



Firmato digitalmente da:

MARCO MARCELLI



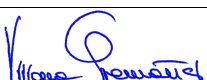
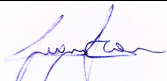
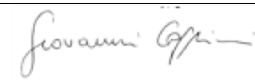
All'Autorità Portuale
di Civitavecchia, Fiumicino e Gaeta
Molo Vespucci – Porto di Civitavecchia
00053 Civitavecchia

alla c.a. Ing. Maurizio Marini
e p.c. Dott. Giorgio Fersini

Civitavecchia, lì 27.05.2024

Oggetto: Relazione Ante Operam

PROGETTO DI RICERCA 'Caratterizzazione Morfodinamica e di Trasporto
solido, Idrodinamica ed Ecologica dell'Unità Fisiografica Capo Linaro Capo
d'Anzio – Programma Esecutivo di Monitoraggio'

Redatto	
Prof. Marco Marcelli	
Dr. Viviana Piermattei	
Dr. Simone Bonamano	
Dr. Sergio Scanu	
Dr. Daniele Piazzolla	
Dr. Alice Madonia	
Dr Emanuele Mancini	
Dr. Giovanni Coppini	
Dr. Ivan Federico	

**PROGETTO DI RICERCA:
CARATTERIZZAZIONE MORFODINAMICA E DI TRASPORTO
SOLIDO, IDRODINAMICA ED ECOLOGICA DELL'UNITÀ
FISIOGRAFICA CAPO LINARO CAPO D'ANZIO**

Relazione Ante Operam



Lista delle figure	6
Lista delle tabelle	12
1. INTRODUZIONE.....	13
2. AREA DI STUDIO.....	17
3. MODELLISTICA NUMERICA.....	21
3.1 Modelli numerici applicati allo studio dei potenziali impatti sugli ecosistemi marini e sulla dinamica sedimentaria	21
3.2 Predisposizione dei modelli operativi e catena operativa	22
3.3 Validazione dei modelli idrodinamici (onde e correnti) e di trasporto solido con i dati di raccolti in situ	26
3.4 Simulazioni del trasporto solido per la valutazione delle zone soggette ad erosione e sedimentazione	39
3.4.1 Modello morfologico e configurazione di XBeach.....	40
3.4.2 Validazione modello XBeach.....	41
3.4.3 Modello e configurazione di SEDTRANS.....	43
3.5 Simulazioni del materiale dragato per la valutazione dei potenziali effetti indotti sull'ecosistema marino	47
4. STUDIO DELLA VARIAZIONE DELLA LINEA DI RIVA A BREVE E A LUNGO TERMINE....	55
4.1 Analisi storica della linea di riva e ricostruzione dei profili della spiaggia sommersa.....	55
4.2 Predisposizione e simulazioni attraverso il modello per l'analisi dell'evoluzione della linea di riva e della spiaggia sommersa ed emersa	79
5. OCEANOGRAFIA SPERIMENTALE	88
5.1 Analisi del clima ondoso e delle correnti marine.....	88
5.1.1 Misure di onde e correnti con Radar X-Band	88
5.1.2 Misure di onde con boa fissa low-cost	94
5.1.3 Misure di onde e correnti con ADCP fisso	97
5.1.4 Misure di correnti con boe lagrangiane.....	110
5.2. Campagne di misura colonna d'acqua.....	111



5.2.1 Operazioni in mare	113
5.2.2 Operazioni in laboratorio	114
5.2.3 Risultati dell'analisi della concentrazione di clorofilla a, dei solidi sospesi e della CDOM ..	116
5.2.4 Risultati elaborazione dei dati oceanografici nella colonna d'acqua	122
5.3 Studio dello stato trofico delle acque	135
5.4. Studio della distribuzione del solido sospeso, della biomassa fitoplanctonica e della CDOM lungo l'unità fisiografica attraverso osservazioni satellitari	137
5.4.1 Distribuzione di solido sospeso (TSM) e clorofilla a (CHL)	137
5.4.1.1 Metodi di processamento delle immagini	137
5.4.1.2 Calcolo di CHL e TSM dai dati Sentinel	138
5.4.1.3 Valutazione delle prestazioni dell'algoritmo con dati in-situ	140
5.4.1.4 Risultati dell'analisi satellitare delle concentrazioni di CHL e TSM.....	142
5.4.2 Analisi della distribuzione della CDOM.....	154
5.5 Stazione fissa di misura della torbidità	158
6. STUDIO DELLA SPIAGGIA SOMMERSA, EMERSA E DEL RATEO DEPOSIZIONALE.....	162
6.1 Caratterizzazione della spiaggia sommersa	162
6.1.1 Profili spiaggia sommersa area di Fiumicino	162
6.1.2 Profili della spiaggia sommersa lungo l'area estesa	164
6.1.3 Campionamenti della spiaggia sommersa	169
6.1.4 Campionamenti del sedimento per granulometrie in corrispondenza delle stazioni di benthos	177
6.2 Caratterizzazione della spiaggia emersa	179
6.2.1 Profili della spiaggia emersa	179
6.2.2 Campionamenti della spiaggia emersa	181
6.3 Studio del rateo di sedimentazione	185
6.3.1 Analisi dei sedimenti funzionale alle attività di dragaggio	189
7. CARATTERIZZAZIONE DEI CORSI D'ACQUA RILEVANTI AI FINI DELLA VALUTAZIONE DEGLI INPUT FLUVIALI	194
7.1 Misure di alveo in prossimità della foce	194



7.2 Analisi degli apporti solidi dei principali corsi d'acqua	197
8. STUDIO DEL COMPARTO BIOTICO.....	199
8.1 Caratterizzazione delle biocenosi bentoniche di fondo mobile.....	199
8.1.1 Piano di campionamento	199
8.1.2 Metodi	203
8.1.3 Risultati della caratterizzazione del benthos di fondo mobile.....	205
8.2 Caratterizzazione del benthos di fondo duro.....	213
8.2.1 Fondali antistanti Capo Linaro	215
8.2.2 Fondali antistanti Macchiatonda	218
8.2.3 Fondali dell'AMP di Tor Paterno.....	220
8.3 Caratterizzazione della <i>Posidonia oceanica</i>	225
8.3.1 Indagini della <i>P. oceanica</i> presso Capo Linaro, ottobre 2022	226
8.3.2 Indagini della <i>P. oceanica</i> presso i fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, marzo 2023	229
8.3.3 Indagini della <i>P. oceanica</i> presso AMP Secche di Tor Paterno, dicembre 2022.....	232
8.4 Analisi quali-quantitativa del pescato commerciale della marineria di Fiumicino.....	235
8.4.1 Metodi	236
8.4.2 Analisi dati e Risultati preliminari	237
9. INTEGRAZIONE DEI DATI NELLA PIATTAFORMA GIS.....	242
Bibliografia	243

Lista delle figure

Figura 1 - Progetto I Stralcio del I Lotto Funzionale del Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino.	15
Figura 2 - Progetto del Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino I e II Lotto.	16
Figura 3 - Plume del Tevere (Copernicus Sentinel) del giorno 25/02/2019.	17
Figura 4 - Morfotipi presenti nel Lazio (Ferretti et al., 2003).	18
Figura 5 - Unità Fisiografica Capo Linaro – Capo Anzio: aree costiere rappresentative presso Furbara (A), Passo Scuro (B), Fregene (C), Castel Porziano (D).	20
Figura 6 - Configurazioni utilizzate nel modello Shyfer per riprodurre l'input fluviale del fiume Tevere: a sinistra la configurazione RCO a destra quella CO.	22
Figura 7 - Ciclo di previsione giornaliero (a) e catena operativa (b).	24
Figura 8 - Esempi di visualizzazione delle previsioni.	25
Figura 9 - Validazione delle configurazioni CO e RCO utilizzando i dati CTD raccolti in prossimità di Fiumara Piccola. Il grafico mostra profili medi di temperatura (a) e salinità (d) con bias (b, e) e RMSE (c, f).	26
Figura 10 - Comparazione tra i dati temperatura media superficiale del modello e del satellite sull'intero dominio di calcolo (a). Vengono inoltre mostrate le metriche di bias (b) e RMSE (c).	28
Figura 11 - Validazione del modello con i dati CTD della zona off-shore in termini di temperatura e salinità media (a). Vengono mostrate inoltre i profili di bias (b) e RMSE (c).	29
Figura 12 - Validazione del modello attraverso la comparazione con i dati CTD "costieri" (a, b, c) e "fluviali" (d, e, f).	30
Figura 13 - Campo di correnti superficiale dal radar costiero (a, d, g, j, m), modello (b, e, h, k, n) e relativo bias (c, f, i, l, o) per eventi di storm: Oct. 6–8, 2021 (a, b, c), Nov. 26–29, 2021 (d, e, f), Dec. 4–5, 2021 (g, h, i), Dec. 24–26, 2021 (j, k, l) e Jan. 31–Feb. 1, 2022 (m, n, o).	32
Figura 14 - Diagrammi polari del campo di velocità osservato (a) e modellato (b) ottenuto attraverso la media dell'intero dominio del radar.	33
Figura 15 - Confronto tra le traiettorie delle boe lagrangiane (linee continue) e traiettorie simulate (linee tratteggiate).	34
Figura 16 - Sezione trasversale di salinità lungo il ramo di Fiumara Grande. I contorni continui rappresentano le osservazioni, mentre le linee tratteggiate indicano i valori modellati.	36
Figura 17 - Mappa d'onda significativa come media dell'anno 2018.	37
Figura 18 - Diagrammi polari in due punti significativi (offshore e nearshore) di moto ondoso per il modello d'onda di Fiumicino basato su WW3 e per il modello di CMEMS basato su WAM.	38
Figura 19 - Altezza d'onda in metri (pannello superiore) e direzione (pannello inferiore) per modello e radar.	39
Figura 20 - dominio di calcolo del modello XBeach in cui viene riportata la batimetria e la posizione dei 5 transekti costa largo in cui è stata effettuata la misura del fondale attraverso campagne invernali ed estive con un trasduttore single beam.	42
Figura 21 - comparazione tra profili di spiaggia sommersa misurati durante i rilievi batimetrici single beam (linee nera e rossa) e calcolati dal modello XBeach (linea blu).	43
Figura 22 - dominio di calcolo e batimetria del sistema integrato e accoppiato SHYFEM-WW3- SEDTRANS.	45
Figura 23 - caratterizzazione dei sedimenti a partire dai dati in-situ.	46
Figura 24 - inizializzazione del modello SEDTRANS in termini di average grain size.	47
Figura 25 - Il poligono più grande in trasparenza rappresenta Diga di Sopraflutto e la Banchina Sud mentre quello più piccolo in alto indica la Diga di Sottoflutto e la Banchina Nord. Tra le due banchine sarà realizzato l'approfondimento del fondale del bacino portuale alla quota di progetto – 6.00 m s.l.m.	48
Figura 26 - Distribuzione del materiale fine in sospensione proveniente dalle attività di dragaggio nella condizione autunnale (a sinistra) ed invernale (a destra).	51
Figura 27 - Distribuzione del materiale fine in sospensione proveniente dalle foci fluviali nella condizione autunnale (a sinistra) ed invernale (a destra).	52
Figura 28 - Zone di accumulo del sedimento fine proveniente dalle attività di dragaggio nella condizione autunnale (a sinistra) ed invernale (a destra).	53

Figura 29 - Zone di accumulo del sedimento fine proveniente dalle foci fluviali nella condizione autunnale (a sinistra) ed invernale (a destra).	54
Figura 30 - Confronto della RMSE in X e in Y tra tutti i fotogrammi ortorettificati.	58
Figura 31 - Mosaico dell'intera linea di costa (Erdas Imagine) sovrapposta all'immagine di Google Earth.	59
Figura 32 - Confronto della RMSE in X e in Y tra tutti i fotogrammi ortorettificati.	60
Figura 33 - Ricostruzione della linea di costa attraverso immagini ortorettificate della costellazione Skysat a 50 cm di risoluzione spaziale.	61
Figura 34 - Posizione dei transetti nella zona a nord.	63
Figura 35 - Posizione dei transetti nella zona centrale.	63
Figura 36 - Posizione dei transetti nella zona a sud.	63
Figura 37 - Alcuni profili batimetrici della zona a nord.	64
Figura 38 - Alcuni profili batimetrici della zona centrale.	65
Figura 39 - Alcuni profili batimetrici della zona a sud.	66
Figura 40 - Rappresentazione dei transetti batimetrici acquisiti tra il 2005 e il 2006.	67
Figura 41 - Profilo batimetrico relativo al transetto "tr1".	68
Figura 42 - Profilo batimetrico relativo al transetto "tr7".	69
Figura 43 - Profilo batimetrico relativo ai transetti "8N".	70
Figura 44 - Profilo batimetrico relativo al transetto "2S".	70
Figura 45 - Profilo batimetrico relativo al transetto "tr10".	71
Figura 46 - Profilo batimetrico relativo al transetto "tr16".	71
Figura 47 - Variazione di Mz dei sedimenti campionati nel tratto di mare compreso tra Palo e Fiumara Grande. L'immagine è tratta dal libro "Il mare del Lazio" (La Monica e Raffi, 1996).	72
Figura 48 - Rappresentazione dei punti di prelievo dei sedimenti.	74
Figura 49 - Mappa dell'area compresa tra Capo Linaro e Palidoro in cui vengono riportati i valori della dimensione media dei granuli dei campioni di sedimento espressa in unità ϕ .	75
Figura 50 - Mappa dell'area compresa tra Palidoro e Torvaianica in cui vengono riportati i valori della dimensione media dei granuli dei campioni di sedimento espressa in unità ϕ .	76
Figura 51 - Mappa dell'area compresa tra Torvaianica e Capo d'Anzio in cui vengono riportati i valori della dimensione media dei granuli dei campioni di sedimento espressa in unità ϕ .	77
Figura 52 - Planimetria del nuovo Porto di Fiumicino nella configurazione "I Lotto funzionale" (a sinistra) 2 nella configurazione "Completa" (a destra).	81
Figura 53 - Variazioni della linea di costa riprodotte con il modello LITPACK (a sinistra) e osservate da foto aeree e immagini satellitari (al centro) nel periodo compreso tra il 1990 e il 2005. Linea di costa rappresentativa dell'unità fisiografica Capo Linaro - Capo d'Anzio in cui vengono riportate alcuni comuni costieri in rosso e la foce dei fiumi in blu (a destra).	84
Figura 54 - Variazioni della linea di costa riprodotte con il modello LITPACK (a sinistra) e osservate da foto aeree e immagini satellitari (al centro) nel periodo compreso tra il 2005 e il 2022. Linea di costa rappresentativa dell'unità fisiografica Capo Linaro - Capo d'Anzio in cui vengono riportate alcuni comuni costieri in rosso e la foce dei fiumi in blu (a destra).	85
Figura 55 - Variazioni della linea di riva dovute alla presenza dell'opera (1° Lotto Funzionale) ottenute sottraendo i cambiamenti prodotti in sua assenza (a sinistra). Linea di costa rappresentativa dell'unità fisiografica Capo Linaro - Capo d'Anzio in cui vengono riportate alcuni comuni costieri in rosso e la foce dei fiumi in blu (a destra).	86
Figura 56 - Variazioni della linea di riva dovute alla presenza dell'opera (Configurazione completa) ottenute sottraendo i cambiamenti prodotti in sua assenza (a sinistra). Linea di costa rappresentativa dell'unità fisiografica Capo Linaro - Capo d'Anzio in cui vengono riportate alcuni comuni costieri in rosso e la foce dei fiumi in blu (a destra).	87
Figura 57 - Diagramma a blocchi che descrive il processamento delle immagini radar. Il dettaglio dei parametri di acquisizione del radar sono riportati in Tabella 2.	90
Figura 58 - Il grafico in basso mostra il confronto tra le altezze d'onda misurate dal radar (pallini rossi) e calcolate dal modello WAM di COPERNIUS (linea nera continua), l'immagine in alto rappresenta lo stick plot della direzione del moto ondoso analizzata dal modello.	91



Figura 59 - Spettri d'onda direzionali acquisiti dal radar e i relativi campi di velocità superficiale in alcuni eventi di storms.	92
Figura 60 - Spettri d'onda direzionali acquisiti dal radar e i relativi campi di velocità superficiale in alcuni eventi di storms.	93
Figura 61 - Visualizzazione della posizione e dei dati acquisiti dalla boa ondametria.....	95
Figura 62 - grafico dell'andamento nel tempo della temperatura superficiale	96
Figura 63 - Grafico dell'andamento nel tempo della pressione atmosferica.	96
Figura 64 - Grafico dell'andamento nel tempo dell'altezza d'onda significativa con comparazione con modello Wave Watch 3.	96
Figura 65 - Posizione in cui è stato installato il sensore ADCP (quadrato blu).....	97
Figura 66 - A sinistra il sensore ADCP (in nero) all'interno della boa di spinta con il suo pacco batterie (blu); a destra lo schema di installazione dello strumento sul fondale marino.	98
Figura 67 - Corrente marina superficiale (a sinistra) e a 6 m di profondità (a destra) relativa al periodo ADCP1.	99
Figura 68 - Corrente marina superficiale (a sinistra) e a 6 m di profondità (a destra) relativa al periodo ADCP2.	100
Figura 69 - Corrente marina superficiale (a sinistra) e a 6 m di profondità (a destra) relativa al periodo ADCP3.	101
Figura 70 - Corrente marina superficiale (a sinistra) e a 6 m di profondità (a destra) relativa al periodo ADCP4.	102
Figura 71 - Corrente marina superficiale (a sinistra) e a 6 m di profondità (a destra) relativa al periodo ADCP5.	103
Figura 72 - Principali parametri del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media) relativa al periodo ADCP1.	104
Figura 73 - Principali parametri del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media) relativa al periodo ADCP2.	105
Figura 74 - Principali parametri del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media) relativa al periodo ADCP3.	106
Figura 75 - Principali parametri del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media) relativa al periodo ADCP4.	107
Figura 76 - Principali parametri del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media) relativa al periodo ADCP5.	108
Figura 77 - Variazione di temperatura alla profondità di 12 durante i cinque periodi di installazione del ADCP.	109
Figura 78 - Traiettorie delle quattro boe lagrangiane lanciate a marzo, maggio e settembre.....	110
Figura 79 - Piano di campionamento per la caratterizzazione della colonna d'acqua. In rosso i 3 transetti effettuati durante la Fase 0; in blu i transetti effettuati durante la Fase 1.	112
Figura 80 - Mappa delle stazioni monitorate durante la Campagna di misura 1.	122
Figura 81 - Mappa delle stazioni monitorate durante la Campagna di misura 2.	123
Figura 82 - Mappa delle stazioni monitorate durante le Campagne di misura 3 e 4.	124
Figura 83 - Mappa delle stazioni monitorate durante la Campagna di misura 5.	124
Figura 84 - Campagna Estate 2020: sezione profondità distanza del transetto TR01.	125
Figura 85 - Campagna Estate 2020: sezione profondità distanza del transetto TR06.	126
Figura 86 - Campagna Estate 2020: sezione profondità distanza del transetto TR07.	127
Figura 87 - Campagna Estate 2020: sezione profondità distanza del transetto TR08.	128
Figura 88 - Campagna Estate 2020: sezione profondità distanza del transetto TR12.	129
Figura 89 - Campagna Estate 2020: Isosuperficie della distribuzione di temperatura, salinità, clorofilla e torbidità lungo lo strato superficiale.....	130
Figura 90 - Campagna Inverno 2021: sezione profondità distanza del transetto TR01.....	131
Figura 91 - Campagna Inverno 2021: sezione profondità distanza del transetto TR02.....	132
Figura 92 - Campagna Inverno 2021: sezione profondità distanza del transetto TR06.....	133
Figura 93 - Campagna Inverno 2021: sezione profondità distanza del transetto TR07.....	134
Figura 94 - Mappa delle stazioni (in blu) nelle quali sono state effettuate le analisi dei nutrienti disciolti e totali di azoto e fosforo durante la Campagna 1.....	135



Figura 95 - Mappa delle stazioni (in blu) nelle quali sono state effettuate le analisi dei nutrienti disciolti e totali di azoto e fosforo durante la Campagna 2.....	136
Figura 96 - Analisi di correlazione dati In-Situ vs Algoritmi.	142
Figura 97 - TSM medio, autunno 2021.....	143
Figura 98 - Figura xx. CHL media, autunno 2021.....	143
Figura 99 - TSM medio, autunno 2022.....	144
Figura 100 - CHL media, autunno 2022.....	144
Figura 101 - TSM medio, primavera 2021.	145
Figura 102 - CHL media, primavera 2021.....	145
Figura 103 - TSM medio, primavera 2022.	146
Figura 104 - CHL media, primavera 2022.....	146
Figura 105 - TSM medio, primavera 2023.	147
Figura 106 - CHL media, primavera 2023.....	147
Figura 107 - TSM medio, estate 2021.	148
Figura 108 - CHL media, estate 2021.....	148
Figura 109 - TSM medio, estate 2022.	149
Figura 110 - CHL media, estate 2022.....	149
Figura 111 - TSM medio, estate 2023.	150
Figura 112 - CHL media, estate 2023.....	150
Figura 113 - TSM medio, inverno2021.....	151
Figura 114 - CHL media, inverno 2021.....	151
Figura 115 - TSM medio, inverno2022.	152
Figura 116 - CHL media, inverno 2022.....	152
Figura 117 - TSM medio, inverno 2023 (dicembre 2022-febbraio 2023).	153
Figura 118 - CHL media, inverno 2023 (dicembre 2022-febbraio 2023).....	153
Figura 119 - Regressione dei minimi quadrati tra la CDOM stimata dalle immagini Sentinel-2 e quella ottenuta dai dati in situ (dataset 2020).	156
Figura 120 -Mappa di distribuzione della CDOM nell'area oggetto di studio (immagine Sentinel-2, 09 settembre 2020).	157
Figura 121 - Mappa di distribuzione della CDOM nell'area oggetto di studio (immagine Sentinel-2, 17 settembre 2020).	158
Figura 122 -Punto di installazione della stazione fissa di torbidità.	159
Figura 123 -Componenti di alimentazione e gestione della sensoristica e della trasmissione dati della Stazione Fissa di Torbidità.....	160
Figura 124 - Grafico dell'andamento della torbidità nel tempo.	161
Figura 125 - Ubicazione dei transetti per l'indagine della morfologia della spiaggia sommersa (UTM, WGS84).....	163
Figura 126 - Profili morfologici acquisiti durante le due campagne di misura.	164
Figura 127 -Ubicazione dei transetti per l'indagine della morfologia della spiaggia sommersa, campagne estiva 2020 ed invernale 2021 (UTM, WGS84).	165
Figura 128 -Ubicazione dei transetti per l'indagine della morfologia della spiaggia sommersa, campagna integrativa (UTM, WGS84).	166
Figura 129 - Profili morfologici acquisiti durante le due campagne di misura, estiva 2020 (linea rossa) Invernale 2021 (linea blu).	167
Figura 130 -Profili morfologici acquisiti durante la campagna integrativa 2021.....	168
Figura 131 - Ubicazione delle stazioni di campionamento dei sedimenti superficiali (UTM, WGS84) nell'area prossima a Fiumicino.	169
Figura 132 - Figura xx. Ubicazione delle stazioni di campionamento dei sedimenti superficiali (UTM, WGS84) nell'area estesa, rispetto ai transetti di misura morfologica.	170
Figura 133 - Curve di frequenza relativa dei campioni prelevati durante la stagione estiva (agosto 2020).	174
Figura 134 - Curve di frequenza relativa dei campioni relativi alla stagione invernale (gennaio 2021)..	174
Figura 135 - Curve di frequenza relativa dei campioni prelevati lungo l'area estesa.....	176
Figura 136 - Piano di campionamento.	177

Figura 137 - Curve di frequenza relativa della frazione sabbiosa dei campioni analizzati.	179
Figura 138 - Ubicazione dei transetti di misura morfologica della spiaggia emersa, la posizione dei transetti è indicata con linea rossa.	180
Figura 139 - Profili morfologici della spiaggia emersa nelle tre stagioni significative.	181
Figura 140 - Attività 210Pb vs sedimenti accumulati.	187
Figura 141 - Modello di regressione lineare.	189
Figura 142 - Calibrazione modello CRS con modello di regressione lineare.	189
Figura 143 - Foci dei fiumi Aronne (in alto) e Zambra (in basso) nei mesi settembre 2020 e marzo 2021.	196
Figura 144 - Piano di campionamento del benthos di fondo mobile.	200
Figura 145 - Punti di campionamento localizzati nell'area di costruzione dell'opera.	201
Figura 146 - Percentuale di abbondanza dei principali taxa analizzati.	206
Figura 147 - Percentuale di diversità specifica dei principali taxa analizzati.	207
Figura 148 - Rapporto tra abbondanza e diversità specifica nei diversi taxa analizzati.	209
Figura 149 - Variazione delle abbondanze nei differenti transetti analizzati.	209
Figura 150 - Variazione delle abbondanze nei differenti punti di campionamento analizzati.	210
Figura 151 - Abbondanza e ricchezza specifica all'interno dell'area portuale.	212
Figura 152 - Abbondanza dei gruppi trofici all'interno dell'area portuale.	213
Figura 153 - Piano di indagine ROV, Capo Linaro, ottobre 2022.	216
Figura 154 - Capo Linaro, transetto di largo.	217
Figura 155 - Capo Linaro, transetto medio.	217
Figura 156 - Capo Linaro, transetto costiero.	218
Figura 157 - Aree di indagine ROV, fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, aprile 2023.	219
Figura 158 - Fondali antistante la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda.	219
Figura 159 - Fondali antistante la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda.	220
Figura 160 - Aree di indagine ROV, Secche di Tor Paterno, gennaio 2023.	221
Figura 161 - Fondali dell'AMP Secche di Tor Paterno.	222
Figura 162 - Fondali dell'AMP Secche di Tor Paterno.	222
Figura 163 - Fondali dell'AMP Secche di Tor Paterno.	223
Figura 164 - Piano di campionamento, Capo Linaro 2022.	227
Figura 165 - Profondità, Capo Linaro 2022.	228
Figura 166 - Tipologia di substrato, Capo Linaro 2022. I fondali in giallo rappresentano fondi duri con presenza di <i>P. oceanica</i> , i fondali in rosso rappresentano fondo duro con copertura algale.	228
Figura 167 - Copertura algale e vegetale, Capo Linaro 2022.	229
Figura 168 - Altezza della vegetazione (m), Capo Linaro 2022. È stata utilizzata una soglia di 0.3 m per discriminare la <i>P. oceanica</i> dal resto della vegetazione.	229
Figura 169 - Piano di campionamento per le indagini strumentali, fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, marzo 2023.	230
Figura 170 - Profondità (m), fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, marzo 2023.	231
Figura 171 - Tipologia di fondale, fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, marzo 2023. I fondali in giallo corrispondono a fondo duro con presenza di copertura algale. I fondali in rosso rappresentano fondi duri con presenza di <i>P. oceanica</i>	231
Figura 172 - Copertura della vegetazione (alghe e piante), fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, marzo 2023.	232
Figura 173 - Altezza della vegetazione, fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, marzo 2023. Le altezze sono riferite in particolare alla <i>P. oceanica</i> . È stata utilizzata la soglia di 0.3 m.	232
Figura 174 - Piano di campionamento per le indagini strumentali, AMP Secche di Tor Paterno, dicembre 2022.	233
Figura 175 - Profondità (m), AMP Secche di Tor Paterno, dicembre 2022.	234
Figura 176 - Tipologia di fondale, AMP Secche di Tor Paterno, dicembre 2022. I fondali in rosso corrispondono a fondi duri con presenza di <i>P. oceanica</i> e biocostruzioni di coralligeno.	234



Figura 177 - Copertura della vegetazione, AMP Secche di Tor Paterno, dicembre 2022. Abbondante presenza di P. oceanica.....	235
Figura 178 - Variazione delle abbondanze e della diversità specifica nelle catture delle 3 imbarcazioni oggetto di studio.	238
Figura 179 - Pescato imbarcazione Claudio Padre, specie più abbondanti.	239
Figura 180 - Pescato imbarcazione San Pietro, specie più abbondanti.....	240
Figura 181 - Pescato più abbondante Santa Maria.....	241
Figura 182 - Esempio di sovrapposizione di diversi layer su piattaforma GIS: modelli matematici su biocenosi bentoniche.	242



Lista delle tabelle

Tabella 1 - Lista delle RMSE per singolo fotogramma IGM.	57
Tabella 2. Parametri radar.	90
Tabella 3 - Intervalli di tempo in cui ha acquisito lo strumento.	98
Tabella 4 - Concentrazione della clorofilla a di n. 80 campioni di acqua di mare prelevati durante le campagne di misura effettuate in Fase 1.	117
Tabella 5 - Concentrazione dei solidi sospesi di n. 65 campioni di acqua di mare prelevati durante le campagne di misura effettuate in Fase 1.	119
Tabella 6 - Assorbimento CDOM a 400 nm di n. 30 campioni di acqua di mare prelevati durante le campagne di misura effettuate in Fase 1.	121
Tabella 7 - Concentrazioni dei nutrienti disciolti e totali di azoto e fosforo di n.3 campioni di acqua di mare prelevati durante le campagne di misura effettuate in Fase 1.	136
Tabella 8 - Caratteristiche Sentinel-2 (https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/Sentinel2msi/resolutions/ /radiometric); * Rapporto segnale/rumore alla radianza di riferimento.	137
Tabella 9 - Date di rilevamento dei dati Sentinel-2.	139
Tabella 10 - Percentuali medie e deviazioni standard di ghiaie, sabbie e fanghi dei campioni prelevati durante la stagione estiva (agosto 2020).	172
Tabella 11 - Percentuali medie e deviazioni standard di ghiaie, sabbie e fanghi dei campioni prelevati durante la stagione invernale (gennaio 2021).	173
Tabella 12 - Percentuali medie e deviazioni standard di ghiaie, sabbie e fanghi dei campioni prelevati a 2, 5, e 10 m lungo nell'area estesa.	175
Tabella 13 - Percentuali di sabbia, ghiaia e fango misurate nelle stazioni di campionamento.	178
Tabella 14 - Campioni di sedimento prelevati nelle tre stagioni significative.	181
Tabella 15 - Percentuali di ghiaia, sabbia e fango dei campioni analizzati nelle tre stagioni.	184
Tabella 16 - Confronto dei risultati ottenuti dalle analisi chimiche con le soglie sopra descritte, transetti A e B.	191
Tabella 17 - Confronto dei risultati ottenuti dalle analisi chimiche con le soglie sopra descritte, transetti C e D.	192
Tabella 18 - Confronto dei risultati ottenuti dalle analisi chimiche con le soglie sopra descritte, Transetto E e Porto.	192
Tabella 19 - Risultati delle misurazioni effettuate alle foci dei corsi d'acqua.	195
Tabella 20 - Percentuali di ghiaia sabbia e fango, e analisi granulometrica della frazione sabbiosa dei sedimenti recuperati durante le tre campagne.	198
Tabella 21- Coordinate delle stazioni di campionamento.	202
Tabella 22 - Percentuale di distribuzione degli individui tra le 10 specie più abbondanti.	211
Tabella 23 - Percentuale di distribuzione degli individui delle quattro specie più abbondanti.	212
Tabella 24 - Valutazione dello stato ecologico (MAES e q-MAES) nelle tre aree di studio.	224
Tabella 25 - Risultati dell'analisi dei parametri morfo-strutturali della <i>P. oceanica</i> nelle aree di Capo Linaro e di Macchiatonda.	226
Tabella 26 - Pescato imbarcazione Claudio Padre.	238
Tabella 27 - Pescato imbarcazione San Pietro.	239
Tabella 28 - Pescato imbarcazione Santa Maria.	240



1. INTRODUZIONE

Il presente documento rappresenta il report conclusivo delle attività previste dalla Fase 1 del 'Progetto di ricerca: Caratterizzazione morfodinamica e di trasporto solido, idrodinamica ed ecologica dell'unità fisiografica Capo Linaro Capo d'Anzio - Programma Esecutivo di Monitoraggio', che a sua volta costituisce uno dei prodotti dell'attività di ricerca previsti dal Progetto 'Predisposizione delle attività di indagine per la realizzazione dello stralcio del I° Lotto Funzionale del Nuovo Porto commerciale di Fiumicino'.

Il progetto si inquadra in un ampio sistema di osservazione, monitoraggio ed analisi dell'ambiente marino che risponde all'esigenza di armonizzare la salvaguardia degli ecosistemi marini con una corretta gestione e sviluppo degli usi delle aree costiere. La risposta dei sistemi naturali alle variazioni generate da specifici interventi sulla costa si sovrappongono alle variazioni indotte dai trend climatici e dalle modifiche territoriali (uso del suolo, interventi sugli alvei, industrie) che avvengono nei bacini afferenti generando una sovrapposizione di effetti che modulano l'evoluzione del tratto di mare ricevente e delle coste a differenti scale spaziali e temporali.

Il focus del progetto è quello di studiare le eventuali variazioni indotte dalla costruzione delle opere sul comparto morfodinamico, di trasporto solido e sul comparto biotico, tenendo conto delle variazioni già in atto nell'area oggetto di studio.

Per poter analizzare un sistema così complesso e separare il più correttamente possibile le variazioni indotte da un'opera rispetto all'evoluzione del sistema stesso è quindi fondamentale conoscere le caratteristiche fisiche e dinamiche dell'area oggetto di studio e l'attuale stato ambientale, attraverso anche un'approfondita analisi dei principali impatti e delle pressioni che influiscono sull'intera area e gli habitat presenti.

Il progetto si pone quindi l'obiettivo di studiare le caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche dell'area compresa tra Capo Linaro e Capo d'Anzio, attraverso uno studio multidisciplinare che prevede l'integrazione di dati osservativi e modellistica numerica e di supportare lo sviluppo delle opere e la loro integrazione nell'area supportando la progettualità di interventi di prevenzione e mitigazione.



L'area oggetto di studio è dominata dalla presenza del fiume Tevere che, essendo il principale corso d'acqua dell'Italia centrale, influenza in maniera significativa il bilancio sedimentario nell'area e la distribuzione delle biocenosi. La stessa area sarà interessata da una serie di attività legate alla realizzazione delle infrastrutture portuali connesse al 'Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino - I Lotto Funzionale'. Le opere previste saranno realizzate in fasi differenti e le attività descritte nel presente progetto saranno funzionali alla realizzazione del I Stralcio del I Lotto Funzionale.

Le opere ascritte al I Stralcio del I Lotto funzionale prevedono la realizzazione della Darsena pescherecci (Figura 1a), protetta da opere foranee in parte conformi al I Lotto ed in parte riutilizzabili nel II Stralcio e che rispetto all'intera opera prevista rappresentano una porzione molto limitata (Figura 1b).

Si tratta di un'infrastruttura dedicata alla flotta peschereccia di Fiumicino che costituirà il nucleo del I Lotto con 620 m di diga foranea di sopraflutto, 430 m di sottoflutto e 855 metri di banchine a servizio del naviglio con un bacino protetto di 80000 mq. La realizzazione del progetto comporterà un dragaggio di circa 125.000 m³, di cui 37.870 m³ per la realizzazione dell'approfondimento alla -6 s.l.m.m, 60.001 m³ per la realizzazione della Diga di Sopraflutto e della Banchina Sud, 28.070 m³ per la realizzazione della Diga di Sottoflutto e la Banchina Nord.

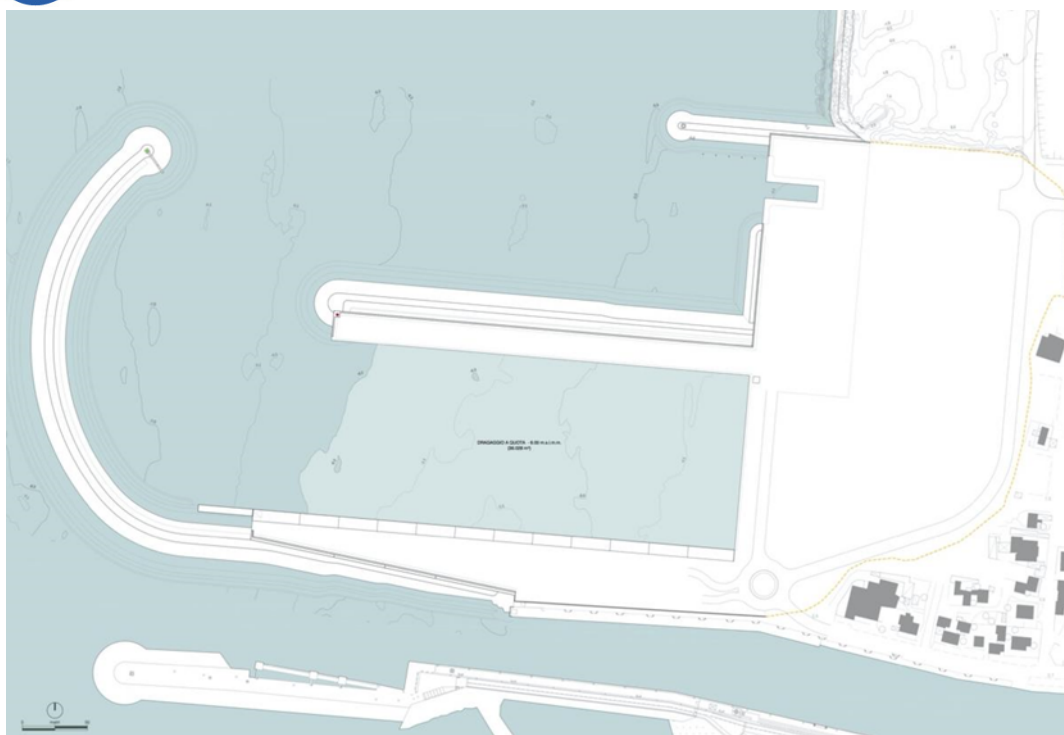


Figura 1 - Progetto I Stralcio del I Lotto Funzionale del Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino.

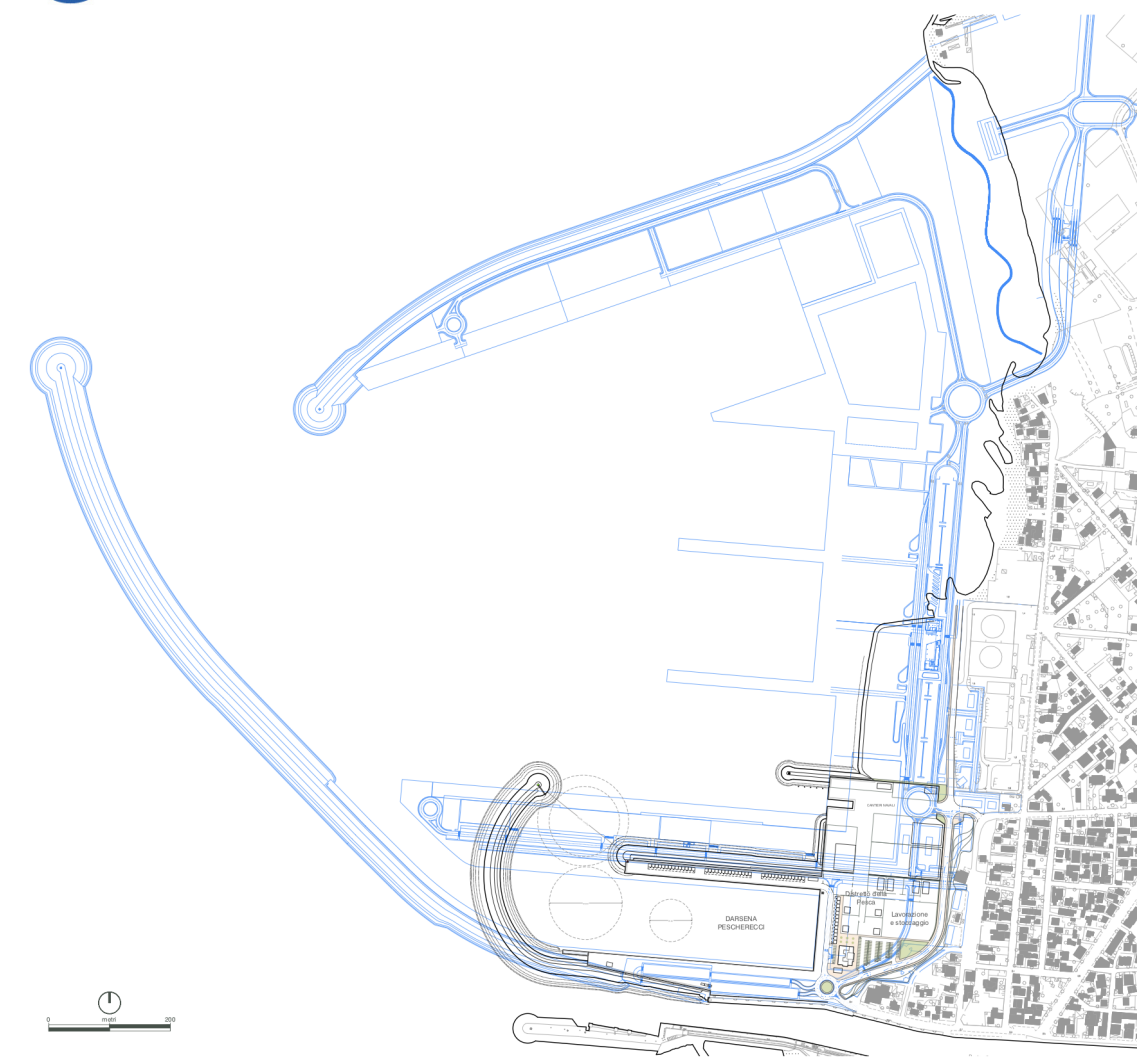


Figura 2 - Progetto del Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino I e II Lotto.

Le attività sperimentali del progetto sono state anticipate da una serie di simulazioni modellistiche (Fase 0) che hanno consentito di ottimizzare il piano di monitoraggio proposto nel presente documento.

La presente relazione riporta il dettaglio delle attività e i risultati ottenuti durante la Fase 1 (Ante Operam) del progetto, che ha riguardato il periodo agosto 2020 – maggio 2022.

2. AREA DI STUDIO

L'area di studio comprende un tratto di costa lungo circa 100 km e si estende da Capo Linaro a Nord e Capo Anzio a Sud, che costituiscono gli estremi dell'Unità Fisiografica.



Figura 3 - Plume del Tevere (Copernicus Sentinel) del giorno 25/02/2019.

Al centro dell'unità di questo tratto di costa è presente la cuspidi deltizia del Tevere che, con una lunghezza di 405 km e un bacino idrografico di 17375 km², rappresenta il principale corso d'acqua dell'Italia centrale.

La presenza del fiume Tevere condiziona con il suo apporto di sedimenti (Figura 2) la natura dei fondali e la morfologia e sedimentologia dei litorali presenti lungo la costa che sono costituiti principalmente da depositi sabbiosi ad eccezione delle porzioni a nord e sud in prossimità dei due capi dove si ritrovano coste di natura rocciosa e ciottolosa.

Dalla analisi dei morfotipi costieri (Figura 4) si evince come il morfotipo costiero dominante sia infatti quello di pianura alluvionale. Oltre al fiume Tevere, lungo l'area di studio sono presenti 13 bacini idrografici minori che presentano un regime torrentizio la cui portata è condizionata principalmente dal regime pluviometrico.



Figura 4 - Morfotipi presenti nel Lazio (Ferretti et al., 2003).

I fondali costieri (0 – 50 m) prospicienti la costa oggetto di studio presentano una pendenza che varia tra lo 0,4 % e il 2 % e si presentano per lo più con un andamento morfologico che riflette l'andamento della linea di costa ad eccezione di alcune aree



(soprattutto nel settore a nord del Tevere) dove sono presenti degli affioramenti rocciosi che costituiscono delle secche di importante valore ecologico.

In particolare, procedendo da nord verso sud si incontrano dapprima le Secche di Macchiatonda, dinanzi l'omonima riserva naturale, a nord del centro abitato di Cerenova; successivamente si incontrano le Secche di Flavia a largo del centro abitato di Ladispoli, le Secche di Palo a largo di Palidoro.

A sud della foce del Tevere, un'area di particolare rilevanza ecologica è costituita dall'Area Marina Protetta delle Secche di Tor Paterno che, situata ad una distanza tra le 4 e le 7 miglia dalla costa, di fronte alla tenuta presidenziale di Castelporziano, è caratterizzata dall'essere completamente sommersa con un fondale che varia dai 18 ai 60 m.

In generale l'area costiera e deltizia presentano un'alta antropizzazione con conseguente perdita dei tratti caratteristici di spiaggia, con particolare riferimento alle strutture dunali ed alle linee di riva interessate da opere di protezione dall'erosione. Stante la perdita di naturalità dell'area costiera portuale e peri-portuale, a livello preliminare sono state individuate quattro zone rappresentative tre in corrispondenza di aree costiere naturali: a nord Furbara e Passo Scuro, Castel Porziano a sud della foce del Tevere, una in corrispondenza della spiaggia di Fregene che, sebbene presenti un retrospiaggia fortemente antropizzato, costituisce un'area molto sensibile dal punto di vista della dinamica litoranea e dell'uso turistico; inoltre verranno analizzate l'area in prossimità del delta del fiume Tevere e le chiusure, a nord e a sud dell'unità fisiografica. Tali aree sono state successivamente utilizzate, come aree campione dove analizzare le eventuali variazioni ecologiche e geomorfologiche che potrebbero essere generate dalla realizzazione delle nuove opere della Darsena Pescherecci a Fiumicino; mentre tutte le informazioni utili ai fini dell'analisi del campo idrodinamico e della dispersione delle particelle fini e necessarie alla calibrazione dei modelli numerici saranno analizzate a scala di Unità fisiografica.

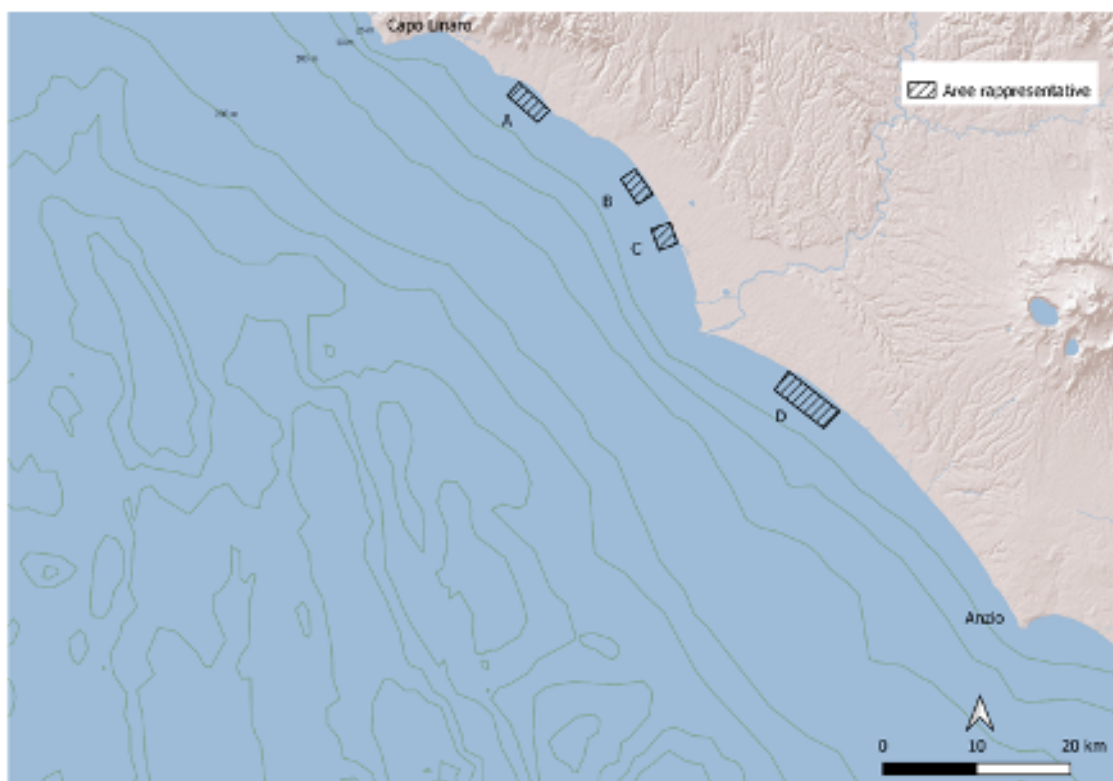


Figura 5 - Unità Fisiografica Capo Linaro – Capo Anzio: aree costiere rappresentative presso Furbara (A), Passo Scurò (B), Fregene (C), Castel Porziano (D).

3. MODELLISTICA NUMERICA

Di seguito vengono riportati la descrizione e i risultati dei modelli numerici relativi alle differenti attività oggetto di studio, tra cui: gli impatti del dragaggio, gli impatti sul trasporto solido, l'idrodinamica, l'evoluzione della linea di riva, nonché l'operatività.

3.1 Modelli numerici applicati allo studio dei potenziali impatti sugli ecosistemi marini e sulla dinamica sedimentaria

Analisi dati Copernicus service

Il dominio del modello Shyftem si estende da Civitavecchia a nord a Torre Astura a sud e comprende l'unità fisiografica Capo Linaro-Capo Anzio che costituisce l'area di studio del presente progetto. La linea di costa è stata ricostruita integrando i dati estratti dalle immagini satellitari ad alta risoluzione e quelli presente nel dataset di Open StreetMap. La batimetria dell'area di studio è stata ricostruita utilizzando i rilievi di dettaglio forniti dall'Autorità di Sistema Portuale nella zona in cui verrà realizzata la nuova opera, a cui sono stati integrati i dati disponibili nella piattaforma Emodnet.

Il modello utilizza una griglia di calcolo agli elementi finiti con risoluzione variabile da 3000 m in mare aperto a 50/100 m lungo la costa dell'unità fisiografica e con infittimenti maggiori fino a 20 m a nord di Fiumara Piccola, dove verrà realizzato il primo stralcio del nuovo Porto di Fiumicino.

Il dominio si estende a largo fino ad una distanza di 35 km dalla costa che equivale ad una profondità di circa 1000 m. L'estensione del dominio di calcolo è stata considerata ottimale per il downscaling con i risultati del modello padre, rappresentato dal modello MFS (Mediterranean Forecasting System) che fornisce le condizioni iniziali con una risoluzione spaziale di $0.042^\circ \times 0.042^\circ$ (che equivalgono all'incirca a 4.5 km) e le condizioni al contorno con una risoluzione temporale di 1 giorno. Lungo la verticale gli strati hanno uno spessore non uniforme, con una risoluzione che diminuisce con l'aumentare della profondità (1 m nella zona superficiale fino a 50 m di spessore negli strati profondi). Le variabili utilizzate nel processo di downscaling sono il livello del mare, la temperatura, la salinità e la velocità delle correnti marine.

Il modello Shyfm è forzato inoltre con dati mareali provenienti dal modello OTPS (OSU Tidal Prediction Software, codice in grado di fornire il segnale di marea) e da dati atmosferici di velocità del vento, temperatura dell'aria e del punto di rugiada, pressione atmosferica, radiazione solare, copertura nuvolosa provenienti dal dataset di ECMWF. Questi ultimi dati vengono impiegati dal modello sia per forzare il campo di corrente negli strati superficiali, sia per calcolare gli scambi di calore all'interfaccia aria-mare.

Per riprodurre la dinamica fluviale nella zona del delta del Tevere sono state utilizzate due diverse configurazioni della griglia di calcolo:

- 1) configurazione River-Coastal-Ocean (RCO): immissione di dati di portata liquida, temperatura e salinità a monte del punto di intersezione dei due rami del fiume Tevere (in prossimità di Capo due Rami);
- 2) configurazione Coastal-Ocean (CO): immissione diretta nella zona delle foci di Fiumara Piccola e Fiumara Grande inserendo differenti valori di portata liquida assumendo che la portata di Fiumara Piccola è di 1/5 rispetto a quella di Fiumara Grande (Mikhailova et al., 1999; Manca et al., 2014).

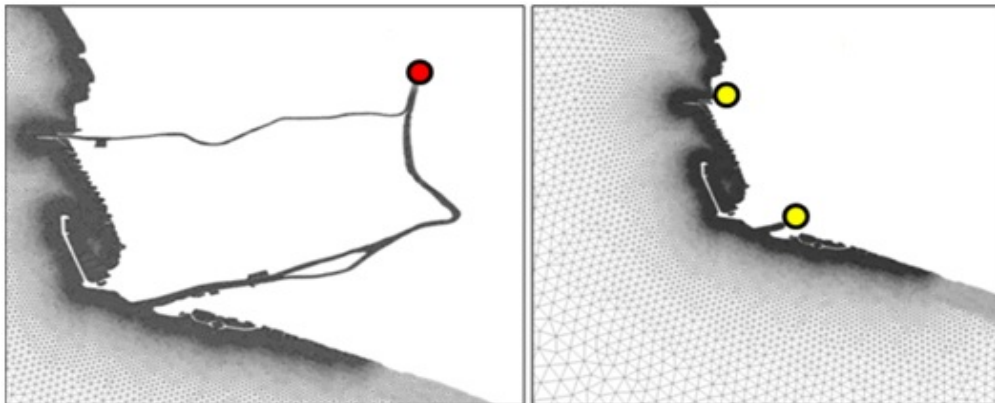


Figura 6 - Configurazioni utilizzate nel modello Shyfm per riprodurre l'input fluviale del fiume Tevere: a sinistra la configurazione RCO a destra quella CO.

3.2 Predisposizione dei modelli operativi e catena operativa



A partire dalle esperienze in campo di previsione operativa a livello europeo (e.g. servizio CMEMS, <https://marine.copernicus.eu/>), il CMCC ha sviluppato le procedure informatiche per la messa in operatività previsionale del sistema idrodinamico e di onda di Fiumicino.

La catena operativa è in grado ogni giorno di fornire 3 giorni di previsioni con frequenza oraria. Gli output sono forniti sia in formato non strutturato (nativo) che in formato *regridded* per *downstream services* applications (ad es. per la visualizzazione e per i modelli di trasporto). I campi oceanici rilasciati quotidianamente comprendono correnti 3D, temperatura e salinità e livello del mare, altezza significativa dell'onda, periodo e direzione.

La metodologia di previsione operativa si basa ogni giorno sulla re-inizializzazione dei modelli ad alta risoluzione di Fiumicino dai modelli di MedCMEMS. La strategia di re-inizializzazione consente di sfruttare i campi sistematici e ad alta qualità del modello Med CMEMS (che include il modulo di assimilazione dei dati osservativi), che fornisce prodotti di previsione operativa nell'ambito del servizio CMEMS.

Il ciclo di previsione giornaliero per la configurazione del modello idrodinamico è riportato in Fig. 7a. Con j come giorno corrente, i campi di inizializzazione (presi dai prodotti di simulazione Med-CMEMS) vengono imposti alle ore 12:00 di 3 giorni indietro ($j - 3$) come campi istantanei. Il ciclo di previsione sfrutta le simulazioni Med-CMEMS (per $j - 2$ e $j - 1$) e le previsioni Med-CMEMS (per $j + 1$, $j + 2$ e $j + 3$) come condizione di contorno laterale, mentre le condizioni di contorno della superficie sono basate sull'analisi ($j - 3$, $j - 2$, $j - 1$) e le previsioni ($j + 1$, $j + 2$, $j + 3$) di ECMWF. La previsione viene predisposta quotidianamente ed eseguita automaticamente. La catena operativa viene attivata non appena sono disponibili i forzanti atmosferici e oceanici di larga scala. Le procedure tecniche (Figura 7b), attraverso script e codici per il calcolo dei campi di previsione, possono essere riassunte nella preelaborazione dei dati di input, nell'esecuzione del modello e nella post-elaborazione del modello di output. Le principali procedure informatiche si basano su workflow manager e script scritti in linguaggio python. La catena operativa è progettata con un approccio di scalabilità e riutilizzabilità.

La previsione dei modelli, in modalità preoperativa, è visualizzata al link: <https://fiumicino.cmcc.it>. Si riportano in figura 7 alcuni esempi di visualizzazione dei campi.

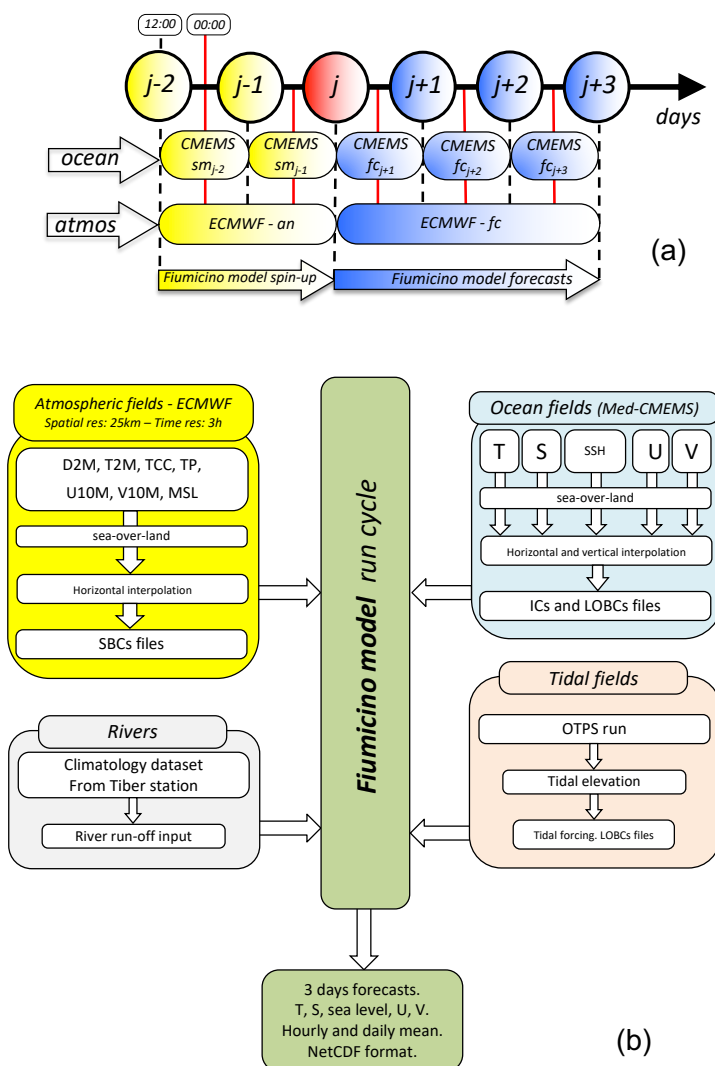


Figura 7 - Ciclo di previsione giornaliero (a) e catena operativa (b).

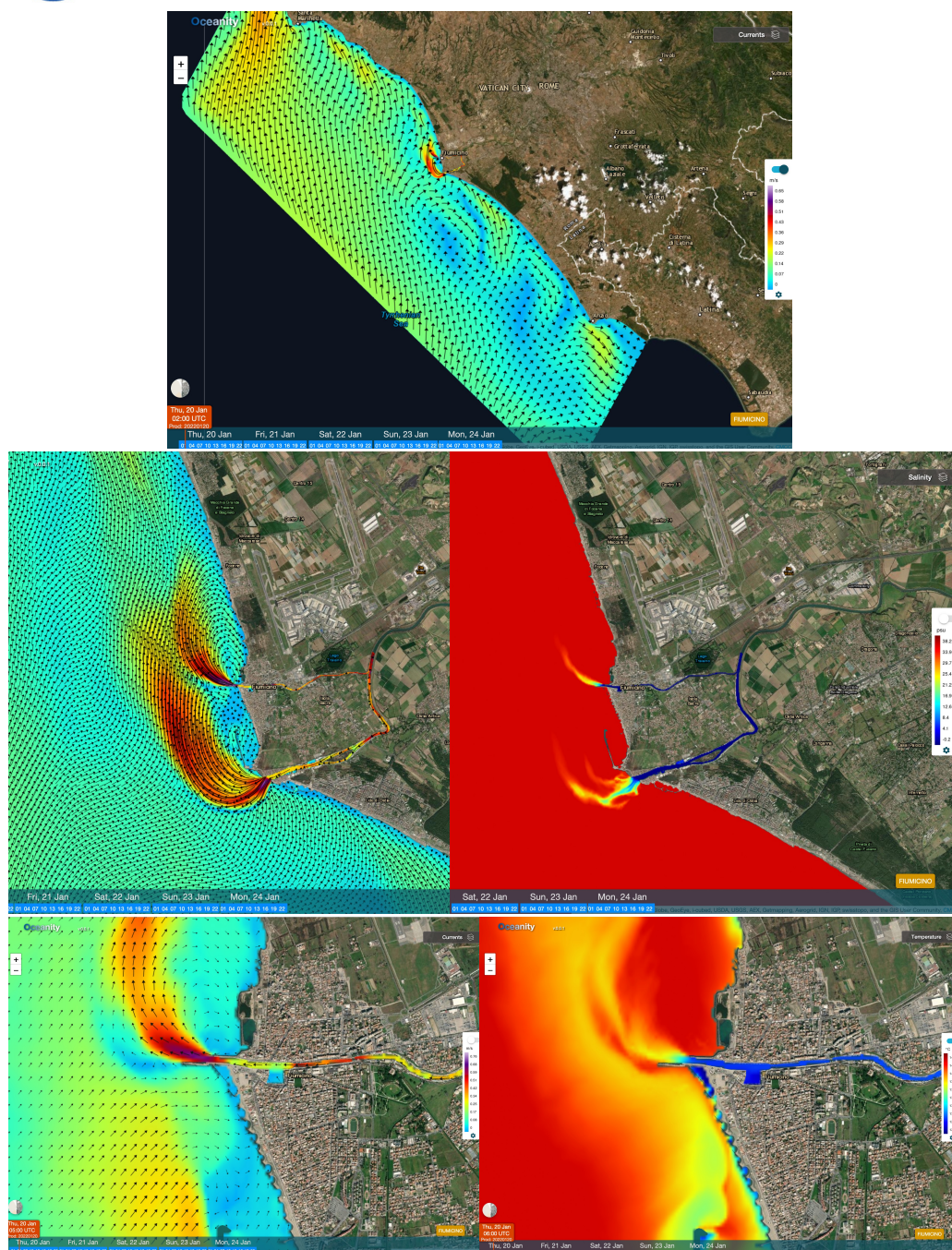


Figura 8 - Esempi di visualizzazione delle previsioni.

3.3 Validazione dei modelli idrodinamici (onde e correnti) e di trasporto solido con i dati di raccolti in situ

Per scegliere quale delle due configurazioni (CO e RCO; vedi paragrafo 3.1) riproduce meglio la dinamica nella zona costiera del delta del fiume Tevere, i risultati del modello Shyfer sono stati confrontati con i profili di temperatura e salinità misurati in un punto a nord distante circa 500 m dalla foce di Fiumara Piccola. I dati sono stati acquisiti tra il mese di giugno e quello di agosto del 2019 attraverso la sonda multiparametrica Idronaut.

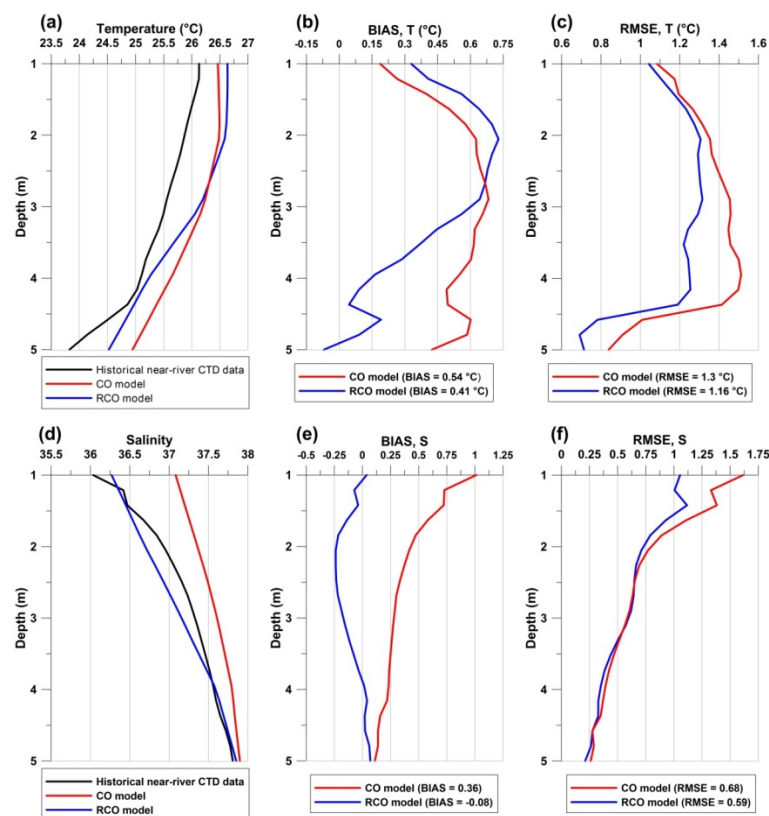


Figura 9 - Validazione delle configurazioni CO e RCO utilizzando i dati CTD raccolti in prossimità di Fiumara Piccola. Il grafico mostra profili medi di temperatura (a) e salinità (d) con bias (b, e) e RMSE (c, f).

L'esperimento di sensibilità indica un'accuratezza molto elevata della configurazione RCO, particolarmente evidente nei profili di salinità. Il setup CO potrebbe potenzialmente



avere lo stesso livello di performance di quello RCO. Questo risultato è raggiungibile solo effettuando un lungo processo di calibrazione in diversi periodi di tempo agendo principalmente sul partizionamento dello scarico fluviale in prossimità delle due foci (qui settato al 20-80% a seguito delle osservazioni presenti in Mikhailova et al., 1999 e Manca et al., 2014) e fornendo degli idonei valori di salinità per simulare il mescolamenti tra acqua salata e quella dolce (qui settata a 15 psu in accordo con i lavori di Oddo et al., 2005, Federico et al., 2017 e Verri et al., 2018). In altre parole, la configurazione RCO minimizza la necessità di svolgere esperimenti di calibrazione e sensibilità del modello, fornendo al tempo stesso dei risultati molto vicini alle osservazioni.

Sulla base di questi risultati, le successive simulazioni modellistiche sono state effettuate utilizzando la configurazione RCO.

La validazione nella parte off-shore è stata effettuata confrontando la temperatura superficiale prodotta dal modello con i valori di SST satellitari disponibili dal catalogo CMEMS (SST_MED_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_004). In particolare, è stata utilizzata la temperatura media dell'intero dominio di calcolo nel periodo 2018-2019.

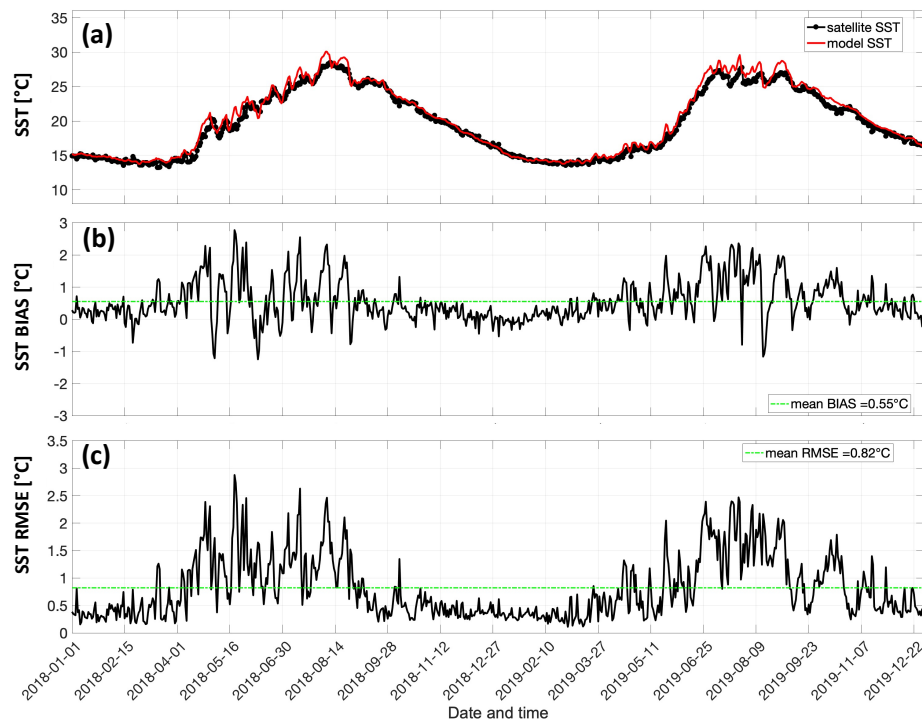


Figura 10 - Comparazione tra i dati temperatura media superficiale del modello e del satellite sull'intero dominio di calcolo (a). Vengono inoltre mostrate le metriche di bias (b) e RMSE (c).

In generale il modello mostra una soddisfacente capacità nel simulare le variazioni di temperatura media superficiale (RMSE medio pari a $0.82\text{ }^{\circ}\text{C}$), producendo una leggera sovrastima (bias medio pari a $-0.55\text{ }^{\circ}\text{C}$). La figura 10 mette in evidenza il ciclo stagionale, con un RMSE medio in inverno approssimativamente di $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ e un'elevata discrepanza in primavera ed estate, raggiungendo un RMSE massimo di $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ nel maggio del 2018. Queste differenze sono in accordo con i risultati prodotti a scala regionale (per l'intero Mar Mediterraneo e Mar Nero, vedi Barletta et al. 2021) e subregionale (per il Mar Adriatico settentrionale, McKiver et al., 2016) e per il sistema degli stretti della Turchia (Ilicak et al., 2021).

Un ulteriore confronto con la parte off-shore è stato effettuato utilizzando i dati CTD raccolti lungo 13 transetti costa largo all'interno dei quali sono state posizionate 10/11 stazioni tra i 10 m e i 200 m di profondità (per un totale di 136 punti di misura). I profili sono stati effettuati tra il mese di agosto e quello di novembre del 2020 con la sonda

multiparametrica SeaBird. Le stazioni di misura sono state raggruppate in profili "fluviali" (posizionati in prossimità della costa e influenzati dalla plume del Tevere), "costieri" (posizionati in prossimità della costa ma non influenzati dalla plume del Tevere) e "di largo" (posizionati oltre la batimetria dei 50 m), sulla base delle caratteristiche fisiche delle masse d'acqua (diagrammi T/S).

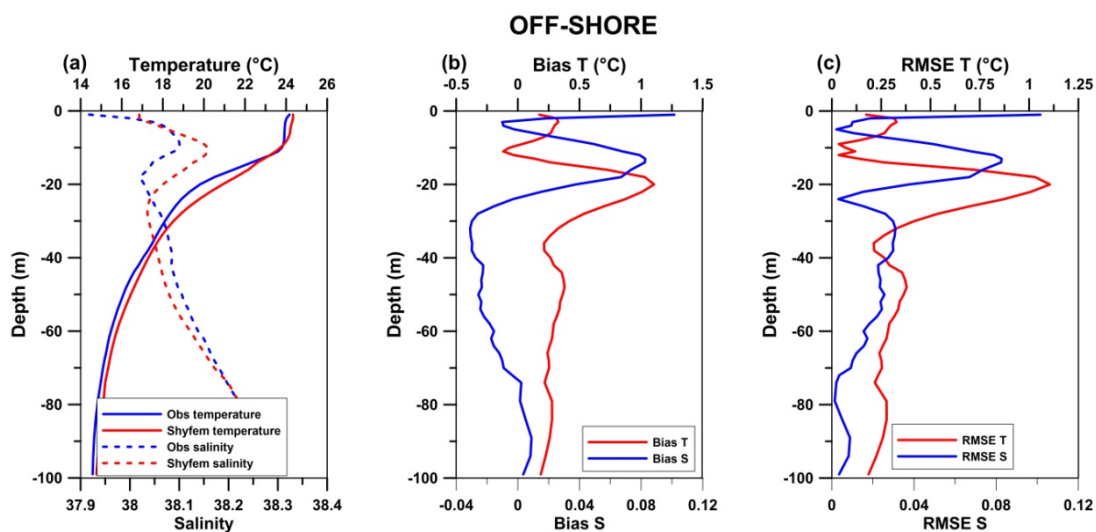


Figura 11 - Validazione del modello con i dati CTD della zona off-shore in termini di temperatura e salinità media (a). Vengono mostrate inoltre i profili di bias (b) e RMSE (c).

Il modello fornisce una buona accuratezza nel riprodurre le variazioni verticali di temperatura (RMSE < 1.25 °C) e salinità (RMSE < 0.11 psu). Per il campo di temperatura, le più elevate discrepanze sono presenti nella zona del termoclino (bias = 1.1 °C) mentre le più elevate differenze di salinità occorrono in superficie (approssimativamente di 0.1 psu) e tra i 20 e i 30 m di profondità dove si verifica un leggero spostamento del picco di salinità.

Nella zona costiera e in quella del delta fluviale, la configurazione RCO è stata messa a confronto con i dati CTD e con le correnti marine superficiali.

La figura 12 mostra l'accuratezza del modello nel riprodurre i profili di temperatura e salinità acquisite nella zona costiera, sia in prossimità del delta fluviale (d, e, f) sia nella parte non interessata dalla plume del Tevere (a, b, c).

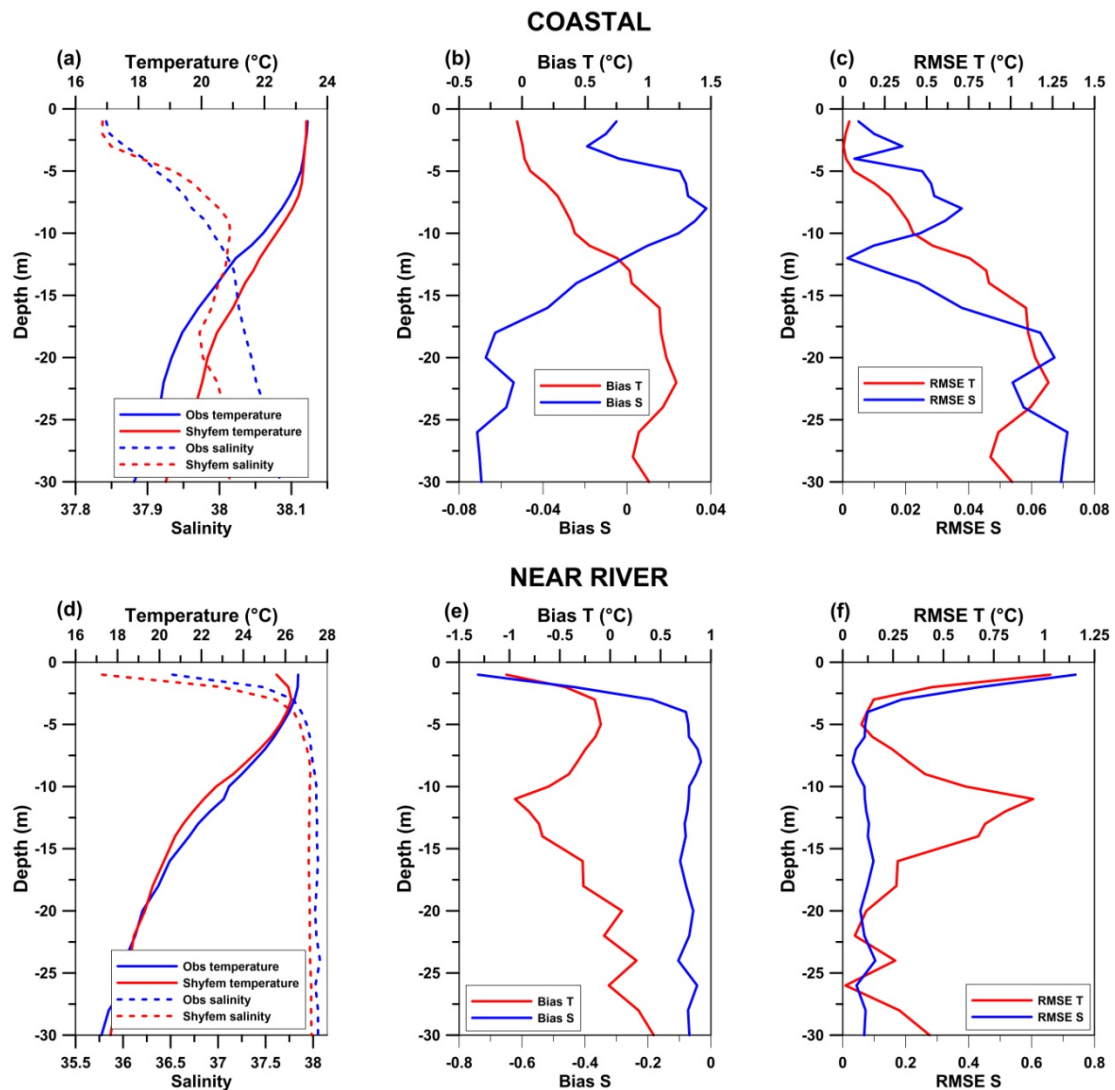


Figura 12 - Validazione del modello attraverso la comparazione con i dati CTD "costieri" (a, b, c) e "fluviali" (d, e, f).



Nella zona costiera, il modello ricostruisce le variazioni verticali di temperatura e salinità con buona accuratezza, in accordo con le stime prodotte nella parte off-shore. Un ottimo accordo è ottenuto negli strati superficiali, mentre un'elevata discrepanza occorre nella parte profonda del profilo ($RMSE - T = 1.25^{\circ}C$ e $RMSE - S = 0.07$), dove la temperatura è sovrastimata e la salinità modellata risulta più bassa dei valori misurati. Questi risultati confermano la correttezza del modello nel riprodurre gli scambi di calore all'interfaccia aria-mare ma richiedono un miglioramento nella simulazione dei processi di mescolamento verticale (Federico et al., 2017). Sebbene la performance del modello diminuisca negli strati profondi in prossimità delle foci fluviali, i risultati raggiunti in questa porzione del dominio possono essere considerati soddisfacenti nel riprodurre i complessi processi dinamici che avvengono nella zona del delta fluviale, la quale è caratterizzata da un forte gradiente di salinità e da un'elevata variabilità tipica delle aree di delta.

Il campo delle correnti marine superficiali calcolate dal modello SHYFEM nella configurazione RCO è stato confrontato con quello prodotto dal radar costiero in banda X che monitora lo stato del mare nella zona di Fiumara Piccola a partire dal dicembre del 2020 (Figura 12). Per il confronto sono stati selezionati dei periodi compresi tra ottobre 2021 e febbraio 2022 in cui sono verificati eventi estremi caratterizzati da condizioni meteomarine (vento e onde) provenienti da diverse direzioni. Le direzioni modellate mostrano un buon accordo con le misure quando gli eventi provengono da sud, da nord e da est. Il bias della variabilità spaziale ha un range compreso tra -0.2 e 0.2 m/s, con maggiore sovrastima nei casi con correnti superficiali più intense (es. Fig. 13o) e lieve sottostima con intensità di corrente inferiori (es. Fig. 13i). Le intensità delle correnti mostrano un pattern di distribuzione spaziale con una diminuzione in prossimità della costa e delle strutture portuali, la quale viene chiaramente riprodotta dal modello in accordo con i valori osservati. La discrepanza tra correnti superficiali modellate e misurate appare essere consistente con i valori di bias ottenuti da altri autori (García-León et al. (2022) nei porti spagnoli e Paladini et al. (2018) nel Golfo di Gaeta).

