

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 1 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

EMERGENZA GAS
INCREMENTO DI CAPACITÀ DI RIGASSIFICAZIONE (DL 17.05.2022, n. 50)
FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti

STUDIO SPECIALISTICO DI IDRAULICA MARITTIMA
Studio meteomarinò

0	Emissione per Permessi	P.De Girolamo	L. Fantera	V. Forlivesi P. Russo	SETT. 2022
Rev.	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato Autorizzato	Data

Documento di proprietà **Snam**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 2 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

INDICE

1	INTRODUZIONE	3
1.1	Obiettivi e metodologia di lavoro	3
1.2	Dati batimetrici di riferimento	4
2	DATI METEOMARINI DI RIFERIMENTO	5
2.1	Dati di vento	5
2.2	Dati di moto ondoso	5
2.3	Dati mareografici	6
3	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL SITO DI INTERESSE	7
3.1	Fetch geografici ed efficaci	9
3.1.1	Punto FSRU Ravenna	9
3.1.2	Punto FSRU Ravenna	15
4	CLIMA ANEMOMETRICO	19
4.1	Regime anemometrico al largo	19
5	CLIMA ONDAMETRICO A LARGO	21
5.1	Dati di moto ondoso in ricostruzione ERA5 Ravenna	21
6	CALIBRAZIONE DEI DATI ONDAMETRICI PER LA VALUTAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI	29
6.1	Confronto degli eventi sincroni al largo di Ancona	30
6.2	Confronto degli eventi estremi asincroni al largo di Ancona	31
7	ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI DI MOTO ONDOSO A LARGO	34
7.1	Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati	34
7.2	Statistica degli eventi estremi per il punto ERA5 Ravenna 44.50°N-12.50°E	36
8	ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DELLA VELOCITA' DEL VENTO	42
8.1	Correlazione altezza d'onda significativa Hs e velocità del vento W10	42
9	PROPAGAZIONE LARGO-RIVA	44
9.1	Condizioni al contorno e dati di calcolo	45
9.2	Clima ondametico in costa	48
10	VARIAZIONI DEL LIVELLO DEL MARE	55
10.1	Correlazione tra i valori di altezza d'onda significativa Hs e i residui di marea	59
11	CAMBIAMENTO CLIMATICI	61
11.1	Variazioni a lungo termine dei livelli del mare a Ravenna	61

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 3 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

1 INTRODUZIONE

Il presente rapporto descrive lo studio meteomarinario finalizzato a definire i principali parametri meteomarini di interesse per il progetto del nuovo terminale marittimo che consentirà di ormeggiare una nave FSRU (Floating Storage and Regasification Unit) a largo del Porto di Ravenna allo scopo di importare e vaporizzare gas naturale liquido (Liquid Natural Gas) importato tramite navi LGN "Shuttle".

Per la redazione del presente studio si è tenuto conto che l'ormeggio della FSRU sarà localizzato a Sud-Est del Porto di Ravenna, dove attualmente è situata l'esistente piattaforma offshore Petra (società del gruppo PIR) la quale verrà opportunamente modificata e riqualificata.

Lo studio è stato eseguito dalla Modimar Project s.r.l., con l'integrazione delle prestazioni specialistiche curata dall'Ing Marco Tartaglini. In particolare, il presente studio è stato curato dal punto di vista tecnico-scientifico dal Prof. Ing. Paolo De Girolamo che si è avvalso della collaborazione della Dott.ssa Ing. Myrta Castellino, PhD, e dell'Ing. Marco Del Bianco.

1.1 Obiettivi e metodologia di lavoro

Gli obiettivi del presente studio sono quelli di definire le caratteristiche statistiche dei principali parametri meteomarini (moto ondoso, vento e variazioni del livello del mare) di interesse per la progettazione del nuovo terminale marittimo, che come sopra riportato accoglierà una nave FSRU funzionale all'importazione e alla vaporizzazione di LNG (Liquefied Natural Gas). Come di seguito descritto con maggiore precisione, il terminale sarà localizzato a Sud-Est del Porto di Ravenna dove attualmente è situato l'esistente terminale offshore per prodotti liquidi costituito da un pontile su pali denominato Petra (società del gruppo PIR).

Per la redazione dello studio si è fatto riferimento ai seguenti dati:

- dati di vento e di moto ondoso ricostruiti in ri-analisi dal 1979 al 2021 con cadenza oraria dal Centro Meteorologico Europeo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF) nell'ambito del progetto ERA5. Questi dati sono stati acquisiti sia per un punto posto a largo del sito in esame, sia per un punto posto a largo del Porto di Ancona;
- dati di moto ondoso misurati a largo del Porto di Ancona dalla boa ondometrica direzionale di Ancona facente parte della Rete Ondametrica Nazionale (RON) attualmente gestita dall'ISPRA;
- variazioni del livello del mare registrate dalla stazione mareografica situata nel Porto di Ravenna facente parte della Rete Mareografica Nazionale (RMN) attualmente gestita dall'ISPRA.

I dati di moto ondoso misurati a largo di Ancona sono stati utilizzati per calibrare le onde estreme a largo del sito in esame secondo quanto descritto nel seguito.

Le analisi condotte hanno consentito di definire nella zona di interesse:

- il clima anemometrico;
- i valori estremi di vento;

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 4 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

- il clima ondametrico a largo del sito in esame e quello in prossimità dell'opera che è stato ottenuto propagando la serie storica ondametrica da largo fino a raggiungere la zona dove sorgerà il nuovo terminale marittimo;
- i valori estremi di moto ondoso a largo del sito in esame;
- le variazioni del livello medio marino indotte sia dalla marea astronomica che dalla marea meteorologica;
- le correlazioni tra l'altezza d'onda significativa, la velocità del vento, e il sovrizzo meteorologico;
- le previste variazioni del livello del mare indotte dai fenomeni di riscaldamento della terra causati dalle variazioni climatiche.

1.2 Dati batimetrici di riferimento

Per condurre il presente studio si è fatto riferimento ai dati batimetrici riportati dalla "Carta Batimetrica area di progetto LNG Ravenna" emessa dalla Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Centro-Settentrionale in data 22/07/2022. Questi dati sono stati integrati con quelli delle carte nautiche recenti disponibili per la zona in esame e con il database EMODNET.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 5 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

2 DATI METEOMARINI DI RIFERIMENTO

2.1 Dati di vento

Le caratteristiche principali dei dati anemometrici utilizzati sono riportate nella seguente tabella. La posizione geografica dei dati è riportata graficamente in Figura 2-1. La serie storica oraria ricostruita in ri-analisi dall'ECMWF si estende per circa 43 anni dal 1979 al 2021.

Tabella 2-1 - Dati anemometrici acquisiti.

Rif	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
1	DATI RICOSTRUITI: ECMWF-ERA5 42-Year Wave Hindcast: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview	Dati anemometrici ricostruiti con modello ERA5 Ravenna	44.50°N 12.50°E	1979 2021

2.2 Dati di moto ondoso

Le caratteristiche principali dei dati ondometrici utilizzati sono riportati nella seguente tabella. Anche in questo caso le serie storiche orarie ricostruite in ri-analisi dall'ECMWF si estendono per circa 43 anni dal 1979 al 2021.

La posizione geografica di riferimento dei dati di moto ondoso ricostruiti è indicata in forma grafica nella Figura 2-1 con il punto rosso ERA5 Ravenna localizzato ad una profondità di circa -25,0 m. Nella stessa figura è indicata, con il punto bianco (FSRU Ravenna), la posizione geografica del pontile offshore esistente denominato Petra (del Gruppo PIR), il quale è posto poco ad Ovest del punto ERA 5 Ravenna su un fondale di circa -14,0 m, dove si prevede di ormeggiare la FSRU. Si riporta inoltre la posizione del punto ERA5 Ancona e della boa ondometrica di Ancona facente parte della Rete Mareografica Nazionale gestita dall'ISPRA. Come di seguito descritto, questi dati sono stati utilizzati per calibrare la serie storica di moto ondoso ERA5 Ravenna.

Tabella 2-2 - Dati ondometrici acquisiti.

Rif	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
1	DATI RICOSTRUITI: ECMWF-ERA5 42-Year Wave Hindcast: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview	Dati di moto ondoso ricostruiti con modello ERA5 Ravenna	44.50°N 12.50°E	1979 2021
2	DATI RICOSTRUITI: ECMWF-ERA5 42-Year Wave Hindcast: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview	Dati di moto ondoso ricostruiti con modello ERA5 Ancona	43.75°N 13.75°E	1979 2021
3	DATI BOA ONDAMETRICA DI ANCONA	Dati di moto ondoso misurati dalla boa ondometrica BOA Ancona	43.825°N 13.719°E	1999 2022

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 6 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

2.3 Dati mareografici

Si riportano nella seguente tabella le caratteristiche principali dei dati mareografici utilizzati

La posizione geografica di riferimento della stazione mareografica di Ravenna, facente parte della Rete Mareografica Nazionale (RMN) gestita dall'ISPRA è planimetricamente indicata in Figura 2-1.

Tabella 2-3 - Dati mareografici acquisiti.

Rif	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
1	Rete Mareografica Nazionale (RMN - ISPRA) Stazione di Ravenna http://dati.isprambiente.it/	Dati mareografici misurati	44.492°N 12.282°E	2010 2022

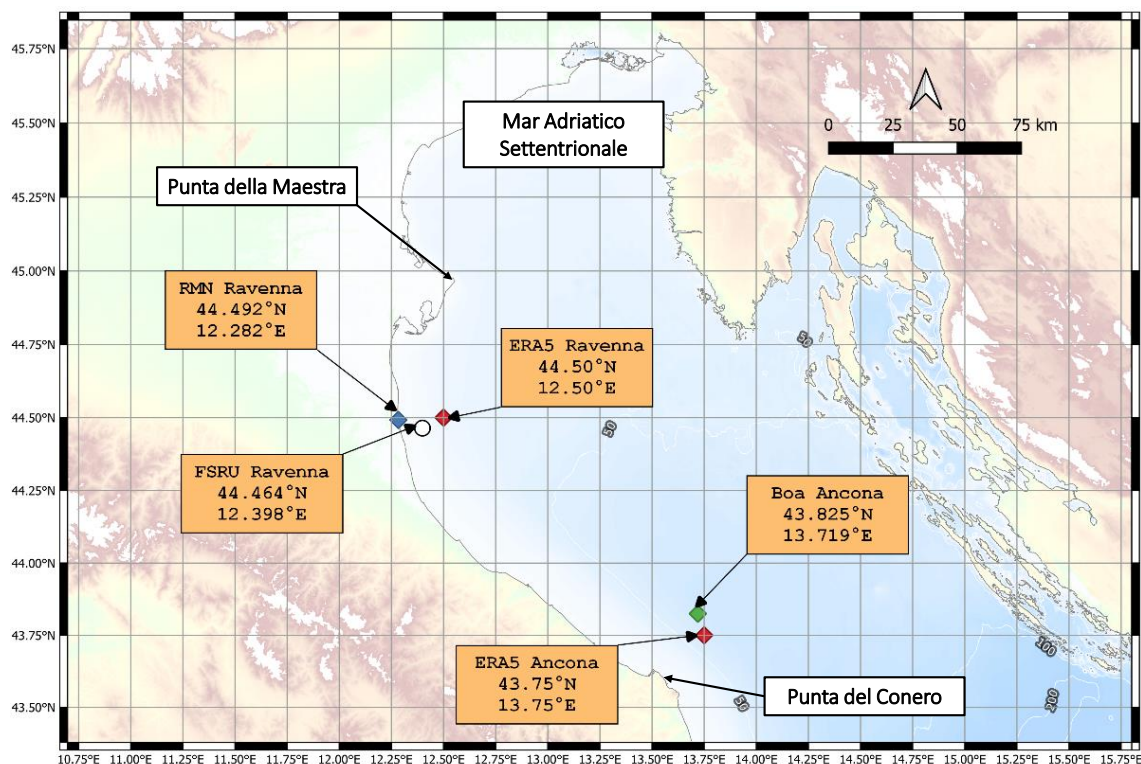


Figura 2-1 - Localizzazione geografica dei dati utilizzati e del sito dove sorgerà il nuovo terminale marittimo indicato nella figura con FSRU Ravenna.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 7 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

3 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL SITO DI INTERESSE

Con riferimento alla Figura 2-1 e alla Figura 3-1, la zona dove si prevede di ormeggiare la FSRU Ravenna è localizzata a Sud-Est dell'imboccatura del porto di Ravenna a circa 7,4 km (circa 4 miglia nautiche) di distanza dalla stessa imboccatura e a circa 8,5 km dalla costa (Punta Marina).

La zona di ormeggio ricade nell'area attualmente occupata dal pontile offshore denominato Piattaforma Petra (vedi Figura 3-2 e Figura 3-3) indicata anche pontile PIR.

Con riferimento alla Figura 3-3, l'asse longitudinale del pontile presenta un angolo ruotato verso Est di pochi gradi (circa 10° N) in modo tale da trapiantare verso Nord Punta della Maestra (vedi Figura 3-1) che costituisce il punto più ad Est del Delta del Po.

Dal punto di vista geografico il Pontile PIR è schermato a Nord dal delta del Po (Punta della Maestra) e a Sud-Est dal promontorio del Conero dove si trova il Porto di Ancona.

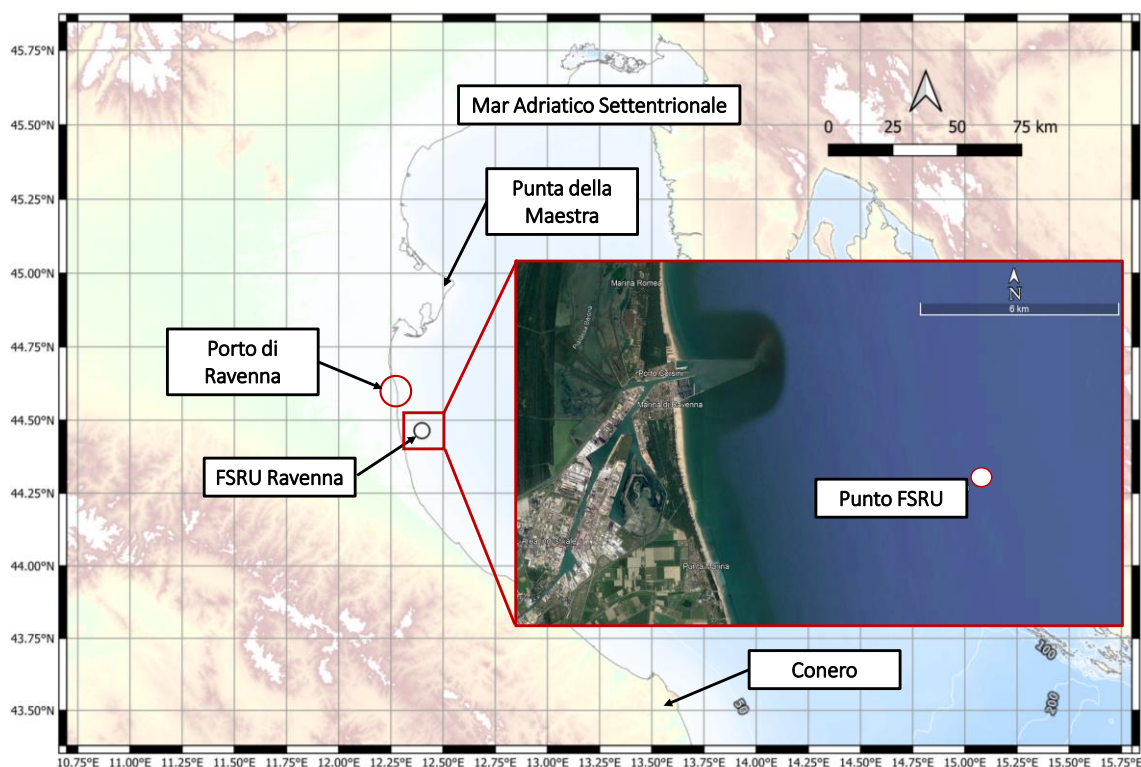


Figura 3-1 - Inquadramento geografico della FSRU Ravenna.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 8 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001



Figura 3-2 - Stato attuale del Pontile Offshore Petra (Pontile PIR) esistente.

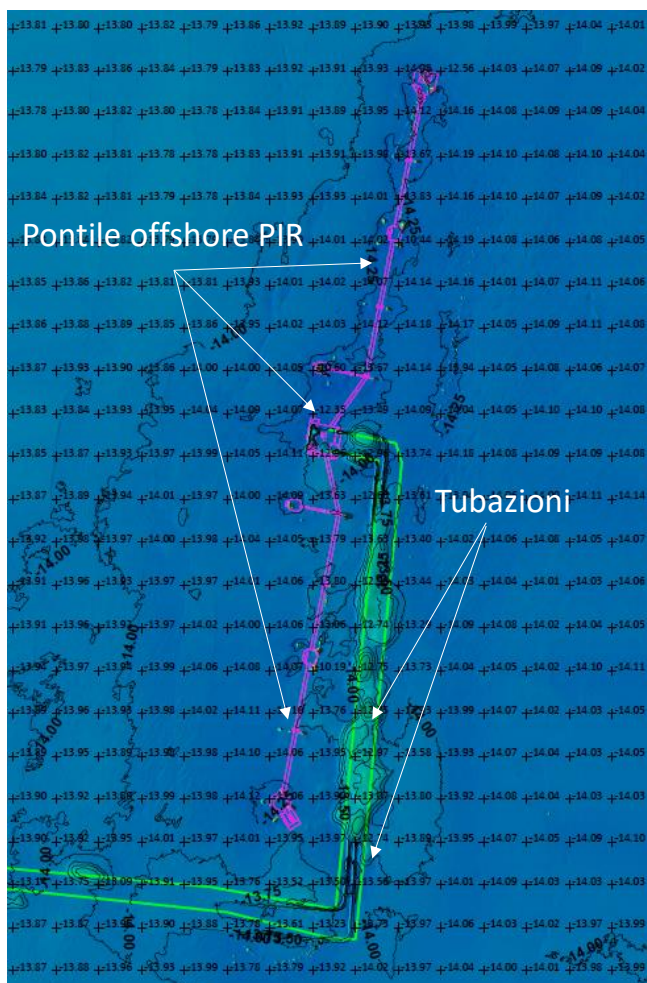


Figura 3-3 - Planimetria del Pontile Offshore Petra (Pontile PIR) esistente.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 9 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

3.1 Fetch geografici ed efficaci

In questo paragrafo vengono calcolati i fetch geografici ed efficaci in relazione ai due punti indicati nella Figura 2-1, ovvero:

1. al punto dove verrà realizzato il nuovo terminale gas (FSRU Ravenna) posto su un fondale di circa 14 m;
2. al punto utilizzato per definire le condizioni di moto ondoso e vento a largo del sito in esame in funzione dei dati dell'ECMWF (ERA5 Ravenna).

Sebbene i due punti siano tra di loro posti ad una distanza di soli circa 9,0 km, avvicinandosi in costa, ovvero passando dal punto 2 al punto 1, si riducono i fetch relativi agli stati di mare provenienti da terra appartenenti al III e al IV quadrante.

3.1.1 Punto FSRU Ravenna

In generale, una prima valutazione delle condizioni “potenziali” di esposizione al moto ondoso del sito in esame può essere effettuata sulla base dei settori di traversia geografica, rappresentativi dell'estensione geografica della superficie marina (“fetch geografico”) che può contribuire alla generazione del moto ondoso sotto l'azione delle perturbazioni atmosferiche che possono interessare l'area in esame.

In Figura 3-4 è riportato il fetch geografico per il punto FSRU Ravenna di coordinate 44.46°N – 12.39°E, posto a circa 9 km al largo del paraggio di Ravenna, limitandone comunque l'estensione massima a 500 km, in congruenza con i limiti medi delle estensioni areali delle massime perturbazioni che possono interessare il bacino del Mar Mediterraneo.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 10 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

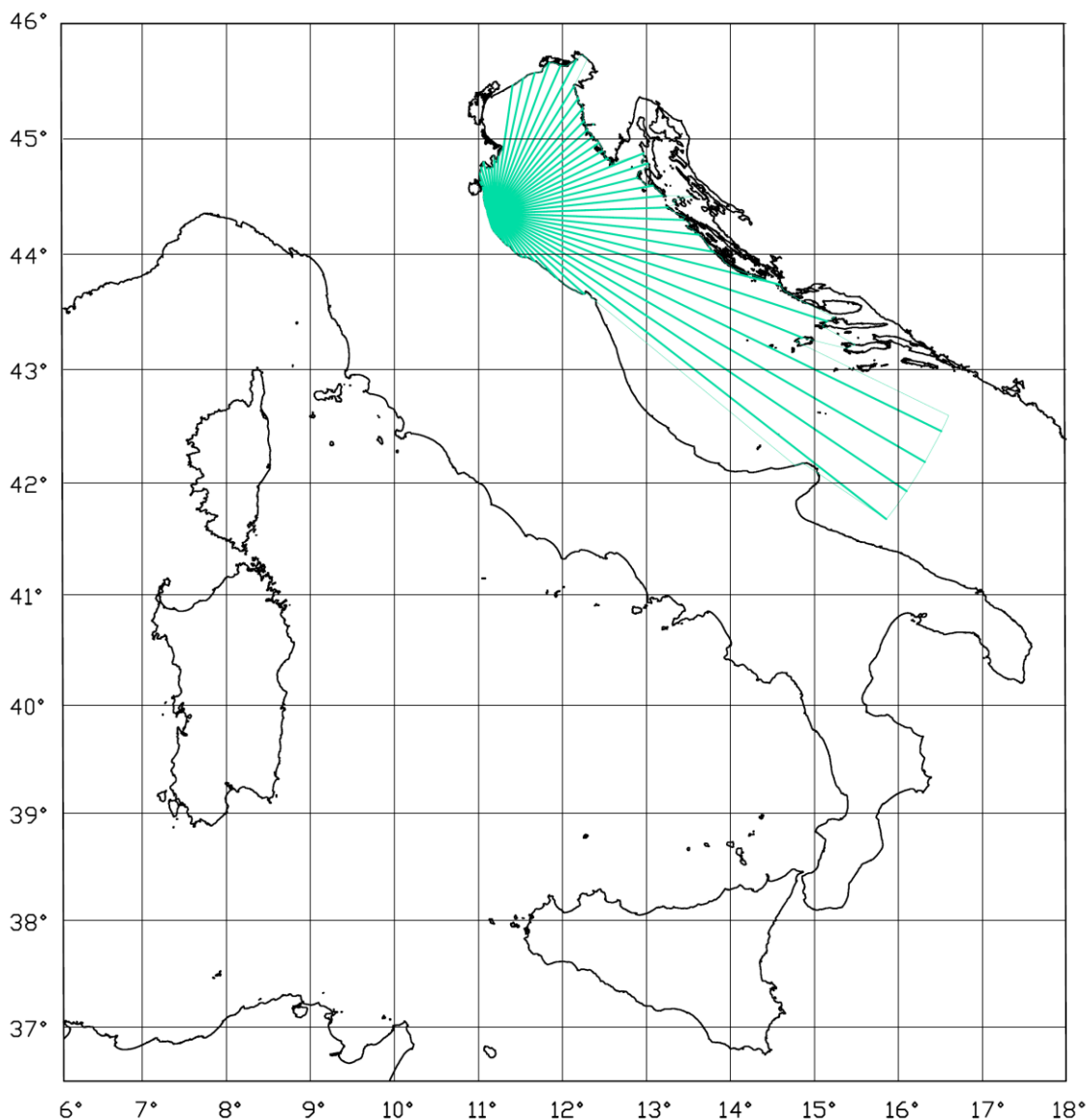


Figura 3-4 Fetch geografico per il punto FSRU Ravenna.

