

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di laurea in Scienze Ambientali

Il “North Atlantic Warming Hole”: circolazione termoalina, cambiamenti climatici.

Revisione bibliografica

Tesi di laurea in Climatologia

Relatore: Zavatarelli Marco

Presentata da: Cucchi Federico

Anno Accademico 2019-2020

“Per molti anni siamo andati avanti con l’illusione di poter sperperare le risorse naturali del pianeta senza subire conseguenze. Ci sbagliavamo. Io mi sbagliavo.”

Il presidente degli USA, dal film The Day After Tomorrow

INDICE

1-SCOPO DELLA TESI.....	Pag 4
2-INTRODUZIONE.....	Pag 5
2.1-IL RUOLO DELL'OCEANO NEL SISTEMA CLIMATICO.....	Pag 5
2.2-CIRCOLAZIONE TERMOALINA E CIRCOLAZIONE ATLANTICA MERIDIONALE (AMOC).....	Pag 6
2.3-MECCANISMI DI FUNZIONAMENTO DELLA THC.....	Pag 10
2.4-CIRCOLAZIONE ATLANTICA.....	Pag 10
2.5-CIRCOLAZIONE ATLANTICA: EFFETTI SUL CLIMA.....	Pag 11
2.6-IL FUTURO DELLA CIRCOLAZIONE OCEANICA ATLANTICA...Pag 14	
3-THE “NORTH ATLANTIC WARMING HOLE”.....	Pag 17
3.1-GENERALITA’.....	Pag17
3.2-POSSIBILI CAUSE DEL WARMING HOLE.....	Pag 18
3.3-POSSIBILI EFFETTI DEL WH SUL CLIMA EUROPEO.....	Pag 28
4-CONCLUSIONI.....	Pag 31
5-RINGRAZIAMENTI.....	Pag 32
6-BIBLIOGRAFIA.....	Pag 32
7-SITOGRAFIA.....	Pag 33

1-SCOPO DELLA TESI

In questo elaborato viene descritta e discussa una particolare struttura del sistema climatico globale: la presenza di un'ampia area dell'oceano globale (in particolare nell'Oceano Atlantico settentrionale) caratterizzata da un trend di raffreddamento della temperatura superficiale, nonostante la progressiva tendenza del sistema climatico ad essere caratterizzato da temperature progressivamente in aumento a causa delle emissioni di gas serra di origine antropica.

2-INTRODUZIONE

2.1-IL RUOLO DELL' OCEANO NEL SISTEMA CLIMATICO

L'oceano è uno dei componenti fondamentali del sistema climatico. La circolazione oceanica globale, in sinergia con quella atmosferica, determina la distribuzione globale dell'eccesso di calore ricevuto nella fascia equatoriale.

La circolazione generale dell'oceano dipende essenzialmente da due “forzanti” principali: l'azione del vento (*wind stress*) sulla superficie marina (responsabile per la cosiddetta *wind driven circulation* e le differenze di densità fra masse d'acqua, dovute a gradienti termici e salini orizzontali e verticali (che determinano le cosiddette correnti termoaline). In realtà il forzante ventoso e quello termoalino agiscono congiuntamente in maniera complessa (non lineare) e la struttura dinamica dell'oceano che risulta dall'azione congiunta di questi due forzanti non può essere attribuita in maniera precisa (da osservazioni oceanografiche) all'uno o all'altro dei due forzanti. Di conseguenza due distinti meccanismi fisici di forzatura dell'oceano generano un'unica circolazione oceanica generale. È possibile però individuare (almeno in maniera approssimata) la causa (il “forzante”) principale alla base di una corrente marina. La circolazione marina orizzontale di larga scala, caratterizzata dai grandi “giri” (gyres) oceanici, ciclonici o anticiclonici (fig.2), dipende principalmente dal forzante ventoso. Osservando fig.1 (che rappresenta in maniera schematica la circolazione generale dell'atmosfera) e la fig.2 (che rappresenta in maniera altrettanto schematica la circolazione generale dell'oceano), si possono notare le relazioni fra la struttura dinamica dell'atmosfera e quella dell'oceano: nella porzione di oceano situata fra 30° N e S le correnti oceaniche si dispongono seguendo la direzione del vento in quella fascia a causa del ridotto effetto della rotazione terrestre. Via via che ci si allontana dall'equatore gli effetti della rotazione terrestre divengono maggiormente rilevanti e, congiuntamente all'azione del vento, determinano la formazione dei grandi “gyres” oceanici. Il forzante termoalino invece regola principalmente i grandi movimenti verticali delle masse d'acqua.

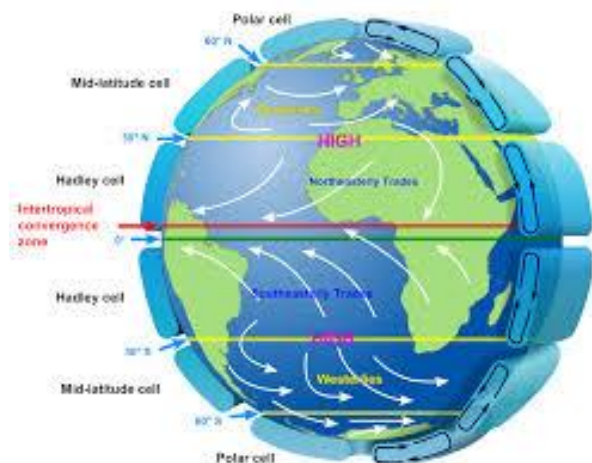


Fig.1
Rappresentazione
schematica della
circolazione
atmosferica globale

Fonte:
www.meteolive.it

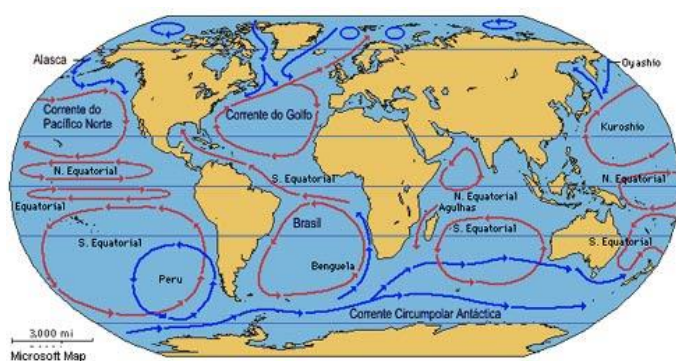


Fig.2
Rappresentazione
schematica della
circolazione
oceanica globale

Fonte:
www.meteolive.it

2.2-LA CIRCOLAZIONE TERMOALINA (THC) E CIRCOLAZIONE ATLANTICA MERIDIONALE (AMOC)

