



LA1.1: Realizzazione di un sistema operativo per la previsione della circolazione del sistema accoppiato Mediterraneo-Mar Nero, che include gli effetti delle maree

R. Iacono, S. Memè, E. Napolitano, A. Bargagli, F. Antonioli, MV. Struglia, A. Carillo, G. Pisacane, A. Anav, R. Cannata, E. Lombardi, G. Sannino

LA1.1: Realizzazione di un sistema operativo per la previsione della circolazione del sistema accoppiato Mediterraneo-Mar Nero, che include gli effetti delle maree

R. Iacono, S. Memè, E. Napolitano, A. Bargagli, F. Antonioli, MV. Struglia, A. Carillo, G. Pisacane, A. Anav, R. Cannata, E. Lombardi, G. Sannino

Febbraio 2020

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.8 Energia elettrica dal mare

Work package: Energia elettrica dal mare

Linea di attività: LA1.1: Implementazione e test di un sistema operativo per la previsione della circolazione del Mar Mediterraneo e valutazione degli effetti delle maree

Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino ENEA

Responsabile del Work package: Gianmaria Sannino ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Piano triennale di realizzazione 2019-2021 della ricerca di sistema elettrico nazionale"

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Giuliana Mattiazzo

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 MITO, MODELLO AD ALTA RISOLUZIONE DELLA CIRCOLAZIONE DEL SISTEMA MEDITERRANEO-MAR NERO, CHE INCLUDE GLI EFFETTI DELLE MAREE.	8
2.2 VALIDAZIONE DELLA DINAMICA DI MAREA.....	9
2.3 VALIDAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE SUPERFICIALE, DELLA SST E DELL'IDROLOGIA.....	11
2.3.1 <i>Circolazione superficiale</i>	11
2.3.2 <i>Temperatura superficiale</i>	12
2.3.3 <i>Profili verticali di temperatura e salinità</i>	13
2.4 EFFETTI DELLE MAREE SUL TRASPORTO E SULLA CIRCOLAZIONE IN ALCUNE REGIONI D'INTERESSE	13
2.4.1 <i>Canale di Sicilia</i>	14
2.4.2 <i>Canale di Corsica</i>	16
2.4.3 <i>Stretto di Otranto</i>	16
2.4.4 <i>Stretto di Messina</i>	17
2.4.5 <i>Nord Adriatico</i>	17
2.5 LA CATENA OPERATIVA MITO.....	18
3 CONCLUSIONI.....	43
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	44

Sommario

Le attività di questa prima annualità hanno riguardato l'implementazione e la validazione di un sistema operativo per la previsione della circolazione del Mar Mediterraneo e del Mar Nero, basato su un modello numerico tridimensionale della circolazione marina che include i principali effetti delle maree. Dopo una fase di test della catena operativa prototipale, il sistema è entrato in fase di produzione, e fornisce ora previsioni giornaliere a cinque giorni delle principali caratteristiche fisiche (corrente, temperatura, salinità, elevazione della superficie), con dati di output orari. I principali risultati delle simulazioni previsionali sono conservati, al fine di creare nel tempo un archivio della circolazione mediterranea, che si presenta come unico nel panorama europeo, per l'alta risoluzione spaziale (circa 2 km, con opportuni infittimenti in zone cruciali, come lo Stretto di Gibilterra e i Dardanelli), e per l'inclusione degli effetti di marea, sia locali che provenienti dall'Atlantico.

Parallelamente, è stata realizzata una simulazione dedicata di più lunga durata, che ha consentito di valutare le performance del modello di circolazione in assenza di assimilazione di dati sperimentali, attraverso un confronto dettagliato con le osservazioni, sia in situ che da satellite. La simulazione è stata poi utilizzata per una prima analisi degli effetti della marea sulla circolazione, con risultati interessanti e, in alcuni casi, non previsti, che mostrano l'esistenza di effetti complessi, anche non lineari, indotti dalla marea in vari sottobacini del Mediterraneo.

1 Introduzione

In questo documento si descrivono le attività del primo anno della linea LA1.1 dell'Accordo di Programma MISE-ENEA, finalizzate all'implementazione e alla validazione di un sistema operativo per la previsione della circolazione del Mar Mediterraneo e del Mar Nero. Tale sistema è basato su un modello numerico tridimensionale "state of the art" della circolazione marina che include i principali effetti delle maree, sia prodotte da forzanti locali che provenienti dall'Atlantico. Un sistema operativo di questo tipo, unico al momento in ambito europeo, può costituire uno strumento prezioso di supporto ad attività di vario tipo che si svolgono in mare, incluse quelle volte all'utilizzo delle risorse marine, tra cui hanno un ruolo di crescente importanza quelle relative all'estrazione di energia dal moto ondoso e dalle correnti.

Oltre all'inclusione della dinamica di marea, il modello di circolazione alla base del sistema operativo, il cui primo sviluppo era stato effettuato nell'ambito dell'obiettivo a) del PAR 2015, ha altre caratteristiche fortemente innovative, tra cui l'alta risoluzione spaziale, con un dettaglio orizzontale di $1/48^\circ$ (circa 2 km) - due volte più alto degli attuali modelli operativi disponibili tramite il Programma Copernicus - che aumenta ulteriormente, fino ad alcune centinaia di metri, nella regione dello Stretto di Gibilterra, permettendo di risolvere adeguatamente la componente di marea atlantica e la complessa dinamica che ha luogo nello Stretto. Rimandiamo al rapporto tecnico relativo al citato obiettivo del PAR 2015 (Progettazione e realizzazione di un sistema di previsione della circolazione marina del Mediterraneo; Report RdS/PAR2015/304) per una descrizione delle attività di ricerca ENEA nel campo dell'oceanografia operativa, ormai più che decennali, all'interno delle quali s'inserisce lo sviluppo del nuovo sistema previsionale.

Nel primo anno di attività sono state individuate le caratteristiche tecniche della catena operativa, tenendo conto, da un lato, della tipologia e della disponibilità dei dati atmosferici e marini che servono per forzare il modello in superficie e per fornire condizioni iniziali e al contorno per le simulazioni, e, dall'altro, delle risorse computazionali necessarie per garantire l'operatività. È stata poi realizzata un'implementazione prototipale della catena operativa, che ha consentito di validare le diverse fasi della procedura informatica e, una volta effettuata la validazione, si è dato inizio alla fase previsionale operativa.

Parallelamente, è stata effettuata una simulazione di più lunga durata, che ha permesso una validazione più robusta del modello, attraverso un confronto dettagliato tra la circolazione e la struttura idrologica simulate e quelle derivanti da osservazioni in situ e remote, che sono ora convenientemente disponibili attraverso il portale europeo Copernicus. La simulazione è stata poi usata per individuare regioni del Mediterraneo in cui gli effetti delle maree sono importanti, e per compiere una prima analisi delle modifiche della circolazione indotte in queste regioni dalla dinamica di marea.

L'analisi delle simulazioni previsionali operative, che andranno nel tempo a costituire un archivio ad alta risoluzione della circolazione Mediterranea, consentirà di approfondire ed estendere i risultati qui presentati.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Benché in generale gli effetti delle maree nel Mediterraneo siano più deboli rispetto a quelli che si osservano in altre regioni dell'oceano globale (restando in ambito europeo, pensiamo ad esempio alle coste atlantiche di Francia e Spagna, o al canale della Manica), è ben noto come essi possano essere localmente amplificati, in alcuni passaggi con batimetria complessa. Esempi sono lo Stretto di Gibilterra (SoG qui di seguito), che permette l'ingresso di acqua superficiale atlantica (Atlantic Water; AW) e del segnale di marea atlantica nel Mediterraneo, e il Canale di Sicilia, che separa il Mediterraneo Occidentale dal bacino orientale (Levantino; vedi la Figura 1, dove è mostrata la batimetria del sistema Mediterraneo-Mar Nero, e sono indicati i vari sottobacini, insieme ad altri luoghi geografici di interesse).

Altre aree in cui la marea produce effetti importanti sono lo Stretto di Messina, dove l'opposizione di fase tra la marea nel Tirreno e quella nello Ionio induce una dinamica poderosa, con forti correnti e vortici, che è nota fin dai tempi di Omero (vedi, ad esempio, Bignami e Salusti [1]), e la parte settentrionale

dell'Adriatico, dove da sempre la marea è una minaccia per gli insediamenti umani (un esempio tratto da un articolo di Paolo Canestrelli: *"10 agosto 1410: Acqua grande crescente per tutta la terra, che non fu mai veduto plui a questo tempo inondazioni de aque. Perirono molte barche, e di quelli che venivano dalla fiera di Mestre e altri luoghi s'annegarono quasi mille persone. Caddero molti camini, il campanile di S. Fosca con rovina di molte case e quello del Corpus Domini con gran parte della chiesa"*)

Sia nello Stretto di Messina che nel SoG osservazioni remote hanno evidenziato effetti spettacolari delle maree; satelliti americani ed europei hanno acquisito negli ultimi decenni numerose immagini SAR (Synthetic Aperture Radar) che mostrano la propagazione di onde solitarie interne generate dall'interazione delle correnti di marea con la batimetria (vedi, ad esempio, il libro di Barale e Gade [2], e le referenze ivi citate). Nel caso del SoG la propagazione di questi segnali è stata anche riprodotta in simulazioni numeriche non-idrostatiche ad altissima risoluzione, descritte in Sanchez-Garrido et al. [3].

Le osservazioni "moderne" delle maree nel Mediterraneo sono cominciate negli anni 80 (vedi Hopkins et al. [4], e Grancini and Michelato [5], tra altri), ma una descrizione dettagliata dei loro effetti sulla circolazione non è ancora disponibile, principalmente a causa della complessità della morfologia e della batimetria del bacino, che determina differenti regimi di marea nei vari sottobacini. Una lista esaustiva dei principali lavori sperimentali dedicati allo studio di questi regimi è contenuta in un lavoro recente di Poulain et al [6], in cui informazioni su alcune delle componenti di marea del Mediterraneo sono estratte dall'analisi delle traiettorie di "drifters" superficiali. Alcuni di questi lavori saranno citati nelle prossime sezioni.

Sulla base del quadro delineato, è evidente che gli effetti delle maree devono essere inclusi nei modelli numerici, e in particolare nei modelli ad alta risoluzione della dinamica costiera. Questi ultimi vanno innestati in modelli a più bassa risoluzione che comunque includano gli effetti delle maree, per non perdere la componente baroclinica della dinamica indotta dal segnale di marea che si propaga dall'Atlantico in tutto il bacino (vedi [7-8]). Ciò è ancora più necessario in regioni, e vedremo che ce ne sono diverse, in cui le maree inducono effetti non lineari, poiché in queste regioni l'effetto dinamico della marea non può essere semplicemente sommato alla circolazione prodotta da modelli che non includano la forzante di marea.

A tutt'oggi, non vi sono modelli numerici Copernicus che forniscano previsioni operative della circolazione del Mediterraneo tenendo conto degli effetti delle maree. Sviluppare un tale sistema è precisamente il primo obiettivo delle attività di LA1.1.

Il modello operativo della circolazione Mediterranea i cui output sono disponibili attraverso il portale europeo Copernicus (MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_PHY_006_013, Clementi et al. [9]) è comunque stato recentemente migliorato. Questo modello, basato sul nucleo computazionale del modello NEMO [10], fornisce campi tridimensionali di temperatura, salinità, elevazione superficiale e velocità con un dettaglio spaziale orizzontale che è ora di $1/24^\circ$ (circa 4.6 km), con frequenza oraria. Un analogo prodotto Copernicus è disponibile per il Mar Nero (BLKSEA_ANALYSIS_FORECAST_PHYS_007_001). L'utilizzo dei dati prodotti da questi modelli rende possibile l'innestamento di un modello più risolto, che copra il sistema Mediterraneo-Mar Nero. I dati Copernicus forniranno la condizione iniziale per il nuovo modello operativo, e, durante la simulazione previsionale, le condizioni al contorno sull'unico bordo aperto del dominio computazionale, che è a ovest di Gibilterra (vedi Figura 1).

Ricordiamo che effetti di lungo termine delle maree in un modello numerico della circolazione Mediterranea basato sul MITgcm (Massachusetts Institute of Technology general circulation model) sono stati prima descritti in Sannino et al [8]. Qui ci concentreremo invece su effetti di breve termine rilevanti per il forecasting. Il modello sviluppato e analizzato nell'ambito del presente MISE-PAR è anch'esso basato su MITgcm, ma, come vedremo meglio in seguito, differisce in molti aspetti dal modello sviluppato in [8]. La risoluzione è stata aumentata in modo importante, sia in termini di livelli verticali che del dettaglio orizzontale, che è ora di $1/48^\circ$ nella maggior parte del dominio computazionale. Il nuovo modello usa condizioni iniziali e al bordo e forzanti atmosferiche superficiali derivanti da modelli previsionali operativi. Il dominio computazionale copre ora l'intero sistema Mediterraneo-Mar Nero, e non ha quindi bisogno di condizioni al bordo *ad hoc* ai Dardanelli, poiché gli scambi che avvengono attraverso gli stretti turchi sono risolti esplicitamente.

Nelle sezioni successive sono descritte le attività svolte, insieme ai principali risultati conseguiti. Le principali caratteristiche tecniche del modello tridimensionale di circolazione oceanica MITO (MIT Operational) qui sviluppato, che è alla base della catena operativa per il forecast della circolazione del sistema Mediterraneo-Mar Nero, sono descritte nella Sezione 2.1. MITO è stato anche utilizzato per una simulazione di più lunga durata (periodo 19 Marzo- 30 Aprile 2018), che è stata analizzata in dettaglio, per validare il modello, valutarne le performances in assenza di assimilazione di dati sperimentali, e avere un primo quadro degli effetti principali della marea in sotto-bacini di interesse. La validazione della dinamica di marea, anche attraverso il confronto con dati mareografici, è descritta nella Sezione 2.2, mentre nella sezione 2.3 si confrontano l'idrologia e la circolazione riprodotta dal modello con dati osservati, sia da remoto che in situ. Gli effetti delle maree sul trasporto e la circolazione sono analizzati in dettaglio nella sezione 2.4, che si focalizza sulle dinamiche simulate nel Canale di Sicilia, nel Canale di Corsica, negli Stretti di Otranto e di Messina, e nel nord Adriatico. Infine, la Sezione 2.5 descrive l'implementazione della catena operativa e fornisce alcuni ulteriori esempi di dinamica indotta dalle maree.

2.1 MITO, modello ad alta risoluzione della circolazione del sistema Mediterraneo-Mar Nero, che include gli effetti delle maree.

Il modello numerico di circolazione MITO, al cuore della catena previsionale operativa, è basato sul modello MITgcm, sviluppato da Marshal et al [11-12]. MITgcm risolve le equazioni di Navier-Stokes per fluidi incomprimibili, in approssimazione di Boussinesq; in MITO viene utilizzata la versione idrostatica del modello. L'implementazione fa uso di una discretizzazione spaziale ai volumi finiti su un grigliato "staggered" di tipo Arakawa-C e di un trattamento implicito non lineare per la superficie libera [13]. Una coordinata zeta scalata è utilizzata in verticale [14], e la topografia è trattata mediante la tecnica delle celle parziali (vedi [8] per ulteriori dettagli). Il dominio del modello, rappresentato in Figura 1, copre tutta l'area del Mediterraneo e del Mar Nero; in tal modo l'unica frontiera aperta (open boundary) è ad ovest dello stretto di Gibilterra, nell'oceano Atlantico.

Il grigliato computazionale orizzontale è costituito da 2500 x 750 punti di griglia, ed è omogeneo, con una risoluzione di circa 2 km ($1/48^\circ$) su quasi tutto il dominio computazionale, tranne che in due regioni, il SoG e lo stretto dei Dardanelli, in cui è necessario un dettaglio maggiore, per risolvere adeguatamente la dinamica a piccola scala indotta dalla complessa batimetria. Nel SoG ciò ottenuto tramite mediante un'appropriata deformazione del grigliato, che consente una risoluzione massima di $1/800^\circ$ (circa 120 m), mentre negli Stretti dei Dardanelli e Bosforo un infittimento graduale consente una risoluzione massima di circa $1/250^\circ$ (circa 380 m). Le caratteristiche del grigliato in queste regioni, insieme alle rispettive batimetrie, sono mostrate in Figura 2. Per quanto riguarda invece la discretizzazione verticale si sono utilizzati 100 livelli, con una risoluzione variabile che va da circa 2 m in superficie a circa 62 m da 1500 m fino al fondo. Il passo d'integrazione temporale è di 10 s.

La batimetria del modello (Figura 1 e 2) è stata realizzata utilizzando il dataset European Marine Observation and Data Network (EMODnet) 2016 (<https://www.emodnet-bathymetry.eu>) per la maggior parte del dominio computazionale, tranne che nelle regioni più risolte, dove sono stati usati dataset specifici a più alta risoluzione. Per il SoG si è usato il dataset di Sanz et al [15] e per gli stretti turchi quello fornito da Erkan Gökaşan (Gökaşan et al. [16-17]), messo a disposizione dalla Turkish Navy, Navigation, Hydrography and Oceanography Office. La batimetria finale del modello è stata poi realizzata mediante l'interpolazione bilineare di questi dati sul grigliato numerico, con correzioni manuali in punti isolati e in alcune zone critiche (vedi Sannino et al, [8], [18]).

MITO è forzato in superficie dal wind-stress, e dai flussi di calore e sale calcolati dai dati orari forniti del modello atmosferico non-idrostatico regionale SKIRON (Kallos et al. [19]). SKIRON è una delle componenti fondamentali del sistema di previsioni POSEIDON (Papadopoulos and Katsafados [20]) dell'Università di Atene (<http://forecast.uoa.gr/forecastnewinfo.php>) e, da anni, è usato per diverse applicazioni sia in atmosfera che in oceano (vedi, ad esempio, [21-23]).

I campi di velocità, temperatura, salinità e elevazione, usati per l’inizializzazione e per le condizioni al bordo nel box atlantico, sono invece prodotti dal modello previsionale operativo basato su NEMO [10], disponibili sul portale COPERNICUS (MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_PHY_006_013).

La forzante di marea è introdotta esplicitamente in MITO, sia come forcing diretto sul bacino che come marea che si propaga dall’Atlantico attraverso il bordo aperto del dominio computazionale. In particolare, nel dominio computazionale sono state introdotte le quattro componenti di marea principali, diurne e semi-diurne (K1, O1, M2, S2). I dettagli dell’implementazione sono descritti in [7] e [8], e nel rapporto tecnico “Progettazione e realizzazione di un sistema di previsione della circolazione marina del Mediterraneo” (Report RdS/PAR2015/304).

Per quanto riguarda i coefficienti di “eddy viscosity” e diffusività verticali si è utilizzata la chiusura di turbolenza di Gaspar et al. [24], mentre la viscosità orizzontale (dipendente dallo spazio) è calcolata mediante l’uso dello schema di Leith [25]. Tale schema differisce da quello classico di Smagorinsky [26], poiché risolve direttamente la cascata di enstrofia (cascata verso le scale più piccole), che è una caratteristica della turbolenza 2D. Il coefficiente di diffusività orizzontale è costante; $K_h = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Lo schema di avvezione dei “tracers” (temperatura e salinità) è del terzo ordine nello spazio e nel tempo e di tipo “flux limited”.

Per ciò che riguarda le condizioni al bordo, sono state utilizzate le condizioni no-slip per l’equazione del momento al fondo e ai bordi solidi laterali. In particolare, il coefficiente di attrito sul fondo è espresso come funzione quadratica del flusso medio nello strato limite. Il coefficiente di drag adimensionale utilizzato è di 2.5×10^{-3} . Al bordo aperto ad ovest è applicato lo schema radiativo di Orlansky [27] per la velocità baroclinica (3D), mentre per l’elevazione si è utilizzata la condizione a gradiente nullo (zero-gradient), e per la velocità barotropica (2D) la condizione radiativa di Orlansky forzata [28]. Le condizioni al bordo per la temperatura e salinità sono trattate mediante uno schema di tipo upwind in cui i tracers sono trasportati all’interno del dominio di integrazione sotto condizioni di inflow.

Nel modello è stato introdotto anche l’apporto fluviale climatologico giornaliero per i 27 fiumi più importanti che affluiscono nel Mar Mediterraneo. L’input è stato calcolato attraverso il modello WBMplus [29-31] e inserito come condizione al bordo. WBMplus è un modello su griglia spaziale basato su un semplice ma robusto budget di umidità del suolo che simula lo scambio verticale d’acqua tra atmosfera e suolo e il trasporto orizzontale d’acqua attraverso la rete fluviale, con risoluzione giornaliera. WBMplus è stato utilizzato a una risoluzione di $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, in una configurazione che richiede come unici parametri atmosferici di input la temperatura dell’aria al suolo e la precipitazione, che sono stati ricavati dal dataset WFDEI [32]. Il modello usa inoltre una parametrizzazione standard per ciò che riguarda la parametrizzazione del suolo, che consiste in una semplice formulazione parametrica in cui l’acqua in eccesso, derivante dalla differenza tra precipitazione ed evaporazione potenziale, viene lasciata infiltrarsi fino alla capacità di immagazzinamento del suolo, e la restante viene lasciata defluire come runoff. Ogni volta che l’evaporazione potenziale supera la precipitazione, la compensazione per il flusso d’acqua verso l’atmosfera si ottiene drenando dal serbatoio del suolo. L’evapotraspirazione è calcolata in base alla formula empirica di Hamon [33], in funzione della sola temperatura.

Le precipitazioni sono considerate neve ogni volta che la temperatura superficiale è inferiore a una soglia e la neve si accumula e non si lascia sublimare. Al di sopra di una soglia di temperatura di scioglimento della neve prescritta, lo scioglimento della neve viene calcolato in funzione della temperatura media giornaliera e delle precipitazioni giornaliere.

Le condizioni iniziali per la copertura nevosa e le proprietà idrologiche del suolo vengono raggiunte tramite lo spin-up del modello. L’acqua viene trasportata lungo la rete fluviale mediante uno schema tipo Muskingum-Cunge che risolve le equazioni di flusso di Saint-Venant [34].

2.2 Validazione della dinamica di marea

Per valutare la qualità della rappresentazione della dinamica di marea è stata effettuata una simulazione di un anno con una versione barotropica del modello. Le mappe delle componenti di marea risultanti,

ottenute dall'analisi armonica dell'elevazione superficiale (vedi [35-36]) sono state confrontate con le mappe di riferimento ottenute utilizzando il software Oregon State University (OSU) Tidal inversion software (OTIS) [37], e con mappe contenute in recenti lavori numerici dedicati alla simulazione delle maree nel Mar Mediterraneo e nei bacini interconnessi. Sono stati anche effettuati confronti puntuali con i dati sperimentali (Tsimplis et al [38]).

Le distribuzioni di ampiezza e fase delle principali componenti di marea, ovvero la semi-diurna M2 e la diurna K1, ottenute dall'analisi armonica dell'altezza della superficie del mare simulata, sono riportate in Figura 3 (pannelli di sinistra), insieme alle corrispondenti mappe ottenute utilizzando OTIS (pannelli di destra). La figura mostra che l'ampiezza di marea M2 è di pochi centimetri nella maggior parte del dominio, e di circa 10 cm, o appena sopra, nel Mar Tirreno e nella parte orientale del bacino levantino. Ampiezze significativamente più elevate si riscontrano solo nel SoG, nel Mare Adriatico settentrionale e nel Golfo di Gabes, dove si possono superare i 50 cm. D'altra parte, l'ampiezza della M2 è molto ridotta nel Mar Nero, in accordo con quanto è noto dalla bibliografia. Le ampiezze estratte dal modello sono in ottimo accordo con quelle di OTIS in tutto il dominio computazionale.

