APPENDICE

DATI DI RIFERIMENTO PER L'ANALISI DELLA DINAMICA LITORANEA

1. DATI DI RIFERIMENTO PER L'ANALISI DELLA DINAMICA LITORANEA

1.1. Moto ondoso al largo (punto U.K.M.O.)

Il clima ondoso al largo del paraggio di Vado Ligure è stato definito utilizzando i dati U.K.M.O., forniti dal centro meteorologico inglese "UK Meteorological Office". Il modello European Wave Model dell'U.K.M.O. ricostruisce lo stato del mare a partire dai dati meteorologici (carte bariche) e dal campo di moto.

I modelli U.K.M.O. Global Wave Model e European Wave Model sono modelli della seconda generazione per la parametrizzazione non lineare dello spettro del moto ondoso. I dati ottenibili, con cadenza di 30 minuti, sono relativi ad ogni nodo della maglia.

Il modello UK Met Office Wave Model copre le acque europee con una griglia locale (European Wave Model) le cui maglie hanno lati di 25÷30 km. L'archivio del modello, che elabora con continuità i dati meteorologici, fornisce dati sequenziali di vento e moto ondoso a partire dall'ottobre 1986.

Con riferimento al paraggio di Vado Ligure, è stato considerato il punto di coordinate geografiche (44.0°N, 8.73°E), situato nel Mar Ligure tra Imperia e Genova su un fondale di oltre 1000 m (Figura 1-1).

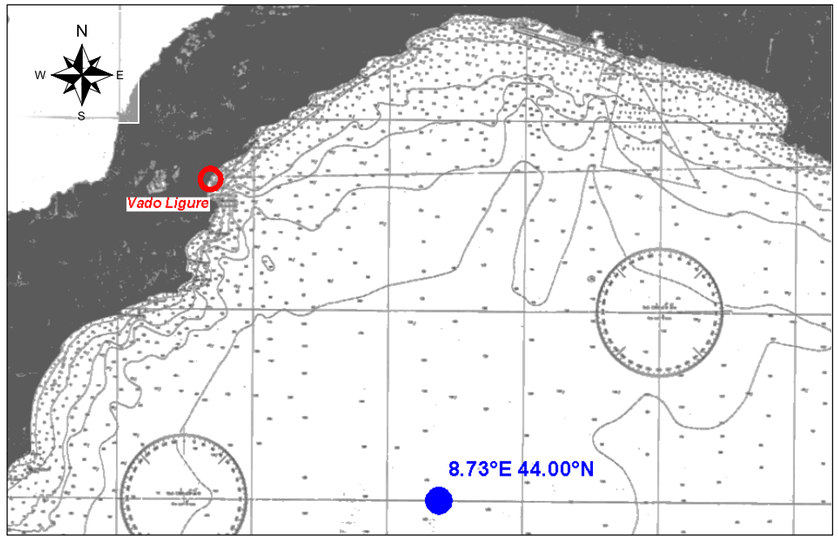


FIGURA 1-1 – PUNTO UKMO 8.73°E - 44.0°N

I dati dell'UKMO si riferiscono al periodo di osservazione che va dal 1 gennaio 1987 al 31 dicembre 2008 e sono costituiti da registrazioni triorarie che sono state elaborate in modo da ottenere il clima delle onde in forma di tabelle delle frequenze, organizzate secondo classi di direzione intervallate di 10° e di altezza d'onda con ampiezza 0.5 m (vedi tabella seguente)

TABELLA 1-1 - CARATTERISTICHE DELLE ONDE "AL LARGO" (PUNTO U.K.M.O.)

Hs (m)	≥ 0	≥ 0.25	≥ 0.75	≥ 1.25	≥ 1.75	≥ 2.25	≥ 2.75	≥ 3.25	≥ 3.75	≥ 4.25	≥ 4.75	Tot.
DIREZIONE °N	< 0.25	< 0.75	< 1.25	< 1.75	< 2.25	< 2.75	< 3.25	< 3.75	< 4.25	< 4.75	< 5.25	
5	0.694	1.614	1.092	0.345	0.065	0.023	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	3.832
15	0.415	1.495	0.860	0.223	0.039	0.005	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	3.036
25	0.424	1.843	0.836	0.193	0.033	0.002	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	3.331
35	0.328	1.479	0.704	0.154	0.019	0.002	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	2.686
45	0.303	1.319	0.506	0.100	0.042	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	2.271
55	0.252	0.866	0.289	0.068	0.019	0.005	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	1.500
65	0.251	0.729	0.282	0.098	0.037	0.002	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	1.398
75	0.228	0.568	0.163	0.084	0.018	0.005	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	1.065
85	0.226	0.522	0.121	0.046	0.019	0.005	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	0.939
95	0.235	0.482	0.109	0.042	0.019	0.011	*0.000*	0.002	*0.000*	*0.000*	*0.000*	0.899
105	0.196	0.417	0.112	0.033	0.007	0.002	0.002	0.002	0.004	*0.000*	*0.000*	0.774
115	0.224	0.445	0.131	0.039	0.028	0.004	0.002	0.004	*0.000*	*0.000*	*0.000*	0.876
125	0.240	0.559	0.159	0.056	0.026	0.002	*0.000*	0.002	*0.000*	*0.000*	*0.000*	1.044
135	0.336	1.463	0.505	0.161	0.046	0.016	*0.000*	0.002	0.002	*0.000*	*0.000*	2.530
145	0.401	1.861	0.818	0.289	0.138	0.030	0.016	0.004	*0.000*	*0.000*	*0.000*	3.557
155	0.776	2.681	0.661	0.168	0.058	0.014	0.009	0.007	*0.000*	*0.000*	*0.000*	4.373
165	0.440	1.510	0.501	0.166	0.040	0.019	0.019	0.002	0.002	*0.000*	*0.000*	2.700
175	0.489	1.526	0.503	0.154	0.044	0.030	0.007	0.002	*0.000*	*0.000*	*0.000*	2.754
185	0.606	1.959	0.887	0.370	0.105	0.063	0.018	0.011	0.002	*0.000*	*0.000*	4.019
195	0.878	3.736	2.376	1.263	0.494	0.159	0.054	0.012	0.011	0.007	0.002	8.992
205	0.890	5.770	2.945	1.344	0.552	0.175	0.067	0.025	0.011	0.005	*0.000*	11.783
215	0.836	5.158	2.541	0.986	0.310	0.077	0.035	0.014	0.002	*0.000*	*0.000*	9.959
225	1.458	6.464	2.358	0.499	0.063	0.014	0.002	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	10.858
235	0.647	3.163	0.866	0.112	0.026	0.002	0.002	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	4.817
245	0.566	1.207	0.098	0.012	0.007	0.004	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	1.894
255	0.217	0.119	0.014	0.009	0.002	0.004	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	0.364
265	0.170	0.100	0.016	0.007	*0.000*	0.002	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	0.294
275	0.165	0.077	0.016	0.005	0.002	0.002	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	0.266
285	0.144	0.070	0.011	0.002	0.004	0.002	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	0.231
295	0.156	0.065	0.012	0.012	0.004	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	0.249
305	0.126	0.063	0.026	0.004	0.005	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	0.224
315	0.121	0.109	0.023	0.014	0.005	0.002	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	0.273
325	0.186	0.233	0.060	0.011	0.002	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	0.491
335	0.223	0.760	0.189	0.047	0.018	0.004	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	1.240
345	0.258	0.711	0.454	0.109	0.044	0.007	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	1.582
355	0.315	1.276	0.957	0.272	0.061	0.016	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	2.896
Tot.	14.418	52.416	22.199	7.497	2.400	0.706	0.231	0.086	0.032	0.012	0.002	100.00

A partire dal clima ondoso al largo così ricostruito è stato possibile ricavare le rose delle registrazioni e delle energie (Figura 1-2) e la rosa delle altezze massime (Figura 1-3).

Si può notare che gli eventi con percentuale di apparizione più elevata corrispondono a mareggiate provenienti da Libeccio (205°N), caratterizzate da altezze massime superiori ai 4 m. In termini di energia del moto ondoso, si evidenzia ancora un picco di energia in corrispondenza della medesima direzione (Libeccio 205°N).

É stato inoltre possibile ricostruire la curva di durata, che consente di mettere in relazione le caratteristiche di un evento con la sua durata media annuale. Il grafico relativo alla curva di durata viene riportato nella Figura 1-4; si può notare che eventi con altezza d'onda superiore ai 2 m si presentano mediamente per meno di 7÷8 giorni all'anno.

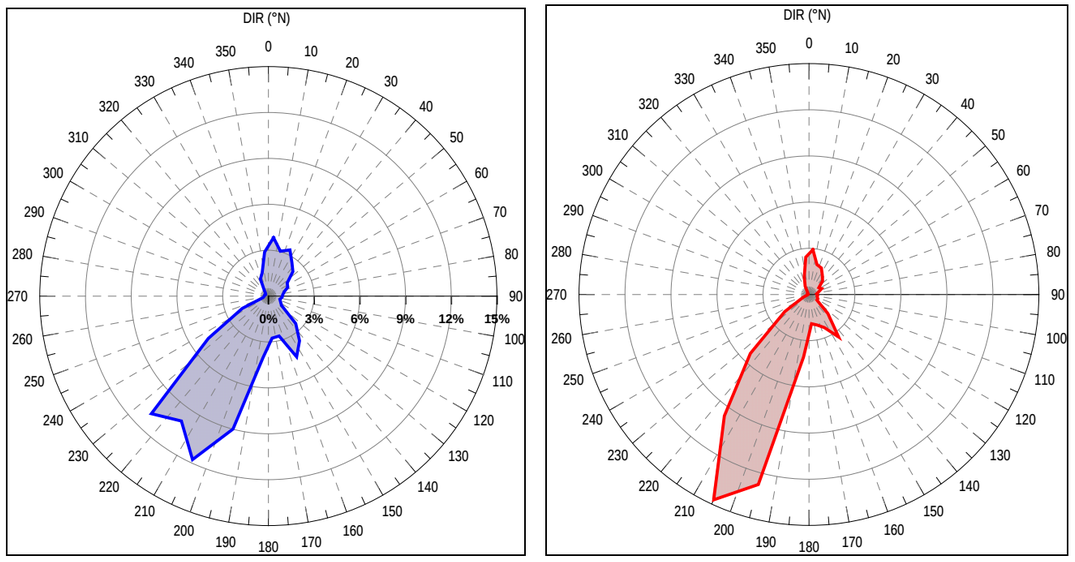


FIGURA 1-2 – ROSE DELLE REGISTRAZIONI (A SINISTRA) E DELLE ENERGIE (A DESTRA) RELATIVE AL PUNTO U.K.M.O.

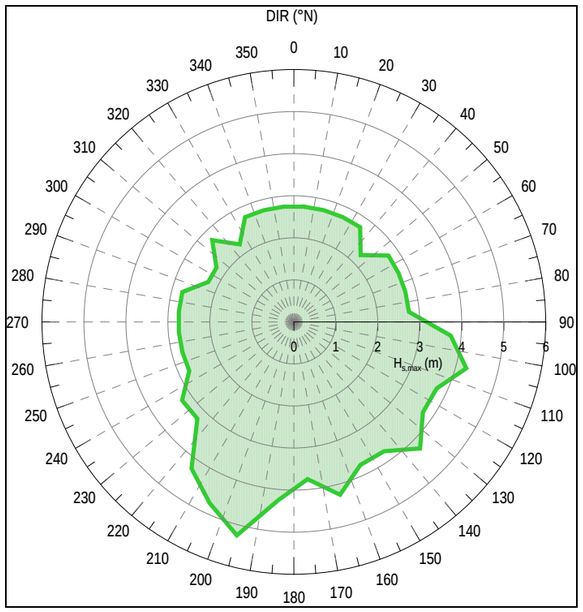


FIGURA 1-3 – ROSA DELLE ALTEZZE MASSIME RELATIVA AL PUNTO U.K.M.O.

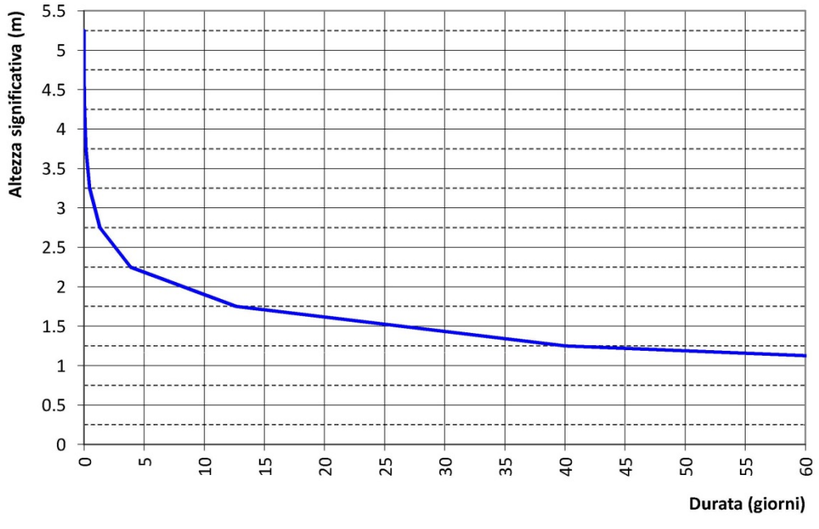


FIGURA 1-4 – CURVA DI DURATA RELATIVA AL PUNTO U.K.M.O.

1.2. Caratteristiche del moto ondoso di fronte al paraggio

Il clima ondoso al largo descritto nel precedente paragrafo è stato propagato in corrispondenza di un punto locale posto di fronte al paraggio oggetto di studio (punto P).

Il moto ondoso in questo punto, più vicino a riva, è stato successivamente utilizzato per definire i dati di input per lo studio della propagazione locale, della circolazione idrodinamica e del trasporto litoraneo (codici di calcolo Delft3D-WAVE, Delft3D-FLOW), con riferimento ad alcune mareggiate ritenute significative.

La propagazione locale del clima ondoso è stata condotta per mezzo del codice di calcolo STWAVE descritto in dettaglio nel successivo paragrafo 1.2.1.

1.2.1. Descrizione del codice di calcolo STWAVE

Il modello matematico STWAVE (Steady-state spectral WAVE model) (Resio 1987, 1988; Davis 1992; Smith, Resio, Zundel 1999) è un modello stazionario spettrale alle differenze finite basato sull'equazione di conservazione dell'azione.

Il modello descrive il cambiamento dei parametri caratteristici della mareggiata (altezza significativa, periodo, direzione media di propagazione, forma dello spettro di frequenza e spreading direzionale) dalle acque profonde, dove il campo d'onda è relativamente omogeneo su scala chilometrica e le zone sottocosta (le onde in tali zone sono fortemente influenzate dalle variazioni della batimetria, dal livello del mare, dalle correnti locali), dove i parametri caratteristici variano significativamente su scala dell'ordine della decina di metri.

Il modello STWAVE simula la rifrazione e lo shoaling indotti dalla profondità e dalle correnti, il frangimento, la diffrazione, l'interazione tra onde e il fenomeno di whitecapping.

Uno spettro d'onda è una rappresentazione statistica di stato del mare. Essenzialmente, uno spettro è rappresentato da una sovrapposizione lineare di onde monocromatiche e descrive la distribuzione dell'energia del moto ondoso come una funzione della frequenza (spettro monodimensionale di frequenza) o

della frequenza e direzione (spettro bidimensionale). Un esempio di spettro monodimensionale è rappresentato in Figura 1-5.

Il periodo di picco dello spettro è dato dal reciproco della frequenza corrispondente al picco dello spettro. L'altezza d'onda significativa è pari a 4 volte la radice quadrata dell'area sottostante lo spettro (momento di ordine 0 dello spettro).

STWAVE è basato sulle seguenti assunzioni:

– è un modello semi-piano, ovvero l'energia del moto ondoso può propagarsi soltanto dal largo verso riva (±87.5° rispetto all'asse X della griglia di calcolo, che è tipicamente la direzione approssimata della normale al litorale). Le onde riflesse dalla spiaggia e dal fondale si muovono in direzioni al di fuori di questo semipiano e sono, pertanto, trascurate;
– la variazione dello spettro d'onda lungo il bordo più "al largo" del dominio di calcolo è generalmente poco rilevante (lo è senz'altro nel caso in oggetto, dato che tale bordo è lungo circa 3 km e disposto lungo batimetriche regolari). Pertanto lo spettro di input in STWAVE è costante lungo tale limite;
– è un modello stazionario: ciò riduce il tempo di calcolo ed è appropriato per condizioni ondose che variano più lentamente del tempo impiegato dalle onde per "attraversare" la griglia di calcolo;
– tiene conto soltanto di rifrazione e shoaling lineare e non rappresenta l'asimmetria dell'onda;
– l'interazione onda-corrente è basata su una corrente con velocità costante attraverso la colonna d'acqua: se si verificano forti gradienti verticali nella corrente, la loro variazione per rifrazione e shoaling non è rappresentata nel modello;
– l'attrito sul fondo viene trascurato;
– il radiation stress è calcolato sulla base della teoria d'onda lineare.

STWAVE è un modello numerico alle differenze finite, basato su una griglia cartesiana ortogonale. Le celle della griglia sono assunte quadrate ($\Delta x = \Delta y$). Si possono ottenere griglie a diversa risoluzione andando a costruire griglie annidate. Ciò può essere ottenuto facendo "girare" il modello a una risoluzione più grossolana, salvando uno spettro per un punto più a riva. Questo spettro può quindi essere utilizzato come una condizione al contorno per una griglia di risoluzione maggiore. STWAVE opera in un sistema di coordinate locali, con l'asse X orientato in direzione perpendicolare alla spiaggia (con origine al largo) e asse Y orientato parallelamente alla costa, formando un sistema di coordinate che rispettano la regola della mano destra. L'orientazione dell'asse X (±87.5°) definisce il semipiano che è rappresentato nel modello.

L'asse Y è generalmente allineato con le batimetriche al largo. Gli angoli di provenienza delle onde sono computati in senso antiorario dall'asse X. I confini laterali nel modello possono essere specificati come terra o mare indicando la profondità delle celle come positiva (mare) o negativa (terra). Si riassume alla seguente Figura 1-6 gli input e gli output forniti dal modello. Per generare uno spettro occorre specificare i seguenti parametri:

– periodo di picco (Tp);
– altezza d'onda;
– profondità;
– parametro di appuntimento dello spettro (γ).

Il parametro di appuntimento controlla la larghezza dello spettro in frequenza (numeri bassi forniscono picchi "larghi", ovvero condizioni di mare vivo, numeri elevati picchi "ristretti", ovvero condizioni di mare di swell). La distribuzione direzionale dello spettro è invece specificata mediante una direzione media e un coefficiente di spreading direzionale (*nn*).

L'energia nello spettro di frequenza è proporzionale a $\cos^{nn}(\alpha - \alpha_m)$, dove α è la direzione della componente spettrale e α_m è la direzione media di propagazione dell'onda. Una guida per la scelta di γ e *nn* è fornita nella Tabella 1-2. Gli spettri con periodi di picco elevati sono generalmente ristretti sia in frequenza che in

direzione. Per piccoli periodi di picco gli spettri sono tipicamente allargati sia in frequenza che in direzione.

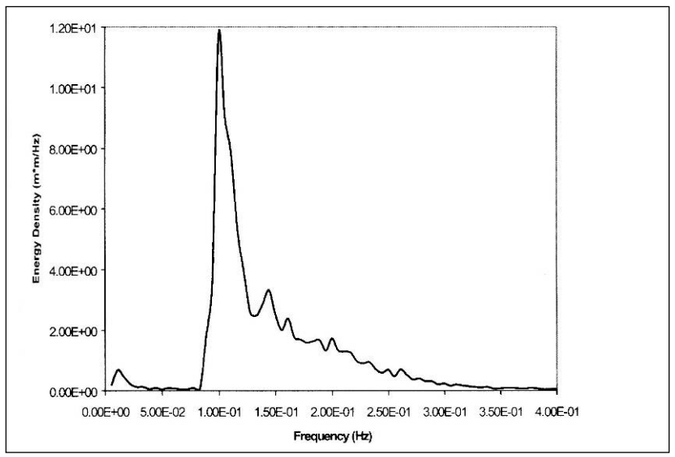


FIGURA 1-5 – SPETTRO MONODIMENSIONALE

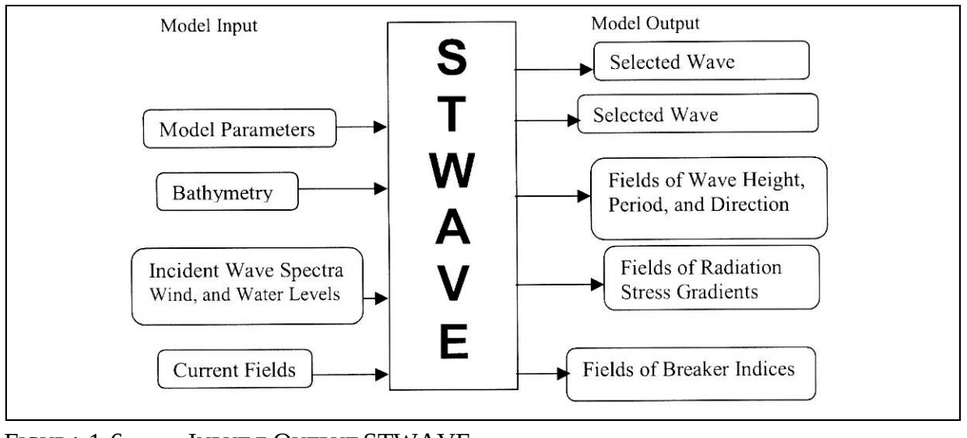


FIGURA 1-6 – INPUT E OUTPUT STWAVE

TABELLA 1-2 – CORRELAZIONE TRA PARAMETRI SPETTRALI (THOMPSON ET AL., 1996)

Tp (s)	γ	*nn*
≤ 10	3.3	4 (JONSWAP)
11	4	8
12	4	10
13	5	12
14	5	16
15	6	18
16	6	20
17	7	22
18	7	26
19	8	28
20	8	30

1.2.2. Settore di traversia

Sulla base dell'analisi del moto ondoso al largo e sulla base della conformazione geografica e dell'ubicazione dell'area oggetto di studio, è stato possibile individuare il settore di traversia caratteristico del paraggio, che risulta compreso tra 50° e 210°N (Figura 1-7).

