

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea in Scienze Ambientali

**“Confronto della concentrazione di ossigeno disciolto lungo la colonna d’acqua nella regione del Golfo del Leone e nel Golfo di Biscaglia attraverso la fornitura di dati derivati da tre dataset differenti”**

Tesi di Laurea in Struttura e Dinamica dell’Atmosfera e dell’Oceano

Relatore:

Prof. Nadia Pinardi

Correlatore:

Dott. Simona Simoncelli

Presentata da:

Giorgia Ridolfi

Sessione III

Anno Accademico 2017/2018



*Ai miei genitori che ci sono sempre stati, a mia sorella, la mia compagna di vita, ai miei amici per le risate e la spensieratezza e soprattutto ad Alex per l'amore, il sostegno che mi ha trasmesso in tutto questo periodo e l'aiuto che mi ha dato.*

*Dedico tutto questo a voi, grazie di cuore.*

Abstract .....	6
Capitolo 1 .....	7
Introduzione.....	7
Il Mar Mediterraneo.....	9
La circolazione generale.....	13
Le principali masse d'acqua.....	15
Il .....	16
Nord Atlantico.....	16
Il Golfo di Biscaglia .....	19
Le banche dati oceanografiche.....	21
EMODnet-Chemistry.....	22
World DataBase.....	22
Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS) .....	23
Obbiettivi.....	25
Capitolo 2.....	26
Dati e Metodi.....	26
Le fonti di dati .....	26
Metodologia.....	31
Capitolo 3.....	34
Risultati .....	34
EMODnet Chemistry.....	34
World Ocean Atlas .....	45
Capitolo 4.....	59
Conclusioni.....	59

Bibliografia .....	61
RINGRAZIAMENTI.....	64

# Abstract

In questa tesi vengono analizzate le concentrazioni di Ossigeno Disciolto lungo la colonna d'acqua di due regioni differenti; il Golfo di Biscaglia nell'Oceano Atlantico e il Golfo del Leone nel Mar Mediterraneo Occidentale. I dati considerati sono dati storici e reperibili da diverse infrastrutture di ricerca quali EMODnet Chemistry (<http://www.EMODnet-chemistry.eu/>), il World Ocean Atlas (<https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>) e Il Servizio Marino Europeo Copernicus (<http://marine.copernicus.eu/>).

Lo scopo è stato quello di analizzare la variazione stagionale della concentrazione di ossigeno nelle due aree di studio lungo la colonna d'acqua. I tre data set sono stati inizialmente scaricati dai cataloghi online di ciascun portale per entrambe le regioni poi sono stati elaborati in modo da poterne analizzare la consistenza. Sono state prodotti profili medi stagionali, hovmoller plots con l'evoluzione inter-annuale dell'ossigeno disciolto lungo la colonna d'acqua e le mappe stagionali a profondità prestabilite (2000, 1000, 200 m e in superficie).

Per elaborare i dati è stato utilizzato il software Matlab.

In definitiva è stato possibile osservare che i tre data set non sono tutti coerenti tra loro ma che di fatto i primi due (EMODnet e WOA) si discostano dal terzo (CMEMS) in quanto essendo un modello che cerca di simulare il reale comportamento dell'ossigeno presenta ancora incertezze significative nel riprodurre le dinamiche di tale parametro. Mentre nell'Atlantico il profilo di variabilità stagionale non è realistico ma il range di massimo e minimo consiste con quanto osservato negli altri prodotti, nel Mediterraneo si è osservato che non solo non è realistico il profilo ma nemmeno il range, questo si osserverà nell'elaborazione dei profili e dei plots.

# Capitolo 1

## Introduzione

Lo scopo di questa tesi è analizzare la variabilità dell'ossigeno disciolto lungo la colonna d'acqua e vedere come varia in due aree di studio: il Golfo del Leone nel Mediterraneo nord-orientale ed il Golfo di Biscaglia nell'Atlantico settentrionale. Lo studio di queste due zone è stato importante perché sono dinamicamente differenti ed è stato quindi possibile averne una visione più completa. Inoltre si sono scelte queste due zone perché avviene la formazione di acque dense, per un processo noto come convezione profonda, secondo cui le masse d'acqua sprofondano a causa di variazioni termoline.

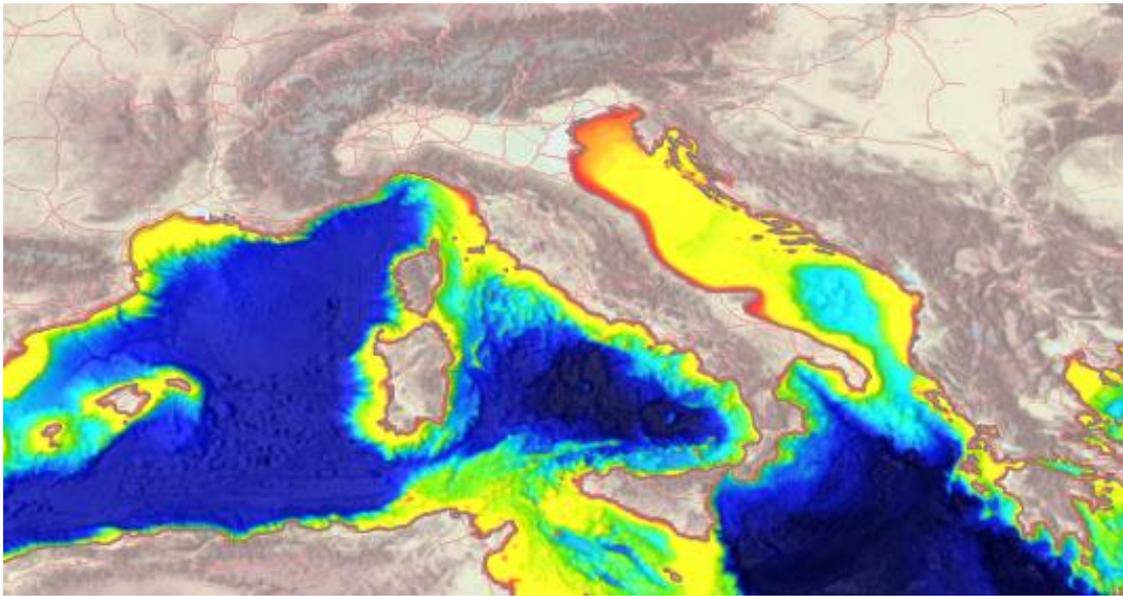
Nel caso del Golfo del Leone per esempio le acque più dense nascono soprattutto dal vento maestrale che quando soffia durante l'inverno, sottrae ingenti quantità di calore all'interfaccia aria-mare. Altro importante fattore che contribuisce ad aumentare la densità di queste acque è l'apporto di salinità da parte dell'acqua Levantina. Inoltre, la presenza di un giro ciclonico riduce la stratificazione e favorisce, quindi, il rimescolamento delle acque. In queste condizioni, lo strato superficiale di acqua tende a diventare sempre più denso e comincia a rimescolarsi con gli strati sottostanti fino a raggiungere il fondale.

L'Ossigeno Disciolto (OD) è un parametro molto importante che riflette la presenza di vita nell'ambiente acquatico. Il presente studio ha dunque l'obiettivo di analizzare l'evoluzione temporale a scala inter e intra-annuale (stagionale) dell'OD lungo la colonna d'acqua in due regioni dell'Oceano. L'OD è un forte indicatore di produttività biotica ed è correlato con la biomassa fitoplanctonica, viene immesso nell'acqua da processi fisici di scambio aria-mare e risalita di acque profonde. In termini quantitativi è espresso in funzione della temperatura e della salinità. Basse temperature determinano

un incremento della solubilità dell'ossigeno, mentre alta solubilità ne provoca una riduzione. Nel periodo invernale si riscontrano in superficie bassi valori di salinità, basse temperature e soprattutto elevata biomassa che attraverso i processi fotosintetici produce ossigeno. Nel periodo estivo, invece, aumenta la salinità, si riduce la biomassa microalgale e di conseguenza anche la produzione e la solubilità dell'ossigeno disciolto in superficie diminuisce. Sul fondale prevalgono i processi di degradazione della sostanza organica con conseguente consumo d'OD. L'utilizzazione dell'ossigeno è pertanto funzione della quantità di sostanza organica espressa dalla biomassa microalgale ed anche degli scambi con la superficie. E' un parametro molto importante per stabilire il grado di salute di bacino. I fattori influenzanti la quantità di OD sono: salinità, temperatura, attività fotosintetica, pressione atmosferica, percentuale di ossigeno atmosferico e presenza di sostanze organiche biodegradabili. La temperatura è molto importante perché incrementa in modo determinante la solubilità dell'ossigeno. I gas infatti sono tanto più solubili quanto più bassa è la temperatura. Nelle migliori condizioni l'OD dovrebbe avere concentrazioni vicine al 100% di saturazione. La forte attività fotosintetica può incrementare la quantità al 100%, al contrario la presenza di sostanze organiche biodegradabili o di materiali riducenti può far diminuire la sua concentrazione. La carenza di ossigeno porta direttamente alla riduzione dello spettro di specie. Ha inoltre conseguenze per la chimica dell'acqua: se manca l'ossigeno, le sostanze vengono decomposte dai batteri per via anaerobica, cioè senza ossigeno.

## Il Mar Mediterraneo

In questa tesi verranno mostrati ed analizzati dati e mappe sulle variazioni di ossigeno relativi in parte al Mar Mediterraneo, occorre quindi descrivere le dinamiche di questo bacino al fine di comprendere meglio le variazioni che verranno studiate.



*Figura 1 Immagine relativa al Mar Mediterraneo presa da EMODnet-Bathymetry (<http://www.EMODnet-bathymetry.eu/>)*

Il Mar Mediterraneo è un mare semi-chiuso e può essere diviso in due sotto-bacini, il Mediterraneo occidentale e orientale, rispettivamente ad ovest e ad est dello Stretto di Sicilia (Figura 1 Immagine relativa al Mar Mediterraneo presa da EMODnet-Bathymetry (<http://www.EMODnet-bathymetry.eu/>)). La circolazione del Mediterraneo è forzata dagli effetti combinati del vento e dei flussi di acqua e calore all'interfaccia aria-mare e provenienti dall'Oceano Atlantico attraverso lo stretto di Gibilterra. La circolazione di questo bacino è generalmente caratterizzata nelle regioni settentrionali da strutture di tipo ciclonico (ruotano in senso anti-orario) e nelle regioni meridionali da strutture anti-cicloniche (ruotano in senso orario) ad eccezione del Tirreno e del Mar Ionio settentrionale; infatti la circolazione del Mar Tirreno è dominata da strutture cicloniche di diversa

intensità e intermittenza mentre quella del Mar Ionio settentrionale è invece caratterizzata da inversioni di segno la cui frequenza è ancora oggi oggetto di studio da parte della comunità scientifica. Essendo un bacino di media latitudine, il Mar Mediterraneo è caratterizzato da un ciclo di formazione delle masse d'acqua, intermedie e profonde, influenzato dall'entrata dell'Atlantic Water (AW) dallo Stretto di Gibilterra. L'acqua meno salata proveniente dall'Atlantico caratterizza lo strato superiore di circa 50/100 m che sovrasta la Levantine Intermediate Water (LIW) formata nel bacino levantino. Le masse d'acque profonde sono distinte tra le parti occidentale e orientale del bacino poiché la soglia dello stretto di Sicilia ha una profondità massima di 500 m. Le acque profonde del Mediterraneo occidentale e quelle del Mediterraneo orientale sono formate rispettivamente nell'area del Golfo del Leone e nel Mare Adriatico meridionale.

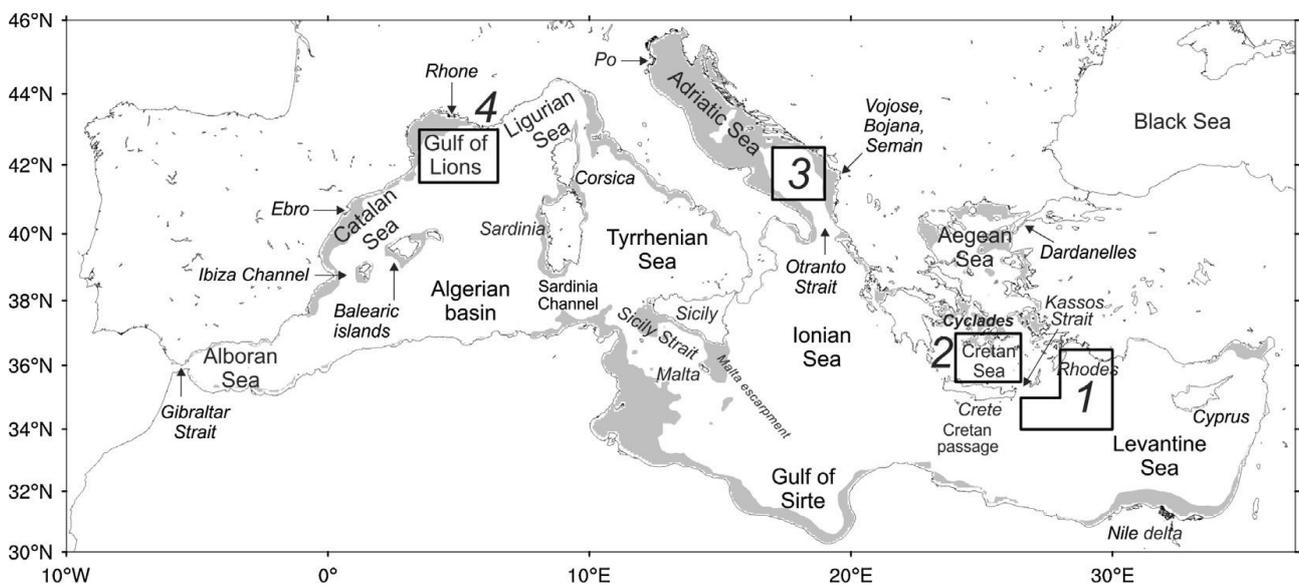


Figura 2 Geometria e nomenclatura del Mar Mediterraneo. Le zone più scure indicano una profondità inferiore a 200m. Le quattro caselle (1-4) sono utilizzate per calcoli di formazione di masse d'acqua, estratto da Pinardi et al. (2013).

Il forzante principale della circolazione del Mediterraneo è quello atmosferico: esso presenta un'elevata complessità ed una forte variabilità stagionale. L'atmosfera forza le masse oceaniche trasferendo momento, calore ed acqua attraverso la superficie dell'oceano: i flussi di momento, calore ed acqua all'interfaccia aria-mare mostrano una variabilità a scala inter-annuale (Pinardi, 1993) molto

accentuata. Le aree che presentano le maggiori perdite di calore sono il giro del Golfo del Leone, il giro di Rodi, il Mar Egeo settentrionale e il Mar Adriatico, dove si formano le acque profonde ed intermedie. L'altro forzante della circolazione è il flusso entrante di acqua atlantica dallo stretto di Gibilterra, che è uno dei termini che contribuiscono al bilancio d'acqua del Mediterraneo. Tuttavia questo mare ha un bilancio di acqua negativo e questo produce una circolazione di tipo anti estuarino in corrispondenza dello stretto di Gibilterra, qui le acque superficiali (meno salate) entrano nel Mediterraneo mentre quelle profonde (più salate) fuoriescono.

La circolazione del Mediterraneo può essere suddivisa in tre componenti principali in funzione delle proprie scale spazio-temporali: 1) la circolazione a scala di bacino (comprendente la circolazione termoalina); 2) circolazione a scala di sotto-bacino; 3) la circolazione di meso-scala.

A scala di bacino, la circolazione termoalina è costituita da tutti i movimenti verticali e orizzontali delle masse d'acqua dovuti a differenze di densità. Questa circolazione è schematicamente rappresentabile come un "nastro trasportatore", a sua volta suddivisibile in due componenti:

- la componente zonale, che rappresenta le acque atlantiche in ingresso dallo stretto di Gibilterra: queste, procedendo verso la parte orientale del bacino del Mediterraneo, si trasformano in Acqua Intermedia Levantina (LIW) nella zona compresa tra Cipro e Rodi; in questo punto la LIW inverte la propria direzione muovendosi verso la parte occidentale del Mediterraneo e fuoriuscendo dallo stretto di Gibilterra.
- La componente meridionale che è forzata nel Mediterraneo orientale dalla formazione di acque profonde nell'Adriatico meridionale e nel Mar Egeo, mentre nel Mediterraneo occidentale è forzata dalla convezione di acqua profonda di origine oceanica nella zona del Golfo del Leone. Questo ramo della circolazione termoalina presenta una variabilità a scala interannuale.

Dunque il “motore” della circolazione termoalina è rappresentato dai processi di formazione delle acque intermedie e profonde; tali processi sono innescati principalmente da tre fattori:

1. l'arrivo di masse continentali d'aria fredda e secca sul mare;
2. la presenza di una circolazione ciclonica, che rende la stratificazione della colonna d'acqua molto debole al centro del vortice;
3. l'aumento di salinità dell'acqua, dovuto ad un fenomeno di formazione del ghiaccio o alla risalita d'acqua salata da strati profondi.

Nel bacino occidentale la formazione di acque profonde si verifica nella zona del Golfo del Leone e si genera come risposta all'azione invernale del Maestrone, che estrae calore all'interfaccia aria-mare, fino a 1000 W/m<sup>2</sup> (Pinardi, 1993).

Nel bacino orientale sono due le zone di formazione di acque profonde, una nell'Adriatico settentrionale e la seconda nell'Adriatico meridionale. Recentemente è stato osservato che il Mar Egeo ha interrotto la produzione di acque profonde e il Mar Adriatico è nuovamente tornato ad essere l'unica zona che le produce nel Mediterraneo orientale. Nel Mediterraneo la principale zona di formazione di acque intermedie è localizzata in corrispondenza del giro di Rodi, dove nel tardo periodo invernale (febbraio-marzo) si origina la LIW (acqua intermedia Levantina), che si propaga successivamente in direzione Ovest. Superato il passaggio di Creta si assiste ad una biforcazione della LIW: un ramo dirige verso Nord, superando lo Stretto di Otranto, mentre l'altro supera il Canale di Sicilia per raggiungere il Mar Tirreno. Qui la corrente assume una dinamica ciclonica prima di fuoriuscire dal bacino del Tirreno lambendo la costa meridionale della Sardegna: in questa zona si assiste ad un'ulteriore diramazione della LIW, una parte della quale contribuisce alla formazione di acque profonde nel Golfo del Leone, mentre la rimanente massa d'acqua fuoriesce dallo Stretto di Gibilterra.

# La circolazione generale

La circolazione generale superficiale ed intermedia del Mar Mediterraneo è stata descritta da Pinardi et al. (2013) analizzando dati di rianalisi che coprono il periodo 1987-2007. La circolazione superficiale media, mostrata in Figura 3, è caratterizzata dall'Acqua Atlantica (AW) che entra da Gibilterra nel mare di Alboran dove si forma il fronte di Almera-Oran, una struttura di circolazione media ben definita che si trova tra il giro di Alboran orientale e un vortice ciclonico. Dopo il fronte di Almera-Oran si definiscono due correnti intensificate, una verso nord in direzione del canale di Ibiza e l'altra che forma la corrente algerina che si muove lungo la costa in direzione est. Grandi vortici anticiclonici crescono e persistono per diversi mesi, dominando il campo di flusso e muovendosi lentamente in tutte le direzioni. Il segmento che scorre verso nord dopo il fronte di Almera-Oran alimenta il WMMC (Western Mid-Mediterranean Current), ramificandosi intorno alle isole di Ibiza e Maiorca. Dopo Maiorca, il WMMC si fonde con il confine meridionale della struttura ciclonica che domina la circolazione a nord dei 40° N, chiamato il Giro del Golfo del Leone. A est delle Isole Baleari, il WMMC fluisce nell'oceano aperto in direzione est girando verso sud lungo le coste occidentali della Sardegna e formando lì una corrente intensificata, la più grande di ampiezza nel Mediterraneo occidentale.

La corrente algerina si dirama in tre parti, due rami entrano nello stretto di Sicilia e un terzo scorre verso nord-est nel Mar Tirreno. Nel mezzo del Tirreno il confine orientale del SWTG (South-Western Tyrrhenian Gyre) forma una corrente nord-ovest saldata, la Middle Tyrrhenian Current (MTC). Intorno alla Corsica invece ci sono due correnti dirette verso nord, la prima parte dal confine Giro del Golfo del Leone e la seconda è un segmento dell'MTC.