Il paraggio si colloca al margine orientale della regione Emilia-Romagna e pertanto il fetch geografico è limitato parzialmente a Sud dal promontorio del Conero e a Nord da Punta della Maestra. A Nord-Nord/Est è limitato dalle coste del Friuli-Venezia Giulia, Istria e Croazia.

Per fetch efficace si intende la “traversia” o lunghezza della porzione di mare sulla quale si esplica “effettivamente” l’azione del vento responsabile della generazione del moto ondoso. Il valore del fetch efficace relativo ad una determinata direzione è funzione anche dei valori dei fetch geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata; in questo modo i fetch efficaci tengono conto del fatto che alla generazione del moto ondoso oltre alla superficie marina individuata nella direzione

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 11 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

media Φ_w lungo la quale spira il vento contribuiscono anche le porzioni di mare dalle direzioni comprese in un settore di $\pm \theta$ rispetto alla direzione media di azione del vento.

Il calcolo del fetch efficace è stato eseguito utilizzando l'applicazione ENIF¹ che, sulla base del fetch geografico tracciato in coordinate polari, risolve la seguente equazione:

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

nella quale i simboli che compaiono rappresentano i seguenti parametri:

- $F_{e,w}$ lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione Φ_w ;
- F_i lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima θ_i ;
- Φ_w direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversa;
- $\Phi_w - \theta \leq \phi_i \leq \Phi_w + \theta$ direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di 2θ considerato nell'intorno della direzione Φ_w ;
- θ ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso (il metodo di Saville prevede un valore di $\theta = \pm 45^\circ$ mentre quello di Seymour fa riferimento ad un valore di $\theta = \pm 90^\circ$. Nel presente caso si è fatto riferimento al metodo di Saville);
- n termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume $n = 4$).

L'equazione deriva dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretschneider, 1947) e dai suoi successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, Smith 1991).

L'applicazione del modello ENIF fornisce anche la correlazione tra la direzione media del vento e la direzione media del moto ondoso generato. I risultati dell'elaborazione, condotta con un passo di discretizzazione di 1° , sono sintetizzati, per valori discreti con passo angolare di 10° , nella Tabella 3-1 e riportati in forma grafica nei diagrammi cartesiani della Figura 3-5. Il fetch efficace è riportato nella mappa geografica della Figura 3-6.

¹ Il software per ambiente windows ENIF per il calcolo automatico dei fetch efficaci è stato sviluppato e commercializzato dalla società MODIMAR S.r.l.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 12 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

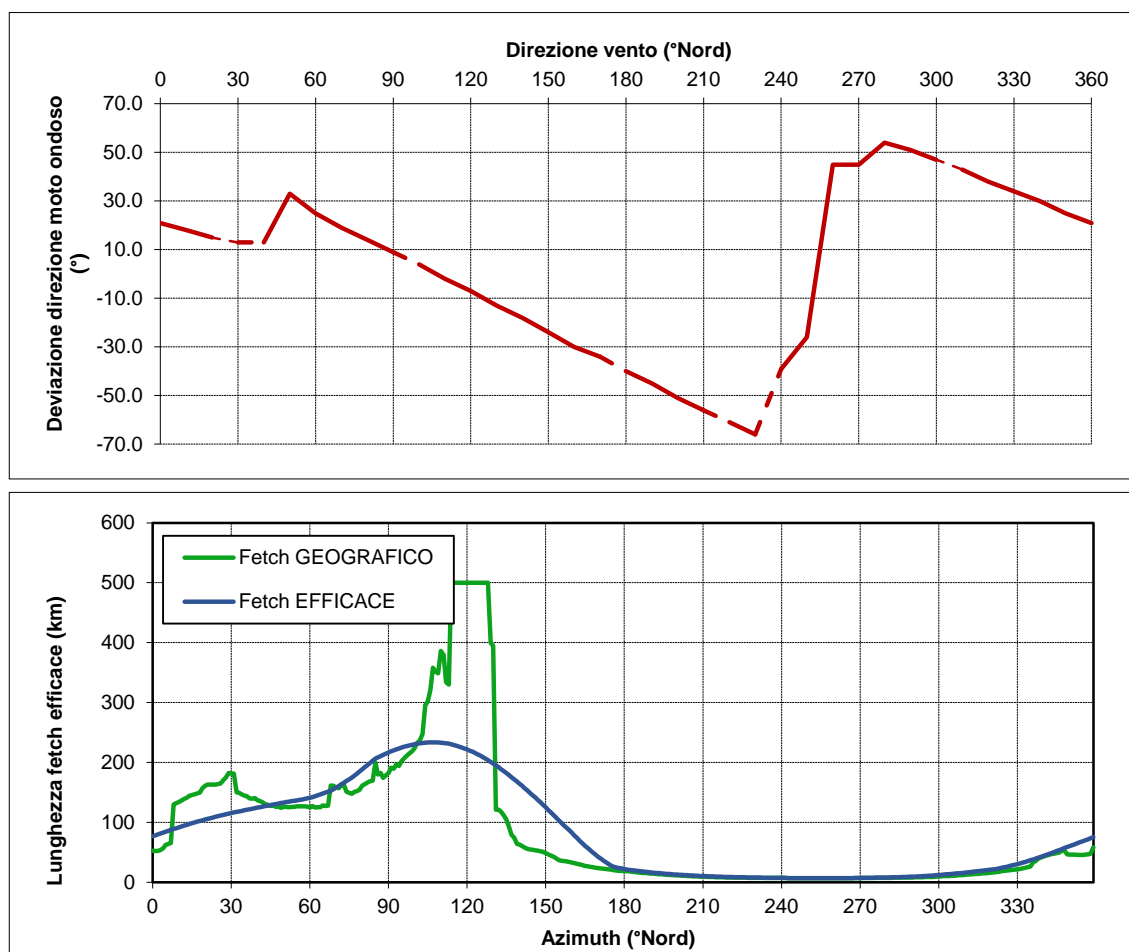


Figura 3-5 Grafico superiore: deviazione tra la direzione di provenienza del vento e del moto ondoso. Grafico inferiore: fetch geografico ed efficace nel punto FSRU di Ravenna.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 13 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

Tabella 3-1 Fetch geografico ed efficace con deviazione direzionale vento/mare nel punto FSRU Ravenna.

Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)	Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)
0	52.83	76.53	21.0	180	18.61	22.03	-40.0
10	133.85	91.60	18.0	190	14.53	16.46	-45.0
20	161.11	104.55	15.0	200	11.42	12.75	-51.0
30	181.75	115.46	13.0	210	9.18	10.34	-56.0
40	136.68	124.51	13.0	220	7.93	8.73	-61.0
50	125.57	132.92	33.0	230	7.40	7.66	-66.0
60	124.62	140.88	25.0	240	7.04	7.02	-39.0
70	158.60	157.89	19.0	250	6.84	6.72	-26.0
80	161.54	188.28	14.0	260	6.81	6.73	45.0
90	182.58	216.60	9.0	270	6.95	7.08	45.0
100	223.63	230.37	4.0	280	7.30	7.85	54.0
110	386.13	232.99	-2.0	290	7.91	9.19	51.0
120	500.00	221.64	-7.0	300	9.54	12.02	47.0
130	394.69	198.04	-13.0	310	12.27	15.96	43.0
140	62.83	164.42	-18.0	320	15.97	20.85	38.0
150	48.79	124.99	-24.0	330	21.66	30.26	34.0
160	32.88	82.26	-30.0	340	42.76	43.86	30.0
170	23.54	42.67	-34.0	350	46.21	60.31	25.0

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 14 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

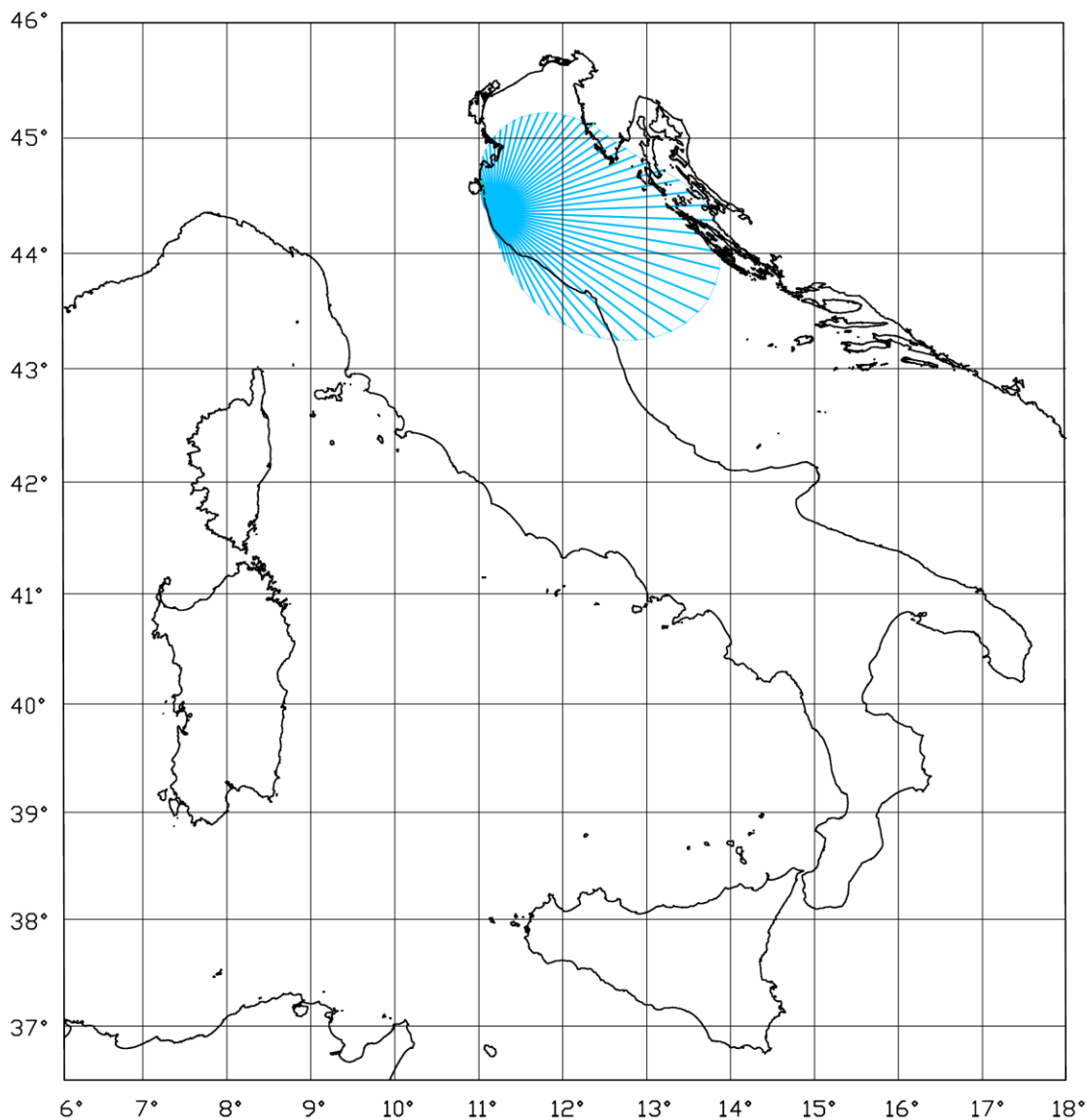


Figura 3-6 Estensione del fetch efficace al largo di Ravenna calcolato nel punto FSRU Ravenna.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 15 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

3.1.2 Punto FSRU Ravenna

In Figura 3-4 è riportato il fetch geografico per il punto FSRU Ravenna, limitandone comunque l'estensione massima a 500 km.

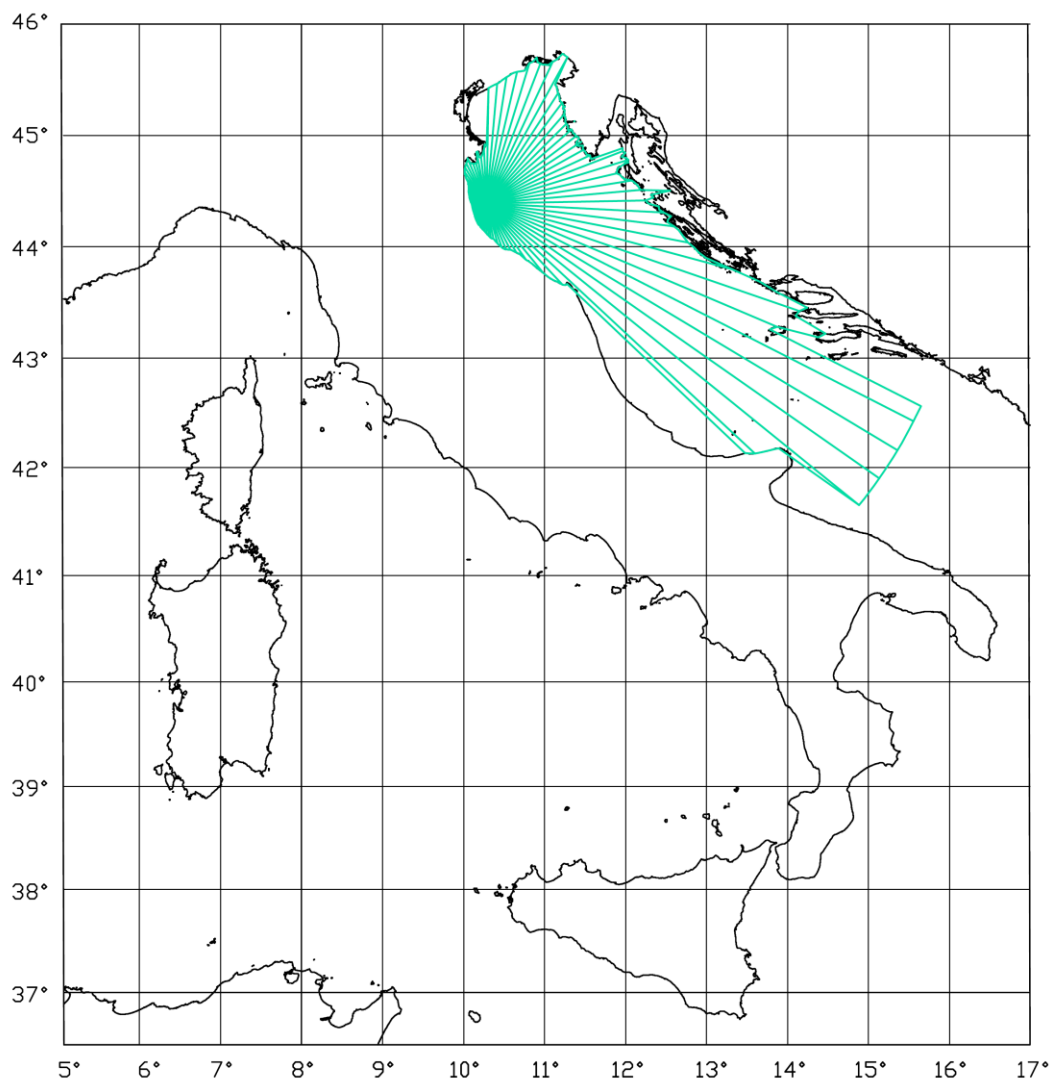


Figura 3-7 Fetch geografico per il punto ERA5 Ravenna

I risultati dell'elaborazione, condotta con un passo di discretizzazione di 1°, sono sintetizzati, per valori discreti con passo angolare di 10°, nella Tabella 3-2 e riportati in forma grafica nei diagrammi cartesiani della Figura 3-8. Il fetch efficace è riportato nella mappa geografica della Figura 3-9.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 16 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

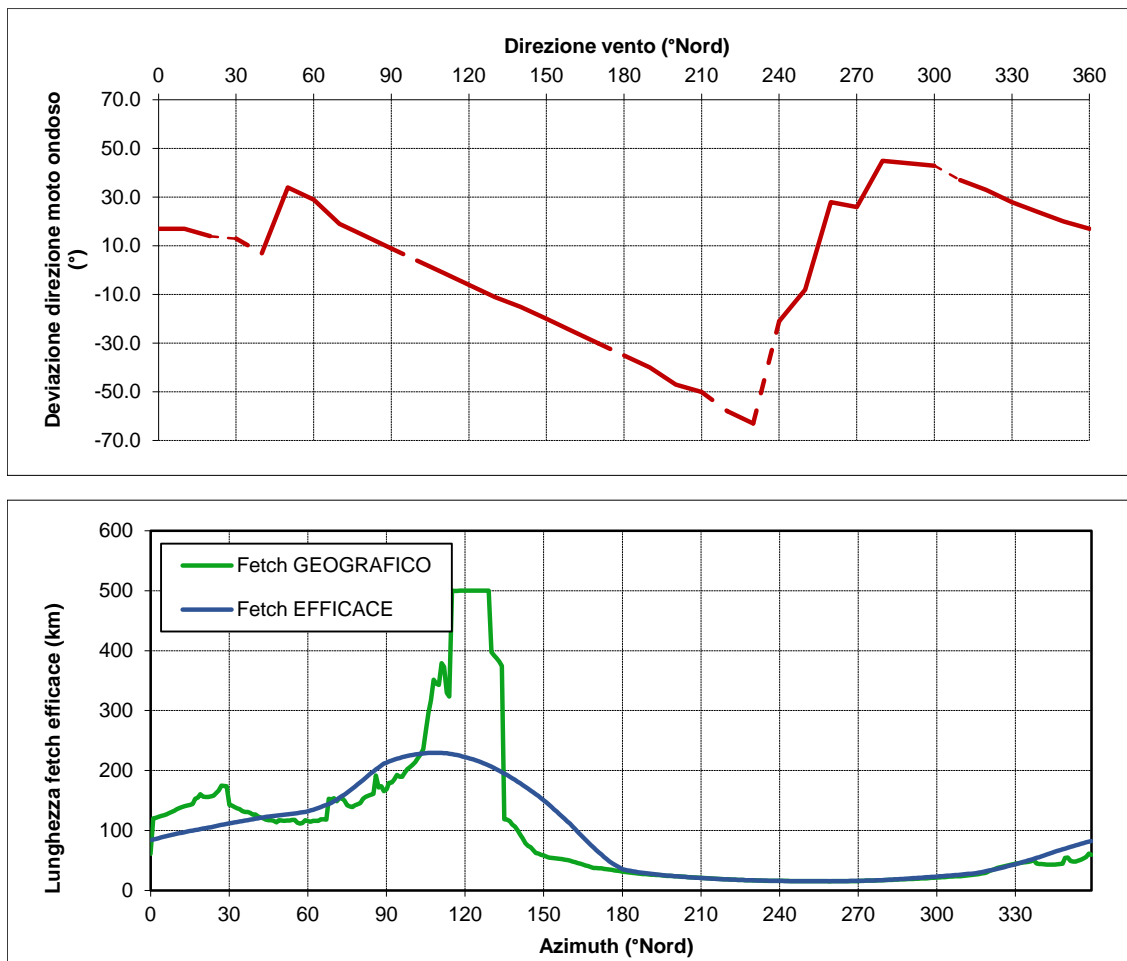


Figura 3-8 Grafico superiore: deviazione tra la direzione di provenienza del vento e del moto ondoso. Grafico inferiore: fetch geografico ed efficace nel punto ERA5 Ravenna.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 17 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

Tabella 3-2 Fetch geografico ed efficace con deviazione direzionale vento/mare nel punto ERA5 Ravenna.

Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)	Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)
0	60.88	83.85	17.0	180	31.59	35.43	-35.0
10	135.36	94.61	17.0	190	26.79	28.11	-40.0
20	156.38	103.19	14.0	200	23.89	23.90	-47.0
30	142.97	111.96	13.0	210	21.07	20.70	-50.0
40	126.82	119.50	7.0	220	18.68	18.47	-58.0
50	116.85	125.82	34.0	230	16.77	16.91	-63.0
60	115.68	132.16	29.0	240	16.05	15.93	-21.0
70	153.88	148.84	19.0	250	15.57	15.46	-8.0
80	145.66	180.38	14.0	260	15.43	15.51	28.0
90	168.54	213.38	9.0	270	15.83	16.11	26.0
100	209.72	226.19	4.0	280	17.31	17.56	45.0
110	342.93	229.59	-1.0	290	19.18	20.16	44.0
120	500.00	222.50	-6.0	300	21.60	23.21	43.0
130	397.41	206.50	-11.0	310	24.34	26.78	37.0
140	101.03	181.76	-15.0	320	32.50	33.24	33.0
150	58.23	150.57	-20.0	330	44.62	43.77	28.0
160	49.66	111.55	-25.0	340	44.00	57.04	24.0
170	37.44	67.65	-30.0	350	54.83	71.28	20.0

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 18 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

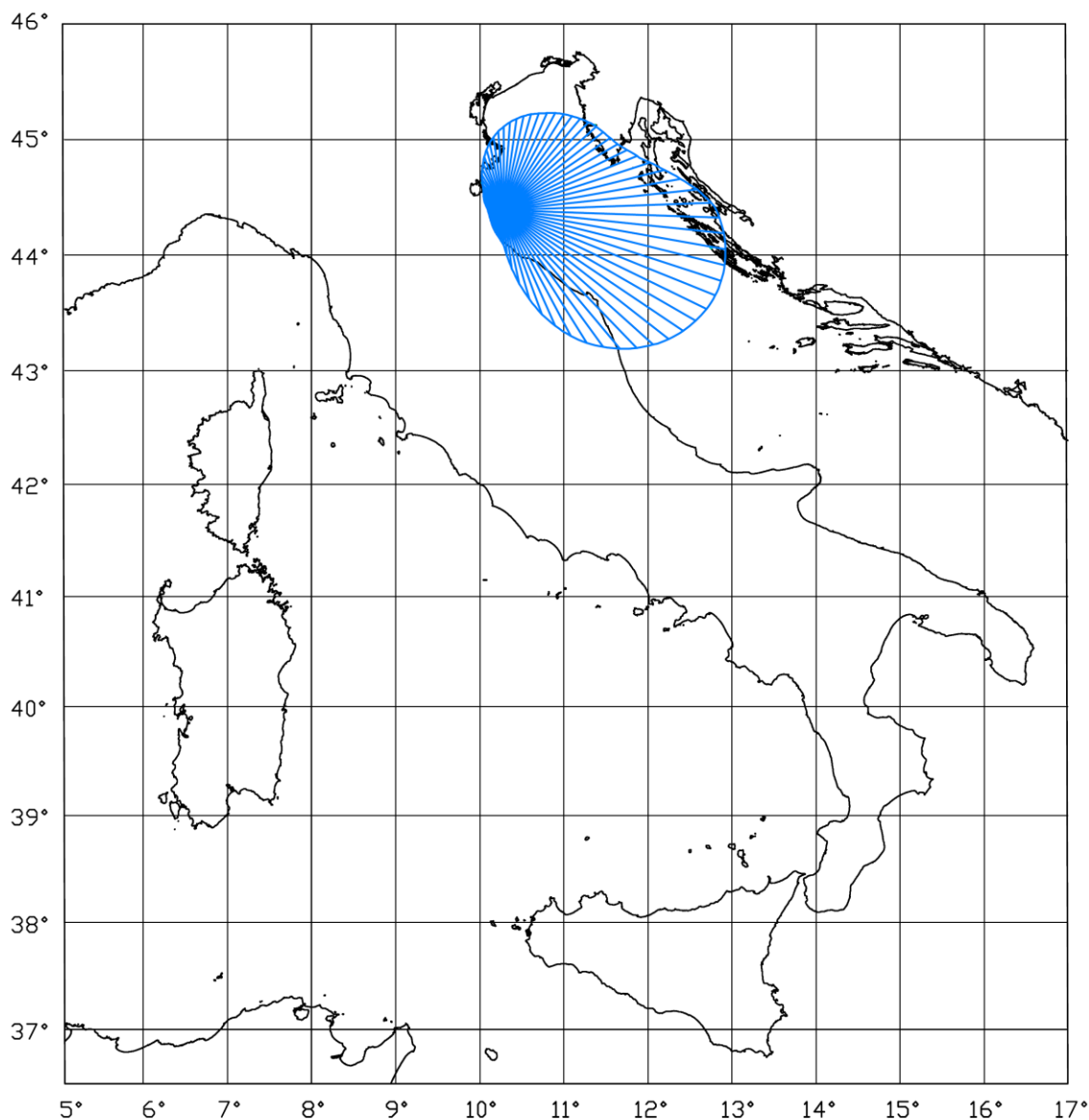


Figura 3-9 Estensione del fetch efficace al largo di Ravenna calcolato nel punto ERA5 Ravenna.

Il confronto tra la Tabella 3-1 e la Tabella 3-2 mostra ovviamente che i fetch geografici ed i fetch efficaci spostandosi da largo verso riva si riducono sensibilmente sia per il settore settentrionale che per quello occidentale.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 19 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

4 CLIMA ANEMOMETRICO

Per l'analisi del regime dei venti al largo si è fatto riferimento ai dati di vento ricostruiti in ri-analisi dall'ECMWF e riportati nel database ERA5 sviluppato nell'ambito del Progetto Europeo Copernicus sul nodo di griglia di coordinate 44.50°N-12.50 °E (vedi Figura 2-1), posto poco a Est del sito oggetto di studio.

4.1 Regime anemometrico al largo

Nella Figura 4-1 è riportata in forma polare la rosa direzionale degli eventi anemometrici ottenuta sulla base della serie storica oraria acquisita nel punto ERA5 Ravenna di coordinate 44.50°N – 12.50°E e relativo al periodo 1979-2021.

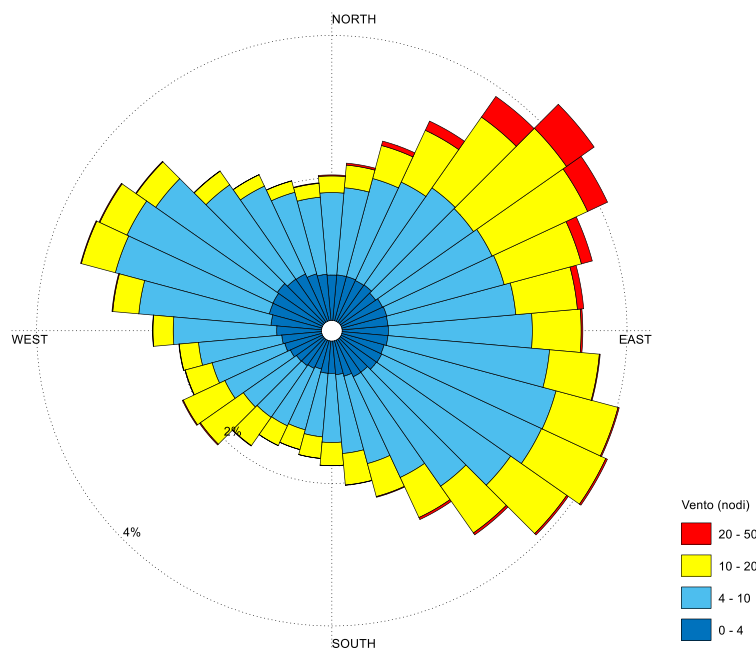


Figura 4-1 Distribuzione direzionale del regime anemometrico ricostruito nel punto ERA5 44.50°N – 12.50°E.

Nella Tabella 4-1 è riportato il clima anemometrico ottenuto classificando gli eventi anemometrici in classi di direzione, di provenienza e di velocità.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 20 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

**Tabella 4-1 – Tabella di ricostruzione percentuale dei venti ricostruiti nel punto ERA5 Ravenna
44.50°N – 12.50°E.**

Direzione °N	Classi di velocità del vento (nodi)											Tot
	da 1 a 4	4 7	7 11	11 17	17 22	22 28	28 34	34 41	41 48	48 56	56 63	
10	0.642	0.793	0.517	0.213	0.034	0.015	0.002					2.217
20	0.643	0.868	0.674	0.297	0.089	0.034	0.006					2.611
30	0.634	0.873	0.804	0.528	0.174	0.080	0.010	0.001				3.103
40	0.641	0.910	0.955	0.785	0.364	0.188	0.027	0.001				3.870
50	0.605	0.928	0.953	1.006	0.567	0.250	0.042	0.001				4.352
60	0.639	0.942	0.949	0.961	0.466	0.157	0.013	0.001				4.126
70	0.652	0.970	0.903	0.770	0.259	0.083	0.005					3.641
80	0.646	1.023	0.931	0.583	0.184	0.037						3.405
90	0.649	1.113	1.065	0.469	0.075	0.009						3.379
100	0.645	1.187	1.298	0.450	0.051	0.006	0.000					3.638
110	0.615	1.272	1.514	0.571	0.057	0.004						4.033
120	0.627	1.270	1.503	0.643	0.069	0.010	0.001					4.124
130	0.621	1.176	1.398	0.622	0.084	0.006	0.002					3.909
140	0.565	1.025	1.127	0.537	0.087	0.013						3.353
150	0.568	0.867	0.841	0.418	0.077	0.009	0.000					2.780
160	0.515	0.702	0.679	0.331	0.047	0.003						2.276
170	0.474	0.600	0.636	0.297	0.026	0.001						2.033
180	0.453	0.531	0.523	0.228	0.014	0.001						1.750
190	0.456	0.477	0.500	0.210	0.014							1.655
200	0.413	0.478	0.488	0.192	0.013							1.584
210	0.439	0.484	0.485	0.216	0.011							1.635
220	0.455	0.469	0.531	0.349	0.024	0.004						1.831
230	0.461	0.486	0.567	0.531	0.073	0.005	0.001					2.123
240	0.497	0.558	0.589	0.461	0.063	0.003	0.001					2.171
250	0.538	0.599	0.570	0.261	0.022	0.001	0.000					1.991
260	0.561	0.701	0.572	0.162	0.012	0.003						2.011
270	0.629	0.899	0.652	0.174	0.017	0.001						2.371
280	0.713	1.198	0.784	0.223	0.033	0.003						2.954
290	0.764	1.389	1.005	0.306	0.039	0.003	0.000					3.507
300	0.769	1.399	0.998	0.261	0.028	0.006						3.462
310	0.791	1.311	0.881	0.209	0.024	0.004						3.219
320	0.739	1.062	0.631	0.145	0.015	0.002						2.595
330	0.734	0.921	0.505	0.106	0.008	0.000						2.273
340	0.682	0.807	0.437	0.098	0.011	0.000						2.035
350	0.651	0.732	0.417	0.118	0.019	0.002	0.001					1.940
360	0.637	0.762	0.467	0.147	0.023	0.005	0.002	0.000				2.043
% di eventi	21.763	31.777	28.347	13.877	3.172	0.949	0.111	0.004	0	0	0	100.00

Analizzando la frequenza di accadimento degli eventi è possibile osservare che:

- il regime dei venti è contraddistinto in prevalenza da brezze, da leggere a vivaci, appartenenti alla classe di velocità compresa tra 4.0 nodi e 17.0 nodi, che hanno una frequenza di accadimento di circa il 95% pari a 346 giorni/anno; le brezze tese e il vento fresco, aventi velocità comprese tra 17.0 nodi e 28.0 nodi, si verificano in media per 15 giorni/anno con una frequenza di accadimento del 4.12%; i venti forti, aventi velocità superiore a 28.0 nodi si verificano in media con una frequenza pari a 0.11%;
- il regime dei venti risulta distribuito principalmente su tre settori. I settori prevalenti sono quelli di Grecale (Nord-Est) e di Scirocco (Sud-Est), mentre il terzo è costituito dal Maestrale.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 21 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

- i venti di maggiore intensità provengono dal settore di Nord-Est (Grecale), che sono seguiti da quelli provenienti da Sud-Est (Scirocco). I venti di Maestrale e di Libeccio sono meno frequenti e meno intensi rispetto agli altri.

5 CLIMA ONDAMETRICO A LARGO

Per la definizione delle caratteristiche del moto ondoso al largo di Ravenna si è fatto riferimento alla serie storica dei dati ondametrici ERA5, acquisiti come detto dal Centro meteorologico europeo (ECMWF). Nel dettaglio ERA5 rende disponibili i dati meteomarinari orari (moto ondoso, vento e pressione atmosferica) ricostruiti in rianalisi dal 1979 al 2021, con un passo di discretizzazione spaziale LAT/LON di 0.25°N e una discretizzazione temporale oraria.

Questi dati sono stati acquisiti sul punto di griglia indicato nella Figura 5-1 ERA5 Ravenna. Il punto è stato scelto con l'obiettivo di utilizzare il punto ERA5 Ravenna come condizione di largo per il sito in esame.

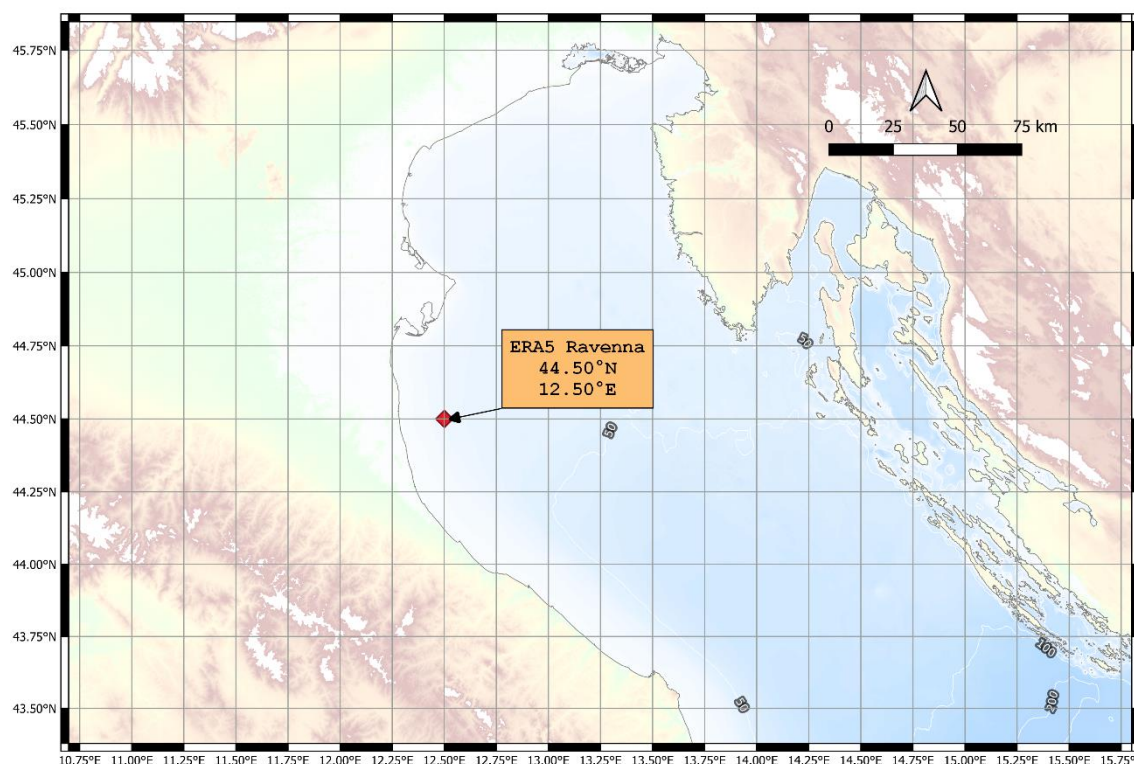


Figura 5-1 - Localizzazione del punto ERA5 Ravenna utilizzato per la caratterizzazione del moto ondoso a largo.

5.1 Dati di moto ondoso in ricostruzione ERA5 Ravenna

La serie storica ondametrica oraria che copre con continuità 43 anni relativa al punto ERA5 di coordinate 44.50°N-12.50 °E è costituita da 376944 stati di mare. La serie storica dell'altezza d'onda significative H_s relativa a tale punto, è riportata a titolo di esempio graficamente nella Figura 5-2.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 22 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

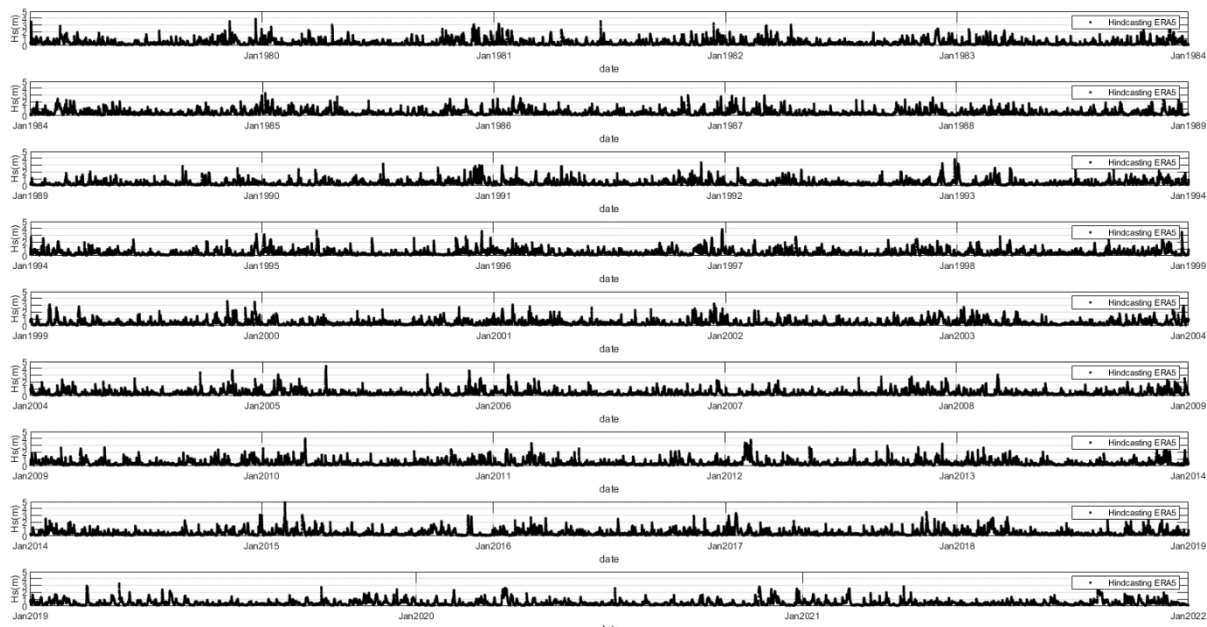


Figura 5-2 - Serie storica dei valori di Hs ricostruiti dall'ECMWF nel punto ERA5 Ravenna di coordinate 44.50°N 12.50°E nel periodo 1979-2021.

Nella Figura 5-3, nelle Tabella 5-1 e nella Tabella 5-2, è riportato il clima ondametrico relativo al punto ERA5 sia in forma grafica, sia in forma numerica.

In particolare, mentre in ciascuna casella della Tabella 5-1 è riportato il numero degli eventi osservati (classificati in termini di Hs e di direzione di provenienza), nella Tabella 5-2 gli stessi eventi sono forniti in percentuale la quale coincide con la loro frequenza di accadimento media annuale.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 23 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

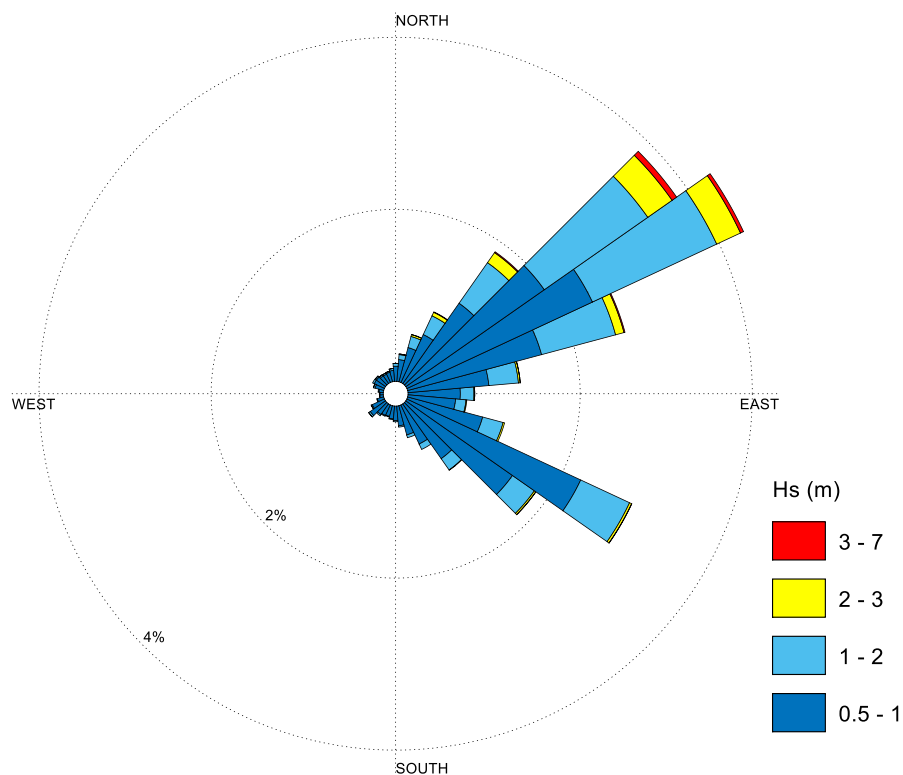


Figura 5-3 - Distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso con $H_s > 0.5$ m nel punto ERA5 Ravenna di coordinate 44.50°N, 12.50°E

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 24 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

Tabella 5-1 - Numero di eventi di moto ondoso al largo di Ravenna suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione, ricostruiti dall'ECMWF. Punto di acquisizione ERA5 Ravenna 44.50°N - 12.50°E. Periodo di riferimento 1979 - 2021.

	Numero di eventi (Hs)												
Direzione d'onda °N	Altezza d'onda (m)												Tot
	0.00	0.25	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 4.50	> 4.50		
	0.25	0.50											
10	3771	2474	1014	143	75	21	6	2					7506
20	4523	3411	1648	336	169	66	18	2	1				10174
30	5028	5014	2435	604	302	139	31	11	10				13574
40	5738	7098	4476	1471	700	372	165	45	0				20065
50	5749	8164	7642	3654	1879	908	392	182	57	3			28630
60	5781	8633	9231	3983	2023	842	307	98	34	9	5		30946
70	6062	7226	6252	2470	886	298	83	32	10	3			23322
80	5835	5233	3685	1064	237	72	5	3					16134
90	6808	4561	2381	506	91	28	5	1					14381
100	7705	5369	2187	381	75	30	6						15753
110	9967	8505	3547	741	187	48	16						23011
120	11227	14335	8744	1907	454	69	30	6	5				36777
130	8399	10971	5956	947	223	58	19	3					26576
140	5203	6486	3076	537	68	12	1						15383
150	3397	4126	1978	243	19								9763
160	2376	3028	1386	122	5								6917
170	1873	2314	903	57	2								5149
180	1644	1891	677	47	1								4260
190	1411	1598	595	35	0								3639
200	1140	1377	511	28	0								3056
210	1116	1233	537	33	6								2925
220	1095	1278	610	53	8								3044
230	964	1120	842	77	2	3							3008
240	1038	1002	615	46	1	2							2704
250	1078	824	313	27									2242
260	1150	737	163	14	1								2065
270	1138	679	159	21	5								2002
280	1336	743	211	37	2								2329
290	1919	851	412	57	14	2							3255
300	2982	1123	521	72	4								4702
310	3434	1358	509	53	8	2							5364
320	3702	1378	440	55	7	1							5583
330	3675	1462	433	51	9	3							5633
340	3550	1387	451	41	6	2							5437
350	3280	1572	513	76	7	2							5450
360	3453	1919	686	89	30	7	1						6185
N° di eventi	138547	130480	75739	20078	7506	2987	1085	385	117	15	5		376944

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 25 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

Tabella 5-2 - Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso al largo di Ravenna suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione, ricostruiti dall'ECMWF. Punto di acquisizione ERA5 Ravenna 44.50°N – 12.50°E. Periodo di riferimento 1979 – 2021.

		Frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa												
Direzione d'onda °N	Altezza d'onda (m)												Tot	
	0.00	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	> 4.50			
	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50				
10	1.000	0.656	0.269	0.038	0.020	0.006	0.002	0.001					1.991	
20	1.200	0.905	0.437	0.089	0.045	0.018	0.005	0.001	0.000				2.699	
30	1.334	1.330	0.646	0.160	0.080	0.037	0.008	0.003	0.003				3.601	
40	1.522	1.883	1.187	0.390	0.186	0.099	0.044	0.012					5.323	
50	1.525	2.166	2.027	0.969	0.498	0.241	0.104	0.048	0.015	0.001			7.595	
60	1.534	2.290	2.449	1.057	0.537	0.223	0.081	0.026	0.009	0.002	0.001		8.210	
70	1.608	1.917	1.659	0.655	0.235	0.079	0.022	0.008	0.003	0.001			6.187	
80	1.548	1.388	0.978	0.282	0.063	0.019	0.001	0.001					4.280	
90	1.806	1.210	0.632	0.134	0.024	0.007	0.001	0.000					3.815	
100	2.044	1.424	0.580	0.101	0.020	0.008	0.002						4.179	
110	2.644	2.256	0.941	0.197	0.050	0.013	0.004						6.105	
120	2.978	3.803	2.320	0.506	0.120	0.018	0.008	0.002	0.001				9.757	
130	2.228	2.911	1.580	0.251	0.059	0.015	0.005	0.001					7.050	
140	1.380	1.721	0.816	0.142	0.018	0.003	0.000						4.081	
150	0.901	1.095	0.525	0.064	0.005								2.590	
160	0.630	0.803	0.368	0.032	0.001								1.835	
170	0.497	0.614	0.240	0.015	0.001								1.366	
180	0.436	0.502	0.180	0.012	0.000								1.130	
190	0.374	0.424	0.158	0.009									0.965	
200	0.302	0.365	0.136	0.007									0.811	
210	0.296	0.327	0.142	0.009	0.002								0.776	
220	0.290	0.339	0.162	0.014	0.002								0.808	
230	0.256	0.297	0.223	0.020	0.001	0.001							0.798	
240	0.275	0.266	0.163	0.012	0.000	0.001							0.717	
250	0.286	0.219	0.083	0.007									0.595	
260	0.305	0.196	0.043	0.004	0.000								0.548	
270	0.302	0.180	0.042	0.006	0.001								0.531	
280	0.354	0.197	0.056	0.010	0.001								0.618	
290	0.509	0.226	0.109	0.015	0.004	0.001							0.864	
300	0.791	0.298	0.138	0.019	0.001								1.247	
310	0.911	0.360	0.135	0.014	0.002	0.001							1.423	
320	0.982	0.366	0.117	0.015	0.002	0.000							1.481	
330	0.975	0.388	0.115	0.014	0.002	0.001							1.494	
340	0.942	0.368	0.120	0.011	0.002	0.001							1.442	
350	0.870	0.417	0.136	0.020	0.002	0.001							1.446	
360	0.916	0.509	0.182	0.024	0.008	0.002	0.000						1.641	
Freq. Accadimento	36.755	34.615	20.093	5.327	1.991	0.792	0.288	0.102	0.031	0.004	0.001		100	

Il diagramma polare di Figura 5-3 (clima ondametrico medio annuale) mostra che il punto in esame posto a largo del sito di interesse, presenta due settori di traversia, ricadenti nel I quadrante (settore Nord-Est - Grecale) e nel II quadrante (settore Sud-Est - Scirocco).

Gli stati di mare provenienti dal I quadrante risultano sia di maggiore intensità, sia di maggiore frequenza rispetto a quelli provenienti dal II quadrante e pertanto il settore di Grecale può essere considerato il settore di traversia principale.

Il settore di Scirocco è compreso tra le direzioni 100° e 160°N, mentre quello di Grecale è compreso tra le direzioni 0° e 90°N.

In Figura 5-4 sono riportate le rose ondametriche medie stagionali desunte sempre dalla serie storica. La figura mostra che la frequenza delle onde provenienti da Grecale risulta in generale prevalente durante l'anno rispetto alle onde provenienti da Scirocco, le quali si verificano più frequentemente durante la primavera.

Comunque le onde di maggiore altezza provengono tutto l'anno dal settore di Grecale.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 26 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

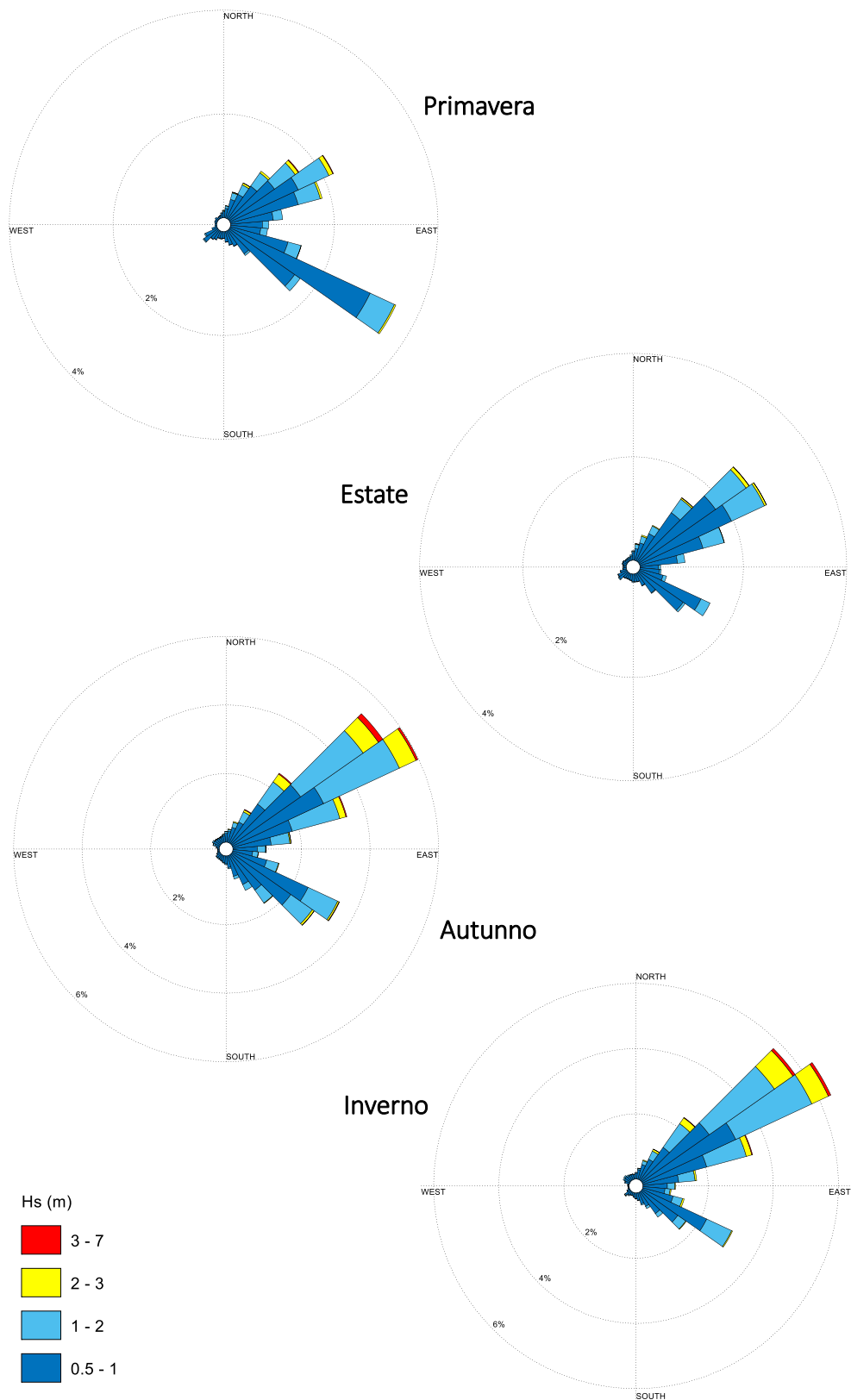


Figura 5-4 - Rose di distribuzione direzionale su base stagionale degli eventi di moto ondoso con $H_s > 0.5m$ nel punto ERA 5 Ravenna di coordinate 44.50°N- 12.50°E

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 27 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

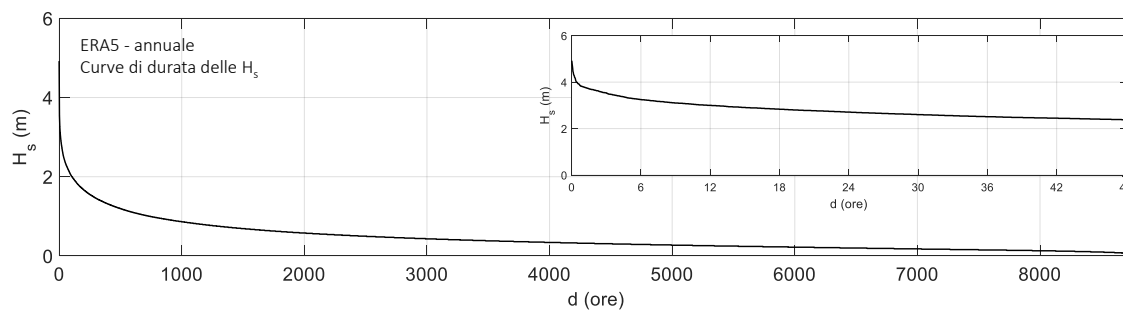


Figura 5-5 - Curva di durata annuale delle H_s per il punto ERA5 Ravenna. (44.50°N-12.50°E)

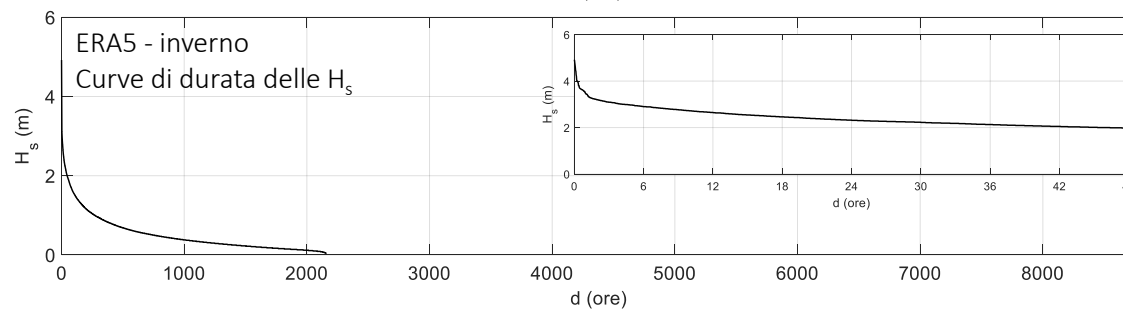
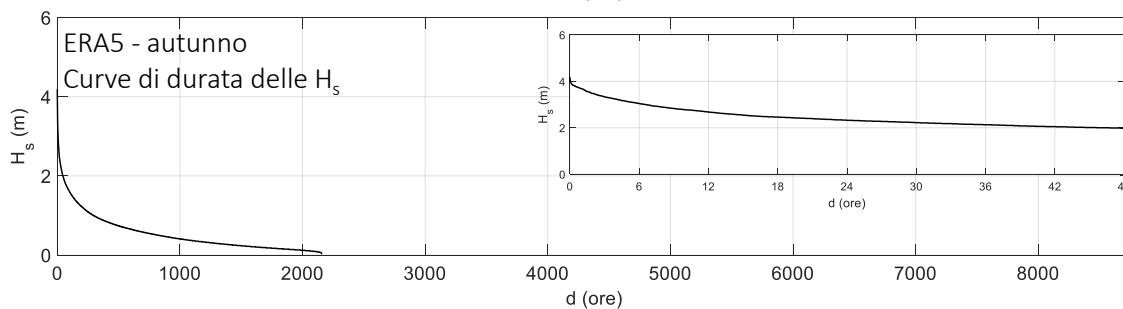
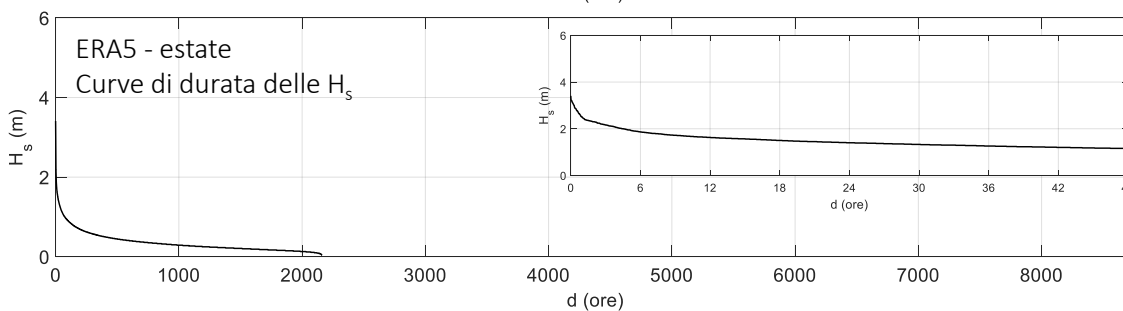
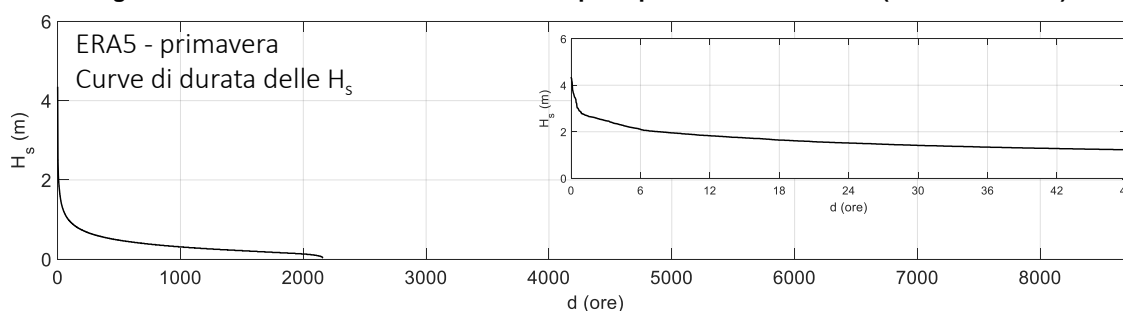


Figura 5-6 - Curve di durata stagionali delle H_s per il punto ERA5 Ravenna (44.50°N-12.50°E).

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 28 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

Nella Figura 5-5 e nella Figura 5-6 sono riportate rispettivamente le curve di durata delle altezze d'onda significative H_s medie annuali e stagionali per il punto ERA5 Ravenna calcolate sulla base della serie storica ECMWF.

Nella Tabella 5-3 infine sono riportate le frequenze di superamento medie annuali e stagionali (esprese rispettivamente in ore/anno e in giorni/anno), di prefissate soglie di H_s .

Tabella 5-3 - Frequenze medie annuali e stagionali di superamento di soglie di H_s per il punto ERA5 Ravenna.

ANNUALE - ERA5			PRIMAVERA - ERA5			AUTUNNO - ERA5		
H_s (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)	H_s (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)	H_s (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)
0.5	2474.59	103.1	0.5	471.85	19.7	0.5	833.81	34.7
1.0	747.78	31.2	1.0	89.47	3.7	1.0	298.48	12.4
1.5	277.58	11.6	1.5	25.18	1.0	1.5	122.23	5.1
2.0	106.74	4.4	2.0	7.72	0.3	2.0	46.75	1.9
2.5	35.83	1.5	2.5	2.83	0.1	2.5	16.38	0.7
3.0	12.11	0.5	> 3	0.62	0.0	3.0	6.59	0.3
3.5	2.79	0.1				3.5	1.84	0.1
> 4	0.44	0.0				> 4	0.12	0.0

ESTATE - ERA5			INVERNO - ERA5		
H_s (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)	H_s (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)
0.5	409.09	17.0	0.5	759.84	31.7
1.0	76.12	3.2	1.0	283.06	11.8
1.5	18.21	0.8	1.5	111.96	4.7
> 2	4.55	0.2	2.0	47.35	2.0
			2.5	16.62	0.7
			3.0	5.05	0.2
			3.5	0.95	0.0
			> 4	0.28	0.0

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 29 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

6 CALIBRAZIONE DEI DATI ONDAMETRICI PER LA VALUTAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI

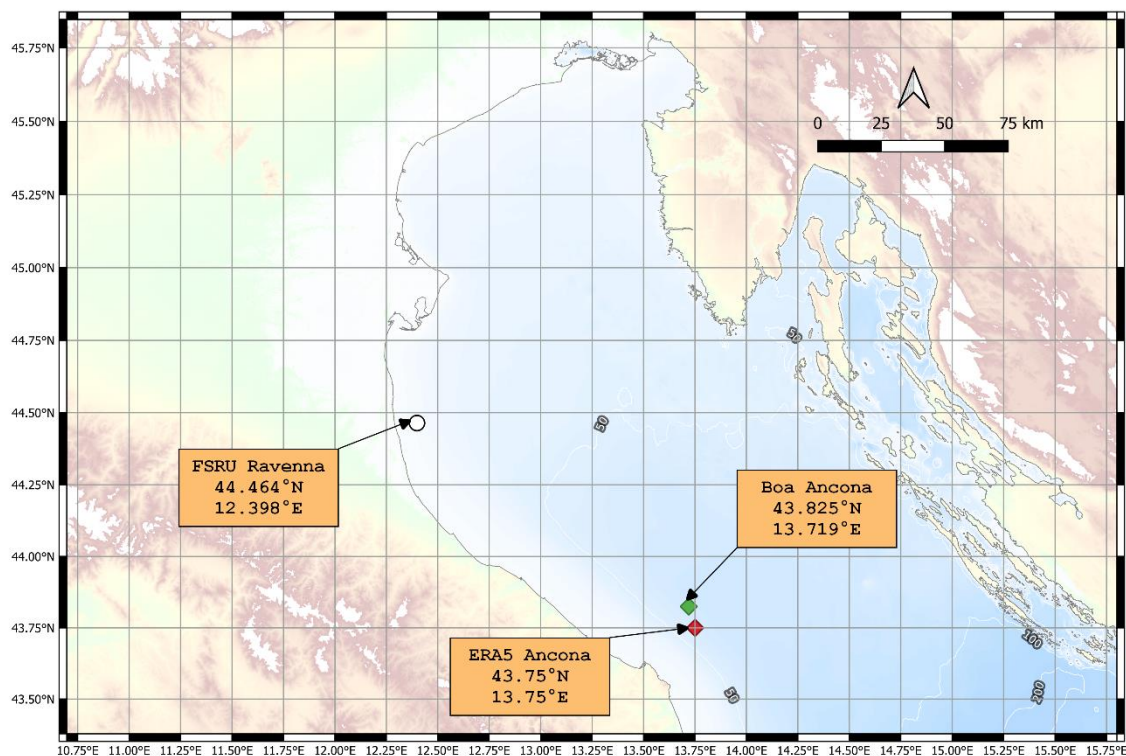


Figura 6-1 – Localizzazione geografica dei dati ondametrici utilizzati per la calibrazione degli eventi estremi.

I dati ondametrici ricostruiti in ri-analisi dai principali centri meteorologici mondiali sono inevitabilmente soggetti ad errori, i quali dipendono dagli errori commessi nel ricostruire i campi di vento che si ripercuotono sulla ricostruzione del moto ondoso.

Mentre dal punto di vista climatico questi errori sono generalmente poco significativi per definire le condizioni medie di esposizione ondametrica di un sito, invece, gli eventuali errori possono condizionare in modo rilevante la statistica delle onde estreme le quali svolgono un ruolo fondamentale per il dimensionamento strutturale delle opere marittime.

Pertanto, risulta sempre di estrema importanza confrontare i dati ondametrici ricostruiti in ri-analisi con dati provenienti da misure dirette per verificare o meno la necessità di effettuare una calibrazione dei dati ricostruiti in condizioni estreme.

Con riferimento alla Figura 6-1, nel caso in esame la stazione di misura diretta selezionata per la calibrazione degli eventi estremi è quella di Ancona facente parte della rete ondametrica nazionale (RON) oggi gestita dall'ISPRA. La Boa di Ancona è stata operativa con intervalli non regolari dal 1999 fino ad oggi.

Tenuto conto che la boa ondametrica di Ancona ricade nella stessa area di generazione delle onde che appartengono a largo al settore di traversia principale del sito di interesse, si è deciso di determinare la necessità o meno di effettuare una

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 30 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

calibrazione dei dati ERA5 per il sito di interesse, effettuando un confronto tra i dati ERA5 e i dati misurati della boa di Ancona.

Per effettuare il confronto in modo corretto si sono quindi acquisiti i dati ERA5 per il punto di griglia più vicino alla posizione dove la boa ondometrica di Ancona è stata operativa tra il 1999 e il 2022 (vedi Figura 6-1). Questo punto è stato definito ERA5 Ancona.

Come di seguito illustrato, si sono utilizzati due approcci differenti per confrontare i dati di moto ondoso ricostruiti ERA5 con quelli osservati dall'ondametro di Ancona.

Il primo confronto, di seguito indicato come "confronto sincrono", fornisce delle indicazioni sull'errore che viene mediamente commesso con la tecnica di ricostruzione del moto ondoso in ri-analisi. La seconda metodologia di confronto, di seguito indicata come "confronto asincrono", è di interesse per valutare l'eventuale necessità di calibrare i valori di Hs raggiunti al culmine delle singole mareggiate necessari per analizzare gli stati di mare estremi e quindi per definire la correlazione Hs – Tempo di ritorno (Tr).

Queste tecniche di confronto, sviluppate teoricamente da De Girolamo et al. (2017), si basano sul concetto che gli errori, tra le misure e i dati ricostruiti, valutati nello stesso istante, errori sincroni, risentono spesso di un errore legato alla tempistica (timing) con cui si sviluppa l'evento meteomarinico. Tale errore può essere eliminato facendo ricorso al confronto asincrono, ovvero confrontando i valori di Hs al culmine delle mareggiate, i quali possono avvenire anche in tempi leggermente diversi, purché appartenenti allo stesso evento meteorologico estremo. L'applicazione di questa tecnica consente di confrontare e quindi di calibrare agevolmente i dati da utilizzare per effettuare la statistica degli eventi estremi.

6.1 Confronto degli eventi sincroni al largo di Ancona

Per quanto riguarda la prima metodologia di analisi (confronto sincrono), i dati ricostruiti ERA5 al largo di Ancona sono stati posti a confronto con i dati sincroni estratti dalle due serie storiche, per i periodi di tempo in comune.