La fase della componente M2 è mostrata nei pannelli nella seconda fila della figura; anche in questo caso, c'è un buon accordo con OTIS, e il modello riproduce correttamente i tre noti punti anfidromici presenti nel Mar Mediterraneo (vedi, ad esempio, [38]). Il primo di essi si trova nel bacino occidentale, a circa 0°E, vicino alla costa spagnola, il secondo nel Canale di Sicilia, e il terzo nella parte settentrionale del Mare Adriatico. La mappa del modello mostra la presenza di altri due punti anfidromici, a sud dell'isola di Creta, vicino alla costa africana, e al centro del Mar Nero, che compaiono anche nella mappa OTIS.

Anche gli ultimi pannelli della figura, relativi alla componente K1, mostrano un buon accordo tra il modello e OTIS, sia in termini di ampiezza che di fase. Le ampiezze sono generalmente inferiori a quelle della M2, tranne che nel Mar Adriatico, dove possono raggiungere i 15 cm, in accordo con quanto rilevato da Tsimplis et al [38]. I punti anfidromici che si trovano nel Canale di Sicilia e nel Mar Nero sono quasi nelle stesse posizioni dei punti della M2.

Sia il modello che le mappe OTIS mostrano anche la presenza di un punto anfidromico, per entrambe le componenti di marea, situato all'interno del Mare di Azov, che è stato segnalato nei recenti lavori di Ferrarin et al [39], e Medvedev [40]. Quello di Ferrarin et al [39] è il primo lavoro che simula la dinamica (barotropica) delle maree nel sistema interconnesso formato dai mari Mediterraneo, Marmara, Nero e Azov. Il lavoro di Medvedev [40] si concentra invece sul sistema Mar Nero - Mare di Azov, e si basa su una versione 2D del Princeton Ocean Model (POM, [41-42]), che viene validato con una lunga serie di osservazioni. In questo lavoro, in accordo con i nostri risultati, si osserva che le ampiezze massime per la M2, fino a circa 2-3 cm, si trovano nella parte orientale, occidentale e nordoccidentale del Mar Nero. Va notato che, secondo Medvedev [40], la componente S1, che è piccola nel Mar Mediterraneo, e non è stata inclusa nel nostro modello, ha un effetto non trascurabile nella dinamica delle maree del Mar Nero. Questo può essere un punto da considerare nel futuro sviluppo del sistema numerico.

L'ampiezza per la componente M2 per il sistema Stretto dei Dardanelli-Mar di Marmara è mostrata in Figura 4 (pannello superiore). Come riportato in [39], le maree all'interno del Mar di Marmara hanno una forte componente remota; la mappa in alto nella figura mostra che l'onda di marea M2 che si propaga dal Mar Egeo è fortemente smorzata nello Stretto dei Dardanelli, con ampiezze che diminuiscono fino a circa 1 cm all'interno del Mar di Marmara. Questo è in ottimo accordo con i risultati di Ferrarin et al [39], utilizzato come riferimento, poichè le ampiezze di OTIS, probabilmente a causa di una risoluzione insufficiente dei dati in questa piccola regione, e/o di una rappresentazione non corretta della batimetria nello Stretto dei Dardanelli, non sono affidabili. Ciò evidenzia l'importanza di avere una buona risoluzione spaziale e una buona rappresentazione della batimetria all'interno dello Stretto. L'assottigliamento della griglia che abbiamo eseguito, anche se non così sofisticato come quello di Ferrarin et al. [39], che si basa su una discretizzazione agli elementi finiti, è comunque sufficiente per riprodurre correttamente la dinamica locale delle maree. Non mostriamo le mappe di ampiezza K1, che hanno poca struttura, con valori intorno ai 2 cm nel Mar Egeo che si riducono a circa 1 cm dopo la propagazione attraverso lo stretto dei Dardanelli. La dinamica che abbiamo appena illustrato spiega perché l'effetto remoto è molto piccolo all'interno del Mar Nero, dove le oscillazioni di marea sono per lo più generate localmente.

Una rappresentazione sintetica della distribuzione spaziale delle componenti mareali dominanti sul bacino si ottiene tracciando il “form factor” $F = (K1 + O1)/(M2 + S2)$ (vedi [43]). Sul dominio questo è più piccolo (più grande) quando le componenti semi-diurne (diurne) dominano. La mappa del form factor risultante dal modello (pannello inferiore in Figura 4) è in buon accordo con quella calcolata da Ferrarin et al [39]. Le maree semi-diurne dominano nello Stretto di Gibilterra, nel Golfo di Gabes e nella parte nord-occidentale del Mar Nero, mentre le componenti diurne sono dominanti nel Mare Adriatico settentrionale e ad ovest delle Baleari.

Infine, riportiamo i risultati dei confronti con i dati mareografici, sia storici che in tempo reale, acquisiti nel periodo della simulazione numerica.

Nella Tabella 1 si confrontano i valori simulati delle ampiezze e delle fasi per le componenti M2, S2, O1 e K1 con i valori osservati di riferimento [38] di 63 mareografi distribuiti nel Mediterraneo. Per ogni componente armonica, il numero nella quinta colonna è la differenza vettoriale d , calcolata come distanza nel piano complesso (vedi, per esempio, [44]). Il confronto è generalmente buono, tranne che nell'area del Golfo di Gabes e in parte dell'Adriatico settentrionale. Le deviazioni quadrate medie delle differenze vettoriali sono di 1,6, 1,5, 0,7 e 0,5 cm per la componente M2, S2, K1 e O1, rispettivamente, che sono paragonabili ai valori ottenuti per un confronto simile da Ferrarin et al [39], che ha considerato un dataset sperimentale leggermente più vasto. La d relativamente grande ottenuta nell'area del Golfo di Gabes può essere dovuta ad imprecisioni nella rappresentazione della batimetria nella parte sud del Golfo.

Riportiamo infine un confronto con dati osservati. Serie temporali locali, che coprono il periodo di simulazione, sono state confrontate con le corrispondenti serie dell'altezza della superficie estratte dai mareografi disponibili attraverso il portale Copernicus, le cui posizioni (54 stazioni) sono mostrate in Figura 5 (pannello a). Il pannello b mostra un diagramma ad istogrammi del coefficiente di correlazione (R) tra le due serie temporali, calcolato in ogni sito (i valori di elevazione sono estratti dalla simulazione nel punto della griglia più vicino al mareografo, con un intervallo di tempo di 1 h). I valori di R sono elevati in quasi tutte le stazioni; $R > 0,8$ per 31 dei 54 mareografi. Nei pannelli inferiori della figura, mostriamo la serie sperimentale (rossa) e quella del modello (nera) in quattro stazioni, rappresentative di diverse regioni del dominio computazionale. Vi è un buon accordo tra le serie temporali numeriche e quelle sperimentali; le discrepanze maggiori sono di solito concentrate nei primi giorni della simulazione, in cui avviene l'adeguamento alle condizioni iniziali. Le differenze derivano anche dal fatto che, a causa della spaziatura orizzontale del modello di 2 km, i valori numerici sono talvolta calcolati in luoghi distanti da quelli, di solito molto vicini alla costa e poco profondi, in cui si trovano i misuratori di marea.

2.3 Validazione della circolazione superficiale, della SST e dell'idrologia

In questa sezione analizziamo i risultati di una simulazione dedicata effettuata con MITO, che copre il periodo 19 Marzo-30 Aprile 2018, è forzata come nel sistema operativo, e utilizza per l'inizializzazione e le condizioni al contorno al bordo aperto i campi delle rianalisi a $1/16^\circ$ disponibili sul portale Copernicus.

2.3.1 Circolazione superficiale

Abbiamo innanzitutto confrontato la circolazione dello strato superficiale prodotta dal modello su tutto il dominio con dati provenienti da osservazioni remote. Tra questi, abbiamo considerato mappe di Absolute Dynamic Topography (ADT; mappe in tempo quasi-reale, con una risoluzione orizzontale nominale di $1/8^\circ$, o circa 14 km), che rappresenta la stima dell'altezza del livello del mare da dati altimetrici satellitari, e della corrispondente circolazione geostrofica. Dopo un mese di simulazione, la circolazione riprodotta dal modello risulta in buon accordo con la quella derivata dai dati satellitari, nonostante non sia stata effettuata alcuna assimilazione o rilassamento. Il modello riproduce correttamente tutte le correnti e i vortici principali, e anche molte strutture di circolazione a più piccola scala. Un esempio è fornito nella Figura 6, che si concentra sul bacino Ligure-Provenzale, uno dei bacini fondamentali per la circolazione termalina del Mediterraneo, per il verificarsi di convezione profonda durante la stagione invernale. Il pannello in basso a sinistra mostra la circolazione media del 19 aprile, a 50 m di profondità, con risoluzione

degradata di un fattore 4, mentre a destra viene visualizzata la ADT media per lo stesso giorno, con sovrapposta la corrispondente ricostruzione geostrofica della circolazione.

Si può notare l'ampia circolazione ciclonica che occupa quasi tutta l'area, con una forma simile nelle due mappe, ma con più dettagli nella simulazione, anche dovuti all'instabilità della corrente che scorre lungo la costa (vedi, ad esempio, l'area del Mar Ligure, e lo zoom nel pannello superiore). La maggior parte delle strutture a larga scala può essere riconosciuta in entrambe le mappe. A sud di 41°N il modello colloca una serie di vortici, che sono presenti anche nella mappa di ADT, quasi nelle stesse posizioni. Appena a nord di questa catena, in un'area tra 4°E e 6°E, la mappa ADT mostra una coppia anticiclone-ciclone, mentre il modello mostra una struttura più complessa, con due poli anticiclonici e due ciclonici. Osservando lo zoom (pannello superiore) si nota come il modello abbia sviluppato dinamiche di circolazione a più piccola scala che non possono essere risolte dalle mappe altimetriche.

Una differenza importante tra le mappe del modello e dell'ADT è nella zona appena a ovest della Sardegna, dove la prima colloca un ampio anticiclone, mentre la seconda mostra un flusso debole, non chiaramente modellato. Va notato, tuttavia, che questa è una delle due regioni del Mediterraneo occidentale in cui l'errore altimetrico è maggiore (l'altra è lungo la costa nord africana, dove scorre la corrente algerina) e che un anticiclone simile a quello simulato è presente come robusta caratteristica dinamica negli schemi delle passate revisioni della circolazione nel Mediterraneo (ad esempio, la review di Millot, [45]).

Un'altra quantità misurata da satellite che può essere utile per la validazione di strutture di circolazione è il coefficiente di attenuazione della luce a 490 nm (K490). Nella Figura 7, relativa al Mar Adriatico, un'altra regione di formazione di acque profonde, confrontiamo la circolazione media del 19 aprile, a 10 m di profondità (pannello centrale), con una mappa satellitare di K490 (1 km di risoluzione; pannello a destra) per lo stesso giorno, che è uno dei pochi nel periodo della simulazione in cui l'area è quasi totalmente priva di nuvole. L'attenuazione è un indicatore della torbidità dell'acqua, che è determinata dalla concentrazione di materia in sospensione, derivante dagli effetti della produzione di plancton primario e dagli input costieri. Questi ultimi sono importanti nel Mare Adriatico, caratterizzato da un intenso deflusso fluviale, in particolare sul versante italiano, in corrispondenza della foce del Po, a circa 45° N. La firma del Po è evidente nella mappa di K490, come un pennacchio costiero allungato, caratterizzato dai valori massimi di attenuazione. La mappa di K490 mostra anche la tipica struttura di circolazione nella parte centrale e meridionale del bacino (vedi, ad esempio, Artegiani et al. [46]), caratterizzata da due ampie celle cicloniche, riprodotte chiaramente dal modello. Questa circolazione su larga scala è in ottimo accordo con la circolazione geostrofica del 19 aprile stimata dai dati altimetrici (pannello di sinistra nella figura), fornendo un'ulteriore evidenza dell'assenza di significativi errori dopo un mese di simulazione. Nella regione meridionale, un flusso di acqua meno torbida entra dallo Stretto di Otranto, scorre attorno al ciclone meridionale (Gyre dell'Adriatico meridionale), e si intrude lungo la costa orientale, come riprodotto dal modello. Lungo questo confine, ci sono diversi luoghi in cui l'acqua meno torbida viene trasportata verso la parte interna del Gyre, seguendo percorsi curvi che sembrano corrispondere ai confini delle piccole strutture presenti nell'output del modello (A, B, C e D nella Figura 7). L'area segnata dalla lettera E corrisponde al confine meridionale della seconda cella ciclonica e contiene acqua più torbida trasportata dal ricircolo costiero.

2.3.2 Temperatura superficiale

Il pannello in alto nella Figura 8 mostra l'evoluzione della temperatura superficiale (Sea Surface Temperature; SST), mediata sull'intero Mediterraneo (Med), sul Mediterraneo Occidentale (Wmed), e sul Mediterraneo Orientale. Le curve nere corrispondono ai risultati della simulazione, mentre quelle rosse sono ottenute da dati satellitari (SST_MED_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_004, interpolati a 1/16°, disponibili attraverso il portale Copernicus). La SST del modello è in buon accordo con le osservazioni (le differenze sono più piccole di 0.5 °C durante l'intera simulazione) e cattura il riscaldamento significativo del bacino che avviene in questo periodo di transizione inverno-primavera.

Gli altri pannelli della figura mostrano che anche la distribuzione spaziale della SST è in buon accordo con i dati da satellite. Il 19 Aprile, a un mese dall'inizio della simulazione, la differenza tra la SST satellitare

(pannello centrale) e modello, riportata nel pannello in basso, è minore di 1 °C nella maggior parte del bacino ed è confrontabile con il bias nella condizione iniziale (non mostrato). In alcune piccole regioni la differenza è più grande, in particolare, nella parte sud-est del Tirreno e nella parte nord dell'Adriatico, dove il modello è più "freddo" delle osservazioni, e nella parte centrale del Mar Egeo, in cui il modello tende ad essere più "caldo". Riguardo all'Adriatico, notiamo che il bias più alto si concentra nella regione del Delta del Po, suggerendo che l'uso di valori climatologici dell'apporto fluviale non sia sufficiente a descrivere correttamente i dettagli della dinamica locale.

2.3.3 Profili verticali di temperatura e salinità

Per valutare la capacità del modello di simulare in modo corretto l'evoluzione della struttura idrologica del bacino abbiamo confrontato i risultati della simulazione con profili di temperatura e salinità misurati in situ da profilatori (INSITU_MED_NRT_OBSERVATIONS_013_035, disponibili attraverso il portale Copernicus). Anche se i dati disponibili sono limitati – da un minimo di 7 a un massimo di 13 profili al giorno nel periodo della simulazione – e non uniformemente distribuiti, il confronto, riportato nelle Tabelle 2 e 3, è incoraggiante. Le tabelle mostrano, per ogni giorno, la media del valore assoluto del bias rispetto alle osservazioni disponibili, e la rms corrispondente, alle profondità di 10, 50, 100, 300, 600 m, che coprono lo strato superficiale (AW) e quello intermedio (LIW). I bias sono calcolati come differenze tra il valore osservato e quello del modello, mediato in un box in cui cade il punto sperimentale. Le differenze, che sono in parte dovute all'inizializzazione, sono in generale piuttosto piccole (pochi decimi di grado per la temperatura e pochi decimi di psu per la salinità), con valori massimi nello strato superficiale e valori molto più piccoli negli strati più profondi. I bias non aumentano durante la simulazione, indicando che il modello non ha "drift" significativi, in linea con quanto osservato per la SST. Il fatto che il bias sia più alto nello strato superficiale può essere dovuto a locali inaccurately dei flussi atmosferici e/o della circolazione superficiale del modello.

2.4 Effetti delle maree sul trasporto e sulla circolazione in alcune regioni d'interesse

Passiamo ora ad analizzare gli effetti delle maree sul trasporto e sulla struttura della circolazione in alcune regioni del nostro dominio. La Figura 9 mostra le serie temporali (Aprile 2019) dei trasporti attraverso i canali e stretti principali. Le sezioni su cui sono calcolati i trasporti sono zonali (trasporto positivo in direzione nord) o meridionali (trasporto positivo in direzione est), e sono locate a: 5.4° per il SoG; 37.° N per il Canale di Sicilia; 43.° N per il Canale di Corsica; 40.1° per lo stretto di Otranto; 26.2° E per lo Stretto dei Dardanelli; e 41.° N per lo Stretto del Bosforo.

I trasporti netti medi (linee rosse) sono piccoli (pochi centesimi di Sv) negli stretti turchi e nello Stretto di Otranto, e vicini a quelli stimati da Ferrarin et al. [39] e da Yari et al. [47], rispettivamente. Il trasporto netto nel Canale di Corsica è verso nord, ed ha un valore tipico per il periodo di transizione inverno-primavera (vedi, ad esempio, Astraldi et al., [48]), mentre il trasporto netto attraverso SoG è quasi nullo. Il trasporto netto medio nel Canale di Sicilia ha un valore positivo di circa 0.4 Sv, che deriva da una parziale compensazione tra il trasporto verso nord di acqua Levantina intermedia (Levantine Intermediate Water, LIW; 200–400 m) e quello di AW nella direzione opposta. Quest'ultimo è di circa +0.8 Sv, che è vicino a valori tipici (Astraldi et al. [48]), mentre il trasporto di AW, - 0.4 Sv, è più debole rispetto ai valori tipici stimati dalle misure e da simulazioni numeriche, che è dell'ordine di circa -1 Sv. Questa discrepanza può essere dovuta al fatto che la sezione tra Capo Bon e la costa siciliana è caratterizzata da una dinamica complessa nel periodo della simulazione, che include lo sviluppo di instabilità della corrente di AW che possono influenzare localmente in modo significativo il calcolo del trasporto superficiale (vedi Figura 12).

La marea induce ovunque una chiara modulazione del trasporto, che è molto forte, con variazioni fino ad alcuni Sv, nel SoG e nel Canale di Sicilia, come ci si poteva attendere. D'altra parte, le robuste modulazioni presenti nel Canale di Corsica e nello Stretto di Otranto non sembrano essere state riportate in precedenza. A Corsica, nella parte finale della simulazione, in cui la variabilità del trasporto è principalmente determinata dalla marea, l'ampiezza della modulazione è circa la metà di quella del segnale. Anche se ci

concentreremo in seguito sugli effetti delle singole componenti di marea, possiamo notare che le componenti M2 e K1 sono chiaramente presenti in tutte le serie, eccetto in quelle del SoG e del Bosforo, in cui la M2 è dominante.

2.4.1 Canale di Sicilia

Il Canale di Sicilia ha un ruolo cruciale nella circolazione del Mediterraneo, poiché controlla lo scambio di AW e LIW tra i due principali sotto-bacini (Occidentale e Levantino). E' noto che in questa regione la marea influenza in modo significativo la dinamica; qui di seguito confrontiamo i risultati della nostra simulazione con le osservazioni disponibili, e, in particolare, con quelle discusse in Gasparini et al. [49], che rappresenta a tutt'oggi l'analisi sperimentale più dettagliata della dinamica di marea nella regione.

La Figura 10 mostra le serie temporali dell'energia cinetica media (MKE), mediata sulle cinque regioni rettangolari delimitate da contorni in rosso indicate nel pannello centrale, e sui primi 100 m della colonna d'acqua. Le cinque regioni sono state selezionate in modo da avere informazioni dettagliate sulla parte nord del canale, la regione nella quale avvengono gli scambi tra il bacino occidentale e quello orientale. Il pannello centrale mostra anche la batimetria della regione, che include nella parte orientale una vasta area con profondità medie inferiori a 100 m, il cosiddetto Banco Avventura, che arriva fino alla punta nordoccidentale della Sicilia. Il lavoro di Artale et al [50] riporta l'esistenza in questa regione di complesse dinamiche influenzate dalla marea.

La figura mostra che la modulazione della MKE dovuta alla marea è debole nelle due regioni a nord, che sono quelle attraversate dalla corrente principale di AW proveniente dal bacino algerino, parte della quale entra poi nel Tirreno. La modulazione è invece molto forte nelle altre tre regioni: quella di sud-ovest, adiacente Capo Bon, che è attraversata da un ramo di AW che forma la cosiddetta corrente tunisina atlantica (ATC, vedi il primo pannello di Figura 12); la regione del Banco Avventura; e, infine, la regione a sud del banco, che include l'isola di Pantelleria. Più a sud gli effetti della marea (non mostrato) sono generalmente più deboli, in accordo con quanto noto (vedi, ad esempio, [49] e [6]), tranne che su un altro banco, il Plateau di Malta, tra Malta e la Sicilia.

Dalle serie di MKE si evince la presenza, durante il periodo della simulazione, di modi di variabilità indotti da altre forzanti. Le variazioni di MKE nella zona del Banco Avventura sono però dominate dalla forzante di marea, in accordo qualitativo con i risultati di Grancini e Michelato [5], che stimavano che il contributo delle correnti di marea alla "eddy kinetic energy" (EKE) nella regione arrivasse a circa il 70%. In accordo con Gasparini et al. [49] vediamo che la variabilità della MKE legata alla marea resta alta a ovest del Banco (pannello a sinistra), e troviamo un contributo significativo anche nella regione attorno Pantelleria (pannello in basso).

Il peso relativo delle componenti di marea diurne e semidiurne (K1, O1; M2, S2) è quantificato nella Figura 11, che mostra gli spettri di potenza della MKE nelle cinque regioni selezionate in Figura 10 (le linee rosse indicano il livello di significatività del 95%). I picchi corrispondenti alle quattro componenti principali sono evidenziati nello spettro per il Banco Avventura; i valori esatti delle relative frequenze sono dati nella Tabella 3 di Gasparini et al. [49].

I picchi dovuti alla marea sono piuttosto deboli nelle due regioni più a nord, come atteso; nell'area a nord del Banco hanno ampiezze confrontabili con quella delle oscillazioni inerziali, che hanno un periodo di circa 20 ore nella regione. I contributi della marea sono invece dominanti negli altri spettri, con il picco della M2 più forte nella zona dell'ATC, e una prevalenza della K1 nelle altre due regioni, probabilmente dovuta al fatto che il punto anfidromico della M2 è più vicino al Banco Avventura rispetto a quello della K1 (vedi Figura 3). Il ruolo dominante della K1 nella regione del Banco era stato già indicato in [49] e nel più recente lavoro numerico di Abdennadher e Boukthir [51]. Non è invece presente nella ricostruzione delle correnti di marea in Gasparini et al. [49], probabilmente a causa delle poche osservazioni disponibili nella regione del Banco. In Artale et al [50] l'oscillazione diurna in questa regione era stata attribuita alla presenza di un'onda topografica intrappolata, di tipo baroclino, di cui non era stato possibile determinare l'esatta natura. Il fatto che la componente M2 sul Banco sia più forte di quella nella regione di Pantelleria è consistente con i

risultati del recente lavoro di Poulain et al [6], in cui la dinamica di marea dovuta alla M2 nel Mediterraneo è studiata attraverso l'analisi di un vasto dataset di osservazioni da drifters.

