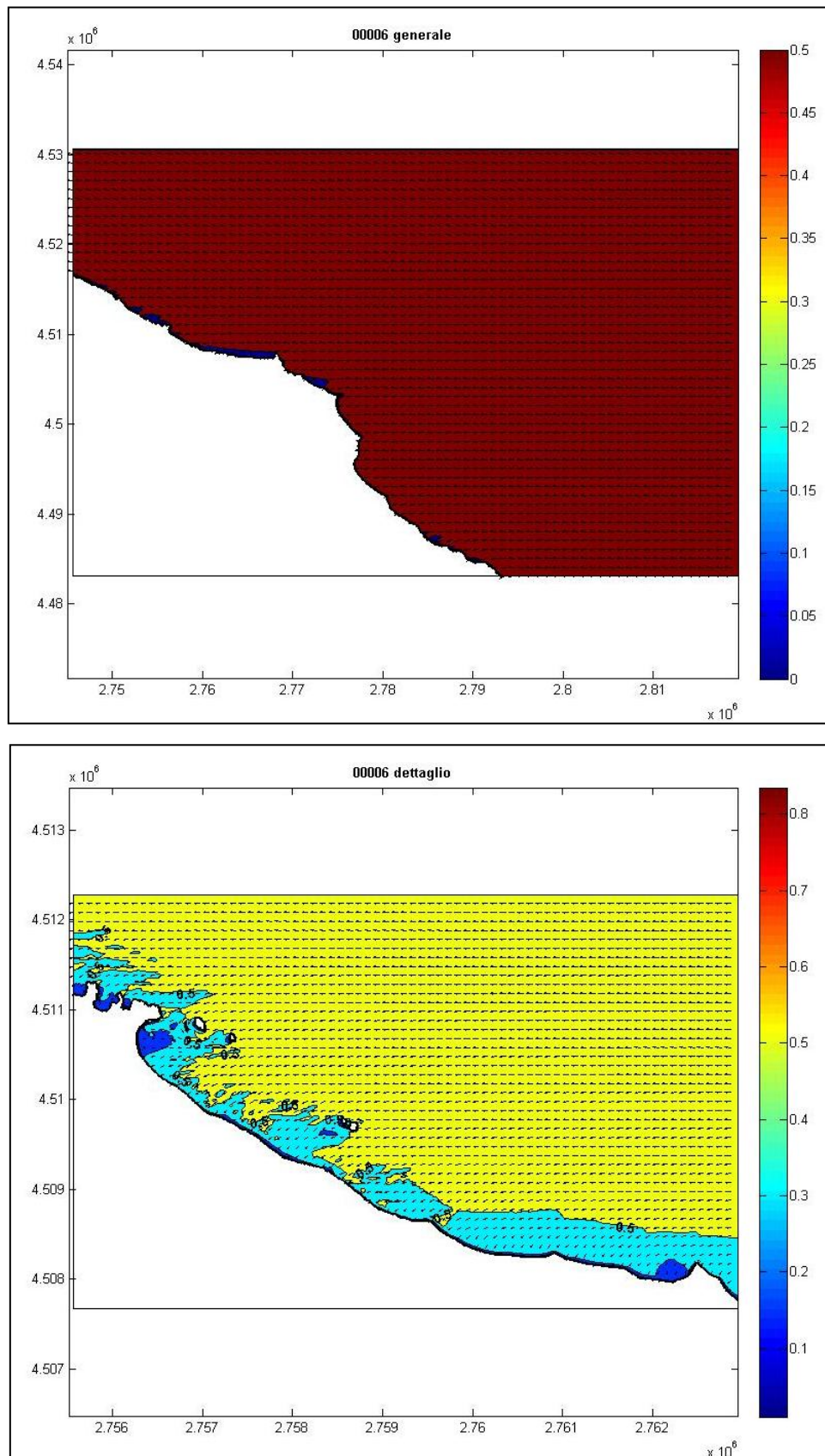


Figura 3.3.5.V: onda equivalente da Est (90°N) – $H_s = 0.74\text{m}$, $T_p = 5.29\text{s}$.

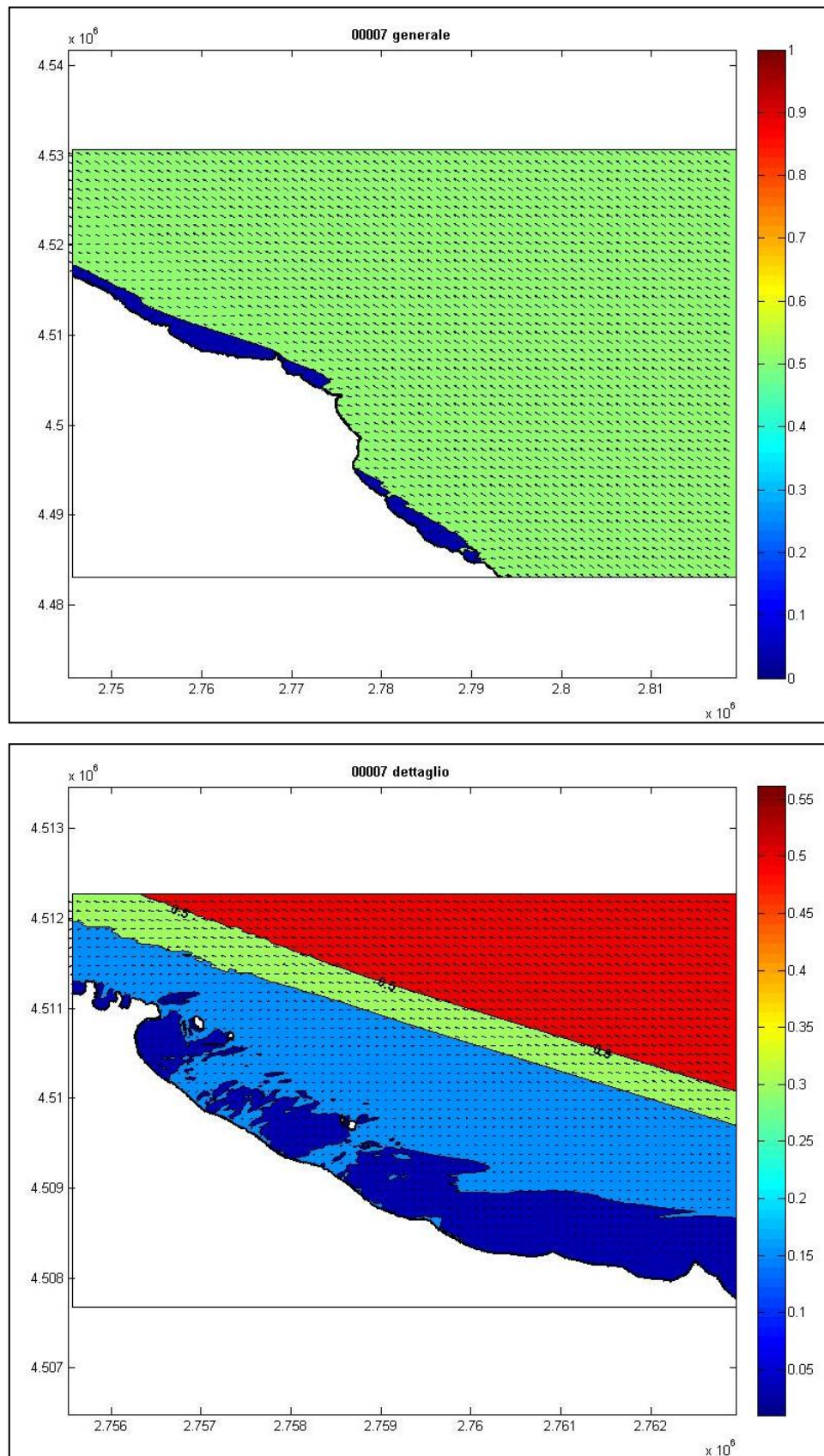


Figura 3.3.5.VI: onda equivalente da ESE (120°N) – $H_s = 0.87\text{m}$, $T_p = 5.54\text{s}$.

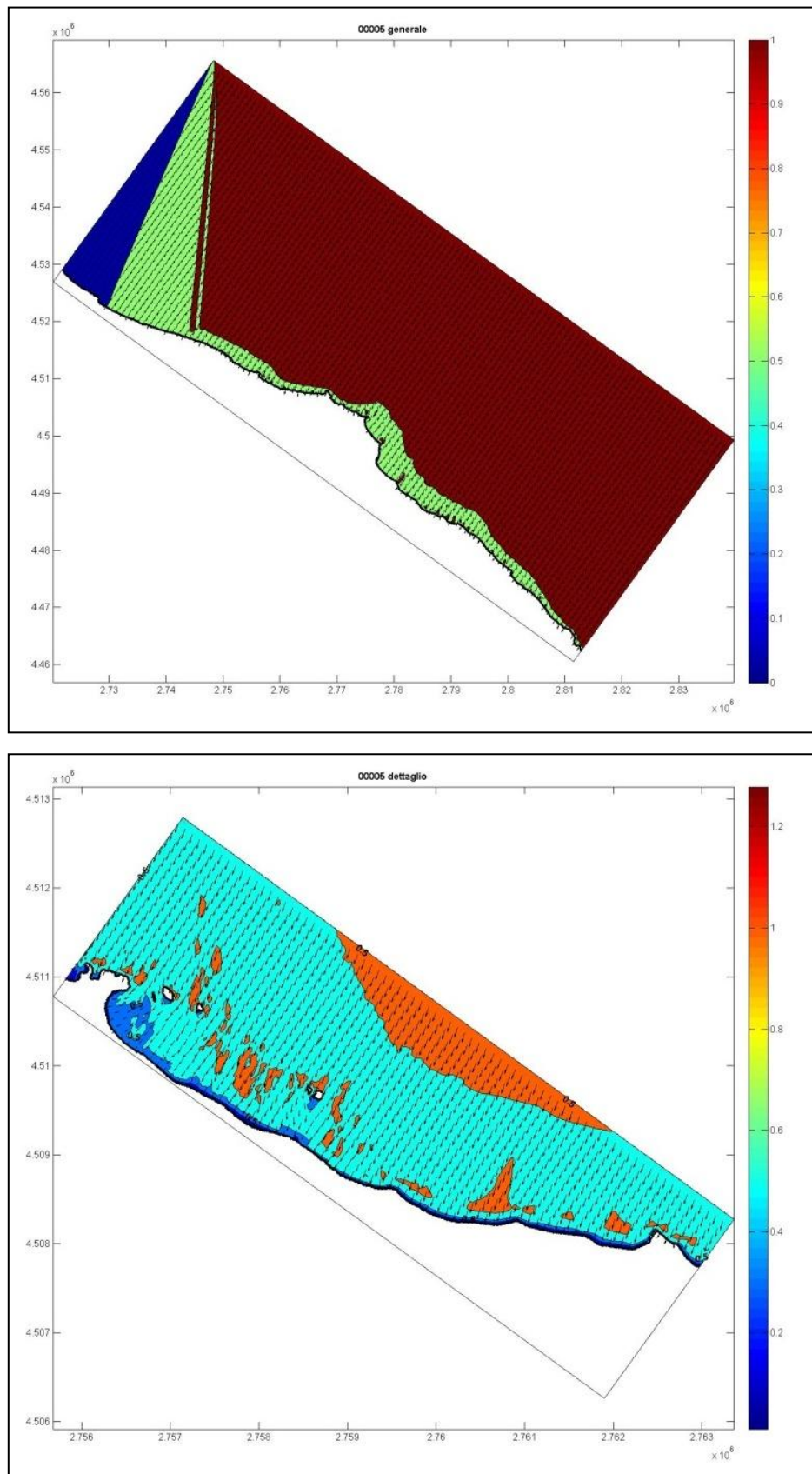


Figura 3.3.5.VII: onda equivalente dell'intero paraggio (20°N) – $H_s = 1.01\text{m}$, $T_p = 5.79\text{s}$.



4. CORRENTI LONGITUDINALI

Il metodo per la valutazione del trasporto solido, basato sul flusso dell'energia, assume che la portata long-shore dipenda dalla componente di flusso di energia parallela alla linea di riva e valutata nella surf zone. Tale flusso viene calcolato partendo dall'approssimazione della conservazione del flusso di energia nella zona di shoaling ed usando la teoria delle onde di piccola ampiezza.

Per stimare l'andamento del trasporto solido, lungo il litorale prospiciente l'AMP di Torre Guaceto, è stata analizzata la linea di costa compresa tra il promontorio su cui è ubicata la torre aragonese di Torre Guaceto e lo sperone roccioso di Torre Testa, posto a circa 6.8 km a Sud.

Il litorale è stato dapprima discretizzato in opportuni segmenti rappresentativi dell'andamento della costa e, successivamente, per ciascuno dei segmenti individuati attraverso i valori di altezza d'onda estrapolati dalle mappe di agitazione relative alle onde di modellazione, è stato calcolato il valore del flusso di energia del moto ondoso incidente in un punto ubicato alla profondità -5m, all'interno della fascia attiva della spiaggia sommersa.

Il flusso di energia per unità di lunghezza della cresta dell'onda è:

$$\bar{P} = \bar{E}C_g = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g$$

dove:

- densità dell'acqua;
- g accelerazione di gravità;
- H altezza d'onda;
- C_g celerità di gruppo.

Se il fronte dell'onda forma un angolo α con la linea di costa, il flusso di energia per unità di lunghezza della riva è:

$$\bar{P} \cos \alpha = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \cos \alpha$$

e la sua componente long-shore P_l è:

$$P_l = \bar{P} \cos \alpha \sin \alpha = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \cos \alpha \sin \alpha$$

o, poiché:



$$\cos\alpha \sin\alpha = \frac{1}{2} \sin 2\alpha$$

si ha:

$$P_l = \frac{1}{16} \rho g H^2 C_g \sin 2\alpha$$

Al frangimento il valore è dato da:

$$P_{lb} = \frac{1}{16} \rho g H_b^2 C_b \sin 2\alpha_b$$

dove:

H_b altezza d'onda al frangimento;

C_b celerità di gruppo al frangimento.

Le equazioni sopra riportate sono valide se il treno d'onde è caratterizzato da un solo periodo ed una sola altezza. In realtà le onde di mare sono caratterizzate da una certa varietà di altezze con una distribuzione probabilistica di Rayleigh. Ciononostante le mareggiate vengono descritte in termini di altezza significativa H_s e pertanto si potrà scrivere che:

$$P_{ls} = \frac{1}{16} \rho g H_{sb}^2 C_{gb} \sin 2\alpha_b$$

Il valore di P_{ls} espresso dalla precedente formula non è in realtà il flusso di energia reale della mareggiata, giacché esso dovrebbe essere calcolato con riferimento ad H_{rms} (altezza d'onda quadratica media) che, nel caso di una distribuzione alla Rayleigh delle altezze d'onda, risulta correlato all'altezza significativa attraverso la relazione $H_s^2 = 2 H_{rms}^2$. Ciò significa che P_{ls} è proporzionale al flusso di energia, e non uguale ad esso. Pertanto P_{ls} viene definito come il "fattore del flusso di energia long-shore".

E' importante osservare che il fattore del flusso di energia long-shore è proporzionale al flusso di peso sommerso della sabbia messa in movimento secondo la relazione:

$$I_l \left[\frac{N}{s} \right] = K [\text{adim.}] P_{ls} \left[\frac{N}{s} \right]$$

dove I_l è il flusso di peso sommerso della sabbia messa in movimento (ovvero la portata in termini di peso sommerso della sabbia, le cui dimensioni sono [forza]/[tempo]), K è un coefficiente adimensionale e P_{ls} è il fattore del flusso di energia long-shore, le cui

dimensioni sono $[energia]/([lunghezza][tempo])=[forza]/[tempo]$. Il trasporto volumetrico di sabbia Q può essere ottenuto come segue:

$$Q = \frac{K}{\rho_s - \rho} \frac{P_{ls}}{ga} = K' P_{ls}$$

Il fattore K' ha le dimensioni $([volume][tempo])/([forza][tempo])$ e diversi autori hanno proposto un valore legato ai propri studi sperimentali.

In definitiva, i flussi d'energia long-shore sono proporzionali, attraverso diversi fattori, al trasporto solido longitudinale.

Da quanto detto sopra emerge che attraverso il calcolo dell'entità e del verso del fattore del flusso di energia long-shore è possibile ottenere una stima qualitativa del trasporto solido long-shore. In base a tale evidenza sono stati calcolati i valori del fattore del flusso di energia long-shore in alcuni punti distribuiti uniformemente lungo il litorale in esame.

Dall'analisi dei risultati si riescono a cogliere indicazioni globali e, talvolta, puntuali sull'azione di singoli attacchi ondosi. È importante sottolineare che, le caratteristiche delle onde utilizzate come input del calcolo, siano quelle relative alle mareggiate equivalenti provenienti da ogni direzione. Si deve infatti considerare che i flussi di energia che determinano il trasporto non si riferiscono ad ogni singola mareggiata che ha effettivamente investito il paraggio, bensì a valori medi annui.

Nelle figure da 4.I a 4.VII i risultati ottenuti sono stati rappresentati con delle frecce orientate nel verso della componente long-shore delle onde incidenti. È importante evidenziare che i tratti di litorale in cui si ha la confluenza delle correnti longitudinali costituiscono zone di potenziale accumulo dei sedimenti, quindi di avanzamento della linea di riva, mentre i tratti di litorale in cui si verifica la divergenza del verso delle correnti sono zone a rischio erosione. Dall'analisi delle figure 4.I e 4.II, si evince che la direzione risultante delle correnti longitudinali, relative alle mareggiate provenienti da NNO e da Nord, è diretta da NO verso SE; il verso della corrente, lungo tutto il tratto esaminato, è uniforme senza punti singolari di inversione.

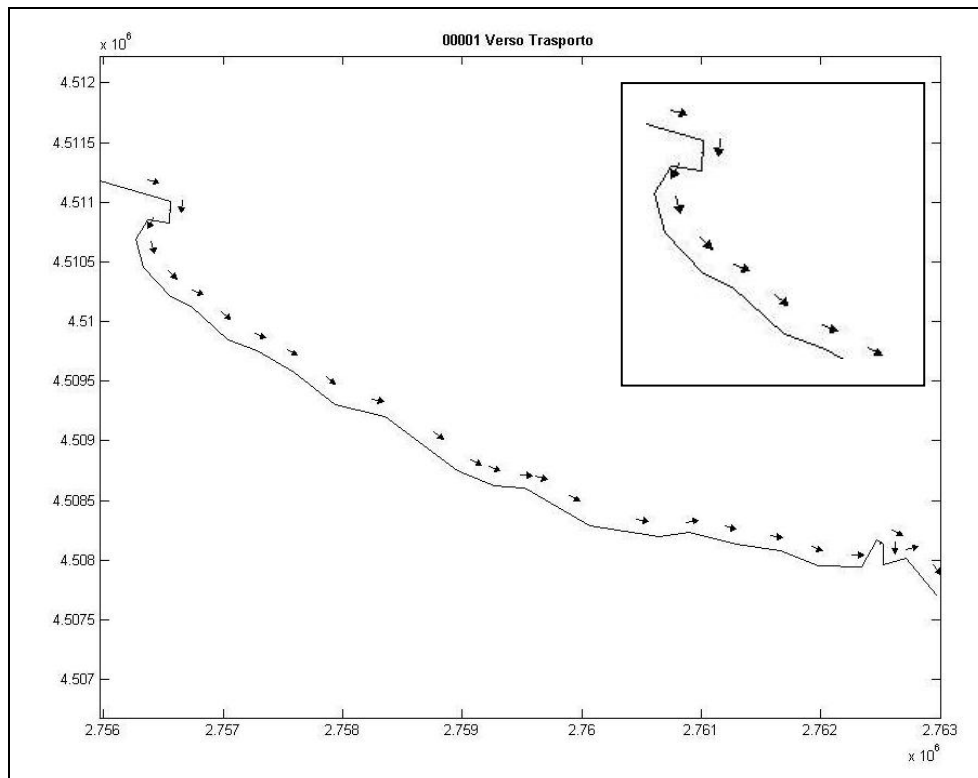


Figura 4.I: corrente longitudinale con onda equivalente da NNO (330°N)

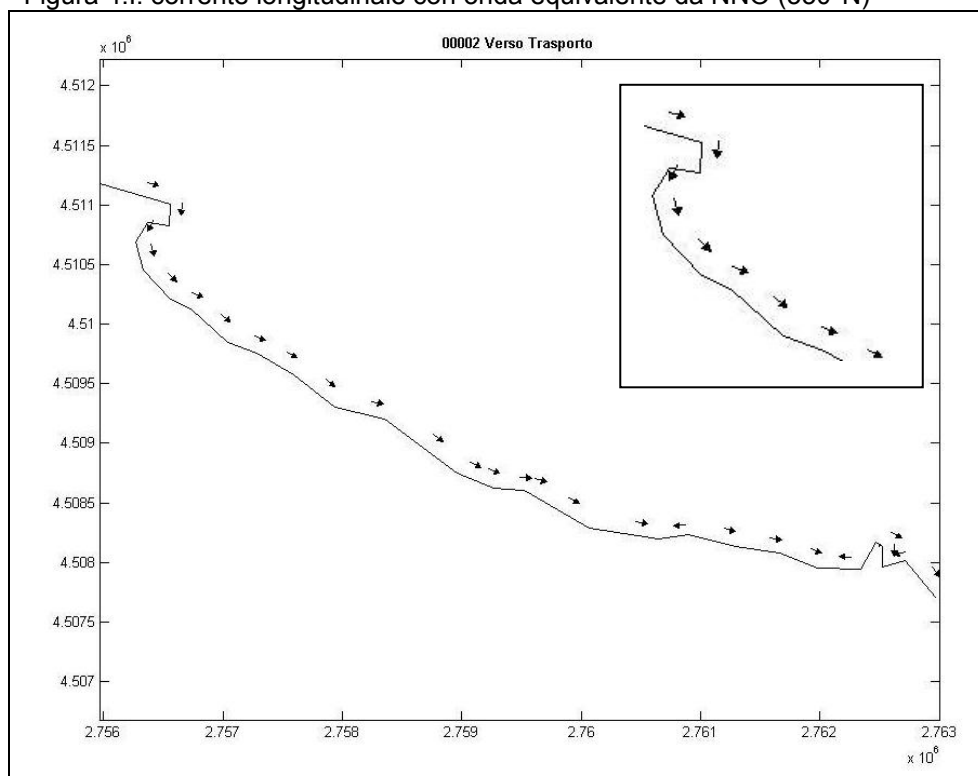


Figura 4.II: corrente longitudinale con onda equivalente da Nord (0°N)

Le mareggiate provenienti da NNE (Fig. 4.III) non danno origine a correnti longitudinali con un verso prevalente, infatti è possibile notare la presenza di vari punti di

convergenza o divergenza dei versi del trasporto, corrispondenti ad altrettante situazioni di accumulo o dispersione di sedimenti.

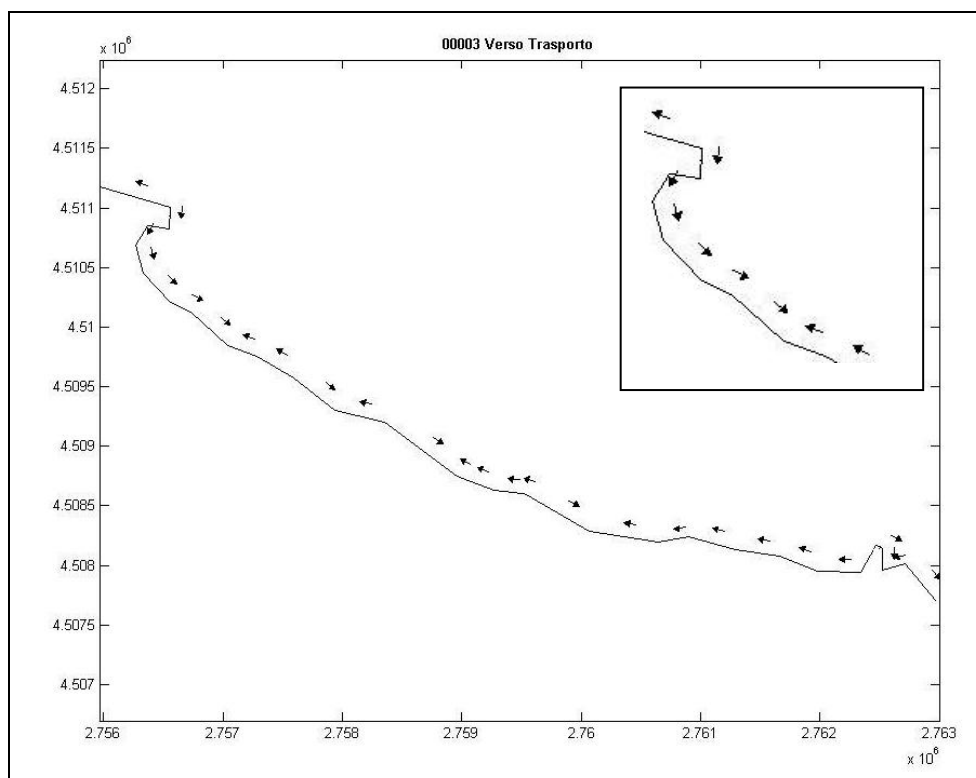


Figura 4.III: corrente longitudinale con onda equivalente da NNE (30°N)

In particolare, è individuabile una zona di potenziale accumulo di sedimenti immediatamente a Sud del promontorio di Torre Guaceto, caratteristica che è stata riscontrata anche per le mareggiate da ENE, Est e ESE.

Per quanto riguarda le mareggiate provenienti da ENE, Est e ESE (figg. da 4.IV a 4.VI), il verso della corrente longitudinale risulta uniformemente orientato da SE verso NO su tutto il tratto di litorale esaminato.

I risultati di tale circolazione sono stati verificati con l'esame dell'evoluzione storica della linea di riva, dalla quale è risultato che la spiaggia immediatamente a Sud di Torre Guaceto è in sensibile avanzamento, proprio per effetto dell'accumulo dei sedimenti trasportati da Sud dalle correnti longitudinali (vedasi evoluzione dell'**Area H**, paragrafo 7.1.3).

Infine, nella figura 4.VII è riportato il verso delle correnti longitudinali relative alla mareggiata energeticamente equivalente dell'intero paraggio. I risultati non permettono di

individuare un'unica direzione del trasporto solido risultante, evidenziando, invece, vari punti singolari significativi di condizioni di potenziale accumulo o dispersione di sedimenti.

Dal punto di vista delle durate di apparizioni annue, le mareggiate equivalenti che determinano correnti longitudinali dirette da NO verso SE (moto ondoso da NNO e da Nord) rappresentano il 37.4% del totale, mentre le mareggiate che determinano componenti long-shore da SE verso NO (moto ondoso da ENE, Est e ESE) costituiscono il 34.0%.

Dal punto di vista dell'intensità dei flussi di energia associati alle diverse direzioni di provenienza del moto ondoso, precedentemente, è stato dimostrato la relazione di proporzionalità tra il trasporto solido longitudinale e il flusso di energia. Considerato che con il calcolo dei flussi di energia del moto ondoso si possono ottenere solo informazioni qualitative sui volumi di sedimento effettivamente movimentati dalle mareggiate, dall'analisi dei risultati ottenuti il volume dei sedimenti movimentati verso Sud è, in termini relativi, doppio rispetto ai sedimenti movimentati verso Nord.

Nello specifico, le mareggiate da NNO sono quelle che determinano il maggiore trasporto verso Sud, mentre le mareggiate da ENE sono quelle che spostano più sedimenti verso Nord.

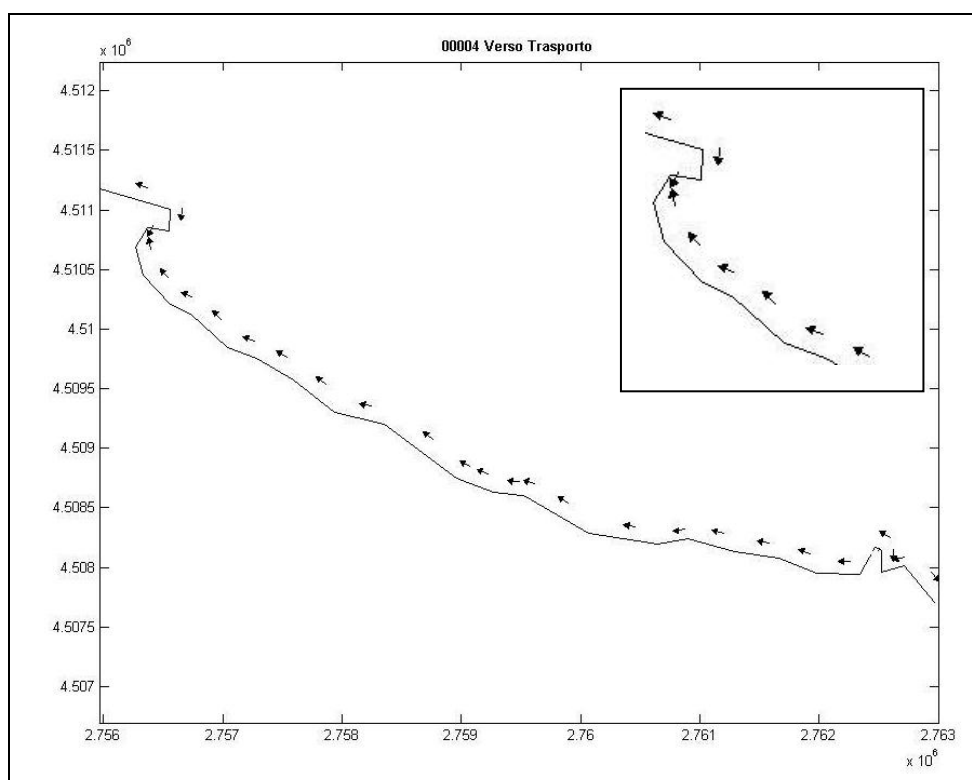


Figura 4.IV: corrente longitudinale con onda equivalente da ENE (60°N).



Protection actions for cross-borders and joint management of marine sites of community interest



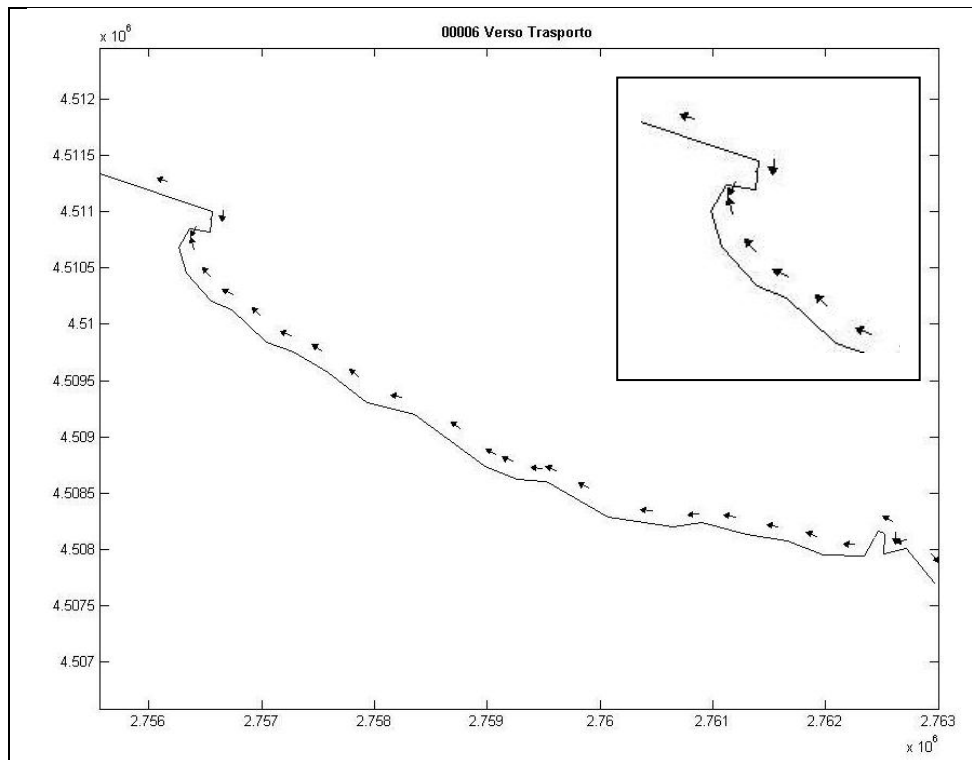


Figura 4.V: corrente longitudinale con onda equivalente da Est (90°N)

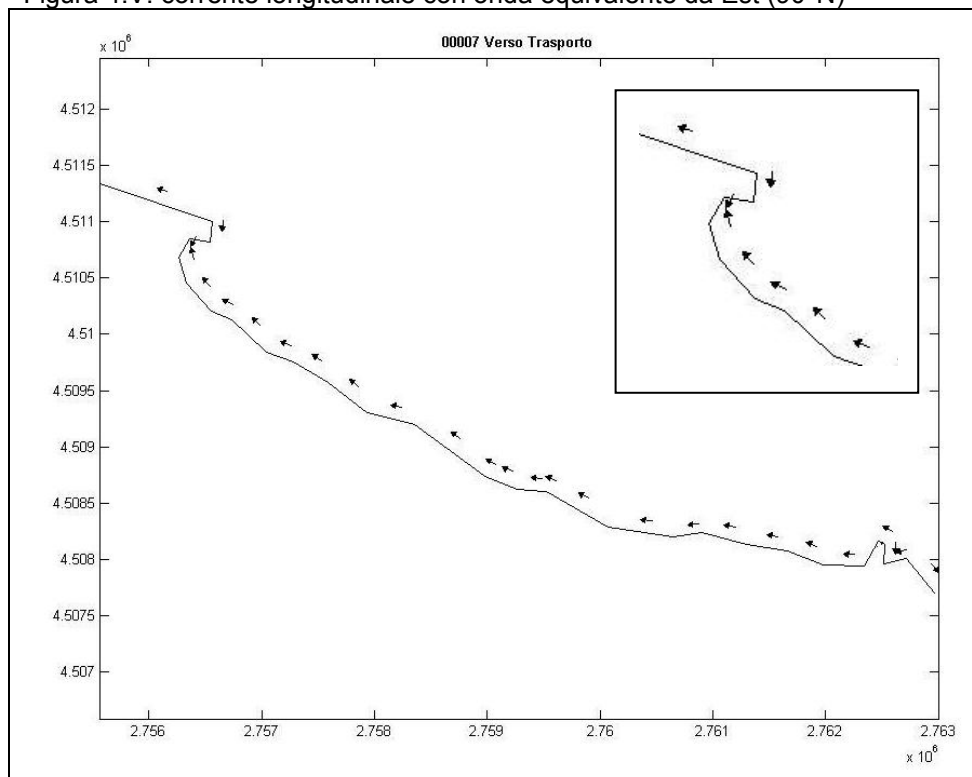


Figura 4.VI: corrente longitudinale con onda equivalente da ESE (120°N)

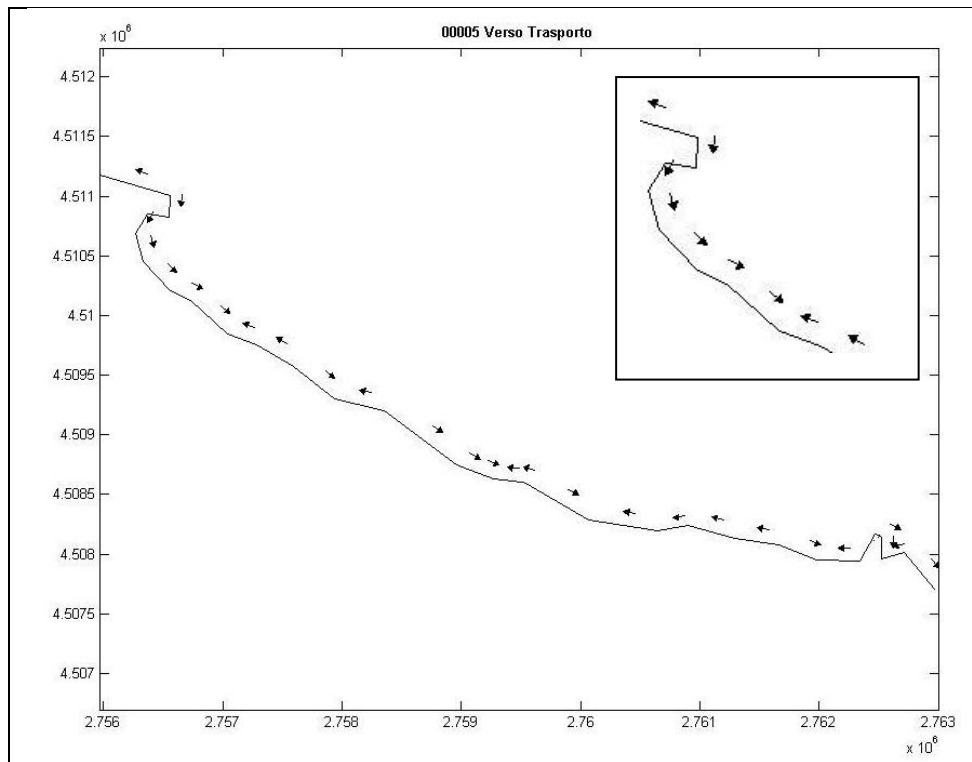


Figura 4.VII: corrente longitudinale con onda energeticamente equivalente
 dell'intero paraggio (20°N)

5. CORRENTI DI CIRCOLAZIONE

Per quanto riguarda il regime delle correnti superficiali nell'area in esame, sono state esaminate le mappe riportate dall'*Atlante delle correnti superficiali dei mari italiani* (1982); in particolare, è stata analizzata una mappa di circolazione mensile per ciascuna delle 4 stagioni, ossia le mappe relative ai mesi di gennaio, aprile, agosto ed ottobre (figure da 5.I a 5.IV). Dall'analisi delle figure si evidenzia che, a prescindere dalla stagione, lungo il litorale pugliese si instaura una corrente di circolazione che, sebbene con intensità differenti, è sempre diretta da Nord-Ovest verso Sud-Est; comportamento opposto si verifica invece sulle coste albanesi, montenegrine e croate con direzione della corrente da SE verso NO, a formare una sorta di vortice nel basso Adriatico.