Il termine “circolazione termoalina” (“thermohaline circulation”, THC), indica appunto la circolazione guidata dalle differenze di densità fra masse d’acqua ed è caratterizzata da scale temporali molto grandi. Lo schema fondamentale della circolazione termoalina generale è stato messo a punto da Broecker (1991), il quale pubblicò un articolo, “*The Great Ocean Conveyor*” dove la circolazione oceanica di lungo periodo dovuta al forzante termoalino viene paragonata a un grande nastro trasportatore, come evidenziato in fig.3

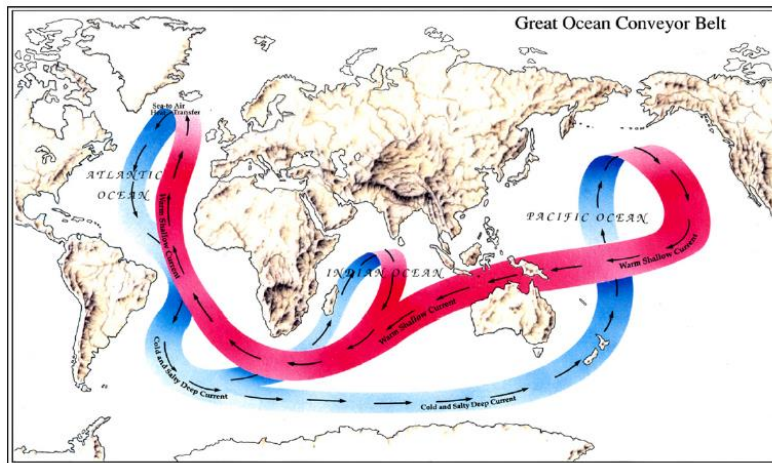


Fig. 3
Rappresentazione grafica della “Great Ocean Conveyor Belt”. In rosso acque calde e meno dense, in azzurro acque più fredde e più dense
 Fonte: Broecker (1991)

Secondo Broecker il processo cruciale alla base di questo tipo di circolazione è la formazione di acque profonde nell'Atlantico settentrionale, la cui variabilità temporale è ritenuta essere responsabile di bruschi e ampi cambiamenti climatici avvenuti nell'emisfero Nord durante l'ultima Era Glaciale. Lo studio evidenzia come le acque nelle vicinanze dell'Islanda vengano raffreddate dal contatto con le masse d'aria fredda invernale che arrivano dall'Artico canadese. Il raffreddamento aumenta la densità dell'acqua superficiale fino al punto in cui può sprofondare negli abissi e scorrere verso sud, formando la parte profonda del nastro trasportatore, che trasferisce acqua nella parte abissale dell'oceano Atlantico ben oltre l'equatore. Questa massa d'acqua, chiamata “*North Atlantic Deep Water*” (NADW), è caratterizzata principalmente da valori relativamente elevati di salinità, e può essere identificata nella parte profonda di quasi tutto l'Oceano Atlantico come possiamo notare dalla fig.4, dove le NADW sono identificate dal colore verde.

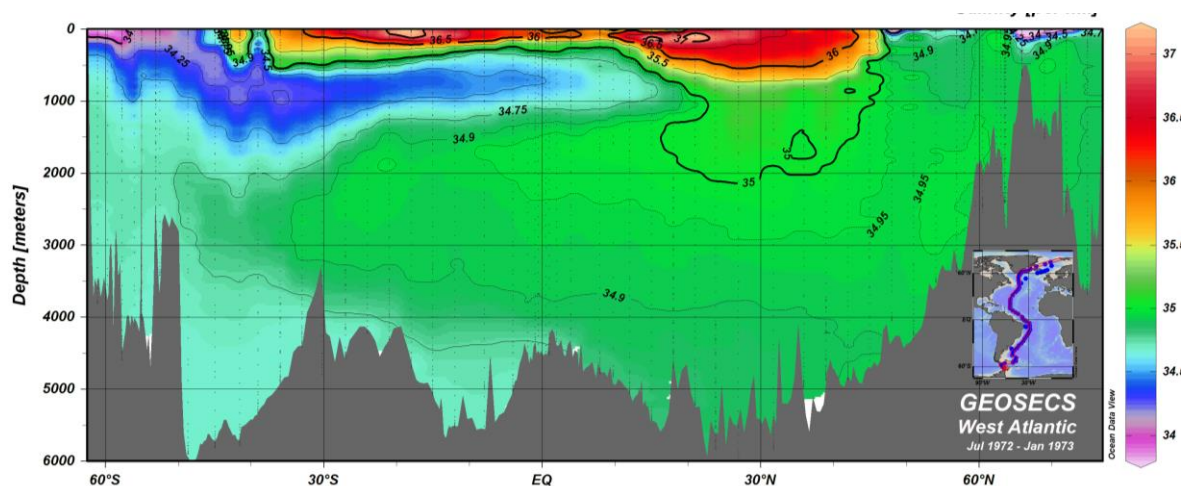


Fig.4

La figura riporta la salinità in relazione alla profondità dell'Oceano Atlantico: a maggiori profondità corrisponde una maggior salinità delle acque.

Fonte: Geosecs

A sud della latitudine 30° S questa massa d'acqua interagisce con un'altra corrente di origine antartica e tende a risalire verso nord, riemergendo nell'Oceano Indiano e nell'Oceano Pacifico. Broecker evidenziò poi una notevole differenza di salinità tra le acque dell'Oceano Nord Atlantico e quelle dell'Oceano Pacifico settentrionale, con queste ultime meno dense e salate a parità di temperatura. Tale differenza è dovuta al trasporto di acqua, sottoforma di vapore acqueo, operato dall'atmosfera.

Rahmstorf (2006), ha definito questo importante processo, facente parte della circolazione termoalina globale, “*Atlantic Meridional overturning circulation*” (AMOC).

Sebbene i termini THC e AMOC siano spesso usati come sinonimi, tra i due ci sono delle differenze fondamentali. La AMOC include la componente ventosa, la THC non ha solo la direttrice meridionale come modalità di azione ma può essere associata anche a celle di circolazione zonale. Quindi è opportuno prestare attenzione alla terminologia: la THC indica un particolare meccanismo di forcing termoalino (l'influenza del raffreddamento o variazione di densità) sulla circolazione oceanica; il termine AMOC

va usato per descrivere un campo di flusso meridionale osservabile e quantificabile come valore medio zonale meridionale di uno specifico bacino oceanico. La fig.5 riporta una schematizzazione più recente della circolazione termoalina, includendo i valori di salinità delle acque, il livello e le forzanti delle correnti oceaniche.