Nella Figura 11, in quattro delle cinque regioni, degli ovali in rosso evidenziano picchi spettrali, con periodi di circa 6 e 8 ore, la cui ampiezza è ben oltre la soglia di significatività. Poiché non vi sono altre forzanti che agiscono esplicitamente su queste scale temporali, dobbiamo concludere che questi picchi rappresentano armoniche delle componenti diurne e semidiurne, generate attraverso interazioni non lineari. Interazioni di questo tipo avvengono in molte regioni costiere poco profonde dell'oceano globale, e possono produrre onde che si propagano su lunghe distanze (vedi, per esempio, [52]). Queste ultime possono essere "overtides", cioè armoniche a più alta frequenza di una singola componente di marea, o "compound tides", che risultano dalla sovrapposizione di diverse componenti di marea. Le interazioni non lineari che producono queste componenti sono state studiate, ad esempio, nel Canale della Manica, come illustrato nella review di Anderson et al [53], in cui è anche sottolineata l'importanza del lavoro pionieristico di Le Provost in questo campo. I periodi che osserviamo indicano la presenza di overtides di tipo M4 (periodo di 6 ore) e di compound tides di tipo MK3 ($K1+M2$; periodo di 8 ore). Questo è un risultato importante, poiché mostra che nel Canale di Sicilia non è possibile descrivere correttamente gli effetti delle maree sovrapponendo semplicemente un appropriato segnale ai risultati di una simulazione che non includa la forzante di marea.

Abbiamo anche calcolato lo spettro di MKE per la LIW (non mostrato), in un box che include le selle dei due stretti passaggi, nella parte nord del canale, attraverso i quali la LIW entra nel Tirreno. La componente M2 risulta essere dominante in questa regione, in accordo con i risultati di [49].

Passiamo ora ad analizzare gli effetti della marea sulla circolazione superficiale nel canale, che ha una struttura complessa, ed è soggetta a una notevole variabilità nel periodo coperto dalla simulazione, indotta dalle forzanti atmosferiche. Nella parte iniziale e in quella finale la struttura del campo di velocità è però simile al tipico pattern inverno-primavera descritto in letteratura (vedi, ad esempio, Jebri et al. [54], e le referenze ivi incluse), e al pattern medio sul periodo della simulazione, che è riportato nel pannello in alto a sinistra della Figura 12 (i colori indicano l'intensità della corrente). Le velocità più alte sono nella parte nord, nella corrente principale di AW, che proviene dal Canale di Sardegna e procede verso il Tirreno. La corrente si biforca ai due lati del Canale di Sicilia, producendo due rami che si dirigono verso sud-est: la ATC sul lato ovest, e un'altra corrente lungo la costa siciliana, di solito indicata come Atlantic Ionian Stream (AIS; vedi, per esempio, Robinson et al [55]). Entrambi i rami formano ampi meandri, in cui sono innestati vortici ciclonici e anticiclonici.

Sotto il pannello con la corrente media sono mostrate le ellissi di marea per la componente K1 (dominante), in cinque punti sul Banco Avventura indicati nella mappa di circolazione. Le piccole eccentricità delle ellissi indicano la presenza di una forte componente di rotazione nella regione del Banco. Ciò è ulteriormente illustrato nella parte destra della figura, in cui è mostrata l'evoluzione della circolazione nella regione indicata da un box rosso nel pannello con la circolazione media, durante il 25 Marzo 2018, a intervalli di sei ore. La variabilità infra-giornaliera si manifesta in una variazione semidiurna dell'intensità della ATC sul lato ovest del Canale e in una drammatica rotazione della corrente in senso orario nella regione del Banco, che avviene su scala giornaliera. Queste variazioni della struttura della circolazione possono avere una forte influenza sulle proprietà locali del trasporto.

Una descrizione più quantitativa della rotazione è data in Figura 13, dove sono riportati stick diagrams orari della corrente media sull'area del Banco, alle profondità di 10 m, 48 m, e 84 m, per il mese di Aprile. La figura mostra che, oltre alla componente diurna, è presente anche una più piccola componente semidiurna; la rotazione in senso orario avviene lungo tutta la colonna d'acqua, in accordo con le osservazioni riportate in Artale et al [50], con velocità che si riducono leggermente andando verso il fondo.

Troviamo una simile rotazione oraria, prevalentemente diurna, associata con velocità più piccole, nell'area del Plateau di Malta, a est dell'Isola di Malta. La prevalenza della componente diurna in quest'area è stata recentemente sottolineata in un lavoro di Cosoli et al [56], in cui sono stati usati SeaSonde radars ad alta frequenza per caratterizzare le correnti locali di marea.

2.4.2 Canale di Corsica

Nella sua parte nord, il Tirreno comunica con il bacino Liguro-Provenzale attraverso il Canale di Corsica, uno stretto passaggio tra la parte nord della Corsica (la penisola di Cap Corse) e l'Isola d'Elba, vicino la costa italiana, largo circa 35 km e profondo 450 m. La corrente nel canale è prevalentemente in direzione nord, più forte in inverno, ed è composta da AW e LIW.

La dinamica indotta dalle maree in questa zona non è ben nota; alcune osservazioni sono riportate in un lavoro di Albérola et al. [57], che analizza l'intero bacino occidentale. Dall'analisi di dati di corrente, principalmente dal mooring che è locato appena a nord della sella del canale (vedi Astraldi et al [48]), attivo fin dal 1985, si conclude in quel lavoro che le correnti di maree sono piccole, dell'ordine di 1-2 cm/s, e che la K1 e la M2 sono le principali componenti di marea, con quest'ultima più forte nello strato superficiale. Nella nostra simulazione abbiamo una chiara modulazione della MKE superficiale media nell'area (box 42.8–43.2° N, 9.5–10.1° E; primi 100 m; non mostrata) dovuta alla marea; lo spettro corrispondente, nel pannello a sinistra in Figura 14, è dominato dai picchi della M2 e della K1, con quest'ultimo leggermente più forte, in contrasto con quanto indicato in [57]. Come nel Canale di Sicilia, sono presenti picchi significativi con periodi di 8 e 6 ore, che indicano il verificarsi di interazioni non lineari. Gli effetti della marea sono però importanti solo nella zona del canale. Nello spettro della MKE nella zona (40–42° N, 10–12° E; vedi pannello destro di Figura 14), a sud del canale, in cui è presente il dipolo di Bonifacio, i picchi di marea sono deboli, e prevalgono le frequenze inerziali.

In Figura 15 sono mostrate mappe della circolazione media e della batimetria nella zona del canale, insieme alle ellissi di marea in quattro punti attorno alla piccola isola di Capraia, indicati nella mappa batimetrica. Le ellissi sono poco elongate, specialmente nei punti a est dell'isola, in una zona costiera poco profonda, indicando la presenza di rotazione (in senso orario, poiché gli assi minori delle ellissi sono negativi). Guardando a singoli giorni abbiamo in effetti rilevato la presenza nell'area di un pattern di circolazione che ruota in senso orario, e trovato che un pattern simile è presente più a sud, tra le isole di Elba e Pianosa. Questi pattern, analoghi a quello presente sul Banco Avventura, non risultano essere stati descritti in precedenza, ma in un recentissimo lavoro di Poulain et al [58], in cui si analizza la circolazione nella parte sud-est del Mar Ligure nell'estate 2010, si nota che le traiettorie di drifters rilasciati nell'area, e intrappolati in una circolazione anticiclonica attorno Capraia (il Ligurian Anticyclone descritto in Ciuffardi et al [59]), includono componenti di alta frequenza, tra cui una rotazione di marea in senso orario. Quindi, le maree sembrano influenzare un'area abbastanza estesa sul lato est del canale, e indurre una dinamica decisamente più complessa di quella descritta in [57], in cui si concludeva che le correnti di marea nel Canale di Corsica sono prevalentemente verso sud.

2.4.3 Stretto di Otranto

Lo Stretto di Otranto è un passaggio piuttosto ampio (circa 75 km) e abbastanza profondo (800 m) che mette in comunicazione l'Adriatico e lo Ionio. La circolazione superficiale è tipicamente costituita da una corrente che entra nell'Adriatico sul lato est del canale e da un ramo di ritorno che ne esce dal lato ovest (vedi [47], e le referenze ivi citate). Durante il periodo simulato il pattern è un po' diverso, poiché la corrente che entra nell'Adriatico è in una posizione più centrale; come mostra la Figura 7, ciò è in accordo con le osservazioni satellitari di K490.

Gli elementi principali della dinamica di marea sono illustrati nella Figura 16, che mostra gli spettri di potenza della MKE nelle tre regioni indicate nella mappa della batimetria (pannello in alto). In accordo con Ursella et al. [60], l'energia è maggiore sul lato ovest, che ospita la corrente di ritorno diretta verso sud, e le componenti principali di marea sono la M2 e la K1, quest'ultima più forte su entrambi i lati dello stretto. Una forte componente inerziale è presente nella regione centrale e ancor più a sud di quest'area (non mostrato). Sul lato ovest l'oscillazione diurna si manifesta come una modulazione dell'intensità della corrente verso sud, mentre sul lato est (vedi Figura 17) si evidenzia un pattern di circolazione più complesso, con una rotazione in senso orario, simile a quelli presenti nell'area del Banco Avventura e nella parte est del Canale di Corsica.

2.4.4 Stretto di Messina

Le maree hanno effetti importanti nello Stretto di Messina, lo stretto passaggio che separa la Sicilia dall'Italia continentale. Questa è una regione di dimensioni molto ridotte in cui il modello potrebbe mostrare dei limiti, poiché la risoluzione orizzontale di circa 2 km non è sufficiente a risolvere tutti i dettagli batimetrici. Cionondimeno gli aspetti principali della circolazione simulati nell'area dello stretto e nelle sue vicinanze appaiono realistici. Per esempio, le mappe in alto a sinistra nella Figura 18, mostrano un forte aumento dell'ampiezza e della fase (di circa 180°) della M2 in direzione sud-nord lungo il canale che è in accordo con le osservazioni e con i risultati di investigazioni numeriche della dinamica locale di marea effettuate con modelli barotropici (Androsov et al [61], e un lavoro più recente di Quattrocchi et al [62], dove è stato implementato un modello ad elementi finiti dello stretto, ad altissima risoluzione).

Nella mappa di circolazione superficiale in alto a destra in Figura 18 (media del 7 Aprile, a 10 m, non a risoluzione piena) si nota la presenza nello stretto di una forte corrente verso sud, che poi segue la costa est della Sicilia per circa 100 km. Questa corrente, che è sempre presente, sia pure con una certa variabilità, nel corso della simulazione, è stata descritta nel lavoro di Bohm et al [63], basato su osservazioni in situ e sulle prime immagini termiche dell'area da satellite, che rivelano la presenza di una striscia fredda lungo la costa siciliana, con origine nell'angolo sud-est del Tirreno. Bohm et al [63] notano anche che la corrente può diventare instabile, generando meandri e vortici; come questo possa influire sulla dinamica nella parte nord-ovest dello Ionio è una questione interessante che non è stata ancora affrontata.

Il pannello in basso a sinistra di Figura 18 mostra la serie temporale del modulo della velocità mediata in una piccola area indicata da un asterisco giallo nella mappa di circolazione; la velocità media durante il periodo della simulazione è superiore a 1 m/s, e la velocità istantanea spesso supera i 2 m/s. Questi valori non sono lontani da quelli osservati (vedi, per esempio, Coiro et al [64]).

L'ultimo pannello della figura mostra lo spettro della MKE media nello stretto; come atteso, il picco più forte è quello della M2, ma le ampiezze di quelli della K1 e delle armoniche non lineari a 8 e 6 non sono molto inferiori. La presenza di forti armoniche non lineari era stata già evidenziata in [61] e [62]; i risultati di questi lavori indicano che nella parte centrale dello stretto, vicino Punta Pezzo, l'ampiezza di queste armoniche può addirittura eccedere quella della M2.

2.4.5 Nord Adriatico

L'unico sotto-bacino del Mediterraneo in cui le maree hanno un effetto globale sulla dinamica è il Mar Adriatico, dove è presente una forte componente remota di marea, dovuta all'oscillazione del livello del mare all'apertura meridionale del bacino (Canale di Otranto). Facciamo riferimento a un lavoro di Poulain [65] per un sommario delle conoscenze di base sulla dinamica di marea del bacino, e per una lista delle referenze rilevanti. In quel lavoro, informazioni sulle correnti di marea nell'Adriatico del sud erano estratte da un ampio database di traiettorie di drifters ARGO, relativo al periodo 1990-2006.

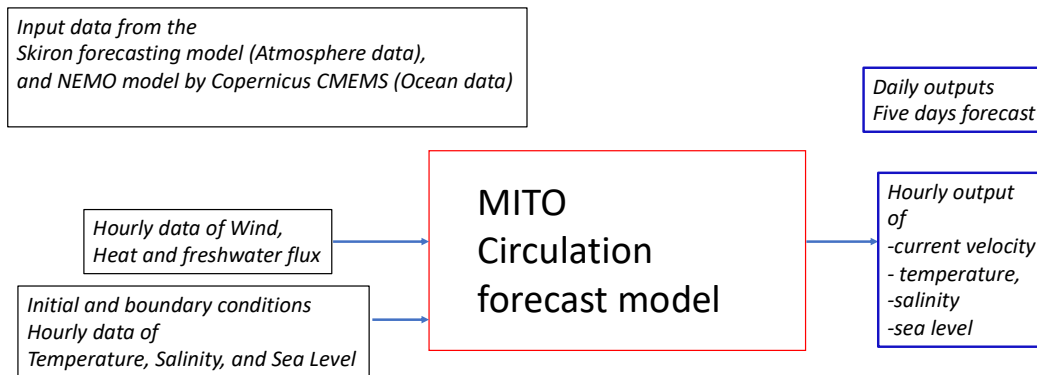
Qui ci concentriamo sulla parte nord del bacino, dove gli effetti di marea sono più forti, ma dobbiamo sottolineare che in questa regione i risultati della simulazione devono essere considerati con cautela, poiché è noto che vi sono altre componenti di marea (P1, N2, e K2), non incluse nel nostro modello, che, benché meno forti della K1 e della M2, non sono trascurabili.

Lo spettro di potenza della MKE (media a nord di 44.5° N) estratto dalla simulazione (vedi Figura 19) mostra forti picchi in corrispondenza delle quattro componenti incluse nel modello. Questo è in accordo con le osservazioni, ma il picco della O1 appare decisamente troppo forte; Malačić et al. [66] e Janeković and Kuzmić [67] indicano che tipicamente l'ampiezza di questo picco dovrebbe essere circa un terzo di quella della K1. Ciò può essere in parte dovuto al fatto che il modello non include la componente P1, ma anche a dinamiche transienti indotte dalle altre forzanti. I picchi non lineari con periodo di 6 e 8 ore sono anch'essi forti; la presenza di queste componenti nella regione è nota da tempo (vedi, ad esempio, [66]). Inoltre, sono anche presenti picchi nel range inerziale e a frequenze sub-mareali, probabilmente dovuti alle complesse forzanti che agiscono in questa zona.

Un esempio della dinamica associata al forcing di marea è fornito dalla Figura 20, che mostra sei mappe della circolazione a 10 m, per il 29 Marzo 2018: una mappa media giornaliera, e cinque mappe istantanee, a intervalli di 6 ore. I pattern di circolazione riflettono la complessa dinamica associata alle componenti M2 e K1. I campi nelle due colonne della figura indicano la presenza di propagazione verso sud sul lato ovest (h00 e h12) e di propagazione verso nord sul lato est (h06 e h18), che è compatibile con la descrizione della componente M2 come sovrapposizione di due onde di Kelvin si propagano in direzioni opposte (vedi [66], e le referenze ivi citate). La circolazione a h18 è in buon accordo con la ricostruzione numerica di Malačić et al. [66] (vedi la loro Figura 7a), sia in termini di struttura che di intensità del campo di velocità, che può superare i 20 cm/s lungo la costa Croata e vicino il Delta del Po. Il fatto le correnti di marea sostanzialmente si invertano ogni 6 ore è consistente con la forte eccentricità delle ellissi di marea mostrata in [65].

2.5 La catena operativa MITO

Il modello che abbiamo descritto, e di cui abbiamo valutato le performances, è stato inserito in una catena operativa che fornisce giornalmente previsioni orarie a 5 giorni della circolazione marina del Mediterraneo e del mar Nero. Il sistema, denominato MITO, è costituito da un complesso set di codici, implementato su computers dell'ENEA nell'ambito delle sue strutture HPC (High Performance Computing), il cui schema sintetico è mostrato di seguito.



Gli outputs di MITO sono dati orari di velocità (3D, tridimensionali), temperatura, salinità (3D) ed elevazione della superficie marina (2D, bidimensionali). I dati di input necessari per la realizzazione delle previsioni giornaliere sono dati atmosferici previsionali di SKIRON (modello atmosferico regionale) di NEMO e dati previsionali marini (modello oceanografico NEMO disponibile su CMEMS). Una volta alla settimana (il martedì) MITO realizza un "run" di inizializzazione che simula i 9 giorni precedenti. Ciò è possibile perché il modello NEMO fornisce anche le "analisi" (simulazioni con assimilazione dati) dei 12 giorni precedenti, mentre di SKIRON si usano le prime 24 h di ogni giorno dei 9 precedenti che rappresentano i dati di qualità migliore (*best skill*). Ogni giorno della settimana dunque la catena operativa realizza un "run" previsionale di 5 gg, tranne il martedì in cui viene effettuato anche il run di inizializzazione.

Va sottolineato che ogni giorno, tra tutti i file di input per i 5 giorni successivi, MITgcm legge come condizione iniziale il file di *restart*, che è stato creato dal run previsionale del giorno precedente. La sequenza completa delle simulazioni previsionali parte il martedì, quando viene realizzata l'inizializzazione, e prosegue fino al lunedì successivo. I giorni simulati per ogni settimana sono descritti in Tabella 4.

MITO pre-processa i seguenti dati giornalieri ed orari per il calcolo dei flussi di momento, calore e sale necessari alla realizzazione delle previsioni:

- Dati atmosferici 2D (modello SKIRON).

I dati del modello SKIRON sono prodotti dall’Università di Atene e consistono di forecasts atmosferici a 5 giorni (120 ore), sono disponibili in formato GRIB. I seguenti parametri vengono usati per la costruzione delle funzioni forzanti per il MITgcm:

- Pressione al suolo
- Copertura nuvolosa
- Componenti del vento UV a 10 metri
- Umidità specifica a 2 m
- Precipitazione
- Temperatura dell’aria a 2 m
- Radiazione ad onda corta

- Dati oceanografici 3D e 2D (modello NEMO). Condizioni al bordo

Le condizioni al bordo sono realizzate scegliendo una striscia di due punti sul bordo ovest del dominio computazionale del modello. In particolare, si usano i seguenti dati 2D e 3D di analisi e forecast di NEMO:

- Elevazione della superficie libera (2D)
- Salinità e temperatura (3D)

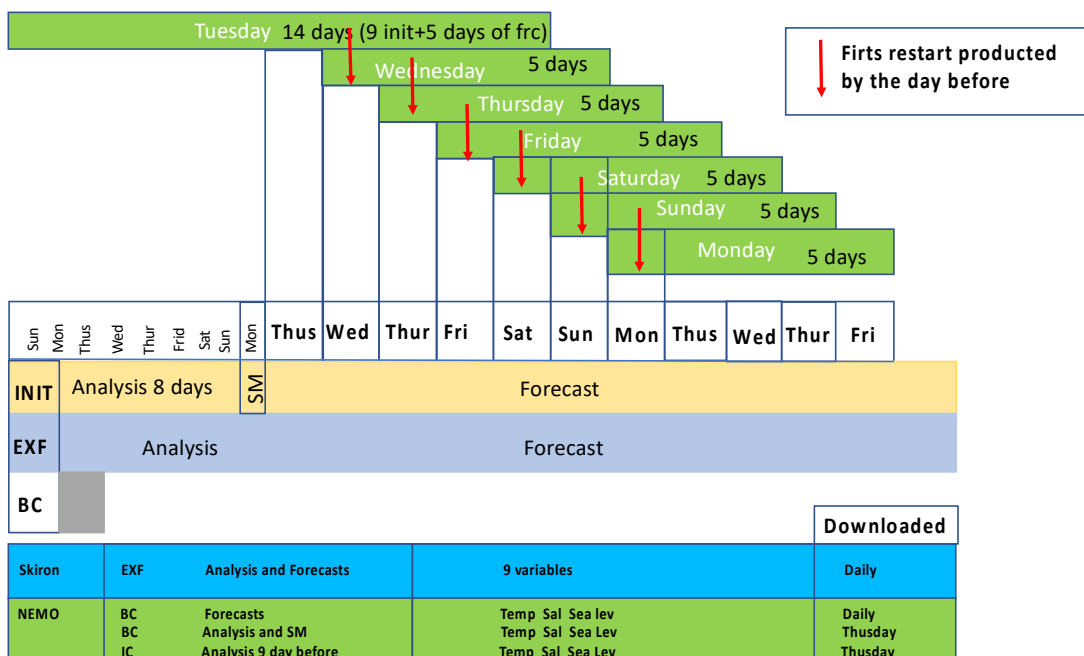
- Dati oceanografici 3D (modello NEMO). Inizializzazione

- Componenti della velocità U e V (3D)
- Temperatura e Salinità (3D)

MITO produce poi giornalmente i seguenti output orari a 5 giorni:

- Componenti della velocità UV (3D)
- Temperatura e salinità (3D)
- Elevazione della superficie (2D)

Il seguente schema rappresenta il ciclo completo della catena operativa:



Le fasi principali della catena operativa sono descritte nella Tabella 5. **G** e **C** indicano i computers sui quali sono eseguite le varie fasi della catena operativa. **G** (Giotto) è un server a memoria condivisa (SGI UV2000) con 512 processori, e **C** (Cresco) è un supercomputer con memoria distribuita con migliaia di processori. **G** e **C** fanno parte delle infrastrutture HPC dell'ENEA.

Va sottolineato che sul server **G** è presente un processo automatico (*cron*) che verifica innanzitutto che tutti i dati necessari sono stati scaricati dai server FTP dove sono disponibili gli outputs di SKIRON e NEMO. Segue la fase di pre-processamento, in cui si creano i dati di input per MITgcm. La procedura operativa si può riassumere nel modo seguente:

1. Su **G** vengono creati i file di input, in formato *netcdf*, che vengono copiati su **C**
2. Un meccanismo automatico (*cron*) su **C** controlla che ci siano tutti i file provenienti da **G**, essi vengono poi trasformati in file ad accesso diretto leggibili da MITgcm.
3. Viene effettuata la simulazione su **C**. Il martedì, giorno in cui viene eseguito il run più lungo, il modello usa 800 cpu mentre gli altri giorni usa 400 cpu.
4. Appena terminata l'esecuzione di MITgcm su **C**, i file di outputs sono prima trasformati in formato *netcdf* e poi trasferiti nell'archivio su **G**.

Nella tabella 6 sono riportati i tempi di calcolo per le singole fasi sui due server utilizzati.

I dati di output trasferiti su **G** sono i campi orari di velocità, temperatura e salinità (3D), e di elevazione della superficie del mare (2D) per l'intero dominio computazionale, per il primo giorno della simulazione. Questi campi andranno nel tempo a costituire un archivio ad alta risoluzione della circolazione del sistema Mediterraneo-Mar Nero, che sarà possibile utilizzare per studiare l'evoluzione della dinamica del bacino su scale temporali più lunghe.