Di conseguenza, le propagazioni del clima ondoso sottocosta, sono state condotte propagando gli eventi ondosi compresi all'interno del settore 50°÷210°N.

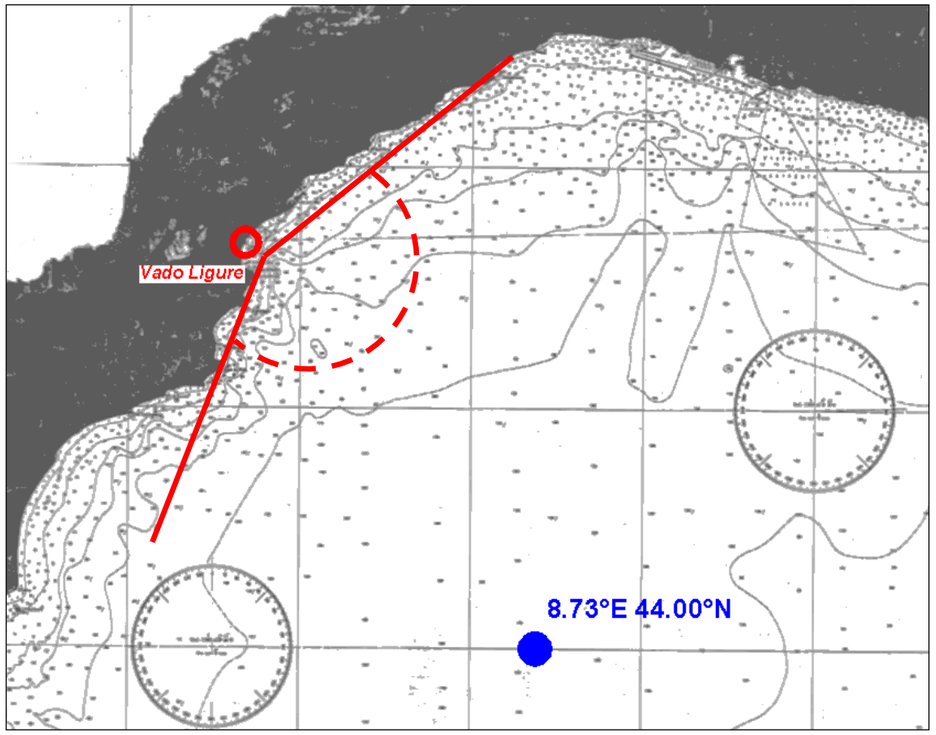


FIGURA 1-7 – SETTORE DI TRAVERSIA

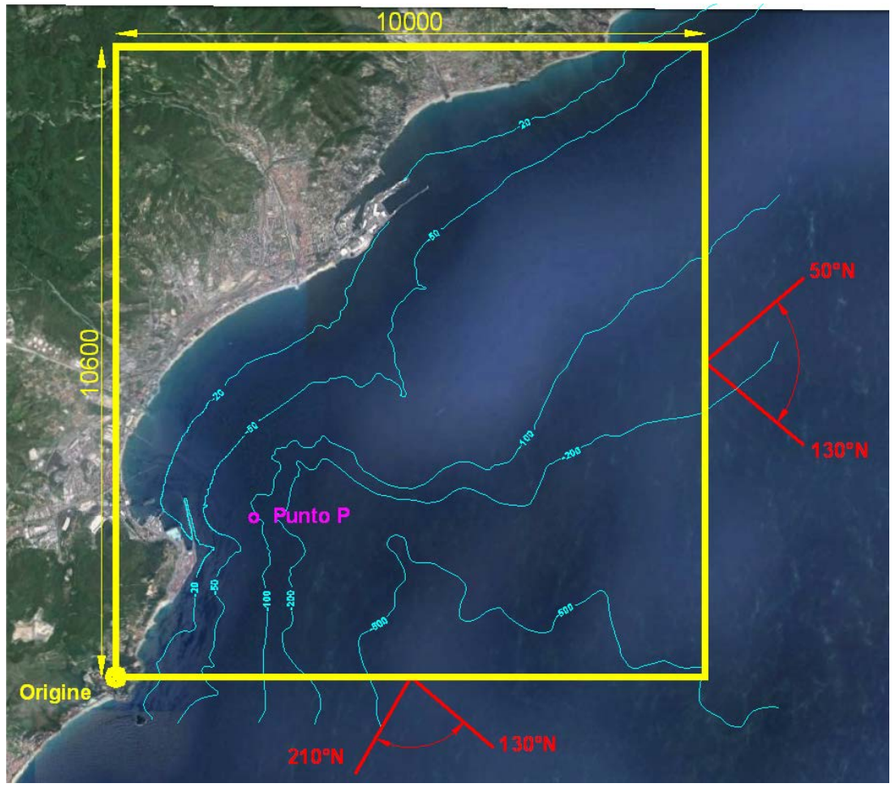


FIGURA 1-8 – GRIGLIA DI CALCOLO E UBICAZIONE DEL PUNTO P

1.2.3. Settaggio del modello di propagazione del clima

Definizione della griglia di calcolo STWAVE

Per la costruzione del dominio di calcolo del modello STWAVE sono stati impiegati i dati batimetrici a disposizione, ovvero le carte nautiche dell'Istituto Idrografico della Marina e i più recenti rilievi locali disponibili. In particolare si è fatto riferimento al rilievo di agosto 2008, che copre il tratto che va dal Porto di Vado fino al terrapieno del campo da calcio (fino a profondità maggiori di -55 m s.m.m.), e al rilievo di aprile 2010, che copre il tratto di litorale compreso tra il pontile Esso e il pontile Chevron (fino a profondità comprese tra -6.5 e -9.0 m s.m.m.).

Il dominio di calcolo è stato discretizzato attraverso una griglia con maglia ortogonale a celle quadrate di passo 50 m, con lati paralleli agli assi cartesiani. La griglia ha origine nel punto di coordinate (1455250 m E; 4898770 m N) e dimensioni 10'000 x 10'600 m (Figura 1-8).

Con riferimento al clima ondoso relativo al punto UKMO al largo, sono stati propagati nel dominio di calcolo tutti gli eventi provenienti dal settore 50°÷210°N. In particolare le mareggiate provenienti da NE-E-SE (50°÷130°N) sono state propagate utilizzando come bordo offshore il lato Est della griglia e

quelle provenienti da SE-S-SO (135°÷210°N) sono state propagate utilizzando come bordo offshore il lato Sud della griglia.

Il punto di output del clima locale (punto P - rappresentato in Figura 1-8) si trova su un fondale di circa 100 m, in corrispondenza del punto di coordinate (1457590 m EST, 4901450 m NORD). Le coordinate del punto P e dell'origine della griglia di calcolo sono espresse nel sistema di riferimento Gauss Boaga – Fuso Ovest.

Dati di input

I dati forniti in input al modello sono stati ricavati dal clima al largo, discretizzato per classi di altezza significativa e direzione di provenienza con riferimento al settore 50°÷210°N.

A ciascun evento ondoso al largo (caratterizzato da una determinata altezza d'onda significativa e direzione di provenienza) è stato associato un valore del periodo, ricavato a partire dall'elaborazione dei periodi di tutti gli eventi ricadenti nel periodo di osservazione (gennaio 1987 – dicembre 2008).

Nel dettaglio, sulla base delle caratteristiche del clima ondoso al largo, sono stati individuati tre differenti settori (50°÷90°N, 90°÷180°N e 180°÷210°N), per ciascuno dei quali è stata ricavata una curva di interpolazione tra altezza d'onda significativa e periodo (H_S – $Tz_)$.

Nelle successive figure Figura 1-9, Figura 1-10 e Figura 1-11 vengono riportate le 3 curve di interpolazione ricavate per i differenti settori. Utilizzando le correlazioni ricavate dall'interpolazione dei dati di base è stato possibile associare a ciascun evento ondoso il corrispondente periodo T_z in funzione dell'altezza significativa per i tre settori considerati.

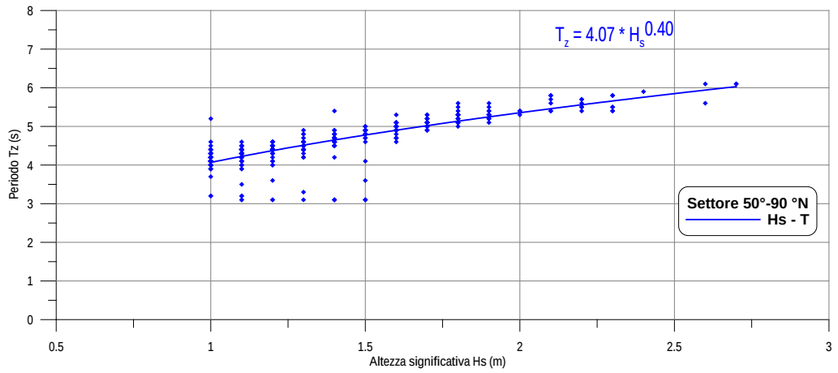


FIGURA 1-9– CORRELAZIONE H_S-T_Z PER IL SETTORE 50°÷90°N

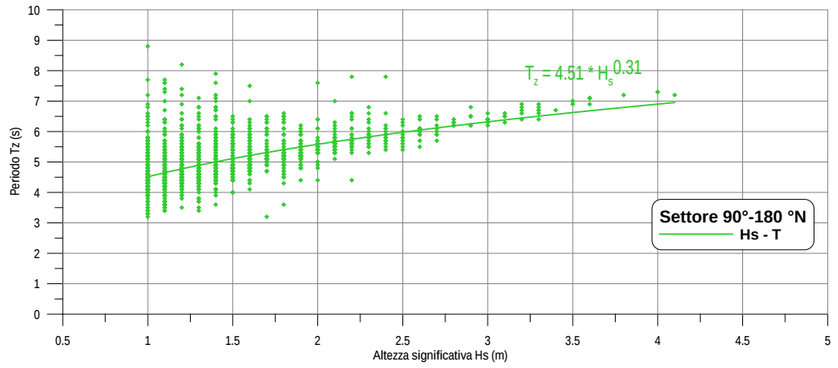


FIGURA 1-10– CORRELAZIONE H_S-T_Z PER IL SETTORE 90°÷180°N

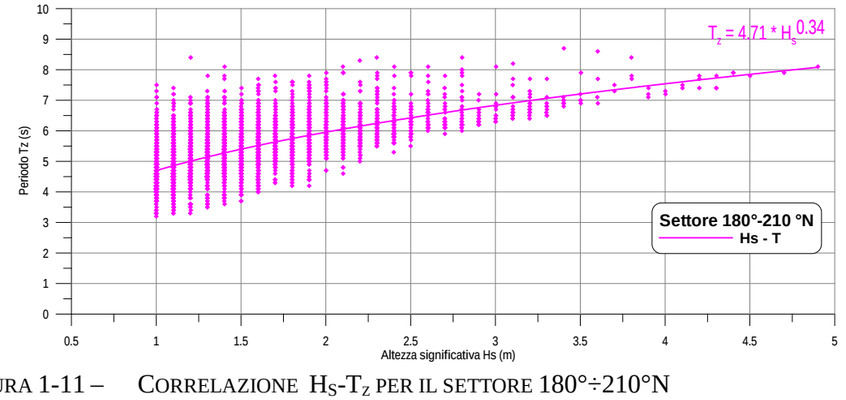


FIGURA 1-11 – CORRELAZIONE H_S-T_Z PER IL SETTORE 180°÷210°N

Applicando poi le note relazioni tra T_z, T_s e T_p:

– $T_z=0.78*T_p$ (Carter et al.);

– $T_z=0.83*T_s$ (Sapkaya),

si ricava che $T_p= 1.28*T_z$.

1.2.4. Clima ondoso locale

Il clima ondoso locale è stato ricostruito ordinando i risultati delle propagazioni dal largo verso riva, per classi di altezza significativa e di direzione locale dell'onda.

Utilizzando le corrispondenze tra i risultati delle simulazioni (clima locale) e la tabella delle registrazioni relative al clima nel punto al largo (Tabella 1-1), è stato possibile associare a ciascun evento nel punto P una percentuale di apparizione e, quindi, ricostruire le rose delle registrazioni e delle energie sottocosta.

Di seguito, si riportano graficamente i risultati delle elaborazioni della climatologia locale; in particolare sono state rappresentate le rose delle registrazioni e delle energie (Figura 1-12) e la rosa delle altezze massime (Figura 1-13).

Dall'analisi della rosa delle registrazioni e di quella delle energie, si osserva che nella propagazione verso costa il clima ondoso subisce una sensibile rotazione, per effetto della conformazione locale del paraggio, rientrando nel settore di traversia locale 60°÷190°N. Si osserva che l'energia è concentrata nel settore di Mezzogiorno (con picco a 185°N) con un picco secondario nel settore di Scirocco (a 145°N); per il settore di Grecale si osserva infine un picco caratterizzato da energia piuttosto contenuta in corrispondenza della direzione 75°N.

Le mareggiate con i valori massimi di altezza significativa (compresi tra 3.5 e 4 m) provengono dai settori di Levante-Scirocco e Mezzogiorno; mentre per il settore di Grecale si presentano mareggiate con altezza significativa inferiore a 2.5 m.

É stata infine ricostruita la curva di durata nel punto P che consente di mettere in relazione le caratteristiche di un evento con la sua durata media annuale (Figura 1-14). Si può osservare come l'altezza significativa di 2 m, che nel punto al largo veniva superata mediamente per 7÷8 giorni all'anno, nel punto P venga superata per circa 3 giorni all'anno.

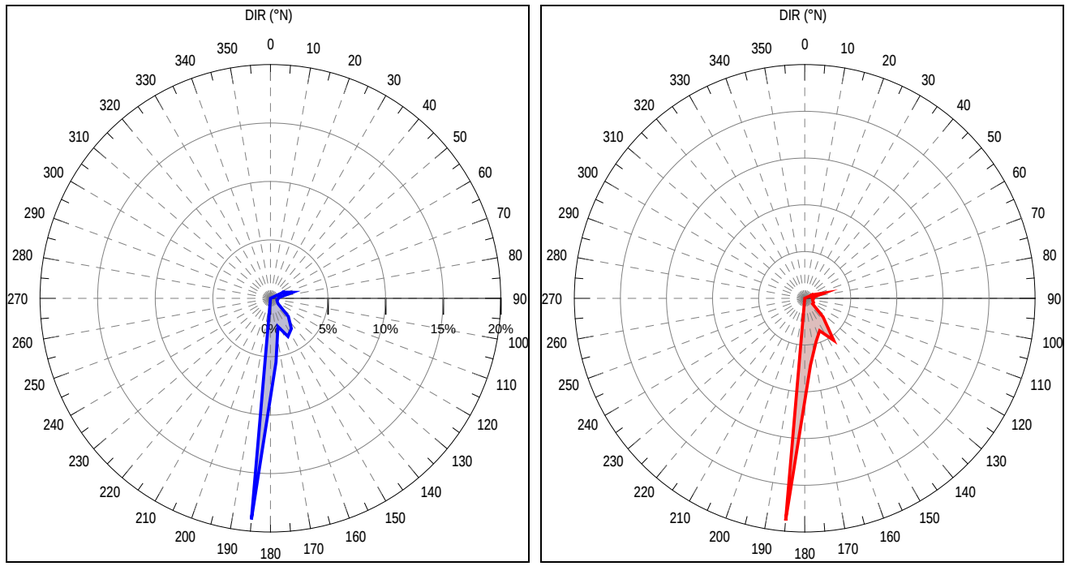


FIGURA 1-12 – ROSE DELLE REGISTRAZIONI (A SINISTRA) E DELLE ENERGIE (A DESTRA) RELATIVE AL PUNTO P

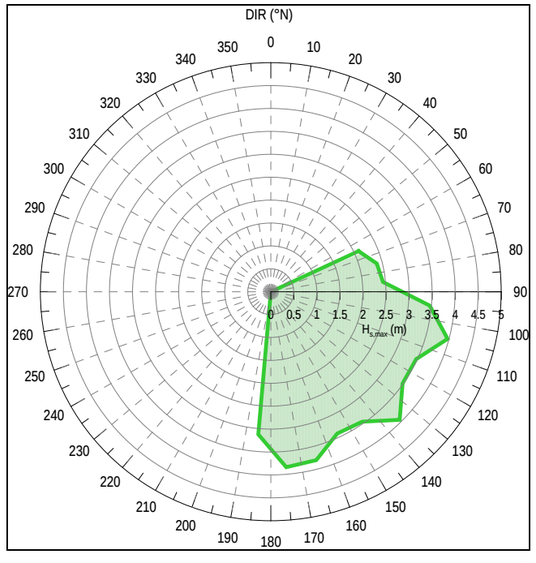


FIGURA 1-13 – ROSA DELLE ALTEZZE MASSIME RELATIVA AL PUNTO P

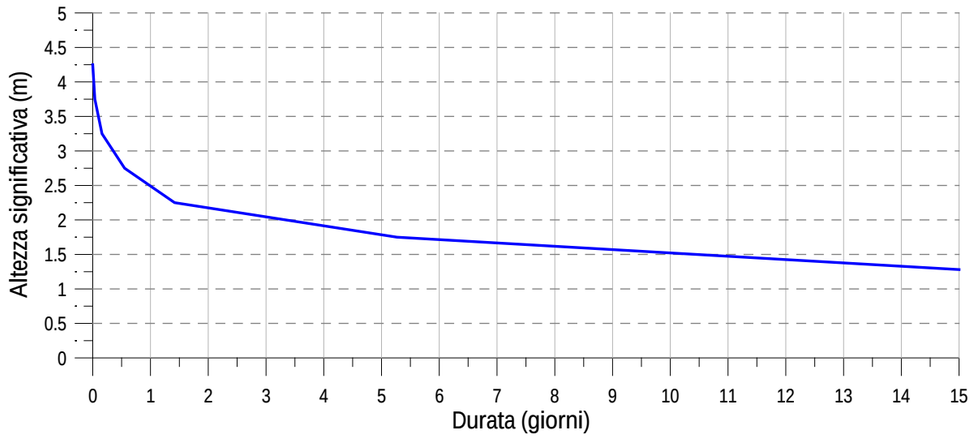


FIGURA 1-14 – CURVA DI DURATA RELATIVA AL PUNTO P

1.2.5. Mareggiate caratteristiche

La climatologia disponibile nel punto P, ricavata dalle propagazioni dal largo verso riva, è stata impiegata per definire alcune mareggiate caratteristiche che sono state impiegate nello studio delle circolazioni costiere e del trasporto solido.

In particolare, sono state individuate alcune mareggiate ritenute significative per la dinamica litoranea locale e che corrispondono rispettivamente a condizioni di moto ondoso relativamente severe (ma non estreme), caratterizzate da persistenza pari a 1g/anno e 5 gg/anno.

L'analisi è stata condotta con riferimento a 3 differenti settori, individuati a partire dalla distribuzione delle energie del clima ondoso locale (Figura 1-12): Greco-Levante (60°÷120°N), Scirocco (120°-160°N) e Mezzogiorno (160°÷190°N).

I valori di altezza d'onda significativa, per le mareggiate individuate, sono stati ricavati dalla curva di durata nel punto P ricostruita per i 3 settori di Greco-Levante, Scirocco e Mezzogiorno, per le suddette frequenze di 1 g e 5 gg/anno (Figura 1-15).

