

**REALIZZAZIONE DI UN SISTEMA MODELLISTICO BIO-GEO-CHIMICO
E DI SIMULAZIONE DELL'ESTENSIONE DEI PENNACCHI GENERATI DA SCARICHI
IN MARE CARATTERIZZATI DA INQUINAMENTO DI BATTERI FECALI**

CIG: A0163647E3

CUP: I81G22000100001

**PIANO DI
PROGETTAZIONE E SVILUPPO
DEL SISTEMA MODELLISTICO**

GRUPPO DI LAVORO

Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS



eXact lab



CINECA



STORIA DEL DOCUMENTO

Revisione	Data	Versione	Note
V01	31/07/2024	Finale	In approvazione della SA
V02	08/08/2024	Finale	Sostituisce le precedenti versioni

INDICE

1. SISTEMI OPERATIVI BIOGEOCHIMICI NEL SERVIZIO MARINE COPERNICUS	4
2. SISTEMA MODELLISTICO OPERATIVO: ELEMENTI COSTITUTIVI E LORO INTEGRAZIONE.....	6
2.1 - Sistema di modellistica accoppiata fisica e biogeochimica a scala nazionale	6
2.1.1 - Modello.....	6
2.1.2 - Domini computazionali e risoluzione.....	11
2.1.3 - Estensione temporale e risoluzione temporale.....	12
2.1.4 - Condizioni iniziali e al contorno.....	13
2.1.5 - Forzanti	13
2.1.6 - Validazione dei risultati del modello a scala nazionale	15
2.2 - Aree ad alta risoluzione (almeno 100 m)	17
2.2.1 - Self-nesting	18
2.3 - Sistema modellistico per la dispersione in mare di scarichi caratterizzati da contaminazione da E. coli	18
3. GIUSTIFICAZIONE DELLE SCELTE TECNICHE EFFETTUATE	20
4. TABELLA DEI RISCHI.....	22
5. DIPENDENZE DEGLI ELEMENTI DEL SISTEMA MODELLISTICO	24
BIBLIOGRAFIA.....	27

1. SISTEMI OPERATIVI BIOGEOCHIMICI NEL SERVIZIO MARINE COPERNICUS

L'oceanografia operativa è definita come l'insieme delle attività per la generazione di prodotti e servizi che forniscono informazioni sull'ambiente marino e costiero. La scienza dei sistemi marini operativi comprende non solo la componente di simulazioni numeriche ma un vasto insieme di discipline per la trasformazione dei dati in informazioni accessibili e utili per i diversi stakeholder (policy maker, attore commerciale e singolo cittadino). Un valido testo introduttivo ai sistemi marini operativi è la guidebook "Implementing Operational Ocean Monitoring and Forecasting Systems; IOC-UNESCO, GOOS-275, DOI: <https://doi.org/10.48670/ET00FS>" che è stata il frutto di un intenso lavoro di elaborazione e sintesi delle comunità Global Ocean Observing System (GOOS) e Copernicus Marine, che ha visto anche la partecipazione di OGS. Questo capitolo iniziale si ispira ai contenuti della guidebook.

I sistemi oceanografici operativi si basano sostanzialmente su due elementi: i) il monitoraggio, che comprende una componente di misurazioni di routine e sistematiche e la loro rapida interpretazione (anche attraverso sistemi di integrazione con i modelli) e ii) la componente di predizione, che utilizza modelli oceanici per generare una varietà di prodotti: rianalisi o hindcast (descrizione dello stato passato), nowcast (descrizione dello stato attuale), forecast (previsione dello stato futuro). A fianco di questi due fondamentali elementi, un sistema oceanografico operativo comprende anche: (iii) una lista di prodotti (output del sistema che rispettano standard comuni secondo il paradigma FAIR e che facilitano il confronto e il miglioramento del sistema), (iv) standard che facilitano il data sharing (ad esempio, formati dei file, convenzioni dei nomi variabili) e l'adozione di framework di validazione interoperativi e v) il trasferimento di know-how e buone pratiche tra la componente scientifica e la componente operativa.

L'importanza dei principi di condivisione, interoperabilità e accessibilità nel campo dei sistemi operativi oceanografici è ampiamente supportata dalla presenza di molteplici standard sviluppati e usati dalla comunità oceanografica. Alcuni esempi sono:

- i) lo standard NetCDF per il formato dei file;
- ii) la climate and forecast (CF) Standard Names Table (<https://cfconventions.org/Data/cf-standard-names/current/build/cf-standard-name-table.html>) che è un documento continuamente aggiornato in base alle richieste di nuove variabili;
- iii) la lista delle essential ocean variables di GOOS (<https://goosocean.org/what-we-do/framework/essential-ocean-variables/>);
- iv) le metriche GODAE per la validazione dei risultati modellistici (<https://oceanpredict.org>).

Un sistema operativo di modellistica oceanografica è tipicamente composto da una componente idrodinamica che include le onde, una componente biogeochimica e una componente per l'assimilazione delle osservazioni da satellite o da piattaforme in situ. Altre componenti meno tipicamente rappresentate sono la dispersione di particelle, l'evoluzione della componente ghiaccio, la componente ecosistemica. Inoltre, i sistemi operativi per le zone costiere possono includere una componente per il downscaling e il nesting di modelli ad alta risoluzione sui risultati di modelli a scala regionale a più bassa risoluzione.

L'architettura operativa di un sistema di forecast (e in generale di una simulazione per il monitoraggio dello stato del mare) comprende tipicamente tre step:

- costruzione delle condizioni iniziali;
- calcolo dell'evoluzione dello stato del sistema-mare nel futuro;
- uso delle informazioni disponibili per la verifica della qualità e correzione del risultato della previsione.

La prima fase comprende: i) l'accesso a dati attraverso data provider (previsioni precedenti, osservazioni, output di altri sistemi operativi a scale diverse), ii) il loro pre-processing (analisi della qualità, interpolazione) e iii) la costruzione di una stima dello stato del mare (ad esempio attraverso l'analisi di assimilazione di dati che permette di integrare lo stato del mare prodotto dal modello con tutte le osservazioni disponibili). Il risultato di questa fase sono campi tridimensionali con cui aggiornare la migliore serie temporale di analisi e con cui inizializzare la successiva fase di previsione. In questa fase preliminare avviene anche l'acquisizione e il controllo di qualità di tutte le informazioni necessarie al calcolo della previsione, quali ad esempio il forzante atmosferico, le condizioni al contorno all'interfaccia mare-atmosfera (concentrazione di CO₂, deposizione atmosferica di nutrienti e altre componenti biologiche), le condizioni ai contorni aperti del dominio computazionale, e le condizioni e forzanti all'interfaccia mare-terra (portate dei fiumi, carichi fluviali di nutrienti).

La fase due comprende la simulazione di una previsione dello stato del mare per un certo intervallo con un modello numerico inizializzato dall'analisi eseguita nella fase uno e forzato dai campi di previsione atmosferica e di previsioni per le altre interfacce e contorni del modello.

La fase tre di post-processing è dedicata alla costruzione di tutti i file prodotti che verranno consegnati agli utenti usando gli standard e i formati condivisi per variabili, formati di file, griglie e metadati. In questa fase vengono inoltre eseguite: la validazione dell'analisi (basandosi sulla letteratura o su set di dati climatologici e osservazioni non usate nell'assimilazione) e delle previsioni (basandosi sul confronto con le osservazioni in modalità ritardata), la disseminazione dell'informazione sulla qualità dei prodotti, la disseminazione dei prodotti attraverso piattaforme e interfacce dedicate (ad esempio: servizi THREDDS, data store e data lake, e servizi FTP), il monitoraggio dell'efficienza del sistema operativo e di tutte le sue componenti.

Anche considerando i sistemi di forecast del Copernicus Marine Service, un elenco di specificità dei sistemi operativi biogeochimici può essere definito in base a:

- il tipo di accoppiamento (on-line/off-line) con la componente fisica. Nel servizio Copernicus Marine sono presenti sistemi accoppiati on-line, quali NEMO-ERSEM (North West Shelf) e NEMO-PISCES (Global Ocean), e sistemi accoppiati off-line quali OGSTM-BFM forzato da NEMO (Mediterranean Sea);
- la complessità dei modelli biogeochimici, che può essere misurata dal numero di variabili di stato e processi descritti. Ad esempio, il modello PISCES, usato nel sistema Copernicus Marine per l'oceano globale, ha circa 20 variabili di stato, mentre il BFM, usato nel sistema Copernicus Marine del Mar Mediterraneo, ne ha 54;
- la presenza di componenti modellistiche aggiuntive per descrivere gli scambi energetici e di materia alle interfacce. Moduli ottici multispettrali descrivono diffusione e scattering dello spettro della luce all'interfaccia aria-acqua e lungo la colonna d'acqua e la sua interazione con le diverse componenti presenti in acqua. Un esempio è il modulo OASIM nel sistema modellistico Copernicus Marine del Mar Mediterraneo (Lazzari et al., 2021). La componente bentonica descrive i processi biologici e chimici nei primi strati di sedimento e gli scambi di nutriente, carbonio e ossigeno all'interfaccia sedimento-colonna d'acqua. Un esempio è il modello ERSEM del sistema North West Shelf di Copernicus (Butenschön et al., 2016);
- il livello di incertezza delle previsioni biogeochimiche, che varia considerevolmente a seconda delle scale e delle quantità di interesse, essendo i modelli biogeochimici costruiti su un'insieme di evidenze empiriche e/o scale diverse. Ad esempio, nel Copernicus Marine Service la qualità dei prodotti biogeochimici è fornita a tre diversi livelli: la documentazione dei prodotti (ad esempio il Quality Information Document della rianalisi biogeochimica del Mar Mediterraneo

<https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-MED-QUID-006-008.pdf>), la webpage di sintesi delle metriche di accuratezza (<https://pgd.mercator-ocean.fr/>), la webpage del monitoraggio in real time dell'accuratezza delle previsioni (ad esempio <https://medeaf.ogs.it/nrt-validation> per la componente biogeochimica del Mar Mediterraneo).