Parte dei dati prodotti dalle simulazioni può essere anche visualizzata attraverso un'interfaccia web dedicata (<https://giotto.casaccia.enea.it/mito/>), in cui si può seguire l'evoluzione del singolo forecast giornaliero per diversi sottobacini del Mediterraneo. La Figura mostra mappe della circolazione e della temperatura a 25 m di profondità, per il 31 Agosto 2020 (snapshots a h00), tratti dal sito web. Si può notare la forte corrente di marea prodotta nello Stretto di Messina, che poi si dirige verso sud lungo la costa est della Sicilia e, nella mappa di temperatura, una corrispondente lingua più fredda che parte dal Tirreno. Il campo di temperatura mostra anche la formazione nella zona di un imponente treno di onde che si propaga verso sud-est.

Figura 1: Il dominio computazionale, che copre l'intero sistema Mar Mediterraneo-Mar Nero, e la corrispondente batimetria. Sono anche indicati i principali sottobacini e altri luoghi geografici d'interesse

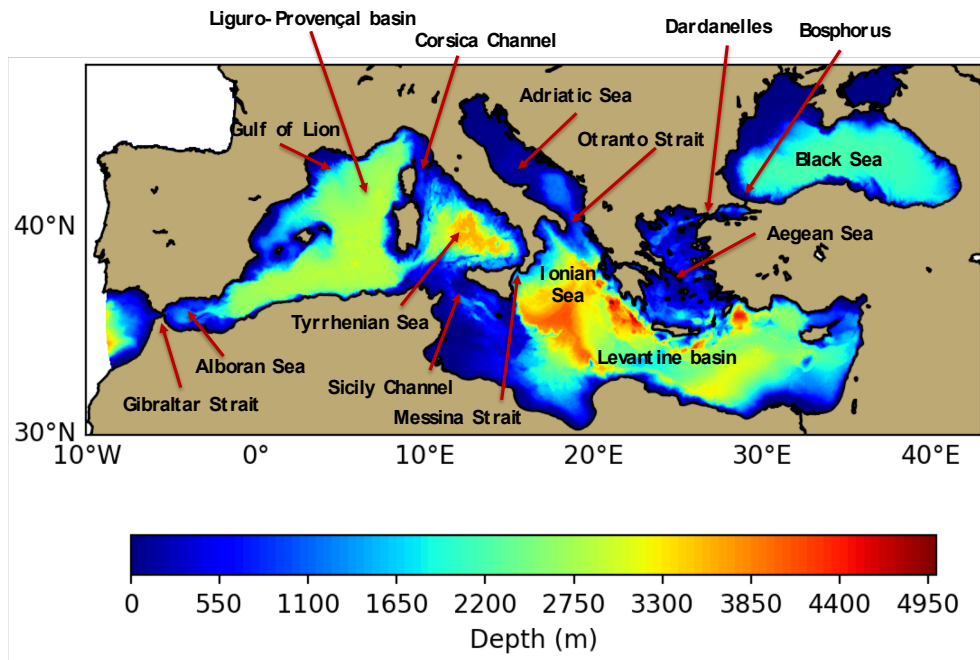


Figura 2: Le tre aree in cui il grigliato computazionale è stato infittito: lo Stretto di Gibilterra (risoluzione massima di circa 120 m) e gli Stretti dei Dardanelli e del Bosforo (risoluzione massima di circa 380 m), con le corrispondenti batimetrie

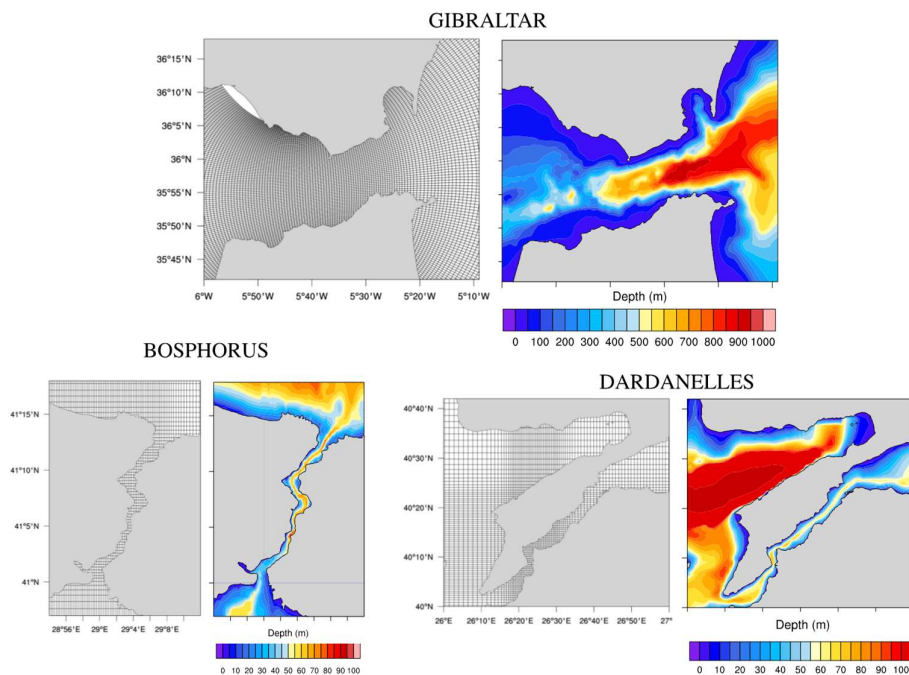


Figura 3: Distribuzione spaziale di ampiezza e fase delle principali costituenti di marea: semi-diurna (M2) e diurna (K1). Le mappe a sinistra sono ottenute dall'analisi armonica dell'altezza della superficie del mare simulata dal modello su un periodo di un anno mentre le mappe a destra sono calcolate con il software OTIS.

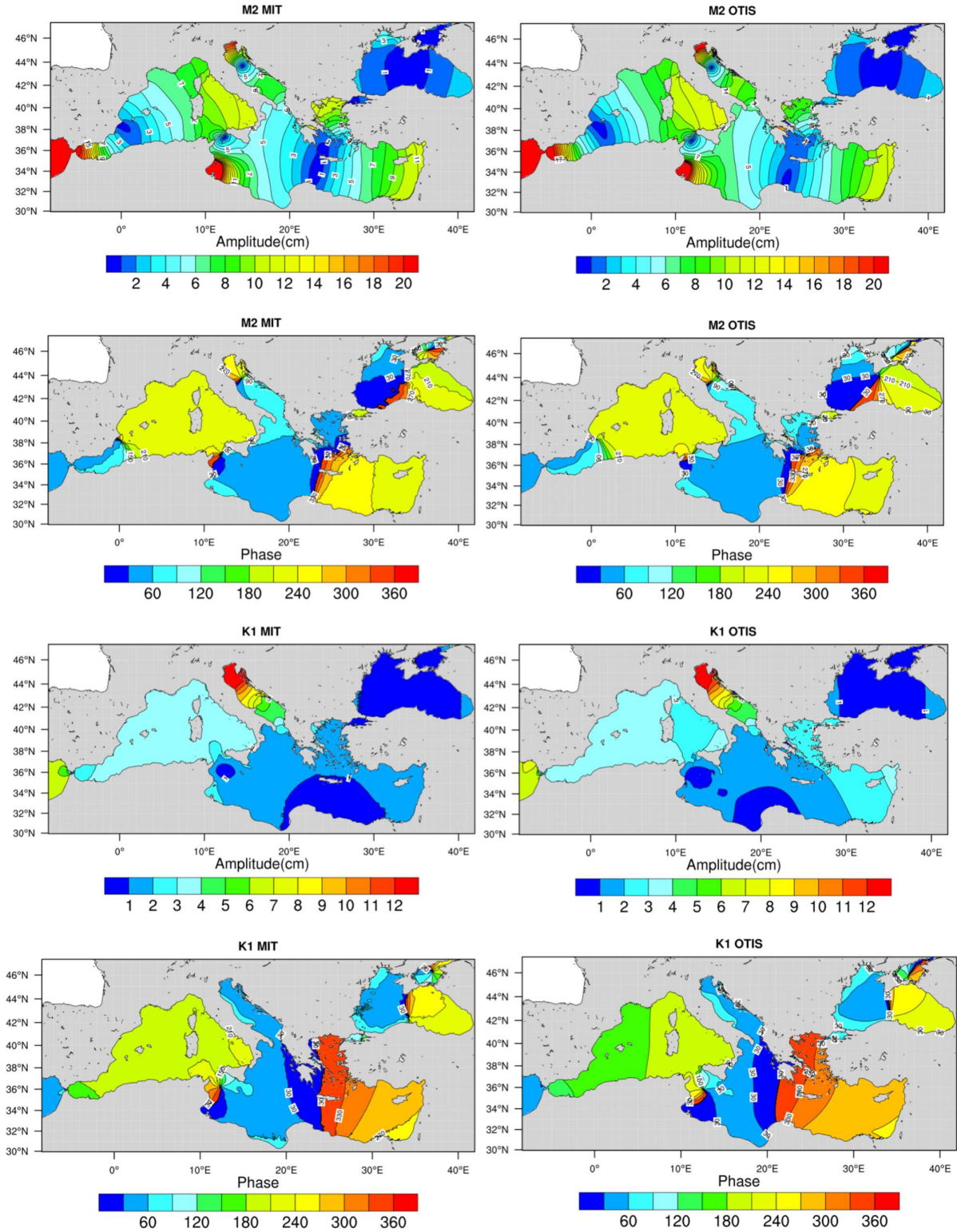


Figura 4: Ampiezza della componente M2 per il sistema Stretto del Dardanelli – Mare di Marmara (pannello superiore), e mappa del “form-factor” per l'intero dominio di calcolo (pannello inferiore). Quest'ultimo indica la prevalenza locale della marea semidiurna (valori bassi) o diurna (valori alti).

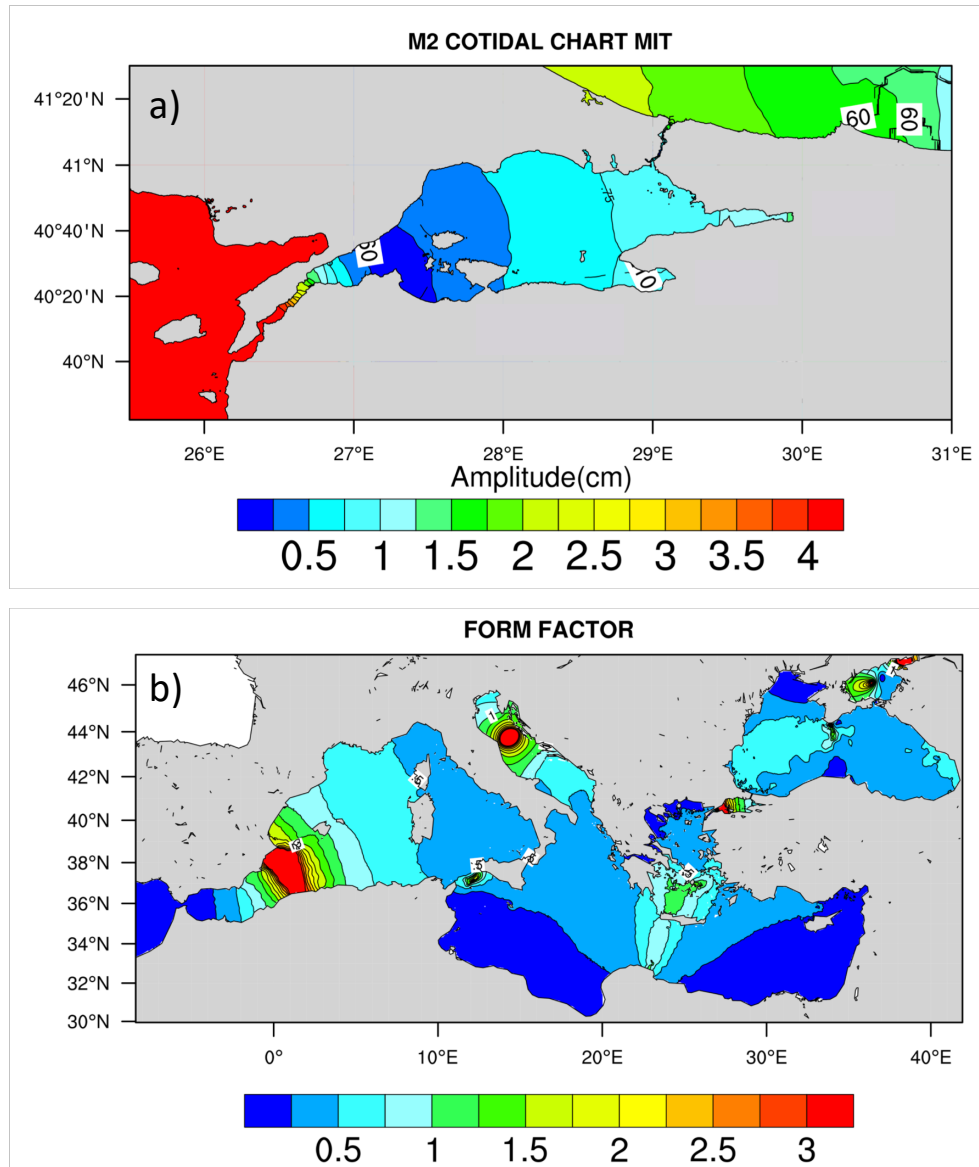


Figura 5: Validazione della dinamica di marea attraverso il confronto con i dati dei mareografi delle stazioni indicate nel pannello superiore sinistro. I pannelli inferiori mostrano le serie temporali (dati orari) del modello (nero) e dell'elevazione registrata dal mareografo (rosso) nelle stazioni 1-4, con i corrispondenti coefficienti di correlazione (R) indicati nei titoli. Il pannello superiore destro è un istogramma di R su tutta la serie di dati.

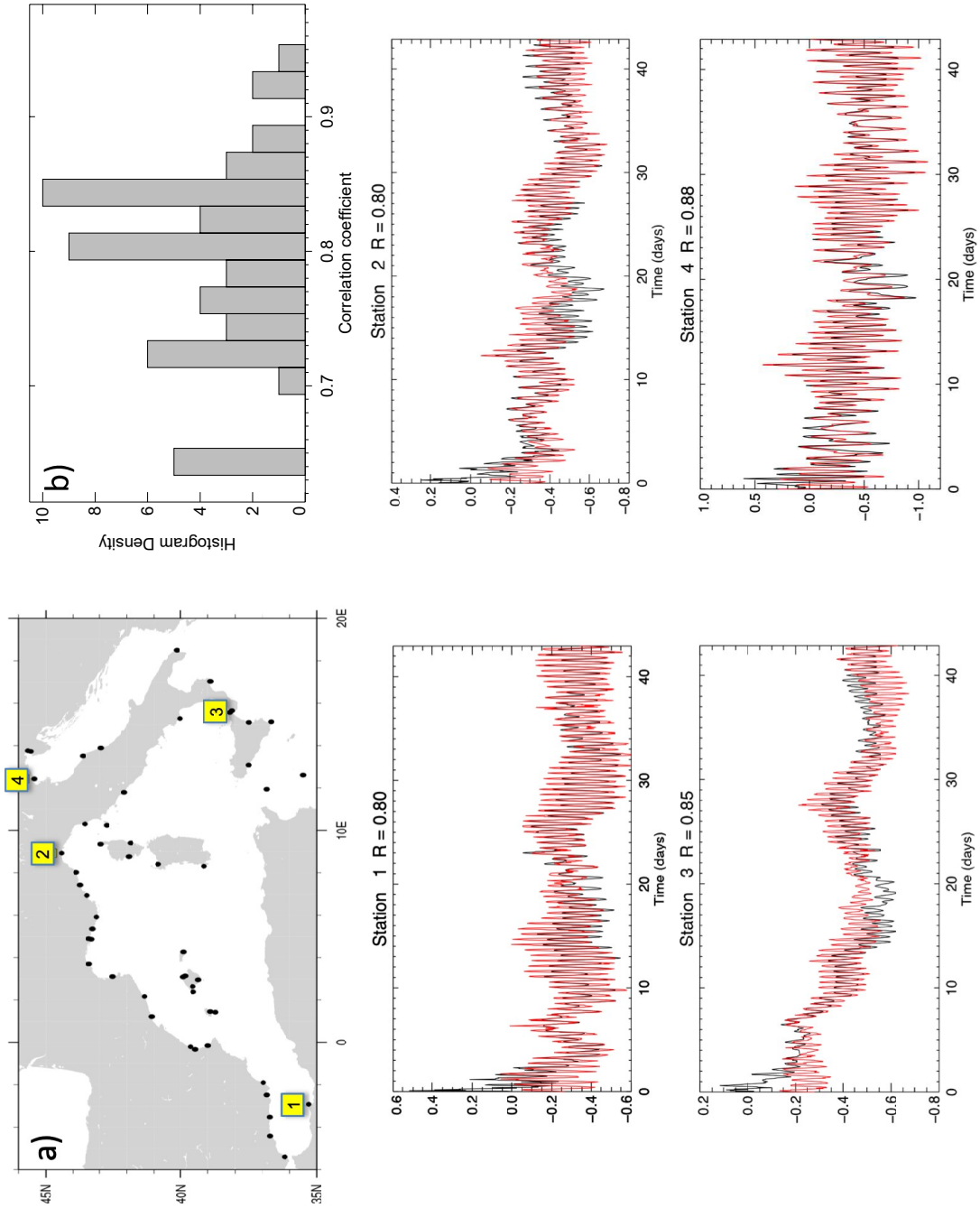


Figura 6: Confronto tra la circolazione superficiale (50 m di profondità) del bacino Ligure-Provenzale del 19 aprile (un mese dopo l'inizio della simulazione) con una mappa ADT per lo stesso giorno. Nel pannello superiore è presente uno zoom della circolazione della regione; nel riquadro rosso è possibile notare l'instabilità della corrente del Nord.

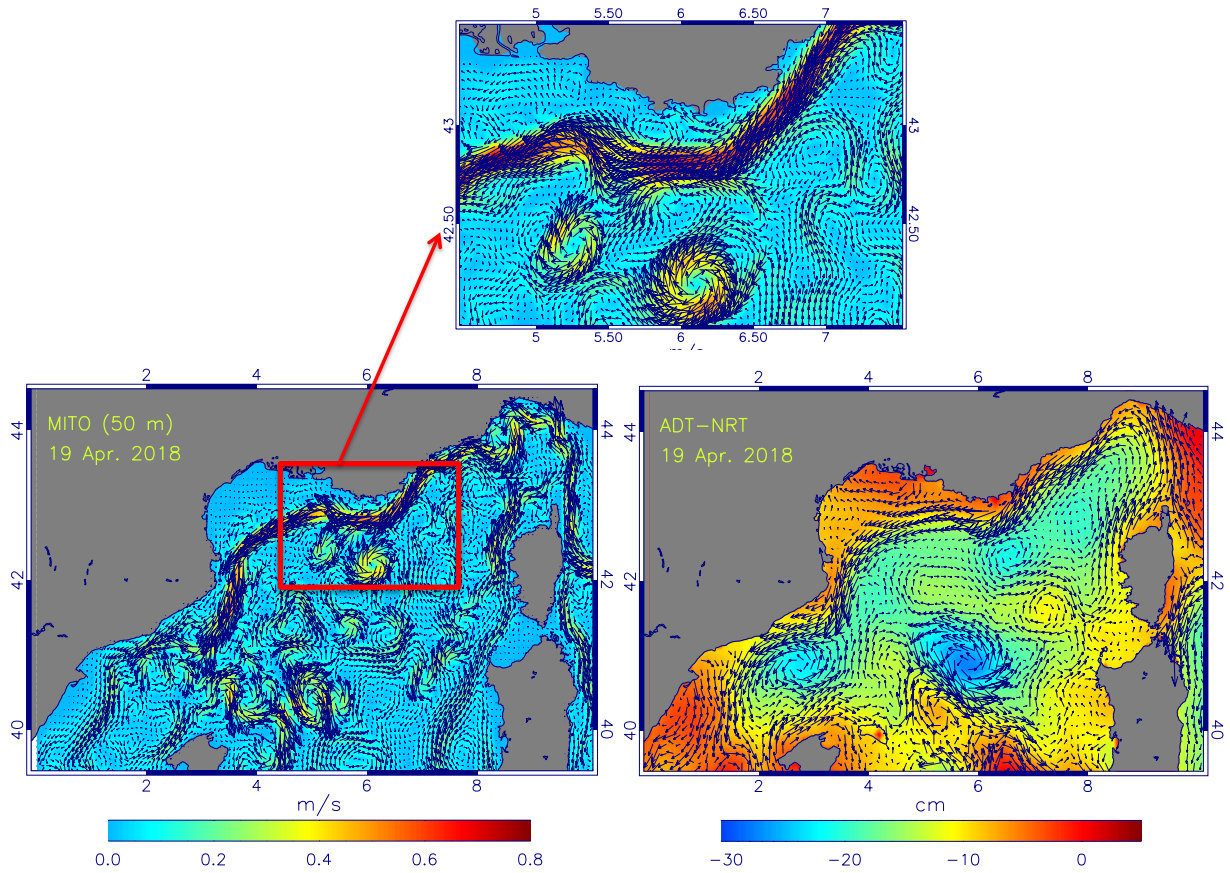


Figura 7: Confronto tra la circolazione giornaliera media del modello (10 m di profondità) del mare Adriatico per il 19 aprile (pannello centrale) con una mappa satellitare ad alta risoluzione (1 km) di K490 (torbidità; pannello di destra), e una mappa di ADT (pannello sinistro), per lo stesso giorno.

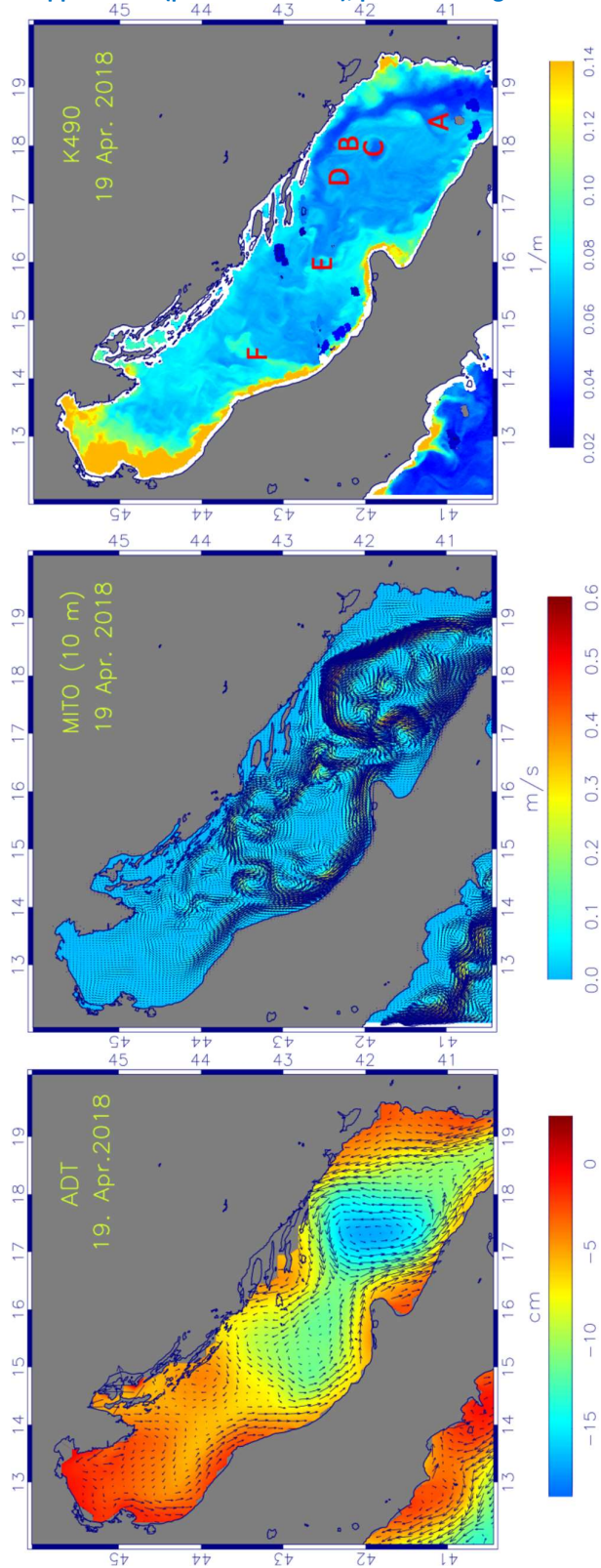


Figura 8: In alto: evoluzione della temperatura media superficiale per l'intero Mar Mediterraneo (Med), per il Mediterraneo occidentale (Wmed) e per il Mediterraneo orientale (Emed). Le curve nere corrispondono ai valori della simulazione, mentre le curve rosse sono ottenute da dati satellitari. Nei pannelli inferiori sono mostrate le mappe da satellite sul Mar Mediterraneo e del bias tra la temperatura simulata e le osservazioni, per il 19 aprile, 1 mese dopo l'inizio della simulazione.