I risultati del confronto sincrono, mostrati nel grafico di destra della Figura 6-2, evidenziano che mediamente i dati ricostruiti ERA5 tendono a sottostimare i dati misurati.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 31 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

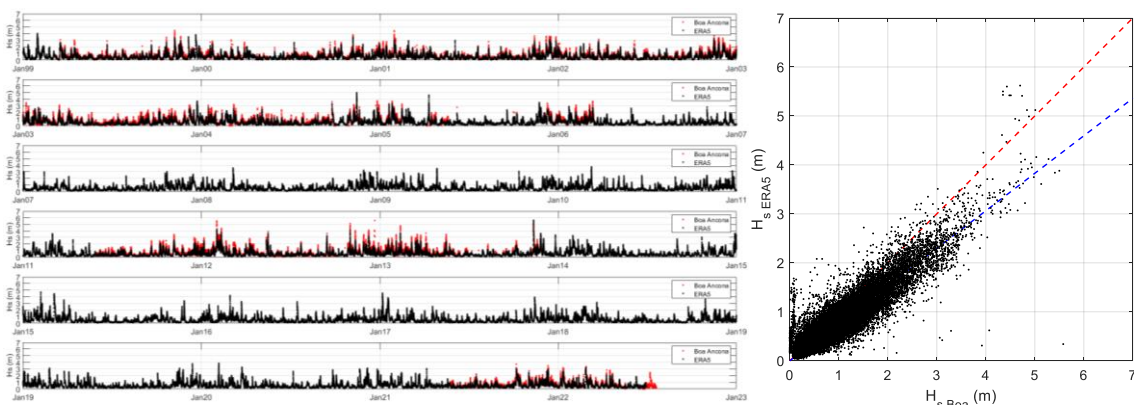


Figura 6-2 – Confronto dei dati di moto ondoso ricostruita dall'ECMWF (ERA5 Ancona) con i dati sincroni registrati dalla boa ondometrica di Ancona per il periodo 1999-2022.

6.2 Confronto degli eventi estremi asincroni al largo di Ancona

Nei grafici polari di Figura 6-3 sono riportati i valori di altezza significativa e direzione di provenienza al colmo delle mareggiate, definite secondo quanto specificato nel seguito, estratte dalla serie storica di misure di moto ondoso effettuate dalla boa ondometrica di Ancona (pannello di sinistra) e dalla serie di dati ricostruiti di moto ondoso ERA5 Ancona (pannello di destra).

I dati fanno riferimento alle stesse mareggiate ma come detto non sono sincroni, ovvero si accetta che i colmi delle singole mareggiate possano avvenire in istanti diversi pur appartenendo allo stesso evento meteorologico.

La singola mareggiata è stata identificata in base al soddisfacimento contemporaneo dei seguenti requisiti:

- altezza d'onda H_s sopra la soglia di 1.0 m per più di 12 ore;
- altezza d'onda H_s al colmo dell'evento meteorologico uguale o superiore alla soglia 2.0 m;
- distanza tra due mareggiate pari ad almeno 48 ore.

Il soddisfacimento di questi requisiti consente di definire i valori estremi di moto ondoso raggiunti al culmine delle mareggiate che risultano statisticamente indipendenti l'uno dall'altro.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 32 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

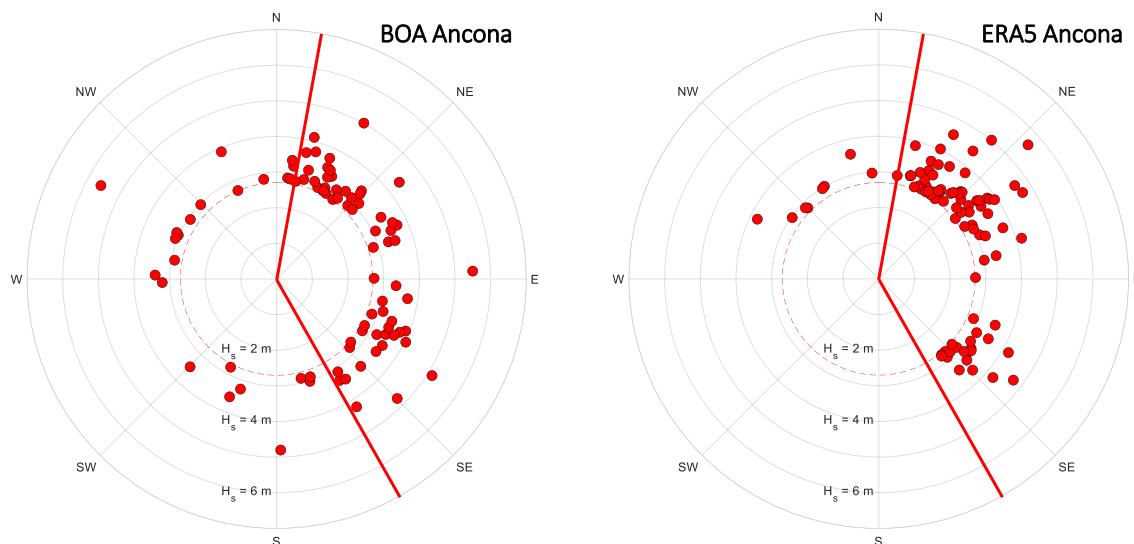


Figura 6-3 – Distribuzione dei valori di altezza d'onda H_s al colmo delle mareggiate registrate dalla boa di Ancona (sinistra) e ricostruiti dall'ECMWF (ERA5 Ancona) nel medesimo periodo.

Il campione delle mareggiate coesistenti è stato ulteriormente ristretto limitando il confronto agli eventi che presentano al loro culmine valori $H_s > 2.6$ m, ottenendo un totale di circa 50 eventi.

I grafici polari di Figura 6-3 mostrano che dal punto di vista direzionale i due set di dati risultano molto simili.

Nella Figura 6-4 gli stessi dati sono confrontati prendendo in esame solo i valori di H_s riportando in ordinata i valori ERA5 Ancona e in ascissa i valori misurati dalla boa ondometrica. Il confronto mostra di nuovo una sottostima dei valori ricostruiti.

Per calcolare un coefficiente di calibrazione medio da applicare solo agli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti in re-analisi, è stata presa in esame la retta di interpolazione di equazione $HP = A+B \cdot HM$. Imponendo alla stessa retta il passaggio per l'origine ($A=0$), si è calcolato applicando il metodo dei minimi quadrati il coefficiente B per il quale si è ottenuto $B = 0.85$. Sostanzialmente per correggere la sottostima degli eventi estremi individuata nel database ERA5 è necessario incrementare i valori di H_s ricostruiti di circa il 17% (coefficiente di calibrazione 1.17).

Ipotizzando che anche il punto ERA5 Ravenna di coordinate 44.50°N-12.50°E, posto a largo di Ravenna e ricadente nella stessa area di generazione delle onde di Ancona sia soggetto ad un errore uguale a quello individuato per Ancona, si è deciso di introdurre nella analisi delle onde estreme del punto ERA5 lo stesso coefficiente di calibrazione determinato per Ancona.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 33 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

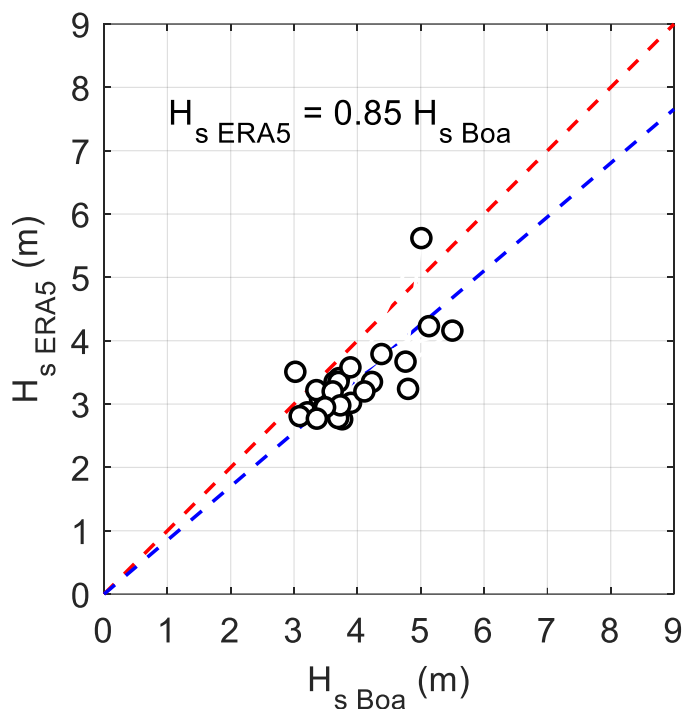


Figura 6-4 Confronto asincrono tra i valori al colmo delle mareggiate (con H_s maggiore di 2.6 m) registrati dalla boa di Ancona tra il 1999 e il 2022 e quelli ricostruiti dall'ECMWF con il modello WAM in prossimità della boa ondamentrica.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 34 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

7 ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI DI MOTO ONDO SO A LARGO

7.1 Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati

Per determinare la correlazione $H_s - T_r$ (T_r = tempo di ritorno) a largo di Ravenna, è stata eseguita l'analisi statistica degli eventi estremi utilizzando come campione di dati la serie dei colmi delle mareggiate estratti dalle serie storiche ERA5 Ravenna calibrati come descritto nel capitolo precedente.

Per eseguire l'analisi statistica delle altezze d'onda risulta necessario selezionare preliminarmente dei campioni di dati che rispondano al doppio requisito di risultare tra di loro statisticamente **indipendenti ed omogenei**.

Per quanto riguarda l'indipendenza statistica si è utilizzato il metodo POT (Peaks Over Threshold) che consiste nel prendere in esame il solo valore massimo di altezza d'onda significativa (valore di picco) che si verifica al culmine di una singola mareggiata. L'individuazione di ciascuna mareggiata nell'ambito della serie storica viene effettuata introducendo una soglia di altezza d'onda e considerando che il singolo evento (mareggiata) abbia inizio quando l'altezza d'onda significativa superi per la prima volta il valore della soglia prestabilito.

Conseguentemente si ipotizza che l'evento termini quando l'altezza d'onda significativa assume per la prima volta un valore inferiore a quello di soglia oppure quando si verifica un forte scarto della direzione del moto ondoso.

Selezionati gli "eventi di picco", l'omogeneità dei dati di solito viene assicurata raggruppando gli stessi dati in eventi caratterizzati da una simile genesi meteorologica. Ciò normalmente si traduce nel separare i valori massimi di altezze d'onda registrati in distinti settori di provenienza degli stati di mare.

Gli stati di mare, caratterizzati da una altezza d'onda significativa (H_s) superiore alla soglia individuata, sono quindi oggetto di una elaborazione statistica al fine di ricavare le caratteristiche del moto ondoso da associare ad assegnati tempi di ritorno T_R (o probabilità di occorrenza).

Le leggi di distribuzione di probabilità cumulata di non superamento (funzione di ripartizione) utilizzate sono:

Distribuzione di Weibull:

$$P_{X_{max}}(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - B}{A} \right)^k \right]$$

Distribuzione di Gumbel:

$$P_{X_{max}}(x) = \exp \left[- \exp \left(\frac{x - B}{A} \right) \right]$$

dove X_{max} è la variabile aleatoria, x il valore di non superamento mentre A , B e k sono le costanti delle distribuzioni, che rappresentano rispettivamente il parametro di scala, di posizione e di forma. Il parametro k per la distribuzione di Weibull è assunto pari a 0.75, 1.0, 1.4 e 2.0.

La valutazione dei parametri della distribuzione richiede la preliminare stima della frequenza campionaria dei dati. Il campione dei dati viene ordinato in senso decrescente e

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 35 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

per ogni m-esimo evento viene calcolata la frequenza campionaria di non superamento utilizzando la seguente formula di generale (plotting position):

$$\widehat{F}_m = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta}, m = 1, 2, K, \dots, N$$

Introducendo la variabile ridotta:

$$y_{(m)} = [-\ln(1 - \widehat{F}_m)]^{\frac{1}{k}}$$

viene applicato il metodo dei minimi quadrati per determinare i parametri A e B della retta:

$$x_{(m)} = B + A \times y_{(m)}$$

Definita la funzione di probabilità di non superamento e tenendo conto che la probabilità cumulata di non superamento è legata al tempo di ritorno dell'evento dalla relazione:

$$T_r(X \leq x) = \frac{1}{(1 - P(X \leq x))}$$

è possibile valutare il valore massimo dell'altezza d'onda significativa, corrispondente ad un tempo di ritorno assegnato.

Una volta eseguite le elaborazioni di regolarizzazione statistica (Gumbel e Weibull), occorre verificare la bontà dei risultati ottenuti. A tale scopo, Goda definisce due diversi criteri da seguire per scartare le distribuzioni statistiche non adatte:

1. Deviation of OutLier (DOL) - dove si controlla che l'evento con il maggiore valore di H_s ricada all'interno di un determinato campo di validità;
2. REsidue of Correlation coefficient (REC) - il coefficiente di correlazione residuo ($\Delta r = 1 - r$) deve essere inferiore ad una determinata soglia definita come $\Delta r = 95\%$.

Il criterio MIR (Minimum ratio of Residual correlation coefficient), proposto sempre da Goda, consente infine di selezionare, tra le distribuzioni rimaste valide, quella che meglio si adatta al campione esaminato; tale criterio si basa sul rapporto tra il coefficiente di correlazione residuo (Δr) e quello medio, che può essere stimato attraverso una relazione empirica (funzione della numerosità del campione e della distribuzione); la distribuzione di migliore adattamento è quella che presenta il minimo valore di tale rapporto.

Il metodo POT prevede che le sole mareggiate che hanno all'interno del settore di competenza un'altezza significativa massima superiore ad una certa soglia vengano utilizzate per la successiva analisi statistica degli eventi estremi; viene quindi definito il parametro di taglio (censoring parameter):

$$v = \frac{N}{N_{tot}}$$

con N = numero degli eventi sopra la soglia e N_{tot} = numero totale delle mareggiate.

La scelta del valore di soglia rappresenta uno dei limiti nell'uso del metodo POT, infatti considerare una soglia eccessivamente piccola comporta di dare maggiore peso agli eventi di modesta entità (mareggiate frequenti), mentre con una soglia eccessivamente elevata viene selezionato un numero di eventi che può risultare piccolo a discapito della bontà della regolarizzazione statistica.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 36 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

Per la definizione della soglia si è fatto riferimento al metodo di Goda il quale prevede di scegliere un valore di soglia tale da poter includere nel campione un numero di eventi compreso tra 2 e 5 per anno.

7.2 Statistica degli eventi estremi per il punto ERA5 Ravenna 44.50°N-12.50°E

Come precedentemente esposto, l'analisi degli estremi è stata effettuata tramite l'utilizzo del metodo POT. Il risultato dell'analisi condotta prendendo in considerazione tutte le direzioni (0°N-360°N) ha portato all'individuazione di due settori di traversia, come riportato in Figura 7-1. Nella figura ogni singolo punto rappresenta il valore di H_s al culmine di un evento estremo di moto ondoso al quale è stato applicato il coefficiente di calibrazione determinato in precedenza.

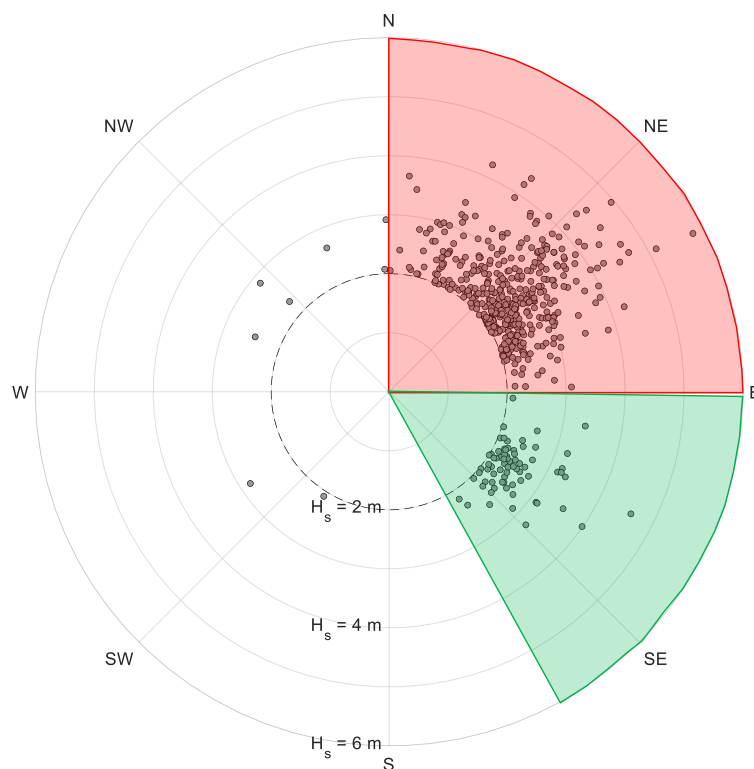


Figura 7-1 - Individuazione dei settori di traversia per il punto di acquisizione ERA5 Ravenna 44.50°N-12.50°N

Il primo settore risulta compreso tra 0°N e 90°N, individuato come settore di Grecale. Questo risulta essere il settore con il più alto numero di eventi. Il secondo settore di traversia viene individuato come compreso tra le direzioni 91°N e 160°N (settore di Scirocco). Data l'esposizione geografica del punto di acquisizione, è possibile osservare che questo sia schermato a Nord da punta della Maestra (costa veneta del delta del Po) e a sud dal Promontorio del Conero dove sorge il Porto di Ancona (costa marchigiana).

Ponendo una soglia pari a $H_s = 2.7$ m, si sono individuati in totale circa 160 eventi estremi per il settore di grecale (come mostrato in Figura 7-2) compreso tra 0°N e 90°N. Gli eventi estremi caratterizzate dai valori più elevati di altezza d'onda significativa H_s per il settore di Grecale sono riportati in Tabella 7-1.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 37 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

Tabella 7-1 Elenco dei 15 eventi estremi di maggiore intensità per il settore di Nord-Est (Grecale).

N° Eventi	Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
1	2015-02-06 05:00	5.8	9.3	62.5
2	2005-04-11 07:00	5.1	9.0	61.9
3	1983-12-02 09:00	4.9	8.5	49.6
4	2010-03-10 05:00	4.7	8.5	59.9
5	2013-11-11 18:00	4.6	8.6	57.5
6	1996-12-26 18:00	4.5	8.3	47.4
7	1992-12-28 09:00	4.5	8.2	52.2
8	2012-02-10 21:00	4.5	8.5	60.7
9	2004-11-14 09:00	4.4	8.1	46.5
10	1995-03-28 05:00	4.3	7.2	33.7
11	2005-11-23 09:00	4.3	8.3	55.0
12	1995-12-13 19:00	4.2	8.5	70.1
13	1999-11-07 08:00	4.2	7.7	59.1
14	1981-06-18 05:00	4.2	7.4	24.5
15	1979-11-11 05:00	4.2	7.7	33.1

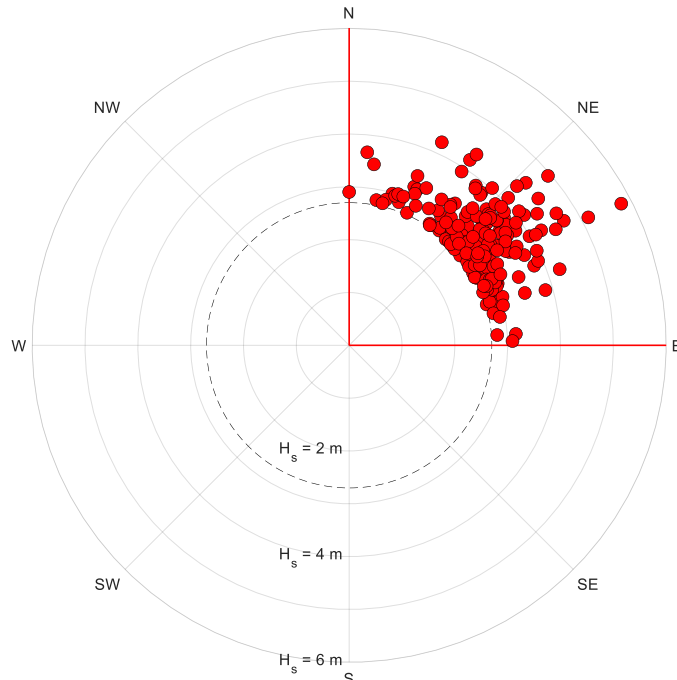


Figura 7-2 - Individuazione tramite metodo POT degli eventi estremi per il punto ERA5 Ravenna 30°N – 90°N. La soglia scelta risulta pari a 2.7 m

Al fine di ottenere lo stesso numero di eventi per il settore di scirocco (91°N-160°N), si è posta una soglia per il troncamento degli estremi pari a $H_s = 1.9$ m. Il risultato è riportato in Figura 7-3. Gli eventi estremi caratterizzate dai valori più elevati di altezza d'onda significativa H_s per il settore di Scirocco, sono riportati in Tabella 7-2. Con riferimento alla Tabella 7-2, si osserva che l'evento n. 2 proveniente da Scirocco e avvenuto alla fine del

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 38 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

mese di ottobre del 2018, coincide con l'evento meteorologico caratterizzato da intensi venti di Scirocco che interessarono tutta l'Italia, che causò in Veneto numerosi danni, a Venezia una marea meteorologica particolarmente rilevante e in Liguria numerosi danni ai Porti di Rapallo e Santa Margherita Ligure.

Tabella 7-2 Elenco dei 15 eventi estremi di maggiore intensità per il settore di Sud-Est (Scirocco).