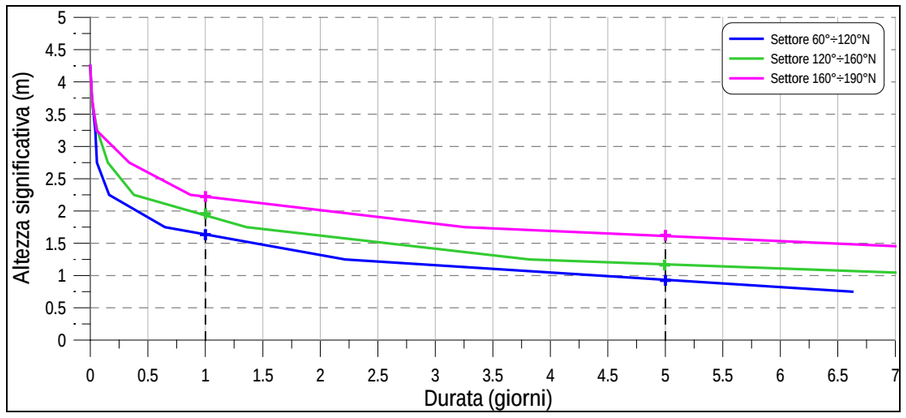


FIGURA 1-15 – CURVA DI DURATA RELATIVA AL PUNTO P PER I 3 SETTORI INDIVIDUATI

Sempre con riferimento alla distribuzione locale dell'energia (Figura 1-12), sono state individuate 3 direzioni principali di provenienza (75°N per il settore di Greco-Levante, 145°N per il settore di Scirocco e 185°N per quello di Mezzogiorno), rappresentative dei picchi di energia.

I valori del periodo di picco da associare a ciascuna mareggiata sono stati ricavati in funzione delle caratteristiche locali dell'evento ondoso sulla base delle corrispondenze tra clima locale e clima al largo ottenuto attraverso le propagazioni.

Le mareggiate caratteristiche così individuate, considerate come input per lo studio della propagazione locale e, successivamente, della dinamica litoranea e del trasporto solido, sono riportate nella successiva Tabella 1-3.

TABELLA 1-3 – MAREGGIATE CARATTERISTICHE NEL PUNTO P

		CARATTERISTICHE NEL PUNTO P		
Mareggiate	**Frequenza (gg/anno)**	**H_S (m)**	**T_P (s)**	**Dir (°N)**
Levante	1	1.64	6.5	75
Scirocco	1	1.93	6.8	145
Mezzogiorno	1	2.22	7.8	185
Levante	5	0.93	5.2	75
Scirocco	5	1.17	5.6	145
Mezzogiorno	5	1.61	6.8	185

1.3. Caratteristiche morfologiche e sedimentologiche

1.3.1. Ricostruzione storica dell'evoluzione morfologica del litorale

La ricostruzione storica dell'evoluzione del litorale di Vado Ligure, tra Villa Gavotti e il porto di Vado, è stata condotta sulla base dei dati forniti dal Committente e, in particolare, sulla base del confronto tra le seguenti linee di riva (Figura 1-16):

– linea di riva 1944 (da rilievo aerofotogrammetrico);
– linea di riva 1973 (da rilievo aerofotogrammetrico);
– linea di riva 1983 (da rilievo aerofotogrammetrico);
– linea di riva 1993 (da rilievo aerofotogrammetrico);
– linea di riva 2003 (da rilievo aerofotogrammetrico);
– linea di riva 2010 (rilievo della campagna di "bianco");
– linea di riva 2014 (da immagini satellitari).

L'analisi dell'evoluzione storica della linea di costa è stata condotta con riferimento al tratto di litorale compreso tra la foce del torrente Quiliano e la foce del torrente Segno.

La linea di riva del 1944 si presenta notevolmente arretrata rispetto a quelle degli ultimi 40 anni (dal 1973 al 2014), in parte perché le opere foranee del porto di Vado nel 1944 non raggiungevano i fondali attuali e in parte perché non erano ancora stati realizzati i terrapieni e le armature di foce del Quiliano.

Per quanto riguarda la spiaggia compresa tra la foce del Quiliano e il terrapieno del cantiere navale, dal 1973 al 1993 si osserva un avanzamento sostanzialmente uniforme della linea di costa di circa 6÷7 m. Dal 1993 al 2003 si riscontra un avanzamento piuttosto consistente (circa 15÷16 m), mentre nel corso degli ultimi anni la linea di costa risulta sostanzialmente stabile.

Con riferimento al tratto di litorale più a Sud (tra il cantiere navale e la foce del Segno), si osserva un riorientamento della linea di costa piuttosto evidente dal 1973 al 1993, con arretramento a Nord e avanzamento a Sud a ridosso della scogliera radente. Questo fenomeno va sicuramente attribuito al completamento delle opere foranee del porto di Vado e soprattutto all'allungamento del molo di sopraflutto.

Questa tendenza diminuisce nel corso del decennio successivo (dal 1993 al 2003) e nel corso dell'ultimo decennio si riscontra una sostanziale stabilità della linea di costa.

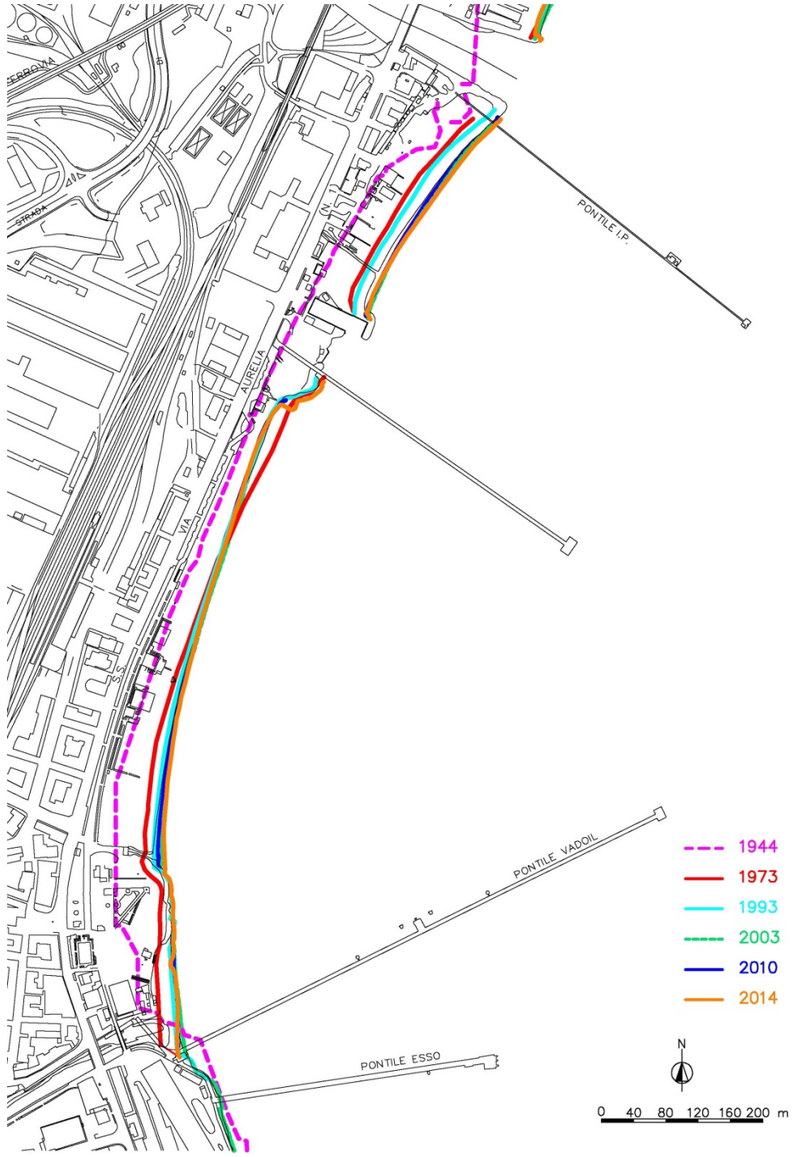


FIGURA 1-16 – RICOSTRUZIONE STORICA DELL'EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA DAL 1944 AL 2014

1.3.2. Dati sedimentologici

Le caratteristiche sedimentologiche del materiale presente sulla fascia attiva del litorale sono state ricavate sulla base dei risultati della campagna di indagini eseguita tra febbraio e maggio 2010, i cui risultati sono descritti in dettaglio nell'elaborato "Analisi sedimentologiche dei prelievi di campione eseguiti sulla spiaggia emersa e sommersa compresa tra il Torrente Segno e il Rio 4 Stagioni ad integrazione del progetto definitivo 'Piastra multifunzionale' del porto di Vado Ligure – Savona", redatto da Drafinsub Survey S.r.l. (maggio 2010).

Ai fini dello studio di cui in oggetto sono state considerate le caratteristiche dei campioni prelevati all'interno dell'area di interesse, compresa tra la foce del torrente Quiliano e la foce del torrente Segno (area riquadrata in rosso in Figura 1-17).

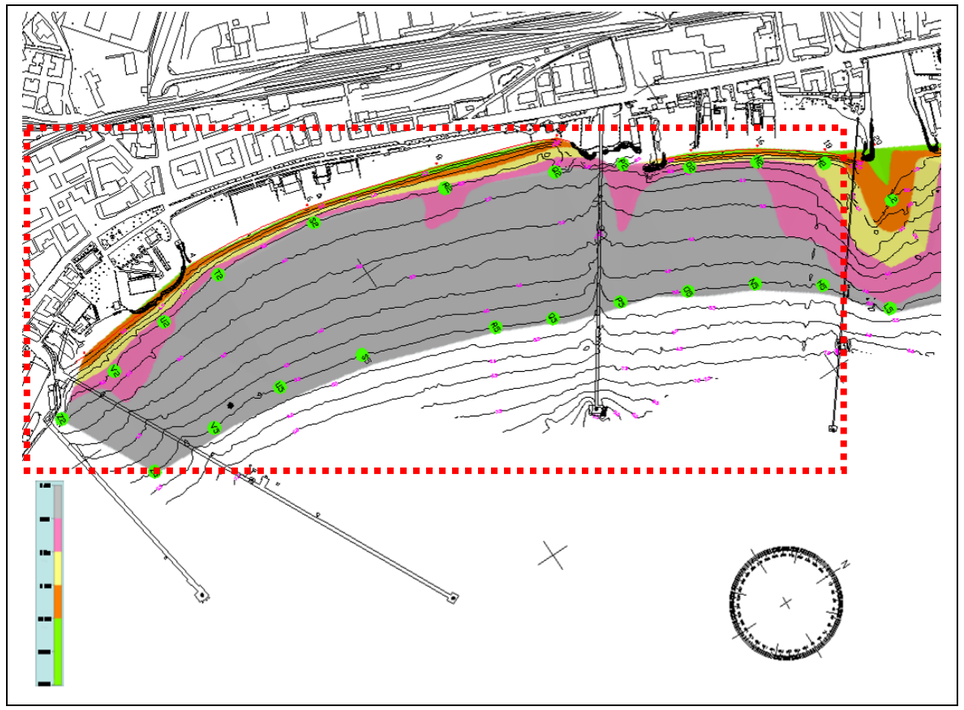


FIGURA 1-17 – UBICAZIONE DEI PUNTI DI PRELIEVO (CAMPAGNA DI INDAGINI DI FEBBRAIO-MAGGIO 2010)

Nelle successive Tabella 1-4 e Tabella 1-5 si riportano i valori del diametro medio dei grani per i campioni prelevati sulla spiaggia sommersa ed emersa, all'interno del tratto di litorale oggetto del presente studio.

TABELLA 1-4 – DIAMETRO MEDIO DEI GRANI – CAMPIONI SPIAGGIA SOMMERSA

Campione	Profondità (m s.m.m.)	D_{50} (mm)
H2	-2	0.276
H5	-5	0.304
N2	-2	0.213
N5	-5	0.132
O2	-2	0.216
O5	-5	0.129
P2	-2	0.318
P5	-5	0.191
Q2	-2	0.166
Q5	-5	0.199
R2	-2	0.303
R5	-5	0.136
S2	-2	0.137
S5	-5	0.159
T2	-2	0.157
U2	-2	0.289
U5	-5	0.157
V2	-2	0.318
V5	-5	0.154
Z2	-2	0.118
Z5	-5	0.162

TABELLA 1-5 – DIAMETRO MEDIO DEI GRANI – CAMPIONI SPIAGGIA EMERSA

Campione	Profondità (m s.m.m.)	D_{50} (mm)
0	battigia	1.867
4	battigia	2.405
6	battigia	2.735
8	battigia	4.273
10	battigia	2.990
14	battigia	6.408
16	battigia	3.362
18	battigia	4.353

Sulla base dei risultati delle indagini eseguite, si evince che la spiaggia sommersa fino alla profondità di circa -5 m s.m.m. (ovvero all'interno della fascia attiva) è costituita da sabbia medio-fine con diametro medio dei grani compreso tra 0.1 e 0.3 mm. La spiaggia emersa risulta, invece, costituita da ghiaia fine con diametro medio dei grani compreso tra 2 e 6 mm.

Vista la differente classazione del materiale tra spiaggia emersa e sommersa, si è scelto di procedere con l'analisi modellistica dell'evoluzione morfologica e della dinamica del litorale come di seguito specificato.

Ai fini dello studio della circolazione e del trasporto solido dei sedimenti che costituiscono il profilo sommerso del litorale (analisi condotta per mezzo di codici di calcolo Delft3D-WAVE, Delft3D-FLOW) sono state fornite in input al modello le caratteristiche granulometriche ricavate sulla base dell'analisi delle curve granulometriche dei campioni prelevati sulla spiaggia sommersa. Nel caso specifico si ottiene un valore medio del D_{50} (diametro medio dei grani) pari a 0.20 mm (Tabella 1-4).

Per quanto riguarda, invece, l'evoluzione della linea di riva e lo studio del trasporto solido longitudinale (analizzati mediante il modello UNIBEST), si è scelto di fornire in input al modello le caratteristiche granulometriche ricavate sulla base dell'analisi delle curve granulometriche dei campioni prelevati sia sulla battigia che sulla spiaggia sommersa, alla profondità di -2 m s.m.m. Il codice di calcolo UNIBEST, infatti, consente di inserire un unico valore del diametro medio dei grani per rappresentare i sedimenti della fascia attiva del litorale e, quindi, non permette di distinguere tra zona sommersa ed emersa. Nella modellazione è stato pertanto considerato un valore medio del D_{50} pari a 2 mm.

1.3.3. Sedimenti provenienti dal Torrente Segno

All'interno del tratto di litorale oggetto di studio si inserisce il Torrente Segno. Questo corso d'acqua, che sottende un bacino di circa 21 km^2, è in grado di generare un modesto apporto di sedimenti. Infatti, la fitta copertura vegetale limita fortemente le condizioni predisponenti a fenomeni di ruscellamento diffuso

e arealmente esteso, ad eccezione di qualche area in cui gli incendi hanno comportato una maggiore esposizione agli agenti erosivi.

Studi sul trasporto solido del Torrente Segno hanno fornito una stima del trasporto medio annuo in grado di essere generato dal torrente, fornendo un range variabile tra i 3400 e gli 8600 m^3/anno relativo al materiale in grado di raggiungere la foce (cfr. "Valutazione del trasporto solido del Torrente Segno", redatto dal Dott. Geol. Guido Paliaga nel giugno 2014). Il valore più elevato si riferisce alla stima effettuata considerando gli effetti dei recenti incendi che hanno interessato alcune aree del bacino.

Il materiale costituente il fondo alveo, inizialmente più grossolano (ciottoli e ghiaie), diminuisce progressivamente verso la foce sino a granulometrie più fini (sabbie).

Le analisi granulometriche eseguite su un campione di materiale prelevato in prossimità della foce hanno mostrato che circa il 25% del campione è costituito da sabbie (dimensioni inferiori ai 2 mm secondo classificazione ASTM).

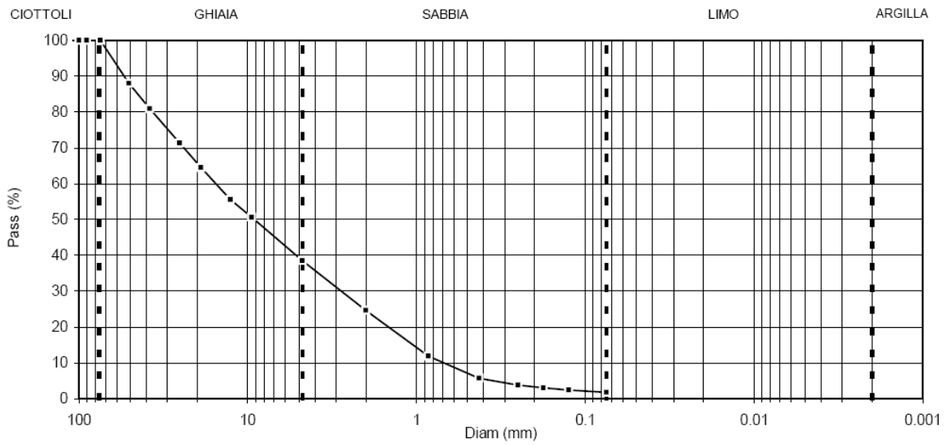


FIGURA 1-18 – CURVA GRANULOMETRICA DEL CAMPIONE DI MATERIALE PRELEVATO ALLA FOCE DEL TORRENTE SEGNO

2. IL MODELLO PER LO STUDIO DELLA CIRCOLAZIONE LITORANEA E DEL TRASPORTO SOLIDO

Al fine di poter comprendere le attuali dinamiche del litorale, nonché di eseguire una verifica dei risultati dei modelli di circolazione e trasporto in relazione alle reali dinamiche, è stato eseguito lo studio su modello matematico dello stato ante operam prima dell'inizio dei lavori per la costruzione della piastra multifunzionale.

Lo studio della dinamica litoranea e del trasporto solido che si instaurano nei fondali antistanti il litorale di Vado in seguito alla persistenza (cioè a regime, in condizioni stazionarie) di determinate forzanti, è stato condotto mediante l'utilizzo del codice di calcolo DELFT3D-FLOW, accoppiato al codice di calcolo DELFT3D-WAVE. Una descrizione dettagliata dei codici di calcolo viene riportata nel successivo paragrafo 2.1.

Per lo studio delle correnti costiere sono state considerate come forzanti principali il moto ondoso e il vento. Il campo di moto ondoso sottocosta (forzante del modello idrodinamico) è stato ricavato, a partire dalle condizioni meteomarine nel punto di output "P" (cfr. precedente paragrafo 1.2.5), per mezzo del modello DELFT3D-WAVE. Quest'ultimo si interfaccia con il modello DELFT3D-FLOW, fornendogli i valori dei radiation stress che generano le correnti litoranee.

In modo analogo, è stato condotto lo studio del trasporto solido litoraneo. I modelli accoppiati consentono di simulare i fenomeni responsabili del trasporto dei sedimenti; le simulazioni condotte consentono di evidenziare, seppur qualitativamente, le aree potenzialmente attive dal punto di vista del trasporto solido generato dall'azione combinata di onde e correnti.

Al fine di analizzare la dinamica delle correnti e del trasporto anche in presenza di trasporto solido proveniente dal Torrente Segno sono stati analizzati alcuni scenari di mareggiate concomitanti ad un evento di piena del torrente.

2.1. Il codice di calcolo Delft3D

Il modello Delft3D è costituito da una "suite" di moduli tra loro interconnessi che consentono la simulazione di processi complessi quali flussi e fenomeni di trasporto, indotti dall'azione simultanea delle forzanti di marea, del vento (modulo FLOW) e del moto ondoso (modulo WAVE) in regime di moto vario, di trasporto solido sia con batimetria fissa che variabile. È inoltre disponibile ed ampiamente utilizzato nel presente studio, un modulo morfologico in grado di riprodurre le dinamiche dei fondali sia a breve che su lunga scala temporale.

I modelli possono utilizzare schematizzazioni bi- o tri-dimensionali, ed è in grado di descrivere i processi idrodinamici, dispersivi, chimici, ecologici e morfologici che hanno luogo in un ambiente fluviale o costiero per effetto dell'applicazione delle forzanti meteo-marine quali le maree, le onde, il vento, ecc. e di forzanti di natura antropica.

La suite DELFT3D utilizza come riferimento di calcolo una griglia curvilinea a maglie rettangolari non uniformi che permette, per questa sua caratteristica, di adottare elementi di dimensioni ridotte nelle zone di maggiore interesse, ed elementi di maggiori dimensioni nelle aree in cui non esistano apprezzabili variazioni geometriche. Questa peculiarità del modello, consente, in ultima analisi, una riproduzione molto accurata dell'ambiente fisico oggetto di simulazione in relazione al tipo di indagine e di informazione che si vuole ottenere.