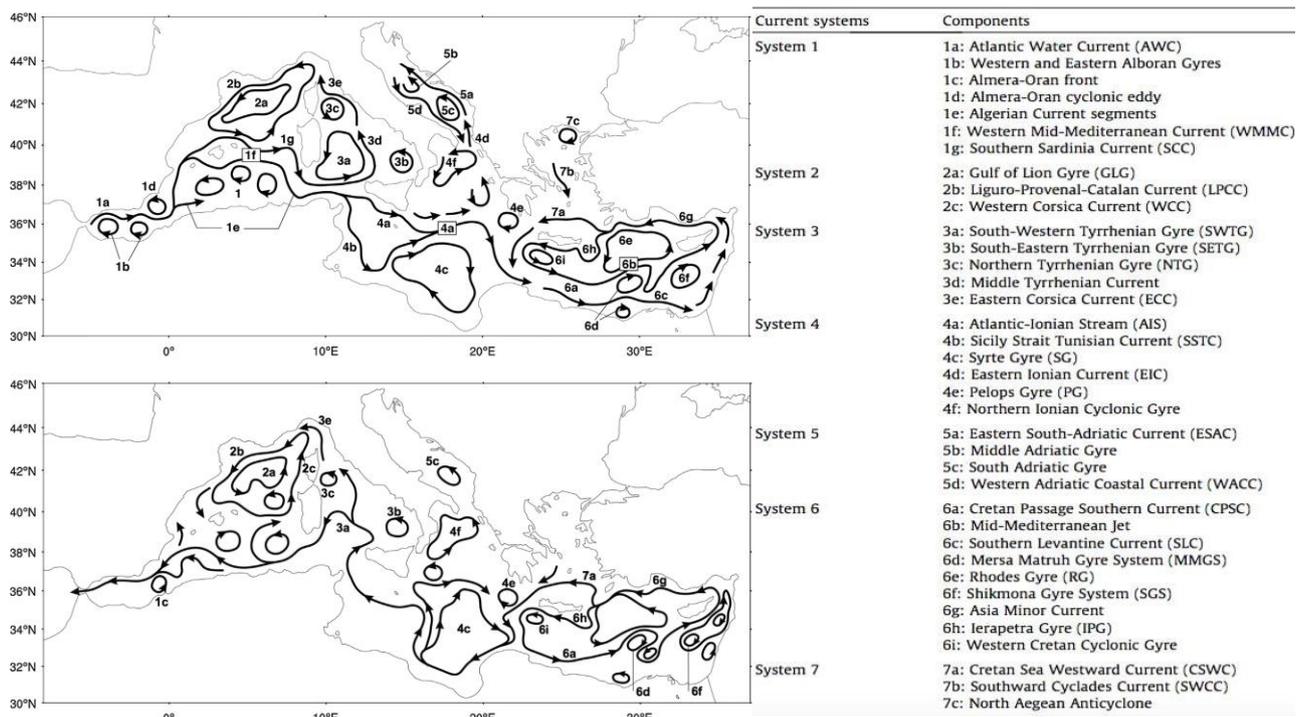


Figura 3 Rappresentazione della circolazione superficiale (in alto) e dello strato intermedio (in basso) del Mar Mediterraneo, estratta da Pinardi et al. (2013). (A destra) La nomenclatura delle strutture della circolazione raffigurate a sinistra.

La struttura della circolazione a profondità intermedia, tra 200 e 300 m (Figura 3) può essere considerata rappresentativo dello strato della LIW nel Mediterraneo orientale. A media profondità la circolazione è simile alla superficie ad eccezione del flusso di ritorno della LIW nello stretto di Sicilia. La circolazione dello strato di LIW è una componente del flusso di ricircolo che esce a Gibilterra (Pinardi et Masetti, 2000), e quindi generalmente scorre nella direzione opposta al flusso superficiale nello stretto di Sicilia. Il percorso della LIW emerge dopo il passaggio di Creta dal Sirte Gyre ed è caratterizzato da due rami principali che iniziano approssimativamente ai 6°, uno diretto a nord, verso il giro del Golfo del Leone, e il secondo verso ovest, direttamente attraverso il bacino algerino, verso lo stretto di Gibilterra.

# Le principali masse d'acqua

Dal punto di vista della dinamica delle masse d'acqua nel Mare Mediterraneo si possono distinguere:

- l'acqua atlantica modificata (Modified Atlantic Water – MAW), caratterizzata da una bassa salinità (da 36.5 psu a 38.5 psu rispettivamente ad Ovest e ad Est del Canale di Sicilia). Tale massa d'acqua penetra nel Mediterraneo attraverso lo stretto di Gibilterra e forma uno strato di profondità non superiore ai duecento metri. Procedendo da Ovest verso Est la MAW tende ad inabissarsi sempre più a causa dell'aumento di densità causato dall'evaporazione;
- l'acqua levantina intermedia (Levantine Intermediate Water – LIW), caratterizzata da un range di temperatura compreso tra 15 e 17.5°C e da un intervallo di salinità compreso tra 38.95 e 39.1 psu. La formazione di questa massa d'acqua avviene nel bacino Levantino orientale, in modo particolare nella zona del giro di Rodi, attraverso processi di convezione intermedia, ossia rimescolamento convettivo sino ad una profondità di 200-300 metri, che si verificano nel tardo periodo invernale. Successivamente si ha una propagazione della LIW verso il bacino occidentale del Mare Mediterraneo con il raggiungimento di una profondità di 400-500 metri nella zona più occidentale del bacino
- l'acqua mediterranea profonda (Mediterranean Deep Water – MDW), caratterizzata da un intervallo di temperatura compreso tra 12.6 e 13.3 °C e salinità compresa tra 38.4 e 38.6 psu. Nel bacino occidentale la MDW si forma nel Golfo del Leone durante il periodo invernale e prende il nome di Western Mediterranean Deep Water (WMDW). Nel bacino orientale la MDW si forma nell'Adriatico e nell'Egeo prendendo il nome di Eastern Mediterranean Deep Water (EMDW). Dal momento che la EMDW raggiunge profondità superiori a quelle del Canale di Sicilia non entra mai in contatto con la WMDW. Quest'ultima fuoriesce dallo stretto di Gibilterra dopo essersi ulteriormente rimescolata con la LIW.

# Il Nord Atlantico

Gli oceani hanno le loro stagioni, date dai cambiamenti di condizioni atmosferiche come i venti e le temperature. Poiché la superficie del mare è a contatto diretto con l'atmosfera, la sua temperatura segue gli schemi stagionali atmosferici. L'acqua possiede tuttavia una capacità termica specificamente elevata e impiega pertanto molto tempo per modificare la propria temperatura. Quando si tratta di un'immensa massa d'acqua come quella di un oceano, il tempo è ancora maggiore. A seconda della stagione, la colonna d'acqua si espande quando il tempo è mite e si contrae quando è freddo. L'espansione e la contrazione dell'acqua dovute alla variazione di temperatura determinano fluttuazioni di altezza della superficie marina, la quale può subire una variazione da 10 a 15 centimetri tra la primavera, dopo avere perduto calore durante l'inverno, e l'autunno, dopo avere assorbito calore durante l'estate. Inoltre, la corrente subisce variazioni non solo di altezza ma anche spaziali, motivo per cui la posizione della Corrente del Golfo quando lascia la costa cambia leggermente nel corso dell'anno. Oltre al fattore climatico l'Oceano è molto importante anche per le sue correnti. La Corrente del Golfo è parte di un sistema di correnti a rotazione oraria dell'Atlantico del Nord, noto come Circuito nord-atlantico.

Le acque che alimentano questa corrente provengono dalla costa occidentale del Nord Africa, per effetto dei venti alisei, la corrente nord-equatoriale si sposta verso il Mar dei Caraibi, si restringe quando attraversa le isole caraibiche e il Canale dello Yucatan, comprimendosi e acquistando forza nel passaggio. La Corrente del Golfo acquista ancora maggiore forza quando incontra la Corrente delle Antille, divenendo una potente corrente sottomarina che procede parallela alla costa orientale degli Stati Uniti per poi immettersi in aperto Oceano Atlantico, in direzione nordorientale. Fluendo nelle acque oceaniche più profonde, questa, forma ampi meandri e si divide in diverse correnti. La più ampia di queste è la Corrente nord-atlantica. Queste correnti sono governate da una combinazione di fattori: la rotazione terrestre, i venti e le differenze di temperatura e concentrazione salina

dell'acqua (note come "gradienti termoalini"), come nel caso di quella nord-atlantica. Le correnti generate dal vento sono il risultato dell'attrito tra la superficie dell'acqua e l'atmosfera. Investendo la superficie marina, il vento trascina con sé l'acqua producendo una corrente rapida la cui velocità diminuisce gradualmente con la profondità. La combinazione degli alisei che spirano verso ovest e dei venti di ponente che spirano verso est produce la rotazione oraria del Nord Atlantico. Tuttavia, alcune correnti che si separano dalla Corrente del Golfo non seguono questo percorso, ma procedono verso nord. In questo percorso verso nord, l'acqua calda evapora, il contenuto salino aumenta e la temperatura media diminuisce. Di conseguenza, l'acqua del mare diventa sempre più densa e inizia ad abbassarsi raggiungendo latitudini più alte. Le fredde correnti del nord confluiscono quindi in un sistema di correnti rotatorio noto come Circuito subpolare nord-atlantico, la cui componente con direzione sud è rappresentata dalla Corrente del Labrador. Questa corrente fredda incontra la Corrente del Golfo in corrispondenza dei Grandi Banchi a sud-est di Terranova. Successivamente, il suo flusso diviene parallelo e di direzione opposta alla Corrente del Golfo. Questa corrente più fredda e densa prosegue quindi il proprio percorso verso sud attraversando la Corrente del Golfo e scorrendo sotto la sua superficie calda. Il movimento continuo delle acque del Nord Atlantico è parte della circolazione termoalina globale, nota anche come Grande Nastro Trasportatore Oceanico.

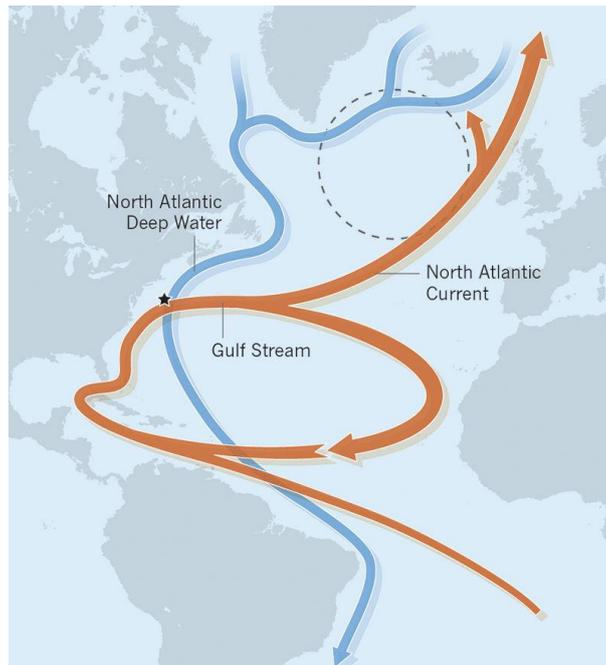


Figura 4 Immagine che descrive il moto della Corrente del Golfo (presa da internet).

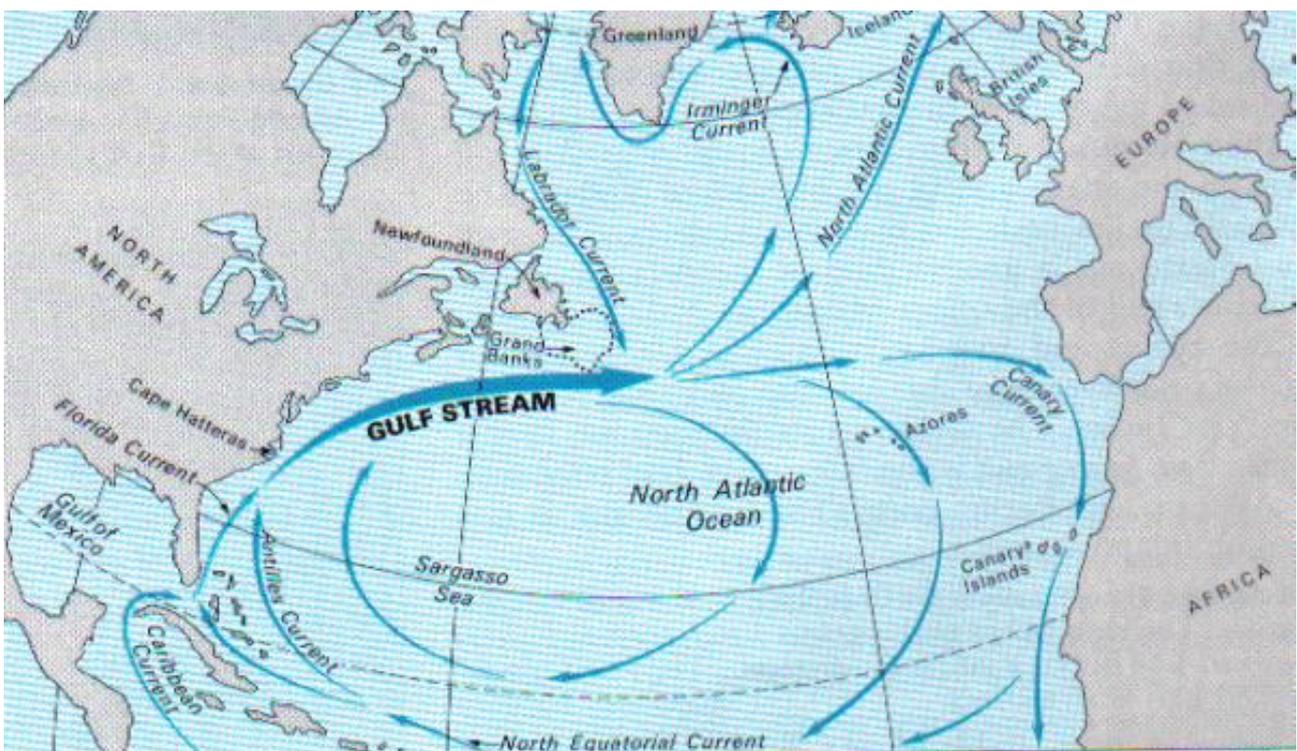


Figura 5 Zoom relativo al moto delle diverse correnti che circolano nell'Atlantico come la Corrente del Golfo e la Corrente nord-orientale. Immagine presa da esa (European Space Agency - [www.esa.int](http://www.esa.int)).

# Il Golfo di Biscaglia

Il Golfo di Biscaglia può essere considerato una baia oceanica aperta. La circolazione oceanica generale è debole e la presenza di vortici ciclonici e anticiclonici è frequente. Un flusso costante verso l'esterno è evidente, ma i cambiamenti stagionali mostrano fasi diverse in diverse posizioni lungo la scarpata continentale. Le correnti residue sono principalmente regolate dal vento, dalle maree nella parte settentrionale e dalla densità dell'acqua. L'idrologia è anche molto eterogenea nella zona.

Nella baia possiamo anche distinguere due settori nord e sud, con la baia centrale che appare come una massa d'acqua ben definita. Da 600 a 1500 m, appaiono le masse d'acqua di origine mediterranea (MW), da 1500 a 3000 m, l'acqua profonda dell'Atlantico nord-orientale e sotto 4000 m appaiono acque antartiche.

L'area centrale (oceanica) del Golfo di Biscaglia è caratterizzata da una debole circolazione anticiclonica. La circolazione diventa ciclonica vicino al margine continentale. Sebbene le correnti geostrofiche medie appaiano più forti negli strati superficiali, rimangono deboli. Queste correnti deboli sono generalmente variabili e la caratteristica principale dell'area oceanica è la frequente presenza di vortici ciclonici e anticiclonici che sono il risultato delle instabilità delle correnti continentali che interagiscono con la topografia di fondo. Sebbene generalmente deboli, le correnti residue tendono a mostrare caratteristiche ben definite nelle direzioni verticale, lungo e trasversale e variano anche stagionalmente.

In inverno si osserva l'inversione termica con le acque più fredde nello strato superficiale, ma è più pronunciata di fronte all'estuario della Loira. Questa inversione verticale è dovuta principalmente alla presenza nello strato superficiale di masse d'acqua fredda meno salina di origine continentale. Nell'area settentrionale i processi di rimescolamento verticale contribuiscono al trasferimento di energia al di sotto del termocline e di conseguenza all'aumento della temperatura dell'acqua. In questa

zona la temperatura di fondo è più alta e la temperatura della superficie è inferiore a quella delle regioni meridionali.

Diversi cambiamenti possono essere osservati in autunno: diminuzione della temperatura in superficie e aumento della temperatura di fondo e un gradiente termico più profondo. Nella parte settentrionale la colonna d'acqua è quasi omogenea. Si può sospettare un minimo intermedio debole. In inverno e in primavera, l'idrologia della piattaforma continentale è principalmente caratterizzata dalla presenza di acque fredde provenienti dagli estuari della Loira, della Gironda e di Adour. Queste acque fredde a bassa salinità sono responsabili dell'inversione dei profili verticali di temperatura e della presenza di forti gradienti verticali. Queste masse d'acqua negli strati superficiali coprono occasionalmente gran parte della piattaforma continentale.

Il termoclino stagionale appare ad aprile nella zona occidentale e raggiunge la zona costiera a maggio. Lo sviluppo del termoclino consente l'identificazione di una struttura interessante nominata "bourrelet froid" (piscina fredda). Si tratta di una massa di acqua fredda relativamente omogenea (la temperatura non raggiunge mai i 12 ° C) che si estende dalla Bretagna meridionale fino alla latitudine dell'estuario della Gironda, centrata sulla zona di 100 m di profondità. Questa struttura è presente tutto l'anno con deboli variazioni di temperatura ed è caratterizzata da fluttuazioni inter-annuali relativamente basse. Due caratteristiche appaiono chiaramente: c'è una marcata tendenza stagionale e un chiaro gradiente di latitudine con venti più forti nella parte settentrionale della baia. Queste caratteristiche del vento potrebbero anche contribuire alle particolarità del Golfo di Biscaglia.