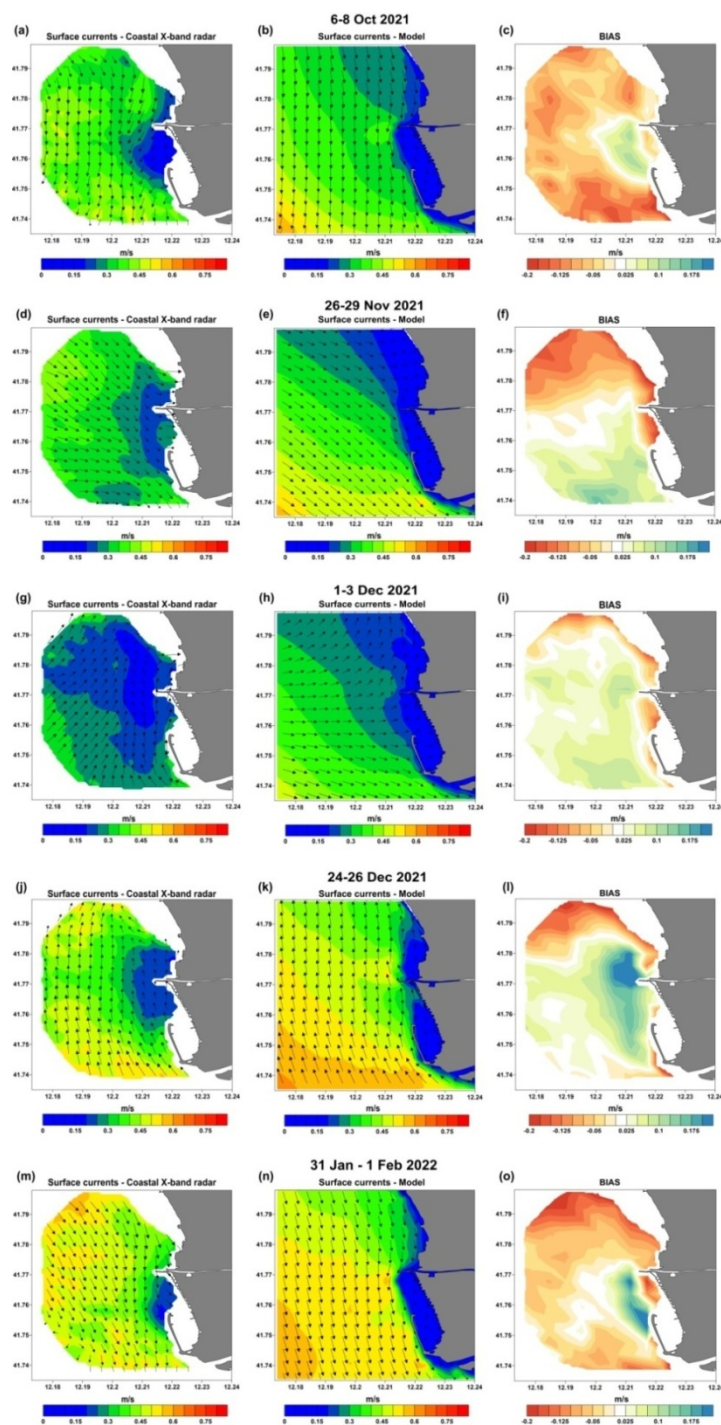


Figura 13 - Campo di correnti superficiale dal radar costiero (a, d, g, j, m), modello (b, e, h, k, n) e relativo bias (c, f, i, l, o) per eventi di storm: Oct. 6–8, 2021 (a, b, c), Nov. 26–29, 2021 (d, e, f), Dec. 4–5, 2021 (g, h, i), Dec. 24–26, 2021 (j, k, l) e Jan. 31–Feb. 1, 2022 (m, n, o).

Il periodo complessivo di funzionamento del radar è stato investigato inoltre in termini di campo medio di velocità e direzione sull'intero dominio del radar utilizzando i diagrammi polari (Figura 14) per visualizzare le classi di intensità e direzione delle osservazioni comparate con i risultati del modello.

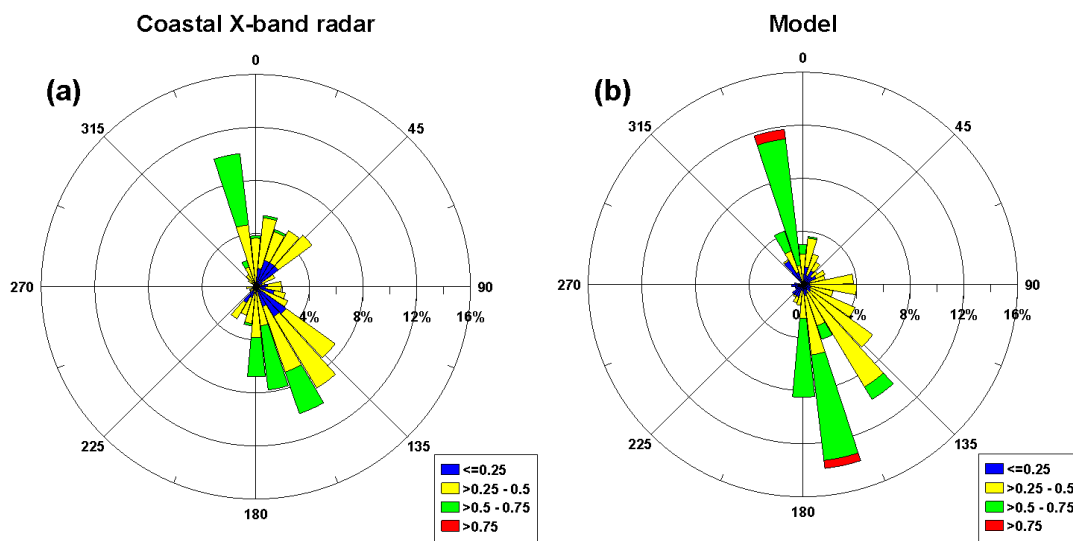


Figura 14 - Diagrammi polari del campo di velocità osservato (a) e modellato (b) ottenuto attraverso la media dell'intero dominio del radar.

Il modello riproduce la direzione dominante con buona accuratezza (345°N), anche quando stima velocità più elevate che si verificano principalmente in prossimità della foce fluviale di Fiumara Piccola. Nel quadrante meridionale del diagramma polare, i risultati del modello differiscono leggermente dalle osservazioni radar, in quanto la classe più frequente stimata dal modello (170°N) è adiacente a quella basata sulle misurazioni (160°N). In generale, le direzioni della corrente rilevate dal radar in banda X mostrano più variabilità (il diagramma polare ha più classi con frequenze maggiori di 4 %) comparato con i risultati del modello. La performance del modello nel simulare il campo di velocità superficiale può essere migliorato aumentando la risoluzione spaziale e temporale delle condizioni al boundary e di superficie (stress del vento) e considerando

gli effetti del moto ondoso nella circolazione costiera durante eventi di storm (Roland et al., 2009, Clementi et al., 2017, Causio et al., 2021) come quelli monitorati dal radar in banda X.

Un'ulteriore validazione delle correnti superficiali è stata effettuata attraverso le traiettorie dei drifter lanciati tra febbraio e marzo del 2021 nella zona del delta del fiume Tevere a diversa distanza dalle due foci. In questo caso la traiettoria del drifter è stata calcolata dal modello lagrangiano "Lagrangian drifting objects model" (Jansen et al., 2016), che riproduce il trasporto di particelle in un campo 2D o 3D utilizzando l'equazione di avvezione risolvibile con il metodo Runge–Kutta di quarto ordine. Per questo studio il modello lagrangiano è configurato per simulare lo spostamento superficiale dell'oggetto utilizzando la corrente del primo strato.

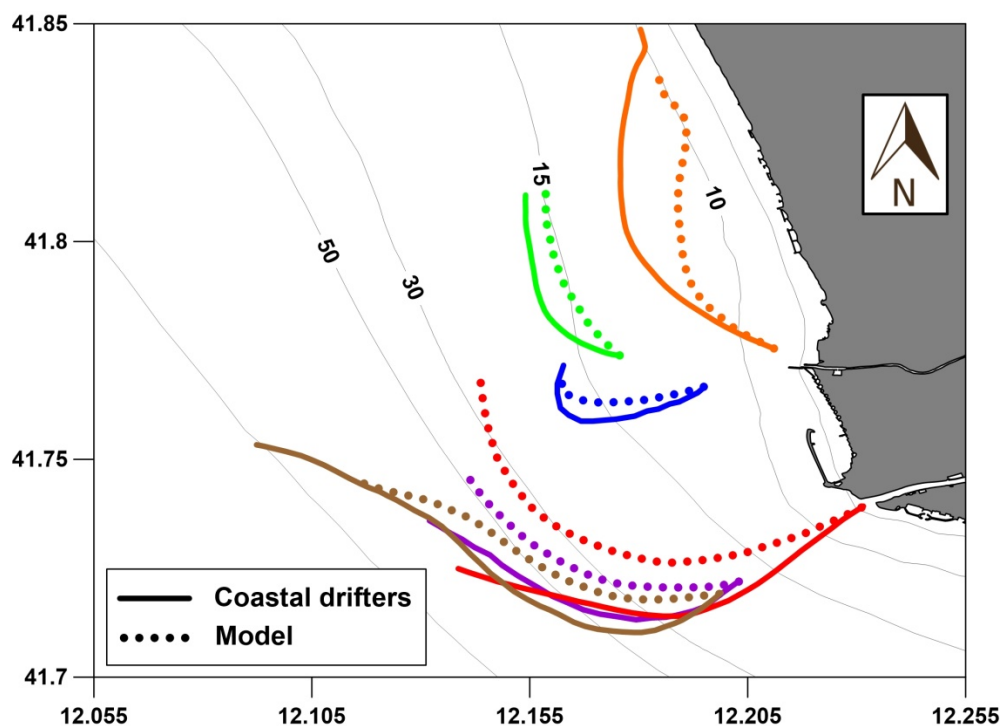


Figura 15 - Confronto tra le traiettorie delle boe lagrangiane (linee continue) e traiettorie simulate (linee tratteggiate).



Il modello mostra una più elevata accuratezza nel riprodurre le traiettorie dei drifter rilasciati in prossimità della foce di Fiumara Piccola. Nella zona di Fiumara Grande, la performance del modello nel simulare il campo di corrente superficiale migliora all'aumentare della distanza dalla foce. Come notato nella comparazione con il radar in banda X, le discrepanze tra i dati modellati e quelli osservati può essere dovuta alla bassa variabilità spaziale e temporale della forzante vento e alla mancanza dell'effetto del moto ondoso nella circolazione costiera.

Per valutare la capacità del modello con la configurazione RCO di riprodurre l'intrusione salina all'interno del ramo di Fiumara Grande, il modello SHYFEM è stato messo a confronto con i valori di salinità osservati durante il rilievo effettuato nella zona costiera del delta (fino ad una profondità di circa 20 m) e all'interno del fiume per circa 2 km a monte della biforcazione. Il campionamento è stato svolto a maggio del 2022, all'interno del quale sono stati effettuati 16 profili con la sonda SeaBird (per la parte a mare) ed Idronaut (lungo l'asta fluviale). La figura 16 mostra una tipica dinamica estuarina con acqua dolce che scorre in superficie verso il mare e acqua di più densa di origine marina che fluisce negli strati profondi verso l'interno del fiume formando un cuneo salino.

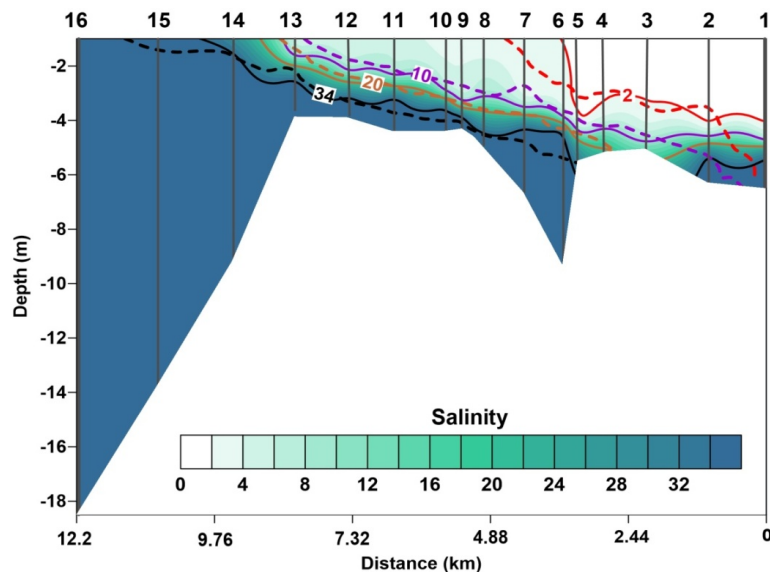


Figura 16 - Sezione trasversale di salinità lungo il ramo di Fiumara Grande. I contorni continui rappresentano le osservazioni, mentre le linee tratteggiate indicano i valori modellati.

Il modello riproduce correttamente i gradienti verticali e orizzontali di salinità dal mare (stazioni 15-17) fino alla stazione 3 localizzata all'interno del fiume. Utilizzando 2 psu (salinità limite per l'irrigazione) come valore limite per distinguere le acque dolci da quelle salate, le isolinee del modello nella parte superficiale si estendono a valle della linea osservata per meno di 1 km; nel frattempo, in basso, l'isolinea stimata scende a 0, mentre la linea osservata no. Questa differenza è dovuta al valore di 0 psu imposto al boundary fluviale all'altezza della stazione 1. In altre parole, la configurazione RCO, che è stata concepita per permettere di riprodurre l'intrusione salina fino ad una distanza di circa 8.8 km verso monte, richiede un'estensione della griglia di calcolo nella zona upstream del fiume, almeno nel periodo primaverile che è stato qui simulato. Il risultato potrebbe essere considerato accettabile in questa fase e promettente in vista dei futuri upgrades, come l'incremento di risoluzione verticale per mezzo di una discretizzazione verticale dipendente dal tempo (generalized tilted time-dependent vertical discretization, Verri et al., 2023).

Il modello WW3 implementato a scala costiera sulla stessa griglia di SHYFEM è stato verificato con il modello CMEMS basato su WAM e con i primi dati osservativi acquisiti

da radar. Nello specifico in figura 17 si riporta la mappa d'onda su tutto il dominio come media dell'anno 2018. Sulla mappa sono inoltre riportati i due punti in cui sono stati effettuati i confronti con CMEMS -WAM, uno in mare aperto (offshore) e uno sotto costa (nearshore). In figura 18 si riportano i diagrammi polari di moto ondoso per i due modelli al fine di valutare la consistenza in mare aperto di WW3 col modello CMEMS e le caratteristiche sotto costa. In figura 19 è mostrato il confronto dei due modelli con i primi dati acquisiti dal radar in termini di altezza dell'onda e direzione.

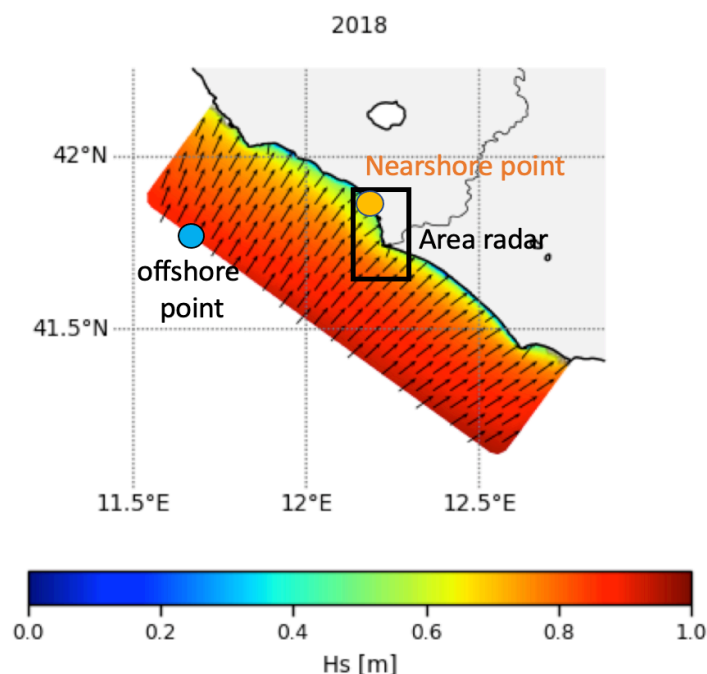


Figura 17 - Mappa d'onda significativa come media dell'anno 2018.

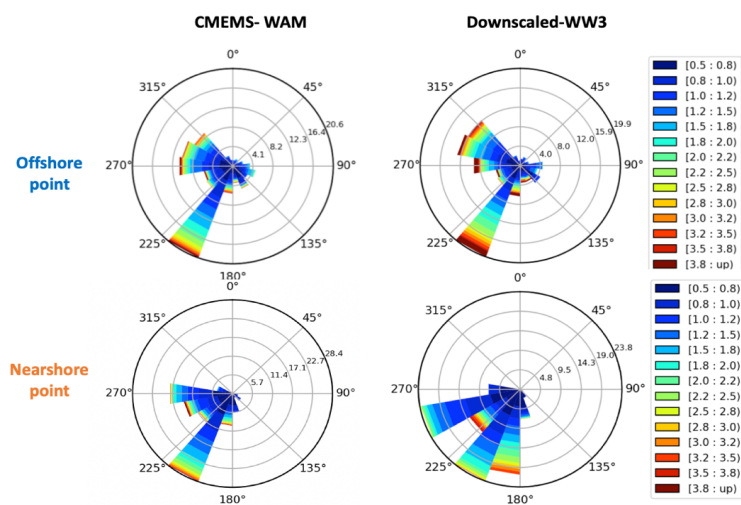


Figura 18 - Diagrammi polari in due punti significativi (offshore e nearshore) di moto ondoso per il modello d'onda di Fiumicino basato su WW3 e per il modello di CMEMS basato su WAM.

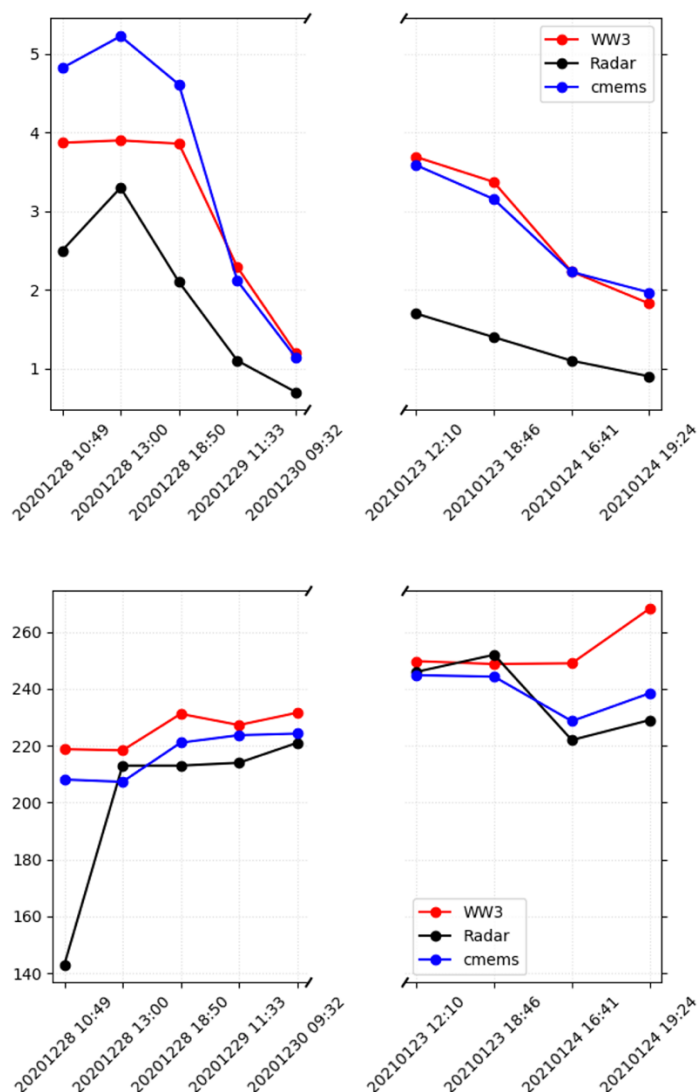


Figura 19 - Altezza d'onda in metri (pannello superiore) e direzione (pannello inferiore) per modello e radar.

3.4 Simulazioni del trasporto solido per la valutazione delle zone soggette ad erosione e sedimentazione

Il trasporto dei sedimenti nella zona costiera oggetto di studio viene analizzato attraverso due modelli, il modello XBeach e il modello SEDTRANS. Di seguito verranno riportati i risultati della validazione del primo modello e la configurazione del secondo. L'obiettivo



nel prossimo futuro è quello di utilizzare SEDTRANS in quanto utilizza un campo idrodinamico e di moto ondoso di elevata affidabilità raggiunta grazie alla validazione dei modelli SHYFEM e WW3 con i numerosi dati acquisiti nel corso di questo progetto.

3.4.1 Modello morfologico e configurazione di XBeach

XBeach è un modello 2DH (“depth averaged”), in grado di simulare il comportamento di una spiaggia soggetta ad eventi intensi di mareggiata, includendo i fenomeni di erosione della duna, inondazione e formazione di brecce. Il campo di utilizzo di tale modello morfologico è circoscritto in particolare alla scala temporale degli eventi di mareggiata, che in pochi giorni possono causare ingenti fenomeni erosivi della spiaggia. Il suo utilizzo è quindi limitato a scale spaziali relativamente piccole e ad intervalli temporali di breve/medio periodo (giorni/mesi). Il modello è in grado di risolvere coppie di equazioni orizzontali 2D legate ai fenomeni di propagazione dell’onda, di flusso, di trasporto sedimentario e di variazione del fondale, imponendo condizioni al contorno di onde variabili (spettrali) e di flusso. XBeach tiene conto della variazione temporale dell’altezza d’onda e quindi è in grado di risolvere il moto legato alle “long-wave”, generato da tale variazione.

XBeach considera l’energia delle onde come mediata sulla loro lunghezza e quindi non è in grado di simulare la forma dell’onda. Tuttavia, quando le onde si propagano dal largo verso riva la loro forma si modifica gradualmente a causa della combinazione dei processi di “shoaling”, frangimento e non-linearità. All’interno del modello l’effetto dell’asimmetria e della distorsione dell’onda viene considerato all’interno della equazione di avvezione-diffusione mediante il calcolo della velocità.

Il dominio del modello si estende sulla stessa area del modello SHYFEM e copre tutta l’unità fisiografica (Figura 20). Il dominio è suddiviso in una griglia regolare rettangolare di celle con una risoluzione orizzontale di 30 metri in entrambi le direzioni orizzontali, con l’asse delle ascisse ordinato verso costa e quello delle ordinate orientato verso la riva. La griglia presenta quindi 500 celle nella direzione trasversale alla linea di costa 3650 nella direzione longitudinale per un totale di 1825000 celle. Il modello è stato runnato con fattore morfologico pari a 10 al fine di ridurre i costi computazionali, suddividendo



comunque i vari periodi di simulazione in modo da tenere in conto che il feedback tra forzante idrodinamica e risposta della morfologia non vari eccessivamente durante i periodi simulati.

A tal proposito, con l'intento di simulare tutto un anno, è stata condotta una caratterizzazione del moto ondoso, suddivisa per direzioni e classi di altezza significativa dell'onda, per determinare quali fossero gli eventi con maggiore frequenza e con maggiore impatto sulla distribuzione dei sedimenti. Per caratterizzare il moto ondoso, sono stati utilizzati i diagrammi polare delle onde basati sul modello CMEMS (13 anni di rianalisi 2007-2019) e WW3 qui sviluppato (2 anni di simulazione 2018-2019). È stata effettuata un'analisi di sensitività al fine di valutare quali altezze d'onda e direzione producessero variazioni morfologiche, individuando nei periodi autunnale e invernale come quelli più intensi.

La forzante del livello marino è stata rappresentata selezionando un periodo di 6 ore e un andamento del livello semplificato ricavando statisticamente dei valori di riferimento dalle simulazioni con il modello SHYFEM per il periodo 2018-2019.

Nella griglia, tutti i nodi all'interno della linea di costa sono stati definiti come non erodibili, in modo da evitare che il modello andasse a simulare erosione sui bracci dei porti o in presenza di moli e banchine.

3.4.2 Validazione modello XBeach

Il modello XBeach è stato validato utilizzando le misure di morfologia della spiaggia sommersa effettuati lungo transetti costa largo localizzati nella zona del delta del fiume Tevere (Fig. 20).

Al fine di poter effettuare il confronto tra dati osservati e modellati, le simulazioni numeriche sono state svolte durante il periodo interessato dai rilievi batimetrici (Agosto-Dicembre 2020). Affinché il modello sia in grado di riprodurre il cambiamento morfologico del fondale alla fine della simulazione, la batimetria iniziale di XBeach è stata integrata con le misure di profondità effettuate nel mese di Agosto.

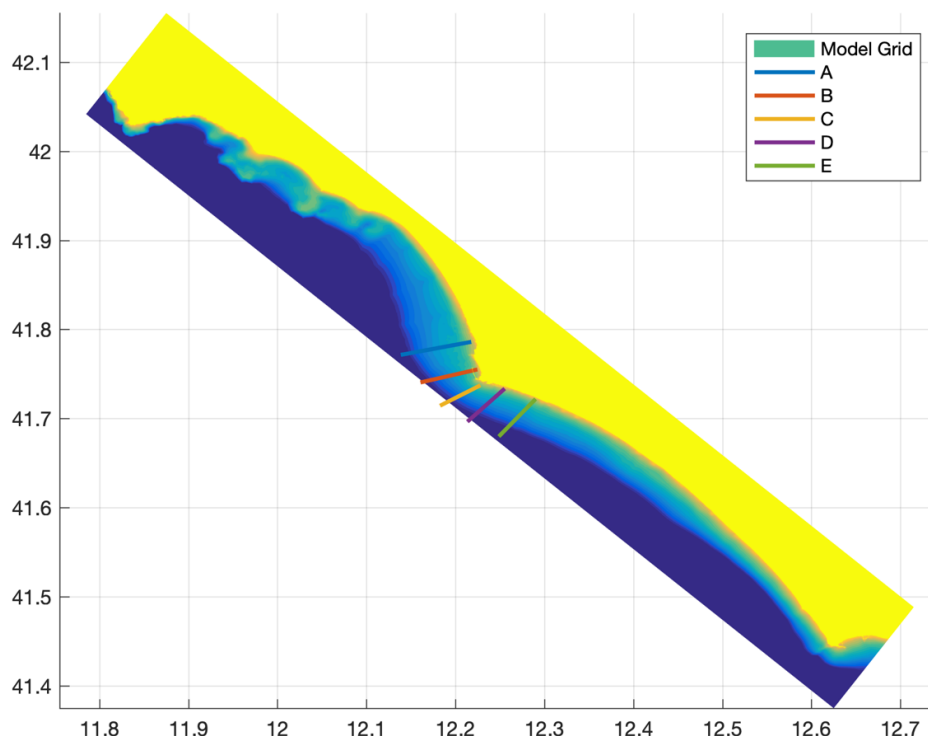


Figura 20 - dominio di calcolo del modello XBeach in cui viene riportata la batimetria e la posizione dei 5 transetti costa largo in cui è stata effettuata la misura del fondale attraverso campagne invernali ed estive con un trasduttore single beam

Dal confronto (Figura 21) emerge che il modello riproduce con buona accuratezza la variazione del fondale nella zona antistante la foce del fiume Tevere (TRB, TRC e TRD), mentre sottostima la misura della profondità nei transetti TRA e TRE, nella fascia batimetrica compresa tra -10 e -15 m. Nonostante il modello sembra riprendere bene l'andamento della dinamica dei sedimenti nella zona centrale dell'area di studio, sarebbe auspicabile, in una fase successiva, arrivare a confrontare i risultati delle simulazioni anche nell'intervallo batimetrico compreso tra il limite della spiaggia emersa e la profondità di 5 metri.

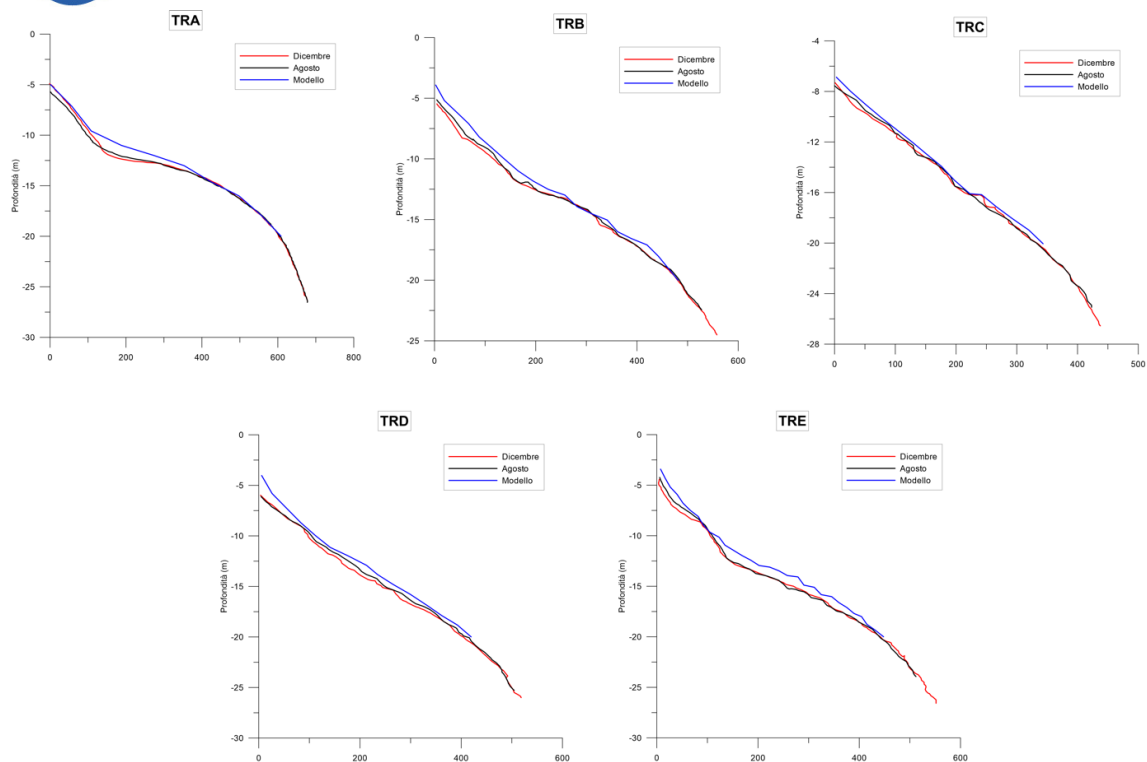


Figura 21 - comparazione tra profili di spiaggia sommersa misurati durante i rilievi batimetrici single beam (linee nera e rossa) e calcolati dal modello XBeach (linea blu).

3.4.3 Modello e configurazione di SEDTRANS

Il modello di trasporto SEDTRANS calcola la dispersione del sedimento e la morfologia del fondale utilizzando i risultati dell'accoppiamento del modello idrodinamico SHYFEM con quello di moto ondoso WW3. Il modello è quindi in grado di analizzare il trasporto del materiale dragato e di stimare le zone di accumulo ed erosione in assenza ed in presenza del primo stralcio del nuovo porto di Fiumicino.

I fenomeni di erosione e deposizione simulati dal modello avvengono principalmente all'interno dello strato limite, situato tra la colonna d'acqua e il fondale. Lo sforzo tangenziale al fondo indotto dai processi idrodinamici viene calcolato applicando la teoria dello strato limite. La scabrezza del fondale è calcolata ad ogni intervallo temporale considerando tre diverse tipologie di scabrezza: granulare, della morfologia del fondo e quella indotta dal trasporto al fondo.



SEDTRANS non solo calcola i parametri dello strato limite, ma predice anche lo sviluppo delle forme di fondo e i tassi di trasporto solido, sia come carico di fondo sia in sospensione, per sabbie e sedimenti coesivi. Il modello computa entrambe le tipologie di trasporto dei sedimenti, al fondo per i sedimenti non coesivi e sospeso per sedimenti coesivi e non coesivi. Il trasporto di fondo per i sedimenti non coesivi può essere calcolato per mezzo di diverse formule presenti all'interno di SEDTRANS.

Nel momento in cui lo sforzo tangenziale al letto supera il valore di sforzo critico per la sospensione, le particelle di sedimenti entrano nella colonna d'acqua e vengono trasportate sotto l'azione delle correnti.

SEDTRANS consente inoltre di calcolare il flusso sedimentario netto tra la colonna d'acqua e il fondo sia per i sedimenti coesivi sia per quelli non-coesivi.

La variazione morfologica del fondale è uguale alla somma dei contributi erosivi e di deposizione delle diverse frazioni sedimentarie presenti nella zona di studio e viene calcolata per entrambe le tipologie di trasporto ad ogni intervallo temporale del modello, in modo tale da aggiornare la batimetria per il modello idrodinamico.

Per caratterizzare il fondale e simulare il trasporto di materiale possono essere definite diverse classi granulometriche. Il fondale è rappresentato tramite una sovrapposizione di strati sedimentari indipendenti, ciascuno caratterizzato dalla propria granulometria. Tra di essi il più superficiale rappresenta lo strato attivo per il trasporto di sedimenti.

Una prima configurazione del modello è stata creata, considerando la stessa griglia e (non-strutturata) e batimetria di SHYFEM e WW3 (Fig. 22).

La caratterizzazione dei sedimenti a partire dai dati in-situ (Fig. 23) è stata effettuata distinguendo tra ghiaia, sabbia e limo e riportando le informazioni relative al D50.

Tali informazioni sono state interpolate nella griglia di calcolo del modello e riportate in termini di average grain size (Fig. 24).

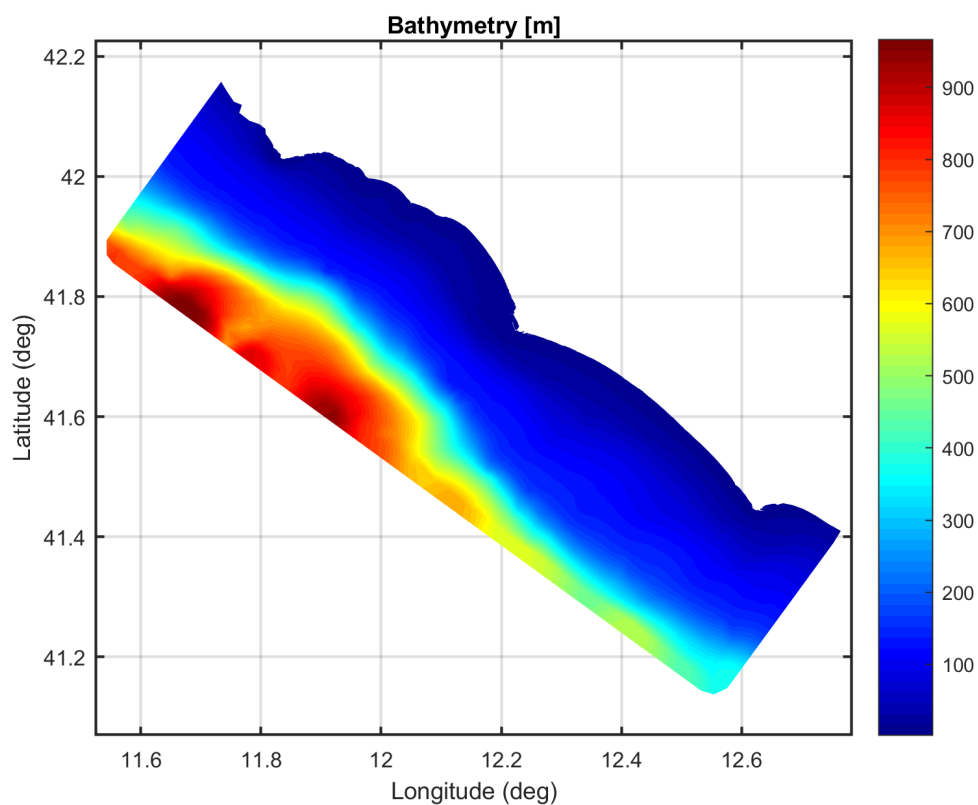


Figura 22 - dominio di calcolo e batimetria del sistema integrato e accoppiato SHYFEM-WW3-
SEDTRANS.

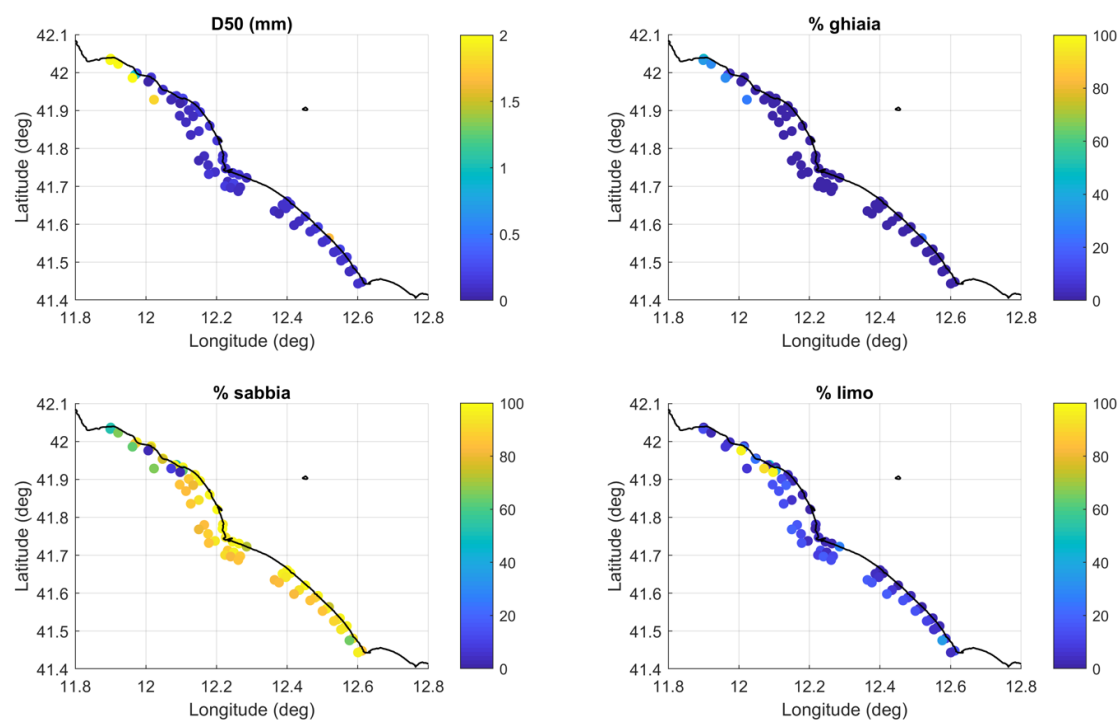


Figura 23 - caratterizzazione dei sedimenti a partire dai dati in-situ

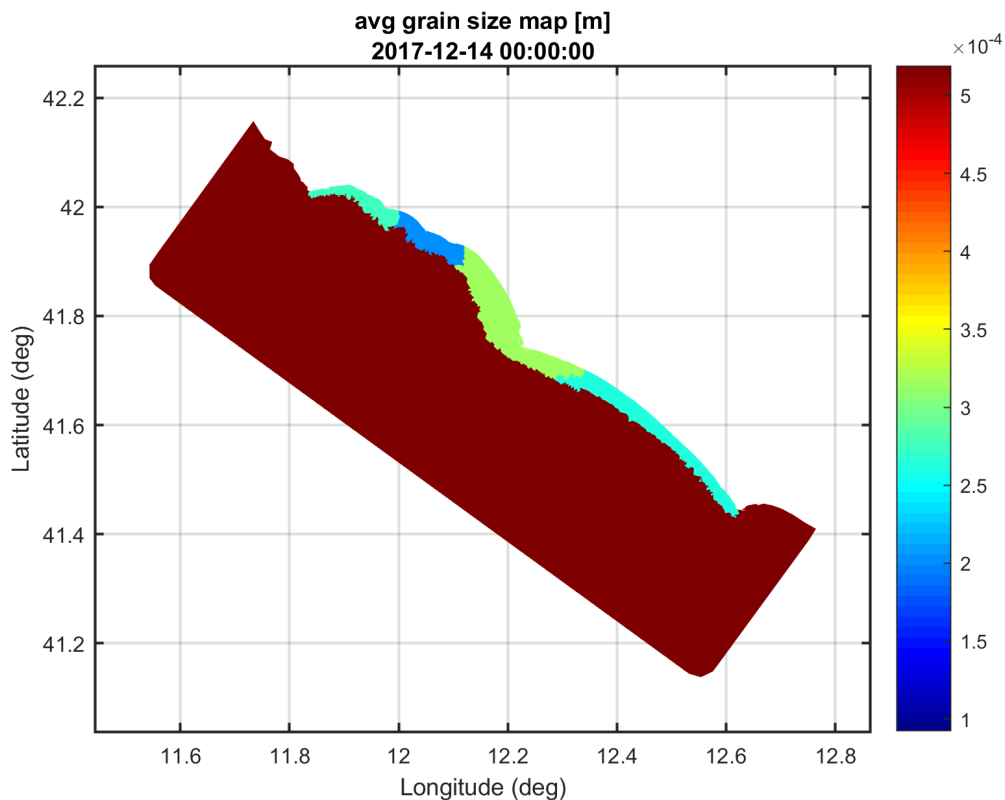


Figura 24 - inizializzazione del modello SEDTRANS in termini di average grain size.

3.5 Simulazioni del materiale dragato per la valutazione dei potenziali effetti indotti sull'ecosistema marino

Le simulazioni della dispersione del materiale dragato sono state effettuate con il modello PTM (Particle tracking Module) che è stato applicato nel dominio di calcolo utilizzato dal modello Shyftem in quanto considera il campo idrodinamico calcolato da quest'ultimo. La corrente indotta dalle onde viene invece calcolata dal modello STWAVE applicato lungo il tratto di costa compreso tra Capo Linaro e Capo d'Anzio che utilizza una griglia di calcolo regolare (differenze finite) con una risoluzione costante di 50 m. Gli input del modello vengono forniti con cadenza giornaliera utilizzando i risultati del modello Wave Watch III in un punto del boundary esterno di STWAVE. I risultati di STWAVE vengono poi passati al modello PTM sotto forma di indice di frangimento (breaker index) e

parametri rappresentativi del moto ondoso (altezza d'onda significativa, direzione media e periodo di picco).

Le attività di dragaggio sono state riprodotte utilizzando una sorgente di sedimento lineare in corrispondenza delle zone in cui verrà realizzata la Diga di Sopraflutto e la Banchina Sud, la Diga di Sottoflutto e la Banchina Nord ed in cui sarà approfondito il fondale del bacino portuale alla quota di progetto – 6.00 m s.l.m.m (Figura 25).



Figura 25 - Il poligono più grande in trasparenza rappresenta Diga di Sopraflutto e la Banchina Sud mentre quello più piccolo in alto indica la Diga di Sottoflutto e la Banchina Nord. Tra le due banchine sarà realizzato l'approfondimento del fondale del bacino portuale alla quota di progetto – 6.00 m s.l.m.m.

L'approfondimento del fondale del bacino portuale alla quota di progetto – 6.00 m s.l.m.m. comporterà la movimentazione di circa 37870 m³ di sedimenti marini. L'escavo sotto le opere foranee e dei banchinamenti (della profondità di 2 m dal fondale) comporterà la rimozione dei seguenti quantitativi di materiali:

- 60001 m³ di sedimenti marini, dalla porzione di fondale destinata alla realizzazione della Diga di Sopraflutto e della Banchina Sud;



- 28070 m³ di sedimenti marini dalla porzione di fondale presso cui saranno realizzati la Diga di Sottoflutto e la Banchina Nord.

La frazione di sedimento che è stata simulata dal modello PTM è quella inferiore a 74 µm che viene utilizzata nelle formulazioni su base tabellare (Metodo TGU, Nakai (1978); Metodo Resuspension Factor, Hayes ae Wu, 2001) per calcolare la massa di sedimento risospeso durante le operazioni di dragaggio. Tali formulazioni sono indicate per la stima del termine sorgente nel manuale ISPRA "La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marinocostiere". Per calcolare la quantità di tale frazione all'interno del materiale che sarà movimentato dalle attività di dragaggio sono stati utilizzati i dati granulometrici dei rilievi effettuati tra il 2013 e il 2014 per la caratterizzazione dei fondali nell'area interessata dalla realizzazione delle opere. Dai risultati emerge che la frazione fine dragata per la realizzazione della Diga di Sopraflutto e la Banchina Sud è di circa 9120 m³, quella per la costruzione della Diga di Sottoflutto e la Banchina Nord ammonta a 3860 m³, mentre l'approfondimento a - 6.00 m s.l.m.m. comporterà la risospensione di 5300 m³ di materiale fine. Per riprodurre la movimentazione di un ampio intervallo di classi granulometriche della frazione fine è stato considerato un diametro mediano di 25 µm e una deviazione standard di 1 phi. Nelle simulazioni del modello PTM, è stata inoltre ipotizzata una densità del sedimento pari a 2650 kg/m³. La quantità effettivamente mobilitata dal fondo e la durata del rilascio di sedimento dalle due fonti è stata stimata tenendo conto dell'utilizzo della draga idraulica (così come comunicato per le vie brevi dal Committente) che produce un rilascio del 5% del materiale fine dragato (Pennekamp et al., 1996; John et al., 2000) ed ha un tasso di produttività pari a 9000 m³/giorno (Feola et al., 2016). Di conseguenza il dragaggio per la realizzazione della nuova opera avrà una durata complessiva di circa 14 giorni. Per definire la dispersione del materiale dragato proveniente dalle sorgenti lineari, che riproducono le tre fasi del dragaggio, sono state considerate complessivamente 7168 particelle aventi ciascuna una massa pari a 86.74 kg. La dispersione del sedimento dragato è stata analizzata in due distinti scenari che riproducono le condizioni meteomarine tipiche di un mese autunnale e di uno invernale.

Al fine di discriminare gli effetti prodotti dalle attività di dragaggio rispetto a quelle



provenienti da altre sorgenti, sono state effettuate anche simulazioni in cui viene considerato il rilascio di sedimento dalle foci di Fiumara Piccola e Fiumara Grande in quanto apportano una grande quantità di materiale fine e si trovano nelle vicinanze dell'area in cui verrà realizzata la nuova opera. Per confrontare i risultati con quelli prodotti dalle simulazioni del dragaggio, sono stati riprodotti gli stessi scenari meteomarinari in cui è stato considerato il rilascio di sedimento con le stesse caratteristiche (classi granulometriche e densità) di quello dragato. La quantità di sedimento fine sversata in prossimità delle due foci è stata calcolata con la formulazione di Van Rijn a partire dai dati orari di portata liquida messi a disposizione dal Servizio Idrografico della Protezione Civile della Regione Lazio. In media la quantità di materiale fine sversato nel periodo autunnale è di circa 110 ton/giorno, mentre in inverno è stato considerato uno scarico di circa 215 ton/giorno. Così come per la portata liquida, è stato assunto che l'80 % del materiale fine viene sversato dalla foce di Fiumara Grande mentre il 20 % dalla foce di Fiumara Piccola. Il numero delle particelle e la massa associata a ciascuna di esse è la stessa di quella utilizzata nelle simulazioni che riproducono il dragaggio.

Il modello PTM ha quindi permesso di stimare l'accumulo e la concentrazione dei sedimenti fini in sospensione che vengono rilasciati dalle attività di dragaggio (Figura 26) e dalle due foci fluviali (Figura 27). Per rendere possibile il confronto tra queste è stato fornito in input sedimento con le stesse caratteristiche (D50 e deviazione standard). La dispersione del materiale fine viene simulato considerando le condizioni idrodinamiche (vento e moto ondoso) di un mese tipico autunnale e di uno tipico invernale.

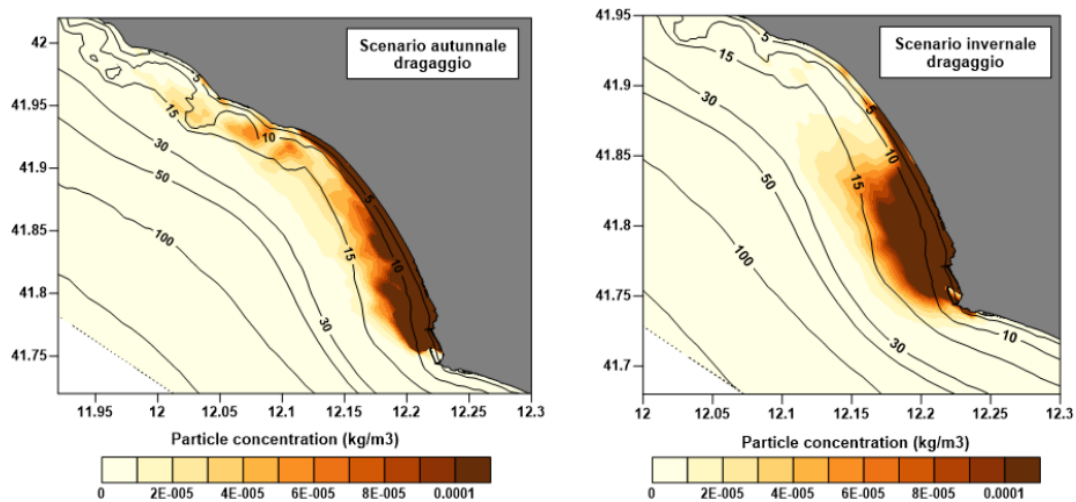


Figura 26 - Distribuzione del materiale fine in sospensione proveniente dalle attività di dragaggio nella condizione autunnale (a sinistra) ed invernale (a destra).

La concentrazione di sedimento fine proveniente dalle foci fluviali caratterizza una larga area che raggiunge la sua massima estensione nella condizione autunnale andando da Torvaianica alle Secche di Macchiatonda e ricoprendo quasi totalmente l'area con elevata torbidità definita dallo scenario di dragaggio. Nello scenario invernale la concentrazione del sedimento in sospensione è, in gran parte dell'area di sovrapposizione, molto più elevato rispetto allo scenario in cui viene riprodotto il dragaggio.

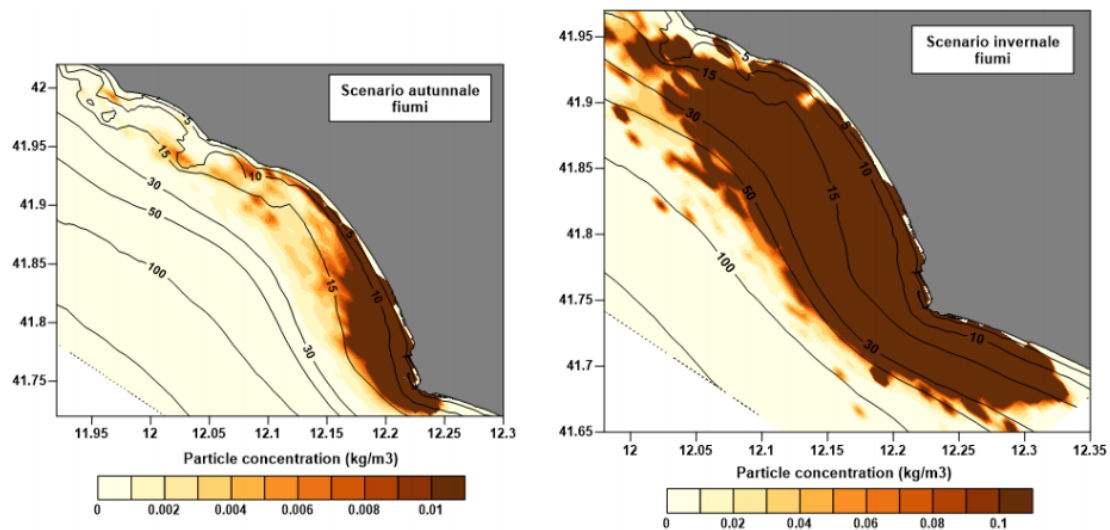


Figura 27 - Distribuzione del materiale fine in sospensione proveniente dalle foci fluviali nella condizione autunnale (a sinistra) ed invernale (a destra).

Le particelle provenienti dalle attività di dragaggio si accumulano lungo la zona costiera a nord della sorgente in entrambe le condizioni simulate. Nello scenario autunnale sono presenti zone di accumulo tra le secche di Macchiatonda mentre in quello invernale si viene a formare un'estesa area di deposizione tra i 10 e 15 m di profondità nella zona antistante Fregene (Figura 28).

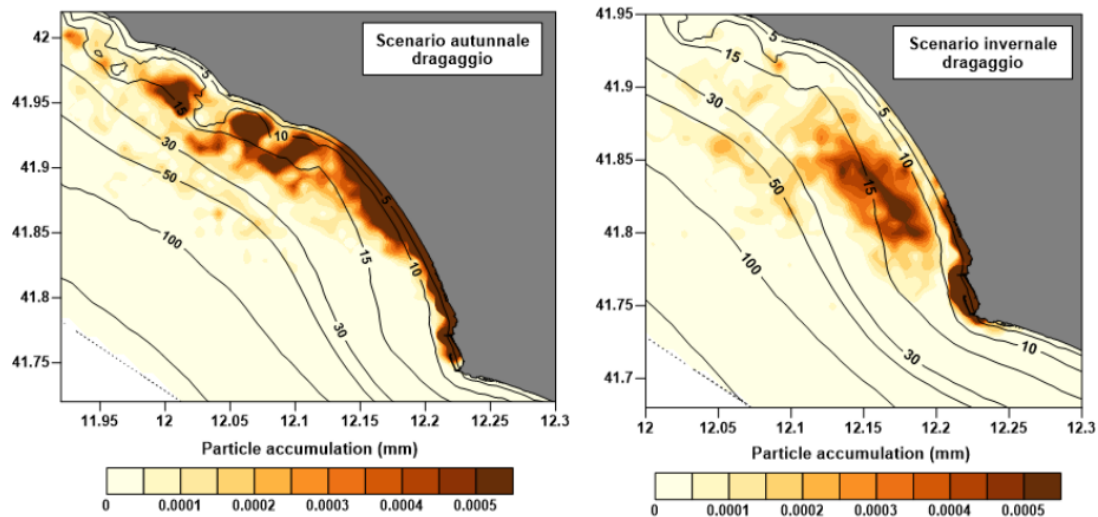


Figura 28 - Zone di accumulo del sedimento fine proveniente dalle attività di dragaggio nella condizione autunnale (a sinistra) ed invernale (a destra).

La dispersione del materiale fine proveniente dai fiumi deposita principalmente in una vasta area che si estende da Torvaianica a Fregene e fino ad una profondità di 100 m. Parte del materiale sedimenta anche nella parte a nord dell'area di studio, nelle aree adiacenti alle secche di Macchiatonda. La deposizione del materiale fluviale nella condizione invernale produce un innalzamento che risulta essere circa un ordine di grandezza superiore a quello prodotto dalle attività di dragaggio (Figura 29).

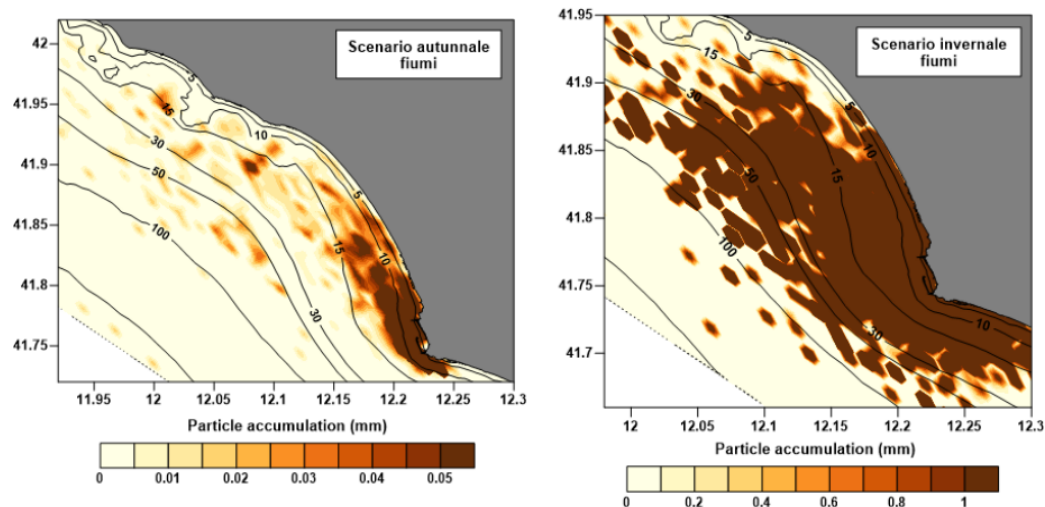


Figura 29 - Zone di accumulo del sedimento fine proveniente dalle foci fluviali nella condizione autunnale (a sinistra) ed invernale (a destra).



4. STUDIO DELLA VARIAZIONE DELLA LINEA DI RIVA A BREVE E A LUNGO TERMINE

4.1 Analisi storica della linea di riva e ricostruzione dei profili della spiaggia sommersa

Al fine di analizzare la variazione a lungo termine della linea di riva del tratto di costa comprendente l'unità fisiografica Capo Linaro-Capo d'Anzio, si è provveduto ad analizzare le foto aeree del 1984 e del 2006 e le immagini satellitari del 2022.

Analisi della linea di costa del 1984

Il materiale fotografico acquisito per l'intero tratto di costa oggetto di studio (Capo Linaro - Capo d'Anzio) consta di venticinque immagini aeree digitalizzate relative al piano di volo dell'Istituto Geografico Militare (IGM) del 1984, con risoluzione pari a 2500 DPI, in formato raster (TIF), della dimensione originale pari a 23cm×23cm. Si tratta di materiale fotografico scannerizzato, pertanto da un primo controllo qualitativo sono emerse la presenza occasionale di piccole aree precedentemente compromesse da usura del materiale e aree più grandi sottoposte a censura visiva per motivi non noti, anche se probabilmente relative ad aree militari e/o industriali sensibili.

L'attività di processamento delle immagini può essere sommariamente suddivisa in cinque fasi principali:

- Controllo visuale della qualità ed integrità delle immagini digitali fornite e verifica delle informazioni tecniche di acquisizione delle stesse;
- attività di ortorettifica e georeferenziazione vera e propria, tramite software dedicato, di ciascun fotogramma, con relativa costruzione del relativo modello geometrico e scelta dei punti di controllo tramite l'ausilio di ortofoto di riferimento o mappe di base non commerciali disponibili;
- creazione di un ortomosaico per la ricostruzione dell'intera scena;
- attività di validazione del prodotto, precisione e accuratezza;
- editing dettagliato della linea di costa in formato Shapefile (shp).
- l'ortorettifica dei fotogrammi è stata implementata all'interno del modulo Mosaic Pro del software Erdas Imagine, secondo questi semplici step:



- creazione del progetto ed acquisizione dei fotogrammi;
- individuazione dei GCPs su ortofoto di riferimento a colori;
- orientamento dei fotogrammi e produzione delle ortofoto finali utilizzando come informazione altimetrica il DTM (Digital Terrain Model);
- definizione delle aree di sovrapposizione (Seamlines), bilanciamento del colore e creazione dell'ortomosaico completo;
- stima dell'accuratezza metrica del prodotto.

Le ortofoto digitali di riferimento utilizzate appartengono al servizio BingMaps Aerial, che fornisce immagini globali a risoluzione e copertura variabile a seconda di dove ci si trova (da 7cm a qualche m). Queste sono state utilizzate per estrarre le coordinate planimetriche X e Y dei GCPs da assegnare ai fotogrammi. Le coordinate Z associate ai GCPs relative alla quota altimetrica sono state estratte utilizzando un DTM ottenuto dal portale TINITALY con precisione a terra di 10m×10m messo a disposizione dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Il modello digitale del terreno (DTM) fornisce una rappresentazione tridimensionale del territorio. La zona di studio è tipicamente pianeggiante, con importante copertura vegetale e notevole presenza di aree agricole e/o prati da pascolo che col tempo sono state trasformate in aree edificabili, per cui la maggior parte dei punti di appoggio è stata individuata in corrispondenza di aree urbane, in corrispondenza degli incroci delle strade, in prossimità di infrastrutture e manufatti quali ponti, pozzi, muretti di recinzione, ecc. visibili sull'immagine e stabili nel tempo.

Tenuto conto del numero delle immagini di partenza e del mutamento del cambiamento del territorio negli ultimi quarant'anni, si è potuta constatare un'ottima precisione del modello di ortorettifica adottato, desumibile anche dalla sovrapposizione delle immagini finali e anche dal confronto con le ortofoto di riferimento BingMaps Aerial. Il numero di GCPs che bisogna identificare per stabilizzare il modello è variato sensibilmente da immagine ad immagine. Per valutare la precisione del modello e l'accuratezza estraibile da ogni immagine non ci si può basare su un piccolo numero di GCPs, per non sovrastimare la prima (RMS troppo basso), e sottostimare la seconda (RMS troppo

elevato). Per la verifica delle accuratezze metriche conseguibili nelle procedure di ortorettifica sono stati scelti dei Check Point distribuiti in maniera uniforme sulle intere immagini. Questi sono dei punti indipendenti, acquisiti con le medesime modalità dei GCPs, su cui confrontare i valori di RMSE (Tabella 1). Allo scopo di individuare il numero minimo dei GCPs e il grado del polinomio utilizzabile per ottenere buone precisioni metriche inizialmente sono state eseguite alcune prove con diverse configurazioni su un'immagine test.

Fotogramma	RMSE			GCPs
	(x)	(y)	TOT	
655	0.0085	0.0090	0.0124	14
653	0.0052	0.0074	0.0091	17
650	0.0044	0.0033	0.0055	13
707	0.0045	0.0067	0.0081	7
710	0.0041	0.0031	0.0051	11
704	0.0030	0.0026	0.0040	14
7020	0.0034	0.0033	0.0047	14
7021	0.0032	0.0034	0.0046	11
7010	0.0019	0.0027	0.0033	10
6959	0.0027	0.0019	0.0034	9
6956	0.0024	0.0027	0.0036	13
6911	0.0020	0.0026	0.0033	11
6908	0.0046	0.0034	0.0057	18
6865	0.0024	0.0034	0.0042	11
6861	0.0037	0.0027	0.0046	10
6859	0.0043	0.0029	0.0052	11
6827	0.0018	0.0044	0.0047	7
6823	0.0048	0.0023	0.0053	11
6795	0.0046	0.0044	0.0047	18
6772	0.0067	0.0038	0.0077	7
6756	0.0048	0.0052	0.0070	7
6752	0.0037	0.0046	0.0059	7
6739	0.0048	0.0023	0.0053	6
6735	0.0022	0.0024	0.0031	12
6822	0.0006	0.0007	0.0009	7
MEDIA	0.0038	0.0036	0.0053	

Tabella 1 - Lista delle RMSE per singolo fotogramma IGM.

Il risultato evidenzia una precisione ottimale per ogni fotogramma, ben al di sotto del valore di 0.5 (pixel), che viene ritenuto valore di soglia standard in letteratura. In generale in nessun fotogramma ci si avvicina a quel valore, sintomo che il modello di correzione applicato è quello adatto.

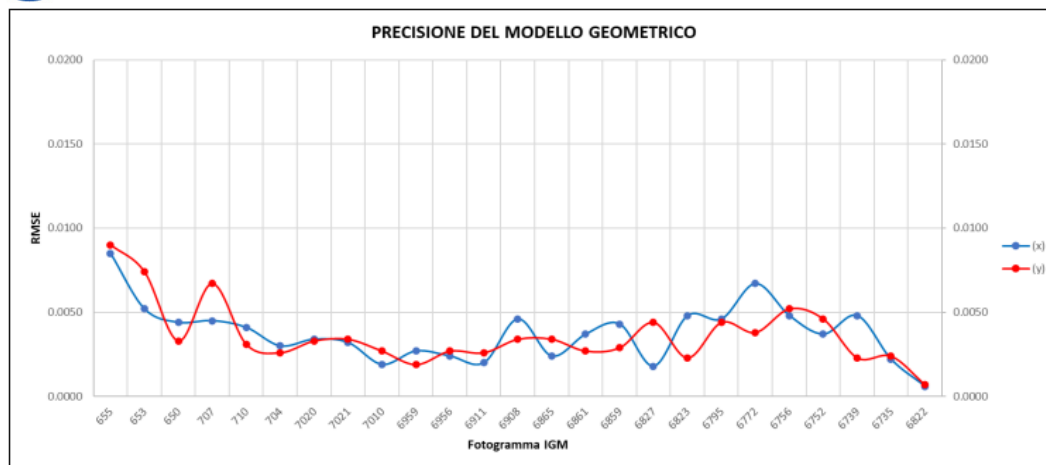


Figura 30 - Confronto della RMSE in X e in Y tra tutti i fotogrammi ortorettificati.

Nel grafico in figura 30 viene mostrata anche una buona sovrapposizione nella distribuzione della precisione lungo la X e lungo la Y, ad indicare che l'entità dell'errore è comparabile tra le due direzioni e anche l'assenza di errore sistemico lungo una delle due direzioni dovuto ad eventuale imprecisione nella cattura dei GCPs. Una volta ortorettificata ogni singola immagine aerea, queste vengono precaricate in ERDAS IMAGINE e disposte in un ordine di sovrapposizione opportuno. Successivamente sono state effettuate operazioni di bilanciamento dei toni di grigio e del contrasto del mosaico per uniformare il più possibile i contrasti di luminosità tra i fotogrammi. L'operazione seguente consiste nel generare i Seam Polygons necessari per definire le porzioni dei fotogrammi che costituiranno il mosaico finale e per controllare che nelle prossimità delle Seamlines (zone di cucitura) ci sia una corretta sovrapposizione degli stessi. Una volta preparati tutti gli ingredienti viene lanciato lo strumento di mosaicatura e ricampionamento con il metodo Bicubic-Spline, in quanto garantisce una buona accuratezza geometrica e un buon contrasto senza creare i classici effetti di scalinatura dei pixel tipici del metodo Nearest Neighbour. Il risultato finale è mostrato nella seguente figura 31.

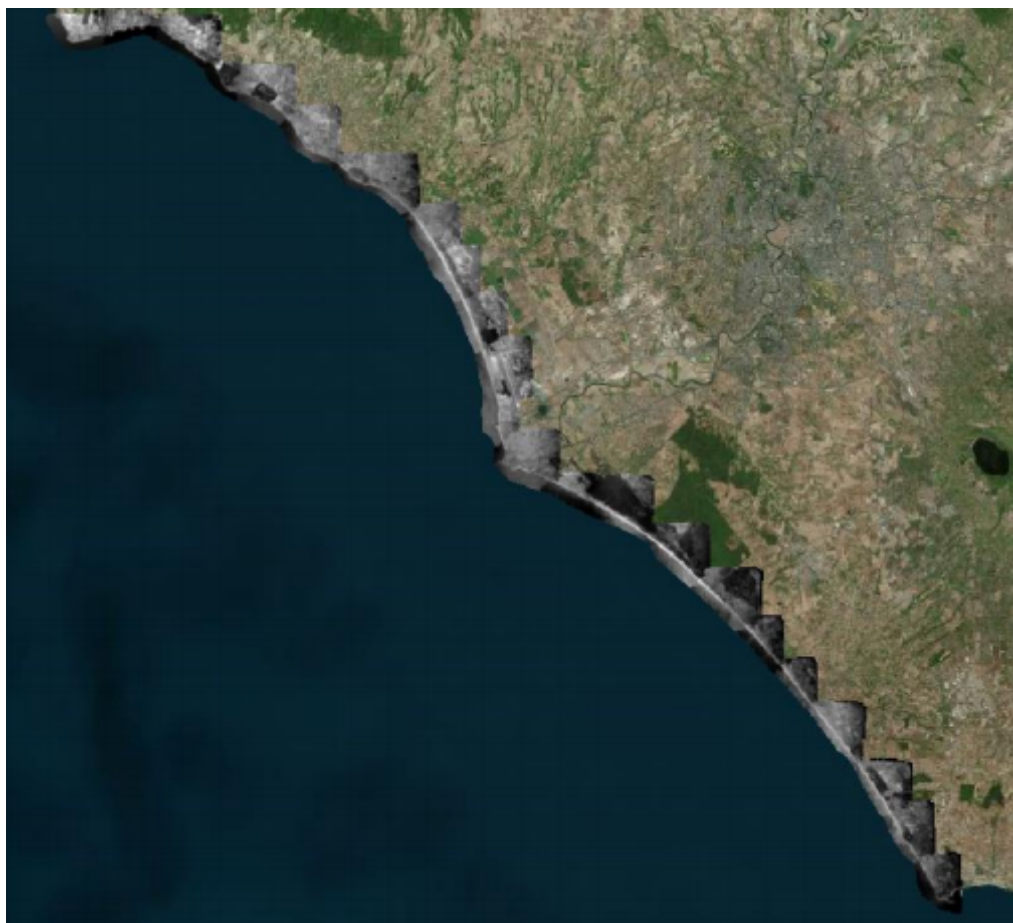


Figura 31 - Mosaico dell'intera linea di costa (Erdas Image) sovrapposta all'immagine di Google Earth.

Per validare il risultato è stata calcolata l'accuratezza posizionale metrica (Figura 32) che si attesta intorno a 1m circa (RMSE) con una bassa deviazione standard (SQM).

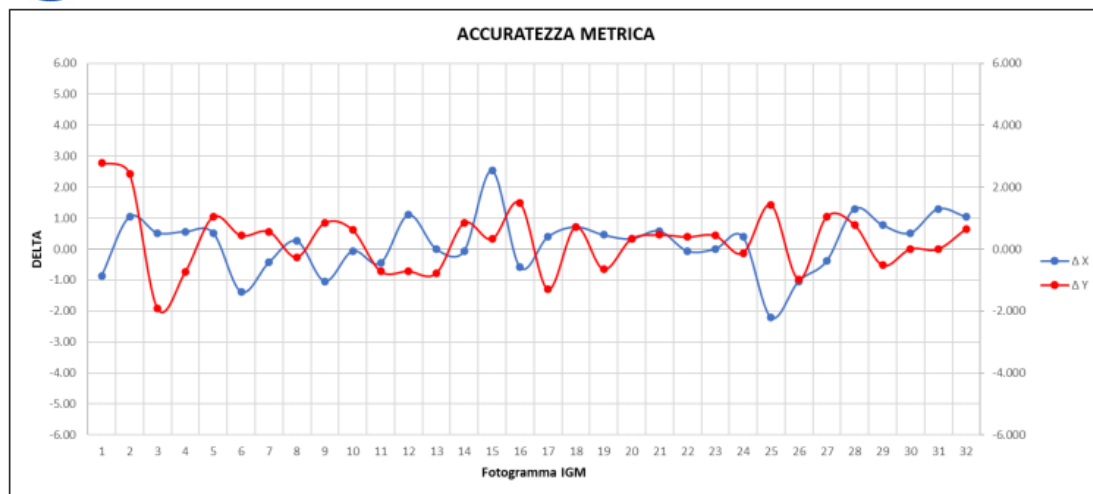


Figura 32 - Confronto della RMSE in X e in Y tra tutti i fotogrammi ortorettificati.

Linea di costa del 2006 e del 2022

Sono state acquisite anche le foto aree del 2006 al fine di analizzare la variazione della linea di riva in un periodo di tempo di circa vent'anni. Per aumentare l'intervallo temporale e analizzare l'impatto di alcune opere realizzate negli ultimi anni all'interno del tratto di costa oggetto di indagine, sono state analizzate inoltre le immagini satellitari ad altissima risoluzione nel 2022 (immagini ortorettificate della costellazione SkySat 50 cm di risoluzione spaziale) (Figura 33).

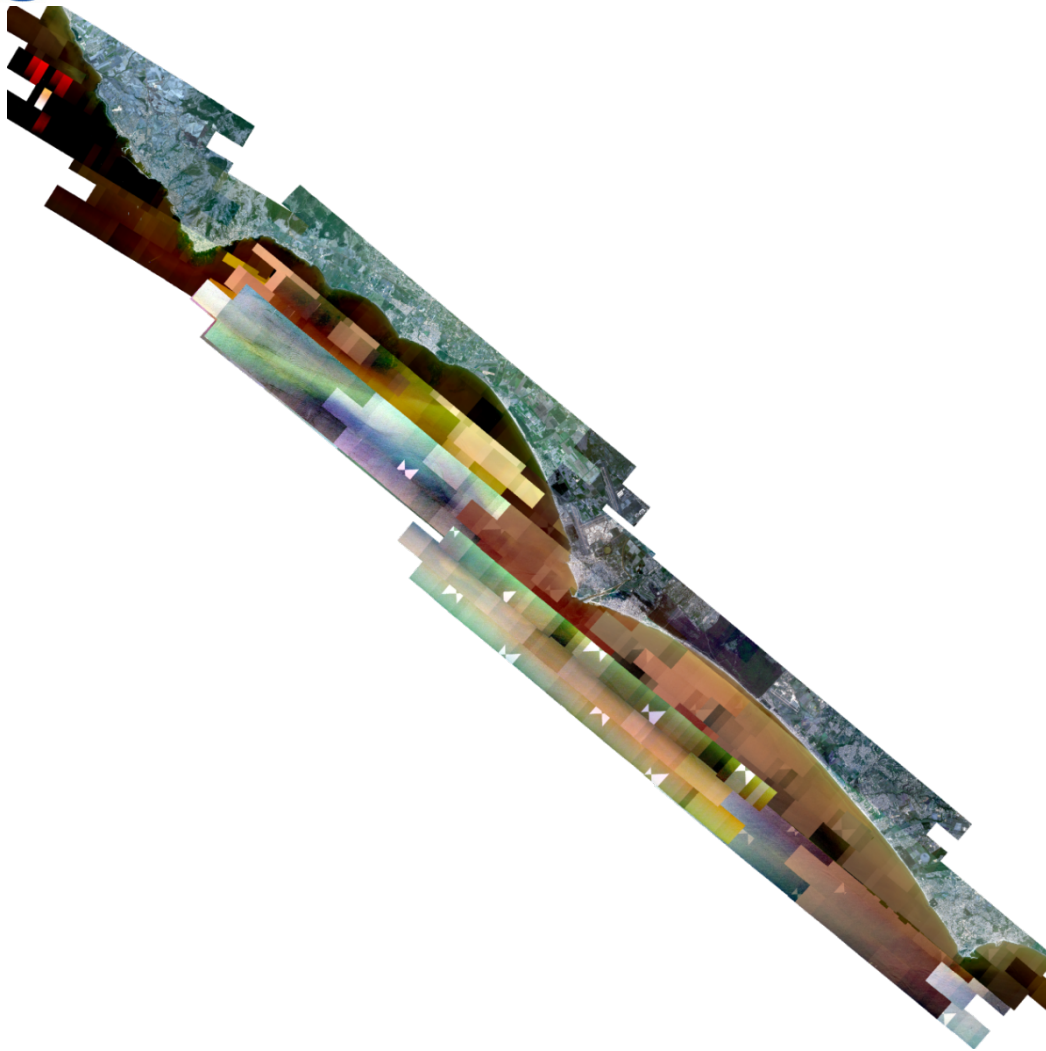


Figura 33 - Ricostruzione della linea di costa attraverso immagini ortorettificate della costellazione Skysat a 50 cm di risoluzione spaziale.

Tutte le immagini utili a determinare la linea di costa nei diversi anni sono state acquisite a fine primavera - inizio estate (maggio-giugno), che rappresenta il periodo successivo a quello delle mareggiate che in genere si verificano da febbraio ad aprile.

Per analizzare il trasporto solido litoraneo è stato inoltre ricostruita la morfologia sommersa degli anni '80 utilizzando i profili di spiaggia rilevati nell'ambito del progetto "Mari del Lazio". Di seguito viene riportata l'immagine dell'area di studio con la posizione



dei transetti batimetrici considerati e i profili della morfologia emersa relativi ad alcuni di essi (Figure 34-39).



Figura 34 - Posizione dei transetti nella zona a nord.



Figura 35 - Posizione dei transetti nella zona centrale.



Figura 36 - Posizione dei transetti nella zona a sud.

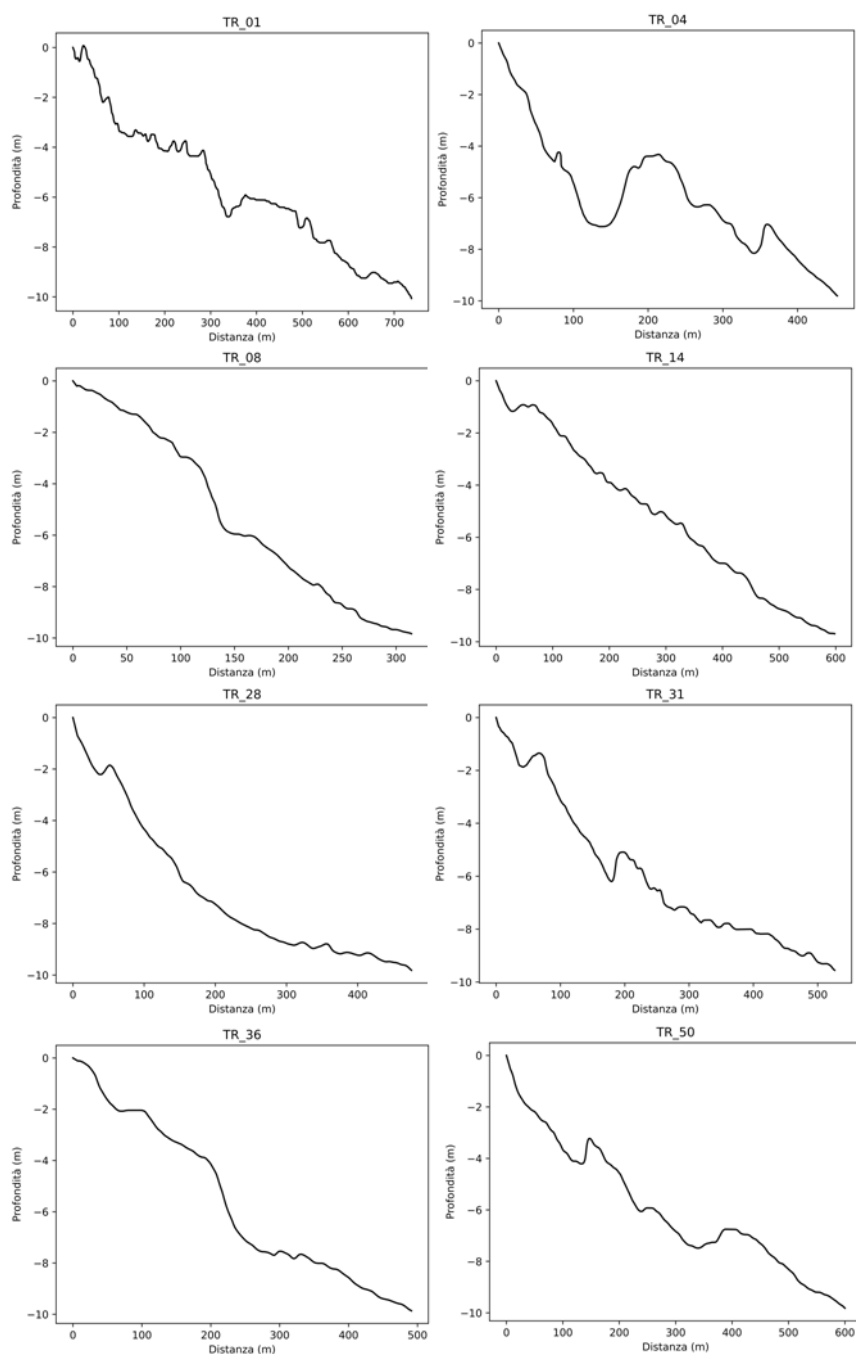


Figura 37 - Alcuni profili batimetrici della zona a nord.

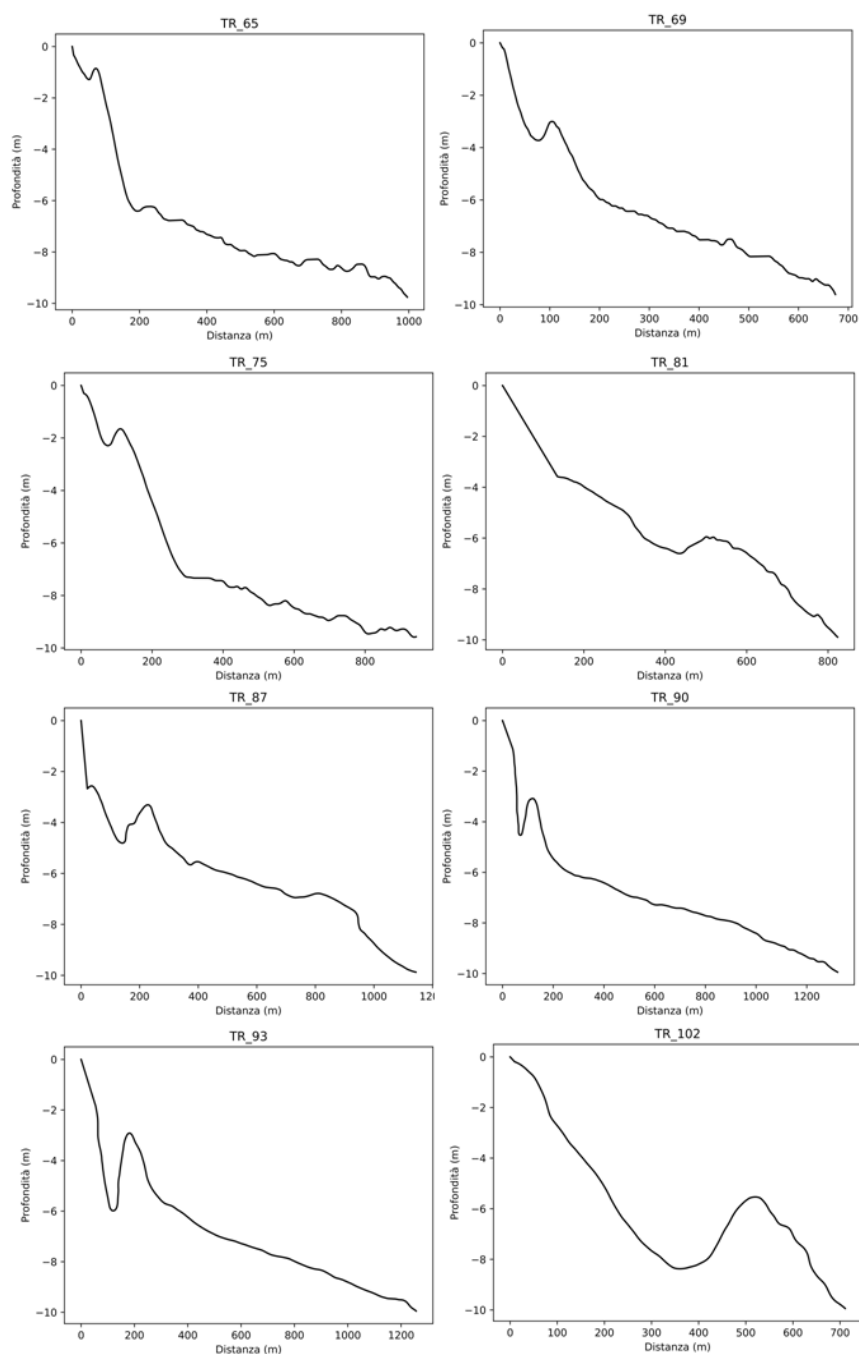


Figura 38 - Alcuni profili batimetrici della zona centrale.