Il modello idrodinamico a maglia curvilinea, morfologico e di propagazione del moto ondoso utilizzati in questo studio fanno parte della suite DELFT3D, sviluppata dal laboratorio idraulico WL|Delft Hydraulics, ora Deltares, e testato e continuamente aggiornato per rispondere alle diverse esigenze.

Questa suite di modelli è stata utilizzata in numerosi studi in Olanda, in Germania, per studi della Comunità Europea, in Russia, in Medio Oriente, ad Hong Kong ed in India, oltre a numerose applicazioni in molte aree lagunari e lungo litorali in Italia.

Di seguito sono illustrate le caratteristiche principali del modello numerico, una trattazione più completa e dettagliata di tutti gli aspetti numerici e concettuali è riportata nel manuale d'uso del modello disponibile sul web all'indirizzo (http://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals).

2.1.1. Il modulo idrodinamico e morfologico Delft3D-FLOW

Il modulo FLOW della suite costituisce l'elemento di base della suite modellistica ed è preposto alla simulazione dei flussi e fenomeni di trasporto indotti dal regime mareale o da particolari situazioni meteorologiche in regime di moto vario sia con schematizzazioni bidimensionali che tridimensionali compresi gli effetti

delle differenze di densità dovute a temperature non uniformi o alla distribuzione di salinità.

Le equazioni del moto, risolte con uno schema numerico incondizionatamente implicito alle differenze finite, vengono applicate lungo una griglia curvilinea che permette, per questa sua caratteristica, di seguire bene le variazioni batimetriche del fondale adottando elementi di dimensioni ridotte nelle zone di maggiore interesse, ed elementi di maggiori dimensioni nelle aree in cui non esistano apprezzabili variazioni geometriche.

Il modello include algoritmi che tengono conto dei seguenti fenomeni fisici:

- Gradienti della superficie libera (effetti barotropici)
- Effetti della rotazione terrestre (forza di Coriolis)
- Acqua con densità variabile (equazioni di stato)
- Gradienti orizzontali di densità (effetti baroclinici)
- Turbolenza indotta dai flussi (turbolenza di massa e di quantità di moto - modello di chiusura della turbolenza)
- Trasporto del sale e di altre sostanze conservative - scambio di calore
- Forzante dovuta all'oscillazione mareale al contorno libero
- Sforzo tangenziale sulla superficie liquida dovuto al vento, variabile nello spazio e nel tempo
- Sforzo tangenziale sul fondo variabile nello spazio
- Pressione atmosferica sulla superficie liquida, variabile nello spazio e nel tempo
- Processo di allagamento ed emersione dei bassifondi soggetti a marea
- Scambio di calore attraverso la superficie libera
- Processi di pioggia ed evaporazione
- Forze generate dalla marea
- Effetti di flussi secondari nelle equazioni della quantità di moto nel caso bidimensionale e scabrezza laterale lungo i muri verticali
- Influenza delle onde sulla scabrezza di fondo (2D e 3D), sforzi indotti dalle onde e flussi di massa (solo nel caso bidimensionale) attraverso strutture idrauliche.

Il modello risolve le equazioni di moto vario in due (valori medi sulla profondità) o in tre dimensioni, considerando un sistema costituito dalle equazioni orizzontali del moto, l'equazione di continuità e le equazioni di trasporto.

Per completezza vengono riportate le equazioni fondamentali mentre per ulteriori approfondimenti si rimanda alla descrizione concettuale del modello riportata nella documentazione ufficiale del modello edita a cura del laboratorio di Idraulica di Delft (Olanda).

L'equazione di continuità (mediata sulla profondità) in coordinate curvilinee ortogonali lungo il piano orizzontale è la seguente:

$$\frac{\partial(\zeta)}{\partial t}+\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\left\{\frac{\partial\left[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)u\right]}{\partial\xi}+\frac{\partial\left[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)v\right]}{\partial\eta}\right\}=Q$$

con Q = quantità sorgente per unità di superficie dovuta a scarichi o prelievi d'acqua, precipitazione e evaporazione.

Le equazioni della quantità di moto nelle direzioni ξ e η sono le seguenti:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial u}{\partial\xi}+\frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial u}{\partial\eta}+\frac{\omega}{d+\zeta}\frac{\partial u}{\partial\sigma}+\frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial\eta}+$$
$$-\frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial\zeta}-fv=-\frac{1}{\rho\sqrt{G_{\xi\xi}}}P_\xi+F_\xi+\frac{1}{(d+\zeta)^2}\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\nu_v\frac{\partial u}{\partial\sigma}\right)+M_\xi$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial v}{\partial\xi}+\frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial v}{\partial\eta}+\frac{\omega}{d+\zeta}\frac{\partial v}{\partial\sigma}+\frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial\xi}+$$
$$-\frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial\eta}-fu=-\frac{1}{\rho\sqrt{G_{\eta\eta}}}P_\eta+F_\eta+\frac{1}{(d+\zeta)^2}\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\nu_v\frac{\partial v}{\partial\sigma}\right)+M_\eta$$

Per una maggiore comprensione dell'equazione precedente si riporta la spiegazione dei principali simboli in essa contenuti:

ξ,η = coordinate curvilinee orizzontali [m]
ζ = livello del pelo libero sopra il piano di riferimento [m]
d = profondità [m]
σ = coordinate verticali scalate, valutate come funzione della profondità e del livello del pelo libero(d,ζ)
u,v = componenti orizzontali della velocità [m/s]
ω = componente nel sistema σ delle velocità nella direzione σ [m/s]
$\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}$ = coefficienti per trasformare coordinate curvilinee in coordinate rettangolari [m]
Pξ ,Pη = gradiente pressione orizzontale nelle direzioni ξ e η
Fξ , Fη = corrispondono alle "tensioni tangenziali" di Reynolds

L'effetto della variazione di densità è considerato solo nel termine del gradiente di pressione orizzontale, Pξ ε Pη (approssimazione di Boussinesq).

La profondità è assunta essere molto minore della scala delle lunghezze orizzontali e quindi si può ritenere valida l'approssimazione che usualmente si utilizza per "acque basse" per la quale l'equazione della quantità di moto verticale si riduce alla relazione della pressione idrostatica:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H$$

In questo modo si assume che le accelerazioni verticali siano piccole se paragonate all'accelerazione di gravità e possano quindi non essere prese in considerazione.

L'equazione di trasporto è formulata in coordinate curvilinee ortogonali lungo il piano orizzontale e in un sistema di coordinate σ lungo la verticale.

$$\frac{\partial (d+\zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\left\{\frac{\partial\left[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)uc\right]}{\partial \xi} + \frac{\partial\left[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)vc\right]}{\partial \eta}\right\} + \frac{\partial \omega c}{\partial \sigma} =$$
$$\frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\left\{\frac{\partial}{\partial \xi}\left[D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial c}{\partial \xi}\right] + \frac{\partial}{\partial \eta}\left[D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial c}{\partial \eta}\right]\right\} +$$
$$\frac{1}{d+\zeta}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left[D_v \frac{\partial c}{\partial \sigma}\right] - \lambda_d (d+\zeta)c + S$$

con λd che rappresenta il processo di decadimento del primo ordine e S la quantità sorgente per unità di superficie dovuta a scarichi o prelievi d'acqua.

Per una maggiore comprensione dell'equazione precedente si riporta la spiegazione dei principali simboli in essa contenuti:

ξ,η = coordinate curvilinee orizzontali [m]
σ = coordinate verticali scalate valutate come funzione della profondità e del livello del pelo libero(d,ζ)
u,v = componenti orizzontali della velocità [m/s]
ω = componente nel sistema σ delle velocità nella direzione σ [m/s]
$\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}$ = coefficienti per trasformare coordinate curvilinee in coordinate rettangolari [m]
D_H e D_V = coefficienti di dispersione orizzontale e verticale [m2/s]

Il coefficiente di diffusione orizzontale viene usualmente considerato costituito da 3 parti: una parte dovuta alla "turbolenza 2D", una parte dovuta alla "turbolenza 3D" ed una parte dovuta alla diffusione molecolare.

La parte 2D è associata al rimescolamento dovuto a moti e forze orizzontali che non possono essere risolte dalla maglia orizzontale (sub-grid scale turbulence). La parte 3D si riferisce alla turbolenza tridimensionale ed è legata alla viscosità dinamica che è valutata seguendo il modello di chiusura della turbolenza.

Indicando questi 3 termini con D_{2d}, D_{3d} e D_{mol} , si può dire che:

$D_H = D_{2d} + D_{3d} + D_{mol}$

La somma degli ultimi 2 termini costituisce il coefficiente di diffusione verticale:

$D_V = D_{3d} + D_{mol}$

Nel caso di simulazioni strettamente bi-dimensionali, l'unico coefficiente di diffusione che rimane è D_H.

Per le simulazioni, eseguite nel presente studio, sono state fatte alcune assunzioni e semplificazioni di seguito brevemente riportate:

- l'effetto della curvatura terrestre non è stata considerata e il parametro di Coriolis è stato assunto uniforme;
- considerando la scala delle analisi effettuate, per la simulazione degli sforzi tangenziali, la scabrezza laterale lungo i contorni chiusi non è stata presa in considerazione (free slip);
- il flusso attraverso contorni chiusi o attraverso il fondo è pari a zero;
- i gradienti di pressione sulla superficie libera (barotropici) non sono stati considerati.

2.1.2. Il modulo per la propagazione del moto ondoso Delft3D-WAVE

Il modulo utilizzato per la propagazione del moto ondoso in ambito costiero DELFT3D-WAVE fa riferimento al codice di calcolo SWAN (Simulating WAves Nearshore).

Questo modello è basato sull'equazione di bilancio energetico dell'energia dello spettro ondoso (in direzioni e frequenze) ed è in grado di simulare la propagazione di onde di piccolo periodo (wind waves e swell waves) dalle acque profonde verso le regioni costiere, caratterizzate da batimetrie irregolari e acque superficiali.

Nel modello sono implementati algoritmi di calcolo per tenere in considerazione i seguenti fenomeni fisici:

- Effetti della trasformazione delle onde dovuti allo shoaling
- Rotazione del fronte d'onda dovuti alla rifrazione
- Generazione delle onde per effetto del vento
- Fenomeni di dissipazione dovuti al white-capping, attrito con il fondale e frangimento
- Interferenze dovute alla presenza di correnti
- Set-up da moto ondoso
- Fenomeni di trasmissione e riflessione dovuti alla presenza di ostacoli quali frangiflutti e berme sommerse
- Iterazioni non lineari del moto ondoso

<u>Equazione di conservazione dell'azione con diffrazione</u>

Il modello DELFT3D-WAVE è basato sulla equazione di conservazione dell'azione dell'onda, e non della densità dell'energia, in quanto lo spettro della densità d'azione è conservativo anche in presenza di correnti (Whitham 1974):

$$\frac{\partial(N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma}$$

dove:

$N = \frac{E(\sigma,\theta)}{\sigma}$ è la densità di azione dell'onda (funzione della frequenza σ e della direzione θ) e si ottiene dividendo la densità di energia E per la frequenza;

c_x, c_y sono le velocità di propagazione lungo le direzioni spaziali x e y;

c_σ è la velocità di propagazione nel dominio delle frequenze e nello spazio direzionale;

S è il termine che esprime eventuali sorgenti o perdite addizionali di energia (forzante da vento, attrito al fondo, interazione non lineare delle onde).

2.1.3. Il trasporto solido ed evoluzione dei fondali

Il modulo idrodinamico Delft3D-FLOW implementa al suo interno anche delle routine per il calcolo trasporto solido e l'evoluzione morfologica dei fondali.

Il modello matematico tiene in considerazione due diverse modalità di trasporto solido; (il trasporto di fondo ed il trasporto di sedimenti in sospensione) e distingue due diverse tipologie di sedimenti, i sedimenti fini (fanghi, limi e argille) e le sabbie caratterizzate da una pezzatura più grossolana.

Per ciascuna delle due tipologie di sedimenti considerate sono implementate delle specifiche routine numeriche che schematizzano i processi fisici di erosione, deposizione e trasporto e le eventuali iterazioni tra le diverse frazioni che compongono il fuso granulometrico.

Nel modello è possibile considerare una composizione variabile del sedimenti sul fondo, distinguendo fino a 50 diverse frazioni di sedimenti di tipo coesivo e non censivo.

Il trasporto di solidi in sospensione

Il trasporto tri dimensionale di solidi in sospensione è calcolato sulla base della equazione di avvezione-diffusione (bilancio di massa) riportata di seguito:

$$\frac{\partial c^{(l)}}{\partial t}+\frac{\partial uc^{(l)}}{\partial x}+\frac{\partial vc^{(l)}}{\partial y}+\frac{\partial\left(w+w_s^{(wl)}\right)c^{(l)}}{\partial z}-\frac{\partial\left(\varepsilon_{s,x}^{(l)}\frac{\partial c^{(l)}}{\partial x}\right)}{\partial x}-\frac{\partial\left(\varepsilon_{s,y}^{(l)}\frac{\partial c^{(l)}}{\partial y}\right)}{\partial y}-\frac{\partial\left(\varepsilon_{s,z}^{(l)}\frac{\partial c^{(l)}}{\partial z}\right)}{\partial z}=0$$

In cui:

$c^{(l)}$	concentrazione in [kg/m³] della frazione di sedimento (l)
u,v,w	componenti della velocità nelle tre direzioni spaziali [m/s]
$\varepsilon_{s,x}^{(l)}$	eddy diffusivity della frazione di sedimento (l) [m²/s]
$w_s^{(wl)}$	velocità di sedimentazione della frazione di sedimento (l) [m/s]

Le velocità delle correnti e di valori dei coefficienti di dispersione idrodinamica (“eddy diffusivity”) sono ricavati direttamente dai risultati idrodinamici.

Da un punto di vista puramente numerico il trasporto di massa è trattato esattamente nello stesso modo in cui sono trattate le altre sostanze conservative come i traccianti e la salinità. Vi sono comunque delle importanti differenze tra i sedimenti e le altre sostanze sopra menzionate che rivestono un’importanza fondamentale quali, ad esempio lo scambio di sedimenti tra il fondo e la colonna d’acqua e la definizione della velocità di sedimentazione per effetto della forza di gravità, le turbolenze idrodinamiche e le iterazioni tra sedimenti in sospensione.

Inoltre, il calcolo del flusso di sedimenti da e verso i fondali determina anche una variazione delle quote batimetriche che a sua volta induce un cambiamento nell’idrodinamica.

Le formulazioni dei processi di sedimentazione, erosione, sollevamento e deposizione sono specifiche in funzione del tipo di sedimento considerato (sedimenti fini o sabbie).

Infine la presenza di differenti frazioni sedimenti nella colonna d’acqua risulta di fondamentale importanza in questi processi; ad esempio le iterazioni tra sedimenti di diversa natura e tipologia hanno delle implicazioni dirette nel calcolo della velocità di sedimentazione (“hindered settling velocity”) di ciascuna singola frazione e quindi della miscela complessiva.

Il trasporto dispersivo

La dispersione dei sedimenti in sospensione nella colonna d’acqua è direttamente legato alla definizione dei coefficienti di dispersione idrodinamica turbolenta (“eddy diffusivities”) $\varepsilon_s^{(l)}$ nelle tre direzioni spaziali.

Questi coefficienti sono legati alle caratteristiche locali delle correnti, alla presenza dei sedimenti in sospensione ed alla intensità moto ondoso. Il calcolo dei coefficienti di dispersione è effettuato sulla base di quattro schemi numerici per il calcolo della turbolenza (“turbulence closure models") con diverso grado di complessità.

I modelli di chiusura della turbolenza differiscono nel modo di trattare le grandezze relative all’energia cinetica turbolenta κ, i termini dissipativi ε e la lunghezza di mescolamento L.

L'output di ciascun modello di turbolenza è il calcolo dei coefficienti di viscosità alle interfacce di ogni layer. Sulla base di questi valori viene ,infine, effettuato anche il calcolo del coefficiente i dispersione verticale.

Gli effetti del moto ondoso

La presenza di un moto ondoso lungo un litorale caratterizzato da bassi fondali risulta di particolare rilevanza sia in riferimento all'idrodinamica che ai processi di trasporto ed erosine dei fondali.
I principali effetti indotti al moto ondoso sono:

– L'incremento dei processi di rimescolamento lungo la verticale causati dalle turbolenze idrodinamiche in superficie, dal frangimento delle onde e dalla dissipazione di energia nello strato adiacente il fondo;
– La generazione di trasporto di massa netto in direzione ortogonale alla spiaggia nella fase di frangimento;
– Lo sviluppo di correnti litoranee in direzione parallela alla spiaggia per effetto della variazione del flusso di quantità di moto ("radiation stress") in funzione dell'angolo di attacco del fronte d'onda;
– Aumento degli sforzi tangenziali al fondo con un conseguente incremento dell'erosione dei fondali.

Gli sforzi generati dalle onde sono quindi calcolati sulla base gradienti dello radiation stress secondo la formula:

$$F_i = \frac{\partial S_{i,j}}{\partial x_j}$$

In cui:

$S_{i,j}$ è il tensore del radiation stress calcolato sulla base dell'energia del moto ondoso, delle velocità di fase e di gruppo, la lunghezza d'onda ed il periodo

Gli sforzi trasmessi lungo le due componenti spaziali x e y risultano quindi:

$$F_x = -\frac{\partial S_{x,x}}{\partial x_j} - \frac{\partial S_{y,x}}{\partial y} = D\frac{k_x}{\omega}$$
$$F_y = -\frac{\partial S_{x,y}}{\partial x} - \frac{\partial S_{y,y}}{\partial y} = D\frac{k_y}{\omega}$$

In cui:

F_x e F_y sono gli sforzi indotti dal moto ondoso mediato sulla colonna d'acqua
S il tensore dello radiation stress
D il coefficiente di dissipazione

Evoluzione morfologica del fondale

Nel modello DELFT3D-FLOW è anche implementate delle routine di calcolo per l'aggiornamento continuo ed automatico delle quote dei fondali ad ogni istante temporale di calcolo. Le variazioni delle quote dei fondali è calcolata sulla base dell'equazione di bilancio di massa per ciascun elemento del dominio di calcolo in cui sono considerati i termini relativi alla deposizione, sedimentazione e trasporto di sedimenti. L'entità della variazione batimetrica è calcolata utilizzando come riferimento la densità del materiale di ciascuna frazione di sedimento (dry bulk density).

Nel codice di calcolo sono anche implementate una serie di funzionalità utili per il controllo dei processi morfologici di lunga durata. Tra questi i più importanti sono il "morphological delay", ovvero, un parametro che definisce la durata di un periodo di transizione in cui non sono attivati morfologici (solitamente necessario per l'avviamento del sistema), ed il "morphological factor", ovvero, un fattore di accelerazione dei processi morfologici, di fondamentale importanza nella valutazione dei processi di lunga durata.

L'aggiornamento delle quote batimetriche è calcolato utilizzando la seguente formulazione matematica:

$$\Delta_{SED}^{(m,n)} = \frac{\Delta t \cdot f_{MORFAC}}{A^{(m,n)}} \left(S_{b,uu}^{(m-1,n)} \cdot \Delta y^{(m-1,n)} - S_{b,uu}^{(m,n)} \cdot \Delta y^{(m,n)} + S_{b,vv}^{(m,n-1)} \cdot \Delta x^{(m,n-1)} - S_{b,vv}^{(m,n)} \cdot \Delta x^{(m,n)} \right)$$

in cui:

$\Delta_{SED}^{(m,n)}$	la variazione della quantità di sedimenti disponibili sul fondo nella cella di calcolo *(m,n)* [kg/m²]
Δt	tempo di calcolo [s]
f_{MORFAC}	fattore di accelerazione morfologica
$A^{(m,n)}$	area della cella di calcolo (m,n) [m²]
$S_{b,uu}^{(m,n)}$	trasporto di massa sul fondo nella direzione u nella cella di calcolo *(m,n)* [kg/ms]
$\Delta x^{(m,n)}$	larghezza della cella di calcolo *(m,n)* nella direzione *x*
$\Delta y^{(m,n)}$	larghezza della cella di calcolo *(m,n)* nella direzione *y*

Il calcolo viene ripetuto per ciascuna frazione di sedimento sabbiosa e per il trasporto di fondo. La valutazione della variazione complessiva del fondale è infine ottenuta dalla sommatoria dei singoli contributi di ogni componente.

2.2. Definizione del dominio di calcolo

La predisposizione del modello matematico idrodinamico richiede, come attività preliminare e indispensabile, la definizione della maglia di calcolo, rispetto alla quale tutte le grandezze di interesse verranno poi definite.

Nella Figura 2-1 viene riportata la griglia a maglia curvilinea definita per schematizzare la zona della baia di Vado Ligure.