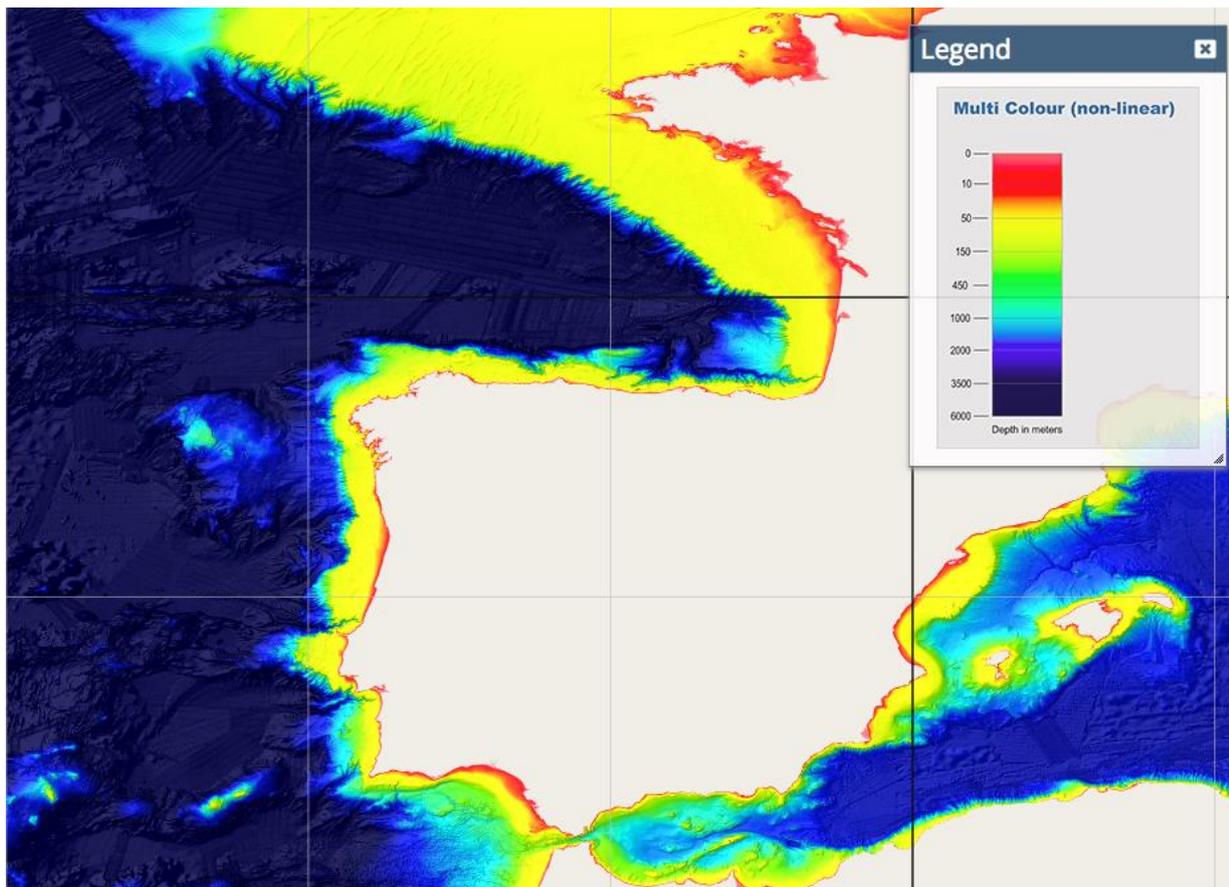


Figura 6 Topografia del Golfo di Biscaglia nell'Atlantico Settentrionale presa da EMODnet-Bathymetry (<http://www.EMODnet-bathymetry.eu/>)

## Le banche dati oceanografiche

Accedere ai dati marini è di vitale importanza per la ricerca marina e per altri studi come la comprensione dei cambiamenti climatici e dell'ingegneria offshore, però il sistema di osservazione marino è molto frammentato, infatti nei paesi europei sono stati identificati oltre 600 istituti scientifici che raccolgono dati utilizzando vari sensori a bordo di navi da ricerca, sottomarini, piattaforme fisse e di deriva, aerei e satelliti, per misurare parametri fisici, geofisici, geologici, biologici, chimici ecc. I dati raccolti non sono né facilmente accessibili, né standardizzati e non sono sempre convalidati. In particolare i dati biogeochimici, quali l'OD, sono particolarmente difficili da reperire, ma con l'avvento di nuove infrastrutture europee quali EMODnet e il Servizio Marino Copernicus, in

aggiunta al World Ocean Data Base esistente fin dalla fine degli anni novanta, è stato possibile accedere a prodotti di OD di varia tipologia per le 2 aree di studio.

## **EMODnet-Chemistry**

In ambito europeo è stata istituito nel 2009 EMODnet (European Marine Observation and Data network ), un sistema standardizzato per la gestione e distribuzione di dati marini in vari ambiti tematici (batimetria, geologia, fisica, chimica, attività umane, biologia, habitat di fondo mare). L'obiettivo è quello di mettere in rete e migliorare le infrastrutture dati marini attualmente esistenti.

EMODnet (European Marine Observation and Data Network) è un'iniziativa a lungo termine sui dati marini sostenuta dalla Commissione europea per garantire che i dati marini europei diventino facilmente accessibili, interoperabili e liberi dalle restrizioni d'uso. Il portale di EMODnet-Chemistry è un sotto portale gestito per lo più da un gruppo di agenzie di monitoraggio marino e da centri di ricerca con lo scopo di favorire sempre di più la reperibilità e la conoscenza di dati. I dati riguardano principalmente fenomeni di eutrofizzazione, contaminanti e rifiuti marini. I dati sono disponibili nei formati ODV (Ocean Data View) e NetCDF (CF). Questo portale consente agli utenti di recuperare set di dati dai data center distribuiti in modo comune tramite un unico portale. Una volta selezionati i propri dati con le caratteristiche scelte è possibile scaricarli inserendoli in un apposito carrello. Di solito non tutti i dati sono facilmente scaricabili ma per alcuni bisogna richiedere un 'autorizzazione al sito, in base anche al tipo d'uso che si intende fare. Dal portale di possono scaricare anche prodotti quali mappe di principali parametri biogeochimici, quali nutrienti, clorofilla e OD.

## **World Ocean DataBase**

Il World Ocean Database, un database nel quale vengono raccolti tutti i dati emessi dal N.O.A.A. (National Oceanic and Atmospheric Administration). Il N.O.A.A. è un ente spaziale statunitense, attivo dal 1970 nei programmi per satelliti meteorologici; si occupa essenzialmente dello studio del

clima sia a livello planetario sia a livello degli Stati Uniti, questo ente raccoglie tutti i dati di tutto il mondo che arrivano direttamente dal sistema di trasmissione satellitare poi li mette a disposizione attraverso il World Ocean Database in modo che chiunque possa averne accesso. Non analizza solo le condizioni meteorologiche ma anche le correnti marine e la dinamica atmosferica che può influenzare il clima attuale. Da qui il World Ocean Atlas che è un insieme di campi climatologici, ottenuti mediante la tecnica dell'analisi oggettiva, di temperatura in situ, salinità, ossigeno disciolto, utilizzo di ossigeno apparente (AOU), percentuale di saturazione di ossigeno, fosfato, silicato e nitrato a livelli di profondità standard per periodi di computazione annuali, stagionali e mensili per l'Oceano Mondiale. Comprende anche i campi statistici associati dei dati del profilo oceanografico osservati interpolati ai livelli di profondità standard.

Anche il World Ocean DataBase è un importante infrastruttura che mette a disposizione dei suoi richiedenti tutti i dati necessari. Anche in questo caso i dati possono essere scaricati in formato Netcdf ma non solo. La particolarità del WOA è che mette a disposizione prodotti elaborati, quali climatologie ottenute dal WODB, agevolando certe tipologie di utenti permettendo un utilizzo e trattamento più immediato dell'informazione.

## **Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS)**

Un'altra infrastruttura europea da cui attingere dati marini è il Servizio Marino Europeo Copernicus istituito nel 2015 (<http://marine.copernicus.eu/>) che fornisce dati in situ, da satellite e da modello.

Copernicus è il programma di osservazione della terra dell'Unione europea, che guarda al nostro pianeta e al suo ambiente per il massimo beneficio di tutti i cittadini europei. Offre servizi di informazione basati sull'osservazione della Terra satellitare e dati in situ (non spaziali). Il programma è coordinato e gestito dalla Commissione europea. Vaste quantità di dati globali dai satelliti e dai

sistemi di misurazione terrestri, aerei e marittimi vengono utilizzate per fornire informazioni che aiutano i fornitori di servizi, le autorità pubbliche e altre organizzazioni internazionali a migliorare la qualità della vita dei cittadini europei. I servizi di informazione forniti sono accessibili a tutti suoi utenti, come anche le altre infrastrutture citate sopra. Copernicus è stato specificamente progettato per soddisfare le esigenze degli utenti. Sulla base di osservazioni satellitari e in situ, i servizi Copernicus forniscono dati e previsioni quasi in tempo reale a livello globale che possono essere utilizzati anche per esigenze locali e regionali, per aiutarci a capire meglio il nostro pianeta e gestire in modo sostenibile l'ambiente in cui viviamo. I set di dati sono resi comparabili e ricercabili, garantendo così il monitoraggio continuo dei cambiamenti in atto nell'ambiente; i modelli vengono esaminati e utilizzati per creare previsioni dell'oceano e dell'atmosfera.

# Obbiettivi

Lo scopo della tesi è quello di analizzare la variabilità stagionale ed inter-annuale in due regioni distinte dell'oceano dell'Ossigeno Disciolto lungo la colonna d'acqua utilizzando tipologie di prodotti diversi ottenuti da tre fonti distinte:

1. EMODnet Chemistry
2. WOA2013
3. Copernicus

Le aree di studio sono state il Golfo del Leone e il Golfo di Biscaglia.

Il Golfo del Leone, nel Mediterraneo occidentale, perché è una delle principali zone dove avvengono le formazioni di masse d'acqua, e il Golfo di Biscaglia, nell'Atlantico settentrionale per avere anche una visione del differente comportamento di tale parametro nell'Oceano Atlantico.

La tesi è strutturata in quattro capitoli. Dopo un'introduzione alle dinamiche e le caratteristiche delle diverse zone considerate, la descrizione del comportamento dell'ossigeno in ambiente marino e le principali infrastrutture dati da cui reperire dati e prodotti del parametro in esame, il secondo capitolo descriverà in specifico i prodotti e le metodologie utilizzati.

Il terzo capitolo mostrerà i risultati ottenuti dallo studio, quindi i grafici, gli hovmoller e le mappe orizzontali.

Infine l'ultimo capitolo contiene le conclusioni di questo lavoro.

# Capitolo 2

## Dati e Metodi

### Le fonti di dati

L'analisi dell'Ossigeno Disciolto si basa su prodotti provenienti da tre diverse fonti: EMODnet Chemistry; World Ocean Atlas; Copernicus Marine Environment Monitoring Service.

All'interno delle iniziative citate i dati marini vengono rielaborati per generare prodotti pronti all'utilizzo. Scopo della tesi è anche quello di confrontare i prodotti relativi alla distribuzione spazio-temporale dell'ossigeno disciolto nelle due zone d'interesse, verificandone la consistenza nel riprodurre l'andamento stagionale ed inter-annuale.

**EMODnet Chemistry** fornisce prodotti liberamente accessibili mediante un catalogo online (Figura 7, <http://www.EMODnet-chemistry.eu/products/catalogue#>).

Il prodotto utilizzato per il Mediterraneo nord occidentale si chiama “**Mediterranean Sea DIVA 4D analysis of Water\_body\_dissolved\_oxygen\_concentration**” (<http://www.EMODnet-chemistry.eu/products/catalogue#/metadata/3a857428-637c-4c4c-8033-2c89f5a0abe9>) e corrisponde ad una serie temporale di analisi decadali a risoluzione spaziale di 0.125 gradi per tutto il Mar Mediterraneo e per ciascuna stagione:

- Inverno (Gennaio-Marzo),
- Primavera (Aprile-Giugno),
- Estate (Luglio-Settembre),
- Autunno (Ottobre-Dicembre).

Ogni anno della dimensione temporale corrisponde al centro della media decennale di ciascuna stagione. Le decadi vanno dal 1971-1980, che corrisponde alla media centrata nel 1976, al 2006-2015, che corrisponde alla media centrata nel 2010. I campi sono sui livelli verticali IODE standard (in metri): -3000.0, -2500.0, -2000.0, -1750.0, -1500.0, -1400.0, -1300.0, -1200.0, -1100.0, -1000.0, -900.0, -800.0, -700.0, -600.0, -500.0, -400.0, -300.0, -250.0, -200.0, -150.0, -125.0, -100.0, -75.0, -50.0, -30.0, -20.0, -10.0, -5.0, -0.0. Il prodotto si basa sui dati osservativi dell'infrastruttura dati SeaDataNet/EMODnet ed è stato creato utilizzando il software DIVA (Data-Interpolating Variational Analysis). Figura 7 mostra anche uno screenshot del sito di visualizzazione online del prodotto utilizzato.

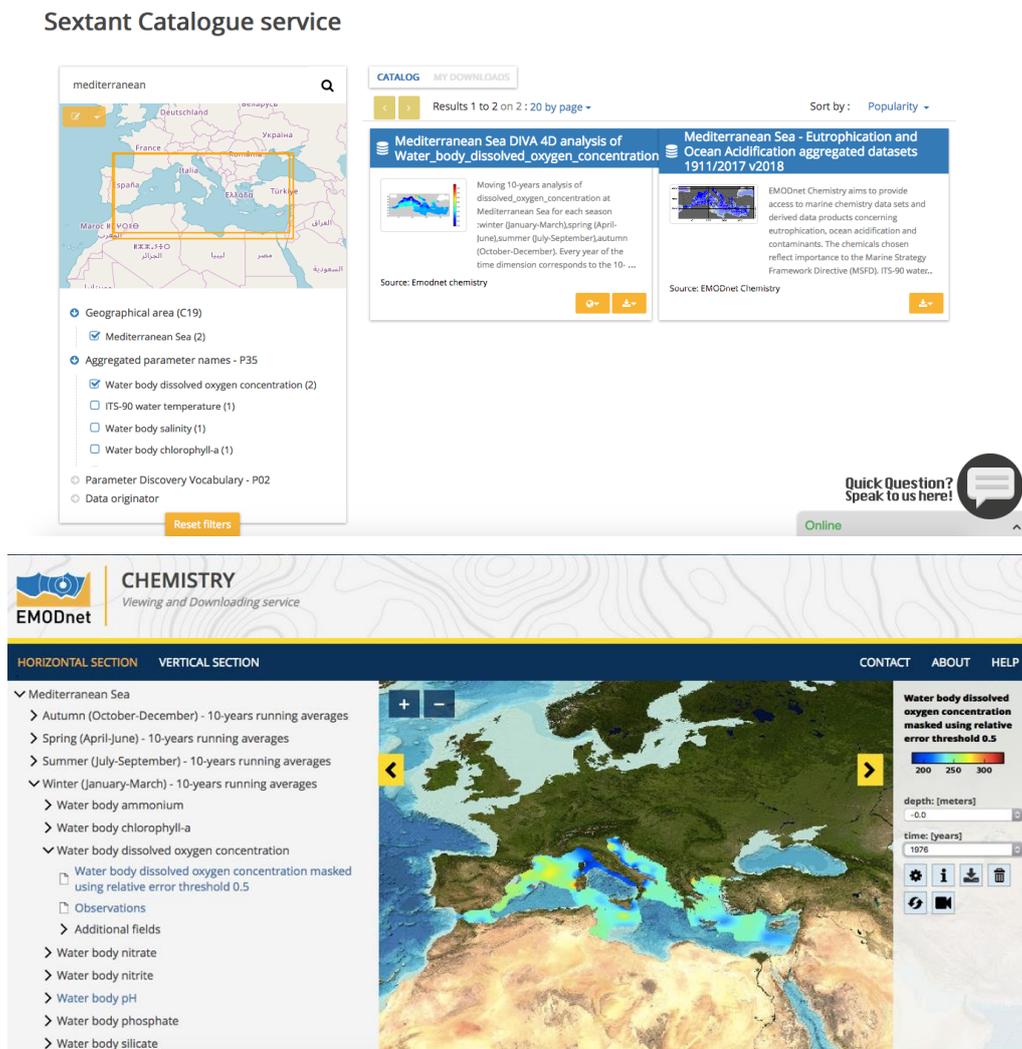


Figura 7 (in alto) Screenshot dal catalogo online di EMODnet Chemistry in cui compaiono i prodotti relativi al Mar Mediterraneo. (in basso) Visualizzazione del prodotto utilizzato alla pagina <http://ec.oceanbrowser.net/EMODnet/>.

Il prodotto utilizzato per la Baia di Biscaglia si chiama “**Atlantic Sea DIVA 4D analysis of Water\_body\_dissolved\_oxygen\_concentration**”

(<http://www.EMODnet-chemistry.eu/products/catalogue#/metadata/0136ec2d-0b48-4664-86a2-5e05063293ab>).

Anche in questo caso ogni anno della dimensione temporale corrisponde al centro della media decadale per ciascuna stagione. Le decadi vanno dal 1963-1972, che corrisponde alla media centrata nel 1966, al 2005-2014, che corrisponde alla media centrata nel 2009.

I campi sono sui livelli verticali IODE standard (in metri): -3000.0, -2500.0, -2000.0, -1750.0, -1500.0, -1400.0, -1300.0, -1200.0, -1100.0, -1000.0, -900.0, -800.0, -700.0, -600.0, -500.0, -400.0, -300.0, -250.0, -200.0, -150.0, -125.0, -100.0, -75.0, -50.0, -30.0, -20.0, -10.0, -5.0, -0.0. Il prodotto si basa sui dati osservativi che vanno dal 1963 al 2014.

**Sextant Catalogue service**

**CHEMISTRY**  
Viewing and Downloading service

**EMODnet**

HORIZONTAL SECTION VERTICAL SECTION CONTACT ABOUT HELP

- Atlantic Sea
  - Autumn (October-December) - 10-years running averages
  - Autumn (October-December) - 6-years running averages
  - Spring (April-June) - 10-years running averages
  - Spring (April-June) - 6-years running averages
  - Summer (July-September) - 10-years running averages
  - Summer (July-September) - 6-years running averages
  - Winter (January-March) - 10-years running averages
    - Water body ammonium
    - Water body chlorophyll-a
    - Water body dissolved oxygen concentration
      - Water body dissolved oxygen concentration masked using relative error threshold 0.5
      - Observations
      - Additional fields
      - Water body nitrate plus nitrite
      - Water body phosphate

Water body dissolved oxygen concentration masked using relative error threshold 0.5

depth: [meters] -0.0

time: [years] 2000

Figura 8 (in alto) Screenshot dal catalogo online di EMODnet Chemistry in cui compaiono i prodotti relativi al Nord Atlantico. (in basso) Visualizzazione del prodotto utilizzato alla pagina <http://ec.oceanbrowser.net/EMODnet/>.

Il **World Ocean Atlas** non suddivide i dati di OD in decenni ma li fornisce come climatologie globali stagionali calcolate partendo dai dati dal 1965 al 2012. Tutti i controlli di qualità applicati ai dati hanno come obiettivo quello di fornire prodotti affidabili. La raccolta dei dati è iniziata dopo il 1965 quando si è iniziato a diffondere il metodo di analisi di ossigeno. Il portale fornisce dati tramite un catalogo online (<https://www.nodc.noaa.gov/cgi-bin/OC5/woa13/woa13oxnu.pl>). I files NetCDF delle climatologie stagionali globali coprono entrambe le aree di studio.

**WOA 2013 Data Access: Objectively analyzed mean of oxygen on 1° grid for all decades**  
*The oxygen climatological fields can be downloaded as individual files of all climatological fields and related statistics*

**Available formats:**  
 ASCII  CSV  ArcGIS  NetCDF

**Available grids:**  
 5°  1°

**Available fields:**

**All fields data links (1° grid)**  
 All periods [THREDDS Catalog](#)

Annual	Seasonal	Monthly
<a href="#">o00_01.nc</a>	<a href="#">o13_01.nc</a> - Winter	<a href="#">o01_01.nc</a> - January
	<a href="#">o14_01.nc</a> - Spring	<a href="#">o02_01.nc</a> - February
	<a href="#">o15_01.nc</a> - Summer	<a href="#">o03_01.nc</a> - March
	<a href="#">o16_01.nc</a> - Autumn	<a href="#">o04_01.nc</a> - April
		<a href="#">o05_01.nc</a> - May
		<a href="#">o06_01.nc</a> - June
		<a href="#">o07_01.nc</a> - July
		<a href="#">o08_01.nc</a> - August
		<a href="#">o09_01.nc</a> - September
		<a href="#">o10_01.nc</a> - October
		<a href="#">o11_01.nc</a> - November
		<a href="#">o12_01.nc</a> - December

Figura 9 Screenshot dal portale online del World Ocean Atlas (<https://www.nodc.noaa.gov/cgi-bin/OC5/woa13/woa13oxnu.pl>)

**Copernicus** fornisce dati di rianalisi per l'OD, cioè dati ottenuti mediante simulazioni numeriche con modelli biogeochimici. Il prodotto utilizzato per il Mar Mediterraneo è MEDSEA REANALYSIS BIO 006 008 ([https://doi.org/10.25423/MEDSEA\\_REANALYSIS\\_BIO\\_006\\_008](https://doi.org/10.25423/MEDSEA_REANALYSIS_BIO_006_008), Teruzzi et al. 2016), la rianalisi biogeochimica del Mar Mediterraneo a 1/16 di grado di risoluzione copre un periodo di tempo di 16 anni (1999-2014). Il sistema di rianalisi è composto dal modello biogeochimico OGSTM-BFM e un sistema di assimilazione OceanVar che assimila dati della concentrazione superficiale di clorofilla da satellite. Il sistema biogeochimico è forzato dal sistema di rianalisi. Per l'assimilazione dei dati è stato utilizzato il database ESA-CCI di concentrazione superficiale di clorofilla da satellite. Questa rianalisi fornisce campi mensili 3D di clorofilla, nutrienti

(fosfati e nitrati) e concentrazioni di ossigeno disciolto, produzione primaria netta, biomassa di fitoplancton, pH oceanico e pCO<sub>2</sub> oceanico.