2. SISTEMA MODELLISTICO OPERATIVO: ELEMENTI COSTITUTIVI E LORO INTEGRAZIONE

2.1 - Sistema di modellistica accoppiata fisica e biogeochimica a scala nazionale

La descrizione del sistema di modellistica accoppiata fisica e biogeochimica a scala nazionale riporta i riferimenti ai requisiti minimi richiesti nel capitolato tecnico, indicandone l'articolo e la lettera di riferimento tra parentesi quadre (ad esempio **[req. Art. 3.1a]**).

2.1.1 - Modello

Il sistema modellistico fisico-biogeochimico a scala nazionale è basato sul modello accoppiato on-line MITgcm-BFM (Figura 2.1, Cossarini et al., 2017). Il modello è composto da due elementi: i) il modello idrodinamico (MITgcm) che risolve la dinamica del moto delle masse d'acqua, i bilanci di salinità e calore e gli scambi energetici e di massa alle interfacce; ii) il modello biogeochimico (BFM) che risolve i cicli biogeochimici per i principali nutrienti e le interazioni tra le componenti biologiche planctoniche dell'ecosistema marino.

Il modello idrodinamico MITgcm (Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model; Marshall et al., 1997) è un modello tridimensionale di circolazione generale a volumi finiti ampiamente utilizzato dalla comunità scientifica e in molti studi applicativi che permette un elevato grado di personalizzazione per creare diverse configurazioni di simulazione modificando i moduli disponibili (packages) e i relativi parametri (Adcroft et al., 2016). È un codice open source Fortran77 molto ben documentato e supportato dalla comunità scientifica e liberamente scaricabile dal sito web del MITgcm (<http://mitgcm.org/>) **[req. Art. 3.1f]**.

Il sistema a scala nazionale sarà basato su una versione aggiornata del codice (Checkpoint stabile più recente) e includerà in particolare le seguenti caratteristiche: schema di superficie libera per simulare il livello marino e l'effetto di evaporazione-precipitazione, schema Leith-Smagorinsky per la turbolenza orizzontale e uno schema KPP o GGL90 per la turbolenza verticale.

La soluzione numerica prevede uno schema Adams-Bashforth del terzo ordine per equazioni della quantità di moto, uno schema implicito per la diffusione e viscosità verticale e il metodo forward-in-time Eulero per le equazioni di trasporto di temperatura, salinità e traccianti.

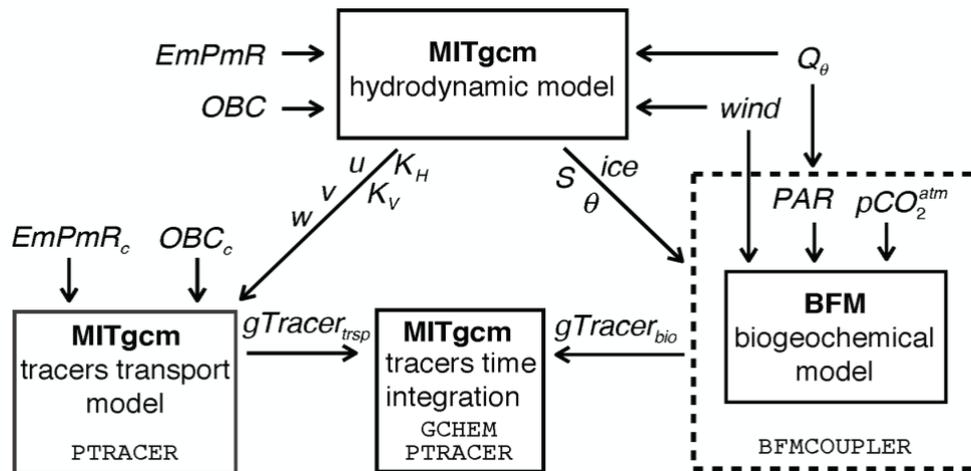


Figura 2.1 - Schema del modello accoppiato idrodinamico-biogeochimico MITgcm-BFM

Il modello Biogeochemical Flux Model (BFM, Figura 2.2) descrive la dinamica dei principali processi biogeochimici che avvengono negli ecosistemi marini (Vichi et al., 2015). La configurazione del BFM adottata nel sistema modellistico a scala nazionale è la versione 5.1 (Salon et al., 2019) e risolve i cicli di carbonio, fosforo, azoto, silicio e ossigeno nella fase disciolta in acqua e nel plancton, e nel comparto disciolto e particolato organico. La dinamica del plancton è parametrizzata considerando una serie di gruppi funzionali: 4 gruppi di fitoplancton (diatomee, picofitoplancton, nanofitoplancton e dinoflagellati), 4 gruppi di zooplankton (eterotrofi nanoflagellati, microzooplancton, mesozooplancton onnivoro e mesozooplancton carnivoro) e 1 gruppo di batteri eterotrofi. Inoltre, il BFM risolve la dinamica del sistema carbonatico per il calcolo dell'acidificazione dell'acqua, degli scambi aria-acqua di CO₂ e dell'accumulo di CO₂ in acqua.

La versione di BFM adottata nel sistema a scala nazionale è pienamente compatibile con i prodotti del sistema Copernicus Marine per la componente biogeochimica del Mediterraneo generati sempre con il modello BFM (Cossarini et al., 2021; Salon et al., 2019) che fornirà le condizioni iniziali e di contorno. Il BFM è scritto in linguaggio Fortran90: il codice, open source e distribuito dalla comunità del consorzio BFM (<https://bfm-community.github.io/www.bfm-community.eu/#home>), è caratterizzato da una alta modularità che permette la personalizzazione del numero e delle caratteristiche dei diversi gruppi funzionali [req. Art. 3.1f].

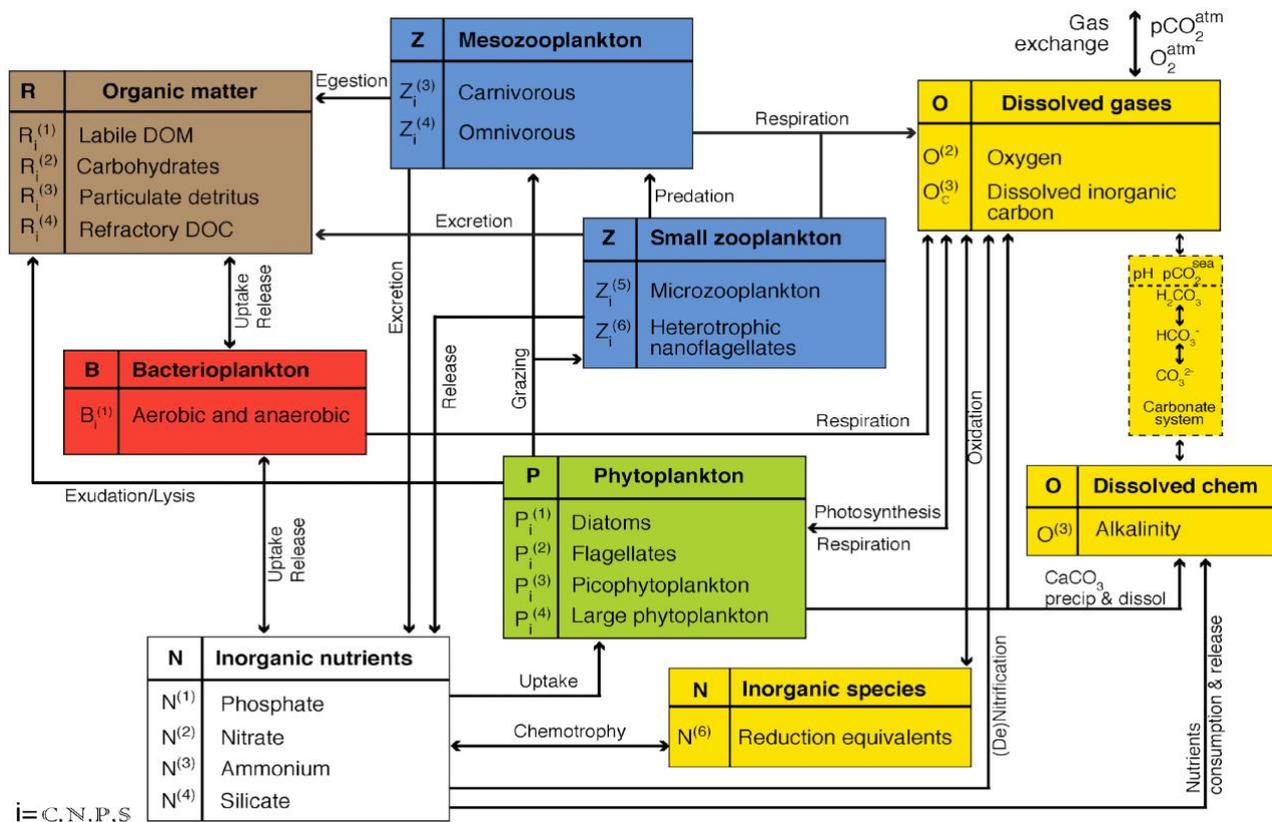


Figura 2.2 - Schema del modello BFM: variabili di stato suddivise nei diversi gruppi funzionali e interazioni e flussi tra i comparti.

Il sistema modellistico previsionale è completato dall'assimilazione di diverse tipologie di osservazioni: temperatura superficiale marina (Sea Surface Temperature, SST) e clorofilla da satellite del Copernicus Marine Service e nutrienti da dati in situ del servizio EIONET/SOE forniti da ISPRA [req. Art. 3.1i].