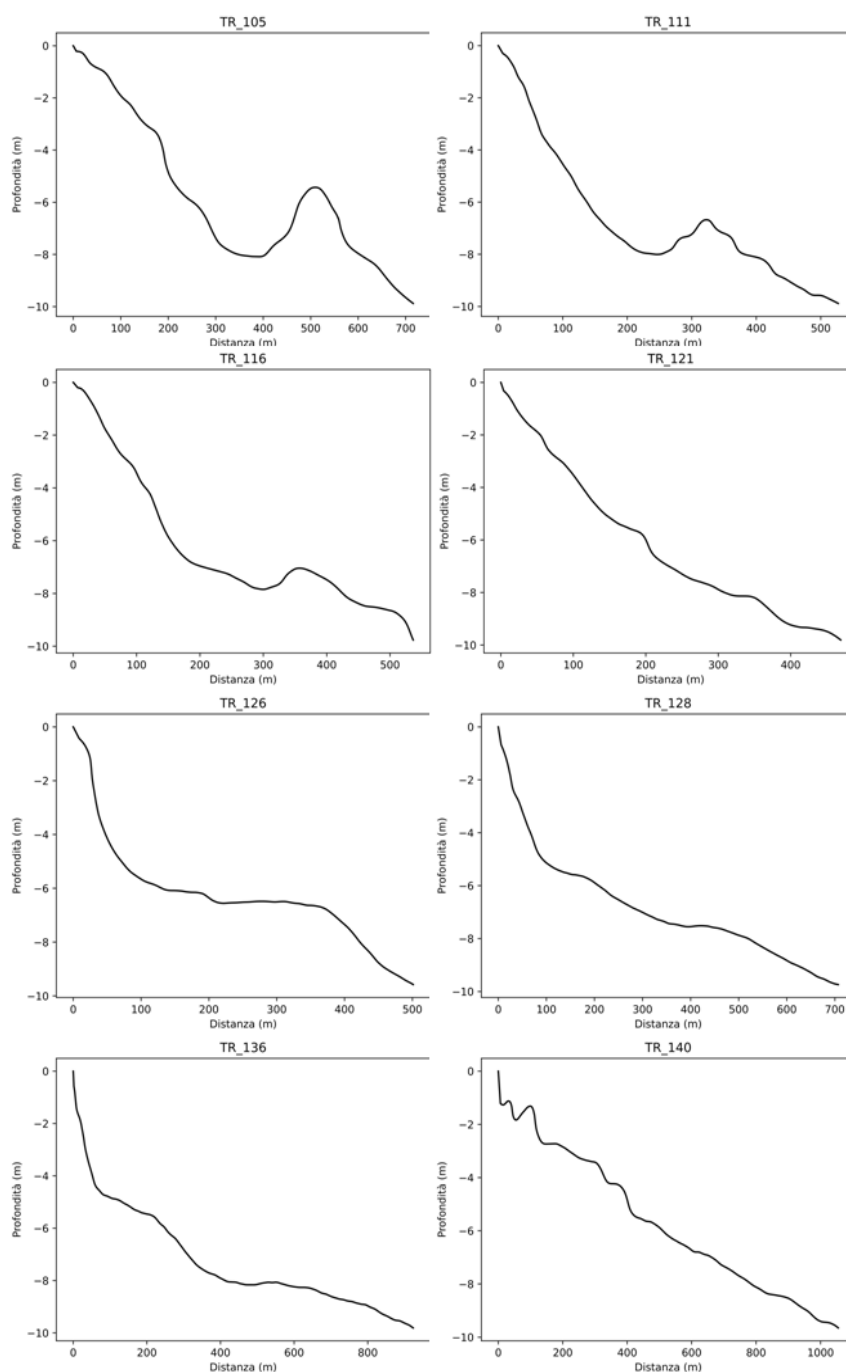


Figura 39 - Alcuni profili batimetrici della zona a sud.

Per analizzare il cambiamento della linea di costa tra il 2005 e il 2022, i precedenti profili sono stati integrati con quelli acquisiti tra il 2005 e il 2006 (Bonamano 2007, Tesi di Laurea) da 1 m a 20 m di profondità (Figura 40).

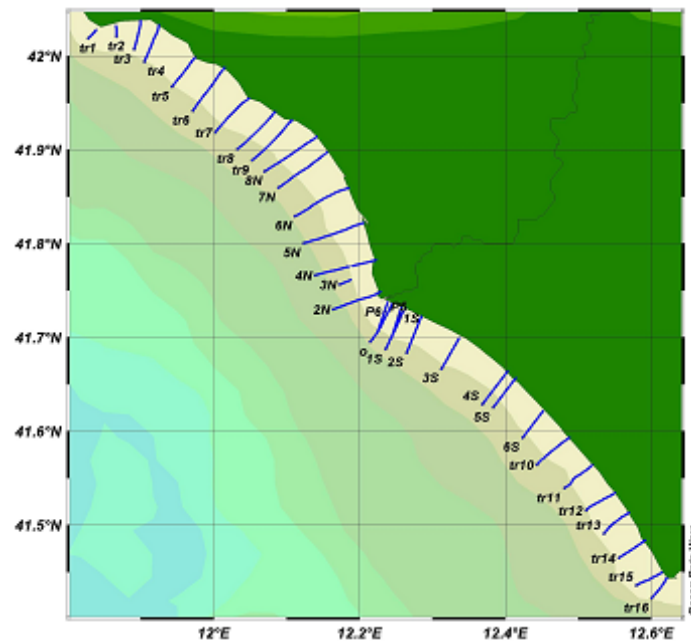


Figura 40 - Rappresentazione dei transetti batimetrici acquisiti tra il 2005 e il 2006.

I transetti posti tra Santa Marinella e Santa Severa hanno un profilo con una elevata pendenza dovuto alla presenza sul territorio retrostante di rilievi collinari che si affacciano direttamente sul mare.

Sul promontorio di Capo Linaro, dove è posizionato il transetto “tr1”, è evidente come i terrazzi costieri si ritrovano nella parte subacquea nella quale l'andamento batimetrico mostra una zona poco acclive fino ad una profondità di 12 m, superata la quale il profilo degrada velocemente verso le basse profondità (Figura 41).

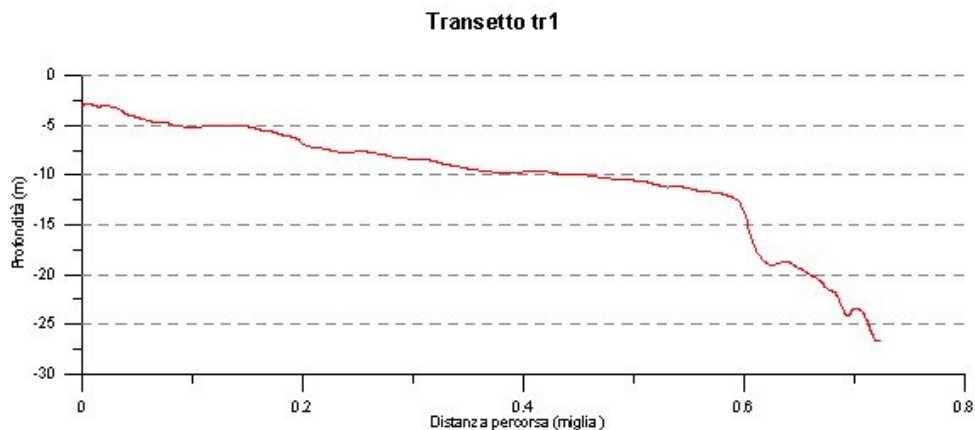


Figura 41 - Profilo batimetrico relativo al transetto "tr1".

Nel tratto di costa che si estende da Santa Severa a Ladispoli, i profili batimetrici mettono in risalto dei terrazzi sommersi che sono ben evidenti nei transetti “tr5” e “tr7” (Figura 42), segnalati anche sulla mappa del fondale dalla presenza di secche. Nei transetti “tr6”, “tr8” e “tr9” si notano, alle varie profondità, alcuni speroni di roccia, i quali potrebbero essere il risultato della degradazione e successivo ricoprimento per deposizione di materiale autoctono di vecchi terrazzi che erano in continuità con quelli rilevati nei profili precedenti.

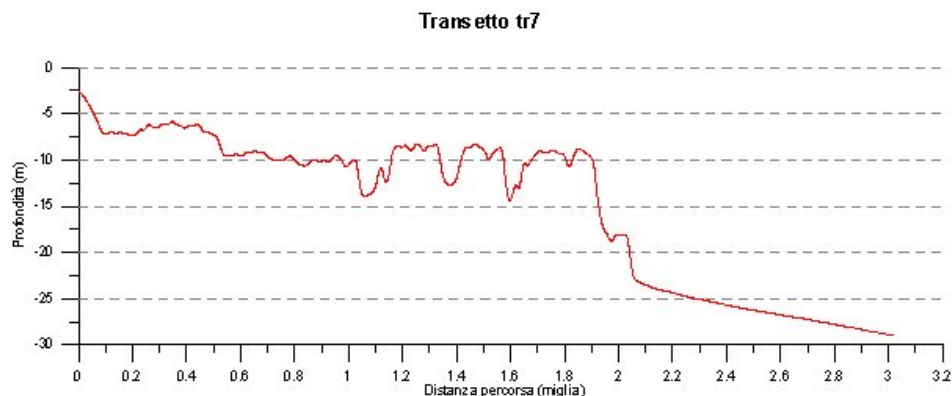


Figura 42 - Profilo batimetrico relativo al transetto “tr7”.

I transetti “8N”, “7N”, “6N”, “5N”, “4N” e “2N”, collocati nell'ala destra del delta tiberino, da Palidoro a nord della foce di Fiumara Grande, mostrano profili in cui si evidenzia un netto cambiamento di pendenza intorno ai 12 m di profondità. Tale profondità risulta essere il limite del fronte deposizionale del materiale grossolano (sabbia) in quanto quest'ultimo ha un angolo di riposo maggiore rispetto a quello del materiale fine (silt e argilla). Tali transetti si collocano su un morfotipo denominato “costa di fronte delta” dove gli apporti solidi provengono da bocche fluviali (Tevere) e il trasporto lungoriva è molto sviluppato. In “8N” (Figura 43) e “6N” si nota anche la presenza di barre sommerse alla profondità di 3 m.

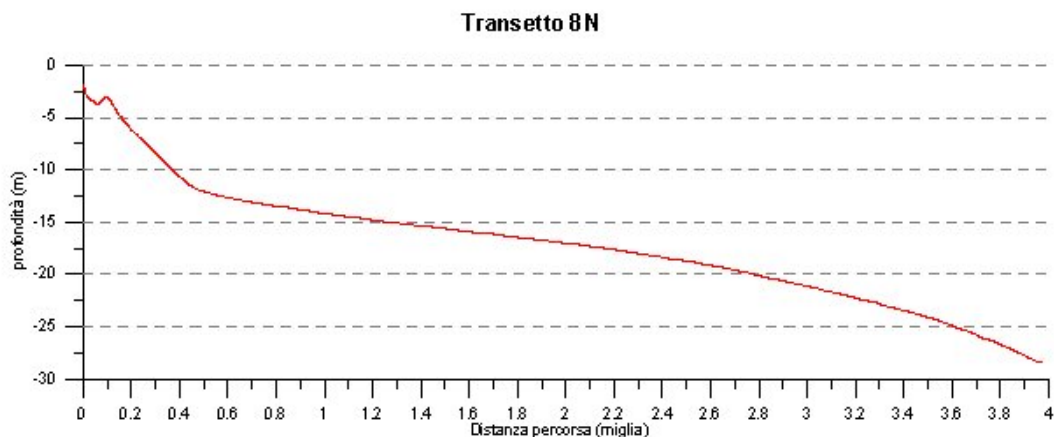


Figura 43 - Profilo batimetrico relativo ai transetti "8N".

Dalla foce di Fiumara Grande a Castel Fusano, il deficit di trasporto solido del Tevere viene evidenziato nei profili "O", "P6", "1S", "P5", "2S" (Figura 44) e "3S" dove la variazione di pendenza dovuta al fronte deposizionale del sedimento sabbioso è meno accentuata rispetto ai transetti analizzati in precedenza.

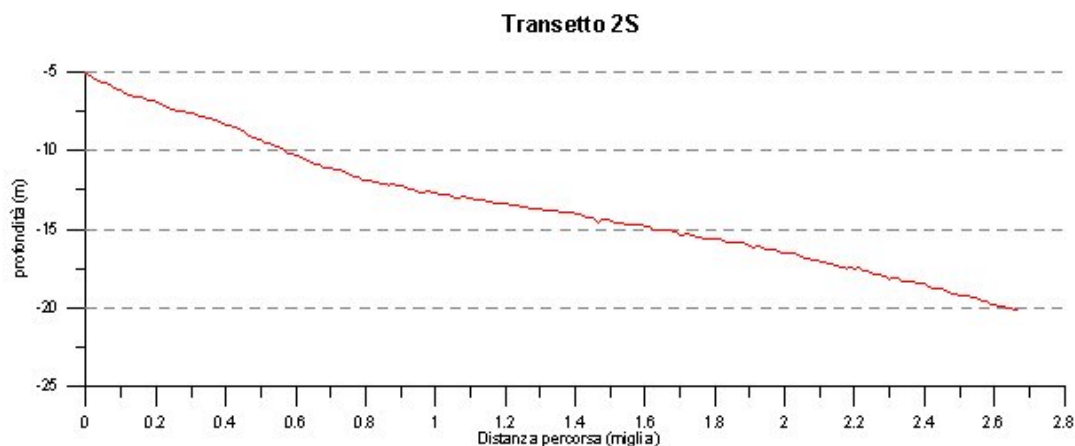


Figura 44 - Profilo batimetrico relativo al transetto "2S".

Nella zona che si estende da Torvaianica a Lavinio, i profili "6S", "tr10" (Figura 45), "tr11", "tr12" e "tr13" mostrano, in alcuni tratti, un andamento molto simile rispetto a quelli che caratterizzavano l'ala sinistra del delta tiberino, con una piccola variazione di

pendenza intorno ai 17 m e con la presenza in “tr10” (Figura 45), “tr11” e “tr12” di evidenti barre sommerse.

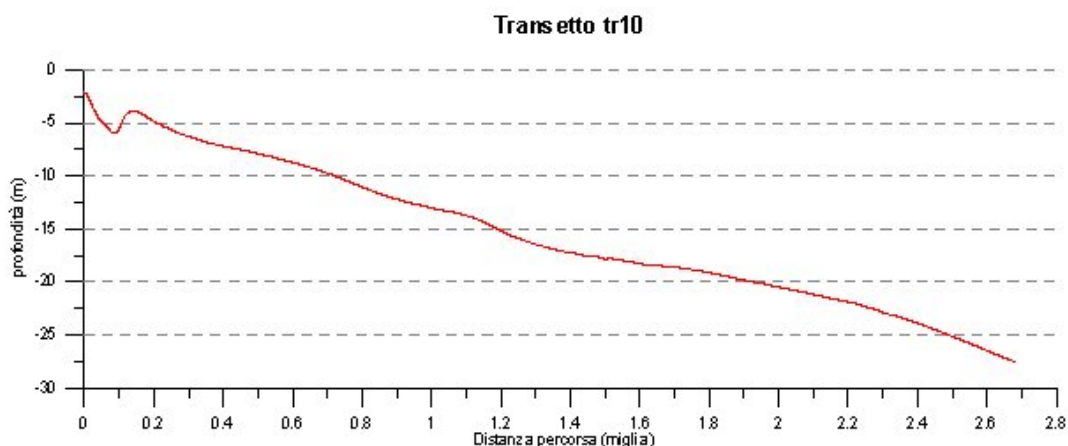


Figura 45 - Profilo batimetrico relativo al transetto "tr10".

Negli ultimi transetti della parte a sud, il cambiamento del morfotipo costiero, da “costa di litorale dritto” a “costa terrazzata”, si ripercuote in maniera attenuata nella parte subacquea. I profili “tr14” e “tr15” evidenziano in alcuni tratti i segni del disfacimento per degradazione e successivo ricoprimento di antichi terrazzi, parte dei quali si può ancora notare nel profilo “tr16” (Figura 46).

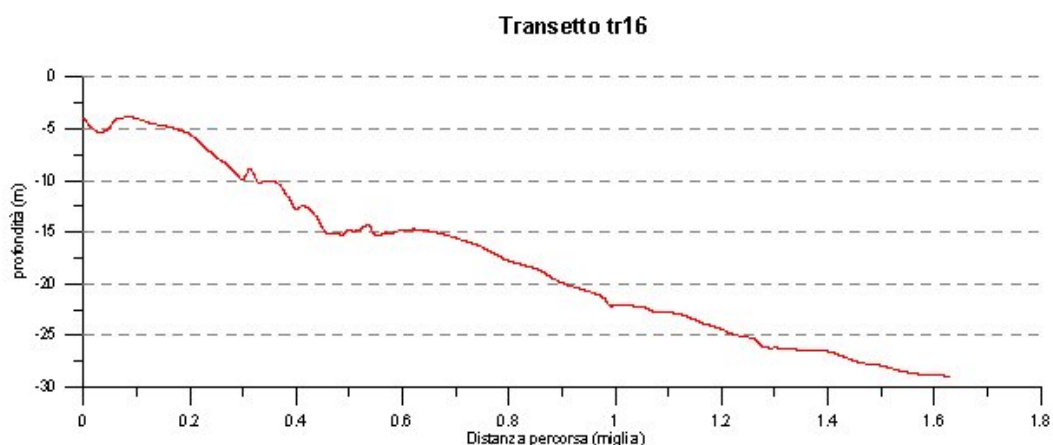


Figura 46 - Profilo batimetrico relativo al transetto "tr16".

Per analizzare il trasporto solido litoraneo nel tratto di costa oggetto di studio tra il 1990 e il 2005, sono state utilizzate le caratteristiche sedimentologiche dei fondali compresi tra Capo Linaro e Capo d'Anzio analizzate a partire dai dati raccolti da La Monica e Raffi (1996) e riportati all'interno del volume "Il Mare del Lazio".

In particolare, è stata analizzata la distribuzione del sedimento sui fondali nella fascia compresa tra la battigia e -50 m ed è stata effettuata la caratterizzazione lito-sedimentologica dei sedimenti più superficiali del fondale marino. Lo studio delle caratteristiche tessiturali dei sedimenti è stato condotto mediante analisi granulometriche con intervalli di classe di $1/2 \phi$ e facendo uso del metodo grafico descritto di Folk & Ward (1957) mediante il quale è stato possibile calcolare indici statistici sintetici. Tra tutti gli indici, al fine di evidenziare meglio le variazioni nella granulometria media, è stato preso in considerazione M_z (Figura 47).

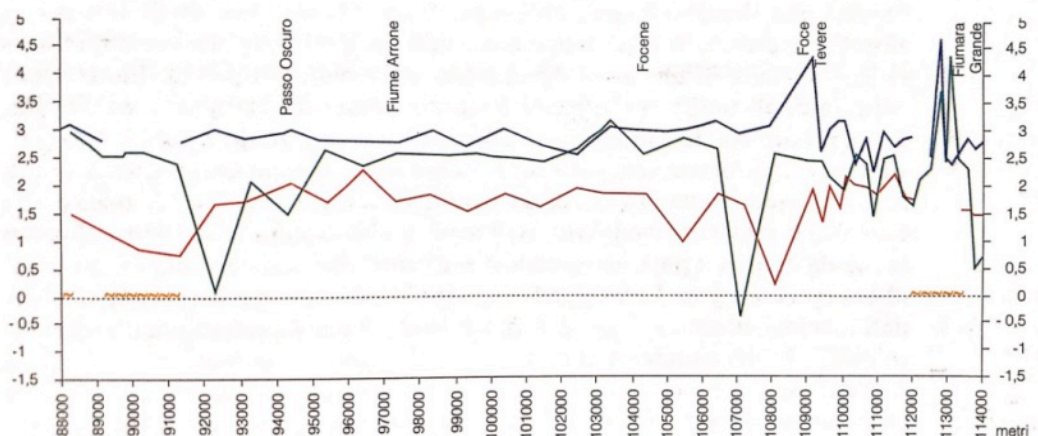


Figura 47 - Variazione di M_z dei sedimenti campionati nel tratto di mare compreso tra Palo e Fiumara Grande. L'immagine è tratta dal libro "Il mare del Lazio" (La Monica e Raffi, 1996).

Per quanto riguarda i fondali compresi tra la battigia fino a -10 m, tra Capo Linaro e Palo (Ladispoli), le variazioni di M_z procedono di pari passo alle variazioni morfologiche dei fondali, in questa zona prevalentemente rocciosi. Per questo motivo, i dati descritti dagli autori sono discontinui con frequenti lacune riguardanti l'area di battigia. In generale, le sabbie oscillano tra -0.7ϕ e 4ϕ . Tra Macchiatonda e Ladispoli il sedimento si arricchisce



nelle granulometrie più fini (siltose). I fondali tra Passo Scuro e Focene mostrano invece una graduale diminuzione del diametro medio nell'area di battigia e un Mz nel campo delle sabbie fini tra i -5 m e i -10 m di profondità. Le aree prossime al fiume Tevere mostrano una granulometria molto variabile (tra -0.4ϕ e $+4.7\phi$) dovuta all'interazione tra l'apporto solido del fiume Tevere ed il moto ondoso (Bellotti et al., 1993). Tra Tor Paterno e Capo d'Anzio il diametro medio dei sedimenti di battigia è compreso tra le sabbie medie e le sabbie medie fini, mentre i fondali attorno ai -10 mostrano la presenza anche di sabbie grossolane.

Spostandosi verso profondità maggiori (dai -10 m fino a -50 m di profondità), i fondali compresi tra Santa Marinella e Ladispoli mostrano l'abbondante presenza di peliti sabbiose. La mancanza di sedimenti a componente sabbiosa rilevante in questa area è essenzialmente dovuta alla mancanza di apporti solidi continentali importanti. Sedimenti ad elevata componente sabbiosa iniziano a presentarsi a Sud-Est di Palo dove inizia a farsi sentire l'influenza degli apporti fluviali. Tra Palo e Torvaianica l'influenza degli apporti fluviali del Tevere è dimostrata dalla presenza di tutta la successione delle facies sedimentarie, dalle sabbie pure anche su fondali di -15 m, fino alle peliti pure abbondantemente presenti a profondità maggiori di -50 m e preponderanti e ubiquitarie oltre i -100 m di profondità.

Per analizzare il cambiamento della linea di costa tra il 2005 e il 2022, i precedenti dati sedimentologici sono stati integrati con quelli acquisiti tra il 2005 e il 2006 (Bonamano 2007, Tesi di Laurea) alle profondità comprese tra -2 m e -15 m. Su tutti i campioni di sedimento raccolti è stata eseguita l'analisi granulometrica e sono stati calcolati gli indici statistici del diametro medio (espresso in unità ϕ), del classamento (σ), dello skewness (sk) e del kurtosis (Kg). I valori rinvenuti dall'analisi di ogni campione sono stati posizionati sui rispettivi profili batimetrici e ai valori indicativi di una maggiore energia sono stati associati pallini di maggiori dimensioni (Figura 48).

In generale si evince come la popolazione granulometrica dominante è quella sabbiosa con delle eccezioni riscontrate nell'area a sud di Capo Linaro dove l'erosione dei fondali rocciosi produce sedimento biodegradabile grossolano. Tale tendenza viene confermata dal

diametro medio che lungo i transetti “tr5” e “tr7” mostra dei valori negativi alle profondità di circa -15 m.

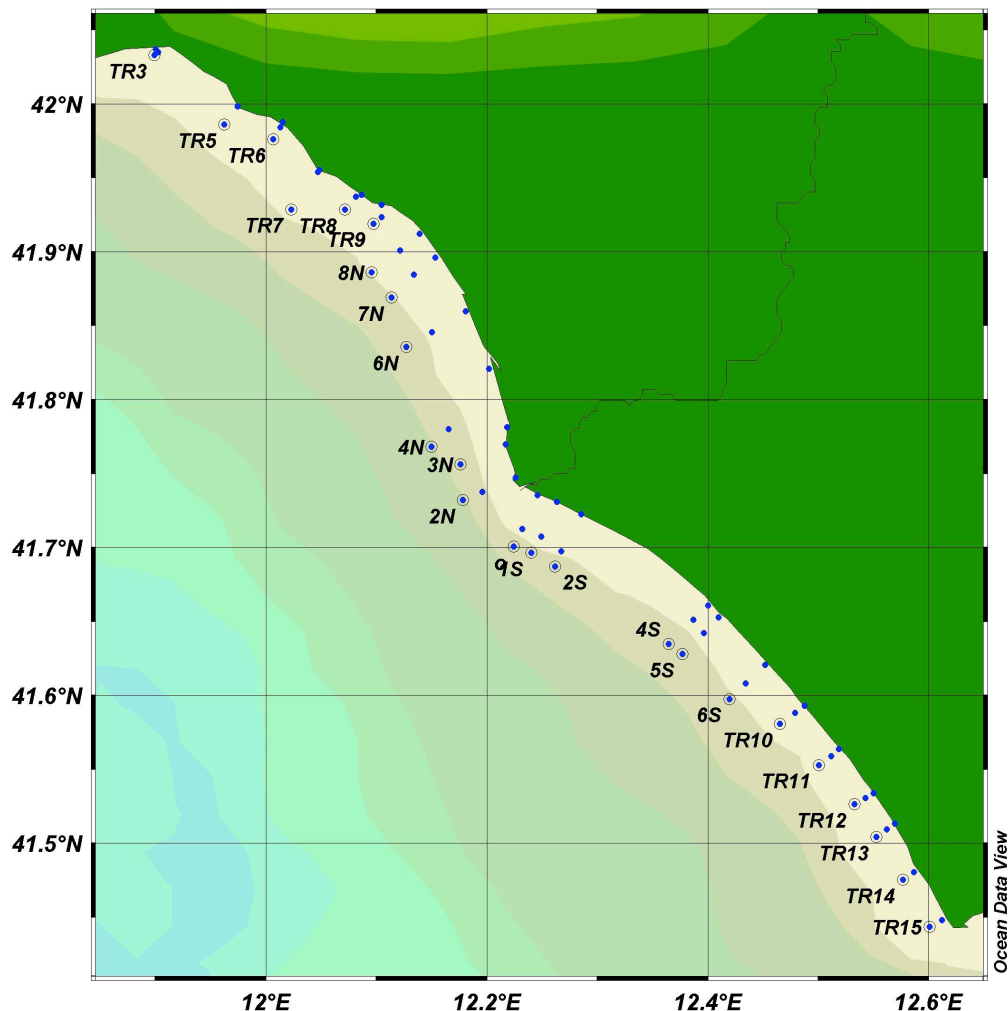


Figura 48 - Rappresentazione dei punti di prelievo dei sedimenti.

Tra Capo Linaro e Palo, la forte variabilità di questo indice granulometrico procede parallelamente alle variazioni delle condizioni morfologiche dei fondali, i quali, come rilevato precedentemente, sono prevalentemente rocciosi. La dimensione del sedimento oscilla tra i -1.3ϕ e i 6.06ϕ (Figura 49); tale variabilità tende a diminuire, a vantaggio delle dimensioni minori, lungo il tratto compreso tra Macchiatonda e Ladispoli. In particolare, su questi fondali le variazioni sono in buona misura legate ad un litorale in

forte erosione e alla presenza lungo la spiaggia, a Torre Flavia e Macchiatonda, di affioramenti olocenici di suoli argillosi (La Monica e Raffi, 1996).

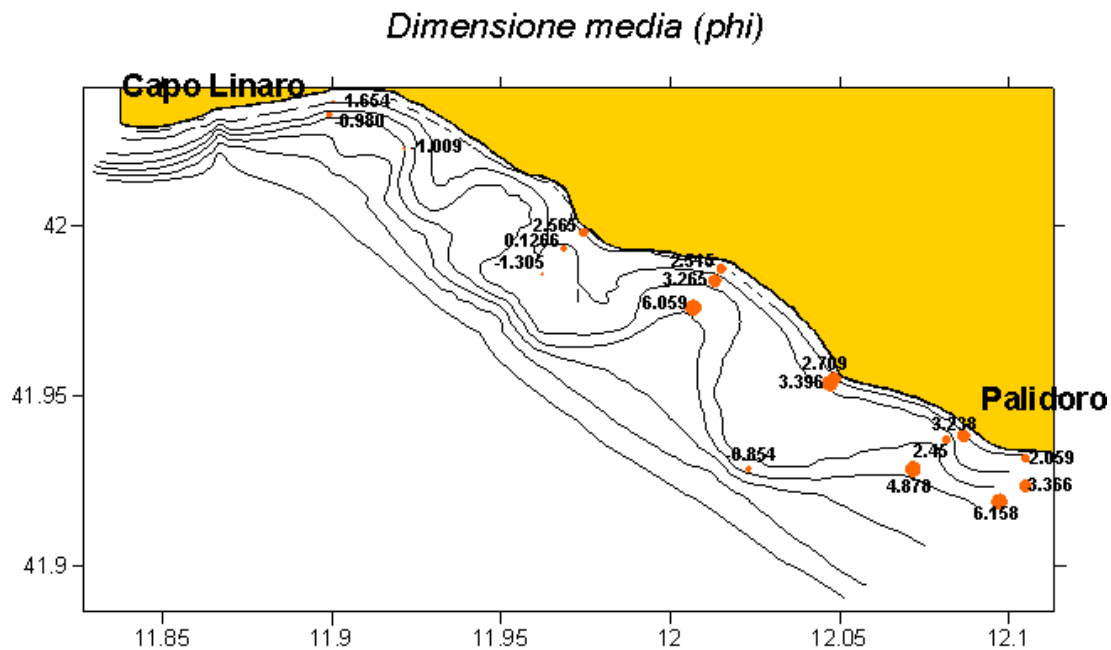


Figura 49 - Mappa dell'area compresa tra Capo Linaro e Palidoro in cui vengono riportati i valori della dimensione media dei granuli dei campioni di sedimento espressa in unità ϕ .

Lungo i fondali che si estendono da Passo Oscuro a Focene (ala destra del delta tiberino) la granulometria media rimane nel campo delle sabbie fini ed una graduale diminuzione si osserva dalla battigia verso fondali più profondi (Figura 50). Tale tendenza rispecchia la situazione nelle aree più prossime alla foce del Tevere (tra Focene e Castel Fusano). In questa zona la distribuzione granulometrica è legata all'interazione tra apporto solido del corso d'acqua e l'azione del moto ondoso che lo distribuisce sui bassi fondali. Tale interazione è variabile in quanto estremamente mutevoli sono sia gli apporti fluviali che le condizioni meteomarine.

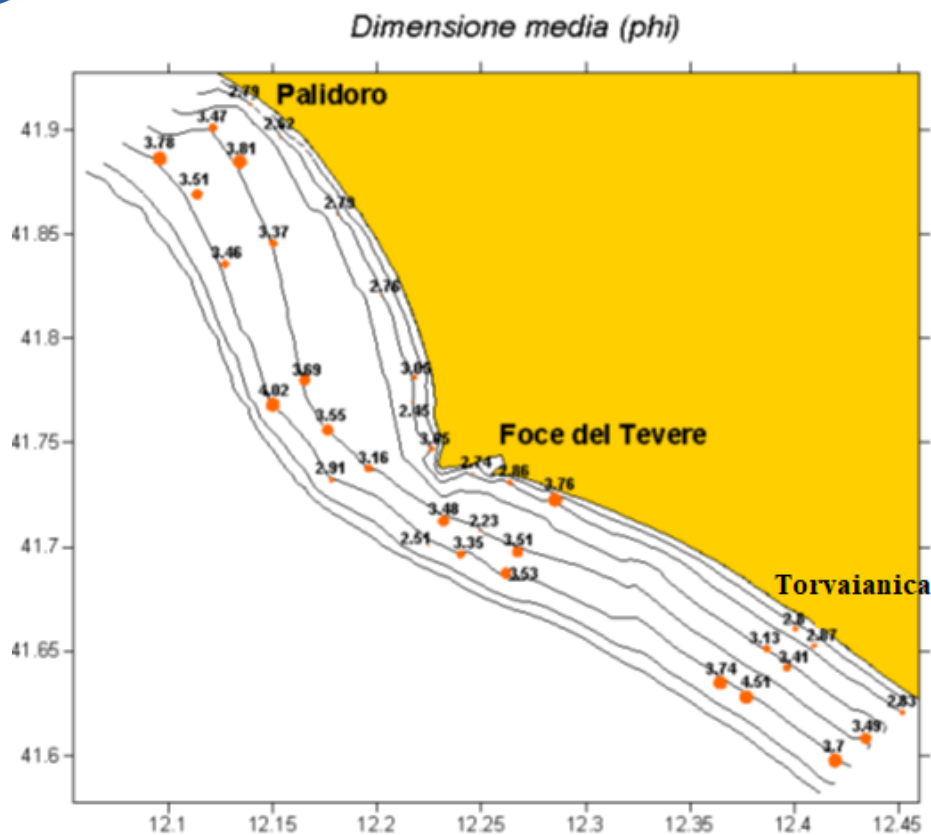


Figura 50 - Mappa dell'area compresa tra Palidoro e Torvaianica in cui vengono riportati i valori della dimensione media dei granuli dei campioni di sedimento espressa in unità ϕ .

I fondali compresi tra Tor Paterno e Capo d'Anzio sono caratterizzati da una topografia uniforme e hanno sedimenti il cui diametro medio è compreso tra le sabbie medie e le sabbie fini (Figura 51).

Gli elevati valori di classamento in alcuni campioni a Sud di Capo Linaro sembrano confermare la presenza in loco di sedimento di origine locale legato alla presenza di fondali rocciosi e di biocostruzioni sui quali l'erosione agisce disgregando i materiali; è possibile quindi che buona parte della sabbia sui bassi fondali si sia formata in loco e non abbia subito che un minimo trasporto. Se si escludono tali zone, i campioni raccolti fino a Torre Flavia risultano essere ben classati.

Dall'abitato di Ladispoli fino alla foce del Tevere i valori di classamento mostrano una graduale diminuzione (aumento della disomogeneità granulometrica) con la tendenza ad

aumentare verso Sud e a diminuire dalla linea di battigia verso il largo. Si passa da campioni ben classificati a campioni moderatamente classificati.

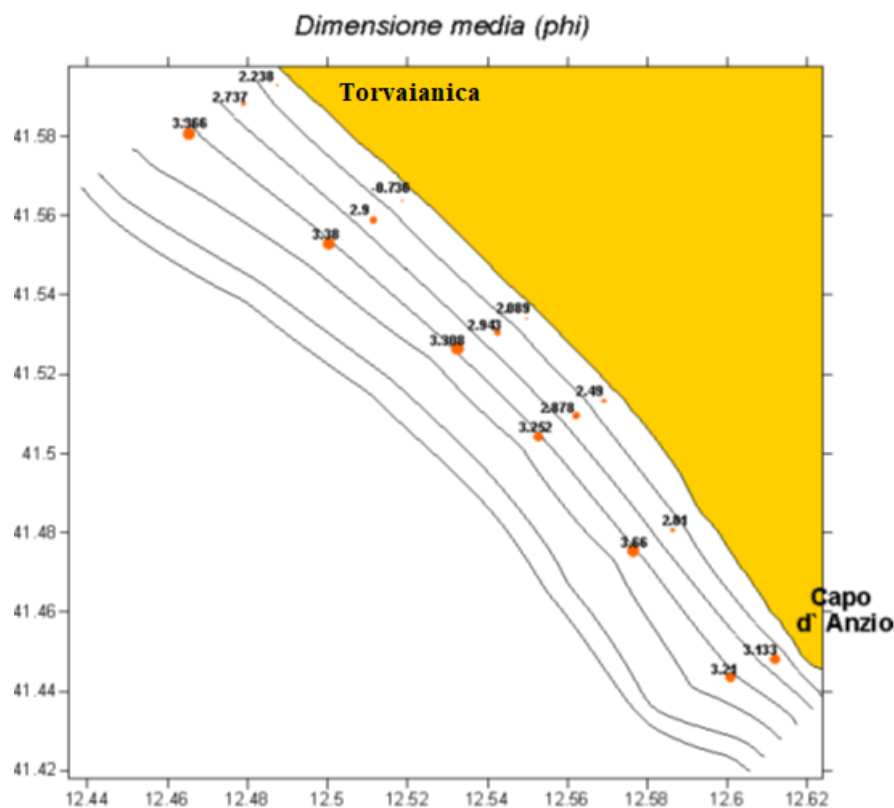


Figura 51 - Mappa dell'area compresa tra Torvaianica e Capo d'Anzio in cui vengono riportati i valori della dimensione media dei granuli dei campioni di sedimento espressa in unità ϕ .

Nell'area del fronte deltizio si evidenziano sedimenti poco classificati che hanno una tendenza costa-largo inversa rispetto al tratto precedente: il classamento decresce gradualmente lungo il tratto trasversale fino ad arrivare alla linea di costa.

Da Tor Paterno a Capo d'Anzio i campioni sono abbastanza omogenei anche se quelli a Nord di Torvaianica hanno dei valori di classamento più elevati rispetto quelli a Sud. Tale fenomeno è riconducibile al diverso periodo stagionale in cui sono stati raccolti i campioni di sedimento. Infatti, l'area a Nord di Torvaianica è stata indagata nel periodo invernale dove, a causa delle avverse condizioni meteomarine il sedimento risulta



abbastanza assortito; i campioni a sud sono stati raccolti nella stagione estiva dove vento e onde sono di modesta entità e, infatti, risultano essere da ben classati a estremamente classati.

Nella zona che va da Capo Linaro a Torvaianica i valori positivi tendenti alla simmetria dello skewness evidenziano che questo lungo tratto di costa è caratterizzato da bassi valori di energia. Procedendo verso Sud la situazione cambia rapidamente: si passa da campioni perfettamente simmetrici fino a valori negativi tendenti alla simmetria concentrati in corrispondenza del fronte deltizio. L' elevata energia di quest'area è associata probabilmente all'interazione tra il moto ondoso e il flusso del fiume Tevere.

A Sud di Tor Paterno fino a Capo d'Anzio i valori negativi dello skewness si concentrano tra la profondità dei 3 m fino a quella dei 7 m evidenziando un'elevata energia dovuta all'azione dell'onda su un complesso sistema di barre formatesi nel periodo invernale (transetti “tr10”, “tr11” e “tr12”). Nel periodo estivo il moto ondoso erode e trasporta il sedimento verso riva ad alimentare la spiaggia. A supportare tale ipotesi lungo questo tratto a basse profondità i valori di skewness sono positivi tendenti alla simmetria.

Nel tratto che va da Capo Linaro a Torre Flavia i valori del kurtosis sono sempre maggiori di 1 tranne quelli posti alla profondità di 7 m e 14 m lungo il transetto “tr6”. La distribuzione dei valori lungo tale transetto viene riportata anche in “tr8” e “tr9”. A sud di Palidoro fino alla foce del Tevere si hanno, a basse profondità, valori del kurtosis minori di 1 o di poco superiori a 1; mentre a -7 m e -14 m l'indice ritorna a superare l'unità. In corrispondenza del fronte deltizio i valori di kurtosis rimangono di poco superiori a 1 a tutte le profondità ma a destra e sinistra di questa zona tali valori risultano essere maggiori di 2.

Da Tor Paterno fino a Capo d' Anzio il kurtosis rispecchia fedelmente la classazione. I valori del parametro sono abbastanza omogenei e concentrati intorno all' unità per la maggior parte dei campioni analizzati. Questo dato evidenzia un appuntamento della distribuzione e di conseguenza una buona classazione.



4.2 Predisposizione e simulazioni attraverso il modello per l'analisi dell'evoluzione della linea di riva e della spiaggia sommersa ed emersa

Il modello utilizzato per l'analisi dell'evoluzione della linea di riva e della spiaggia emersa e sommersa è il LITPACK. Il LITPACK è un sistema di modellazione deterministica che descrive i maggiori processi della fascia costiera, sotto forma di un insieme di singoli moduli sviluppati dal Danish Hydraulic Institute. Permette di discretizzare spazialmente la costa e i profili morfologici attraverso intervalli della stessa dimensione e questo pone dei limiti nella rappresentazione di tratti di linea di riva brevi e molto articolati.

Il modello può essere applicato ad un ampio range di processi litoranei, investigati con dettaglio differente in base al tipo di modulo applicato:

- trasporto puntuale di sedimento: include la modellazione del trasporto in un sito specifico, puntuale nello spazio;
- correnti litoranee;
- trasporto solido litoraneo: include la modellazione del trasporto parallelo alla linea di costa, gli effetti delle strutture antropiche e la distribuzione perpendicolarmente alla linea di costa del trasporto di sedimento;
- trasporto annuale: calcolo dei volumi totali trasportati nell'arco di un anno, utilizzato per la valutazione degli effetti delle strutture protettive, del budget di sedimento, e come input per il modulo di previsione dell'evoluzione della linea di costa;
- evoluzione della linea di costa: include la simulazione della variazione della linea di costa in base al clima di trasporto e ad eventuali strutture introdotte nel sistema studiato;
- evoluzione di profili batimetrici.

La distribuzione verticale del sedimento non coesivo al di sopra di un punto del fondale esposto ad onde e correnti, viene calcolata sulla base della teoria di Engelund e Fredsoe (1976) che definisce il trasporto di sedimento come somma del carico sospeso (q_s) più il carico di fondo (q_b).



In caso di combinazione degli effetti di correnti ed onde, il moto orbitale di quest'ultime nei pressi del fondo produrrà un incremento considerevole nei valori istantanei di bed shear stress e di eddy viscosity all'interno del boundary layer. Tale situazione è stata descritta da Fredsoe tramite un modello la cui idea di base è che lo sviluppo del wave boundary layer venga calcolato per ogni mezzo periodo d'onda, assumendo che il profilo di velocità al suo interno sia logaritmico.

Una volta determinate le condizioni idrodinamiche viene calcolato il trasporto di sedimento sulla base della già citata teoria di Engelund e Fredsoe basata sulla distinzione tra il trasporto come carico sul fondo e il trasporto in sospensione.

Le caratteristiche richieste dal modulo per la descrizione del sedimento riguardano le dimensioni del sedimento del fondale superficiale (esprese in termini di d_{50} , che rappresenta la mediana dei valori del diametro dei granuli di sedimento), e la velocità di caduta, calcolata in base alla legge di Stokes. Per la descrizione del fondale vengono invece indicati il bed shear stress e delle costanti che definiscono dimensioni ed effetti di eventuali ripple marks, le increspature del fondo dovute proprio al passaggio dell'onda. Una volta specificate le caratteristiche morfologiche e granulometriche del fondale viene calcolato il trasporto di sedimento considerando le caratteristiche del moto ondoso e la presenza di correnti dovute sia alla circolazione generale sia ad eventuali venti. Il modello calcola, oltre al trasporto longitudinale, anche quello trasversale, considerando l'influenza di parametri quali l'asimmetria delle onde, stress dovuti a gradienti verticali di densità, e circolazione della corrente sul trasporto di sedimento. I risultati finali sono, principalmente, la variazione della linea di riva calcolata rispetto ad una linea di base presa come riferimento e i profili trasversali che descrivono la morfologia emersa e sommersa.

Per ricostruire la linea di costa nell'area di studio è stata realizzata una griglia di calcolo utilizzando una linea retta posizionata sulla terraferma (baseline) avente un'inclinazione di circa 170° rispetto al nord. L'inclinazione e la risoluzione spaziale scelta (10 m) ha consentito di definire nel dettaglio i diversi elementi geografici (baie strette, pennelli e strutture antropiche di grandi dimensioni) che costituiscono la linea di costa oggetto di studio. Le strutture che caratterizzano le linee di riva nel 1984, 2005 e 2022 sono state

inserite come breakwaters e jetties, a secondo dell'orientamento e della posizione, all'interno della griglia di calcolo. Le griglie ottenute per il 1984 e il 2005 sono state utilizzate per la validazione del modello LITPACK mentre quella del 2022 è stata realizzata per effettuare previsioni sulla variazione della linea di riva a seguito della realizzazione del nuovo Porto di Fiumicino, sia nella configurazione "I Lotto funzionale" sia nella configurazione "Completa" (Figura 52).



Figura 52 - Planimetria del nuovo Porto di Fiumicino nella configurazione "I Lotto funzionale" (a sinistra) 2 nella configurazione "Completa" (a destra).

Validazione del modello LITPACK

Il modello è stato calibrato utilizzando due lunghi intervalli temporali annui in cui si disponeva della linea di costa:

- 1984 -2005;
- 2005 - 2022.

Nel primo periodo temporale è stata utilizzata come linea di costa quella del 1984 che è stata ottenuta elaborando le foto aeree dell'Aeronautica Militare. Al fine di analizzare nel dettaglio la zona di Fiumicino la baseline è stata orientata con un'inclinazione di 170° N,



ed è stato scelto un intervallo spaziale di 10 m. Sono stati selezionati otto dei centoquaranta transetti cross-shore rilevati nel 1990 in modo che la loro posizione e variabilità fosse rappresentativa delle diverse zone morfologiche dell'unità fisiografica Capo Linaro - Capo d'Anzio. In ognuno degli otto transetti è stata definita la variazione del d_{50} e del parametro di classazione (espresso come $\sqrt{(d_{84}/d_{16})}$) utilizzando i dati sedimentologici acquisiti a diverse profondità (0 m, -5 m, -10 m). Per tener conto della variabilità spaziale del moto ondoso nell'area di studio sono stati applicati tre climi ondametrici di un anno rappresentativo del periodo di indagine. I tre punti prescelti si trovano nella zona a Nord, in corrispondenza della cuspidi deltizia e nella zona a Sud dell'unità fisiografica ad una profondità di circa 20 m. I parametri d'onda in corrispondenza di questi tre punti sono stati calcolati con il modello SWAN che riproduce la propagazione del moto ondoso verso riva e quindi i fenomeni di shoaling, diffrazione, rifrazione e frangimento. Prima di calcolare la variazione della linea di riva è stato determinato, in corrispondenza di ogni transetto, il Littoral drift per diversi intervalli di altezza d'onda, periodo e direzione.

Nel modello è stato inserito l'apporto del fiume Tevere utilizzando un valore medio tra i dati disponibili negli ultimi cinquant'anni e suddividendo tale valore secondo quanto definito da Mikhailova et al. (1998) tra la foce di Fiumara Piccola (1/5) e quella di Fiumara Grande (4/5). Le numerose strutture rigide presenti sul tratto di costa oggetto di studio sono state trattate come revetments (strutture non erodibili) quando si trattava di barriere aderenti o longitudinali poste ad una piccola distanza l'una dall'altra, offshore breakwaters quando erano poste ad una certa distanza da costa come gli antemurali portuali e Groynes quando si tratta di barriere trasversali che interrompono in tutto o in parte il trasporto longitudinale del sedimento. Nella simulazione Coastline evolution, gli effetti prodotti dal clima d'onda annuale sul trasporto solido litoraneo sono stati moltiplicati per l'intervallo di anni necessari per riprodurre la variazione della linea di riva (25 anni). Per aumentare le performance del modello in termini di BIAS e RMSE i valori di active depth e offshore contour, che definiscono lo spazio tra la linea di costa e la zona a largo in cui avviene il trasporto solido, sono stati modificati nei diversi tratti dell'area di studio. Per verificare l'attendibilità della active depth e dello offshore contour e per riprodurre la



variazione della linea di costa dovuta dalla presenza del molo Concordia, il modello è stato validato anche nel periodo compreso tra il 2005 e il 2022. Le uniche modifiche rispetto al precedente setting riguardano l'anno rappresentativo delle condizioni ondamiche e l'inserimento di alcune strutture che sono state realizzate all'interno del periodo di indagine, come il molo Concordia.

Nelle figure 47 e 48 sono rappresentati i risultati della calibrazione del modello, che è stata effettuata sull'unità fisiografica Capo Linaro – Capo d'Anzio e su due archi temporali diversi: 1990-2005 (Figura 53) e 2005-2022 (Figura 54). Per ogni punto della linea di base (asse verticale) i valori positivi indicano una tendenza all'avanzamento (in metri) della costa, mentre valori negativi indicano arretramento. Nel plot centrale della figura 53 sono rappresentate le variazioni reali misurate dalle differenze tra la linea di costa del 1990 e del 2005 ricostruite attraverso foto aeree ed immagini satellitari. A sinistra è rappresentata la variazione della linea di costa calcolata attraverso il modello LITPACK. Come si evince dal plot a sinistra, il modello rappresenta fedelmente il tratto di linea di costa in avanzamento che si estende da Passoscuro fino a nord di Fiumicino, e riproduce in modo affidabile anche l'arretramento della costa nella porzione di Fiumicino. Inoltre, in prossimità della Foce del Tevere, il modello riproduce bene l'avanzamento della linea di costa. Nel tratto di costa che si estende a Nord di Ladispoli e a Sud di Tor Paterno, il modello rappresenta abbastanza bene i fenomeni di avanzamento ed arretramento della linea di costa, pur non risultando in grado di simularne la reale entità. Il confronto tra dati misurati ed osservati è stato effettuato valutando i valori di BIAS ed RMSE. Il BIAS medio (scostamento del valore stimato dal valore osservato) è di -5.01 m mentre il valore di RMSE (Root Mean Square Error, errore quadratico medio) è pari a 12.30.

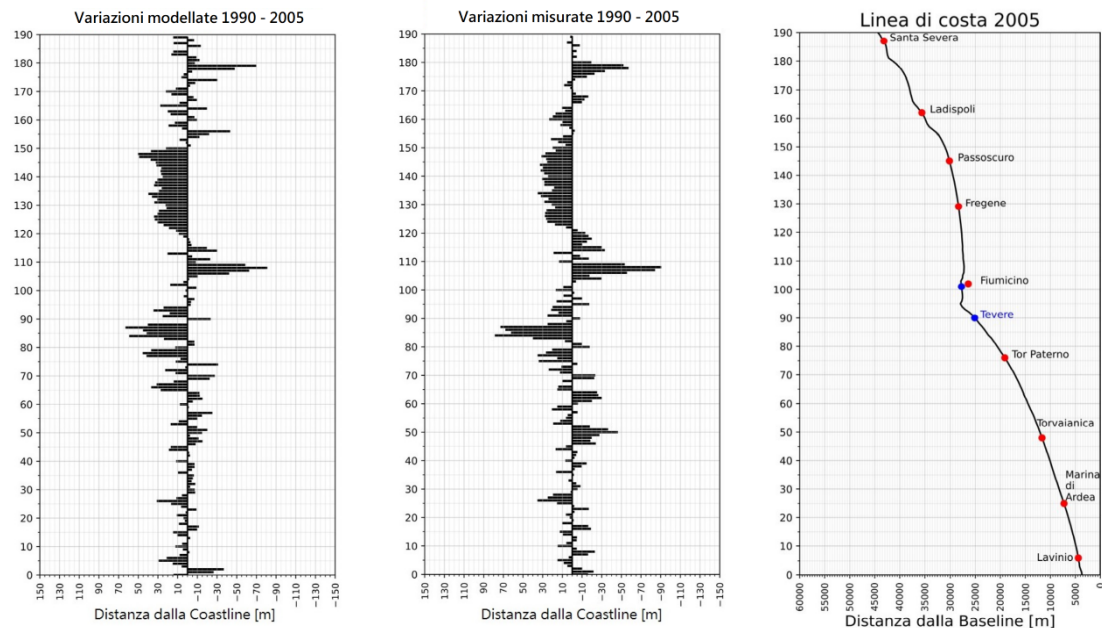


Figura 53 - Variazioni della linea di costa riprodotte con il modello LITPACK (a sinistra) e osservate da foto aeree e immagini satellitari (al centro) nel periodo compreso tra il 1990 e il 2005. Linea di costa rappresentativa dell'unità fisiografica Capo Linaro - Capo d'Anzio in cui vengono riportate alcuni comuni costieri in rosso e la foce dei fiumi in blu (a destra).

Nel periodo 2005-2022 (Figura 54) il modello riproduce meglio le variazioni della linea di riva nel tratto centrale dell'unità fisiografica, con particolare riferimento al tratto di costa compreso tra Ladispoli e Passoscuro e tra Fregene e Tor Paterno. Nella parte a Nord e nel tratto compreso tra Torvaianica e Marina di Ardea c'è una maggiore discrepanza tra le variazioni simulate rispetto a quelle reali. Questa simulazione ha prodotto un BIAS medio di 0.19 m ed un RMSE di 9.66.

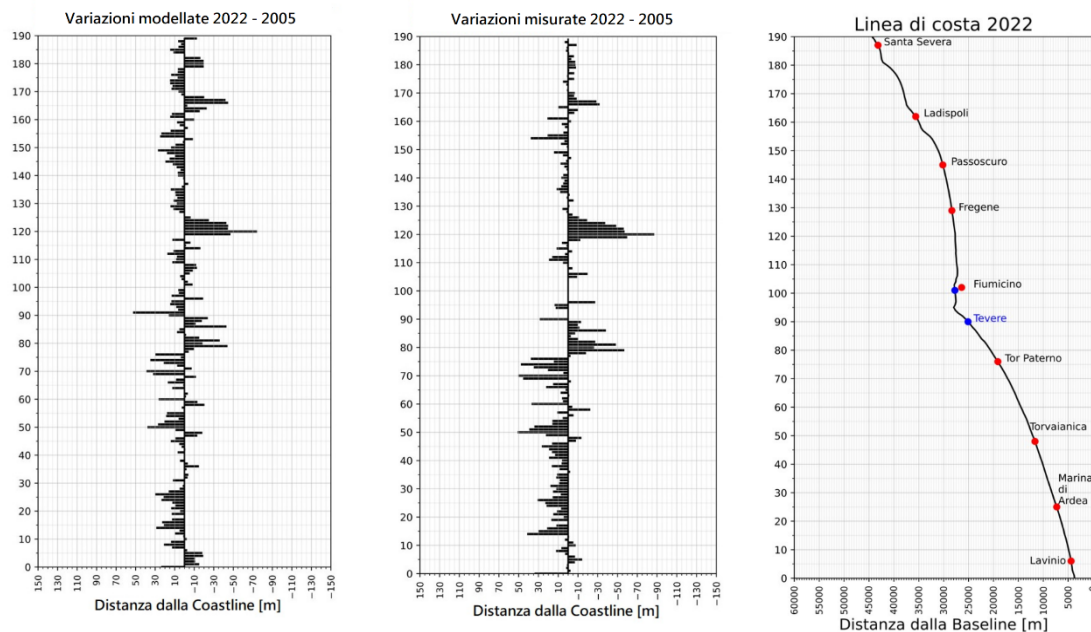


Figura 54 - Variazioni della linea di costa riprodotte con il modello LITPACK (a sinistra) e osservate da foto aeree e immagini satellitari (al centro) nel periodo compreso tra il 2005 e il 2022. Linea di costa rappresentativa dell'unità fisiografica Capo Linaro - Capo d'Anzio in cui vengono riportate alcuni comuni costieri in rosso e la foce dei fiumi in blu (a destra).

Analisi degli scenari futuri

Per analizzare gli effetti del nuovo porto di Fiumicino sulla morfologia della linea di costa è stato effettuato un confronto riproducendo la variazione della linea di riva in assenza ed in presenza della struttura.

La figura 55 riporta le aree in avanzamento e in arretramento della costa causate dalla presenza del porto dopo il completamento della prima fase dei lavori (configurazione 1° Lotto Funzionale). La zona interessata dalle variazioni si estende fino ad una distanza di 5800 m nella zona a Nord e di 2600 m nella parte a Sud rispetto alla posizione della nuova struttura. Questa configurazione produce un arretramento della linea di riva di circa 13 m nella parte a Nord che tende a diminuire all'aumentare della distanza dall'opera. Il materiale tende ad accumularsi nel tratto di costa a sud del molo di Fiumara Piccola con valori che diminuiscono procedendo verso la foce di Fiumara Grande.

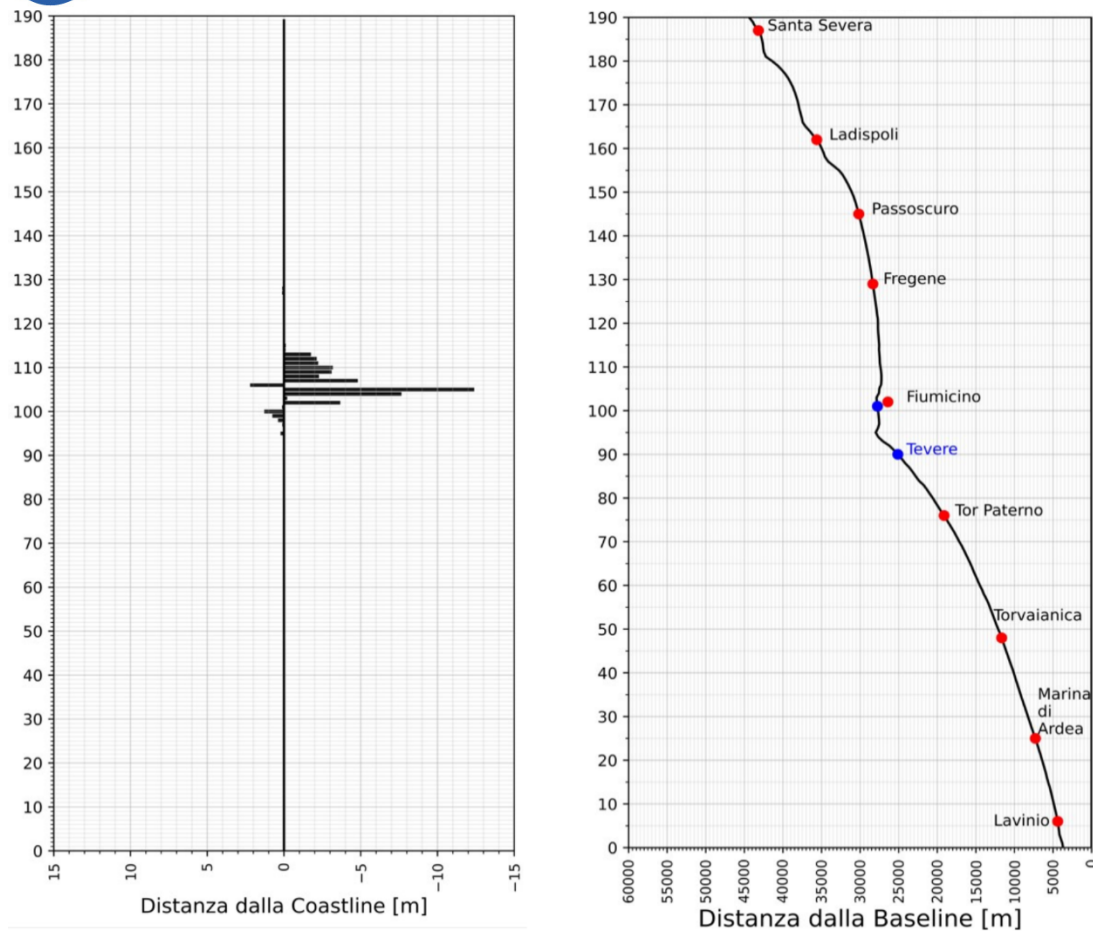


Figura 55 - Variazioni della linea di riva dovute alla presenza dell'opera (1° Lotto Funzionale) ottenute sottraendo i cambiamenti prodotti in sua assenza (a sinistra). Linea di costa rappresentativa dell'unità fisiografica Capo Linaro - Capo d'Anzio in cui vengo riportate alcuni comuni costieri in rosso e la foce dei fiumi in blu (a destra).

La figura 56 riporta le variazioni della linea di riva dovuti alla presenza del nuovo porto di Fiumicino a seguito il completamento della seconda fase dei lavori (Configurazione finale). Gli effetti indotti da questa struttura risultano essere più marcati di quella precedente sia in termini di estensione del tratto di costa coinvolto dai cambiamenti (6900 m nella zona Nord e 2900 m nella parte a Sud) sia per quanto riguarda l'entità dei cambiamenti stessi. Il nuovo porto produce un arretramento della costa di oltre 20 m nella parte a nord con valori che tendono a diminuire all'aumentare della distanza dall'opera. Accumuli si verificano nella spiaggia adiacente al molo di sottoflutto della nova struttura

e nel tratto di costa compreso tra Fiumara Piccola e Fiumara Grande.

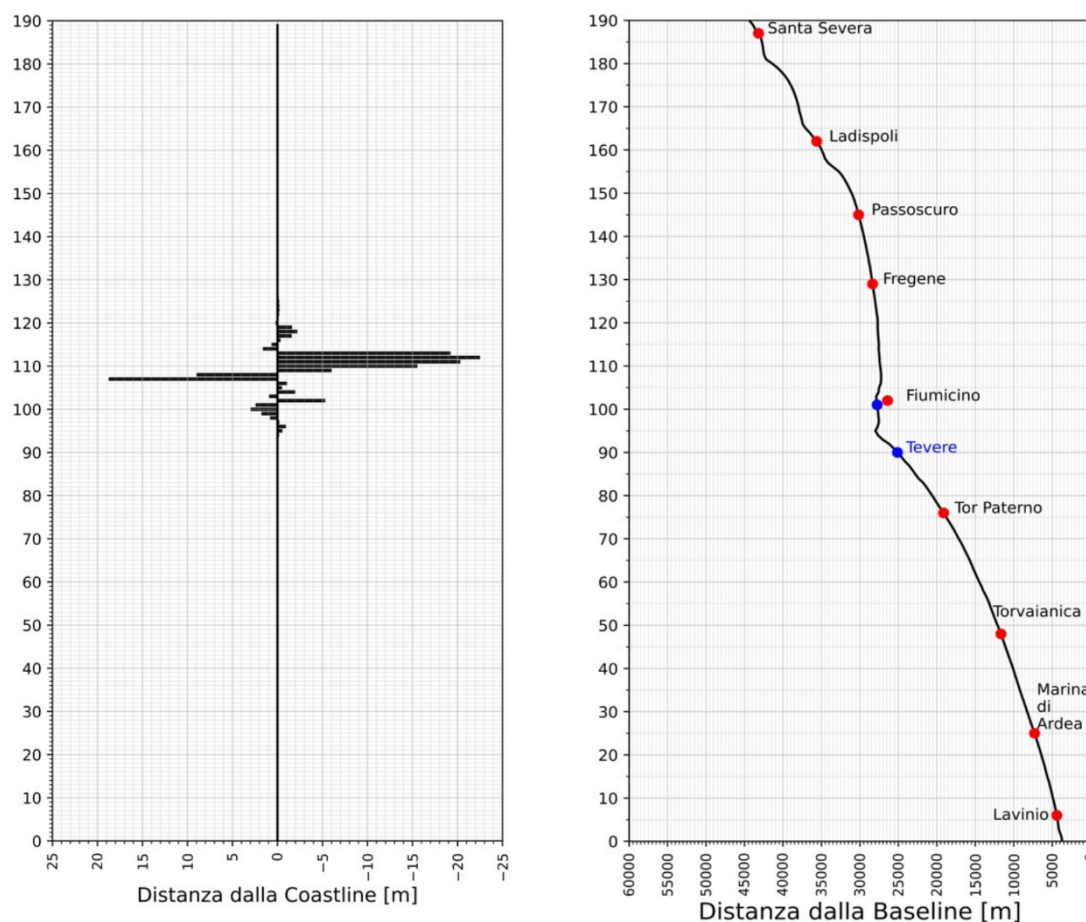


Figura 56 - Variazioni della linea di riva dovute alla presenza dell'opera (Configurazione completa) ottenute sottraendo i cambiamenti prodotti in sua assenza (a sinistra). Linea di costa rappresentativa dell'unità fisiografica Capo Linaro - Capo d'Anzio in cui vengono riportate alcuni comuni costieri in rosso e la foce dei fiumi in blu (a destra).



5. OCEANOGRAFIA SPERIMENTALE

5.1 Analisi del clima ondoso e delle correnti marine

5.1.1 Misure di onde e correnti con Radar X-Band

Il monitoraggio dello stato del mare per mezzo di un radar X-band è diventato nel corso del tempo un sistema di grande interesse data la sua maggiore risoluzione spaziale rispetto ai più comuni sistemi HF. Rispetto ai radar HF il sistema in banda X dispone di una serie di vantaggi che ne facilitano l'utilizzo come: la minore dimensione, minor peso e facilità d'installazione, la capacità di effettuare un monitoraggio ad elevata risoluzione spaziale e temporale (Young et al., 1985). Il principio di funzionamento del radar in banda X è basato sul processamento del segnale elettromagnetico di backscatter rimesso dalla rugosità del mare per effetto della risonanza di Bragg (Nieto et al., 2004; Nieto et al., 2000). Questo segnale può essere processato per raggiungere una caratterizzazione spazio-temporale dello stato del mare. Al fine di perseguire questo risultato è necessaria una dettagliata analisi statistica che consente di passare dall'immagine radar all'informazione spazio-temporale dello stato di mare (Nieto et al., 2004; Serafino et al., 2010). L'ottenimento delle informazioni dello stato del mare, quali direzione d'onda, periodo, altezza e intensità e direzione delle correnti, si ottengono dall'analisi spazio-temporale dell'elevazione della superficie del mare attraverso l'approccio proposto da Serafino et al., 2010 che consiste essenzialmente in 4 fasi.

Nella prima fase, la sequenza di immagini radar è trasformata in una immagine spettrale 3-D per mezzo della 3-D-Fast Fourier Transform (3D-FFT); successivamente, il decadimento lungo la direzione di propagazione, della potenza del segnale ricevuto, viene filtrato applicando un high-pass (HP) filter sull'immagine spettrale FI (k_x, k_y, ω).

Nella seconda fase, le componenti delle onde di gravità sono estratte dall'immagine spettrale FI (k_x, k_y, ω). Il filtraggio analizza la relazione di dispersione che intercorre tra il numero d'onda ($\bar{k}$) e la frequenza angolare (ω) attraverso la corrente superficiale



$\bar{U} = (U_x, U_y)$ e la profondità dell'acqua h . La relazione di dispersione è data da:

$$\omega(\bar{k}) = \sqrt{g|\bar{k}| \tanh(|\bar{k}|h) + \bar{k}\bar{U}} \quad (1),$$

dove g è l'accelerazione gravitazionale alla superficie della terra e k è:

$$k = |\bar{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (2).$$

Il vettore corrente $\bar{U} = (U_x, U_y)$ necessita di essere stimato prima di applicare la relazione di dispersione (Young et al., 1985). Per questo motivo, la massimizzazione della metodologia NSP, sviluppata da Serafino et al., 2010, è applicata nella terza fase.

Una volta che la corrente $\bar{U} = (U_x, U_y)$ è stata stimata, è possibile costruire il band pass filter $G(k_x, k_y, \omega, U_x, U_y)$ sulla base dell'equazione (1) e applicarla all'immagine spettrale FI (k_x, k_y, ω) (vedi diagramma a blocchi di Fig. 57). Il risultato di questa procedura è la funzione $\check{F}I(k_x, k_y, \omega)$.

Nel quarto passaggio si passa dall'immagine spettrale filtrata $\check{F}I(k_x, k_y, \omega)$ allo spettro d'onda FW (k_x, k_y, ω) minimizzando l'effetto dovuto ai fenomeni di modulazione. Questa fase può essere implementata usando la funzione MTF (Modulation Transfer Function) che permette la trasformazione dallo spettro radar allo spettro di mare.

$$F_w(k_x, k_y, \omega) = \frac{\check{F}I(k_x, k_y, \omega)}{|M(k)|^2} \quad (3),$$

dove $|M(k)|^2 = k\beta$ è la funzione MTF. Analisi empiriche passate hanno trovato una buona stima con il valore di $\beta = -1.2$ (Nieto Borge et al., 2004). Quando lo spettro d'onda $F_w(k_x, k_y, \omega)$ è determinato, è possibile estrarre alcuni parametri relativi allo stato di mare. Questo viene fatto generando uno spettro direzionale del numero d'onda, da cui calcolare la lunghezza d'onda e la direzione di propagazione (λ_p, θ_p) delle onde primarie. L'ultimo passo è fornire l'evoluzione dell'altezza d'onda $\eta(x, y, t)$ attraverso una inversa

3-D FFT alla funzione $F_w(kx, ky, \omega)$.

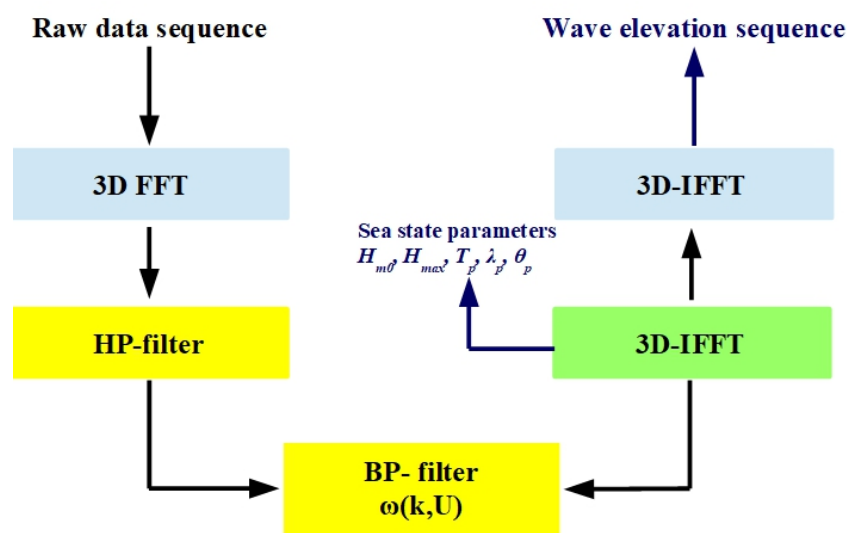


Figura 57 - Diagramma a blocchi che descrive il processing delle immagini radar. Il dettaglio dei parametri di acquisizione del radar sono riportati in Tabella 2.

<i>Parametri radar</i>	<i>Valore</i>
Peak power	25kW
Radar scale	2.48 NM
Antenna rotation period (Δt)	2 s
Spatial image spacing (Δx and Δy)	5 m
Antenna height	15 m

Tabella 2. Parametri radar.

Il sistema presenta delle limitazioni che dipendono dalla sua capacità di rilevare le anomalie della superficie dell'acqua e per questo il sistema in generale non consente di effettuare delle misure con un moto ondoso < 0.5 m e in condizioni di onde molto corte al di sotto della frequenza di Nyquist. Inoltre, un altro limite del sistema è l'incapacità di effettuare misure in assenza totale di vento, condizione comunque molto poco frequente. Per le altre condizioni meteorologiche il sistema non presenta limiti né in altezza massima

dell'onda (a differenza del radar HF che ha un limite sia inferiore che superiore di altezza d'onda misurabile) né in presenza di pioggia. Il Radar X-Band è stato installato presso la foce di Fiumara Piccola (Fiumicino) nel dicembre del 2020, su di una torre faro posta alle coordinate Lat. 41.770634 Long. 12.22097. Il radar ha permesso di acquisire le correnti marine superficiali e i parametri del moto ondoso in diversi eventi di storm che si sono succeduti nel corso del 2021.

Dal confronto con i risultati del modello WAM distribuiti dalla piattaforma COPERNICUS (product identifier = MEDSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_006_013), emerge come l'altezza d'onda acquisita dal radar durante alcuni eventi di storm occorsi nel 2021, sia ben correlata ($r=0.65$) con quella calcolata nel modello in un punto a largo ricadente all'interno del dominio di misura del radar (Figura 58).

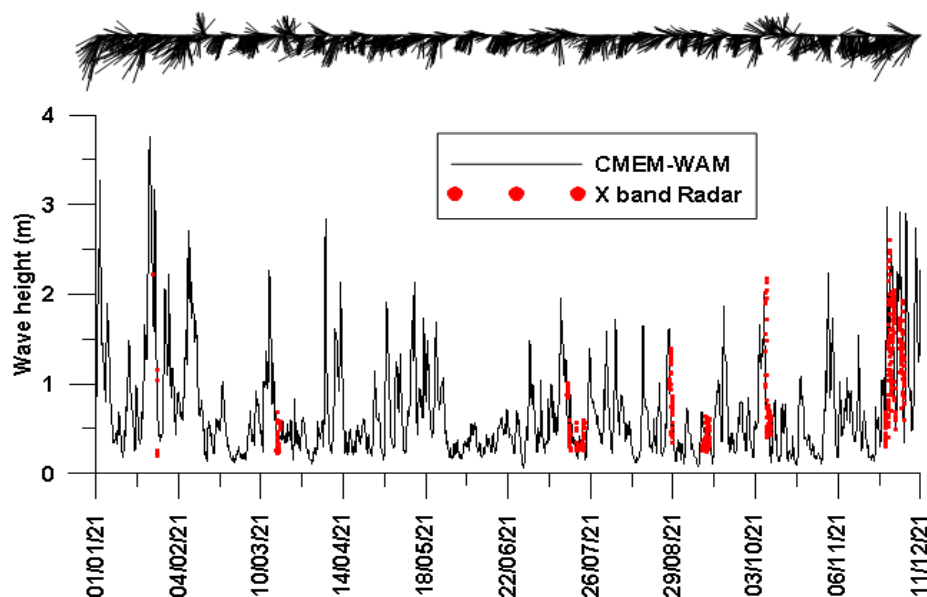


Figura 58 - Il grafico in basso mostra il confronto tra le altezze d'onda misurate dal radar (pallini rossi) e calcolate dal modello WAM di COPERNIUS (linea nera continua), l'immagine in alto rappresenta lo stick plot della direzione del moto ondoso analizzata dal modello

Di seguito vengono riportati gli spettri d'onda direzionali acquisiti dal radar e i relativi

campi di velocità superficiale in alcuni eventi di storms (Figura 59 e 60).

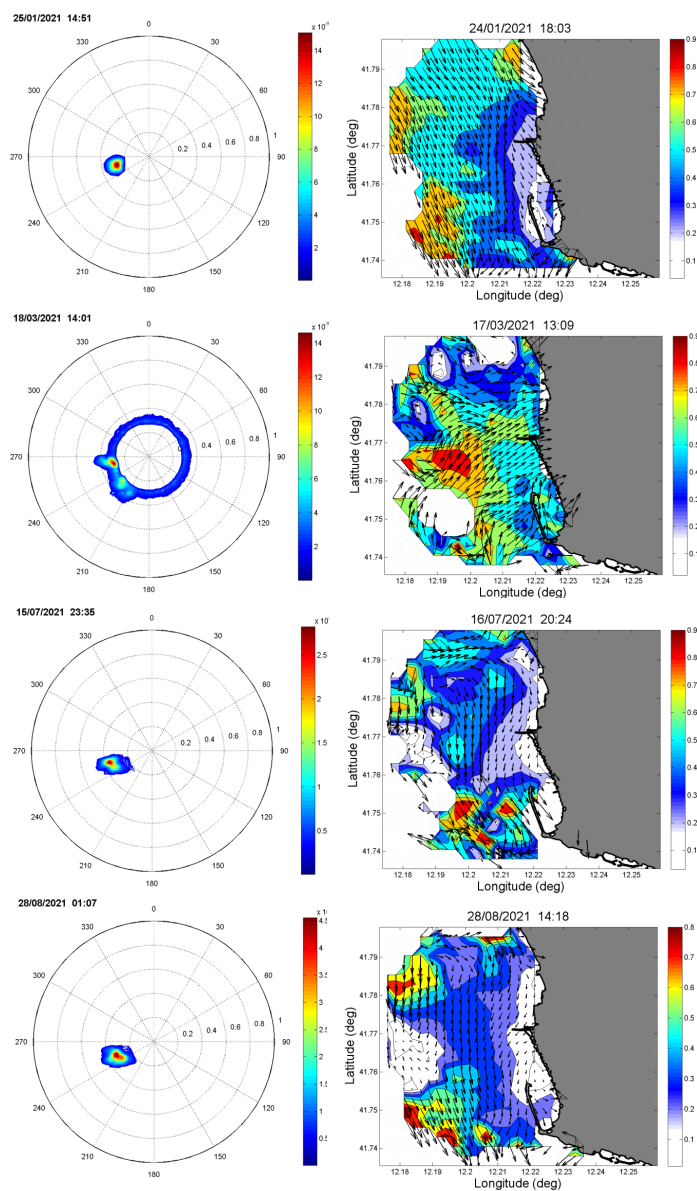


Figura 59 - Spettri d'onda direzionali acquisiti dal radar e i relativi campi di velocità superficiale in alcuni eventi di storms.

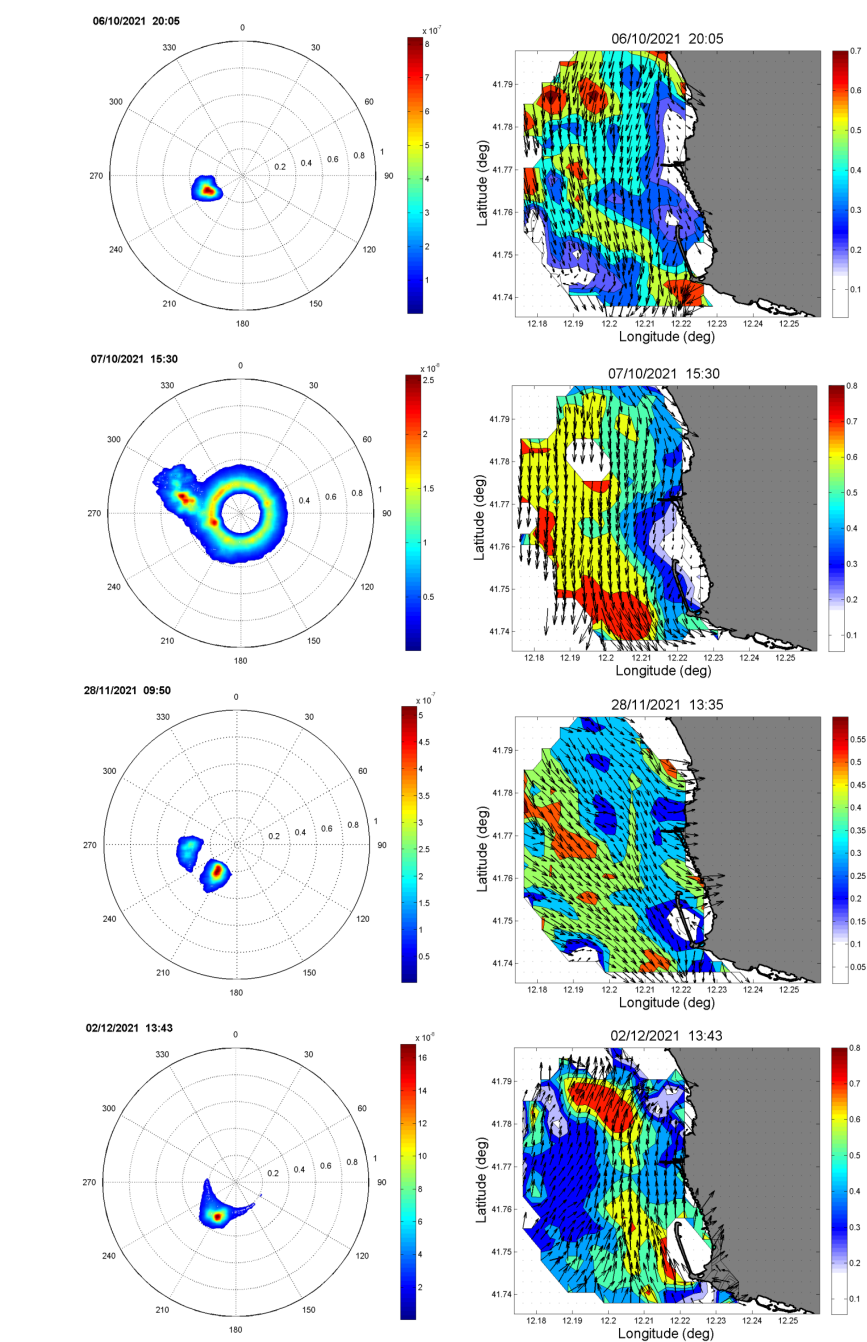


Figura 60 - Spettri d'onda direzionali acquisiti dal radar e i relativi campi di velocità superficiale in alcuni eventi di storms.