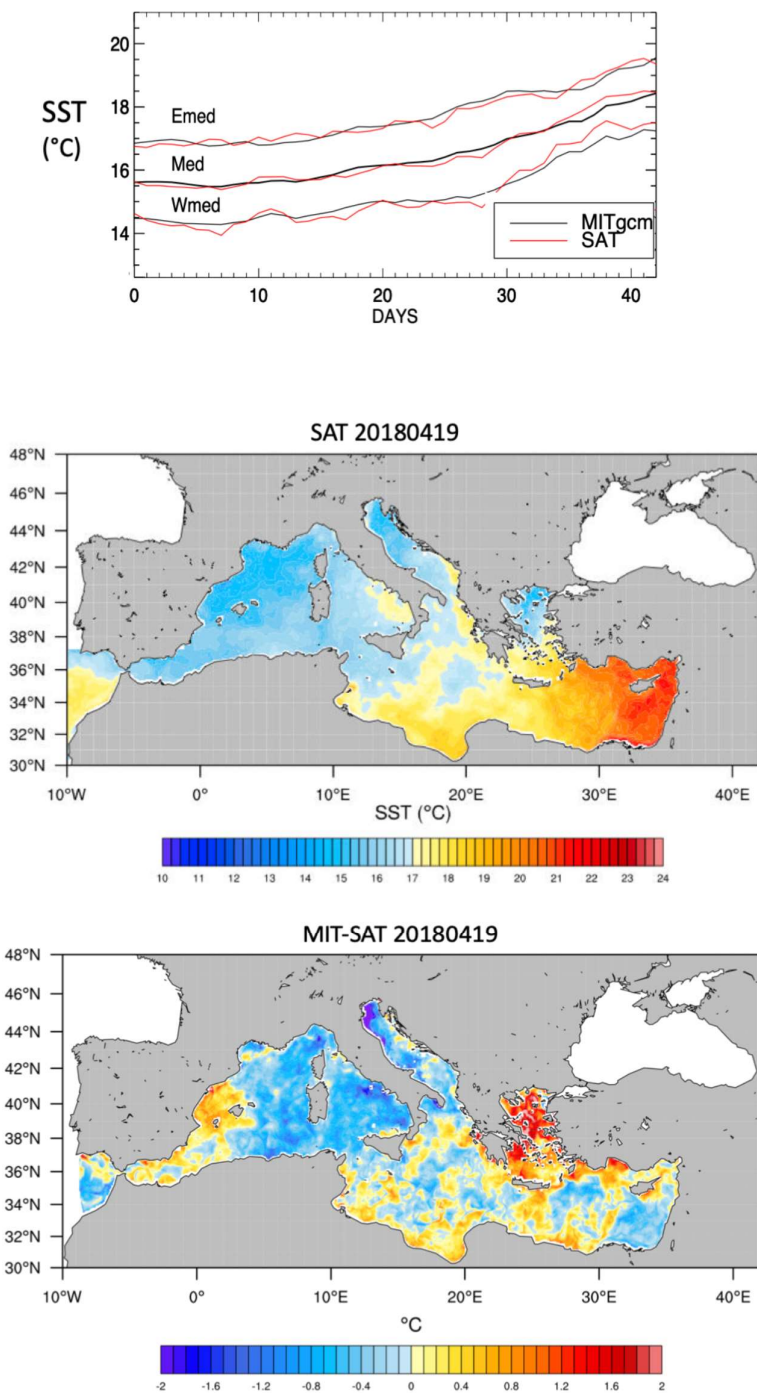


Figura 9: Serie temporali (Aprile 2018; dati orari) dei trasporti attraverso lo Stretto di Gibilterra, il Canale di Sicilia, il Canale di Corsica, lo Stretto di Otranto, lo Stretto dei Dardanelli e lo Stretto del Bosforo. Le sezioni su cui vengono calcolati i trasporti sono zonali (trasporto positivo in direzione nord) o meridionali (trasporto positivo in direzione est).

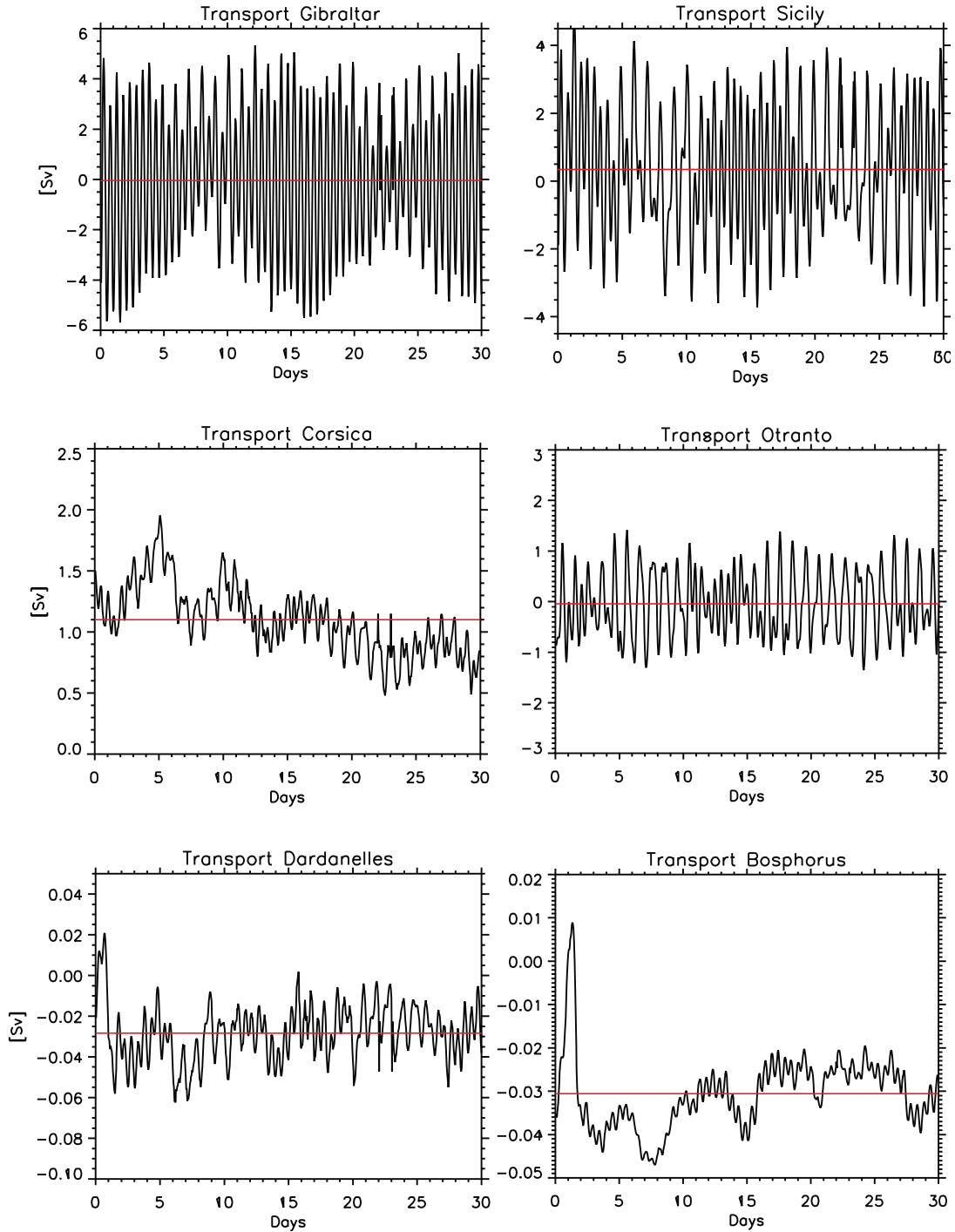


Figura 10: Serie temporali di MKE nel Canale di Sicilia. La MKE è stata mediata sulle cinque regioni indicate dalle celle rosse nel pannello centrale, che mostra la batimetria della regione, e sui primi 100 m della colonna d'acqua (le linee rosse indicano le medie dei valori di MKE sulla simulazione).

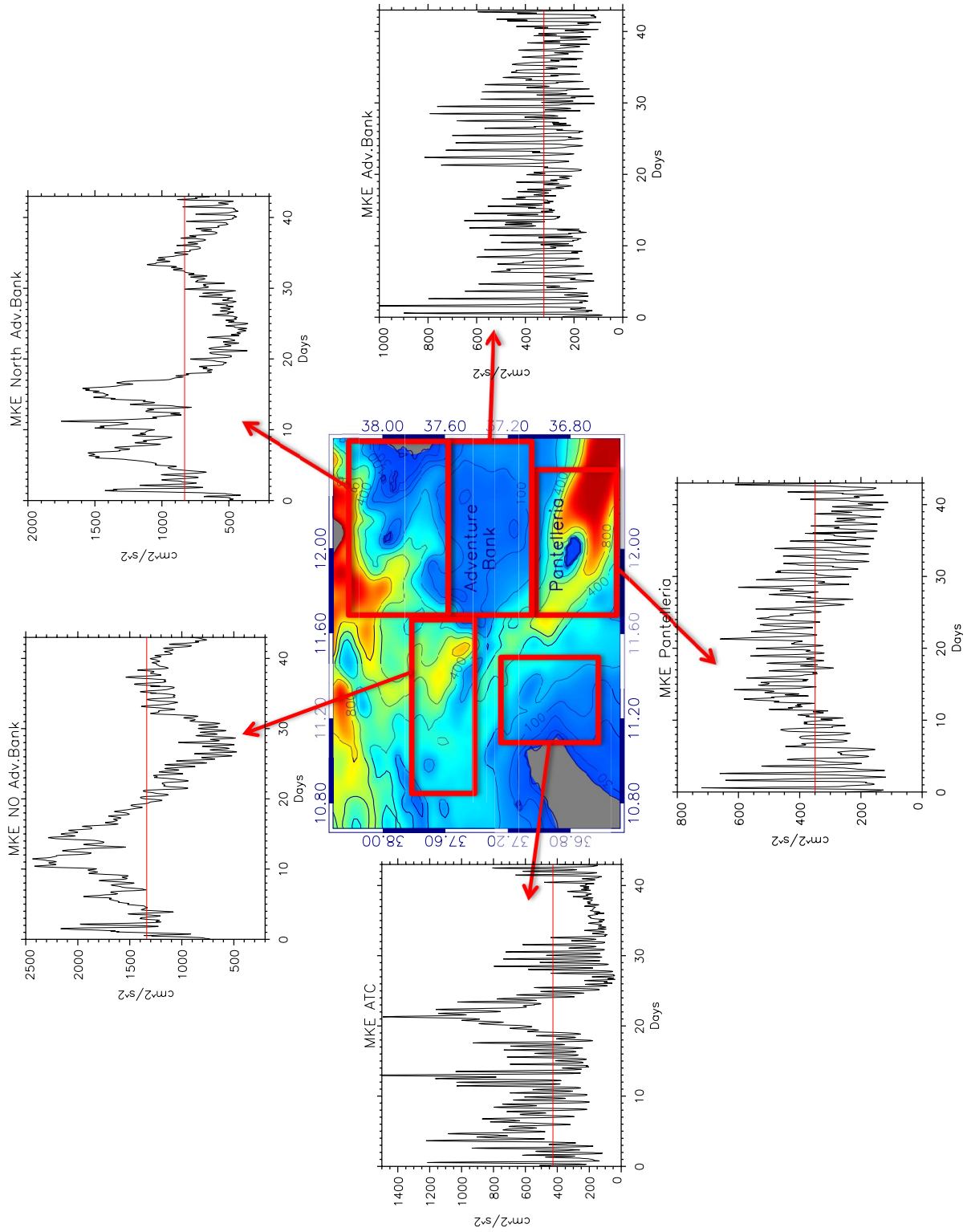


Figura 11: Come in Figura 10, con le serie di MKE sostituite dai loro spettri di potenza. I picchi corrispondenti alle quattro principali componenti di marea sono evidenziati nello spettro relativo alla regione del Banco Aventuro. Gli ovali rossi evidenziano le componenti con periodi di 8 h e 6 h, rispettivamente, che sono prodotte attraverso interazioni non lineari.

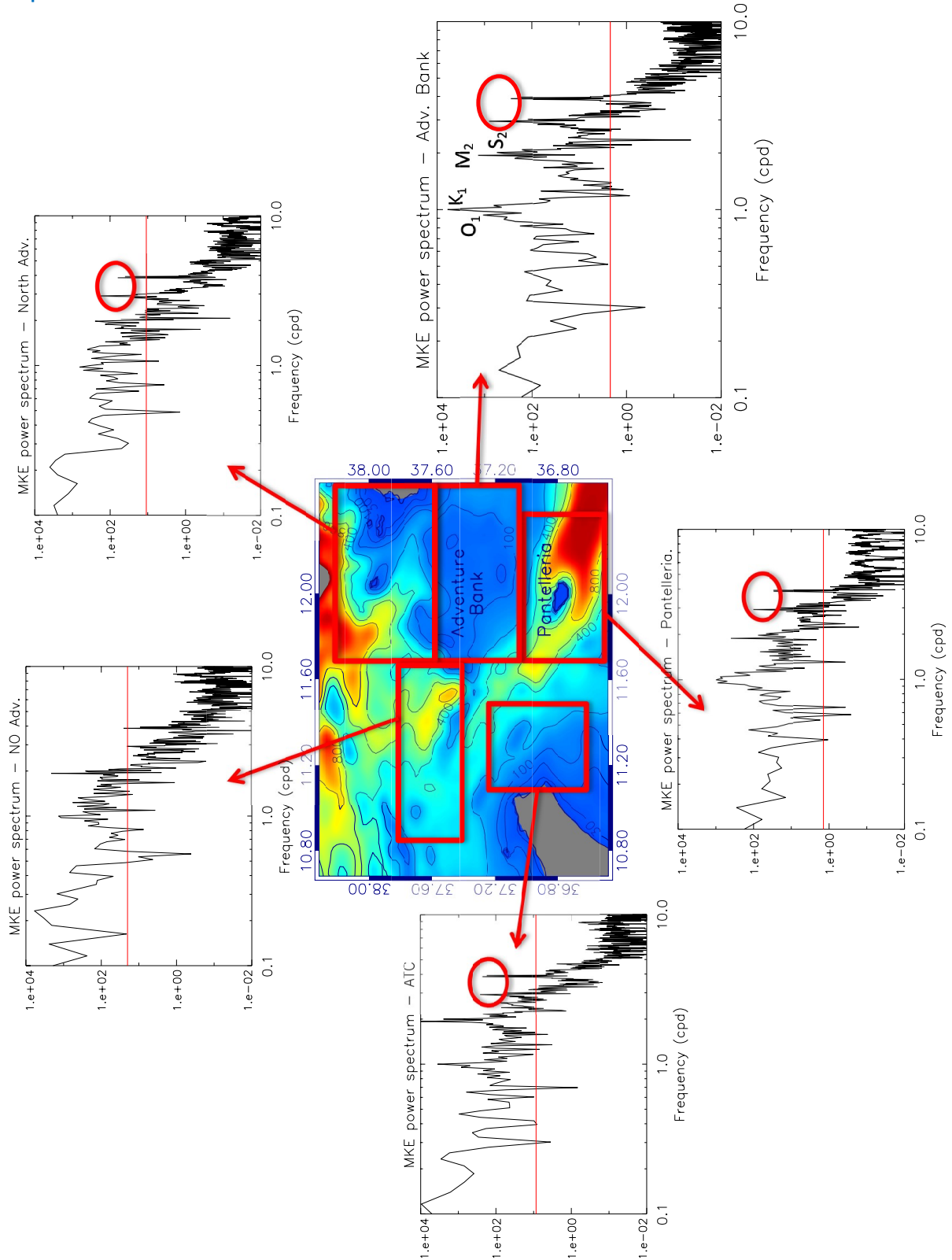


Figura 12: Circolazione media a 10 m di profondità nel Canale di Sicilia (in alto a sinistra). Questa circolazione è caratterizzata da due rami che si separano e che scorrono verso sud-est: l'ATC sul lato occidentale e l' AIS sul lato della Sicilia (vedi il testo per ulteriori dettagli). Il pannello sottostante mostra le ellissi di marea per la componente K1, calcolate in cinque punti sopra il Banco dell'Avventura (segnate da punti nella mappa in alto a sinistra). A destra è mostrata la circolazione del 25 marzo, ad intervalli di 6 h. Si noti l'imponente rotazione diurna della circolazione che avviene sopra il Banco dell'Avventura

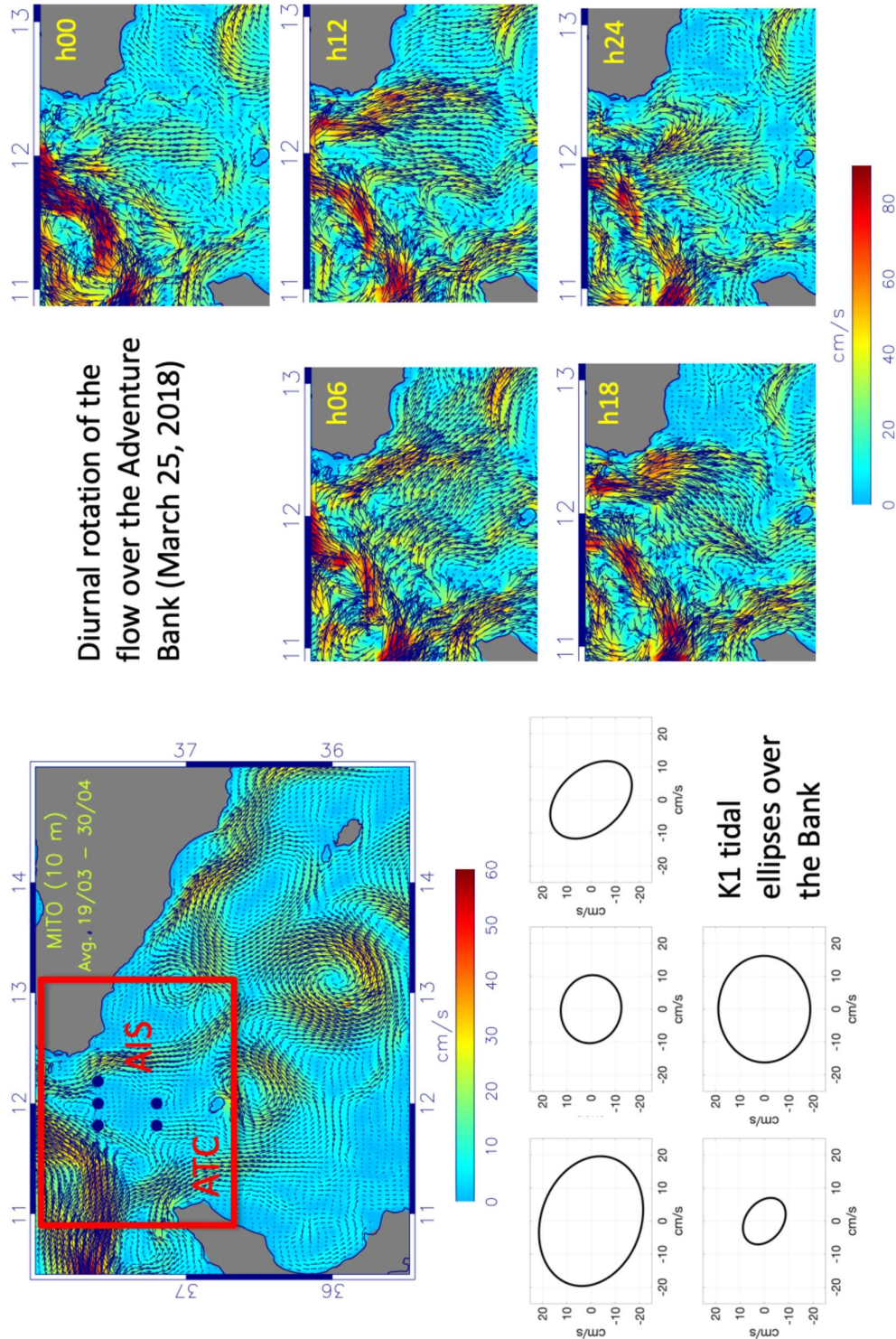


Figura 13: Diagramma orario del flusso, mediato sul Banco Avventura (Canale di Sicilia), per il mese di aprile 2008, a tre diverse profondità (10 m, 48 m, 84 m). Gli assi dei diagrammi puntano rispettivamente verso nord e verso est. Il diagramma mostra la rotazione che avviene lungo tutta la colonna d'acqua, su scale diurna e semidiurna.