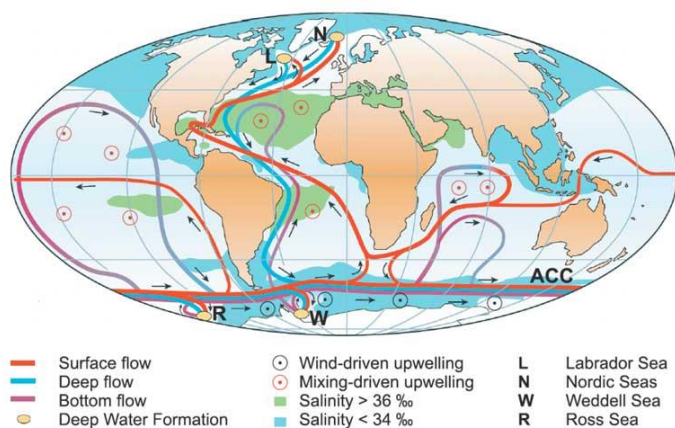


Plate 1. Schematic of the global overturning circulation. See text for explanation. From Kuhlbrodt et al. (2007).

Fig. 5

Rappresentazione più recente schematica della circolazione termoalina globale, la figura include i valori di salinità delle acque, il livello di profondità e le forzanti delle correnti oceaniche.

Fonte: Kuhlbrodt et al (2007)

Rahmstorf (2006), definisce come caratteristiche fondamentali della THC:

- la formazione di acque profonde: cioè lo sprofondamento convettivo di una massa d'acqua che determina importanti processi di rimescolamento verticale. Tale processo avviene in aree ben localizzate dell'oceano globale: il Mare di Norvegia-Groenlandia, il Mare del Labrador, il Mar Mediterraneo, il Mare di Weddell, il Mare di Ross;
- la diffusione delle acque profonde (ad esempio la NADW) in ampie aree dei bacini oceanici;

- La risalita (*upwelling*) verso la superficie delle acque profonde: questo fenomeno non è localizzato come il processo di formazione di acque profonde e non è di conseguenza di facile osservazione. Si ritiene che abbia luogo principalmente nella regione Circumpolare Antartica, nel nord pacifico e nell'Oceano Indiano, come indicato dalla fig.5
- Le correnti superficiali: chiudono il circuito termoalino. Nell'Oceano Atlantico le correnti di superficie che compensano la formazione delle NADW sono la Corrente del Golfo e la Corrente del Nord Atlantico al largo della Scandinavia.

2.3-MECCANISMI DI FUNZIONAMENTO DELLA THC

Le masse d'acqua densa si formano, come già visto, in alcune aree specifiche del nord Atlantico a causa dei processi di raffreddamento ed evaporazione, portando a una diminuzione della temperatura e ad un aumento della salinità.

2.4-CIRCOLAZIONE ATLANTICA

L'eccesso di calore che il pianeta riceve nelle fasce equatoriali-tropicali viene distribuito globalmente dalla circolazione atmosferica e dalle correnti oceaniche, che riscaldano le acque vicino alla superficie e la raffreddano a livelli più profondi. Il ramo più noto di questa circolazione è la Corrente del Golfo, rappresentata in fig.6, una circolazione guidata dai venti che trasporta acque calde dai Caraibi verso nord. La AMOC descrive la circolazione oceanica calcolata come media zonale; il ramo atlantico consiste di una parte guidata dal vento e dalla THC. Sebbene sia il Pacifico che l'Atlantico abbiano forti correnti di superficie verso nord nel loro margine occidentale (Corrente di Kuroshio e Corrente del Golfo), solo nell'Atlantico, che è più salato del Pacifico, le acque oceaniche sono sufficientemente dense da poter inabissarsi.



Fig.6

Schematizzazione della corrente del golfo (in rosso). In azzurro le correnti profonde della circolazione termoalina.

Fonte: www.meteoservice.net

2.5-CIRCOLAZIONE ATLANTICA: EFFETTI SUL CLIMA

L'importanza della AMOC è dovuta, da un punto di vista climatologico al trasporto meridionale di calore verso nord, (fino a 1 PW nel nord Atlantico, da www.meteonetwork.it). Calcoli teorici (www.meteonetwork.it) stimano che il calore trasportato nel Nord Atlantico settentrionale è in grado di riscaldare l'acqua oceanica di questa regione di 5°C circa. Questa è infatti all'incirca la differenza tra la temperatura superficiale (SST) del nord Atlantico e del nord Pacifico a latitudini simili. Il calore trasportato a Nord dalle correnti superficiali (fig.7) limita l'espansione meridionale dei ghiacci artici, riducendo l'albedo con conseguente aumento di temperatura in quella zona, come descritto in fig.7.

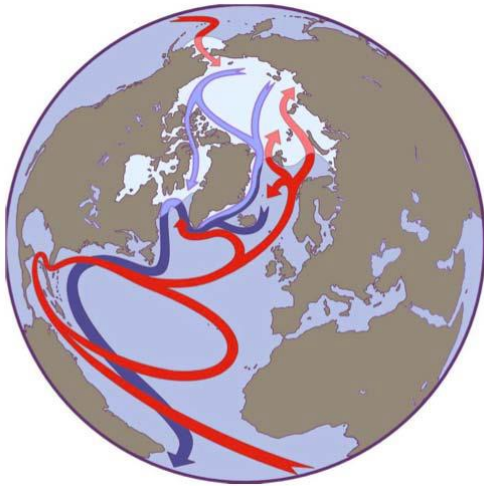


Fig.7

Circolazione nel nord Atlantico e nell'Oceano Artico. Questa immagine semplificata mostra le correnti di superficie in rosso e le Acque Profonde del Nord Atlantico (NADW) in blu. La banchisa invernale (in bianco) viene ridimensionata nel settore Atlantico dalla tiepida Corrente del Nord Atlantico.

Fonte: Rahmstorf et al (2006)

Al di sopra della principale regione di formazione delle acque profonde degli oceani globali, le temperature superficiali dell'aria sono più calde anche di 10°C rispetto alla media latitudinale (Stocker 2002). Questa situazione è determinata dall'azione congiunta dell'oceano e dell'atmosfera nel distribuire il calore verso nord. Il contributo della THC può essere stimato impedendo la formazione di NADW nei modelli climatici, per esempio introducendo una anomalia alina (riduzione di salinità) nelle acque superficiali del nord Atlantico. Il risultato di un esperimento numerico di questo tipo è illustrato dalla fig.8, dove le due immagini indicano la risposta di due differenti modelli previsionali: l'immagine di sinistra è la risposta del primo modello, quella di destra del secondo modello di previsione. Entrambe indicano un calo della temperatura dell'aria, più pronunciato nell'immagine di destra relativa al secondo modello previsionale (Stocker T.F 2002). Si nota come l'assenza di formazione di NADW nell' Atlantico settentrionale, porti ad una riduzione delle temperature atmosferiche di circa 10°C alle alte latitudini.