L'assimilazione viene realizzata con uno schema off-line (ovvero l'assimilazione delle variabili fisiche e biogeochimiche non è accoppiata) e modulare (ovvero sono usati schemi di assimilazione diversi per le diverse tipologie di variabili) per mantenere efficacia e solidità operativa sia nelle simulazioni di forecast che nelle simulazioni di rianalisi. In particolare:

a) l'assimilazione di SST utilizza uno schema di rilassamento (nudging) per la variabile temperatura basato sul modulo nativo RBCS (Relaxation Boundary Conditions) del MITgcm (adattato per gestire il rilassamento a dati superficiali). La variabile assimilata è la fundation temperature (ovvero la temperatura superficiale al netto della correzione per l'effetto dello skin layer) disponibile in 2 prodotti del Copernicus Marine Service alla risoluzione di $0.01^\circ \times 0.01^\circ$:

SST_MED_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_004 per l'analisi e inizializzazione delle simulazioni di forecast e SST_MED_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_021 per le simulazioni di rianalisi. I parametri del nudging sono la costante di rilassamento τ a cui si unisce il file 3D contenente la maschera con valori da 1 (rilassamento con costante τ) a 0 (no rilassamento).

b) l'assimilazione della clorofilla viene eseguita utilizzando due diversi schemi adattati per le simulazioni di forecast o di rianalisi:

b1) per le simulazioni di forecast, l'analisi e inizializzazione della clorofilla è risolta da un modello di Neural Network Convoluzionale di super-resolution che utilizza mappe a bassa risoluzione (circa 4.5 km) del prodotto biogeochimico di Analysis e Forecast di Copernicus

MEDSEA_ANALYSISFORECAST_BGC_006_014 e mappe di clorofilla da satellite del prodotto L4 OCEANCOLOUR_MED_BGC_L4_NRT_009_142 alla risoluzione di 1 km. Il modello di super-resolution è stato precedentemente addestrato (fase di "training") sugli output del modello ad alta risoluzione. L'inizializzazione della clorofilla (campi 3D ricostruiti ad alta risoluzione) è poi trasferita alle altre variabili di stato del fitoplancton (biomassa di clorofilla dei quattro gruppi funzionali di fitoplancton e concentrato di N, Si, P, C di ciascun gruppo funzionale) attraverso un operatore di covarianza variabile nel tempo.

b2) per le simulazioni di rianalisi, l'assimilazione di clorofilla è realizzata usando il codice di assimilazione variazionale 3DVarBio (Teruzzi et al., 2021) già in uso nel sistema modellistico biogeochimico del Mar Mediterraneo del Copernicus Marine Service. Le osservazioni assimilate sono il prodotto L4 OCEANCOLOUR_MED_BGC_L4_MY_009_144 alla risoluzione di 1 km. Il codice 3DVarBio include anche un operatore di covarianza biogeochimica per trasferire la correzione di clorofilla alle altre variabili di stato del fitoplancton (biomassa di clorofilla dei quattro gruppi funzionali di fitoplancton e concentrato di N, Si, P, C di ciascun gruppo funzionale).

c) l'assimilazione delle osservazioni di nutriente in situ della rete EIONET/SOE viene realizzata con uno schema di nudging per le simulazioni di rianalisi. Lo schema di nudging utilizza lo stesso modulo MITgcm RBCS utilizzato per la SST e con i parametri adattati per gestire il rilassamento dei traccianti.

Le osservazioni di nutriente consistono in dati sparsi (rete delle stazioni costiere per il monitoraggio MSFD) con cadenza temporale variabile.

Il sistema modellistico fornirà in output la lista di 26 parametri che sono elencati in Tabella 2.1 **[req. Art. 3.1e]**. La lista dei parametri include variabili di stato del modello BFM (ad esempio nitrato, ammonio, fosfato, alcalinità, carbonio disciolto inorganico), combinazioni delle variabili di stato del modello (ad esempio il TRIX, che è una combinazione dei valori logaritmici di nutriente, clorofilla e ossigeno; la clorofilla-a, che è la somma della clorofilla-a nei 4 gruppi funzionali di fitoplancton; e la biomassa di fitoplancton, che è la somma della biomassa di carbonio dei gruppi funzionali di fitoplancton), flussi (ad esempio la produzione primaria, il flusso di CO₂ all'interfaccia acqua-aria) e variabili diagnostiche del modello (ad esempio pH, calcolato in total scale alle condizioni di pressione e temperatura in situ, e Kd490, derivato dall'integrazione dell'attenuazione della luce lungo la verticale).

La lista di parametri proposti include 21 variabili già presenti nel catalogo del Copernicus Marine Service e 5 nuove variabili. Alla lista dei 16 parametri richiesti dal disciplinare tecnico sono state aggiunte altre 10 variabili. I prodotti saranno forniti come file in formato NetCDF4 unitamente ai metadati secondo lo standard del Marine Core Service di Copernicus (ad esempio, vedasi lo User Manual dei prodotti per il Mar Mediterraneo <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-MED-PUM-006-014.pdf>) che sono conformi allo standard Climate and Forecast Convention CF-1.4

[\(https://cfconventions.org/\)](https://cfconventions.org/) **[req. Art. 3.1g]**.

Nome variabile	Nome standard fornito dal database CF convention CF-1.4 (https://cfconventions.org) o definizione	Nome breve	Unità di misura	Presente nel catalogo Copernicus Marine	Variabile inclusa nella lista minima o nuova	Tipo di variabile
clorofilla a	mass_concentration_of_chlorophyll_a_in_sea_water	CHL	mg m ⁻³	si	inclusa	derivata
biomassa di fitoplancton	mole_concentration_of_phytoplankton_expressed_as_carbon_in_sea_water	PHYTOC	mgC m ⁻³	si	nuova	derivata
biomassa di zooplancton	mole_concentration_of_zooplankton_expressed_as_carbon_in_sea_water	ZOOC	mgC m ⁻³	si	nuova	derivata
ammonio	mole_concentration_of_ammonium_in_sea_water	NH ₄	mmol m ⁻³	si	inclusa	variabile di stato
nitrato	somma di nitrati e nitriti	NO _x	mmol m ⁻³	si	inclusa	variabile di stato
azoto inorganico disciolto	somma di ammonio e nitrato	DIN	mmol m ⁻³	no	nuova	variabile di stato
ortofosfato	mole_concentration_of_phosphate_in_sea_water	PO ₄	mmol m ⁻³	si	inclusa	variabile di stato
fosforo totale	somma di ortofosfato e fosfato disciolto organico	TP	mmol m ⁻³	no	inclusa	derivata
silicati	mole_concentration_of_silicate_in_sea_water	SiO ₄	mmol m ⁻³	si	inclusa	variabile di stato
produttività primaria	net_primary_production_of_biomass_expressed_as_carbon_per_unit_volume_in_sea_water	NPP _v	mgC m ⁻³ day ⁻¹	si	inclusa	flusso
produttività primaria integrata verticalmente	net_primary_production_of_biomass_expressed_as_carbon_per_unit_surface_in_sea_water	NPP	gC m ⁻² y ⁻¹	no	nuova	flusso
ossigeno disciolto	mole_concentration_of_dissolved_molecular_oxygen_in_sea_water	O ₂	mmol m ⁻³	si	inclusa	variabile di stato
flusso di CO ₂ all'interfaccia aria-acqua	surface_downward_mass_flux_of_carbon_dioxide_expressed_as_carbon	fpcO ₂	kg m ⁻² s ⁻¹	si	nuova	flusso
pressione parziale di CO ₂ alla superficie del mare	surface_partial_pressure_of_carbon_dioxide_in_sea_water	spCO ₂	Pa	si	nuova	diagnostica
carbonio disciolto inorganico	mole_concentration_of_dissolved_inorganic_carbon_in_sea_water	dissic	mol m ⁻³	si	nuova	variabile di stato

pH	sea_water_ph_reported_on_total_scal e	ph	[-]	si	inclusa	diagnostica
alcalinità totale	sea_water_alkalinity_expressed_as_m ole_equivalent	alk	mol m ⁻³	si	nuova	variabile di stato
TRIX	formulazione in Vollenweider et al., 1998	TRIX	[-]	no	nuova	derivata
PAR	downwelling_photosynthetic_radiance _in_sea_water	PAR	W m ⁻²	no	nuova	diagnostica
Kd490	volume_absorption_coefficient_of_rad iative_flux_in_sea_water	Kd490	m ⁻¹	si	inclusa	diagnostica
componente zonale della corrente	eastward_sea_water_velocity	uo	m s ⁻¹	si	inclusa	variabile di stato
componente meridionale della corrente	northward_sea_water_velocity	vo	m s ⁻¹	si	inclusa	variabile di stato
componente verticale della corrente	upward_sea_water_velocity	wo	m s ⁻¹	si	inclusa	variabile di stato
livello del mare	sea_surface_height_above_geoid	zos	m	si	inclusa	variabile di stato
salinità	sea_water_salinity	so	psu	si	inclusa	variabile di stato
temperatura dell'acqua	sea_water_potential_temperature	thetao	°C	si	inclusa	variabile di stato

Tabella 2.1 - Lista delle variabili fornite dal sistema modellistico per ogni nodo di griglia unitamente allo standard name o metodo di calcolo, unità di misura e indicazione della presenza della variabile del catalogo Marine Core Service di Copernicus e della presenza nella lista dei parametri o parametri equivalenti del disciplinare.

2.1.2 - Domini computazionali e risoluzione

La regione geografica del sistema a scala nazionale **[Art. 3.1a]**, che include la regione marina oggetto del report per la strategia marina ai sensi dell'articolo 4 della MSFD (https://inspire-geoportal.ec.europa.eu/srv/api/records/ispra_rm:Meta_MSFD2018_Reg?language=all), è suddivisa in 7 domini computazionali (regionali, a risoluzione di 500 m, Figura 2.3). Nel progetto sono inoltre previsti 10 siti con estensione non inferiore a 400 km² in cui opera il sistema modellistico su un grigliato numerico alla risoluzione di 1/960° (fattore 1 a 5 rispetto alla risoluzione del sistema a scala nazionale, ovvero circa 100 m) **[req. Art. 3.1m]**.