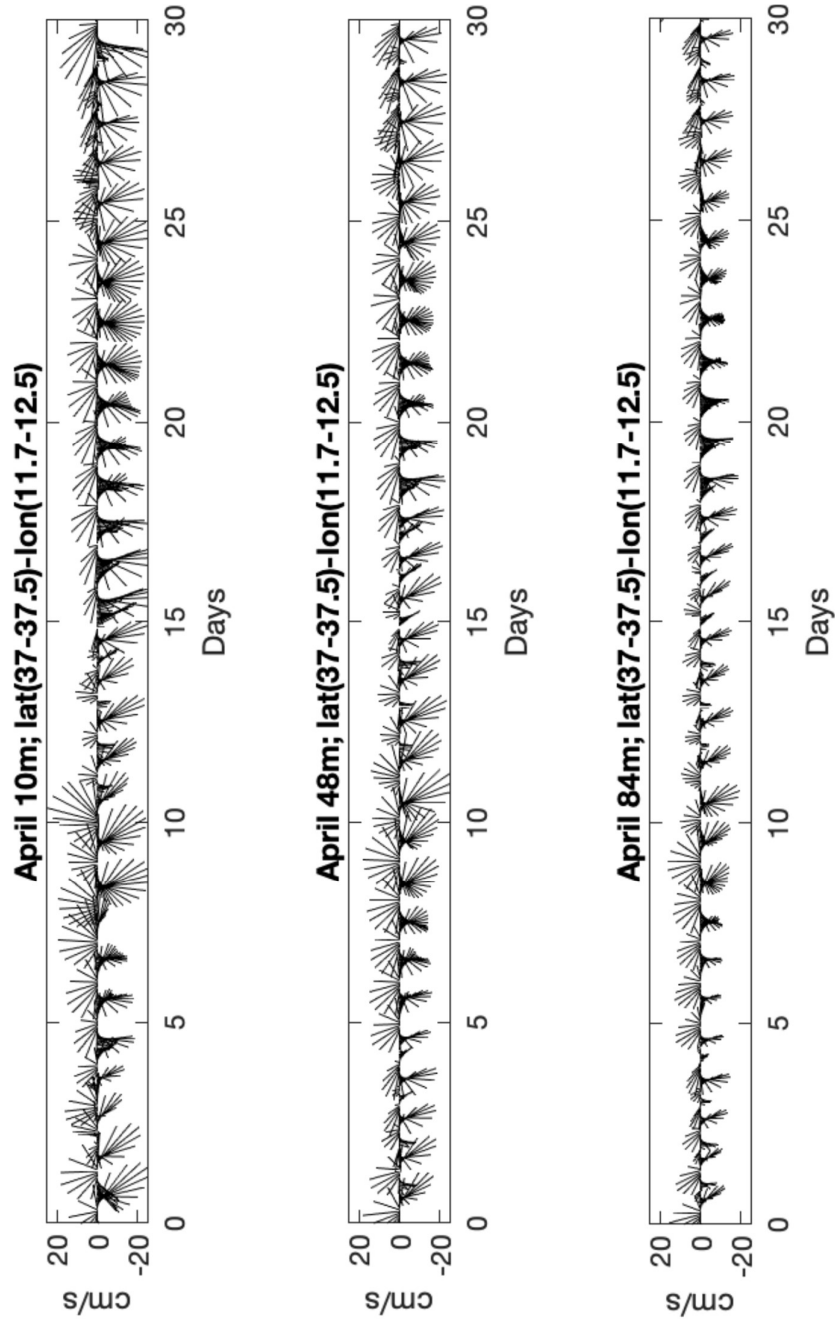


Figura 14: Spettro della MKE nell'area del Canale di Corsica (a sinistra), ed appena più a sud, nell'area del "dipolo" di Bonifacio (a destra)

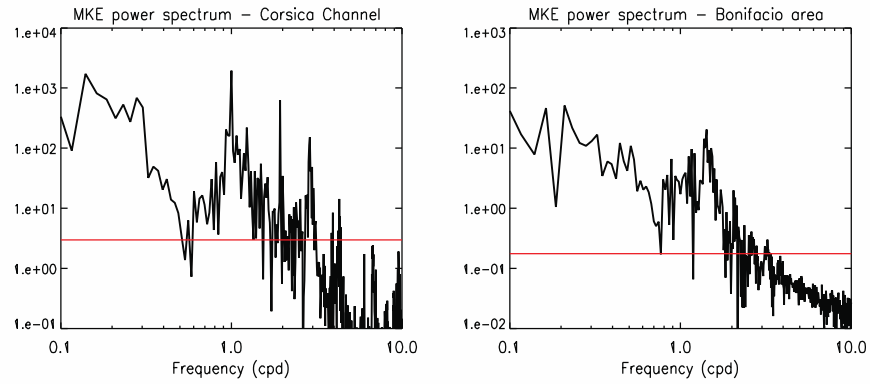


Figura 15: Circolazione media nel Canale di Corsica (10 m di profondità) e la corrispondente batimetria (pannelli superiori). Nei pannelli inferiori sono evidenziate le ellissi di marea della componente K1 nei quattro punti intorno all'isola di Capraia evidenziati nella mappa.

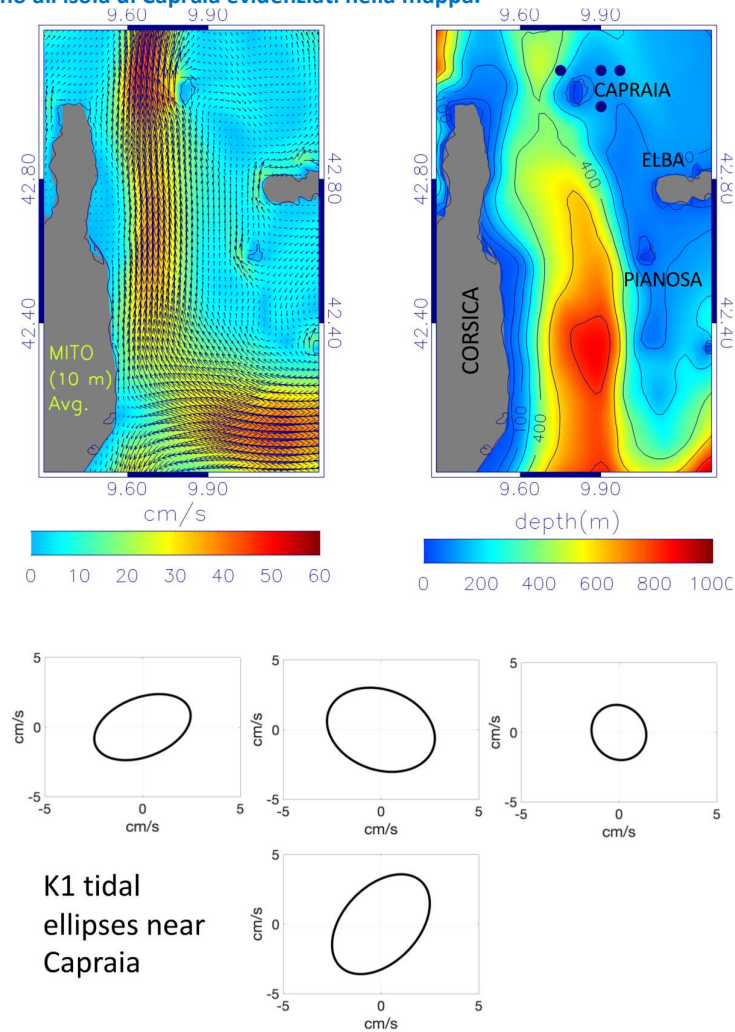


Figura 16: Come in Figura 10, ma per lo Stretto di Otranto.

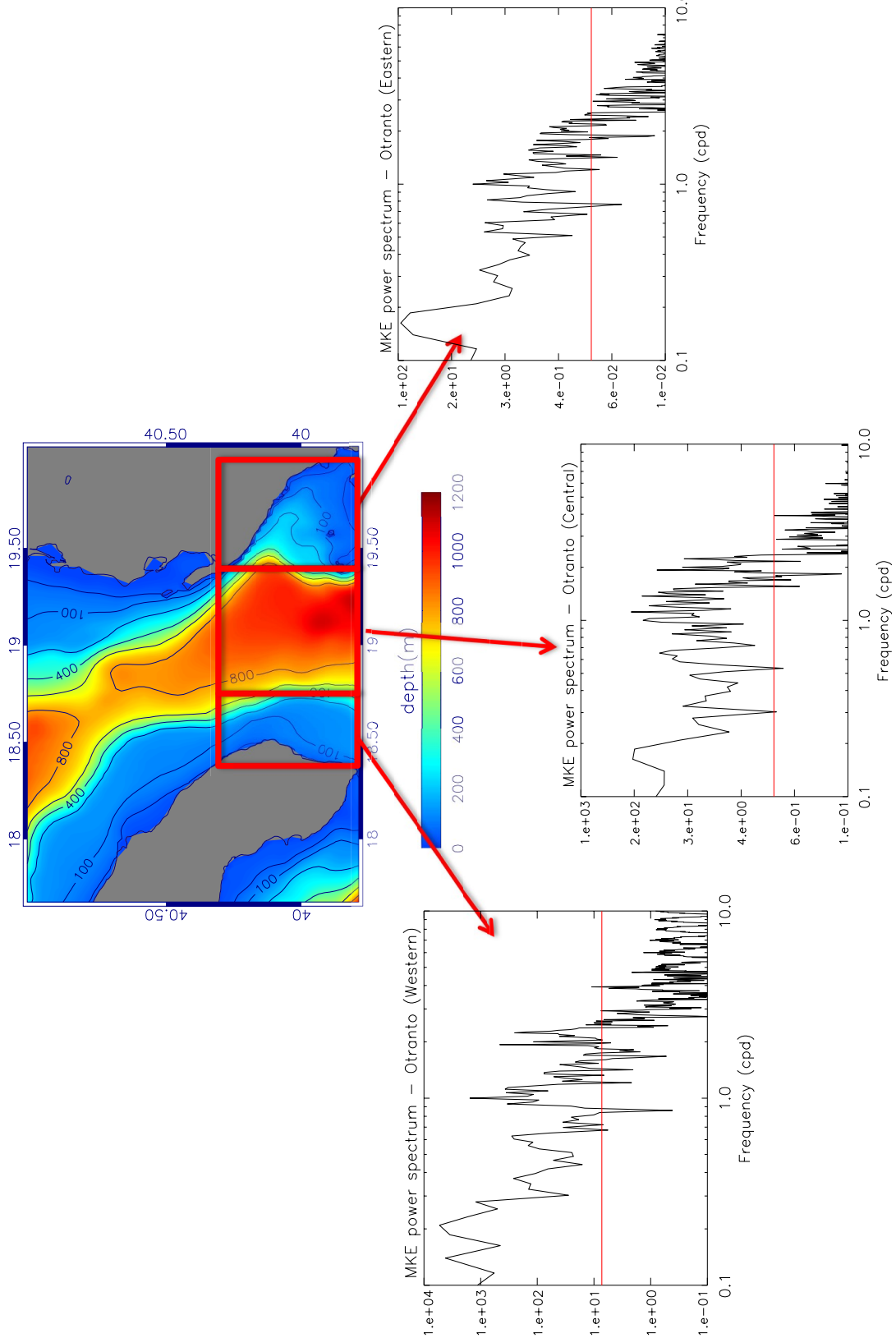


Figura 17: Circolazione (10 m di profondità) nella parte orientale dello Stretto di Otranto, la cui batimetria è visualizzata nel pannello in alto a sinistra. Gli altri cinque pannelli mostrano la circolazione durante il giorno, con intervalli di 6 h.

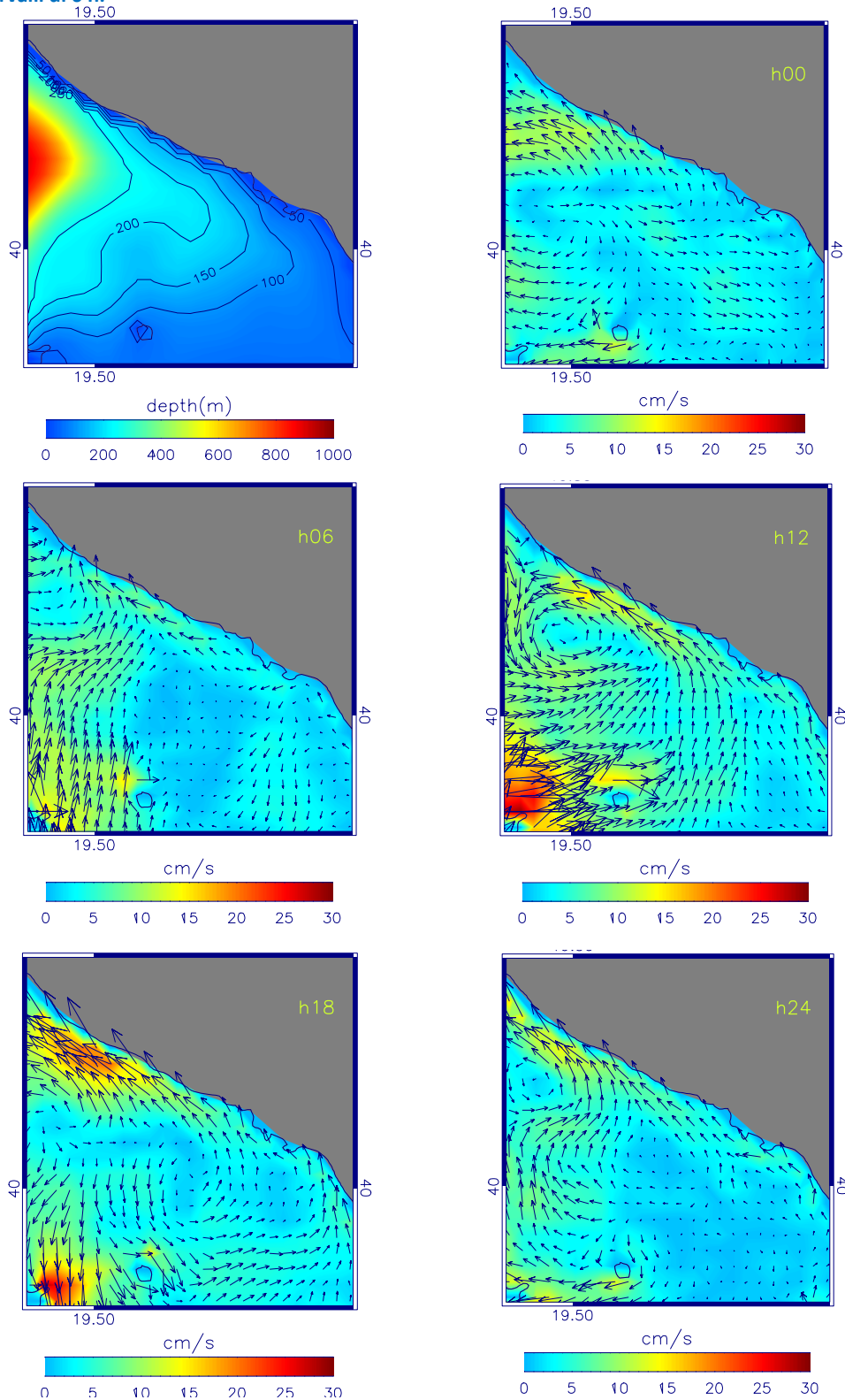


Figura 18: In alto a sinistra: mappe dell'ampiezza e della fase della componente di marea M2 nell'area dello Stretto di Messina. In alto a destra: circolazione superficiale del 7 aprile (10 m di profondità; per chiarezza, viene tracciata solo una freccia ogni due punti della griglia) nell'area circostante lo Stretto; la stella gialla indica approssimativamente l'area su cui è stata calcolata la media della velocità per produrre le serie temporali visualizzate nel pannello in basso a sinistra. Nell'ultimo pannello c'è lo spettro della MKE nell'area dello Stretto, che mostra forti picchi a periodi di 8 h e 6 h (componenti non lineari)

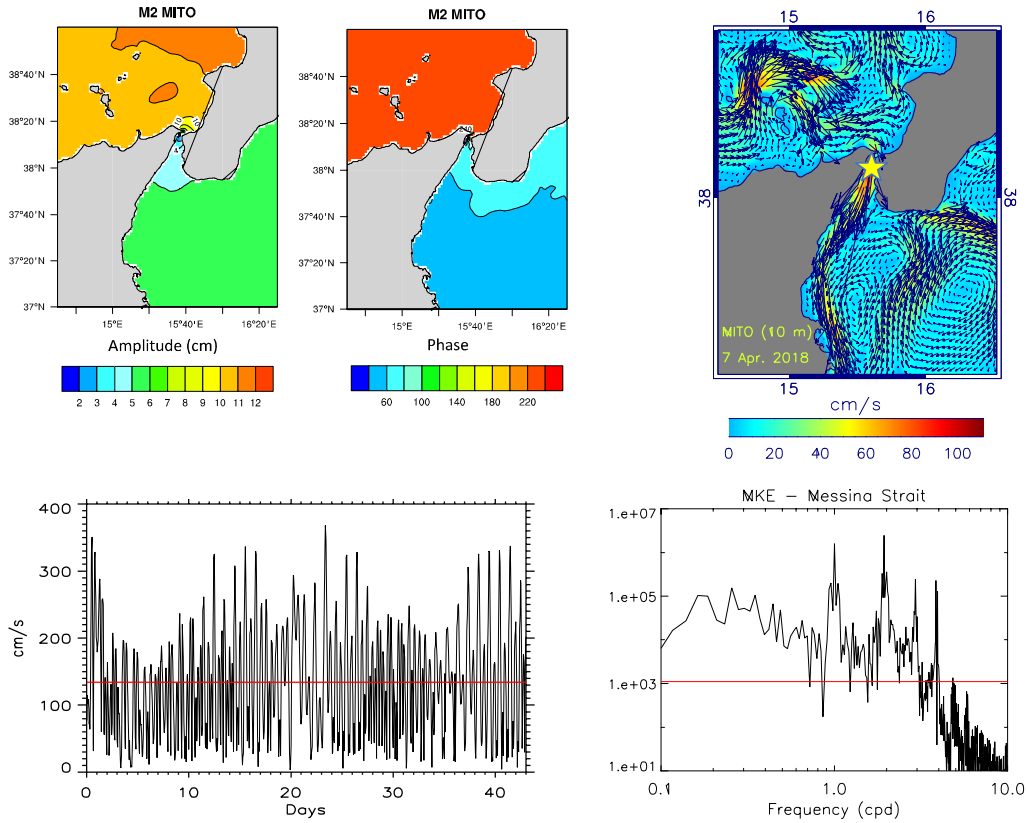


Figura 19: Spettro della MKE per il Nord Adriatico (a nord di 44,5° N)
MKE power spectrum – North ADR.

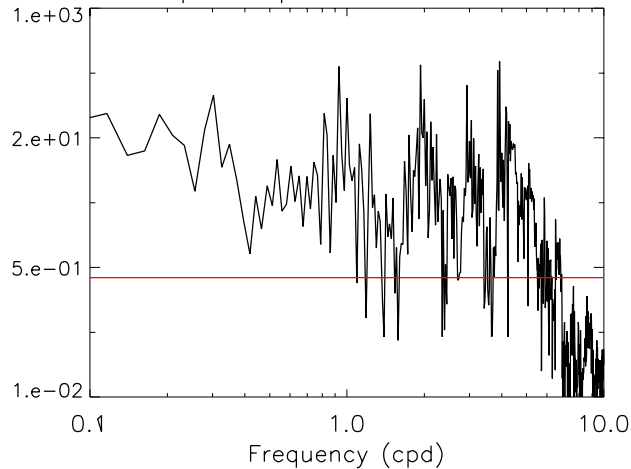


Figura 20: Mappe della circolazione a 10 m di profondità, per il 29 marzo 2018, nel Nord Adriatico. Le località di Venezia, Trieste e del Delta del Po sono evidenziate nel pannello in alto a sinistra, che è una mappa della circolazione media giornaliera. Le altre mappe mostrano la circolazione durante il giorno, con intervalli di 6 h, illustrando i forti effetti della marea sulla circolazione

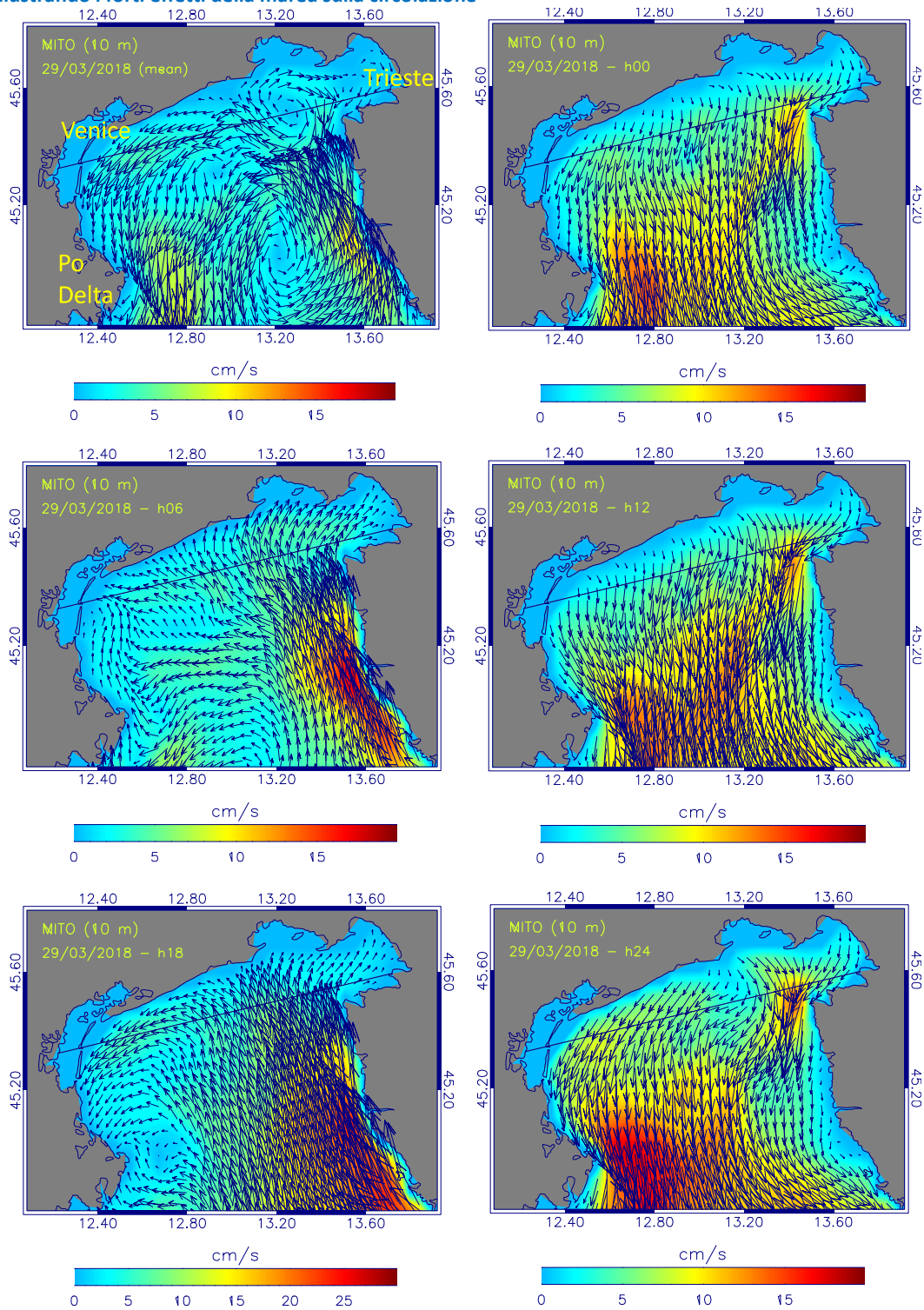


Figura 21: Mappe della circolazione e della temperatura a 25 m di profondità, per il 31 Agosto 2020 (snapshots a h00), tratti dal sito web in cui vengono mostrate le uscite del modello operativo (<https://giotto.casaccia.enea.it/mito/>). Si può notare la forte corrente di marea prodotta nello Stretto di Messina, che poi si dirige verso sud lungo la costa est della Sicilia e, nella mappa di temperatura, una corrispondente lingua più fredda che parte dal Tirreno. Il campo di temperatura mostra anche la formazione nella zona di un imponente treno di onde che si propaga verso sud-est.