5.1.2 Misure di onde con boa fissa low-cost

Al fine di acquisire dati ondametrici nell'area oggetto di studio è stata installata una boa a basso costo, grazie alla collaborazione con LDL (Lagrangian Drifter Laboratory) dello Scripps Institution of Oceanography UCSD (Centurioni et al. 2017). La boa è stata inizialmente (marzo 2022) posizionata nell'area interdetta alla navigazione per la presenza delle piattaforme, a circa 35m di profondità, alle coordinate: 41.75400 N - 12.14400 E (Datum WGS84). A causa di eventi esterni, la boa è stata rimossa dal suo ormeggio in data 28 marzo 2022 ed è stata recuperata alla deriva dopo poche ore.

È stata quindi richiesta una nuova autorizzazione agli organi competenti per modificare il punto di installazione della boa.

La boa è stata quindi posizionata, dopo aver ricevuto autorizzazione, in data 16 marzo 2023, nel punto di coordinate 41.8517480 N - 12.2664579 E (Datum WGS84).

La boa ondamentica ha acquisito in continuo nel periodo 28.03.2023-08.08.2023 (per un totale di 146 giorni), data in cui è stata recuperata per effettuare la manutenzione periodica.

La posizione della boa e i dati erano continuamente monitorabili attraverso un sito web ad hoc (Figura 61) e periodicamente sono stati uploadati sull'ftp predisposto con il supporto del CED dell'AdSP per la loro visualizzazione sul Geoportale online.

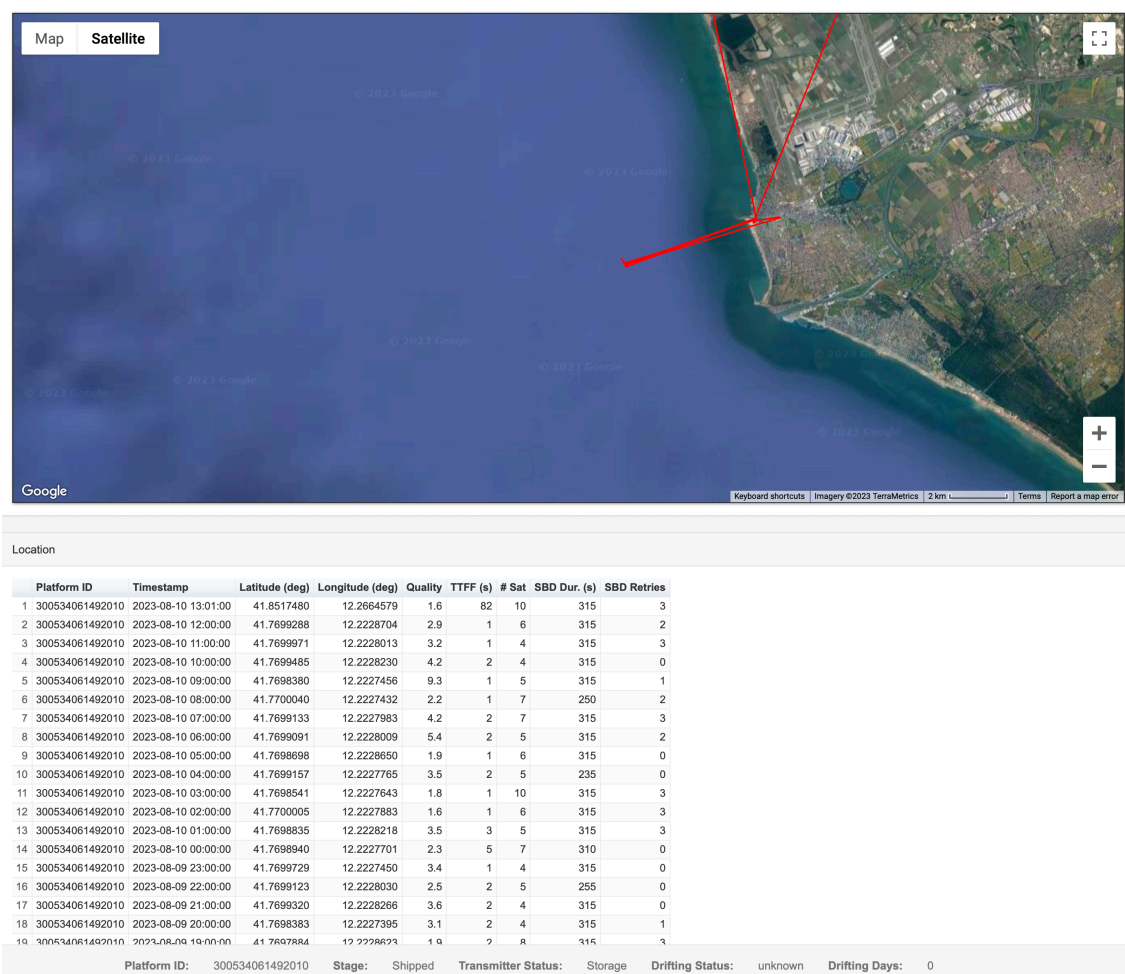


Figura 61 - Visualizzazione della posizione e dei dati acquisiti dalla boa ondametrica.

Di seguito vengono riportati alcuni dei dati acquisiti dalla boa, in particolare quelli di temperatura superficiale, pressione atmosferica e altezza d'onda significativa.

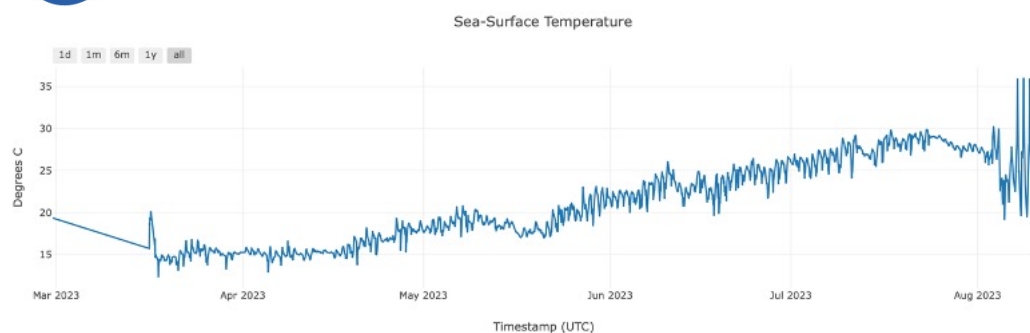


Figura 62 - grafico dell'andamento nel tempo della temperatura superficiale

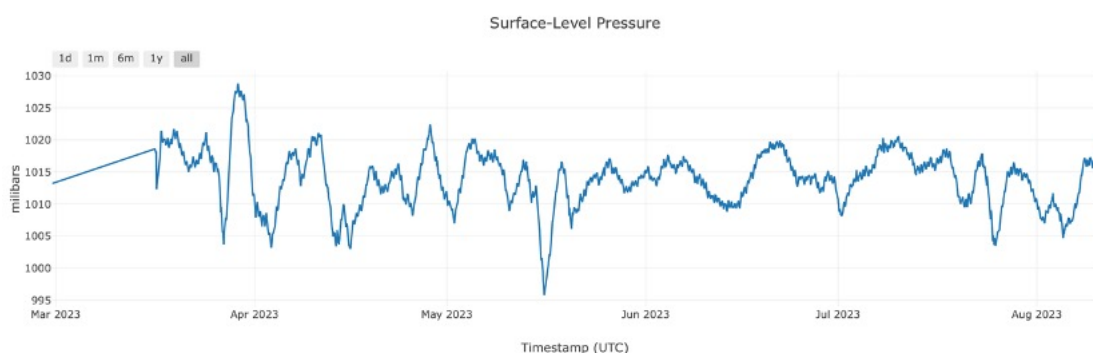


Figura 63 - Grafico dell'andamento nel tempo della pressione atmosferica.

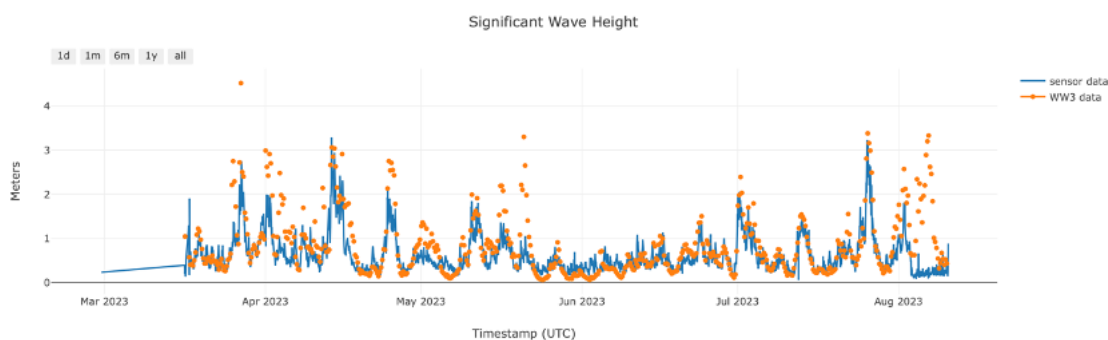


Figura 64 - Grafico dell'andamento nel tempo dell'altezza d'onda significativa con comparzione con modello Wave Watch 3.

5.1.3 Misure di onde e correnti con ADCP fisso

Le correnti marine e il moto ondoso nella zona costiera di Fiumicino sono state misurate attraverso l'utilizzo di un sensore ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) Signature1000 della Nortek, posizionato ad circa 3 km dalle linea di riva su una profondità di circa 15 m (figura 65). Oltre alla misura delle correnti marine e del moto ondoso, il Signature1000 è lo strumento ottimale per le misurazioni di turbolenza e della biomassa lungo la colonna d'acqua grazie all'utilizzo del fascio centrale che funge anche da ecoscandaglio biologico.

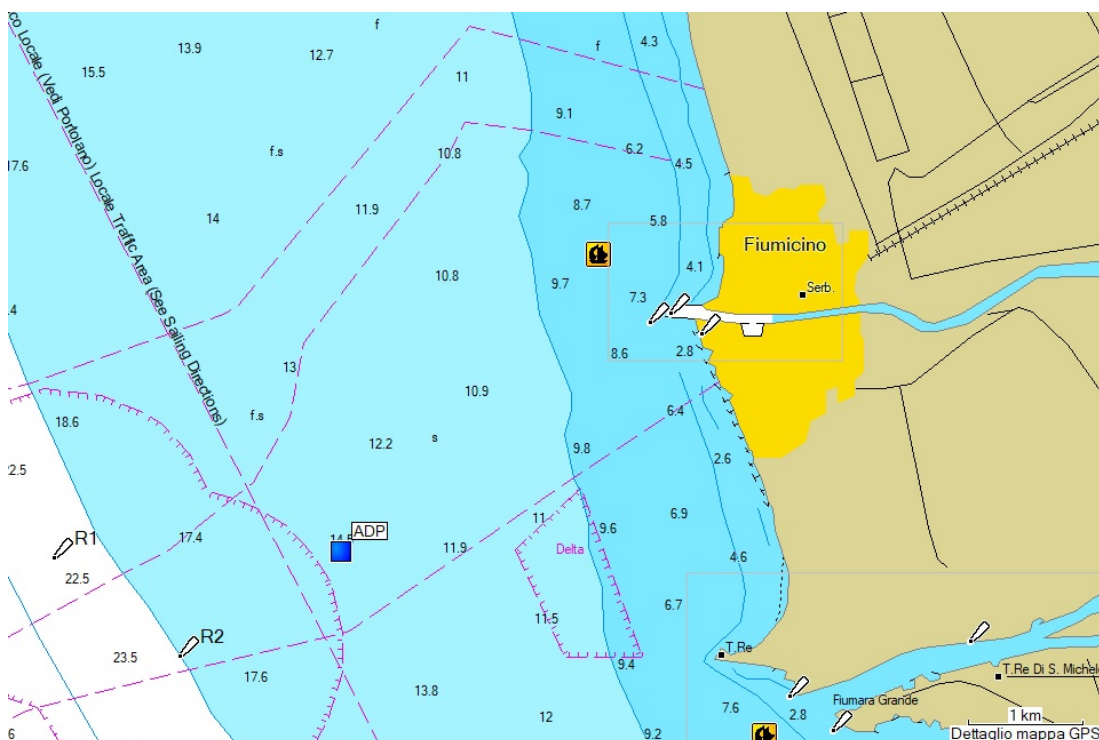


Figura 65 - Posizione in cui è stato installato il sensore ADCP (quadrato blu).

Lo strumento è stato posizionato a 3 m dal fondo all'interno di una boa di spinta (figura 60 a sinistra) e opera in modalità uplooking in quanto i lobi sono rivolti verso la superficie del mare (figura 60 a destra). In questo modo è in grado di rilevare la direzione e il periodo

delle onde e le correnti marine superficiali. Grazie all'utilizzo di specifici sensori, lo strumento ADCP è inoltre in grado di misurare l'altezza delle onde e la temperatura del mare alla profondità in cui è posizionato (-12 m).



Figura 66 - A sinistra il sensore ADCP (in nero) all'interno della boa di spinta con il suo pacco batterie (blu); a destra lo schema di installazione dello strumento sul fondale marino.

Lo strumento acquisisce le componenti orizzontali della velocità e i parametri del moto ondoso, nonché la temperatura dell'acqua, alla profondità di 12 m registrando i dati in una scheda di memoria interna al dispositivo. Al fine di controllare la carica delle batterie e di scaricare periodicamente i dati acquisiti dallo strumento sono state svolte 5 survey i cui periodi sono riportati nella tabella 3.

Tabella 3 - Intervalli di tempo in cui ha acquisito lo strumento.

Nome survey	Inizio	Fine
ADCP1	02/08/2022	12/09/2022
ADCP2	07/02/2023	13/03/2023
ADCP3	16/03/2023	18/04/2023
ADCP4	19/04/2023	20/05/2023
ADCP5	21/05/2023	17/07/2023

Prima di ogni survey lo strumento è stato configurato in modo tale da acquisire le correnti marine e il moto ondoso ad intervalli orari e da avere dati di velocità ogni 0.5 m lungo la colonna d'acqua. Il sensore ADCP ha acquisito per un totale di 196 giorni.

Di seguito vengono riportati i dati delle correnti marine (superficie e 6 m di profondità), del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media) e della temperatura relativi ad ogni intervallo di campionamento.

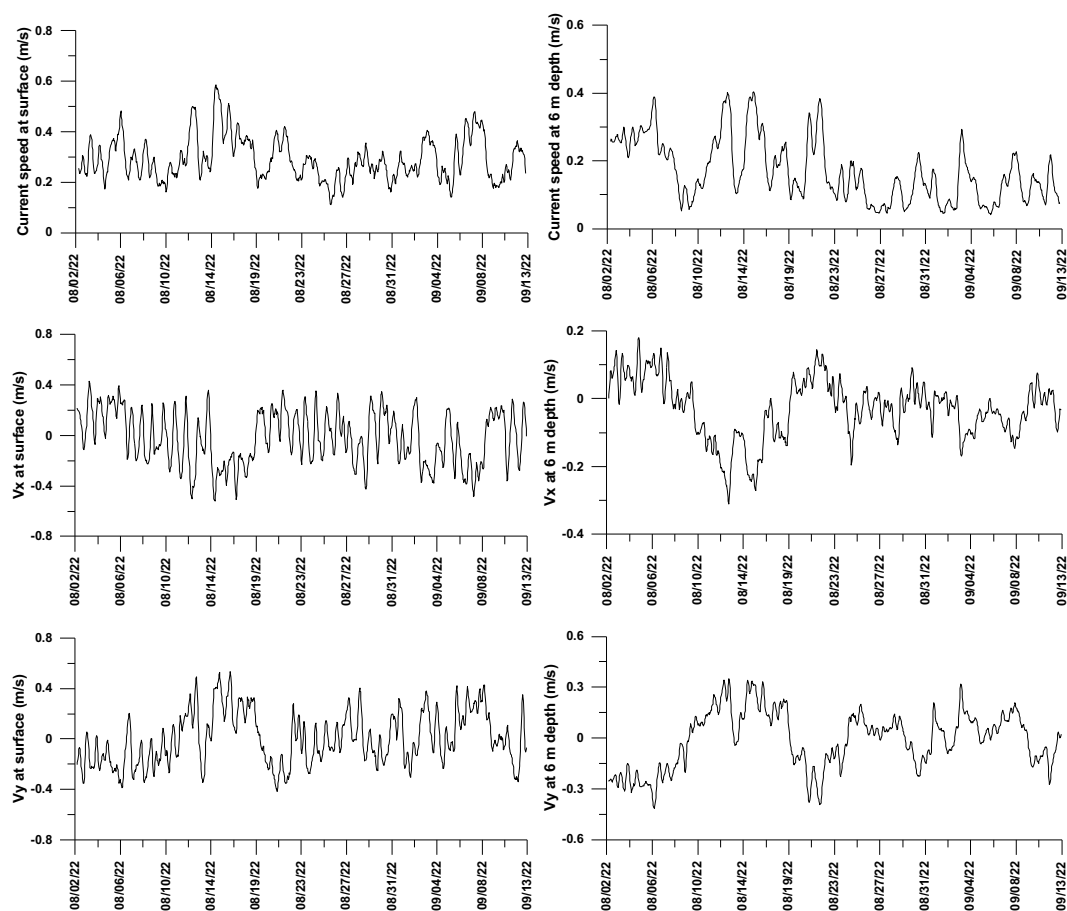


Figura 67 - Corrente marina superficiale (a sinistra) e a 6 m di profondità (a destra) relativa al periodo ADCP1.

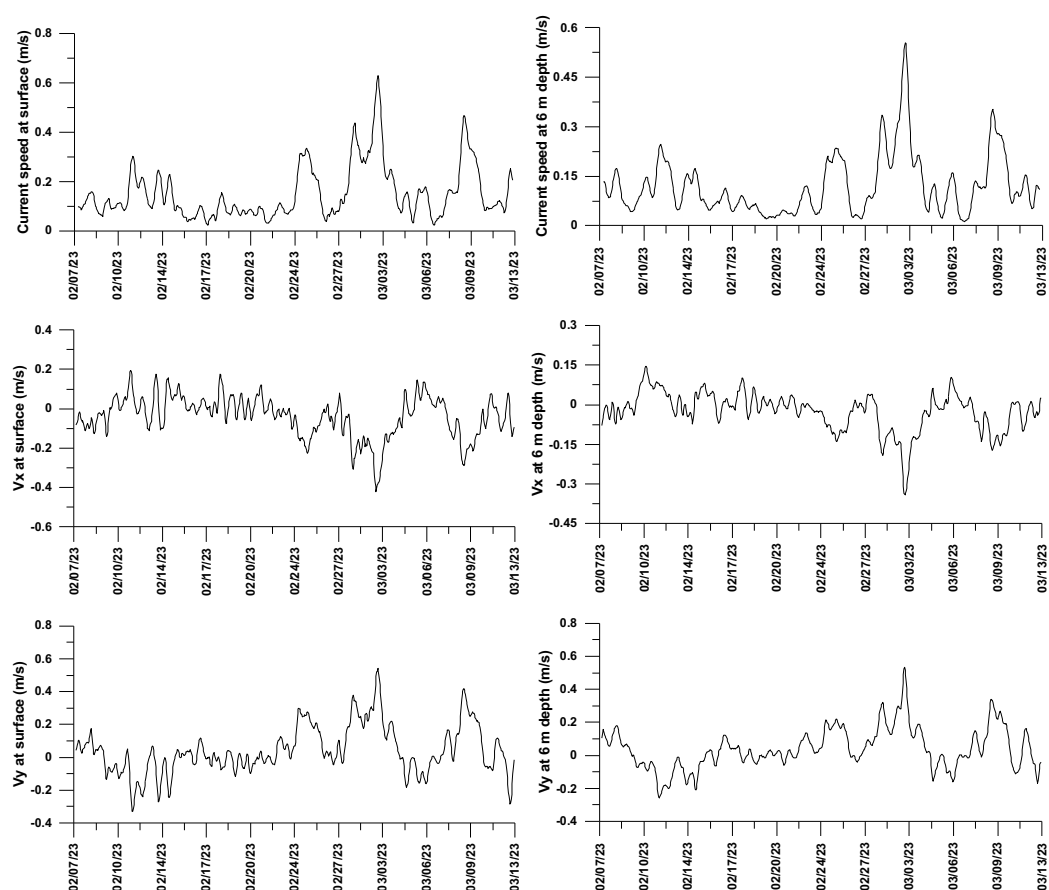


Figura 68 - Corrente marina superficiale (a sinistra) e a 6 m di profondità (a destra) relativa al periodo ADCP2.

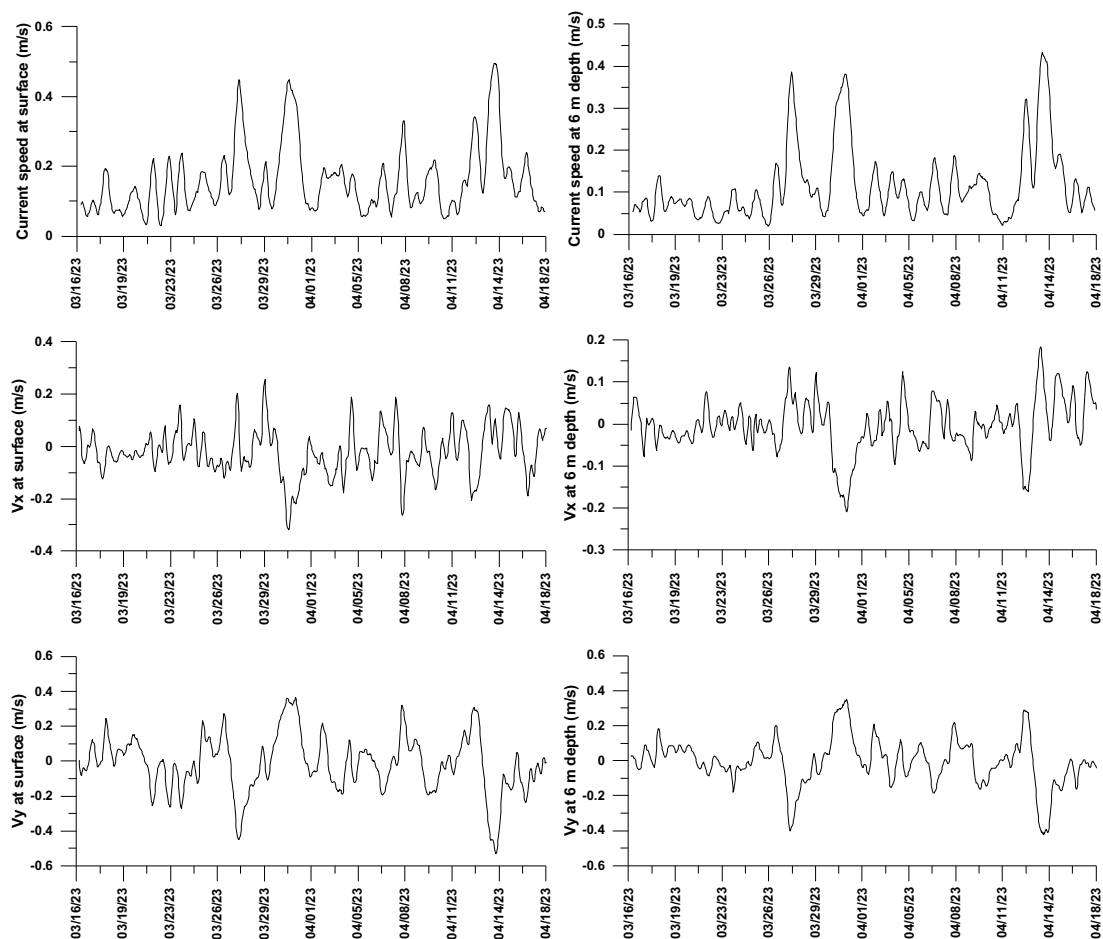


Figura 69 - Corrente marina superficiale (a sinistra) e a 6 m di profondità (a destra) relativa al periodo ADCP3.

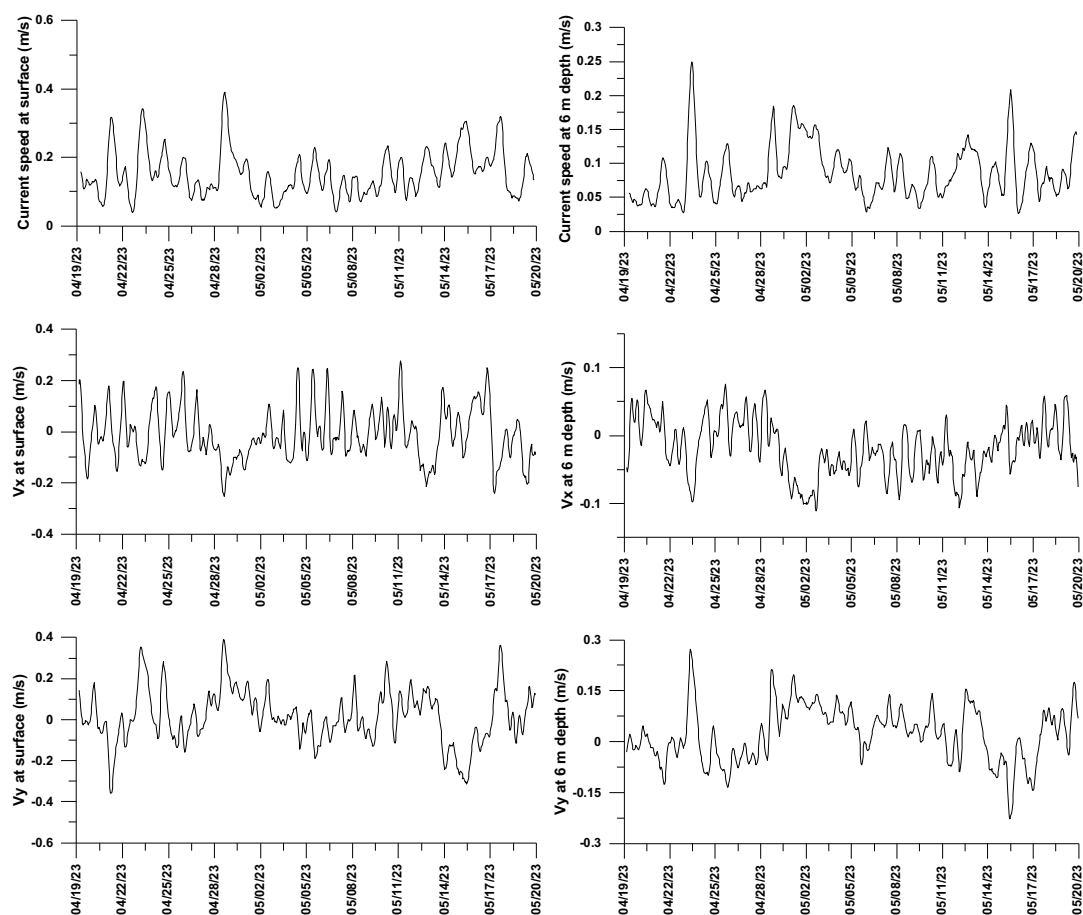


Figura 70 - Corrente marina superficiale (a sinistra) e a 6 m di profondità (a destra) relativa al periodo ADCP4.

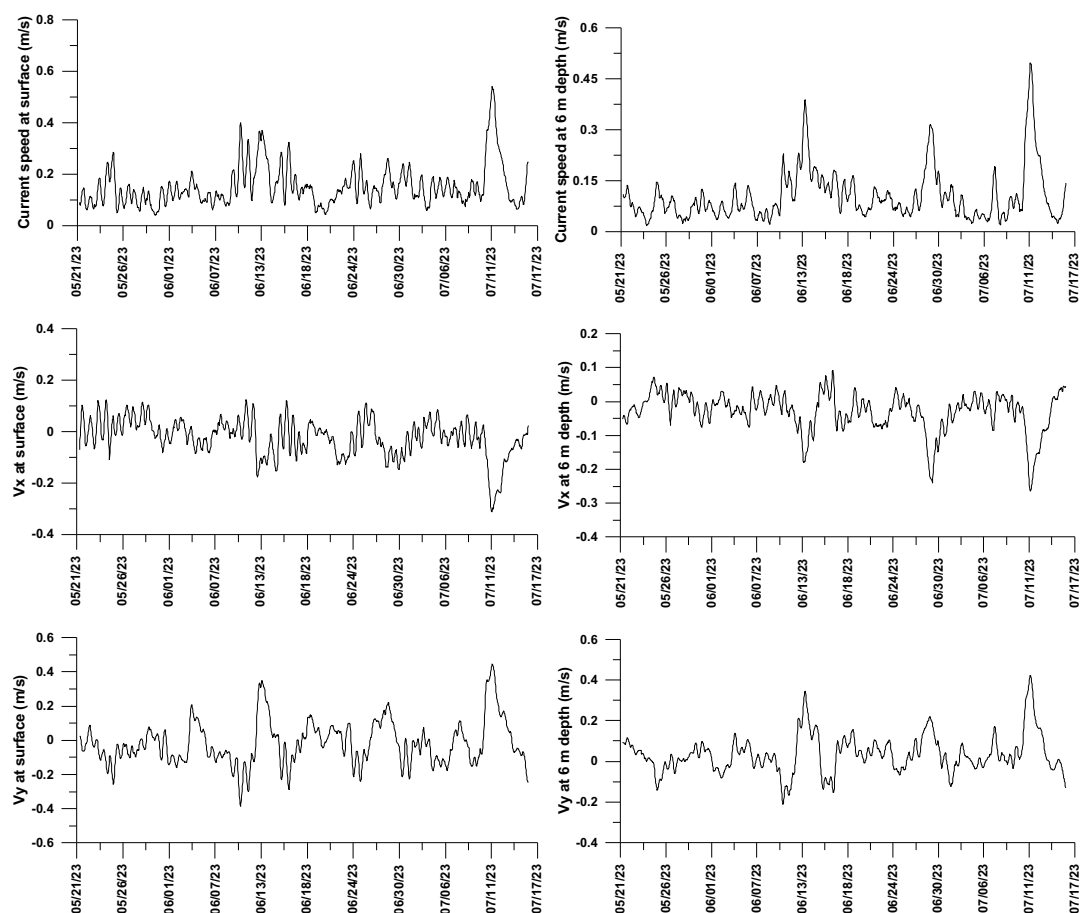


Figura 71 - Corrente marina superficiale (a sinistra) e a 6 m di profondità (a destra) relativa al periodo ADCP5.

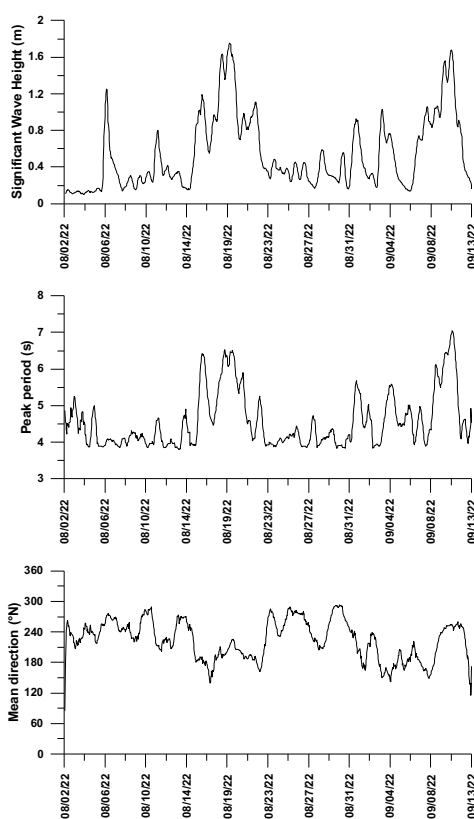


Figura 72 - Principali parametri del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media) relativa al periodo ADCP1.

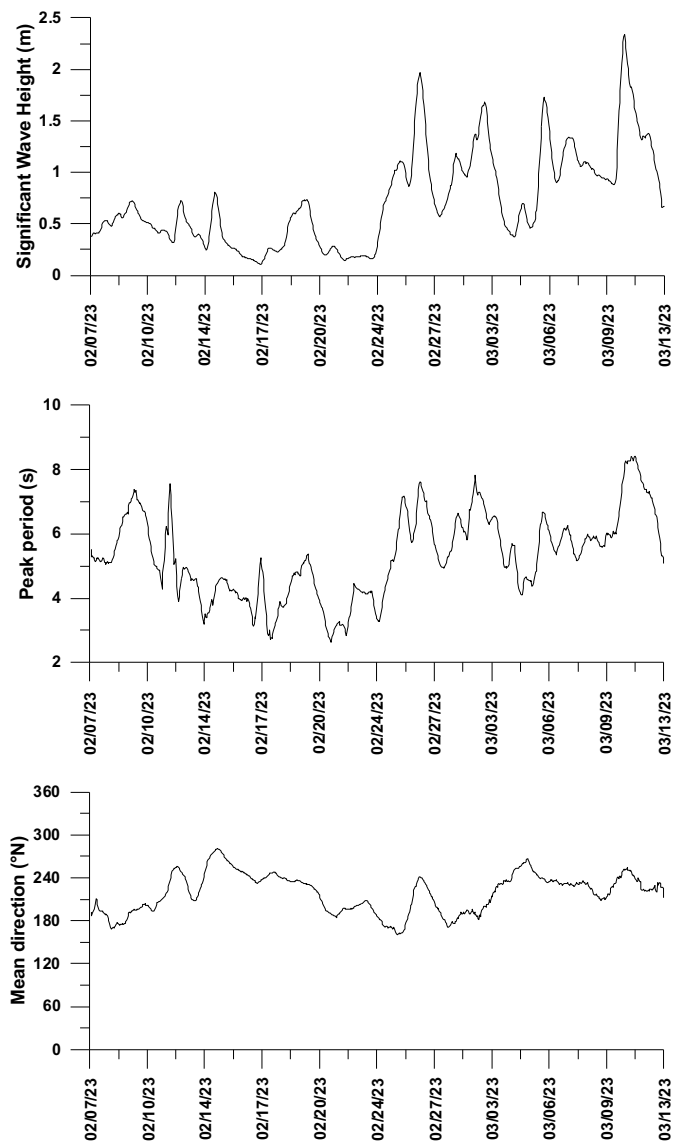


Figura 73 - Principali parametri del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media) relativa al periodo ADCP2.

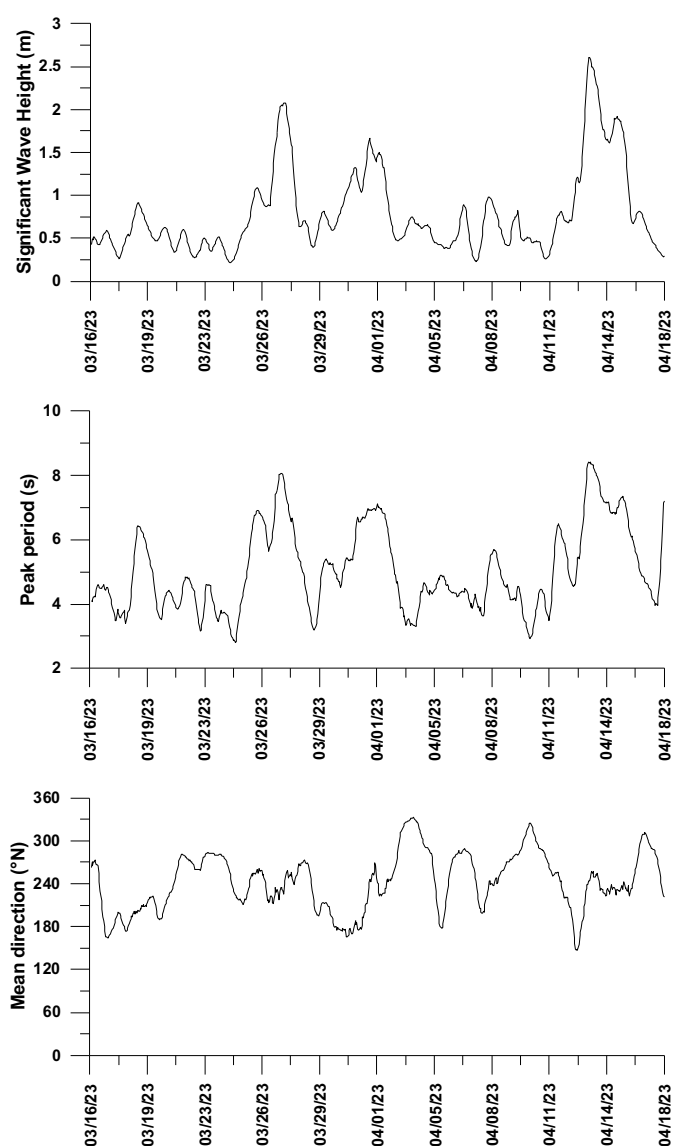


Figura 74 - Principali parametri del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media) relativa al periodo ADCP3.

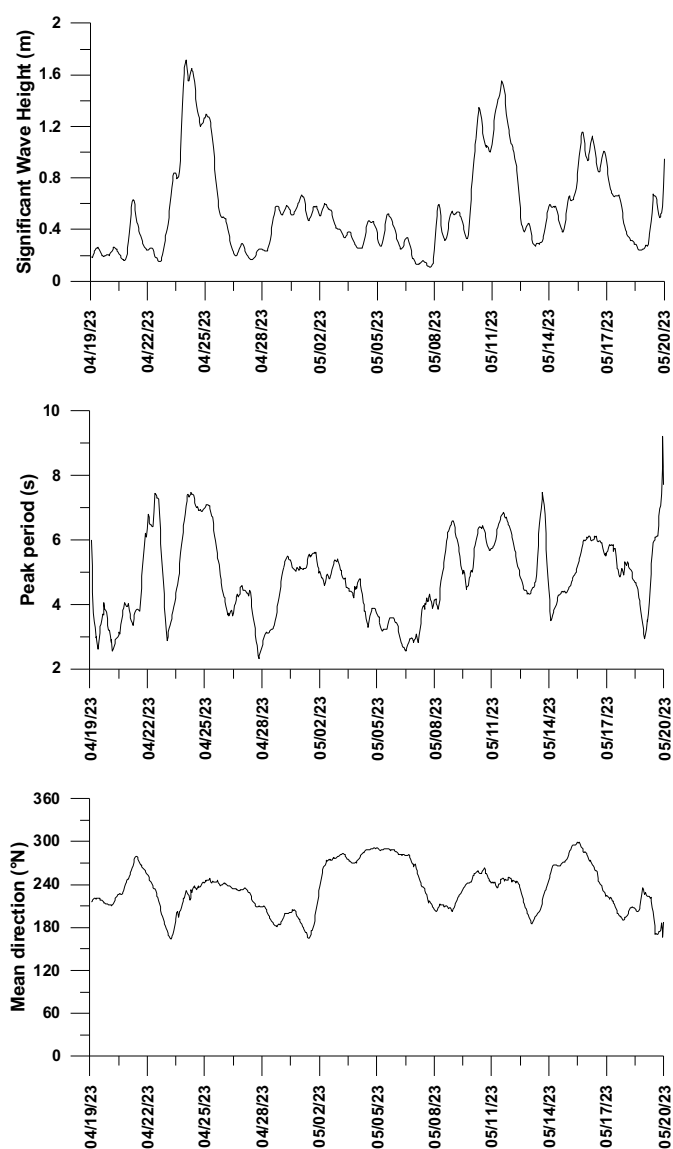


Figura 75 - Principali parametri del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media) relativa al periodo ADCP4.

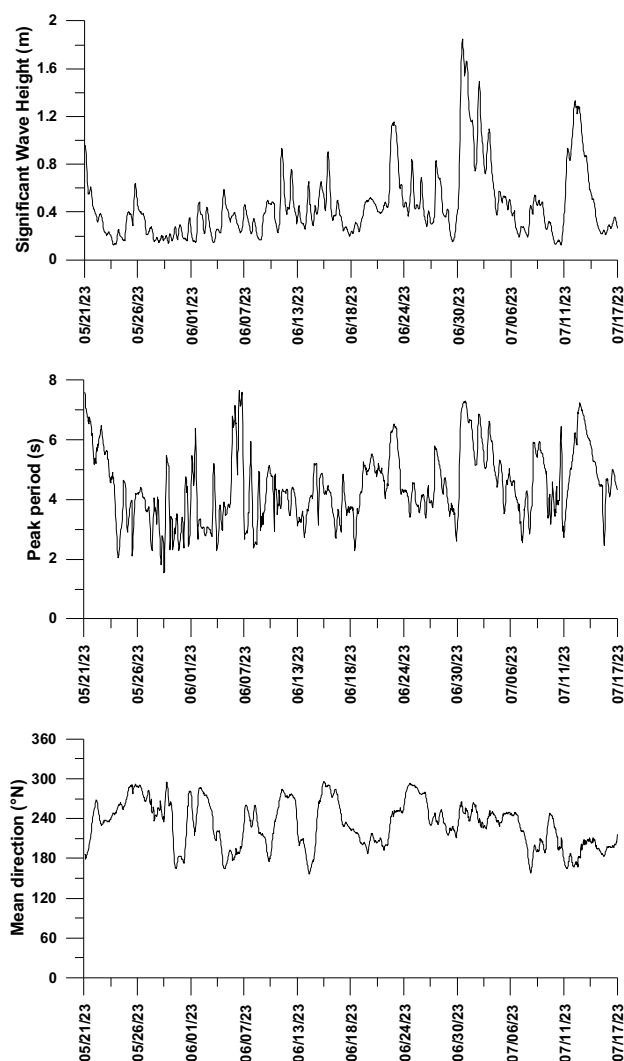


Figura 76 - Principali parametri del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media) relativa al periodo ADCP5.

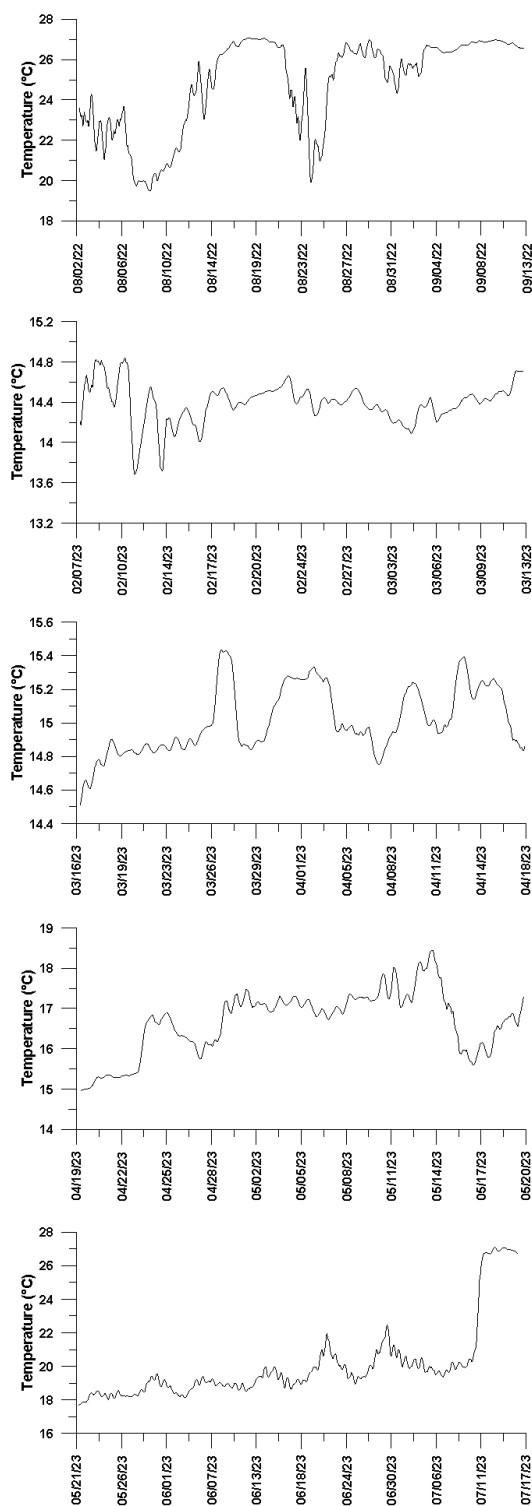


Figura 77 - Variazione di temperatura alla profondità di 12 durante i cinque periodi di installazione del ADCP.

5.1.4 Misure di correnti con boe lagrangiane

Al fine di analizzare la corrente marina superficiale nella zona del delta del Tevere sono state lanciate quattro boe lagrangiane nella zona costiera sia in prossimità della foce di Fiumara Grande, sia in quella di Fiumara Piccola. I drifter in questione sono della famiglia Nomad e consistono in robuste boe galleggianti che incorporano le più recenti tecnologie di posizionamento e di comunicazione. Trovano utilizzo in moltissimi campi di ricerca scientifica e per il supporto soccorso in mare di persone, navi, aerei, ecc, per il monitoraggio della deriva degli sversamenti in mare di oli, e nel campo della pesca. I Nomad costieri sono più indicati per l'uso in prossimità della linea di riva in quanto hanno tempi di impiego medio-corti. Ogni drifter dispone di diversi sistemi di tracciamento (GSM, GPS, GLONASS e GALILEO) e sono facilmente gestibili da remoto attraverso i servizi on-line gratuiti (GSM, GPS, GLONASS e GALILEO) che permettono il monitoraggio degli spostamenti e lo scarico dei dati. In questa fase del progetto sono stati effettuati lanci a marzo e luglio 2021, e maggio 2022 in condizioni di mare calmo che ne ha permesso il lancio e il recupero dopo circa 8 ore (figura 78).

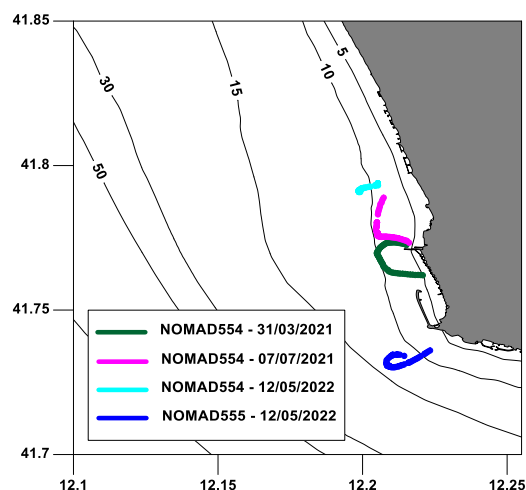


Figura 78 - Traiettorie delle quattro boe lagrangiane lanciate a marzo, maggio e settembre.



Come si può vedere dalla figura 7, le due boe lanciate in prossimità della foce di Fiumara Piccola si dirigono in direzioni opposte. Il drifter lanciato il 7 luglio 2021 viene trasportato verso nord (linea magenta) mentre quello messo in mare il 31 marzo 2021 (linea verde) si dirige nella parte sud. Entrambi inizialmente procedono verso il largo spinti dalla plume fluviale prima di cambiare direzione a causa dell'azione delle correnti superficiali che risentono dello stress del vento sull'interfaccia aria-mare. Il drifter rilasciato in prossimità della foce di Fiumara Grande (linea blu) viene prima portato verso il largo e successivamente spinto verso costa dalle correnti mareali. La traiettoria della boa lagrangiana della parte a nord dell'area di studio (linea celeste) risulta essere molto breve in quanto è stata recuperata dopo poche ore a causa di un problema tecnico.

5.2. Campagne di misura colonna d'acqua

Ad integrazione di quanto previsto per la Fase 0, sono state effettuate una serie di campagne di misura (figura 79) in diversi periodi al fine di avere una eterogenea caratterizzazione della colonna d'acqua, sia in condizione di stratificazione che di mescolamento, lungo 13 transetti costa largo sino alla batimetrica di 200 m distribuiti lungo tutta l'unità fisiografica, per un totale di 321 profili. Le campagne di misura sono state svolte a bordo dell'imbarcazione ORCA della ditta MTM e a bordo del battello oceanografico LIGHEA dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA).

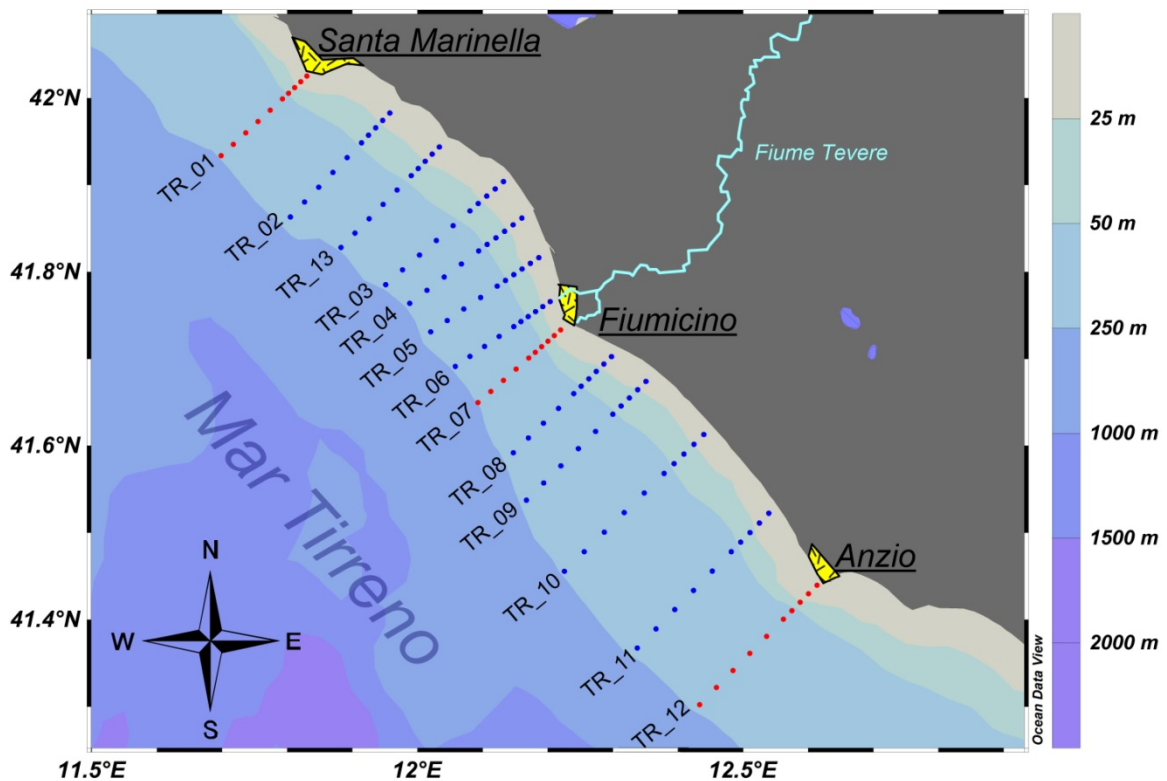


Figura 79 - Piano di campionamento per la caratterizzazione della colonna d'acqua. In rosso i 3 transetti effettuati durante la Fase 0; in blu i transetti effettuati durante la Fase 1.

In corrispondenza di ciascun transetto sono stati acquisiti lungo la colonna d'acqua, mediante l'uso di sonde multiparametriche, dati di pressione, temperatura, conducibilità (salinità, densità), ossigeno disciolto, clorofilla a e solido sospeso.

Relativamente ai parametri clorofilla a, solido sospeso e sostanza organica disciolta cromoforica CDOM (Chromophoric Dissolved Organic Matter) sono stati raccolti un totale di n.175 campioni (clorofilla a n.80 campioni rispetto ai n.30 previsti; solido sospeso n.65 campioni rispetto ai 30 previsti; CDOM n.30 campioni).

5.2.1 Operazioni in mare

In corrispondenza di ciascuna stazione sono stati effettuati profili di temperatura, conducibilità (salinità, densità), ossigeno disciolto, clorofilla a e solido sospeso lungo la colonna d'acqua con sonde multiparametriche SBE9-11 e Idronaut 316.

Parallelamente all'acquisizione dei dati lungo la colonna d'acqua, sono stati prelevati campioni di acqua di mare per l'analisi della clorofilla a, del solido sospeso e della CDOM: i campioni sono stati raccolti attraverso l'uso di una bottiglia Niskin, in accordo con le procedure riportate nei metodi ISO, i Manuali e Linee Guida APAT/CNR IRSA n. 29/2003 e successivi aggiornamenti, i Manuali e Linee Guida ISPRA 56/2010 Metodologie di studio del Plancton marino, i Quaderni IRSA e in 'Metodologie Analitiche di Riferimento-Programma di Monitoraggio per il controllo dell'Ambiente marino costiero/Triennio 2001.2003', MATTM, ICRAM, Roma 2001 e successivi aggiornamenti.

Modalità di campionamento

I campioni d'acqua prelevati per l'analisi della clorofilla a e della CDOM sono stati travasati dalla bottiglia di campionamento in una bottiglia di plastica scura da 5l, interponendo il retino da plancton con maglia da 250 µm, in modo da trattenere lo zooplancton e le macroalghe eventualmente presenti. Il campione d'acqua per l'analisi del solido sospeso è stato, invece, travasato in bottiglie di plastica da 2l.

Conservazione dei campioni

Una volta prelevati, i campioni di acqua di mare sono stati posti al fresco, lontano dai raggi solari, fino al momento della filtrazione.

In particolare, i campioni per l'analisi della clorofilla a sono stati filtrati a bordo dell'imbarcazione immediatamente dopo il prelievo. Per ciascun campione è stato filtrato un volume noto (da 1 a 3l) con filtri in fibra di vetro Whatman GF/F 25 mm. I filtri sono stati conservati in provette da 10 ml, immersi in 5 ml di Acetone 100% disidratato e mantenuti al buio ad una temperatura di -20°C fino al momento delle analisi di



laboratorio. I campioni per l'analisi della CDOM sono stati ottenuti recuperando dei subcampioni di 200ml di acqua filtrata di ciascun campione in bottiglie in vetro borosilicato. I campioni sono stati mantenuti al buio ad una temperatura di 4 °C fino al momento della successiva analisi di laboratorio.

5.2.2 Operazioni in laboratorio

Di seguito si riportano le attività di laboratorio ed i metodi di riferimento adottati per l'analisi dei parametri sopra indicati.

Clorofilla a

Una volta in laboratorio, i filtri, conservati a -20°C, sono stati triturati con un pestello in vetro. Il volume dell'estratto acetone è stato portato a 10 ml attraverso l'aggiunta di Acetone 80%, in modo tale da ottenere un estratto finale di Acetone 90%. I campioni sono stati, quindi, riposti ad una temperatura di 4°C per 24h per completare l'estrazione. Al termine dell'estrazione, ciascuna provetta è stata centrifugata per 15 minuti a 4000 giri/min, in modo da separare il filtro dalla soluzione. Si è, pertanto, proceduto alla lettura spettrofotometrica del sopranatante secondo le metodiche ISO (10260:1992) e ISPRA (Lazzara et al., 2010).

Calcoli

La stima dei pigmenti fotosintetici è stata effettuata applicando le seguenti formule:

- metodo della stima della clorofilla a (con feopigmenti) (Jeffrey & Humphrey, 1975);
- metodo per la stima delle clorofille a,b e c (Lorenzen & Jeffrey, 1980);
- metodo per la stima separata della clorofilla a e dei feopigmenti (Lorenzen, 1967).

Torbidità

I campioni prelevati in situ sono stati filtrati (Volumi noti da 1 a 3l) utilizzando filtri con pori di diametro medio di 0,45 µm, pre-essiccati per 1 ora in stufa ad una temperatura di 105°C e pesati al decimo di milligrammo dopo averli lasciati raffreddare in essiccatore



per 30 minuti. Al termine della filtrazione i filtri sono stati risciacquati con acqua distillata ultrapura. Ultimata la filtrazione, i filtri sono stati a loro volta essiccati ad una temperatura di 105 °C per un'ora e pesati secondo i metodi riportati in Strickland&Parson (1972) e APAT IRSA (2003).

Calcoli

Il contenuto di solidi totali disciolti è dato da:

$$\text{Solidi Sospesi} \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{(M1 - M0) * 1000}{V}$$

dove:

M1 = peso (mg) del filtro e del residuo dopo essiccamento;

M0 = peso (mg) del filtro;

V = volume (ml) di campione sottoposto a filtrazione.

Sostanza organica disciolta cromoforica (CDOM)

Al momento dell'analisi, una quota di ciascun campione è stata ulteriormente rifiltrata su membrane in policarbonato Nuclepore (porosità 0.22 µm) ed analizzata allo spettrofotometro (SHIMADZU UVmini1240) in cuvette di quarzo con cammino ottico di 10 cm secondo le metodologie riportate in Wurl (2009) "Practical guidelines for the analysis of seawater" e nel protocollo NASA "Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation" Volume (IV), Mueller et al. (2003).

Gli spettri ottenuti dalle letture spettrofotometriche sono stati corretti per l'assorbimento residuo della radiazione rossa sottraendo la densità ottica a 700 nm da quella di ciascuna lunghezza d'onda, essendo l'assorbimento della sostanza organica trascurabile nel rosso. Infine, gli spettri sono stati convertiti in assorbimento ed interpolati nel range 250-700 nm secondo l'equazione:

$$a_{\lambda} = a_{\lambda 0} * e^{-S(\lambda - \lambda 0)}$$



dove a_λ è il coefficiente di assorbimento alla lunghezza d'onda λ , a_{λ_0} è la lunghezza d'onda di riferimento ed S la costante di decadimento esponenziale, i cui valori forniscono informazioni sull'origine del pool di CDOM analizzato (Bricaud et al., 2004; Helms et al., 2008). Il valore di assorbimento a 400 nm è stato utilizzato come stima della concentrazione CDOM di ogni campione.

5.2.3 Risultati dell'analisi della concentrazione di clorofilla a, dei solidi sospesi e della CDOM

Le attività di campionamento svolte finora hanno permesso di raccogliere un totale di 175 campioni di cui n.80 per l'analisi della clorofilla a e n.65 per l'analisi del solido sospeso, al fine di ottenere un set di dati utile per la calibrazione della strumentazione oceanografica, la validazione dei modelli matematici ed il confronto con i dati satellitari. Per quanto attiene alla sostanza organica disciolta cromoforica CDOM (Chromophoric Dissolved Organic Matter) sono stati raccolti un totale di 30 campioni.

Di seguito si riportano i risultati delle analisi di clorofilla a e solido sospeso effettuate sui campioni di acqua di mare raccolti nel corso delle campagne di misura effettuate durante la Fase 1 in corrispondenza delle stazioni riportate nelle tabelle 4 e 5:

Tabella 4 - Concentrazione della clorofilla a di n. 80 campioni di acqua di mare prelevati durante le campagne di misura effettuate in Fase 1.

Transetto	Stazione	Codice Stazione	Data	Profondità (m)	Clorofilla a (µg/l)
TR04	05	10405	27/08/2020	3	0.192
TR06	03	10603	21/08/2020	2	0.832
TR06	05	10605	21/08/2020	2	1.125
TR06	07	10607	21/08/2020	2	0.241
TR06	11	10611	21/08/2020	10	0.072
TR06	06	10606.3	11/11/2020	2	1.469
TR06	06	10606.3	11/11/2020	8	0.573
TR06	07	10607.3	11/11/2020	5	0.722
TR06	08	10608.3	11/11/2020	5	0.613
TR06	08	10608.3	11/11/2020	10	0.472
TR06	08	10608.3	11/11/2020	20	0.288
TR06	08	10608.3	11/11/2020	30	0.243
TR06	08	10608.3	11/11/2020	50	0.155
TR06	09	10609.3	11/11/2020	5	0.773
TR06	09	10609.3	11/11/2020	8	0.800
TR06	10	10610.3	11/11/2020	5	0.906
TR06	10	10610.3	11/11/2020	10	0.443
TR06	10	10610.3	11/11/2020	20	0.408
TR06	10	10610.3	11/11/2020	30	0.872
TR06	10	10610.3	11/11/2020	40	0.272
TR09	05	10905	09/09/2020	6	0.229
TR09	08	10908	09/09/2020	12	0.117
TR10	01	11001	09/09/2020	3	0.443
TR10	03	11003	09/09/2020	5	0.336
TR10	05	11005	09/09/2020	8	0.192
TR10	09	11009	09/09/2020	30	0.203
TR11	05	11105	03/09/2020	8	0.115
TR11	10	11110	03/09/2020	50	0.139
TR06	04	20604	18/02/2021	2	2.031
TR06	04	20604	18/02/2021	5	1.887
TR06	04	20604	18/02/2021	10	1.189
TR06	05	20605	18/02/2021	2	1.482
TR06	05	20605	18/02/2021	10	1.024
TR06	05	20605	18/02/2021	15	0.640
TR06	06	20606	18/02/2021	5	1.439
TR06	06	20606	18/02/2021	10	1.034
TR06	06	20606	18/02/2021	18	0.626
TR06	07	20607	18/02/2021	5	1.253
TR06	07	20607	18/02/2021	20	0.632
TR06	07	20607	18/02/2021	30	0.481
TR06	08	20608	18/02/2021	10	0.778
TR06	08	20608	18/02/2021	30	0.427

TR06	08	20608	18/02/2021	50	0.480
TR06	76	30676	28/06/2021	70.5	0.538
TR06	77	30677	28/06/2021	58	0.173
TR07	88	30788	28/06/2021	55	0.171
TR07	88	30788	28/06/2021	80.5	0.676
TR07	90	30790	28/06/2021	29	0.072
TR07	90	30790	28/06/2021	72	0.490
TR14	13	41413	23/09/2021	15	0.373
TR14	15	41415	23/09/2021	15	0.179
TR14	15	41415	23/09/2021	27.7	0.219
TR14	17	41417	23/09/2021	30	0.112
TR14	17	41417	23/09/2021	62	0.525
TR14	19	41419	23/09/2021	20	0.171
TR14	19	41419	23/09/2021	70	0.573
TR05	31	52231	13/05/2022	2	0.328
TR05	33	52233	13/05/2022	1.8	0.384
TR05	33	52233	13/05/2022	18	0.141
TR05	34	52234	13/05/2022	2	0.347
TR05	40	52240	13/05/2022	50.4	0.24
TR05	40	52240	13/05/2022	70	0.493
TR05	40	52240	13/05/2022	194.6	0.144
TR06	23	52123	14/05/2022	2	0.888
TR06	23	52123	14/05/2022	15	0.272
TR06	26	52126	14/05/2022	3.8	0.517
TR06	26	52126	14/05/2022	62.9	0.304
TR06	29	52129	14/05/2022	2	0.053
TR06	29	52129	14/05/2022	90.3	0.331
TR06	29	52129	14/05/2022	198	0.032
TR07	16	52016	12/05/2022	2	0.275
TR07	16	52016	12/05/2022	45	0.248
TR07	16	52016	12/05/2022	67	0.397
TR07	20	52020	12/05/2022	58	0.371
TR07	20	52020	12/05/2022	75	0.312
TR09	4	51904	14/05/2022	2	0.645
TR09	7	51907	14/05/2022	49	0.155
TR09	11	51911	14/05/2022	54.8	0.328
TR09	11	51911	14/05/2022	213	0.035

Tabella 5 - Concentrazione dei solidi sospesi di n. 65 campioni di acqua di mare prelevati durante le campagne di misura effettuate in Fase 1

Transetto	Stazione	Codice Stazione	Data	Profondità (m)	Clorofilla a (µg/l)
TR06	06	10606.3	11/11/2020	2	1.8
TR06	06	10606.3	11/11/2020	8	1.2
TR06	07	10607.3	11/11/2020	5	1.3
TR06	08	10608.3	11/11/2020	5	1.3
TR06	08	10608.3	11/11/2020	10	1.9
TR06	08	10608.3	11/11/2020	20	1.3
TR06	08	10608.3	11/11/2020	30	1.25
TR06	08	10608.3	11/11/2020	50	1.2
TR06	09	10609.3	11/11/2020	5	1.55
TR06	09	10609.3	11/11/2020	8	1.25
TR06	10	10610.3	11/11/2020	5	1.85
TR06	10	10610.3	11/11/2020	10	1.15
TR06	10	10610.3	11/11/2020	20	1.6
TR06	10	10610.3	11/11/2020	30	1.05
TR06	10	10610.3	11/11/2020	40	1.2
TR06	04	20604	18/02/2021	2	2.96
TR06	04	20604	18/02/2021	5	1.57
TR06	04	20604	18/02/2021	10	2.82
TR06	05	20605	18/02/2021	2	2.88
TR06	05	20605	18/02/2021	10	1.20
TR06	05	20605	18/02/2021	15	1.37
TR06	06	20606	18/02/2021	5	1.32
TR06	06	20606	18/02/2021	10	1.42
TR06	06	20606	18/02/2021	18	1.09
TR06	07	20607	18/02/2021	5	1.49
TR06	07	20607	18/02/2021	20	1.32
TR06	07	20607	18/02/2021	30	0.96
TR06	08	20608	18/02/2021	10	1.21
TR06	08	20608	18/02/2021	30	1.56
TR06	08	20608	18/02/2021	50	1.04
TR06	76	30676	28/06/2021	70.5	1.18
TR06	77	30677	28/06/2021	58	2.30
TR07	88	30788	28/06/2021	55	1.10
TR07	88	30788	28/06/2021	80.5	4.08
TR07	90	30790	28/06/2021	29	0.52
TR07	90	30790	28/06/2021	72	1.10
TR14	13	41413	23/09/2021	15	0.65
TR14	15	41415	23/09/2021	15	0.65
TR14	15	41415	23/09/2021	27.7	0.48
TR14	17	41417	23/09/2021	30	0.68
TR14	17	41417	23/09/2021	62	0.70
TR14	19	41419	23/09/2021	20	0.68

TR14	19	41419	23/09/2021	70	0.70
TR09	05	51905	14/05/2022	2	0.58
TR09	05	51905	14/05/2022	48	0.86
TR09	07	51907	14/05/2022	2	0.49
TR09	07	51907	14/05/2022	49	0.41
TR09	11	51911	14/05/2022	213	0.58
TR07	16	52016	12/05/2022	2	0.78
TR07	16	52016	12/05/2022	45	0.73
TR07	16	52016	12/05/2022	67	1.81
TR06	23	52123	14/05/2022	2	0.78
TR06	23	52123	14/05/2022	15	0.88
TR06	26	52126	14/05/2022	3.8	0.80
TR06	26	52126	14/05/2022	62.9	0.58
TR06	26	52126	14/05/2022	90	1.01
TR06	29	52129	14/05/2022	2	0.51
TR06	29	52129	14/05/2022	90.3	0.25
TR06	29	52129	14/05/2022	198	0.44
TR05	31	52231	13/05/2022	2	0.48
TR05	31	52231	13/05/2022	12	1.19
TR05	38	52238	13/05/2022	18	0.49
TR05	38	52238	13/05/2022	2	0.38
TR05	40	52240	13/05/2022	2	1.00
TR05	40	52240	13/05/2022	194.6	0.41



Relativamente all'analisi della sostanza organica disciolta cromoforica CDOM nella tabella 6 si riportano i valori del coefficiente di assorbimento a 400 nm a_{400} dei campioni raccolti durante le campagne di misura effettuate.

Tabella 6 - Assorbimento CDOM a 400 nm di n. 30 campioni di acqua di mare prelevati durante le campagne di misura effettuate in Fase 1.

Transetto	Stazione	Codice Stazione	Data	Profondità (m)	a_{400} CDOM (m^{-1})
TR04	05	10405	27/08/2020	3	0.118861
TR06	03	10603	21/08/2020	2	0.054547
TR06	05	10605	21/08/2020	2	0.343147
TR06	07	10607	21/08/2020	2	0.057505
TR06	11	10611	21/08/2020	2	0.033141
TR06	06	10606.3	11/11/2020	2	0.617204
TR06	06	10606.3	11/11/2020	5	0.444479
TR06	09	10609.3	11/11/2020	5	0.202664
TR06	10	10610.3	11/11/2020	5	0.345450
TR08	05	10805	21/08/2020	2	0.142390
TR09	05	10905	09/09/2020	6	0.148590
TR09	08	10908	09/09/2020	12	0.023911
TR10	03	11003	09/09/2020	5	0.164296
TR10	05	11005	09/09/2020	8	0.071393
TR10	09	11009	09/09/2020	30	0.150220
TR06	04	20604	18/02/2021	2	0.676305
TR06	04	20604	18/02/2021	5	0.476721
TR06	04	20604	18/02/2021	10	0.163513
TR06	05	20605	18/02/2021	2	0.579509
TR06	05	20605	18/02/2021	10	0.240821
TR06	05	20605	18/02/2021	15	0.061025
TR06	07	20607	18/02/2021	5	0.405328
TR06	08	20608	18/02/2021	10	0.156604
TR06	08	20608	18/02/2021	50	0.036305
TR07	03	20703	19/01/2021	2	0.133825
TR07	05	20705	19/01/2021	3	0.016235
TR07	04	20704.2	17/02/2021	2	0.907382
TR07	04	20704.2	17/02/2021	5	0.303194
TR07	04	20704.2	17/02/2021	10	0.113899
TR07	05	20705.2	17/02/2021	2	0.803747

5.2.4 Risultati elaborazione dei dati oceanografici nella colonna d'acqua

Di seguito si riportano le mappe nautiche con le stazioni monitorate nel corso delle campagne di misura in corrispondenza dei transetti riportati in figura 80. Con lo scopo di ottenere un dataset ottimizzato per lo studio nel tempo delle variabili monitorate nell'area di studio, ciascuna stazione è identificata con un codice numerico nel quale la prima cifra corrisponde al numero della campagna di misura, la seconda e la terza cifra corrispondono al transetto analizzato, le successive alla stazione monitorata.

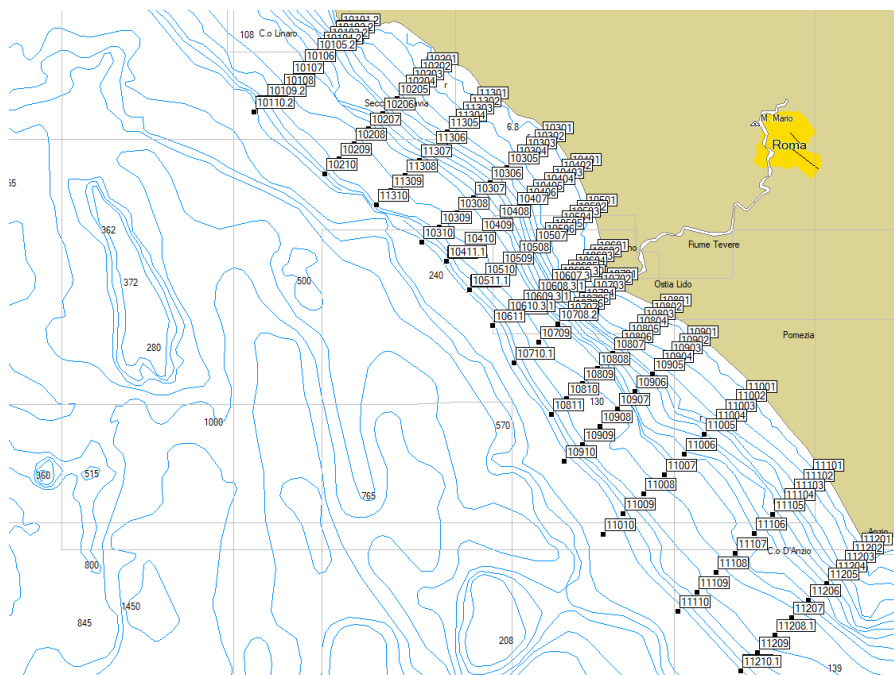


Figura 80 - Mappa delle stazioni monitorate durante la Campagna di misura 1.

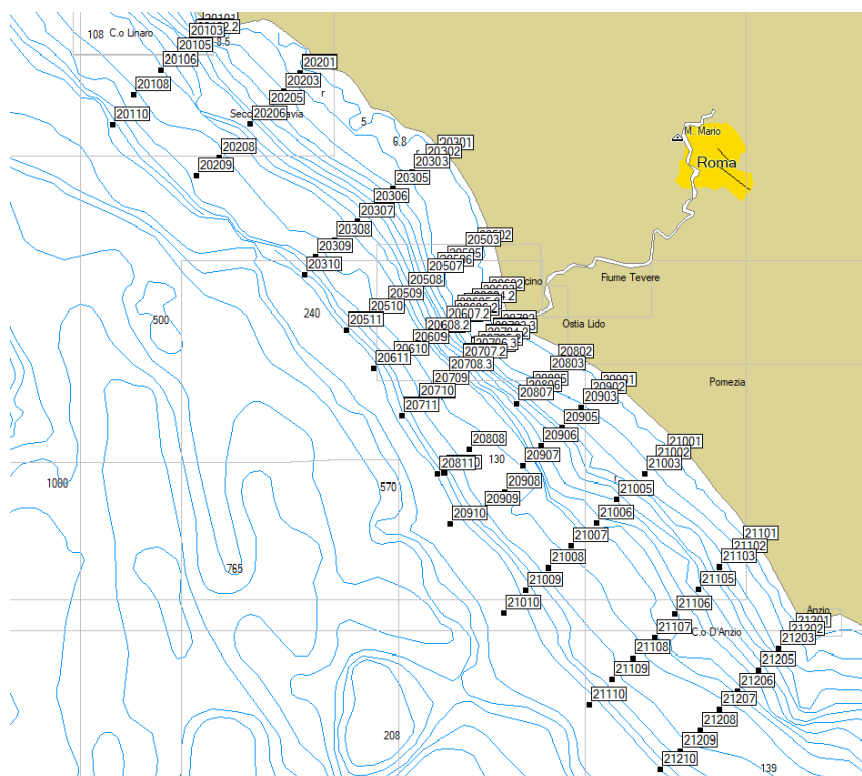


Figura 81 - Mappa delle stazioni monitorate durante la Campagna di misura 2.

The map shows the coastal area of Rome, Italy, with the Tevere river (Fiume Tevere) flowing into the sea. The coastline is marked with various sampling points, each labeled with a number and a letter (e.g., 52240, 52239, 52238, 52237, 52236, 52235, 52234, 52233, 52232, 52231, 52230, 52229, 52228, 52227, 52226, 52225, 52224, 52223, 52222, 52221, 52220, 52219, 52218, 52217, 52216, 52215, 52214, 52213, 52212, 52211, 52210, 52209, 52208, 52207, 52206, 52205, 52204, 52203, 52202, 52201, 52200, 52199, 52198, 52197, 52196, 52195, 52194, 52193, 52192, 52191, 52190, 52189, 52188, 52187, 52186, 52185, 52184, 52183, 52182, 52181, 52180, 52179, 52178, 52177, 52176, 52175, 52174, 52173, 52172, 52171, 52170, 52169, 52168, 52167, 52166, 52165, 52164, 52163, 52162, 52161, 52160, 52159, 52158, 52157, 52156, 52155, 52154, 52153, 52152, 52151, 52150, 52149, 52148, 52147, 52146, 52145, 52144, 52143, 52142, 52141, 52140, 52139, 52138, 52137, 52136, 52135, 52134, 52133, 52132, 52131, 52130, 52129, 52128, 52127, 52126, 52125, 52124, 52123, 52122, 52121, 52120, 52119, 52118, 52117, 52116, 52115, 52114, 52113, 52112, 52111, 52110, 52109, 52108, 52107, 52106, 52105, 52104, 52103, 52102, 52101, 52100, 52099, 52098, 52097, 52096, 52095, 52094, 52093, 52092, 52091, 52090, 52089, 52088, 52087, 52086, 52085, 52084, 52083, 52082, 52081, 52080, 52079, 52078, 52077, 52076, 52075, 52074, 52073, 52072, 52071, 52070, 52069, 52068, 52067, 52066, 52065, 52064, 52063, 52062, 52061, 52060, 52059, 52058, 52057, 52056, 52055, 52054, 52053, 52052, 52051, 52050, 52049, 52048, 52047, 52046, 52045, 52044, 52043, 52042, 52041, 52040, 52039, 52038, 52037, 52036, 52035, 52034, 52033, 52032, 52031, 52030, 52029, 52028, 52027, 52026, 52025, 52024, 52023, 52022, 52021, 52020, 52019, 52018, 52017, 52016, 52015, 52014, 52013, 52012, 52011, 52010, 52009, 52008, 52007, 52006, 52005, 52004, 52003, 52002, 52001, 52000, 51999, 51998, 51997, 51996, 51995, 51994, 51993, 51992, 51991, 51990, 51989, 51988, 51987, 51986, 51985, 51984, 51983, 51982, 51981, 51980, 51979, 51978, 51977, 51976, 51975, 51974, 51973, 51972, 51971, 51970, 51969, 51968, 51967, 51966, 51965, 51964, 51963, 51962, 51961, 51960, 51959, 51958, 51957, 51956, 51955, 51954, 51953, 51952, 51951, 51950, 51949, 51948, 51947, 51946, 51945, 51944, 51943, 51942, 51941, 51940, 51939, 51938, 51937, 51936, 51935, 51934, 51933, 51932, 51931, 51930, 51929, 51928, 51927, 51926, 51925, 51924, 51923, 51922, 51921, 51920, 51919, 51918, 51917, 51916, 51915, 51914, 51913, 51912, 51911, 51910, 51909, 51908, 51907, 51906, 51905, 51904, 51903, 51902, 51901, 51900, 51899, 51898, 51897, 51896, 51895, 51894, 51893, 51892, 51891, 51890, 51889, 51888, 51887, 51886, 51885, 51884, 51883, 51882, 51881, 51880, 51879, 51878, 51877, 51876, 51875, 51874, 51873, 51872, 51871, 51870, 51869, 51868, 51867, 51866, 51865, 51864, 51863, 51862, 51861, 51860, 51859, 51858, 51857, 51856, 51855, 51854, 51853, 51852, 51851, 51850, 51849, 51848, 51847, 51846, 51845, 51844, 51843, 51842, 51841, 51840, 51839, 51838, 51837, 51836, 51835, 51834, 51833, 51832, 51831, 51830, 51829, 51828, 51827, 51826, 51825, 51824, 51823, 51822, 51821, 51820, 51819, 51818, 51817, 51816, 51815, 51814, 51813, 51812, 51811, 51810, 51809, 51808, 51807, 51806, 51805, 51804, 51803, 51802, 51801, 51800, 51799, 51798, 51797, 51796, 51795, 51794, 51793, 51792, 51791, 51790, 51789, 51788, 51787, 51786, 51785, 51784, 51783, 51782, 51781, 51780, 51779, 51778, 51777, 51776, 51775, 51774, 51773, 51772, 51771, 51770, 51769, 51768, 51767, 51766, 51765, 51764, 51763, 51762, 51761, 51760, 51759, 51758, 51757, 51756, 51755, 51754, 51753, 51752, 51751, 51750, 51749, 51748, 51747, 51746, 51745, 51744, 51743, 51742, 51741, 51740, 51739, 51738, 51737, 51736, 51735, 51734, 51733, 51732, 51731, 51730, 51729, 51728, 51727, 51726, 51725, 51724, 51723, 51722, 51721, 51720, 51719, 51718, 51717, 51716, 51715, 51714, 51713, 51712, 51711, 51710, 51709, 51708, 51707, 51706, 51705, 51704, 51703, 51702, 51701, 51700, 51699, 51698, 51697, 51696, 51695, 51694, 51693, 51692, 51691, 51690, 51689, 51688, 51687, 51686, 51685, 51684, 51683, 51682, 51681, 51680, 51679, 51678, 51677, 51676, 51675, 51674, 51673, 51672, 51671, 51670, 51669, 51668

124

Di seguito vengono riportati i risultati più significativi ottenuti dall'elaborazione di tutti i dati oceanografici acquisiti durante le diverse campagne. I risultati si focalizzano sulle prime due campagne: estate 2020 (campagna 1); inverno 2021 (campagna 2).