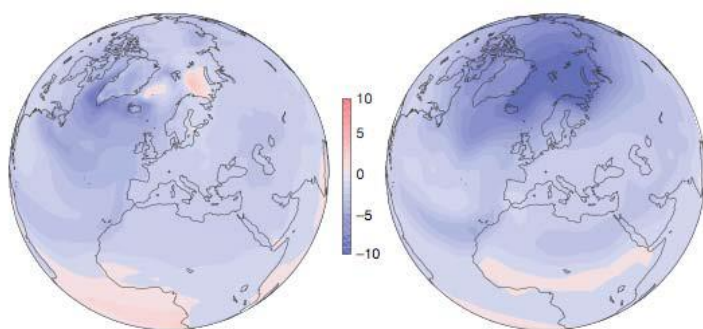


Fig.8

Variazione della temperatura dell'aria in seguito all'interruzione della formazione di NADW. La figura di sinistra è la risposta di un modello, quella di destra di un altro modello. Entrambe indicano un calo di temperatura, più marcato nella figura di destra.

Fonte: Stocker (2002)

Le massime riduzioni di temperatura tendono a verificarsi presso il limite della banchisa artica a causa del feedback positivo dell'albedo del ghiaccio che provoca un maggior raffreddamento della temperatura dell'aria piuttosto che delle SST.

L'ampiezza e l'estensione spaziale del raffreddamento dipendono dai modelli. Molti di essi tendono a raffreddare le temperature sulle terre emerse dell'Europa nord-occidentale (Scandinavia, Isole Britanniche) di alcuni gradi, altri mostrano un forte raffreddamento sul Canada.

Più in generale, nei modelli, se la THC si interrompe, l'emisfero boreale si raffredda mentre quello australe si riscalda, dato che il trasporto trans-equatoriale di calore nell'oceano viene ridotto. Questo cambiamento nella partizione del calore tra i due emisferi sposta l'equatore termico e la l'ITCZ (InterTropical Convergence Zone) a sud.

Infine, il blocco della THC determina una variazione del livello del mare. Oggi il livello del mare nel nord Atlantico è circa un metro più basso rispetto alle latitudini confrontabili del Pacifico, questo perchè le acque profonde si formano solo nell'Atlantico, a causa della dinamica geostrofica delle correnti superficiali. Qualsiasi cambiamento delle correnti superficiali è associato a un rapido aggiustamento della topografia della superficie marina; nel caso di un'interruzione della formazione di NADW, il livello del mare attorno al nord Atlantico aumenterebbe rapidamente di un metro.

Un ulteriore (ma su scale temporali molto ampie) cambiamento del livello del mare risulterebbe inoltre determinato dalla variazione della temperatura nell'oceano profondo, causato dalla mancanza di formazione di NADW.

2.6-IL FUTURO DELLA CIRCOLAZIONE OCEANICA ATLANTICA

Come evidenziato in un articolo presente sul sito www.meteonetwork.it, il riscaldamento globale può influenzare la THC in due modi: alle alte latitudini, il riscaldamento e la diminuzione di salinità delle acque superficiali riducono la densità di tali acque, inibendo di conseguenza il processo di formazione delle masse di acqua profonda. Sempre dall'articolo, emerge come molti modelli predicono un indebolimento significativo della formazione di NADW (del 20-50%) in funzione del processo di riscaldamento globale. Alla riduzione di densità delle acque marine superficiali si potrebbe inoltre aggiungere quella determinata dalla fusione dei ghiacciai della Groenlandia e dall'aumento delle precipitazioni, specialmente lungo i fiumi siberiani (www.meteonetwork.it).

Un possibile effetto della variazione della struttura termoalina dell'oceano è quello di una rapida variazione delle temperature come avvenuto durante l'ultima era glaciale a causa della forte variazione di salinità causata nel nord Atlantico dallo scioglimento dei ghiacci della Laurentide (l'immenso ghiacciaio continentale che durante l'ultima era glaciale ricopriva gran parte del nord America).

In tempi più recenti *Bryden et al. (2005)* stimano che il trasporto meridionale di calore legato alla AMOC si sia ridotto (nel periodo 1957-2004) del 30%, con le riduzioni maggiori concentrate dal 1992 in poi.

In realtà non è facile definire queste variazioni come un "cambiamento" climatico, piuttosto come la manifestazione di una variabilità naturale su scala temporale decadale; per fare questo occorrono serie storiche più lunghe e continuative (non misurazioni di solo pochi, singoli anni, come quelle usate da *Bryden et al.*) che non

sono attualmente disponibili. Un primo studio sulla naturale variabilità del sistema (*Cunningham et al. 2007*) ha analizzato, attraverso misurazioni giornaliere, l'andamento della AMOC atlantica dall'aprile 2004 all'aprile 2005. Lo studio mostra che questa variabilità è alquanto elevata (abbastanza da includere le 5 misure riportate da *Bryden et al.*). Questo potrebbe suggerire che il trend a lungo termine presentato da *Bryden et al.* potrebbe essere nient'altro che una manifestazione della variabilità di lungo periodo naturale del sistema climatico. Ulteriori dati e studi aiuteranno comunque a chiarirlo. Effettivamente un calo del 30% della AMOC avrebbe dovuto in teoria determinare una riduzione delle temperature nel Nord Atlantico e (in parte) sull'Europa, mentre negli ultimi anni le temperature atmosferiche nella regione non hanno fatto altro che aumentare.

Knight et al. (2005), ha simulato l'andamento della THC per gli ultimi 125 anni, ottenendo (fig. 9) un risultato opposto alle stime di *Bryden et al (2005)*, in quanto il modello ha riportato un rafforzamento della THC a partire dagli anni '70. Sempre da fig.9 comunque emerge come nei prossimi decenni la THC subirà un indebolimento.

In gran parte dei modelli di circolazione generale considerati da IPCC (2007) che hanno condotto esperimenti di proiezione nel futuro della struttura e del funzionamento del sistema, la THC tende a indebolirsi ma non ad interrompersi e il processo di global warming causato dalle emissioni di gas serra sarebbe comunque superiore agli effetti di raffreddamento causati dall'indebolimento della THC.

Al contrario, l'esame dell'evoluzione temporale della SST indicherebbe un rafforzamento del 10% del trasporto della AMOC per il periodo 1970-1990. Perciò è molto probabile che alla fine del secolo scorso la AMOC abbia subito dei cambiamenti significativi a scale pluriannuali/decennali ma non c'è un'evidenza coerente sul trend della forza media della AMOC.

IPCC (2013) nel suo ultimo rapporto, sulla base delle simulazioni dei modelli, ritiene “molto probabile” un graduale rallentamento del 25% (ma con una incertezza di stima molto elevata) della AMOC nel corso del ventunesimo secolo.