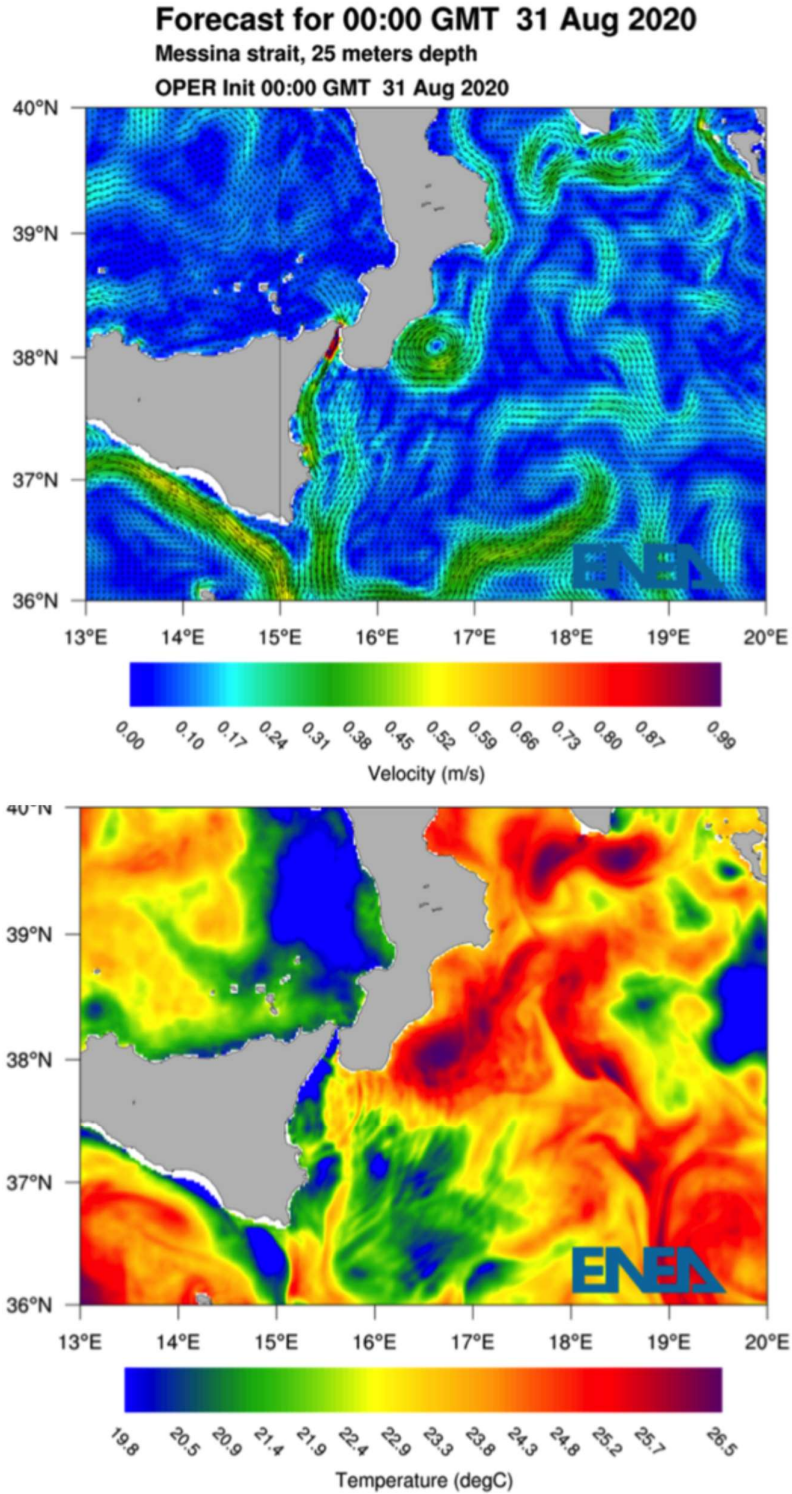


Tabella 1: I valori del modello delle ampiezze e delle fasi per le componenti M2, S2, O1 e K1 sono confrontati con i valori osservati di riferimento (Tsimplis et al, 1995) dai mareografi distribuiti nel Mediterraneo. Per ogni componente armonica, il numero nella quinta colonna è la differenza vettoriale d , calcolata come distanza nel piano complesso. Segue nella pagina successiva

Tide gauge	Location	Latitude	Longitude	M2				S2				O1				K1							
				AMP		Pha		AMP		Pha		AMP		Pha		AMP		Pha					
				Obs	Mdl	Obs	Mdl	Obs	Mdl	Obs	Mdl	Obs	Mdl	Obs	Mdl	Obs	Mdl	Obs	Mdl				
60	Alexandria	31° 12'	29° 52' E	7.2	5.9	245.0	241.1	1.4	4.1	3.0	259.0	256.9	1.1	1.3	0.9	241.0	257.2	0.5	1.7	0.7	273.0	272.8	1.0
55	Alexandroupolis	40° 51'	25° 23' E	7.1	8.5	73.0	45.3	4.0	5.0	4.7	92.0	91.5	0.3	1.3	1.3	309.0	319.2	0.2	0.3	2.0	341.0	350.6	1.7
4	Almeria	36° 50'	02° 27' W	9.0	8.0	51.0	46.6	1.2	4.0	3.4	78.0	68.8	0.9	2.0	2.3	119.0	132.4	0.6	3.0	3.1	157.0	185.0	1.5
27	Ancona	43° 37'	13° 30' E	6.6	6.1	302.0	302.3	0.5	3.6	3.4	315.0	310.9	0.3	4.2	4.2	61.0	44.0	1.2	13.0	12.9	72.0	65.7	1.4
34	Bakar	45° 18'	14° 32' E	10.6	10.3	208.0	222.1	2.6	5.5	6.0	212.0	216.9	0.7	4.1	4.5	38.0	23.7	1.1	13.8	14.4	48.0	45.3	0.9
7	Banyuls	42° 29'	03° 06' E	4.6	6.5	229.0	223.9	1.9	1.8	2.1	249.0	240.6	0.4	1.9	2.1	110.0	125.0	0.5	3.2	3.4	179.0	196.3	1.0
46	Bar	42° 04'	19° 06' E	9.2	7.2	76.0	72.7	2.0	5.6	4.8	80.0	73.1	1.0	1.4	1.7	19.0	15.6	0.4	4.8	4.6	42.0	39.8	0.2
3	B. Hoceima	35° 15'	03° 55' W	18.0	16.8	61.0	61.7	1.3	7.0	6.4	85.0	82.5	0.6	1.0	1.9	183.0	127.6	1.5	4.0	3.0	119.0	169.5	3.1
44	Brindisi	40° 38'	17° 56' E	8.7	7.3	73.0	70.9	1.4	5.2	4.8	81.0	73.7	0.8	1.5	1.7	43.0	31.5	0.4	4.6	4.6	54.0	56.4	0.2
13	Cagliari	39° 12'	09° 10' E	7.6	8.4	235.0	235.1	0.8	2.8	3.1	257.0	255.5	0.3	1.8	1.5	109.0	129.1	0.6	3.2	3.2	180.0	202.5	1.3
37	Capo Passero	36° 41'	15° 09' E	6.7	5.6	62.0	56.1	1.3	3.5	3.0	67.0	61.6	0.6	0.9	0.9	46.0	44.1	0.1	1.9	1.9	52.0	52.9	0.0
11	Carloforte	39° 09'	08° 18' E	6.5	6.9	231.0	232.3	0.4	2.6	2.7	254.0	251.0	0.2	1.9	1.7	95.0	135.9	1.3	3.2	3.8	178.0	204.7	1.7
36	Catania	38° 30'	15° 06' E	6.4	6.8	62.0	61.6	0.4	3.4	4.2	68.0	65.8	0.8	1.1	1.2	43.0	44.9	0.1	1.5	3.6	46.0	45.6	2.1
19	Civitavecchia	42° 06'	11° 47' E	10.9	10.6	239.0	228.5	2.0	4.1	7.3	259.0	246.9	0.9	1.2	1.3	104.0	129.4	0.6	2.7	3.2	192.0	206.3	0.9
57	Chios	38° 23'	26° 09' E	4.4	5.3	49.0	27.9	2.0	2.9	2.6	71.0	78.4	0.5	1.3	1.1	300.0	310.6	0.3	2.3	1.7	329.0	343.6	0.8
63	Famagusta	35° 07'	33° 57' E	11.0	8.8	236.0	233.2	2.2	7.3	4.2	258.0	250.7	3.2	1.8	1.4	258.0	267.3	0.5	2.1	1.6	278.0	278.9	0.5
15	Gabes	33° 53'	10° 07' E	51.1	60.9	79.0	82.1	10.3	36.4	38.5	107.0	123.5	11.0	0.5	0.5	81.0	352.7	0.7	2.5	2.8	349.0	11.8	1.1
12	Genova	44° 24'	08° 54' E	8.6	8.6	225.0	225.8	0.1	3.2	3.2	242.0	240.9	0.1	1.4	1.7	105.0	135.4	0.8	3.3	3.8	175.0	207.8	2.0
1	Gibraltar	35° 20'	05° 21' W	29.8	29.9	46.0	50.3	2.3	10.7	11.1	72.0	74.9	0.7	0.9	1.7	165.0	153.8	0.8	2.0	1.8	131.0	169.6	1.3
54	Imklion	35° 20'	25° 08' E	1.5	1.2	304.0	290.6	0.4	1.1	0.8	309.0	306.3	0.3	0.9	0.7	296.0	307.3	0.3	1.8	1.0	330.0	347.7	0.9
30	Ischia	40° 44'	13° 56' E	12.0	10.9	232.0	230.8	1.1	5.0	4.2	252.0	248.0	0.9	1.0	1.2	106.0	138.4	0.6	3.0	3.4	192.0	210.6	1.1
49	Kalamata	37° 01'	22° 08' E	2.2	2.3	69.0	45.9	0.9	1.1	1.4	69.0	41.5	0.7	0.5	0.6	342.0	344.0	0.1	1.2	1.2	3.0	17.1	0.3
48	Katakolo	37° 38'	21° 19' E	3.3	3.1	62.0	53.0	0.5	1.6	1.8	65.0	52.2	0.4	0.5	0.7	353.0	353.0	0.2	1.3	1.3	6.0	21.8	0.4
62	Kyrenia	35° 20'	33° 19' E	10.1	8.0	235.0	233.7	2.1	6.4	3.8	256.0	251.2	2.6	1.8	1.4	260.0	269.4	0.5	2.4	1.5	278.0	282.3	0.9
14	La Spezia	44° 04'	09° 51' E	9.4	8.9	215.0	227.5	2.1	3.4	3.3	237.0	242.3	0.3	1.4	1.6	102.0	139.1	1.0	3.7	3.9	183.0	209.6	1.8
22	Lampedusa	35° 30'	12° 30' E	6.6	6.6	45.0	33.2	1.4	4.2	3.9	58.0	58.3	0.3	0.7	0.4	999.0	48.4	1.0	0.9	0.9	3.0	15.2	0.2
47	Lefkas	38° 50'	20° 42' E	4.0	3.8	79.0	61.0	1.2	2.2	2.2	85.0	59.8	1.0	0.6	0.8	5.0	358.6	0.2	1.4	1.5	19.0	23.8	0.2
58	Leros	37° 05'	26° 53' E	2.1	2.3	305.0	301.5	0.2	1.3	0.8	316.0	323.9	0.5	1.1	1.0	291.0	299.3	0.2	2.0	1.3	317.0	330.5	0.8
35	Lipari	38° 29'	14° 58' E	12.0	10.9	232.0	234.4	1.2	4.5	4.2	254.0	252.5	0.3	1.1	1.2	111.0	144.2	0.7	3.1	3.6	199.0	211.1	0.9
16	Livorno	43° 32'	10° 18' E	8.5	9.4	228.0	229.4	0.9	3.4	3.5	245.0	244.4	0.1	1.8	1.8	106.0	136.4	0.9	4.0	4.1	182.0	205.8	1.7
2	Malaga	36° 42'	04° 27' W	18.0	16.5	56.0	48.4	2.7	7.0	6.6	79.0	71.0	1.0	2.0	2.1	126.0	137.4	0.4	0.3	2.6	156.0	178.9	1.2

Tide gauge	Location	Latitude	Longitude	M2				S2				O1				K1								
				AMP		Pha		AMP		Pha		AMP		Pha		AMP		Pha						
				Obs	Mdl	Obs	Mdl	Obs	Mdl	Obs	Mdl	Obs	Mdl	Obs	Mdl	Obs	Mdl	Obs	Mdl					
33	Malta	35° 54'	14° 31' E	6.0	5.4	47.0	48.8	0.7	4.0	3.1	57.0	62.0	1.0	1.0	0.5	55.0	27.6	0.6	1.0	1.6	19.0	34.0	0.7	
8	Marseille	43° 18'	05° 21' E	7.0	7.1	217.0	223.6	0.8	2.0	2.5	236.0	240.7	0.5	2.0	1.9	101.0	128.1	0.9	3.0	3.5	176.0	201.4	1.5	
23	Mazara del Vallo	37° 38'	12° 35' E	4.3	4.1	161.0	168.1	0.6	1.8	1.6	151.0	153.9	0.2	1.6	2.0	74.0	82.2	0.5	3.5	3.9	114.0	133.9	1.3	
38	Milazzo	38° 13'	15° 15' E	12.0	10.9	234.0	235.4	1.1	4.7	4.3	252.0	253.4	0.5	1.1	1.2	116.0	146.1	0.6	3.3	3.7	200.0	211.4	0.8	
31	Napoli	40° 52'	14° 16' E	11.1	11.0	234.0	230.9	0.6	4.4	4.2	253.0	248.1	0.4	1.0	1.2	110.0	139.4	0.6	2.8	3.4	201.0	210.9	0.8	
32	Ortona	42° 21'	14° 24' E	6.4	5.8	64.0	54.6	1.2	4.5	4.2	76.0	61.3	1.1	3.4	3.0	53.0	42.2	0.7	9.7	8.9	73.0	64.2	1.7	
45	Otranto	40° 09'	18° 30' E	7.0	5.8	74.0	71.0	1.3	4.0	3.6	82.0	73.9	0.7	1.0	1.2	44.0	33.4	0.3	2.3	2.9	64.0	61.5	0.6	
26	Palermo	38° 08'	13° 20' E	10.6	10.5	238.0	233.2	0.9	4.1	4.0	261.0	252.3	0.6	1.2	1.3	121.0	136.7	0.4	3.2	3.5	195.0	206.1	0.7	
6	Palma	39° 35'	02° 38' E	3.0	3.5	208.0	223.3	1.0	1.0	1.0	223.0	245.0	0.4	2.0	2.0	105.0	127.8	0.8	4.0	3.4	168.0	195.3	1.8	
20	Pantelleria	36° 47'	12° 00' E	1.6	2.2	31.0	75.2	1.5	1.9	0.9	42.0	89.3	1.4	1.4	2.1	999.0	128.0	3.4	2.0	3.4	172.0	189.0	1.6	
56	Portobanda	31° 46'	25° 42' E	2.9	3.1	235.0	250.9	0.8	2.9	1.7	271.0	270.5	1.2	0.8	0.5	259.0	271.6	0.3	1.2	0.4	306.0	332.5	0.9	
28	P. Empedocle	37° 15'	13° 30' E	4.5	3.7	78.0	65.4	1.2	3.2	2.6	77.0	74.7	0.6	1.4	1.1	76.0	63.7	0.4	1.8	1.7	91.0	99.8	0.3	
10	Porto Maurizio	43° 52'	08° 01' E	8.3	8.2	222.0	225.4	0.5	3.4	3.0	237.0	241.9	0.5	1.6	1.7	108.0	133.5	0.7	3.6	3.7	187.0	206.3	1.2	
61	Port Said	31° 16'	32° 19' E	11.2	9.2	241.0	236.4	2.2	6.9	4.5	254.0	251.3	2.5	1.7	1.1	245.0	255.3	0.6	2.1	1.1	273.0	264.3	1.0	
39	Reggio Calabria	38° 07'	15° 39' E	6.2	4.4	62.0	67.7	1.9	3.1	2.4	68.0	66.3	0.7	0.9	1.0	40.0	42.2	0.1	1.3	2.0	44.0	62.8	0.8	
59	Rodos	36° 26'	28° 14' E	4.4	4.6	257.0	244.4	1.0	2.7	2.3	268.0	266.0	0.4	1.1	1.0	281.0	289.4	0.2	1.8	1.1	303.0	316.3	0.7	
40	Santadrea Island	43° 02'	15° 46' E	6.8	5.4	93.0	79.2	2.0	4.4	4.0	95.0	80.6	1.1	2.5	2.7	42.0	25.6	0.8	6.8	8.1	54.0	46.9	1.6	
17	Stax	34° 44'	10° 46' E	41.6	42.1	76.0	70.2	4.3	26.7	26.1	103.0	110.6	3.5	0.8	0.5	82.0	324.3	1.1	1.8	2.7	4.0	355.0	1.0	
24	SG	36° 10'	12° 49' E	4.8	4.3	50.0	37.6	1.1	3.1	2.9	57.0	59.4	0.3	0.9	0.6	999.0	66.9	1.4	0.5	0.5	78.0	59.7	0.2	
9	Skikda	36° 53'	06° 55' E	5.6	6.0	227.0	230.7	0.5	2.2	2.3	249.0	255.7	0.3	2.0	1.8	114.0	137.3	0.8	2.3	3.8	178.0	205.0	2.0	
52	Souda	35° 30'	24° 03' E	1.0	0.9	348.0	346.4	0.1	0.8	0.7	338.0	345.4	0.2	0.6	0.6	307.0	316.7	0.1	1.4	1.0	342.0	358.0	0.5	
42	Split	43° 30'	16° 26' E	8.0	6.2	100.0	90.1	2.2	5.6	4.7	100.0	87.5	1.5	2.7	2.8	34.0	17.1	0.8	8.8	8.4	41.0	38.3	0.6	
53	Syros	37° 26'	24° 55' E	2.0	1.9	42.0	16.2	0.9	1.0	0.7	57.0	47.7	0.3	1.0	0.8	311.0	319.1	0.2	1.9	1.3	340.0	354.5	0.7	
43	Taranto	40° 28'	17° 13' E	6.5	5.3	71.0	67.3	1.2	3.7	3.0	73.0	69.2	0.8	0.8	1.0	34.0	26.7	0.2	1.8	2.0	42.0	48.3	0.3	
50	Thessaloniki	40° 37'	23° 02' E	9.0	10.5	78.0	47.3	5.4	6.1	5.5	98.0	1.0	1.0	1.0	1.3	1.2	328.0	330.8	0.1	2.6	2.1	357.0	2.6	0.5
51	Tobrukh	32° 11'	23° 48' E	1.4	1.2	285.0	262.0	0.5	1.3	1.1	284.0	293.1	0.3	0.5	0.4	252.0	286.6	0.3	0.6	0.5	290.0	7.2	0.7	
29	Trieste	45° 39'	13° 45' E	26.3	20.8	249.0	247.3	5.5	15.2	13.0	255.0	247.6	2.9	6.1	5.2	42.0	28.9	1.6	19.7	17.0	59.0	50.2	3.9	
25	Tripoli	32° 54'	13° 12' E	11.1	10.1	60.0	68.1	1.8	5.4	4.5	75.0	93.1	1.8	0.6	0.5	121.0	27.9	0.8	2.0	1.9	13.0	34.4	0.7	
21	Venice	45° 25'	12° 20' E	23.4	18.5	259.0	257.7	4.9	14.1	11.5	265.0	258.0	3.0	5.6	5.2	50.0	34.6	1.5	17.9	16.8	61.0	55.4	2.0	
41	Vieste	41° 53'	16° 11' E	7.9	8.0	61.0	65.8	0.7	5.1	5.3	83.0	69.1	1.3	1.5	1.8	52.0	47.4	0.3	4.2	5.0	65.0	72.4	1.0	
18	Zarzis	33° 30'	11° 07' E	21.9	25.0	77.0	82.4	3.8	15.3	13.7	103.0	121.1	4.8	0.9	0.6	102.0	9.3	1.1	2.0	2.4	31.0	21.8	0.5	

Tabella 2: Per ogni giorno, sono mostrati la media del valore assoluto del bias di temperatura rispetto alle osservazioni disponibili, e la rms corrispondente, alle profondità di 10, 50, 100, 300, 600 m, che coprono lo strato superficiale (AW) e quello intermedio (LIW).

depth	28/03 NP=7	29/03 NP=6	30/03 NP=9	31/03 NP=7	02/04 NP=8	03/04 NP=10	06/04 NP=13	07/04 NP=11
10	0.28 (0.37)	0.19 (0.28)	0.40 (0.49)	0.29 (0.42)	0.29 (0.37)	0.46 (0.53)	0.26 (0.32)	0.33 (0.41)
50	0.44 (0.58)	0.22 (0.24)	0.26 (0.13)	0.26 (0.40)	0.21 (0.25)	0.49 (0.55)	0.10 (0.10)	0.32 (0.36)
100	0.55 (0.77)	0.19 (0.28)	0.59 (0.29)	0.12 (0.13)	0.27 (0.34)	0.90 (1.06)	0.07 (0.09)	0.44 (0.50)
300	0.12 (0.16)	0.07 (0.09)	0.03 (0.01)	0.10 (0.12)	0.01 (0.01)	0.04 (0.04)	0.09 (0.10)	0.17 (0.20)
600	0.11 (0.13)	0.07 (0.09)	0.01 (0.01)	0.18 (0.19)	0.01 (0.01)	0.1 (0.1)	0.11 (0.11)	0.09 (0.11)

depth	8/04 NP=8	9/04 NP=9	10/04 NP=8	13/04 NP=11	14/04 NP=7	15/04 NP=13	16/04 NP=9	17/04 NP=12
10	0.26 (0.32)	0.22 (0.30)	0.38 (0.44)	0.36 (0.46)	0.26 (0.36)	0.23 (0.31)	0.28 (0.37)	0.28 (0.37)
50	0.19 (0.23)	0.22 (0.24)	0.49 (0.60)	0.45 (0.47)	0.37 (0.48)	0.23 (0.28)	0.45 (0.53)	0.44 (0.58)
100	0.15 (0.20)	0.26 (0.34)	0.54 (0.59)	0.38 (0.46)	0.21 (0.31)	0.32 (0.36)	0.29 (0.38)	0.55 (0.76)
300	0.06 (0.07)	0.38 (0.49)	0.13 (0.17)	0.12 (0.14)	0.07 (0.14)	0.10 (0.15)	0.07 (0.13)	0.13 (0.17)
600	0.15 (0.16)	0.11 (0.05)	0.10 (0.10)	0.14 (0.15)	0.01 (0.01)	0.13 (0.20)	0.12 (0.13)	0.17 (0.20)

depth	18/04 NP=8	19/04 NP=9	20/04 NP=8	21/04 NP=11	23/04 NP=7	24/04 NP=13	25/04 NP=9	26/04 NP=12
10	0.39 (0.49)	0.75 (0.94)	0.40 (0.52)	0.40 (0.46)	0.35 (0.43)	0.29 (0.48)	0.52 (0.61)	0.37 (0.47)
50	0.24 (0.25)	0.99 (1.0)	0.52 (0.57)	0.31 (0.34)	0.47 (0.60)	0.36 (0.40)	0.56 (0.61)	0.23 (0.23)
100	0.28 (0.37)	1.36 (1.43)	0.78 (0.83)	0.30 (0.44)	0.41 (0.44)	0.32 (0.36)	0.52 (0.56)	0.05 (0.02)
300	0.20 (0.22)	0.45 (0.54)	0.31 (0.49)	0.17 (0.18)	0.11 (0.13)	0.39 (0.19)	0.2 (0.21)	0.02 (0.01)
600	0.16 (0.17)	0.13 (0.14)	0.18 (0.24)	0.06 (0.08)	0.08 (0.1)	0.12 (0.06)	0.14 (0.21)	0.06 (0.03)