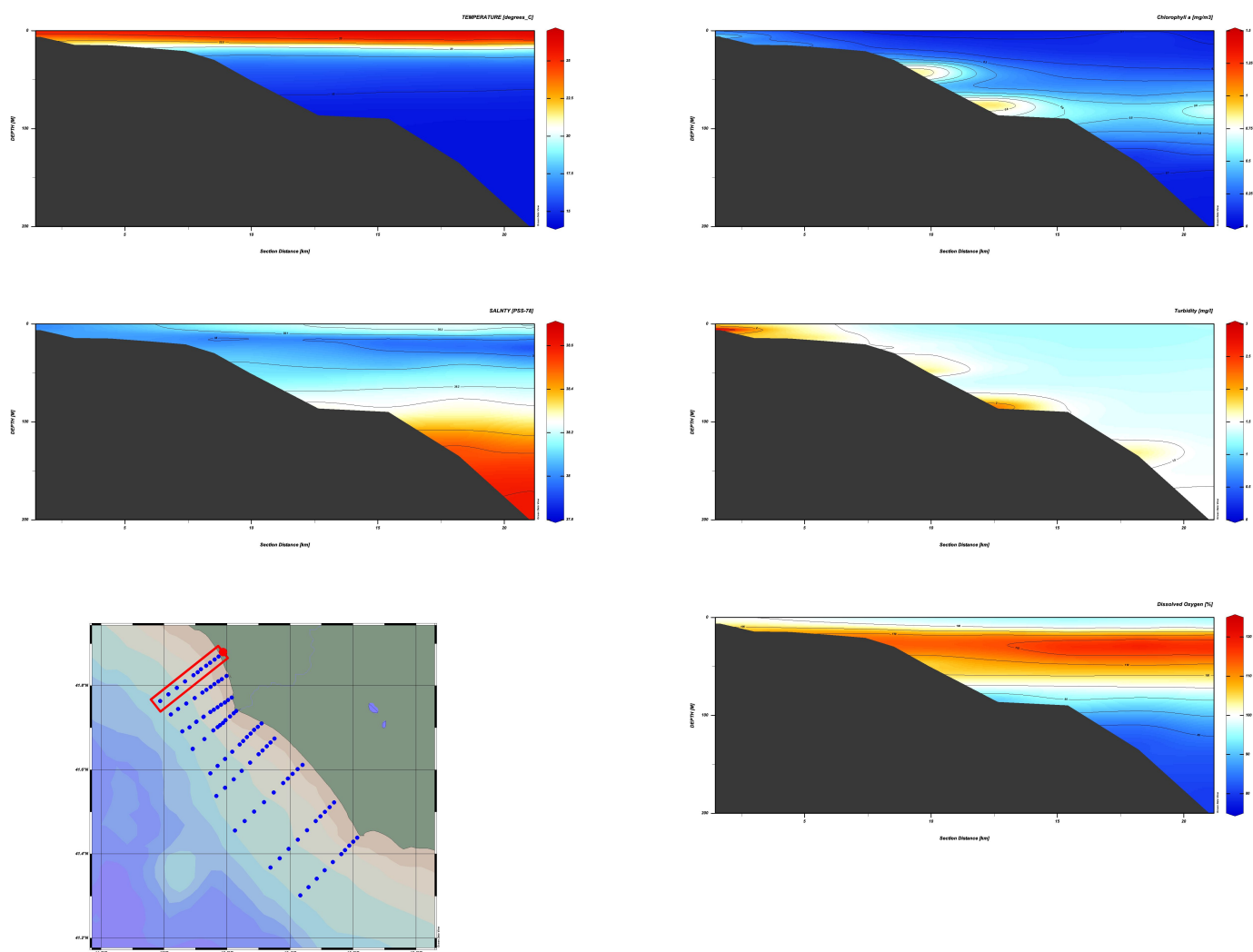


Figura 84 - Campagna Estate 2020: sezione profondità distanza del transetto TR01.

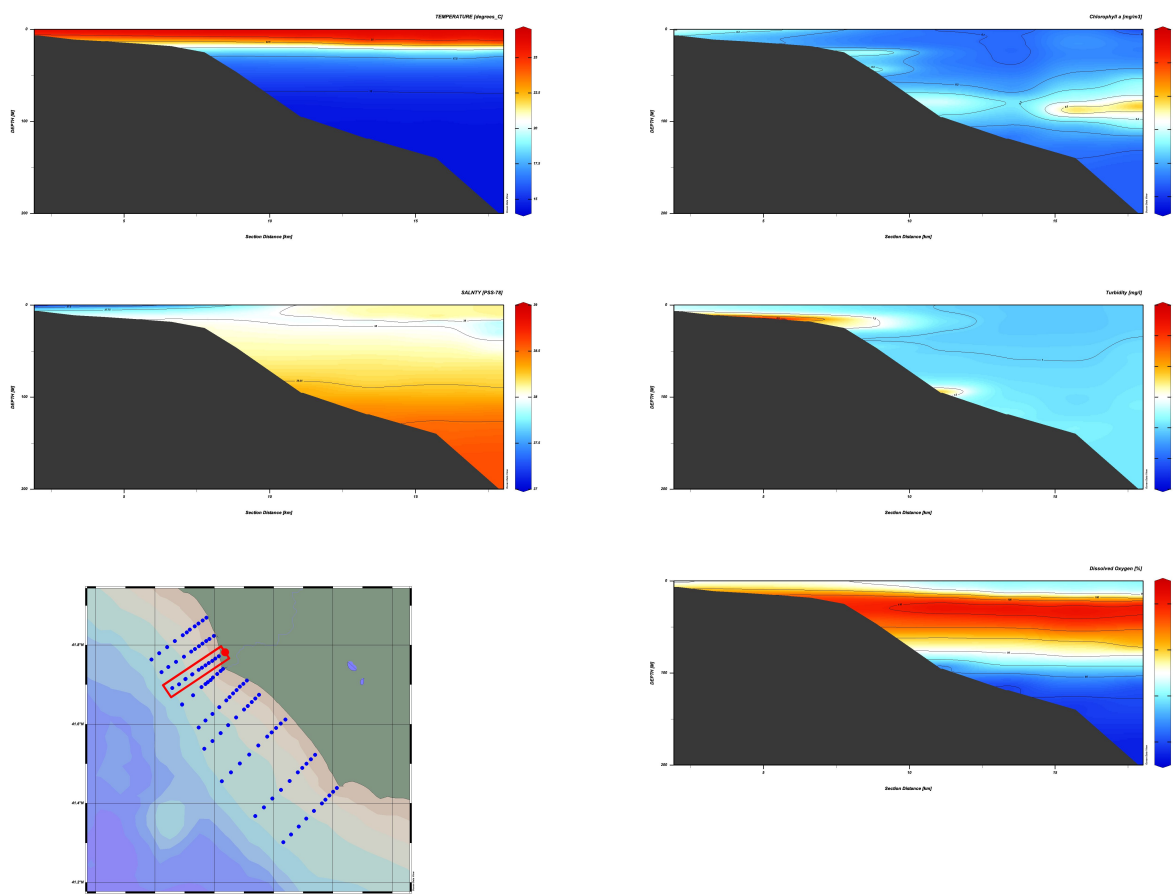


Figura 85 - Campagna Estate 2020: sezione profondità distanza del transetto TR06.

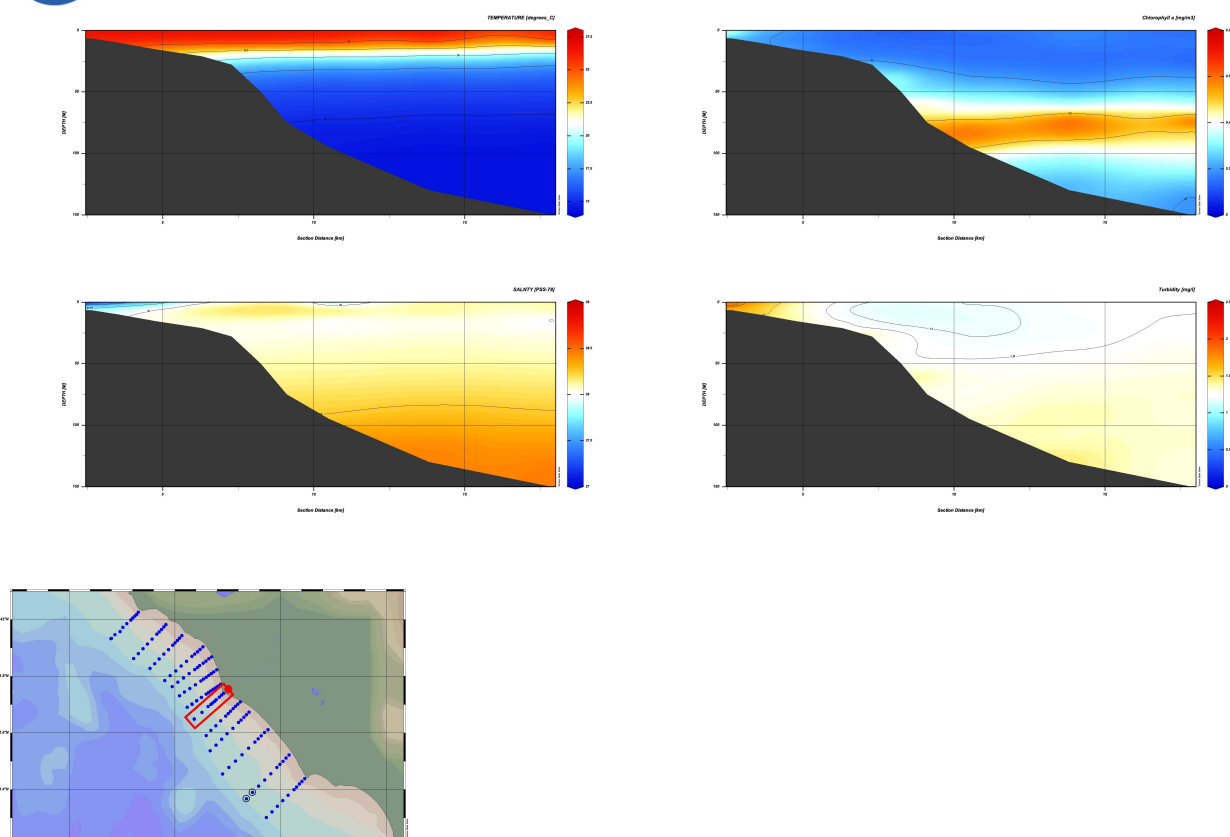


Figura 86 - Campagna Estate 2020: sezione profondità distanza del transetto TR07.

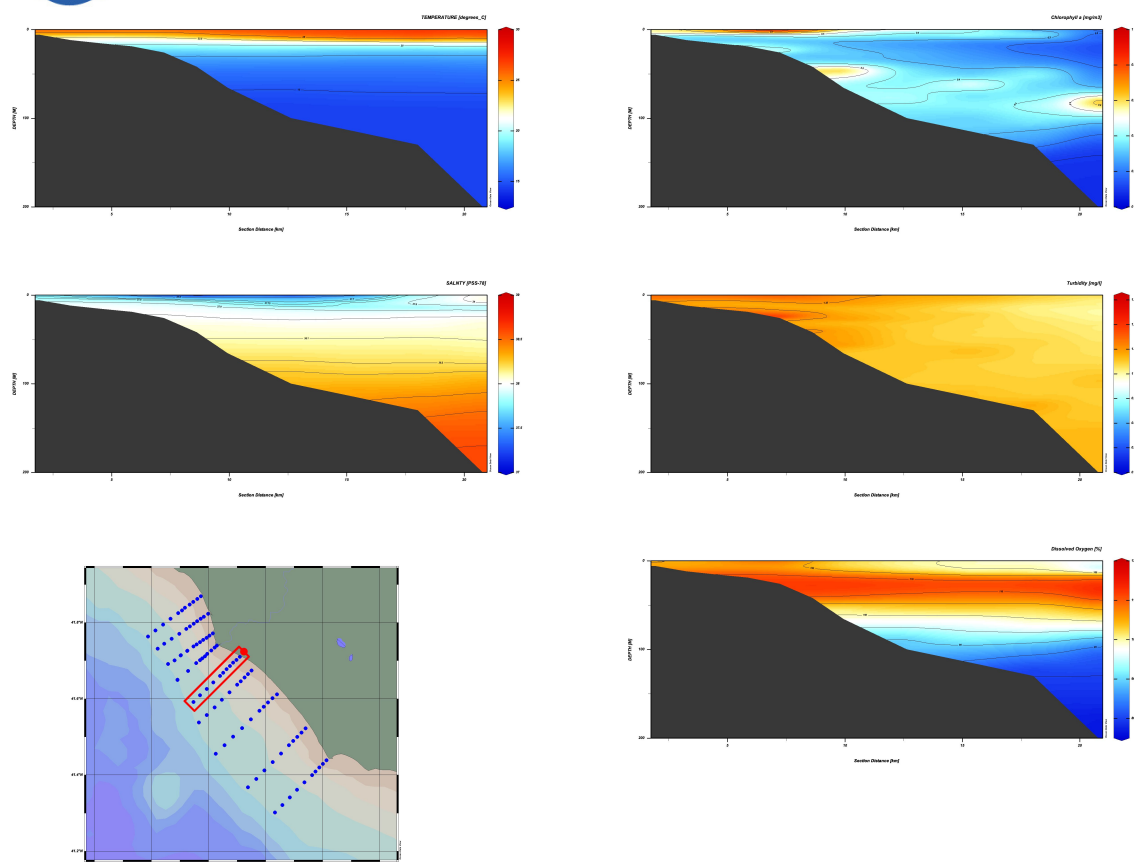


Figura 87 - Campagna Estate 2020: sezione profondità distanza del transetto TR08.

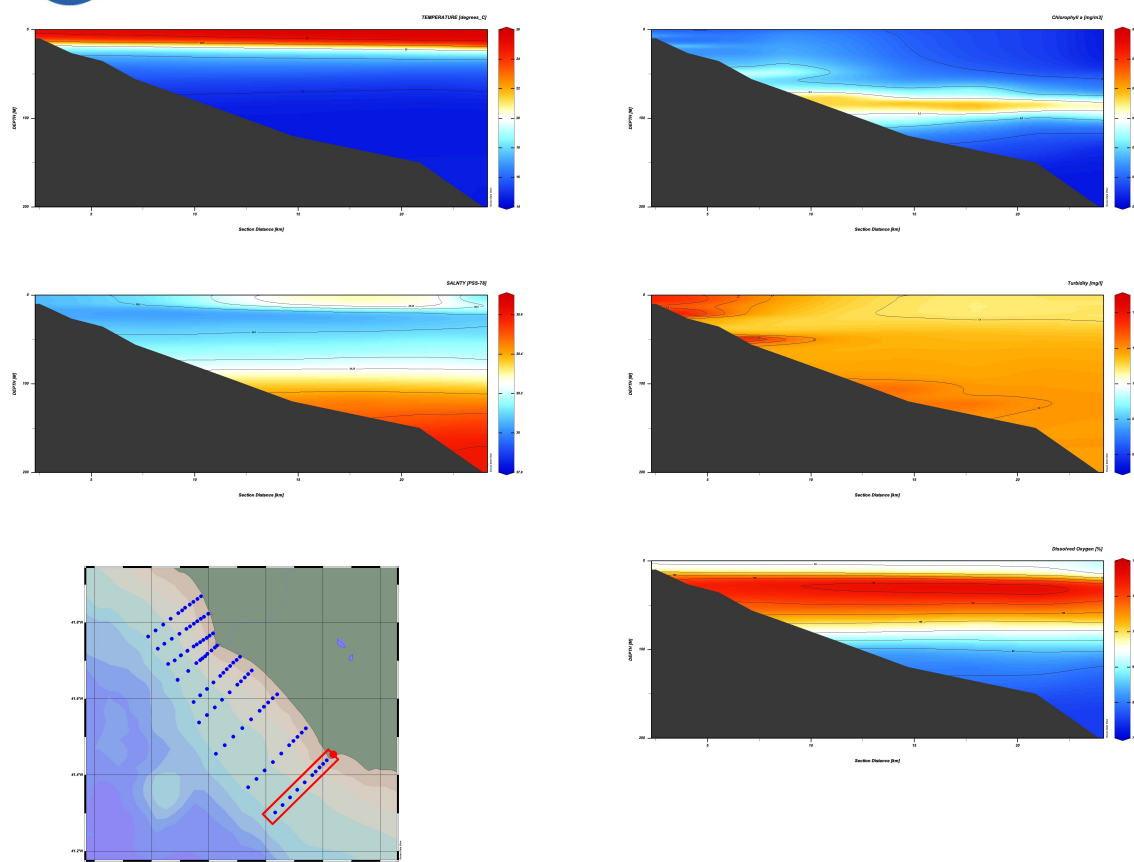


Figura 88 - Campagna Estate 2020: sezione profondità distanza del transetto TR12 dell'andamento delle variabili temperatura, salinità, clorofilla, torbidità e ossigeno disciolto.

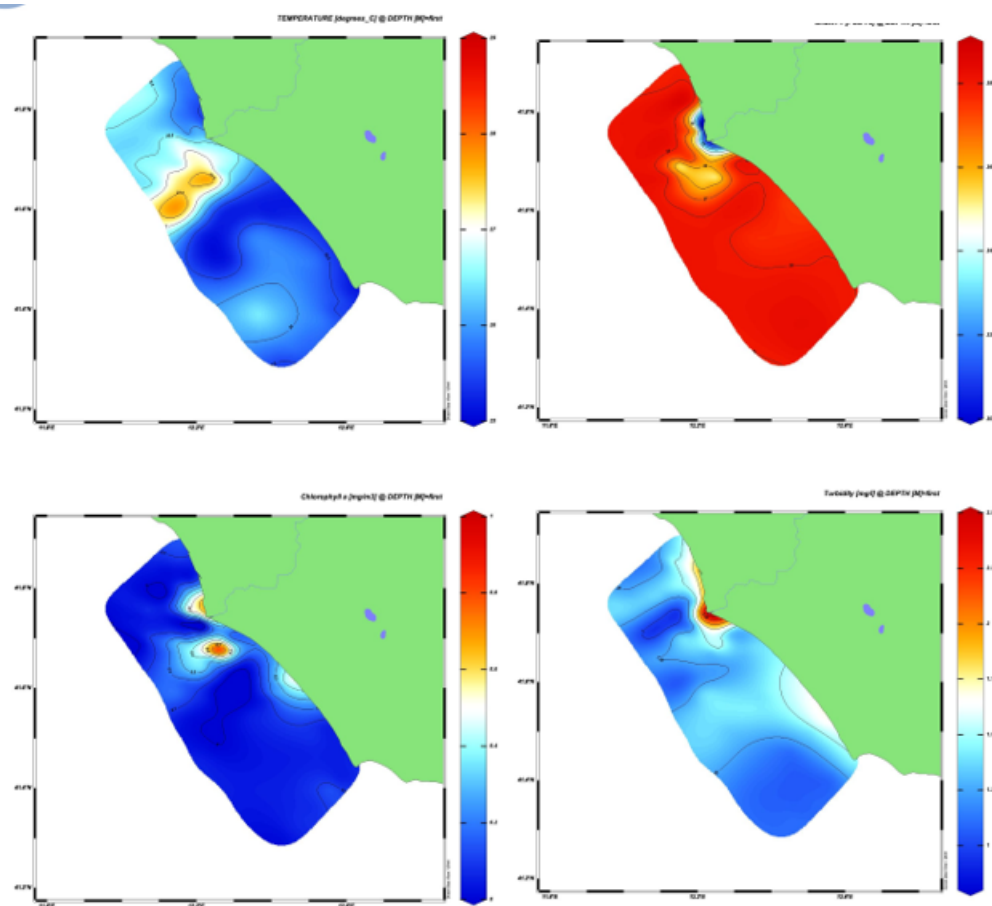


Figura 89 - Campagna Estate 2020: Isosuperficie della distribuzione di temperatura, salinità, clorofilla e torbidità lungo lo strato superficiale.

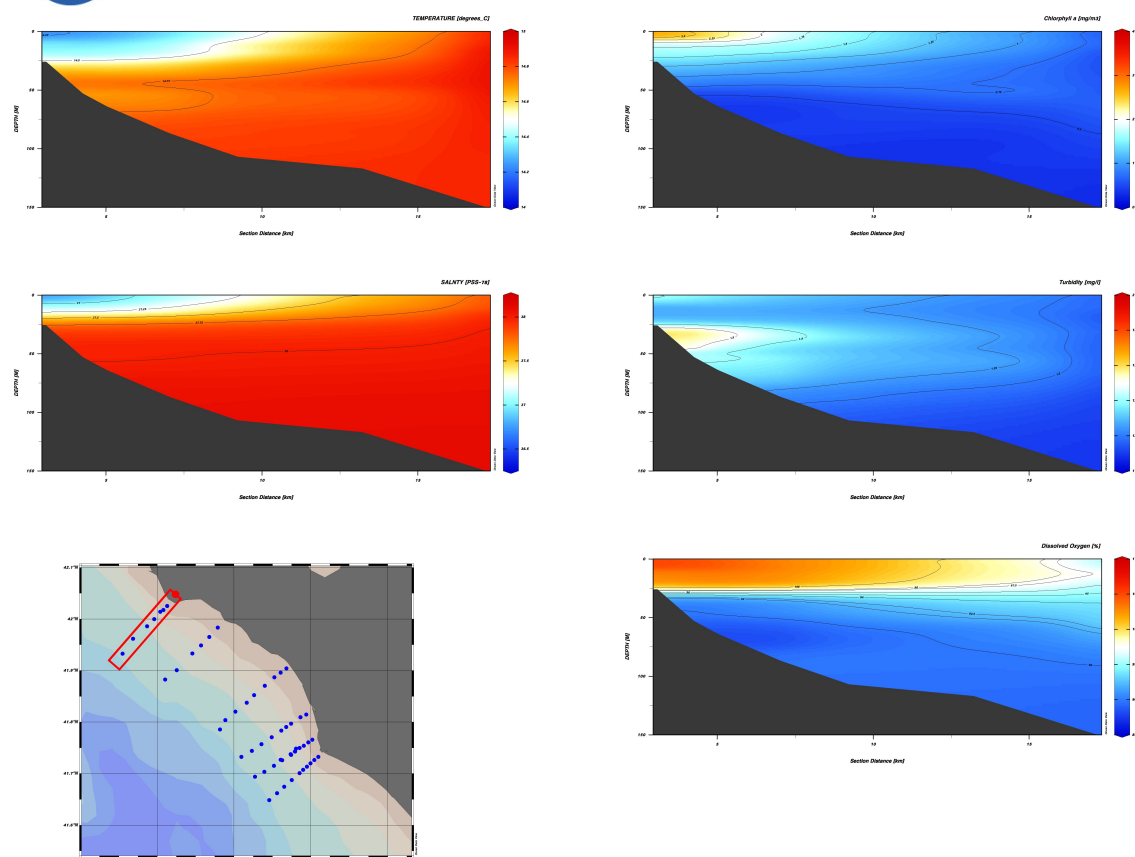


Figura 90 - Campagna Inverno 2021: sezione profondità distanza del transetto TR01.

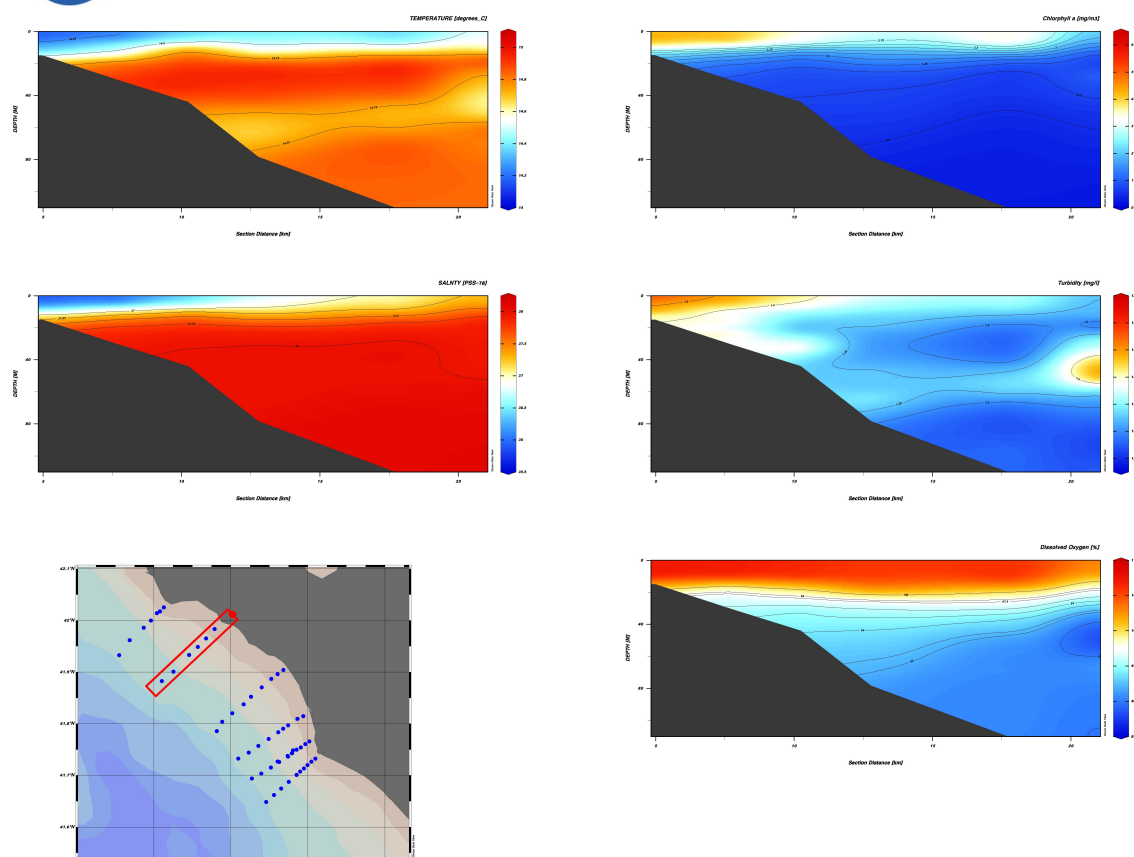


Figura 91 - Campagna Inverno 2021: sezione profondità distanza del transetto TR02.

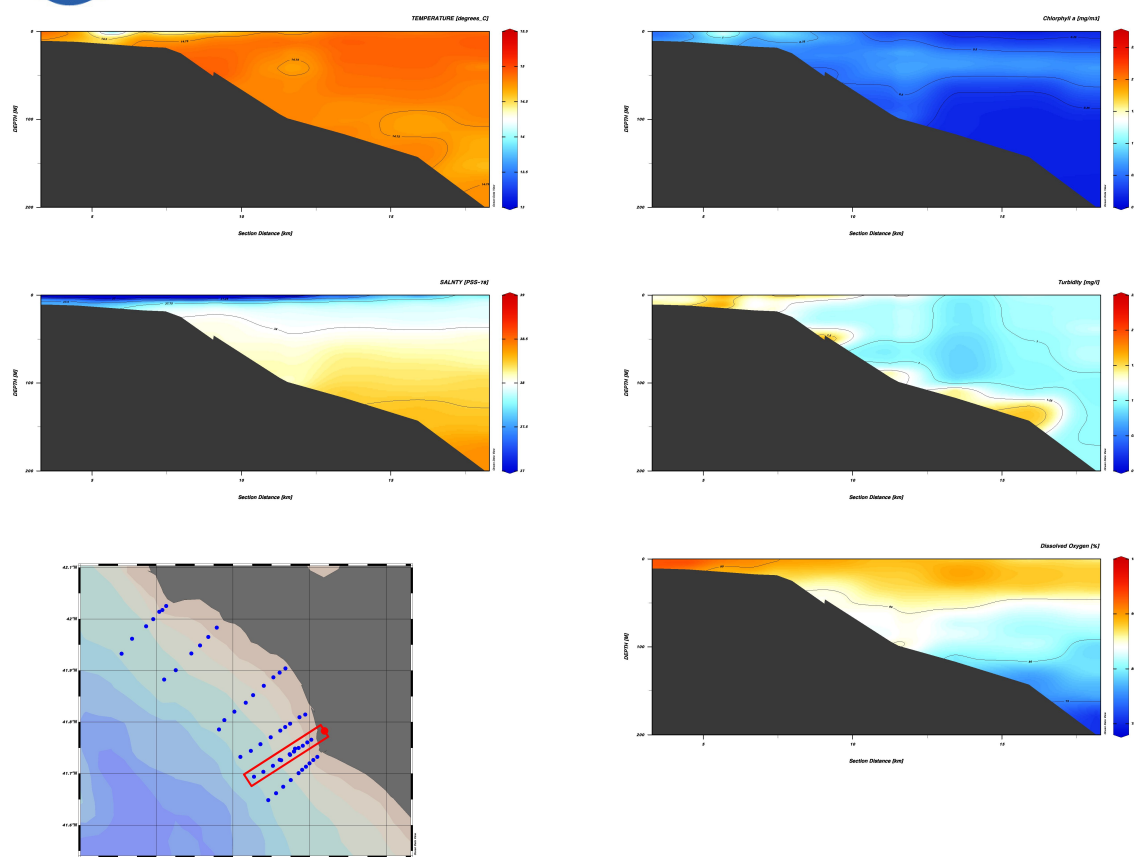


Figura 92 - Campagna Inverno 2021: sezione profondità distanza del transetto TR06.

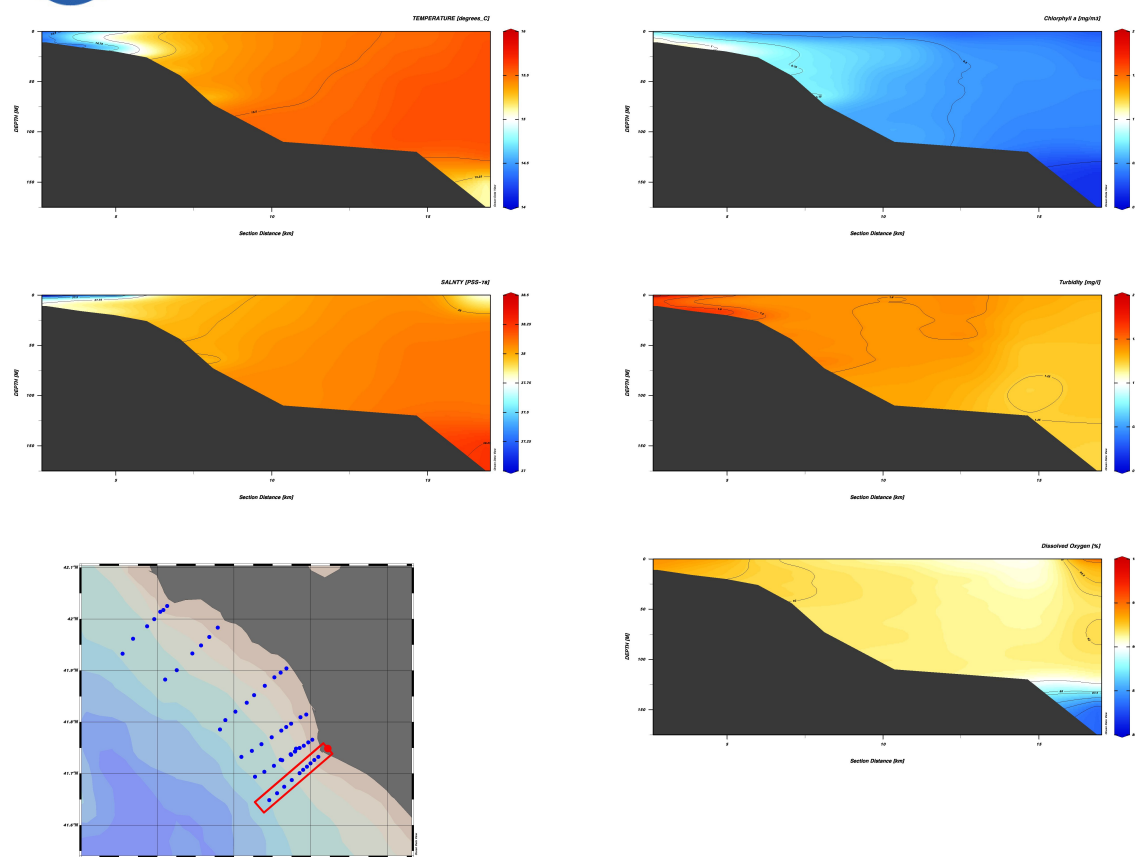


Figura 93 - Campagna Inverno 2021: sezione profondità distanza del transetto TR07.

5.3 Studio dello stato trofico delle acque

Durante le campagne di misura della colonna d'acqua sono stati effettuati n.13 campioni di acqua di mare superficiali per l'analisi dei nutrienti totali e disciolti di azoto e fosforo in corrispondenza delle stazioni indagate.

Di seguito si riportano le mappe delle stazioni nelle quali sono state effettuate le analisi dei nutrienti disciolti e totali di azoto e fosforo (figure 94 e 95).

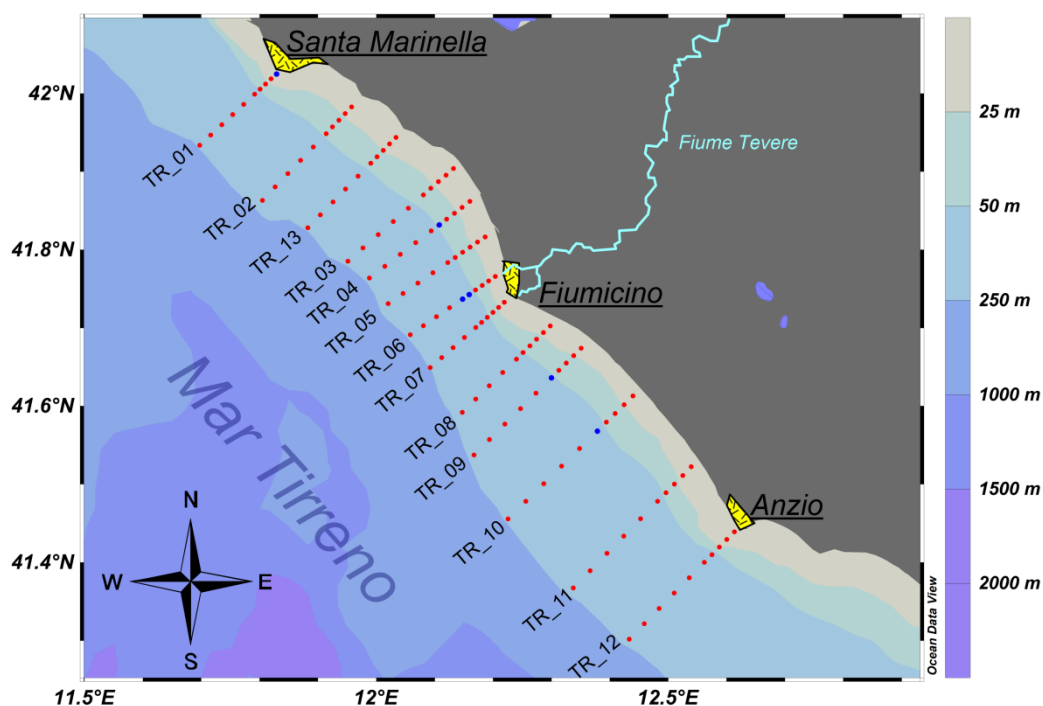


Figura 94 - Mappa delle stazioni (in blu) nelle quali sono state effettuate le analisi dei nutrienti disciolti e totali di azoto e fosforo durante la Campagna 1.

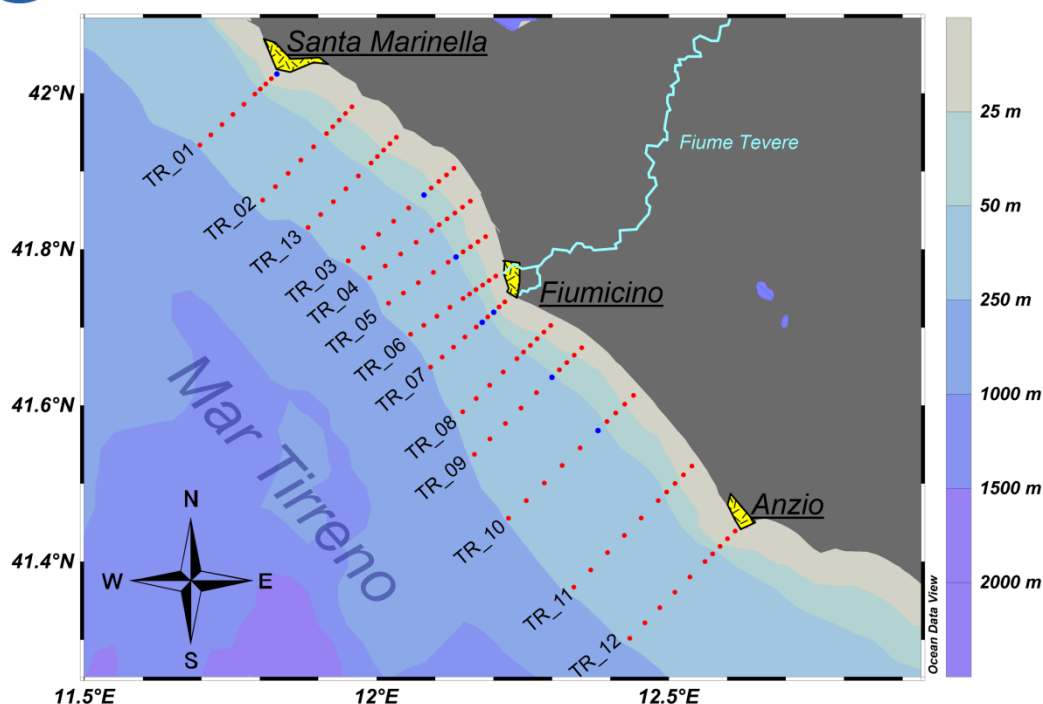


Figura 95 - Mappa delle stazioni (in blu) nelle quali sono state effettuate le analisi dei nutrienti disciolti e totali di azoto e fosforo durante la Campagna 2.

Di seguito si riportano i risultati delle analisi dei nutrienti totali di azoto e fosforo:

Tabella 7 - Concentrazioni dei nutrienti disciolti e totali di azoto e fosforo di n.3 campioni di acqua di mare prelevati durante le campagne di misura effettuate in Fase 1.

Transetto	Stazione	Codice Stazione	Data	Prof (m)	NO ₂ (μmol/l)	NO ₃ (μmol/l)	Si (μmol/l)	PO ₄ (μmol/l)	P tot (μmol/l)	N tot (μmol/l)
TR01	01	10101	31/10/2020	5	0.178	0.765	4.224	0.204	0.232	8.989
TR04	05	10405	27/08/2020	3	0.214	2.155	3.217	0.150	0.426	13.974
TR06	05	10605	21/08/2020	2	0.138	1.013	2.840	0.114	0.321	11.938
TR06	06	10606.3	11/11/2020	2	0.365	6.216	12.097	0.219	0.603	21.415
TR09	05	10905	09/09/2020	6	0.234	0.301	6.168	0.069	0.585	14.502
TR10	05	11005	09/09/2020	8	0.168	1.421	1.545	0.114	0.277	14.882
TR01	01	20101	07/03/2021	3.0	0.043	0.283	1.524	0.116	0.480	22.089
TR03	05	20305	05/03/2021	3.0	0.192	4.172	9.434	0.203	0.537	20.538
TR05	05	20505	03/03/2021	3.0	0.114	1.736	4.360	0.098	0.403	16.964
TR07	03	20703	19/01/2021	2.0	0.411	3.577	7.310	0.161	0.403	17.052
TR07	05	20705	17/02/2021	3.0	0.514	13.289	25.886	0.385	0.744	33.115
TR09	05	20905	04/03/2021	3.0	0.066	0.892	2.509	0.053	0.279	12.194
TR10	05	20101	07/03/2021	3.0	0.108	0.457	2.225	0.298	0.370	16.078

5.4. Studio della distribuzione del solido sospeso, della biomassa fitoplanctonica e della CDOM lungo l'unità fisiografica attraverso osservazioni satellitari

5.4.1 Distribuzione di solido sospeso (TSM) e clorofilla a (CHL)

5.4.1.1 Metodi di processamento delle immagini

Date le caratteristiche uniche degli ecosistemi marini, è essenziale trovare l'algoritmo più adatto per la stima a livello regionale della clorofilla-a (CHL) e dei sedimenti sospesi (Total Suspended Matter – TSM). A questo scopo abbiamo adottato sette algoritmi e validato le loro prestazioni in quattro stagioni negli anni 2021, 2022, 2023. Dall'analisi statistica, si osserva che l'algoritmo C2RCC hanno sovraperformato tutti gli altri algoritmi e può essere utilizzato per stimare la clorofilla e i sedimenti sospesi.

Rispetto alle informazioni satellitari esistenti liberamente disponibili, Sentinel-2 possiede caratteristiche spaziali, spettrali e temporali superiori (tabella 8), che lo rendono altamente adatto per il monitoraggio e la valutazione completa delle concentrazioni della clorofilla-a e della materia sospesa totale nell'ambiente marino costiero. Per questa ricerca, abbiamo utilizzato i dati Sentinel-2 (A e B) di livello 1C di Copernicus.

Tabella 8 - Caratteristiche Sentinel-2 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/Sentinel2msi/resolutions/> /radiometric); * Rapporto segnale/rumore alla radianza di riferimento.

Banda No.	Risoluzione spaziale (m)	Sentinel-2 A		Sentinel-2 B		SNR@ Lref*
		Lunghezza d'onda centrale (nm)	Ampiezza banda (nm)	Lunghezza d'onda centrale (nm)	Ampiezza banda (nm)	
B1	60	442.7	21	442.2	21	129
B2	10	492.4	66	492.1	66	158
B3	10	559.8	36	559.0	36	168
B4	10	664.6	31	664.9	31	148
B5	20	704.1	15	103.8	16	117
B6	20	740.5	15	739.1	15	89
B7	20	782.8	20	779.7	20	105
B8	10	832.8	106	832.9	106	174
B8a	20	864.7	21	864.0	22	72
B9	60	945.1	20	442.2	21	114
B10	60	1373.5	31	943.2	21	50
B11	20	1613.7	91	1610.4	94	100
B12	20	2202.4	175	2185.7	185	100

I seguenti metodi di elaborazione delle immagini sono stati applicati ai dati Sentinel-2:

- *Ricampionamento*: è la prima e principale procedura nell'elaborazione delle immagini satellitari, il ricampionamento è il processo di mantenimento di una risoluzione spaziale comune a tutte le bande, poiché le bande vanno da 10 m a 60 m (Tabella 8). Il metodo di ricampionamento è sostanzialmente diviso in due: *downsampling* e *upsampling*. Per mantenere la coerenza e l'accuratezza dei dati ed evitare artefatti, i dati Sentinel-2 vengono campionati fino a 60 m utilizzando il metodo di interpolazione *nearest neighbor*.
- *Mascheramento*: utilizzato per delineare accuratamente le AOI (aree di interesse). Questo metodo è altamente raccomandato e utile per la valutazione delle concentrazioni di clorofilla-a e dei sedimenti sospesi nelle acque costiere utilizzando i dati Sentinel-2, consentendo di nascondere le informazioni sulle acque interne, che possono andare a inficiare i risultati dello studio incentrato esclusivamente sull'ambiente marino.
- *Correzione atmosferica*: è il processo di rimozione degli effetti atmosferici come l'assorbimento e la dispersione del valore di riflettanza dalle informazioni di osservazione della Terra. I dati Sentinel-2 L1C vengono utilizzati per la correzione atmosferica. Nel dettaglio, sono stati testati tre tipi di metodi di correzione atmosferica basati su reti neurali come C2RCC, C2x Net e C2X COMPLEX.

5.4.1.2 Calcolo di CHL e TSM dai dati Sentinel

Per stimare le concentrazioni di clorofilla e di sedimenti sospesi, sono stati utilizzati dati Sentinel-2 L1C raccolti da dicembre 2020 a settembre 2023, in condizioni di nubi al 30%, per un totale di 107 dati satellitari. Per stimare i cambiamenti spazio-temporali, i dati sono stati organizzati in quattro stagioni: primavera, estate, autunno e inverno. Per stimare la clorofilla e i sedimenti sospesi sono stati utilizzati gli algoritmi C2RCC, C2x Net e C2X COMPLEX. Sulla base dell'analisi statistica si osserva che C2RCC ha sovraperformato



gli algoritmi C2x-Net e C2X-COMPLEX. Informazioni dettagliate riguardanti il periodo di acquisizione dei dati Sentinel-2 sono fornite nella tabella 9.

Tabella 9 - Date di rilevamento dei dati Sentinel-2.

Anno	Mese	Giorno		Anno	Mese	Giorno		Anno	Mese	Giorno
2021	2	14		2022	1	15		2023	1	10
2021	2	24		2022	1	25		2023	1	30
2021	3	1		2022	2	9		2023	2	1
2021	3	11		2022	3	1		2023	2	14
2021	3	31		2022	3	6		2023	3	16
2021	4	5		2022	3	21		2023	3	21
2021	4	15		2022	3	26		2023	4	10
2021	4	20		2022	4	5		2023	4	20
2021	4	25		2022	4	10		2023	4	25
2021	4	30		2022	4	25		2023	5	5
2021	5	5		2022	4	30		2023	5	25
2021	5	10		2022	5	10		2023	5	30
2021	5	15		2022	5	20		2023	6	24
2021	5	20		2022	5	25		2023	6	29
2021	5	25		2022	5	30		2023	7	4
2021	6	4		2022	6	9		2023	7	9
2021	6	9		2022	6	14		2023	7	14
2021	6	14		2022	6	19		2023	7	19
2021	6	19		2022	6	24		2023	7	29
2021	7	9		2022	6	29		2023	8	3
2021	7	14		2022	7	4		2023	8	8
2021	7	19		2022	7	9		2023	8	13
2021	7	24		2022	7	14		2023	8	18
2021	7	29		2022	7	19		2023	8	23
2021	8	8		2022	7	24		2023	9	7
2021	8	13		2022	7	29		2023	9	12
2021	8	18		2022	8	3				
2021	8	23		2022	8	8				
2021	8	28		2022	8	13				
2021	9	2		2022	8	23				
2021	9	7		2022	8	28				
2021	9	12		2022	9	7				
2021	9	22		2022	9	17				
2021	10	17		2022	9	22				

2021	11	21		2022	9	27				
2021	12	16		2022	10	2				
2021	12	31		2022	10	17				
				2022	11	1				
				2022	11	6				
				2022	11	11				
				2022	11	21				
				2022	12	1				
				2022	12	11				
				2022	12	31				

5.4.1.3 Valutazione delle prestazioni dell'algoritmo con dati in-situ

Sono stati applicati tre algoritmi, vale a dire C2RCC, C2X e C2X COMPLEX per generare clorofilla-a e sedimenti sospesi totali. I dati *in situ* (chl-a e TSM, misurati durante le campagne oceanografiche, capitolo 3.2) sono stati confrontati con quelli generati attraverso gli algoritmi per convalidarne l'efficienza e l'affidabilità. Oltre a perfezionare l'algoritmo, la validazione con dati *in situ* aiuta a scegliere l'algoritmo più adatto per l'area di studio. L'analisi si è concentrata sulla correlazione spaziale. Nello specifico, abbiamo calcolato i valori di R^2 per quantificare la forza della correlazione per due variabili: clorofilla-a (CHL) e sedimenti sospesi con un intervallo di tolleranza (+/-) 5%. Le prestazioni dell'algoritmo con le informazioni derivate dai dati *in-situ* e Sentinel-2 sono riportate in figura 90.

In-situ vs. C2RCC

Il valore di R^2 calcolato per l'algoritmo C2RCC rispetto a CHL *in situ* è stato di 0.78338, ed indica un'elevata correlazione. Allo stesso modo, per i sedimenti sospesi (TSM), il valore di R^2 calcolato è pari a 0.86878, evidenziando ulteriormente una forte relazione positiva tra l'algoritmo C2RCC e le misurazioni *in situ* (figura 90).

In-situ vs. C2X

Il coefficiente di correlazione di CHL tra i dati *in situ* e l'algoritmo C2X è stato di 0.3526. Questa moderata correlazione positiva suggerisce che l'algoritmo C2X cattura parte della



variabilità osservata nelle misurazioni *in situ* di chl-a. Al contrario, il coefficiente di correlazione per i sedimenti sospesi (TSM) è risultato pari a 0.82265, indicando una correlazione positiva più forte tra i dati *in situ* e l'algoritmo C2X (figura 90).

In-situ vs. C2X Complex

Il valore del coefficiente di determinazione per CHL è pari a 0.0945, indicando una correlazione relativamente debole tra l'algoritmo del complesso C2X e le misurazioni chl-a *in situ*. Al contrario, per i sedimenti sospesi (TSM), il valore R^2 ottenuto è stato di 0.80666 ed indica una più forte correlazione (figura 96).

In sintesi, i risultati suggeriscono che l'algoritmo C2RCC sembra migliore degli algoritmi ACOLITE (ACOLITE è stato usato per ottenere le concentrazioni di CHL e TSM nelle precedenti fasi del progetto), C2X e C2X Complex nella stima della clorofilla-a e dei sedimenti sospesi in tutte le stagioni, evidenziando correlazioni più forti con i dati *in situ*. È comunque da notare che, quando si tratta di stimare i sedimenti sospesi, gli algoritmi C2X e C2X Complex mostrano comunque un coefficiente di correlazione molto alto sebbene sia inferiore a quello C2RCC.

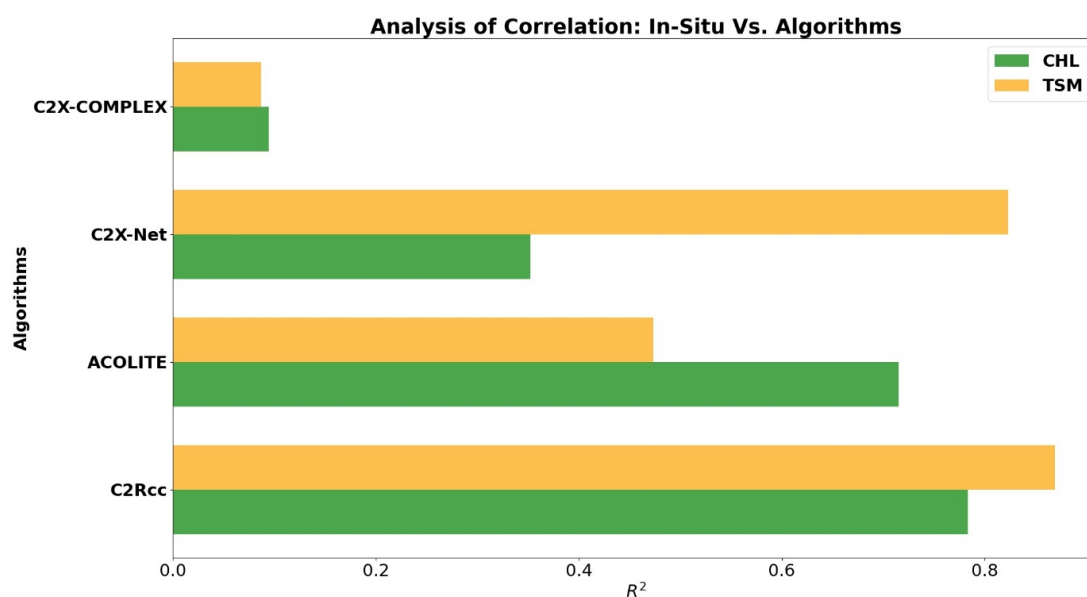


Figura 96 - Analisi di correlazione dati In-Situ vs Algoritmi.

5.4.1.4 Risultati dell'analisi satellitare delle concentrazioni di CHL e TSM

Di seguito si riportano i risultati dell'analisi satellitare delle concentrazioni di TSM e CHL (g/m^3) nelle stagioni degli anni 2021, 2022 e 2023.

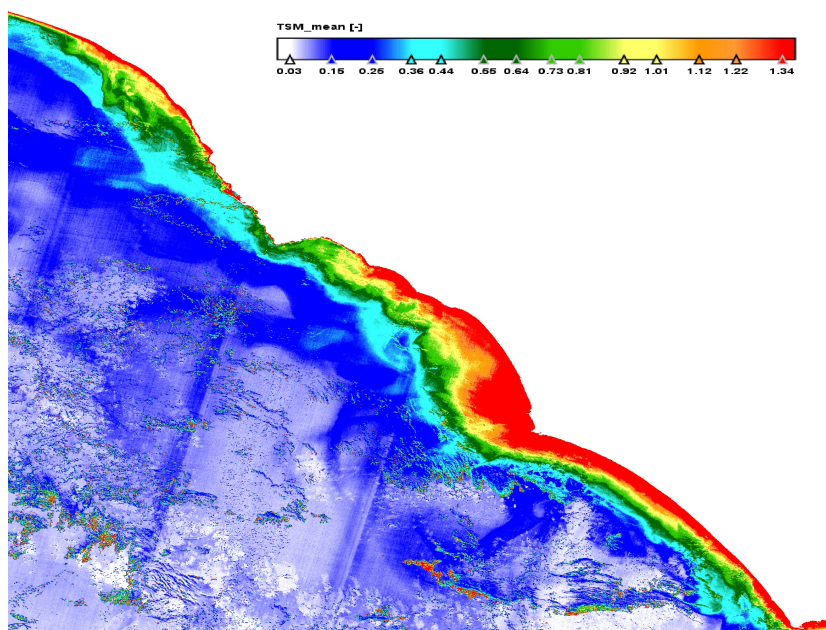


Figura 97 - TSM medio, autunno 2021.

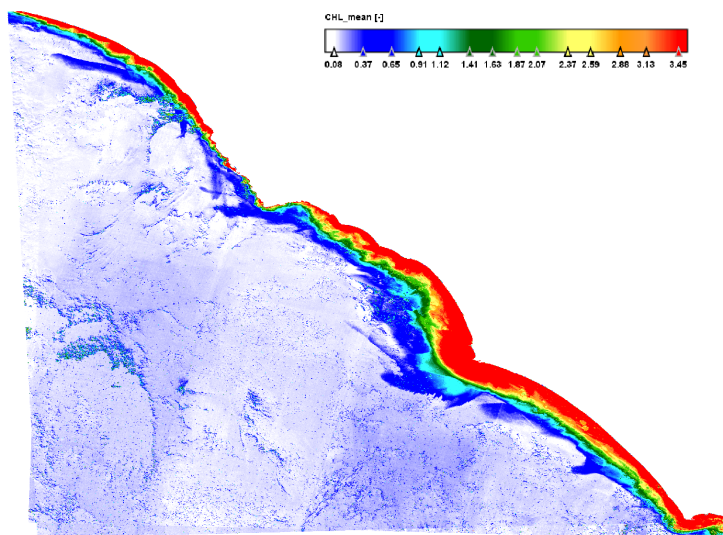


Figura 98 - Figura xx. CHL media, autunno 2021.

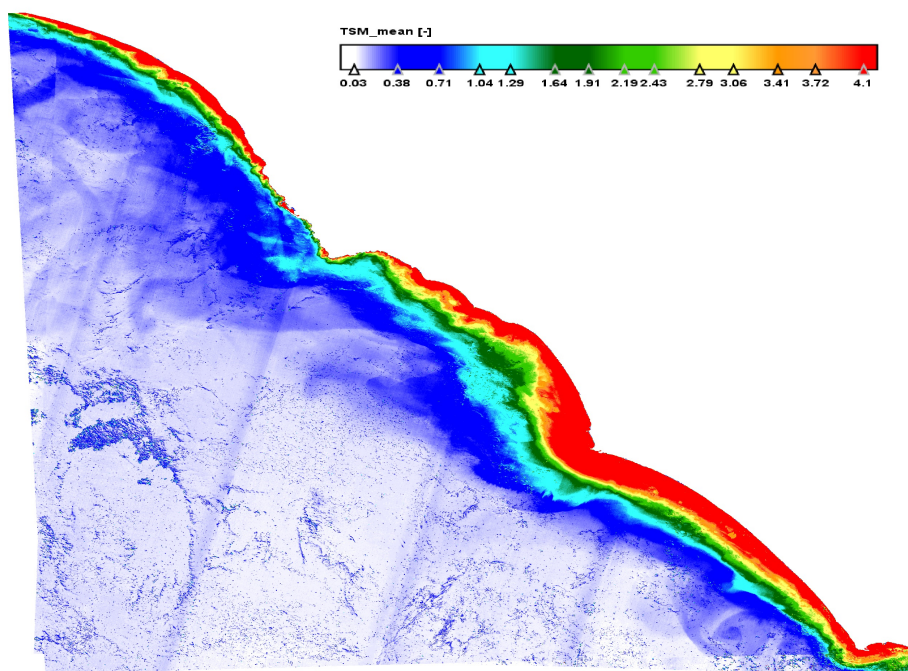


Figura 99 - TSM medio, autunno 2022.

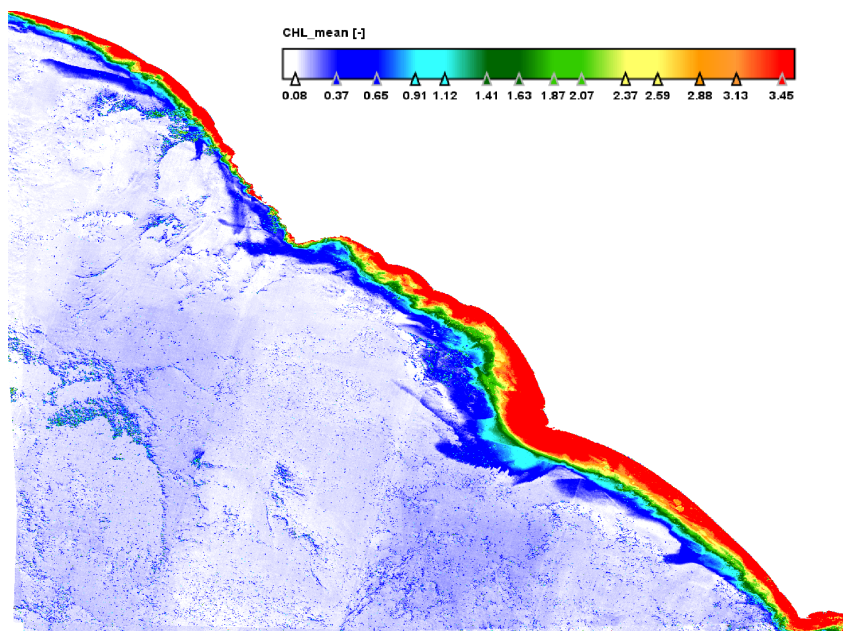


Figura 100 - CHL media, autunno 2022.

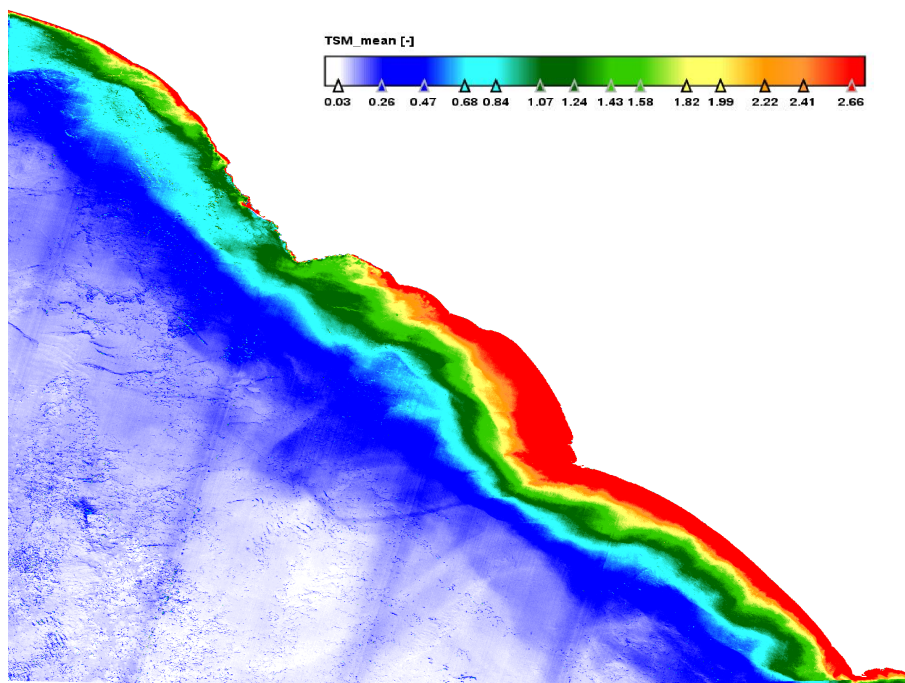


Figura 101 - TSM medio, primavera 2021.

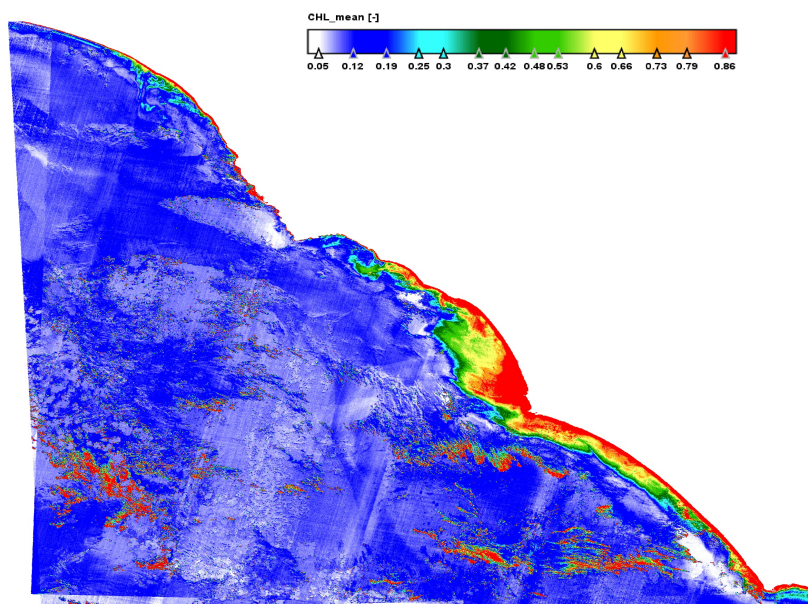


Figura 102 - CHL media, primavera 2021.

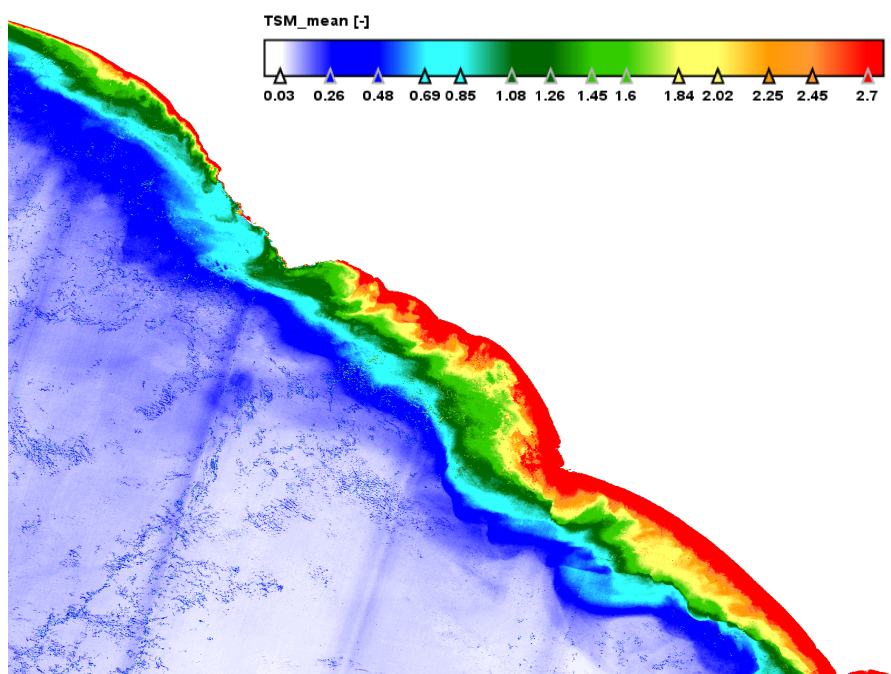


Figura 103 - TSM medio, primavera 2022.

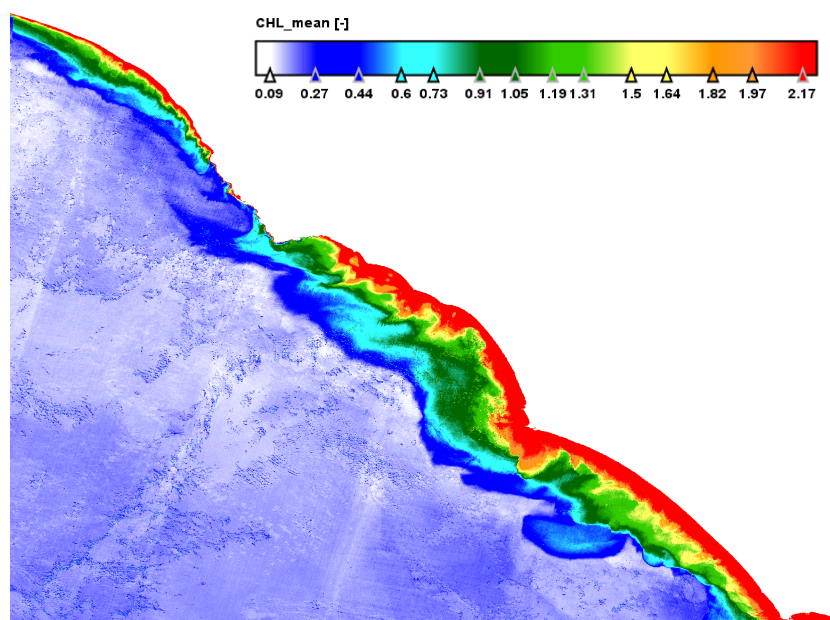


Figura 104 - CHL media, primavera 2022.

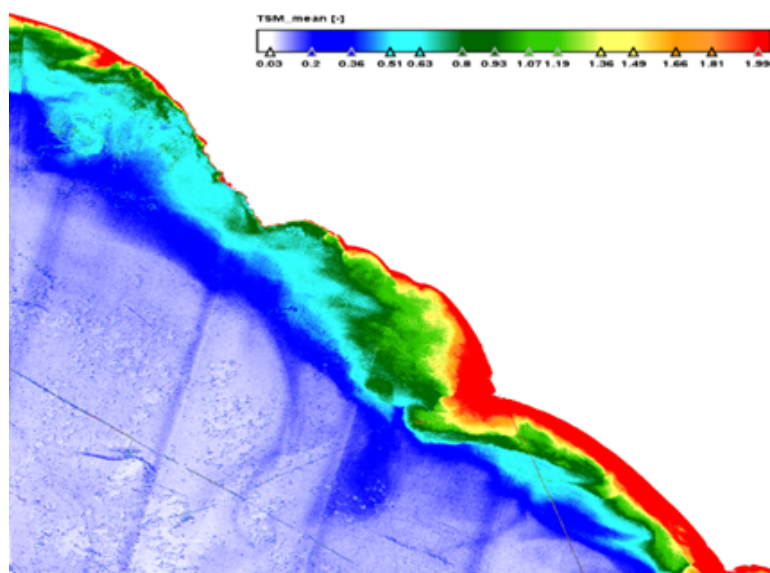


Figura 105 - TSM medio, primavera 2023.

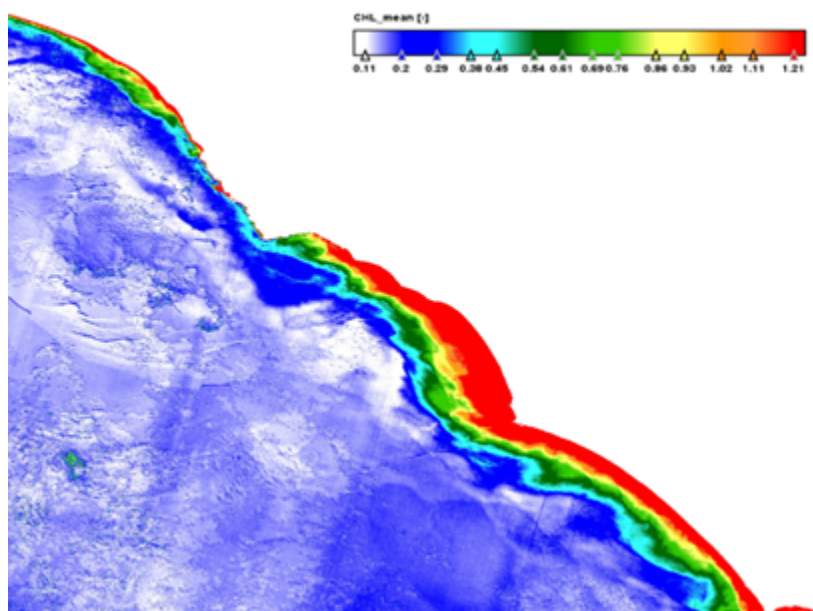


Figura 106 - CHL media, primavera 2023.

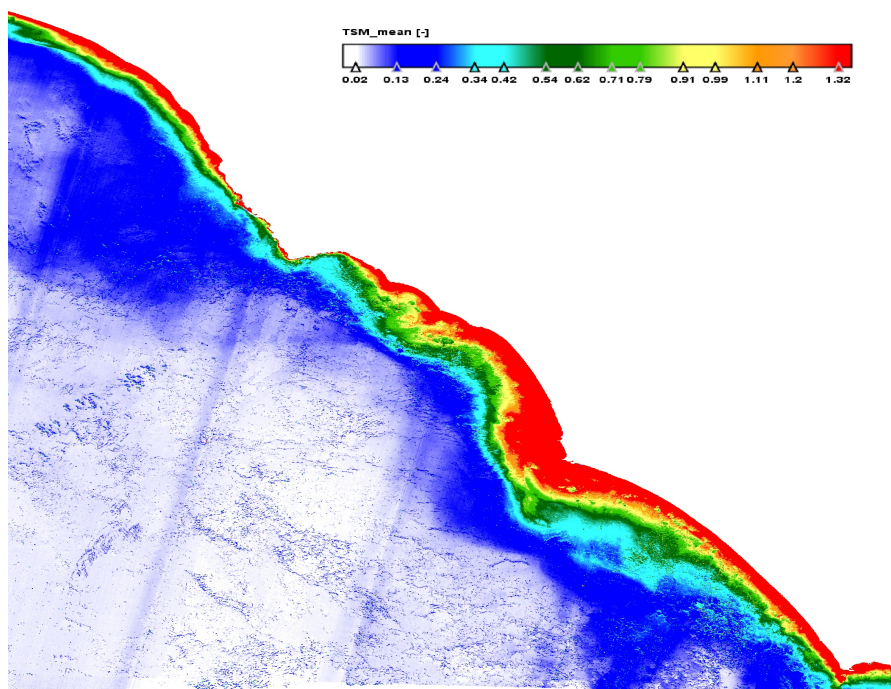


Figura 107 - TSM medio, estate 2021.

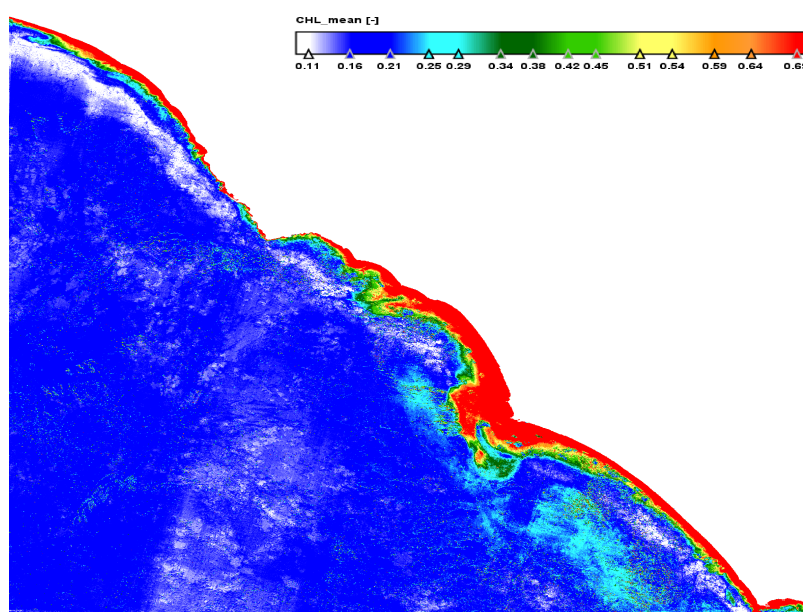


Figura 108 - CHL media, estate 2021.

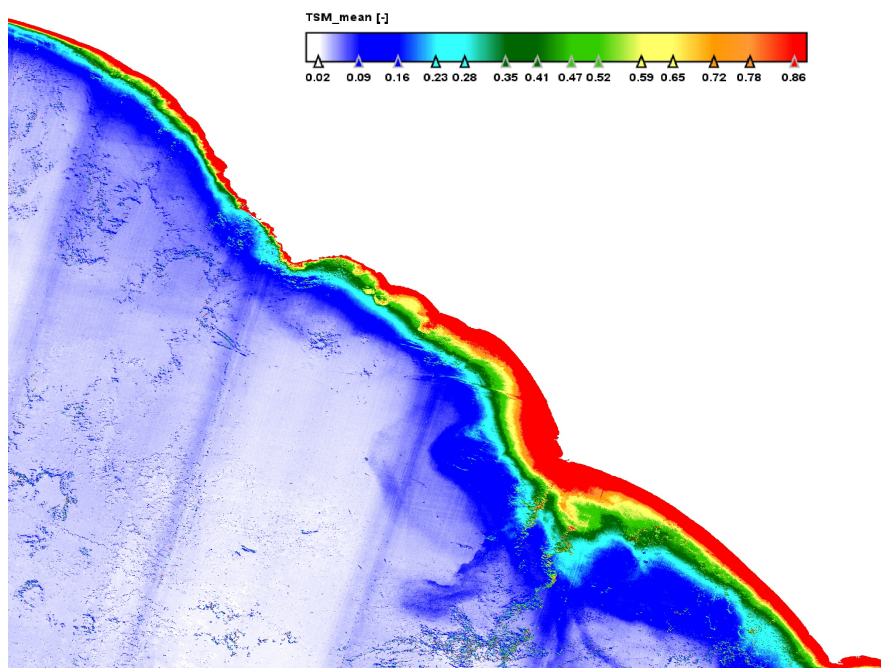


Figura 109 - TSM medio, estate 2022.

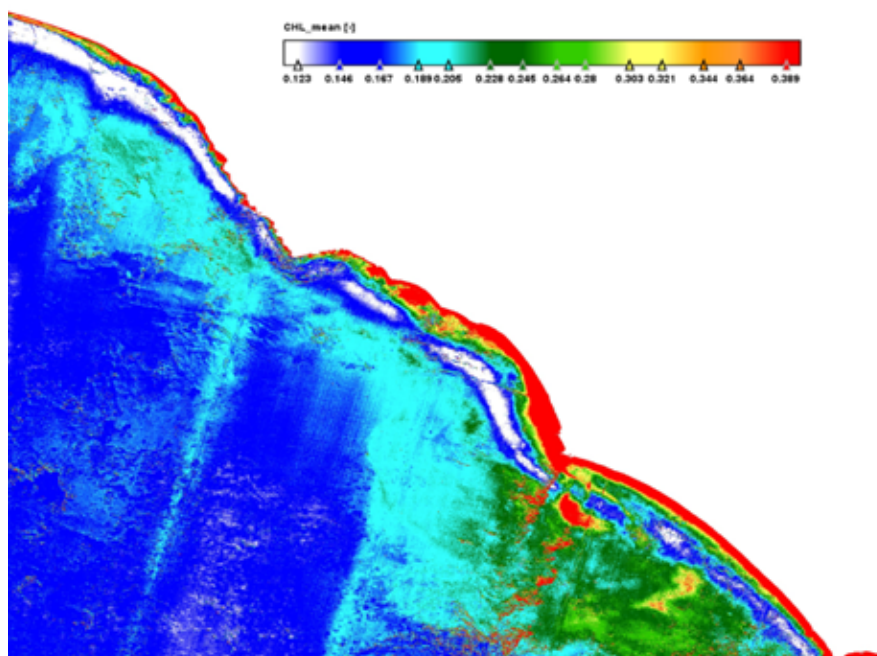


Figura 110 - CHL media, estate 2022.

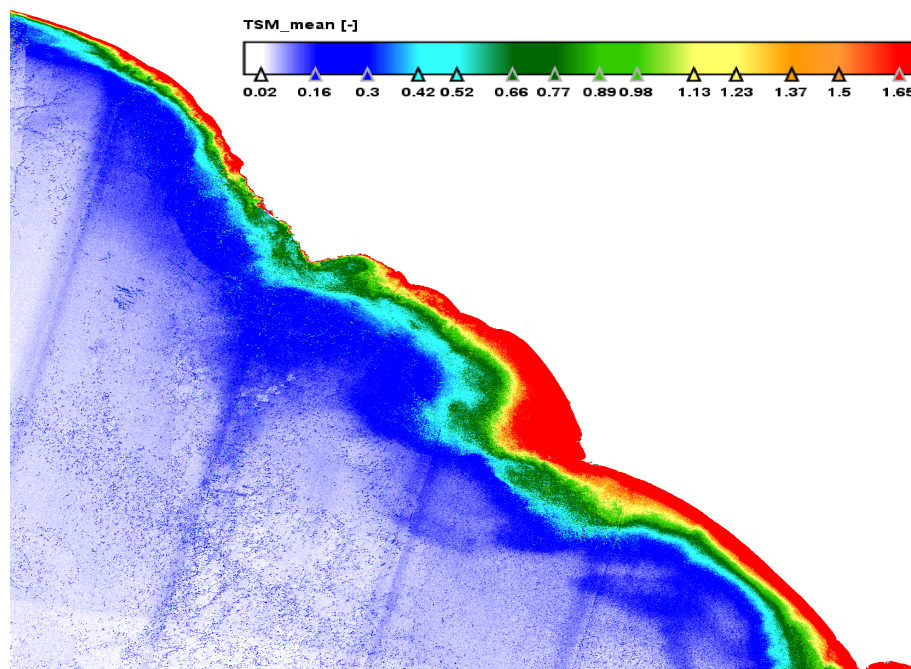


Figura 111 - TSM medio, estate 2023.

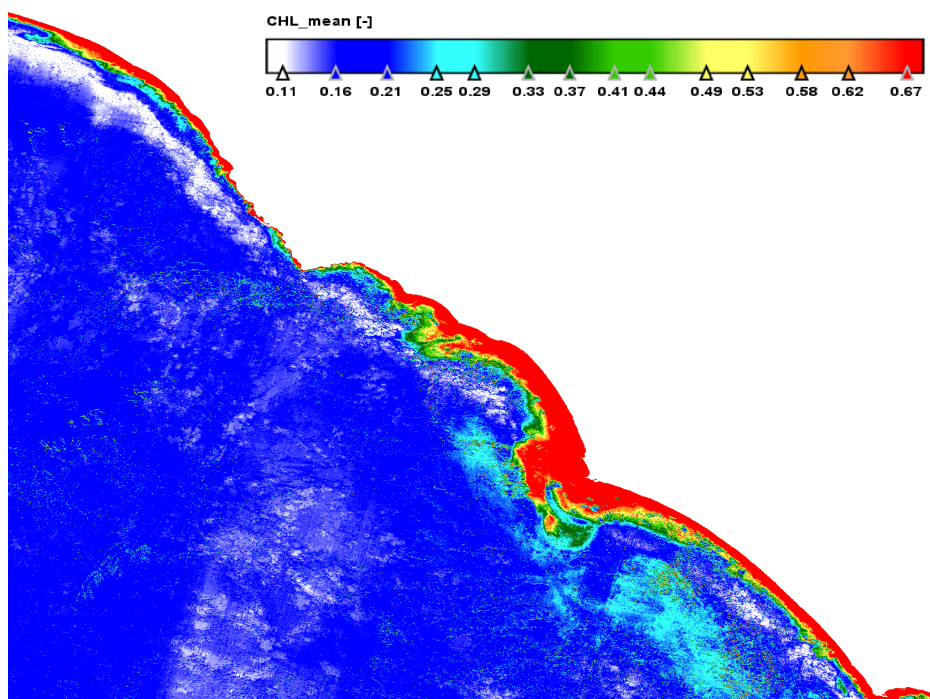


Figura 112 - CHL media, estate 2023.