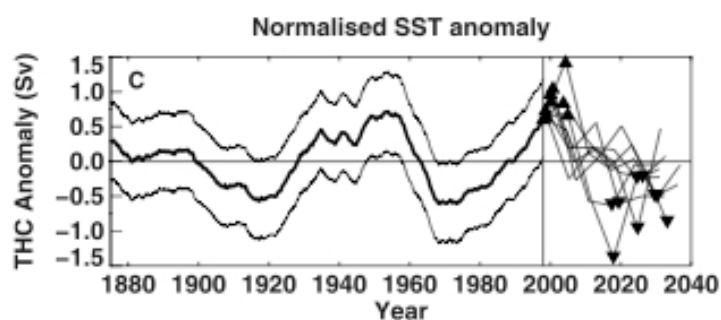


Fig.9

Ricostruzione e previsione della THC (e intervallo di confidenza); tutti i membri dell'ensemble mostrano un calo della sua forza nei prossimi 3 decenni. L'andamento del grafico fino all'anno 2000 contrasta fortemente con i risultati di Bryden et al, che indicano un calo del 30% della THC.

Fonte: Knight et al. 2005

3-THE “NORTH ATLANTIC WARMING HOLE”

3.1 GENERALITA’

La ricostruzione dell’anomalia di temperatura media superficiale (SST) dal 1870 al 2010 dell’Oceano globale (fig.10) ne indica un progressivo aumento verso valori positivi.

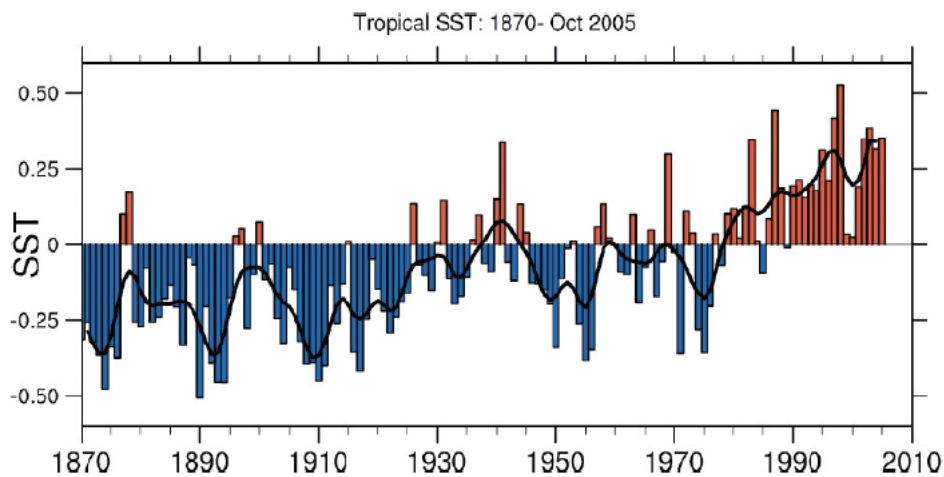


Fig. 10

Andamento della anomalia della temperatura superficiale media per il periodo 1870 al 2006. La temperatura è misurata in °C.

Fonte: Anthes et al. (2006)

Un tale aumento è coerente con l’aumento delle temperature atmosferiche di superficie nel corso degli ultimi anni. Sono però state osservate regioni dell’Oceano globale in cui questo aumento non è così pronunciato, anzi in alcune aree si è addirittura osservata una progressiva diminuzione del valore di temperatura. Una di queste zone è situata nell’Oceano Atlantico, immediatamente a sud della Groenlandia. La fig.11, che riporta il trend di variazione della SST (in °C/anno) per il periodo 1993-2019, illustra in maniera evidente come la quasi totalità della superficie oceanica abbia subito un processo di riscaldamento con la appariscente eccezione della menzionata zona a sud della Groenlandia.

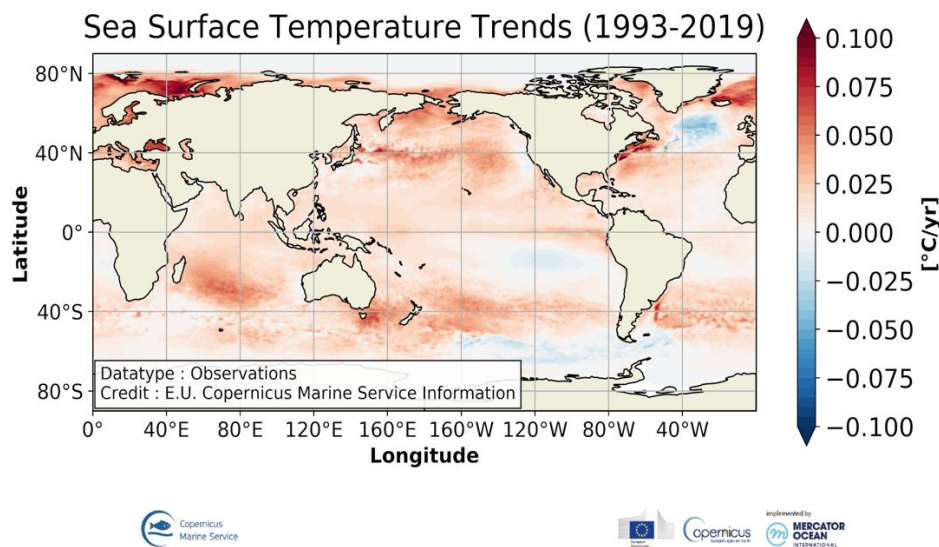


Fig.11

Trend di variazione di temperatura delle acque superficiali oceaniche nel periodo 1993-2019.

Fonte:

<https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators/global-ocean-trend-map-sea-surface-temperature>

Questa zona è stata definita come il “*North Atlantic Warming Hole (WH)*” o “buco di riscaldamento” proprio per la tendenza al raffreddamento opposta a quella dell’oceano globale.

3.2-POSSIBILI CAUSE DEL WARMING HOLE

Il motivo per cui una limitata ma ben definita regione dell’oceano globale sia soggetta ad una evoluzione temporale contraria a quella generale non è ancora del tutto compreso. In particolare deve essere chiarito se il fenomeno dipenda da alterazioni del sistema climatico indotte dalla pressione antropica, e quali siano le connessioni fra il WH e una variazione delle caratteristiche della circolazione termoalina globale; in particolare dell’indebolimento della AMOC. Di seguito si riportano alcune recenti ipotesi basate principalmente sui risultati di simulazioni numeriche condotte con modelli matematici del sistema climatico.