N° Eventi	Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
1	1979-12-22 08:00	4.6	9.2	116.8
2	2018-10-29 17:00	4.0	8.5	124.9
3	1990-12-09 18:00	3.6	7.9	123.9
4	1979-02-17 00:00	3.4	7.8	99.9
5	1986-02-01 00:00	3.3	9.4	115.8
6	1992-12-08 15:00	3.3	8.3	96.7
7	2000-11-06 20:00	3.2	7.7	134.2
8	2012-10-31 21:00	3.2	7.5	115.1
9	1980-01-15 18:00	3.2	8.3	113.9
10	2016-02-29 02:00	3.2	8.3	109.1
11	2009-04-27 21:00	3.2	8.1	115.5
12	2013-02-11 18:00	3.1	7.7	127.0
13	1987-11-24 17:00	3.1	8.1	127.0
14	1996-12-10 07:00	2.9	7.0	92.0
15	1980-10-11 15:00	2.9	6.5	133.3

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 39 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

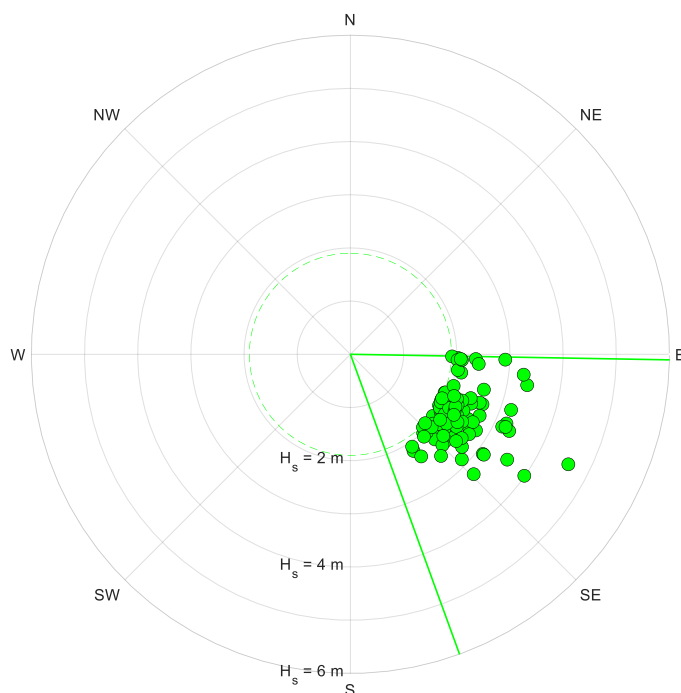


Figura 7-3 - Individuazione tramite metodo POT degli eventi estremi per il punto ERA5 Ravenna 91°N-160°N. La soglia scelta risulta pari a 1.9 m

Su tali campioni statistici si è quindi applicata una funzione di probabilità alla Weibull con fattore $k = 1$ che è risultata la più adatta a rappresentare gli eventi estremi, i cui risultati sono riportati in Figura 7-4 e Figura 7-5.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 40 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

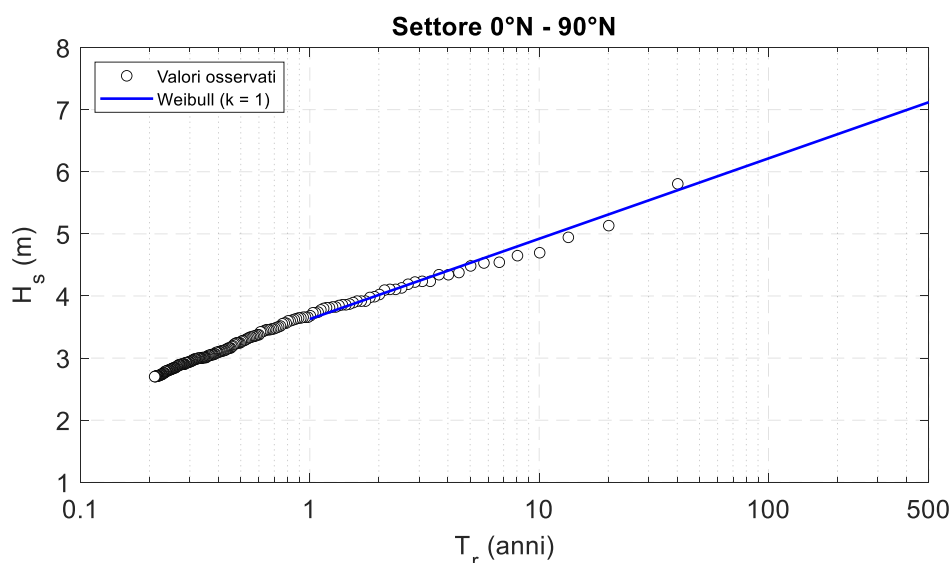


Figura 7-4 - Altezze d'onda estreme - metodo POT (soglia posta uguale a 2.7 m) Legge Weibull (k=1.00)
– Settore di grecale 0°N-90°N per il punto ERA5 Ravenna 44.50°N-12.50°E.

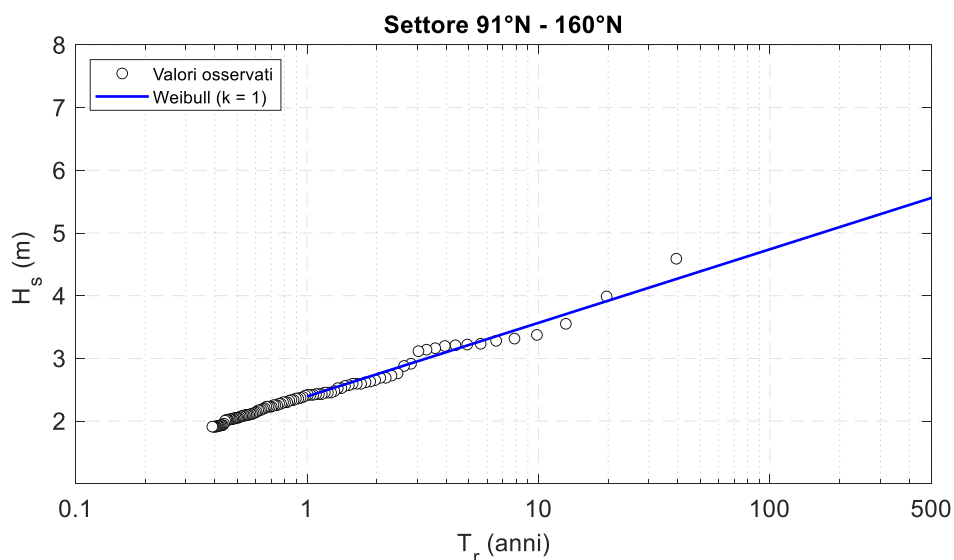


Figura 7-5 - Altezze d'onda estreme - metodo POT (soglia posta uguale a 1.9 m) Legge Weibull (k=1.00)
– Settore di scirocco 91°N-160°N per il punto ERA5 Ravenna 44.50°N-12.50°E.

Nella Tabella 7-3 e Tabella 7-4 sono riportati, per i due settori di traversia, i valori di H_s e T_p relativi ai tempi di ritorno T_r di 2, 10, 25, 50 e 100 anni. Ai valori estremi di H_s determinati, si sono associati i valori del periodo di picco spettrale T_p tramite la legge esponenziale:

$$T = aH_s^b$$

I risultati ottenuti, applicando il metodo dei minimi quadrati ai soli eventi estremi sopra soglia, sono riportati in Figura 7-6 nel pannello di sinistra per il settore di maestrale e nel pannello di destra per quello di Scirocco.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 41 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

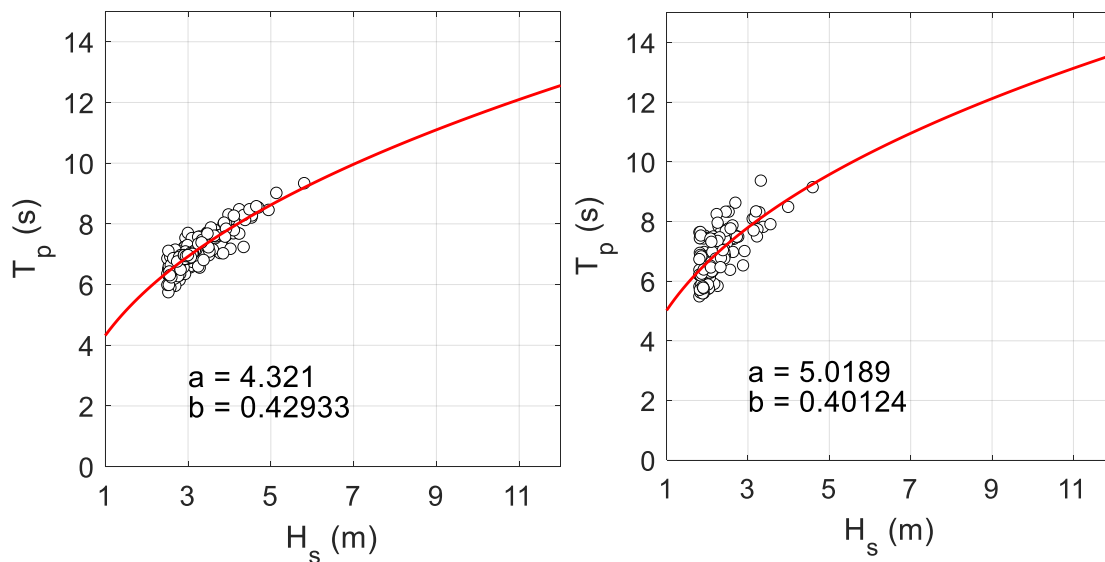


Figura 7-6 Legge H_s - T_p per il settore di Grecale (sinistra) e il settore di Scirocco (destra).

Tabella 7-3 Eventi estremi – Settore di Grecale

Tr (anni)	Hs (m)	Tp (s)
2	4.02	7.85
5	4.53	8.27
10	4.92	8.57
20	5.31	8.85
25	5.44	8.94
50	5.83	9.21
100	6.22	9.47
500	7.12	10.04

Tabella 7-4 Eventi estremi – Settore di Scirocco

Tr (anni)	Hs (m)	Tp (s)
2	2.75	7.53
5	3.21	8.02
10	3.57	8.36
20	3.92	8.68
25	4.03	8.78
50	4.39	9.08
100	4.74	9.37
500	5.56	9.99

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 42 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

8 ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DELLA VELOCITA' DEL VENTO

I dati anemometrici ricostruiti in re-analisi per il punto ERA5 Ravenna sono stati analizzati statisticamente per definire la correlazione velocità del vento (W10) tempo di ritorno (Tr). W10 è il valore di velocità del vento alla quota +10.0m sul l.m.m.

I risultati ottenuti per i tempi di ritorno 2, 5 10, 20, 25, 50 e 100 anni sono mostrati in Tabella 8-1 dove la velocità del vento è fornita alla quota +10.0 m sul l.m.m. ed è espressa in nodi (kn).

Il pannello di sinistra della tabella mostra la correlazione Tr-Velocità del vento omnidirezionale ottenuta dal punto ERA5 Ravenna. Il pannello centrale e quello di destra mostrano invece la correlazione rispettivamente per il settore di traversia principale (settore di Grecale) e per il settore secondario (settore di Scirocco).

Tabella 8-1 – Valori estremi di vento derivati con una funzione di distribuzione di probabilità del tipo alla Weibull con coefficiente k = 1.

SETTORE OMNIDIREZIONALE [0°N - 360°N]		SETTORE I [0°N - 90°N]		SETTORE II [91°N - 160°N]		SETTORE III [225°N - 315°N]	
Tr	W10	Tr	W10	Tr	W10	Tr	W10
(anni)	(kn)	(anni)	(kn)	(anni)	(kn)	(anni)	(kn)
2	31.37	2	31.47	2	22.05	2	21.66
5	34.12	5	34.63	5	25.04	5	23.16
10	36.21	10	37.04	10	27.30	10	24.31
20	38.30	20	39.46	20	29.58	20	25.46
25	38.98	25	40.24	25	30.32	25	25.83
50	41.09	50	42.67	50	32.60	50	26.68
100	43.22	100	45.12	100	34.90	100	28.14

8.1 Correlazione altezza d'onda significativa Hs e velocità del vento W10

Al fine di correlare i valori di altezza d'onda significativa Hs con quelli relativi al vento W10 si è ricavata una legge esponenziale del tipo:

$$W10 = a \cdot H_s^b$$

Tale correlazione è riferita a due settori distinti. In Figura 8-1 sono riportati i risultati. Nel grafico di sinistra i dati si riferiscono al settore compreso tra 0°N e 90°N mentre nel grafico di destra i risultati fanno riferimento al settore compreso tra 90°N e 160°N.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 43 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

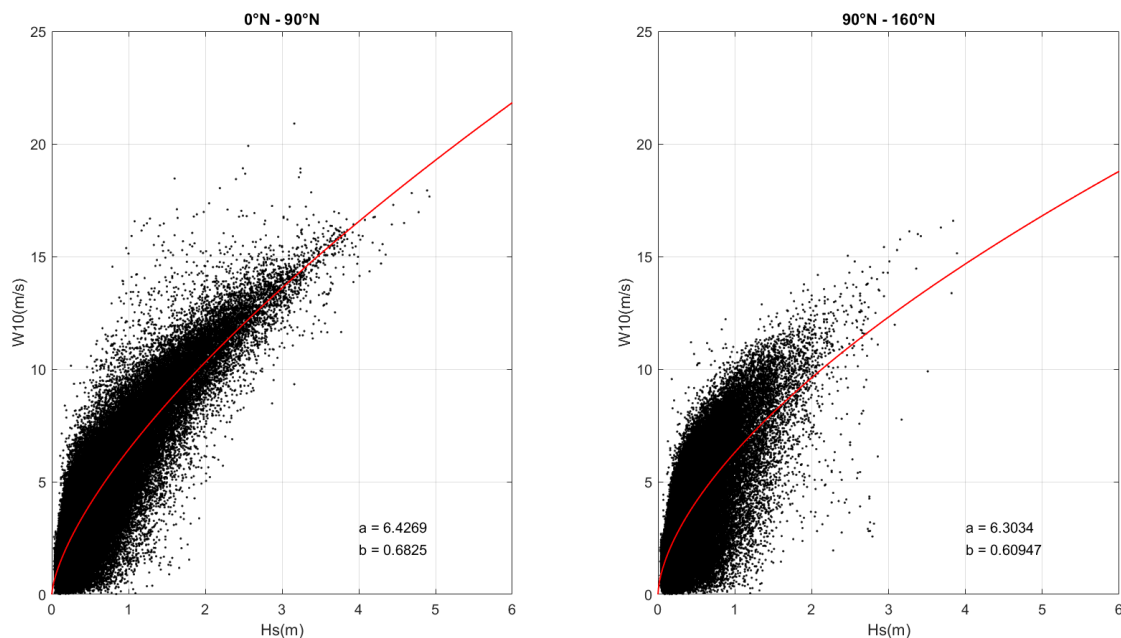


Figura 8-1 Grafico di sinistra: correlazione Hs-W10 per il settore Nord/Nord-Est. Grafico di destra: correlazione Hs-W10 per il settore di Sud-Est-

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 44 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

9 PROPAGAZIONE LARGO-RIVA

La propagazione largo-riva della serie storica ERA5 ha permesso di definire il clima ondametrico medio annuale in prossimità della zona di ormeggio della FSRU in funzione delle analoghe caratteristiche definite al largo e descritte nei paragrafi precedenti.

Per effettuare la propagazione dell'intera serie storica si è applicato il modello numerico di propagazione inversa spettrale MEROPE, sviluppato dalla società Modimar S.r.l.

Il modello numerico MEROPE risolve la rifrazione inversa spettrale di stati di mare e consente di determinare in un punto posizionato in costa (denominato punto d'inversa) le caratteristiche spettrali del moto ondoso che si propagano da largo a riva utilizzando una griglia di calcolo costruita sulla base dei dati batimetrici del paraggio d'interesse.

Il modello simula l'evoluzione spaziale di stati di mare rappresentati da uno spettro con energia distribuita in frequenza e direzione e riproduce gli effetti indotti sul moto ondoso dalla rifrazione e dallo shoaling causati dal fondale senza tenere conto degli effetti dissipativi dovuti al frangimento e dall'attrito sul fondo, utilizzando pertanto un approccio conservativo.

Il punto di inversa è stato posizionato nella zona dove verrà realizzata la diga foranea su un fondale naturale di circa 14 m.

Come descritto nel seguito, l'applicazione del modello numerico ha consentito di propagare in costa l'intera serie storica oraria ondametrica ricostruita in ri-analisi a largo su un arco di tempo di 43 anni.

In Figura 9-1 è rappresentato il dominio di calcolo utilizzato per le simulazioni effettuate con il modello MEROPE, definito sulla base dei dati batimetrici forniti integrati con quelli delle carte nautiche disponibili e del database opensource EMODNET.

Il suddetto dominio di calcolo ha dimensioni 65000 m x 125000 m ed è numericamente definito da una griglia di calcolo rettangolare con passo di discretizzazione di 50 m in entrambe le direzioni.

All'interno della griglia di calcolo è stato selezionato un punto di propagazione, indicato in Figura 9-1 come "Punto di inversa". La posizione è stata scelta in modo tale che il punto si trovasse nella zona dove verrà realizzata la nuova diga foranea ad una profondità di circa -14 m sul l.m.m. In Figura 9-1 è rappresentato inoltre il punto di ricostruzione del moto ondoso (hindcasting) indicato come "ERA5 Ravenna" il quale come detto è posizionato ad una profondità di circa -25 m sul l.m.m.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 45 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

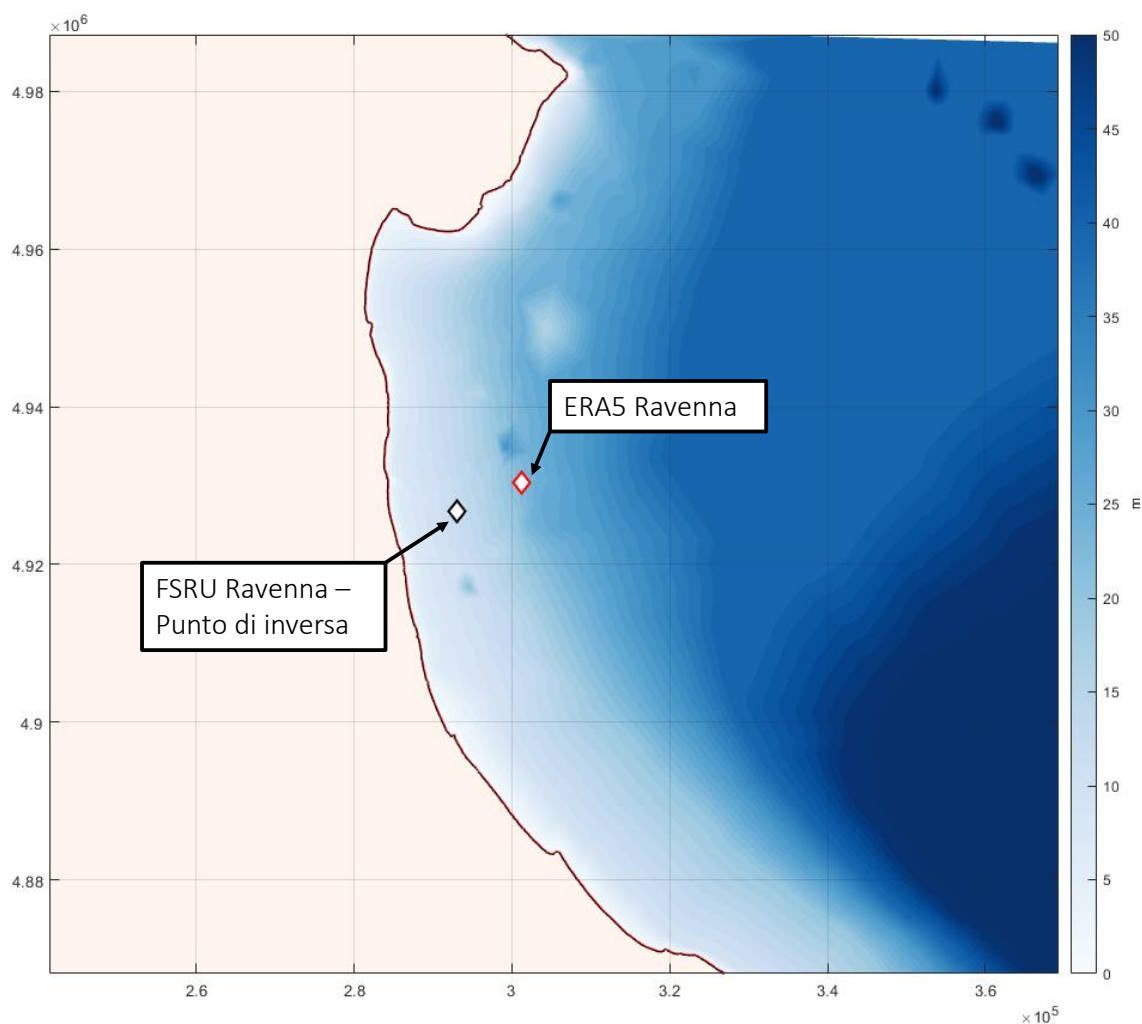


Figura 9-1 Griglia di calcolo utilizzata dal modello di inversa spettrale MEROPE.

9.1 Condizioni al contorno e dati di calcolo

Per i punti scelti sono stati calcolati 20 piani d'onda d'inversa per altrettanti periodi compresi tra 2 e 22 secondi, tracciando una serie di raggi (ortogonali ai fronti d'onda), spazati di 0.5° , sino a coprire l'intero settore (geografico) di traversia effettivo sotto costa. In Figura 9-2 sono rappresentati, a titolo di esempio, i raggi dell'inversa spettrale centrati nel punto di propagazione sotto costa ottenuti per il periodo di 5 s.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 46 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

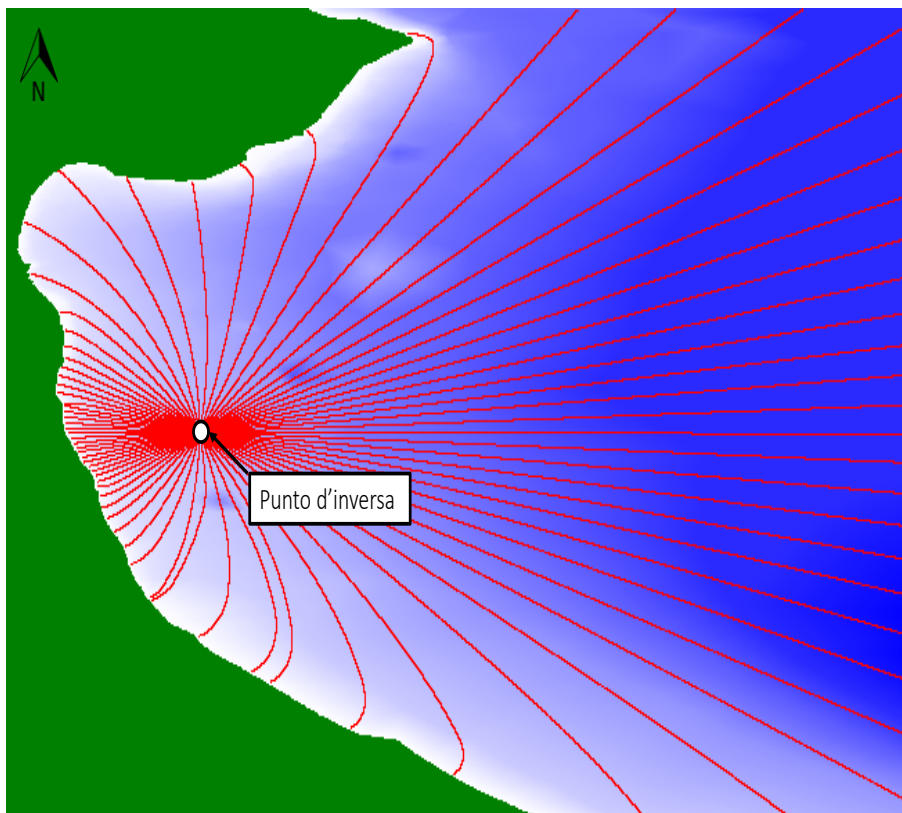


Figura 9-2 Esempio di tracciamento inverso dei raggi eseguito mediante il modello MEROPE per onde caratterizzate dal periodo di 5 s.

I 4000 piani d'onda inversi (20 x 200) così calcolati hanno consentito di costruire un database di correlazione largo-riva. Mediante questo database l'intera serie storica dei dati ERA5 al largo di Ravenna è stata propagata nel punto di ormeggio della FSRU ("Punto d'inversa").