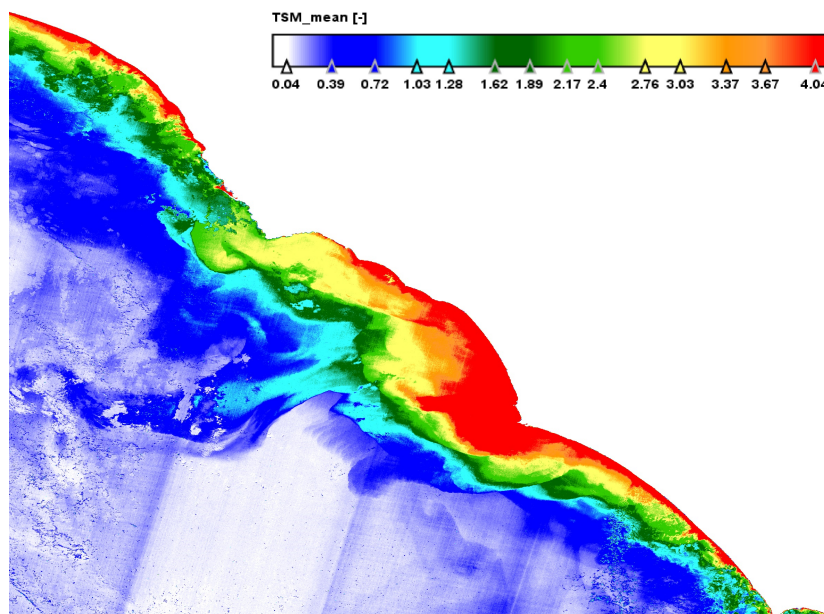


Figura 113 - TSM medio, inverno2021

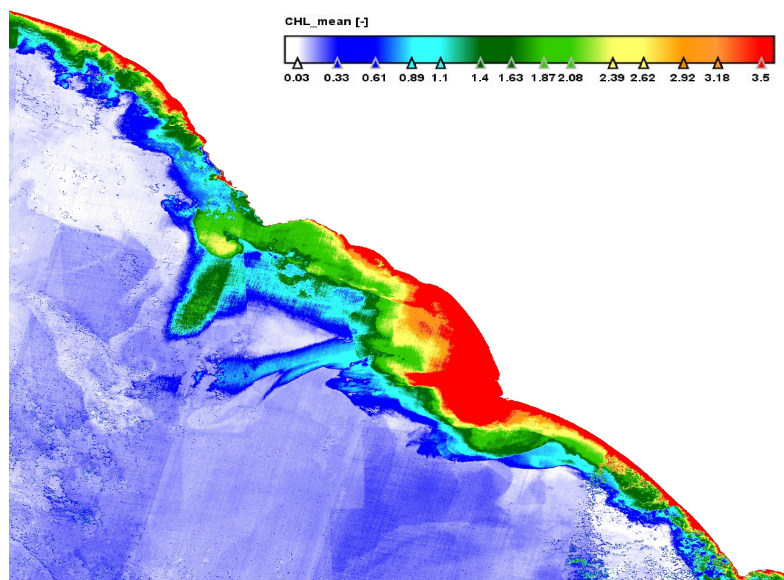


Figura 114 - CHL media, inverno 2021.

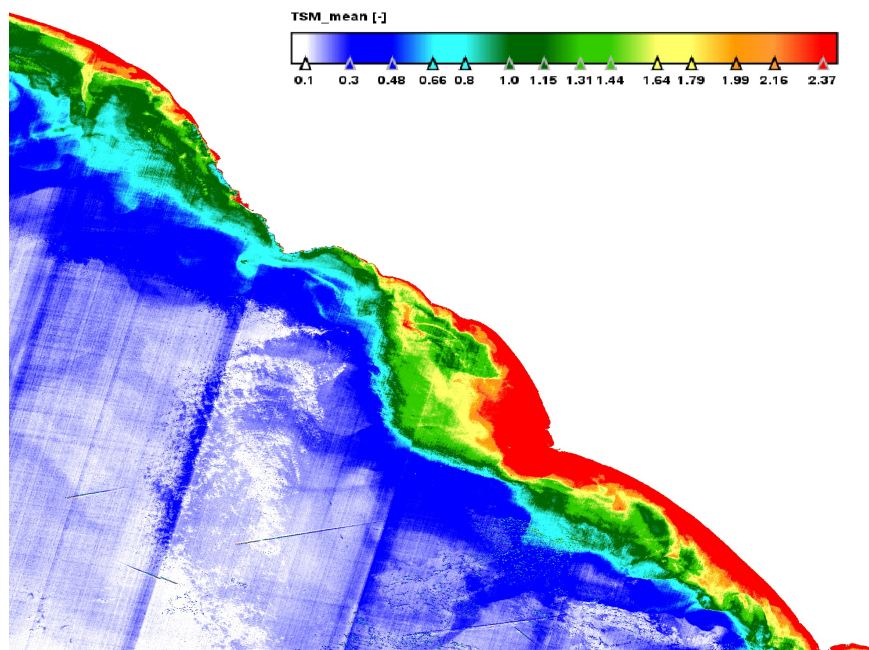


Figura 115 - TSM medio, inverno 2022.

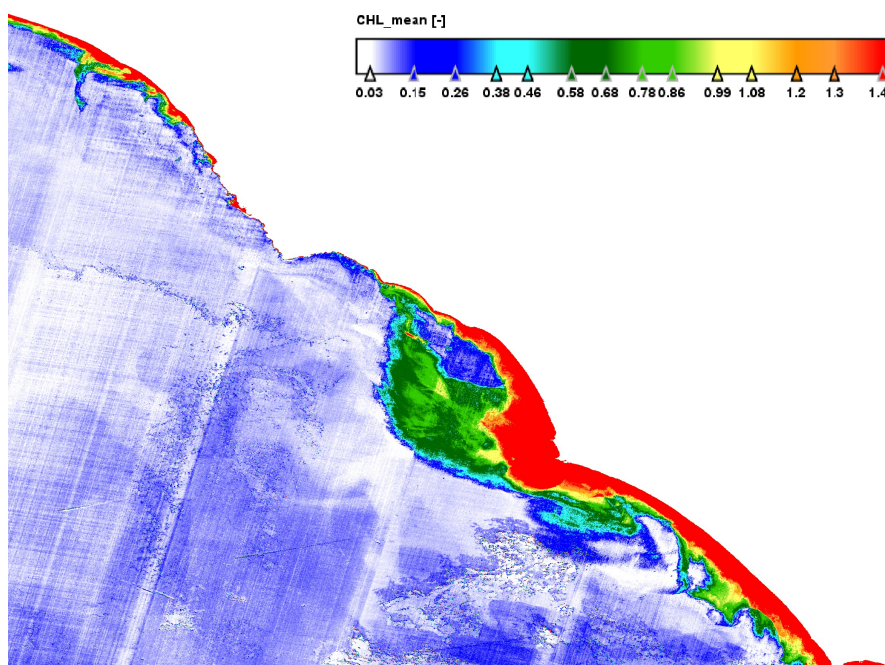


Figura 116 - CHL media, inverno 2022.

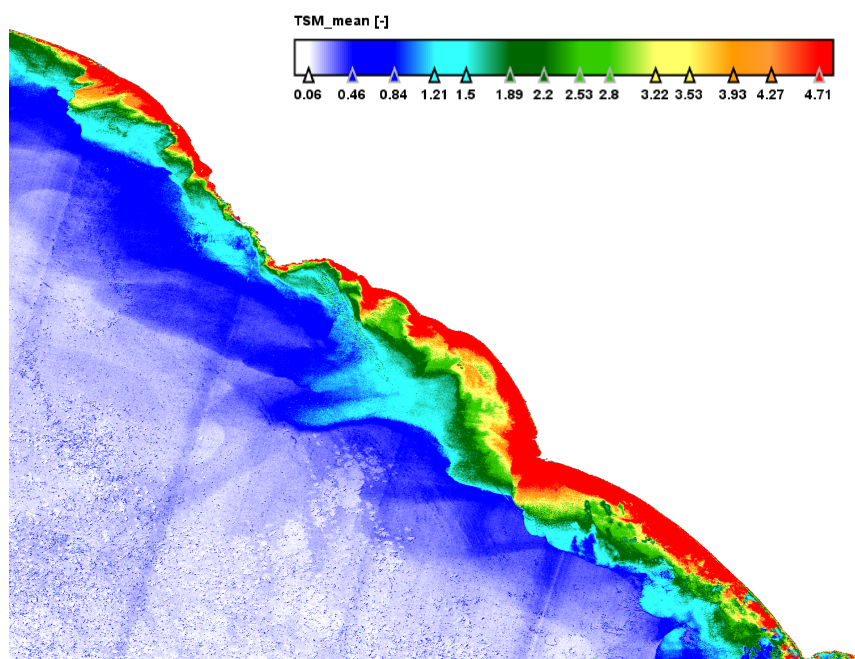


Figura 117 - TSM mediO, inverno 2023 (dicembre 2022-febbraio 2023).

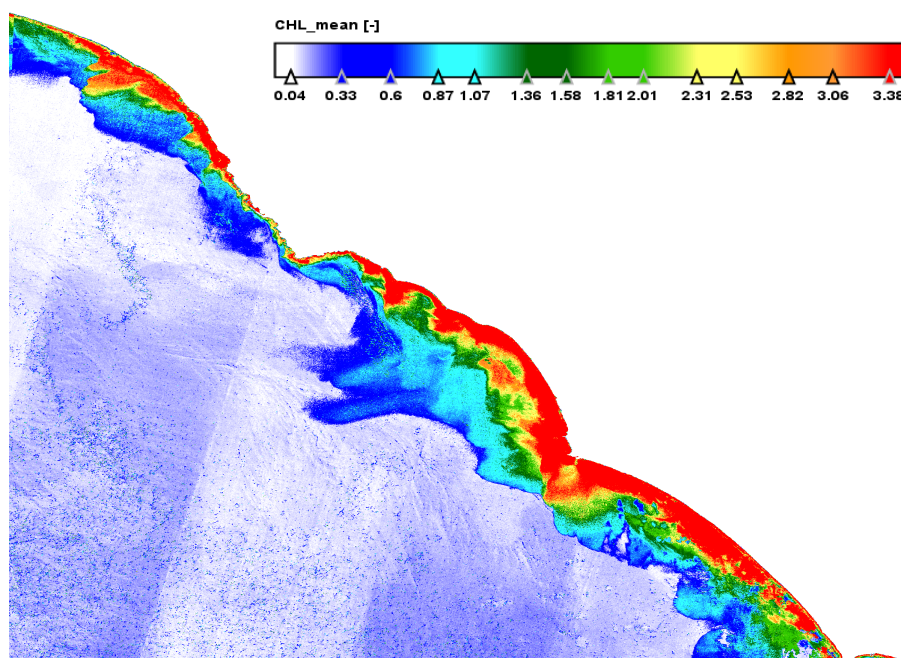


Figura 118 - CHL media, inverno 2023 (dicembre 2022-febbraio 2023).



5.4.2 Analisi della distribuzione della CDOM

La sostanza organica disciolta cromoforica (Chromophoric Dissolved Organic Matter, CDOM) costituisce, insieme al particolato in sospensione ed al fitoplancton, uno dei costituenti otticamente attivi degli ecosistemi marini. Essa rappresenta la frazione della sostanza organica disciolta (DOM) in grado di assorbire la luce nella regione dell'ultravioletto e del visibile, avendo un forte impatto sulla disponibilità della luce lungo la colonna d'acqua e quindi sui processi fotosintetici (Mabit et al., 2022).

La CDOM è dunque un parametro chiave per lo studio dei processi biogeochimici e la valutazione della qualità delle acque, soprattutto in aree costiere interessate dalla presenza di input fluviali, ricche di sostanze organiche disciolte di origine terrestre.

Date le sue proprietà ottiche, la CDOM rappresenta, inoltre, un tracciante della plume fluviale da piattaforme satellitari, consentendo una visione sinottica ad alta risoluzione ed ampia copertura spaziale dei processi idrodinamici fondamentali dell'area oggetto di studio.

Ad oggi lo studio della CDOM in ambiente marino è prevalentemente basata sull'analisi di campioni raccolti in situ, attraverso tecniche analitiche che richiedono lunghi tempi di analisi e costi elevati. Tuttavia, negli ultimi anni, il crescente aumento dell'utilizzo di dati telerilevati ha permesso di ampliare le conoscenze sulla distribuzione e sulla dinamica della CDOM (Slonecker et al., 2016, Cao et al., 2018; Wei et al., 2019), sebbene gli studi riportati in letteratura si concentrino principalmente sulla verifica di ipotesi specifiche o su indagini a scala regionale.

Alla luce di queste considerazioni, le attività progettuali prevedono lo sviluppo di un algoritmo specifico per l'unità fisiografica oggetto di studio, per la quale non sono riportati studi pregressi.

In questa prima fase del progetto è stata effettuata una indagine preliminare per la validazione del dataset di immagini Sentinel-2 utilizzando i dati raccolti in situ durante le campagne oceanografiche svolte nell'area estesa. In particolare, è stato utilizzato un



approccio multibanda che ha previsto il calcolo della CDOM attraverso l'utilizzo dell'algoritmo C2RCC per il calcolo del coefficiente di assorbimento di gelbstoff a 443 nm.

L'equazione usata per il calcolo è la seguente:

$$CDOM = (IOP_A_490 - IOP_A_670) / 2$$

dove

IOP_A = proprietà ottica inerente dell'assorbimento;

IOP_A_490 = coefficiente di assorbimento Sentinel-2 nella banda blu,

IOP_A_670 = coefficiente di assorbimento Sentinel-2 nella banda del rosso.

Al fine di analizzare la relazione statistica tra la CDOM derivata dalle immagini Sentinel-2 e quella ottenuta dall'analisi dei campioni raccolti in situ (Dataset 2020), è stato adottato il metodo di regressione dei minimi quadrati (figura 119). Il coefficiente di correlazione ottenuto (R^2) è di 0,69596, attestando una correlazione statisticamente significativa tra i due set di dati. L'analisi effettuata ha indicato una buona affidabilità dei dati Sentinel-2 per il monitoraggio del parametro CDOM nell'area oggetto di studio. Tuttavia, è necessario condurre ulteriori step di indagine per ridurre al minimo gli errori dovuti alle misure ed alle condizioni atmosferiche, al fine di ottenere un'elevata correlazione tra i set di dati.

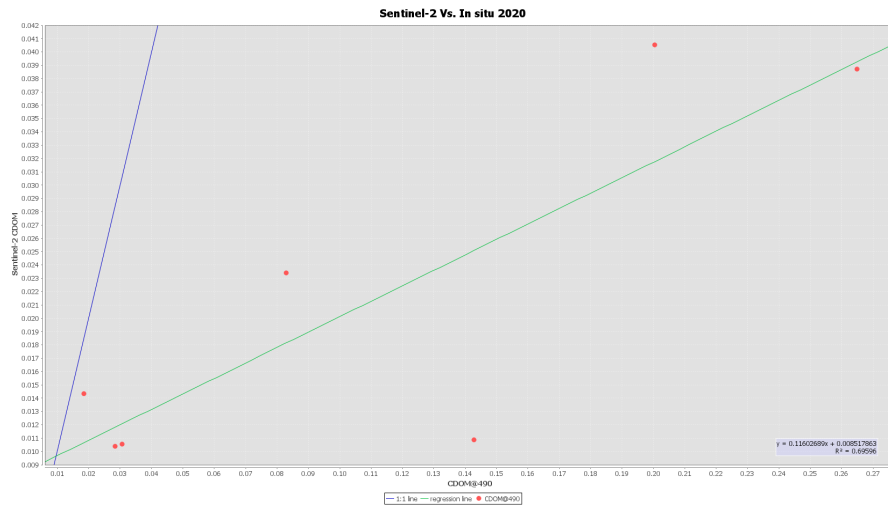


Figura 119 - Regressione dei minimi quadrati tra la CDOM stimata dalle immagini Sentinel-2 e quella ottenuta dai dati in situ (dataset 2020).

Successivamente alla validazione sono state prodotte una serie di mappe al fine di individuare i pattern di distribuzione spazio-temporale specifici per l'area di studio. In particolare, le mappe in figura 120 e 121 mostrano che la variazione della CDOM nelle acque marine presenta un evidente gradiente di concentrazione che aumenta da costa verso largo, con valori massimi in corrispondenza dell'area interessata dalla foce del fiume Tevere. Si osserva inoltre che la produzione di CDOM in mare è strettamente correlata alla presenza delle acque fluviale; tuttavia, la sua distribuzione è strettamente influenzata dalle condizioni meteo oceanografiche e dai processi dinamici.

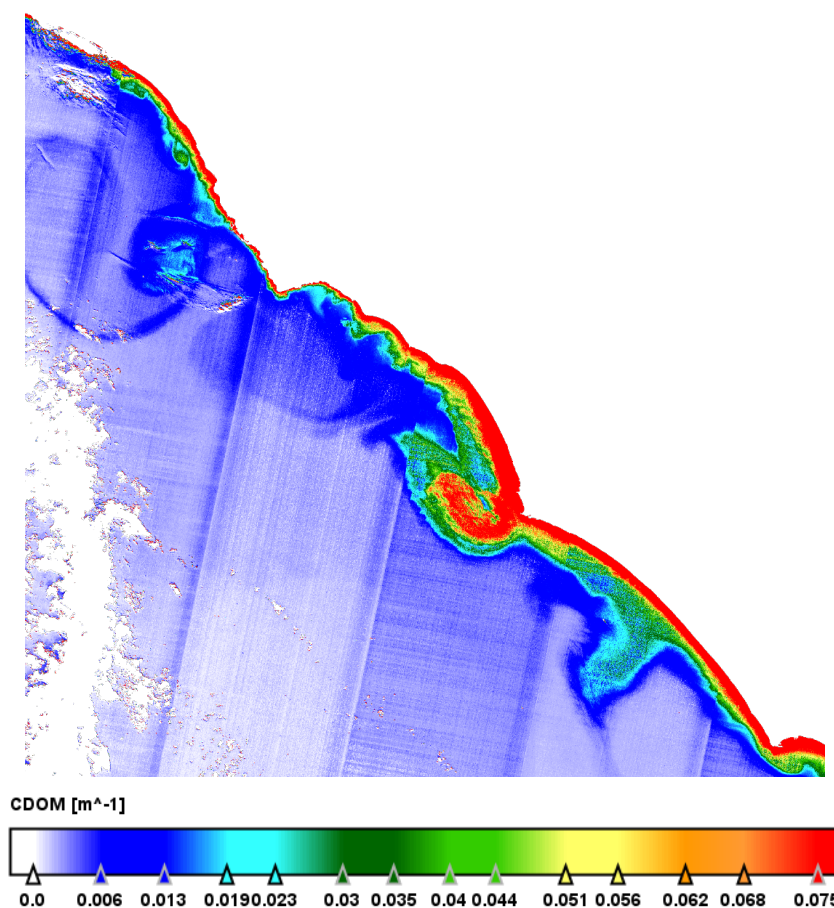


Figura 120 -Mappa di distribuzione della CDOM nell'area oggetto di studio (immagine Sentinel-2, 09 settembre 2020).

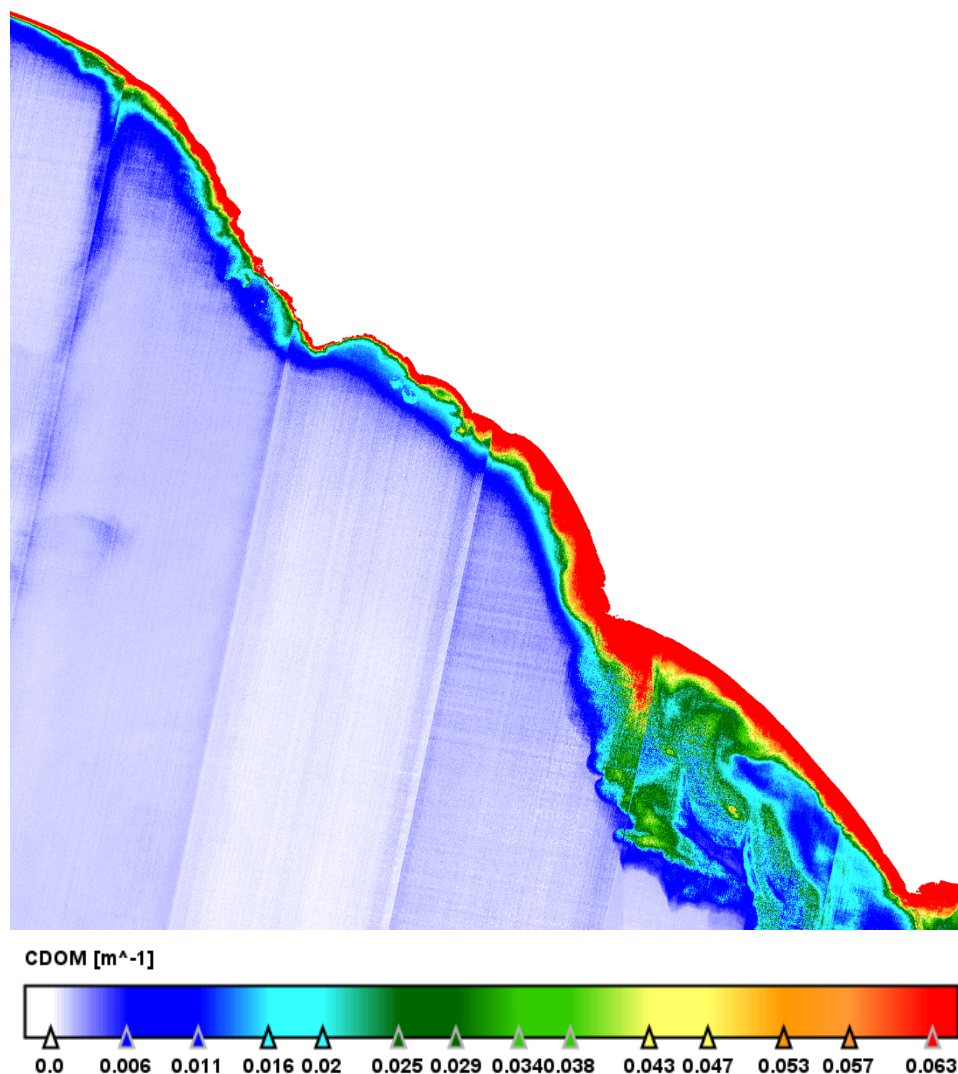


Figura 121 - Mappa di distribuzione della CDOM nell'area oggetto di studio (immagine Sentinel-2, 17 settembre 2020).

5.5 Stazione fissa di misura della torbidità

Ad integrazione di quanto previsto per la valutazione di eventuali variazioni breve-medio termine nell'area limitrofa alle nuove opere, è stata installata una stazione fissa di misura della torbidità sulla foce di 'Fiumara Piccola' a Fiumicino, come riportato in figura 122.

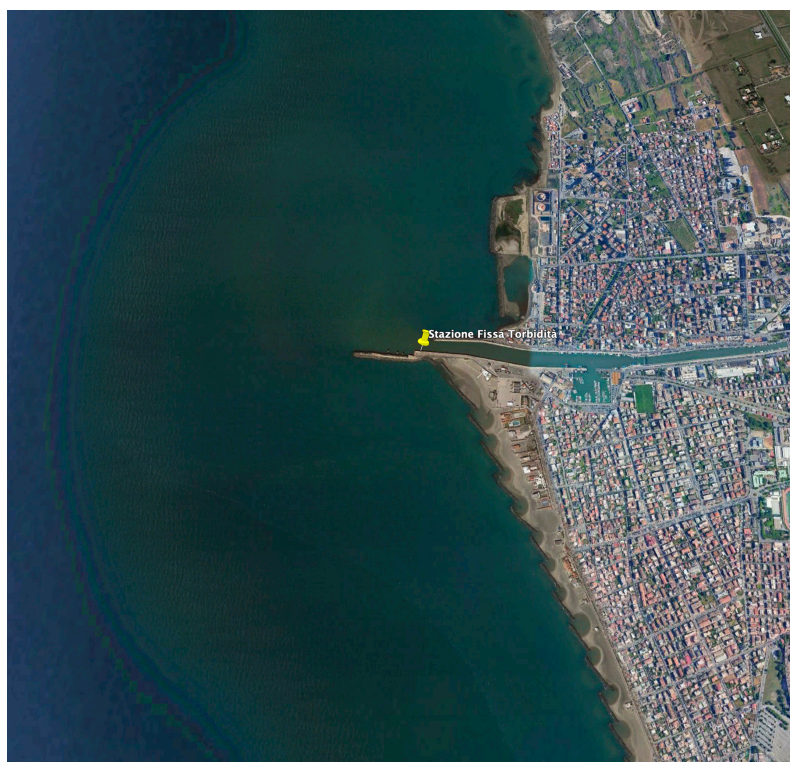


Figura 122 -Punto di installazione della stazione fissa di torbidità.

La stazione fissa è composta da un sensore di torbidità immerso attraverso un braccio che lungo la banchina raggiunge la superficie delle acque sottostanti. Il sensore è connesso ad un datalogger riposto all'interno di un contenitore IP67 ed è alimentato da una batteria caricata attraverso un pannello solare. Il sistema acquisisce 30 dati ogni 20 minuti che vengono processati per poter trasmettere un dato nello stesso intervallo di tempo.

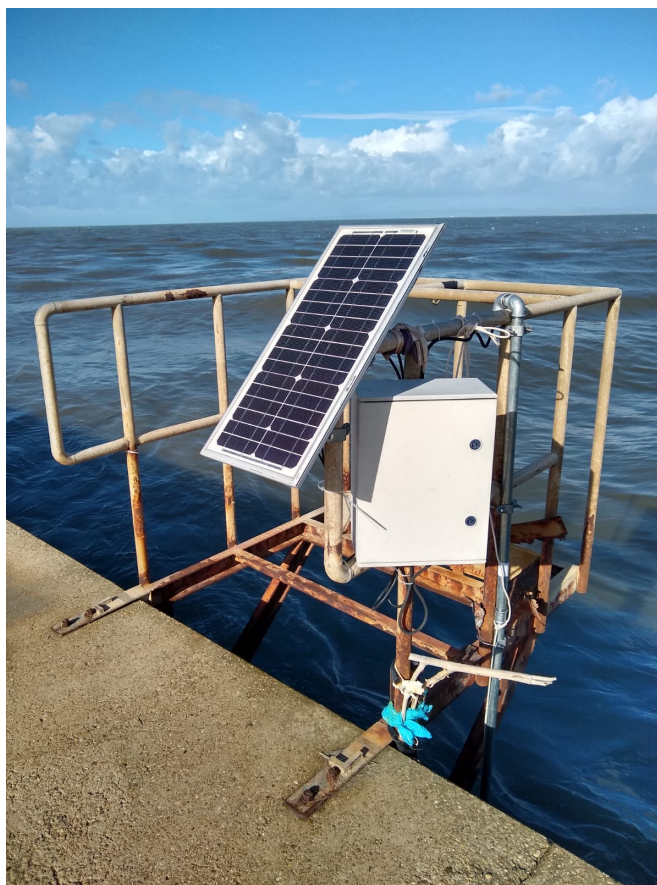


Figura 123 -Componenti di alimentazione e gestione della sensoristica e della trasmissione dati della Stazione Fissa di Torbidità.

La stazione è stata installata e messa in funzione nel periodo compreso tra il 01.08.2022 e il 09.11.2022 al fine di acquisire dati in differenti condizioni e stagioni e poter calcolare il 90° percentile, pari a 66.14 mg/l, che consentirà di impostare il limite corretto al di sopra del quale dovranno mantenersi i valori durante le fasi di Cantiere. In questo modo sarà possibile implementare un Early Warning System che consentirà di limitare gli impatti del dragaggio e consentirà di discriminare tra la sorgente naturale e quella antropica.

Il calcolo del 90° percentile è stato fatto sulla base del DM 173/2016 che prescrive che "nella fase "ante operam" occorre individuare un valore di riferimento relativo alla torbidità e/o concentrazione dei solidi sospesi nella colonna d'acqua, corrispondente al 90° percentile del set di misure sufficientemente ampio da risultare rappresentativo della



variabilità dell'area, qualora non sia desumibile da letteratura o da indagini pregresse, o diversamente stabilito dal Piano di monitoraggio che deve anche prevedere le opportune misure da intraprendere in caso di difformità."

Durante il periodo di funzionamento della stazione di torbidità sono stati effettuati una serie di campionamenti di acqua superficiale in corrispondenza del sensore, che hanno consentito di calibrare la strumentazione e di convertire il valore acquisito da NTU a mg/l, con un coefficiente di regressione pari a 0.95.

Di seguito viene riportato il grafico di tutti i dati acquisiti nel periodo in oggetto, che sono visibili e interrogabili attraverso il Geoportale online dell'AdSP.

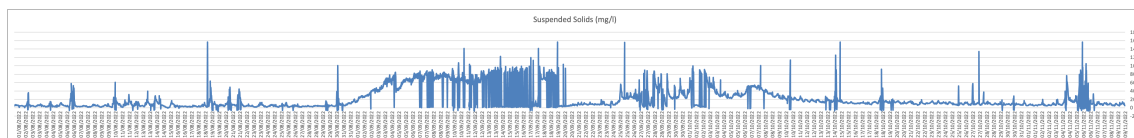


Figura 124 - Grafico dell'andamento della torbidità nel tempo.



6. STUDIO DELLA SPIAGGIA SOMMERSA, EMERSA E DEL RATEO DEPOSIZIONALE

6.1 Caratterizzazione della spiaggia sommersa

6.1.1 Profili spiaggia sommersa area di Fiumicino

È stata effettuata n.1 campagna di caratterizzazione morfologica dei fondali antistanti l'area di Fiumicino. In particolare, sono stati effettuati rilievi morfologici lungo n.5 transetti, come previsto dal programma esecutivo di monitoraggio. I transetti (da INT7 a INT10) sono stati distribuiti ad intervalli regolari rispetto a quelli effettuati durante la Fase 0 del progetto, in modo da ottenere una maggior copertura di dati utilizzabili per i modelli numerici (Figura 125).

I dati acquisiti sono stati elaborati considerando l'effetto del rollio e del beccheggio dell'imbarcazione durante le acquisizioni (Pitch and Roll) ed è stato considerato l'effetto della marea, utilizzando i dati disponibili acquisiti dai due mareografi più vicini facenti parte della rete mareografica nazionale (Civitavecchia ed Anzio).

In figura 126 sono riportati i profili morfologici acquisiti durante la campagna. I profili sono rappresentati in funzione della distanza progressiva da costa.

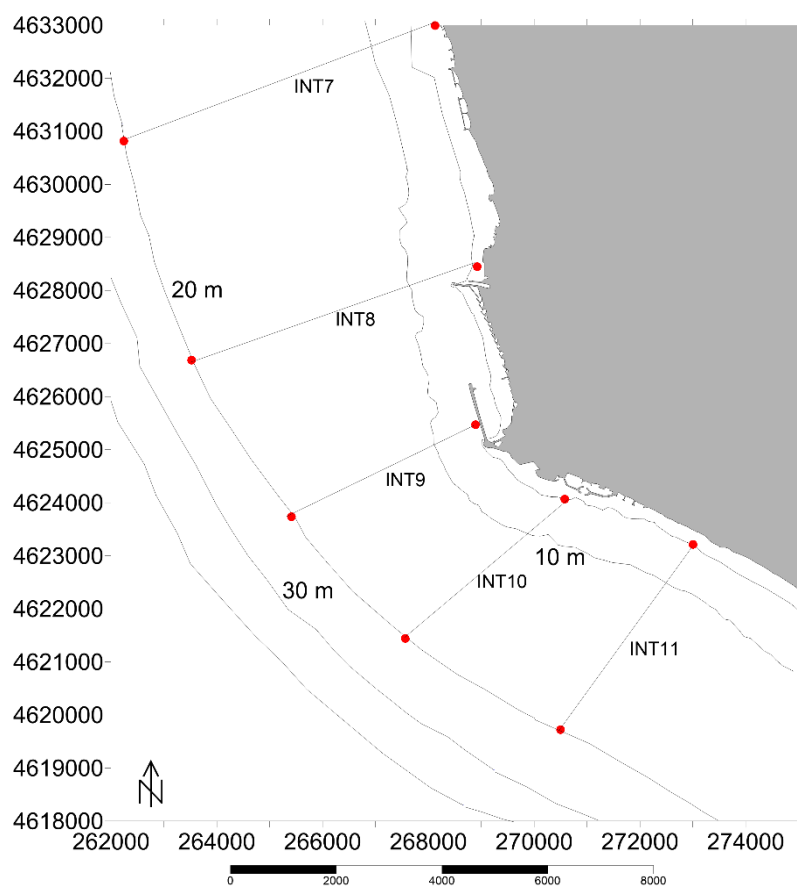


Figura 125 - Ubicazione dei transetti per l'indagine della morfologia della spiaggia sommersa (UTM, WGS84).

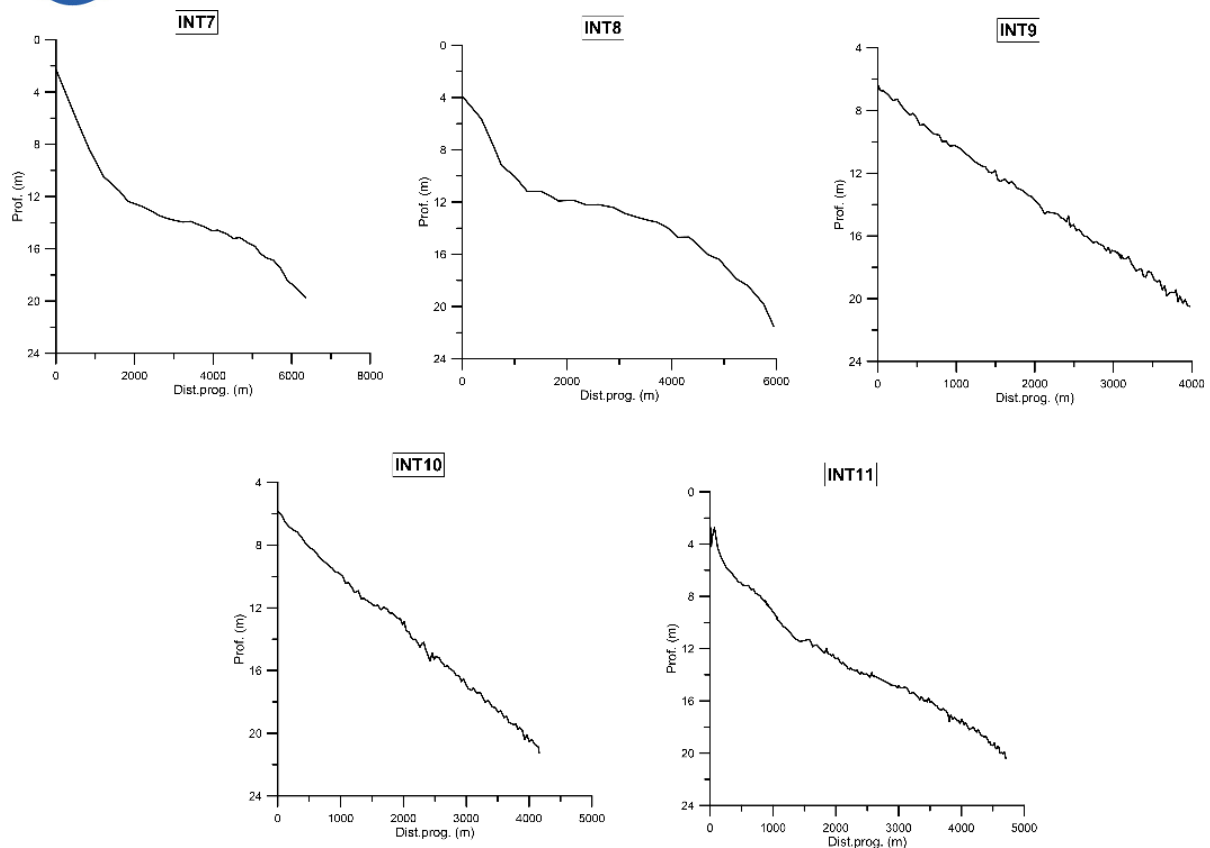


Figura 126 - Profili morfologici acquisiti durante le due campagne di misura.

6.1.2 Profili della spiaggia sommersa lungo l'area estesa

Sono state effettuate n.3 campagne di misure morfologiche dei fondali lungo l'area estesa, per un totale di 26 transetti così suddivisi:

- n.8 transetti durante la campagna estiva 2020 (figura 127);
- n.8 transetti durante la campagna invernale 2021 (figura 127);
- n.10 transetti durante una terza campagna di misure morfologiche a scopo integrativo effettuata durante il 2021 (figura 128).

I transetti situati alle estremità dell'area di indagine (Capo Linaro, Capo Anzio) sono caratterizzati da fondali prevalentemente rocciosi; questi transetti sono stati rappresentati una sola volta in quanto non è stata evidenziata discrepanza morfologica rilevante tra la campagna estiva 2020 ed invernale 2021.

I dati acquisiti sono stati elaborati considerando l'effetto del rollio e del beccheggio dell'imbarcazione durante le acquisizioni (Pitch and Roll) ed è stato considerato l'effetto della marea, utilizzando i dati disponibili acquisiti dai due mareografi più vicini facenti parte della rete mareografica nazionale (Civitavecchia ed Anzio).

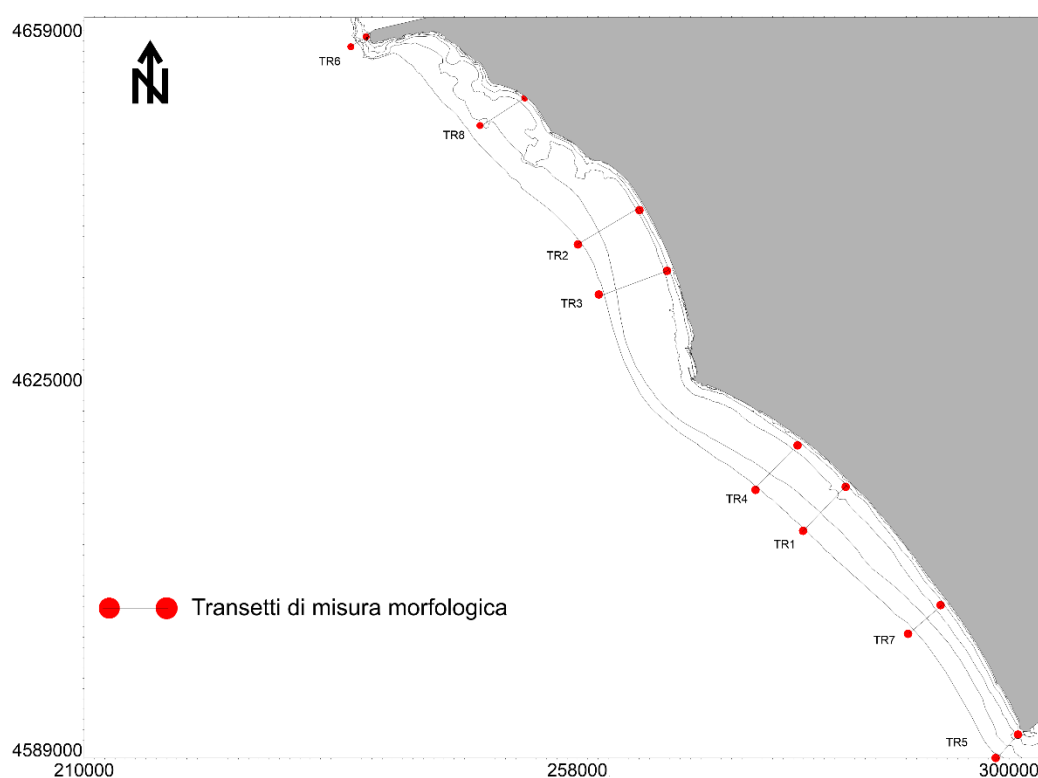


Figura 127 -Ubicazione dei transetti per l'indagine della morfologia della spiaggia sommersa, campagne estiva 2020 ed invernale 2021 (UTM, WGS84).

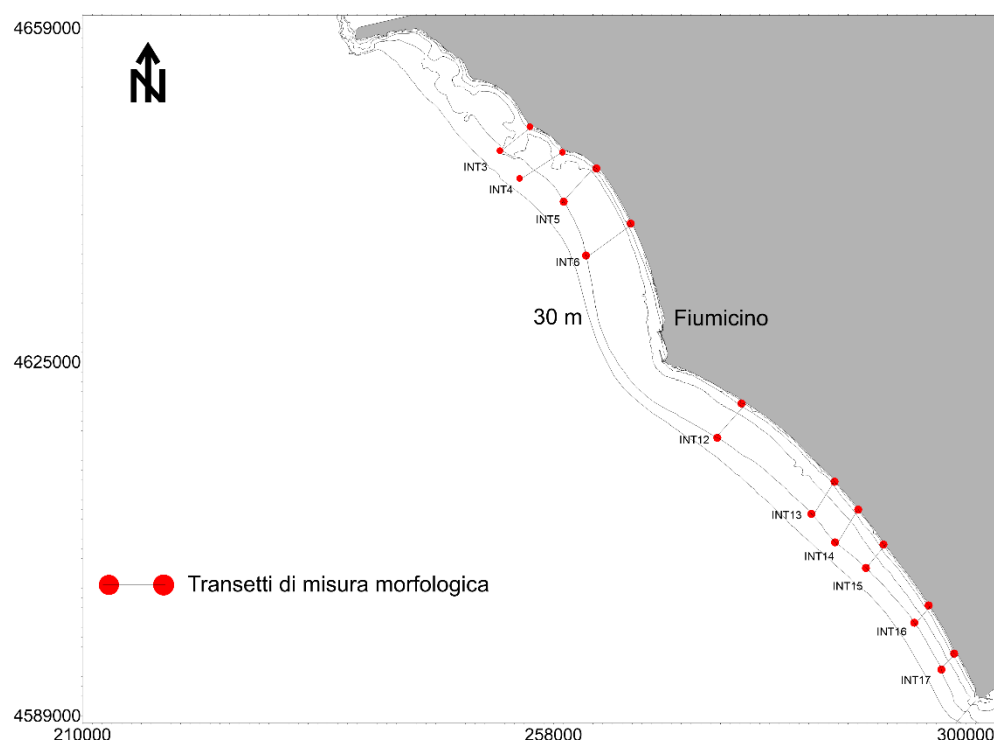


Figura 128 -Ubicazione dei transetti per l'indagine della morfologia della spiaggia sommersa, campagna integrativa (UTM, WGS84).

In figura 129 sono riportati i profili morfologici sovrapposti acquisiti durante la campagna estiva 2020 ed invernale 2021. In figura 130 sono riportati i profili morfologici acquisiti durante la campagna integrativa 2021. I profili sono rappresentati in funzione della distanza progressiva da costa.

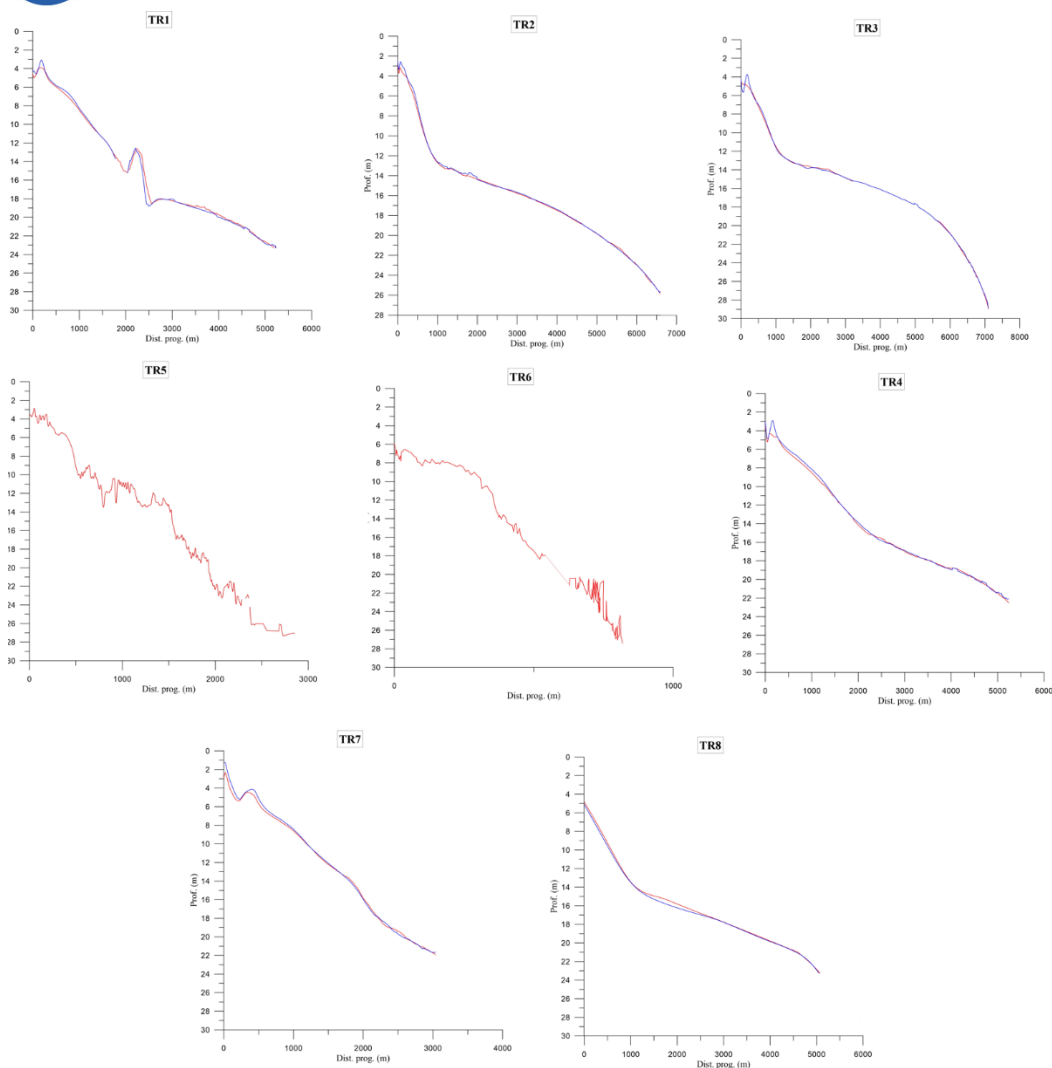


Figura 129 - Profili morfologici acquisiti durante le due campagne di misura, estiva 2020 (linea rossa) Invernale 2021 (linea blu).

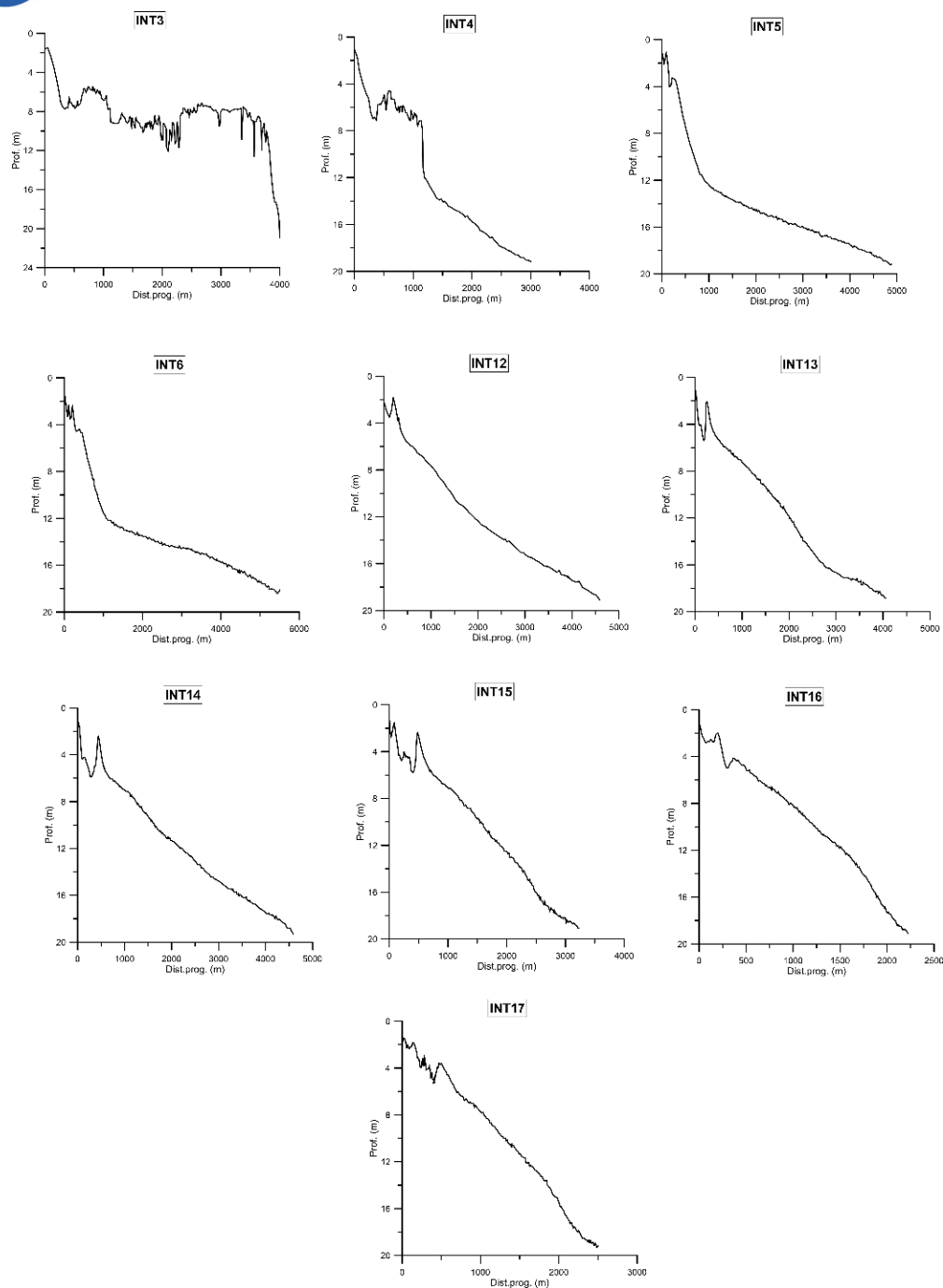


Figura 130 -Profili morfologici acquisiti durante la campagna integrativa 2021.

6.1.3 Campionamenti della spiaggia sommersa

Congiuntamente alle due campagne di misura di morfologia della spiaggia sommersa nell'area prossima a Fiumicino (Transetti FASE 0), sono stati effettuati i campioni di sedimento superficiale previsti nel cronoprogramma delle attività ante operam. Nel dettaglio, sono stati effettuati n.3 campionamenti lungo n.5 transetti, in due stagioni (agosto 2020 e gennaio 2021), per un totale di 30 campioni di sedimento. I campioni di sedimento superficiale sono stati prelevati alle profondità di 2 m, 5 m e 10 m (Figura 131), per un totale di 30 campioni.

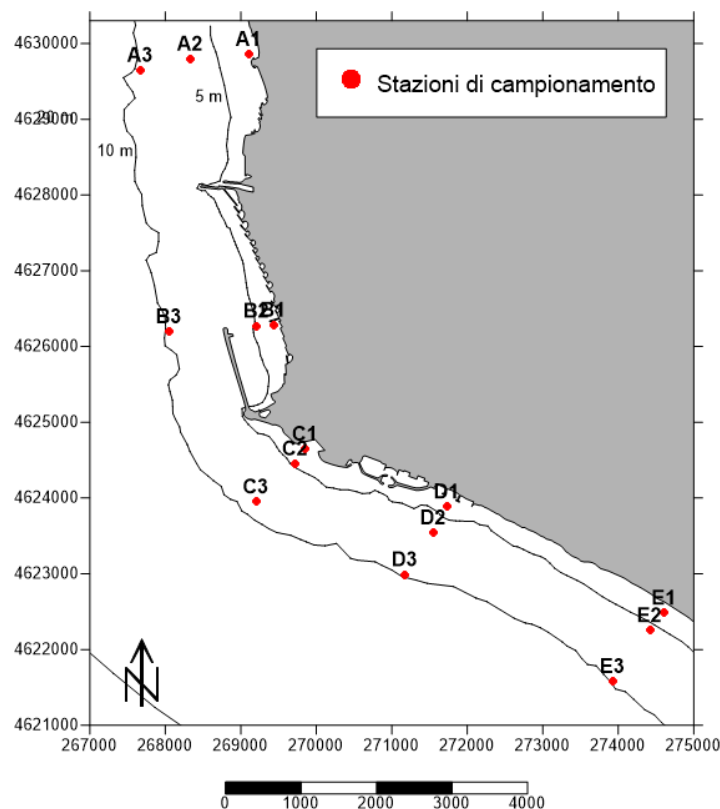


Figura 131 - Ubicazione delle stazioni di campionamento dei sedimenti superficiali (UTM, WGS84) nell'area prossima a Fiumicino.

Inoltre, per quanto riguarda l'area estesa, è stata effettuata n.1 campagna di campionamento di sedimenti, durante la quale sono stati prelevati campioni di sedimento superficiale alle profondità di 2, 5 e 10 m lungo gli 8 transetti nei quali sono state effettuate le indagini morfologiche descritte nel paragrafo 5.1.2 (Figura 132).

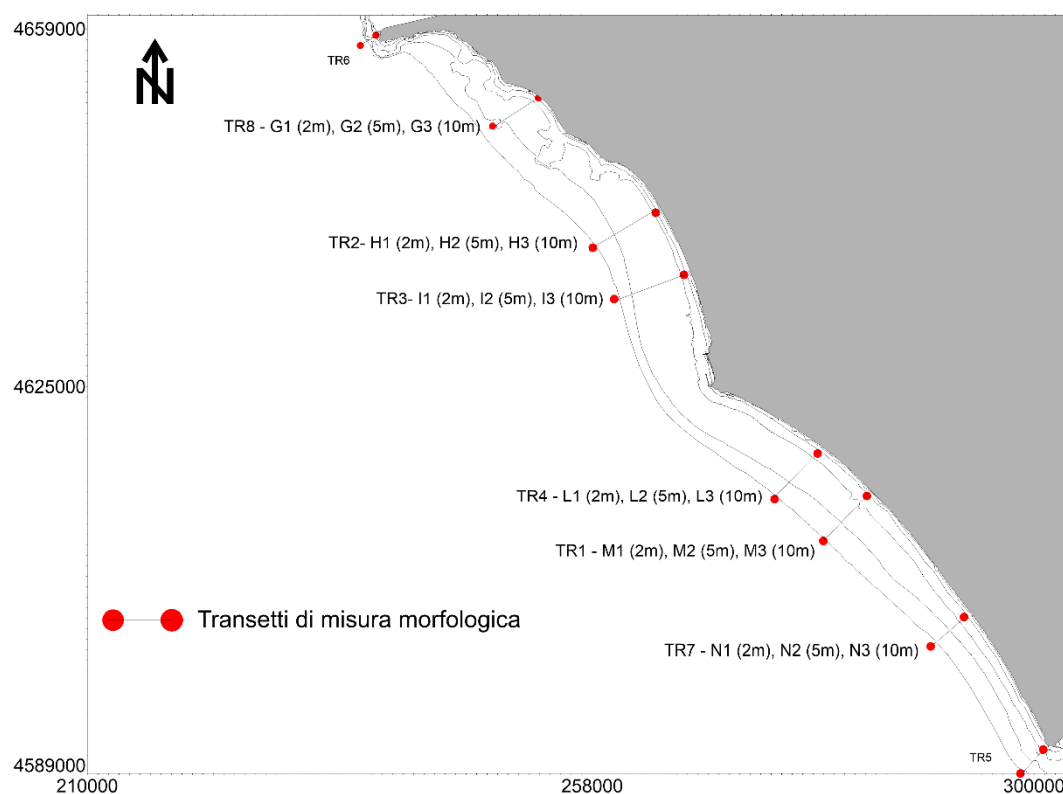


Figura 132 - Figura xx. Ubicazione delle stazioni di campionamento dei sedimenti superficiali (UTM, WGS84) nell'area estesa, rispetto ai transetti di misura morfologica.

Il campionamento dei sedimenti superficiali è stato effettuato attraverso un campionatore a gravità, come riportato nel Decreto 15 luglio 2016, n. 173 (ex art 109, comma 2 del D. lgs 152/06) “Regolamento recante modalità e criteri tecnici per l'autorizzazione all'immersione in mare dei materiali di escavo di fondali marini”. Una volta trasportati (a 4°C) in laboratorio, i sedimenti destinati all'analisi granulometrica sono stati asciugati in stufa a 40°C per 48 h e pestellati per le successive analisi.



I sedimenti asciutti sono stati sottoposti ad analisi granulometrica mediante setacciatura meccanica (ASTM D6913/D6913M). Nel dettaglio, per ogni campione sono stati pesati circa 100 g di sedimento e posti in un setaccio meccanico con un intervallo di maglie decrescente di 1 phi (da -1 phi a 4 phi). I sedimenti sono stati agitati per 15 minuti. Successivamente il materiale trattenuto in ciascun setaccio è stato pesato con bilancia analitica. Per ogni campione, sono state eseguite due repliche di setacciatura. I campioni sono stati analizzati dal punto di vista granulometrico. In particolare, sono state ricavate le abbondanze percentuali di ghiaie ($x > 2000 \mu\text{m}$), sabbie ($2000 \mu\text{m} < x < 63 \mu\text{m}$) e fanghi ($x < 63 \mu\text{m}$), ed è stata effettuata l'analisi della frazione sabbiosa ($2000 \mu\text{m} < x < 63 \mu\text{m}$) mediante setacciatura meccanica (ASTM D6913/D6913M). Nel dettaglio, sono state eseguite due repliche analitiche per ogni campione, per un totale di 60 analisi granulometriche.

Negli allegati 1A e 1B al presente documento vengono riportate le coordinate di tutti i campioni di sedimento prelevati nell'area prossima a Fiumicino e nell'area estesa, le curve granulometriche cumulate della frazione sabbiosa di ogni campione, ed una scheda comprensiva di statistica (Folk and Ward, 1957).

In tabella 10 e tabella 11 sono riportate le percentuali medie di ghiaie ($x > 2000 \mu\text{m}$), sabbie ($2000 \mu\text{m} < x < 63 \mu\text{m}$) e fanghi ($x < 63 \mu\text{m}$) dei campioni di sedimento prelevati nei 15 siti di campionamento, sia per quanto riguarda la stagione estiva (agosto 2020) sia per la stagione invernale (gennaio 2021). In figure 133 e 134 sono riportate le curve di frequenza relativa delle due campagne di campionamento suddette.

Tabella 10 - Percentuali medie e deviazioni standard di ghiaie, sabbie e fanghi dei campioni prelevati durante la stagione estiva (agosto 2020).

Stazioni	A1		A2		A3	
	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.
Ghiaie	0.27	0.03	0.18	0.02	0.31	0.13
Sabbie	99.59	0.03	99.19	0.26	95.73	1.45
Fanghi	0.14	0.06	0.63	0.28	3.95	1.33
	B1		B2		B3	
	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.
Ghiaie	0.26	0.17	0.26	0.03	0.01	0.02
Sabbie	99.68	0.23	98.63	0.12	99.96	0.01
Fanghi	0.06	0.06	1.11	0.15	0.03	0.02
	C1		C2		C3	
	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.
Ghiaie	0.12	0.06	0.43	0.17	0.51	0.12
Sabbie	99.83	0.06	99.54	0.18	97.71	0.37
Fanghi	0.05	0.00	0.02	0.01	1.78	0.49
	D1		D2		D3	
	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.
Ghiaie	1.27	0.31	0.03	0.04	0.02	0.03
Sabbie	98.68	0.28	92.85	0.26	99.97	0.03
Fanghi	0.05	0.03	7.12	0.31	0.01	0.00
	E1		E2		E3	
	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.	% media	Dev. st.
Ghiaie	0.66	0.57	0.53	0.55	0.07	0.04
Sabbie	99.32	0.54	99.03	0.47	99.09	0.02
Fanghi	0.02	0.02	0.45	0.08	0.84	0.06

Tabella 11 - Percentuali medie e deviazioni standard di ghiaie, sabbie e fanghi dei campioni prelevati durante la stagione invernale (gennaio 2021).

Stazioni	A1		A2		A3	
	% media	Dev.st	% media	Dev.st	% media	Dev.st
Ghiaie	0.35	0.02	0.00	0.01	0.05	0.00
Sabbie	99.36	0.08	95.46	0.71	96.94	0.59
Fanghi	0.29	0.06	4.54	0.70	3.01	0.58
	B1		B2		B3	
	% media	Dev.st	% media	Dev.st	% media	Dev.st
Ghiaie	0.21	0.14	0.01	0.02	0.00	0.00
Sabbie	99.58	0.25	97.57	0.48	75.73	5.25
Fanghi	0.21	0.10	2.41	0.50	24.27	5.25
	C1		C2		C3	
	% media	Dev.st	% media	Dev.st	% media	Dev.st
Ghiaie	0.06	0.04	0.22	0.01	0.37	0.04
Sabbie	96.13	0.51	97.79	0.01	98.39	0.02
Fanghi	3.81	0.55	2.00	0.02	1.24	0.05
	D1		D2		D3	
	% media	Dev.st	% media	Dev.st	% media	Dev.st
Ghiaie	0.05	0.00	2.38	1.17	3.29	0.37
Sabbie	99.14	0.17	93.90	0.80	96.21	0.26
Fanghi	0.81	0.18	3.72	0.36	0.50	0.11
	E1		E2		E3	
	% media	Dev.st	% media	Dev.st	% media	Dev.st
Ghiaie	0.15	0.04	0.81	0.54	0.07	0.03
Sabbie	99.81	0.09	98.35	0.35	98.56	0.25
Fanghi	0.04	0.05	0.83	0.19	1.37	0.29

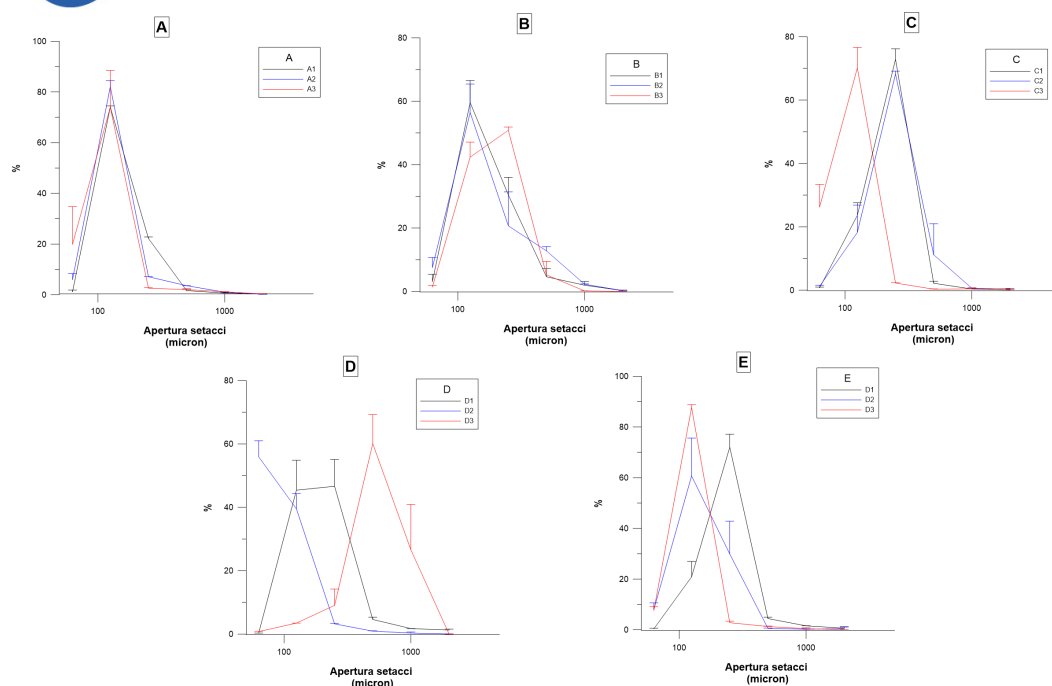


Figura 133 - Curve di frequenza relativa dei campioni prelevati durante la stagione estiva (agosto 2020).

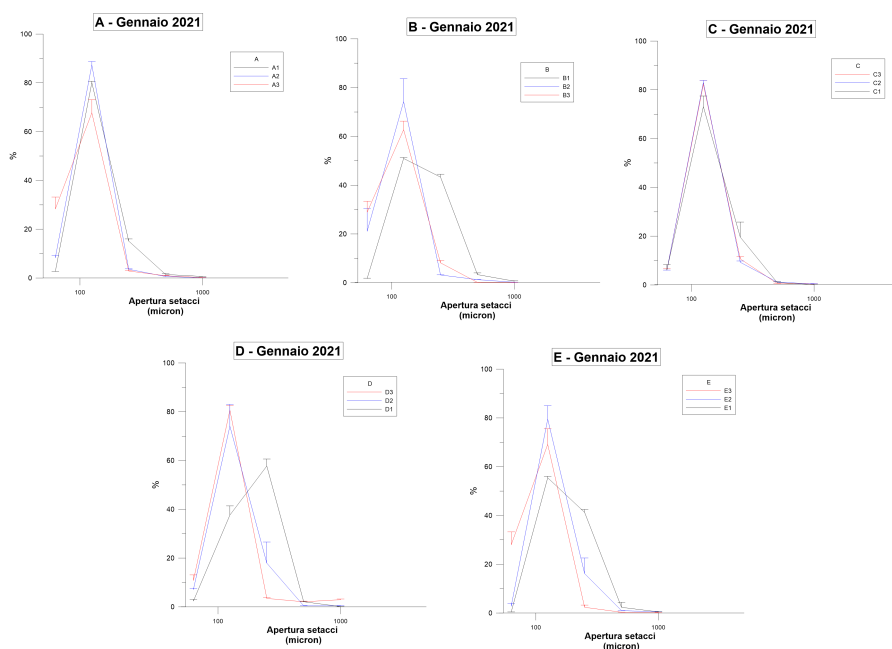


Figura 134 - Curve di frequenza relativa dei campioni relativi alla stagione invernale (gennaio 2021).

In tabella 12 sono riportate le percentuali medie di ghiaie ($x > 2000 \mu\text{m}$), sabbie ($2000 \mu\text{m} < x < 63 \mu\text{m}$) e fanghi ($x < 63 \mu\text{m}$) dei campioni di sedimento prelevati nei siti di campionamento ubicati nell'area di campionamento estesa. In figura 135 sono riportate le curve di frequenza relativa della campagna di campionamento.

Tabella 12 - Percentuali medie e deviazioni standard di ghiaie, sabbie e fanghi dei campioni prelevati a 2, 5, e 10 m lungo nell'area estesa.

	G1		G2		G3	
	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.
Ghiaie%	0.28	0.01	0.04	0	2.23	0.31
Sabbie%	99.64	0.07	97.77	1.09	94.79	0.81
Fanghi%	0.07	0.06	2.19	1.09	2.98	0.5
	H1		H2		H3	
	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.
Ghiaie%	0.96	0.12	0.61	0.29	0.45	0.1
Sabbie%	98.98	0.03	99.33	0.32	99.05	0.18
Fanghi%	0.06	0.09	0.06	0.02	0.5	0.08
	I1		I2		I3	
	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.
Ghiaie%	0.34	0.06	0.38	0.28	0.26	0.08
Sabbie%	99.66	0.06	99.59	0.26	99.47	0.16
Fanghi%	0.01	0.01	0.03	0.03	0.27	0.08
	L1		L2		L3	
	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.
Ghiaie%	0.37	0.03	0.37	0.33	0.86	0.26
Sabbie%	99.61	0	99.63	0.32	98.88	0.44
Fanghi%	0.02	0.03	0	0	0.26	0.18
	M1		M2		M3	
	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.
Ghiaie%	0.39	0.16	0.5	0.3	0.14	0.2
Sabbie%	99.59	0.13	99.44	0.38	99.85	0.2
Fanghi%	0.02	0.03	0.05	0.08	0.01	0
	N1		N2		N3	
	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.
Ghiaie%	0.14	0	0.48	0.09	0.17	0.01
Sabbie%	99.79	0.03	99.2	0.12	99.49	0.02
Fanghi%	0.07	0.03	0.33	0.03	0.34	0.01

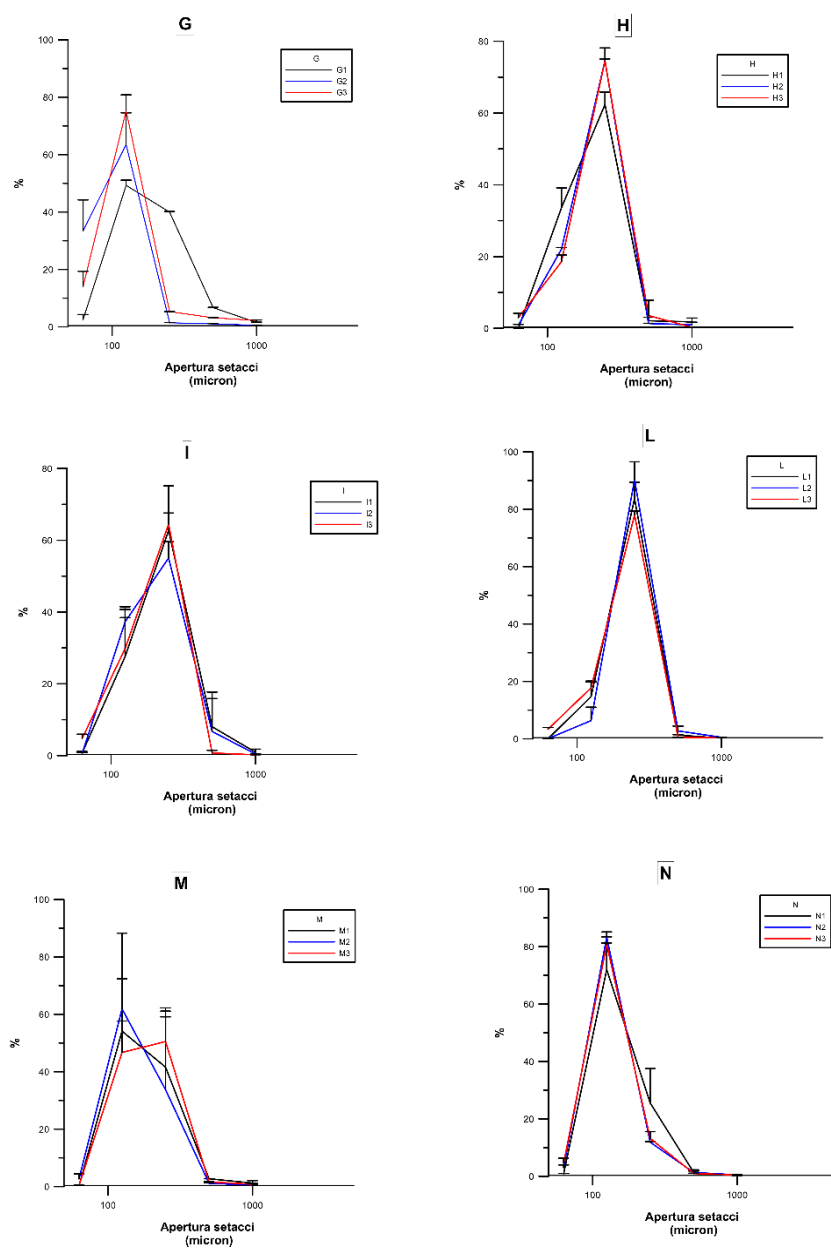


Figura 135 - Curve di frequenza relativa dei campioni prelevati lungo l'area estesa.

6.1.4 Campionamenti del sedimento per granulometrie in corrispondenza delle stazioni di benthos

Sono stati prelevati n.28 campioni di sedimento, disposti alle profondità di 2, 5, 10, 20 e 30 m, durante l'estate 2021 e sottoposti ad analisi granulometrica. In figura 136 viene riportata l'ubicazione delle stazioni di campionamento. I sedimenti sono stati prelevati mediante benna Van Veen. Nell'allegato 1C, che sarà riportato nella relazione Fase finale, saranno riportate le curve granulometriche cumulate della frazione sabbiosa di ogni campione, ed una scheda comprensiva di statistica (Folk and Ward, 1957).

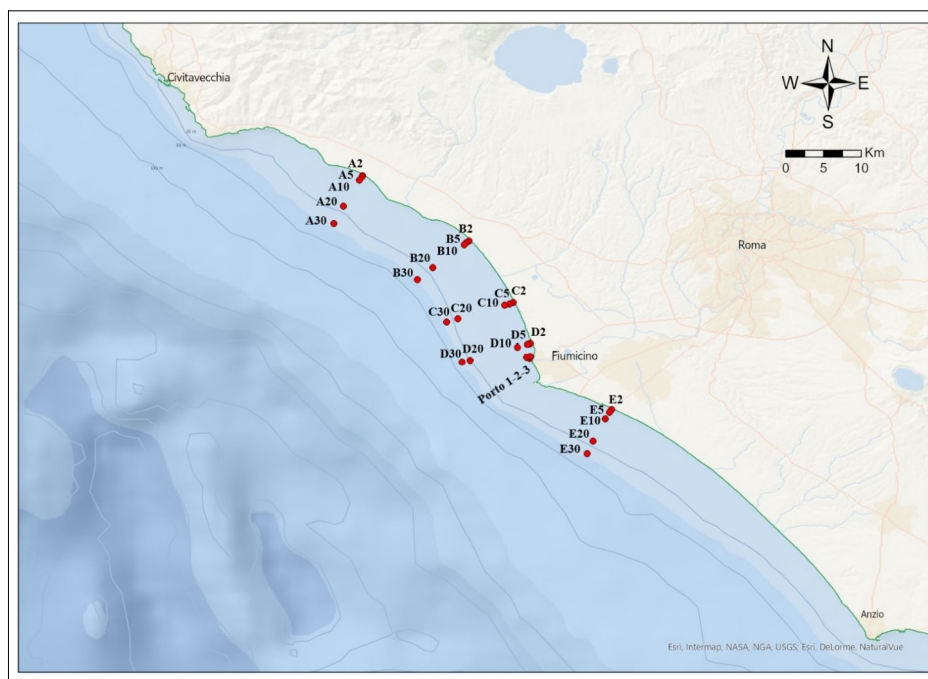


Figura 136 - Piano di campionamento.

Una volta trasportati (a 4°C) in laboratorio, i sedimenti destinati all'analisi granulometrica sono stati asciugati in stufa a 40°C per 48 h e pestellati per le successive analisi.

I sedimenti asciutti sono stati sottoposti ad analisi granulometrica mediante setacciatura meccanica (ASTM D6913/D6913M). Nel dettaglio, per ogni campione sono stati pesati circa 100 g di sedimento e posti in un setaccio meccanico con un intervallo di maglie

decescente di 1 phi (da -1 phi a 4 phi). I sedimenti sono stati agitati per 15 minuti. Successivamente il materiale trattenuto in ciascun setaccio è stato pesato con bilancia analitica. Per ogni campione, sono state eseguite due repliche di setacciatura. Dalle sopracitate analisi, sono state costruite le curve granulometriche di ciascun campione ed è stato possibile ricavare le percentuali di ghiaia, sabbia e fango contenute nei sedimenti. In tabella 13 sono riportate le percentuali di ghiaia, sabbia e fango riscontrate nei diversi siti di campionamento. Le curve granulometriche dei campioni sono riportate nell'allegato 1C.

Tabella 13 - Percentuali di sabbia, ghiaia e fango misurate nelle stazioni di campionamento.

	A2		A5		A10		A20		A30	
	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.
Ghiaia %	0.17	0.04	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sabbia %	99.81	0.02	93.81	0.69	89.48	1.29	68.96	25.53	17.47	6.51
Fango %	0.02	0.01	6.17	0.71	10.52	1.29	31.04	25.53	82.53	6.51
	B2		B5		B10		B20		B30	
	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.
Ghiaia %	0.18	0.09	0.07	0.00	0.19	0.04	1.45	0.60	0.00	0.00
Sabbia %	99.81	0.09	99.80	0.06	95.73	0.50	79.60	18.58	33.58	1.04
Fango %	0.01	0.00	0.13	0.06	4.08	0.54	18.95	19.18	66.42	1.04
	C2		C5		C10		C20		C30	
	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.
Ghiaia %	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sabbia %	99.92	0.02	98.40	0.05	95.62	0.08	29.03	2.50	51.11	3.79
Fango %	0.02	0.01	1.60	0.05	4.38	0.08	70.97	2.50	48.89	3.79
	D2		D5		D10		D20		D30	
	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.
Ghiaia %	2.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sabbia %	97.98	0.03	96.09	0.24	97.47	0.48	88.82	0.37	39.88	10.14
Fango %	0.00	0.00	3.91	0.24	2.53	0.48	11.18	0.37	60.12	10.14
	E2		E5		E10		E20		E30	
	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.
Ghiaia %	2.54	1.48	0.91	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sabbia %	97.46	1.48	97.32	0.08	93.08	0.52	85.20	0.37	19.86	5.99
Fango %	0.00	0.00	1.78	0.21	6.92	0.52	14.80	0.37	80.14	5.99
	PORTO1		PORTO2		PORTO3					
	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.	% Media	Dev.st.				
Ghiaia %	0	0	0	0	0	0				
Sabbia %	96.53	0.50	95.77	0.55	97.18	0.02				
Fango %	3.47	0.50	4.23	0.55	2.82	0.02				

In figura 137 vengono riportate le curve granulometriche di frequenza relativa della frazione sabbiosa, dei campioni analizzati.

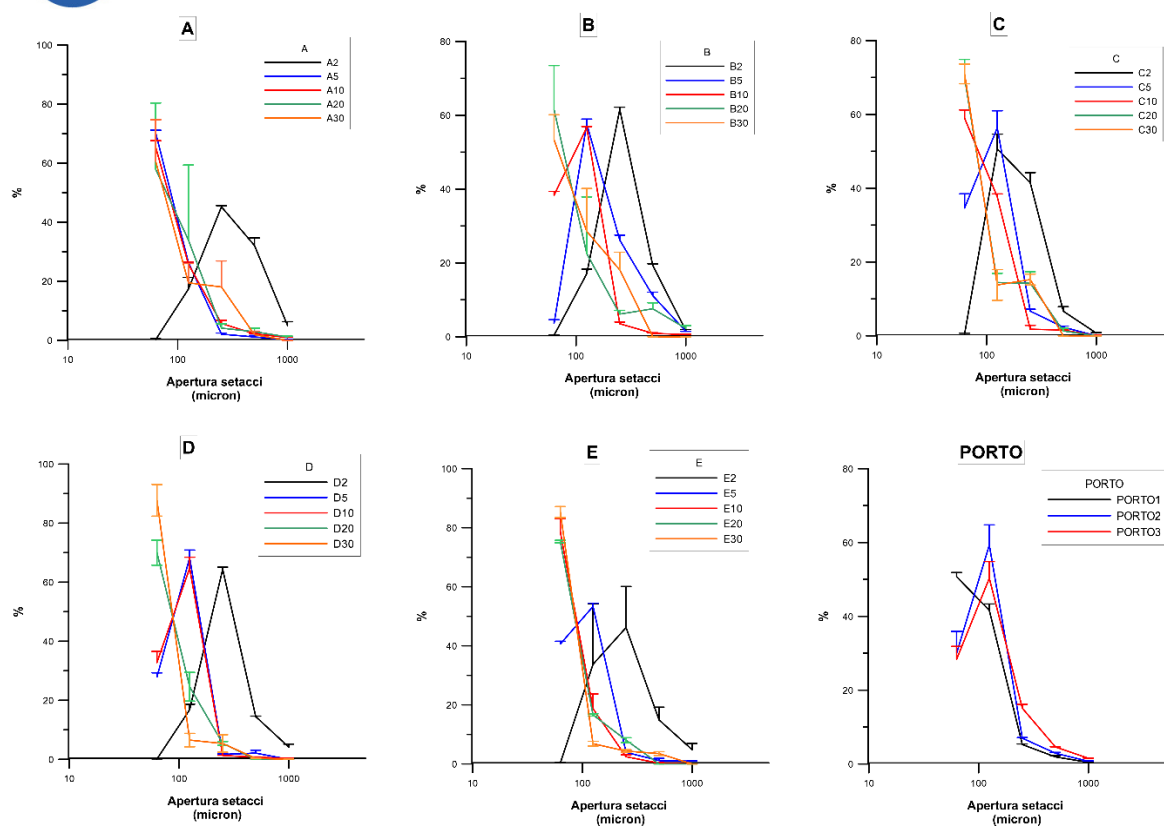


Figura 137 - Curve di frequenza relativa della frazione sabbiosa dei campioni analizzati.

6.2 Caratterizzazione della spiaggia emersa

6.2.1 Profili della spiaggia emersa

Sono state eseguiti n. 2 rilevamenti in 4 aree (Castel Porziano, Coccia di Morto, Passoscuro, Marina di Cerveteri) in tre stagioni significative (inverno 2021, estate 2021, inverno 2023), per un totale di n.24 rilevamenti.