Tale schema di circolazione, come detto, è localmente variato, nella sua intensità dalla periodicità delle stagioni, dalla quantità di acqua scambiata tra l'Adriatico ed il Mediterraneo, dall'apporto di acqua dolce fluviale, oltre che dalle condizioni meteorologiche. Tale andamento in particolare si intensifica notevolmente in inverno, con venti dominanti provenienti dai quadranti settentrionali, in cui tale condizione può mantenersi costante per lunghi periodi di tempo.

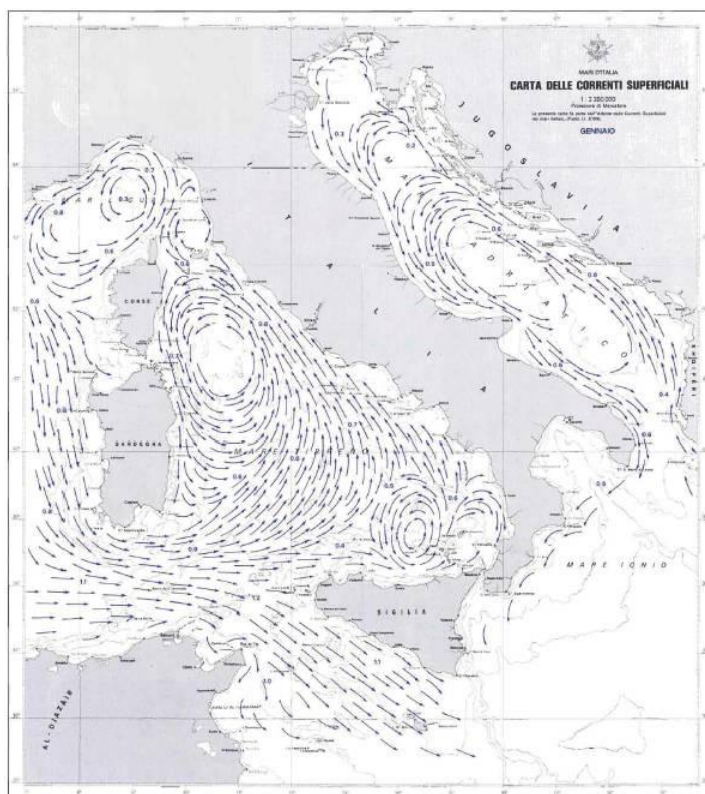


Figura 5.I: mese di gennaio (Atlante delle correnti superficiali dei mari italiani).

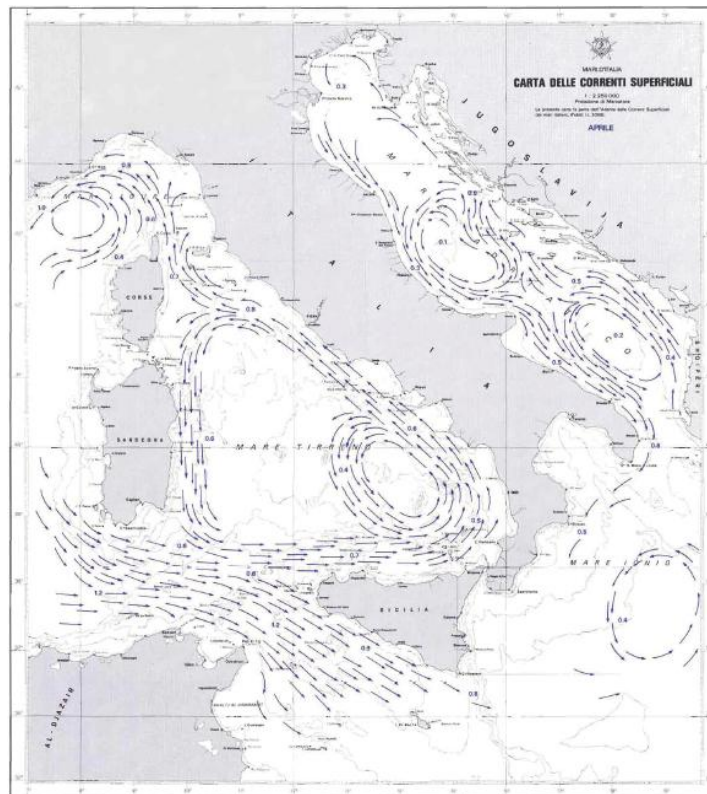


Figura 5.II – mese di aprile (Atlante delle correnti superficiali dei mari italiani).

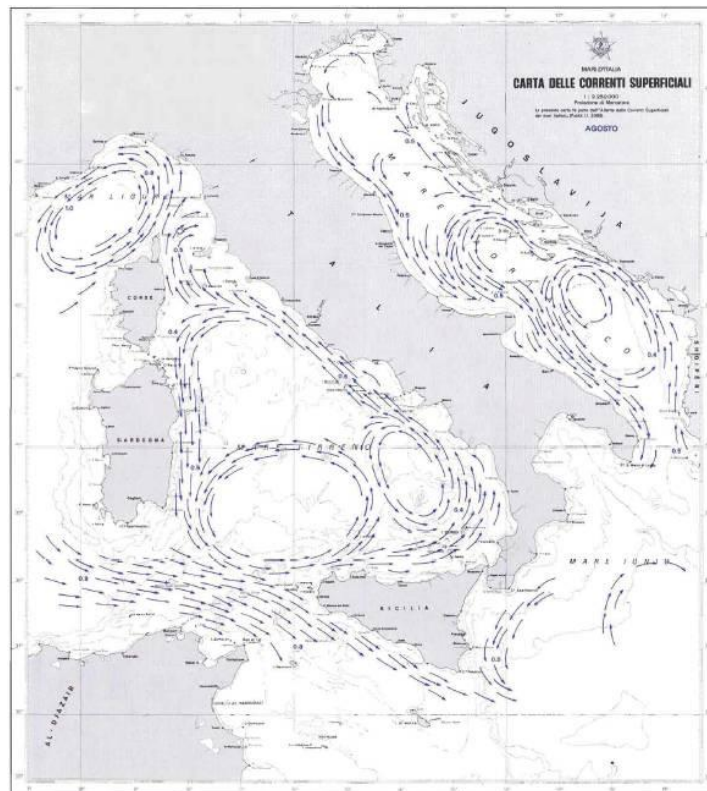


Figura 5.III – mese di agosto (Atlante delle correnti superficiali dei mari italiani).

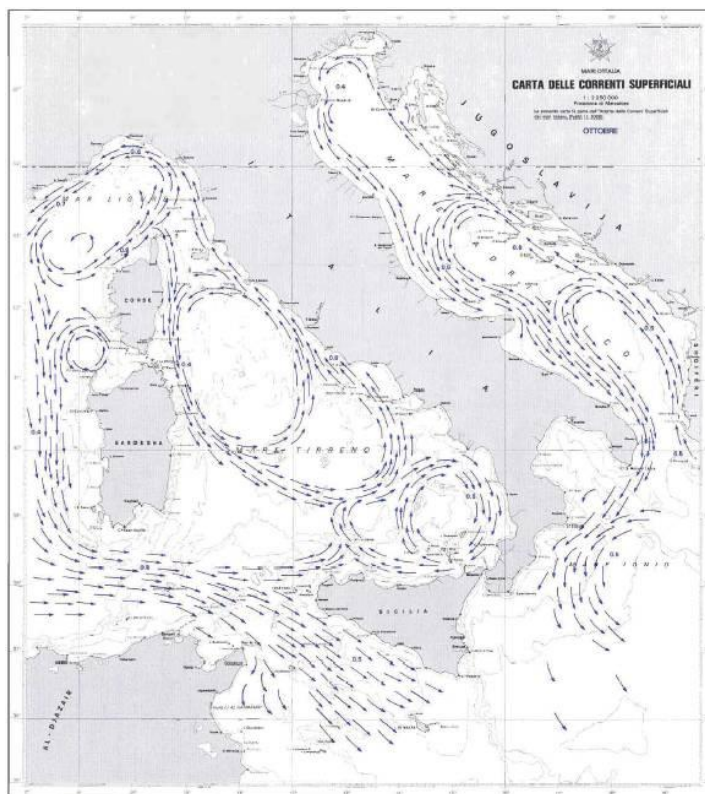


Figura 5.IV – mese di ottobre (Atlante delle correnti superficiali dei mari italiani).

Come approfondimento dei dati di letteratura reperiti, con l'utilizzo di un idoneo modello matematico, sono stati riprodotti i campi di circolazione superficiali determinati da alcune delle condizioni di vento spiranti nell'ambito del settore di traversia del paraggio in esame.

Nello specifico, è stato utilizzato il **modulo idrodinamico HD** del modello di circolazione tridimensionale **MIKE 21**, sviluppato presso il DHI (Danish Hydraulic Institute). Il MIKE 21 è un metodo di modellazione numerica alle differenze finite che viene utilizzato per la simulazione di flussi a superficie libera in differenti aree di applicazione (ad esempio oceani, regioni costiere, estuari, laghi), variabili sotto diverse condizioni, prendendo in considerazione variazioni di densità, batimetria, forze esterne come fattori meteorologici, maree, correnti ed altre condizioni idrografiche. Le principali caratteristiche del modello sono le seguenti:

- i punti computazionali sono inseriti in una griglia con maglia rettangolare o quadrata;
- la differenziazione orizzontale rispetto al tempo è esplicita, mentre la differenziazione verticale è di tipo implicito;

- il modello è a superficie libera e passo temporale discreto;
- fa riferimento alle equazioni dell'idrodinamica e a quelle di stato.

Il modulo idrodinamico HD risolve le equazioni, dipendenti dal tempo, della conservazione della massa e della quantità di moto nelle tre dimensioni, ossia le equazioni di Reynolds, in cui il flusso è decomposto in quantità medie e fluttuazioni turbolente. Al suo interno è presente un modulo sulla turbolenza basato sulla viscosità turbolenta (eddy viscosity) secondo Boussinesq, che mette in relazione le tensioni di Reynolds con il campo della velocità media. La salinità, la temperatura e la pressione sono legate alla densità dalla relazione dell'UNESCO (UNESCO 1981). La densità, a sua volta, viene calcolata in ciascun punto del dominio per ogni istante in funzione della salinità che è nota.

Il modulo idrodinamico HD forma le basi per tutte le applicazioni di MIKE 21, come la previsione delle correnti e del livello dell'acqua, e per tutti gli altri moduli, come quelli ambientali.

Il modello è stato applicato su un dominio di calcolo costituito da una griglia con passo 100 x 100 rappresentativa della batimetria e della costa in prossimità dell'area in esame (figura 5.V).

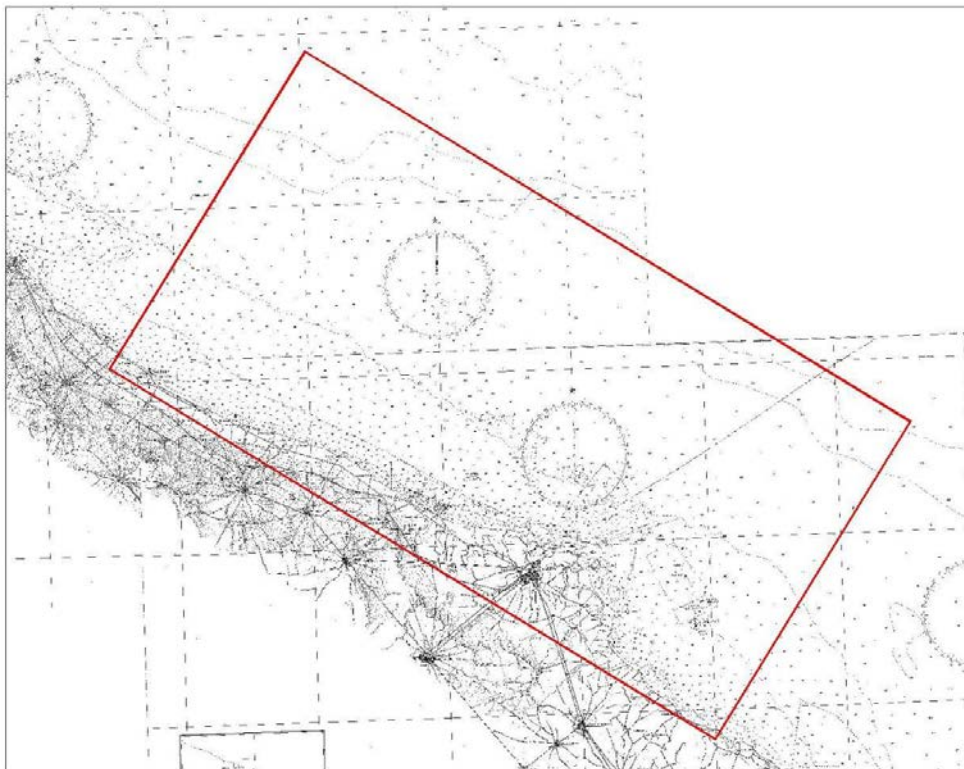


Figura 5.V: carta IIM con individuazione del dominio batimetrico di calcolo.



La griglia batimetrica del fondale è stata ricavata a partire dalle carte nautiche della zona prodotte dall'Istituto Idrografico della Marina; in particolare, sono state utilizzate le tavole IIM n. 29 e n. 30 in scala 1:100.000. Le tavole IIM sono state informatizzate e georeferenziate secondo la rappresentazione conforme di Gauss-Boaga con reticolato piano nel sistema nazionale (Gauss-Boaga) riferito all'ellissoide Roma 40.

Le informazioni desunte dalla carta nautica IIM sono state integrate con un rilievo batimetrico di dettaglio effettuato lungo tutto il litorale oggetto di studio, fino alla profondità di circa -10 m s.l.m.m.

Le simulazioni sono state condotte in ambiente baroclino impiegando come meccanismo forzante la forza rotazionale terrestre, una marea di tipo semidiurno e la tensione tangenziale indotta da venti di intensità e direzione differenti.

In particolare, la marea considerata lungo i tre contorni aperti, di tipo semidiurno, è caratterizzata da un'ampiezza pari a 0.15 m (altezza 0.30 m) e da un periodo di 12 ore. L'andamento della marea viene valutato dal programma come variazione sinusoidale dell'elevazione della superficie tramite la formula:

$$Value = ref.level + \frac{1}{2} range \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{N \cdot \Delta t - Phase}{Period}\right)$$

dove N è il numero di steps temporali e Δt lo step temporale. Lo stesso valore è usato su tutti i punti della griglia lungo i tre contorni aperti del dominio.

Per quanto riguarda la scelta dei venti utilizzati come forzanti nelle simulazioni, si è fatto riferimento ai risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati registrati dalla stazione anemometrica dell'Aeronautica Militare di Brindisi, la più vicina all'area oggetto di indagine; la serie storica analizzata è costituita dalle registrazioni acquisite nel periodo 1951 – 2005.

Durante tale periodo non si sono verificate interruzioni di rilievo nella raccolta dei dati e la percentuale di rilevazioni effettive sul totale delle misurazioni teoriche risulta di poco inferiore al 100%.

Dall'elaborazione statistica della serie completa delle registrazioni (figura 5.VI, tabella 5.I) risulta che mediamente in un anno la classe delle calme è piuttosto frequente, esse costituiscono, infatti, il 17.93% dell'intera popolazione.

Dall'analisi della distribuzione annuale dei venti è risultato che il maggior numero di osservazioni spetta ai venti da NNO, con percentuali molto elevate anche per i venti da Sud e da OSO; in realtà quest'ultimi venti sono, per il dominio indagato, venti di terra,

ovvero venti che spirano dalla terra verso il mare e dunque non generano moto ondoso e correnti su grande scala.

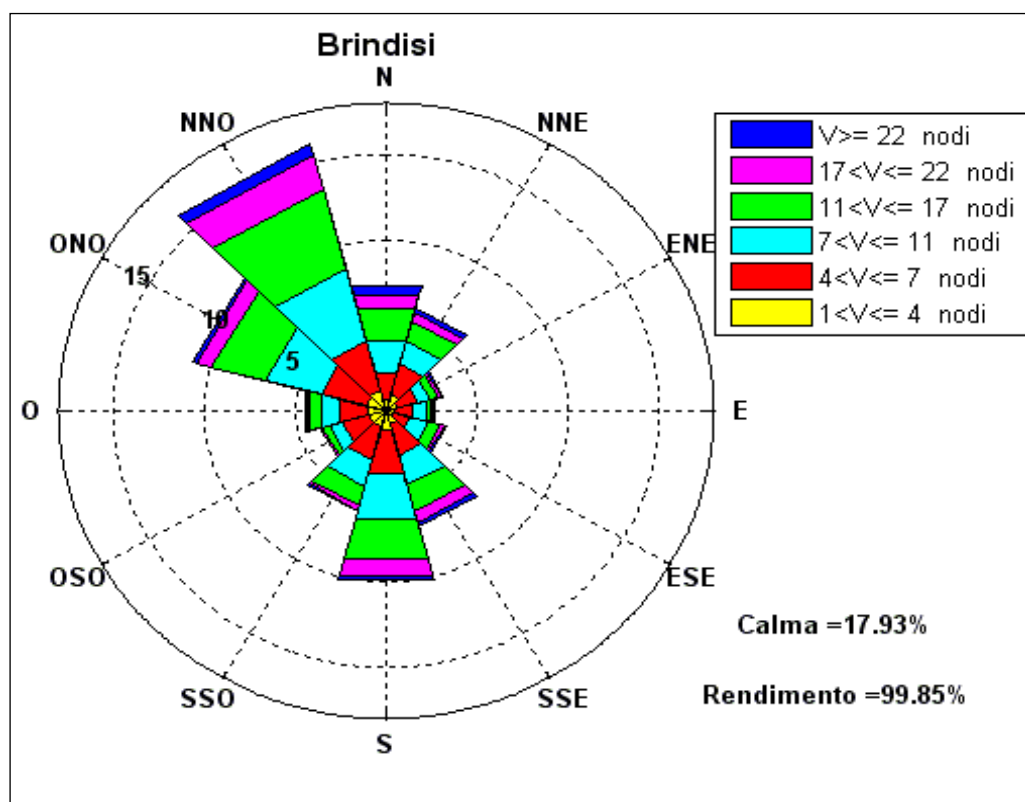


Figura 5.VI: frequenze di apparizione annuali.

DIREZIONE	VELOCITA' U (kn)						TOT
	1<U≤4	4<U≤7	7<U≤11	11<U≤17	17<U≤22	U>22	
0	0.74	1.61	1.88	1.96	0.87	0.49	7.55
30	1.01	1.84	1.42	1.15	0.55	0.27	6.24
60	0.64	1.19	0.74	0.43	0.15	0.07	3.22
90	0.45	1.05	0.77	0.31	0.09	0.04	2.71
120	0.42	1.01	1.01	0.66	0.24	0.08	3.42
150	0.79	1.92	1.76	1.62	0.65	0.27	7.01
180	1.16	2.68	2.67	2.46	0.95	0.31	10.23
210	0.98	1.99	1.62	1.15	0.30	0.09	6.13
240	1.00	1.46	0.79	0.38	0.11	0.04	3.78
270	1.02	1.66	1.01	0.63	0.20	0.08	4.60
300	1.10	2.62	3.20	3.02	0.83	0.22	10.99
330	1.25	3.02	4.31	4.84	2.07	0.71	16.20

Tabella 5.I: frequenze di apparizione annuali.

Pertanto, ai fini della definizione delle condizioni di vento implementate nel modello di calcolo utilizzato, sono stati tralasciati i venti spiranti dalle direzioni esterne al settore di traversia del paraggio in esame, mentre come ulteriore forzante, accanto alla marea, è stata considerata la tensione tangenziale indotta da venti uniformi provenienti rispettivamente da NNO (330°N), da NNE (30°N) e da Est (90°N).

I valori delle intensità dei suddetti venti derivano da una media pesata, per ciascuna direzione di provenienza, valutata in riferimento alle frequenze di apparizione di ciascuna classe di vento (tabella 5.II). Nel dettaglio i valori di intensità del vento adottati nel modello idrodinamico utilizzato sono pari rispettivamente a 4.80 ms⁻¹ per la direzione NNE, 3.95 ms⁻¹ per la direzione Est e 5.79 ms⁻¹ per la direzione NNO.

Le differenti configurazioni di simulazione adottate permettono di testare, con adeguata accuratezza, l'influenza della variazione della direzione del vento sulla struttura di circolazione nel dominio oggetto di studio.

DIREZIONE	valore medio	
	U (kn)	U (m/s)
0	10.97	5.65
30	9.33	4.80
60	7.85	4.04
90	7.68	3.95
120	9.17	4.72
150	9.94	5.12
180	9.92	5.11
210	8.47	4.36
240	6.87	3.54
270	7.66	3.95
300	9.94	5.12
330	11.25	5.79

Tabella 5.II: valori medi dei venti registrati dalla stazione AM di Brindisi.

La tensione tangenziale τ dovuta al vento viene calcolata dal modello di calcolo tramite la formula:

$$\tau = C_D \rho_a W^2$$

in cui al coefficiente di drag C_D viene assegnato un valore pari a 2.6×10^{-3} , la densità dell'aria ρ_a è assunta pari a 1.247 kg m^{-3} ed a W vengono assegnati i valori della velocità del vento relativi ad una distanza di 10 m sulla superficie del mare.



Avendo imposto come forzante in input un campo di vento omogeneo, la condizione di stazionarietà viene raggiunta in tempi brevi. Kuzmic *et al.* (1985) e Orlic *et al.* (1986) hanno rilevato il periodo temporale caratteristico di un comportamento transitorio del modello pari a due giorni di simulazione. Tuttavia, per garantire il raggiungimento della condizione di stazionarietà anche per la forzante marea, nelle elaborazioni è stato fissato un periodo di simulazione pari a 3 giorni, a partire dalle ore 12.00 del primo giorno, con uno step temporale di integrazione $\Delta t = 9$ sec, partendo da una condizione di quiete.

Il massimo numero di Courant è definito come:

$$C_R = c \frac{\Delta t}{\Delta s}$$

in cui Δt rappresenta lo step temporale di integrazione, Δs il passo della griglia in una delle direzioni orizzontali e c è la celerità di propagazione delle onde data dall'espressione:

$$c = \sqrt{gh}$$

dove g è l'accelerazione di gravità, ed h è la profondità del fondale.

In base ai dati di input il numero di Courant è stato valutato dal programma pari a 8.44, e rappresenta il numero di punti della griglia che vengono analizzati in uno step temporale.

Per ciò che concerne il modello di turbolenza, al coefficiente di viscosità turbolenta ν_t è stato assegnato un valore costante sull'intero dominio d'indagine, pari a $0.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Nelle simulazioni è stato preso in considerazione anche l'effetto dell'attrito al fondo, dipendente dal parametro di Manning a cui è stato assegnato un valore costante pari a $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, consigliato in letteratura.

Come detto in precedenza nell'Adriatico Meridionale agisce una corrente di circolazione di base diretta da NO verso SE che può subire variazioni locali in funzione della durata e della intensità delle forzanti di vento.

I venti spiranti da NNO, da NNE e da Est, sono quelli che ricadono nella traversia dell'area esame, ed hanno rispettivamente frequenze di apparizione del 16.20%, 6.24% e 2.71%, mentre le velocità medie pesate calcolate per le stesse direzioni sono rispettivamente 5.79 m/s, 4.80 m/s e 3.95 m/s.

Nelle figure da 5.VII a 5.IX sono riportati i risultati ottenuti dall'applicazione del modello idrodinamico HD, rappresentati da vettori di lunghezza proporzionale alle intensità delle correnti calcolate.

I venti locali sono forzanti che tendono a modificare la corrente dominante diretta da NO verso SE; in particolare i venti provenienti da NNO tendono ad accentuare tali correnti, mentre i venti provenienti da NNE ed Est tendono a ridurre, o ad invertire, tali correnti.

Dalla figura 5.VII si nota che il vento da NNO determina correnti intense dirette da NO verso SE, in linea con il verso prevalente indicato in tutte le mappe di circolazione riportate nell'Atlante delle correnti superficiali dei mari italiani (1982).

Il vento da NNE (figura 5.VIII) genera lungo il litorale in esame una corrente diretta prevalentemente da SE verso NO, ma si evidenziano nelle aree limitrofe la formazione di vorticità locali sottocosta, molto evidenti nella zona dell'AMP di Torre Guaceto, ed in particolare in corrispondenza dello scoglio di Apani.

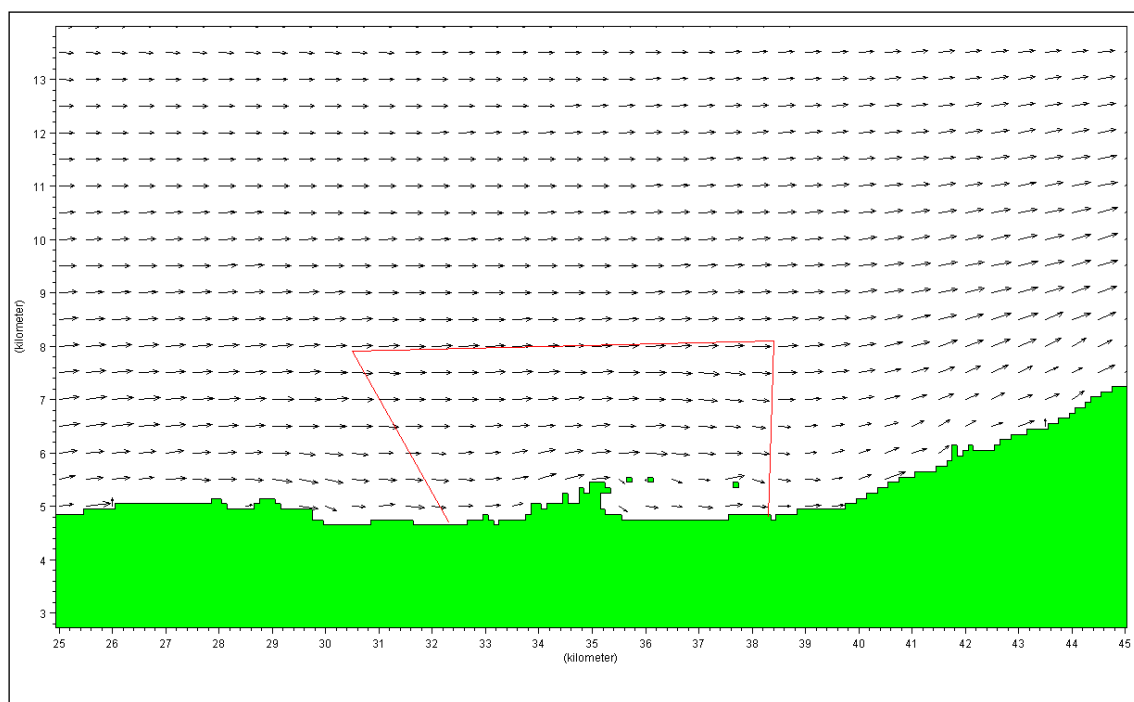


Figura 5.VII: mappa delle correnti superficiali (vento da NNO di intensità pari a 5.79 ms^{-1}).

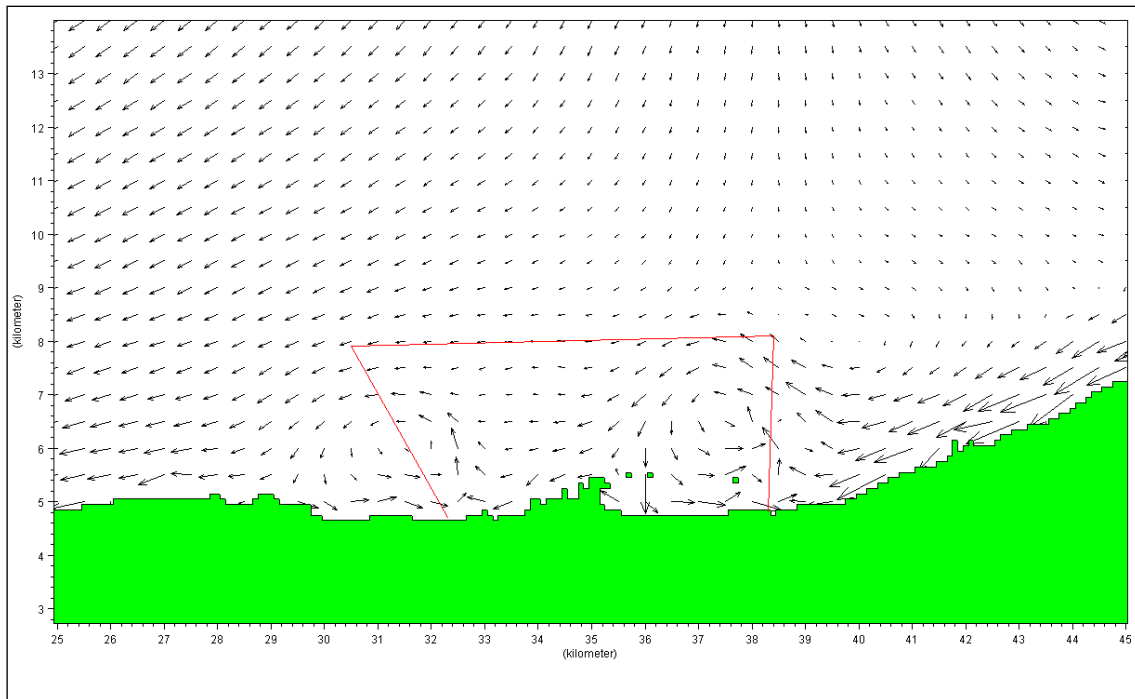


Figura 5.VIII: mappa delle correnti superficiali (vento da NNE di intensità pari a 4.80 ms^{-1}).

Il vento da Est (figura 5.IX) genera anche in questo caso delle correnti dirette da SE verso NO. Queste correnti sono molto significative perché, sebbene di bassa intensità ed in controtendenza rispetto alla corrente di base instaurata nell'intero Adriatico, fanno sì il materiale più fine proveniente dall'erosione della falesia posta a Sud sia trascinato verso NO, determinando gravi problemi di sedimentazione sui fondali e sulle biocenosi presenti nell'ambito dell'AMP di Torre Guaceto, come si dirà meglio al paragrafo 7.3.