Per simulare la dispersione dell'energia in frequenza e direzione si è utilizzata la funzione di densità spettrale:

$$S(f,\theta)=S(f)G(f,\theta)$$

dove la funzione $S(f)$ è stata espressa con uno spettro JONSWAP con $\gamma = 3.3$.

La funzione $G(f,\theta)$ viene esplicitata nel modello MEROPE sulla base dell'equazione fornita da Goda ponendo $s_{max} = 18$ (onde di mare vivo). Si ricorda che le "onde di mare vivo" (sea), tipiche dell'area di generazione (fetch), hanno una elevata dispersione direzionale dell'energia e per tale ragione vengono anche chiamate "onde a cresta corta".

Per il punto di inversa spettrale, la Figura 9-3 (grafico superiore) riporta in forma grafica l'andamento del coefficiente $K = H_s/H_{so} = K_r \cdot K_s$ rispetto alla direzione di incidenza a largo, dove:

- H_s è l'altezza d'onda significativa in costa;
- H_{so} è l'altezza d'onda significativa a largo;

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 47 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

- K_r è il coefficiente di rifrazione;
- K_s è il coefficiente di shoaling.

Nella stessa figura è rappresentata anche la corrispondenza calcolata tra le direzioni del moto ondoso al largo e i corrispondenti valori di direzione calcolati a riva (grafico inferiore di Figura 9-3).

I grafici di Figura 9-3, ottenuti dall'applicazione del modello Merope per il caso in questione, consentono di calcolare facilmente le caratteristiche del moto ondoso a riva in funzione di quelle a largo.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 48 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

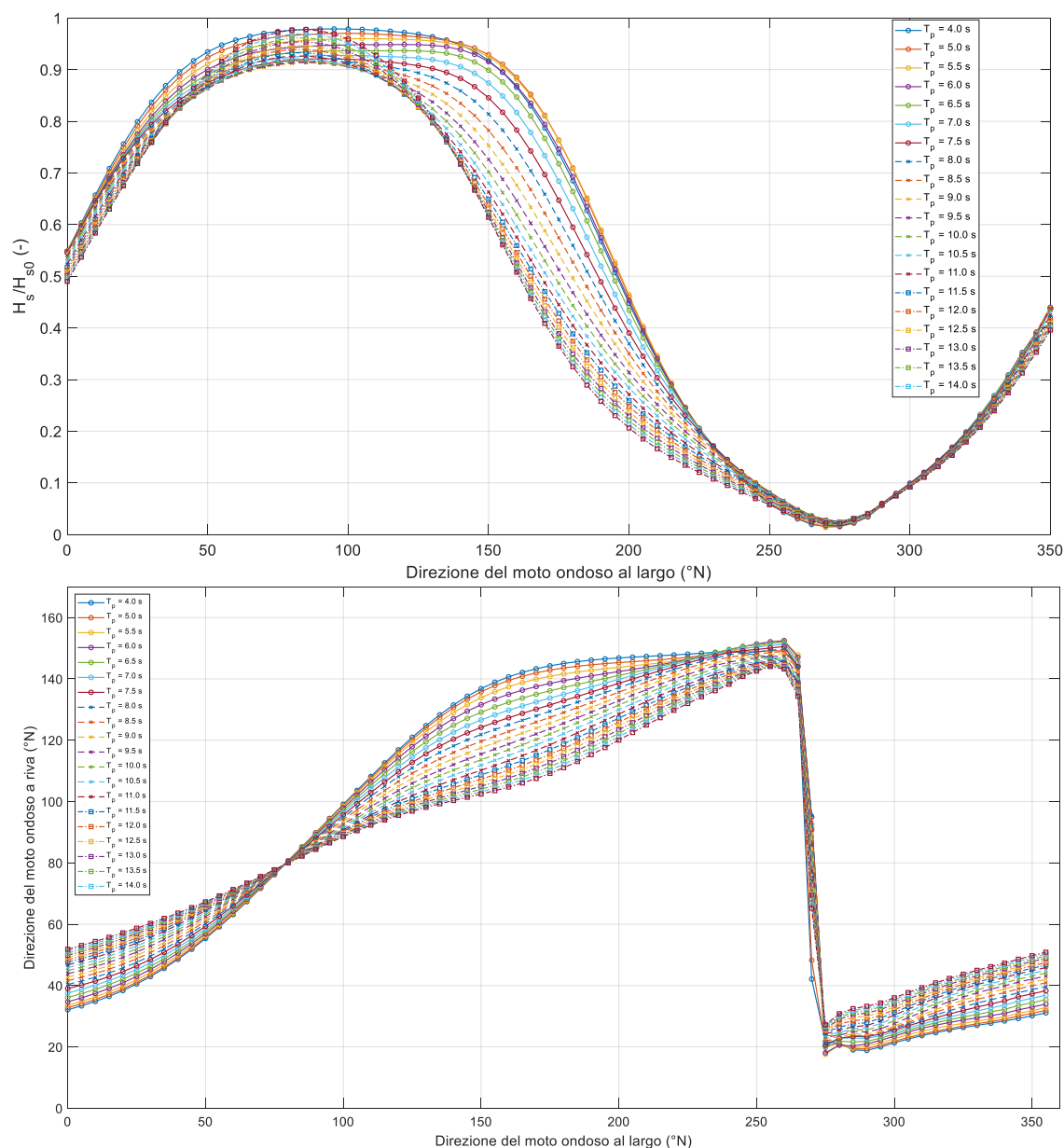


Figura 9-3 - Codice di calcolo MEROPE. Andamento del rapporto H_s/H_{s0} in funzione delle direzioni del moto ondoso al largo e del periodo (grafico superiore) e corrispondenza delle direzioni del moto ondoso a riva in funzione della direzione a largo al variare del periodo delle onde (grafico inferiore).

9.2 Clima ondametrico in costa

L'applicazione del modello MEROPE ha consentito di propagare nel punto di inversa spettrale tutti gli stati di mare della serie storica 1979-2021 ricostruita al largo e di valutare pertanto le caratteristiche di clima di moto ondoso in prossimità della zona di ormeggio della FSRU Ravenna.

In totale sono stati propagati da largo a riva 376944 stati di mare.

La serie storica propagata in costa è stata quindi analizzata per definire il clima ondametrico medio nel punto di inversa.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 49 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

In Figura 9-4 è possibile apprezzare il confronto tra il regime ondametrico annuale al largo e quello a riva. Come è possibile notare, gli eventi durante il processo di propagazione largo/riva, subiscono una rotazione.

In particolare, gli stati di mare provenienti dal I quadrante subiscono una modesta rotazione oraria, essendo influenzati dalla rifrazione e dalla presenza di Punta della Maestra posta a Nord del sito di interesse, mentre gli stati di mare provenienti dal II quadrante subiscono una modesta rotazione antioraria.

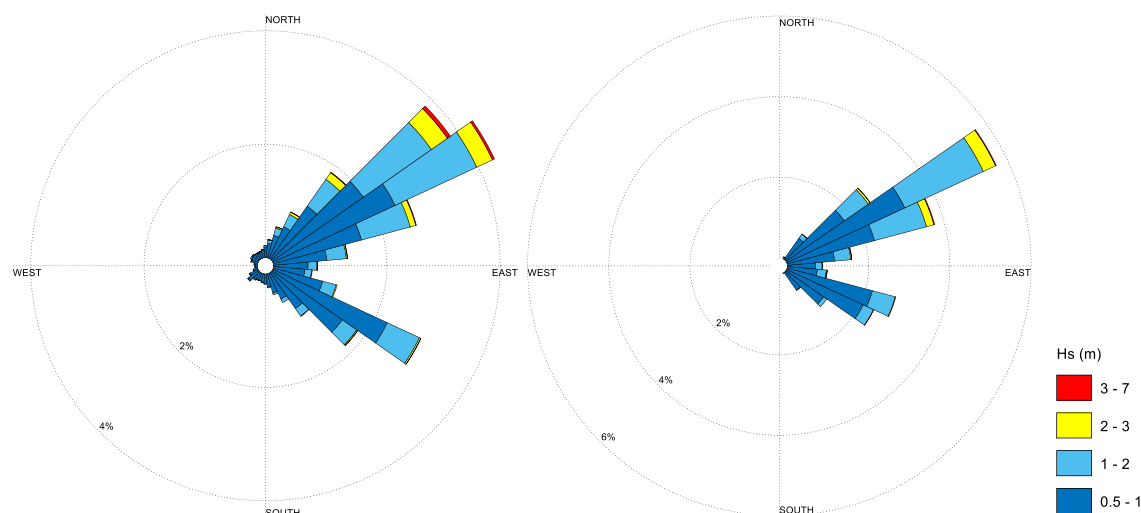


Figura 9-4 - Rose ondametriche a largo e propagate in prossimità della zona di ormeggio della FSRU Ravenna.

Con riferimento alla serie storica ondametrica propagata in costa, si riporta rispettivamente nella Tabella 9-1 e nella Tabella 9-2 il numero di eventi registrati e le relative frequenze di accadimento classati per altezza d'onda H_s e direzione di provenienza.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 50 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

Tabella 9-1 - Numero di eventi per classi di direzione e altezza d'onda della serie storica propagata largo/riva.

	Numero di eventi (Hs)												
Direzione d'onda °N	Altezza d'onda (m)												Tot
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 4.50	> 4.50		
10	820											820	
20	17468	1										17469	
30	28736	2092	187	2								31017	
40	14066	7455	2404	409	74	2						24410	
50	10531	11063	6613	2037	689	167	40	1				31141	
60	8115	11320	12102	5527	2520	937	313	67	2			40903	
70	7611	8916	8393	3530	1465	550	165	53	16	5		30704	
80	6896	5890	4399	1232	269	77	16	2				18781	
90	7917	4832	2607	515	98	31	4					16004	
100	9380	6055	2796	674	162	75	2	6				19150	
110	13395	12891	8201	1801	388	45	10					36731	
120	15092	16034	7845	953	104	9						40037	
130	10847	10384	4277	346	10							25864	
140	11147	6913	2022	17								20099	
150	22249	1538	27									23814	
160												0	
170												0	
180												0	
190												0	
200												0	
210												0	
220												0	
230												0	
240												0	
250												0	
260												0	
270												0	
280												0	
290												0	
300												0	
310												0	
320												0	
330												0	
340												0	
350												0	
360												0	
N° di eventi	184270	105384	61873	17043	5779	1893	550	129	18	5	0	376944	

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 51 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

Tabella 9-2 - Frequenza di accadimento per classi di direzione e altezza d'onda della serie storica propagata largo/riva.

	Frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa												
Direzione d'onda °N	Altezza d'onda (m)												Tot
	0.00	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	> 4.50	
	0.25	0.50											
10	0.218												0.22
20	4.634	0.000											4.63
30	7.623	0.555	0.050	0.001									8.23
40	3.732	1.978	0.638	0.109	0.020	0.001							6.48
50	2.794	2.935	1.754	0.540	0.183	0.044	0.011	0.000					8.26
60	2.153	3.003	3.211	1.466	0.669	0.249	0.083	0.018	0.001				10.85
70	2.019	2.365	2.227	0.936	0.389	0.146	0.044	0.014	0.004	0.001			8.15
80	1.829	1.563	1.167	0.327	0.071	0.020	0.004	0.001					4.98
90	2.100	1.282	0.692	0.137	0.026	0.008	0.001						4.25
100	2.488	1.606	0.742	0.179	0.043	0.020	0.001	0.002					5.08
110	3.554	3.420	2.176	0.478	0.103	0.012	0.003						9.74
120	4.004	4.254	2.081	0.253	0.028	0.002							10.62
130	2.878	2.755	1.135	0.092	0.003								6.86
140	2.957	1.834	0.536	0.005									5.33
150	5.902	0.408	0.007										6.32
160													0
170													0
180													0
190													0
200													0
210													0
220													0
230													0
240													0
250													0
260													0
270													0
280													0
290													0
300													0
310													0
320													0
330													0
340													0
350													0
360													0
Freq. Accadimento	48.885	27.957	16.414	4.521	1.533	0.502	0.146	0.034	0.005	0.001	0.000		100

Nella Figura 9-5 si riportano in forma grafica le rose ondamiche stagionali relative alla serie storica propagata in costa.

Le rose stagionali mostrano che gli stati di mare di maggiore intensità si verificano nel periodo autunnale e invernale e provengono sempre dal I quadrante.

Nella Figura 9-6 e nella Figura 9-7 sono riportate rispettivamente le curve di durata delle altezze d'onda significative H_s medie annuali e stagionali per la serie storica propagata nel punto d'inversa spettrale.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 52 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

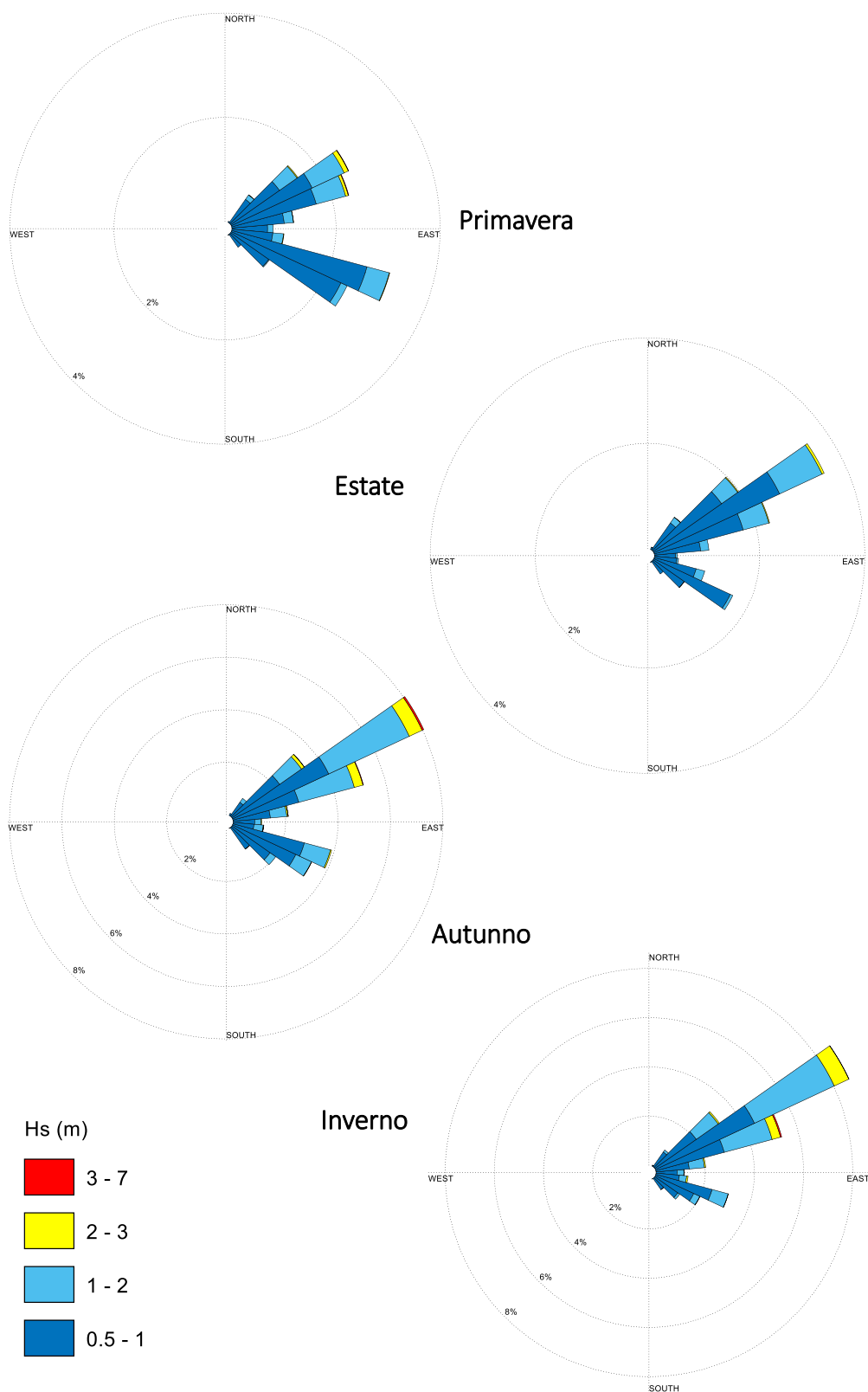


Figura 9-5 Rose ondametriche stagionali per la serie storica propagata sottocosta.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 53 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

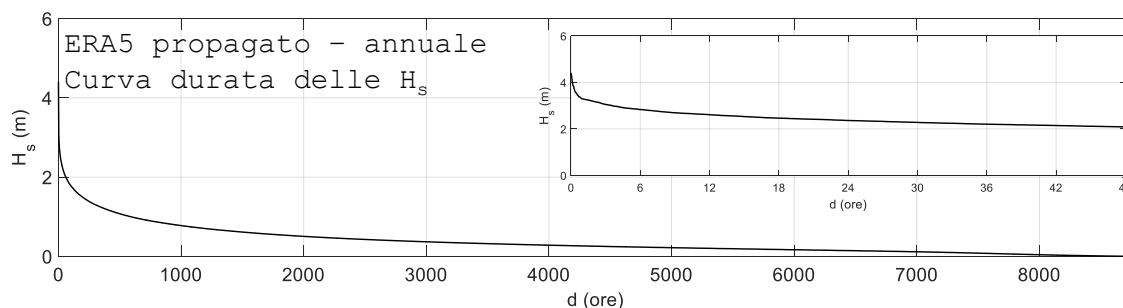


Figura 9-6 - Curva di durata media annuale delle H_s per il punto di propagazione d'inversa spettrale posizionato in prossimità della zona di ormeggio della FSRU Ravenna.

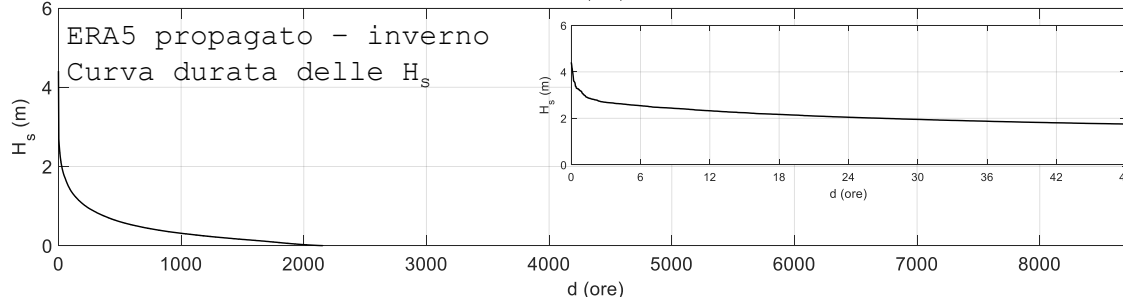
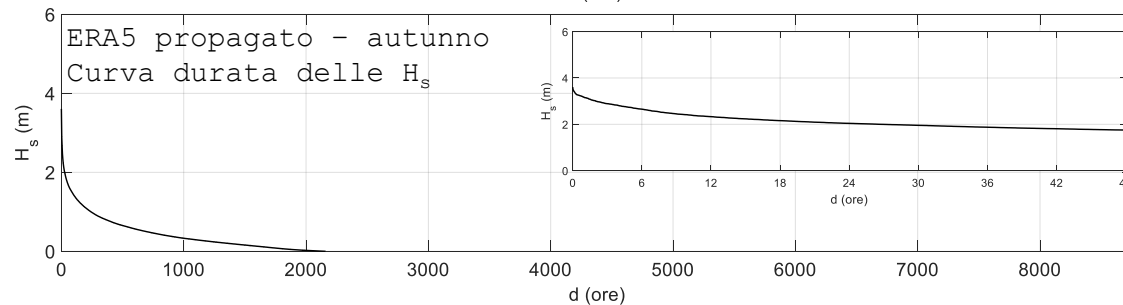
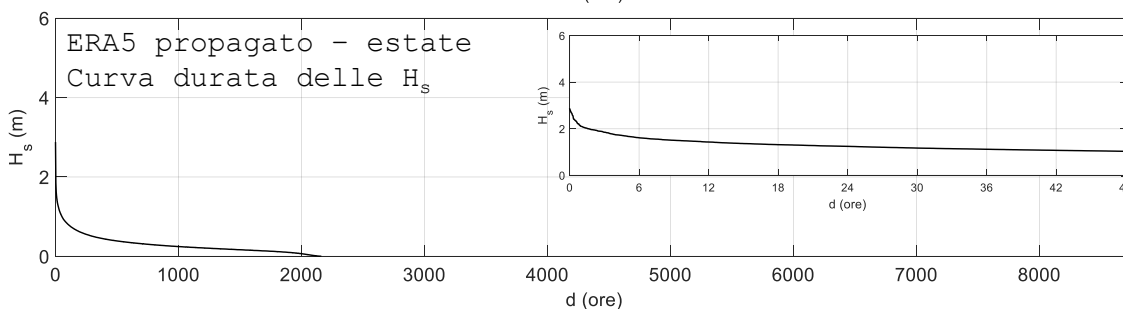
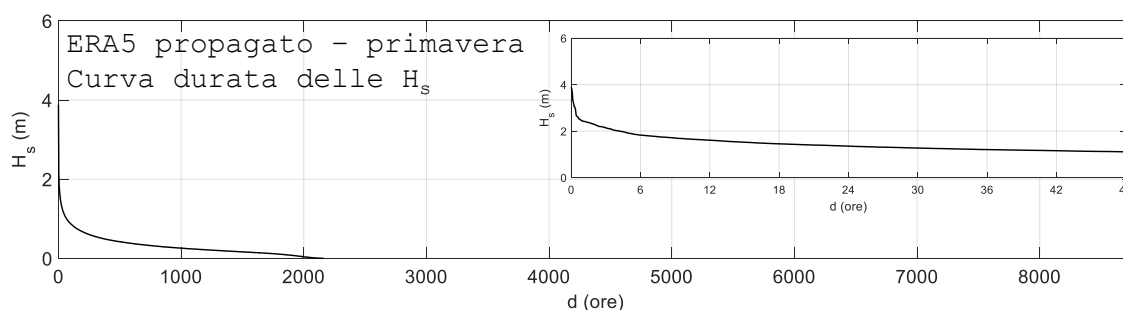


Figura 9-7 - Curve di durata stagionali delle H_s per il punto di propagazione d'inversa spettrale posizionato in prossimità della zona di ormeggio della FSRU Ravenna.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 54 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

Nella Tabella 9-3 infine sono riportate le frequenze di superamento medie annuali e stagionali (esprese rispettivamente in ore/anno e in giorni/anno), di prefissate soglie di Hs.

Tabella 9-3 - Frequenze medie annuali e stagionali di superamento di soglia di Hs per il punto di propagazione d'inversa spettrale per la FSRU Ravenna.