Il prodotto utilizzato per l'Oceano Atlantico è il GLOBAL REANALYSIS BIO 001 018 ([http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=GLOBAL\\_REANALYSIS\\_BIO\\_001\\_018](http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS_BIO_001_018))

ed è una rianalisi biogeochimica che copre un periodo di 19 anni (1998-2016). Il modello biogeochimico utilizzato è PISCES; un modello di complessità intermedia disegnato per l'applicazione nell'Oceano globale, ed è parte di una piattaforma chiamata NEMO. Questo modello ha 24 variabili (Nitrati, Fosfati, Ferro, Ossigeno Disciolto ecc.) e simula il ciclo biogeochimico di ossigeno. Il prodotto utilizzato ha una risoluzione di 1 / 4 di grado ed è una simulazione globale biogeochimica fornita quotidianamente da una simulazione fisica non assimilativa. Dallo studio di questo prodotto si evince che in superficie la temperatura è vincolata dalla solubilità dell'ossigeno atmosferico, quindi non è controllato dalle dinamiche biogeochimiche; mentre in profondità la concentrazione di ossigeno dipende maggiormente dalla mineralizzazione.

Nella tabella sottostante viene mostrato un riassunto di quelle che sono state le informazioni più importanti per lo svolgimento del lavoro, relative ad ogni dataset. Per EMODnet è importante ricordare che considera solo delle decadi stagionali, dal 1971 al 2015, centrate dal 1976 al 2010 per il Mediterraneo e dal 1963 al 2014, centrate dal 1966 al 2009, per l'Atlantico.

Le informazioni relative al WOA sono uguali sia per il Mediterraneo che per l'Atlantico perché di fatto il file a disposizione è unico, diviso in quattro stagioni, e indica una climatologia stagionale, ovvero prende per un intero periodo di 48 anni tutte le stagioni e applica una media.

Infine il CMEMS differisce sia per il Mediterraneo che per l'Atlantico, non soltanto per i differenti livelli di profondità, ma anche per la tipologia di dati; infatti per il Mediterraneo sono stati presi dati medi mensili centrati sul sedicesimo giorno di ogni mese (16/01/99 al 16/12/17), invece per

l'Atlantico i dati sono stati raggruppati annualmente e solo in seguito convertiti in mesi per il confronto.

A parte per il caso del WOA per ogni infrastruttura a seconda della zona che si considera cambia il livello di profondità, questa cosa non si attua per il WOA perché a differenza degli altri non è disponibile un file per l'Atlantico e un file per il Mediterraneo ma soltanto un unico file globale dove all'interno si identifica la regione scelta.

	COPERTURA TEMPORALE	RISOLUZIONE ORIZZONTALE	LIVELLI VERTICALI	TIPOLOGIA DI PRODOTTO
	WMED			
<b>EMODnet</b>	1971-2015	1/8°	IODE 29	DECADI STAGIONALI centrate dal 1976 al 2010
<b>World Ocean Atlas</b>	1965-2012	1/4°	30	CLIMATOLOGIE STAGIONALI
<b>Copernicus</b>	1999-2017	1/16°	63	CAMPI MEDI MENSILI
	NATL			
<b>EMODnet</b>	1963-2014	1/8°	IODE 30	DECADI STAGIONALI centrate dal 1966 al 2009
<b>World Ocean Atlas</b>	1965-2012	1/4°	30	CLIMATOLOGIE STAGIONALI
<b>Copernicus</b>	1998-2016	1/4°	71	0,200,500,1000,2000

*Tabella 1 Sintesi schematica delle caratteristiche dei dati utilizzati e della loro tipologia.*

## Metodologia

Lo studio è iniziato con la ricerca dei dati e, una volta ottenuti, con la rielaborazione di questi grazie al software MATLAB.

Le mappe dell'atlantico in generale e del Mediterraneo sono state create inizialmente per un'analisi preliminare dei tre data sets poi sono state selezionate le aree di interesse. Il Golfo del Leone è compreso in un range di longitudine  $0,9.25^{\circ}\text{E}$  e latitudine di  $39-44^{\circ}\text{N}$  mentre il golfo di Biscaglia il range di longitudine di  $-12-0^{\circ}\text{E}$  e latitudine di  $42-50^{\circ}\text{N}$ . Inizialmente sono state mappate varie profondità poi alcune in comune tra i tre data sets sono state selezionate dopo l'analisi dell'OD lungo la colonna d'acqua.

Per EMODnet l'obbiettivo principale è stato quello di realizzare degli hovmoller plots stagionali, ovvero delle immagini che mostrassero il cambiamento della concentrazione di ossigeno disciolto stagione per stagione lungo tutto il periodo considerato. Successivamente i quattro hovmoller plots stagionali sono stati concatenati tra loro per ottenere dei profili medi che mostrassero l'andamento e il cambiamento della concentrazione di OD lungo la colonna d'acqua a seconda della stagione e della profondità del bacino. Infine concatenando i profili medi è stato realizzato anche un unico hovmoller al cui interno comprendesse l'evoluzione e il cambiamento inter-annuale della concentrazione di ossigeno lungo tutto il periodo considerato. Questo hovmoller è stato realizzato anche con un particolare zoom sui primi 200 metri di profondità per fare in modo che fosse ben evidente il ciclo in quanto principalmente superficiale. Le stesse immagini sono state realizzate sia per il Mediterraneo che per l'Atlantico e messe a confronto.

Per il WOA si sono realizzati soltanto dei profili stagionali, sia per il Mediterraneo che per l'Atlantico, in modo da fare il confronto con EMODnet, perché siccome il WOA non considera delle decadi ma soltanto l'intero periodo dal 1965 al 2012, non sarebbe stato produttivo effettuare degli hovmoller plots e non si sarebbe neanche potuto osservare l'andamento di un ciclo stagionale. Anche questi profili mostrano l'andamento e il cambiamento stagionale dell'OD all'interno della colonna d'acqua a seconda della stagione e della profondità.

Infine anche per il CMEMS sono stati visualizzati gli hovmoller plots stagionali, sia per il Mediterraneo che per l'Atlantico, ma non singoli per ogni stagione bensì già concatenati all'interno

di un unico ciclo stagionale che mostrasse l'andamento dell'OD lungo tutto il periodo dal 1998/1999 ad oggi; questo perché i dati all'interno del CMEMS sono suddivisi in mesi e non in stagioni o in decenni.

In definitiva è stato possibile realizzare delle medie delle decenni in base alla stagione e alla profondità per ogni Dataset utilizzato. Il primo è stato EMODnet nel quale ho preso in considerazione il periodo che parte dal '71 al 2015 quindi quattro decenni [76,86,96,06], che valgono anche per il Golfo di Biscaglia anche se parte dal '63, e per ogni decade ho considerato una stagione e una profondità. La stessa cosa è stata fatta con il World Ocean Atlas considerando sempre come decenni il 76,86,96,06 perché il periodo di inizio di raccolta dati è nel 1963; infine per il CMEMS si è presa soltanto l'ultima decade [2006] in quanto il periodo di raccolta dati parte dal 1998 ad oggi quindi è stato possibile effettuare confronti solo nella fase più recente.

# Capitolo 3

## Risultati

I risultati ottenuti sono presentati per entrambe le regioni di studio per ciascuna tipologia di prodotto, poi verranno confrontati i vari prodotti per valutare la loro consistenza in termini di variazione dell'Ossigeno Disciolto lungo la colonna d'acqua.

## EMODnet Chemistry

La Figura 10 mostra l'andamento dell' OD lungo la colonna d'acqua dal 1976 al 2010 nelle diverse stagioni nella zona del Golfo del Leone nel Mediterraneo nord-occidentale, ottenuta facendo una media spaziale ad ogni livello verticale per ciascuna media decadale fornita. L'OD varia lungo la colonna d'acqua tra 170 e 280  $\mu\text{mol/l}$  con i valori massimi confinati nello strato superficiale. Nei riquadri a destra viene mostrato lo strato superficiale con profondità inferiori a 200m, in cui si osserva il massimo di OD sotto-superficiale tra 20 e 50m in estate ( $\sim 280 \mu\text{mol/l}$ ), valori simili ( $\sim 260 \mu\text{mol/l}$ ) in inverno e primavera dalla superficie fino a 50m circa, mentre in autunno i valori massimi superficiali sembrano inferiori ( $\sim 240 \mu\text{mol/l}$ ) rispetto alle altre stagioni.

L'evoluzione temporale durante il periodo 1976-2010 mostra una tendenza dell'OD a diminuire sia in superficie che in profondità, dove l'OD passa da valori di circa 200-210  $\mu\text{mol/l}$  negli anni Ottanta a valori tra 180-200  $\mu\text{mol/l}$  negli anni novanta e duemila.

Per poter meglio analizzare il ciclo intra ed inter-annuale dell'OD i dati stagionali sono stati concatenati in un unico hovmoller plot in Figura 11. Qui si nota maggiormente la variazione stagionale di OD in superficie con massimi estivi più profondi rispetto alla primavera. Valori massimi assoluti di OD sono presenti nei primi anni ottanta. Si conferma una tendenza negativa dell'OD sia

nei primi 200m che lungo il resto della colonna d'acqua con valori inferiori dai primi anni Novanta in poi. Il ciclo stagionale superficiale sembra anche ridursi in spessore col passare del tempo, coinvolgendo inizialmente i primi 200m poi riducendosi dopo il 2008 nei primi 80m.

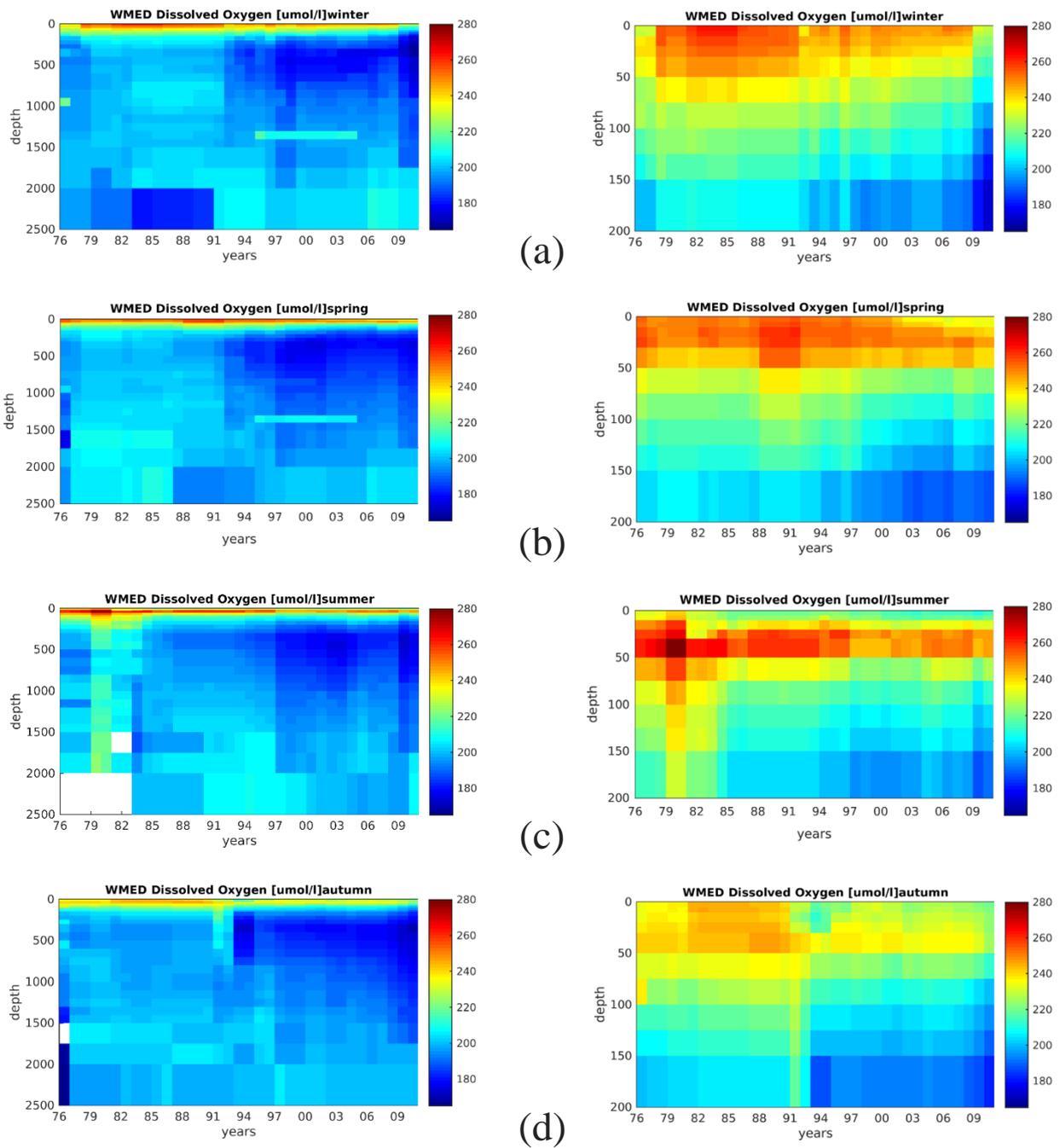
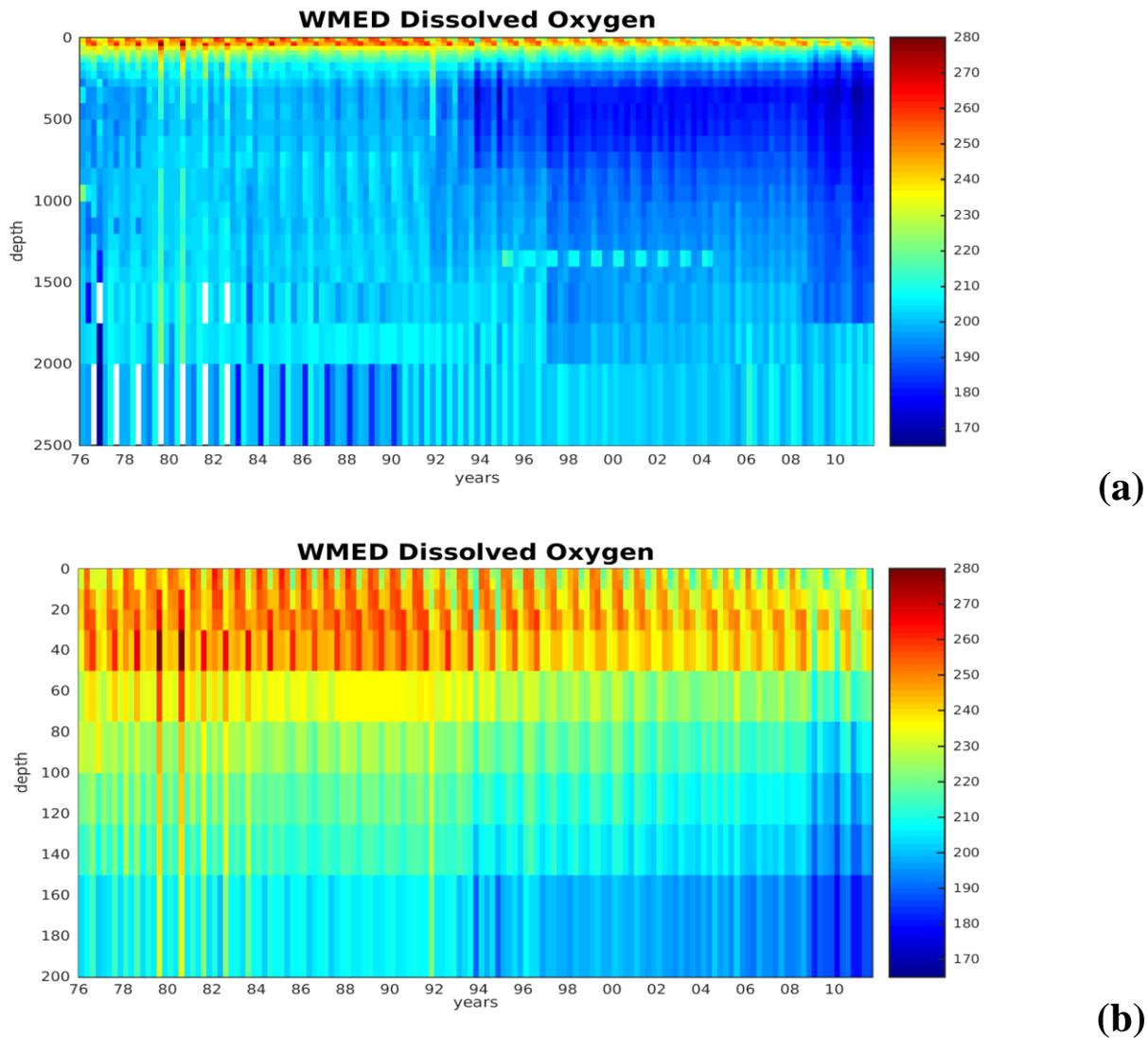


Figura 10 Hovmoller plot dell'ossigeno disciolto lungo la colonna d'acqua nella regione del Golfo del Leone (a sinistra) e zoom dello strato superficiale con profondità inferiore a 200m (a destra) espressa in  $\mu\text{mol/l}$ : a) inverno, b) primavera, c) estate, d) autunno.



(a)

(b)

Figura 11 Evoluzione inter-annuale dell'ossigeno disciolto lungo la colonna d'acqua nel Mediterraneo nord-orientale: (a) tutta la colonna d'acqua; (b) zoom dei primi 200 metri.

Nel Golfo di Biscaglia (Figura 12) l'OD mostra in tutte e quattro le stagioni valori elevati tra la superficie e i 500m ( $240-280\mu\text{mol/l}$ ) e sotto i 1500m ( $260-280\mu\text{mol/l}$ ), mentre tra i 600 e i 1500m di profondità circa si notano valori minimi di ossigeno ( $200-220\mu\text{mol/l}$ ). Si ipotizza che acque provenienti dal Mediterraneo, caratterizzate da valori analoghi di OD, giungano fino al Golfo di Biscaglia fluendo lungo il margine iberico del Nord Atlantico. Ad ogni modo nel ciclo dell'Atlantico troviamo un andamento simile in tutte le stagioni.