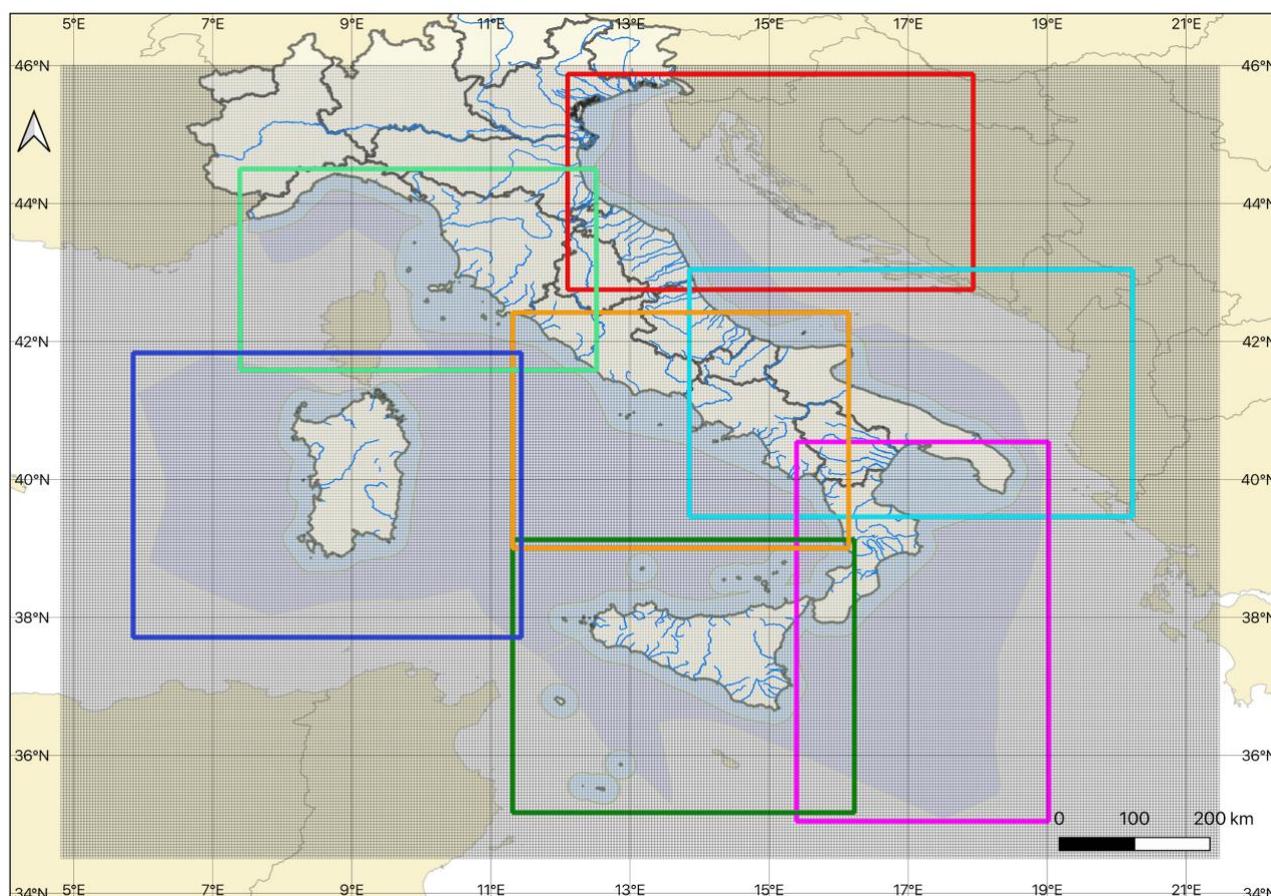


Figura 2.3 - Estensione dei 7 domini computazionali regionali per le simulazioni a scala nazionale. Le acque territoriali (delimitate dalle 12 miglia nautiche) sono indicate in azzurro chiaro e la zona economica esclusiva italiana in viola chiaro. Il grigliato regolare (mesh) è una porzione (centrata sui mari italiani) del grigliato del modello Copernicus per il Mediterraneo a $1/24^\circ$, su cui sono innestati i domini regionali.

La risoluzione spaziale orizzontale dei 7 domini regionali è di $1/192^\circ$, che corrisponde ad un fattore 8 rispetto alla risoluzione nominale del modello fisico e biogeochimico del Mar Mediterraneo del sistema Marine Service di Copernicus (ovvero $1/24^\circ$ come indicato in <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-MED-PUM-006-014.pdf>).

La risoluzione proposta corrisponde a celle di lato $570 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ (media 485 m) alla latitudine di 45° N (Nord Adriatico e Mar Ligure) e celle di lato $570 \text{ m} \times 460 \text{ m}$ (media 515 m) alla latitudine di 36° N (Canale di Sicilia) **[req. Art. 3.1c]**.

2.1.3 - Estensione temporale e risoluzione temporale

Il sistema operativo a scala nazionale fornisce quotidianamente previsioni fino a 120 ore in avanti rispetto alla data di produzione con l'inizializzazione prevista al tempo T-7 e 7 giorni di simulazione di spin-up **[req. Art. 3.1h]**. L'estensione della ricostruzione nel passato comprende una simulazione di rianalisi del periodo dalle 00:00 del 1 gennaio 2011 alle 23:00 del 31/12/2020 e una simulazione di hindcast dalle 00:00 del 1 gennaio 2021 fino alla data di avvio dell'operatività del sistema in modalità predittiva **[req. Art. 3.1b]**.

La risoluzione temporale dei prodotti in uscita dal modello in modalità previsionale è oraria, mentre la risoluzione temporale dei prodotti in modalità hindcast/rianalisi è giornaliera (ovvero media dell'intervallo da 00:00 UTC+1 a 24:00 UTC+1) e mensile (ovvero media dell'intervallo da 00:00 UTC+1 del primo giorno di ogni mese alle 24:00 UTC+1 dell'ultimo giorno di ogni mese) **[req. Art. 3.1d]**.

2.1.4 - Condizioni iniziali e al contorno

Le condizioni iniziali e ai contorni aperti del sistema a scala nazionale saranno forniti dai prodotti del Copernicus Marine Service (<https://data.marine.copernicus.eu/>) relativamente ai sistemi fisici e biogeochimici del Mar Mediterraneo. È previsto un adeguato periodo di spin-up a partire dalle condizioni iniziali, come descritto in sezione 2.1.3 **[req. Art. 3.1h]**.

In particolare, temperatura, salinità e correnti zonale e meridionale saranno ricavate dal prodotto MEDSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_006_013 per le simulazioni di hindcast e forecast e dal prodotto MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004 per le simulazioni di rianalisi.

Per quel che riguarda le variabili biogeochimiche, verranno utilizzate tutte le variabili disponibili nei prodotti Copernicus MEDSEA_ANALYSISFORECAST_BGC_006_014 e MEDSEA_MULTIYEAR_BGC_006_008, ovvero ortofosfato, nitrato, silicato, ossigeno, concentrazione di carbonio di fitoplancton e contenuto di clorofilla, concentrazione di carbonio di zooplancton, alcalinità totale, carbonio inorganico disciolto). Le altre variabili di stato del modello BFM (ad esempio, carbonio organico disciolto e particolato e contenuto di azoto e fosforo nel particolato organico) saranno ricavate da condizioni climatologiche e rapporti stechiometrici calcolati sulla base di output di simulazioni pubblicate (ad esempio la rianalisi biogeochimica Copernicus del Mar Mediterraneo; Cossarini et al., 2021).

2.1.5 - Forzanti

Meteo

Il forzante meteorologico è costituito dal modello COSMO per la modalità operativa e dalla rianalisi SPHERA per le simulazioni nei periodi 2011-2020 e durante l'hindcast dal 2021 all'inizio del servizio operativo.

Il modello COSMO ha una risoluzione orizzontale di 2.2 km e output con frequenza oraria. I dati sono scaricabili liberamente dal portale Meteo-Hub / Mistral (<https://meteohub.mistralportal.it/app/datasets>).

Fiumi

Il sistema modellistico include le condizioni al contorno dei fiumi in termini di apporto di acqua dolce e di apporti di nutrienti (azoto, fosforo e silicio), carbonio in forma inorganica disciolta e organica particolata e alcalinità **[req. Art. 3.1h]**.

Il numero e la posizione dei fiumi è derivato dal database EFAS (<https://european-flood.emergency.copernicus.eu/>) sull'estensione geografica del modello, identificando i *major rivers* secondo il criterio di dimensione della portata media annuale di $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, che risulta comprensivo del criterio di dimensione del bacino scolante con il valore soglia di 500 km^2 (definizione di *large rivers* come indicato nelle FAQ del servizio EFAS <https://www.efas.eu/en/faq#efas-forecast-floods>).

Gli apporti di acqua dolce a frequenza giornaliera sono ricavati dal sistema EFAS ed è predisposta la possibilità di utilizzare anche i valori osservati disponibili presso servizi di monitoraggio (ad esempio, i

dati in tempo reale di portata del fiume Po a Pontelagoscuro reperibili dal servizio operato dal SIMC di ARPAE-ER).

Nelle simulazioni di forecast, quando i valori di portata fluviale non sono disponibili viene utilizzato l'ultimo valore disponibile anche per i giorni successivi.

Gli apporti di nutrienti e altre sostanze disciolte sono calcolati moltiplicando i valori di portate (runoff) d'acqua dolce per i valori di concentrazione tipica delle sostanze disciolte (Tabella 2.2). In assenza di un servizio operativo pubblico e gratuito che fornisca i dati di apporti di nutriente e di altre sostanze disciolte dai fiumi, l'approccio di calcolarli da concentrazioni di riferimento e portate rappresenta infatti una buona approssimazione quantitativa - anche in considerazione del fatto che la frequenza adottata è quella della media giornaliera - e una solida opzione operativa.

Al meglio della nostra conoscenza, esiste un unico servizio operativo (HypeWeb, <https://hypeweb.smhi.se/explore-water/>) che fornisce dati giornalieri di apporti di nutrienti e altre sostanze disciolte dai fiumi per i mari europei. HypeWeb è un servizio a pagamento e quindi non utilizzabile per l'implementazione del sistema operativo biogeochimico a scala nazionale, ma sarà esplorata la possibilità di utilizzarlo come elemento di confronto per i valori di carico calcolati sulla base dei dati EFAS.

	Sottoregione Adriatico-Ionica	Sottoregione Tirrenica
Nitrato [gN/m ³]	1,74	2,23
Fosfato [gP/m ³]	0,059	0,28
DIC [gC/m ³]	36,08	52,96
POC [gC/m ³]	1,52	1,68
DOC [gC/m ³]	2,29	3,24
Alcalinità [mol/m ³]	3,01	5,16
Brogi et al., 2020; Cozzi & Giani, 2011; Dai et al., 2012; Giani et al., 2023; Gómez-Gutiérrez et al., 2006; Higuera et al., 2014; Kaiser et al., 2004; Ludwig et al., 2009; Malagó et al., 2019; Many et al., 2021; Panagiotopoulos et al., 2012; Pitta et al., 2014; Strobl et al., 2009; Tamše et al., 2015; UNEP/MAP/MED POL, 2003; Van Apeldoorn & Bouwman, 2014; Volf et al., 2013.		