ANNUALE - ERA5			PRIMAVERA - ERA5			AUTUNNO - ERA5		
Hs (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)	Hs (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)	Hs (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)
0.5	1956.8	81.5	0.5	364.6	15.2	0.5	649.4	27.1
1.0	590.0	24.6	1.0	66.1	2.8	1.0	242.5	10.1
1.5	194.6	8.1	1.5	15.8	0.7	1.5	85.9	3.6
2.0	60.3	2.5	> 2	4.2	0.2	2.0	36.8	1.5
2.5	16.3	0.7				2.5	8.1	0.3
> 3	3.5	0.1				> 3	3.4	0.1

ESTATE - ERA5			INVERNO - ERA5		
Hs (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)	Hs (m)	Durata (ore)	Durata (giorni)
0.5	307.5	12.8	0.5	635.3	26.5
> 1.0	52.0	2.2	1.0	229.4	9.6
			1.5	81.3	3.4
			> 2	19.2	0.8

L'analisi della Tabella 9-3 mostra che mediamente durante l'anno la frequenza di superamento della soglia Hs=2,0 m risulta di circa 60 ore all'anno (circa 3 giorni), mentre la soglia Hs=3,0 m viene superata solo per circa 3,5 ore/anno.

Nel periodo estivo mediamente non si verificano mai onde con Hs>2,0 m.

Se si paragonano questi risultati con quelli ottenuti a largo e riportati nella Tabella 5-3 si evince che il sito in esame dove è localizzato il pontile PIR presenta condizioni ondamiche mediamente inferiori rispetto alla corrispondente di largo.

La riduzione calcolata, non essendo dovuta a fenomeni dissipativi quali il frangimento del moto ondoso e all'attrito sul fondo, che non sono stati tenuti in conto a favore di sicurezza, è da imputare esclusivamente ai fenomeni di rifrazione e alla protezione offerta prevalentemente dal Delta del Po.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 55 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

10 VARIAZIONI DEL LIVELLO DEL MARE

Le variazioni del livello del mare in prossimità della costa sono dovute a varie cause, tra le quali risultano prevalenti le seguenti:

- maree astronomiche: variazioni del livello del mare dovute all'interazione tra le masse oceaniche e il campo gravitazionale degli astri posti in prossimità della terra tra i quali quelli della luna e del sole risultano i più importanti. Poiché si può assumere che i moti relativi degli astri e della terra e le loro periodicità siano note con ottima approssimazione, si può assumere che le maree astronomiche siano ricostruibili e prevedibili in senso deterministico;
- maree meteorologiche: variazioni del livello del mare dovute a perturbazioni atmosferiche (processo stocastico). La componente meteorologica della marea è indotta essenzialmente da due fenomeni che si esplicano contemporaneamente:
 - (i) l'effetto barometrico inverso;
 - (ii) l'azione esercitata dal vento sulle masse oceaniche ("wind set-up").

In presenza di perturbazioni meteorologiche di tipo ciclonico (depressioni atmosferiche) con vento che spira verso la costa, si verifica un aumento del livello del mare comunemente indicato con il termine sovrizzo di tempesta ("storm surge").

In presenza di alte pressioni (anticicloni) i venti sono generalmente deboli per cui prevale l'effetto barometrico inverso che dà origine ad un abbassamento del livello medio marino.

Per analizzare le variazioni del livello del mare si è fatto riferimento ai dati registrati dalla stazione mareografica di Ravenna, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (RMN) gestita da ISPRA. La stazione acquisisce, oltre alla misura del livello idrometrico, anche i valori di temperatura e pressione atmosferica, nonché i venti (velocità e direzione).

I grafici di Figura 10-1 riportano i livelli idrometrici registrati dalla stazione mareografica di Ravenna nel periodo 2010-2022. Da osservare che lo zero dello strumento non coincide con il livello medio del mare.

La marea astronomica a Ravenna è di tipo misto semidiurno (periodo 12 ore e 30 minuti) con due alte e due basse maree, di diversa ampiezza. L'ampiezza di marea risulta rilevante, con escursioni di livello comprese mediamente tra +0.35 m e -0.44 m. Durante le fasi sizigiali si ha un aumento dell'ampiezza della marea che può superare i 50 cm.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 56 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

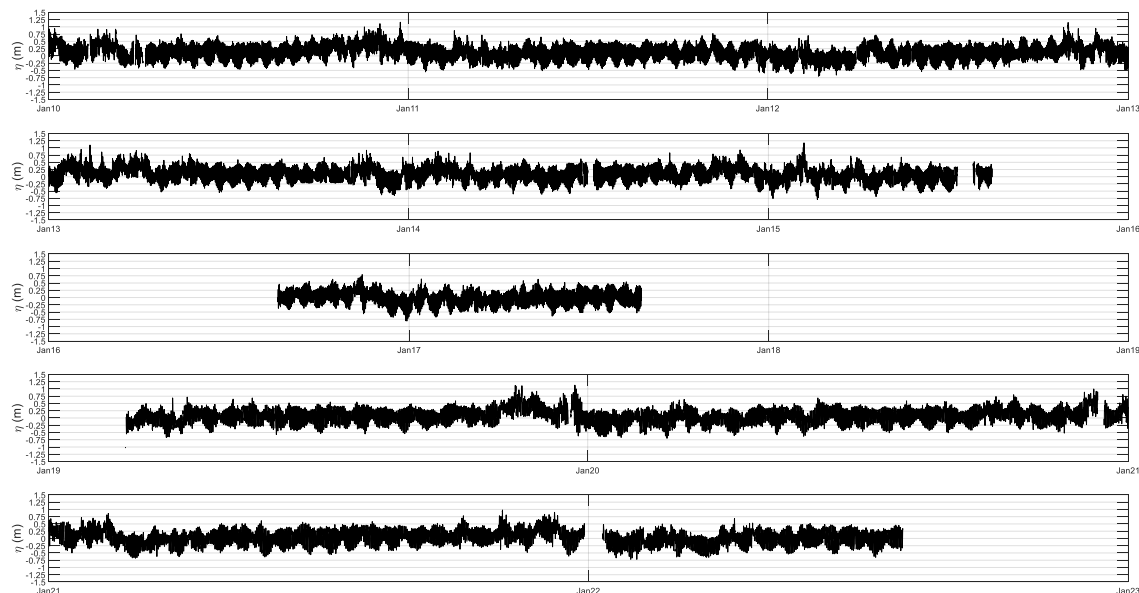


Figura 10-1 – Livelli idrometrici osservati dalla stazione mareografica di Ravenna nel periodo 2010-2022.

Per la valutazione della componente astronomica della marea, le misure mareografiche effettuate dalla stazione di Ravenna sono più che sufficienti per valutare le costanti armoniche di marea.

I livelli rappresentati in Figura 10-1 sono riferiti allo zero dello strumento (zero idrometrico) che in generale non è detto che coincida con il livello medio del mare.

Come è desumibile dalla Figura 10-2, il rendimento della stazione mareografica si può considerare sufficientemente elevato, escludendo però completamente il 2018, anno in cui la stazione non ha mai funzionato.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 57 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

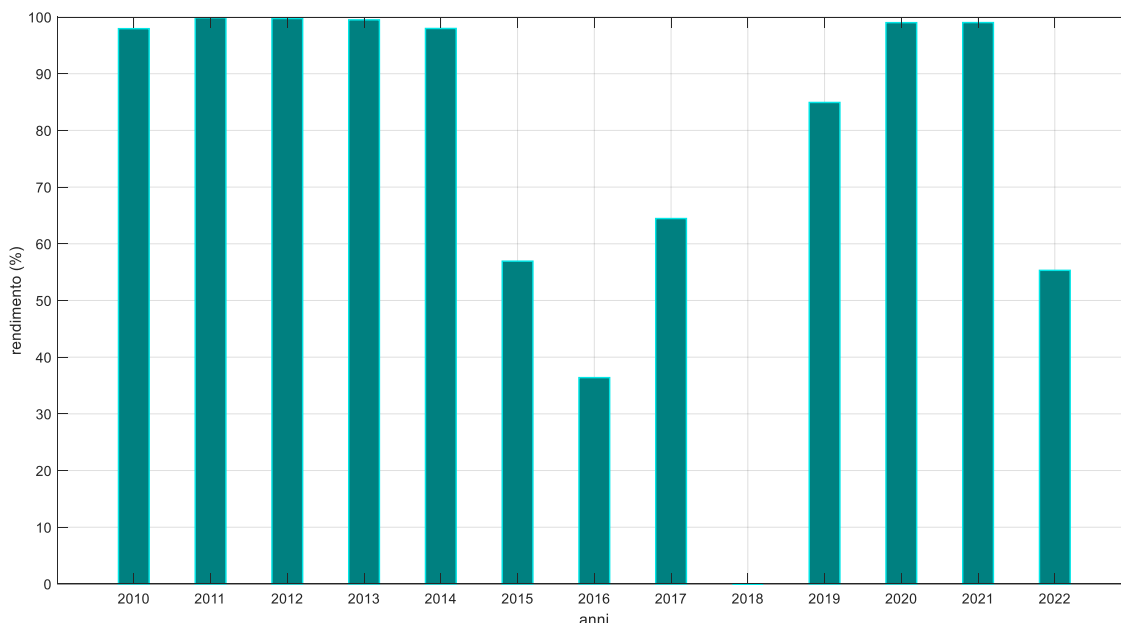


Figura 10-2 Rendimento annuale della stazione mareografica di Ravenna per il periodo di riferimento 2010-2022.

Le misure acquisite dallo strumento sono state processate mediante l'algoritmo di Pawlowicz et al., 2002, comunemente utilizzato a livello mondiale, al fine di ottenere le costanti armoniche relative alla marea astronomica.

Una volta determinato il segnale di livello dovuto alla sola marea astronomica, i livelli indotti dalla sola componente meteorologica (residuo) sono stati ottenuti sottraendo alle misure la componente astronomica.

La Figura 10-3 mostra a titolo di esempio una porzione del risultato dell'analisi condotta. Nel grafico sono rappresentate: le misure di livello (in nero), la componente armonica (in rosso) e la componente residua dovuta prevalentemente alla marea meteorologica (in blu).

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 58 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

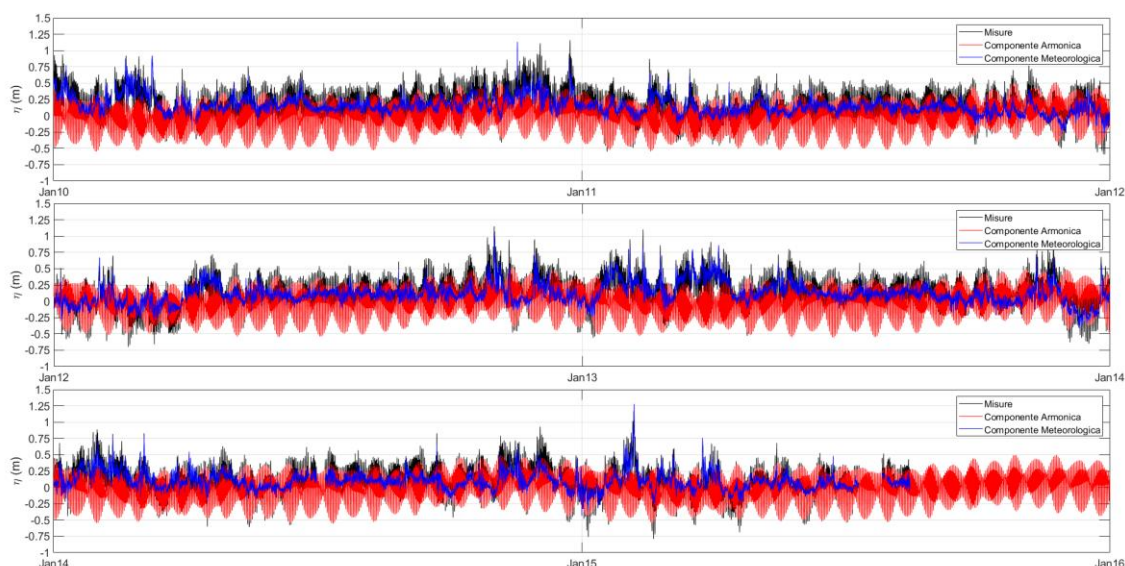


Figura 10-3 – Analisi di una porzione della serie storica delle misure di livello misurate presso la stazione RMN di Ravenna: identificazione della componente armonica e meteorologica.

I valori caratteristici della marea astronomica a Ravenna sono sintetizzati in Tabella 10-1 dove si è utilizzata la nota simbologia internazionale per la loro caratterizzazione.

Tabella 10-1 Livelli caratteristici della marea astronomica per la stazione di Ravenna.
Ricostruzione basata su circa undici anni di misura.

	Zero-Strumento (m)	L.M.M. (m)
HAT	0.61	0.52
MHWS	0.45	0.35
MHWN	0.32	0.23
MSL	0.09	0.00
MLWN	-0.13	-0.23
MLWS	-0.34	-0.44
LAT	-0.47	-0.56

Una volta identificata la serie storica della sola componente meteorologica (residuo) è stata effettuata l'analisi dei valori estremi dei valori massimi del segnale ottenuto. L'analisi degli eventi estremi è stata effettuata utilizzando il metodo dei picchi sopra soglia (POT) con valore di soglia del sovrizzo meteorologico pari a +0.3 m sul l.m.m.

La distribuzione di probabilità che meglio approssima i dati è risultata essere la distribuzione di Weibull ($k = 1$).

In Figura 10-4 viene riportato l'andamento del sovrizzo meteorologico in funzione del tempo di ritorno T_r , mentre la Tabella 10-2 mostra i valori numerici associati ad alcuni tempi di ritorno selezionati.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 59 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

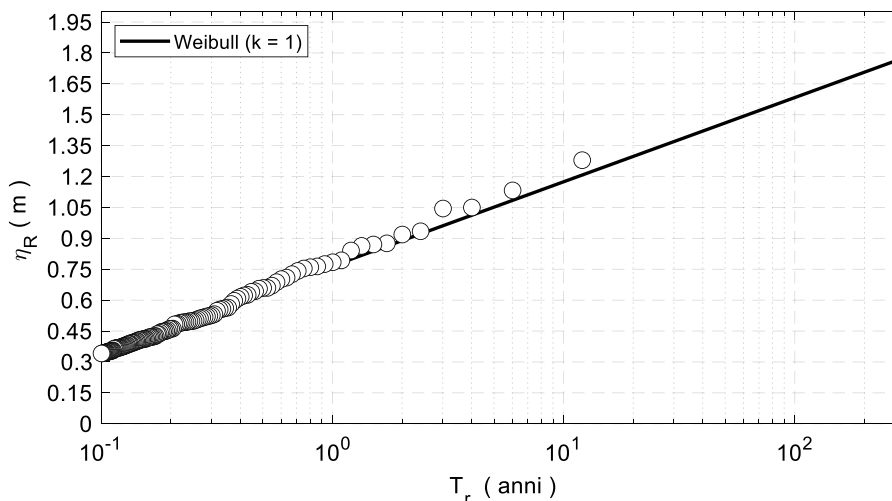


Figura 10-4 – Analisi degli estremi con soglia pari a 0.3 m per Ravenna.

Tabella 10-2 Valori estremi del sovrалzo residuo in funzione del tempo di ritorno T_r per il porto di Ravenna.

T_r (anni)	Sovralzo (m)
2	0.89
5	1.05
10	1.17
20	1.30
25	1.34
50	1.46
100	1.58

10.1 Correlazione tra i valori di altezza d'onda significativa H_s e i residui di marea

Al fine di correlare i valori dell'altezza d'onda significativa H_s con il residuo di marea si sono ricavate due leggi lineari per il settore di Nord/Nord-Est e per il settore Sud-Est, rispettivamente compresi tra 0°N - 90°N e 90°N - 160°N . Tali correlazioni sono riportate in Figura 10-5.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 60 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

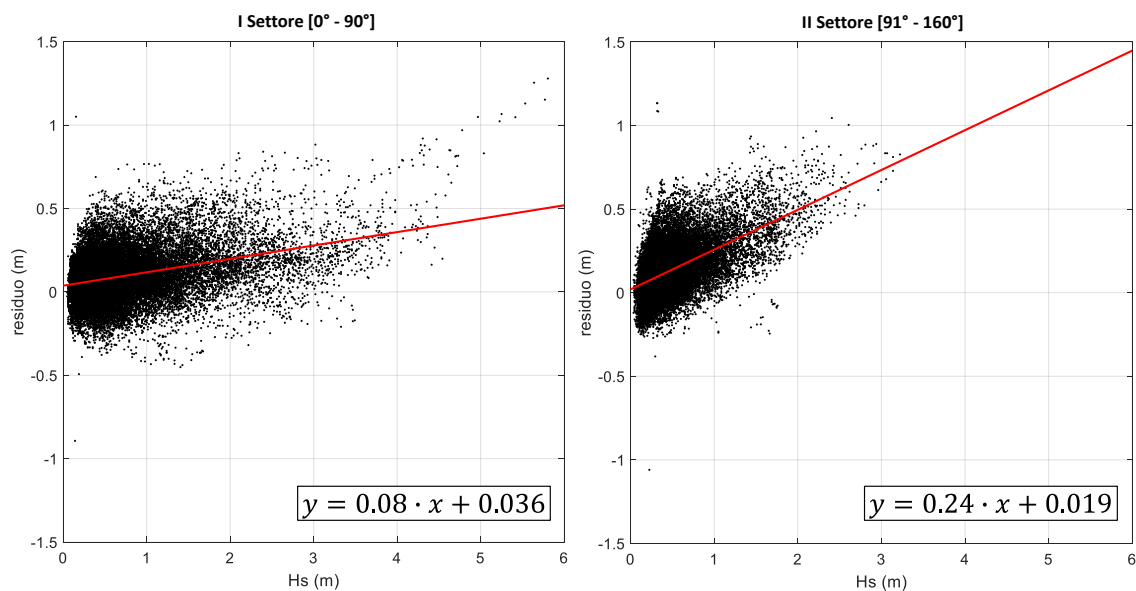


Figura 10-5 Correlazione tra l'altezza d'onda significativa H_s e il residuo di marea per i due settori di Nord/Nord-Est e Sud-Est.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 61 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

11 CAMBIAMENTO CLIMATICI

È noto che le analisi statistiche dei vari fenomeni meteomarinari che condizionano il progetto per un'opera marittima (in particolare onde e livelli) devono tenere conto delle possibili tendenze attese nel prossimo futuro in un arco temporale comparabile con la vita utile delle opere in progetto. È anche noto che negli ultimi anni molti studiosi hanno indicato scenari futuri con variazioni significative, legate in gran parte alle interferenze antropiche sulla climatologia terrestre.

È abbastanza certo che nei prossimi decenni si avrà un aumento delle temperature medie e un conseguente aumento dei livelli marini, anche se è ancora piuttosto incerta l'entità di questi innalzamenti, in relazione ai possibili scenari di emissione di CO₂ nell'atmosfera terrestre.

Più incerte sono invece le previsioni relative alle eventuali modifiche delle statistiche relative alle eventuali modifiche delle statistiche relative al regime dei venti e delle onde nei diversi mari e oceani. Tuttavia si può affermare che in base a recenti studi eseguiti per il Mar Mediterraneo e in particolare per i mari che bagnano le coste italiane, allo stato attuale non si prevedono incrementi significativi delle condizioni di moto ondoso.

11.1 Variazioni a lungo termine dei livelli del mare a Ravenna

Per quanto riguarda le variazioni del livello medio del mare, le previsioni al futuro del tasso di incremento dovuto all'eustatismo sono sicuramente più elevato a causa dei cambiamenti climatici.

È noto che tali stime sono periodicamente aggiornate dalla commissione internazionale di scienziati che fanno parte dell'International Panel on Climate Change (IPCC) dell'Unesco. In relazione ai possibili scenari sulle emissioni di anidride carbonica: lo scenario più ottimista è denominato SSP1-2.6, mentre quello più pessimista SSP5-8.5.

La Figura 11-1 mostra la previsione di innalzamento del livello del mare per il secolo corrente e parte di quello futuro fornita dall'IPCC per il Mar Adriatico Settentrionale. Le linee colorate presenti nella figura mostrano gli scenari in termini di innalzamento di livello forniti da diversi modelli climatologici in relazione ad emissioni variabili.

Per una previsione a breve termine, con un tempo di riferimento di circa 25 anni, è possibile affermare che l'innalzamento del livello medio del mare in Adriatico sia nell'ordine dei 20 cm.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZA-E-17075	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti	Fg. 62 di 62	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3301-001

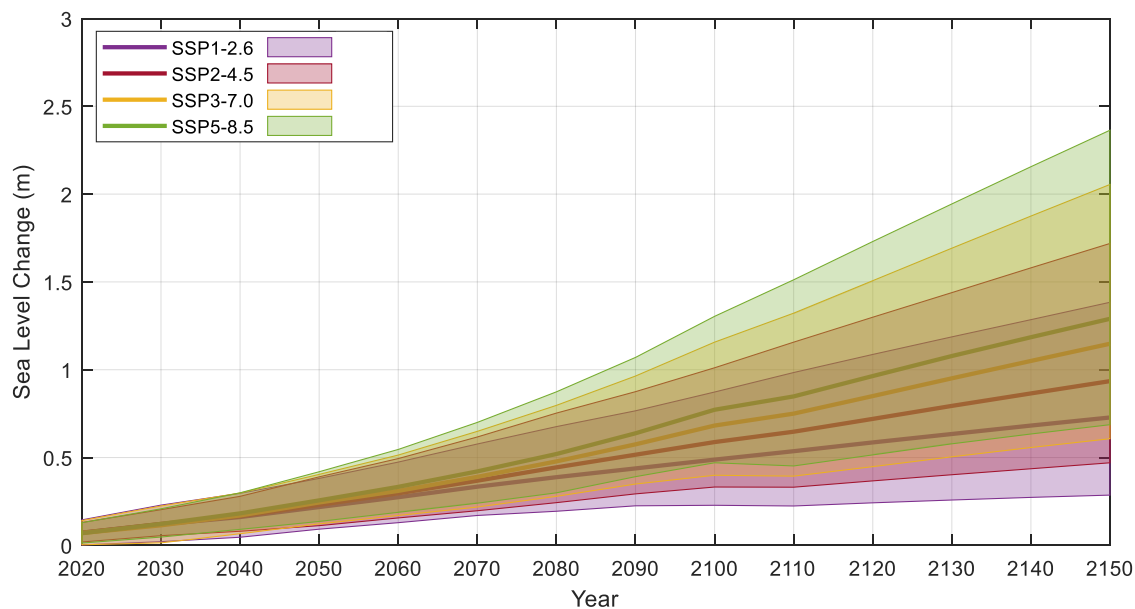


Figura 11-1 – Previsione per il Global Sea Level Rise fornita dall'IPCC (2022) per il Mar Adriatico Settentrionale.