Keil et al. (2020), nel loro modello hanno mantenuto fisso il trasporto di calore oceanico dipendente dalla circolazione termoalina mantenendo solo le usuali

fluttuazioni stagionali e rimuovendo tendenze caratterizzate da scale temporali più ampie, per valutare il possibile ruolo dell'atmosfera, ottenendo come risultato il mantenimento del WH sebbene indebolito. Inoltre, dallo studio è emerso come la superficie del mare in raffreddamento contribuisca a formare una maggior quantità di nubi, le quali schermando la radiazione solare in arrivo, generano un effetto di retroazione (feedback) di tipo positivo, che determina una ulteriore diminuzione di temperatura della superficie oceanica, come si nota nello schema di fig.12, dove le frecce rosse rappresentano l'AMOC, la circolazione del vortice subpolare è rappresentata dalle frecce blu, e la radiazione solare schermata è in giallo.

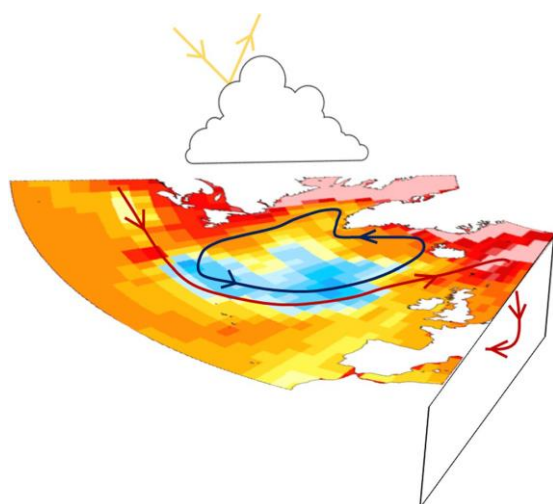


Fig. 12

Rappresentazione schematica della formazione di nubi causate dalla presenza di acque più fredde, le quali a loro volta riflettono la radiazione solare non consentendo il riscaldamento delle acque.

Fonte: Keil et al (2020)

In una seconda serie di esperimenti, *Keil et al., (2020)* si sono concentrati invece su una situazione esattamente opposta, lasciando la circolazione termoalina (e conseguentemente l'associato trasporto oceanico di calore) libera di evolvere nel tempo. Per condurre questa ricerca ci si è basati sulla cosiddetta tecnica delle “ensemble simulations”, riassumibile come segue:

- la simulazione della circolazione oceanica relativa al periodo 1850-2005 è stata ripetuta 100 volte; per ogni ripetizione sono state leggermente modificate (in

maniera casuale) le condizioni iniziali o le caratteristiche dei forzanti della circolazione.

- lo stesso approccio è stato adottato per la simulazione relativa al periodo 2006-2156, aggiungendo il progressivo aumento (1% per anno) dei livelli di CO₂ atmosferica.

Le variazioni temporali delle caratteristiche oceaniche ottenute da questi “ensembles” di simulazioni determinano un’area di evoluzione temporale che definisce l’ambito di possibile variazione. Questa tecnica, ripetendo le stesse simulazioni da condizioni iniziali e/o forzanti leggermente differenti permette di ottenere risultati associati ad una valutazione quantitativa dell’incertezza associata alle simulazioni stesse. I risultati ottenuti hanno indicato che la causa principale del warming hole è associata alla variazione della circolazione oceanica.

In particolare, i risultati indicano che complessivamente il Nord Atlantico riduce il suo contenuto di calore a causa di ridotti contributi di avvezione di calore dalle latitudini meridionali e di aumentati trasporti verso le alte latitudini. Questa variazione nelle caratteristiche del trasporto oceanico associato alla circolazione termoalina risulta dovuta ad un rafforzamento della circolazione oceanica a livello del “Subpolar oceanic gyre” (fig.13), un “giro” anticiclonico di correnti che caratterizza la circolazione dell’Oceano Atlantico settentrionale. Il progressivo rafforzamento di questo gyre determina lo spostamento verso nord ovest della corrente nord Atlantica, causando un ridotto apporto di calore da sud, a beneficio delle regioni artiche dell’Oceano Atlantico.



Fig. 13

*Schema della
circolazione oceanica
nell'Atlantico del nord.
SPG: Subpolar gyre;
NAC: Corrente Nord
Atlantica*

Fonte:

<https://www.normer.uio>.

Le cause del rafforzamento del vortice sono alquanto complesse, ma risultano assai ragionevolmente ascrivibili alle emissioni antropiche di gas serra, in quanto nei modelli matematici questo rafforzamento compare in conseguenza degli aumentati tenori atmosferici di CO₂.

Wood (2020), rileva che le simulazioni di “ensemble” rendono più affidabile la comprensione delle variazioni climatiche decadal, e se esse sono da imputare a cause antropiche o naturali. In un ensemble costituito da 100 simulazioni riferite al passato, il WH è sempre presente, nonostante non sempre nelle simulazioni si sia assistito ad un indebolimento dell'AMOC. Ciò che era comune a tutte le simulazioni era che il trasporto di calore verso latitudini più elevate aumentava in risposta al riscaldamento globale. Questo aumento spiega la formazione del WH, che sarebbe quindi attribuibile alle emissioni antropiche di gas serra. Il WH può essere quindi causato da una variazione climatica dovuta alla forzante antropica, in cui l'indebolimento della AMOC, come si può notare nella fig.14, comporta una maggior intensità del WH, ovvero un suo maggior raffreddamento, calcolato come differenza tra la temperatura media del WH stesso e della SST.

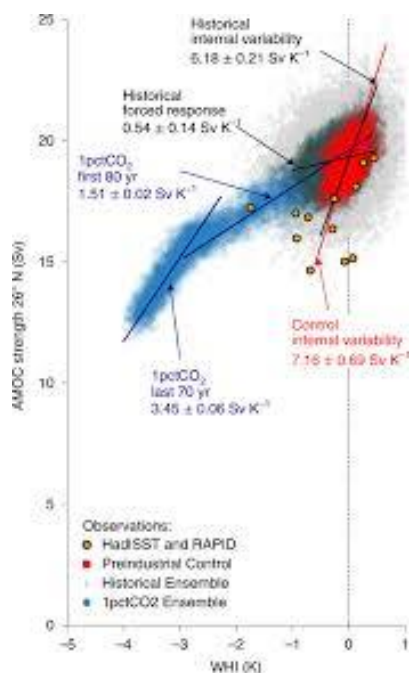


Fig. 14

Il grafico lega la forza dell'AMOC con l'intensità del WH, data dalla differenza di temperatura tra la media del WH e della SST. Si nota come a una minor forza dell'AMOC corrisponda un WH più freddo

Fonte: Keil et al (2020).

A tutt'oggi non risulta chiaro se l'indebolimento attuale della AMOC sia un risultato delle variazioni climatiche di tipo antropico o sia una manifestazione della variabilità naturale di lungo periodo della circolazione termoalina.