Come si può notare la maglia è a risoluzione variabile, con una grande densità di maglie nella zona litoranea posta a nord della piattaforma del porto (Figura 3 2), dove le informazioni devono essere maggiormente dettagliate al fine di poter rappresentare in modo adeguato i fenomeni di trasporto, e si vanno via via diradando verso il mare aperto dove la morfologia della zona è meno variabile e, quindi, viene richiesta una minore precisione locale nella sua descrizione.

La dimensione delle maglie di calcolo varia da circa 10 m nelle aree di maggiore dettaglio fino ad oltre 100m nelle aree di mare aperto.

La batimetria associata a tale maglia in riferimento alla configurazione approvata di Progetto Esecutivo è riportata in Figura 2-2.

I dati batimetrici, interpolati sulla maglia di calcolo, sono stati desunti dalle carte nautiche a diverso dettaglio, integrate, nella zona del porto, dai rilievi batimetrici più recenti fatti condurre dall'Autorità Portuale di Savona nel Febbraio 2006, ad Agosto 2008 ed ad aprile 2010. Ulteriori informazioni per la schematizzazione delle opere portuali nelle diverse configurazioni di progetto e nelle fasi di costruzione sono state derivate dai disegni di progetto.

In particolare, la schematizzazione utilizzata per la modellazione idrodinamica e per la propagazione del moto ondoso nell'ambito di questo studio è stata predisposta e verificata sulla base dei risultati dello studio eseguito con il modello fisico sviluppato presso l'Istituto HR Wallingford, al fine di riprodurre in modo realistico gli effetti dissipativi e di frangimento delle onde che avvengono sotto la piattaforma per la presenza dei pali di sostegno e dei cassoni di imbasamento e conterminazione.

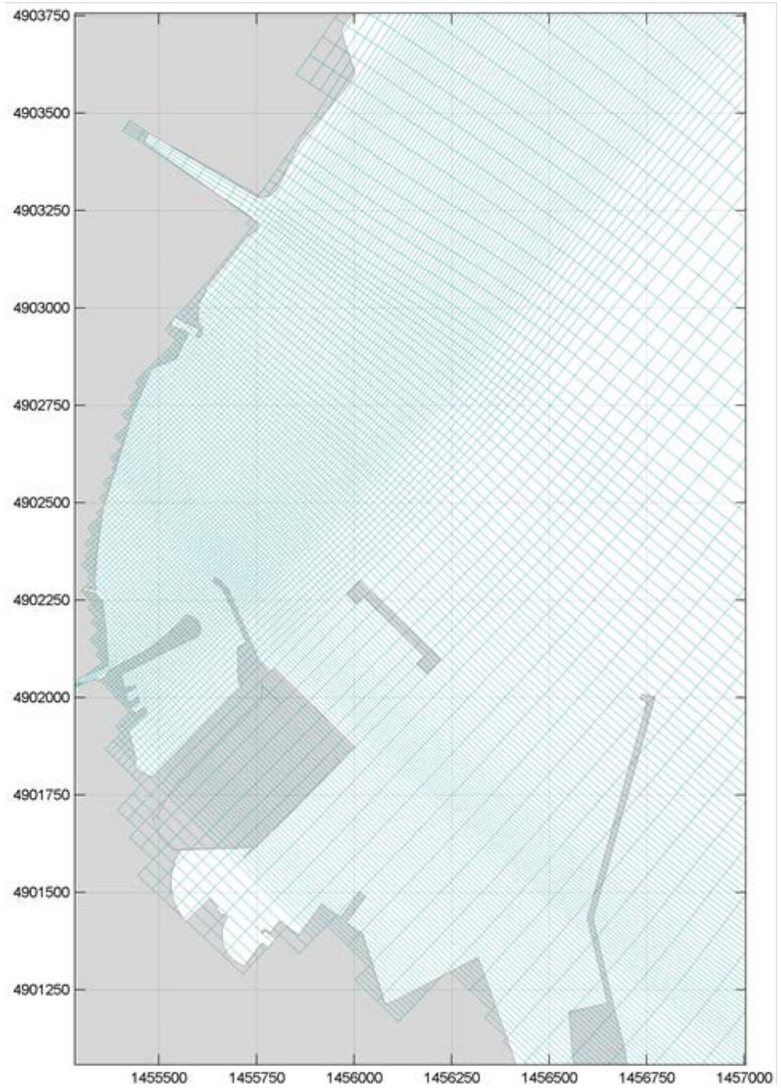


FIGURA 2-1 – GRIGLIA DI CALCOLO IMPIEGATA PER LO STUDIO DELLA CIRCOLAZIONE COSTIERA E DEL TRASPORTO SOLIDO

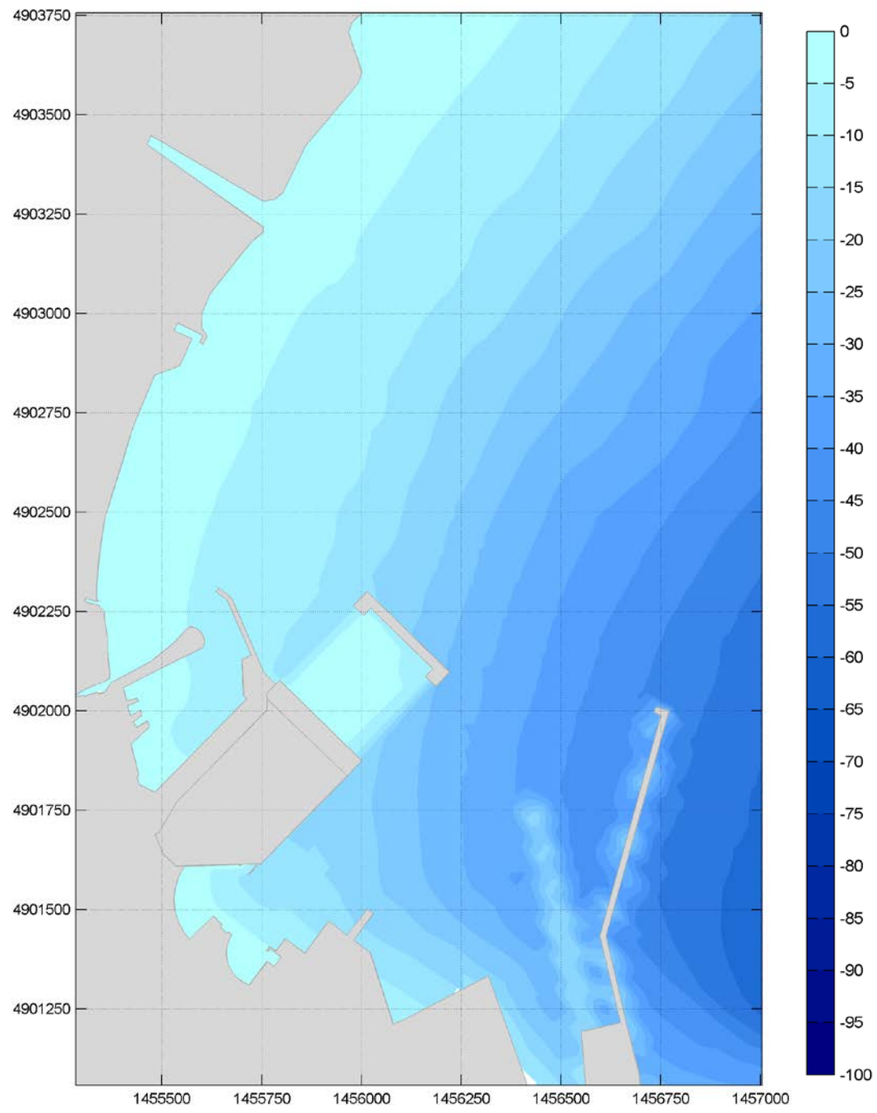


FIGURA 2-2 – SCHEMATIZZAZIONE BATIMETRICA(M SMM) DELLA BAIA DI VADO LIGURE NELLA CONFIGURAZIONE DI RIFERIMENTO DI PROGETTO ESECUTIVO

2.3. Dati di input e condizioni al contorno

Le condizioni assegnate in input al modello matematico vengono di seguito esplicitate e successivamente sintetizzate nella Tabella 2-1.

Condizioni ondametriche imposte nel modello

Le condizioni ondametriche impiegate nello studio si riferiscono alle mareggiate caratteristiche definite in precedenza con riferimento al clima nel punto P (si rimanda a quanto descritto nel precedente paragrafo 1.2.5).

Condizioni anemometriche imposte nel modello

Le condizioni anemometriche, imposte come condizione di input nel modello idrodinamico, sono state individuate ricavando per ciascuna delle mareggiate analizzate una condizione anemometrica congrua con i valori di altezza d'onda e periodo di picco.

In particolare, per la stima del vento congruo relativo a ciascuna mareggiata è stata utilizzata la correlazione proposta da Svedrup, Munk e Bertschneider (nota come "metodo SMB") che, nell'ipotesi di condizione di mare completamente sviluppato, associa i parametri della mareggiata (H_S,T_P) alla velocità del vento (U_A): $U_A = H_S^2 \times 929.5/T_p^3$.

Le condizioni anemometriche sono state individuate considerando la velocità del vento a 10 m dal suolo (U), dove: $U=U_A^{(1/1.23)}/0.71$.

La direzione di provenienza del vento è stata assegnata pari quella di provenienza delle mareggiate al largo.

Condizioni di piena del Torrente Segno

Come anticipato, al fine di analizzare la dinamica dei sedimenti in uscita dal Torrente Segno sono stati analizzati alcuni scenari di eventi ondosi concomitanti con un evento di piena del torrente.

Nel dettaglio, è stato considerato un evento di piena definito da un idrogramma di piena ordinaria caratterizzato da una portata massima pari a circa 60 m^3/s (vedi Figura 2-3). Tale portata (cfr. portata "indice", Relazione idraulica del T. Segno, Giugno 2014) è, con buona approssimazione, la portata significativa in quanto in grado di riprodurre gli effetti morfodinamici degli eventi (idrogramma) di piena che, nel tempo, hanno condotto all'attuale configurazione del fondo alveo.

L'evento di piena è caratterizzato da una frequenza di accadimento piuttosto limitato, conseguentemente si è scelto di associare tale evento alle condizioni di moto ondoso (tra quelle simulate) che più probabilmente si possono verificare in concomitanza con la piena; si è quindi scelto di associare l'evento di piena alle mareggiate caratteristiche con frequenza media annua pari a 5 giorni/anno.

È stato inoltre possibile stimare la portata solida e la quantità di sedimenti che possono essere mobilitati e trasportati a mare da tale evento di piena: 400 m^3**.** Tale valore è stato stimato considerando gli effetti dei recenti incendi che hanno interessato alcune aree del bacino. Tale quantità di sedimenti risulta comunque solo parzialmente di interesse per l'analisi del trasporto solido litoraneo in quanto solo i sedimenti più fini sono in grado di essere mobilitati dalla dinamica litoranea. Sulla base delle analisi granulometriche si è, infatti, osservato che solo il 25% del materiale risulta essere di dimensione inferiore ai 2 mm.

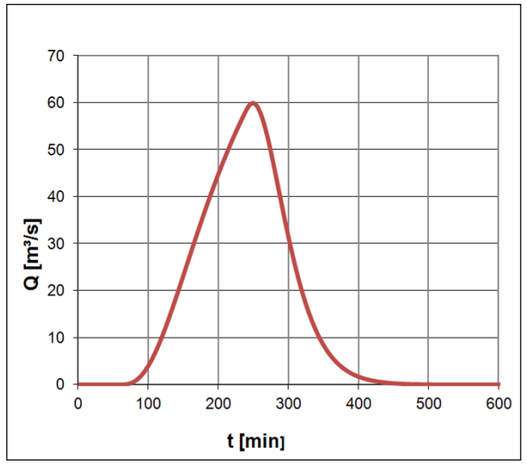


FIGURA 2-3 – IDROGRAMMA DI PIENA DELLA PORTATA "INDICE"

Dati sedimentologici

Ai fini dello studio della circolazione litoranea e del trasporto solido dei sedimenti che costituiscono la spiaggia sommersa sono state fornite in input al modello le caratteristiche granulometriche ricavate sulla base dell'analisi delle curve granulometriche dei campioni prelevati sulla spiaggia sommersa (cfr precedente paragrafo 1.3.2). Nel caso specifico si è ottenuto un valore medio del D50 (diametro medio dei grani) pari a 0.20 mm (Tabella 1-4).

In definitiva sono state individuate 6 condizioni di input per lo studio su modello, costituite da 3 mareggiate caratterizzate da una frequenza pari a 1 giorno nell'anno medio e da 3 mareggiate caratterizzate da una frequenza pari a 5 giorni concomitanti a un evento di piena. Di seguito nella Tabella 2-1 si riportano sinteticamente le caratteristiche dei 6 test individuati.

TABELLA 2-1 – CONDIZIONI DI INPUT IMPOSTE NEI MODELLI

				CARATTERISTICHE NEL PUNTO P			**VENTO**	
TEST	**Mareggiate**	**Freq. (gg/anno)**	**T.Segno**	**H_S (m)**	**T_P (s)**	**Dir (°N)**	**Velocità (m/s)**	**Dir (°N)**
1	Levante	1	-	1.64	6.5	75	8.7	75
2	Scirocco	1	-	1.93	6.8	145	9.4	145
3	Mezzogiorno	1	-	2.22	7.8	185	11.8	195
4	Levante	5	piena	0.93	5.2	75	6.0	75
5	Scirocco	5	piena	1.17	5.6	145	6.8	145
6	Mezzogiorno	5	piena	1.61	6.8	185	9.5	195

3. MODELLO DI EVOLUZIONE MORFOLOGICA

Lo studio morfologico dell'evoluzione della Spiaggia di Vado Ligure (SV) è stato condotto mediante l'utilizzo dei codici di calcolo DELFT3D-WAVE (descritto al par. 2.1.2) e UNIBEST-CL+ (sviluppato da Deltares). Per la definizione del dominio di calcolo sono stati utilizzati come base i più recenti rilievi locali disponibili: rilievo di agosto 2008 che copre il tratto che va dal Porto di Vado fino al terrapieno del campo da calcio (fino a profondità maggiori di -55 m s.m.m.) e rilievo di aprile 2010 che copre il tratto di litorale compreso tra il pontile Esso e il pontile Chevron (fino a profondità comprese tra -6.5 e -9.0 m s.m.m.).

3.1. Taratura del modello di evoluzione morfologica

Inizialmente si è proceduto con una fase di taratura del modello e successivamente sono state eseguite le simulazioni previsionali dell'evoluzione della linea di riva a 10 anni (2014-2024), in relazione alle diverse configurazioni esaminate (quella di riferimento e quella della perizia di variante del progetto esecutivo) e ai diversi stati di riferimento.

La fase di taratura permette di adattare il modello matematico alla situazione del paraggio oggetto di studio (il modello, infatti, interpreta la realtà fisica in maniera semplificata), tenendo conto qualitativamente dei principali fenomeni che governano l'evoluzione morfologica della costa.

L'operazione di taratura consente, pertanto, di tenere conto in maniera implicita di tutti i fattori non direttamente esplicitabili sotto la forma di relazioni causa-effetto.

Ai fini della modellazione matematica, è stato individuato un dominio di calcolo idoneo per il sito in esame, schematizzando opportunamente (come in seguito specificato) le singolarità presenti.

Il codice di calcolo Delft3D-Wave impiegato per la propagazione del moto ondoso da un punto al largo (punto U.K.M.O.) sottocosta, al limite esterno della fascia attiva, è descritto nel paragrafo 2.1.2 mentre il codice di calcolo UNIBEST-CL+ è descritto nel successivo paragrafo 3.1.1.

3.1.1. Descrizione del codice di calcolo UNIBEST

Il modello matematico "UNIBEST" (***Uni***form ***Be***ach ***S***ediment ***T***ransport), sviluppato da Deltares, consente la simulazione e lo studio dei processi costieri longitudinali e trasversali e delle annesse variazioni morfologiche dei profili trasversali e della configurazione planimetrica della spiaggia.

In particolare, il modulo UNIBEST-CL+, impiegato per lo studio dell'evoluzione morfologica del litorale in oggetto, permette di calcolare le modificazioni subite dalla linea di riva in conseguenza a variazioni nello spazio o nel tempo del trasporto solido litoraneo indotto dall'azione del moto ondoso in direzione parallela alla linea di riva.

L'estensione costiera che può essere convenientemente modellata può variare da meno di un chilometro a qualche decina di chilometri, mentre gli intervalli di calcolo delle variazioni della posizione della linea di riva variano in genere da alcuni mesi alle decine di anni.

Il modulo di calcolo che determina lo spostamento della linea di riva in funzione del trasporto solido e della sua variazione nello spazio, è basato sulla teoria dei modelli a una linea: tale teoria assume che il profilo trasversale della spiaggia (in direzione quindi perpendicolare alla linea di riva) si mantenga costante nel tempo, traslando semplicemente verso il largo o verso terra (Figura 3-1).

In questo modo, l'evoluzione del profilo completo della spiaggia può essere descritta attraverso la traslazione orizzontale di un unico punto appartenente al profilo stesso.

Nelle suddette ipotesi, è quindi possibile descrivere l'evoluzione del litorale attraverso una unica linea: a tale scopo appare conveniente scegliere come riferimento la linea cui appartengono tutti i punti che si trovano alla quota del medio mare (cioè la linea di riva), che risulta sempre un indicatore di primaria importanza negli studi di idraulica marittima.

Una seconda ipotesi geometrica fondamentale assunta dal modello è che il trasporto solido indotto dal moto ondoso avvenga tra due quote fissate all'interno del profilo trasversale: si assume cioè che la zona "attiva" della spiaggia, ossia quella interessata dal trasporto solido longitudinale, e dalle modificazioni ad essa connesse, sia solamente quella compresa tra la massima quota D_B della spiaggia attiva emersa (di solito assunta pari alla quota di massima risalita) e la cosiddetta

"profondità di chiusura" D_C, al disotto della quale il fondale si mantiene sensibilmente costante nel tempo (nel medio termine). Questi ultimi valori sono determinabili in funzione delle caratteristiche del moto ondoso incidente.

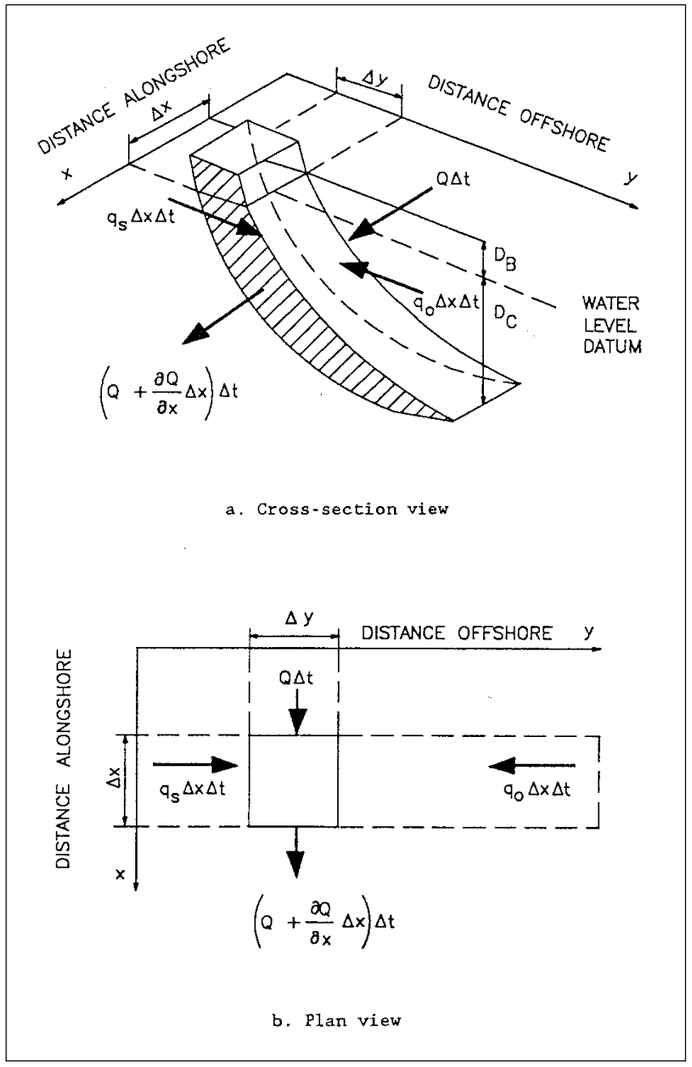


FIGURA 3-1 – SCHEMATIZZAZIONE DEL LITORALE

L'equazione di continuità dei sedimenti in una generica sezione, con riferimento al significato dei simboli indicato in Figura 3-1, può essere scritta nella forma seguente:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)}\left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q\right) = 0$$

dove Q rappresenta il trasporto solido longitudinale e q la quantità di materiale eventualmente apportato (ripascimenti o apporti fluviali) o asportato (dragaggi) dalla generica sezione.