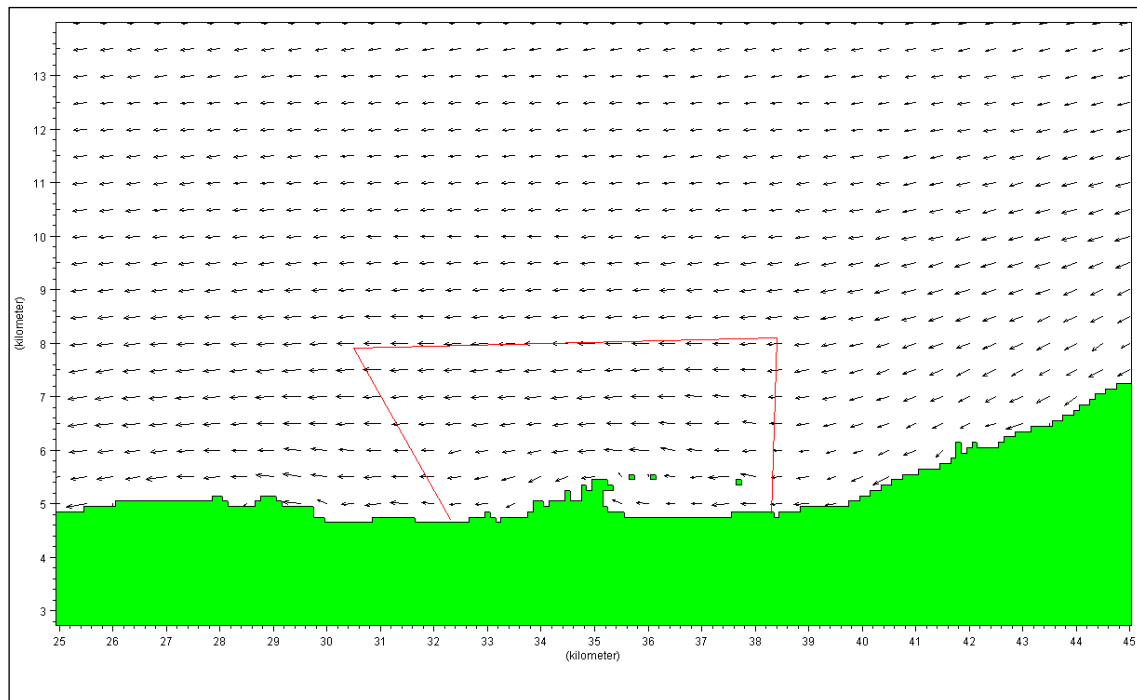


Figura 5.IX: mappa delle correnti superficiali (vento da EST di intensità pari a 3.95 ms^{-1}).



6. VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO

Nella pianificazione e gestione della fascia costiera si deve tener conto dei possibili cambiamenti climatici; nel caso specifico dei litorali sabbiosi questi potranno portare ad un incremento dell'attuale trend di innalzamento del livello medio mare (Petrillo A.F., 2007; Regione Puglia e Autorità di Bacino della Puglia, 2009).

La variazione del livello marino è un fenomeno legato a diversi fattori ambientali e fisici, a livello globale e locale, ed ha una forte periodicità temporale. La questione è di grande importanza poiché l'innalzamento del livello medio mare determina un naturale arretramento dei litorali sabbiosi e un aumento del rischio di inondazione delle aree costiere basse. Un'idea tangibile dell'entità del rischio cui i litorali sabbiosi sono sottoposti si può avere dallo studio di Bruun P. (1962), in base al quale l'aumento di 1 mm del livello marino può produrre un arretramento della linea di riva da $0.05 \div 0.10\text{m}$, in dipendenza della pendenza del profilo di spiaggia.

Numerosi sono gli studi condotti negli ultimi anni sulla previsione delle variazioni del livello del mare; in alcuni casi, sono stati messi a punto anche modelli matematici. I modelli elaborati però devono essere tarati, per cui sono necessarie serie di dati di campo affidabili e di lunga durata. Infatti, generalmente si impiegano modelli evolutivi, categoria alla quale appartengono anche i modelli per le previsioni meteorologiche oggi ampiamente disponibili e che, come è noto, migliorano le loro prestazioni man mano che aumentano le informazioni di base. Purtroppo, allo stato attuale, poche sono le grandezze che intervengono nel fenomeno di cui sono disponibili serie storiche adeguate ed affidabili.

Negli ultimi due secoli, da quando cioè sono disponibili misure strumentali affidabili, il livello del mare ha subito una risalita media complessiva compresa tra 1 e 1.5 mm/anno (nell'Adriatico i mareografi di Trieste (Fig. 6.I) e Venezia (Fig. 6.II) hanno registrato circa 1.5 mm/anno negli ultimi 100 anni). E' da notare che negli ultimi 50 anni si è avuto un incremento del trend ed infatti si è registrato un valore medio di 1.8 mm/anno (Church et al., 2004). Dalle figure 6.I e 6.II si nota che i due mareografici segnalano un forte incremento del livello medio mare nel periodo 2008 – 2010, circa 150 mm, a cui corrisponde un incremento annuo di 50 mm/anno. Questi "valori anomali" hanno determinato grandi disagi e preoccupazioni a Venezia, come riportato anche ampiamente sui mezzi di stampa da Paolo Canestrelli (2010), direttore del Centro Previsioni e Segnalazione Maree della Città di Venezia, che attribuisce i "valori anomali"

principalmente alla bassa pressione che in questi anni si è instaurata nell'Adriatico. Come si vedrà in seguito "valori anomali" simili sono stati registrati anche da altri mareografi del medio e basso Adriatico.

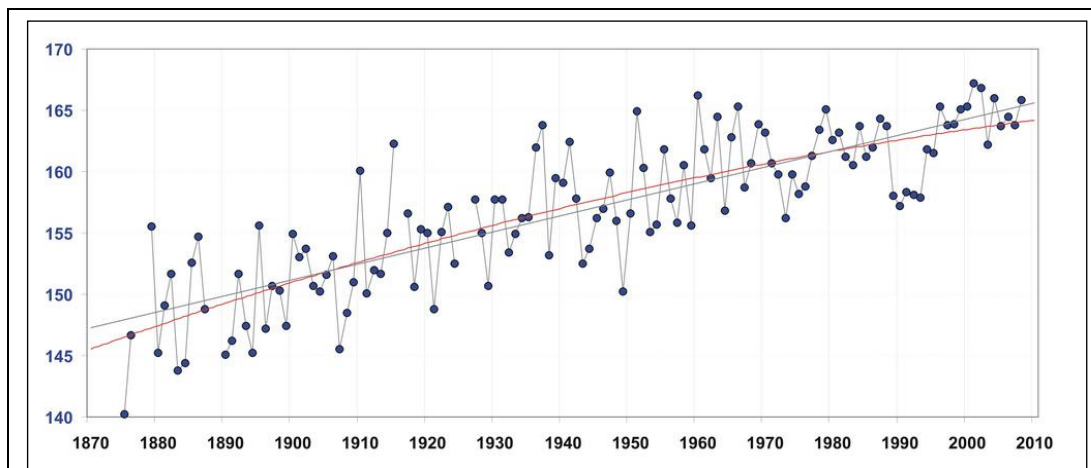


Figura 6.I - livello medio mare annuale a Trieste.

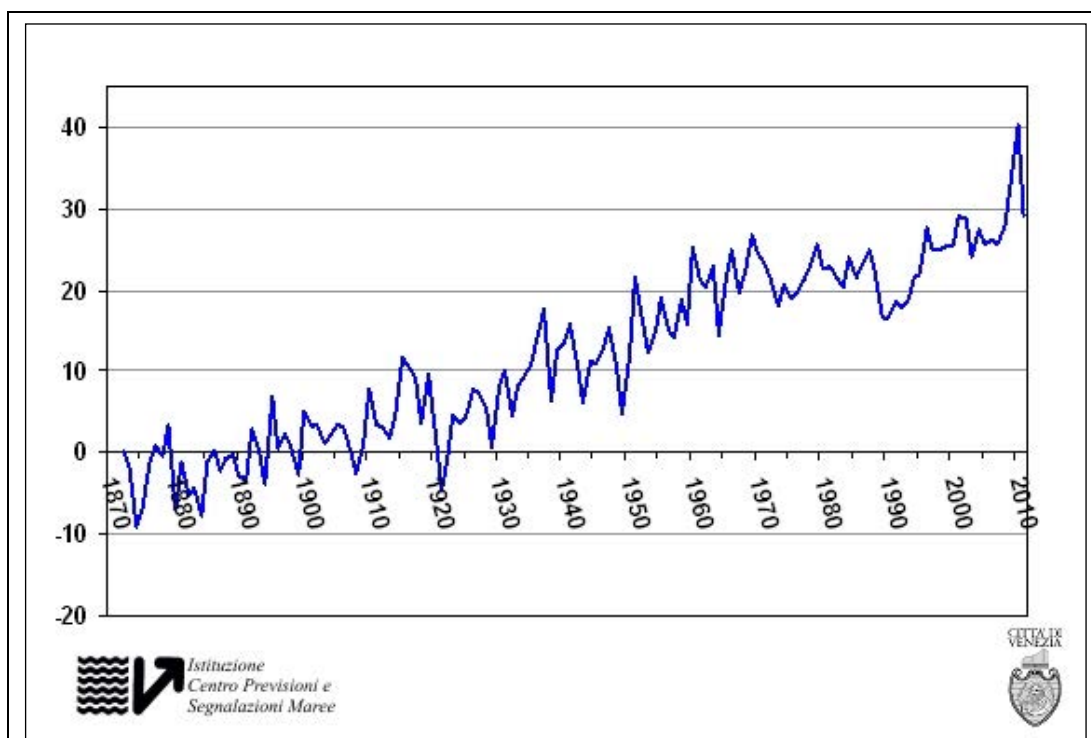


Figura 6.II - livello medio mare annuale a Venezia

Analizzando le serie temporali riportate nelle figure 6.I e 6.II, si può vedere che incrementi sensibili sul breve periodo di tale entità, se non maggiore, si sono avuti nel 1895, 1900, 1910, 1915, 1937, 1941, 1951, 1960, 1963, 1966, 1979, 2003, 2010.



Queste periodicità possono essere evidenziate effettuando l'analisi spettrale delle serie temporali. Dalle varie indagini finora eseguite è risultato che, su tutti i mari, compaiono sempre oscillazioni con periodi prossimi a quelli indicati dalla successione fondamentale 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11.2, 16, 22.4, 32, 44.8 anni. Purtroppo, la conoscenza è alquanto scarsa per i periodi più lunghi.

Nel recente rapporto del 2013, in versione draft, dell'I.P.C.C. (Intergovernmental Panel on Climate Change, organo tecnico-scientifico del W.M.O., World Meteorological Organization, e U.N.E.P., United Nations Environment Programme, che ha come compiti lo studio dei cambiamenti climatici in atto, lo sviluppo di scenari futuri, la definizione della vulnerabilità dei sistemi naturali e sociali, nonché stabilire le strategie di adattamento e di mitigazione), utilizzando specifici modelli di previsione, sono indicate le stime dell'aumento del livello globale del mare nei prossimi 100 anni, in funzione di più scenari. La differenza tra gli scenari è data dal differente valore di RCP (Representative Concentration Pathway) considerato, ovvero della traiettoria descritta dai valori di concentrazione dei 4 gas serra principali nei prossimi 100 anni. Per il report del 2013 sono state considerate 4 RCP, RCP2.6, RCP4.5, RCP6 e RCP8.5, ed in funzione di esse sono stati elaborati 4 modelli di previsione dell'innalzamento del livello globale del mare. Le stime elaborate hanno un range che varia tra 0.26 m e 0.54 m per RCP2.6 e 0.54 m e 0.97 m per RCP8.5. Come si può notare, i modelli matematici di previsione forniscono un forte margine di indeterminazione; tuttavia tutti gli studi concordano che nel prossimo futuro vi sarà un incremento del trend del sollevamento del livello medio mare.

Nel precedente rapporto della stessa organizzazione (IPCC, 2007) il sollevamento previsto variava in un range compreso tra 0.18 m e 0.59 m per i prossimi 100 anni. I dati indicano, dunque, un aumento delle stime di innalzamento; tale peggioramento, è causato tra l'altro dal deterioramento delle condizioni al contorno, dall'aumento dei dati contenuti nel database climatico utilizzato e all'affinamento dei modelli matematici.

Con i dati indicati dal rapporto 2013, prendendo a riferimento un innalzamento del livello medio mare di 2.6 mm/anno, negli ultimi 50 anni, l'arretramento naturale della linea di riva dei litorali sabbiosi sarebbe stato compreso tra 6.5 m e 13 m.

Dal 2013 al 2110 prendendo a riferimento un innalzamento di 2.6 mm/anno, ci sarebbe un arretramento compreso tra 13m e 26 m, mentre con un sollevamento medio di 9.7 mm/anno nei prossimi 100 anni ci sarebbe un arretramento compreso tra 48.5 m e 97 m.



Questi dati mostrano la grande influenza che ha l'innalzamento del livello medio mare sulla dinamica dei litorali sabbiosi.

6.1. IL LIVELLO MEDIO DEL MARE

Il livello del mare, in condizioni dinamiche, è dato dalla somma del livello medio, del wind setup, del wave setup e della marea. Ai fini della determinazione delle condizioni ondose in grado di determinare l'allagamento delle aree a ridosso della linea di riva di Torre Guaceto, è opportuno analizzare le varie componenti che concorrono a definire il livello del mare e determinare le cause che ne producono le variazioni. Allo scopo di individuare tutti gli elementi che determinano l'inondazione è stata determinata anche la massima altezza di risalita (run-up) dell'onda lungo il profilo della spiaggia.

6.1.1. Il livello medio del mare

Il livello del mare cambia continuamente sotto l'azione di vari fenomeni (maree, onde, venti, correnti, pressione barometrica, variazioni stagionali di densità, apporti di acqua dalla terra e dal cielo, evaporazione, movimenti astrali, subsidenza, ecc.).

Le variazioni di livello determinate dai diversi fattori hanno ampiezza, frequenza e durata diversa; pertanto, è difficile definire il "livello del mare". Tuttavia, per la pianificazione della fascia costiera e per le progettazioni (quali opere di protezione delle coste, definizione delle aree inondabili, ecc.), è necessario determinare il valore minimo e massimo, alle diverse scale temporali.

6.1.2. Storm surge

Con il termine storm surge (sovrалzo di tempesta) si intende la variazione del livello medio del mare per effetto dell'azione del vento (wind setup), e della pressione atmosferica (sovrалzo barico).

Il wind setup indica il sovrалzo del livello del mare sottocosta dovuto all'azione del vento; esso è dovuto all'accumulo di acqua sottocosta per azione dei venti foranei permanenti.

La valutazione del wind setup a seguito di fenomeni meteorici gravosi è di fondamentale importanza specie se ad esso si accompagnano moti ondosi violenti; bisogna tuttavia evidenziare che i valori che esso generalmente assume risultano essere rilevanti solo in presenza di particolari situazioni geografiche e topografiche.

Si deve segnalare la possibilità che si verifichi anche il fenomeno opposto, ossia l'abbassamento del livello per azione di vento spirante da terra verso il mare (wind set-down), ma esso è di scarso interesse ai fini degli studi costieri.

Come si è detto il wind setup dipende oltre che, naturalmente, dalle caratteristiche dell'evento meteorologico (velocità di traslazione del vento, durata, lunghezza del percorso sopra la massa marina, forma delle isobare), anche da alcuni parametri geomorfologici come la forma e la dimensione del bacino marino, l'estensione della piattaforma continentale (isobata -200m), nonché dalla configurazione e dalla rugosità del fondo.

Il sovrizzo che si verifica a seguito di una perturbazione, può essere valutato utilizzando modelli di calcolo, oppure effettuando considerazioni statistiche partendo da osservazioni dirette effettuate su un sufficiente periodo di tempo.

Il calcolo del massimo sovrizzo di vento S , in prima approssimazione, può essere effettuato mediante una nota formulazione analitica implicita (PODIS, 2005):

$$S = \frac{K_p L_p U^2}{g(D-d-S)} \ln \left(\frac{D}{d+S} \right)$$

dove:

- U è la velocità del vento persistente (m/s);
- D è la profondità limite della piattaforma continentale (-200m);
- d è la profondità ove si calcola il sovrizzo (m);
- L_p è la distanza tra d e D nella direzione del vento (m);
- g è l'accelerazione di gravità (9.81 m/s^2);
- K_p è un coefficiente pari a 3×10^{-6} .

Considerato che nel paraggio di Torre Guaceto la piattaforma continentale si trova a circa 33 km dalla costa, nella condizione di un vento costante diretto verso la costa con velocità di 30 m/s, in corrispondenza di un punto in prossimità della linea di riva posto alla profondità di -1.5 m, si è ricavato un innalzamento del livello del mare pari a circa 0.22 m.

Nel Mediterraneo centrale il contributo che può essere fornito da variazioni della pressione atmosferica risulta dello stesso ordine di grandezza delle escursioni di marea.

Un abbassamento barico di 1 mbar, rispetto al valore normale di 1013 mbar, produce un innalzamento di circa 1cm del livello marino, con un abbassamento



equivalente del livello medio mare nel caso di un innalzamento di 1 mbar della pressione atmosferica.

Per avere un ordine di riferimento, negli ultimi 30 anni nel Tirreno i valori minimi e massimi misurati della pressione (legati al passaggio dei cicloni ed anticicloni) risultano rispettivamente pari a 975 mbar (26/02/1989) e 1044 mbar (04/12/1986). Ne consegue quale effetto barico un massimo sovrizzo marino di 0.38m ed un massimo abbassamento del livello di 0.31 m. In condizioni estreme tali valori possono aumentare ancora di diversi centimetri.

Nel caso in esame il valore di sovrizzo di tempesta (storm surge) adottato è stato ricavato dai risultati riportati in un lavoro di Marcos M. (2009), in cui sono stati analizzati i dati di livello registrati dal mareografo di Bari dal 1998 al 2006.

In tale studio i valori dei livelli registrati a Bari sono stati depurati delle oscillazioni di marea astronomica, ottenendo in definitiva i valori del residuo meteorologico, ossia l'escursione del livello marino legato al wind setup ed alla variazione della pressione atmosferica. Nel caso di Bari il massimo valore del residuo meteorologico misurato è stato di circa 47 cm.

6.1.3. Wave setup

Con l'espressione wave setup si indica il sovrizzo dovuto alle onde, ovvero la variazione del livello marino associata alla propagazione del moto ondoso durante le mareggiate, soprattutto nella zona più prossima alla riva.

Durante la propagazione delle onde dal largo verso la costa, infatti, si verifica dapprima un piccolo abbassamento del livello medio del mare nella zona dei frangenti (wave setdown), cui segue un successivo innalzamento progressivo verso costa (wave setup). I due termini wave setup e wave setdown rappresentativi del fenomeno, possono essere calcolati utilizzando diversi metodi.

Nel presente studio il calcolo del sovrizzo d'onda (wave setup) è stato eseguito utilizzando il modello matematico SBEACH32, sviluppato dal Coastal Engineering Research Center dell' U.S. Army Corps of Engineers; il codice SBEACH32 è un modello in grado di riprodurre la propagazione del moto ondoso di onde irregolari associando un algoritmo per il calcolo del sovrizzo dell'onda.



Il frangimento a profondità differenti di onde irregolari (tipico del moto ondoso reale) determina dissipazioni di energia del moto ondoso, e quindi variazioni del livello marino, anche ad elevate distanze dalla linea di costa.

Il codice SBEACH32 è stato applicato lungo un transetto trasversale a partire dalla profondità di -10m fino alla spiaggia emersa in corrispondenza della zona di interesse. Il fondale sommerso e la spiaggia emersa sono stati discretizzati con passo costante di 5 m.

Sono state propagate fino alla battigia le onde con tempo di ritorno T_r di 50 anni, suddivise per settore di provenienza del moto ondoso, riportate nella tabella 6.1.3.I; nel modello è stata inoltre simulata la mareggiata verificatasi nel basso Adriatico il 06/01/2012, per la quale sono disponibili la serie storica delle altezze d'onda al largo misurate dalla boa ondometrica di Monopoli, la serie storica dei dati di velocità e direzione del vento misurate nella stazione anemometrica della rete mareografica nazionale di Bari, nonché i corrispondenti i valori di marea misurati dal mareografo ubicato nel porto di Bari.

H (m)	dir (°N)	T (s)
3.70	356	8.39
4.19	16	8.39
4.53	38	9.56
4.37	57	9.56
2.67	73	8.39
0.66	77	8.39

Tabella 6.1.3.I: onde con T_r 50 anni simulate nel modello SBEACH32

Nelle figure da 6.1.3.I a 6.1.3.VII sono riportati i grafici relativi ai valori di altezza d'onda calcolati con il modello SBEACH32 lungo il profilo trasversale adottato della costa di Torre Guaceto, con l'indicazione dei valori dei massimi sovralzi in prossimità della battigia.

Dall'analisi delle figure si evince che in prossimità della battigia i valori del wave setup associati alle mareggiate con tempo di ritorno T_r di 50 anni, risultano comprese tra 0.15 m (ESE) e 0.85 m (NNE); nel caso della mareggiata del 06/01/2012 il valore del sovralzo calcolato al lordo del contributo della marea e del vento è risultato pari a 0.74 m.

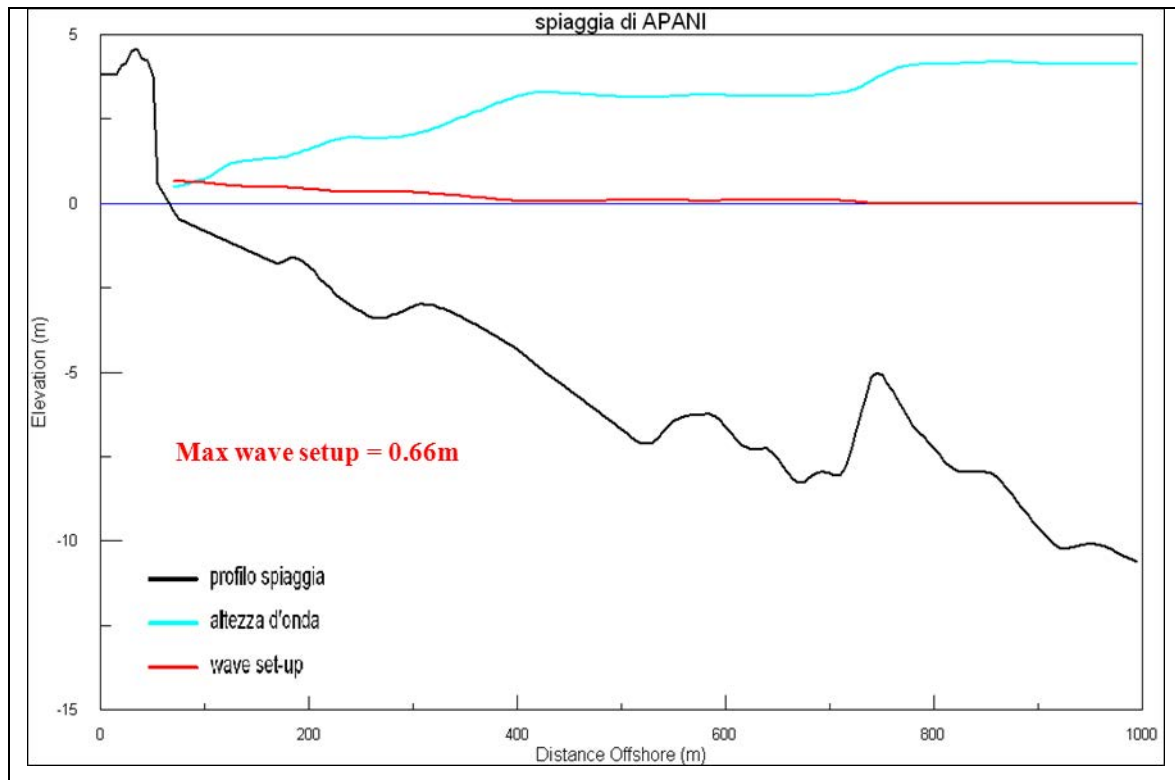


Figura 6.1.3.I - onda al largo da NNO con Tr 50 anni.

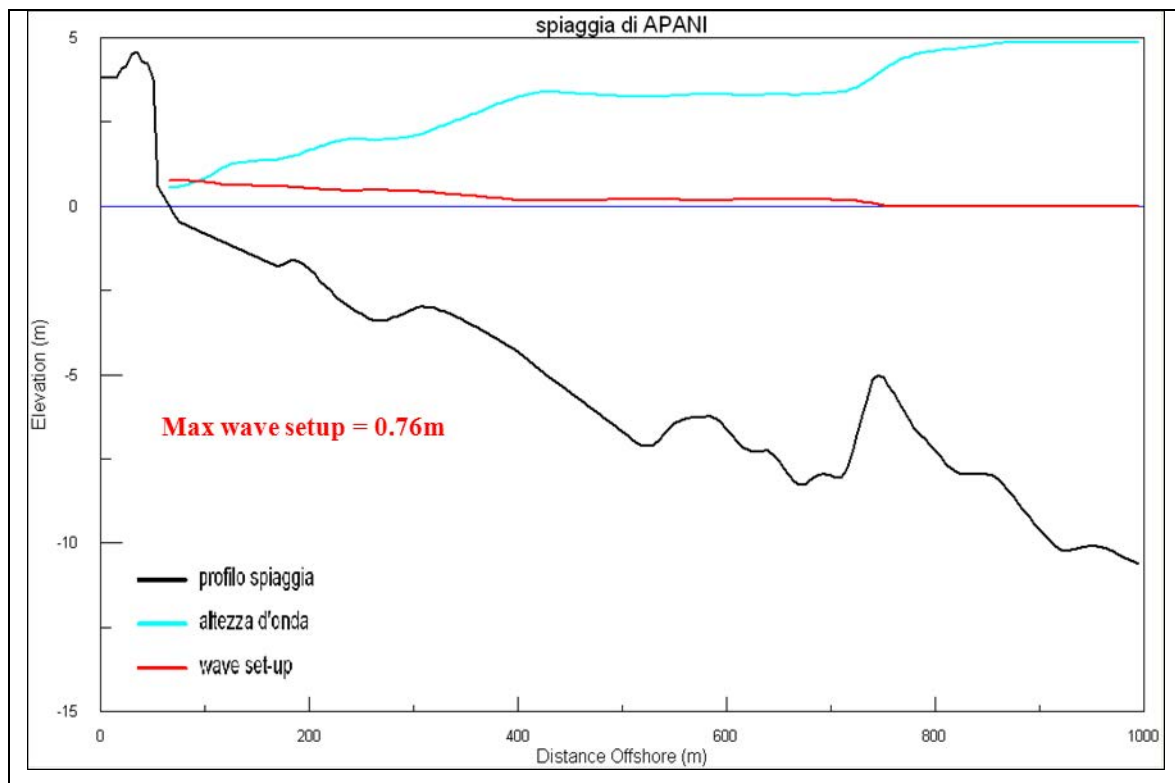


Figura 6.1.3.II - onda al largo da Nord con Tr 50 anni.

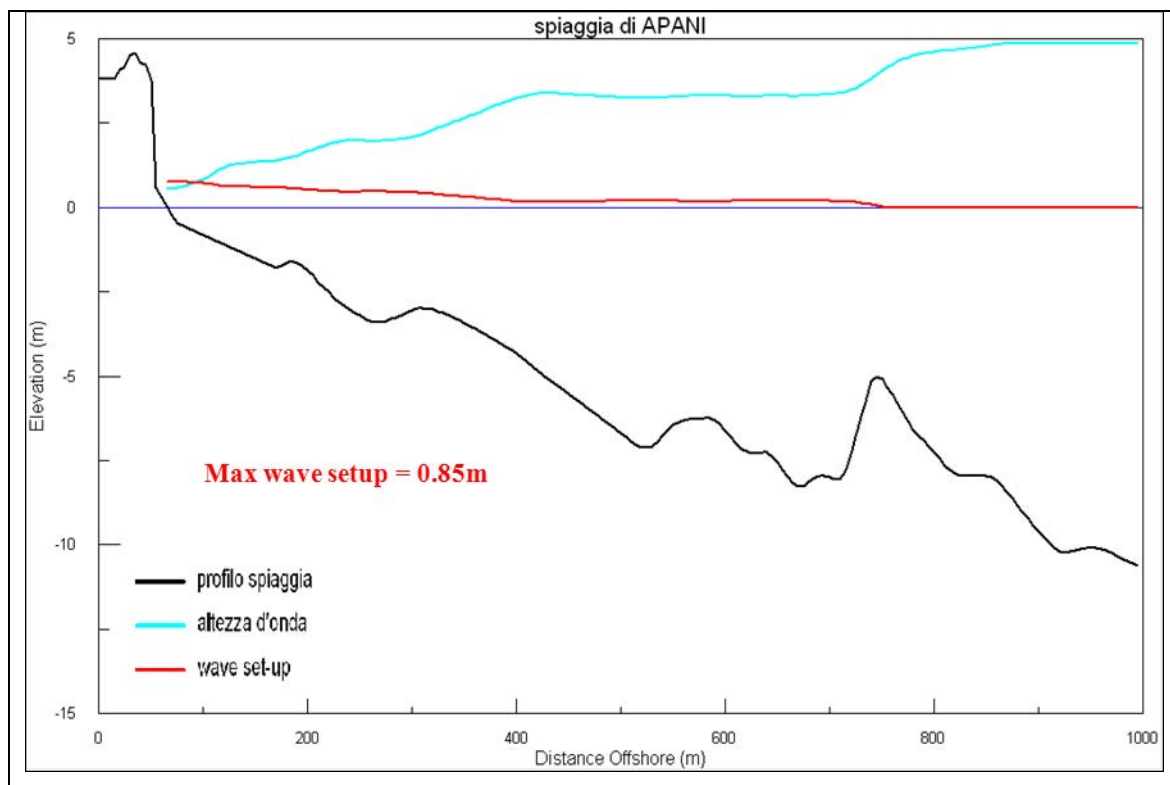


Figura 6.1.3.III - onda al largo da NNE con Tr 50 anni

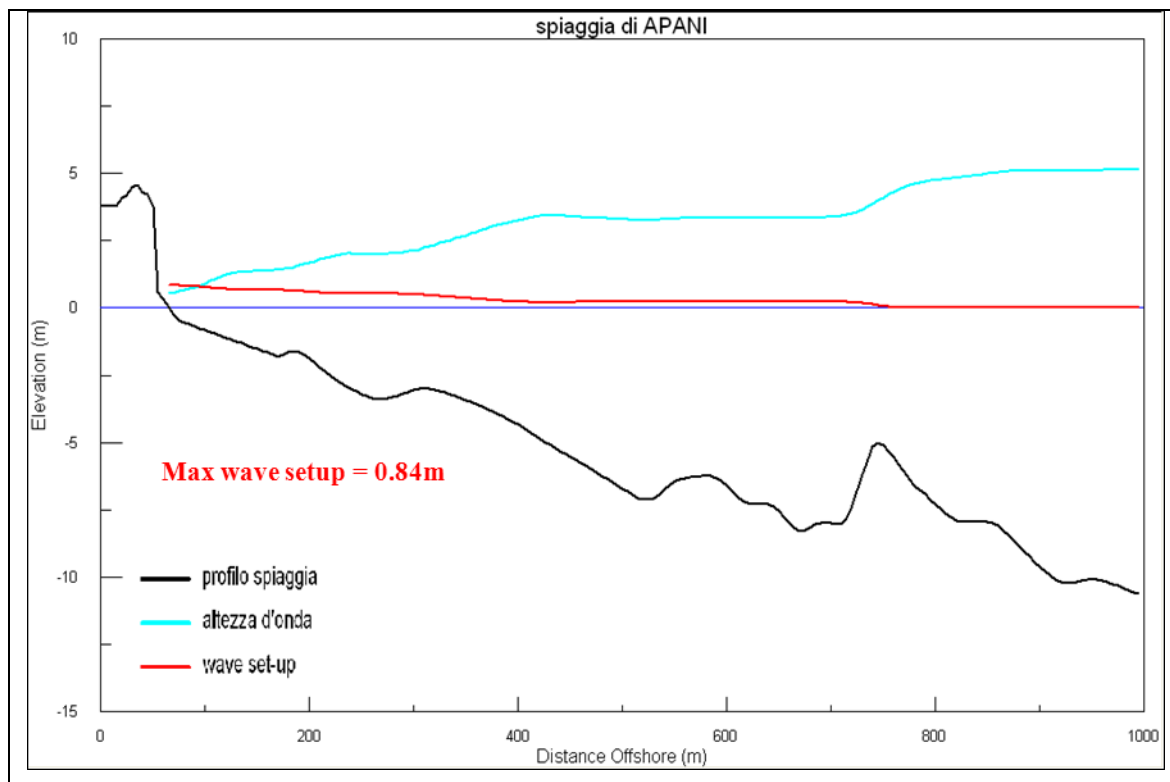


Figura 6.1.3.IV - onda al largo da ENE con Tr 50 anni

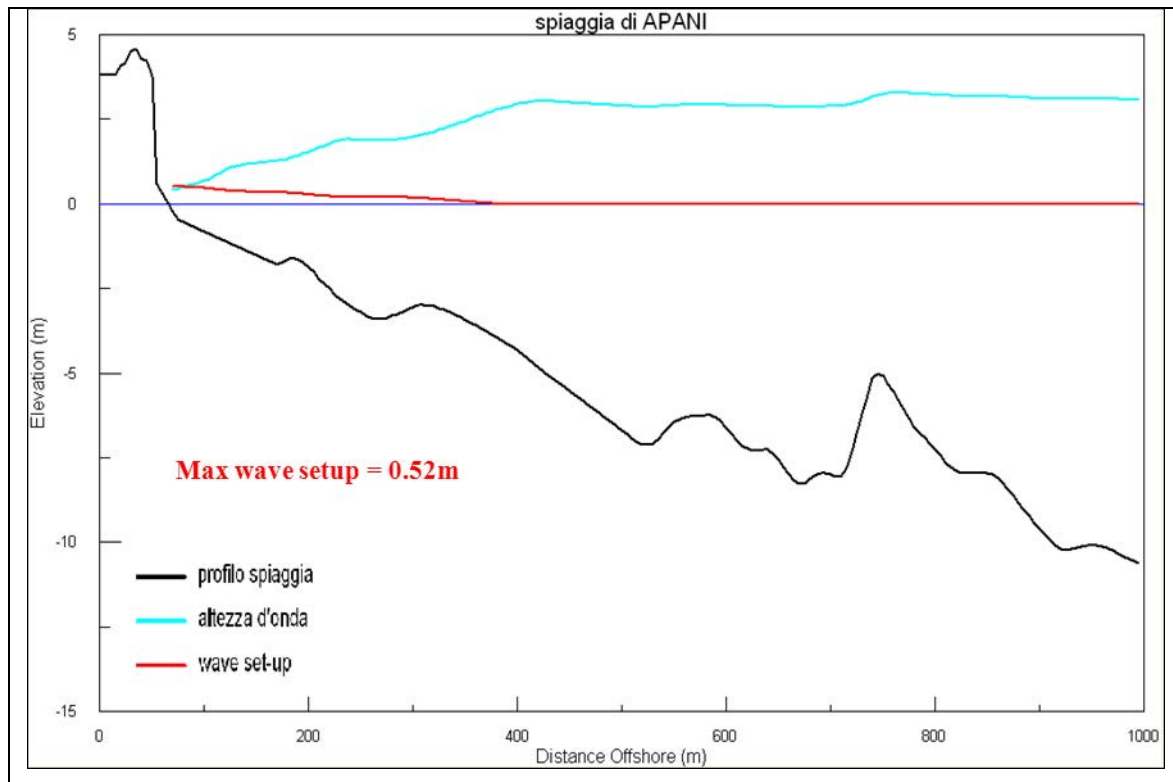


Figura 6.1.3.V - onda al largo da Est con Tr 50 anni.