Tabella 2.2 - Concentrazioni di riferimento delle sostanze disciolte nelle acque fluviali per i fiumi delle sottoregioni MSFD dei mari italiani. Lista delle fonti (dataset e pubblicazioni) usate per ricavare i valori di riferimento.

Flussi biogeochimici superficiali e al fondo della colonna d'acqua

Il sistema modellistico include:

- la deposizione atmosferica di azoto e fosforo utilizzando i valori di flusso della rianalisi biogeochimica Copernicus del Mar Mediterraneo (Cossarini et al., 2021);
- i flussi di scambio di ossigeno e di CO₂ all'interfaccia acqua-aria utilizzando i valori di solubilità dell'ossigeno alla temperatura e salinità dell'acqua e i valori osservati di concentrazione in aria di CO₂;
- i flussi di scambio di nutriente, CO₂ e ossigeno all'interfaccia sedimento-acqua. I valori sono reperiti da letteratura (e.g., Mussap et al., 2017) e modulati in funzione della profondità e della distanza dalla costa.

2.1.6 - Validazione dei risultati del modello a scala nazionale

Il framework di validazione del sistema modellistico a scala nazionale si basa sui principi e buone prassi discusse e adottate dalla comunità modellistica biogeochimica del Copernicus Marine Service (Hernandez et al., 2018; Gutknecht et al., 2022). In particolare, considerando la nomenclatura GODAE (Hernandez et al., 2018), verranno adottate metriche di classe 1 atte a valutare la capacità del sistema modellistico di riprodurre le caratteristiche medie delle variabili osservate (ad esempio, confronto di mappe spaziali medie tra risultati del modello e climatologie e confronto di valori medi stagionali per selezionate aree tra risultati del modello e climatologie) e metriche di classe 4 finalizzate alla valutazione della capacità del modello di riprodurre la variabilità temporale e spaziale osservata nelle misure sperimentali puntuali e rilevate da satellite (ad esempio, *root mean square difference* delle coppie di valori di osservazioni e output del modello al tempo e nella localizzazione delle osservazioni). Le osservazioni utilizzate per la validazione saranno:

- temperatura superficiale marina da dati satellitari forniti dal Copernicus Marine Service: prodotti SST_MED_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_004 per la validazione delle simulazioni di forecast e SST_MED_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_021 per la validazione delle simulazioni di rianalisi;
- clorofilla superficiale da dati satellitari forniti dal Copernicus Marine Service: prodotti OCEANCOLOUR_MED_BGC_L4_NRT_009_142 per la validazione delle simulazioni di forecast e OCEANCOLOUR_MED_BGC_L4_MY_009_144 per la validazione delle simulazioni di rianalisi;
- nutrienti (nitrato, fosfato, azoto totale, fosforo totale), ossigeno e clorofilla da dati in situ del dataset MedBGCins (Di Biagio et al., 2024) che è una data collection specificatamente predisposta da OGS per la validazione dei modelli oceanografici che completa il dataset EMODnet Chemistry Eutrophication and Acidity con molteplici altre campagne;
- nutrienti (nitrato, fosfato, azoto totale, fosforo totale), ossigeno e clorofilla da dati in situ del dataset EIONET/SOE fornito da ISPRA;
- produzione primaria da dati satellitari forniti dal Copernicus Marine Service; prodotto OCEANCOLOUR_MED_BGC_L4_MY_009_144 per la validazione delle simulazioni di rianalisi.

Nello specifico, le statistiche di validazione sono prodotte per ciascun dominio (o per rilevanti segmenti delle coste italiane, in accordo con le indicazioni della Stazione Appaltante), considerando i limiti amministrativi delle regioni e/o specifiche condizioni delle coste italiane. Per ogni segmento di costa italiana e in funzione dei dati di campo e da remoto disponibili, verranno calcolate le statistiche di validazione elencate in Tabella 2.3.

Sistema modellistico in modalità hindcast/rianalisi		
metrica	descrizione della metrica	frequenza e risoluzione della metrica
confronto visuale spaziale	confronto visuale di mappe da output del modello e mappe da dati da remoto	mensile e annuale
confronto visuale temporale	confronto visuale dell'andamento temporale medio dell'output del modello e dei dati di campo o dati da remoto	medie spaziali ottenute su opportuna suddivisione spaziale (ad esempio, acque entro le 12 miglia nautiche e acque al largo) dei segmenti costieri
RMSD	radice dello scarto quadratico medio tra output del modello e dati in situ o da remoto	annuale e stagionale
BIAS	media degli scarti tra output del modello e dati di campo o da remoto	annuale e stagionale
confronto delle STD delle distribuzioni	confronto delle deviazioni standard calcolate su output del modello e mappe da dati da remoto	annuale
confronto dei valori percentili	confronto dei valori percentili (ad esempio 5, 25, 50, 75 e 95 percentile) della distribuzione degli output del modello e dei dati osservati	annuale
Sistema modellistico in modalità forecast		
metrica	descrizione della metrica	frequenza della metrica
confronto visuale spaziale	confronto visuale delle mappe del primo giorno di forecast con le corrispondenti mappe da dati da remoto	giornaliera, quando il dato da remoto è reso disponibile
RMSD	radice dello scarto quadratico medio tra mappe del primo giorno di forecast e le corrispondenti mappe da dati da remoto	giornaliera, quando il dato da remoto è reso disponibile
BIAS	media degli scarti tra mappe del primo giorno di forecast e le corrispondenti mappe da dati da remoto	giornaliera, quando il dato da remoto è reso disponibile

Tabella 2.3 - Elenco delle metriche di validazione per il sistema modellistico in modalità hindcast/rianalisi e in modalità forecast, con inclusa la descrizione della metrica e la frequenza e risoluzione dell'applicazione della metrica.

Qualora i dati siano utilizzati anche per l'assimilazione, la validazione verrà fatta utilizzando il first guess degli output del modello (ovvero l'output di previsione prima che il dato osservato venga assimilato dal modello) seguendo la prassi adottata dalla comunità di oceanografia modellistica operativa.

L'obiettivo della validazione è dimostrare il valore aggiunto del modello a scala nazionale rispetto alla qualità dei prodotti del Copernicus Marine Service, ovvero verificare che le metriche di performance (RMSD) delle simulazioni a scala nazionale non siano peggiori (con una tolleranza del 10%) rispetto ai valori di RMSD dei prodotti Copernicus Marine **[req. Art. 3.1f]**. La qualità dei prodotti Copernicus Marine è riportata nei documenti "Quality Information Document" (QUID). Ad esempio, i QUID del prodotto di analisi e forecast della biogeochimica (catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-MED-QUID-006-014.pdf) e del prodotto di rianalisi (catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-MED-QUID-006-008.pdf) forniscono i valori di qualità della clorofilla nella tabella 4.1.1 per le aree off-shore del Mediterraneo e nella tabella 4.1.2 per aree costiere. La caratterizzazione del costiero rispetto all'off-shore è definita dal limite della batimetrica di 200 m. Un altro esempio sono i valori di qualità per le previsioni della temperatura forniti nella tabella 8 del QUID del prodotto di analisi e forecast della fisica (catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-MED-QUID-006-013.pdf). In questo esercizio di confronto deve essere tenuta in considerazione la rappresentatività del campione analizzato, ovvero deve essere verificato che le metriche di performance siano calcolate su domini spaziali e periodi temporali comparabili. Qualora il confronto diretto con i valori riportati nei documenti QUID di Copernicus risulti non significativo, altre modalità di confronto verranno adottate.

2.2 - Aree ad alta risoluzione (almeno 100 m)

Il sistema operativo per le aree ad alta risoluzione è costituito dal medesimo modello MITgcm-BFM descritto nel capitolo 2.1 **[req. Art. 3.2f]**.

Le 10 aree di estensione non inferiore a 400 km² in cui opera il sistema modellistico su un grigliato numerico alla risoluzione di 1/960° (fattore 1 a 5 rispetto alla risoluzione del sistema a scala nazionale, ovvero circa 100 m) **[req. Art. 3.2m]** verranno scelte fra i possibili siti elencati di seguito **[req. Art. 3.2a]** (elenco non esaustivo né definitivo):

- Golfo di Trieste
- Lignano - Grado/Marano
- Chioggia
- foce Po e costa emiliana
- Eolie - Panarea
- Golfo di Napoli
- Golfo di Gaeta
- Orbetello
- Golfo di Follonica
- La Spezia
- Lavagna
- Golfo di Oristano

Il sistema operativo ad alta risoluzione produce quotidianamente previsioni fino a 120 ore in avanti rispetto alla data di produzione. L'estensione della ricostruzione nel passato comprende una simulazione di rianalisi del periodo dalle 00:00 del 1 gennaio 2011 alle 23:00 del 31/12/2020 e una

simulazione di hindcast dalle 00:00 del 1 gennaio 2021 fino alla data di avvio dell'operatività del sistema in modalità predittiva **[req. Art. 3.2b]**.

La risoluzione temporale dei prodotti in uscita dal modello in modalità previsionale è oraria, mentre la risoluzione temporale dei prodotti in modalità hindcast/rianalisi è giornaliera (ovvero media dell'intervallo da 00:00 UTC+1 a 24:00 UTC+1) e mensile (ovvero media dell'intervallo da 00:00 UTC+1 del primo giorno di ogni mese alle 24:00 UTC+1 dell'ultimo giorno di ogni mese) **[req. Art. 3.2d]**.

I parametri forniti e i formati dei prodotti del sistema ad alta risoluzione sono quelli già descritti per il sistema a scala nazionale e riportati nella Tabella 2.1 **[req. Art. 3.2e e g]**.