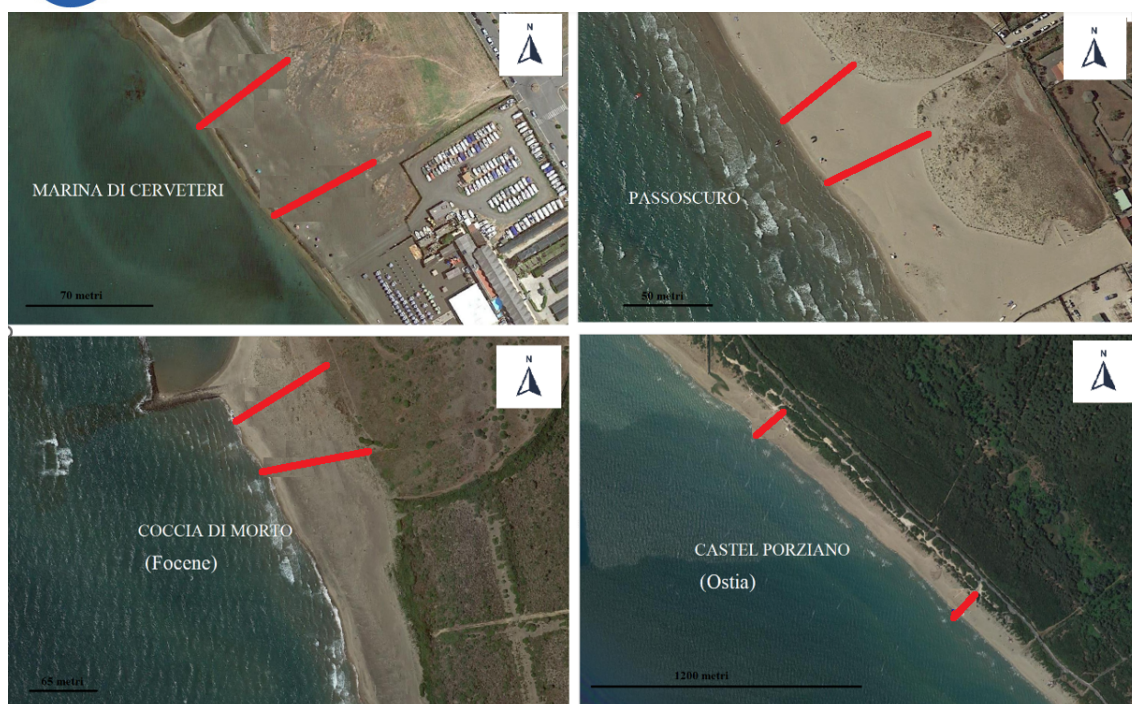


Figura 138 - Ubicazione dei transetti di misura morfologica della spiaggia emersa, la posizione dei transetti è indicata con linea rossa.

La misurazione di altezza e distanza in ogni rottura di pendio identificata in ogni transetto di misura è stata effettuata in NRTK (Network Real Time Kinematic), utilizzando un Rover GNSS Leica. In figura 139 sono riportati i profili morfologici ottenuti nelle due stagioni riferiti al livello medio del mare (s.m.l.).

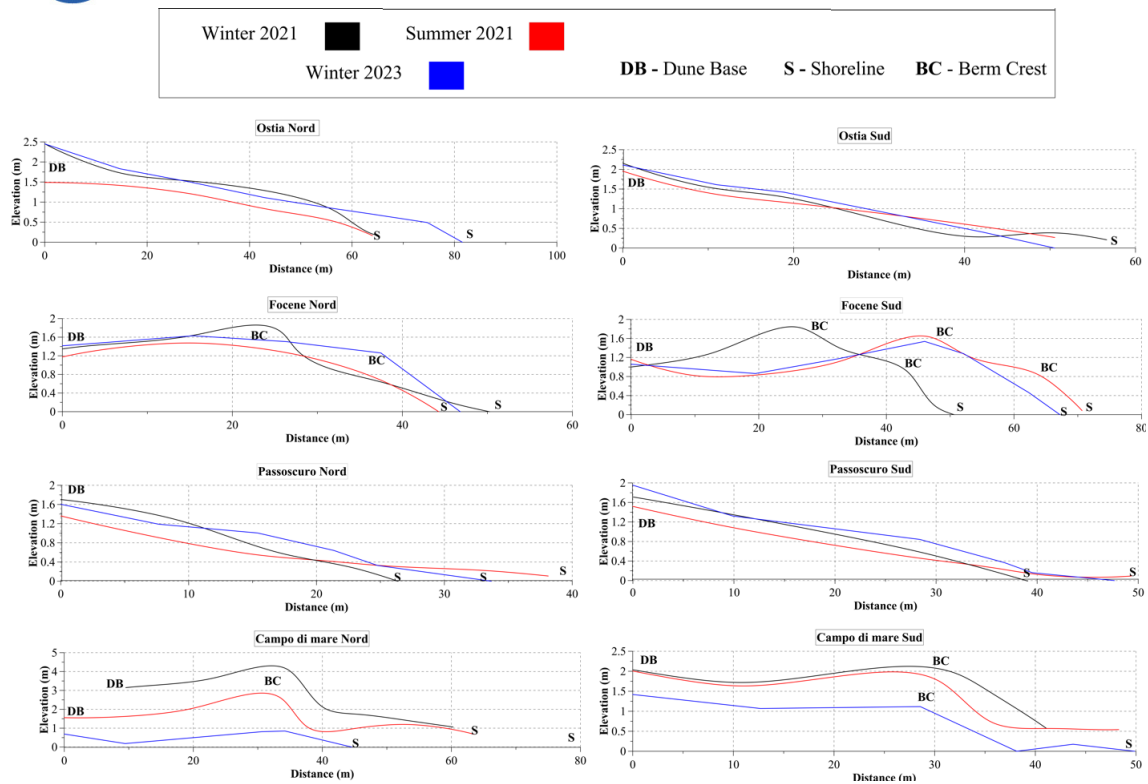


Figura 139 - Profili morfologici della spiaggia emersa nelle tre stagioni significative.

6.2.2 Campionamenti della spiaggia emersa

Sono stati effettuati, in concomitanza, ai rilievi di spiaggia emersa campionamenti di sedimento. Durante ogni campagna di misura morfologica della spiaggia emersa, sono stati recuperati 3 campioni in ognuno degli 8 transetti previsti, per un totale di 72 campioni di sedimento, come previsto dal programma esecutivo di monitoraggio.

Tabella 14 - Campioni di sedimento prelevati nelle tre stagioni significative.

Ostia Nord
P61
P64
P66
Ostia Sud
P68
P71

P73
Focene Nord
P75
P79
P81
Focene Sud
P82
P86
P88
Passoscuro Sud
P90
P92
P94
Passoscuro Nord
P95
P97
P99
Campo di Mare Sud
P101
P104
P105
Campo di Mare Nord
P117
P120
P124

I sedimenti asciutti sono stati sottoposti ad analisi granulometrica mediante setacciatura meccanica (ASTM D6913/D6913M). Nel dettaglio, per ogni campione sono stati pesati circa 100 g di sedimento e posti in un setaccio meccanico con un intervallo di maglie decrescente di 1 phi (da -1 phi a 4 phi). I sedimenti sono stati agitati per 15 minuti. Successivamente il materiale trattenuto in ciascun setaccio è stato pesato con bilancia analitica. Per ogni campione, sono state eseguite due repliche di setacciatura. Dalle sopracitate analisi, sono state costruite le curve granulometriche di ciascun campione ed è stato possibile ricavare le percentuali di ghiaia, sabbia e fango contenute nei sedimenti. In seguito, è stata effettuata un'analisi statistica del campione relativo ad ogni stazione di prelievo utilizzando i parametri sedimentologici descritti da Folk e Ward (1957). I parametri normalmente usati in sedimentologia per lo studio granulometrico, descritti



da Folk e Ward sono: Mean Size, Mode, Median, Standard Deviation, Skewness e Kurtosis. I primi tre tendono a dare un'informazione sulla dimensione del sedimento, gli ultimi due sulla distribuzione quantitativa dei granuli nelle varie classi dimensionali. Gli indici statistici sono stati calcolati mediante il metodo grafico, agendo direttamente sulla curva di frequenza cumulata. Il calcolo dei parametri statistici è stato effettuato utilizzando il tool di Matlab SANDY (Ruiz-Martinez et al., 2016).

In tabella 15 sono riportate le percentuali di sabbia, ghiaia e fango dei campioni prelevati ed analizzati nelle due stagioni. Nell'allegato 1D, sono riportate le curve granulometriche e le schede dei campioni analizzati.

Tabella 15 - Percentuali di ghiaia, sabbia e fango dei campioni analizzati nelle tre stagioni.

Inverno 2021							
	P61	P64	P66	P68	P71	P73	P75
Ghiaia (%)	0.000	0.403	0.000	0.005	0.500	0.000	0.473
Sabbia (%)	99.970	99.597	99.992	99.974	99.973	99.991	99.517
Fanghi (%)	0.030	0.000	0.008	0.021	0.027	0.009	0.009
	P79	P81	P82	P86	P88	P90	P92
Ghiaia (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sabbia (%)	99.993	99.992	99.977	99.979	99.991	99.979	99.992
Fanghi (%)	0.007	0.008	0.023	0.021	0.009	0.021	0.008
	P94	P95	P97	P99	P101	P104	P105
Ghiaia (%)	0.036	0.000	0.000	0.000	1.480	0.018	0.000
Sabbia (%)	99.960	99.996	100.000	99.997	98.449	99.975	99.996
Fanghi (%)	0.003	0.004	0.000	0.003	0.071	0.006	0.004
	P118	P120	P124				
Ghiaia (%)	1.400	0.287	0.000				
Sabbia (%)	98.597	99.704	99.992				
Fanghi (%)	0.003	0.009	0.008				
Estate 2021							
	P61	P64	P66	P68	P71	P73	P75
Ghiaia (%)	0.269	0.897	0.000	0.000	0.000	0.000	0.723
Sabbia (%)	99.401	98.933	99.995	99.979	99.957	99.997	99.274
Fanghi (%)	0.329	0.170	0.005	0.021	0.043	0.003	0.003
	P79	P81	P82	P86	P88	P90	P92
Ghiaia (%)	0.152	0.510	2.011	0.052	0.000	0.003	0.003
Sabbia (%)	99.835	99.488	97.955	99.948	99.997	99.978	99.979
Fanghi (%)	0.013	0.002	0.034	0.000	0.003	0.019	0.018
	P94	P95	P97	P99	P101	P104	P105
Ghiaia (%)	0.000	0.000	0.015	0.000	6.939	0.048	1.016
Sabbia (%)	99.997	99.962	99.943	99.996	93.000	99.949	98.984
Fanghi (%)	0.003	0.038	0.042	0.004	0.062	0.003	0.000
	P118	P120	P124				
Ghiaia (%)	5.136	0.376	2.199				
Sabbia (%)	94.861	99.617	97.801				
Fanghi (%)	0.003	0.006	0				
Inverno 2023							
	P61	P64	P66	P68	P71	P73	P75
Ghiaia (%)	0	0.2988	0	0	0.01008	0	0.0287
Sabbia (%)	99.945	99.657	99.99662	99.985	99.96319	99.995	99.932
Fanghi (%)	0.055	0.0442	0.003382	0.0151	0.026729	0.0049	0.0391
	P79	P81	P82	P86	P88	P90	P92
Ghiaia (%)	0.063	0	0.411	0.09	0.015353	0.0101	0.0134
Sabbia (%)	99.902	100	99.534	99.846	99.98465	99.986	99.973
Fanghi (%)	0.034	0	0.055	0.064	0	0.0041	0.0134
	P94	P95	P97	P99	P101	P104	P105
Ghiaia (%)	0.031	0.0094	0.00826	0.0083	0.438177	0.0885	0.0756
Sabbia (%)	99.969	99.986	99.98348	99.988	99.56182	99.909	99.923
Fanghi (%)	0	0.0047	0.00826	0.0042	0	0.0023	0.0017
	P118	P120	P124				
Ghiaia (%)	2.711	0.1882	1.799401				
Sabbia (%)	97.283	99.805	98.19923				
Fanghi (%)	0.006	0.007	0.001366				

6.3 Studio del rateo di sedimentazione

È stato eseguito n.1 carotaggio nell'area di Fiumicino, successivamente diviso in aliquote sottoposte ad analisi radio-cronologica. In totale il carotaggio è stato suddiviso in 25 strati da 1 cm. Successivamente è stata effettuata la datazione radio-cronologica valutando il decadimento dell'isotopo 210 del Piombo (210Pb).

Il 210Pb è uno strumento importante per stimare l'età dei sedimenti e i tassi di accumulo di massa sedimentaria (SAR) (Appleby e Oldfield 1978; Goldberg 1963; Koide et al. 1972) a causa della sua emivita relativamente breve (22,3 anni) e delle proprietà di adsorbimento di sedimenti fini. Il 210Pb non supportato o "in eccesso" è il 210Pb derivato da deposizione secca o umida generata dal decadimento del 222Rn nell'aria o dal decadimento del 222Rn nella colonna d'acqua. Il 210Pb "unsupported" è stato calcolato sottraendo la misurazione del 226Rn da ciascun valore totale di 210Pb (Appleby e Oldfield, 1978).

Il profilo del 210Pb di questo carotaggio mostra un andamento irregolare ma approssimativamente esponenziale in funzione della profondità. L'attività massima registrata è di 8.83 DPM/g (decadimenti per minuto/g) nella sezione 6 (profondità estrapolata 4 - 7.5 cm), la minima è 5.31 DPM/g nella sezione 24 (profondità estrapolata 20.5 - 24 cm). Sono presenti evidenze di possibile mixing superficiale o variazioni del rateo di accumulo sedimentario soprattutto nelle sezioni più recenti (sezioni 1-3), dove l'attività del 210Pb mostra valori più bassi rispetto alle quote sottostanti (sezioni 4-7.5 cm). La densità del sedimento (dry weight) aumenta progressivamente con la profondità (da 0.687 g/cm³ nella sezione 1 fino a 1.138 g/cm³ nella sezione 24).

Per analizzare il profilo del carotaggio è stato in primo luogo applicato un modello di regressione lineare (Lubis et al., 2006), il quale presume che l'input di 210Pb e il tasso di accumulo di sedimenti siano costanti. Queste ipotesi non sono completamente soddisfatte, e quindi il modello non può essere applicato a tutto il carotaggio. Tuttavia, il modello è stato applicato alle sezioni 6 - 24 (profondità estrapolata 4 - 24 cm), dove il tasso di accumulo di sedimenti appare relativamente costante, per stimare il tasso medio approssimativo di accumulo di sedimenti nell'intervallo. La velocità di sedimentazione



calcolata, è stata successivamente utilizzata per calibrare il Modello CRS (Constant Rate of Supply) (Lubis et al., 2006) per questo carotaggio.

Il modello ha mostrato ($R^2 = 0.9764$) un tasso medio di accumulo di sedimenti di $0,8911 \text{ g/cm}^2/\text{anno}$ in queste sezioni.

Successivamente è stato applicato il modello CRS (Lubis et al., 2006). Il modello CRS presuppone un input costante di ^{210}Pb ed un carotaggio sufficientemente lungo da includere tutta la sorgente atmosferica misurabile ^{210}Pb . Poiché la seconda ipotesi non è soddisfatta, il CRS è stato calibrato attraverso i risultati del modello di regressione lineare. Il modello CRS calibrato è stato utilizzato per calcolare il rateo di accumulo sedimentario e l'età dell'intero carotaggio.

In conclusione, la parte più superficiale (primi 4 cm) mostra un rateo di accumulo variabile tra $1.1838 - 1.2323 \text{ g/cm}^2/\text{anno}$. Nell'intervallo 4 - 24 cm il rateo di accumulo dei sedimenti appare relativamente costante ($0.8182 \text{ g/cm}^2/\text{anno} - 0.9624 \text{ g/cm}^2/\text{anno}$). Nell'intervallo 4 - 24 cm, il tasso medio di accumulo di sedimenti stimato dal modello CRS è stato calibrato e forzato con il modello di regressione lineare fino a coincidere esattamente con la stima di regressione lineare di $0.8911 \text{ g/cm}^2/\text{anno}$. La sezione più antica è datata 26 anni circa.

Sebbene le età calcolate dal CRS dipendano dai risultati del modello di regressione lineare, il modello CRS è da preferire perché dovrebbe fornire previsioni accurate sull'età nella parte inferiore di ogni sezione, anche se il tasso di accumulo dei sedimenti cambia nel tempo.

Total Pb-210 Activity vs. Accumulated Sediment

Core C

Total Pb-210 Activity (DPM/g Dry Wt.)

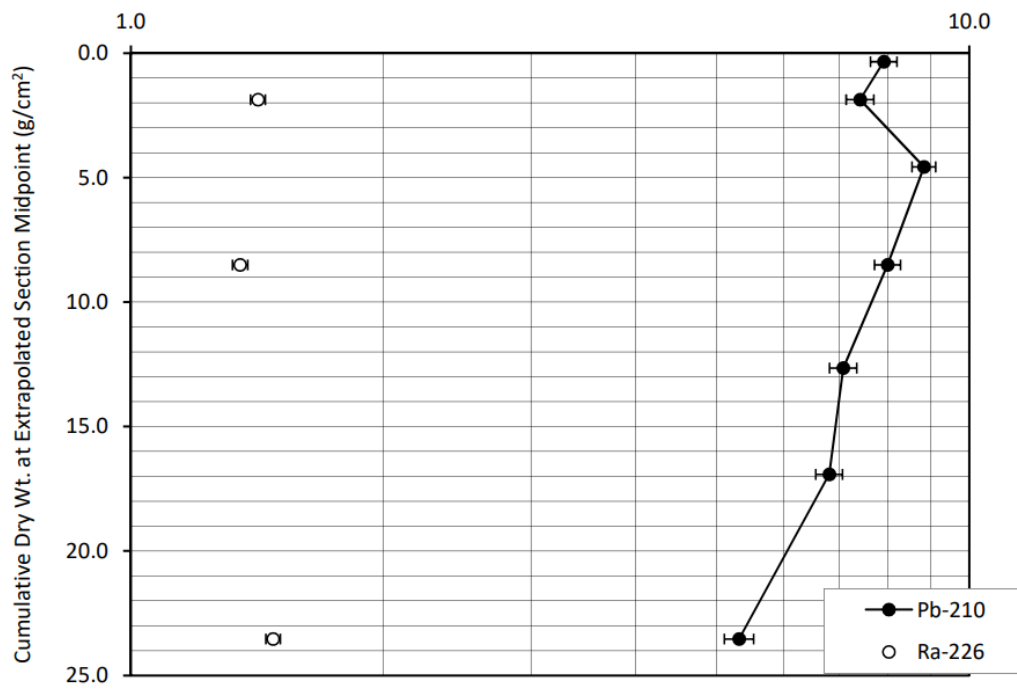


Figura 140 - Attività ^{210}Pb vs sedimenti accumulati.

**Regression of Unsupported Pb-210 Activity
vs. Accumulated Sediment**

(Unsupported activity calculated by subtracting the nearest neighbouring Ra-226
measurement from each total Pb-210 value)

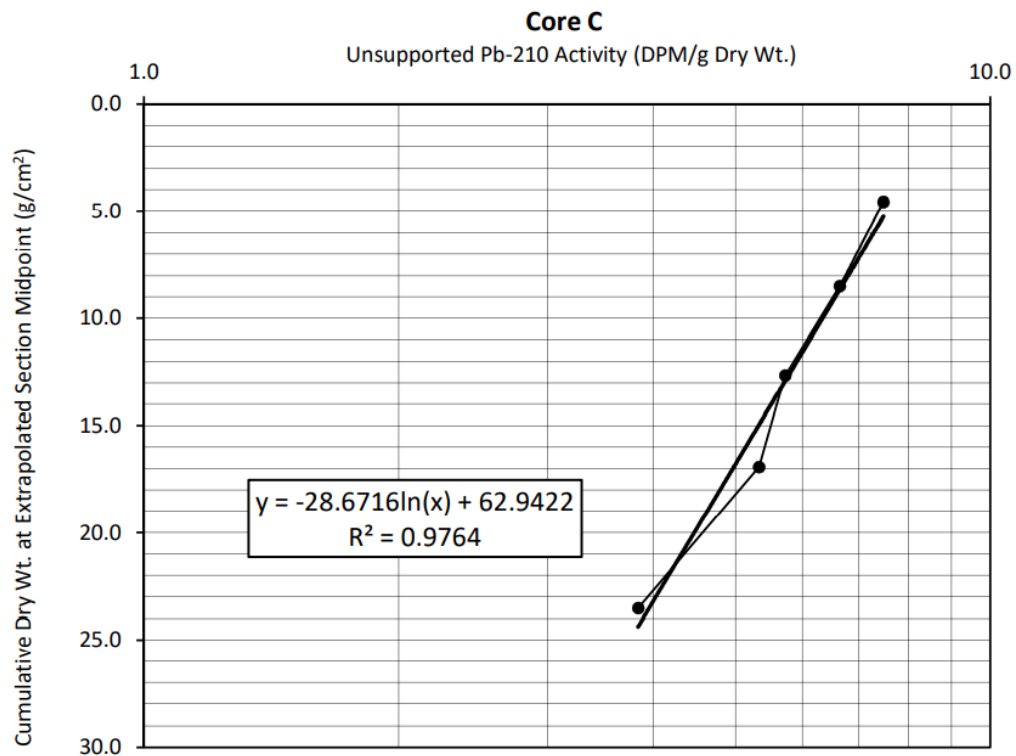


Figura 141 - Modello di regressione lineare.

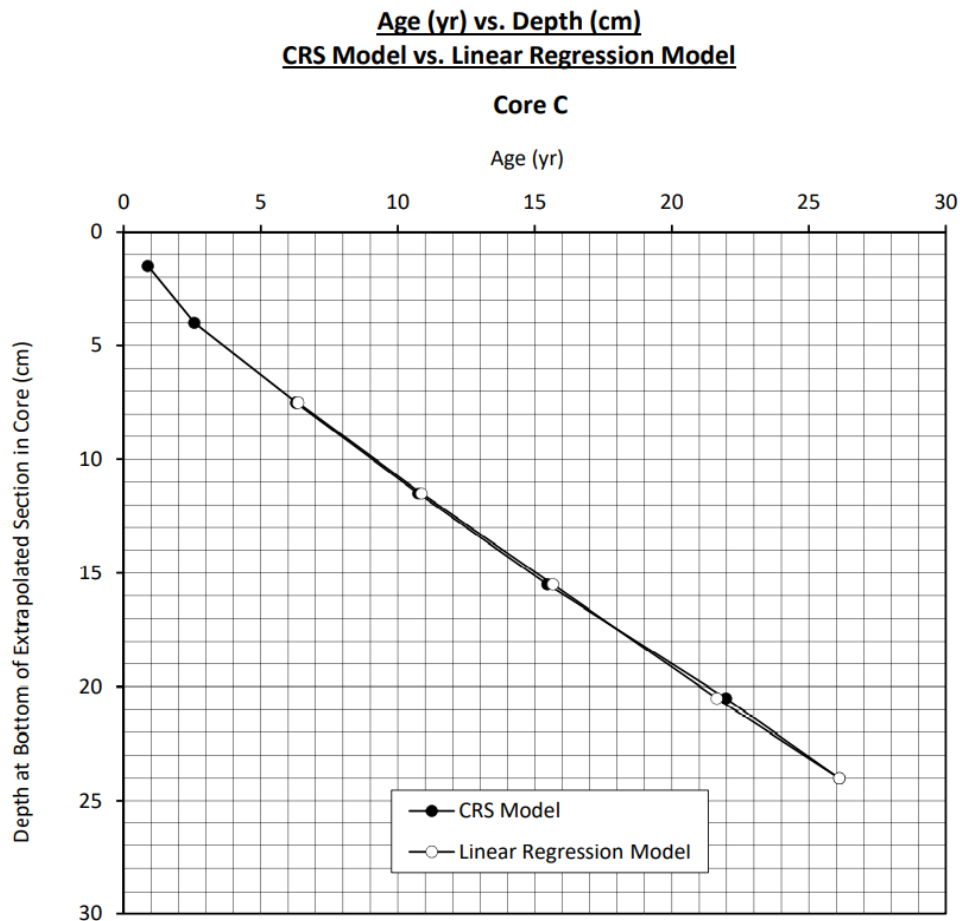


Figura 142 - Calibrazione modello CRS con modello di regressione lineare.

6.3.1 Analisi dei sedimenti funzionale alle attività di dragaggio

Sono stati eseguiti, in concomitanza con le indagini di caratterizzazione delle biocenosi bentoniche di fondo mobile, campionamenti di sedimento superficiale alle profondità di 2, 5, 10, 20 e 30 m (figura 136), successivamente sottoposti a caratterizzazione chimica. Nel dettaglio sono state esaminate le concentrazioni di As, Cu, Ni, Pb, Zn, Al, Antracene, PCB.

I sedimenti asciutti sono stati sottoposti ad analisi granulometrica mediante setacciatura meccanica (ASTM D6913/D6913M). Nel dettaglio, per ogni campione sono stati pesati



circa 100 g di sedimento e posti in un setaccio meccanico con un intervallo di maglie decrescente di 1 phi (da -1 phi a 4 phi). I sedimenti sono stati agitati per 15 minuti. Successivamente il materiale trattenuto in ciascun setaccio è stato pesato con bilancia analitica. Per ogni campione, sono state eseguite due repliche di setacciatura. Dalle sopracitate analisi, sono state costruite le curve granulometriche di ciascun campione ed è stato possibile ricavare le percentuali di ghiaia, sabbia e fango contenute nei sedimenti. I campioni di sedimento prelevati sono stati analizzati chimicamente al fine di ottenere la concentrazione di As, Cu, Ni, Pb, Zn, Al, Antracene, PCB. Le analisi dei metalli sono state eseguite secondo i metodi EPA 3051A 2007 ed EPA 6020B 2014. Gli idrocarburi policiclici aromatici (Antracene) sono stati analizzati secondo i metodi EPA 3550C 2007 ed EPA 8270E 2018. La concentrazione dei policlorobifenili (PCB) è stata eseguita secondo i metodi EPA 3550C 2007 e EPA 8270E 2018.

Nelle tabelle 16, 17 e 18 sono riportati i risultati delle analisi effettuate sui sedimenti e il confronto rispetto a diverse soglie nazionali. In particolare, le concentrazioni di elementi chimici ottenute dall'analisi dei sedimenti durante le campagne sono state confrontate con quanto riportato in:

- Icrum, A. (2006). “Manuale per la movimentazione dei sedimenti marini. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare”. Soglie LCB (Livello chimico di base) e LCL (livello chimico limite).
- Decreto 15 luglio 2016, n. 173 (ex art 109, comma 2 del D.lgs 152/06) “Regolamento recante modalità e criteri tecnici per l'autorizzazione all'immersione in mare dei materiali di escavo di fondali marini”. Soglie L1 ed L2.
- Decreto 8 novembre 2010, n. 260, “Regolamento recante i criteri tecnici per la classificazione dello stato dei corpi idrici superficiali, per la modifica delle norme tecniche del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale, predisposto ai sensi dell'articolo 75, comma 3, del medesimo decreto legislativo”. Soglia SQA-MA (Standard di qualità ambientale espresso come valore

medio annuo).

*µg/kg. **Come sommatoria dei seguenti congeneri: 28, 52, 77, 81, 101, 118, 126, 128, 138, 153, 156, 169, 180. ***Standard di qualità ambientale espresso come valore medio annuo (SQA-MA). **** PCB totali, lo standard è riferito alla sommatoria dei seguenti congeneri: 28, 52, 77, 81, 101, 118, 126, 128, 138, 153, 156, 169, 180.

Tabella 16 - Confronto dei risultati ottenuti dalle analisi chimiche con le soglie sopra descritte, transetti A e B.

Parametri	Unità di misura	Siti di campionamento										
		A2	A5	A10	A20	A30	LCB (Pelite < 10 %)	LCB	LCL	L1	L2	SQA-MA***
Al	mg/kg s.s.	1287	5274	4729	10355	14590						
As	mg/kg s.s.	26.2	29.1	22.7	15.9	19.6	17	25	32	12	20	12
Ni	mg/kg s.s.	4.8	11.1	9.8	23.2	35.1	40	70	75	30	75	30
Pb	mg/kg s.s.	3.7	11.1	10.4	20.6	31.4	25	40	70	30	70	30
Cu	mg/kg s.s.	0.78	4.1	4	11.3	19.6	15	40	52	40	52	-
Zn	mg/kg s.s.	8.1	30.6	29.1	49.6	69	50	100	170	100	150	-
Antracene	mg/kg s.s.	<0.001	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	47*		89*	24*	245*	45*
PCB Totali (somma 29 congeneri)	microg/kg s.s	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	5**		189**	8**	60**	8****
Pelite %	%	0.02	6.17	10.52	31.04	82.53						
Parametri	Unità di misura	Siti di campionamento										
		B2	B5	B10	B20	B30	LCB (Pelite < 10 %)	LCB	LCL	L1	L2	SQA-MA***
Al	mg/kg s.s.	5150	5997	7732	9852	12221						
As	mg/kg s.s.	12	13.2	12.6	16.6	15.7	17	25	32	12	20	12
Ni	mg/kg s.s.	15.2	19.6	23.3	26.7	29.7	40	70	75	30	75	30
Pb	mg/kg s.s.	8.5	9.4	11.3	18.8	29	25	40	70	30	70	30
Cu	mg/kg s.s.	2.3	3.9	5.5	9.6	16.1	15	40	52	40	52	-
Zn	mg/kg s.s.	21.8	30.9	38.1	49.8	63.1	50	100	170	100	150	-
Antracene	mg/kg s.s.	<0.001	<0.0005	<0.0005	0.0049	0.00063	47*		89*	24*	245*	45*
PCB Totali (somma 29 congeneri)	microg/kg s.s	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	5**		189**	8**	60**	8****

*µg/kg. **Come sommatoria dei seguenti congeneri: 28, 52, 77, 81, 101, 118, 126, 128, 138, 153, 156, 169, 180. ***Standard di qualità ambientale espresso come valore medio annuo (SQA-MA). **** PCB totali, lo standard è riferito alla sommatoria dei seguenti congeneri: 28, 52, 77, 81, 101, 118, 126, 128, 138, 153, 156, 169, 180.

Tabella 17 - Confronto dei risultati ottenuti dalle analisi chimiche con le soglie sopra descritte, transetti C.e D.

		C2	C5	C10	C20	C30	LCB (Pelite < 10 %)	LCB	LCL	L1	L2	SQA-MA***
Al	mg/kg s.s.	3224	5462	8115	9144	14104						
As	mg/kg s.s.	4.6	6.5	12.9	15.2	20	17	25	32	12	20	12
Ni	mg/kg s.s.	17.1	18.1	25.1	23.9	32.9	40	70	75	30	75	30
Pb	mg/kg s.s.	6.5	8.7	13	16.2	26.8	25	40	70	30	70	30
Cu	mg/kg s.s.	1.6	4.6	5.7	7.9	15.2	15	40	52	40	52	-
Zn	mg/kg s.s.	16.8	36.9	39.1	44.8	65.9	50	100	170	100	150	-
Antracene	mg/kg s.s.	<0.001	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	47*		89*	24*	245*	45*
PCB Totali (somma 29 congeneri)	microg/kg s.s.	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	5**		189**	8**	60**	8****
Pelite %	%	0.02	1.60	4.38	70.97	48.89						
		D2	D5	D10	D20	D30	LCB (Pelite < 10 %)	LCB	LCL	L1	L2	SQA-MA***
Al	mg/kg s.s.	3526	10702	6959	9238	10789						
As	mg/kg s.s.	5.6	14.6	9.1	17.5	15.1	17	25	32	12	20	12
Ni	mg/kg s.s.	11.9	28.8	21.9	26.4	23.8	40	70	75	30	75	30
Pb	mg/kg s.s.	6.9	16.7	11.3	21	22.8	25	40	70	30	70	30
Cu	mg/kg s.s.	1.8	8.6	7.7	9.7	13.9	15	40	52	40	52	-
Zn	mg/kg s.s.	15.2	107	37	111	51.3	50	100	170	100	150	-
Antracene	mg/kg s.s.	<0.001	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	47*		89*	24*	245*	45*
PCB Totali (somma 29 congeneri)	microg/kg s.s.	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	5**		189**	8**	60**	8****
Pelite %	%	0.00	3.91	2.53	11.18	60.12						

Tabella 18 - Confronto dei risultati ottenuti dalle analisi chimiche con le soglie sopra descritte, Transetto E e Porto.

		E2	E5	E10	E20	E30	LCB (Pelite < 10 %)	LCB	LCL	L1	L2	SQA-MA***
Al	mg/kg s.s.	2489	5497	6968	14167	12844						
As	mg/kg s.s.	5.9	7.5	9.3	14.3	13.4	17	25	32	12	20	12
Ni	mg/kg s.s.	11.5	19.2	20.4	38.8	31.7	40	70	75	30	75	30
Pb	mg/kg s.s.	4.8	8.2	10.9	20.6	22.1	25	40	70	30	70	30
Cu	mg/kg s.s.	1.1	3.9	5.8	19.8	18	15	40	52	40	52	-
Zn	mg/kg s.s.	13.2	40.9	33.4	60.6	57.5	50	100	170	100	150	-
Antracene	mg/kg s.s.	<0.001	<0.0005	0.0177	0.0006	<0.0005	47*		89*	24*	245*	45*
PCB Totali (somma 29 congeneri)	microg/kg s.s.	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	5**		189**	8**	60**	8****
Pelite %	%	0.00	1.78	6.92	14.80	80.14						
		Porto 1	Porto 2	Porto 3	LCB (Pelite < 10 %)	LCB	LCL	L1	L2	SQA-MA***		
Al	mg/kg s.s.	9457	9967	9644								
As	mg/kg s.s.	12.6	11.2	9.7	17	25	32	12	20	12		
Ni	mg/kg s.s.	30	26.7	22.9	40	70	75	30	75	30		
Pb	mg/kg s.s.	14.5	14.7	15.9	25	40	70	30	70	30		
Cu	mg/kg s.s.	7.4	7.8	8.2	15	40	52	40	52	-		
Zn	mg/kg s.s.	50.2	47.2	41.6	50	100	170	100	150	-		
Antracene	mg/kg s.s.	<0.0005	<0.0005	<0.0005	47		89*	24*	245*	45*		
PCB Totali (somma 29 congeneri)	microg/kg s.s.	<0.1	<0.1	<0.1	5**		189**	8**	60**	8****		
Pelite %	%	3.47	4.23	2.82								

Dalle tabelle 12A, 12B, e 12C, elencando le evidenze per ogni transetto, risulta quanto segue:

Transetto A

As - Siti A2, A5, A10 -Superamento LCB, L1, L2. siti A20, A30 – Superamento L1. Siti A2, A5, A10, A20, A30 – Superamento LCB.

Pb -Sito A30 – Superamento L1 e SQA-MA.

Transetto B

As - Siti B5, B10, B20, B30 – Superamento di L1 e SQA-MA.

Transetto C



As - Siti C10, C20, C30 – Superamento L1 e SQA-MA.

Ni - Sito C30 – Superamento L1 e SQA-MA.

Transetto D

As - Siti D5, D20, D30 – Superamento L1 e SQA-MA.

Zn - Sito D20 – Superamento LCB e L1.

Transetto E

As - Siti E20 e E30 – Superamento L1 e SQA-MA.

Ni - Siti E20 e E30 – Superamento L1 e SQA-MA.

Transetto Porto

As - Sito PORTO1 – Superamento L1 e SQA-MA.

Zn - Sito PORTO1 – Superamento LCB.

In conclusione, i campioni di sedimento analizzati non mostrano contaminazione da composti organici quali Antracene e PCB. Tuttavia, sono stati riscontrati superamenti di alcuni limiti di legge da parte di As, Ni, Pb e Zn. Il rame (Cu) non mostra alcun caso di superamento delle soglie utilizzate per il confronto dei risultati. In generale, l'elemento chimico che mostra concentrazioni maggiori rispetto ai limiti utilizzati è As. Infatti, As mostra concentrazioni elevate e eccedenti almeno la soglia L1 in diverse stazioni, dislocate in tutti i transetti di misura.



7. CARATTERIZZAZIONE DEI CORSI D'ACQUA RILEVANTI AI FINI DELLA VALUTAZIONE DEGLI INPUT FLUVIALI

7.1 Misure di alveo in prossimità della foce

Sono state eseguite indagini in prossimità di n. 5 foci fluviali di n.4 corsi d'acqua (Canale dei Pescatori, Tevere, Arrone e Zambra). Nel dettaglio sono state valutate: (a) ampiezza dell'alveo nel tratto fluviale precedente allo sbocco in mare; (b) altezza idrometrica; (c) velocità della corrente fluviale nella sezione di misura idrometrica; d) concentrazione mg/L di solido sospeso. Le campagne sono state effettuate rispettivamente nei mesi di settembre 2020, marzo 2021 e giugno 2021. La misura dell'altezza idrometrica e della velocità della corrente sono state eseguite rispettivamente in prossimità delle due sponde ed al centro delle aree di foce di ogni corso d'acqua indagato. Per quanto riguarda il Canale dei Pescatori (Ostia) e le due foci del fiume Tevere (Fiumicino e Ostia) nella campagna di marzo 2021 sono state eseguite misure delle correnti attraverso l'utilizzo di ADCP. Le restanti misurazioni nelle tre campagne effettuate sono state eseguite con mulinello idrometrico. In tabella 19 sono riportati i risultati delle misurazioni effettuate.

Tabella 19 - Risultati delle misurazioni effettuate alle foci dei corsi d'acqua.

Campagna di misura	Corso d'acqua	Latitudine WGS84	Longitudine WGS84	Ampiezza dell'alveo (m)	Misura idrometrica, profondità massima (m)		Solido Sospeso (mg/L)	Velocità della corrente media (m/s)		
					Destra	Sinistra		Destra	Sinistra	Centro
Settembre 2020	Canale dei Pescatori	41.718945 N	12.3132287 N	18.5	2	2	27.43	0.02	0.04	0.03
	Tevere (Ostia)	41.74038 N	12.23380 E	160.5	3.6	3.2	4.8	0.33	0.38	0.35
	Tevere (Fiumicino)	41.771409 N	12.218176 E	46.3	2.5	3.5	6.04	2.2	2.17	2.18
	Arnone (Fregene)	41.84378 N	12.18964 E	16	0.2	0.2	61.8	0.35	0.45	0.35
	Zanbra (Marina di Cerveteri)	41.975491 N	12.033128 E	4	0.3	0.3	12	-	-	0.29
Marzo 2021	Canale dei Pescatori	41.718945 N	12.3132287 N	18.5	2.1	2.2	9.65	0.08		
	Tevere (Ostia)	41.74038 N	12.23380 E	160.5	3.8	4	9.58	0.16		
	Tevere (Fiumicino)	41.771409 N	12.218176 E	46.3	3.6	4.2	9.63	0.11		
	Arnone (Fregene)	41.86882 N	12.180730 E	30	0.3	0.3	65.07	0.1	0.1	0.1
	Zanbra (Marina di Cerveteri)	41.976016 N	12.032494 E	10	0.2	0.2	14.78	0.03	0.03	0.03
Giugno 2021	Canale dei Pescatori	41.718945 N	12.3132287 N	18.5	1.1	1.2	1.7	0.03		
	Tevere (Ostia)	41.74038 N	12.23380 E	160.5	3.5	3.5	2.23	0.07		
	Tevere (Fiumicino)	41.771409 N	12.218176 E	46.3	3.8	3.8	2.11	1.6		
	Arnone (Fregene)	41.870668 N	12.179354 E	5	0.2	0.3	76.33	flusso entrante		
	Zanbra (Marina di Cerveteri)	41.974576 N	12.033964 E	14	0.1	0.07	6	0.25	0.25	0.32



Settembre 2020



Marzo 2021



Settembre 2020



Marzo 2021

Figura 143 - Foci dei fiumi Arrone (in alto) e Zambra (in basso) nei mesi settembre 2020 e marzo 2021.



7.2 Analisi degli apporti solidi dei principali corsi d'acqua

Sono state effettuate le indagini previste in prossimità di n. 5 foci di n. 4 corsi d'acqua (Canale dei Pescatori, Tevere, Arrone e Zambra), a settembre 2020, marzo 2021 e giugno 2021, per un totale di n.15 campioni.

I sedimenti asciutti sono stati sottoposti ad analisi granulometrica mediante setacciatura meccanica (ASTM D6913/D6913M). Nel dettaglio, per ogni campione sono stati pesati circa 100 g di sedimento e posti in un setaccio meccanico con un intervallo di maglie decrescente di 1 phi (da -1 phi a 4 phi). I sedimenti sono stati agitati per 15 minuti. Successivamente il materiale trattenuto in ciascun setaccio è stato pesato con bilancia analitica. Per ogni campione, sono state eseguite due repliche di setacciatura. Dalle sopracitate analisi, sono state costruite le curve granulometriche di ciascun campione ed è stato possibile ricavare le percentuali di ghiaia, sabbia e fango contenute nei sedimenti. In tabella 20 sono riportati i risultati delle analisi granulometriche condotte nelle varie stagioni; le curve granulometriche e i risultati dell'analisi statistica sono riportate nell'allegato 1E di questo documento.

Tabella 20 - Percentuali di ghiaia sabbia e fango, e analisi granulometrica della frazione sabbiosa dei sedimenti recuperati durante le tre campagne.

SETTEMBRE 2020

	Arrone		Canale pescatori		Tevere (Ostia)		Tevere (Fiumicino)		Zambra	
	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.
Ghiaia (%)	0.05	0.01	1.06	0.76	1.27	0.31	0.27	0.03	16.59	0.27
Sabbia (%)	99.94	0.01	98.94	0.76	98.68	0.28	99.59	0.03	83.36	0.22
Fango (%)	0.01	0.01	0	0	0.05	0.03	0.14	0.06	0.01	0.00
	Arrone		Canale pescatori		Tevere (Ostia)		Tevere (Fiumicino)		Zambra	
Apertura setacci (micron)	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.
1000	0.08	0	10.99	0.94	1.76	0.02	0.66	0.2	49.92	1.09
500	2.26	0.13	66.04	5.11	4.67	0.71	1.65	0.38	29.85	0.20
250	89.5	0	21.32	3.68	47.26	8.7	22.28	0.58	18.99	0.81
125	8.03	0.04	1.61	0.47	45.97	9.43	74.21	0.49	1.20	0.45
63	0.14	0.09	0.03	0.02	0.33	0.01	1.2	0.67	0.05	0.02

MARZO 2021

	Arrone		Canale pescatori		Tevere (Ostia)		Tevere (Fiumicino)		Zambra	
	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.
Ghiaia (%)	0.36	0.29	1.20	0.19	0.05	0.00	0.35	0.01	2.12	0.6
Sabbia (%)	99.64	0.29	98.80	0.19	99.14	0.17	99.34	0.02	97.87	0.59
Fango (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	0.18	0.30	0.02	0.01	0.01
	Arrone		Canale pescatori		Tevere (Ostia)		Tevere (Fiumicino)		Zambra	
Apertura setacci (micron)	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.
1000	1.81	0.37	11.15	0.23	0.13	0.01	0.63	0.02	10.09	3.08
500	20.67	2.8	65.15	1.28	2.1	0.24	1.51	0.1	39.91	2.14
250	67.51	1.61	21.97	0.92	57.74	2.87	14.98	0.22	49.08	5.07
125	9.98	1.55	1.69	0.12	37.63	3.76	80.2	0.15	0.91	0.14
63	0.03	0.01	0.04	0.01	2.4	0.64	2.68	0.01	0.01	0

GIUGNO 2021

	Arrone		Canale Pescatori		Tevere (Ostia)		Tevere (Fiumicino)		Zambra	
	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.
Ghiaia (%)	0.68	0.15	1	0.9	0	0	0.18	0.25	16	4.01
Sabbia (%)	99.29	0.12	99	0.9	97.68	0.53	97.61	2.45	84	4.01
Fango (%)	0.03	0.04	0	0	2.32	0.53	2.22	2.7	0	0
	Arrone		Canale Pescatori		Tevere (Ostia)		Tevere (Fiumicino)		Zambra	
Apertura setacci (micron)	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.	Media	Dev.st.
1000	2.48	0.77	14.09	5.75	0	0	0.69	0.08	53.66	9.97
500	19.55	3.14	47.64	5.1	3.45	1.19	2.24	1.02	28.71	1.68
250	71.35	1.24	37.33	9.95	5.97	1.02	11	5.63	16.3	7.16
125	6.58	2.61	0.91	0.89	63.86	1.72	70.29	14.02	1.33	1.13
63	0.05	0.06	0.02	0.02	26.73	3.93	15.79	18.55	0	0
Tot	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0



8. STUDIO DEL COMPARTO BIOTICO

8.1 Caratterizzazione delle biocenosi bentoniche di fondo mobile

L'obiettivo principale del nostro studio è quello di caratterizzare e descrivere la struttura del popolamento bentonico di fondo mobile nell'unità fisiografica compresa tra Capo Linaro Capo Anzio, allo scopo di analizzare la composizione l'abbondanza specifica delle comunità macrozoobentoniche. I dati raccolti in questa campagna sono di fondamentale importanza per effettuare confronti nei futuri monitoraggi al fine di evidenziare l'insorgere di potenziali variazioni nella struttura e nella composizione delle comunità macrozoobentoniche.

Inoltre, questo lavoro ha il fine di determinare la qualità biologica nell'area oggetto di studio tramite l'utilizzo degli indici AMBI e M-AMBI (ATZI's Marine Biotic Index) che corrispondono al Rapporto di Qualità Ecologica (RQE) richiesto dalla Direttiva 2000/60/CEE, i cui risultati saranno presentati nella relazione Fase 1 finale.

8.1.1 Piano di campionamento

Lungo il tratto costiero compreso tra Capo Linaro e Capo Anzio, ad agosto 2021 sono stati effettuati n. 5 transetti costa largo e sono state eseguite 25 stazioni di prelievo e analisi distribuite tra la batimetrica dei -2 metri e quella dei -30 metri.

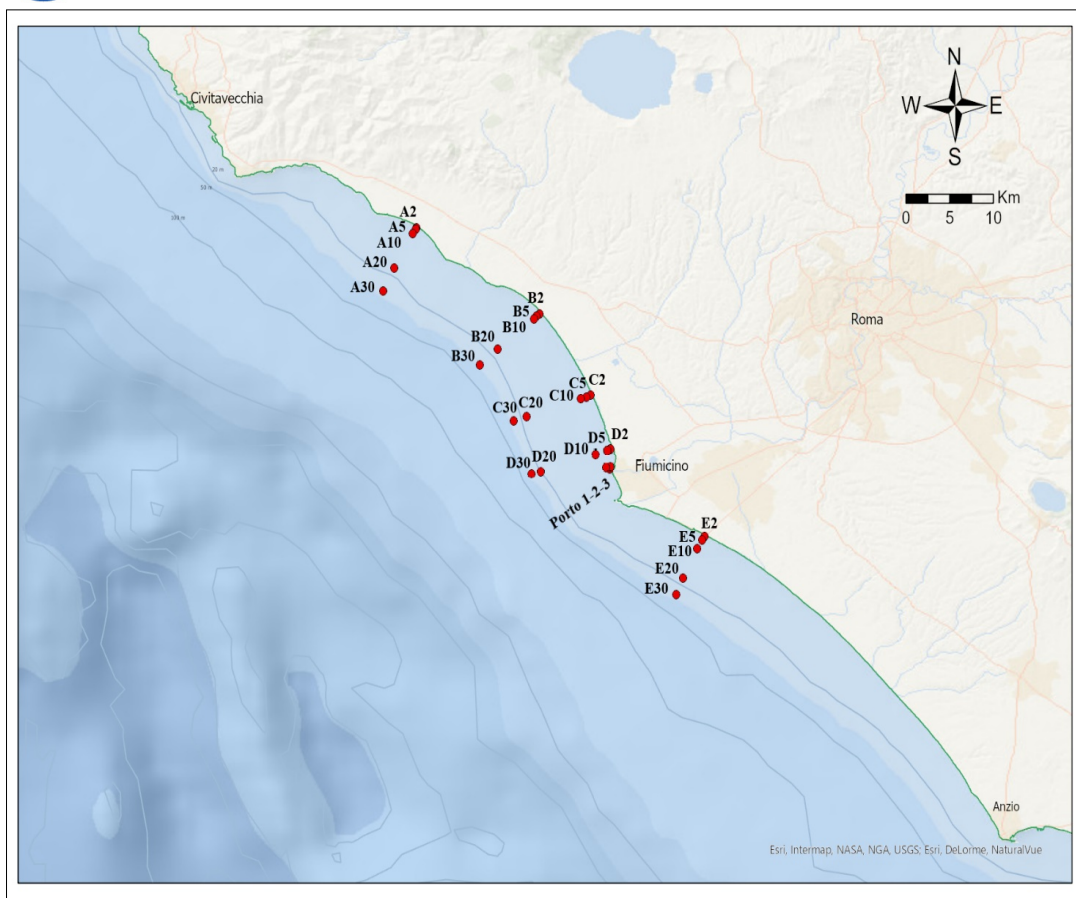


Figura 144 - Piano di campionamento del benthos di fondo mobile.

Inoltre, al fine di ottenere una scala di indagine di dettaglio (strettamente locale) e di evidenziare la presenza di variazioni quali quantitative nelle comunità bentoniche associate ai substrati mobili presenti nell'area di costruzione, sono stati effettuati n.3 punti di campionamento all'interno dell'area interessata dai lavori, come riportato in figura 144 e più in dettaglio in figura 145.

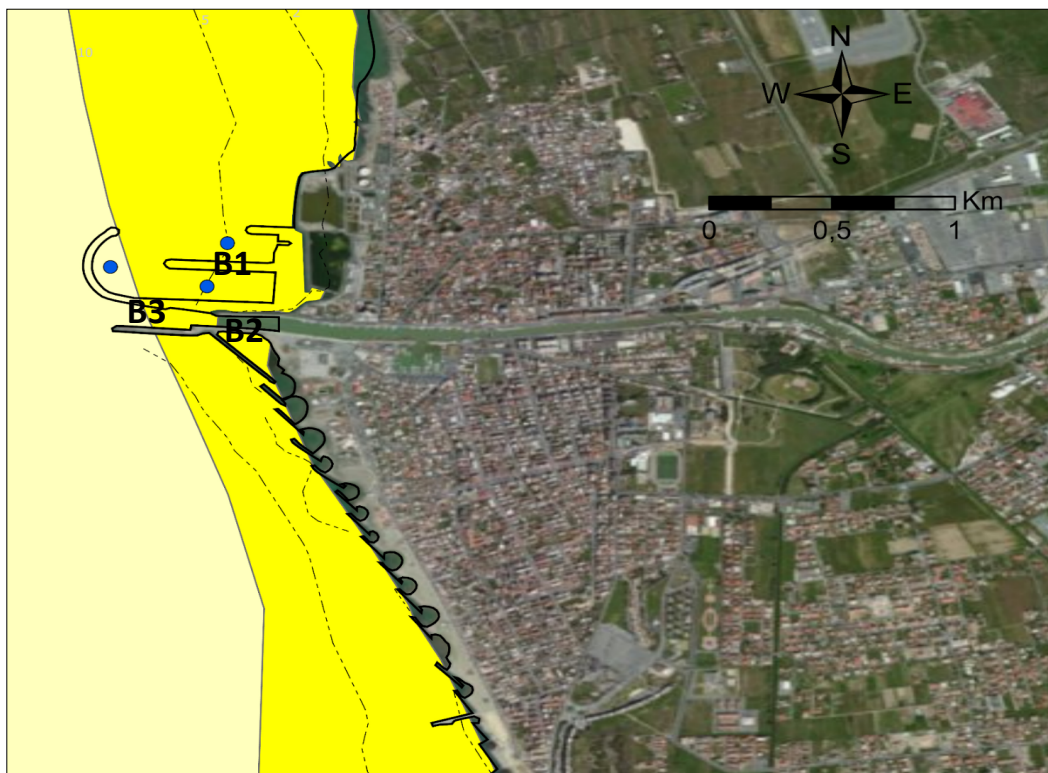


Figura 145 - Punti di campionamento localizzati nell'area di costruzione dell'opera.



Nella tabella 21 sono riportate le coordinate geografiche delle 28 stazioni di campionamento.

Tabella 21- Coordinate delle stazioni di campionamento.

Stazione	Coordinate geografiche		Profondità (m)
	Latitudine	Longitudine	
A2	41.9843319	12.0190996	2
A5	41.9830559	12.0183907	5
A10	41.9792278	12.0156969	10
A20	41.9488865	12.9966982	20
A30	41.9290371	12.9849303	30
B2	41.9089795	12.1458372	2
B5	41.906643	12.1429166	5
B10	41.9045012	12.139996	10
B20	41.8778264	12.1030016	20
B30	41.8638074	12.0843097	30
C2	41.8369378	12.1982134	2
C5	41.8355749	12.1939299	5
C10	41.8342119	12.1884781	10
C20	41.8180512	12.1324024	20
C30	41.8151571	12.1189676	30
D2	41.7898187	12.2188524	2
D5	41.7886504	12.215153	5
D10	41.7853404	12.2032758	10

D20	41.770348	12.1472001	20
D30	41.7680115	12.1378524	30
E2	41.7126907	12.3155926	2
E5	41.7092416	12.3132139	5
E10	41.7017442	12.308018	10
E20	41.5754833	12.2935623	20
E30	41.6613803	12.2864729	30
Porto 1	41.7745135	12.2185928	5
Porto 2	41.7727821	12.2178414	6
Porto 3	41.7735661	12.2143135	8

L'imbarcazione utilizzata per il prelievo dei campioni è la motonave ORCA di proprietà della ditta M.T.M. Service S.R.L. di Fiumicino.

8.1.2 Metodi

Il campionamento del macrozoobenthos di fondo mobile è stato effettuato tramite l'utilizzo una benna di tipo Van Veen standard da 18 litri, per un totale di 3 sottocampioni a punto di prelievo, come previsto dalla normativa vigente e ai sensi del Dlgs 152/2006 e del Dlgs 260/2010 e descritto anche nel documento tecnico "Analisi delle comunità bentoniche di fondi mobili in ambiente marino" pubblicato e aggiornato dall'ISPRA.

Ogni sottocampione è stato eseguito da operatori scientifici verificando che lo strumento avesse lavorato in condizioni ottimali e che non ci fosse stata fuoriuscita di sedimento.

Il campione di sedimento raccolto è stato rimosso dal campionatore (quest'ultimo è stato accuratamente risciacquato da eventuali residui di campione con acqua di mare precedentemente filtrata con un filtro di maglia inferiore ad 1 mm, per evitare eventuali contaminazioni) e posto in un contenitore di dimensioni adeguate. Per separare gli organismi macrobentonici dal sedimento, il campione è stato vagliato attraverso un



setaccio con apertura regolare di maglia 1 mm.

Il materiale biologico e non biologico rimanente dopo la setacciatura è stato trasferito in appropriati contenitori plastici opportunamente contrassegnati con le informazioni del campionamento (nome della campagna, codice della stazione, numero della replica, ecc.) e fissato con una soluzione di Etanolo al 75% e acqua di mare filtrata. In caso di campioni con elevata presenza di materia organica (ad esempio resti di vegetali), la concentrazione di Etanolo è stato aumentato fino al 90%.

Come previsto dal DLGS 3 aprile 2006 n° 152 e sue modifiche apportate con Decreto del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del territorio e del Mare 14 aprile 2009 n° 56, per i metodi di campionamento degli elementi di qualità biologica si fa riferimento al documento tecnico "Analisi delle comunità bentoniche di fondi mobili in ambiente marino" pubblicato e aggiornato dall'ISPRA.

In laboratorio sono state svolte le operazioni di sorting e identificazione specifica degli organismi campionati. Nella prima fase sono stati separati gli organismi da identificare dal materiale residuo. Ogni campione poi è stato risciacquato con acqua dolce su di un setaccio certificato di maglia uguale o superiore a quello usato durante il campionamento al fine di eliminare la soluzione fissativa.

Il materiale risciacquato è stato poi posto in una vaschetta di plastica bianca di dimensioni adeguate alla grandezza del campione ed è stato successivamente analizzato allo stereomicroscopio all'interno di capsule Petri così da smistarlo in maniera sistematica, separando gli organismi nei taxa prioritari (Policheti, Molluschi, Crostacei ed Echinodermi); Tali organismi sono stati poi identificati fino al raggiungimento del più basso livello tassonomico possibile.

Per l'identificazione al livello tassonomico più basso si è fatto riferimento ai fascicoli della "Checklist delle specie della fauna italiana" relativi alla fauna bentonica marina (fascicoli nn. 2, 3, 4, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 108, 109) (Minelli et al. 1995).

Si è passato poi alla conta degli organismi e loro successiva conservazione in contenitori recanti un'etichetta all'interno (carta da lucido con la scritta a matita) e all'esterno, in cui sono state indicate la sigla o nome del progetto, la data di campionamento, la sigla della



stazione, la replica, il gruppo sistematico di appartenenza. Sono state inoltre compilate “schede laboratorio” in cui abbiamo riportato, oltre alle caratteristiche relative al campione (data campionamento, sigla stazione, replica), anche la data in cui si è effettuato lo smistamento, il tempo impiegato, il nome dell’operatore e qualunque nota relativa al campione ritenuta utile.

Per l'analisi tassonomica e l'ecologia delle specie sono stati utilizzati i seguenti testi: Campoy (1982), Chevreux & Fage (1925), Costa & Krapp & Ruffo (2009), Fauchald (1977), Fauvel (1923), P.J. Hayward & J.S. Ryland (1996), Riedl (1991), Ruffo (1982, 1989, 1993), Tortonese (1965), Zariquiey Alvarez (1968); per la nomenclatura ci si è attenuti a quella proposta dal sito World Register of Marine Species (WoRMS-www.marinespecies.org).

8.1.3 Risultati della caratterizzazione del benthos di fondo mobile

Nei 28 campioni di benthos analizzati sono stati rinvenuti e identificati 7850 individui rappresentativi di 143 taxa; solo per l’1.5% degli individui non è stato possibile estendere l'identificazione a livello di specie.

Il numero di individui campionato è risultato essere particolarmente alto anche se molti bivalvi erano rappresentati da organismi giovanili di piccole dimensioni.

I gruppi tassonomici identificati sono 9 più 6 altri gruppi (nominati ALTRO in lista) rappresentati dai taxa Mysidiacea, Antozoa, Phoronida e Nemertea, i taxa più rappresentativi a livello di abbondanza sono:

- **Policheti: 61%**
- **Bivalvi: 25%**
- **Gasteropodi: 3%**
- **Scafopodi: 0.2%**
- **Anfipodi: 2%**
- **Isopodi: 1%**
- **Anisopodi: 4%**
- **Decapodi: 1%**

- **Echinodermi: 1%**
- **ALTRO 1.8%**

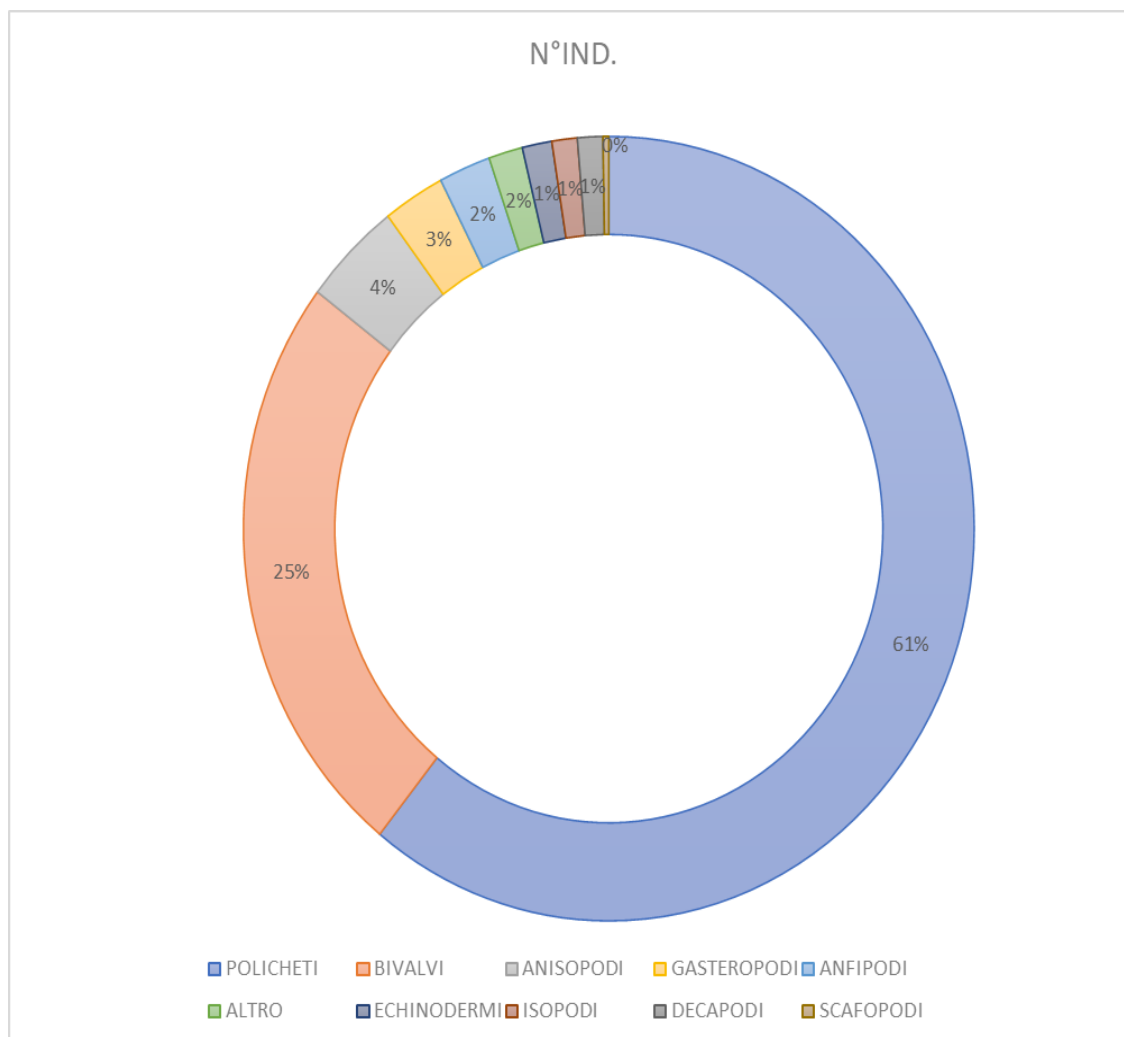


Figura 146 - Percentuale di abbondanza dei principali taxa analizzati.

Per quanto concerne la diversità specifica i Policheti sono risultati i più diversificati (32% delle specie totali) dai Bivalvi (15%) dagli Anfipodi (11%) dai Decapodi e dagli Echinodermi, entrambi rappresentativi dell'8% della diversità totale.

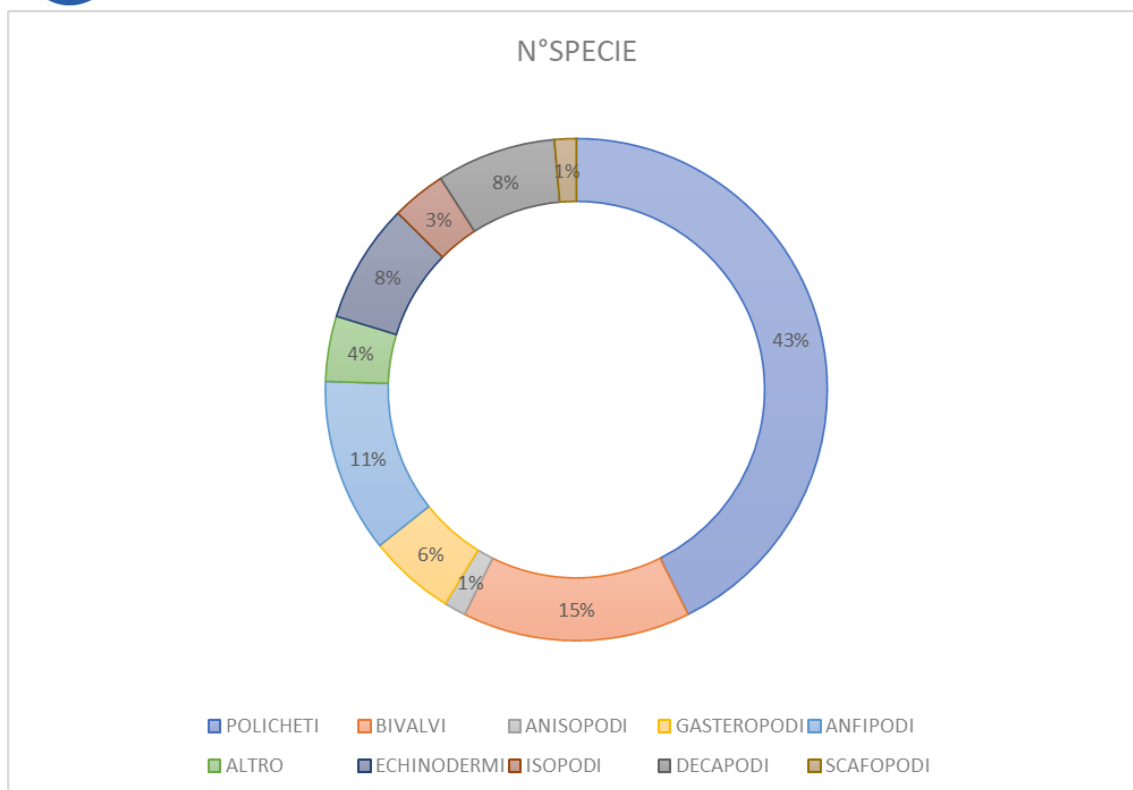


Figura 147 - Percentuale di diversità specifica dei principali taxa analizzati.

Dalle analisi da noi effettuate è risultato che I policheti costituiscono il taxon più rappresentativo sia in termini quantitativi (4772 ind.), sia nel numero di specie (61). La Classe Polychaeta è rappresentata soprattutto dalle famiglie Owenidae, Nepthyidae, Glyceridae e Sigalionidae anche se la famiglia Owenidae è presente con un'unica specie, *Owenia fusiformis* Delle Chiaje, 1844, che è risultata essere la specie più abbondante sul totale degli organismi identificati, rappresentativa del 53.9% del pool analizzato; questa Classe è risultata abbondante e ben rappresentata in tutte le stazioni analizzate ed ha mostrato un incremento di dominanza nelle stazioni più profonde (30 m).

I Bivalvi, rappresentati da 1925 individui suddivisi in 21, sono risultati il secondo taxa più abbondante. Le specie più abbondanti sono la *Donacilla cornea* (Poli, 1791), appartenente alla famiglia Masodesmatidae e particolarmente abbondante nella stazione più superficiale, il Mactridae *Spisula subtruncata* (da Costa, 1778) e il Pharidae *Phaxas pellucidus* (Pennant, 1777).



I Molluschi Gasteropodi, con sole 8 specie e 214 individui, sono poco abbondanti nelle stazioni comprese tra i 2 e i 10 m ma hanno mostrato un incremento nelle abbondanze nelle stazioni più profonde (20 e 30 m) grazie all'aumento del Turritellidae *Turritella communis* Risso, 1826.

Gli Scafopodi sono rappresentati da 2 specie di cui l'*Antalis dentalis* (Linnaeus, 1758) rappresenta circa il 95% dell'abbondanza totale.

Gli Anfipodi (180 ind. e 16 specie) sono dominati dal Pontoporeidae *Bathyporeia phaiophthalma* Bellan-Santini, 1973 nelle stazioni superficiali (2 e 5 m) mentre a partire dai 10 m si osserva l'incremento degli Ampeliscidae rappresentati soprattutto dalle specie *Ampelisca brevicornis* (Costa, 1853) e *Ampelisca gibba* G.O. Sars, 1883.

Gli Isopodi, rappresentati da solo 5 specie e 88 individui, hanno mostrato la dominanza del Cirolanidae *Eurydice spinigera* Hansen, 1890, una delle specie più abbondante nei campioni raccolti a 2 m.

Gli Anisopodi sono rappresentati quasi esclusivamente dall'Apseudidae *Apseudes hastifrons* Norman & Stebbing, 1886 che con 329 individui è risultata essere la specie più abbondante nei sedimenti misti e fangosi (20 e 30m) mentre il *Tuberapseudes echinatus* (Sars, 1882), appartenente alla stessa famiglia e rappresentato da solo 13 individui, è presente solo nei campioni raccolti a 30 m di profondità.

Infine, per quanto concerne i crostacei, il Diogenidae *Diogenes pugilator* (P. Roux, 1829) è risultata essere la specie più abbondante dell'Ordine Decapoda (88 ind. e 11 specie) ed è stata osservata la sua maggiore abbondanza nelle stazioni comprese tra i 5 e i 20 m di profondità.

Il Phylum degli Echinodermi, 103 individui e 11 specie, è risultato più abbondante nelle stazioni comprese tra 5 e 20 m e dominato dalle specie *Ophioderma longicaudum* (Bruzelius, 1805) e *Ophiura albida* Forbes, 1839.

In conclusione, la comunità campionata è risultata essere ricca e ben diversificata ma in termini quantitativi dominano poche specie che hanno mostrato un incremento nelle abbondanze in relazione a fasce batimetriche ben definite a testimonianza che la granulometria dei substrati e le caratteristiche idrodinamiche dei differenti siti di campionamento sono probabilmente i due fattori determinanti per la distribuzione delle

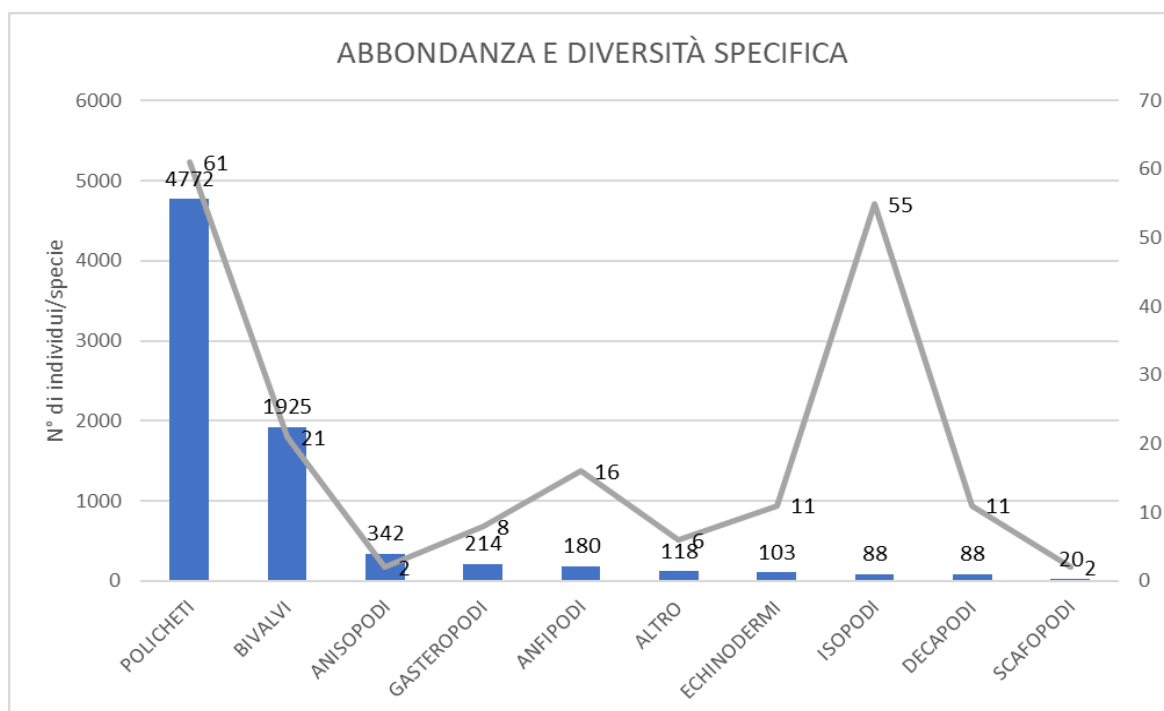


Figura 148 - Rapporto tra abbondanza e diversità specifica nei diversi taxa analizzati.

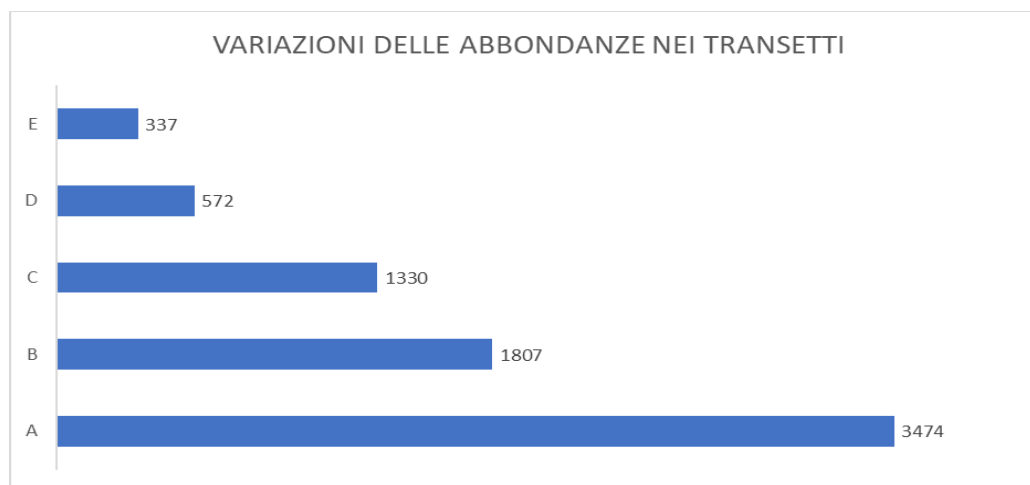


Figura 149 - Variazione delle abbondanze nei differenti transetti analizzati.

L'analisi della distribuzione degli individui nei differenti transetti mostra un incremento delle abbondanze nei punti di campionamento più distanti dalla foce del Fiume Tevere e in particolare un massimo nel transetto A e un minimo nel transetto E, localizzato a sud della foce fluviale.

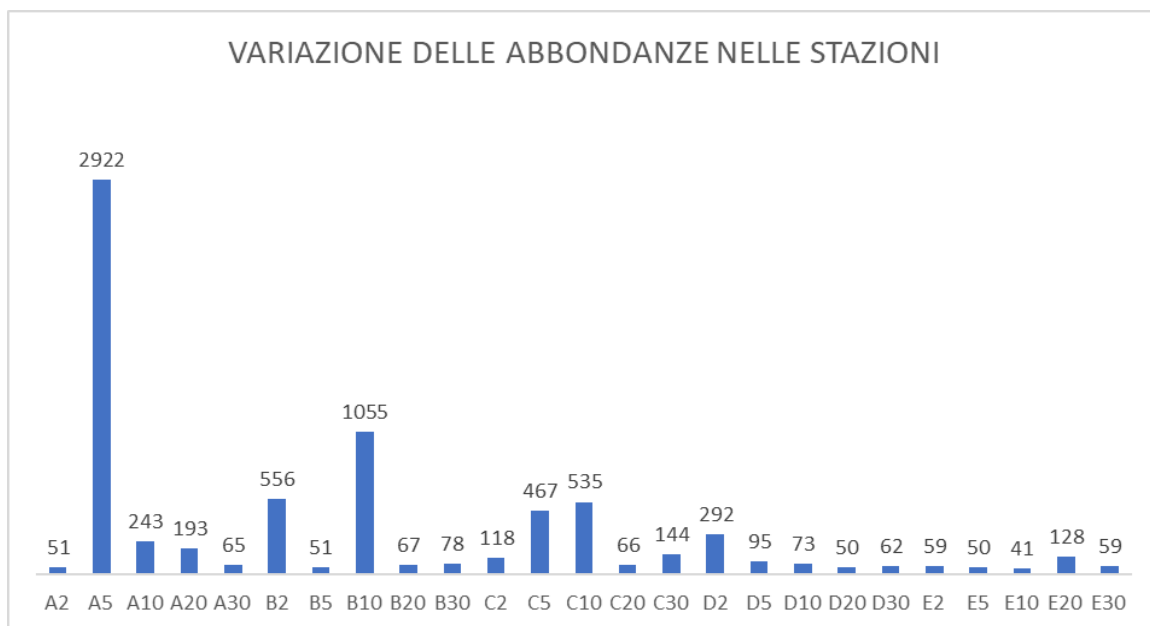


Figura 150 - Variazione delle abbondanze nei differenti punti di campionamento analizzati.

In un'analisi di dettaglio, che descrive la variazione delle abbondanze nei diversi punti di campionamento (profondità) effettuati si osserva che il massimo è stato registrato nelle stazioni comprese tra i 2 e i 10 m ed in particolare si deve sottolineare un incremento delle abbondanze nei punti A2, B2, B10, C10 e C5. Probabilmente in questi siti l'idrodinamismo locale favorisce le comunità dei filtratori che mostrano i loro massimi di abbondanza proprio in queste stazioni. Infatti, le specie favorite in questi siti di analisi sono il Polichete *O. fusiformis* e i Bivalvi *D. cornea*, *S. subtrincata* e *P. pellucidus*.

In conclusione, dallo studio delle caratteristiche ecologiche delle specie macrozoobentoniche analizzate si evince che le zoocenosi sono dominate da specie filtratrici sabulicole nelle stazioni comprese tra i 2 e i 10 m mentre nelle stazioni più profonde, dove si osserva un incremento della componente fangosa, è stato registrato un

incremento delle specie fangofile e mixticole come i Policheti delle famiglie e Nephtyidae, Sternaspidae e Lumbrineridae, il Tanaidaceo *A. hastifrons*, il gasteropode *T. communis*, il decapode *G. rhomboides* e gli Ophiuroidea del genere *Ophiura* e *Amphiura*. La netta differenza nella composizione della comunità, osservata tra le due fasce batimetriche oggetto di studio, potrebbe testimoniare che la distribuzione delle specie è regolata non solo dall'idrodinamismo locale ma che probabilmente gli apporti fluviali e la loro deposizione influiscono in maniera attiva nella distribuzione delle specie.

Pool delle specie più abbondanti

Analizzando i 10 taxa con valori di abbondanza più elevati si osserva che essi rappresentano l'84.3% della comunità oggetto di studio.

Tabella 22 - Percentuale di distribuzione degli individui tra le 10 specie più abbondanti.

Owenia fusiformis Delle Chiaje, 1844	4231	53,8%
Donacilla cornea (Poli, 1791)	878	11%
Spisula subtruncata (da Costa, 1778)	566	7,2%
Apeudes hastifrons Norman & Stebbing, 1886	329	4,1%
Phaxas pellucidus (Pennant, 1777)	180	2,2%
Turritella communis Risso, 1826	169	2%
Dosinia exoleta (Linnaeus, 1758)	82	1%
Thracia phaseolina (Lamarck, 1818)	73	0,9%
Sigalion mathildae Audouin & Milne Edwards, 1832	58	0,7%
Eurydice spinigera Hansen, 1890	55	0,7%

Le tre stazioni di campionamento situate all'interno dell'area di costruzione del porto sono state denominate P1, P2 e P3. All'interno di tale area sono stati identificati 330 organismi rappresentativi di 32 specie differenti.

In queste tre stazioni dominano esclusivamente i Policheti, con 95 individui e 14 specie e i Bivalvi che sono rappresentati da 149 individui suddivisi in 10 specie.

Gli Anfipodi, i Decapodi, gli Echinodermi e i Gasteropodi sono rappresentati da un basso numero di individui e da pochissime specie mentre, è importante sottolineare la particolare abbondanza dei Phoronida, rappresentati unicamente dalla specie *Phoronis* cnf. *psammophyla* un piccolo filtratore tubicolo. Gli Isopodi, gli Anisopodi e gli Scafopodi non sono risultati presenti nell'area.