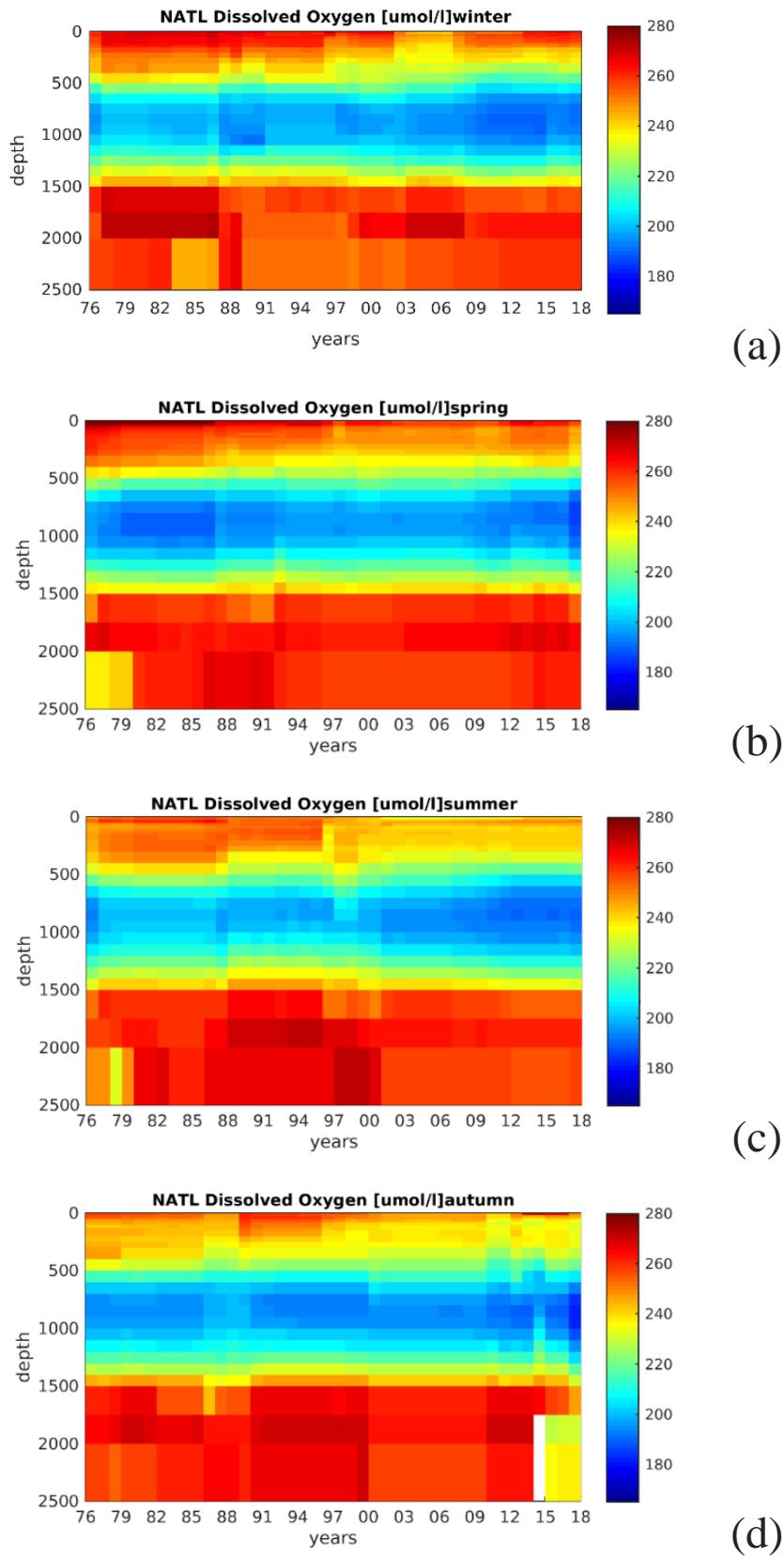
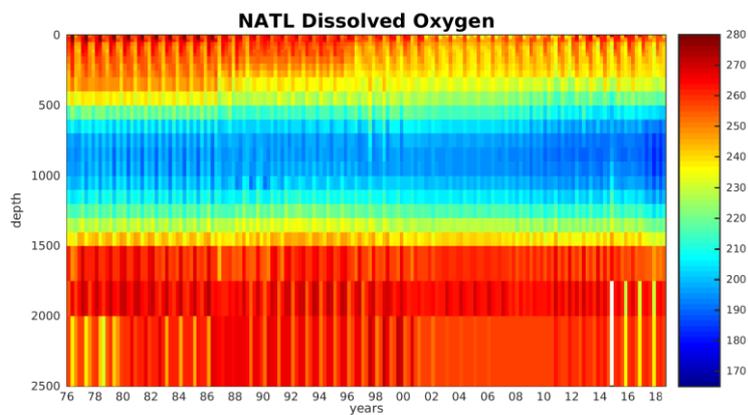
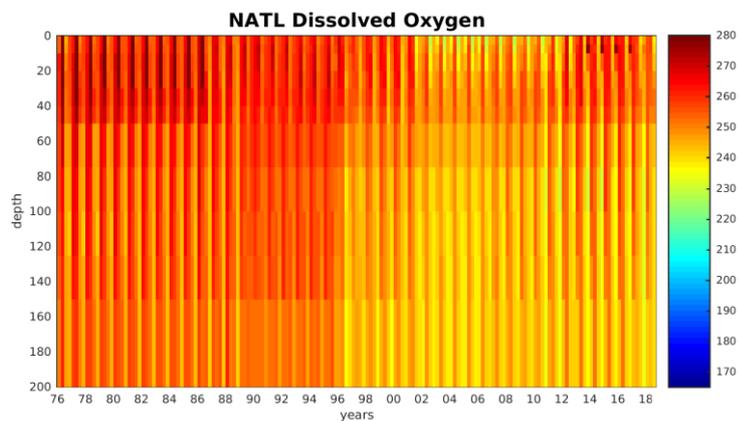


Figura 12 Hovmoller plot per l'ossigeno disciolto lungo la colonna d'acqua nel Golfo di Biscaglia espressa in  $\mu\text{mol/l}$ : a) inverno, b) primavera, c) estate, d) autunno.

I profili medi stagionali sono stati poi concatenati in un grafico unico (Figura 13) che mostra l'andamento inter-annuale della concentrazione di ossigeno, per il Golfo di Biscaglia. Lo zoom nei primi 200 metri serve per evidenziare la variabilità in prossimità della superficie. Si nota una diminuzione nel tempo dell'OD nello strato superiore a 500m di profondità, che in linea con il Golfo del Leone, tende anche a diminuire in spessore interessando negli anni 2000 principalmente i primi 300m della colonna d'acqua. Anche il valore minimo di OD sembra ridursi nel tempo. Sotto i 1500m il valore di OD rimane pressoché costante.



(a)



(b)

Figura 13 Evoluzione inter-annuale dell'ossigeno disciolto lungo la colonna d'acqua nel Nord Atlantico: a) tutta la colonna d'acqua, b) zoom nei primi 200 metri.

L'analisi dei profili medi stagionali calcolati per l'intero periodo in esame (Figura 14) mettono in risalto in modo differente il comportamento dell'ossigeno nelle differenti stagioni considerate. Nel Mediterraneo nord-occidentale (Figura 14a), si osserva che il ciclo stagionale coinvolge i primi 200m della colonna d'acqua. I profili verticali sono simili in inverno e primavera, in estate si osserva un picco sotto-superficiale a 50m circa di profondità, mentre in autunno questo picco si riduce ai valori minimi di OD di  $\sim 230 \mu\text{mol}/\text{l}$ . L'OD presenta un minimo ( $190 \mu\text{mol}/\text{l}$ ) a 500 metri che tende ad aumentare e a stabilizzarsi sotto i 1000m di profondità ( $200 \mu\text{mol}/\text{l}$ ).

Nel Golfo di Biscaglia (Figura 14b), si è osserva che i profili differiscono nei primi 500m di profondità con valori massimi in primavera e inverno ( $\sim 260 \mu\text{mol}/\text{l}$ ) e inferiori in estate e autunno ( $\sim 250 \mu\text{mol}/\text{l}$ ). È presente un piccolo picco sotto-superficiale maggiormente visibile in estate.

Il valore minimo ( $190 \mu\text{mol}/\text{l}$ ) si osserva a circa 100m di profondità. I valori di OD tendono ad aumentare a profondità maggiori fino a ( $\sim 260 \mu\text{mol}/\text{l}$ ) valori simili a quelli superficiali. Lo studio di questi grafici ha mostrato che il cambiamento dell'ossigeno avviene negli strati superficiali in maniera significativa poi tende a rimanere invariato. Negli strati superficiali agiscono infatti i forzanti atmosferici che influenzano direttamente la produzione primaria e dunque la concentrazione dell'OD.

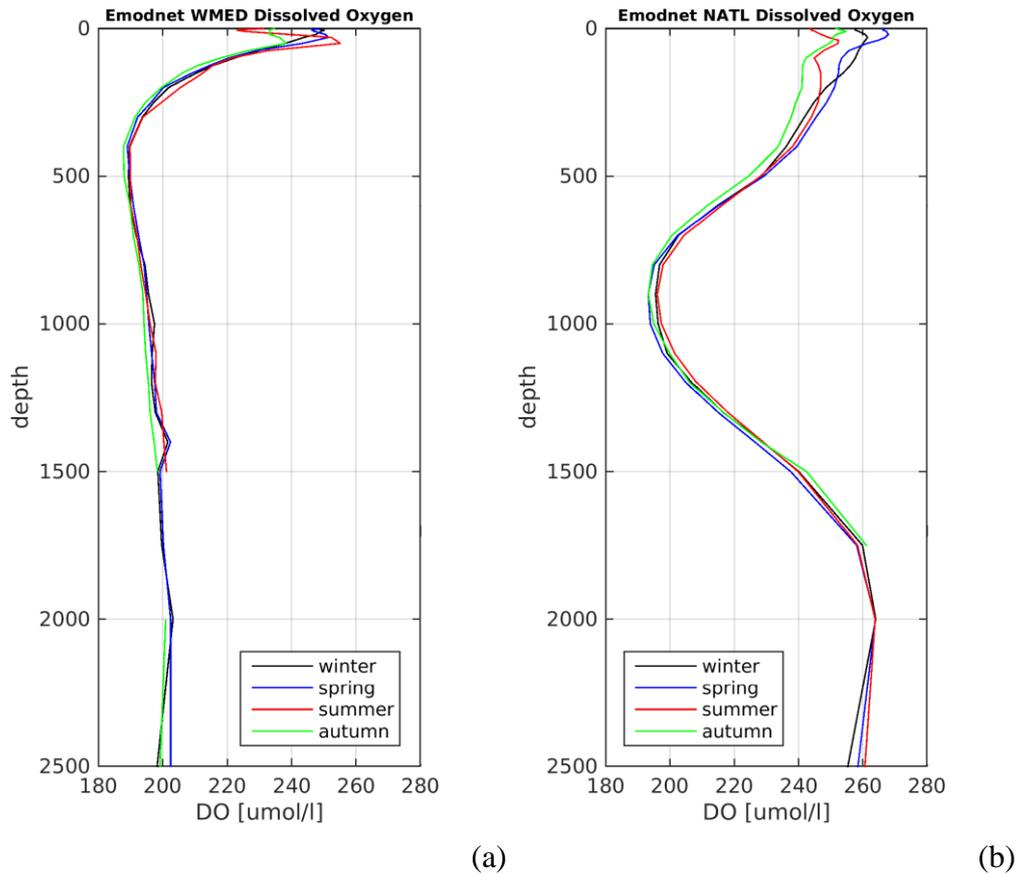


Figura 14 Profili medi stagionali calcolati dai prodotti di EMODnet: a) Golfo del Leone nel Mediterraneo nord-orientale, b) Golfo di Biscaglia nell'Atlantico settentrionale.

Qui di seguito verranno presentate le mappe medie stagionali, calcolate dalle quattro decadi centrate negli anni 1976, 1986, 1996, 2006, a tre diverse profondità. Per il Golfo del Leone sono state selezionate per i tre data set le profondità: superficie (Figura 15), 500m (strato intermedio, Figura 16), 2000m (fondo, Figura 17). Per il Golfo di Biscaglia sono state selezionate per i tre data set le profondità: superficie (Figura 18), 1000m (strato con minima concentrazione di OD, Figura 19) e 2000m (fondo, Figura 20).

Dalle immagini sottostanti si può verificare che la concentrazione di ossigeno disciolto nel Golfo del Leone cambia molto a seconda della stagione e della profondità, infatti a mano a mano che si scende a profondità maggiori la concentrazione di OD tende a diminuire e questo è ben visibile per il fatto che il colore tende ad essere più chiaro (minore concentrazione di ossigeno). Per il cambiamento stagionale si osserva che in corrispondenza dell'inverno e della primavera la concentrazione di OD è

maggiore mentre in estate e autunno inizia a diminuire. Il pattern orizzontale mostra poi che allontanandosi sempre di più dalla riva la concentrazione di ossigeno inizia a calare arrivando anche in zone al largo dove è molto scarsa se non quasi inesistente, questo probabilmente si deve al fatto che in superficie scorrono fiumi carichi di nutrienti che quando incontrano il mare favoriscono alle alghe cibo sufficiente per la produzione di ossigeno.

Per il Golfo di Biscaglia si identifica un andamento molto simile a quello del Golfo del Leone con la netta differenza che intorno alla profondità di 2000 metri invece di esserci un calo drastico della concentrazione di OD è presente una grande quantità di ossigeno, questo si evince dal colore rosso (alta concentrazione di ossigeno disciolto). Il motivo del perché accade ciò è sicuramente dovuto allo sprofondamento delle acque più dense, nelle regioni più fredde, al loro trasporto grazie alle correnti e alla finale risalita di acque più leggere nelle regioni più calde. Ad ogni modo sia per una regione che per l'altra si osserva una concentrazione più elevata nell'inverno e nella primavera.

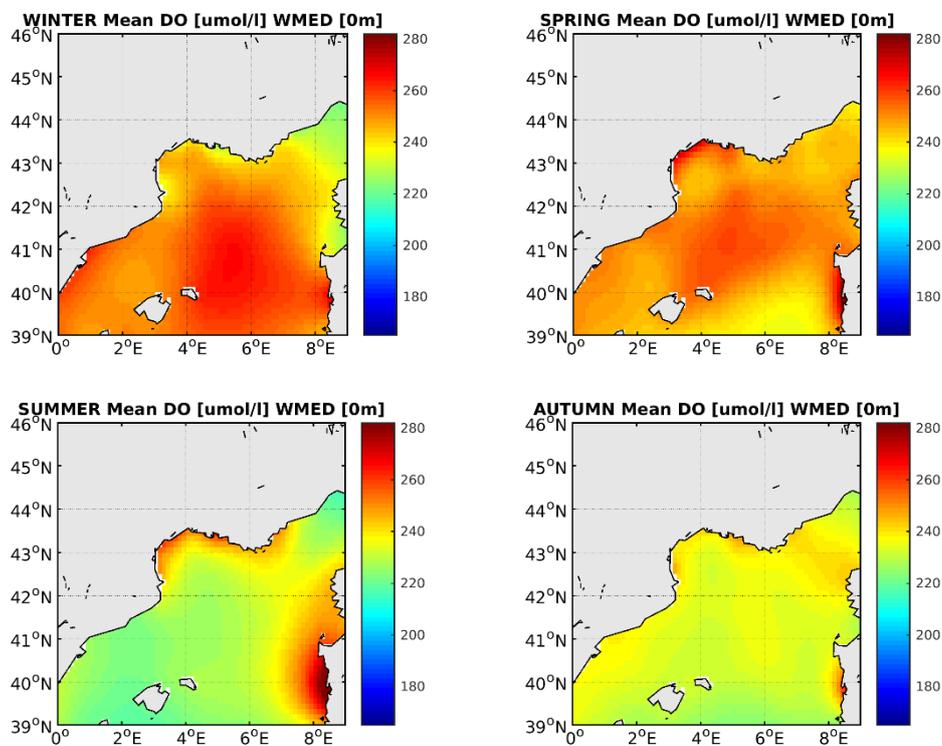


Figura 15 Medie stagionali per EMODnet nel Golfo del Leone alla superficie.

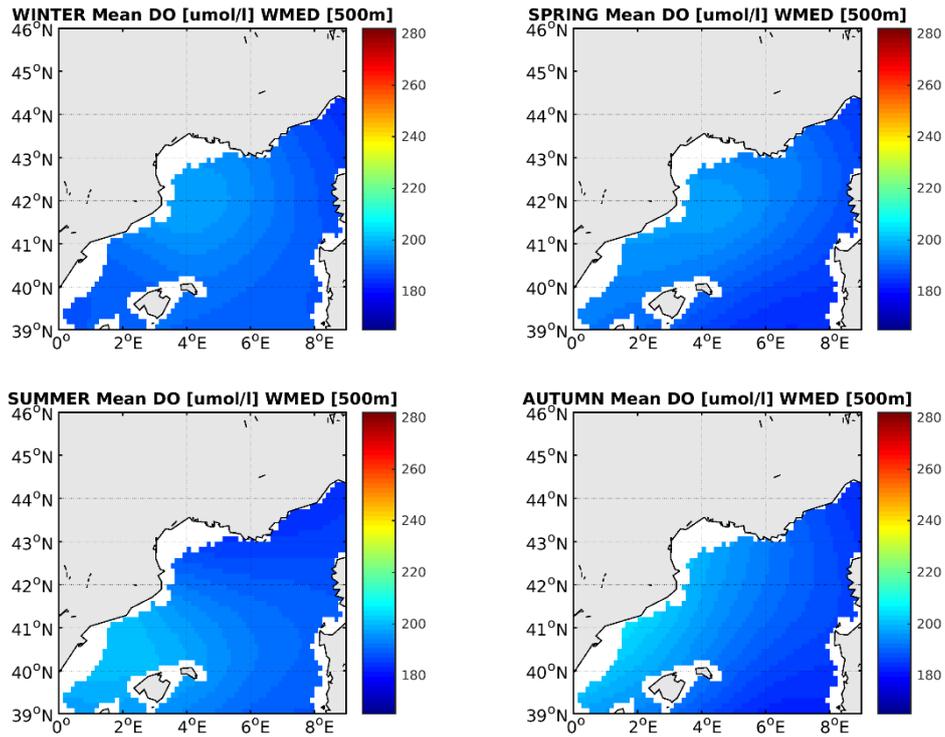


Figura 16 Medie stagionali per EMODnet nel Golfo del Leone a 500 metri.

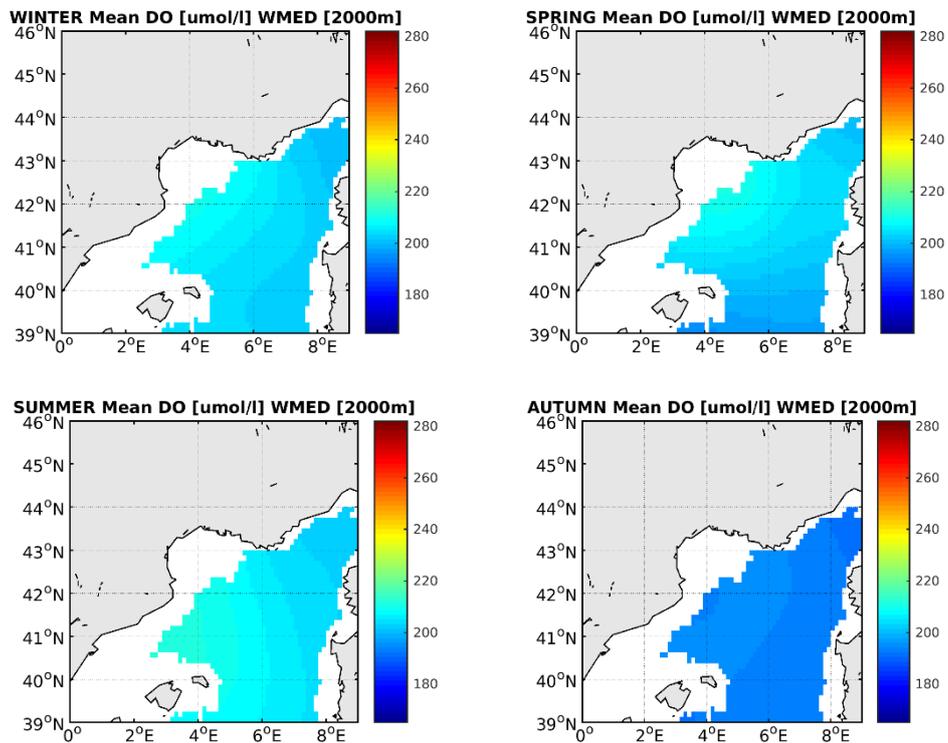


Figura 17 Medie stagionali per EMODnet nel Golfo del Leone a 500 metri.

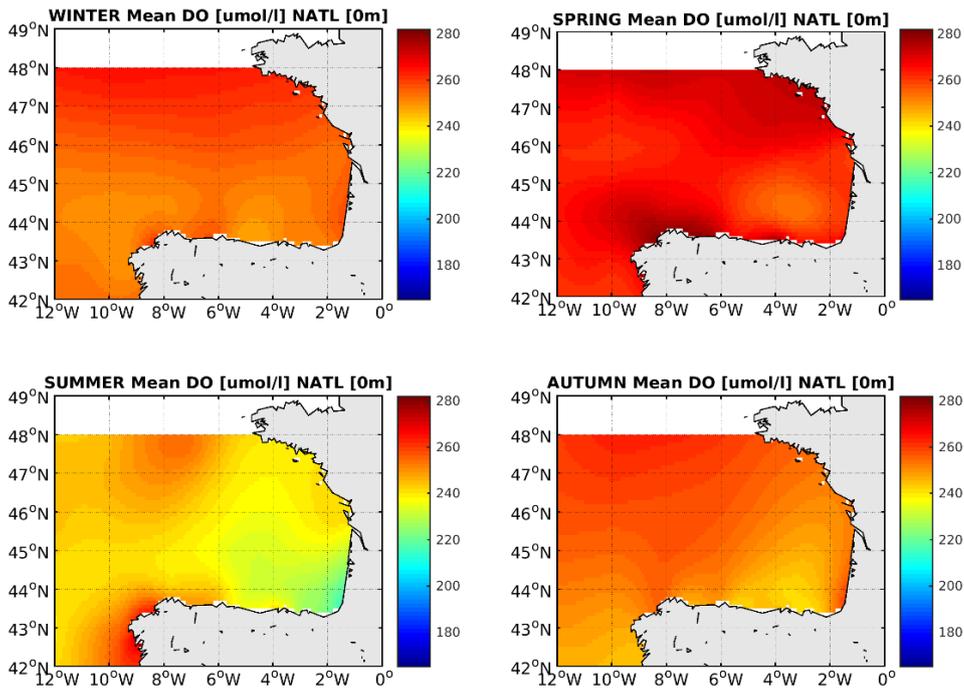


Figura 18 Medie stagionali per EMODnet nel Golfo di Biscaglia alla superficie.