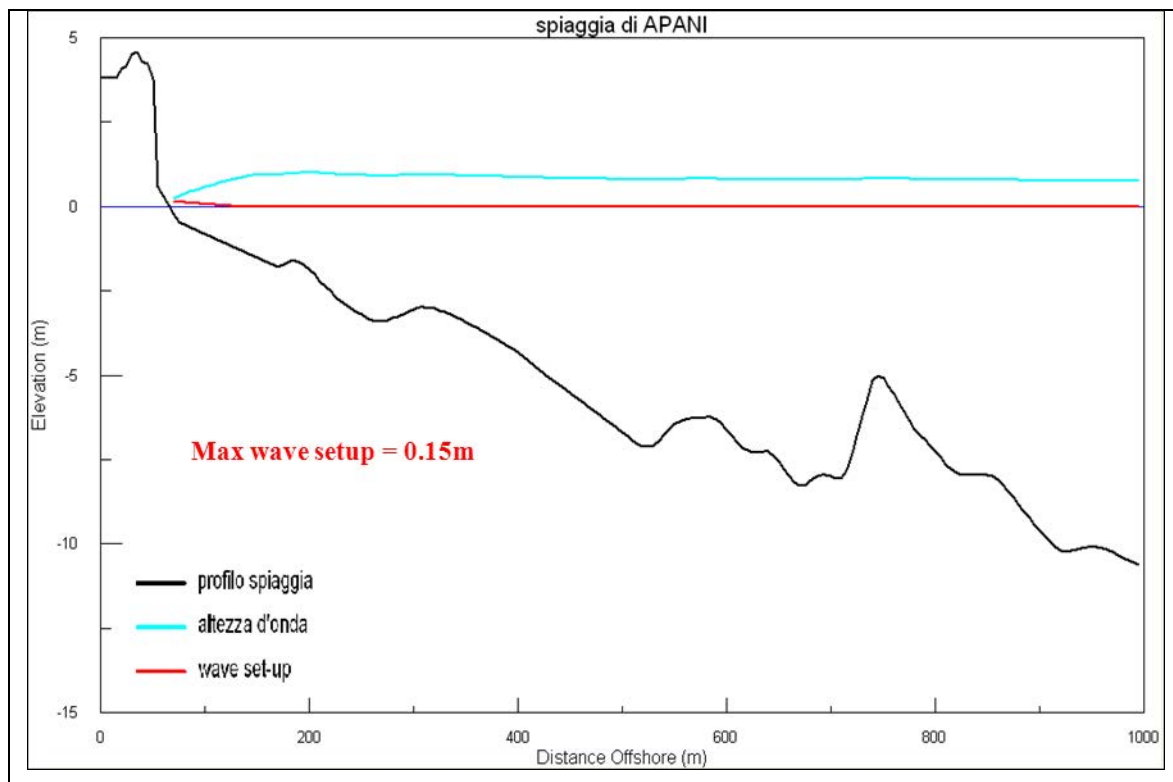


Figura 6.1.3.VI - onda al largo da ESE con Tr 50 anni

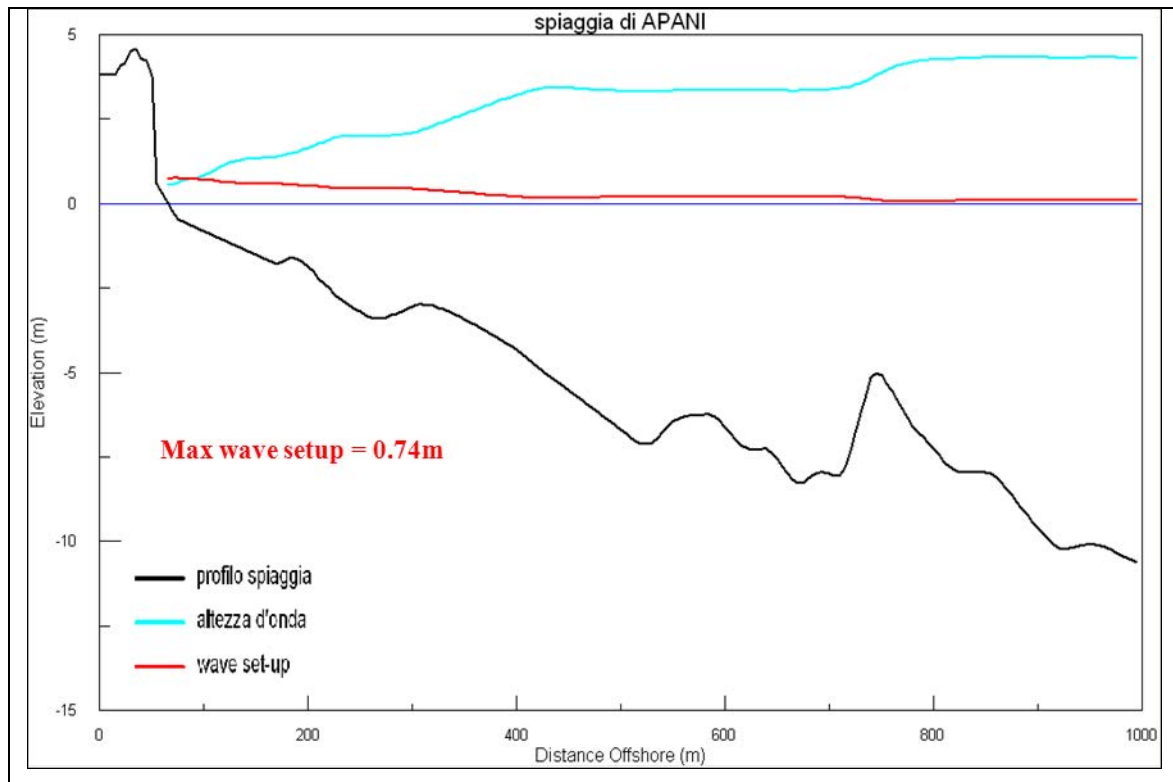


Figura 6.1.3.VII - mareggiata del 06 gennaio 2012

6.1.4. Analisi dei livelli di marea registrati nel basso Adriatico

Lo studio delle oscillazioni del livello marino al largo di Apani è stato effettuato utilizzando i dati acquisiti dal 1999 al 2011 dalla stazione mareografica ubicata nel porto di Bari (Fig. 6.1.4.I).

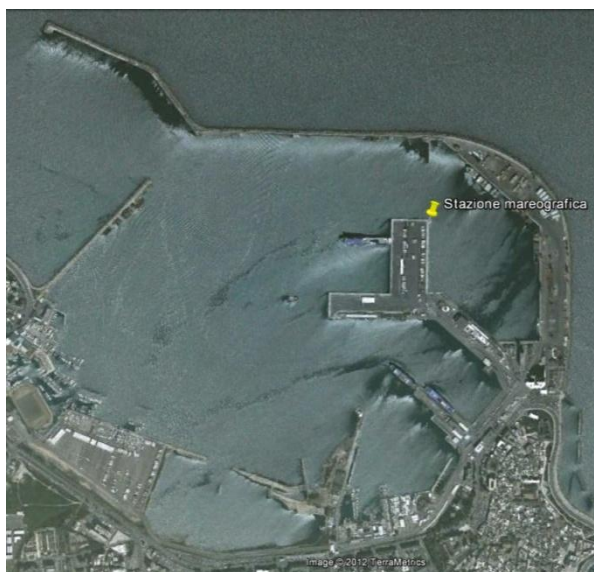


Figura 6.1.4.I - stazione mareografica di Bari.

La stazione è parte della Rete Mareografica Nazionale attualmente gestita dall'ISPRA (ex APAT).

Nella stazione di Bari, dal 02/12/0, la misura del livello idrometrico viene effettuata con un nuovo sensore radar con precisione millimetrica, mentre precedentemente i dati sono stati acquisiti con un sensore ad ultrasuoni (Fig. 6.1.4.II).

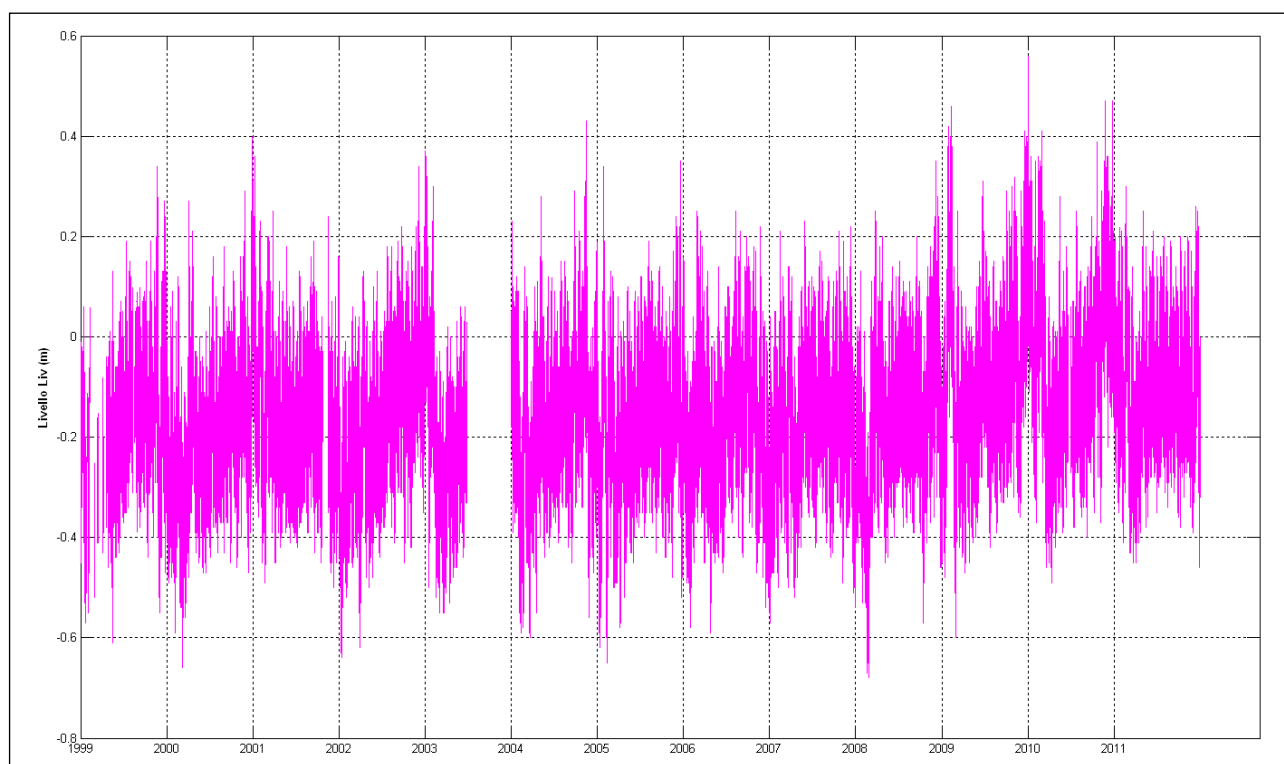


Figura 6.1.4.II - dati acquisiti dal mareografo di Bari.

L'ampiezza delle oscillazioni registrate risulta dell'ordine delle decine di centimetri ed è compatibile con la fenomenologia delle variazioni del livello del mare nel Mediterraneo.

L'analisi dei dati del mareografo di Bari evidenzia a partire dal 2009 un innalzamento del livello medio mare locale ed un aumento dei picchi di marea, con un massimo registrato il 09/02/2010 pari a +0.60 m s.l.m.m.

Dalla figura 6.1.4.II si osserva inoltre che le oscillazioni del livello del mare dovute alla marea sono mediamente dell'ordine dei 30 cm.

Al fine di verificare l'effettivo innalzamento del livello marino, l'analisi è stata estesa a tutte le stazioni presenti nel basso e medio Adriatico della RON e della Rete di Monitoraggio Meteomarinario della Regione Puglia (Fig. 6.1.4.III), realizzata con fondi POR Puglia 2000 – 2006

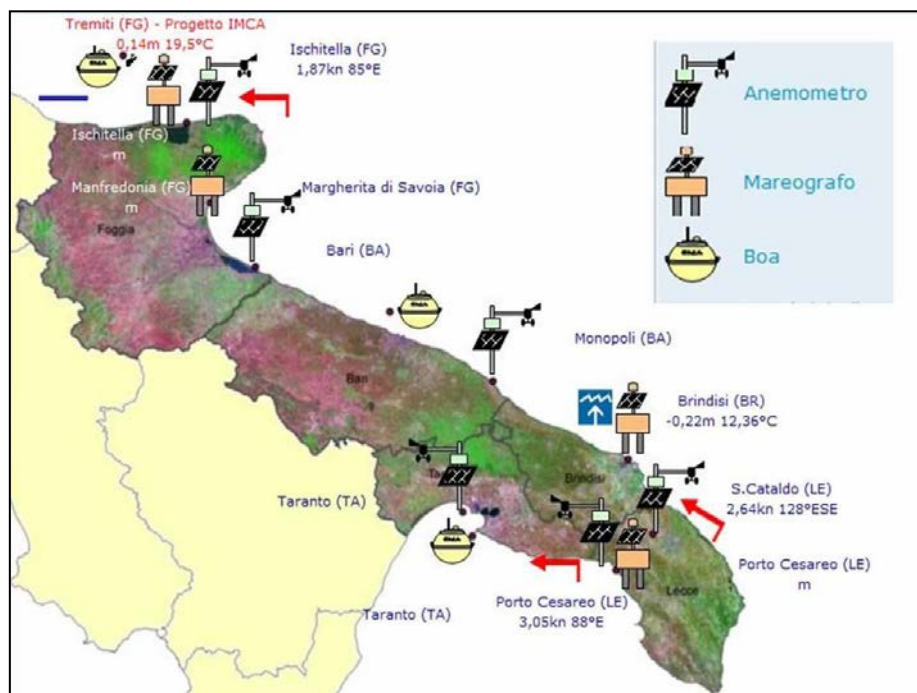


Figura 6.1.4.III - Rete di Monitoraggio Meteomarinario della Regione Puglia

Il valore del livello medio mare annuale è stato calcolato dai dati osservati con l'applicazione di filtri numerici (Doodson) come illustrato nel Volume I del IOC "Manual on Sea Level Measurement and Interpretation" (Unesco, Intergovernmental Oceanographic Commission, 1985 e 2006). Nella tabella 6.4.4.I sono riportati i valori medi annuali trovati per le stazioni dalle quali è stato possibile ottenere le serie temporali rilevate.

L'analisi dei livelli medi annuali in tutte le stazioni esaminate (figura 6.1.4.IV) mostra un generalizzato aumento del livello a partire dal 2009 con differenze tra il 2008 e il 2010 dell'ordine della decina di centimetri.

I valori del livello medio mare negli anni 2009-2010 possono trovare una spiegazione nell'andamento dei valori medi della pressione atmosferica nelle stesse stazioni.

Anno	STAZIONE						
	Ortona	Vieste	Bari	Otranto	Manfredonia	Brindisi	Taranto
1999	-0.065944	-0.14876	-0.20013018	-0.28349	N.D.	N.D.	-0.27186
2000	-0.099448	*	-0.20893923	-0.26833	N.D.	N.D.	-0.28874
2001	-0.066106	-0.12973	-0.17123941	-0.23921	N.D.	N.D.	-0.25342
2002	-0.078190	-0.14265	-0.17785915	-0.25546	N.D.	N.D.	-0.2769
2003	-0.099061	-0.15383	-0.18637233	-0.25126	N.D.	N.D.	-0.27592
2004	-0.073748	*	-0.17126404	-0.24615	N.D.	N.D.	-0.26809
2005	-0.092883	-0.12705	-0.18589566	-0.25841	N.D.	N.D.	-0.27644
2006	-0.090337	-0.12504	-0.18351354	-0.25278	N.D.	N.D.	-0.26965
2007	-0.102365	-0.13806	-0.17828778	-0.25895	-0.0761824	-0.23205	-0.24237
2008	-0.082617	-0.12677	-0.16735281	-0.26143	-0.0821759	*	-0.23519
2009	-0.007844	-0.06661	-0.10124588	-0.20001	*	*	-0.14937
2010	0.008783	-0.03372	-0.05142586	-0.16809	0.0246966	-0.0813	-0.11895
* basso rendimento della stazione							
Differenza 2010-2008	0.0914	0.0930	0.1159	0.0933	0.1069	-0.0813	0.1162

Tabella 6.4.4.I - livelli medi annuali calcolati con il filtro di Doodson

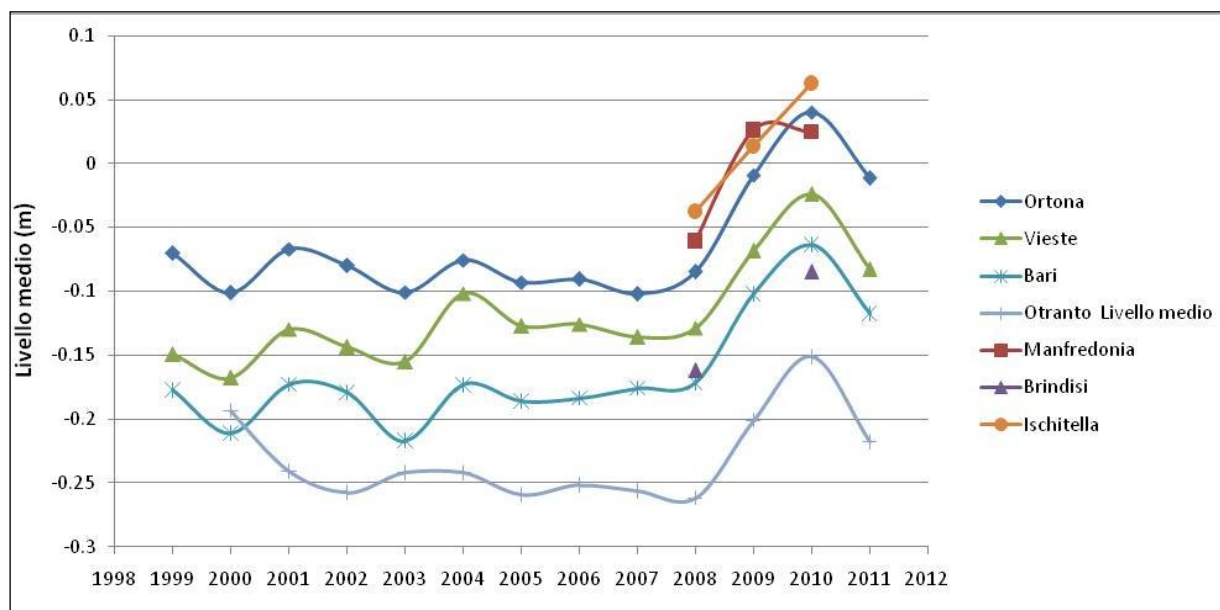


Figura 6.1.4.IV - Livello medio annuale

Nella figura 6.1.4.V sono riportate le pressioni atmosferiche medie nel periodo 1999 – 2011 per le stazioni di Ortona, Vieste, Bari e Otranto; si osserva appunto che nel periodo 2009 - 2010 le pressioni medie sono nettamente inferiori a quelle degli anni precedenti.

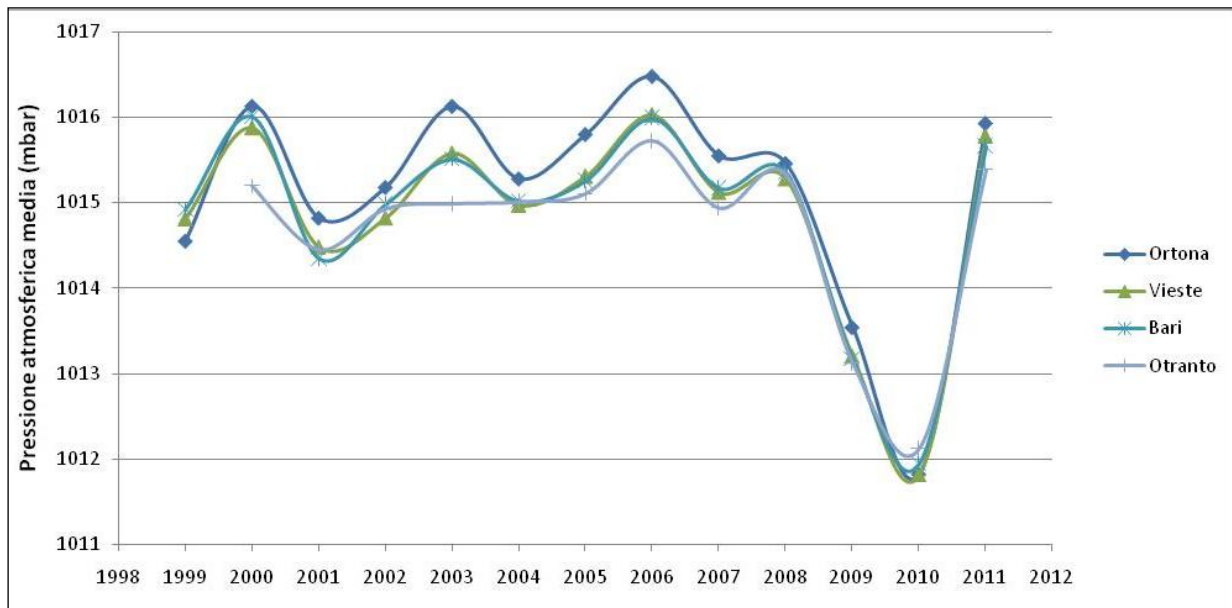


Figura 6.1.4.V - Pressione atmosferica media annuale nelle stazioni di Ortona, Vieste, Bari e Otranto.

Per le stazioni di misura di cui si disponeva delle serie complete di dati, sono stati calcolati anche i valori medi mensili del livello del mare (Fig. 6.1.4.VI) che nell'inverno 2008-2009 e 2009-2010 hanno raggiunto i valori massimi di tutto il periodo considerato. I sopracitati periodi sono stati caratterizzati da mareggiate particolarmente intense generate da perturbazioni atmosferiche che si sono protratte per parecchi giorni con valori di pressione atmosferica notevolmente inferiori alla media.

Nella figura 6.1.4.VII, per la stazione di Bari, sono riportati i valori medi mensili dei livelli del mare e delle pressioni atmosferiche; si può osservare la buona correlazione tra le due grandezze.

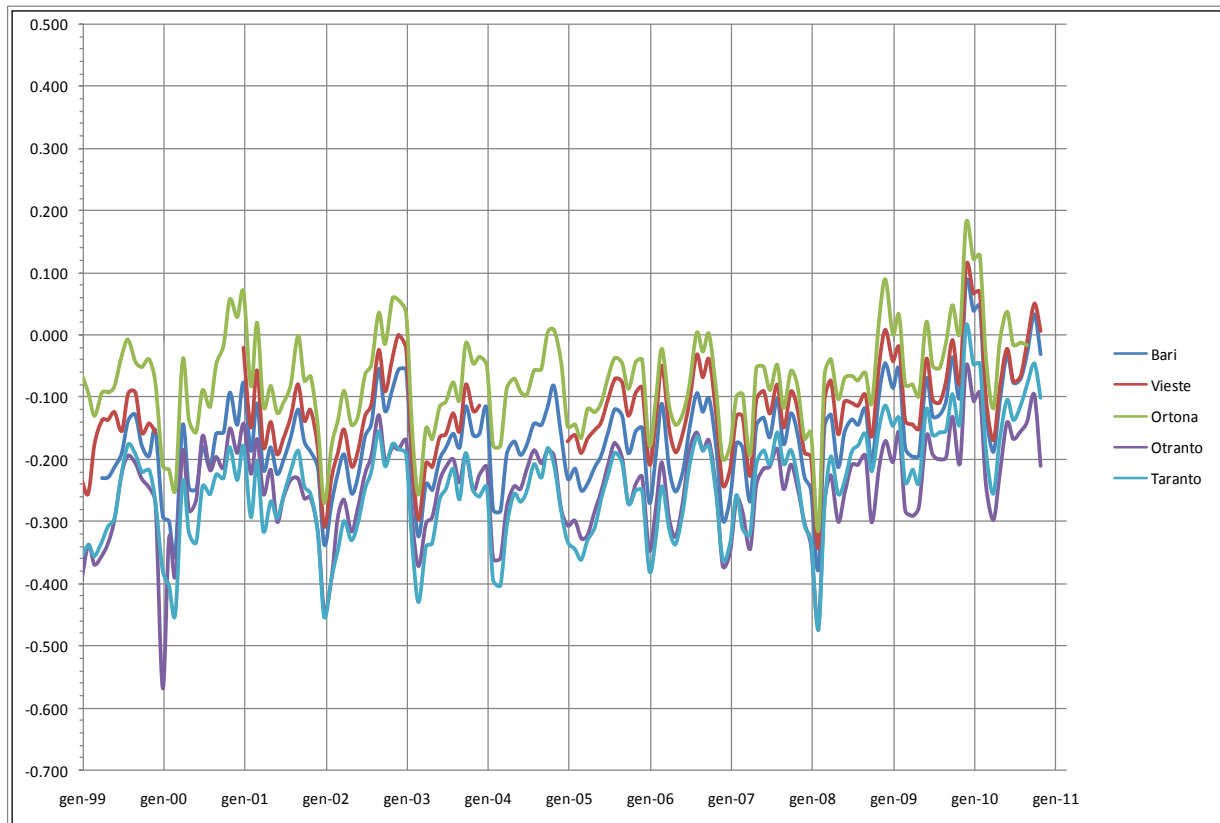


Figura 6.1.4.VI - Livelli medi mensili in alcune stazioni del Medio Adriatico e in quella di Taranto.

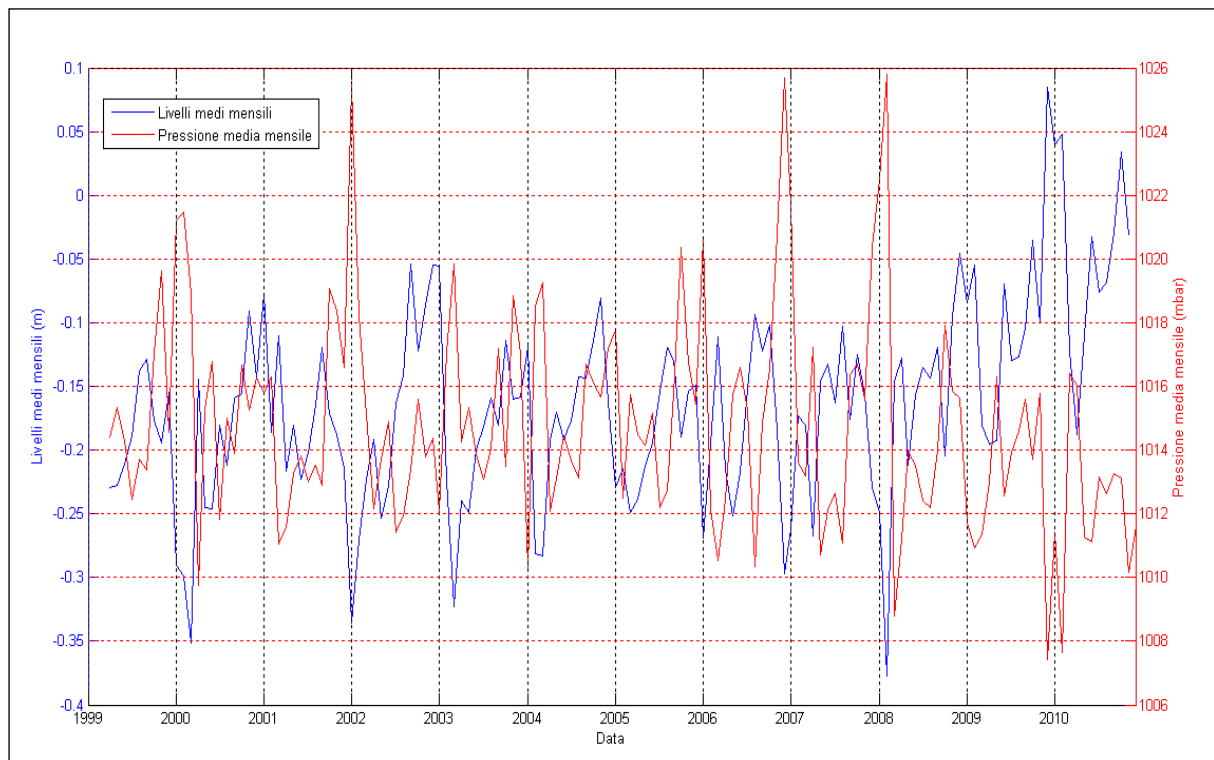


Figura 6.1.4.VII: valori medi mensili del livello del mare e pressione atmosferica nella stazione di Bari.



6.1.5. Altezza di risalita (*runup*)

Il runup di un'onda è la massima altezza verticale di risalita dell'onda su una struttura al di sopra del livello medio del mare.

Nel presente studio il calcolo dell'altezza di risalita è stato effettuato per determinare la massima quota che può essere raggiunta dal moto ondoso lungo un paramento avente pendenza pari a quella media rilevata lungo la spiaggia di Torre Guaceto.

Il calcolo dell'altezza di risalita è stato effettuato confrontando i risultati di varie formule esistenti in letteratura a partire dalla mareggiata al largo da NNE con tempo di ritorno T_r pari a 50 anni.

In particolare sono state utilizzate le formule di seguito riportate:

$$R_{u2\%} = 1.86 H_0 \xi_0^{0.71} \quad \text{MASE}$$

$$R_{u2\%} = 0.36 g^{0.5} m_e H_0^{0.5} T_p \quad \text{KOMAR}$$

$$R_{u2\%} = 1.1 \quad 0.35 m_0 \quad H_0 L_0^{0.5} + \frac{H_0 L_0 \quad 0.563 m_0^2 + 0.004}{2}^{0.5} \quad \text{STOCKDON}$$

$$R_u = 0.6 m_e \quad H_0 L_0^{0.5} \quad \text{se } m_0 \geq 0.10$$

$$R_u = 0.05 \quad H_0 L_0^{0.5} \quad \text{se } m_0 < 0.10 \quad \text{NIELSEN HANSLOW}$$

dove:

- $R_{u2\%}$ è la massima quota, misurata verticalmente rispetto al livello medio mare (l.m.m.), superata dal 2% delle onde incidenti;
- H_0 è la massima altezza d'onda al largo (onda da NNE - $H_0 = 5.31\text{m}$);
- T_p è il periodo di picco dell'onda al largo ($T_p = 9.53\text{s}$);
- L_0 è la lunghezza d'onda al largo ($L_0 = 142\text{m}$);
- m_e è la pendenza della spiaggia emersa ($m_e = 0.053$);
- m_0 è la pendenza della spiaggia sommersa ($m_0 = 0.012$);

- $\xi_0 = \frac{m_0}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}}$ è il numero di Iribarren;
- g è l'accelerazione di gravità ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

Le precedenti formule sono state ricavate sperimentalmente in base a dati misurati sul campo, quindi tengono conto anche del fenomeno del wave setup.

Applicando le su indicate formule al paraggio di Torre Guaceto, si ottengono i valori di runup riportati nella tabella 6.1.5.I.

Ai fini della verifica del rischio di ingressione marina, è stato adottato il massimo valore calcolato pari a +1.37m.

formula <i>runup</i>	R_u (m)
MASE	1.37
KOMAR	1.31
STOCKDON	1.09
NIELSEN - HANSLOW	1.37

Tabella 6.1.5.I - Valori di runup calcolati

Dal valore massimo adottato è stato sottratto il corrispondente valore di wave setup ottenuto con il modello SBEACH32 per l'onda da NNE, pari a +0.85m, ottenendo in definitiva il contributo per effetto del solo runup pari a +0.52m.

6.2. STIMA DELLE AREE INONDABILI

Per valutare l'estensione delle aree costiere a rischio ingressione marina sono stati considerati tre scenari con differente valore del sovrizzo rispetto al livello medio mare:

- **50 cm;**
- **100 cm;**
- **214 cm:** prevede l'effetto contemporaneo dei sovrizzi di tempesta (*storm surge*), di marea, di *wave setup* e *run up*, i valori massimi dei quali sono stati quantificati nei paragrafi precedenti. È importante sottolineare che, il valore di 214 cm è da ritenere esatto solo nell'ipotesi di perfetta coincidenza temporale tra i singoli fenomeni che contribuiscono alla variazione del livello medio marino; in generale, la perfetta coincidenza ha una scarsa probabilità di accadimento.



6.2.1. Flo-2D

Per definire le aree interessate dalla ingressione marina è stato utilizzato il software commerciale FLO-2D.

Il Flo-2D si basa su un modello idrologico-idraulico bidimensionale (2D) in grado di simulare la propagazione dell'onda di piena e di colate detritiche in bacini idrografici e l'interazione con le varie ostruzioni e strutture che caratterizzano le aree antropizzate tra le quali ponti, argini e tombini. Il FLO-2D è un modello alle differenze finite che integra l'equazione dei momenti in forma completa, utilizzando uno schema geometrico grigliato a passo costante, finalizzato alla stima delle variabili idrauliche (tirante, velocità e portata), cella per cella, e distinguendo per ognuna otto potenziali direzioni di flusso.