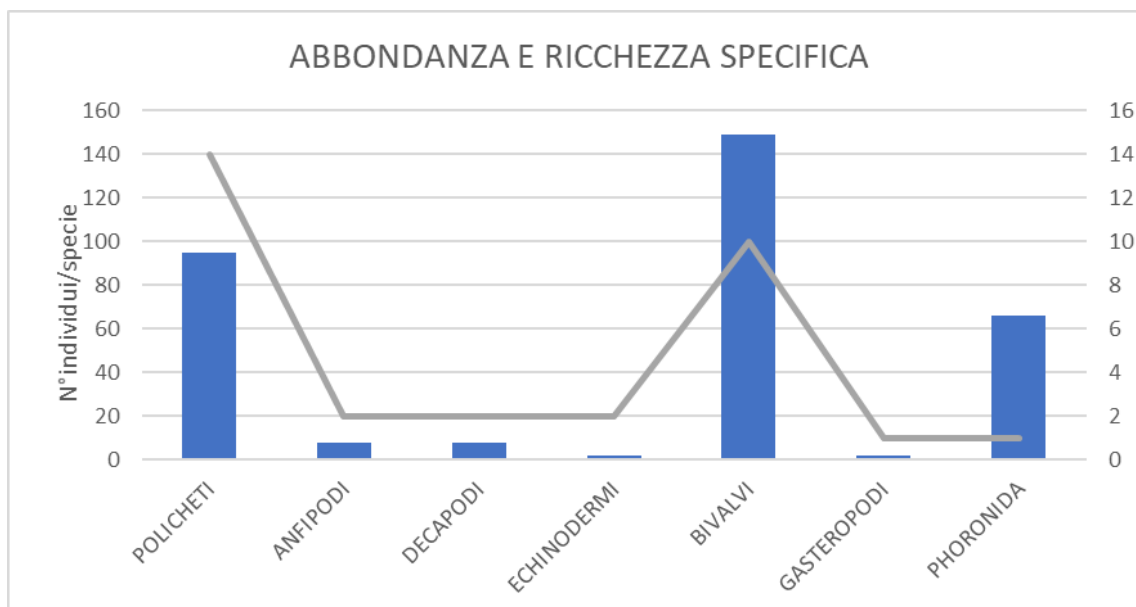


Figura 151 - Abbondanza e ricchezza specifica all'interno dell'area portuale.

Le specie più abbondanti, rappresentative del 62% della comunità analizzata sono:

Tabella 23 - Percentuale di distribuzione degli individui delle quattro specie più abbondanti

<i>Phaxas pellucidus</i> (Pennant, 1777)	66	20%
<i>Phoronis cf. psammophila</i>	66	20%
<i>Owenia fusiformis</i> Delle Chiaje, 1844	38	11,5%
<i>Dosinia exoleta</i> (Linnaeus, 1758)	35	10,5%

Tutte queste specie sono filtratrici, a testimonianza che nell'area domina la risospensione e che probabilmente l'unica fonte di cibo è proprio la materia organica veicolata dal Fiume Tevere.

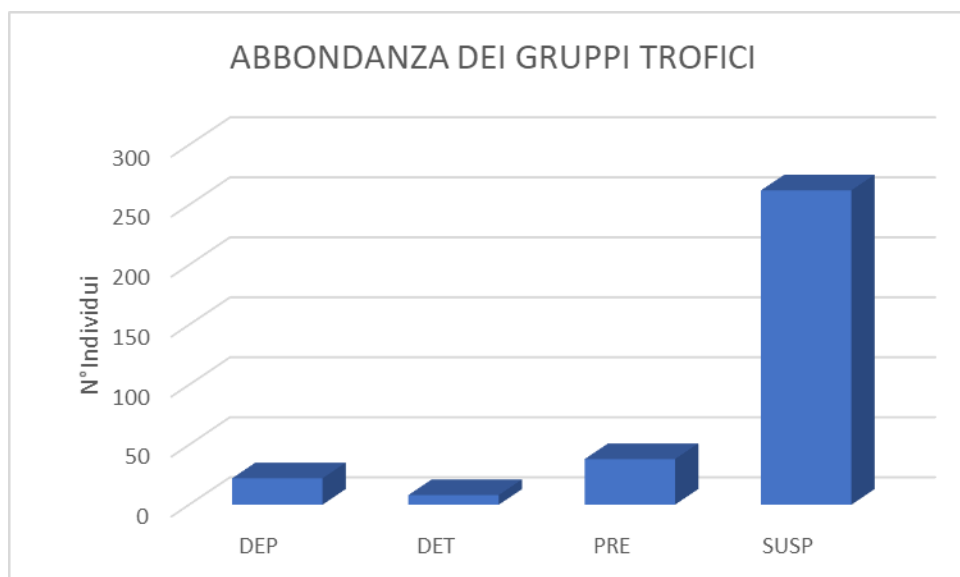


Figura 152 - Abbondanza dei gruppi trofici all'interno dell'area portuale.

Anche in questi punti di prelievo ed analisi è abbondante il detrito conchigliare a testimonianza che i bivalvi sono sempre stati il taxon dominante nell'area.

In conclusione le comunità macrozoobentoniche presenti nell'area di costruzione del porto sono dominate dai Bivalvi, dai Phoronidi e dai Policheti sospensivori mentre poco rappresentativi sono gli altri gruppi tassonomici; questo testimonia che le zoocenosi sono fortemente influenzate dalla foce fluviale limitrofa che rappresenta la principale fonte di alimento per la comunità.

8.2 Caratterizzazione del benthos di fondo duro

I substrati duri, che comprendono per lo più rocce infralitorali e substrati coralligeni, sono stati oggetto di indagine mediante campionamenti non distruttivi ROV (Remotely Operated underwater Vehicle). Le campagne di indagine ROV previste dal progetto



sono state eseguite ad ottobre 2022, gennaio 2023 e aprile 2023 nelle tre aree scelte: a Nord nei fondali antistanti il promontorio di Capo Linaro, più a Sud in corrispondenza dei fondali antistanti la riserva naturale regionale di Macchiatonda, e nei fondali dell'area marina protetta (AMP) delle Secche di Tor Paterno.

Le indagini sono state eseguite tramite un ROV dotato di sistema di posizionamento subacqueo (blue ROV 2, Blue Robotics). I video ROV acquisiti durante le attività scientifiche sono stati analizzati al fine di valutare lo stato di qualità dei fondali.

Al fine di valutare lo stato di qualità dei fondali nelle tre aree di studio, sono stati applicati gli indici MAES e q-MAES (Cánovas-Molina et al. 2016):

$$\text{MAES} = \text{ST} + \text{SCB} + \text{SE} + \text{SH} + \text{SEN} + \text{SL}$$

dove: ST = punteggio del numero di taxa megabentonici; SCB = punteggio della copertura biotica percentuale nello strato basale; SE = punteggio della densità di tutte le specie megabentoniche erette; SH = punteggio dell'altezza media delle specie erette più abbondanti; SEN = punteggio della percentuale di colonie con epibiosi/necrosi delle specie erette più abbondanti; SL = punteggio della densità dei rifiuti.

$$\text{q-MAES} = \text{ST} + \text{SCB} + \text{SCE} + \text{SL}$$

dove: ST = punteggio del numero di taxa megabentonici; SCB = punteggio della copertura biotica percentuale nello strato basale; SCE = punteggio della copertura percentuale delle specie erette; SL = punteggio della densità dei rifiuti marini.

Ciascun punteggio è stato determinato sulla base dell'analisi video ROV e definendo uno specifico valore RC (Condizione di riferimento) che rappresenta il miglior valore rilevato considerando tutte le osservazioni. I valori RC sono stati selezionati considerando i valori “migliori” di ciascuna metrica annotata (Cánovas-Molina et al. 2016) in assenza di un'area da considerare come “intatta” e da considerare come riferimento. I valori RC sono stati quindi utilizzati per calcolare tre intervalli metrici (MV) e per assegnare un punteggio (1, 2 e 3): $\text{MV} < 50\%$ di RC; $50\% < \text{VM} < 80\%$ di



RC; $MV > 80\%$ di RC, come precedentemente descritto in dettaglio da Cánovas-Molina et al. (2016). Infine, i risultati sono stati espressi in tre classi di qualità (cattivo, moderato e buono; Cánovas-Molina et al. 2016).

Al fine dell'applicazione degli indici, sono state considerate dieci fotografie casuali scattate da ciascuna acquisizione video (tre video in ciascun sito ROV).

Abbiamo applicato gli indici MAES e q-MAES considerando i dati disponibili nelle tre aree e apportando modifiche in considerazione degli habitat da indagare (soprattutto esplicitando alcuni parametri, evitando di stravolgere troppo la formulazione originale), e per rendere gli indici più facilmente applicabili anche in ambiente fotico. Inoltre, nel calcolo degli indici sono state integrate diverse informazioni ottenute dalle indagini USV. Le equazioni di MAES (Indice A) e q-MAES (Indice B) rivisti sono riportate di seguito:

IndiceA: $ST + SCB + SEZ + SHZ + SEP + SHP + SEN + SL$ (3),

IndiceB: $ST + SCB + SCEZ + SCEP + SL$ (4),

dove il parametro ST rappresenta il punteggio del numero massimo di taxa megabentonici di flora e fauna; SEZ e SHZ sono rispettivamente il punteggio della densità (numero di organismi in ciascuna foto ROV analizzata) delle specie megazoobentiche erette e la loro altezza media (da immersioni subacquee); SEP e SHP sono il punteggio della densità (da immersioni scientifiche e analisi video ROV) delle specie megafitobentoniche erette e la loro altezza media (da dati USV); SCEZ e SCEP sono il punteggio di copertura percentuale rispettivamente delle specie erette megazoobentoniche e megafitobentoniche (da dati USV). Il parametro SEN è stato aggiornato e indica la percentuale di epibiosi/necrosi sia sulla flora che sulla fauna. Per l'applicazione nei nostri siti di studio, specifichiamo che: (i) i valori SHZ e SEP per TP non sono disponibili.

8.2.1 Fondali antistanti Capo Linaro

Le indagini ROV presso i fondali antistanti Capo Linaro sono state effettuate nel mese

215

di settembre 2022. Le indagini hanno previsto acquisizioni video lungo tre transetti (figura 153), per un totale di n.4 video ROV. Nel dettaglio, il transetto costiero è ubicato in aree con profondità tra i 3 e i 3 m; il transetto medio è posizionato in un'area con profondità compresa tra 7 e 10 m; il transetto di largo è posizionato in un'area con profondità comprese tra 10 e 15 m. Ogni transetto ha una lunghezza di più di 100 m.

In generale, i fondali di Capo Linaro, al termine della stagione estiva, mostrano un fondale composto essenzialmente da fondi duri e *Posidonia oceanica* su fondo duro. Di seguito si riportano alcune immagini estratte dai video ROV acquisiti durante la campagna di indagine (Figure 154, 155, 156).

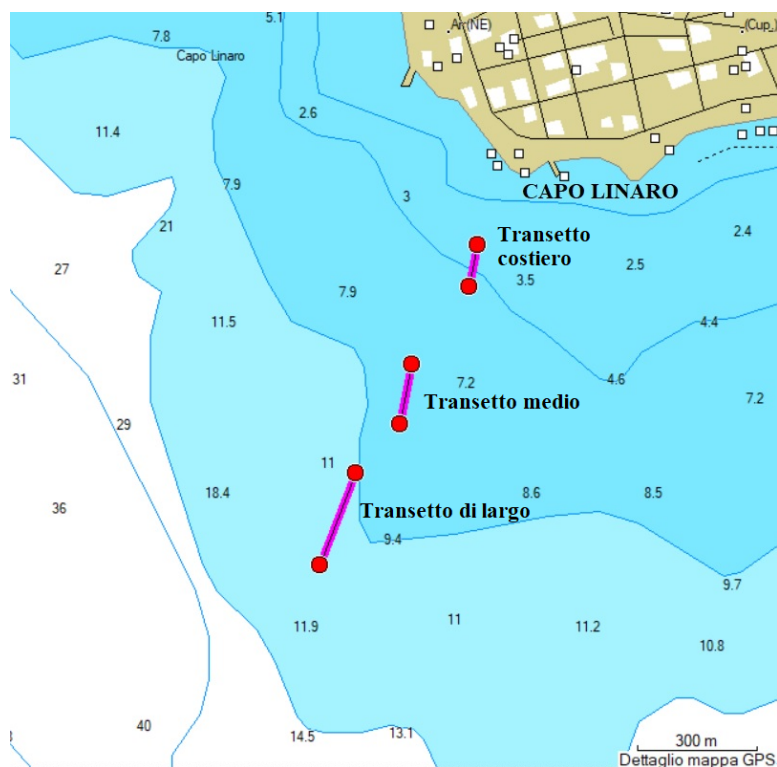


Figura 153 - Piano di indagine ROV, Capo Linaro, ottobre 2022.



Figura 154 - Capo Linaro, transetto di largo.

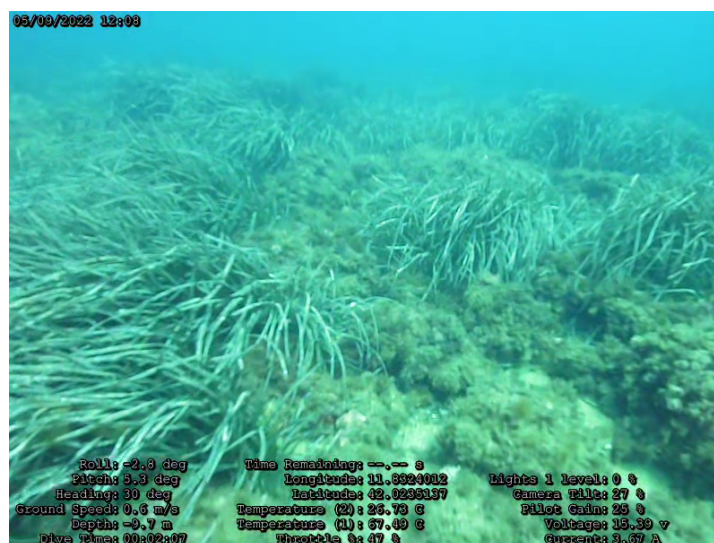


Figura 155 - Capo Linaro, transetto medio.

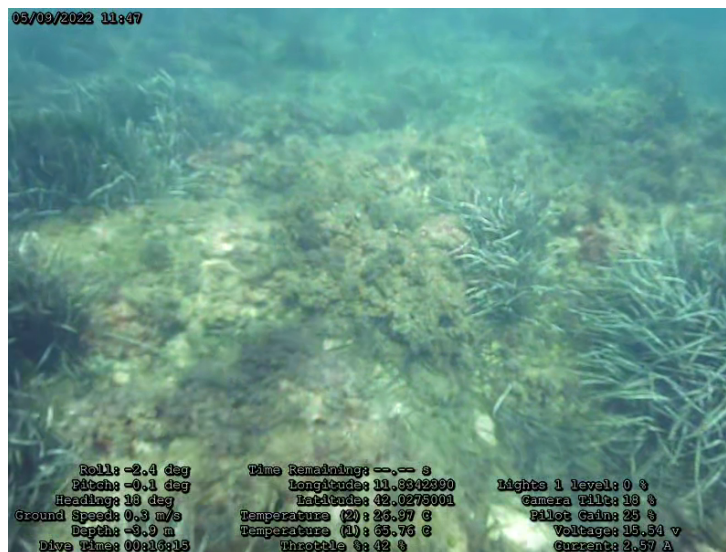


Figura 156 - Capo Linaro, transetto costiero.

In tabella 24 (alla fine del cap. 8.2.3) è riportato il risultato dell'applicazione degli indici MAES e q-MAES per l'area di Capo Linaro, compresa la definizione dei valori soglia, in base alle osservazioni scientifiche dei video ROV.

In generale, lo stato ecologico dell'area di Capo Linaro è da ritenersi Moderato.

8.2.2 Fondali antistanti Macchiatonda

Le indagini ROV presso i fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda sono state effettuate nei mesi di aprile 2023. Le indagini hanno previsto acquisizioni ROV, in totale n.3 video, a partire da punti scelti in base alla morfologia sommersa dell'area (Figura 157).

In generale, i fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda mostrano fondali ricchi di biodiversità, con presenza di coralligeno, fondi rocciosi e presenza di *Posidonia oceanica*. Di seguito si riportano alcune immagini estratte dai video ROV (Figure 158 e 159).

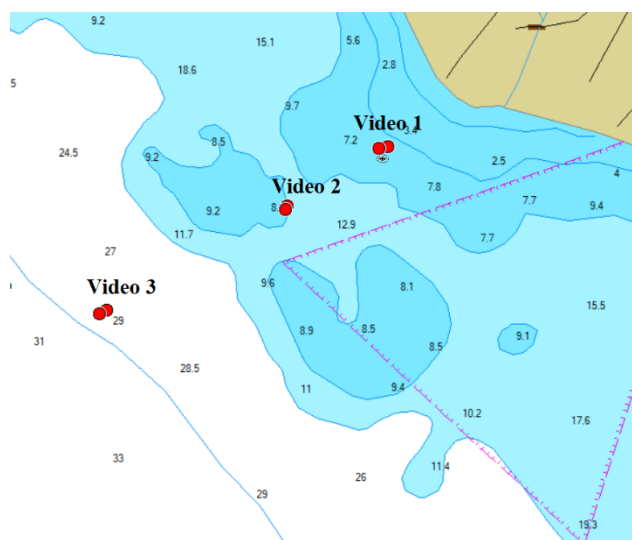


Figura 157 - Aree di indagine ROV, fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, aprile 2023.

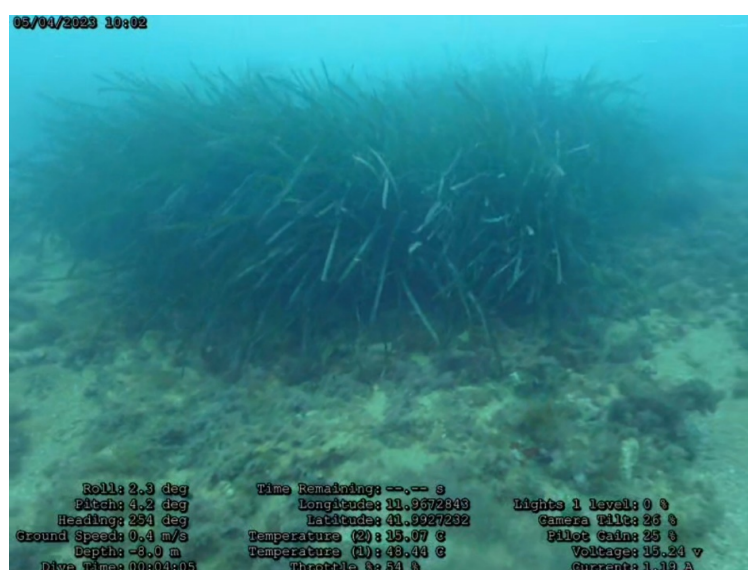


Figura 158 - Fondali antistante la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda.



Figura 159 - Fondali antistante la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda.

In tabella 24 (alla fine del cap. 8.2.3) è riportato il risultato dell'applicazione degli indici MAES (mod) e q-MAES per l'area di Macchiatonda, compresa la definizione dei valori soglia, in base alle osservazioni scientifiche dei video ROV.

In generale, lo stato ecologico dell'area di Macchiatonda è da ritenersi Moderato.

8.2.3 Fondali dell'AMP di Tor Paterno

Le indagini ROV presso i fondali compresi all'interno dell'AMP delle Secche di Tor Paterno sono state effettuate nei mesi di dicembre 2022 e gennaio 2023. Le indagini hanno previsto acquisizioni ROV, in totale n.4 video, a partire da punti scelti in base alla morfologia sommersa dell'area, in particolar modo ubicati vicino all'area di minore profondità delle Secche (Figura 160).

In generale, i fondali delle Secche di Tor Paterno mostrano fondali ricchi di biodiversità, con presenza di coralligeno strutturato, fondi rocciosi e presenza di *Posidonia oceanica*. Di seguito si riportano alcune immagini estratte dai video ROV (Figure 161, 162, 163).

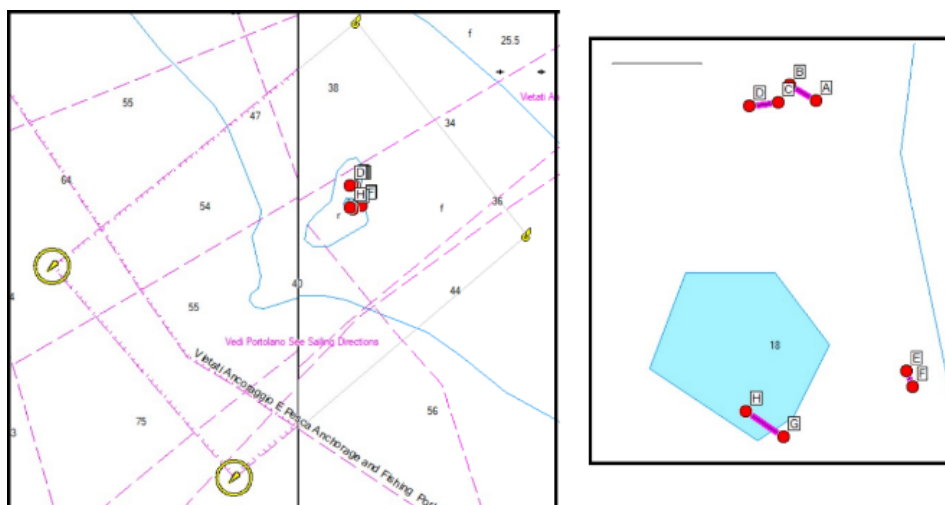


Figura 160 - Aree di indagine ROV, Secche di Tor Paterno, gennaio 2023.

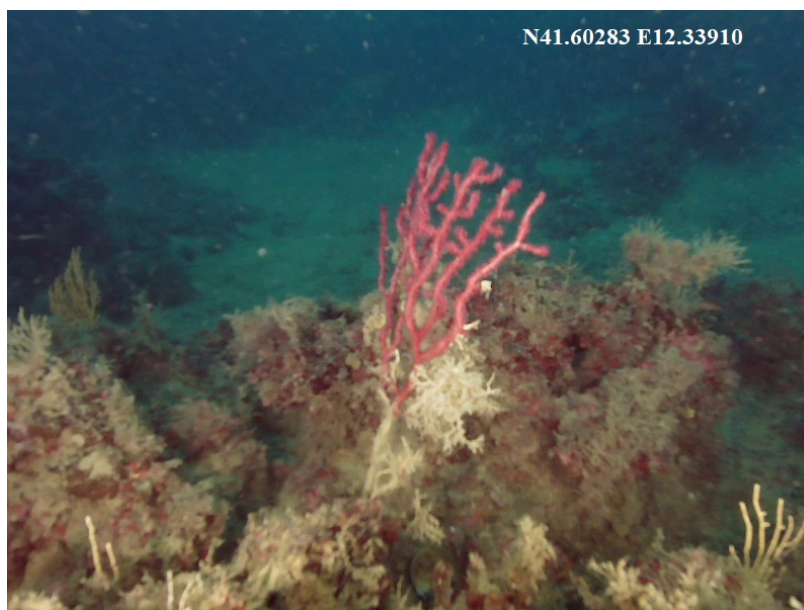


Figura 161 - Fondali dell'AMP Secche di Tor Paterno.



Figura 162 - Fondali dell'AMP Secche di Tor Paterno.

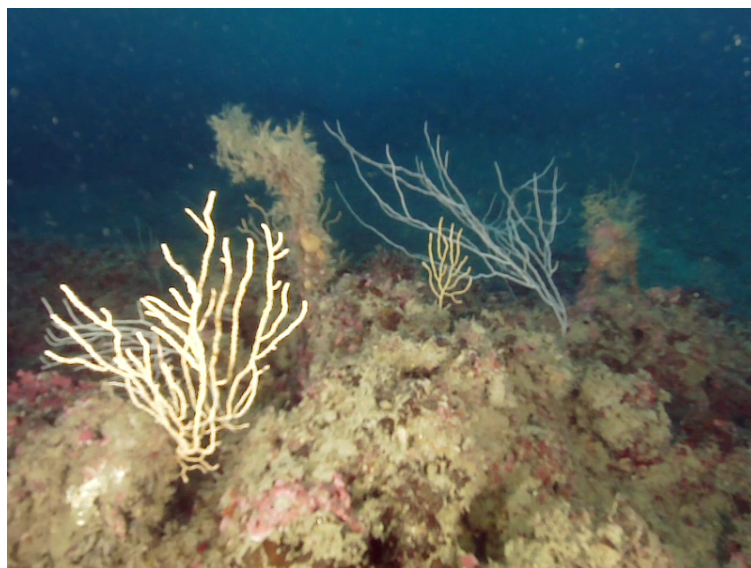


Figura 163 - Fondali dell'AMP Secche di Tor Paterno.

In tabella 24 è riportato il risultato dell'applicazione degli indici MAES e q-MAES per l'area di Tor Paterno, compresa la definizione dei valori soglia, in base alle osservazioni scientifiche dei video ROV.

In generale, lo stato ecologico dell'area di Tor Paterno è da ritenersi Moderato.

Tabella 24 - Valutazione dello stato ecologico (MAES e q-MAES) nelle tre aree di studio.

	Metriche	Score 1	Score 2	Score 3	Condizione di riferimento (RC)					
Index A	Massimo numero di taxa (T)	< 3.9	4 < MV < 6.4	> 6.5	8					
	Percentuale di copertura botica basale (CB)	< 49%	50% < MV < 79%	> 80%	100%					
	Densità delle specie erette negaobiontoniche (EZ)	< 10	11 < MV < 18	> 19	22					
	Altezza delle specie erette negaobiontoniche (HZ)	-	-	-	-					
	Densità delle specie erette negaflobiontoniche (EZ)	< 123	124 < MV < 197	> 198	246**					
	Altezza delle specie erette negaflobiontoniche (HZ)	< 0.59	0.6 < MV < 0.95	> 0.96	1.2 m					
Index B	percentuale di necrosi/epifiosi (EN)	> 80 %	79% > MV > 50%	< 49 %	100%					
	Marine litter (L)	0	0	0	0					
	Copertura percentuale negaobionthos (CEZ)	< 22%	23% < MV < 35%	> 36%	45%					
	Copertura percentuale negaflobionthos (CEP)	< 49%	50% < MV < 79%	> 80%	100%					
Sito	T	CB	EZ	HZ	EP	HP	EN	L	CEZ	CEP
Capo Linaro	2	98.70%	0	-	165	1.2 m	60.40%	0	0	100%
Marchionda	2	79%	0	-	58	0.61 m	18.50%	0	0	100%
Tor Paterno	8	94.12%	9.4	-	70.87	-	14.75%	0	23.10%	90.70%
Habitat quality	Score Index A	Score Index B	Sito	Index A	Index B	Qualità dell'habitat				
Attivo	8 to 12	5 to 8	CP	15	11	Moderato				
Moderato	13 to 19	9 to 11	MT	14	11	Moderato				
Buono	20 to 24	12 to 15	TP	16	11	Moderato				



8.3 Caratterizzazione della *Posidonia oceanica*

Il monitoraggio delle praterie di *Posidonia oceanica* lungo l'U.F. è stato effettuato tramite acquisizione di dati acustici raccolti con un ecoscandaglio scientifico MX AQUATIC HABITAT ECHOSOUNDER della BioSonics che funziona con un trasduttore a frequenza singola di 204.8 kHz, installato sulla piattaforma autonoma Echoboat (Unmanned surface vehicle; USV). Tale tecnica di monitoraggio permette di ottenere dati relativi a presenza e copertura della vegetazione, oltre che informazioni sulla morfologia del fondale. Questi dati, effettuati su una scala temporale ampia, permettono di valutare la dinamica dello stato di salute dell'ecosistema.

Sono state effettuate indagini in tre aree: i fondali antistanti Capo Linaro (ottobre 2022), i fondali antistanti Macchiatonda (marzo 2023), i fondali dell'AMP delle Secche di Tor Paterno (dicembre 2022).

Nell'area di Capo Linaro e Macchiatonda, in concomitanza del rilievo Echoboat, è stata effettuata l'analisi dei parametri morfo-strutturali della *P. oceanica*, attraverso il prelievo di n. 1 campione. I risultati, assieme alle immagini ROV acquisite nelle stesse aree (vedi paragrafo 9.3), sono stati utilizzati per la validazione dei dati echosounder.

I risultati dell'analisi dei parametri morfo-strutturali della *P. oceanica* sono riportati in tabella 25.

Tabella 25 - Risultati dell'analisi dei parametri morfo-strutturali della *P. oceanica* nelle aree di Capo Linaro e di Macchiatonda.

	Stazione	N. medio foglie/fascio	Larg foglie intermedie (cm)	Lung foglie intermedie (cm)	Larg foglie adulte (cm)	Lung foglie adulte (cm)	Copertura	Densità (50x50)	Altezza media (cm)
Capo Linaro	CAP 1	7	0.7	36.47	0.8	49.94	40%	171	82
	CAP 2	5.6	1.8	49.7	0.9	43.9			
	CAP 3	15	1	35.47	1	56.67			
Macchiatonda	CAP 1	9	0.85	37	0.9	32	19%	170	67 cm
	CAP 2	8	0.9	53	0.9	35.5			
	CAP 3	8	0.9	47	0.9	31			

8.3.1 Indagini della *P. oceanica* presso Capo Linaro, ottobre 2022

Le indagini presso i fondali di Capo Linaro sono state effettuate durante il mese di ottobre 2022. La piattaforma Echoboat è stata programmata a riva e trasportata in prossimità della coordinata di inizio del transetto di misura (in figura 164 si riporta il piano di campionamento effettuato). Una volta giunti in prossimità della coordinata



scelta. Echoboat è stato impostato in modalità autonoma e sono state effettuate diverse acquisizioni lungo il transetto.

Una volta acquisiti i dati sono stati elaborati ed è stato possibile ottenere informazioni riguardanti la profondità, la copertura vegetale, l'altezza della vegetazione, e la tipologia di substrato.

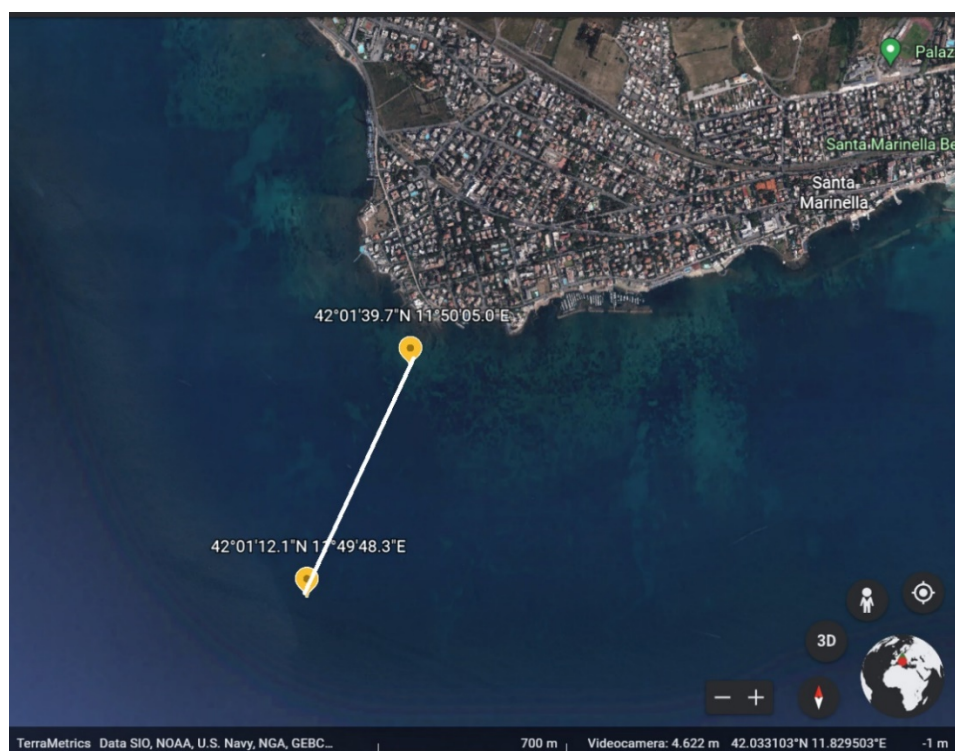


Figura 164 - Piano di campionamento, Capo Linaro 2022.



Figura 165 - Profondità, Capo Linaro 2022.

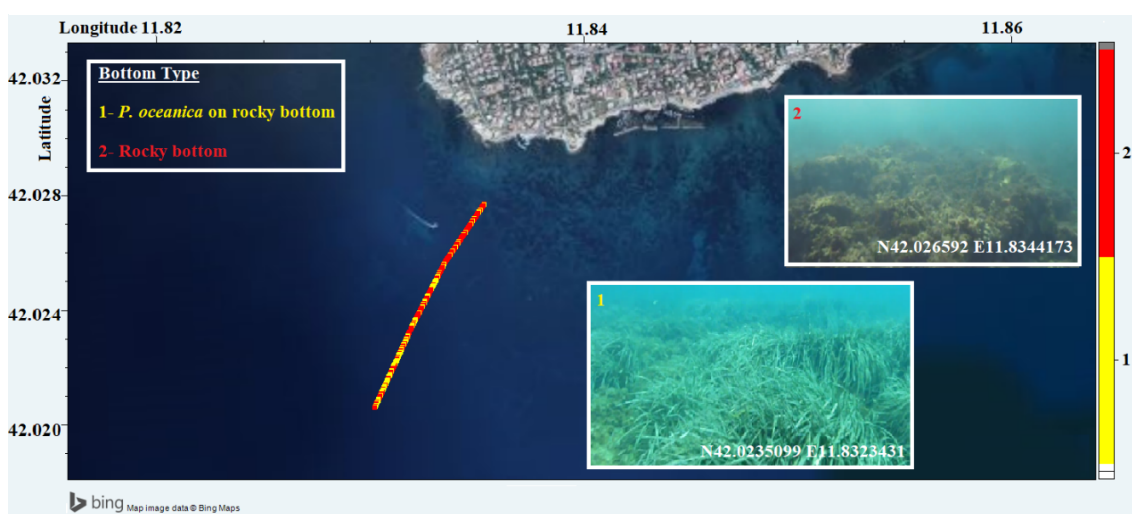


Figura 166 - Tipologia di substrato, Capo Linaro 2022. I fondali in giallo rappresentano fondi duri con presenza di *P. oceanica*, i fondali in rosso rappresentano fondo duro con copertura algale.



Figura 167 - Copertura algale e vegetale, Capo Linaro 2022.



Figura 168 - Altezza della vegetazione (m), Capo Linaro 2022. È stata utilizzata una soglia di 0.3 m per discriminare la *P. oceanica* dal resto della vegetazione.

8.3.2 Indagini della *P. oceanica* presso i fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, marzo 2023

Le indagini strumentali presso i fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda sono state svolte durante il mese marzo 2023. I rilievi hanno interessato n.1 transetto di misura, riportato in figura 169.

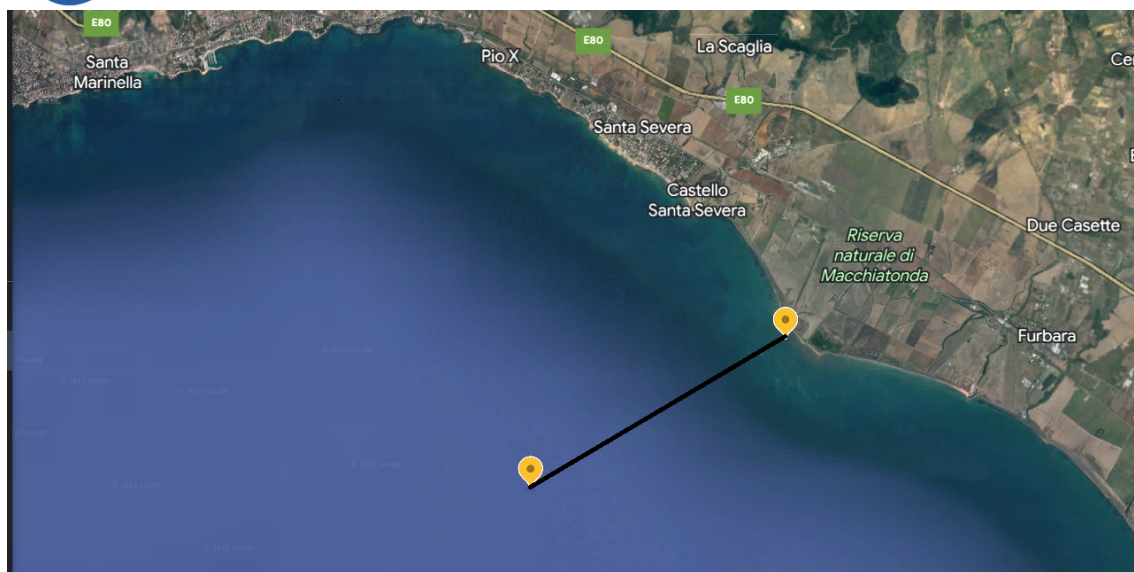


Figura 169 - Piano di campionamento per le indagini strumentali, fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, marzo 2023.

La piattaforma Echoboat è stata programmata a riva e trasportata in prossimità della coordinata di inizio prossima alla costa (Figura 169). Una volta giunti in prossimità della coordinata scelta, Echoboat è stato impostato in modalità autonoma ed è stata effettuata l'acquisizione dati.

Una volta acquisiti, i dati sono stati elaborati ed è stato possibile ottenere informazioni riguardanti la batimetria, tipologia di fondale, la morfologia del fondale, e la copertura e l'altezza vegetale.

Di seguito alcune immagini relative ai dati elaborati.

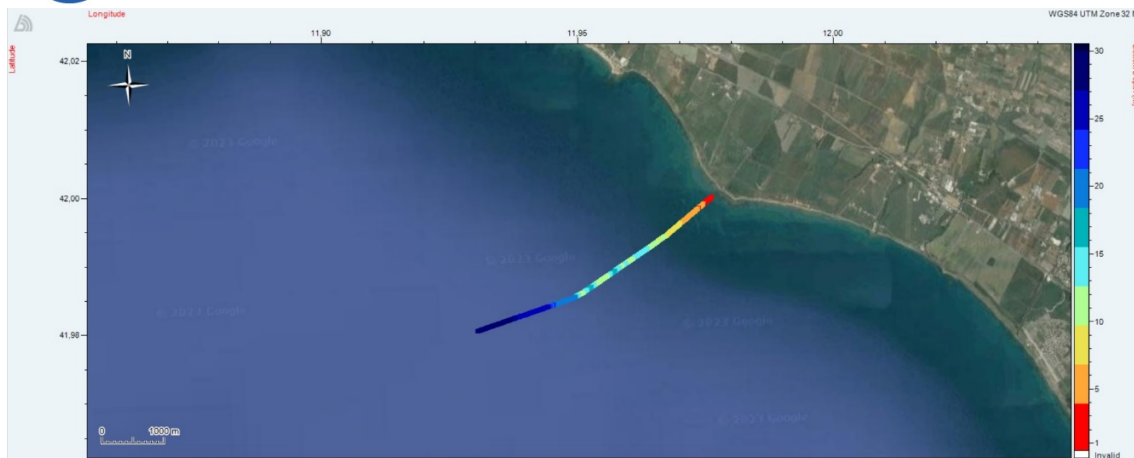


Figura 170 - Profondità (m), fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, marzo 2023.



Figura 171 - Tipologia di fondale, fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, marzo 2023. I fondali in giallo corrispondono a fondo duro con presenza di copertura algale. I fondali in rosso rappresentano fondi duri con presenza di *P. oceanica*.

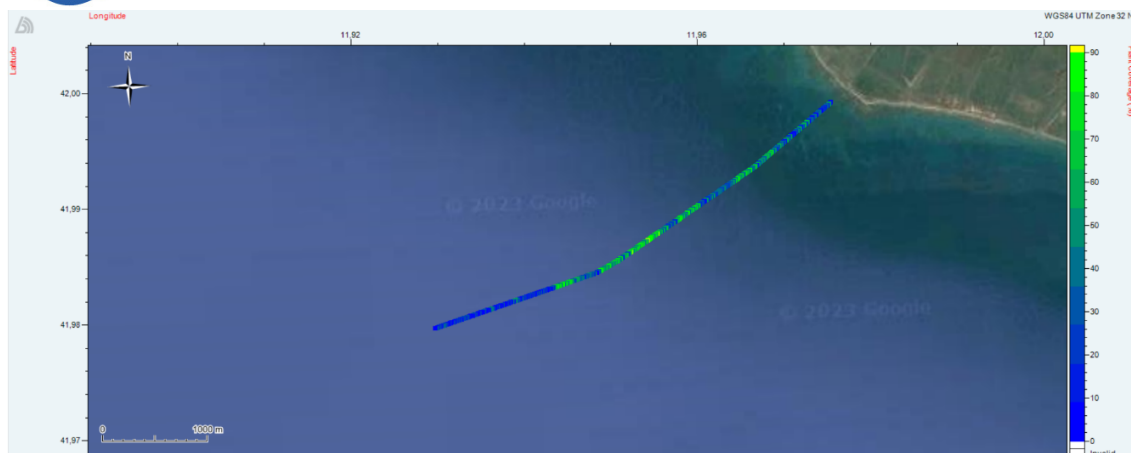


Figura 172 - Copertura della vegetazione (alghe e piante), fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, marzo 2023.

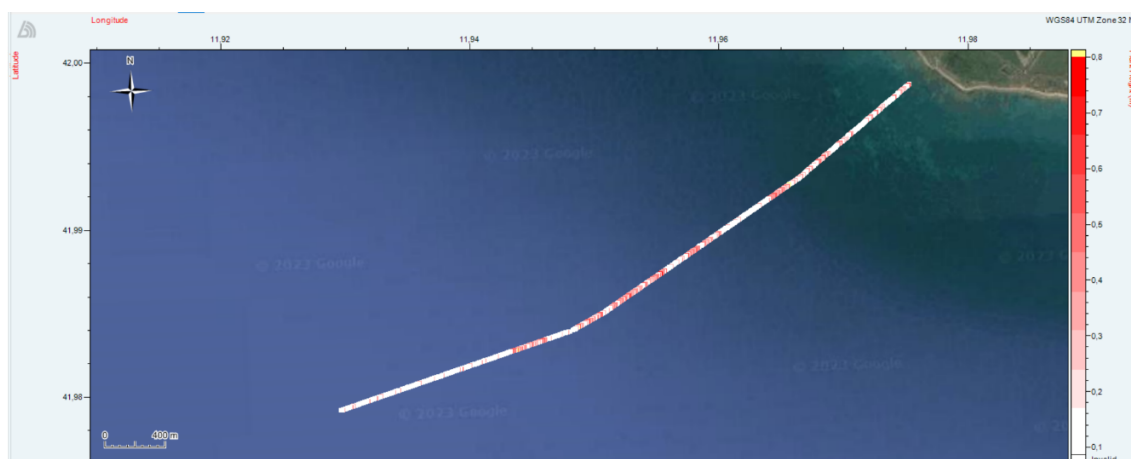


Figura 173 - Altezza della vegetazione, fondali antistanti la Riserva Naturale Regionale di Macchiatonda, marzo 2023. Le altezze sono riferite in particolare alla P. oceanica. È stata utilizzata la soglia di 0.3 m.

8.3.3 Indagini della *P. oceanica* presso AMP Secche di Tor Paterno, dicembre 2022

Le indagini strumentali presso l'AMP Secche di Tor Paterno sono state svolte durante il mese di dicembre 2022. Al fine di acquisire il maggior quantitativo di informazioni possibile dell'area, i rilievi hanno interessato cinque transetti di misura che ricoprono completamente l'area con minore profondità dell'area marina protetta (Figura 174).

232

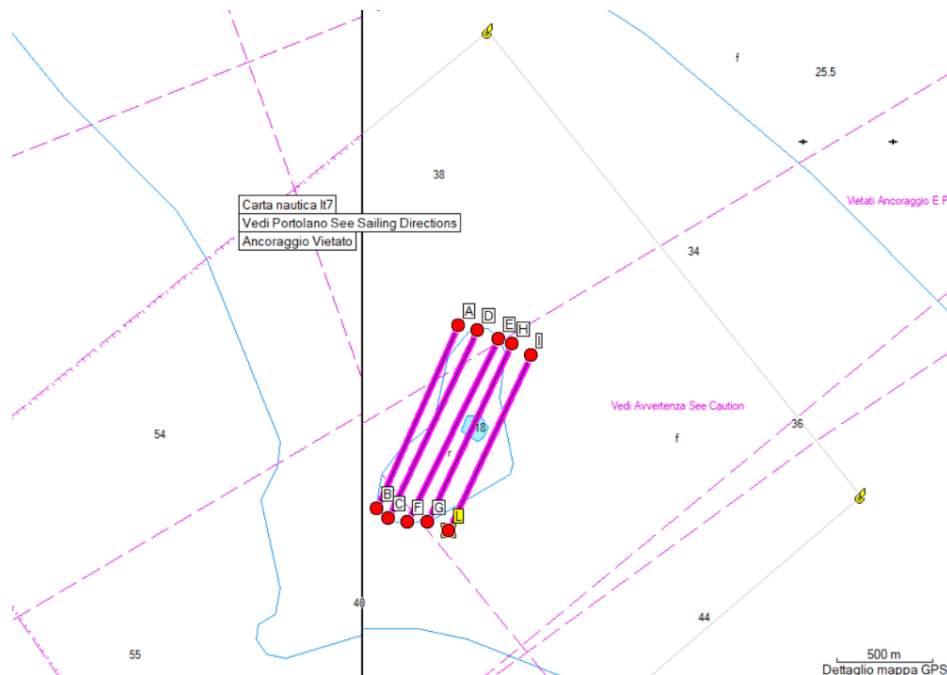


Figura 174 - Piano di campionamento per le indagini strumentali, AMP Secche di Tor Paterno, dicembre 2022.

La piattaforma Echoboat è stata programmata a riva e trasportata in prossimità della coordinata di inizio (punto A) (Figura 174). Una volta giunti in prossimità della coordinata scelta, Echoboat è stato impostato in modalità autonoma e sono state effettuate diverse acquisizioni lungo i cinque transetti.

Una volta acquisiti i dati sono stati elaborati ed è stato possibile ottenere informazioni riguardanti la batimetria, tipologia di fondale, la morfologia del fondale, e la copertura vegetale.

Nell'area di Tor Paterno non è stato possibile effettuare immersioni e prelevare il campione per l'analisi dei parametri morfo-strutturali della *P. oceanica*. Di conseguenza, non è stato possibile validare i dati di altezza della vegetazione, che per questo motivo sono stati omessi da questa relazione.

Di seguito alcune immagini relative ai dati elaborati.

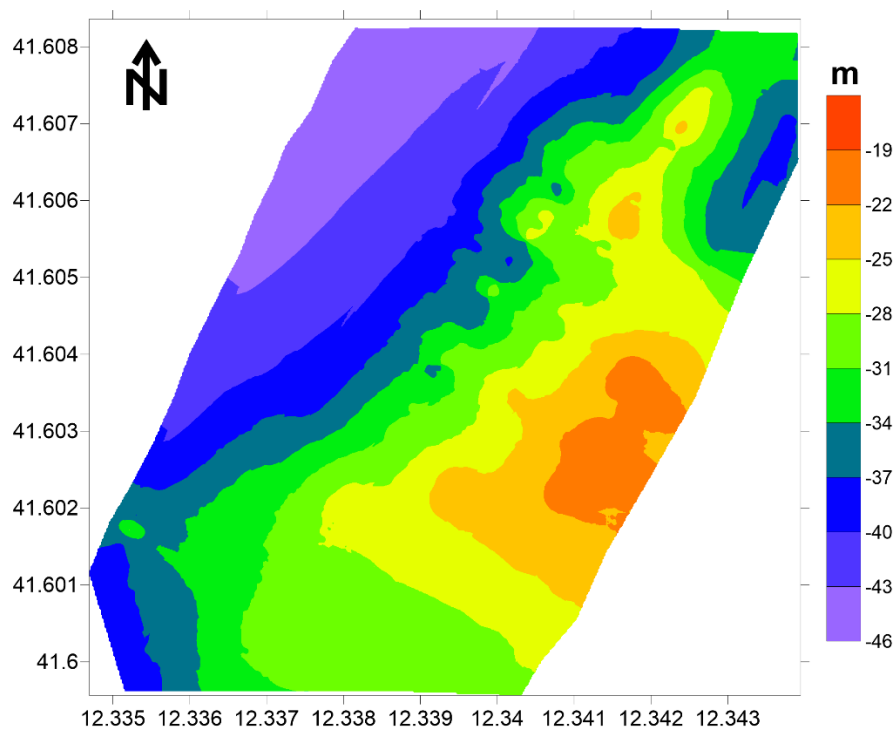


Figura 175 - Profondità (m), AMP Secche di Tor Paterno, dicembre 2022.

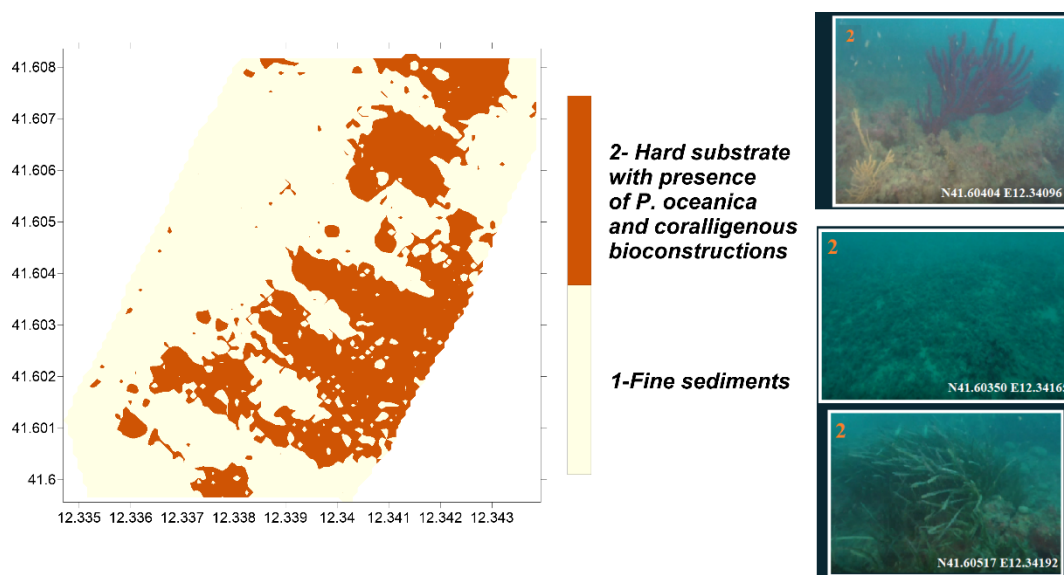


Figura 176 - Tipologia di fondale, AMP Secche di Tor Paterno, dicembre 2022. I fondali in rosso corrispondono a fondi duri con presenza di *P. oceanica* e biocostruzioni di coralligeno.

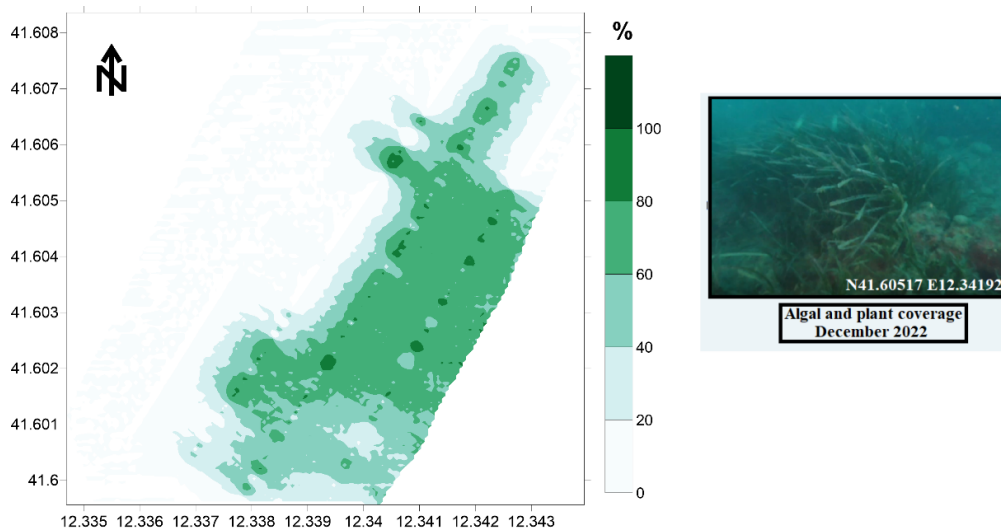


Figura 177 - Copertura della vegetazione, AMP Secche di Tor Paterno, dicembre 2022. Abbondante presenza di *P. oceanica*.

8.4 Analisi quali-quantitativa del pescato commerciale della marineria di Fiumicino

La flotta peschereccia di Fiumicino, che è opera nel territorio da ormai decenni, è considerata la più importante della regione Lazio e una delle più rappresentative del Tirreno Centrale. Essa è rappresentata da 35 motonavi che operano strascico demersale e da circa 10 turbo-soffianti adibite alla cattura dei molluschi bivalvi; inoltre sono presenti oltre 60 unità di piccola pesca che usano attrezzi fissi come reti posta e palangari. La piccola pesca, categoria che racchiude, a Fiumicino, tutte le imbarcazioni che non praticano la pesca a strascico, si esercita con imbarcazioni di piccole dimensioni (lunghezza inferiore ai 12 m) e limitate motorizzazioni (raramente superiori ai 100 HP). Generalmente a bordo di ciascuna unità si trova un solo imbarcato. Le imbarcazioni da strascico sono caratterizzate da lunghezza fuori tutto (Lft) compresa tra i 12 e i 30 m, stazza lorda (GT) totale di circa 2.054 e una potenza (KW) totale di circa 10.507. Il tratto di costa in cui opera questa flotta va da Capo Circeo a Capo Dinaro (80 miglia, 160 Km circa); lo strascico viene effettuato soprattutto su substrati sabbiosi, misti e fangosi ma alcune imbarcazioni si spostano fino alle secche di Palo e alla Secca della Vaccina (settore costiero compreso tra Santa Severa e Ladispoli), localizzate a Nord del Porto e in aree

limitrofe alle secche di Tor Paterno (sud). La pesca in queste aree più eterogenee ha lo scopo di insidiare specie associate a substrati misti con presenza di rocce (Sparidi, Carangidi ecc.). I substrati mobili antistanti la Foce del Tevere, alimentati regolarmente dagli apporti continentali, godono di un'altissima abbondanza di molluschi bivalvi e da sempre questi fondali sono stati sfruttati per la raccolta di numerose specie tramite l'utilizzo di rastrelli e turbo-soffianti; tra le specie più apprezzate troviamo: il lupino (*Chamalea galina*), il cannicchio (*Solen marginatus*) e le telline. Per quanto riguarda le specie associate allo strascico le più pescate sono sicuramente le triglie (*Mullus spp.*), il merluzzo (*M. merluccius*), la spigola (*Dicentrarchus labrax*), le seppie (*Sepia officinalis*), i calamari (*Loligo sp* e *Illex coindietii*) e la spannocchia (*Squilla mantis*) ma numerosi sono anche le specie secondarie catturate in base alla stagionalità come palamite, orate, pesce azzurro, lampughe ecc.

La costruzione di opere portuali e le operazioni di dragaggio ad essa associate possono alterare le caratteristiche quali-quantitative dei popolamenti ittici demersali e le reti trofiche ad esse associate e di conseguenza influenzare i quantitativi di cattura delle marinerie locali. Al fine di caratterizzare le popolazioni ittiche locali e di creare un bianco utile a confronti futuri, sono stati raccolti ed analizzati i dati quali quantitativi relativi al pescato commerciale di n.3 imbarcazioni appartenenti alla marineria di Fiumicino.

Questo lavoro ha lo scopo di analizzare e descrivere le caratteristiche quali quantitative del pescato commerciale di Fiumicino al fine di produrre un bianco utile a confronti successivi. Queste analisi saranno in futuro indispensabili per valutare l'insorgere di potenziali variazioni quali quantitative negli andamenti del pescato causate dalla costruzione dell'opera portuale e al contempo monitorare lo stato di salute degli stock ittici (specie target).

8.4.1 Metodi

Sono stati raccolti e analizzati i dati relativi al pescato commerciale di n.3 imbarcazioni appartenenti alla marineria di Fiumicino. Per ogni imbarcazione è stata prodotta la lista specie, comprensiva di abbondanze in Kg., inerente alla fauna commercializzata al fine



di descrivere le variazioni quali-quantitative del pescato locale e al contempo identificare le specie più abbondanti pescate nell'area analizzata. Per ogni specie è stata descritta la taglia commerciale e la categoria di appartenenza alle liste FAO; è stata anche analizzata la variazione mensile delle catture nell'arco di 1 anno (2020). Inoltre, sono state analizzate e descritte le catture inerenti a n.1 turbosoffiante al fine di monitorare le variazioni inerenti alla pesca dei bivalvi nell'area oggetto di studio.

Imbarcazioni:

- **Claudio Padre** – pesca a strascico;
- **San Pietro** – pesca a strascico;
- **Sanata Maria** – pesca a strascico e pesca dei bivalvi.

8.4.2 Analisi dati e Risultati preliminari

In totale le tre imbarcazioni hanno catturato un totale di 232.950 kg di pesce suddivisi in 217 specie, l'imbarcazione Santa Maria, con 164876 kg di pescato e 75 specie pescata, rappresenta l'imbarcazione con il maggior quantitativo di catture seguita Dal Claudio Padre (40.800 Kg e 74 specie) e dalla motonave San Pietro (27.274 kg e 68 specie).

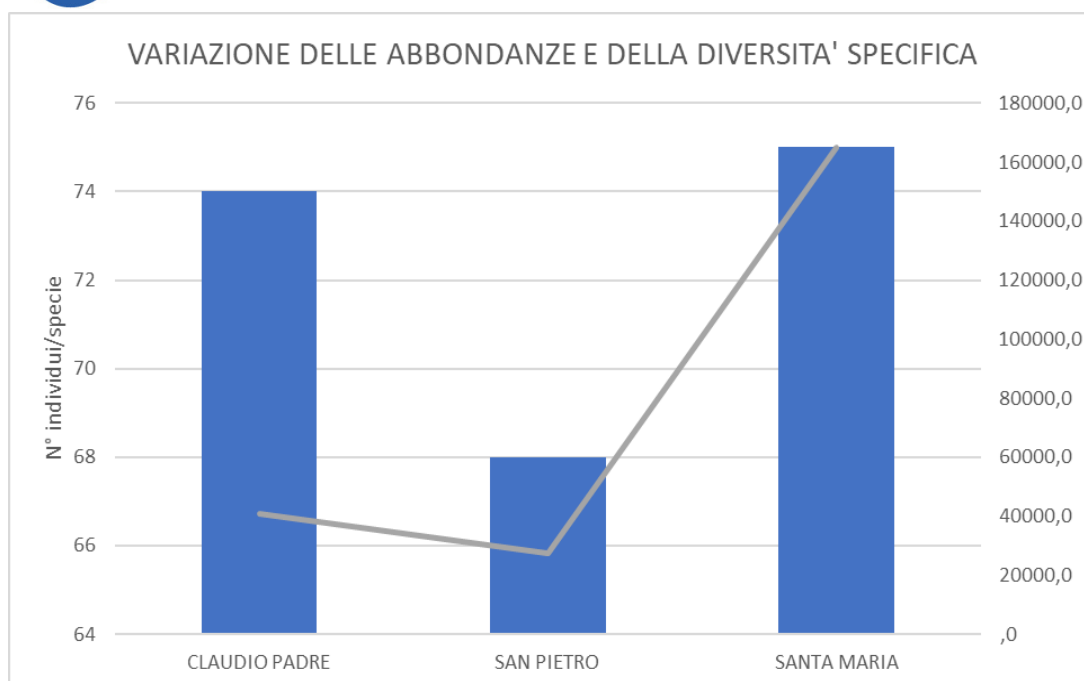


Figura 178 - Variazione delle abbondanze e della diversità specifica nelle catture delle 3 imbarcazioni oggetto di studio.

L'analisi delle 10 specie più abbondanti mostra che i quantitativi di cattura sono di 195.363 kg rappresentativi dell'84% del pescato totale.

In seguito, si descrivono le specie target maggiormente pescate e i loro quantitativi di cattura:

Claudio Padre

Tabella 26 - Pescato imbarcazione Claudio Padre.

SPECIE	CATTURE IN Kg.
GAMBERO ROSA MED. MEDIO	5.347
MAZZANCOLLA	2.912
MOSCARDINO BIANCO	1.720
MURICE	1.829
NASELLO	1.140

NASELLO MEDIO	2.922
PANNOCCHIA O CANOCCHIA	2.953
POLPO DI SCOGLIO	3.712
SEPPIA	1.654
TRIGLIA DI FANGO	3.869
TOT: 28.057	

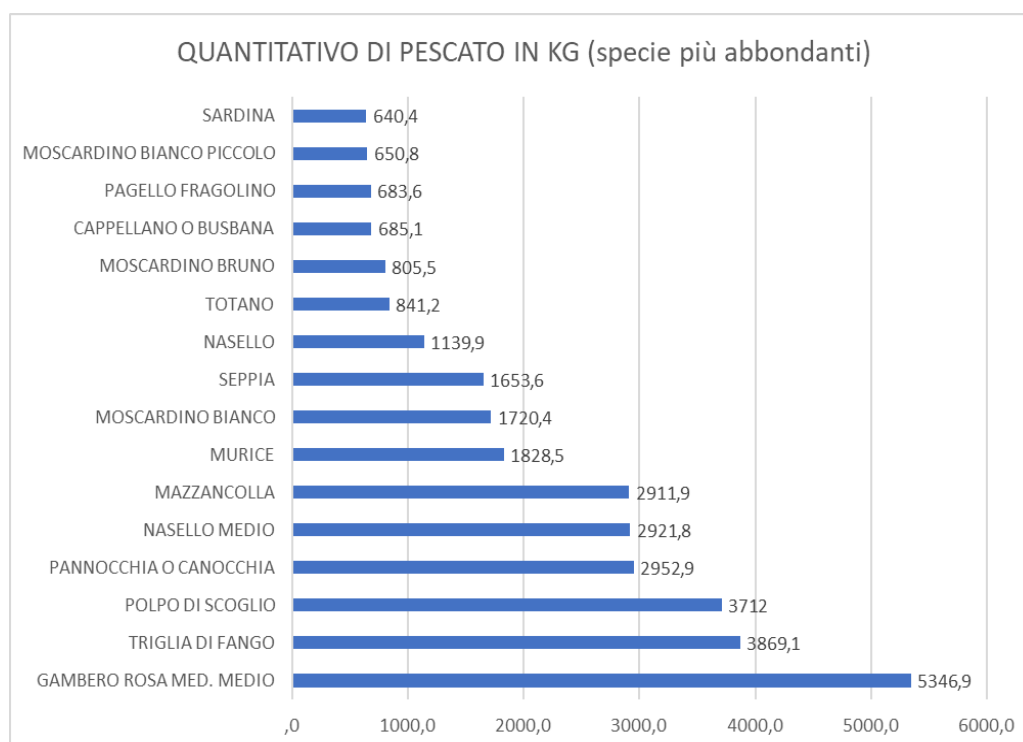


Figura 179 - Pescato imbarcazione Claudio Padre, specie più abbondanti.

San Pietro

Tabella 27 - Pescato imbarcazione San Pietro.

SPECIE	CATTURE IN Kg.
GAMBERO ROSA MED. MEDIO	4475
GAMBERO VIOLA	1.063,80
MAZZANCOLLA	1.703,50
MOSCARDINO BIANCO	1.513,30
NASELLO	1058

NASELLO MEDIO	1.846,90
PANNOCCHIA O CANOCCHIA	2.763,90
POLPO DI SCOGLIO	2.302,60
TOTANO	950,6
TRIGLIA DI FANGO	1362
TOT: 19.039,6	



Figura 180 - Pescato imbarcazione San Pietro, specie più abbondanti.

Santa Maria

Tabella 28 - Pescato imbarcazione Santa Maria.

SPECIE	CATTURE IN Kg.
ACCIUGA O ALICE	93.693
GAMBERO ROSA	17.373,80

MAZZANCOLLA	3.340,90
MOSCARDINO BIANCO	5.529,60
NASELLO	3.196,18
PANNOCCHIA O CANOCCHIA	3.803,7
POLPO DI SCOGLIO	7.942,7
SARDINA	2743
SEPPIA	4.127,9
TRIGLIA DI FANGO	6.515,44
TOT: 148.266,2	

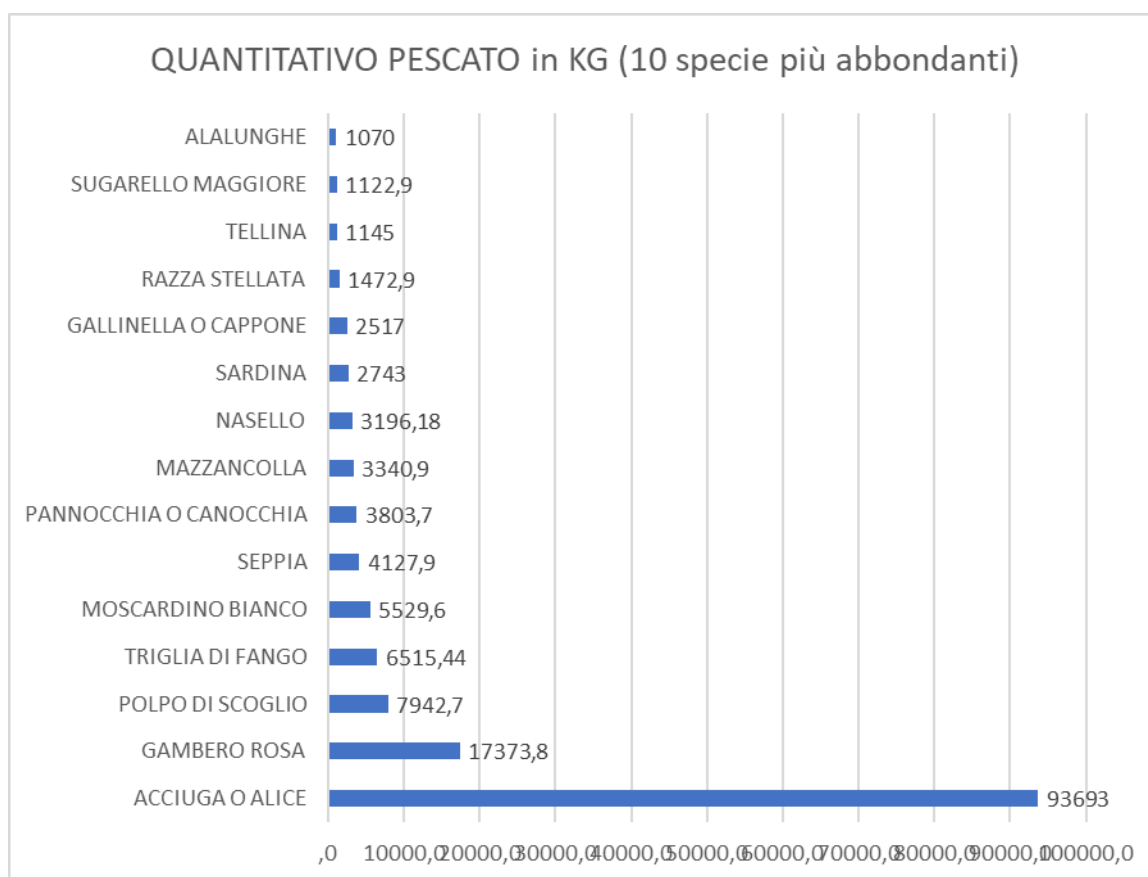
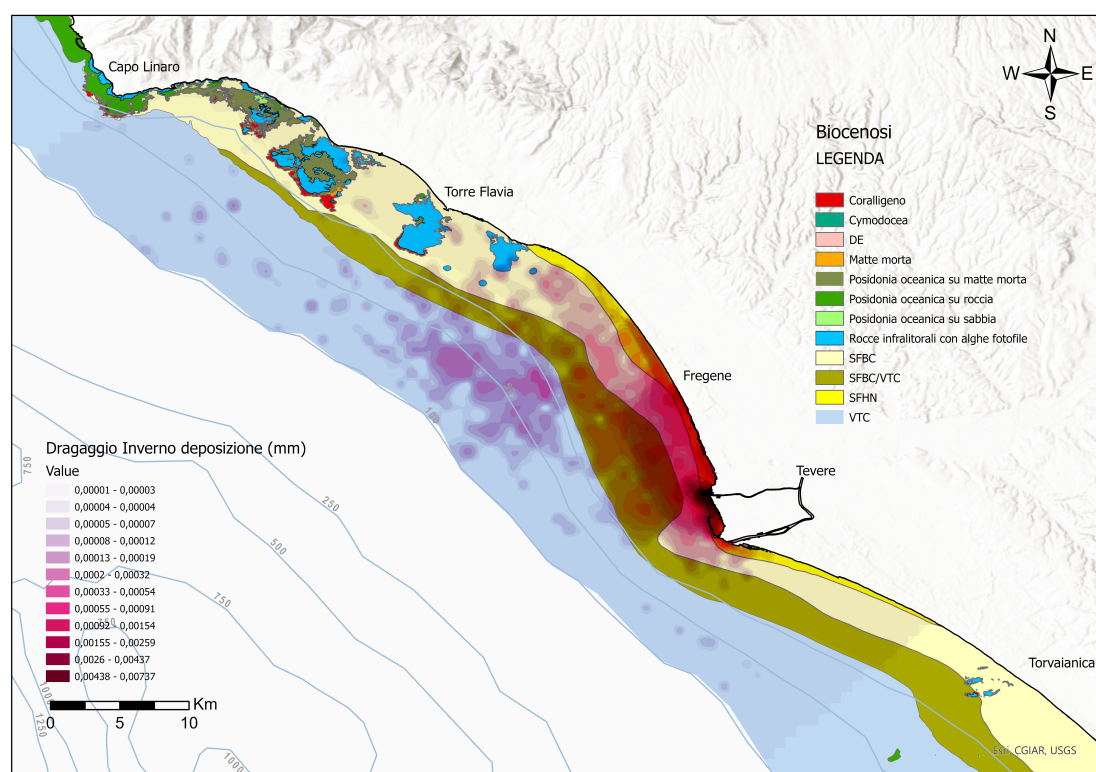


Figura 181 - Pescato più abbondante Santa Maria

9. INTEGRAZIONE DEI DATI NELLA PIATTAFORMA GIS

Al fine di elaborare rappresentazioni sinottiche dei dati raccolti nel corso delle fasi del progetto, sono stati predisposti diversi layer geografici di rappresentazione utilizzando la piattaforma ARCGIS. Il sistema informativo geografico è basato su un database di progetto che raccoglie sia i dati di campo e modellistici che la letteratura di riferimento. Sia il database che le elaborazioni cartografiche dei layers di dati rispondono alle specifiche INSPIRE (INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe) al fine di garantire oltre che una gestione più efficiente dei dati, anche una piattaforma di condivisione in accordo con la Direttiva 2007/2/CE.



Bibliografia

- APAT, I. C. (2003). Analytical methods for water. *APAT guidelines and manuals*.
- Appleby, P. G., & Oldfieldz, F. (1983). The assessment of 210 Pb data from sites with varying sediment accumulation rates. *Hydrobiologia*, 103, 29-35.
- Barletta, I. (2021). Seamless Modelling of the Southern European Seas with an optimized MPI-based Unstructured-Grid Model. PhD Thesis. Alma Mater Studiorum–Università di Bologna.
- Bricaud, A., Claustre, H., Ras, J., & Oubelkheir, K. (2004). Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: Influence of the size structure of algal populations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C11)
- Campoy, A. (1982). Fauna de España. Fauna de anélidos poliquetos de la Península Ibérica (II).
- Cánovas-Molina, A., Montefalcone, M., Bavestrello, G., Cau, A., Bianchi, C. N., Morri, C., ... & Bo, M. (2016). A new ecological index for the status of mesophotic megabenthic assemblages in the Mediterranean based on ROV photography and video footage. *Continental Shelf Research*, 121, 13-20.
- Cao, F., Tzortziou, M., Hu, C., Mannino, A., Fichot, C. G., Del Vecchio, R., ... & Novak, M. (2018). Remote sensing retrievals of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon dynamics in North American estuaries and their margins. *Remote Sensing of Environment*, 205, 151-165.
- Causio, S., Ciliberti, S. A., Clementi, E., Coppini, G., & Lionello, P. (2021). A modelling approach for the assessment of wave-currents interaction in the Black Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 893.
- Centurioni, L., Horányi, A., Cardinali, C., Charpentier, E., & Lumpkin, R. (2017). A global ocean observing system for measuring sea level atmospheric pressure: Effects and impacts on numerical weather prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(2), 231-238.
- Chevreaux, E., & Fage, L. (1925). Feuille de ration Française des Sociétés de Science Naturelles. Office Central de Faunistique, *Faune de France* (Vol. 9, pp. 437-9). Lechevalier.



Clementi, E., Oddo, P., Drudi, M., Pinardi, N., Korres, G., & Grandi, A. (2017). Coupling hydrodynamic and wave models: first step and sensitivity experiments in the Mediterranean Sea. *Ocean Dynamics*, 67, 1293-1312.

Costa, F., Krapp, T., & Ruffo, S. (2009). Atlante degli Anfipodi Mediterranei. Guida illustrata a colori.—Atlas of Mediterranean amphipods. Guide with colour illustrations. Fauvel, P. (1923). Feuille de la Faune Française des Sociétés de Science Naturelles. Office Central de Faunistique, *Faune de France* (Vol. 5). Lechevalier.

Federico, I., Pinardi, N., Coppini, G., Oddo, P., Lecci, R., & Mossa, M. (2017). Coastal ocean forecasting with an unstructured grid model in the southern Adriatic and northern Ionian seas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(1), 45-59.

Feola, A., Lisi, I., Salmeri, A., Venti, F., Pedroncini, A., Gabellini, M., & Romano, E. (2016). Platform of integrated tools to support environmental studies and management of dredging activities. *Journal of environmental management*, 166, 357-373.

Ferretti, O., Barsanti, M., Delbono, I., & Furia, S. (2003). ELEMENTI DI GESTIONE COSTIERA-Parte I Tipi morfo-sedimentologici dei litorali italiani. *ENEA, Ente per le Nuove tecnologie l'Energia e l'Ambiente*. Mikhailova et al. (1999).

Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of sedimentary research*, 27(1), 3-26.

Fauchald, K. (1977). The polychaete worms. Definitions and keys to the orders, families and genera. *Natural History Museum of Los Angeles County, Science Series*.

Goldberg, E. D., Koide, M., Schmitt, R. A., & Smith, R. H. (1963). Rare-Earth distributions in the marine environment. *Journal of Geophysical Research*, 68(14), 4209-4217.

Hayward, P. J., & Ryland, J. S. (1996). Some British Phidoloporidae (Bryozoa: Cheilostomatida). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 117(1), 103-112.

Hayes, D., & Wu, P. Y. (2001, June). Simple approach to TSS source strength estimates. In *Proceedings of the WEDA XXI Conference, Houston, TX, June 25* (Vol. 27, p. 2001).

Helms, J. R., Stubbins, A., Perdue, E. M., Green, N. W., Chen, H., & Mopper, K. (2013). Photochemical bleaching of oceanic dissolved organic matter and its effect on absorption spectral slope and fluorescence. *Marine Chemistry*, 155, 81-91.

Jeffrey, S. T., & Humphrey, G. F. (1975). New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochimie und physiologie der pflanzen*, 167(2), 191-194.

Jeffrey, S. W., & Hallegraeff, G. M. (1980). Studies of phytoplankton species and photosynthetic pigments in a warm core eddy of the East Australian Current. I. Summer populations. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 3, 285-294.

John, D. M., House, W. A., & White, G. F. (2000). Environmental fate of nonylphenol ethoxylates: differential adsorption of homologs to components of river sediment. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 19(2), 293-300.

Koide, M., Bruland, K. W., & Goldberg, E. D. (1973). Th-228/Th-232 and Pb-210 geochronologies in marine and lake sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(5), 1171-1187.

La Monica, G. B., & Raffi, R. (1996). Morfologia e sedimentologia della spiaggia e della piattaforma continentale interna. *Il Mare del Lazio. Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Regione Lazio Assessorato Opere e Reti di Servizi e Mobilità*, 62-105

Lorenzen, C. J. (1967, December). Vertical distribution of chlorophyll and phaeopigments: Baja California. In *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts* (Vol. 14, No. 6, pp. 735-745). Elsevier.

Lorenzen C J, Jeffrey SW (1980) Determination of chlorophyll in seawater. UNESCO technical papers on Marine Science 35:1- 20

Lubis, A. A. (2006). Constant rate of supply (CRS) model for determining the sediment accumulation rates in the coastal area using ²¹⁰Pb. *Journal of Coastal Development*, 10(1), 9-18.

Mabit, R., Araújo, C. A., Singh, R. K., & Bélanger, S. (2022). Empirical remote sensing algorithms to retrieve SPM and CDOM in Québec coastal waters. *Frontiers in Remote Sensing*, 3, 834908.

Manca, F., Capelli, G., La Vigna, F., Mazza, R., & Pascarella, A. (2014). Wind-induced salt-wedge intrusion in the Tiber river mouth (Rome–Central Italy). *Environmental Earth Sciences*, 72, 1083-1095.



McKiver, W. J., Sannino, G., Braga, F., & Bellafore, D. (2016). Investigation of model capability in capturing vertical hydrodynamic coastal processes: a case study in the north Adriatic Sea. *Ocean Science*, 12(1), 51-69. Ilıcak et al., 2021

Mueller, J. L., Fargion, G. S., McClain, C. R., Pegau, S., Zaneveld, J. R. V., Mitchell, B. G., ... & Stramska, M. (2003). *Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, revision 4, volume IV: Inherent optical properties: Instruments, characterizations, field measurements and data analysis protocols* (No. NASA/TM-2003-211621/REV7-VOL-IV).

Nieto Borge, J. C., Lehner, S., Niedermeier, A., & Schulz-Stellenfleth, J. (2004). Detection of ocean wave groupiness from spaceborne synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C7).

Nieto Borge, J., & Soares, C. G. (2000). Analysis of directional wave fields using X-band navigation radar. *Coastal Engineering*, 40(4), 375-391.

Paladini de Mendoza, F., Bonamano, S., Martellucci, R., Melchiorri, C., Consalvi, N., Piermattei, V., & Marcelli, M. (2018). Circulation during storms and dynamics of suspended matter in a sheltered coastal area. *Remote Sensing*, 10(4), 602.

Pennekamp, J. G., Epskamp, R. J. C., Rosenbrand, W. F., Mullie, A., Wessel, G. L., Arts, T., & Deibel, I. K. (1996). Turbidity caused by dredging: viewed in perspective. *Terra et Aqua*, 10-17.

Roland, A., Cucco, A., Ferrarin, C., Hsu, T. W., Liao, J. M., Ou, S. H., ... & Zanke, U. (2009). On the development and verification of a 2-D coupled wave-current model on unstructured meshes. *Journal of Marine Systems*, 78, S244-S254.

Riedl, R. (1991). Fauna e flora del Mediterraneo. *Franco Muzzio, Padova*, 1-777.

Ruffo, S., 1982. (ed.). The Amphipoda of the Mediterranean. Part I . Gammaridea (Acnathonotozomatidae to Gammaridae). *Memoires de l'Institut Oceanographique, Monaco* 13: 1-364.

Ruffo, S., 1989. (ed.). The Amphipoda of the Mediterranean. Part 2. Gammaridea (Haustoriidae to Lysianassidae). *Memoires de l'Institut Oceanographique, Monaco* 13: 365-576.

Ruffo, S., 1993. (ed.). The Amphipoda of the Mediterranean. Part 3. Gammaridea (Melphidippidae to Talitridae) Ingolfiellidea Caprellidea. *Memoires de l'Institut Oceanographique, Monaco* 13: 577-813.

Ruiz-Martínez, G., Rivillas-Ospina, G. D., Mariño-Tapia, I., & Posada-Vanegas, G. (2016). SANDY: A Matlab tool to estimate the sediment size distribution from a sieve analysis. *Computers & geosciences*, 92, 104-116.

Slonecker, E. T., Jones, D. K., & Pellerin, B. A. (2016). The new Landsat 8 potential for remote sensing of colored dissolved organic matter (CDOM). *Marine Pollution Bulletin*, 107(2), 518-527.

Strickland, J. D. H., & Parsons, T. R. (1972). A practical handbook of seawater analysis.

Tortonese, E. (1965). Biologie comparée de trois espèces méditerranéennes de Diplodus (Pisces Sparidae). *Rapp. PV Comm. Int. Explor. Sc. Me. Medit*, 18, 189-192.

Verri, G., Barletta, I., Pinardi, N., Federico, I., Alessandri, J., & Coppini, G. (2023). Shelf slope, estuarine dynamics and river plumes in az* vertical coordinate, unstructured grid model. *Ocean Modelling*, 102235.

Wei, J., Lee, Z., Shang, S., & Yu, X. (2019). Semianalytical derivation of phytoplankton, CDOM, and detritus absorption coefficients from the Landsat 8/OLI reflectance in coastal waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(6), 3682-3699

Wurl, O., Miller, L., Röttgers, R., & Vagle, S. (2009). The distribution and fate of surface-active substances in the sea-surface microlayer and water column. *Marine Chemistry*, 115(1-2), 1-9.

Young, I. R., Rosenthal, W., & Ziemer, F. (1985). A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C1), 1049-1059.

Zariquiey Alvarez, R. (1968). Crustáceos decápodos ibéricos.