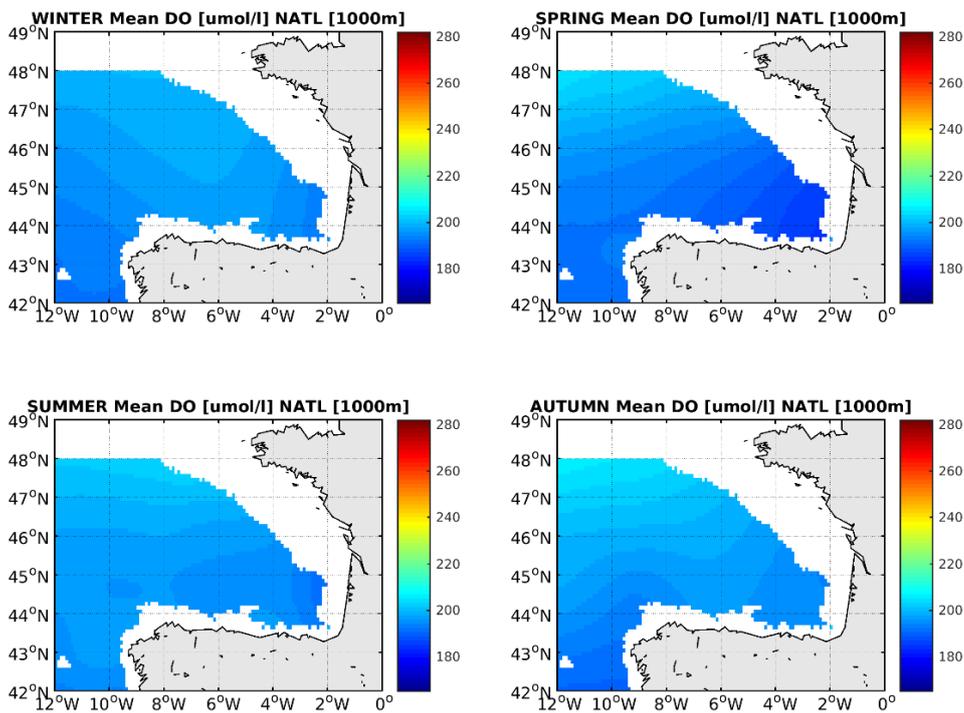


Figura 19 Medie stagionali per EMODnet nel Golfo di Biscaglia a 1000 metri.

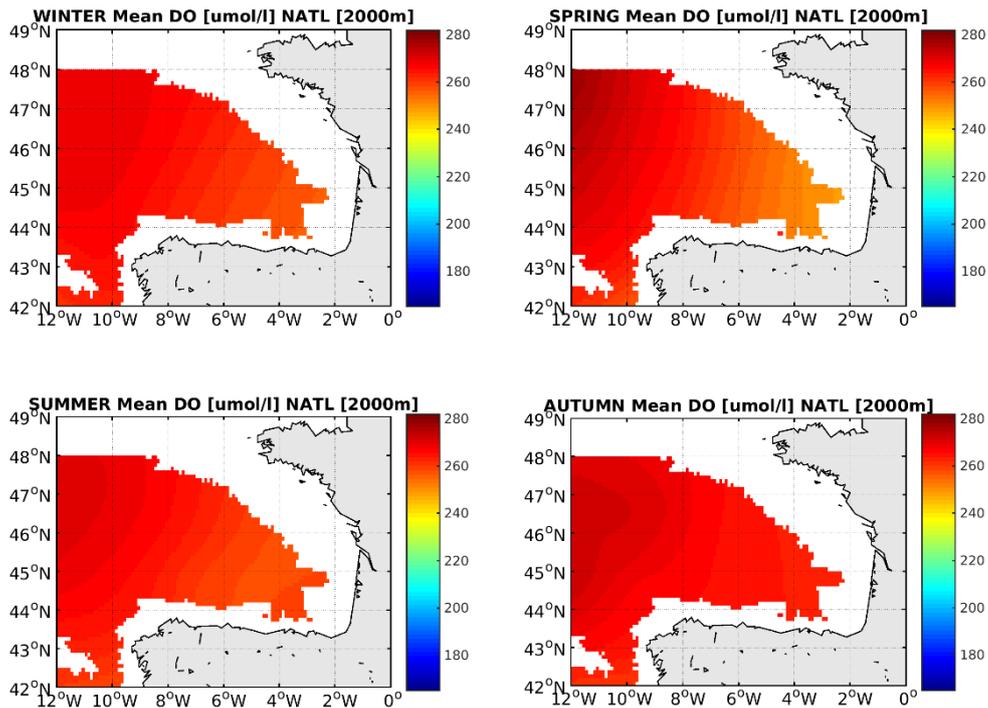


Figura 20 Medie stagionali per EMODnet nell' area del Golfo di Biscaglia a profondità di 2000 metri.

## World Ocean Atlas

L'elaborazione delle climatologie stagionali WOA2013 è stata relativamente più semplice, in quanto i dati erano già suddivisi in 4 file ognuno per ogni stagione. In questo caso il periodo di tempo nel quale i dati sono stati elaborati va dal 1965 al 2012 (consistente con EMODnet, si veda Tabella 1). Figura 21 presenta i profili medi stagionale delle due zone considerate analogamente a quanto presentato in Figura 14 dai dati EMODnet.

Nel Golfo del Leone (Figura 21a), il profilo stagionale è molto simile a quello calcolato dal data set EMODnet, sia nel pattern verticale che in termini di valori medi. Si riscontra però al di sotto dei 500m un andamento molto irregolare e non realistico del profilo, probabilmente dovuto o alla tecnica di mappatura utilizzata o ad uno scarso controllo di qualità dei dati. Sicuramente il profilo stagionale della Baia di Biscaglia è più lineare.

Anche nella Baia di Biscaglia (Figura 21b) si osserva una perfetta consistenza con il profilo stagionale calcolato da EMODnet, quindi un minimo tra i 500 e i 1000 metri e tra i 1500 e 2000 metri di profondità. Si riscontra anche in questo caso un profilo più irregolare probabilmente a causa della diversa modalità di interpolazione dei dati ma ad ogni modo coerente con quello proposto da EMODnet.

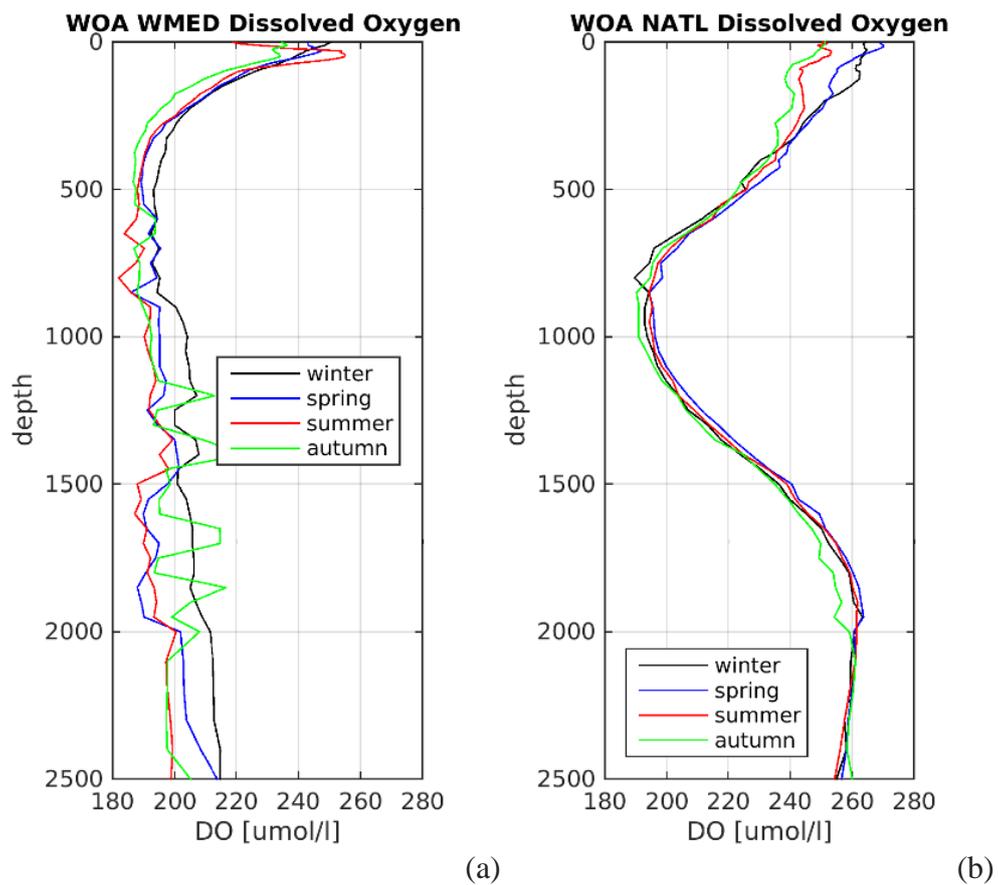


Figura 21 Profili medi stagionali calcolati dalla climatologia WOA: a) Golfo del Leone nel Mediterraneo nord-orientale; b) Golfo di Biscaglia.

Per il WOA2013 sono state elaborate mappe medie orizzontali sui livelli prescelti e descritti in precedenza. Sia per il Golfo del Leone che per il Golfo di Biscaglia il risultato ottenuto è molto simile

a quello di EMODnet; infatti nel caso del Golfo del Leone si osserva una maggiore concentrazione di OD durante il periodo invernale e primaverile mentre nel periodo estivo e autunnale la concentrazione tende a diminuire in maniera significativa. Anche nel Golfo di Biscaglia abbiamo una situazione comparabile con il Golfo del Leone fatta sempre eccezione per i 2000 metri di profondità nei quali si osserva una concentrazione di ossigeno molto elevata (data dal colore rosso). In queste mappe, anche se sembra che il pattern orizzontale non ci sia, a causa della scarsa risoluzione delle immagini, in realtà è in linea con quanto osservato per EMODnet, prettamente superficiale.

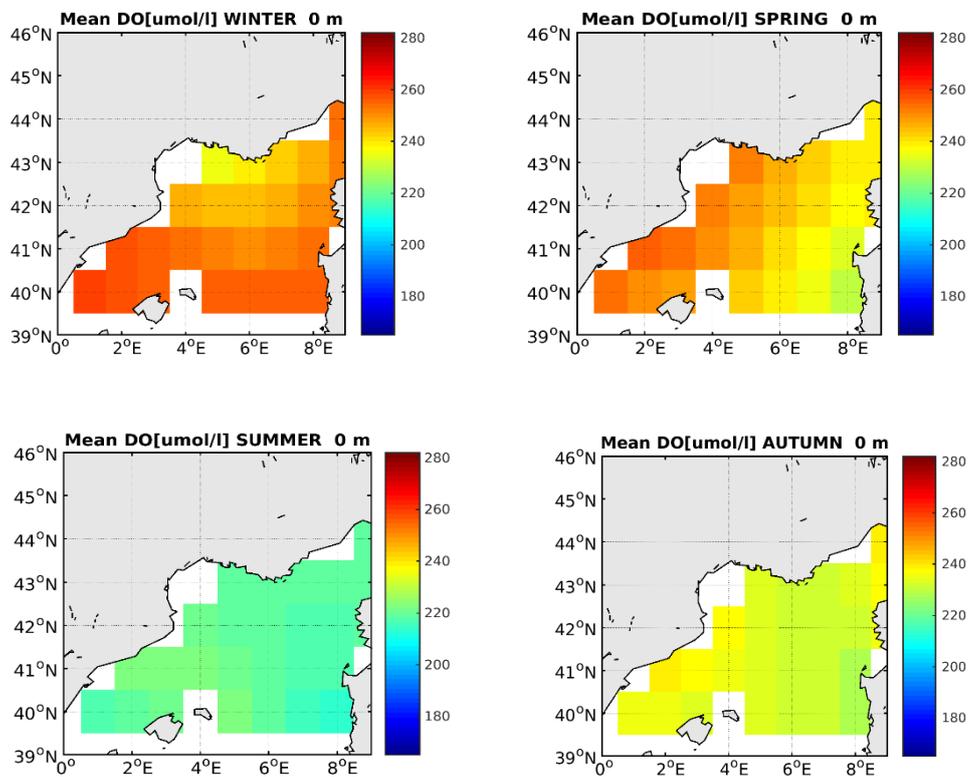


Figura 22 Medie stagionali per i dati WOA relativa al Golfo del Leone alla superficie.

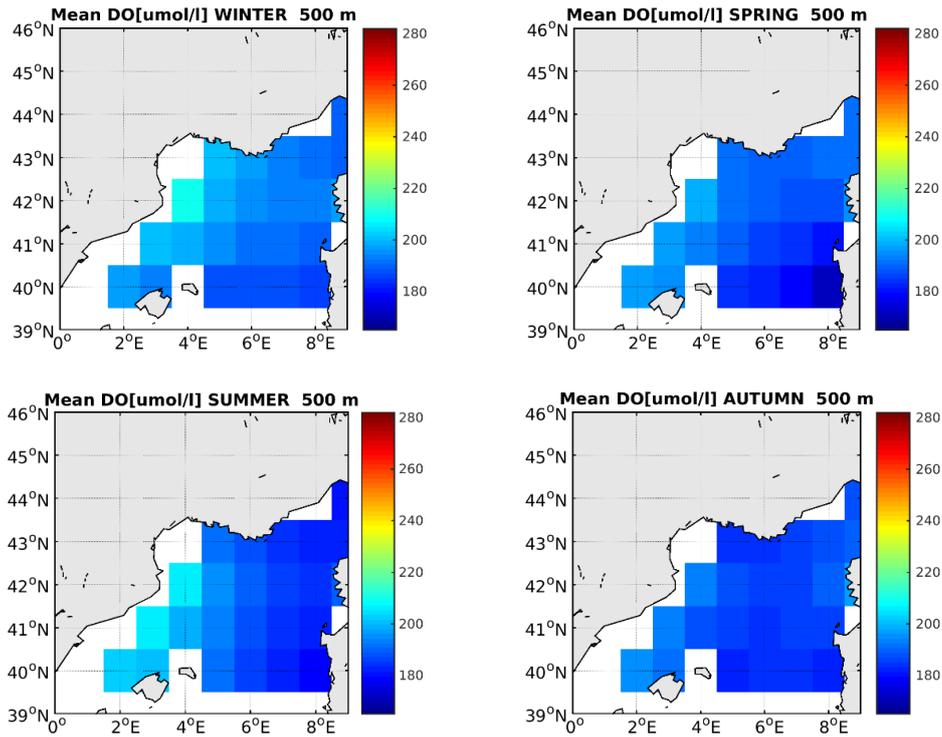


Figura 23 Medie stagionali per i dati WOA relativa al Golfo del Leone a profondità a 500 metri.

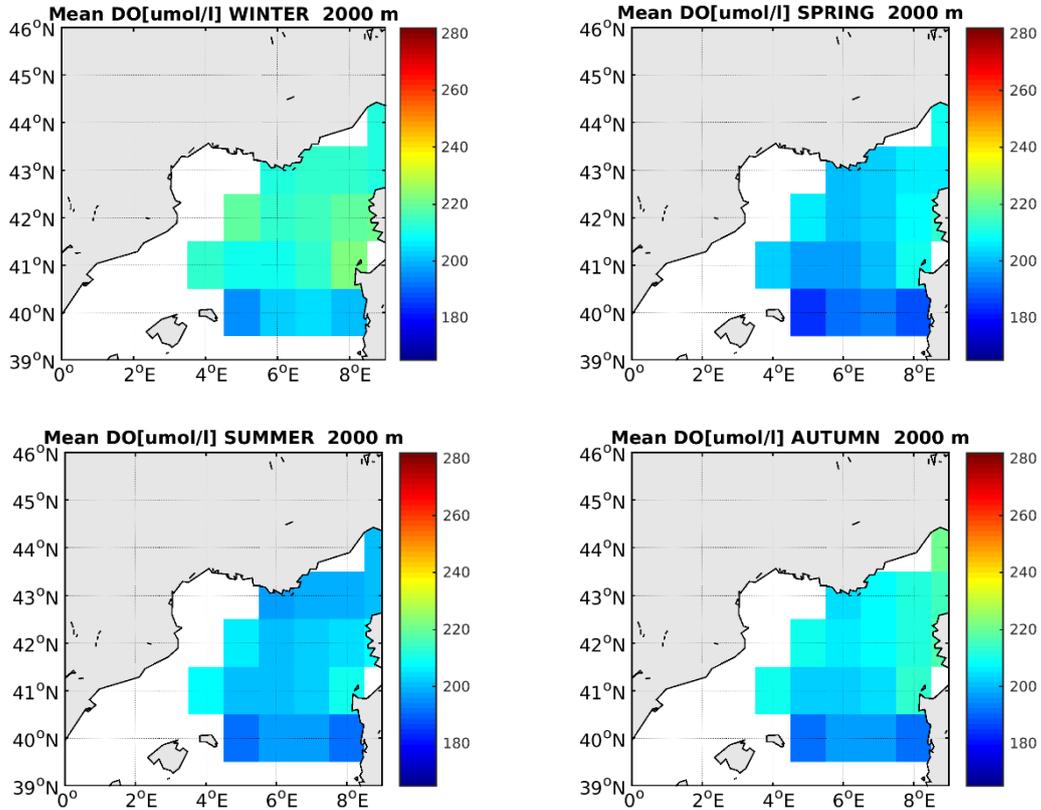


Figura 24 Medie stagionali per i dati WOA relativa al Golfo del Leone a 2000 metri.

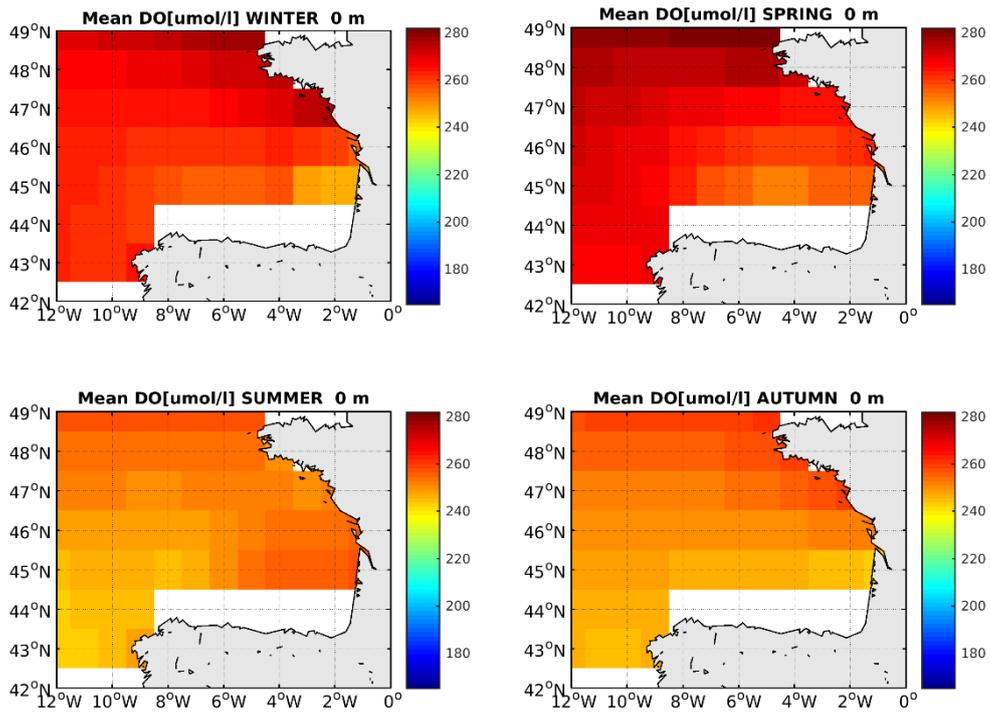


Figura 25 Medie stagionali per i dati WOA2013 nel Golfo di Biscaglia alla superficie.