6.2.2. I risultati

Scenario 1 (50 cm di altezza della colonna d'acqua)

In figura 6.2.2.I è riportata, in scala di colori, l'altezza che la colonna d'acqua raggiungerebbe, in prossimità delle spiagge di Torre Guaceto, se si verificasse un sovrizzo rispetto al livello medio mare pari a circa +0.5m.

Come si può notare, le aree a rischio ingressione marina sarebbero limitate ed interesserebbero, sostanzialmente, solo parte delle superfici sabbiose, non costituendo, perciò, un reale rischio per l'ambiente e per le strutture antropiche presenti nell'interno.

In figura 6.2.2.II è rappresentato un dettaglio dell'area di analisi H; l'immagine evidenzia l'esigua superficie di territorio che sarebbe interessata dai fenomeni di inondazione.

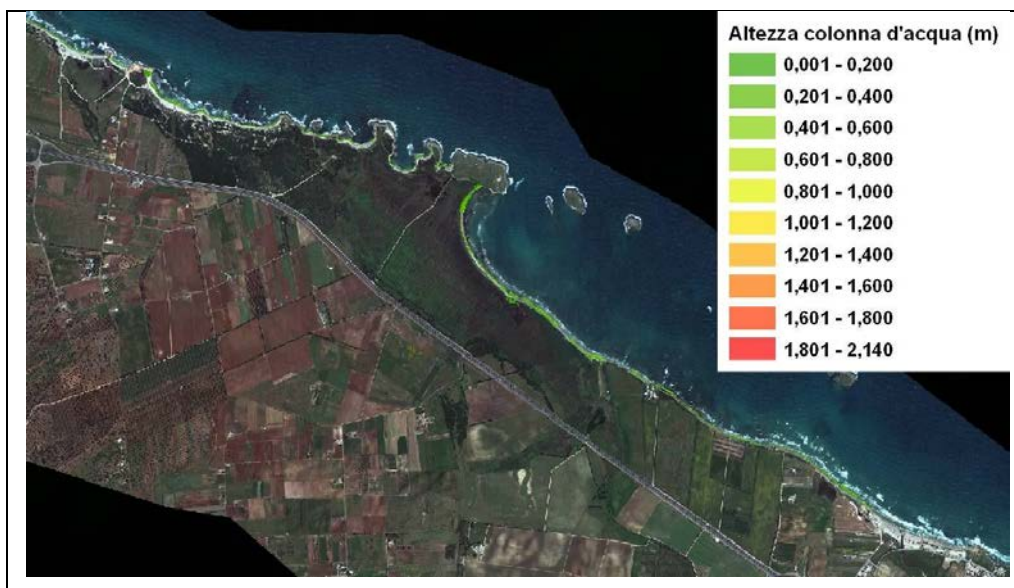


Figura 6.2.2.I: Aree inondata con un sovrizzo pari a +0.5m.

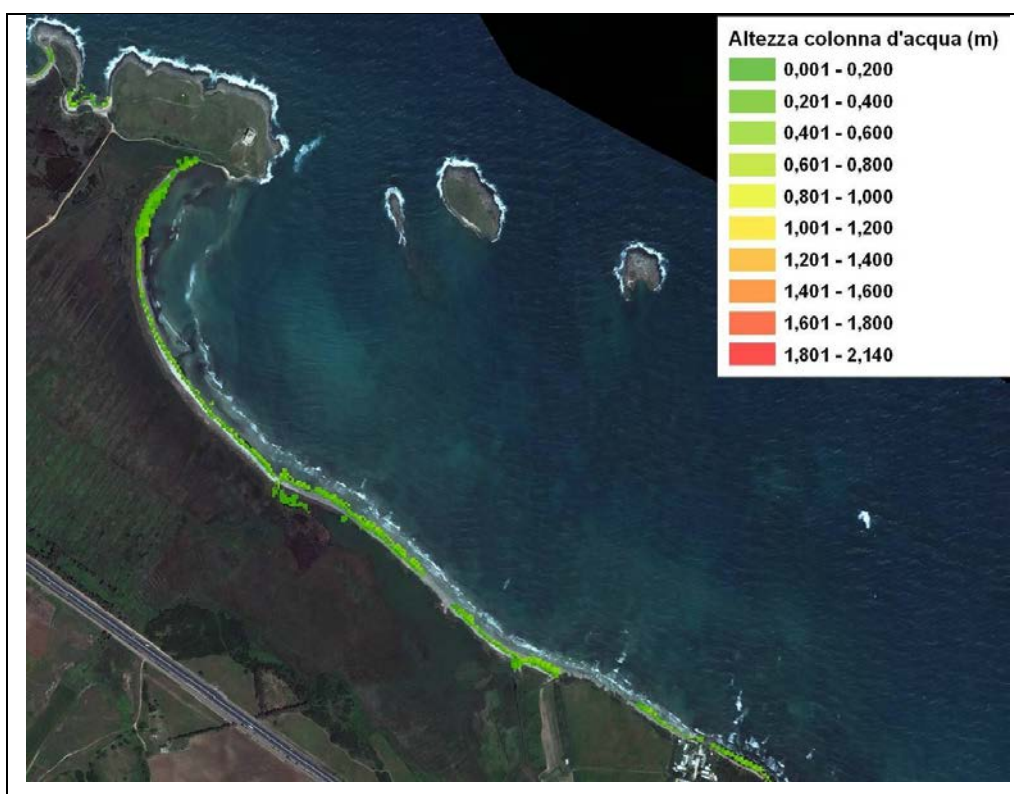


Figura 6.2.2.II - simulazione per l'area H (sovrizzo pari a +0.5m)

Scenario 2 (100 cm di altezza della colonna d'acqua)

In figura 6.2.2.III è riportata, in scala di colori, l'altezza che la colonna d'acqua raggiungerebbe, in prossimità delle spiagge di Torre Guaceto, se si verificasse un sovrizzo rispetto al livello medio mare pari a circa +1m. Come si può notare, sono presenti due

settori a rischio ingressione marina nella parte settentrionale e centrale del territorio dell'AMP (figg. 6.2.2.IV e 6.2.2.V).

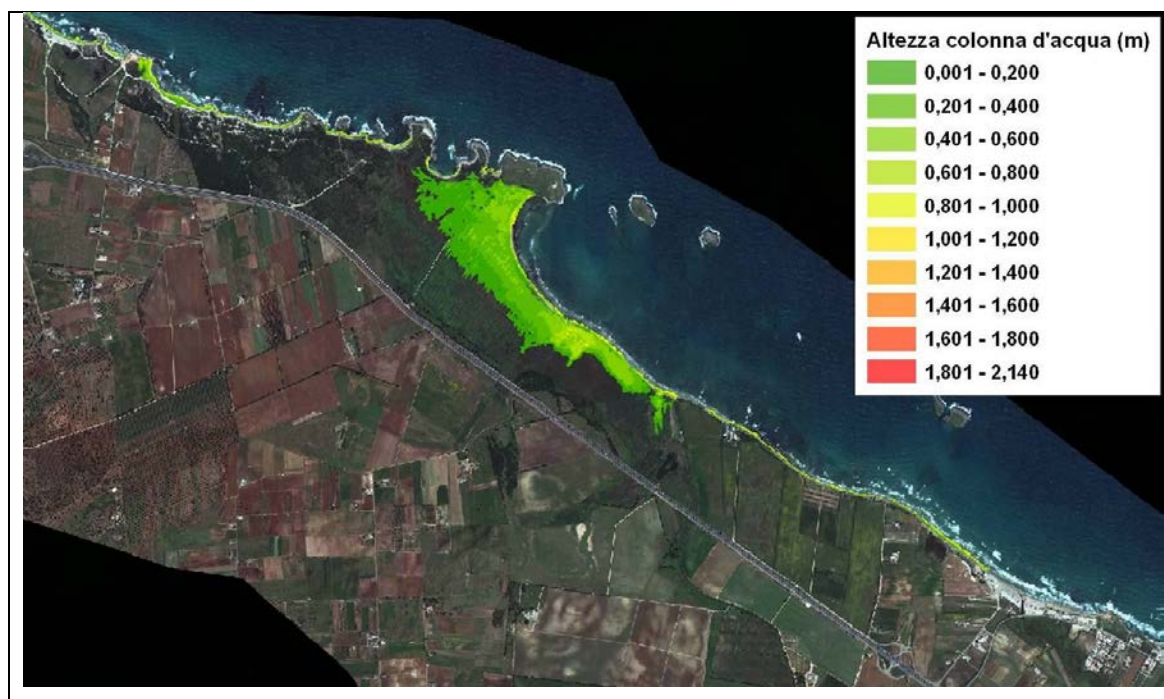


Figura 6.2.2.III - Aree inondate con un sovrizzo rispetto al livello medio mare pari a +1m.

Nella parte settentrionale, area di analisi C (fig. 6.2.2.IV), i fenomeni interesserebbero la spiaggia e l'ambiente retrostante. Essendo l'area C sede, durante la stagione estiva, di un lido molto frequentato, la presenza di persone e di manufatti costituirebbe un fattore di aumento della vulnerabilità e, conseguentemente, del rischio, rendendo, fattivamente, l'area in questione, critica.

Per lo scenario in questione, l'area di analisi maggiormente interessata dall'ingressione marina, con una estensione superiore ai 60 ha, sarebbe la H (figura 6.2.2.V). I fenomeni interesserebbero buona parte della zona umida e coinvolgerebbero tratti dei sentieri pedonali presenti, costituendo, un potenziale pericolo per i fruitori dell'AMP, per le strutture e per la viabilità. Considerata la vulnerabilità ed il pericolo, l'area può essere definita a rischio elevato.

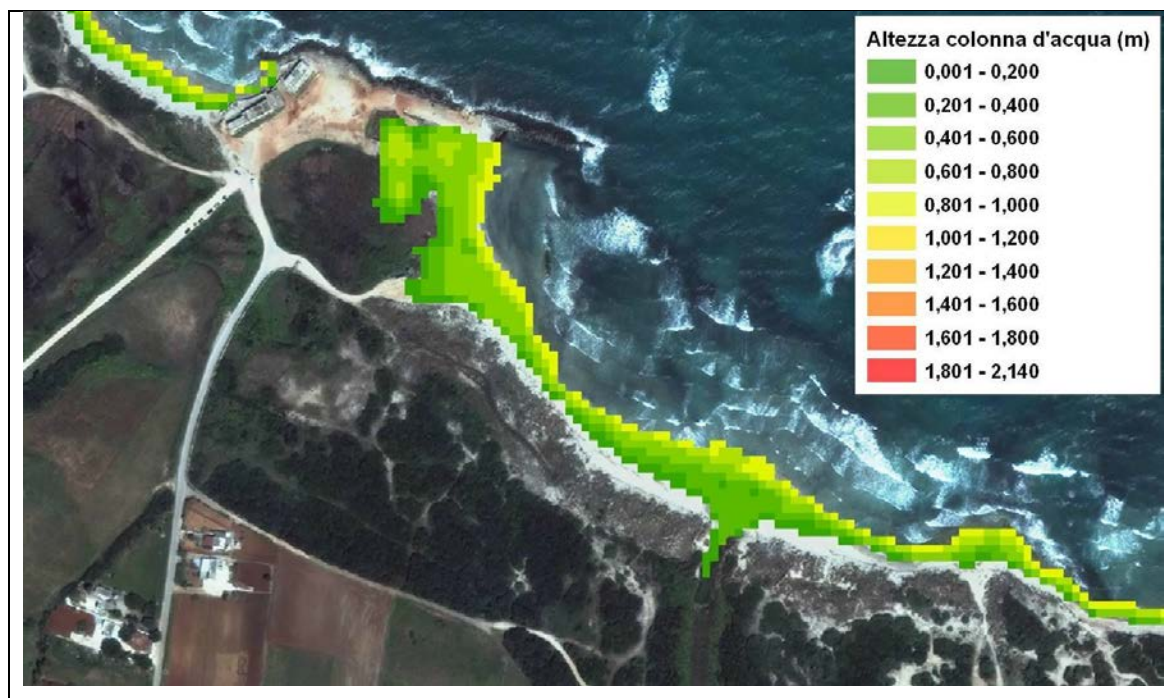


Figura 6.2.2.IV - simulazione per l'area C (un sovrizzo rispetto al livello medio mare pari a +1m)

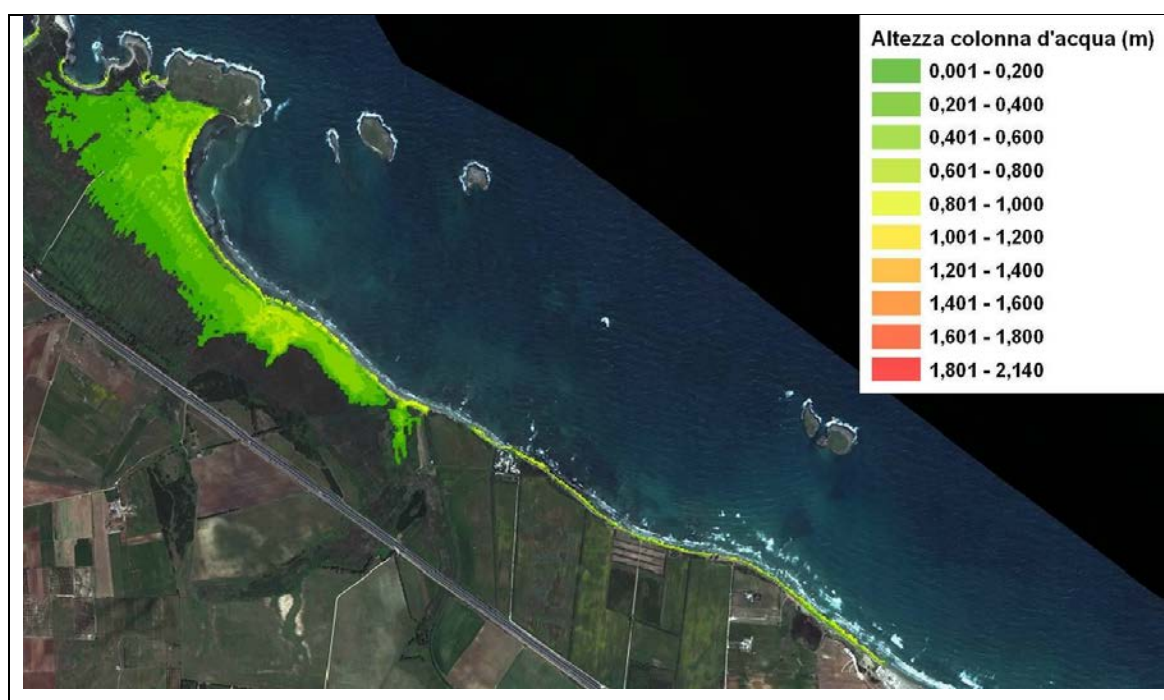


Figura 6.2.2.V - simulazione per l'area H (un sovrizzo rispetto al livello medio mare pari a +1m)

Scenario 3 (214 cm di altezza della colonna d'acqua)

In figura 6.2.2.VI è riportata, in scala di colori, l'altezza che la colonna d'acqua raggiungerebbe, in prossimità delle spiagge di Torre Guaceto, se si verificasse un sovrizzo rispetto al livello medio mare pari a circa +2.14m. Come si può notare, le aree a rischio ingressione marina sono piuttosto ampie, con una estensione di circa 126ha.

In particolare, si notano 3 grandi aree di ingressione, la prima all'estremo nord dell'AMP con una estensione di circa 10 ettari, la seconda nella parte centrale, con una estensione poco superiore ai 104 ha e, infine, la terza, nella parte più meridionale, con una estensione di circa 13 ha.

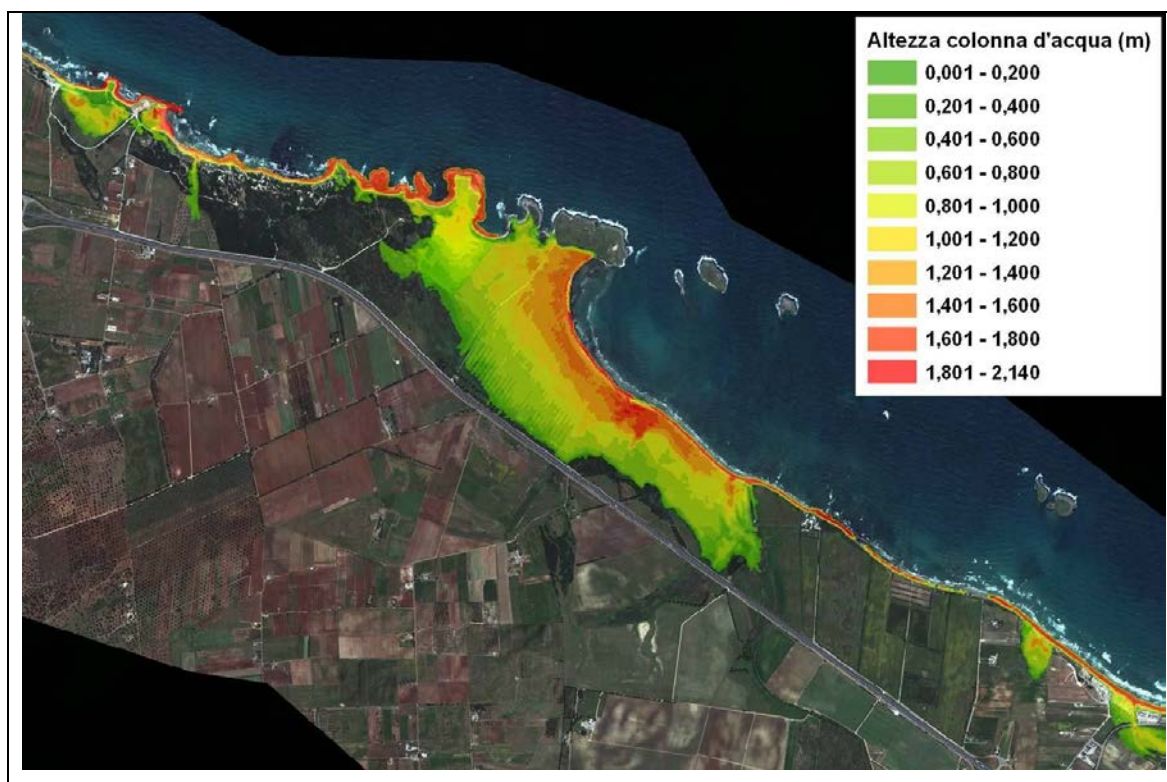


Figura 6.2.2.VI - Aree inondata con un sovrizzo rispetto al livello medio mare pari a +2.14m.

In particolare, in figura 6.2.2.VII, è possibile notare che nel caso di ingressione marina, nelle aree di analisi A e B, il cordone dunale e la fascia retrodunale sarebbero completamente coperte ed, inoltre, sarebbe interessata, parzialmente, la struttura antropica situata nella parte centrale dell'area A.

Le aree C e D, rappresentate in figura 6.2.2.VIII, mostrano due situazioni differenti, infatti, mentre nell'area D l'ingressione coinvolgerebbe solo la spiaggia, nell'area C, i fenomeni interesserebbero anche la zona retrodunale e un canale posto nella parte centrale, il quale veicolerebbe le acque verso l'interno per centinaia di metri. Inoltre, l'area C è sede, durante la stagione estiva, di un lido molto frequentato, con le relative attrezzature. La presenza di persone e di manufatti costituisce un fattore di aumento della vulnerabilità e, conseguentemente, del rischio, rendendo l'area in questione, fortemente critica.

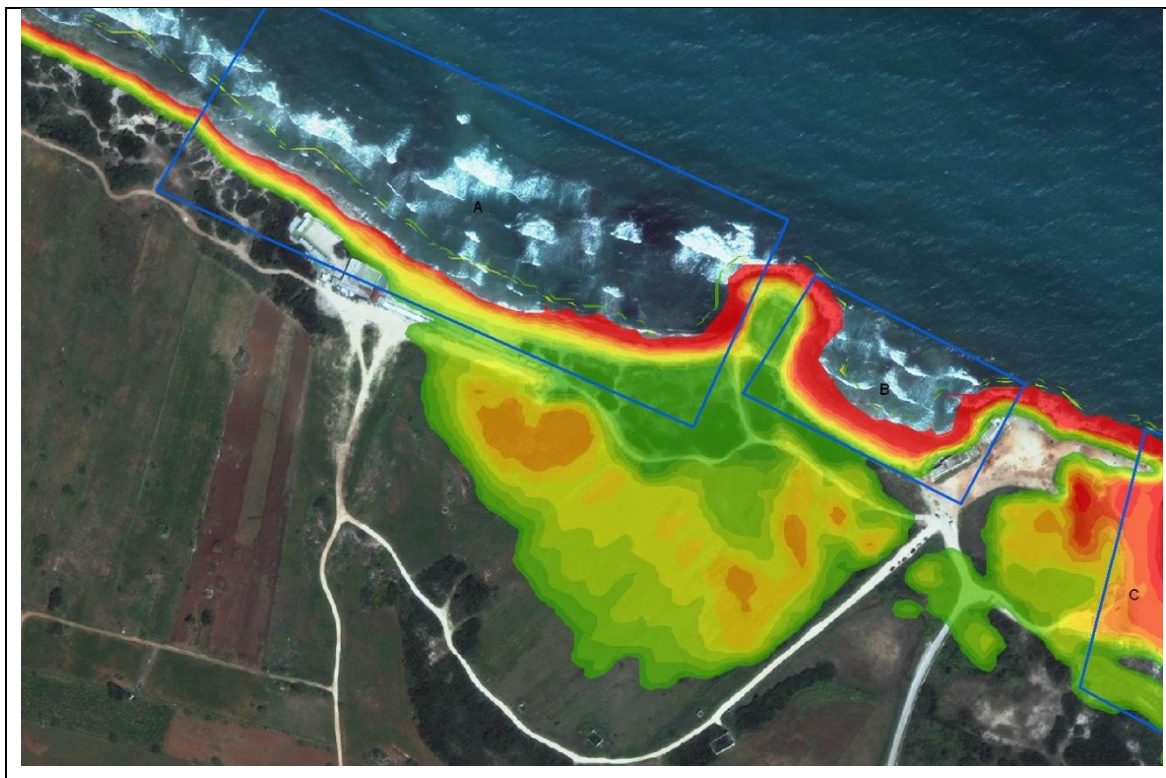


Figura 6.2.2.VII: simulazione per le aree A e B (sovrалzo pari a +2.14m)

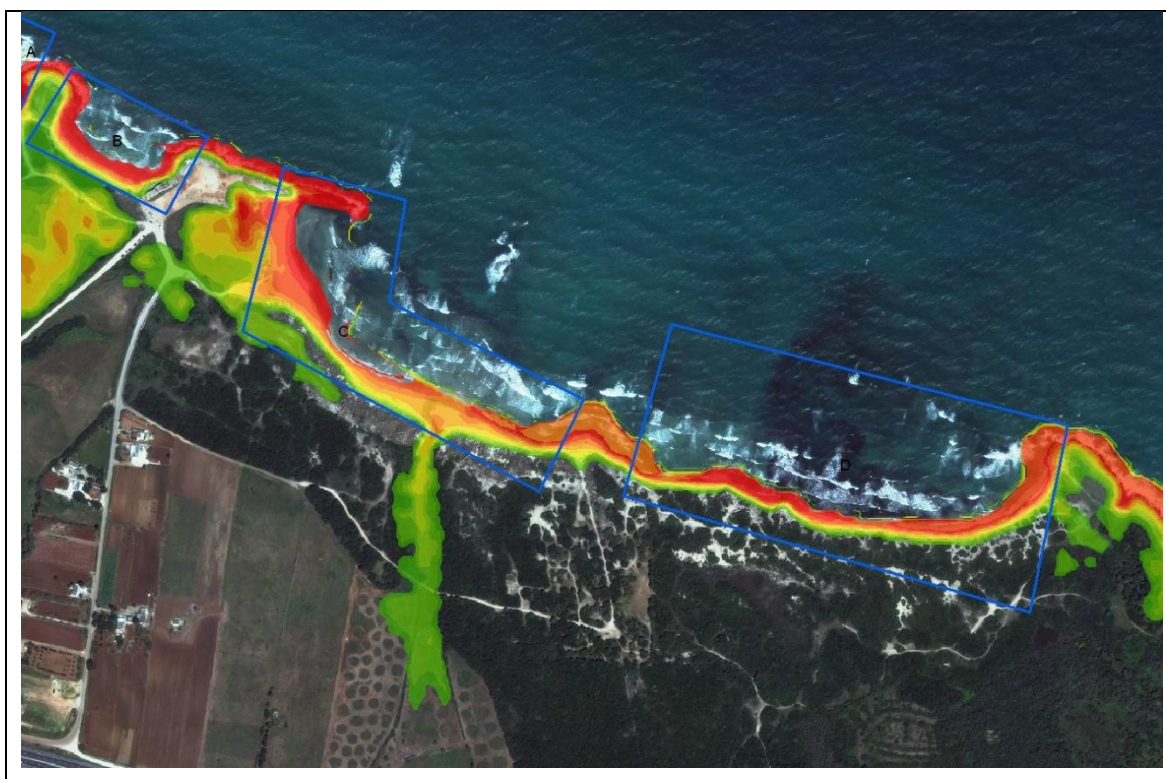


Figura 6.2.2.VIII: simulazione per le aree C e D (sovrалzo pari a +2.14m)

Le aree E, F e G, rappresentate in figura 6.2.2.IX, in seguito all'evento sarebbero completamente inondate, anche se buona parte del settore sommerso sarebbe costituito

da zona umida con acqua salmastra, quindi a bassa vulnerabilità. I pochi manufatti presenti, non sarebbero coinvolti nel fenomeno.

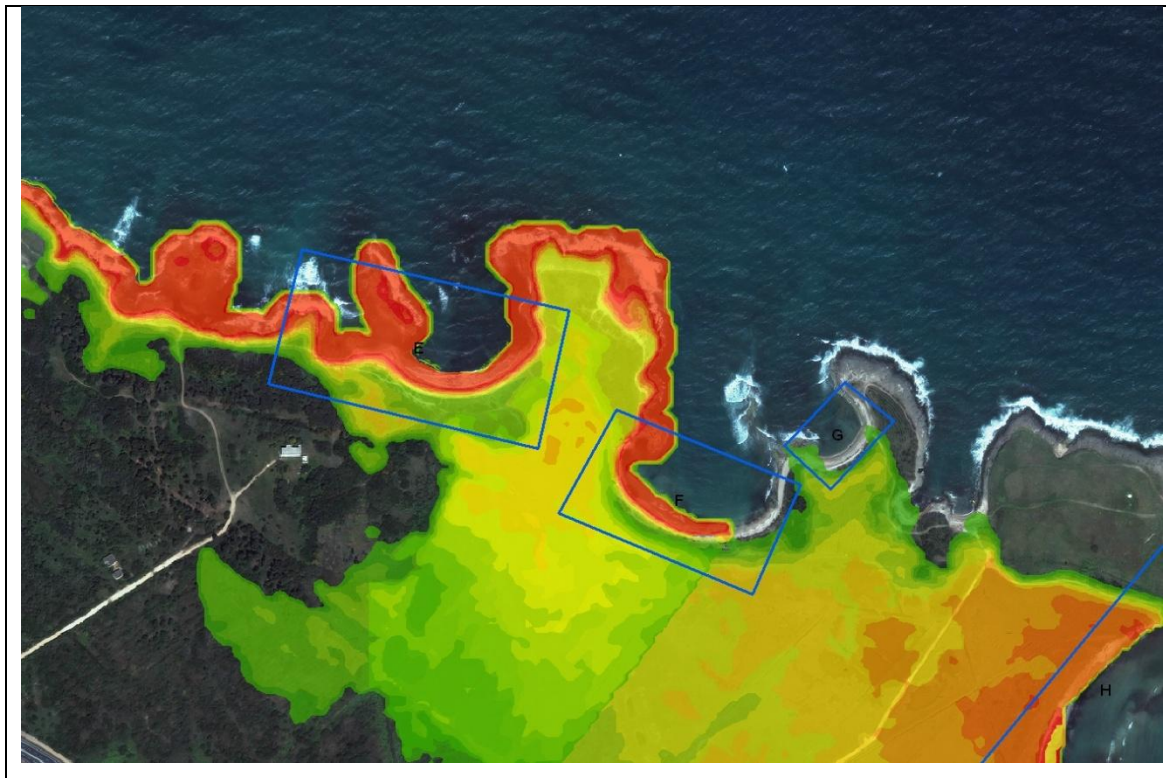


Figura 6.2.2.IX - simulazione per le aree E, F e G (sovrалzo pari a +2.14 m)

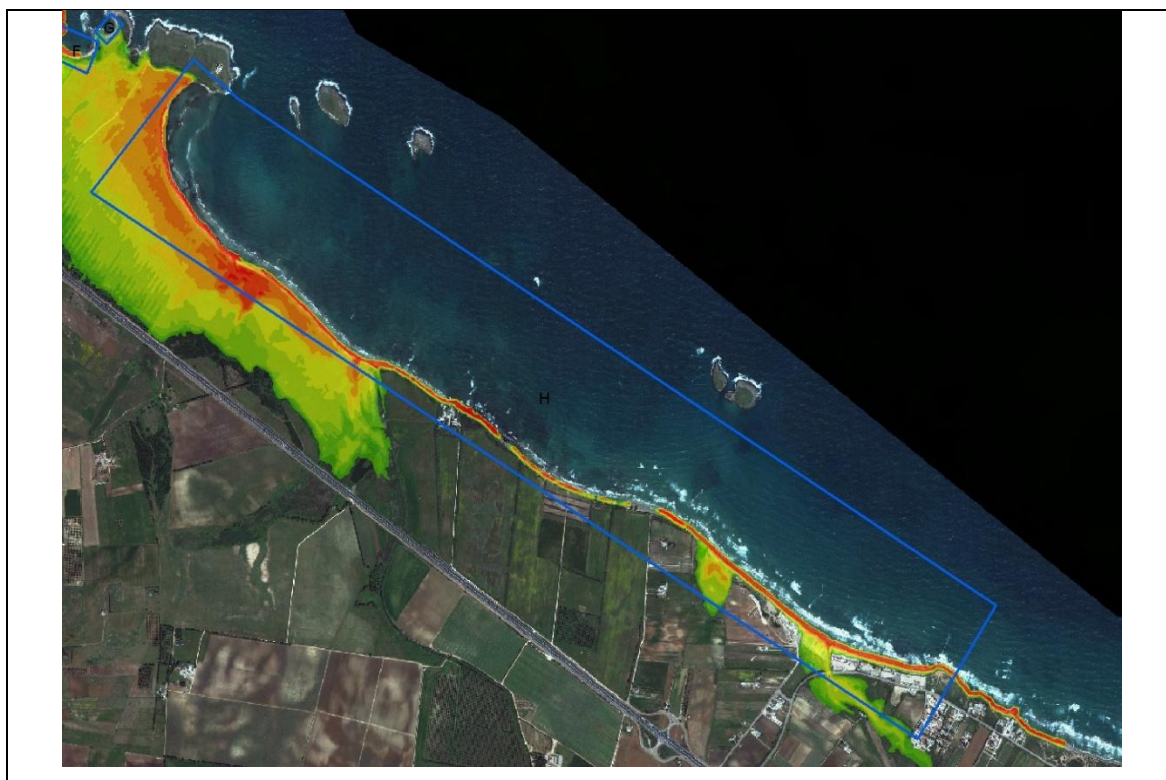


Figura 6.2.2.X - simulazione per l'area H (sovrалzo pari a +2.14m)

L'area maggiormente interessata dall'ingressione marina sarebbe la H (fig. 6.2.2.X), si notano, infatti, nella parte settentrionale e nella parte meridionale 2 settori particolarmente colpiti.

Il primo settore (figura 6.2.2.XI), mostra l'estensione notevole del fenomeno di ingressione, il quale, interesserebbe l'intera zona umida e coinvolgerebbe i sentieri pedonali, costituendo, un potenziale pericolo per i fruitori dell'AMP, per le strutture e per la viabilità.

Considerata la vulnerabilità ed il pericolo, l'area può essere definita a rischio elevato. A tal proposito è interessante notare che, la strada statale SS379 non sarebbe coinvolta dagli allagamenti, risultando normalmente percorribile.

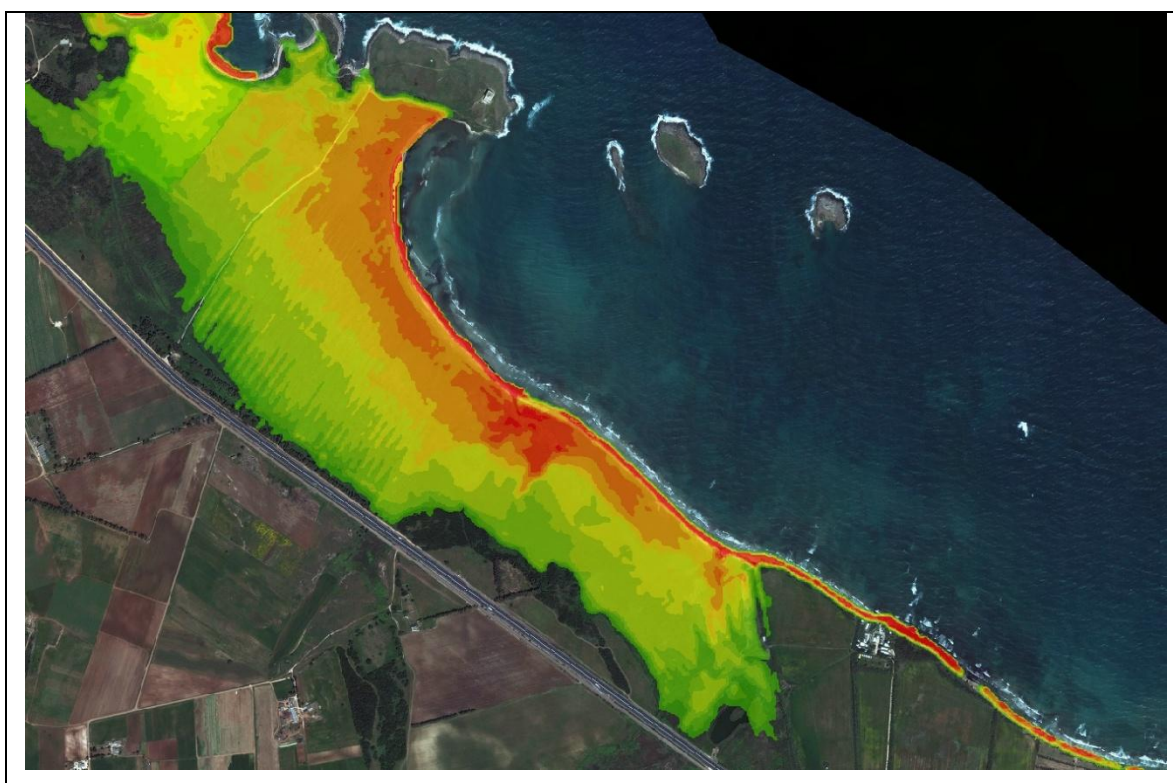


Figura 6.2.2.XI - particolare dell'area H. Zona inondata con un sovrizzo pari a +2.14m

Il secondo settore dell'area H (figura 6.2.2.XII), coincide, solo in parte con l'AMP, infatti, l'area protetta termina alla periferia dell'area a forte antropizzazione posta a destra. La scelta di coinvolgere nell'analisi anche un settore esterno all'AMP è stata decisa per dare continuità spaziale ai fenomeni e per la presenza del Canale Reale, importante via d'acqua, che influenza pesantemente i risultati dell'analisi. Come si nota, il canale costituirebbe una via preferenziale d'ingressione trasportando le acque per centinaia di metri verso l'interno ed, inoltre, in caso di piena coincidente con i fenomeni in analisi, le

acque trasportate dal Canale Reale costituirebbero una barriera naturale al deflusso delle acque marine, generando una esondazione che coinvolgerebbe una maggiore estensione dell'area antropizzata rispetto all'area coinvolta dai soli fenomeni d'ingressione. Le considerazioni appena esposte inducono a definire il settore come a forte rischio.