Tabella 3: Come la Tabella 2, ma per la salinità

depth	28/03 NP=7	29/03 NP=6	30/03 NP=9	31/03 NP=7	02/04 NP=8	03/04 NP=10	06/04 NP=13	07/04 NP=11
10	0.25 (0.27)	0.15 (0.18)	0.22 (0.32)	0.51 (2.08)	0.61 (1.68)	0.53(1.2)	0.15 (0.17)	0.65 (1.6)
50	0.13 (0.21)	0.16 (0.27)	0.37 (0.44)	0.12 (0.24)	0.15 (0.18)	0.06 (0.06)	0.07 (0.07)	0.16 (0.21)
100	0.22 (0.25)	0.31 (0.31)	0.29 (0.31)	0.18 (0.19)	0.14 (0.17)	0.09 (0.11)	0.01 (0.02)	0.15 (0.17)
300	0.12 (0.15)	0.23 (0.21)	0.30 (0.19)	0.19 (0.11)	0.002 (0.0021)	0.01 (0.04)	0.03 (0.08)	0.04 (0.04)
600	0.067 (0.1)	0.01(0.01)	0.13 (0.07)	0.03 (0.1)	0.016 (0.016)	0.02 (0.01)	0.01 (0.01)	0.07 (0.11)

depth	8/04 NP=8	9/04 NP=9	10/04 NP=8	13/04 NP=11	14/04 NP=7	15/04 NP=13	16/04 NP=9	17/04 NP=12
10	0.21 (0.19)	0.41 (0.59)	0.1 (0.2)	0.36 (0.45)	0.18 (0.21)	0.66 (1.8)	0.46 (0.65)	0.76 (2.02)
50	0.08 (0.08)	0.16 (0.27)	0.23 (0.25)	0.22 (0.22)	0.10 (0.13)	0.18 (0.30)	0.35 (0.44)	0.18 (0.23)
100	0.04 (0.05)	0.10 (0.12)	0.12 (0.12)	0.15 (0.16)	0.16 (0.17)	0.21 (0.40)	0.15 (0.21)	0.14 (0.18)
300	0.03 (0.02)	0.06 (0.07)	0.13 (0.17)	0.06 (0.04)	0.05 (0.07)	0.03 (0.06)	0.02 (0.07)	0.01 (0.02)
600	0.02 (0.02)	0.04 (0.02)	0.14 (0.15)	0.03 (0.05)	0.01 (0.01)	0.009 (0.01)	0.10 (0.12)	0.55 (1.99)

depth	18/04 NP=8	19/04 NP=9	20/04 NP=8	21/04 NP=11	23/04 NP=7	24/04 NP=13	25/04 NP=9	26/04 NP=12
10	0.21 (0.23)	0.24 (0.30)	0.40 (0.52)	0.33 (0.22)	0.46 (0.39)	0.29 (0.48)	0.52 (0.61)	0.37 (0.47)
50	0.44 (0.47)	0.07 (0.09)	0.52 (0.57)	0.31 (0.48)	0.56 (0.59)	0.36 (0.40)	0.56 (0.61)	0.23 (0.23)
100	0.25 (0.32)	0.07 (0.08)	0.78 (0.83)	0.36 (0.54)	0.29 (0.31)	0.32 (0.36)	0.52 (0.56)	0.05 (0.02)
300	0.05 (0.08)	0.06 (0.07)	0.31 (0.49)	0.02 (0.03)	0.04 (0.04)	0.39 (0.19)	0.2 (0.21)	0.02 (0.01)
600	0.01 (0.04)	0.03 (0.03)	0.18 (0.24)	0.09(0.11)	0.012 (0.013)	0.12 (0.06)	0.14 (0.21)	0.06 (0.03)

Tabella 4: Numero dei giorni simulati da ogni singola simulazione di forecast

Giorno	Durata della simulazione in giorni
<i>Martedì</i>	14
<i>Mercoledì</i>	5
<i>Giovedì</i>	5
<i>Venerdì</i>	5
<i>Sabato</i>	5
<i>Domenica</i>	5
<i>Lunedì</i>	5

Tabella 5: Fasi principali della catena operativa

1. Acquisizione dati	G		<i>Download dei dati di SKIRON e NEMO</i>
2. Pre-processing	G		<i>Creazione di EXF, BC and IC in formato netcdf</i>
3. Pre-processing		C	<i>Trasformazione dei dati di input in formato binario per il MITgcm</i>
4. Fase principale		C	<i>Esecuzione del MITgcm</i>
5. Post-processing		C	<i>Trasformazione dei dati di output (binari) in formato netcdf</i>
6. Post-processing	G		<i>I file di outputs vengono rinominati ed archiviati</i>

Tabella 6: Tempi computazionali delle singole fasi della catena operativa MITO

	G - GIOTTO	C- CRESCO (800 cpu)
<i>BC - Boundary conditions</i>	20'	
<i>INIT (Tuesday) - Initialization</i>	17'	
<i>EXF – EXternal Functions</i>	35'	
<i>MITgcm on Tuesday</i>		13h45'
<i>MITgcm not Tuesday</i>		4h30'
<i>Creation NC data and some graphical outputs on tuesday</i>		1h10'
<i>Creation NC data and some graphical outputs not tuesday</i>		45'

3 Conclusioni

In questo primo anno sono state sviluppate ed estese attività iniziate nell'ambito dell'obiettivo a) del PAR 2015. Il modello ad alta risoluzione della circolazione del sistema Mediterraneo-Mar Nero, con inclusa la forzante di marea, ivi sviluppato (qui denominato MITO), è stato utilizzato per una simulazione dedicata di 40 giorni, forzata da dati realistici, che ha permesso di valutare le performance del modello in assenza di ogni assimilazione di dati sperimentali, e di effettuare dettagliati confronti con le osservazioni, sia in situ che da satellite. I risultati sono molto positivi; anche in assenza di assimilazione, i campi di temperatura e salinità, di SST, e di circolazione restano vicino a quelli osservati lungo tutto il periodo della simulazione, dimostrando che il modello non introduce alcun tipo di bias su queste scale temporali.

Parallelamente, il modello è stato inserito in una catena operativa che utilizza nuovi prodotti che si sono resi recentemente disponibili, come il nuovo modello previsionale a $1/24^\circ$ della circolazione Mediterranea (senza maree) di Copernicus, che consente un efficiente innestamento di MITO, che ne utilizza i dati necessari per l'inizializzazione e le condizioni al contorno sull'unico bordo aperto del dominio computazionale. Il sistema fa anche uso (alla superficie) di dati atmosferici ad alta risoluzione (5 km) prodotti dal modello SKIRON, reso disponibile dall'Università di Atene.

Dopo una fase di test delle procedure informatiche della nuova catena previsionale, dall'estate 2019 il sistema fornisce previsioni orarie a cinque giorni, che vengono rese disponibili sul sito web <https://giotto.casaccia.enea.it/mito/>. Parte dei risultati prodotti viene conservata, allo scopo di creare nel tempo un archivio della circolazione del sistema Mediterraneo, unico sia per l'alta risoluzione che per l'inclusione delle maree.

L'analisi della simulazione dedicata ha permesso di analizzare gli effetti ad alta frequenza della marea sulla circolazione locale in alcune zone del Mediterraneo. I principali risultati sono stati pubblicati nel recente lavoro di Palma et al [68]. Lo studio ha evidenziato alcuni aspetti inediti della dinamica del bacino, sintetizzati qui di seguito:

1. Le maree inducono una forte modulazione dei trasporti nei canali e negli stretti che separano i sottobacini principali del Mediterraneo. Mentre questo era prevedibile per il SoG e il Canale di Sicilia, si sono riscontrati effetti simili, non precedentemente evidenziati, nel canale di Corsica e nello Stretto d'Otranto;
2. Le maree agiscono modulando l'intensità delle correnti, come l'ATC nel Canale di Sicilia, e la corrente associata alla AW che attraversa il Canale di Corsica. Inoltre, in alcune zone costiere con fondale più basso si producono effetti locali più complessi. In tali regioni le maree danno origine a onde che vengono intrappolate da elementi topografici, determinando pattern di circolazione che ruotano in senso orario su scala temporale diurna. Il modello riproduce tali variabilità nel Canale di Sicilia, nella regione del Banco Avventura, in accordo con precedenti osservazioni [5], ma anche nella parte orientale del Canale di Corsica e dello Stretto di Otranto;
3. Il modello riproduce anche alcuni effetti non lineari indotti dalle maree e ciò viene evidenziato dall'analisi degli spettri di potenza della MKE nei canali di Sicilia e Corsica, nello Stretto di Messina e nell'Adriatico settentrionale. Si sono trovati infatti picchi significativi con periodi di 6 ed 8 ore che possono essere originati solo da interazioni non lineari tra le componenti di marea esplicitamente rappresentate nel modello. I periodi rilevati indicano la presenza di maree M4 (periodo di 6 ore) e di maree composte MK3 ($K1 + M2$; periodo di 8 ore), in tutte le aree citate. La presenza di tali componenti è stata osservata in passato nello Stretto di Messina e nell'Adriatico settentrionale, ma lo studio presente mostra che questa può essere una caratteristica più generale delle dinamiche di bacino.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] F. Bignami, E. Salusti, "Tidal Currents and Transient Phenomena in the Strait of Messina: a Review". L.J. Pratt (ed.) *The Physical Oceanography of Sea Straits*, Kluwer Academic Publishers, (1990), 95-124.
- [2] V. Barale, M. Gade (Eds.), "Remote Sensing of the European Seas". Springer, (2008).
- [3] J.C. Sanchez-Garrido, G. Sannino, L. Liberti, J. Garcia Lafuente, L.J. Pratt, "Numerical modelling of three-dimensional stratified tidal flow over Camarinal Sill, Strait of Gibraltar." *J. Geophys. Res.* 116, (2011), C12026.
- [4] T.S. Hopkins, E. Salusti, D. Settimi, "Tidal forcing of the water mass interface in the Strait of Messina." *J. Geophys. Res.* 89 (C2), (1984), 2013–2024.
- [5] G.F. Grancini, A. Michelato, "Current structure and variability in the Strait of Sicily and adjacent area." *Ann. Geophys.* 5, (1987), 75–88.
- [6] P.M. Poulain, M. Menna, R. Gerin, "Mapping Mediterranean tidal currents with surface drifters." *Deep-Sea Res. PT I* 138, (2018), 22-33.
- [7] C. Naranjo, J. Garcia-Lafuente, G. Sannino, J.C. Sanchez-Garrido, "How much do tides affect the circulation of the Mediterranean Sea? From local processes in the Strait of Gibraltar to basin-scale effects." *Prog. Oceanogr.* 127, (2014), 108-116.
- [8] G. Sannino, A. Carillo, G. Pisacane, C. Naranjo C, "On the relevance of tidal forcing in modelling the Mediterranean thermohaline circulation." *Prog. Oceanogr.* 134, (2015), 304-329.
- [9] E. Clementi, P. Oddo, M. Drudi, N. Pinaridi, G. Korres, A. Grandi, "Coupling hydrodynamic and wave models: first step and sensitivity experiments in the Mediterranean Sea." *Ocean Dynam.* 67, (2017), 1293-1312.
- [10] M. Tonani, A. Teruzzi et al, "The Mediterranean Monitoring and Forecasting Centre, a component of the MyOcean system." *Proceedings of the Sixth International Conference on EuroGOOS 4-6 October 2011, Sopot, Poland. First published 2014. Eurogoos Publication no. 30. (2014), ISBN 978-91-974828-9-9.*
- [11] J. Marshall, C. Hill, L. Perelman, A. Adcroft, "Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling." *J. Geophys. Res.* 102, (1997), 5733–5752.
- [12] J. Marshall, A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman, C. Heisey, "A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers." *J. Geophys. Res.* 102, (1997), 5753–5766.
- [13] J.M. Campin, A. Adcroft, C. Hill, J. Marshall, "Conservation of properties in a free-surface model." *Ocean Model.* 6, (2004), 221–244.
- [14] A. Adcroft, J.M. Campin, "Rescaled height coordinates for accurate representation of free-surface flows in ocean circulation models." *Ocean Model.* 7(34), (2004), 269–284.
- [15] J.L. Sanz, J. Acosta, M. Esteras, P. Herranz, C. Palomo, N. Sandoval, "Prospección geofísica del Estrecho de Gibraltar: resultados del Programa Hércules (1980-1983)." *Publ. espec. Inst. Esp. Oceanogr. Span. Inst. of Oceanogr.*, Madrid, (1991).
- [16] E. Gökaşan, H. Tur, B. Ecevitoglu, T. Görüm, A. Türker, B. Tok, F. Çağlak, H. Birkan, M. Şimşek, "Evidence and implications of massive erosion along the Strait of İstanbul (Bosphorus)." *Geo-Mar. Lett.* 25, (2005), 324-342.
- [17] E. Gökaşan, M. Ergin et al, "Factors controlling the morphological evolution of the Çanakkale Strait (Dardanelles, Turkey)." *Geo-Mar. Lett.* 28, (2007), 107-129.
- [18] G. Sannino, A. Sözer, E. Özsoy, "A high-resolution modelling study of the Turkish Straits System." *Ocean Dynam* 67, (2017), 397-432.
- [19] G. Kallos, S. Nickovic et al, "The regional weather forecasting system SKIRON: an overview." In: *Proceedings of the Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments, Athens, Greece, 15–17 October 1997, (1997), 109–122.*
- [20] A. Papadopoulos, P. Katsafados, "Verification of operational weather forecasts from the POSEIDON system across the Eastern Mediterranean." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci* 9, (2009), 1299-1306
- [21] G. Kallos, A. Papadopoulos, P. Katsafados, S. Nickovic, "Transatlantic Saharan dust transport: model simulation and results." *J Geophys Res* 111, (2006), D09204. <https://doi.org/10.1029/2005JD006207>

- [22] C. Stathopoulos, A. Kaperoni, G. Galanis, G. Kallos, "Wind power prediction based on numerical and statistical models." *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* 112, (2013), 25–38
- [23] P. de Ruggiero, E. Napolitano, R. Iacono, S. Pierini, "A high- resolution modelling study of the circulation along the Campania coastal system, with a special focus on the Gulf of Naples." *Cont. Shelf Res.* 122, (2016), 85–101
- [24] P. Gaspar, Y. Grégoris, J. Lefevre, "A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: tests at station Papa and long-term upper ocean study site." *J Geophys Res* 95, (1990), 16179–16193
- [25] C. Leith, "Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans." *Phys Fluids* 10, (1968), 1409–1416
- [26] J. Smagorinsky, "General circulation experiments with the primitive equations." *Mon Weather Rev* 91, (1963), 99–164
- [27] I. Orlandi, "A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows." *J Comput Phys* 21, (1976), 251–269
- [28] P. Bills, J. Noye, "An investigation of open boundary conditions for tidal models of shallow seas. Numerical modelling: applications to marine systems." Noye J (ed), Elsevier, vol. 145, (1987), 159–194
- [29] C.J. Vörösmarty, C.A. Federer, A.L. Schloss, "Potential evaporation functions compared on US watersheds: implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling." *J. Hydrol.* 207, (1998), 147–169
- [30] D. Wisser, S. Frothingham, E.M. Douglas, B.M. Fekete, C.J. Vörösmarty, A.H. Schumann, "Global irrigation water demand: variability and uncertainties arising from agricultural and climate data sets." *Geophys. Res. Lett.* 35, (2008), L24408
- [31] D. Wisser, B.M. Fekete, C.J. Vörösmarty, A.H. Schumann, "Reconstructing 20th century global hydrography: a contribution to the Global Terrestrial Network- Hydrology (GTN-H)." *Hydrol Earth Syst Sci* 14, (2010), 1–24
- [32] G.P. Weedon, G. Balsamo et al, "The WFDEI Meteorological Forcing Data." Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. (2018), <https://doi.org/10.5065/486N-8109>
- [33] W.R. Hamon, "Computation of direct runoff amounts from storm rainfall." In: *Proceedings of the Symposium on Surface Waters*, IAHS Publications, vol. 63, (1963), 52–62
- [34] V.M. Ponce, "Engineering hydrology: principles and practices." Prentice Hall, (1994)
- [35] M.G.G. Foreman, "Manual for tidal heights analysis and prediction." *Pacific Marine Sci. Re* 77–10, (1977).
- [36] R. Pawlowicz, B. Beardsley, S. Lentz, "Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE." *Computers & Geosciences* 28, (2002), 929–937.
- [37] G. Egbert, L. Erofeeva, "Otis – OSU tidal inversion software." (2002)
- [38] M.N. Tsimplis, R. Proctor, R.A. Flather, "A two-dimensional tidal model for the Mediterranean Sea." *J. Geophys. Res. Oceans* 100, (1995), 16223–16239.
- [39] C. Ferrarin, D. Bellafiore, G. Sannino, M. Bajo, G. Umgiesser, "Tidal dynamics in the inter-connected Mediterranean, Marmara, Black and Azov seas". *Prog Oceanog* 161, (2018), 102–115.
- [40] I.P. Medvedev, "Tides in the Black Sea: Observations and Numerical Modelling." *Pure Appl. Geophys.* 175, (2018), 1951–1969.
- [41] A. Blumberg, G.L. Mellor, "A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model", *Three Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal and Estuarine Sciences*, 4, (1987), 1–16, American Geophysical Union (AGU), Washington, D.C.
- [42] G.L. Mellor, "User's guide for a three-dimensional, primitive equation numerical ocean model", *Int. Rep. Program in Atmos. Ocean. Sci.*, 11–35, Princeton Univ., Princeton N.J. (2004).
- [43] D.T. Pugh, "Tides, Surges and Mean Sea-Level." John Wiley & Sons Ltd. (1996).
- [44] M.G.G. Foreman, R.F. Henry, R.A. Walters, V.A. Ballantyne, "A finite element model for tides and resonance along north coast of British Columbia." *J. Geophys. Res.* 98, (1993), 2509–2531.
- [45] C. Millot, "Circulation in the Western Mediterranean Sea." *J. Mar. Syst.* 20, (1999), 423–442.

- [46] A. Artegiani, D. Bregant, E. Paschini, N. Pinardi, F. Raichich, A. Russo, "The Adriatic Sea general circulation. Part II: Baroclinic circulation structure." *J. Phys. Oceanogr.* 27, (1997), 1515–1532
- [47] S. Yari, V. Kovačević, V. Cardin, M. Gačić, H.L. Bryden, "Direct estimate of water, heat, and salt transport through the Strait of Otranto." *J. Geophys. Res.* 117, (2012), C09009
- [48] M. Astraldi, S. Balopoulos, J. Candela, J. Font, M. Gacic, GP. Gasparini, B. Manca, A. Theocharis, J. Tintoré, "The role of straits and channels in understanding the characteristics of Mediterranean circulation." *Prog Oceanogr* 44, (1999), 65–108.
- [49] GP. Gasparini, DA. Smeed, S. Alderson, S. Sparnocchia, A. Vetrano, S. Mazzola, "Tidal and subtidal currents in the Strait of Sicily." *J. Geophys. Res.* 109, (2004), C02011
- [50] V. Artale, A. Provenzale, R. Santoleri, "Analysis of internal temperature oscillations of tidal period on the Sicilian continental shelf." *Cont. Shelf Res.* 9, (1989), 867–888
- [51] J. Abdennadher, M. Boukthir, "Numerical simulation of the barotropic tides in the Tunisian Shelf and the Strait of Sicily." *J. Mar. Syst.* 63, (2006), 162–182
- [52] RD. Ray, "Propagation of the overtide M4 through the deep Atlantic Ocean." *Geophys. Res. Lett.* 34, (2007), L21602
- [53] OB. Anderson, GD Egbert, SY Erofeeva, RD Ray, "Mapping nonlinear shallow-water tides: a look at the past and the future." *Ocean Dyn.* 56, (2006), 416–429
- [54] F. Jebri, B. Zakardjian, F. Birol, J. Bouffard, L. Jullion, C. Sammari, "Interannual variation of surface currents and transports in the Sicily Channel derived from coastal altimetry." *J Geophys Res: Oceans* 122, (2017), <https://doi.org/10.1002/2017JC012836>
- [55] AR. Robinson, J. Sellschopp et al. "The Atlantic ionian stream." *J Mar Syst* 20, (1999), 129–156
- [56] S. Cosoli, A. Drago, G. Ciracolo, F. Capodici, "Tidal currents in the Malta-Sicily Channel from high-frequency radar observations." *Cont. Shelf Res.* 109, (2015), 10–23
- [57] C. Albérola, S. Rousseau et al, "Tidal currents in the western Mediterranean Sea." *Oceanol. Acta* 18(2), (1995), 273–284
- [58] P-M. Poulain, E. Mauri et al, "On the dynamics in the southeastern Ligurian Sea in summer 2010." *Cont. Shelf Res.* 196, (2020), 10408
- [59] T. Ciuffardi, E. Napolitano, R. Iacono, F. Reseghetti, G. Raiteri, A. Bordone, "Analysis of surface circulation structures along a frequently repeated XBT transect crossing the Ligurian and Tyrrhenian seas." *Ocean Dyn.* 66 (6–7), (2016), 767–783.
- [60] L. Ursella, V. Kovačević, M. Gačić, "Tidal variability of the motion in the Strait of Otranto." *Ocean Sci.* 10, (2014), 49–67
- [61] AA. Androsov, BA. Kagan, DA. Romanenkov, NE. Voltzinger, "Numerical modelling of barotropic tidal dynamics in the strait of Messina." *Adv. Water Resour.* 25, (2002), 401–415
- [62] G. Quattrocchi, GJ. Gorman, MD. Piggott, A. Cucco, "M2, overtides and compound tides generation in the Strait of Messina: the response of non-hydrostatic, finite-element ocean model." *J. Coast. Res.* 75, (2016), 657– 661
- [63] E. Bohm, G. Magazzu, L. Wald, ML. Zoccolotti, "Coastal currents on the Sicilian shelf south of Messina." *Oceanol Acta* 10, (1987), 137–172
- [64] DP. Coiro, G. Troise, T. Ciuffardi, G. Sannino, "Tidal current energy resource assessment: the Strait of Messina test case." In: *International Conferences on Clean Electrical Power (ICCEP)*, (2013), 213–220
- [65] PM. Poulain, "Tidal currents in the Adriatic as measured by surface drifters." *J. Geophys. Res.* 118, (2013), 1434–1444
- [66] V. Malačić, D. Viezzoli, B. Cushman-Roisin, "Tidal dynamics in the northern Adriatic Sea." *J. Geophys. Res.* 105, (2000), 26265–26280
- [67] I. Janeković, M. Kuzmić, "Numerical simulation of the Adriatic Sea principal tidal constituents." *Ann. Geophys.* 23, (2005), 3207–3218
- [68] M. Palma, R. Iacono, G. Sannino, A. Bargagli, A. Carillo, BM. Fekete, E. Lombardi, E. Napolitano, G. Pisacane, MV. Struglia, "Short-term, linear and non-linear local effects of the tides on the surface dynamics in a new, high-resolution model of the Mediterranean Sea circulation." *Ocean Dyn.*, (2020), <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01364-6>.