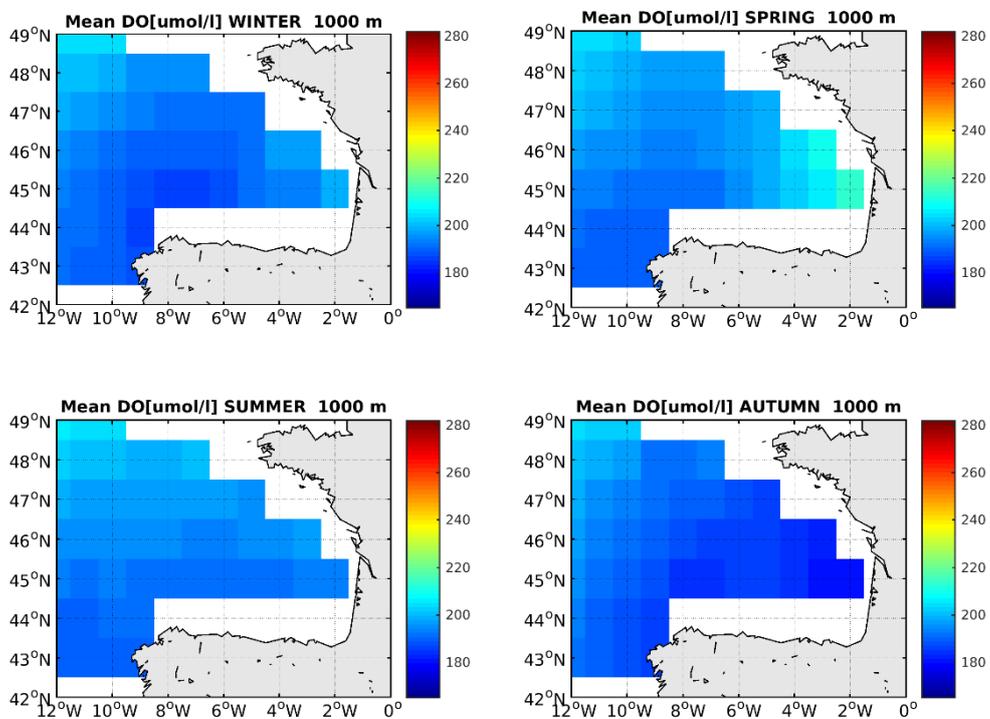


Figura 26 Medie stagionali per i dati WOA2013 nel Golfo di Biscaglia alla profondità di 1000 metri.

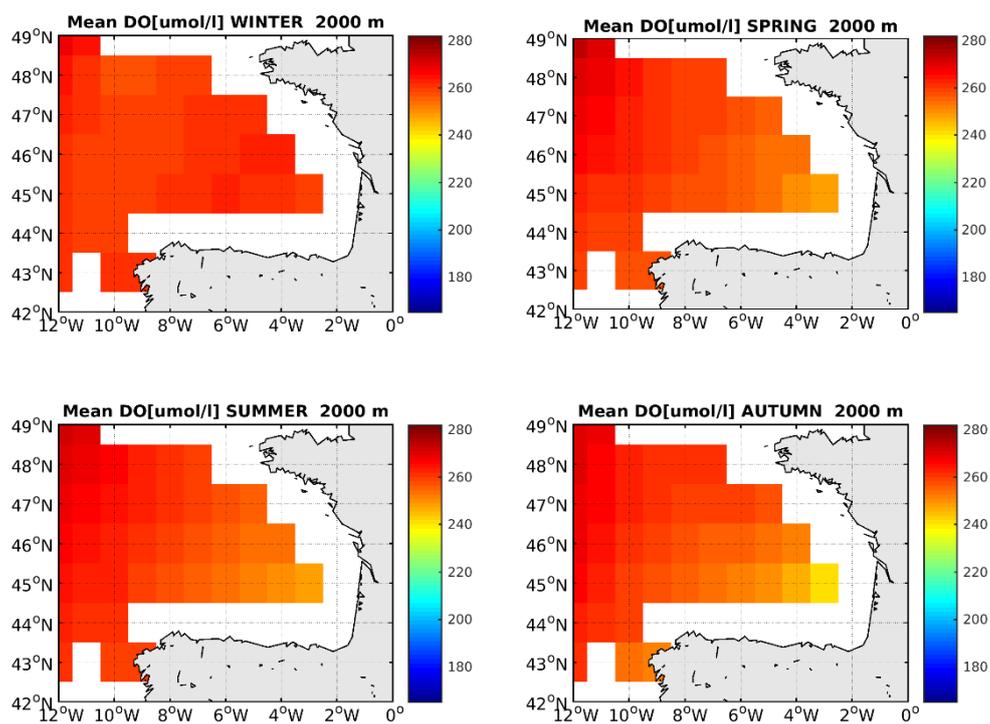


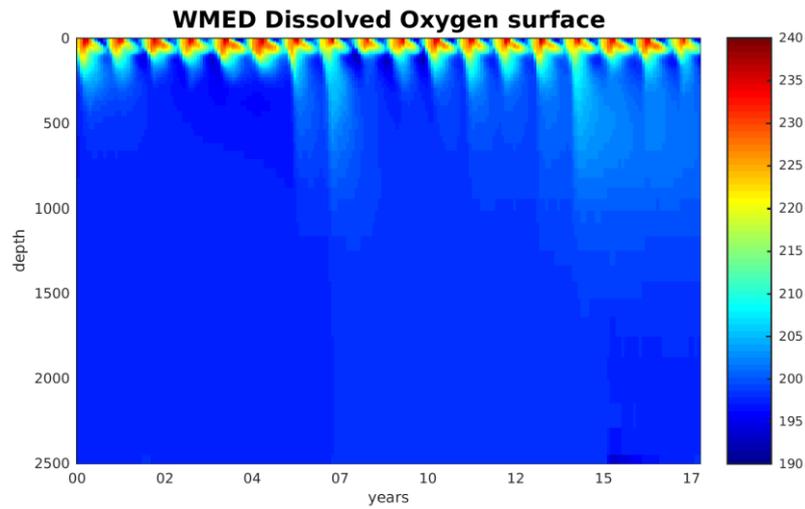
Figura 26 Medie stagionali per i dati WOA2013 nel Golfo di Biscaglia a 2000 metri.

## Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS)

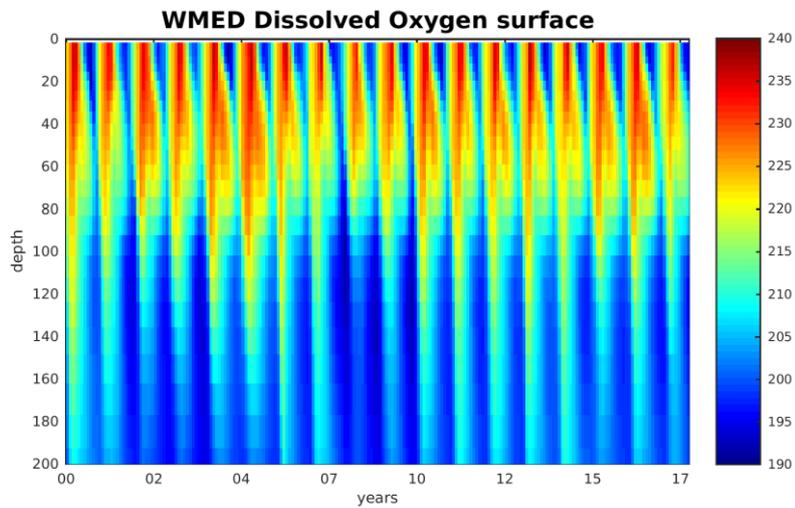
I dati di Copernicus derivano da un modello numerico che ha riprodotto il periodo che va dal 99 al 2016 perciò a differenza dei data set analizzati precedentemente la risoluzione temporale è molto maggiore (output mensili).

L'evoluzione intra ed inter-annuale mostrata dagli hovmoller in Figura 27 mostra un marcato ciclo stagionale con picchi di ossigeno che normalmente si verificano nei mesi estivi. Tale ciclo si sviluppa nei primi 200m della colonna d'acqua come mostrato anche dai due data set precedenti. Si noti però che la variazione stagionale di OD sia molto ridotta con valori minimi di circa  $190 \mu\text{mol/l}$  e valori

massimi pari a  $240 \mu\text{mol/l}$ . Manca completamente il picco di valori tra  $260\text{-}280 \mu\text{mol/l}$  che si osserva in EMODnet nei primi 50m. Non si osserva nessuna tendenza di lungo periodo, ma occorre rimarcare che questo data set, diversamente da EMODnet, copre solo gli anni 2000. (Si noti che in questi grafici è stato necessario definire una scala di colori differenti rispetto a Figura 10 e Figura 12).



(a)



(b)

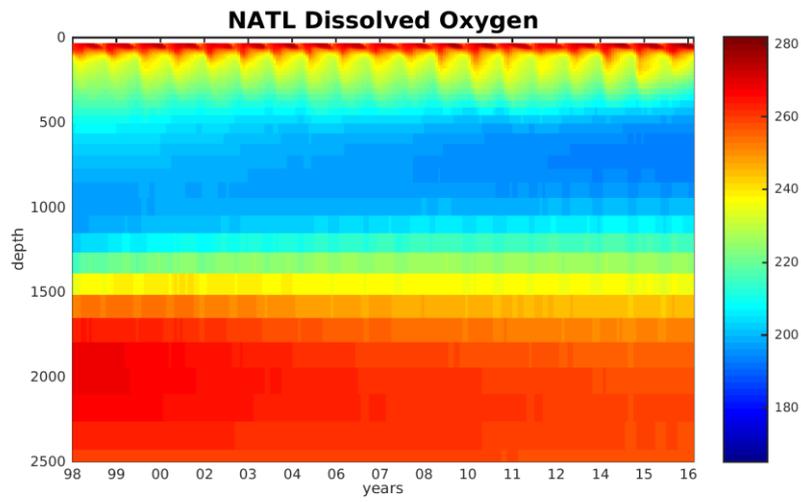
Figura 27 Evoluzione temporale dell'Ossigeno Disciolto ottenuta dai dati mensili della rianalisi biogeochimica del CMEMS per il Mediterraneo: a) su tutta la colonna d'acqua, b) zoom a 200 metri di profondità.

La

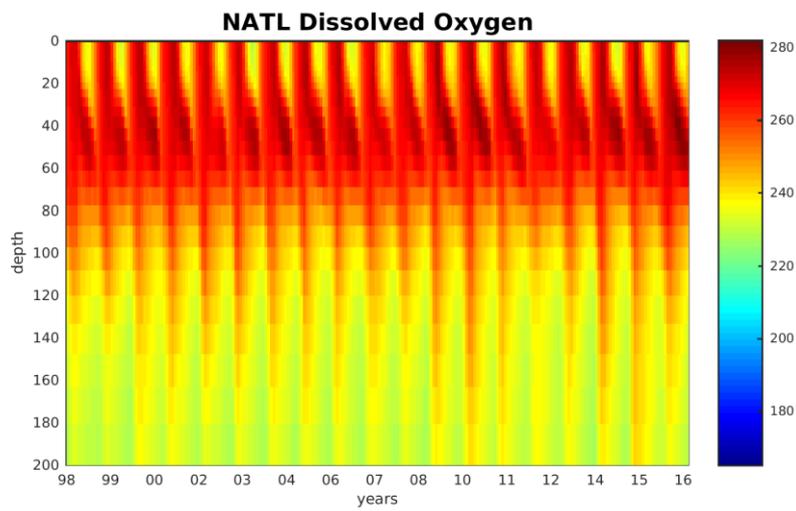
Figura 28 presenta l'evoluzione temporale lungo la colonna d'acqua dell'OD nella Baia di Biscaglia ottenuta dai dati di rianalisi globale. Il valore massimo e il minimo considerati sono gli stessi delle figure precedenti perché in questo caso il ciclo stagionale è consistente a quello presentato dal prodotto EMODnet. Si osserva un pattern verticale caratterizzato da una concentrazione elevata in superficie, valori minimi nello strato intermedio 300-1200m ed un successivo aumento a profondità più elevate. Valori massimi nello strato superficiale sono confinati a profondità inferiori (<200m) rispetto a EMODnet, mentre lo strato con valori minimi di OD sembra posizionato a profondità lievemente inferiori (300-1200m) rispetto a EMODnet (500-1500m). Si osserva una lieve tendenza negativa della concentrazione di OD nello strato intermedio negli ultimi 10 anni della serie temporale. Sembra anche che il minimo di OD diventi meno profondo, consistentemente con EMODnet. Sono stati realizzati i profili medi stagionali anche dai dati CMEMS (Figura 29).

Nel Golfo del Leone (Figura 29a) mostra una concentrazione più elevata di ossigeno disciolto in superficie, variabile in funzione della stagione, e poi un profilo verticale costante nella restante colonna d'acqua. Questi profili stagionali sono completamente differenti da quelli mostrati in Figura 14 per EMODnet e Figura 21 per il WOA2013 e questo può essere dovuto sia al periodo più recente a cui si riferiscono i dati da cui i profili sono stati calcolati ma anche alla incapacità del modello biogeochimico di riprodurre la dinamica dell'OD.

Anche nella Baia di Biscaglia (Figura 29b) il modello biogeochimico globale non riesce a riprodurre il pattern verticale presentato da EMODnet e WOA2013, per le stesse motivazioni appena avanzate per il Mediterraneo. Il minimo di OD è posizionato a profondità inferiori (~700m) e la dinamica sotto superficiale non è consistente. Si noti però che i ranges di variazioni di OD sono perfettamente consistenti.



(a)



(b)

Figura 28 Evoluzione temporale dell'ossigeno disciolto lungo la colonna d'acqua ottenuto dalla rianalisi biogeochimica del CMEMS nell'Atlantico Settentrionale: a) tutta la colonna d'acqua, b) zoom nei primi 200 metri.

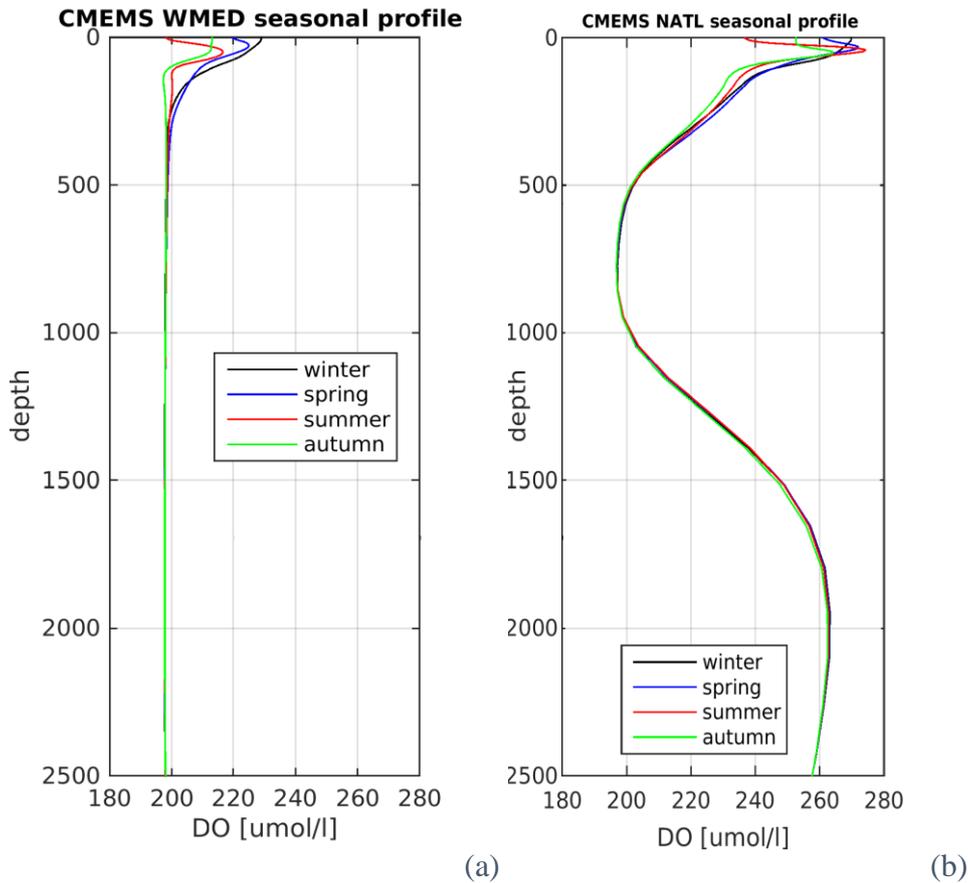


Figura 29 Profili medi stagionali ottenuti dalle rianalisi biogeochimiche del CMEMS: (a) Golfo del Leone; (b) Baia di Biscaglia.

Per i dati CMEMS il calcolo delle medie è stato effettuato in maniera differente. Non sono state considerate tutte e quattro le decadi perché il programma è iniziato nel '98 e prosegue fino ad oggi quindi per poter fare dei confronti realistici si è presa soltanto l'ultima decade [2000-2010] centrata nel 2006. Inoltre le stagioni sono state costruite in quanto i dati erano suddivisi in mesi, ma per poter fare dei confronti è stato opportuno raggruppare tre mesi alla volta in modo da definire tutte e quattro le stagioni.

Il risultato mostra delle mappe orizzontali simili a quelle proposte da EMODnet e da WOA, in quanto quello che dovrebbe essere l'inverno (la prima figura in alto da sinistra) presenta un colore più forte rispetto alle altre che indica un'elevata concentrazione di ossigeno, mentre nelle altre stagioni il colore è più tenue fino alle ultime due immagini che presentano un colore azzurro indice di una bassa

concentrazione di ossigeno. Di fatto si osserva che le stagioni nelle quali la concentrazione è leggermente più alta sono l'inverno e la primavera mentre l'estate e l'autunno hanno concentrazioni molto più scarse.

Nel Golfo di Biscaglia il risultato è più simile a quella proposto dai DataSet precedenti, forse per il fatto che sono dati di rianalisi globale; di fatto la concentrazione di OD è molto elevata in tutte le stagioni in superficie e alla profondità di 2000 metri mentre intorno ai 1000 metri di profondità la concentrazione è molto scarsa. Si può evidenziare anche che per l'Atlantico la variazione di concentrazione coinvolge tutte le stagioni in modo più o meno uguale mentre per il Mediterraneo anche alle stesse profondità si osserva un cambiamento stagionale maggiore. In queste mappe, grazie ad una risoluzione più elevata, è possibile osservare che il pattern orizzontale è prettamente superficiale, probabilmente per l'apporto di nutrienti da parte dei fiumi.

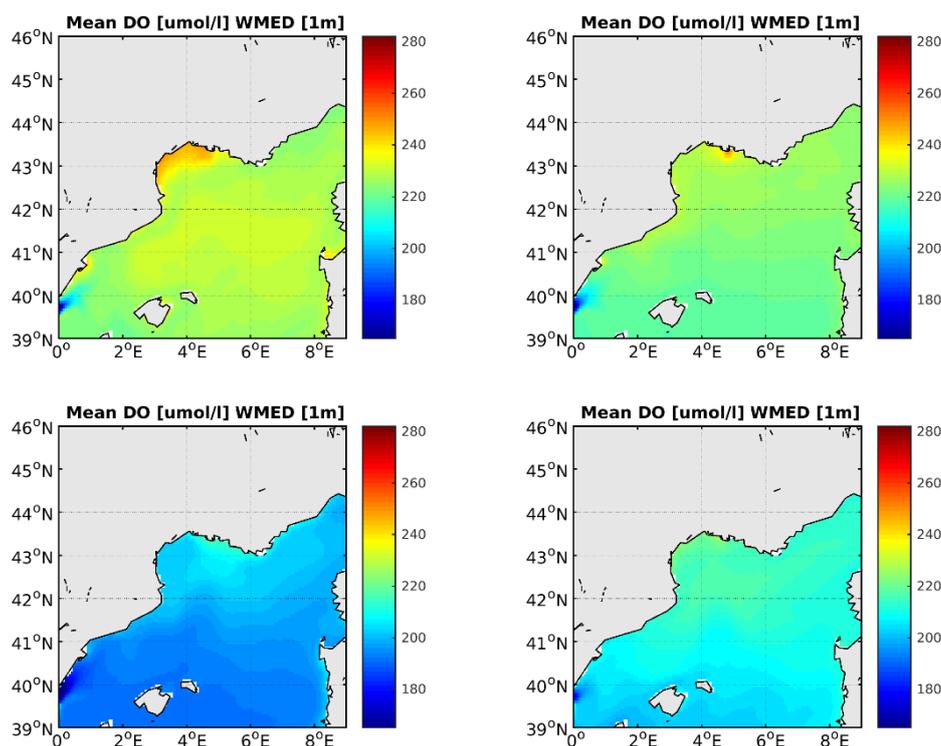


Figura 30 Medie stagionali per i dati CMEMS relativo al Golfo del Leone alla superficie.