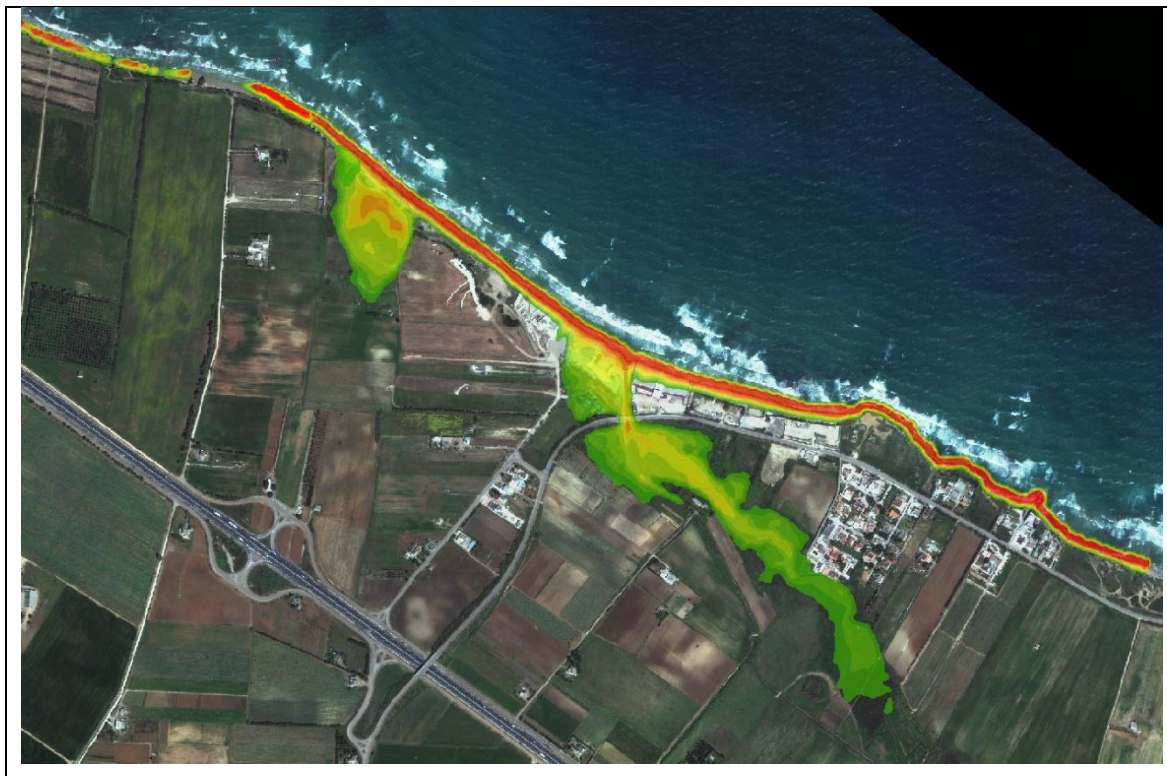


Figura 6.2.2.XII - particolare dell'area H. Zona inondata con un sovrizzo pari a +2.14m



7. LA COSTA E I FENOMENI DI EROSIONE

La costa può essere definita come l'elemento di relazione e di interazione tra mare e terra. Per via anche delle attività che sulla stessa si sviluppano, la costa può essere considerata una risorsa non solo dal punto di vista ambientale, ma anche sociale ed economico.

L'erosione costiera può essere definita in maniera esemplificativa, senza rinunciare in alcun modo ad un'efficace chiarezza espressiva, come l'invasione della terra da parte del mare. Essa è valutata facendo riferimento ad un lasso temporale sufficientemente lungo, tale da permettere di eliminare eventi estremi quali tempeste e dinamiche dei sedimenti a carattere locale.

L'erosione costiera implica tre differenti tipi di impatto o rischi:

Perdita di aree con valore economico;

Distruzione delle difese naturali (solitamente sistemi di dune) anche a seguito di un singolo evento tempestoso, con conseguente potenziale o effettiva inondazione dell'entroterra;

Distruzione delle opere di difesa artificiali, con conseguente potenziale o effettiva inondazione dell'entroterra.

Il processo di erosione ed accrescimento costiero è sempre esistito ed ha contribuito, da sempre, a plasmare il panorama costiero creando una grande varietà di tipologie di coste. L'erosione è influenzata anche dall'entroterra: le piogge e l'azione esercitata dall'acqua sul letto dei fiumi e dei torrenti hanno l'effetto di produrre movimento di sedimenti verso la costa, i quali forniscono materiale essenziale per contribuire allo sviluppo di spiagge e dune sabbiose e più in generale per creare luoghi atti ad insediare attività economiche e ricreative.

Numerose sono le funzioni svolte dai depositi sedimentari, quali, protezione dal rischio di inondazione delle aree sottoposte dell'entroterra, assorbimento dell'energia delle onde più impetuose durante le tempeste, riduzione dell'eutrofizzazione delle acque costiere e il favorire lo sviluppo di insediamenti e proliferazione di specie faunistiche.

L'erosione costiera è, usualmente, il risultato di una combinazione di fattori, sia naturali che indotti dall'uomo, operanti su diversa scala.



I fattori naturali più rilevanti sono: vento e tempeste, correnti prossime alle spiagge, innalzamento del livello del mare, subsidenza del suolo e apporto liquido e solido dei fiumi a mare.

I fattori indotti dall'uomo includono: utilizzazione della fascia costiera per la realizzazione di infrastrutture e opere per insediamenti abitativi, industriali e ricreativi, uso del suolo e alterazione della vegetazione, estrazioni di acqua dal sottosuolo, lavori per la regimazione dei corsi d'acqua per la difesa del suolo e per il prelievo di risorsa per uso potabile, irriguo e industriale, estrazione di inerti dai fiumi, dragaggi, eccetera.

Molte coste europee sono interessate da fenomeni erosivi la cui dimensione muta da Paese a Paese con risultati nel complesso allarmanti. L'Italia arriva ad oltre il 23% del litorale soggetto a erosione, in gran parte frutto della rapida urbanizzazione a cui sono state soggette negli ultimi decenni coste e spiagge. In particolare, dagli anni cinquanta, anche lungo le coste italiane, e in Puglia lungo i suoi circa novecento chilometri di costa, si sono manifestati in modo palese locali e diffusi fenomeni di erosione delle coste sabbiose, sia come trend naturale sia come fenomeno indotto dalla pressione d'uso della fascia costiera.

Nell'ambito della redazione del Piano Regionale delle Coste della Regione Puglia è stato condotto lo studio della criticità all'erosione delle coste sabbiose analizzando le linee di costa regionali del 1992, 2000 e 2005. Nel lasso di tempo considerato, è stato osservato che la percentuale di tratti di costa sabbiosa in arretramento è del 4,6%. Tale valore è inferiore al 21,4%, del periodo 1950 – 2000, ricavato dai tecnici dell'APAT (Barbano et al., 2006) nell'ambito di un progetto a scala nazionale realizzato dal Ministero dell'Ambiente, nel 2006, volto a definire lo stato della costa italiana e le sue criticità; tale risultato indica che i fenomeni erosivi più intensi sono accaduti in anni antecedenti al 1992, con una legge presumibilmente decrescente a partire dalla data in cui gli effetti antropici si sono manifestati per la prima volta sul litorale. Se da un lato il trend è confortante è da considerare che i tratti ancora oggi in erosione coincidono, in genere, con quelli che hanno già subito precedentemente forti arretramenti, per cui ulteriori azioni erosive, anche se di piccola entità, potrebbero determinare la scomparsa completa dell'arenile.



7.1. EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA DELL'AREA MARINA PROTETTA DI TORRE GUACETO

L'evoluzione della linea di riva è funzione dell'interazione tra fattori naturali e antropici. I fenomeni erosivi possono essere definiti come l'avanzamento del mare rispetto alla terra. Per definire un fenomeno erosivo e per quantificarlo è necessario osservare l'evoluzione della linea di riva per un periodo di tempo sufficientemente lungo, al fine di eliminare l'influenza degli eventi episodici (mareggiate) e della dinamica sedimentaria locale.

Al fine di comprendere lo stato della costa nell'area di studio, è stata realizzata l'analisi dell'evoluzione della linea di riva, per quantificare gli scostamenti avvenuti tra il 1992 e il 2011.

In particolare, sono stati utilizzati i dati relativi alle linee di riva del 1992, 1997, 2005, 2008, 2011. Il set di dati è stato estratto da set di ortofoto aeree e satellitari prodotte negli anni succitati. L'estrazione del dato relativo all'evoluzione è stata realizzata sfruttando le capacità di una estensione, il DSAS, del software GIS ARCGIS della ESRI.

7.1.1. ARCGIS

Il GIS (Sistema Informativo Territoriale) è ormai recepito in tutti gli ambiti territoriali come strumento indispensabile nella pianificazione.

Un sistema GIS è costituito da un complesso di componenti informatiche (hardware e software) che consente di archiviare e gestire una notevole quantità di dati multidisciplinari riferiti a coordinate geografiche ed archiviati in forme alfanumeriche, grafiche e video.

Esso può essere impiegato per applicazioni in cartografia e come strumento di supporto alle decisioni.

Un GIS ha come obiettivo fondamentale la creazione di uno strumento flessibile e tecnologicamente avanzato per fornire ai decisori la possibilità di gestire rapidamente i dati a disposizione.

Per quanto riguarda i data base geografici, la caratteristica fondamentale di un GIS è la capacità di visualizzare i dati georeferenziati, ovvero con coordinate spaziali reali attribuite ad ogni elemento; in altre parole, le coordinate di un oggetto sono memorizzate relativamente al sistema di riferimento in cui realmente è situato l'oggetto e nelle reali dimensioni, non in scala.

Per lo studio in oggetto è stato utilizzato l'ArcGIS, il software applicativo GIS più diffuso al mondo, della ESRI, costituito da un famiglia di prodotti estremamente ricca di funzionalità che permettono agli utenti di svolgere qualsiasi operazione GIS, dalla più semplice alla più avanzata.

7.1.2. DSAS

Per la quantificazione dell'evoluzione della linea di costa è stato utilizzato il DSAS, nella versione 4.3. Il DSAS (Digital Shoreline analysis system), è sviluppato dallo United States Geological Survey(USGS) e funziona quale estensione del software Arcgis.

Il principio di funzionamento del DSAS è basato sul tracciamento di transetti, di lunghezza e spaziatura scelti dall'operatore, perpendicolari alle linee di riva oggetto dell'analisi. L'output dell'algoritmo di calcolo sono tabelle contenenti dati relativi alle proprietà delle linee di costa trattate, tra le quali, la distanza tra le linee di costa e il tasso di movimento annuale.

7.1.3. I RISULTATI DELL'ANALISI

L'analisi con il DSAS per lo studio dell'evoluzione della riva nell'area protetta di Torre Guaceto è stata realizzata, esclusivamente, sui tratti sabbiosi, in quanto è supposto che nell'arco temporale considerato (1992-2011) le falesie siano stabili. Tenendo conto di tale considerazione, l'attenzione è stata rivolta alle 8 aree indicate in figura 7.1.3.I

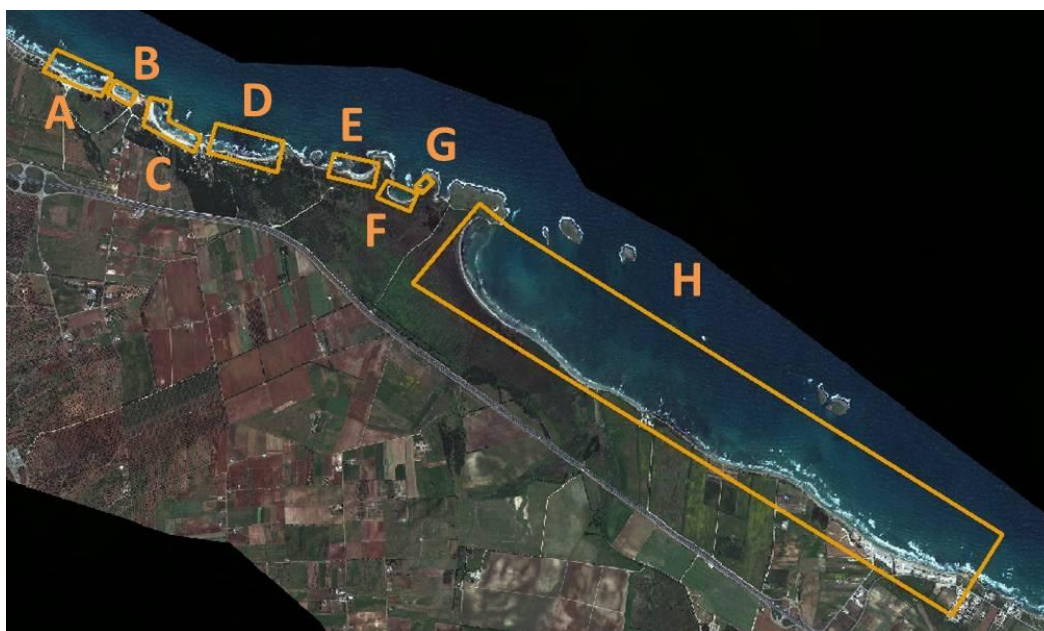


Figura 7.1.3.I – Aree di analisi per l'evoluzione della linea di riva

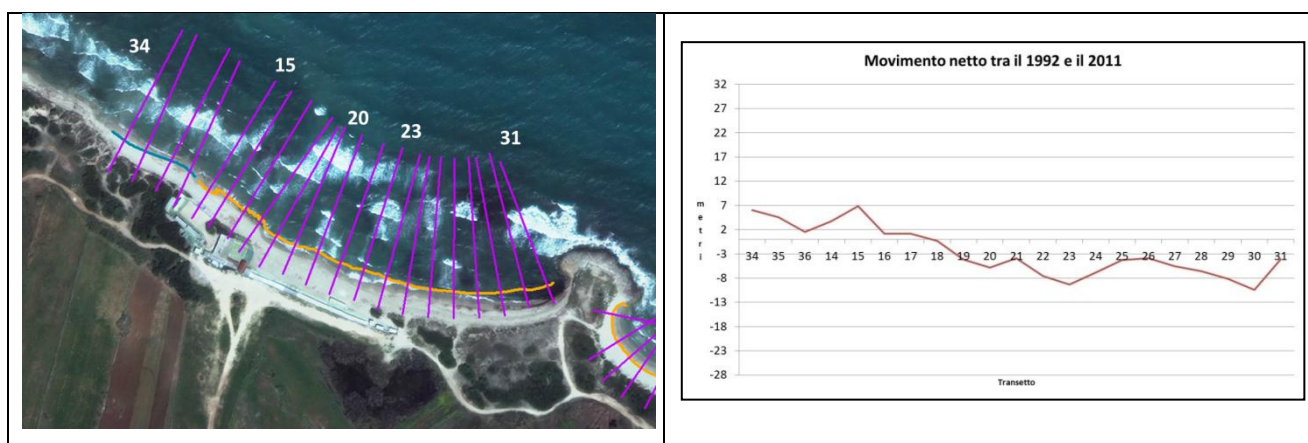
Di seguito saranno illustrati i risultati per le singole 8 aree.

Area A



Figura 7.1.3.II – Area di analisi A

I diagrammi sottostanti (Figura 7.1.3.III), mostrano, in senso orario, la posizione dei transetti, il movimento netto, in metri, della linea riva nel periodo 1992 – 2011, il tasso di movimento annuale e, infine, la distanza della linea di riva lungo i transetti (rappresentati in ascissa) negli di osservazione 1997 – 2005 – 2008 – 2011 rispetto allo zero, che rappresenta la linea di riva di partenza, ovvero , il 1992.



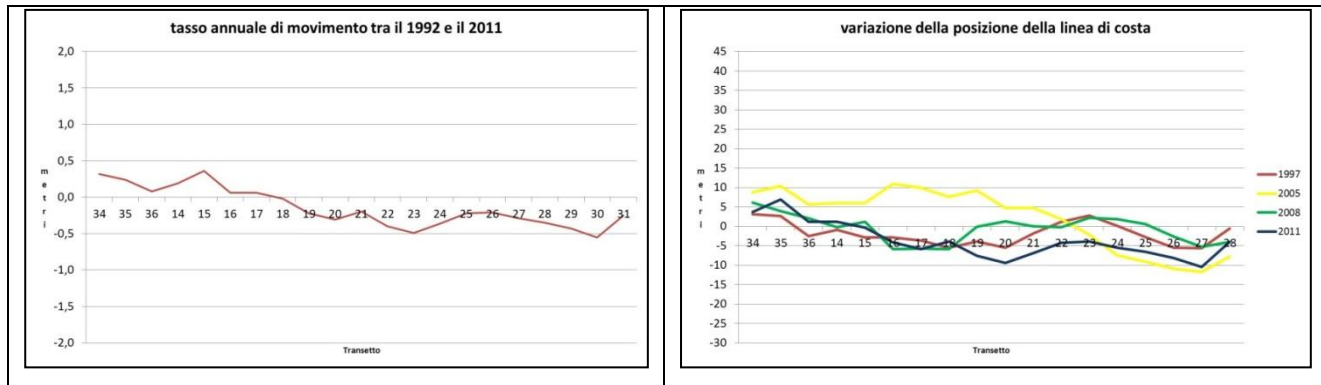


Figura 7.1.3.III – Posizione dei transetti, diagramma del movimento netto, del tasso di movimento annuale e della posizione delle linee di costa nel periodo di osservazione.

Per l'area A è possibile osservare che, tra il 1992 e il 2011, c'è stato uno spostamento di sedimenti dal settore orientale al settore occidentale, con erosione nel primo settore ed avanzamento della linea di riva nel secondo. La progressione non è di una entità tale da compensare le perdite registrate nei 20 anni di analisi, per cui parte del sedimento è stato allontanato verso l'esterno da cause differenti dalle correnti longitudinali che agiscono lungo la costa. In particolare, il diagramma relativo all'andamento delle singole linee di costa, mostra che al forte avanzamento registrato nel periodo 1997 – 2005, comune a tutte le aree di analisi, si contrappone un progressivo arretramento nei periodi 2005 -2008 e 2008 -2011. L'andamento è tale da definire un bilancio sedimentario negativo.

Area B



Figura 7.1.3.IV – Area di analisi B

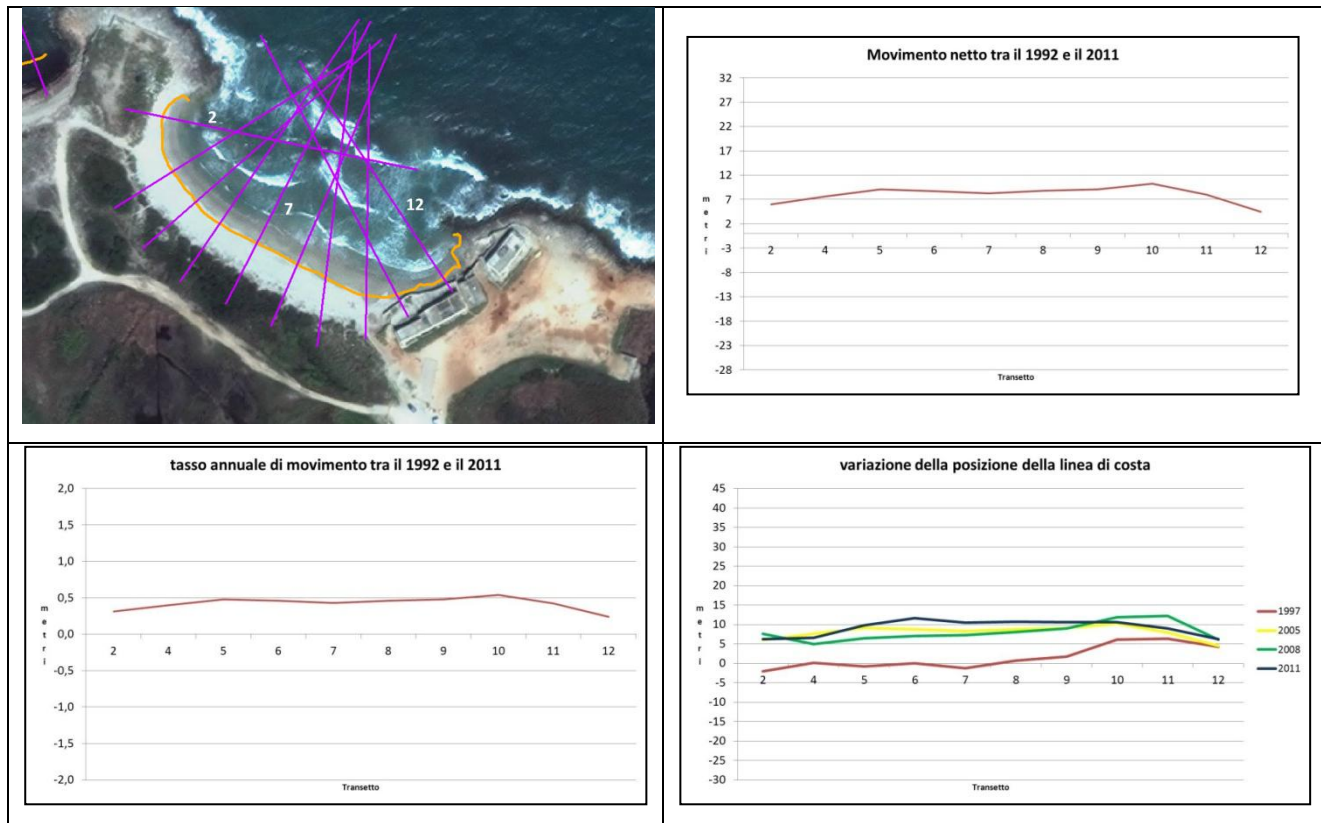


Figura 7.1.3.V – Posizione dei transetti, diagramma del movimento netto, del tasso di movimento annuale e della posizione delle linee di costa nel periodo di osservazione.

L'area B, tra il 1992 e il 2011, ha vissuto un avanzamento progressivo della linea di riva con un bilancio sedimentario positivo. In particolare, il diagramma relativo all'andamento delle singole linee di costa, mostra un forte avanzamento registrato nel periodo 1997 – 2005, comune a tutte le aree di analisi ed un progressivo rallentamento della progressione nei periodi 2005 -2008 e 2008 -2011.

Area C



Figura 7.1.3.VI – Area di analisi C

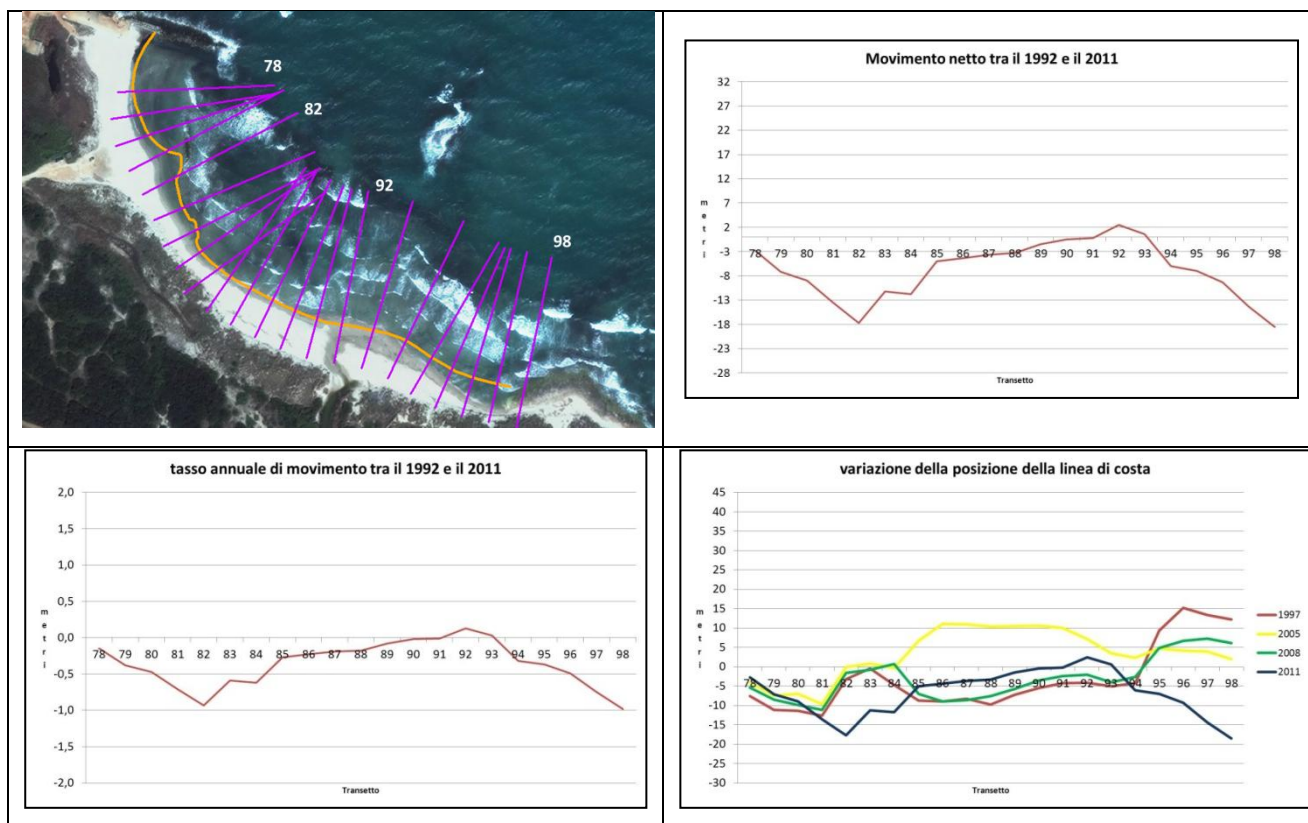


Figura 7.1.3.VII – Posizione dei transetti, diagramma del movimento netto, del tasso di movimento annuale e della posizione delle linee di costa nel periodo di osservazione

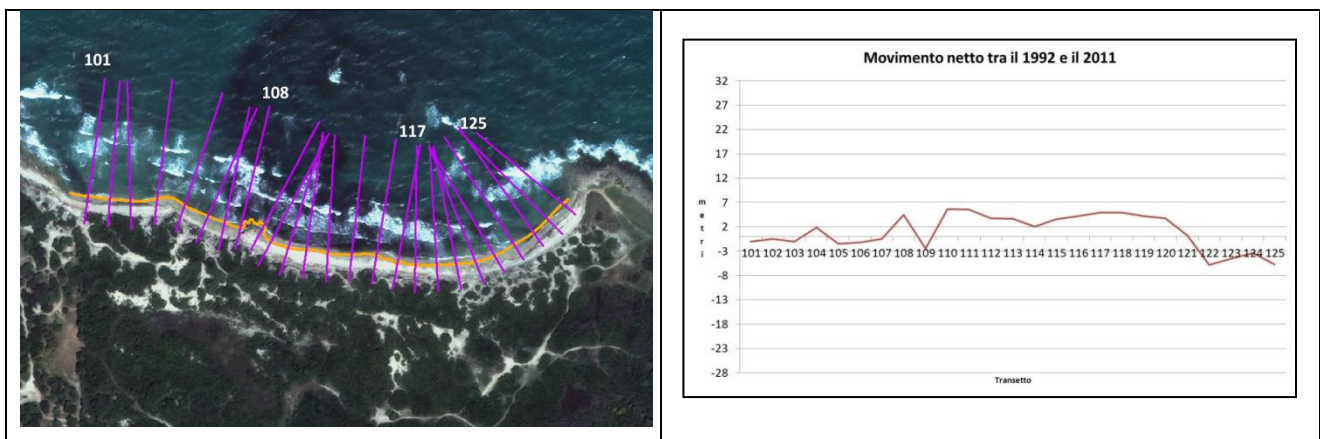
L'area C mostra, tra il 1992 e il 2011, un bilancio sedimentario fortemente negativo con 2 settori (i più esterni) fortemente penalizzati, con punte di arretramento della linea

riva sino ad un massimo di 18 metri in vent'anni. Il lieve avanzamento misurato nel settore centrale non riesce, se non minimamente, a compensare le perdite subite. Anche questa area, se si considera il diagramma relativo all'andamento delle singole linee di costa, mostra un deciso avanzamento della linea di riva nel periodo 1997 – 2005, completamente annullato dal progressivo arretramento nei periodi 2005 -2008 e 2008 -2011. E' interessante osservare che uno dei due picchi di arretramento (circa 20 metri) è situato, spazialmente, nei pressi di una opera di protezione longitudinale distaccata. La presenza della barriera sembra aver esercitato una azione negativa sul movimento e deposizione dei sedimenti.

Area D



Figura 7.1.3.VIII – Area di analisi D



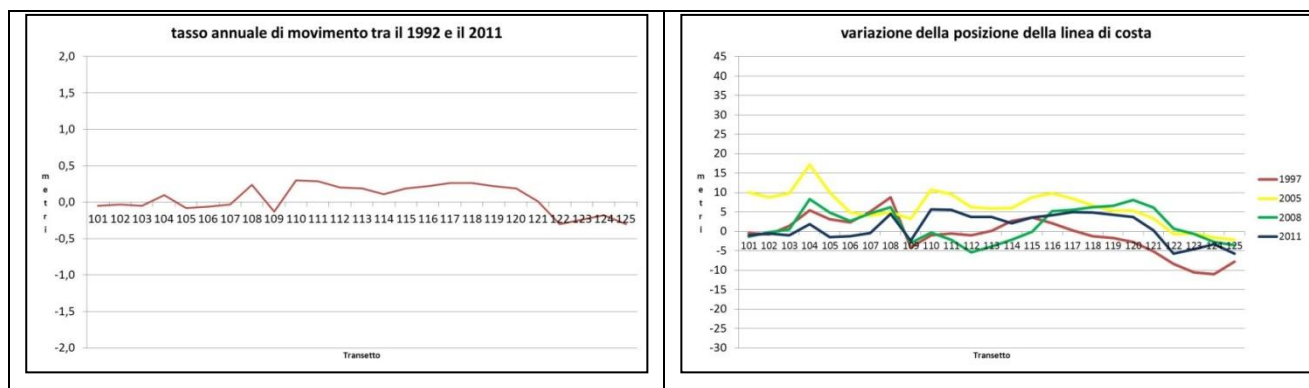


Figura 7.1.3.IX – Posizione dei transetti, diagramma del movimento netto, del tasso di movimento annuale e della posizione delle linee di costa nel periodo di osservazione.

L'area D, tra il 1992 e il 2011, ha sperimentato un avanzamento modesto della linea di riva con un bilancio sedimentario lievemente positivo. Nel dettaglio, considerando il diagramma relativo all'andamento delle singole linee di costa, si osserva un evidente avanzamento tra il periodo 1997 – 2005, soprattutto nel settore occidentale, a cui si contrappone un arretramento nel periodo 2005 -2008. Il periodo 2008 -2011, mostra un andamento più complesso, lievemente negativo, ma ancora non sufficiente a eliminare i benefici della progressione registrata nel 2005- 2008.