Il modulo UNIBEST-CL+ si compone dei seguenti sottomoduli:

– modulo LT (Longshore Transport);
– modulo CL (CoastLine).

Il modulo LT consente di calcolare il trasporto solido longitudinale lungo una serie di profili trasversali distribuiti lungo il tratto di costa in esame. Il trasporto così calcolato viene successivamente fornito come input al modulo CL, impiegato per l'analisi dell'evoluzione della linea di costa, il quale consente di schematizzare anche eventuali opere rigide presenti lungo il litorale, quali pennelli, barriere parallele alla costa e protezioni di sponda oppure interventi morbidi quali by-pass o ripascimenti.
Nei paragrafi seguenti si riporta una breve descrizione dei due moduli sopra citati.

3.1.1.1.1 Modulo LT

Il modulo LT di UNIBEST-CL+ consente di calcolare le correnti longitudinali indotte dalla marea e dal moto ondoso ed il conseguente trasporto solido generato, in riferimento a diversi profili trasversali della spiaggia, assumendo che questa sia caratterizzata da una configurazione pressoché uniforme lungo la costa.

Il clima ondoso, schematizzato in modo probabilistico e fornito come condizione al contorno all'estremità lato mare di ciascun profilo, viene propagato verso costa mediante il modello ENDEC 1D (incluso nel modulo LT), che tiene conto dei principali processi di rifrazione lineare e della dissipazione non lineare indotta dal frangimento e dall'attrito sul fondo. Il modello consente di applicare qualunque clima di moto ondoso e regime di marea; ciascuna condizione ondosa fornita come input viene combinata con ciascuna delle condizioni di marea definite.

Il trasporto solido longitudinale e la distribuzione trasversale dello stesso possono essere valutati nel modulo LT in accordo a diverse formule di trasporto, che consentono quindi di operare un'analisi di sensibilità in riferimento alle specifiche condizioni locali.

Nel caso specifico, il trasporto solido longitudinale è stato computato mediante la seguente formulazione proposta da Van Rijn (2014):

$$Q_{t,mass} = 0.0006\, K_{swell}\, \rho_s\, (\tan\beta)^{0.4}\, (d_{50})^{-0.6} \left(H_{s,br}\right)^{2.6} V_{wave}$$

in cui

g	accelerazione di gravità [m/s^2]
$H_{s,br}$	altezza d'onda al frangimento [m]
Θ_{br}	angolo di incidenza del moto ondoso al frangimento rispetto alla normale alla linea di riva [°]
d_{50}	diametro medio dei sedimenti [m]
tanβ	pendenza del fondale [-]
V_{wave}	velocità della corrente longitudinale [m/s]
ρ_s	densità dei sedimenti [kg/m^3]
K_{swell}	fattore di swell [-]

La velocità della corrente longitudinale viene computata mediante la seguente relazione:

$$V_{wave} = 0.3\left(gH_{s,br}\right)^{0.5} \sin(2\theta_{br})$$

Il fattore di swell, dipendente dalla frequenza di occorrenza delle onde da swell all'interno del clima d'onda, è così definito:

$$K_{swell} = 1.5(p_{swell}/100) + 1(1-p_{swell}/100) = 0.015\,p_{swell} + (1-0.01\,p_{swell})$$

dove

p_{swell} percentuale di tempo caratterizzata dalla presenza di condizioni di swell [-]

L'effetto indotto dalla marea può essere incluso nel modello sostituendo V_{wave} con V_{total}. La velocità longitudinale della corrente risulta quindi espressa dalla seguente formulazione:

$$V_{total} = V_{wave} + 0.01\,p_1 V_1 + 0.01\,p_2 V_2$$

dove

V_i velocità media della marea in una determinata finestra temporale [m/s];

P_i percentuale di tempo caratterizzata da velocità Vi [-]

3.1.1.1.2 Modulo CL

Il modulo CL di UNIBEST-CL+ permette di calcolare le modificazioni subite dalla linea di riva per effetto dei gradienti di trasporto solido longitudinale lungo una costa che presenta una conformazione pressoché uniforme ed è basato sulla teoria dei modelli ad una linea. Come già descritto precedentemente, tale teoria assume che il profilo trasversale della spiaggia (in direzione quindi perpendicolare alla linea di riva) si mantenga costante nel tempo, traslando semplicemente verso il largo o verso terra. In questo modo, l'evoluzione del profilo completo della spiaggia può essere descritta attraverso la traslazione orizzontale di un unico punto appartenente al profilo stesso.

Il modello consente di imporre differenti condizioni iniziali e al contorno, permettendo quindi di rappresentare una varietà di situazioni costiere. Lungo il tratto di litorale oggetto di analisi è possibile schematizzare anche apporti o perdite di sedimenti, al fine di considerare l'eventuale apporto di sedimenti dai fiumi, la perdita di sedimenti verso il largo, il prelievo di materiale dalla spiaggia,…

E' inoltre possibile schematizzare e considerare l'effetto indotto da eventuali opere rigide presenti lungo il litorale, quali pennelli, barriere parallele alla costa e protezioni di sponda oppure interventi morbidi quali by-pass o ripascimenti.

3.1.2. Profondità di chiusura e altezza di swash

La profondità di chiusura rappresenta la profondità limite al di sotto della quale il profilo trasversale non subisce cambiamenti significativi, nell'intervallo di tempo per cui si esegue la simulazione. La valutazione corretta della profondità di chiusura per un dato sito è condotta sulla base dell'analisi di dati storici che documentino l'evoluzione nel tempo del profilo trasversale, in sezioni significative del sito in oggetto.

Qualora tali dati non siano disponibili, è possibile valutare la profondità tramite la relazione di Birkemeier (1985):

$$h_c = 1.75 \cdot H_{0,12} - 57.9 \cdot \frac{(H_{0,12})^2}{gT_s^2}$$

dove $H_{0,12}$ rappresenta il valore dell'altezza d'onda significativa superata in media per 12 ore all'anno e T_s è il periodo dell'onda $H_{0,12}$. Con riferimento al clima ondoso al largo riportato in Tabella 1-1, è stato possibile ricostruire la curva di durata e determinare il valore di $H_{0,12}$. In Figura 3-2 è rappresentata la curva di durata per il calcolo della $H_{0,12}$.

Sulla base della frequenza annua è stata valutata un'altezza d'onda $H_{0,12}$ pari a circa 3,2 m e la profondità di chiusura h_c è risultata di conseguenza pari a 4,5 m. La massima altezza di risalita dell'onda D_B è stata stimata mediante la seguente relazione proposta da Nielsen and Hanslow (1991):

$$R_{2\%} = 1.98 \cdot L_{zwm}$$

dove

$$L_{zwm} = 0.6\left(H_{0rms} L_0\right)^{0.5} \tan\beta_F \qquad \text{per } \tan\beta_F \geq 0.10$$

$$L_{zwm} = 0.05\left(H_{0rms} L_0\right)^{0.5} \qquad \text{per } \tan\beta_F < 0.10$$

e H_{0rms} = 0.706·Hs è il valore quadratico medio delle altezze d'onda al largo.

La massima altezza di risalita dell'onda DB è stata stimata in 1,5 m pertanto l'altezza complessiva della fascia attiva risulta di 6,0 m.

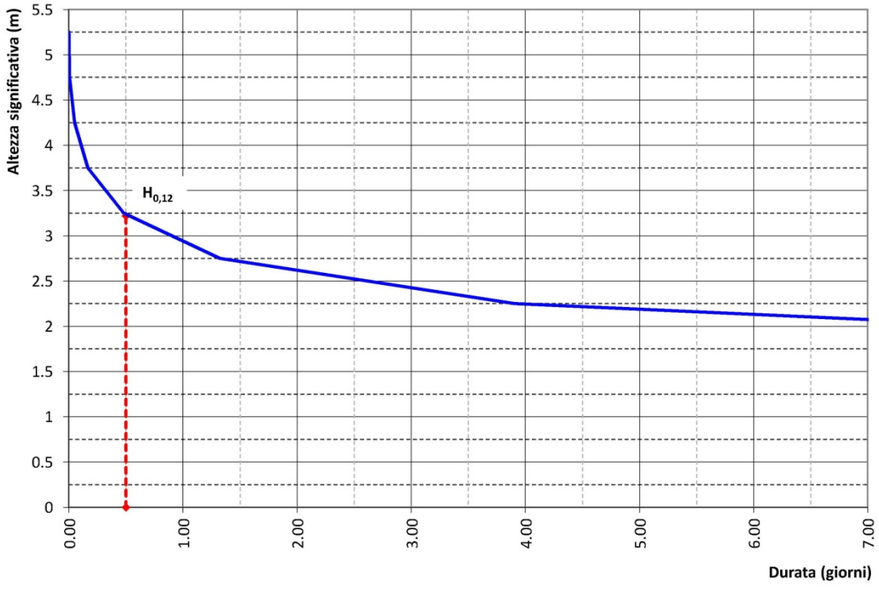


FIGURA 3-2 – INDIVIDUAZIONE DI $H_{0,12}$ – CURVA DI DURATA RELATIVA AL PUNTO U.K.M.O.

3.1.3. Propagazione del moto ondoso sottocosta

La fase iniziale della taratura del modello di evoluzione morfologica è consistita nel trasferimento sottocosta, al limite esterno della fascia attiva, delle caratteristiche del clima ondoso note in un punto al largo (punto U.K.M.O.).

La propagazione del moto ondoso sottocosta è stata eseguita mediante il codice di calcolo DELFT3D-WAVE.

E' stata individuata una serie di stazioni (in pratica una serie di boe virtuali) poste lungo la costa in corrispondenza della batimetrica –4,5 m s.m.m.; tali stazioni sono state ritenute significative per rappresentare le differenti condizioni di moto ondoso lungo il litorale (Figura 3-3).

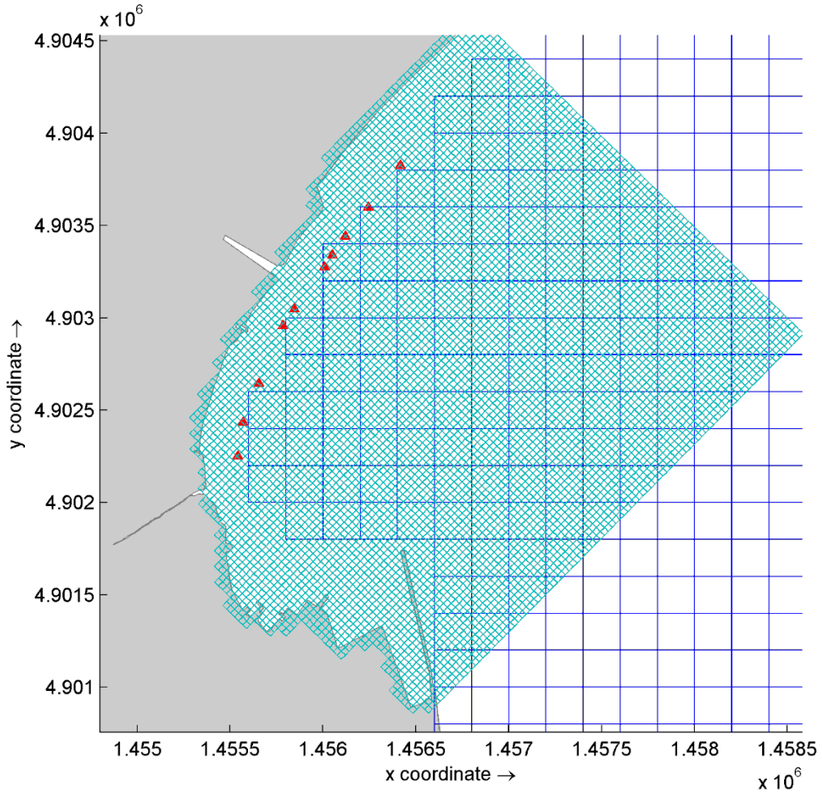


FIGURA 3-3 – SIMULAZIONE DI TARATURA – UBICAZIONE DELLE BOE VIRTUALI (STAZIONI) POSTE ALLA PROFONDITÀ DI –4,5 M S.M.M.

Per procedere ad un'analisi modellistica del moto ondoso è stato dapprima individuato il cosiddetto "Dominio di Calcolo", cioè l'area in cui si intende

studiare la propagazione del moto ondoso. Il suddetto dominio di calcolo è stato quindi schematizzato da due diverse griglie di calcolo a maglia quadrata: una griglia regionale avente lato di 200 m che copre l'intero dominio di calcolo (Figura 3-4) e una griglia di dettaglio che si innesta sulla griglia regionale, con lato di 30 m (Figura 3-5), che copre un'area limitata alla zona di interesse dello studio.

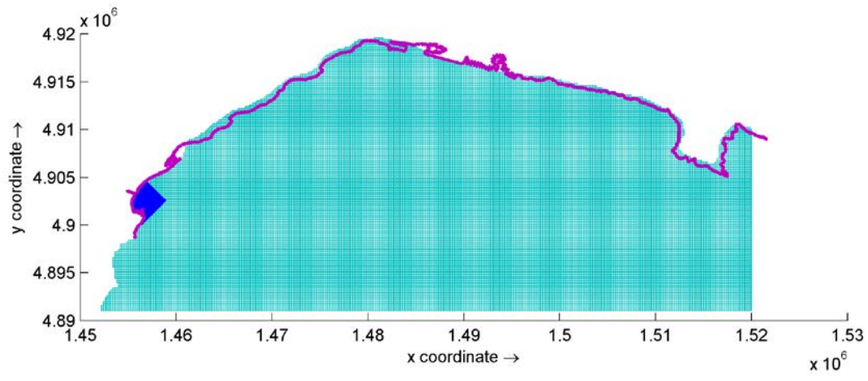


FIGURA 3-4 – GRIGLIA REGIONALE E GRIGLIA DI DETTAGLIO USATE NEL MODELLO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE

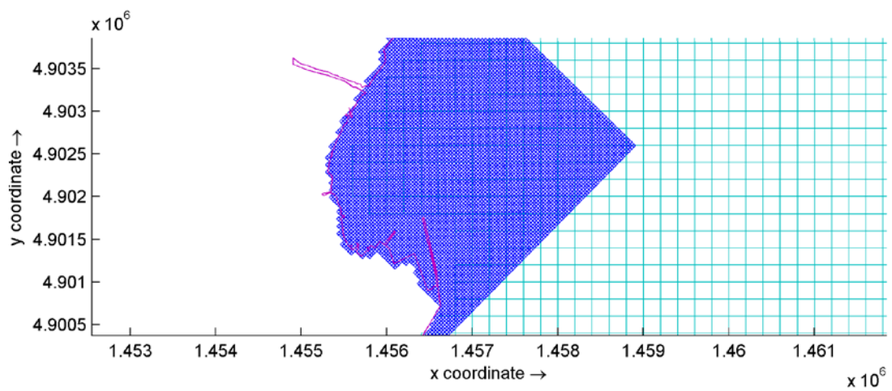


FIGURA 3-5 – GRIGLIA DI DETTAGLIO USATA NEL MODELLO DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE

La batimetria del modello è stata definita con riferimento alle stesse griglie utilizzate per la definizione del dominio fisico. I dati batimetrici, interpolati sulle due griglie di calcolo, sono stati desunti da carte nautiche a diverso dettaglio integrate, nella zona del porto, dai rilievi batimetrici più recenti fatti condurre dall'Autorità Portuale di Savona nel Febbraio 2006, nell'Agosto 2008 e nell'Aprile 2010.

Le batimetrie utilizzate per il modello regionale e per il modello di dettaglio sono presentate rispettivamente in Figura 3-6 e Figura 3-7. Si fa notare come nel modello SWAN le celle sommerse presentino valori di quota del fondale positivi mentre le celle emerse presentino quote negative.

Per distinguere la parte sommersa dalla parte emersa del dominio è stato introdotto un "landboundary" (linea viola in Figura 3-6 e Figura 3-7) che rappresenta il limite della terraferma come indicato nelle carte nautiche e, localmente, estratto dal recente sondaggio del 2010. Come livello per la definizione delle terre emerse si è scelto di prendere il l.m.m..

Come si osserva dalle Figura 3-6 e Figura 3-7, i fondali sul boundary sud del modello hanno profondità estremamente elevate (fino a -1.000 m s.l.m.m.) che vanno riducendosi da sud verso nord fino a raggiungere valori attorno ai -30 - -40 m.s.l.m.m in prossimità della diga foranea esistente.

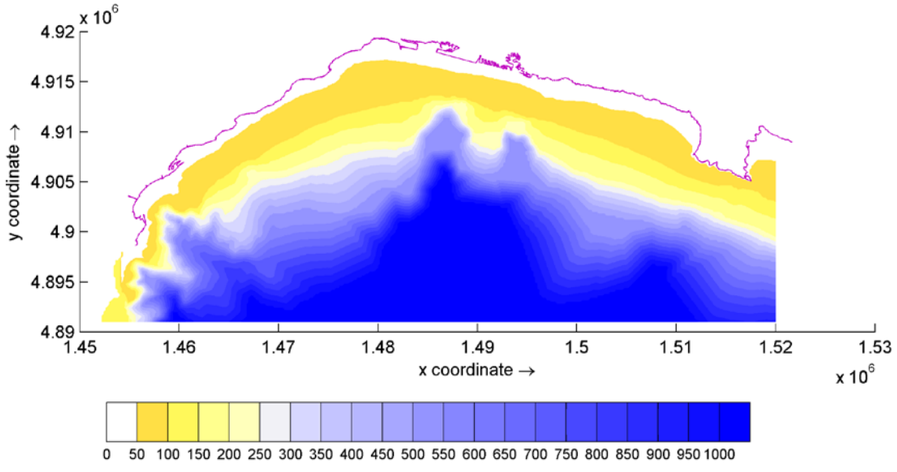


FIGURA 3-6 – BATIMETRIA RICOSTRUITA SULLA GRIGLIA DI CALCOLO REGIONALE

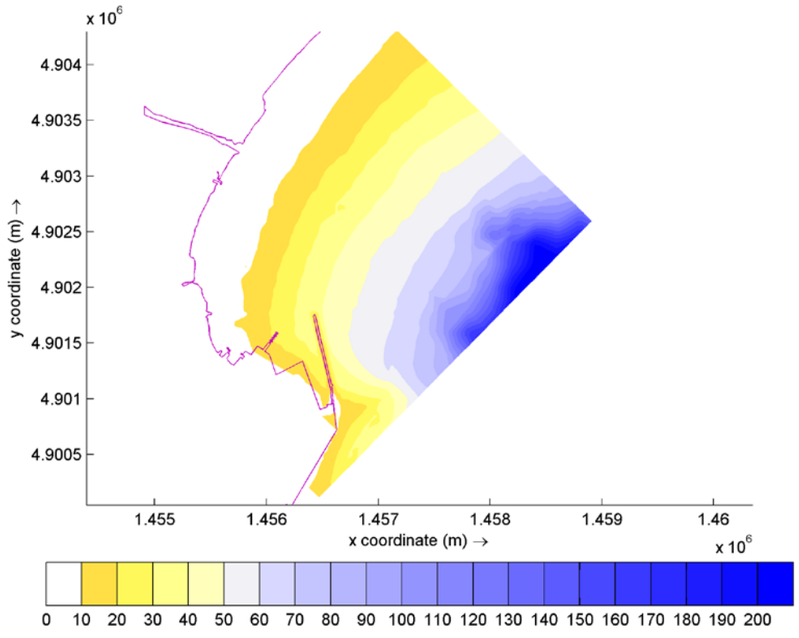
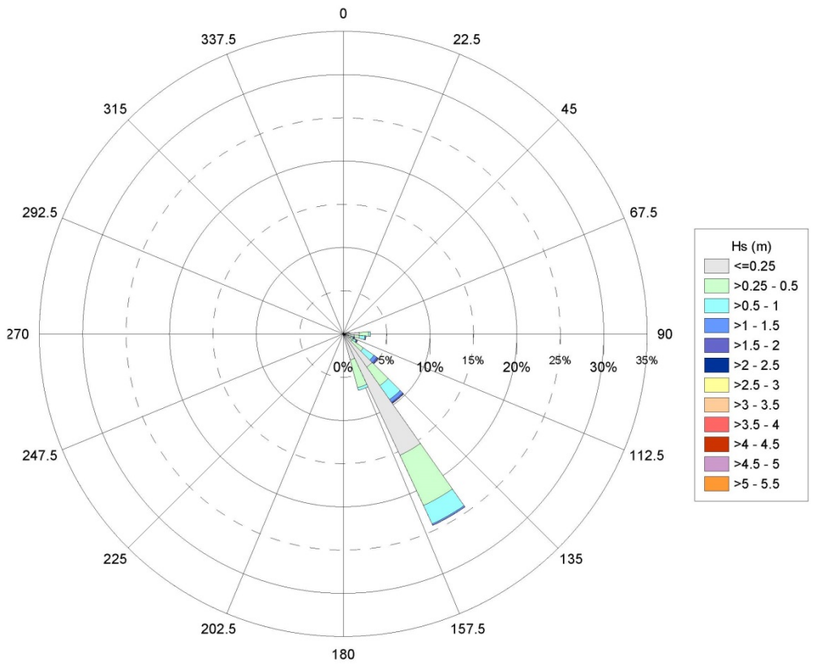


FIGURA 3-7 – BATIMETRIA RICOSTRUITA SULLA GRIGLIA DI CALCOLO DI DETTAGLIO

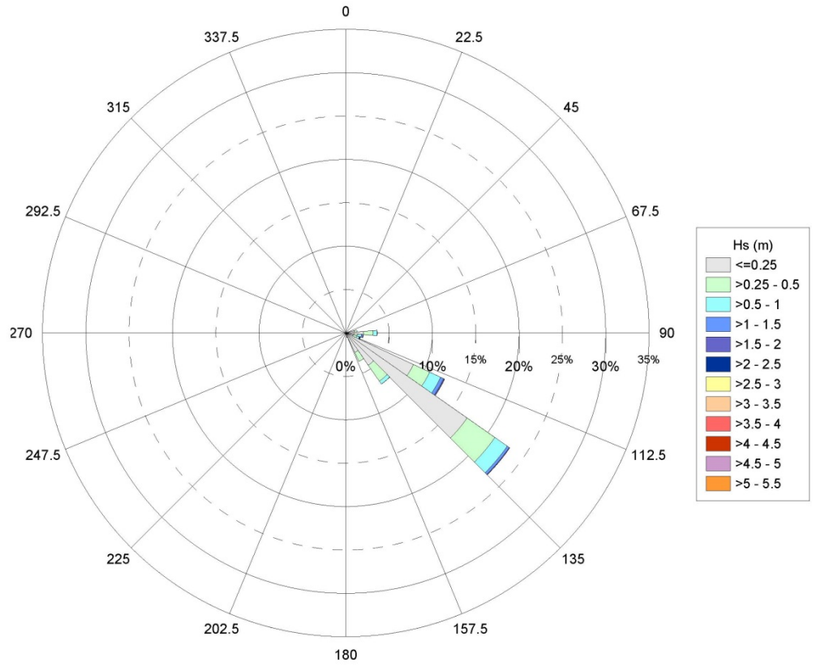
Il clima ondoso ricavato in corrispondenza delle boe virtuali ubicate alla –4,5 m s.m.m. (a titolo esemplificativo si riportano nelle Figura 3-8÷Figura 3-10 i climi ondosi ottenuti nei punti sottocosta 2, 7 e 10, collocati rispettivamente nel tratto Nord, centrale e Sud del litorale) è stato schematizzato in modo probabilistico e fornito come input nel modulo LT di UNIBEST-CL+, all'estremità lato mare di ciascun profilo.