Le condizioni iniziali e ai contorni aperti delle simulazioni previsionali per i 10 sistemi ad alta risoluzione sono ricavate dalle analoghe simulazioni del sistema a scala nazionale, con opportune interpolazioni dalla griglia alla risoluzione $1/192^\circ$ alla griglia alla risoluzione $1/960^\circ$ **[req. Art. 3.2h]**. L'effetto dell'assimilazione delle osservazioni è implicitamente trasferito dalle condizioni iniziali realizzate con i metodi descritti nella sezione 2.1 alle condizioni iniziali del sistema previsionale ad alta risoluzione **[req. Art. 3.2i]**

2.2.1 - Self-nesting

I sistemi ad alta risoluzione si innestano direttamente nei loro corrispondenti modelli regionali, adattando opportunamente le medesime procedure di inizializzazione e forcing.

Le condizioni iniziali vengono ottenute interpolando i campi del modello regionale sulla griglia ad alta risoluzione. Invece che inizializzare il modello al giorno -7, come nel caso regionale, nell'alta risoluzione ci si innesta al giorno -4: in questo modo, da un lato ci si allontana dalle condizioni iniziali (che sono quelle del modello Mediterraneo a 4.5 km, interpolate sulla griglia regionale), dall'altro si lascia comunque tempo al modello di effettuare un congruo periodo di spin-up.

L'aumento di risoluzione è di un fattore 5, corrispondente al passaggio dalla risoluzione di $1/192^\circ$ a quella di $1/960^\circ$, corrispondente a cella con lato medio di 97 m e 103 m alla latitudine di 45° N (Nord Adriatico e Mar Ligure) e 36° N (Canale di Sicilia), rispettivamente.

Il modello meteo utilizzato e gli apporti fluviali sono i medesimi dei modelli regionali

2.3 - Sistema modellistico per la dispersione in mare di scarichi caratterizzati da contaminazione da E. coli

Il modello di dispersione in mare di scarichi caratterizzati da contaminanti sarà basato su un modulo di trasporto e diffusione (modulo PTRACER di MITgcm) e un modulo di decadimento di un tracciante che simula la contaminazione batterica tipo Escherichia coli (E. coli) incluso nel modulo BFMcoupler **[req. Art. 3.3f]**. Il sistema prevede: (a) la simulazione di un tracciante attivo (trasporto, diffusione e decadimento) per ogni singola sorgente e (b) la caratterizzazione dei punti di scarico (quantificazione del flusso di tracciante dello scarico a mare). Il trasporto per avvezione e diffusione del tracciante E. coli utilizza i campi tridimensionali di velocità orizzontale e verticale e di diffusività prodotti dal MITgcm.

Il modulo di dispersione del tracciante E. coli include una legge di decadimento di primo grado:

$$\frac{\partial[E. coli]}{\partial t} = -k \cdot [E. coli]$$

dove il tasso di decadimento k varia nello spazio e nel tempo in funzione della temperatura e salinità dell'acqua e dell'intensità della radiazione solare secondo la formula (Chan et al., 2013):

$$k(x, y, z, t) = (k_b + k_s \cdot S(x, y, z, t)) \cdot \theta^{T(x, y, z, t) - 20} + k_l \cdot I(x, y, t) \cdot e^{-e_z \cdot z}$$

Nella formula, S e T sono la salinità (PSU) e la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), I è la radiazione solare (W m^{-2}), k_b è il tasso di decadimento di background in condizioni di buio, salinità nulla e 20°C di temperatura, k_s è la costante empirica per la salinità, e θ è la costante per la dipendenza dalla temperatura. La componente di decadimento dovuta all'azione della radiazione solare è descritta dalla costante k_l e dal coefficiente di decadimento della radiazione con la profondità e_z . I valori standard per i parametri della formulazione sono: $k_b = 0.8 \text{ d}^{-1}$,

$k_s = 0.017 \text{ d}^{-1}$, $k_l = 0.086 \text{ d}^{-1} \text{ W}^{-1} \text{ m}^2$, $e_z = 0.5 \text{ m}^{-1}$ and $\theta = 1.07$. Le variabili salinità, temperatura e radiazione solare, come anche le velocità, sono fornite dal MITgcm.

Il modello di dispersione (moduli PTRACER e BFMcoupler di MITgcm) fornisce in output per ogni tracciante E. coli simulato i campi tridimensionali di concentrazione che saranno utilizzati per calcolare indici di diluizione finalizzati alla caratterizzazione dell'impatto a mare dei diversi punti di scarico (Bruschi et al., 2021) **[req. Art. 3.3e]**.

I punti sorgente (ovvero il numero di traccianti E. coli) sono tutti i corsi d'acqua e i punti di scarico di impianti di trattamento delle acque reflue urbane definiti nel sistema operativo a scala nazionale (sezione 2.1.5). Nel caso dei punti di scarico di impianti di trattamento delle acque reflue urbane ubicati sul fondo del mare è previsto anche un termine di rilassamento della salinità per simulare l'apporto di acqua dolce.

Ogni singolo punto di scarico sarà inizializzato con un flusso unitario medio giornaliero $1 \text{ CFU}/100\text{ml}/\text{d}$. Il risultato del modello (campi tridimensionali medi orari e giornalieri di concentrazione del tracciante tipo E. coli) sarà poi moltiplicato per un fattore di scala che caratterizza la carica batterica della sorgente (FCB, Fattore di scala della Carica Batterica della sorgente). Questo approccio flessibile permette di utilizzare i risultati delle simulazioni per tipologie di carica batterica diverse e permette di quantificare l'impatto degli scarichi in base alle migliori informazioni che sarà possibile raccogliere per ogni sorgente e fiume considerato.

Nel caso di coliformi fecali (tipo E. coli), il Fattore di scala della Carica Batterica dei Punti di Scarico della Direttiva 91/271/CEE - Trattamento acque reflue urbane (UWWTD) verrà stimato considerando la seguente formula:

$$FCB = CL_{AE} \cdot P_{\text{Seff}} \cdot E_{\text{coli_EA}}$$

dove CL_{AE} rappresenta il Carico di Ingresso espresso in abitanti equivalenti dei punti di scarico, fornito dalla Stazione Appaltante nell'Allegato A del Capitolato, P_{Seff} rappresenta l'efficienza di abbattimento degli impianti di depurazione dello scarico e $E_{\text{coli_EA}}$ è il coefficiente di conversione di unità di concentrazione di E. coli per abitante equivalente. I coefficienti verranno stimati per singolo punto di

scarico in accordo con le informazioni rese disponibili dalla Stazione Appaltante o disponibili nella letteratura scientifica. Per quel che riguarda il Fattore di scala della Carica Batterica da assegnare alle foci dei fiumi, verranno prese in considerazione informazioni da letteratura e pubblicazioni disponibili per caratterizzare la concentrazione media di E. coli nelle acque fluviali. A titolo di esempio, potranno essere utilizzati i dati delle stazioni più prossime alla foce a mare dei fiumi ricavati dagli studi delle ARPA regionali per la classificazione della qualità delle acque irrigue (ad esempio, Regione Veneto, 2020; Arpa, 2018). Qualora la stazione di misura sia distante dalla foce del fiume, verrà considerato un fattore di diluizione in relazione alle portate idrologiche del fiume ricavate dal dataset EFAS (sezione 2.1.5).

Il modello di dispersione è allineato con il sistema modellistico operativo a scala nazionale: l'estensione geografica dei domini computazionali **[req. Art. 3.3a]**, l'estensione temporale **[req. Art. 3.3b]**, la risoluzione spaziale **[req. Art. 3.3c]**, la risoluzione temporale dei prodotti **[req. Art. 3.3e]**, le condizioni al contorno e forzanti **[req. Art. 3.3h]** e il formato dei prodotti **[req. Art. 3.3g]** coincidono con quelli già descritti per il sistema modellistico operativo a scala nazionale nella sezione 2.1.

Il modello di dispersione per i siti ad alta risoluzione è allineato ai rispettivi domini analogamente al sistema a scala nazionale.

3. GIUSTIFICAZIONE DELLE SCELTE TECNICHE EFFETTUATE

Nella presente sezione vengono presentati gli elementi a supporto del modello scelto per il sistema previsionale a scala nazionale:

- il BFM è il modello di riferimento del sistema modellistico biogeochimico Copernicus del Mar Mediterraneo **[ref Art. 3.1f]**;
- il modello MITgcm e il modello BFM hanno dimostrato di descrivere efficacemente molteplici aspetti della fisica e della biogeochimica del mar Mediterraneo e dei suoi mari marginali in numerose pubblicazioni scientifiche (Tabella 3.1) **[ref Art. 3.1f]**.

	BFM	assimilazione dati	MITgcm
Cossarini, G., Querin, S., Solidoro, C., Sannino, G., Lazzari, P., Di Biagio, V., & Bolzon, G. (2017). Development of BFMCOUPLER (v1. 0), the coupling scheme that links the MITgcm and BFM models for ocean biogeochemistry simulations. <i>Geoscientific Model Development</i> , 10(4), 1423-1445.	✓		✓
Cossarini, G., Feudale, L., Teruzzi, A., Bolzon, G., Coidessa, G., Solidoro, C., Di Biagio V.,... & Salon, S. (2021). High-resolution reanalysis of the Mediterranean Sea biogeochemistry (1999–2019). <i>Frontiers in Marine Science</i> , 8, 741486.	✓	✓	
Di Biagio, V., Salon, S., Feudale, L., & Cossarini, G. (2022). Subsurface oxygen maximum in oligotrophic marine ecosystems: mapping the interaction between physical and biogeochemical processes. <i>Biogeosciences Discussions</i> , 2022, 1-33.	✓	✓	
Salon, S., Cossarini, G., Bolzon, G., Feudale, L., Lazzari, P., Teruzzi, A., ... & Crise, A. (2019). Novel metrics based on Biogeochemical Argo data to improve the model uncertainty evaluation of the CMEMS Mediterranean marine ecosystem forecasts.	✓	✓	
Querin, S., Cossarini, G., & Solidoro, C. (2013). Simulating the formation and fate of dense water in a midlatitude marginal sea during normal and warm winter conditions. <i>Journal of Geophysical Research: Oceans</i> , 118(2), 885-900.			✓
Querin, S., Cosoli, S., Gerin, R., Laurent, C., Malačič, V., Pristov, N., & Poulain, P. M. (2021). Multi-platform, high-resolution study of a complex coastal system: The TOSCA experiment in the Gulf of Trieste. <i>Journal of Marine Science and Engineering</i> , 9(5), 469.			✓
Di Biagio, V., Cossarini, G., Salon, S., Lazzari, P., Querin, S., Sannino, G., & Solidoro, C. (2019). Temporal scales of variability in the Mediterranean Sea ecosystem: Insight from a coupled model. <i>Journal of Marine Systems</i> , 197, 103176.	✓		✓
Bruschi, A., Lisi, I., De Angelis, R., Querin, S., Cossarini, G., Di Biagio, V., ... & Silvestri, C. (2021). Indexes for the assessment of bacterial pollution in bathing waters from point sources: The northern Adriatic Sea CADEAU service. <i>Journal of Environmental Management</i> , 293, 112878.	✓	✓	✓
Di Biagio, V., Cossarini, G., Salon, S., & Solidoro, C. (2020). Extreme event waves in marine ecosystems: an application to Mediterranean Sea surface chlorophyll. <i>Biogeosciences</i> , 17(23), 5967-5988.	✓		✓
Teruzzi, A., Bolzon, G., Feudale, L., & Cossarini, G. (2021). Deep chlorophyll maximum and nutricline in the Mediterranean Sea: emerging properties from a multi-platform assimilated biogeochemical model experiment. <i>Biogeosciences Discussions</i> , 2021, 1-29.	✓	✓	