Area E



Figura 7.1.3.X – Area di analisi E

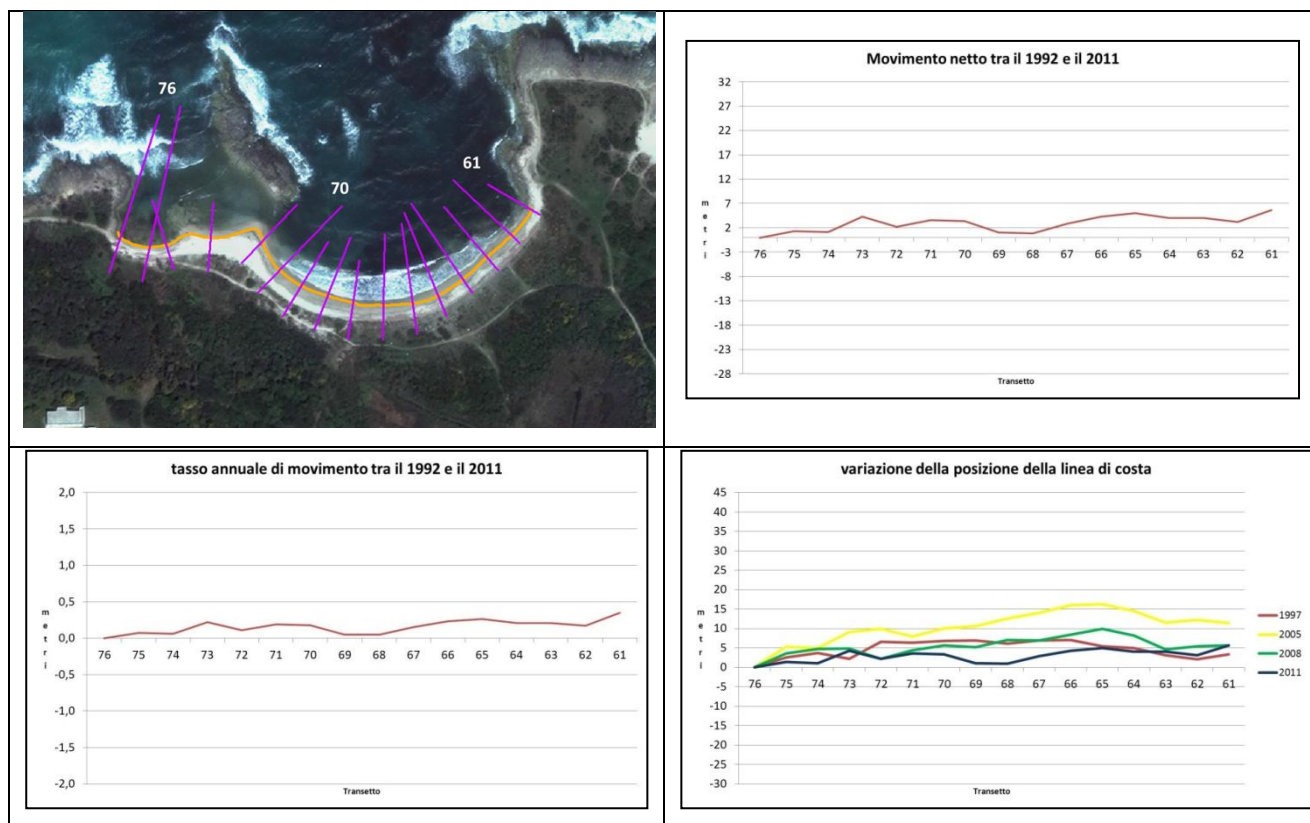


Figura 7.1.3.XI – Posizione dei transetti, diagramma del movimento netto, del tasso di movimento annuale e della posizione delle linee di costa nel periodo di osservazione

L'area E, tra il 1992 e il 2011, mostra un avanzamento progressivo della linea di riva con un bilancio sedimentario positivo. In particolare, il diagramma relativo all'andamento delle singole linee di costa, mostra l'ormai più volte citato avanzamento nel periodo 1997 – 2005, ed un progressivo arretramento nei periodi 2005 -2008 e 2008 -2011, di entità tale da ridurre al minimo i benefici derivanti dall'apporto sedimentario registrato nel periodo 1997 - 2005.

Area F

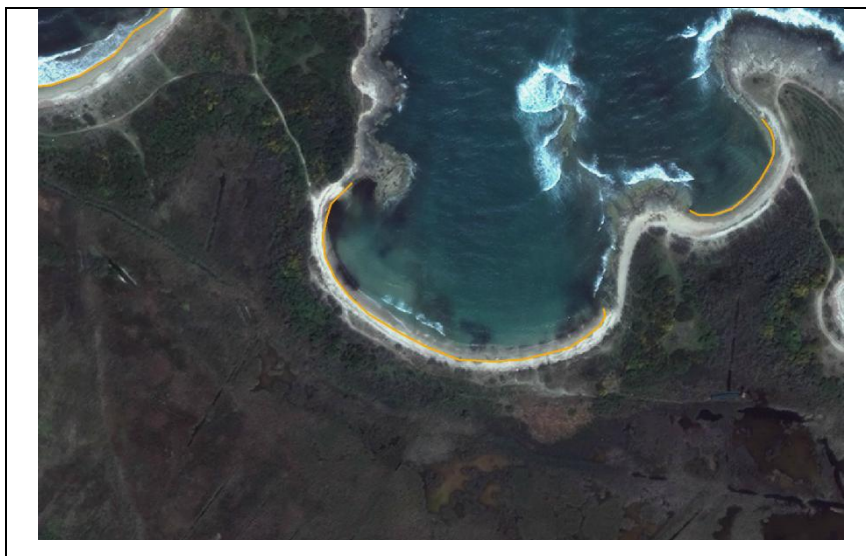


Figura 7.1.3.XII – Area di analisi F

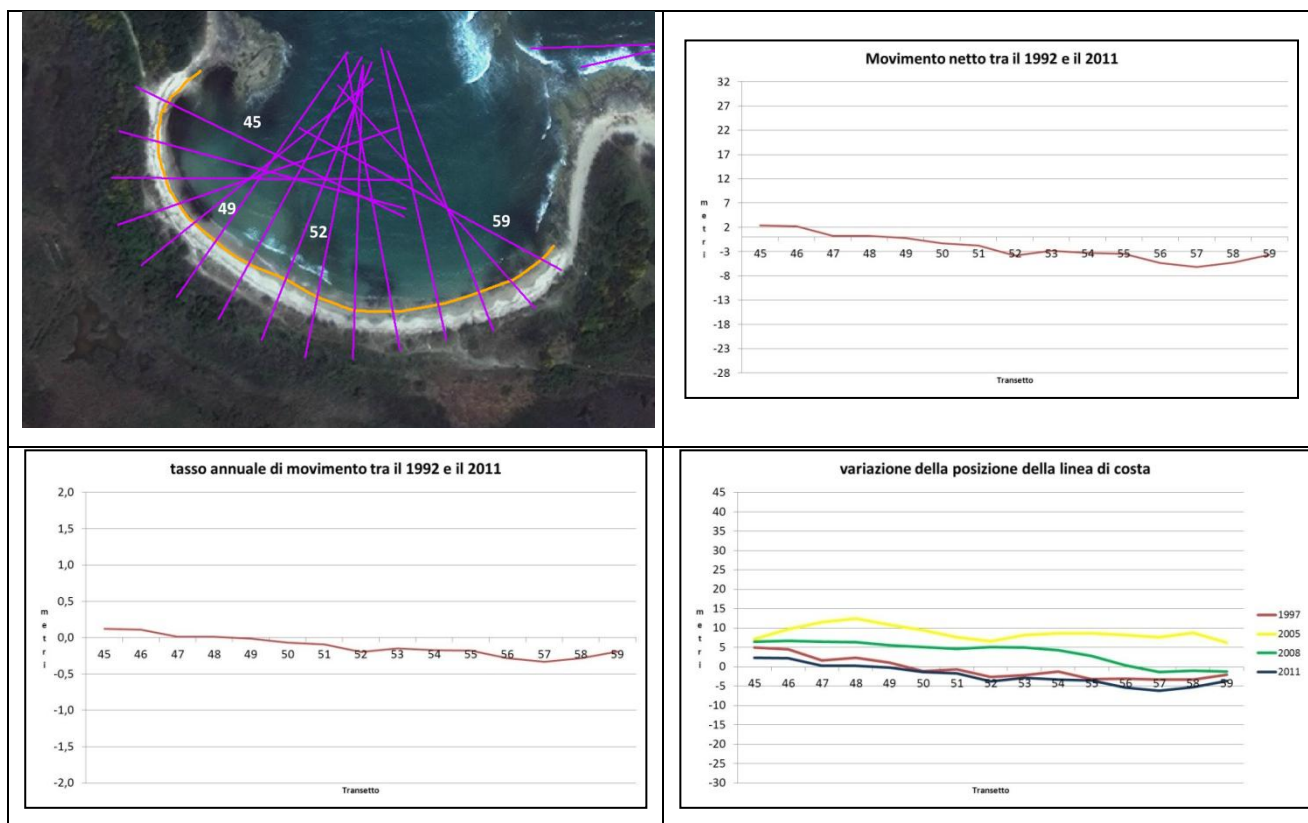


Figura 7.1.3.XIII – Posizione dei transetti, diagramma del movimento netto, del tasso di movimento annuale e della posizione delle linee di costa nel periodo di osservazione

L'area F mostra, tra il 1992 e il 2011, una movimentazione di sedimenti dal settore orientale al settore occidentale, con erosione nel primo settore ed avanzamento della linea di riva nel secondo. Il bilancio sedimentario dell'area è negativo, per cui parte del

sedimento è stato allontanato verso l'esterno da cause differenti dalle correnti longitudinali che agiscono lungo la costa.

In particolare, il diagramma relativo all'andamento delle singole linee di costa, mostra, anche in questo caso, un netto avanzamento nel periodo 1997 – 2005 ed un progressivo arretramento nei periodi 2005 -2008 e 2008 -2011. L'entità dell'arretramento è stato tale da eliminare, quasi completamente, i benefici goduti dall'area a seguito dell'apporto sedimentario registrato nel periodo 1997 – 2005.

Area G

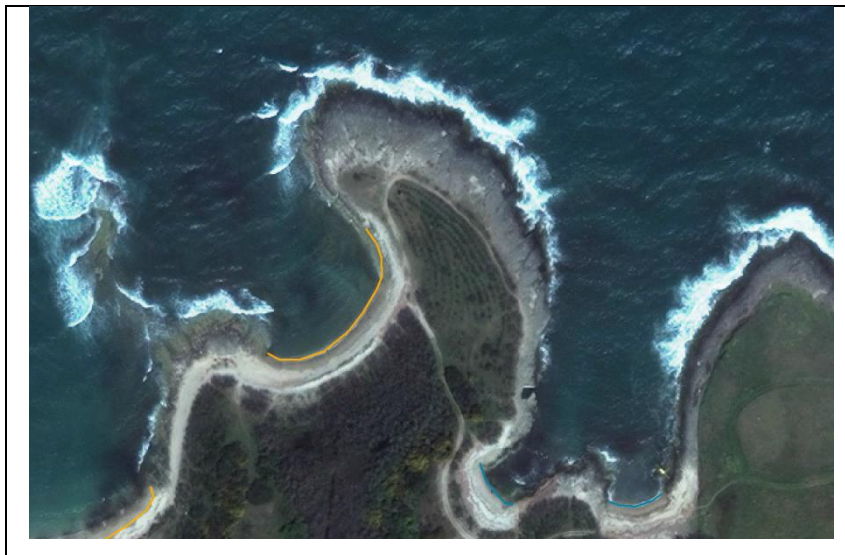
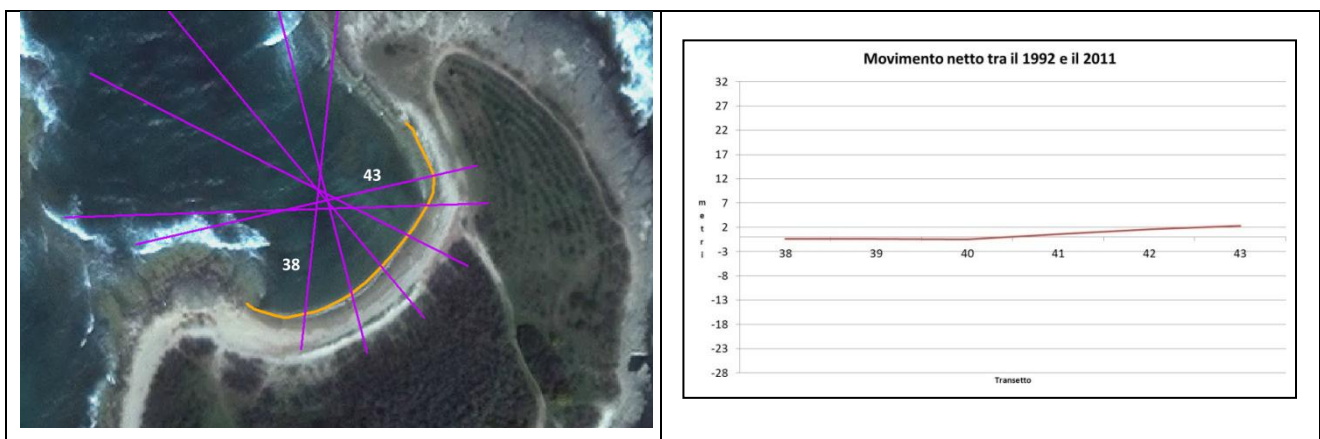


Figura 7.1.3.XIV – Area di analisi G



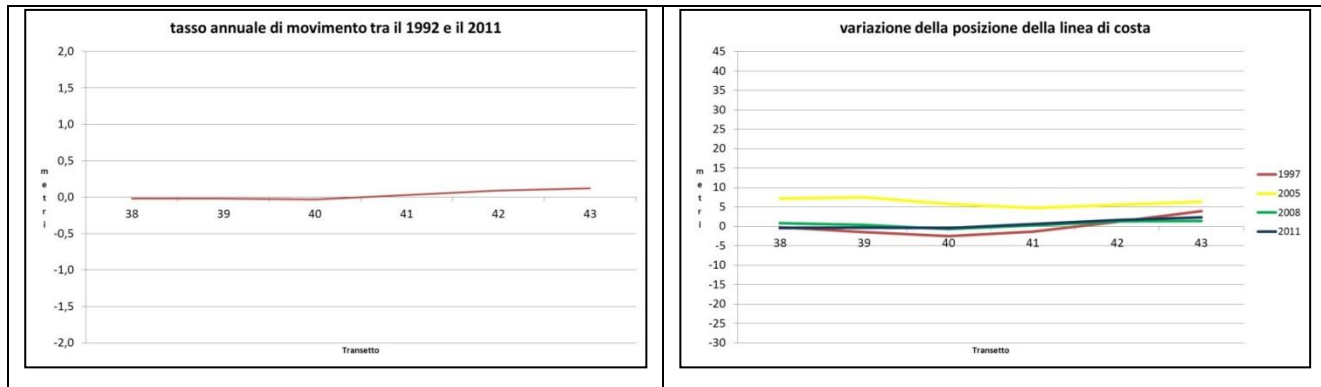


Figura 7.1.3.XV – Posizione dei transetti, diagramma del movimento netto, del tasso di movimento annuale e della posizione delle linee di costa nel periodo di osservazione

La linea di costa, nell'area G, mostra, nel lungo periodo, una sostanziale immobilità. L'analisi dei singoli periodi, indica il già più volte citato avanzamento tra il 1997 e il 2005, al quale si contrappone un progressivo arretramento negli anni successivi. L'andamento negativo è stato tale da riportare la posizione della linea di costa ai livelli del 1992.

Area H



Figura 7.1.3.XVI – Area di analisi H

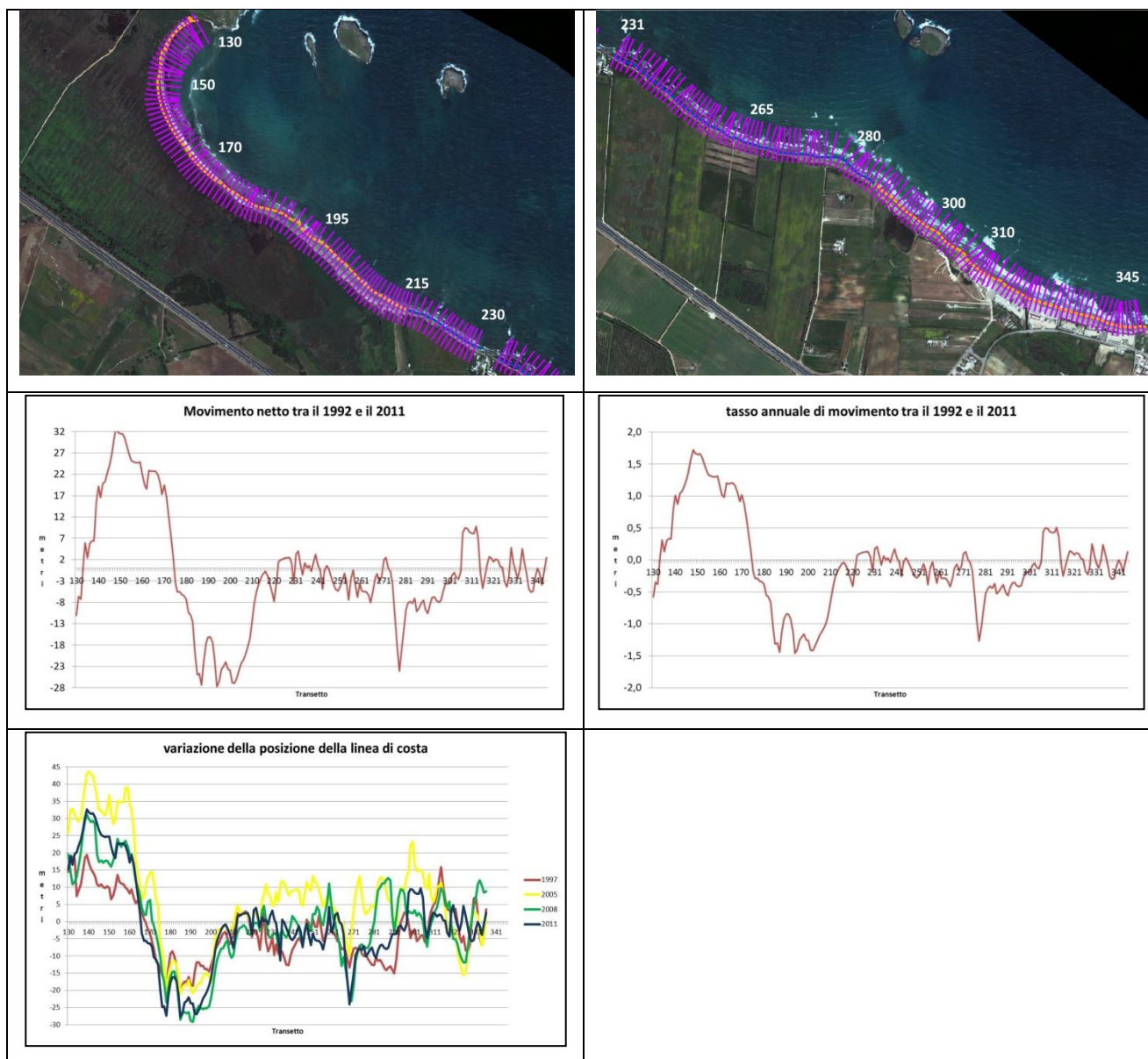


Figura 7.1.3.XVII – Posizione dei transetti, diagramma del movimento netto, del tasso di movimento annuale e della posizione delle linee di costa nel periodo di osservazione

L'area H, per estensione e per la presenza di manufatti, risulta essere la più interessante per l'analisi dell'evoluzione della linea di riva. Il diagramma del movimento netto (Fig. 7.1.3.XVII), evidenzia 5 settori caratterizzati da una differente evoluzione. Il settore più settentrionale, dal transetto numero 135 al numero 175, mostra un netto avanzamento con punta massima di oltre 30 metri in 20 anni; il fenomeno è conseguenza della movimentazione di sedimenti da sud est verso nord ovest come riflesso delle principali correnti long shore agenti nell'area (vedasi Capitolo 4).



Il settore coperto dai transetti dal numero 175 al numero 225, è caratterizzato da un andamento negativo, con punte di arretramento sino a 28 metri, quasi speculare al primo settore analizzato. E' probabile che i sedimenti allontanati dal secondo settore costituiscano gran parte dell'accumulo evidenziato nel settore più settentrionale dell'area.

I settori coperti dai transetti dal numero 230 al numero 270 e dal numero 300 al numero 345, mostrano un andamento complesso di non semplice interpretazione, con un complessivo arretramento della linea di costa. Fenomeni di arretramento più consistenti sono evidenti, invece, nel settore coperto dai transetti dal numero 270 al numero 300 con punte oltre i 25 metri.

Nel complesso, l'area H, mostra un bilancio sedimentario negativo con chiari segni di arretramento lungo tutta la linea di costa, tranne, nel settore più settentrionale, dove parte del sedimento movimentato è andato ad accumularsi, a causa dell'effetto "barriera" svolto dallo sperone roccioso su cui è situata la torre Guaceto.

L'andamento della posizione della linea di riva, nei singoli periodi, mostra una variazione simile a quella riscontrata nelle aree precedenti, infatti, ad un complessivo e netto avanzamento nel periodo 1997 – 2005, è contrapposto il progressivo arretramento nei due periodi temporali successivi.

Per i singoli settori, evidenziati in precedenza, l'andamento della linea di costa è pressoché costante nel tempo, variando, solamente, la velocità di progressione o retrogressione della linea di costa.

Infine, se si considera il complesso delle 8 aree analizzate, il bilancio sedimentario è negativo, con un periodo di forte accumulo, 1997 -2005, e i 3 periodi di saldo negativo del bilancio, con valori relativi massimi durante il periodo temporale 2005 – 2008.

7.2. UN'INDICATORE PER LA VALUTAZIONE DELLA SENSIBILITA' ALL'EROSIONE DELLA COSTA DELL'AMP DI TORRE GUACETO

Una definizione largamente accettata di *geoindicatore* o, più semplicemente, *indicatore ambientale*, è fornita dall'Organizzazione per lo Sviluppo e la Cooperazione Economica (OECD), secondo la quale, il geoindicatore è un parametro, o un valore derivato da parametri, che indica, fornisce informazioni o descrive lo stato di un fenomeno, dell'ambiente, o di un'area, con un significato più ampio di quello direttamente associato alla singola grandezza.



Un geoindicatore pertanto fornisce una valutazione dell'aspetto ambientale osservato, di per sé non direttamente misurabile, andando a stimare come questo varia. Dunque, si ricorre ad un indicatore per rappresentare in modo sintetico la variabilità di un fenomeno consentendo anche un diretto confronto con situazioni uguali.

In generale, l'indicatore in generale deve avere la capacità di:

- facilitare la trasmissione di informazioni;
- rappresentare le situazioni in maniera semplificata;
- capacità di rilevare i cambiamenti.

Per l'ambiente costiero la scelta del set di indicatori deve risultare particolarmente accurata a causa delle complicate relazioni tra le diverse fenomenologie ambientali, dei meccanismi di retroazione, condizioni di non linearità ed altri effetti che si possono combinare per portare a situazioni di incertezza nell'interpretazione di particolari fenomeni costieri (Forbes e Liverman, 1996).

Per la valutazione della sensibilità all'erosione della costa dell'AMP di Torre Guaceto, considerando la quantità di dati in possesso, è stato deciso di adottare un singolo indicatore definito *Quantificazione della costa sabbiosa in erosione*. Di questo indicatore è apprezzabile la facilità di lettura dei risultati, l'agevole reperimento dei dati che lo popolano, nonché l'immediata rappresentazione della variazione dello stato dell'ambiente. L'indicatore esprime il rapporto tra la lunghezza di costa interessata dai fenomeni erosivi e la lunghezza totale della costa potenzialmente soggetta ai fenomeni indagati. Nel caso in oggetto, al denominatore della formula dell'indicatore è stata posta la lunghezza della costa bassa, ovvero, è stata esclusa la costa rocciosa definita *immodificabile*. Inoltre, sono stati considerati in erosione, i tratti di costa lungo i quali la variazione della posizione sia stata, perpendicolarmente allo sviluppo della linea di riva, di almeno 5 metri. La scelta è stata fatta per depurare le variazioni della posizione della linea di costa, dalle modifiche di carattere stagionale o dagli effetti di eventi meteomarinari occasionali che non sono da accomunare con le cause dei fenomeni erosivi.

Il valore dell'indice può variare tra lo zero, ad indicare l'assenza di tratti in erosione, e l'1, ad indicare una completa diffusione dei fenomeni lungo il tratto di costa considerato.

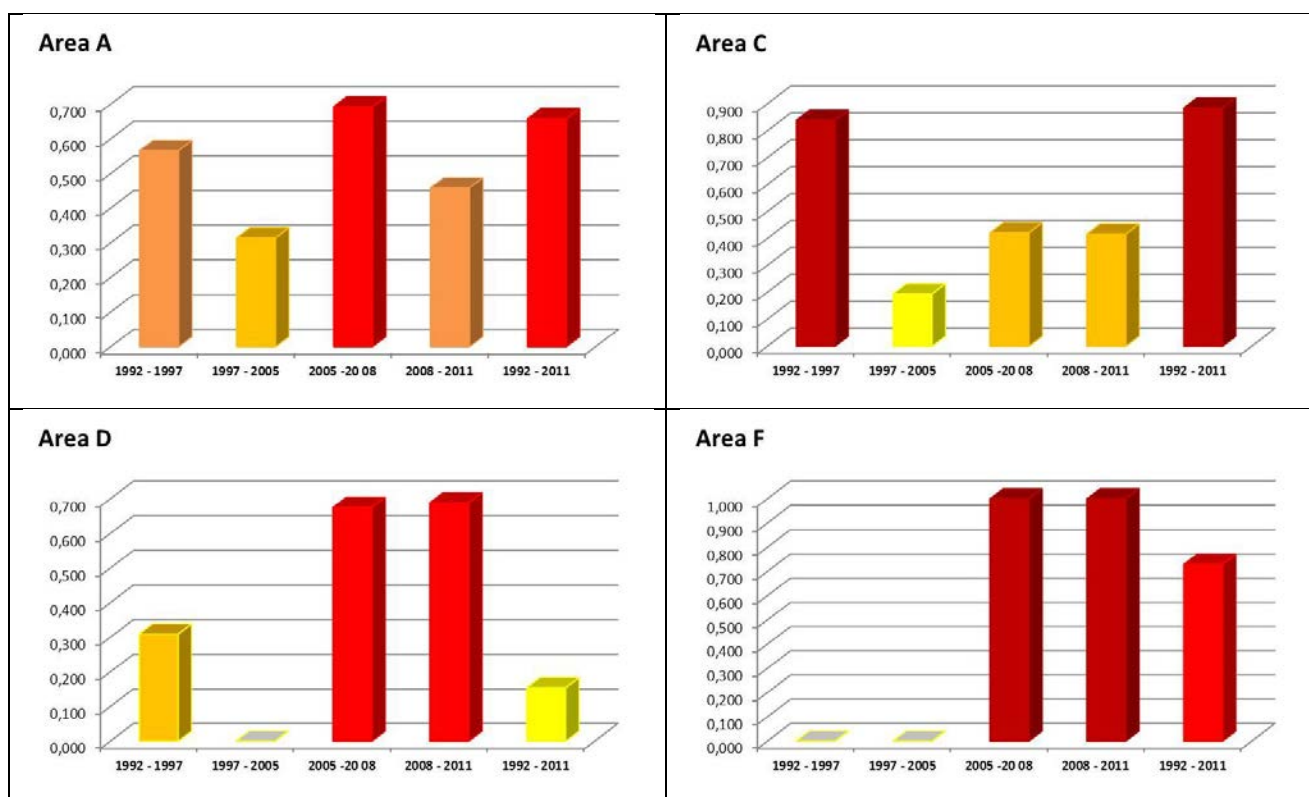
Per la peculiarità dei fenomeni e per le caratteristiche proprie della costa indagata, l'indicatore e la variazione del suo valore sono state calcolate per le 8 aree illustrate in

figura 7.1.3.I e per i periodi temporali 1992 -1997, 1997 – 2005, 2005 – 2008, 2008 – 2011 e 1992 - 2011.

In Tab. 7.2.1, sono mostrati i risultati per il calcolo dell'indice per le 8 aree, mentre in Fig. 7.2.1, sono rappresentati gli istogrammi della variazione del valore dell'indice, negli intervalli temporali precedentemente definiti, per le aree A, C, D, F, H.

Area	indice 92 - 97	indice 97 - 05	indice 05 - 08	indice 08 - 11	indice 92 - 11
A	0,566	0,314	0,693	0,458	0,658
B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
C	0,839	0,194	0,420	0,416	0,885
D	0,309	0,000	0,675	0,688	0,154
E	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
F	0,000	0,000	1,000	1,000	0,729
G	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
H	0,614	0,167	0,830	0,410	0,560

Tabella 7.2.1 – Valore dell'indicatore per le singole aree e per i periodi temporali considerati



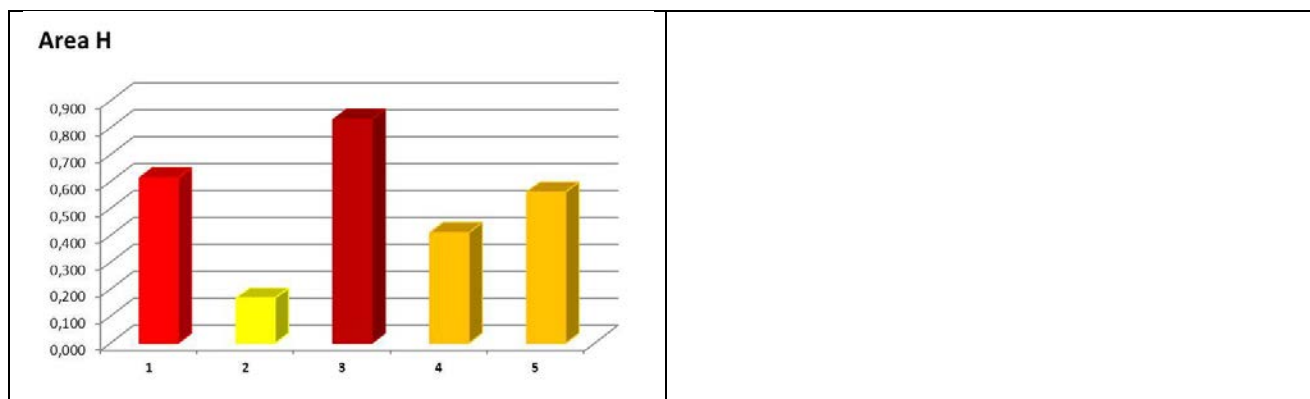


Figura 7.2.I – Variazione del valore dell'indice per le aree A, C, D, F, H.

I valori elencati riflettono la diffusione dei fenomeni erosivi nell'area dell'AMP, infatti, se si considera il periodo 1992 -2011 (Fig. 7.2.VI), su circa 6300 metri di costa bassa e quindi potenzialmente soggetta a fenomeni erosivi oltre il 50% di essa, 3200 metri, risulta coinvolta nell'arretramento della linea di riva. Particolarmente interessate da tale evoluzione negativa sono le aree A, C, F e, soprattutto, considerando l'estensione e l'importanza, la H.

Il valore dell'indice, se considerati i singoli intervalli di tempo analizzati, mostra una forte variabilità con minimi nel periodo 1997 – 2005 (Fig. 7.2.II), durante il quale è stata registrata un forte avanzamento delle linea di costa lungo tutte le aree, e valori massimi nel periodo successivo, 2005 – 2008 (Fig. 7.2.III), durante il quale eventi meteomarini di una certa importanza hanno afflitto la costa in oggetto, provocando il rimaneggiamento di lunghi settori di spiaggia sabbiosa. Nell'ultimo periodo considerato, il 2008 – 2011 (Fig. 7.2.IV), la situazione sembra stabilizzata in quasi tutte le aree, con i valori dell'indice pressoché costante, a meno dell'area H dove il valore dell'indice è dimezzato, in quanto lungo parecchi settori il trend evolutivo risulta invertito, passando da arretramento a stabilità e/o avanzamento.



Figura 7.2.II – Distribuzione del valore dell'indicatore lungo la costa dell'AMP di Torre Guaceto per il periodo 1992 - 1997



Figura 7.2.III – Distribuzione del valore dell'indicatore lungo la costa dell'AMP di Torre Guaceto per il periodo 1997 - 2005



Figura 7.2.IV – Distribuzione del valore dell'indicatore lungo la costa dell'AMP di Torre Guaceto per il periodo 2005 - 2008



Figura 7.2.V – Distribuzione del valore dell'indicatore lungo la costa dell'AMP di Torre Guaceto per il periodo 2008 - 2011



Figura 7.2.VI – Distribuzione del valore dell'indicatore lungo la costa dell'AMP di Torre Guaceto per il periodo 1992 -2011

7.3. CONSIDERAZIONI SULLA SEDIMENTAZIONE SUI FONDALI

Per avere indicazioni circa la sedimentazione sui fondali dell'Area Marina Protetta, la ULR CoNISMa dell'Università del Salento ha installato e gestito 5 trappole sedimentarie (per i dettagli consultare gli studi condotti dalla ULR CoNISMa dell'Università del Salento).

Le trappole sono state posizionate sul fondale nei punti A, B, C, D ed E rappresentati in figura 7.3.1, ad una profondità tra 5 e 6 m, in prossimità della zona di chiusura della fascia attiva della dinamica dei sedimenti.



Figura 7.3.1 - Posizione delle trappole per sedimenti.

Le trappole A, B, C e D ricadono nelle Zona A dell'AMP, mentre la trappola F è al margine sud della stessa in Zona C (figura 7.3.2).

I prelievi sono stati effettuati con 4 repliche per trappola; è da sottolineare che durante i quattro prelievi la trappola D è stata persa tre volte, mentre la trappola E per due volte è stata rimossa. Considerato ciò, nell'analisi che si riporta, è stato fatto riferimento solo ai dati per i quali è stato possibile fare un confronto omogeneo.

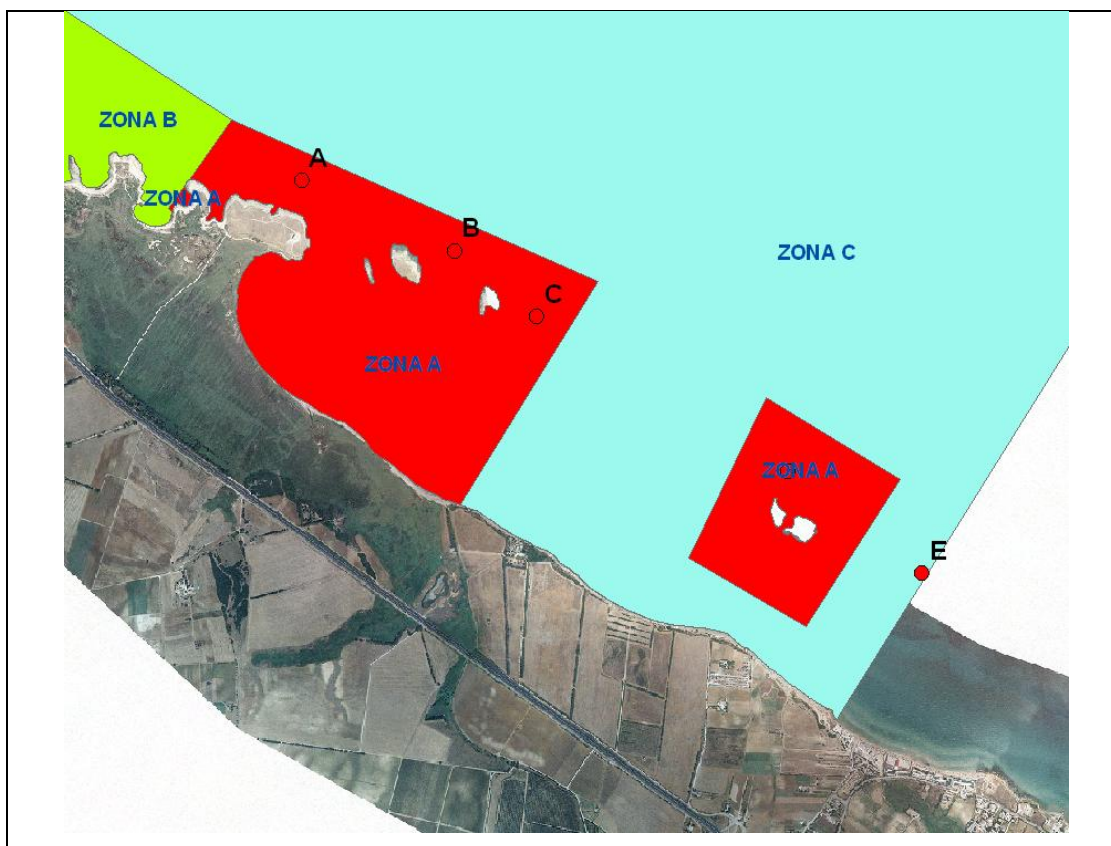


Figura 7.3.2 - Posizione delle trappole e Zone dell'Area Marina Protetta

Nella Tabella 7.3.1 è riportato il rapporto tra il peso secco dei sedimenti trattenuti dalla trappola A (PA) e il peso secco delle altre trappole.