Di conseguenza utilizzare il WH per valutare la forza della AMOC, come accade in alcune ricerche, va fatto con cautela. Mentre una AMOC indebolita è stato uno dei molti fattori potenzialmente in gioco in passato, nel futuro, dominato dall'aumento dei gas serra, i cambiamenti nel trasporto di calore oceanico giocheranno un ruolo importante nel comportamento del WH.

Rei Chemke et al (2020), hanno evidenziato, come la presenza del WH sia presumibilmente attribuibile a cause antropiche.

Per comprendere come le variazioni temporali di temperatura oceanica superficiale costituiscano la risposta forzata del sistema alle emissioni antropiche di gas serra, nello studio sono state utilizzate le simulazioni "ensemble" di 3 modelli. Il primo modello è il Community Earth System Model 40 – members Large Ensemble (CESM-LE), il secondo è il Max Planck Institute Earth System Model 100 members Grand Ensemble (MPI-GE) e come terzo il modello Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CIMP5). Sono stati acquisiti poi i dati della SST

attraverso il satellite della NOAA e HadISST. I 3 modelli sono fra loro indipendenti, ma sono stati forzati utilizzando le emissioni di gas serra osservate per il periodo 1850-2005. Lo scenario (RCP8.5) di emissioni antropiche di gas serra per il 21° secolo definito dall'IPCC è stato poi utilizzato per effettuare proiezioni nel futuro (sino al 2100) del funzionamento del sistema climatico. Nella fig.15 sono riportati risultati dei modelli, espressi come valore medio della variazione della SST in °C/anno per i periodi 1982-2017 (fig.15 c, d, e), e 1982-2100 (fig.15 f, g, h), insieme a due analisi delle osservazioni satellitari di SST per il periodo 1982-2017 (fig.15 a, b).

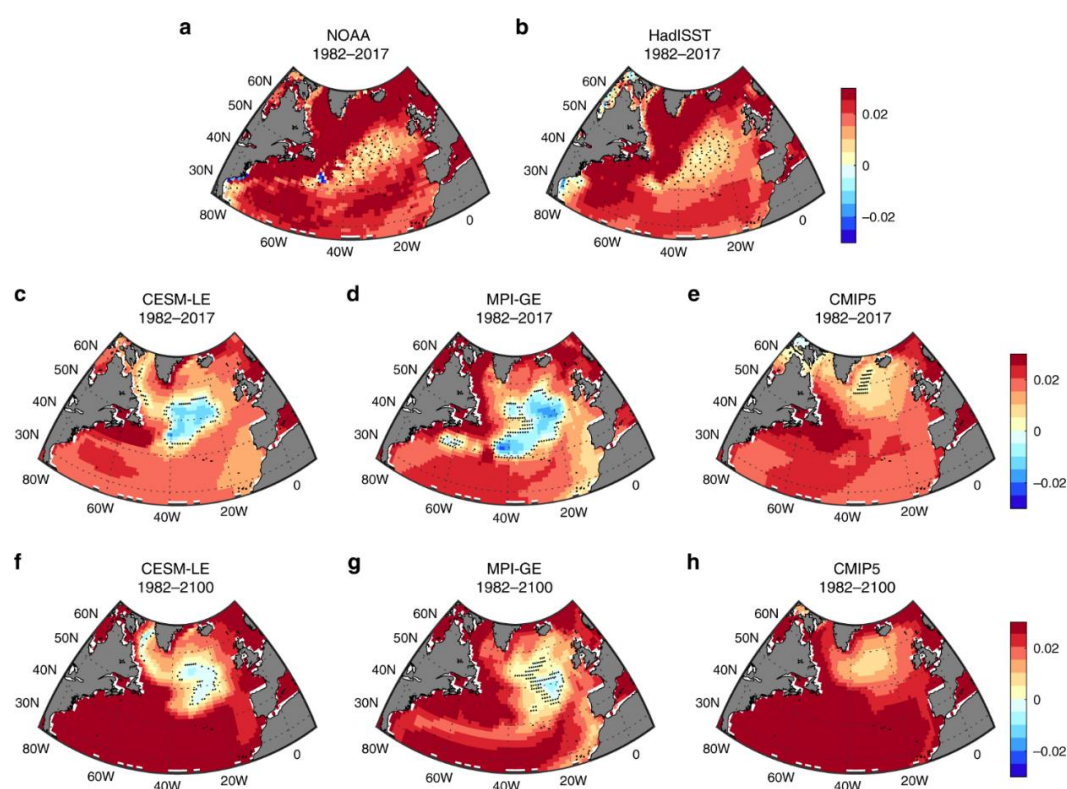


Fig. 15

Tendenza della temperatura superficiale dell'Oceano (1982-2017). La fig.15a rappresenta la temperatura media registrata dal NOAA. La fig.15b rappresenta la temperatura media registrata dal HadISST. Le figure 15c e 15d rappresentano la media della temperatura ottenuta tramite le simulazioni dei modelli CESM-LE, MPI-GE 40. La fig. 15e rappresenta la media della temperatura ottenuta dal modello CMIP5. Le figure 15f, 15g e 15h rappresentano la tendenza della temperatura media fino al 2100 utilizzando i modelli CESM-LE, MPI-GE e CMIP5. Le temperature sono espresse in °C/anno.

Fonte: Rei Chemke et al (2020)

Dai risultati riportati in fig.15, notiamo che la tendenza della temperatura media, espressa in °C/anno, nelle simulazioni dei modelli CESM-LE e MPI-GE mostra un andamento simile a quello osservato dai satelliti NOAA e HadISST, con un riscaldamento a basse e alte latitudini e un raffreddamento a latitudini medie, evidenziando la presenza del WH. Solo il modello CMIP5 mostra un raffreddamento più blando e più spostato a Nord, probabilmente a causa di un diverso input dei dati. Tutti e tre i modelli sono concordi nel riportare la presenza del WH anche in futuro, nonostante qualche piccola differenza.