Tabella 3.1 - Lista delle pubblicazioni scientifiche basate su simulazioni dei modelli MITgcm e BFM nel Mar Mediterraneo e nei mari italiani.

La scelta delle condizioni al contorno (dagli output dei modelli fisici e biogeochimici del Mar Mediterraneo del sistema Copernicus Marine), degli input fluviali (dal servizio EFAS), del forzante atmosferico (modello operativo COSMO e rianalisi SPHERA, Giordani et al., 2023) è supportata sia dall'alto standard scientifico dei modelli utilizzati, sia dalla solidità del sistema di produzione e rilascio dei dati.

4. TABELLA DEI RISCHI

Le maggiori criticità per la realizzazione del sistema previsionale a scala nazionale e dei domini ad alta risoluzione sono elencate nella seguente Tabella 4.1. La tabella elenca, per ciascuna criticità, l'impatto sull'attività del progetto, il livello di rischio (inteso come severità del rischio e sua probabilità) e l'eventuale soluzione tecnica come azione per la mitigazione dell'impatto del rischio sui risultati del progetto. La Tabella 4.1 non è un documento statico, ma verrà aggiornata all'interno del sistema di controllo e reporting della pianificazione del progetto come descritto nel capitolo 4 del documento "Programma di gestione del progetto".

ID rischio	descrizione del rischio	impatto	severità	livello di probabilità	soluzione prevista per la mitigazione del rischio
IR1	assenza del forzante atmosferico ad alta risoluzione per la regione italiana (dal portale Meteo-Hub / Mistral)	degradazione della qualità delle simulazioni marine e delle previsioni	high	low	uso del forzante atmosferico ECMWF a più bassa risoluzione
IR2	assenza del dato Copernicus di satellite a scala regionale [1 km]	degradazione dell'analisi e mancata validazione	low	low	uso di un prodotto alternativo del sistema Copernicus Marine (prodotto globale [4 km])
IR3	assenza del dato Copernicus del modello fisico e biogeochimico del Mediterraneo	condizioni iniziali e condizioni al contorno assenti per le simulazioni, e conseguente degradazione della qualità delle simulazioni	high	low	uso di sistemi di recovery: ad esempio, uso di prodotti climatologici calcolati ad hoc su un periodo di almeno 10 anni. Tali prodotti saranno sempre disponibili su un server dedicato e costituiranno il dato di "backup" per la creazione delle condizioni iniziali e al contorno delle simulazioni operative. Una volta disponibile il prodotto Copernicus, le simulazioni verranno aggiornate con i nuovi dati NRT.

IR4	ritardi nella realizzazione dei moduli di gestione delle dipendenze	ritardo nell'esecuzione delle simulazioni	medium	low	ritardo nel rilascio dei risultati della simulazione
IR5	ingegnerizzazioni e del sistema modellistico non supporta il porting sui cluster di calcolo	sistema modellistico non funzionante in automatico	low	low	supporto manuale per l'esecuzione del porting e delle simulazione
IR6	assenza del dato di portata fluviale EFAS	condizioni al contorno ad alta frequenza assenti e degradazione della qualità delle simulazioni	medium	low	uso di sistemi di recovery (ad esempio, uso di climatologie)
IR7	assenza di risultati efficaci relativamente alla fornitura di prodotti satellitari dedicati (con ottimizzazioni specifiche), e di supporto esterno sia alla modellistica regionale che a quella ad alta risoluzione	la fase di ottimizzazione finale (T7) dei sistemi a scala nazionale e di alta risoluzione non può beneficiare di questo supporto esterno	medium	medium	la finalizzazione dei risultati del sistema nazionale è realizzata con le risorse interne e i risultati già ottenuti durante le fasi precedenti
IR8	blocco macchine HPC	sistema modellistico non funzionante	high	low	piano di contingenza con CINECA: predisposizione di un sistema ridondato (di backup) su un cluster HPC alternativo, garantendo altresì il pronto intervento di manutenzione/ripristino HW/SW per risolvere il fermo macchine

Tabella 4.1 - Tabella delle potenziali criticità.

5. DIPENDENZE DEGLI ELEMENTI DEL SISTEMA MODELLISTICO

I principali elementi del sistema modellistico sono semplificati nello schema di Figura 5.1. Il cuore del sistema (box grigio) è composto dagli elementi del modello fisico-idrodinamico, il modello biogeochimico, il modulo per l'accoppiamento dei modelli (coupler) e il modulo di dispersione. Il sistema modellistico si completa con i moduli di data assimilation (box viola) e i moduli di gestione dei dati di input (box bianchi). I risultati delle simulazioni sono utilizzati dal tool di generazione dei prodotti e da quello della validazione (box arancioni). La Tabella 5.1 riporta la lista dei dati di ingresso e uscita necessari al funzionamento del sistema previsionale a scala nazionale unitamente alla descrizione della fonte, del formato e delle trasformazioni operate nelle interfacce degli elementi del sistema.

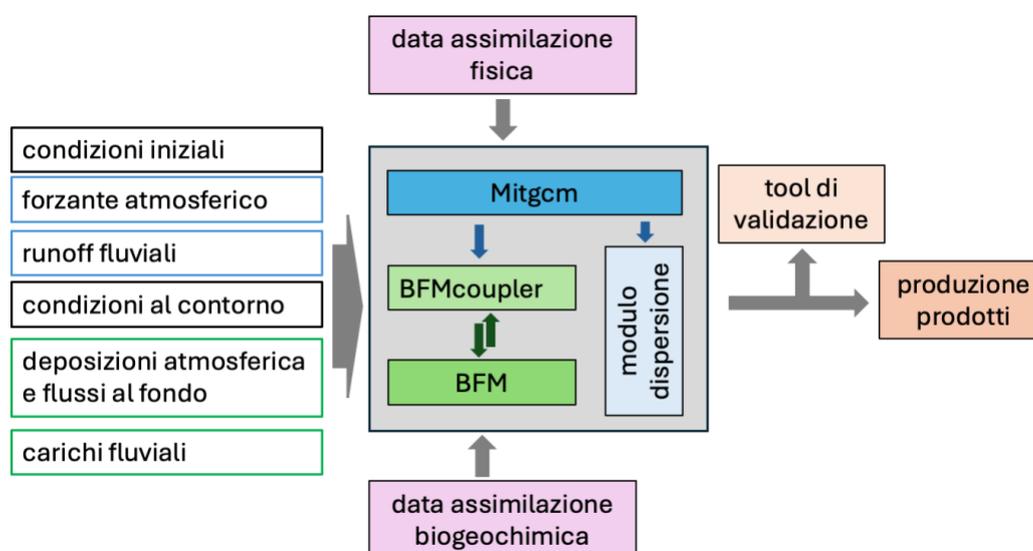


Figura 5.1 - Schema degli elementi che compongono il sistema modellistico

dipendenza	lista variabili	elemento del sistema che usa la dipendenza	fonte e formato dei dati di ingresso	trasformazione	formato dei dati di utilizzo
forzante atmosferico	vento, temperatura, pressione, radiazione solare, umidità, precipitazione	MITgcm	Meteo-Hub / portale Mistral (https://meteohub.mistralportal.it/app/datasets); formato GRIB	interpolazione sulle griglie del modello, conversione delle unità di misura, correzione per il passaggio tra griglie a diverse proiezioni	formato dei campi 2D del modulo EXF di MITgcm, file binari Float32
condizioni al contorno per variabili fisiche	temperatura, salinità, componenti della velocità zonale e meridionale	MITgcm	Copernicus Marine Service (https://data.marine.copernicus.eu/); prodotti: MEDSEA_ANALYSISFOR ECAST_PHY_006_013 e MEDSEA_MULTYEAR_P HY_006_004 formati: NetCDF4 CF1.4	conversione delle unità di misura, interpolazione sulla griglia 1/192°	formato del modulo OBCS di MITgcm, file binari Float32