Sostanzialmente, a partire da ciascun clima ondoso ricavato in corrispondenza delle boe virtuali, è stata selezionata una sequenza di eventi di moto ondoso, ciascuno caratterizzato da altezza d'onda significativa, periodo, direzione media di provenienza e durata, tale per cui l'andamento globale del clima ottenibile dalla sequenza ricostruita rappresenta efficacemente il clima vero. Tali sequenze di moto ondoso sono state successivamente propagate verso costa dal modello ENDEC 1D (incluso nel modulo LT), che tiene conto dei principali processi di rifrazione lineare e della dissipazione non lineare indotta dal frangimento e dall'attrito sul fondo.



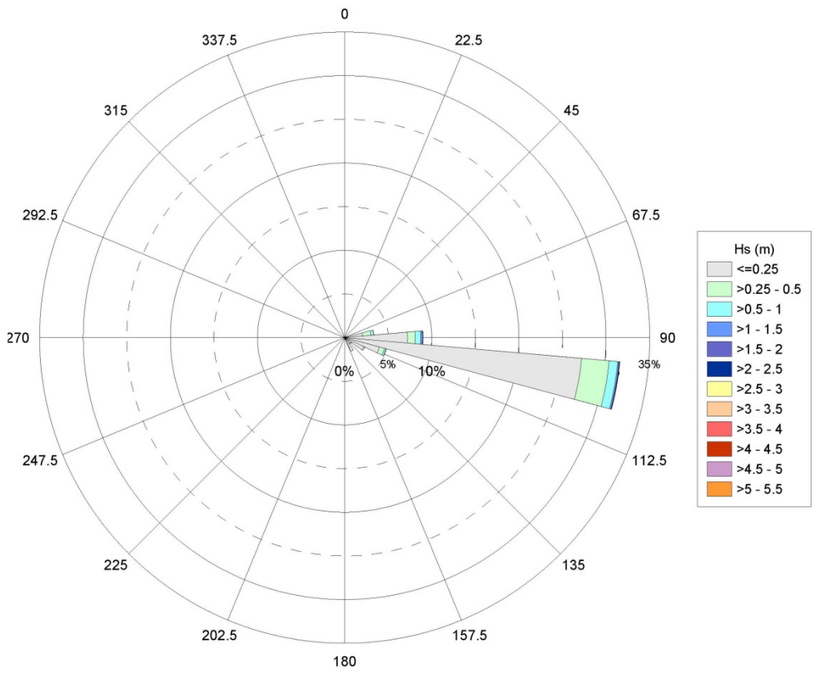
Hs (m)	≥ 0	≥ 0.25	≥ 0.5	≥ 1.0	≥ 1.5	≥ 2.0	≥ 2.5	≥ 3.0	≥ 3.5	≥ 4.0	≥ 4.5	≥ 5.0	Tot.
DIREZIONE °N	< 0.25	< 0.5	< 1.0	< 1.5	< 2.0	< 2.5	< 3.0	< 3.5	< 4.0	< 4.5	< 5.0	< 5.5	
50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
80	0.6616	0.0811	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.74
90	1.8567	1.0654	0.1875	0.0054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.11
100	1.2637	0.6165	0.6129	0.1280	0.0126	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.63
110	0.6165	0.3389	0.2271	0.1190	0.0577	0.0126	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.37
120	0.8454	0.4272	0.3389	0.1046	0.0667	0.0144	0.0090	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.81
130	1.2258	1.5773	1.4800	0.4182	0.1749	0.0451	0.0036	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.92
140	4.6652	2.6301	1.9523	0.3984	0.1190	0.0451	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9.81
150	15.4631	6.4156	2.3543	0.1713	0.0162	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.42
160	3.1006	3.3115	0.3353	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.75
170	0.0000	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.06
180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
210	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
Tot.	29.70	16.53	7.49	1.34	0.45	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	55.64

FIGURA 3-8 – CLIMA ONDOSO NELLA BOA VIRTUALE 2



Hs (m)	≥ 0	≥ 0.25	≥ 0.5	≥ 1.0	≥ 1.5	≥ 2.0	≥ 2.5	≥ 3.0	≥ 3.5	≥ 4.0	≥ 4.5	≥ 5.0	Tot.
DIREZIONE °N	< 0.25	< 0.5	< 1.0	< 1.5	< 2.0	< 2.5	< 3.0	< 3.5	< 4.0	< 4.5	< 5.0	< 5.5	
50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
80	1.0257	0.2614	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.29
90	1.9811	1.1140	0.4777	0.0234	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.60
100	0.9482	0.3912	0.4380	0.1947	0.0433	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.02
110	0.8418	0.4344	0.2506	0.0739	0.0487	0.0234	0.0054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.68
120	7.7604	1.8099	1.2763	0.3605	0.1226	0.0162	0.0036	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.35
130	17.2405	4.0830	1.8513	0.2938	0.0685	0.0108	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	23.55
140	5.2024	2.1451	0.4435	0.0162	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.81
150	2.4877	1.3051	0.0036	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.80
160	0.4975	0.0613	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.56
170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
210	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
Tot.	37.99	11.61	4.74	0.96	0.28	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	55.64

FIGURA 3-9 – CLIMA ONDOSO NELLA BOA VIRTUALE 7



Hs (m) DIREZIONE °N	≥ 0 < 0.25	≥ 0.25 < 0.5	≥ 0.5 < 1.0	≥ 1.0 < 1.5	≥ 1.5 < 2.0	≥ 2.0 < 2.5	≥ 2.5 < 3.0	≥ 3.0 < 3.5	≥ 3.5 < 4.0	≥ 4.0 < 4.5	≥ 4.5 < 5.0	≥ 5.0 < 5.5	Tot.
50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
70	0.1857	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.19
80	2.0298	0.9879	0.3064	0.0306	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.35
90	7.1439	0.8725	0.6183	0.2235	0.0415	0.0126	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8.91
100	26.8144	3.0357	0.9302	0.1658	0.0433	0.0180	0.0108	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	31.02
110	4.6310	0.7571	0.2542	0.0379	0.0036	0.0000	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.69
120	2.1415	0.1262	0.0072	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.27
130	1.1537	0.0991	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.25
140	0.8508	0.0324	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.88
150	1.7197	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.72
160	0.2488	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.25
170	0.0991	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.10
180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
210	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
Tot.	47.02	5.91	2.12	0.46	0.09	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	55.64

FIGURA 3-10 – CLIMA ONDOSO NELLA BOA VIRTUALE 10

3.1.4. Premessa alla modellazione

I modelli matematici costituiscono un valido strumento per l'analisi e la previsione dell'evoluzione della morfologia costiera. Il principale vantaggio dei modelli matematici risiede nella possibilità, una volta implementati, di studiare in tempi ragionevolmente brevi diverse soluzioni progettuali ovvero l'effetto di forzanti di natura diversa (mareggiate eccezionali, variazioni del clima, ecc…).
La modellazione dell'evoluzione morfologica di un litorale coinvolge fenomeni di natura diversa quali il moto ondoso incidente il litorale stesso, la presenza di correnti costiere, il trasporto solido longitudinale (in direzione parallela alla linea di riva), il trasporto solido trasversale (perpendicolare alla linea di riva), l'influenza di strutture collocate all'interno della zona attiva della spiaggia (quella cioè interessata da fenomeni di migrazione dei sedimenti per azione del moto ondoso) e di eventuali interventi di dragaggio o ripascimento artificiale.

In primo luogo è fondamentale la determinazione delle forzanti del sistema, cioè del clima meteomarino locale. Sulla base di questi dati è possibile quindi valutare il trasporto solido nelle diverse direzioni nelle diverse celle che compongono il modello matematico. Una volta determinate le forzanti, si passa quindi alla valutazione del trasporto solido nelle diverse direzioni, valutazione che si basa su criteri semi-empirici che legano le caratteristiche del moto ondoso alla geometria della spiaggia ed alle caratteristiche dei sedimenti che la costituiscono.

Va quindi analizzata l'influenza delle strutture collocate all'interno della zona attiva, sia in termini di modificazione della propagazione locale del moto ondoso che di interazione con il regime di trasporto solido, cioè di valutazione della variazione indotta localmente sulle forzanti del sistema dalla presenza di opere e della capacità di queste ultime di intercettare, totalmente o in una parte da quantificare, il trasporto solido. Alla stregua delle opere in zona attiva vanno considerati gli interventi di dragaggio e ripascimento, che modificano localmente il campo di moto delle onde incidenti e alterano in alcune zone il budget di sedimenti passibile di migrazione per effetto delle forzanti già determinate.

3.1.5. Considerazioni preliminari e settaggio del modello UNIBEST-CL+

Il modello UNIBEST-CL+ è stato tarato con riferimento all'evoluzione del litorale avvenuta nel periodo compreso tra il 1993 e il 2014; la linea di riva relativa al 1993 è stata fornita dal Committente mentre quella del 2014 è stata desunte da immagini satellitari (cfr. paragrafo 1.3.1).

La fase di taratura del modello consiste sostanzialmente nel variare i parametri di calibrazione del codice di calcolo fino ad ottenere dal modello la ricostruzione più fedele possibile dell'evoluzione della linea di costa misurata nell'intervallo temporale 1993-2014.

Il tratto di costa oggetto di studio, compreso tra la spiaggia di Zinola (circa 500 m a Nord-Est del terrapieno del campo da calcio) e il pontile Esso, è stato schematizzato mediante 10 profili trasversali estesi fino alla profondità di -4,50 m s.m.m. (profondità di chiusura della spiaggia sommersa), la cui ubicazione è illustrata in Figura 3-11.

A titolo esemplificativo, in Figura 3-12 è riportata la schematizzazione adottata nel modulo LT di UNIBEST-CL+ per alcuni dei profili trasversali della costa.



FIGURA 3-11 – UBICAZIONE DEI PROFILI TRASVERSALI SCHEMATIZZATI NEL MODELLO UNIBEST

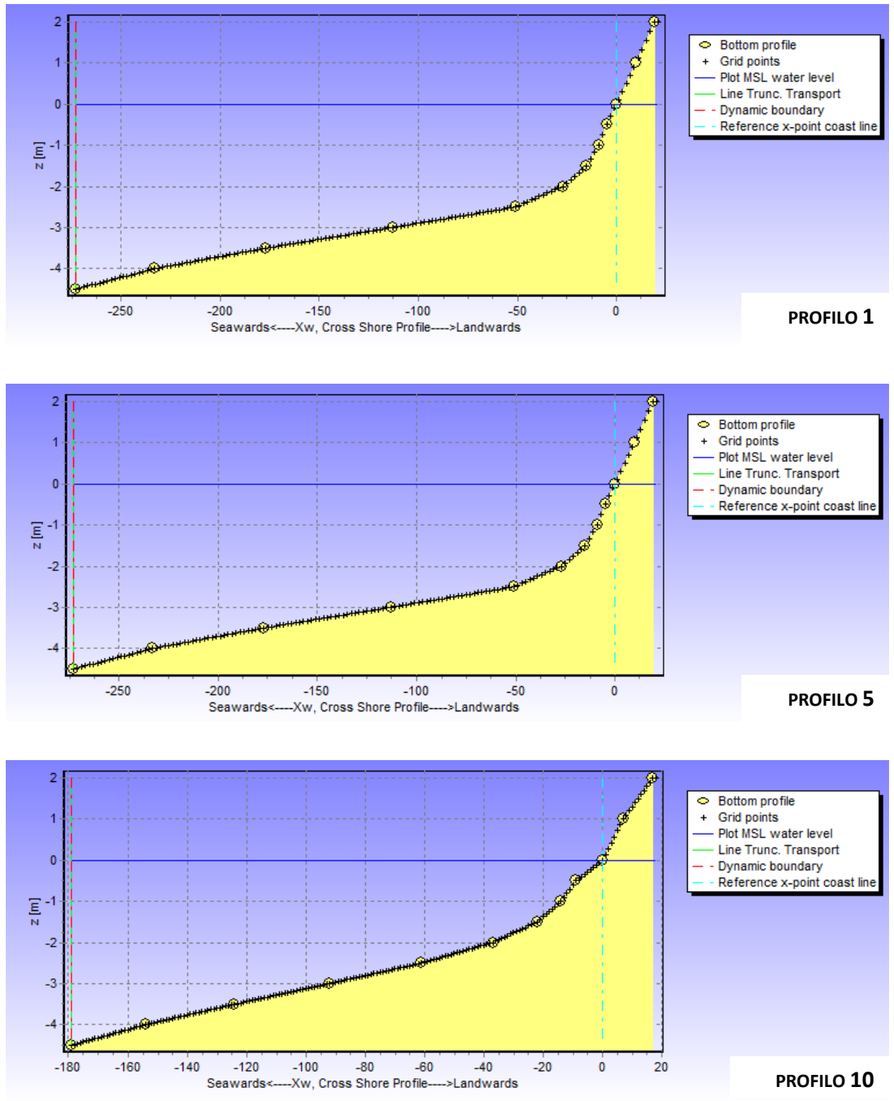


FIGURA 3-12 – ESEMPIO DI SCHEMATIZZAZIONE DI TRE PROFILI TRASVERSALI NEL MODELLO UNIBEST (PROFILI 1, 5 E 10)

L'estensione del dominio di calcolo è stata determinata in base alla conformazione del litorale e delle opere presenti, che ha consentito di porre gli estremi in corrispondenza di punti notevoli dove fissare univocamente le condizioni al contorno. L'estremo sinistro del dominio di calcolo è stato fissato in corrispondenza del litorale di Zinola, mentre l'estremo destro della griglia si trova in prossimità del pontile Esso.

In linea generale, relativamente alle opere presenti sul litorale e schematizzate nelle simulazioni, si fa presente che il porto di Vado e la piattaforma sono stati inseriti solamente nel modello di propagazione DELFT3D-WAVE. Per quanto riguarda il porto turistico, questo è stato inserito interamente nel modello DELFT3D-WAVE mentre nel modulo CL di UNIBEST-CL+ è stato rappresentato solamente il molo di sottoflutto. Il pennello in prossimità della foce del Segno, nelle configurazioni ove previsto, è stato schematizzato sia nel modello di propagazione DELFT3D-WAVE che nel modulo CL di UNIBEST-CL+.

Pertanto, nella simulazione di taratura si è provveduto ad inserire nel dominio DELFT3D-WAVE il porto di Vado nella configurazione attuale mentre nella griglia UNIBEST sono state opportunamente schematizzate le altre opere presenti nel periodo di taratura (1993-2014).

La linea di riva iniziale è quella del 1993; i sedimenti presenti all'interno della fascia attiva sono stati rappresentati con un valore del diametro mediano dei grani pari a 2 mm (valore rappresentativo dei campioni prelevati sia sulla battigia che sulla spiaggia sommersa, alla profondità di -2 m s.m.m.- cfr. precedente paragrafo 1.3.2).

Di seguito, procedendo da Nord verso Sud, si riporta una breve descrizione delle opere presenti lungo il litorale e rappresentate nel modello UNIBEST.
Il terrapieno esistente tra Villa Gavotti e il torrente Quiliano (terrapieno del campo da calcio) è stato rappresentato avanzando la linea inerodibile in

corrispondenza della scogliera radente. La foce del Quiliano è stata schematizzata con un pennello di lunghezza idonea e permeabilità nulla.
La zona del cantiere navale e il terrapieno adiacente sono stati schematizzati avanzando la linea inerodibile in corrispondenza della difesa radente presente lato mare e con un pennello che presenta permeabilità nulla.
Anche la scogliera a protezione del terrapieno dove è ubicato il campo da basket, poco più a Nord della foce del torrente Segno, è stata schematizzata avanzando la linea inerodibile.
Il pontile Tirreno Power e i pontili Vadoil e Esso (posti più a Sud in prossimità della foce del Segno), essendo su pali, non sono stati rappresentati nel modello in quanto completamente permeabili in relazione al flusso di sedimenti.

Per quanto riguarda i ripascimenti eseguiti sul litorale oggetto di studio nell'arco dell'ultimo ventennio (dal 1993 al 2014) si fa presente che non è stato possibile reperire un elenco completo di tutti gli interventi.
Pertanto, secondo le indicazioni fornite dal Committente, sono stati inseriti nel modello UNIBEST solamente due interventi:

– Ripascimento del 2005: versamento di 19'000 m^3 di materiale nel tratto di litorale a Nord-Est del terrapieno da calcio fino alla foce del torrente Letimbro, eseguito con sabbia e ghiaia proveniente dalle attività di scavo per la costruzione del complesso della Torre nella vecchia darsena del porto di Savona;
– Ripascimento di marzo-aprile 2009: versamento di 2'800 m^3 di materiale nella spiaggia a Nord-Est del terrapieno da calcio (per un tratto di circa 500 m), eseguito con ghiaia naturale proveniente da cava.

Di seguito, in Figura 3-13, si riporta la schematizzazione adottata nella simulazione di taratura per la linea di riva del 1993, le opere presenti lungo il litorale, i ripascimenti e gli apporti solidi dei torrenti.
Tutte le simulazioni condotte con UNIBEST, sia quella di taratura che quelle in cui sono state analizzate le varie configurazioni progettuali, sono state eseguite considerando l'immissione di sedimenti da parte del torrente Quiliano. L'immissione di sedimenti è stata schematizzata con un ripascimento localizzato in corrispondenza della foce, che è stato qualitativamente stimato in circa 2.000 m^3/anno.