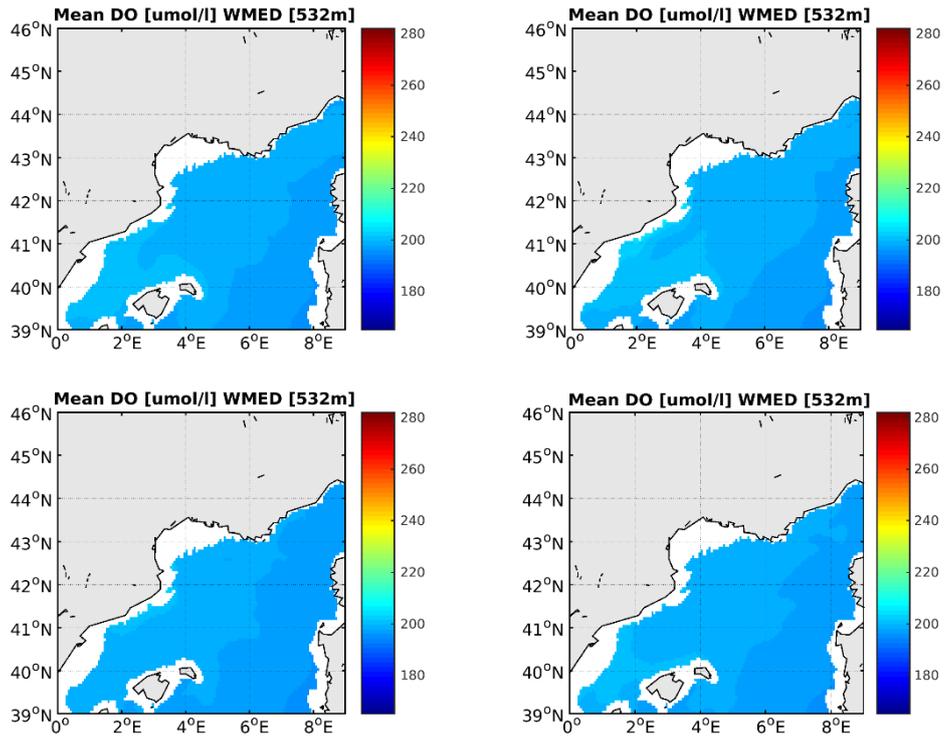


Figura 31 Medie stagionali per i dati CMEMS relativo al Golfo del Leone alla profondità di 500 metri.

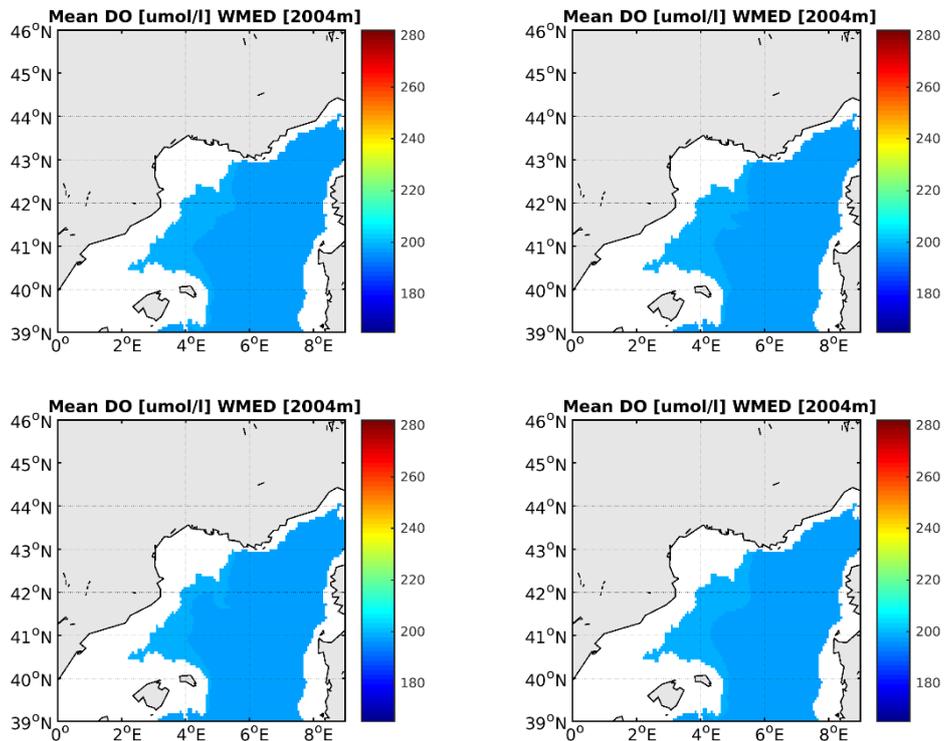


Figura 32 Medie stagionali per i dati CMEMS relativo al Golfo del Leone alla profondità di 2000 metri.

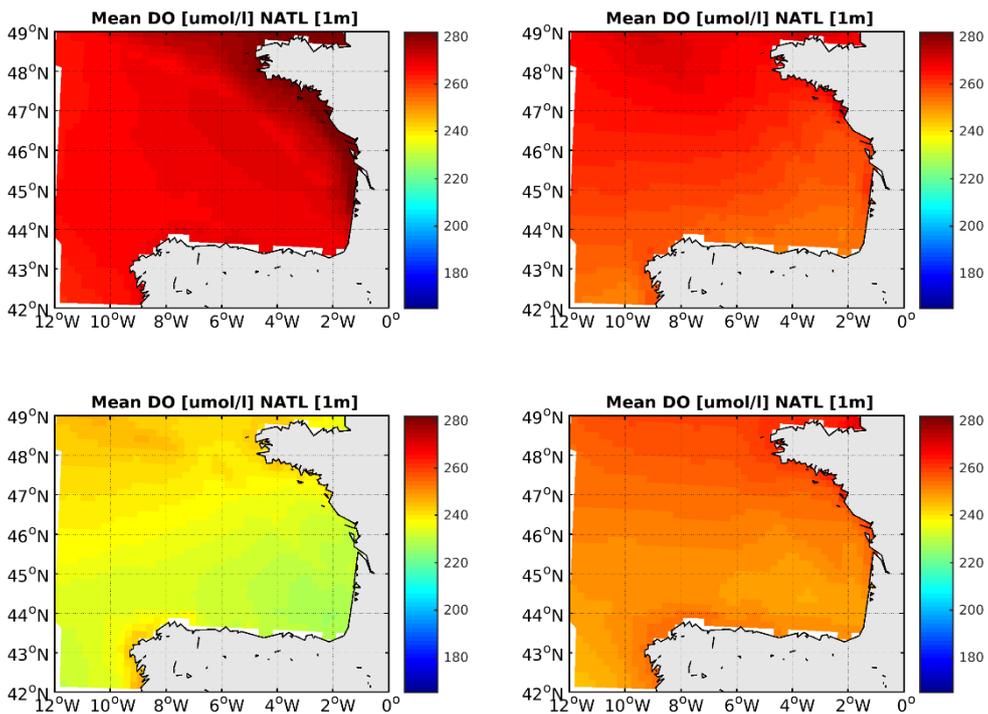


Figura 33 Medie stagionali per il CMEMS relative al Golfo di Biscaglia alla superficie.

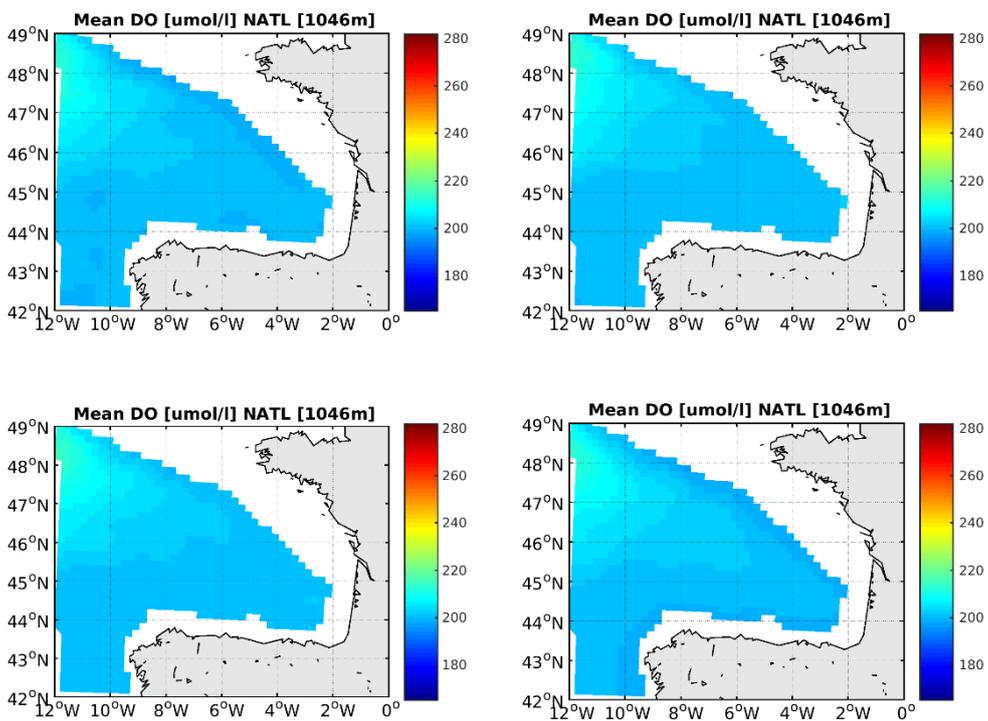


Figura 34 Medie stagionali per i dati CMEMS relative al Golfo di Biscaglia a profondità di 1000 metri.

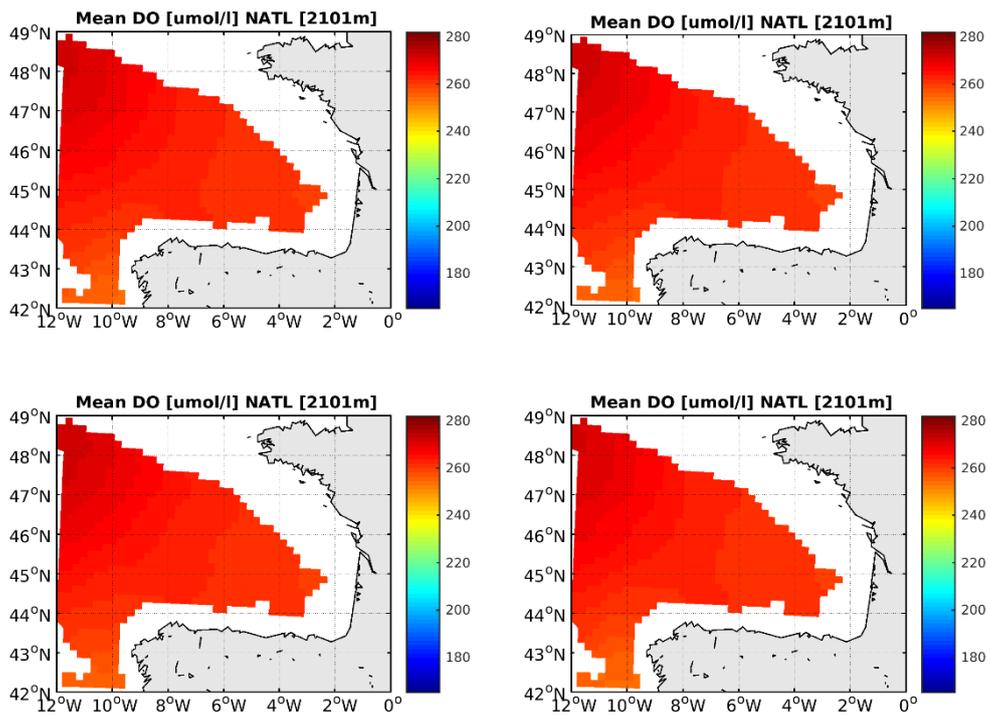


Figura 35 Medie stagionali per il CMEMS relative al Golfo di Biscaglia alla profondità di 2000 metri.

# Capitolo 4

## Conclusioni

In questa tesi è stata descritta la concentrazione di ossigeno a seconda delle stagioni e in un periodo di tempo che mediamente verte dagli anni '70 ad oggi. Inoltre si sono considerate due zone geografiche ben precise come area di studio: il Golfo del Leone nel Mediterraneo nord-occidentale e il Golfo di Biscaglia nell'Atlantico settentrionale.

Per questo studio sono state usati tre prodotti diversi provenienti da tre infrastrutture dati quali EMODnet Chemistry, World Ocean DataBase e Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS), descritte nell'introduzione.

Nel primo capitolo sono state descritte le caratteristiche e le dinamiche del Mar Mediterraneo e del Nord Atlantico per mettere in evidenza l'avvenimento di diversi fenomeni come la formazione di acqua dense, conoscenze che sono state fondamentali per comprendere il comportamento dell'ossigeno disciolto e per l'interpretazione dei risultati ottenuti.

Nel secondo capitolo sono stati descritti i tre diversi data set e la metodologia applicata. In particolare EMODnet e il WOA utilizzano dati, in questo caso Ossigeno Disciolto, che vengono interpolati con diverse tecniche e mettono a disposizione dei prodotti, quali serie di medie decadali e climatologie. CMEMS invece mette a disposizione dei dati da modello, quali rianalisi biogeochimiche, che quindi simulano la dinamica dei parametri biogeochimici mediante l'utilizzo di equazioni dinamiche. Solo dopo aver ottenuto i grafici, gli hovmoller, i profili e le mappe orizzontali, nel terzo capitolo, si sono potuti confrontare i risultati ottenuti.

La parte informatica ha svolto un ruolo preponderante nel mio lavoro, che è stata poi fondamentale per ottenere i risultati cercati. In tutte e tre i DataSet è stata utile per reperire i prodotti, per rielaborarli e attraverso il software MATLAB ottenere i grafici e hovmoller; questo sia per il Golfo del Leone

che per il Golfo di Biscaglia. Grazie a questo tipo di lavoro è stato possibile osservare che l'ossigeno ha dinamiche molto particolari e che risente delle condizioni atmosferiche, alternarsi delle stagioni, e climatiche, e dei processi biologici che lo producono.

In definitiva è stato possibile osservare che i tre data set non sono tutti coerenti tra loro ma che di fatto i primi due (EMODnet e WOA) si discostano dal terzo (CMEMS) in quanto essendo un modello che cerca di simulare il reale comportamento dell'ossigeno presenta ancora incertezze significative nel riprodurre le dinamiche di tale parametro. Mentre nell'Atlantico il profilo di variabilità stagionale non è realistico ma il range di massimo e minimo consiste con quanto osservato negli altri prodotti, nel Mediterraneo si è osservato che non solo non è realistico il profilo ma nemmeno il range.

Questo lavoro è solo un punto di partenza, un inizio per svolgere ricerche sempre più approfondite sull'ossigeno che è ancora poco conosciuto ma soprattutto è un lavoro che può spingere i ricercatori a migliorare le tecniche di interpolazione dei dati, a perfezionare i modelli biogeochimici e a rendere sempre più facile l'accesso a dati e prodotti. I modelli biogeochimici potrebbero beneficiare dell'assimilazione dei dati di Ossigeno Disciolto per rendere maggiormente realistici i propri risultati.

# Bibliografia

- Bower A.S., Le Cann B., Rossby T., Zenk W., Gouldk J., Speer K., Richardson P.L., Prater M.D. & Zhang H.M., 2016. “Directly measured mid-depth circulation in the northeastern North Atlantic Ocean”;
- Coppola L, Legendrea L, Lefevreb D, Prieura L, Taillandiera V, Riquiera E.D,2018.  
“ Seasonal and inter-annual variations of dissolved oxygen in the northwestern Mediterranean Sea (DYFAMED site)”;
- Friocourt Y., Levier B., Speich S., Blanke B., and Drijfhout S.S; “A regional numerical ocean model of the circulation in the Bay of Biscay”,2007;
- Koutsikopoulosi C and Le Cann B,1996: “Physical processes and hydrological structures related to the Bay of Biscay anchovy”;
- Margirierl F, Bosse1,2 A , Testorl P , L’Hevederl B, Mortier M and Smeed D, 2016.  
“Characterization of Convective Plumes Associated With Oceanic Deep Convection in the Northwestern Mediterranean From High-Resolution In Situ Data Collected by Gliders”;
- Marshalll J. and Speer2 K., “Closure of the meridional overturning circulation through Southern Ocean upwelling”,2012;
- Pinardi N., Navarra A., 40 (6), 1299–1326. “Baroclinic wind adjustment processes in the Mediterranean Sea. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography “,1993;
- Pinardi N., Zavattarelli M., Adani M., Coppini G., Fratianni C., Oddo P., Simoncelli S., Tonani M., Lyubartsev V., Bonaduce A., Dobricic S., “Mediterranean Sea large-scale low-frequency ocean variability and water mass formation rates from 1987 to 2007: A retrospective analysis”,2013;
- Seidovl D., Mishonov A., Reagan J. and Parsons R., 2017: “Multidecadal variability and climate shift in the North Atlantic Ocean”;

- Stendaroa I, Kiekea D, Rheina M, Gruber N, Steinfeldt R, 2015. “Interannual to decadal oxygen variability in the mid-depth water masses of the eastern North Atlantic”;
- Teruzzi A., Cossarini G., Lazzari P., Salon S., Bolzon G., Crise A., Solidoro C. (2016). “Mediterranean Sea biogeochemical reanalysis (CMEMS MED REA-Biogeochemistry 1999-2015)”;
- Testor P., Bosse A., Houpert L., Margirier F., Mortier L., Legoff H., Dausse D., Labaste M., Karstensen J., Hayes D., Olita A., Ribotti A., Schroeder K., Chiggiato J., Onken R., Heslop E., Mourre B., D’ortenzio F., Mayot N., Lavigne H., de Fommervault O., Coppola L., Prieur L., Taillandier V., Durrieu de Madron X., Bourrin F., Many G., Damien P., Estournel C., Marsaleix P., Taupier-Letage I., Raimbault P., Waldman R., Bouin M.-N., Giordani H., Caniaux G., Somot S., Ducrocq V., and Conan P. : “Multiscale Observations of Deep Convection in the Northwestern Mediterranean Sea During Winter 2012–2013 Using Multiple Platforms”, 2016;
- Vinci M., Giorgetti A., Lipizer M., “The role of EMODnet-Chemistry in the European challenge for Good Environmental Status”.

# Sitografia

- <https://www.seadatanet.org/>;

- <http://www.EMODnet-chemistry.eu/welcome>;

- <http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products>;

-<http://www.EMODnet-bathymetry.eu/data-products>;

-<https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>;

-[https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_Weather\\_IT/SEMMHUN18IH](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Weather_IT/SEMMHUN18IH);

-<http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to->

[products/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=GLOBAL\\_REANALYSIS](http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS)

[BIO\\_001\\_018](#).

# RINGRAZIAMENTI

- In primo luogo ringrazio i miei genitori e la mia famiglia che non solo mi ha sopportato in questo periodo caotico ma mi hanno sempre permesso di studiare quello che più mi piaceva anche se era difficile per le mie capacità e mi hanno sempre spronato ad andare avanti nei momenti di difficoltà.
- Ringrazio mia sorella per il continuo supporto e per l'esserci sempre stata per me nei momenti più difficili, spero sarà sempre così.
- Ringrazio gli amici e i colleghi che in questi mesi sono stati al mio fianco sostenendomi e incoraggiandomi a fare di più e ad andare avanti quando la voglia mancava.
- Ringrazio Simona per l'aiuto costante, i suggerimenti, i continui consigli e gli insegnamenti che mi ha trasmesso.
- Ringrazio la Professoressa Pinardi per avermi assegnato questo lavoro, per il supporto e per aver creduto nelle mie capacità.
- Un grande grazie va a Luca per tutti gli aiuti con Matlab, informatici, a creare gli script e soprattutto grazie per esserti seduto lì con me quando non ci capivo niente.
- Ma soprattutto il grazie più importante e più grande va ad Alex, senza di lui non sarei riuscita a scrivere neanche due righe di tesi, non solo mi ha sostenuto per tutto il periodo della tesi ma mi ha consolato quando piangevo, mi ha lasciato sfogare quando credevo di non farcela, mi ha dato una mano a rialzarmi quando mi sentivo a terra perché vedevo la tesi come uno scoglio irraggiungibile e per tutta la pazienza che ha avuto con me e che, si spera, avrà anche in futuro. Davvero non so cosa dire se non grazie.

A tutti quanti grazie di cuore, se sono arrivata fino a qui è stato soprattutto per merito vostro.