condizioni al contorno di variabili biogeochimiche	nutrienti, ossigeno, fitoplancton, zooplancton,	MITgcm-BFM	Copernicus Marine Service (https://data.marine.copernicus.eu/); prodotti: MEDSEA_ANALYSISFOR_ECAST_BGC_006_014 e MEDSEA_MULTIYEAR_BGC_006_008 Formati: NetCDF4 CF1.4	conversione delle unità di misura, interpolazione sulla griglia 1/192°	formato del modulo OBCS di MITgcm, file binari Float32
portate fiumi (runoff)	portate d'acqua dolce	MITgcm	Copernicus Climate Change Service (https://cds.climate.copernicus.eu/); prodotti: i) River discharge and related historical data from the European Flood Awareness System DOI: 10.24381/cds.e3458969 ii) River discharge and related forecasted data by the European Flood Awareness System DOI: 10.24381/cds.9f696a7a formato: NetCDF	estrazione dei dati su punti foce, conversione delle unità di misura	formato del modulo OBCS di MITgcm, file binari Float32
apporti fluviali dei carichi di nutriente, POC, DOC, DIC, alcalinità	flussi di nutriente, POC, DOC, DIC, alcalinità	MITgcm-BFM	come sopra	come al punto precedente; calcolo dei carichi con dati descritti in Tab. 2.2	formato del modulo OBCS di MITgcm, file binari Float32
dati di satellite per assimilazione	SST, clorofilla superficiale	MITgcm, 3DVarBio, Modulo NN	Copernicus Marine Service (https://data.marine.copernicus.eu/); prodotti: OCEANCOLOUR_MED_BGC_L4_NRT_009_142, OCEANCOLOUR_MED_BGC_L4_MY_009_144, SST_MED_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_004, SST_MED_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_021 formato: NetCDF4 CF1.4	conversione delle unità di misura, interpolazione sulla griglia 1/192°	formato binario del modulo RBCS di MITgcm e di 3DVarBio
dati di satellite per validazione	SST, clorofilla superficiale	Tool di validazione	come al punto precedente	conversione delle unità di misura, interpolazione sulla griglia 1/192°	tabelle di numeri e grafici

dati in situ MedBGCins	Nutrienti, ossigeno, clorofilla	Tool di Validazione	zenodo https://doi.org/10.5281/zenodo.11474651 formato: NetCDF4	conversione delle unità di misura	tabelle di numeri e grafici
dati in situ EIONET/SOE	Nutrienti, ossigeno, clorofilla	Tool di Validazione	ISPRA	conversione delle unità di misura	tabelle di numeri e grafici
punti sorgente per tracciante E. coli (scarichi a mare)	localizzazione e dell'input di E. coli	modulo di dispersione	ISPRA, Punti di Scarico, Direttiva UWWTD91/271/CEE - Trattamento delle acque reflue urbane	costruzione di mappe 2D; conversione delle unità di misura,	formato del modulo PTRACERS di MITgcm, file binario Float32
punti sorgente per tracciante E. coli (apporti fluviali)	localizzazione e dell'input di E. coli	modulo di dispersione	fiumi EFAS (come sopra)	costruzione di mappe 2D; conversione delle unità di misura,	formato del modulo PTRACERS di MITgcm, file binario Float32
mappe di flussi bentici	flussi di CO ₂ , O ₂ , NO ₃ , PO ₄ all'interfaccia acqua- sedimento	BFMcoupler	letteratura	costruzione di mappe 2D; conversione delle unità di misura,	formato del modulo PTRACERS di MITgcm, file binario Float32
deposizione atmosferica di N e P	flussi di N e P atmosferici alla superficie del mare	BFMcoupler	letteratura	costruzione di mappe 2D; conversione delle unità di misura	formato del modulo PTRACERS di MITgcm, file binario Float32
fattore di attenuazione di background	Kd	BFMcoupler	Copernicus Marine Service (https://data.marine.copernicus.eu/); prodotti: OCEANCOLOUR_MED_B GC_L4_MY_009_144 formato: NetCDF4 CF1.4	conversione delle unità di misura, interpolazione sulla griglia 1/192°	formato del modulo PTRACERS di MITgcm, file binario Float32
prodotti	lista delle variabili di Tabella 2.1	modulo di produzione dei prodotti	sistema modellistico; formato: binari MITgcm	conversione delle unità di misura	formato: NetCDF4 CF1.4

Tabella 5.1 - Lista delle dipendenze dei diversi elementi del sistema operativo a scala nazionale.

BIBLIOGRAFIA

Butenschön, M., Clark, J., Aldridge, J. N., Allen, J. I., Artioli, Y., Blackford, J., ... & Torres, R. (2016). ERSEM 15.06: a generic model for marine biogeochemistry and the ecosystem dynamics of the lower trophic levels. *Geoscientific Model Development*, 9(4), 1293-1339.

Broggi, S. R., Balestra, C., Casotti, R., Cossarini, G., Galletti, Y., Gonnelli, M., ... & Santinelli, C. (2020). Time resolved data unveils the complex DOM dynamics in a Mediterranean river. *Science of the Total Environment*, 733, 139212.

Cozzi, S., & Giani, M. (2011). River water and nutrient discharges in the Northern Adriatic Sea: Current importance and long term changes. *Continental Shelf Research*, 31(18), 1881-1893.

Cossarini, G., Querin, S., Solidoro, C., Sannino, G., Lazzari, P., Di Biagio, V., & Bolzon, G. (2017). Development of BFMCOUPLER (v1. 0), the coupling scheme that links the MITgcm and BFM models for ocean biogeochemistry simulations. *Geoscientific Model Development*, 10(4), 1423-1445.

Cossarini, G., Feudale, L., Teruzzi, A., Bolzon, G., Coidessa, G., Solidoro, C., ... & Salon, S. (2021). High-resolution reanalysis of the Mediterranean Sea biogeochemistry (1999-2019). *Frontiers in Marine Science*, 8, 741486.

Dai, M., Yin, Z., Meng, F., Liu, Q., & Cai, W. J. (2012). Spatial distribution of riverine DOC inputs to the ocean: an updated global synthesis. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(2), 170-178.

Di Biagio, V., Campanella, S., & COSSARINI, G. (2024). In situ dataset for initialization and validation of the Copernicus Med-MFC biogeochemical model system (MedBGCins) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11474651>

Giani M, Ogrinc N, Tamše S, Cozzi S. Elevated River Inputs of the Total Alkalinity and Dissolved Inorganic Carbon in the Northern Adriatic Sea. *Water*. 2023; 15(5):894. <https://doi.org/10.3390/w15050894>

Giordani, A., Cerenzia, I. M. L., Paccagnella, T., & Di Sabatino, S. (2023). SPHERA, a new convection-permitting regional reanalysis over Italy: Improving the description of heavy rainfall. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 149(752), 781-808.

Gómez-Gutiérrez, A. I., Jover, E., Bodineau, L., Albaigés, J., & Bayona, J. M. (2006). Organic contaminant loads into the Western Mediterranean Sea: estimate of Ebro River inputs. *Chemosphere*, 65(2), 224-236.

Higuera, M., Kerhervé, P., Sanchez-Vidal, A., Calafat, A., Ludwig, W., Verdoit-Jarraya, M., ... & Canals, M. (2014). Biogeochemical characterization of the riverine particulate organic matter transferred to the NW Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, 11(1), 157-172.

Kaiser, E., Arscott, D. B., Tockner, K., & Sulzberger, B. (2004). Sources and distribution of organic carbon and nitrogen in the Tagliamento River, Italy. *Aquatic Sciences*, 66, 103-116.

Lazzari, P., Álvarez, E., Terzić, E., Cossarini, G., Chernov, I., D'Ortenzio, F., & Organelli, E. (2021). CDOM spatiotemporal variability in the Mediterranean Sea: a modelling study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 176.

Ludwig, W., Dumont, E., Meybeck, M., & Heussner, S. (2009). River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: major drivers for ecosystem changes during past and future decades?. *Progress in oceanography*, 80(3-4), 199-217.

Malagó, A., Bouraoui, F., Grizzetti, B., & De Roo, A. (2019). Modelling nutrient fluxes into the Mediterranean Sea. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 22, 100592.

Many, G., Ulses, C., Estournel, C., and Marsaleix, P.: Particulate organic carbon dynamics in the Gulf of Lion shelf (NW Mediterranean) using a coupled hydrodynamic–biogeochemical model, *Biogeosciences*, 18, 5513–5538, <https://doi.org/10.5194/bg-18-5513-2021>, 2021.

Mussap, G., & Zavatarelli, M. (2017). A numerical study of the benthic–pelagic coupling in a shallow shelf sea (Gulf of Trieste). *Regional Studies in Marine Science*, 9, 24–34.

Panagiotopoulos, C., Sempere, R., Para, J., Raimbault, P., Rabouille, C., & Charrière, B. (2012). The composition and flux of particulate and dissolved carbohydrates from the Rhone River into the Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, 9(5), 1827–1844.

Pitta, E., Zeri, C., Tzortziou, M., Dimitriou, E., Paraskevopoulou, V., Dassenakis, E., Scoullou, M., & Anagnostou, E. (2014). Dissolved organic matter cycling in eastern Mediterranean rivers experiencing multiple pressures. The case of the trans-boundary Evros River. *Mediterranean Marine Science*, 15(2), 398–415. <https://doi.org/10.12681/mms.565>

Salon, S., Cossarini, G., Bolzon, G., Feudale, L., Lazzari, P., Teruzzi, A., ... & Crise, A. (2019). Novel metrics based on Biogeochemical Argo data to improve the model uncertainty evaluation of the CMEMS Mediterranean marine ecosystem forecasts. *Ocean Science*, 15(4), 997–1022.

Strobl, R. O., Somma, F., Evans, B. M., & Zaldívar, J. M. (2009). Fluxes of water and nutrients from river runoff to the Mediterranean Sea using GIS and a watershed model. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114(G3).

Tamše, S., Ogrinc, N., Walter, L. M., Turk, D., & Faganeli, J. (2015). River sources of dissolved inorganic carbon in the gulf of Trieste (N Adriatic): stable carbon isotope evidence. *Estuaries and Coasts*, 38, 151–164.

Teruzzi, A., Bolzon, G., Feudale, L., & Cossarini, G. (2021). Deep chlorophyll maximum and nutricline in the Mediterranean Sea: emerging properties from a multi-platform assimilated biogeochemical model experiment. *Biogeosciences Discussions*, 2021, 1–29.

UNEP/MAP/MED POL: Riverine Transport of Water, Sediments and Pollutants to the Mediterranean Sea. MAP Technical Reports Series No. 141, UNEP/MAP, Athens, 2003.

Van Apeldoorn, D. and Bouwman, L.: SES land-based runoff and nutrient load data (1980–2000), Deliverable 4.6, http://www.perseus-net.eu/assets/media/PDF/deliverables/3321.6_Final.pdf, (last access: 5 February 2020), 2014.

Volf, G., Atanasova, N., Kompare, B., & Ožanić, N. (2013). Modeling nutrient loads to the northern Adriatic. *Journal of hydrology*, 504, 182–193.