<i>Rapporto tra i pesi secchi trattenuti dalle trappole</i>				
PA/PA	PA/PB	PA/PC	PA/PD	PA/PF
1	2,1	4,0	3,4	7,0

Tabella 7.3.1

La Tabella 7.3.1 mostra che la sedimentazione rilevata è massima nell'area della trappola A e, come tendenza, diminuisce sensibilmente man mano verso Est, fino a diventare minima in corrispondenza della trappola E posta al limite dell'Area Marina Protetta.

Nella Tabella 7.3.2 sono riportati i diametri medi (D_{50}) delle curve granulometriche dei sedimenti intrappolati; è possibile notare come sia maggiore nelle aree delle trappole B e D poste vicino agli isolotti ove vi è presente un forte idrodinamismo.

<i>Diametro medio (D_{50}) delle curve granulometriche dei sedimenti secchi intrappolati (μm)</i>				
A	B	C	D	E
142	524	147	192	127

Tabella 7.3.2

La forte sedimentazione di materiale nell'area della trappola A riveste un ruolo di grande importanza per l'Area Marina Protetta. L'entità della sedimentazione può essere giustificata dall'azione delle correnti che si instaurano con eventi meteomarinari provenienti ENE, Est e ESE che, come già scritto nei Capitoli 4 e 5, determinano correnti dirette da Est verso Ovest. Invece, le correnti da moto ondoso e da vento che si instaurano con eventi meteomarinari provenienti da Nord determinano, nell'area della trappola A, correnti intense dirette verso Est che, certamente, non possono essere responsabili, se non in minima parte, della sedimentazione di materiali sottili.

L'antropizzazione ed i fenomeni erosivi innescati nella zona sud-est, all'esterno dell'Area Marina Protetta, a causa delle correnti longitudinali provenienti da Sud-Est, hanno determinato una notevole sedimentazione nella zona a Sud del promontorio roccioso sul quale è posta la Torre Guaceto. L'entità della sedimentazione è stata tale da saturare la capacità di accumulo della piccola baia (figura 7.3.2), con conseguente spostamento di parte dei sedimenti, spinti dalle correnti provenienti da Sud-Est, sui fondali in prossimità della trappola A, di fronte e a nord della Torre.

Il fenomeno, anche se allo stato attuale di difficile quantizzazione, è confermato dai dati delle trappole sedimentarie e dalle evidenze biocenotiche, tra le quali la forte riduzione dell'estensione della prateria di Posidonia.

Il fenomeno, di grande importanza, sarebbe da monitorare nel lungo periodo sia per l'aspetto idrodinamico che sedimentologico e biocenotico.



8. CONCLUSIONI

Nell'ambito del progetto, il Gruppo di Lavoro del Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica (DICATECh) del Politecnico di Bari, coordinato dal Prof. Antonio Felice Petrillo, ha realizzato la definizione del clima meteomarinico al largo e sotto costa, attraverso il reperimento ed analisi delle serie storiche dei dati anemometrici di 3 stazioni pugliesi (Bari, Brindisi e Monopoli), lo studio delle correnti longitudinali per la valutazione dei processi di trasporto solido, le analisi delle variazioni del livello marino (determinazione della massima altezza di risalita sulla spiaggia emersa), e l'individuazione delle aree di allagamento da moto ondoso in concomitanza di eventi estremi. Inoltre, è stata eseguita l'analisi della tendenza evolutiva storica della linea di riva, attraverso l'interpretazione e la modellazione dei dati esistenti, e l'analisi della tendenza evolutiva storica della linea di riva attraverso un indicatore ambientale definito appositamente.

Lo studio del clima meteomarinico ha messo in evidenza che la massima frequenza di apparizione spetta alle mareggiate provenienti da NNO, le quali fanno registrare una percentuale del 23.53%, mentre le mareggiate da ESE e le mareggiate da Nord costituiscono, rispettivamente, il 14.19% e il 13.85% dei dati registrati di tutte le osservazioni. Per completare il quadro conoscitivo, è importante sottolineare che le onde da Est sono piuttosto frequenti nel paraggio con una frequenza del 10.81%, mentre le onde da NNE e ENE fanno registrare percentuali tra il 7.74% e il 8.99%.

In funzione dell'altezza significativa, le onde con elevazione minore di 0.5m rappresentano il 25.71% di tutte le osservazioni, mentre le onde con altezza compresa tra 0.5 e 1.5m costituiscono il 49.75% delle registrazioni e sono le mareggiate più frequenti. Il 6.8% delle osservazioni compete ad onde con altezza compresa tra 1.5 e 2.5m, mentre le mareggiate con altezza compresa tra 2.5 e 3.5m sono poco frequenti, con una percentuale del 1.18%. Infine, solo lo 0.16% delle onde registrate raggiunge altezze maggiori di 3.5m.

Utilizzando i dati ottenuti dalle stazioni precedentemente citate, sono stati estratti i valori di altezza d'onda sotto costa, che sono stati, successivamente, utilizzati per lo studio dell'ingressione marina nell'area costiera della spiaggia di Torre Guaceto. I risultati mostrano che i valori massimi di altezza d'onda al largo, con un tempo di ritorno di 50 anni, si riferiscono al settore di traversia centrale compreso tra le direzioni 10°N e 70°N, con un'altezza significativa dell'onda di 5.31 m e un periodo di 9.53 s, mentre per il settore



di traversia compreso tra le direzioni 310°N e 10°N , l'altezza massima è di 4.79 m con un periodo di 8.44 s. Infine, per il settore di traversia compreso tra le direzioni 70°N e 130°N , l'altezza massima dell'onda significativa è risultata essere di 3.98 m con un periodo di 8.59 s.

Sempre ai fini della caratterizzazione della dinamica dei litorali in esame, è stato indispensabile definire il clima meteomarinico equivalente annuale, ovvero l'onda di modellazione o morfologica, caratterizzata da un'altezza d'onda H ed un periodo d'onda T ; i parametri H e T sono rappresentativi del contenuto energetico per il settore considerato. L'onda così ricavata è in grado di indurre effetti sul litorale equivalenti a quelli indotti da tutte le onde sulla base delle quali è stata calcolata. Dallo studio del clima meteomarinico medio del paraggio risulta che l'altezza d'onda energeticamente equivalente più elevata (1.25 m) compete alla direzione ENE, con una frequenza di apparizione pari al 10.7%; mentre, le mareggiate equivalenti da NNO (1.02 m), da ESE (0.87 m) e da Nord (1.14 m) sono le più frequenti con percentuali di apparizione pari rispettivamente a 28.1%, 17.0% e 16.6%. Inoltre, l'onda caratteristica dell'intero paraggio ha un'altezza di 1.01 m, un periodo di 5.79 s e una direzione di provenienza 20°N .

Lo studio delle correnti longitudinali che agiscono lungo il paraggio di Torre Guaceto ha evidenziato, nel caso delle mareggiate da NNO e da Nord, che la direzione del trasporto solido longitudinale è diretta da NO verso SE, mentre ha direzione opposta nel caso delle mareggiate da ENE, Est e da ESE.

Mentre vi è un sostanziale equilibrio tra le frequenze di apparizione degli eventi ondosi che determinano un andamento opposto della direzione del trasporto dei sedimenti, è stata riscontrata una intensità doppia del trasporto associato alla componenti verso Sud.

L'esame delle elaborazioni riferite alle singole direzioni di provenienza del moto ondoso ha evidenziato che in occasione delle mareggiate provenienti dai quadranti meridionali si determina una zona di accumulo di sedimenti in corrispondenza della spiaggia immediatamente a Sud di Torre Guaceto. Tale comportamento è stato riscontrato anche nello studio dell'evoluzione storica della linea di riva, da cui è risultato, in tale area, un sensibile avanzamento del litorale.

Per quanto riguarda il regime delle correnti superficiali nell'area in esame, sono state esaminate le mappe riportate dall'*Atlante delle correnti superficiali dei mari italiani*



(1982). Da tali mappe è emerso che, a prescindere dalla stagione, lungo il litorale pugliese si instaura una corrente di circolazione che, sebbene con intensità differenti, è sempre diretta da Nord-Ovest verso Sud-Est; comportamento opposto si verifica invece sulle coste albanesi, montenegrine e croate con direzione della corrente da SE verso NO, a formare una sorta di vortice nel basso Adriatico.

Come approfondimento dei dati di letteratura reperiti, con l'utilizzo del **modulo idrodinamico HD** del modello di circolazione tridimensionale **MIKE 21**, sono stati riprodotti i campi di circolazione superficiali determinati da alcune delle condizioni di vento spiranti nell'ambito del settore di traversia del paraggio in esame.

Le simulazioni sono state condotte in ambiente baroclino impiegando come meccanismo forzante la forza rotazionale terrestre, una marea di tipo semidiurno (ampiezza pari a 0.15 m) e la tensione tangenziale indotta da tre condizioni di vento, ossia venti uniformi provenienti rispettivamente da NNO (330°N), da NNE (30°N) e da Est (90°N).

I valori delle intensità dei suddetti venti derivano da una media pesata, per ciascuna direzione di provenienza, valutata in riferimento alle frequenze di apparizione di ciascuna classe di vento. Nel dettaglio i valori di intensità del vento adottati nel modello idrodinamico utilizzato sono pari rispettivamente a 4.80 ms^{-1} per la direzione NNE, 3.95 ms^{-1} per la direzione Est e 5.79 ms^{-1} per la direzione NNO.

Dalle simulazioni effettuate è emerso che il vento da NNO determina correnti intense dirette da NO verso SE, in linea con il verso prevalente indicato in tutte le mappe di circolazione riportate nell'Atlante delle correnti superficiali dei mari italiani. Il vento da NNE genera lungo il litorale in esame una corrente diretta prevalentemente da SE verso NO, ma si evidenziano nelle aree limitrofe la formazione di vorticità locali sottocosta, molto evidenti nella zona dell'AMP di Torre Guaceto, ed in particolare in corrispondenza dello scoglio di Apani.

Il vento da Est genera anche in questo caso delle correnti dirette da SE verso NO. Queste correnti sono molto significative perché, sebbene di bassa intensità ed in controtendenza rispetto alla corrente di base instaurata nell'intero Adriatico, fanno sì che il materiale più fine, proveniente dall'erosione della falesia posta a Sud, sia trascinato verso NO determinando gravi problemi di sedimentazione del materiale trasportato sulle biocenosi presenti nell'ambito dell'AMP di Torre Guaceto, ed in particolare sulle praterie di posidonia. In definitiva i venti locali sono forzanti che tendono a modificare la corrente



dominante diretta da NO verso SE. In particolare i venti provenienti da NNO tendono ad accentuare tali correnti, mentre i venti provenienti da NNE ed Est tendono a ridurre, o ad invertire, tali correnti.

L'analisi per lo studio dell'evoluzione della riva è stata eseguita, esclusivamente, sui tratti sabbiosi.

Tenendo conto dei soli tratti sabbiosi, la costa è stata suddivisa in 8 aree (figura 3.1.3.I). L'analisi mostra che, in linea generale, la costa ha subito un'inversione nel trend evolutivo intorno al 2005, infatti, ad un lungo periodo di avanzamento, diffuso lungo l'intera linea di costa, è succeduto un periodo caratterizzato da un progressivo arretramento di entità tale da annullare quasi ovunque il surplus sedimentario riscontrato sino al 2005. Analizzando le singole aree, l'entità dei fenomeni variano in funzione delle caratteristiche fisiografiche delle stesse per cui, se nelle aree A e C è possibile evidenziare un complessivo bilancio sedimentario negativo, per le aree B ed E è stato calcolato un bilancio positivo. Per le aree D, F, G i dati esprimono, invece, un sostanziale equilibrio. Infine, l'area H, nella quale ricade il tratto di costa sabbiosa più lungo, mostra una evoluzione articolata; infatti, il settore più settentrionale presenta un netto avanzamento della costa con punte massime di oltre 30 metri in 20 anni, conseguenza della movimentazione di sedimenti da sud est verso nord ovest, causata dall'azione delle principali correnti long shore, e provenienti dal settore attiguo che, a conferma dell'ipotesi elaborata, è caratterizzato da un bilancio sedimentario negativo, con punte di arretramento sino a 28 metri, con un andamento della linea di costa speculare al primo settore. I settori centrali e meridionali mostrano un andamento dell'evoluzione della linea di costa complesso e di non semplice interpretazione, con un generale arretramento della linea di costa, più consistente nel settore a destra del canale Reale con punte di arretramento di oltre 25 metri. Nel complesso, l'area H, mostra un bilancio sedimentario negativo con chiari segni di arretramento lungo tutta la linea di costa, tranne, nel settore più settentrionale, dove parte del sedimento movimentato nell'area è andato ad accumularsi, a causa dell'effetto "blocco" svolto dallo sperone roccioso su cui è situata la Torre Guaceto.

Per la valutazione della sensibilità all'erosione della costa dell'AMP di Torre Guaceto, considerando la quantità di dati in possesso, è stato definito un geoindicatore nominato *Quantificazione della costa sabbiosa in erosione*. L'indicatore esprime il rapporto tra la lunghezza di costa interessata dai fenomeni erosivi e la lunghezza totale della costa



potenzialmente soggetta ai fenomeni indagati. Per depurare la linea di costale da modifiche di carattere stagionale o dagli effetti di eventi meteomarini occasionali, sono stati considerati in erosione, solo i tratti di costa lungo i quali la variazione della posizione della linea di riva sia stata, perpendicolarmente allo sviluppo della costa, di almeno 5 metri.

I valori ottenuti riflettono la diffusione dei fenomeni erosivi nell'area dell'AMP, infatti, se si considerano i singoli intervalli di tempo analizzati, l'indice mostra una forte variabilità con minimi nel periodo 1997 – 2005, durante il quale è stata registrata un forte avanzamento delle linea di costa lungo tutte le aree, e valori massimi nel periodo successivo, 2005 – 2008, durante il quale eventi meteomarini di una certa importanza hanno interessato la costa in oggetto, provocando il rimaneggiamento di lunghi settori di spiaggia sabbiosa. Nell'ultimo periodo considerato, 2008 – 2011, la situazione sembra stabilizzata in quasi tutte le aree, con valori dell'indice pressoché costante, se si esclude l'area H dove il valore dell'indice si è dimezzato, in quanto il trend evolutivo risulta invertito, passando da arretramento a stabilità e/o avanzamento.

L'evoluzione del tratto di costa dell'area H, influenza fortemente l'Area Marina Protetta, infatti, l'antropizzazione e i fenomeni erosivi innescati nella zona a sud-est dell'area, ovvero all'esterno dell'Area Marina Protetta, hanno determinato, a causa delle correnti provenienti da sud-est, una notevole sedimentazione nella zona a sud del promontorio roccioso sul quale è posta la Torre Guaceto. L'entità della sedimentazione è stata tale da saturare la capacità di accumulo della piccola baia con conseguente spostamento di parte dei sedimenti, spinti dalle correnti provenienti da sudest, sui fondali della zona di protezione A, di fronte e a nord della Torre Guaceto.

Il fenomeno, anche se allo stato attuale di difficile quantizzazione, è stato evidenziato dai dati delle trappole sedimentarie e dalle evidenze biocenotiche, quali la forte riduzione dell'estensione della prateria di Posidonia. Il fenomeno è di grande importanza e sarebbe da monitorare nel lungo periodo sia sotto l'aspetto idrodinamico che sedimentologico e biocenotico.

I risultati indicano, ancora una volta, come l'Area Marina Protetta di Torre Guaceto, a causa delle sue ridotte dimensioni, sia fortemente influenzata dalle aree marine adiacenti non protette, in modo particolare dalle aree poste a sudest della stessa.



9. CONCLUSIONS

As specified within the scope of the project, the research unit of the Laboratory of Research and Experimentation for Coastal Defense (Department of Civil, Environmental, Building Engineering and Chemistry, DICATECh, Technical University of Bari) coordinated by Prof. Antonio Felice Petrillo, has defined the meteomarine climate both offshore and inshore through the analysis of comprehensive historical wind data collected from three weather stations in Puglia (Bari, Brindisi and Monopoli). It has also carried out the study of the longshore currents for the assessment of the longshore sediment transport, it has analysed the changes in sea level (determination of the maximum height on the emerged beach) and has identified the flooding areas caused by wave motion in conjunction with extreme events. In addition, the analysis of the historical evolution of the shoreline, through the interpretation and modeling of existing data, has been performed together with the analysis of the historical evolution of the shoreline through a specifically designed environmental indicator.

The study of the meteomarine climate showed that severe storms most frequently came from NNW, at 23.53% of observations, while severe storms from ESE and North were, respectively, 14.19% and 13.85% of all the recorded observations. Storms from the East were fairly common in the area with a frequency of 10.81%, while the waves from NNE to ENE recorded rates between 7.74% and 8.99%.

As for wave height, waves less than 0.5m were 25.71% of all observations, while waves between 0.5 - 1.5m high were recorded 49.75 % of the time and are easily the most frequent. Waves above this height are much less common with, respectively, 1.5 - 2.5m of height at 6.8% of the observations and 2.5 - 3.5m at 1.18% while waves reaching heights greater than 3.5m were present only 0.16% of the time.

The values of inshore wave height were extracted from the data of the above mentioned weather stations and they were subsequently utilized to study the ingression of the sea onto the land at the research site. The results show that the maximum offshore wave height, with a return period of 50 years, was for a wave coming from between NNE and ENE, with a significant wave height of 5.31m and a period of 9.53s. For the sector between WNW and N, the maximum wave height was 4.79m with a period of 8.44s. Finally, for the waves coming from ENE and ESE, the maximum significant wave height was found to be 3.98m with a period of 8.59s.



To be able to typify the dynamics of the coast, it was essential to define the yearly equivalent meteomarine climate, that is the morphological wave with wave height H and wave period T , so representing the wave energy content for this sector. In this way, the wave obtained will be able to induce effects on the shoreline equivalent to those induced by the total of the waves from which the morphological wave has been calculated. From the study of the average meteomarine climate of the local area, the energy-equivalent wave with the highest wave height at 1.25m comes from ENE, with an appearance frequency of 10.7%, while the energy-equivalent wave height from NNW was 1.02m, from ESE, 0.87m and from the North, 1.14m, with appearance frequencies of respectively 28.1%, 17.0% and 16.6%. The characteristic wave of the entire local area has a height of 1.01m, a period of 5.79s and comes from 20°N .

The study of the longshore currents has shown, in the case of severe storms coming from NNW and N, that the direction of longshore sediment transport is from NW towards SE, while the direction is the opposite in the case of severe storms from ENE, E and ESE.

The occurrence of wave storm events transporting sediment is more or less the same for each of these two opposite directions, however the force of transport was twice as strong in the southerly direction.

Further analysis of a more restricted directional origin of the severe storms showed that the waves coming from the southern quadrants produce a zone of sediment accumulation close to the beach immediately to the south of Torre Guaceto. Such behavior has also been observed in the study of the historical evolution of the shoreline, which shows, in this area, a significant growth towards the sea.

As for the surface currents in the area, the maps of the Italian Seas Surface Currents Atlas (1982) was examined. These maps show that, regardless of the season, along the Apulian coast there is a current of varying intensity from north-west to south-east, while along the Albanian, Montenegrin and Croatian coasts the current direction is from SE to NW, so generating a type of vortex in the southern Adriatic Sea.

To develop the data beyond that available in the literature, the surface circulation fields, determined by some of the wind conditions in the area, have been reproduced utilizing the HD hydrodynamic module of the three-dimensional circulation model MIKE 21.

The simulations were conducted in a baroclinic atmosphere with the driving mechanism being the Earth's rotational force, a semidiurnal tide (amplitude of 0.15 m) and



a tangential stress induced by three wind conditions, namely, uniform winds coming, respectively, from NNW (330°N), NNE (30°N) and east (90°N), each wind with an intensity derived from a weighted average dependent on the frequency of appearance of each class of wind. These are respectively for the three winds 5.79ms^{-1} , 4.80ms^{-1} and 3.95ms^{-1} .

Simulations showed that the wind from NNW determines intensive currents from NW to SE, in line with the prevailing direction indicated in the maps of the Italian Atlas of Seas Surface Currents. The wind from NNE creates a direct current mainly from SE to NW along the coast with, however, local inshore vortexes in the adjacent areas, most noticeably in the area of the Torre Guaceto MPA of, and particularly near Apani rock. The wind from the East also generates currents from SE to NW. These currents are significant because, though of low intensity and in contrast to the Adriatic base current, they cause the finer sediments from the eroded cliff positioned south of the Torre Guaceto MPA to be carried to the NW creating serious sedimentation problems on the ecosystems present in the environment of the Torre Guaceto MPA, and in particular on the Posidonia meadows. In conclusion, the local winds induce a tendency to influence the dominant current directed from NW to SE. In particular, the winds from the NNW tend to accentuate this current, while the winds from the NNE and East tend to reduce or reverse it.

The analysis of the evolution of the coastal shore has been performed, exclusively, on sandy parts with the coastline being divided into 8 areas (Figure 3.1.3.I). The analysis shows that, in general, around 2005, the coast underwent an inversion of the previous period of beach growth along the entire coastline, leading to such progressive beach erosion as to almost everywhere cancel the surplus sediment deposited up to 2005. Analyzing the individual areas, the extent of the phenomenon varies depending on their physiographic characteristics, so that in areas A and C, there is an overall negative sediment balance, in areas B and E there is a positive balance, while in the areas D, F and G the data show essentially an equilibrium. Differently, in area H where there is the longest stretch of sandy coastline, the beaches show a mixed evolution with the northernmost sector showing significant growth towards the sea of up to 30 meters within 20 years because of the movement of sediments from the southeast to the northwest, due to the action of the principal long shore currents, such sediment coming from the adjacent southern area which shows a loss of material, with erosion of up to 28 meters of width, mirroring the northern sector of area H. The central and southern sectors show an evolution of the coastline which is complex and not easy to interpret with general coastal



erosion which is more pronounced, arriving at over 25 meters, in the sector to the right of the Canale Reale. Overall, area H shows a negative sediment balance with clear signs of erosion along all the coast except in the northernmost sector where a part of the sediments have accumulated due to the blocking effect of the rocky spur where the actual Tower of Torre Guaceto is situated.

To assess the susceptibility to erosion of the Torre Guaceto MPA, using the large amount of data collected, a geo-indicator named “Quantification of the sandy coast in erosion” was defined. The indicator expresses the ratio between the length of coastline affected by erosion and the total length of the coastline potentially subject to the phenomena under investigation. To avoid the effect of seasonal changes or occasional weather events, only the lengths of the coastline with a variation of the position of the shore line of at least 5 meters, perpendicular to the coastline itself, were taken into consideration.

The values obtained reflect the spread of erosion in the MPA, in fact, if we consider the individual time intervals analyzed, the index shows a great variability with the lowest values during the period 1997 - 2005, when much beach growth was recorded in all areas, and the highest values in the successive period 2005 - 2008 during which stormy weather events affected the coast, causing the rearrangement of long sandy stretches of beach. In the latest period under consideration 2008 – 2011, the situation seems to have stabilized in almost all areas, with almost constant index values, except in area H, where the index value is only half of the other areas, passing from beach erosion to stability or to growth.

The evolution of area H strongly influences the evolution of the entire Marine Protected Area. In fact, human settlement and the erosive activities to the south-east and outside the Marine Protected Area have created, owing to the currents coming from the southeast, notable sediment deposition in the zone south of the rocky promontory on which the Tower of Torre Guaceto stands. The magnitude of sedimentation has been so large as to saturate the storage capacity of the small bay, with a consequent deposition of the sediment, driven by currents coming from the southeast, onto the seabed of Protection Zone A, in front of and to the north of the Tower.

The size of this deposition is difficult to quantify, but evidence of the data of the sediment trap and from the ecosystem such as the large reduction in the extent of Posidonia meadows, confirms its existence. Long-term monitoring should be carried out on



Protection actions for cross-borders and joint management of marine sites of community interest



the hydrodynamic, sedimentological and ecosystem aspects which are of great importance.

The results indicate, once again, that the Marine Protected Area of Torre Guaceto, because of its small size, is strongly influenced by the adjacent non-protected marine areas, in particular those located to the southeast.



BIBLIOGRAFIA

- BARBANO A., CORSINI S., MANDRONE S., PAONE M., ROTUNNO M., 2006. - APAT, Dipartimento Tutela delle Acque Interne e Marine - Servizio. Difesa delle Coste, Via Curtatone, 3 00185 Roma Italia.
- BRUNO M., 2010 - La rete di monitoraggio meteomarina della regione puglia: elaborazione dei dati ondametrici. In: Atti del XXXII Convegno Di Idraulica e Costruzioni Idrauliche –Palermo.
- BRUNO M.F., NOBILE B., PETRILLO A.F. (2011) - Evoluzione recente della linea di riva dell'Isola di Varano. V° Congresso di LaguNet. Lesina (FG), 19-22 ottobre 2011.
- BRUNO M.F., PETRILLO A.F., (2011) - Il livello medio mare dell'adriatico negli ultimi anni. V° Congresso di LaguNet. Lesina (FG), 19-22 ottobre 2011.
- BRUNO M.F. , A.F. PETRILLO (2012) - I risultati del monitoraggio del litorale di Trani (BT) dopo la realizzazione di opere di difesa. Studi costieri n. 20 2012, ISSN 1129-8588.
- BRUNO M.F., FRANCIOSO R., NOBILE B., PETRILLO A.F. (2012) - Integrated studies for coastal erosion and littoral planning: the apulian experience, Proceedings of Coastlab12 - Ghent, Belgium 17 - 20 September 2012.
- BRUNO M.F., PETRILLO A.F. (2013) - "La Rete di Monitoraggio Meteomarina della Regione Puglia". Workshop "Le coste pugliesi: tra prospettive di sviluppo ed esigenze di tutela" organizzato dalla Società Italiana di Geologia Ambientale – Sezione Puglia -; Monopoli, 18 gennaio 2013; Hotel Lido Torre Egnazia.
- BRUUN, P., 1962 - Sea-level rise as a cause of shore erosion. Journal Waterways and Harbours Division, vol. 88(1-3), pp. 117-130.
- CHIARADIA M. T., FRANCIOSO R., MATARRESE R., PETRILLO A. F., RANIERI G. & URRUTIA C., 2008 - Estrazione semi-automatica della linea di costa da immagini satellitari ad alta risoluzione: valutazione ed applicabilità. In: Collana Editoriale di Studi e Ricerche dell'Autorità di Bacino della Basilicata, N. 9. 2008.
- CHURCH, J A., WHITE N. J., COLEMAN R., LAMBECK K., MITROVICA J. X., 2004: Estimates of the Regional Distribution of Sea Level Rise over the 1950–2000. Period. J. Climate, 17, 2609–2625.
- DAMIANI, L., BRUNO, M., MOLFETTA, M. E NOBILE, B., 2007 - Coastal zone monitoring in Apulia region: first analysis on meteomarine climate. In: CD ROM Proceedings of Vth International Symposium on Environmental Hydraulics (ISEH 2007), Arizona (USA).



DAMIANI, L., PETRILLO, A.F., SAPONIERI, A. (2009) - "Beach Dewatering Systems: Modelling Coastal Groundwater Flow". Proceedings of the 33rd IAHR Congress, Water Engineering for a Sustainable Environment, 9-14 August 2009, Vancouver, pp 7304-7311, ISBN 978-90-78046-08-0.

DAMIANI, L., PETRILLO, A.F., SAPONIERI, A. (2010) - Near shore Morphodynamic of drained beaches. ICCE 2010.

DAMIANI L., PETRILLO A.F., SAPONIERI A. (2010) - "Near shore morphodynamic of a drained beach". Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering, Shanghai, China. Retrieved from <http://journals.tdl.org//ICCE/>

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELLE ACQUE E DI CHIMICA DEL POLITECNICO DI BARI, 2011 - *Piano Regionale delle Coste della Regione Puglia*. Rapporto tecnico 2011.

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELLE ACQUE E DI CHIMICA DEL POLITECNICO DI BARI, 2010 - *Studi propedeutici per la predisposizione del Piano Stralcio della Dinamica delle Coste*. Rapporto tecnico 2010.

FORBES, D.L & LIVERMAN, D.G.E., 1996. - *Geological indicators in the coastal zone. Geoindicators - Assessing rapid environmental changes in earth systems* (Ed. by A. R. Berger and W. J. Iams), pp. 175-192. A.A. Balkema, Rotterdam.

IPCC, 2007. - *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. pp 104.

MARCOS, M., 2009. *Sea level extremes in southern Europe*. Journal of Geophysical Research, Vol. 114, C01007.

MASE, H. 1989. *Random wave runup height on gentle slope*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol 115, No. 5, pp 649-661.

NIELSEN, P. and HANSLOW, D.J., 1991. *Wave runup distributions on natural beaches*. Journal of Coastal Research, 7(4), 1139-1152. Fort Lauderdale (Florida). ISSN 0749-0208.

KOMAR, P.D., 1998. *Beach processes and sedimentation*. Prentice Hall, NJ, 544.

PETRILLO A.F., SELICATO F., BRUNO M.F., FONTANARI M., GIORDANO A., MAGGIO G., 2008 - *Lo stato dei litorali pugliesi e la loro gestione*. Atti del Convegno Nazionale di Maratea 15-17 2008.

PETRILLO A.F. (2008) - Relazione sul tema "Evoluzione dei litorali sabbiosi salentini" al "2° Forum sull'Ambiente: La Salvaguardia del Sistema Costiero Salentino"; Lecce 20 giugno 2008.



- PETRILLO A. F., SELICATO F., BRUNO M. F., GIORDANO A., MAGGIO G. (2009) - "La gestione integrata della fascia costiera nel Piano Regionale delle Coste in Puglia". Libro "Territori costieri", pp. 384. Franco Angeli Editore, 2009. Codice ISBN 13: 9788856810189.
- PETRILLO A.F. (2009) - Relazione su: "Alcune considerazioni sugli afflussi in mare e la qualità delle acque di quest'ultimo". VII Giornata di studio sul drenaggio urbano sostenibile. Bari, 10 dicembre 2009.
- PETRILLO A.F. (2009) - Relazione su: "Attività antropiche e rischio sulle coste: controllo e normativa". 13a Conferenza Nazionale ASITA. Bari, Fiera del Levante, 1 – 4 dicembre 2009.
- PETRILLO A.F. (2009) - Relazione su: La modellistica fisica impiegata per lo studio degli interventi di recupero e riequilibrio del litorale di Marina di Massa. Convegno "Spiagge nuove per Massa". Sala APT di Marina di Massa 17 novembre 2009.
- PETRILLO A.F. (2009) - Relazione su: La modellistica matematica e fisica per lo studio della dinamica costiera. Convegno Penisola salentina geologia e pericolosità geologiche, organizzato dall'Ordine Regionale dei Geologi della Puglia presso la Sala consiliare della Provincia di Lecce - Palazzo dei Celestini, 19 giugno 2009.
- PETRILLO A.F. (2009) - Relazione su: La modellistica fisica e numerica nella difesa dei litorali e tecniche di monitoraggio. Training Progettuale per la Costa Martinsicuro, 8 -12 Giugno 2009 Scuola Blu, via Colle di Marzio 1 - Martinsicuro (TE).
- PETRILLO A.F.; SELICATO F.; GIORDANO A., MAGGIO G. (2010) - "Integrated coastal management in the Regional Coastal Planning in the South of Italy". ICCCM (International Conference on Coastal Conservation and Management). April 2010, Portogallo.
- PETRILLO A.F. (2010) - Relazione sulla "Evoluzione dei litorali pugliesi, con particolare riferimento a quelli dell'arco ionico". Seminario su "L'erosione costiera nel metapontino", organizzato a Matera l'8 settembre 2010 dall'Università della Basilicata.
- PETRILLO A.F. (2011) - "I primi dieci anni del Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste del Politecnico di Bari: attività svolte e prospettive per il futuro". Atti del 32° Corso sulle Tecniche di Difesa dall'Inquinamento, Ed. BIOS, ISBN 978-88-97181-05-7, 15-18 giugno 2011.
- PODIS (Progetto Operativo Difesa Suolo -Difesa delle Coste e Salvaguardia dei Litorali), 2005. *Analisi delle caratteristiche meteomarine al largo e a riva e valutazione dei processi evolutivi costieri*. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Roma, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato S.p.A.



POLITECNICO DI BARI -DIAC, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BARI -DGG, CNR-IRSA,
2009 - *POR 2000-2006, Programma Operativo della Regione Puglia 2000-2006, per il*
"Monitoraggio fisico degli interventi di difesa delle coste già finanziati e realizzati" e il
"Miglioramento delle conoscenze di base, adeguamento e ampliamento del sistema di
monitoraggio del suolo, dei corpi idrici superficiali, sotterranei e costieri". Rapp. tecn. 2009
STOCKDON, H.F., et al, 2006. *Empirical parameterization of setup, swash and runup.*
Coastal Engineering 53 (2006) 573-588.
UNESCO, INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION, 1985 e 2006. -
Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Volume I.



Protection actions for cross-borders and joint management of marine
sites of community interest



ALLEGATI

Allegato 1: GIS

Allegato 2: Grafici dell'analisi della evoluzione della linea di riva



Protection actions for cross-borders and joint management of marine
sites of community interest



Il Responsabile Scientifico della Convenzione

(prof. ing. Antonio Felice Petrillo)