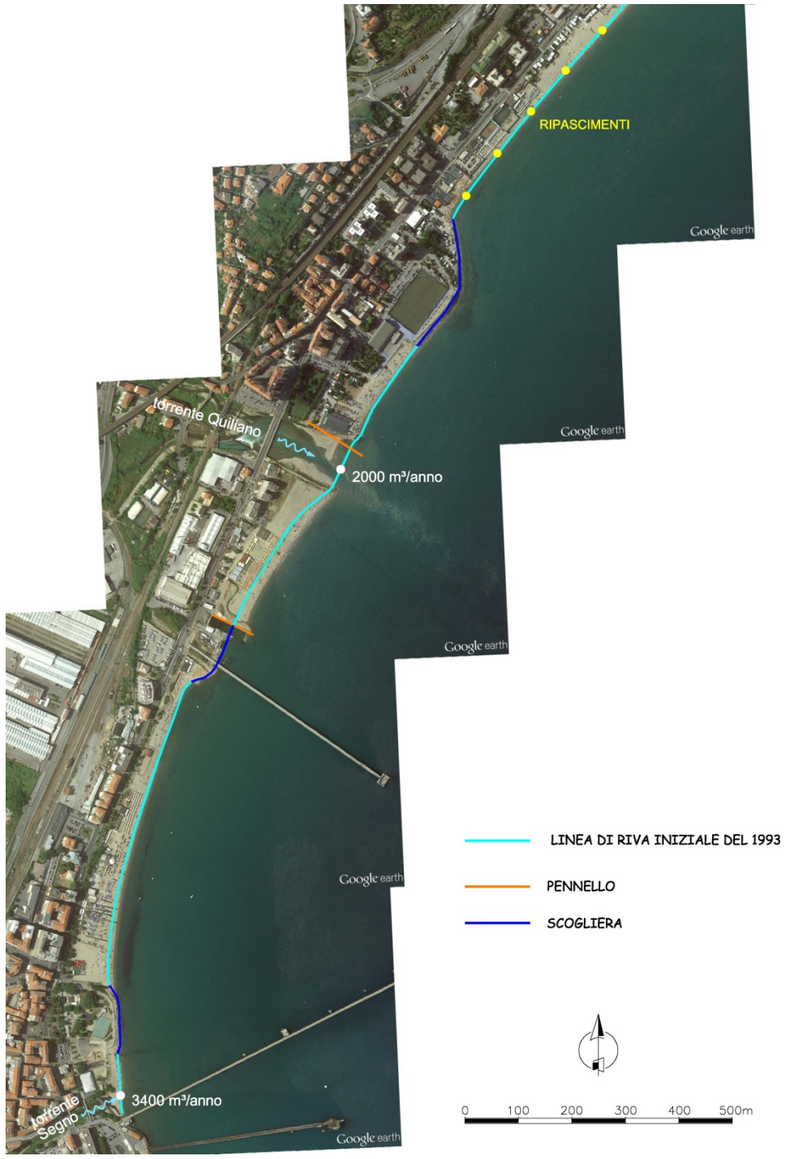


FIGURA 3-13 – SIMULAZIONE DI TARATURA 1993-2014 - SCHEMATIZZAZIONE LINEA DI RIVA E OPERE PRESENTI LUNGO IL LITORALE

Per quanto riguarda, invece, l'immissione di sedimenti da parte del torrente Segno, posto in corrispondenza dell'estremo destro del dominio di calcolo, nella fase di taratura è stata condotta un'analisi per valutare l'influenza dei sedimenti provenienti dal Segno sul trasporto solido locale. Il valore di portata solida del torrente è stato stimato sulla base dei risultati degli studi idraulici condotti sul Torrente Segno (cfr. precedente paragrafo 1.3.3).

Per la stima della portata solida del torrente Segno da inserire nella simulazione UNIBEST si è fatto riferimento al valore massimo del trasporto medio annuo in grado di essere generato dal torrente e di raggiungere la foce, pari appunto a circa 8600 m^3/anno (stima effettuata considerando gli effetti dei recenti incendi). Considerando che le simulazioni UNIBEST sono state condotte facendo riferimento alle caratteristiche sedimentologiche del materiale della spiaggia emersa (costituito da ghiaia medio-fine) e della spiaggia sommersa, alla profondità di -2 m s.m.m., sulla base della curva granulometrica del materiale prelevato alla foce del Segno è stata individuata la percentuale di sedimenti corrispondente alla granulometria considerata (Figura 3-14). Ne consegue che la portata solida del torrente Segno relativa alla classe di sedimenti compresa tra 2 e 20 mm (ghiaia medio-fine), risulta pari a circa il 40% del totale, ovvero circa 3400 m^3/anno.

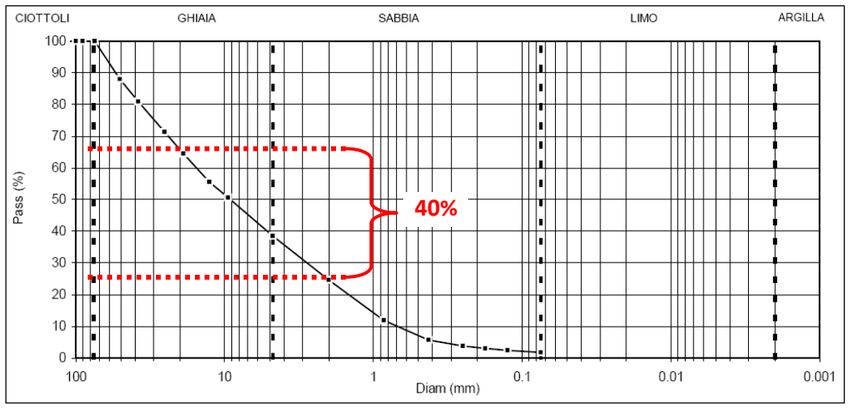


FIGURA 3-14 – INDIVIDUAZIONE DELLA CLASSE DI SEDIMENTI CORRISPONDENTI ALLE GHIAIE MEDIO-FINI SULLA BASE DELLA CURVA GRANULOMETRICA DEL CAMPIONE DI MATERIALE PRELEVATO ALLA FOCE DEL TORRENTE SEGNO

3.1.6. Risultati taratura

Nel presente paragrafo si riportano i risultati della simulazione di taratura relativa al periodo 1993-2014, condotta per mezzo del codice di calcolo UNIBEST.
I risultati sono rappresentati nella successiva
Figura 3-15 in termini di evoluzione della linea di riva e in Figura 3-16 in termini di trasporto solido, con riferimento all'intera griglia di calcolo.

Il modello, opportunamente tarato, è in grado di riprodurre con buona approssimazione l'evoluzione della linea di riva per il tratto di litorale analizzato. In particolare, una buona corrispondenza tra la linea di riva stimata dal modello e quella relativa a giugno 2014 si riscontra nel tratto di litorale a Nord-Est del terrapieno del campo da calcio (spiaggia di Zinola), per il quale è stato possibile reperire informazioni più accurate relativamente ai ripascimenti eseguiti nel periodo di taratura.

Per quanto riguarda, invece, la spiaggia tra la foce del Quiliano e il cantiere nautico, il modello riproduce con discreta approssimazione l'evoluzione avvenuta nel periodo 1993-2014; sono infatti stati eseguiti degli interventi (ad esempio modifiche dell'armatura di foce del Quiliano e/o ripascimenti) non facilmente documentabili.

Procedendo verso Sud, il modello è in grado di riprodurre con buona approssimazione la tendenza evolutiva del litorale, che si manifesta con una sensibile rotazione subita dalla linea di riva nel periodo 1993-2014 ed un conseguente arretramento a Nord (in corrispondenza del cantiere nautico) e avanzamento a Sud (a ridosso della difesa radente).

Per quanto riguarda l'apporto solido del Torrente Segno, le analisi eseguite hanno evidenziato che la sua influenza è limitata alla sola zona di foce; i sedimenti uscenti dalla foce vanno ad alimentare in parte i litorali a Nord e, in parte minore, quelli a Sud, tuttavia la loro influenza è appunto limitata alla zona di foce.

Ne consegue che il contributo dei sedimenti immessi dal Torrente Segno alla dinamica delle spiagge poste più a Nord risulta trascurabile. Tale affermazione trova conferma anche da quanto emerso dagli studi di dettaglio del trasporto solido e dell'evoluzione del fondale, condotti con il modello Delft 3D.

In linea generale, il trasporto solido longitudinale è diretto verso Nord-Est (ovvero verso il porto di Savona) nel tratto di litorale a Nord del terrapieno del campo da calcio (spiaggia di Zinola). Procedendo verso la foce del Torrente Quiliano, il trasporto si riduce di entità e in corrispondenza della foce si osserva un'inversione nel verso del trasporto che viene quindi ad essere diretto verso Sud (verso il Porto di Vado), per annullarsi in prossimità della foce del torrente Segno.

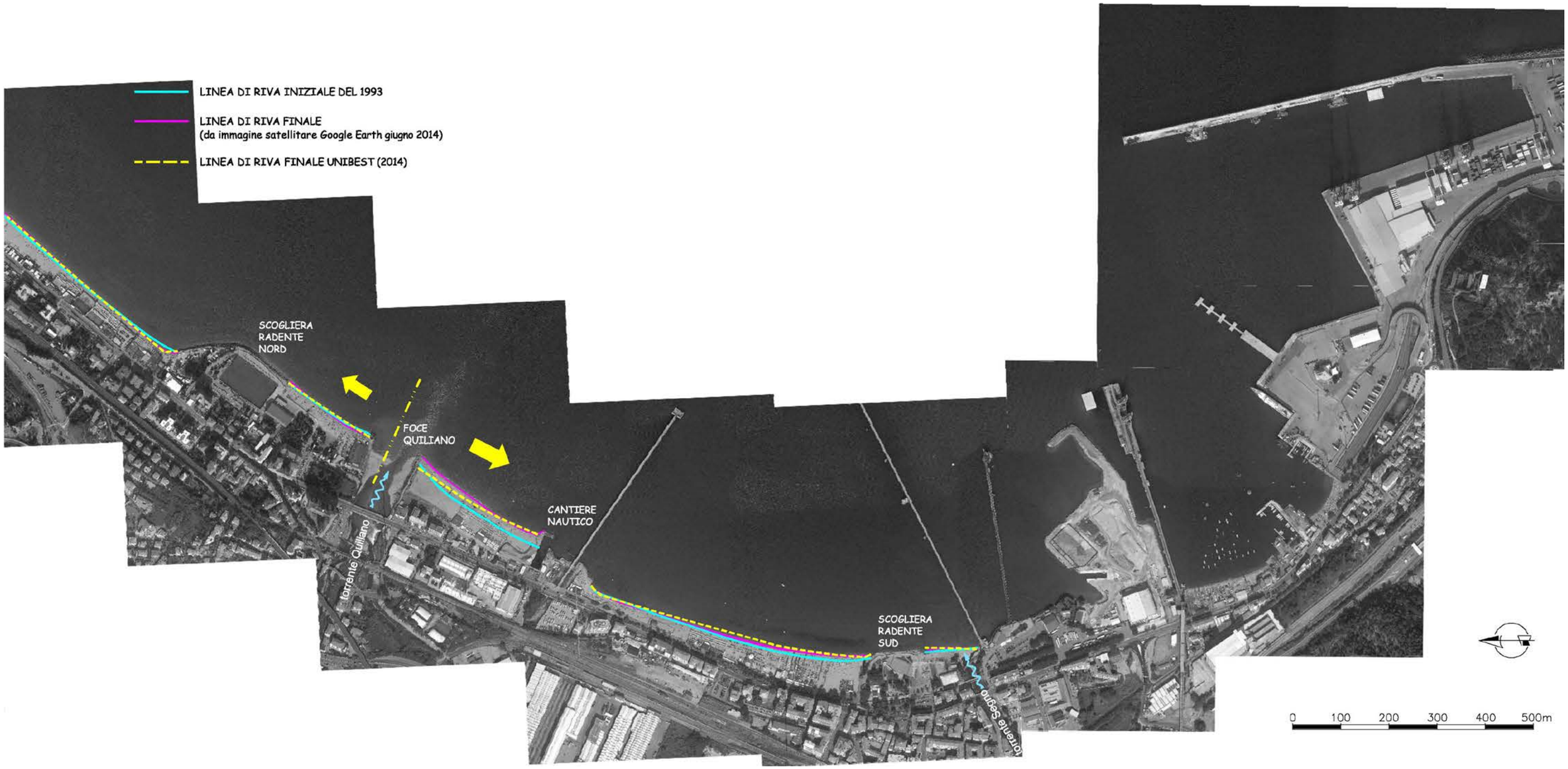


FIGURA 3-15 – TARATURA DEL MODELLO UNIBEST (1993-2014) - EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA

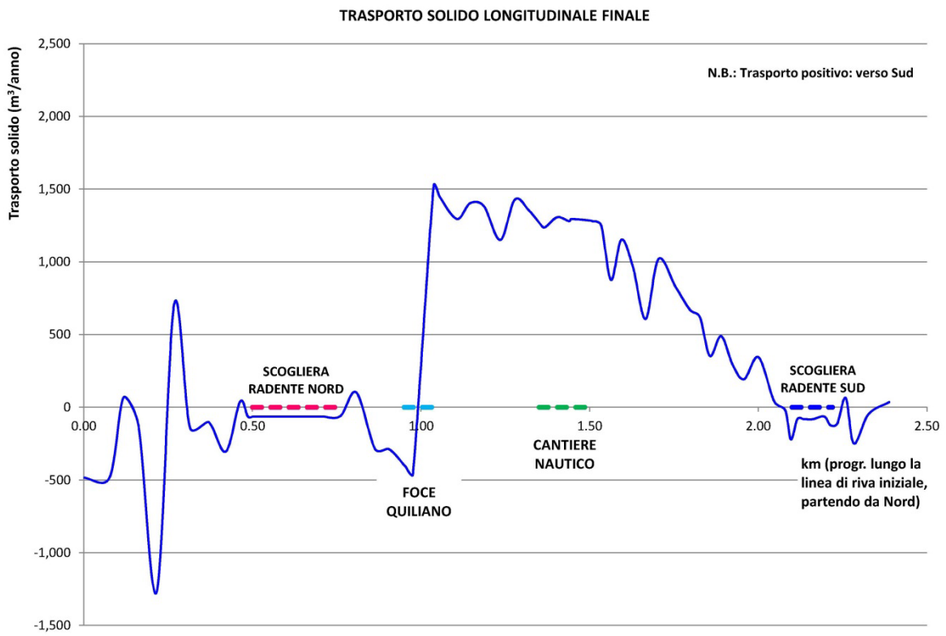


FIGURA 3-16 – SIMULAZIONE DI TARATURA - ANDAMENTO TRASPORTO SOLIDO LONGITUDINALE

3.2. Evoluzione morfologica in configurazione attuale

Il modello di evoluzione morfologica, una volta tarato, è stato impiegato per la previsione dell'evoluzione della linea di riva in assenza di interventi (configurazione attuale del litorale).

Per stimare la tendenza evolutiva del litorale nella configurazione attuale, è stata condotta una simulazione dell'evoluzione della linea di riva a 10 anni, con riferimento al medesimo periodo temporale utilizzato per le simulazioni nelle diverse configurazioni di progetto (dal 2014 al 2024).

Di seguito si riportano i parametri utilizzati nel modello e i risultati della simulazione eseguita in riferimento alla situazione attuale.

3.2.1. Parametri utilizzati nel modello

Le opere rigide attualmente presenti nel tratto di litorale compreso tra la spiaggia di Zinola e il porto di Vado sono state opportunamente schematizzate nel modello UNIBEST. Si tratta sostanzialmente delle stesse opere presenti nella simulazione di taratura e descritte nel precedente paragrafo 3.1.5.

La linea di riva iniziale è quella del 2014; i sedimenti presenti all'interno della fascia attiva sono stati rappresentati con un valore del diametro mediano dei grani pari a 2 mm (come per la simulazione di taratura). La simulazione è stata condotta considerando l'immissione di sedimenti da parte del torrente Quiliano mentre, per quanto riguarda il Torrente Segno, il suo contributo alla dinamica litoranea è stato considerato trascurabile, sulla base di quanto osservato nell'ambito della simulazione di taratura.

Di seguito, in Figura 3-17, si riporta la schematizzazione della linea di riva e delle opere presenti lungo il litorale nella configurazione attuale, di riferimento per la simulazione eseguita con il modello UNIBEST.

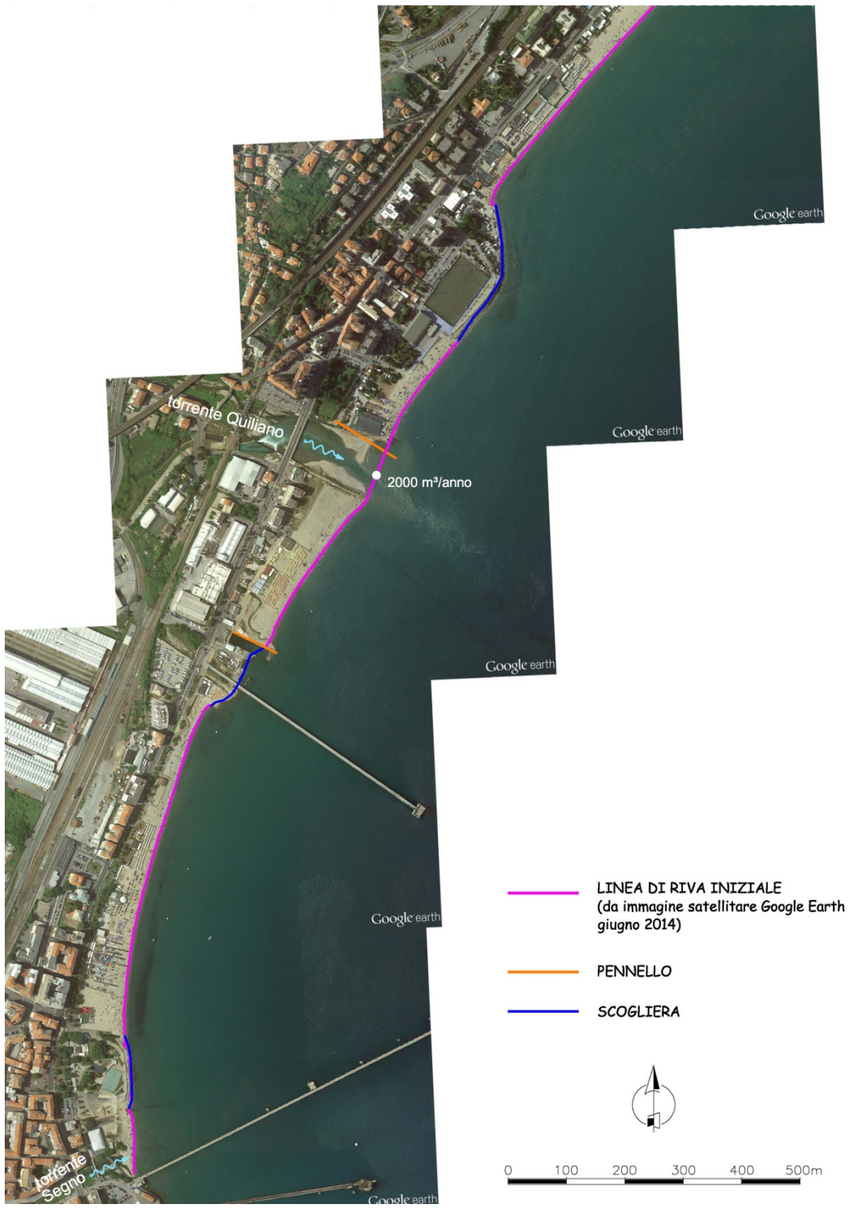


FIGURA 3-17 – CONFIGURAZIONE ATTUALE – SCHEMATIZZAZIONE LINEA DI RIVA E OPERE PRESENTI LUNGO IL LITORALE

3.2.2. Risultati evoluzione morfologica in configurazione attuale

I risultati della simulazione di evoluzione morfologica a 10 anni in configurazione attuale sono rappresentati nella successiva Figura 3-18 in termini di evoluzione della linea di riva, con riferimento all'intera griglia di calcolo.

Per quanto riguarda il verso e l'andamento del trasporto solido valgono le stesse considerazioni formulate per la simulazione di taratura.
In linea generale, il trasporto solido longitudinale è diretto verso Nord-Est (ovvero verso il porto di Savona) nel tratto di litorale a Nord del terrapieno del campo da calcio (spiaggia di Zinola). Procedendo verso la foce del Torrente Quiliano, il trasporto si riduce di entità e in corrispondenza della foce si osserva un'inversione nel verso del trasporto che viene quindi ad essere diretto verso Sud (verso il Porto di Vado), per annullarsi in prossimità della foce del torrente Segno.

In termini di evoluzione della linea di costa, si riscontra una tendenza alla stabilità nella spiaggia di Zinola, a ridosso del terrapieno del campo da calcio. Dalla foce del Quiliano, procedendo verso Sud fino al cantiere nautico alla radice del pontile Tirreno Power, il trasporto solido risulta diretto verso Sud e si registra una rotazione antioraria della linea di riva, con un arretramento della stessa in corrispondenza della foce del Quiliano ed un avanzamento nei pressi del cantiere nautico. Anche nel tratto più a Sud (tra il pontile Tirreno Power e la difesa radente a Nord del Segno) si osserva un riorientamento della linea di riva, con una tendenza ad un modesto avanzamento in corrispondenza della difesa radente situata a Nord della foce del Torrente Segno.



FIGURA 3-18 – CONFIGURAZIONE ATTUALE - EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA NEL PERIODO 2014-2024