Successivamente, per rispondere alla domanda se il WH sia causato da fattori antropici, gli scienziati hanno utilizzato 4 modelli di simulazione quasi identici al CESM-LE, ma con un uno dei forzanti alternativamente mantenuto costante: gas serra (LE-fixGHG), aerosol (LE-fixAER), combustione di biomasse (LE-fixBMB) e uso/modifica del suolo (LE-fixLUC). La fig.16 riporta le forzanti considerate e la temperatura superficiale media dell'Oceano negli anni 1982-2017. Si nota chiaramente che quando vengono mantenute costanti le emissioni di gas serra, l'anomalia termica che rappresenta il WH scompare, al contrario quando si fissano gli aerosol, la combustione di biomasse e l'uso/cambio dei suoli l'anomalia termica negativa o leggermente negativa rimane. Questo attesta che la formazione del WH è correlata all'emissione di gas serra, poiché un tale aumento, come noto, comporta un surriscaldamento termico globale, soprattutto ai poli che comporta una maggior fusione delle calotte polari e un conseguente aumento di acqua dolce che si riversa in Oceano. Questo afflusso di acqua dolce può andare a modificare il meccanismo di base della circolazione termoalina e di conseguenza della circolazione Nord Atlantica in quanto, come descritto nei paragrafi precedenti, entrambe dipendono da un delicato equilibrio tra acqua dolce e salata, andando in questo modo a indebolire entrambe. C'è da chiedersi cosa potrà succedere alla temperatura superficiale dell'Oceano durante il secolo in corso tenendo in considerazione che l'emissione di gas serra aumenterà costantemente.

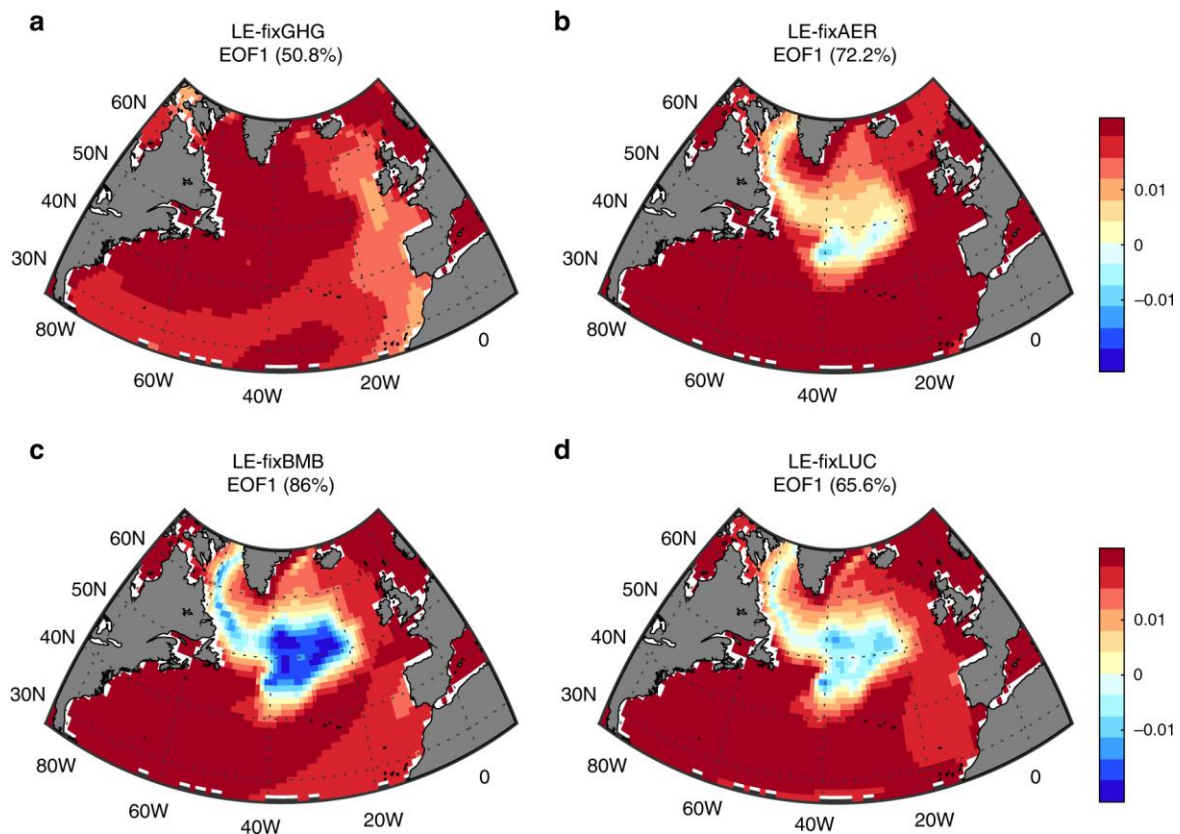


Fig. 16

Tendenza della temperatura superficiale media dell'Oceano negli anni 1982-2017 fissando i parametri gas serra (a), aerosol (b), combustione di biomasse (Fig.c) e uso del suolo (d)

Fonte: Rei Chemke et al (2020)

Rei Chemke et al 2020, inoltre hanno investigato l'impatto dell'aumentata concentrazione atmosferica di gas serra sulla variazione della SST. I processi che determinano la variazione della SST sono: flussi di calore aria-mare, avvezione zonale e meridionale e trasferimenti di calore verticali. La fig.17 riassume l'importanza di ciascuno di questi processi (espressi come flusso di energia, W/m^2) nel determinare variazioni (aumenti o diminuzioni) della SST media nella regione del WH, così come simulata da un *Earth System Model*. Si può notare come i flussi di calore aria-mare

(fig.17a) e la avvezione termica meridionale (fig.17c) abbiano significativo impatto, sebbene di segno opposto, mentre l'avvezione termica zonale e i trasferimenti di calore verticali (fig.17b, d) non variano di molto il loro contributo alle variazioni termiche. Per quanto riguarda invece l'avvezione termica meridionale si nota come, a partire dagli anni '90, essa trasferisca meno calore nella regione. Tale tendenza al raffreddamento si oppone e, in qualche località supera, il riscaldamento dovuto ai flussi di calore aria-mare, contribuendo così alla formazione del WH. Gli altri due termini, trasferimento di calore zonale e verticale, non contribuiscono alla formazione del warming hole. Per esaminare se il recente declino dell'avvezione termica meridionale sia imputabile ai gas serra, lo studio ha confrontato le tendenze dell'avvezione meridionale utilizzando (sempre con procedura "ensemble") un Earth System Model. La dinamica generale del clima è stata simulata in 5 esperimenti indipendenti, rivolti a definire la sensitività del sistema ai forzanti, definiti e caratterizzati come segue:

- CESM-LE: Esperimento di controllo. Sono stati utilizzati tutti i forzanti e la loro variabilità temporale.
- LE-FixGHG: la concentrazione atmosferica di gas serra è stata mantenuta costante nel tempo e fissata ai valori attuali.
- LA-FixAER: la concentrazione atmosferica di aerosol è stata mantenuta costante nel tempo e fissata ai valori attuali.
- LE-FixBMB: le emissioni di CO₂ dovute alla combustione di biomasse sono state mantenute costanti nel tempo e fissate ai valori attuali.
- LE-FixLUC: le condizioni di uso del suolo (e di conseguenza il loro impatto climatico) sono state mantenute costanti nel tempo e fissate ai valori attuali.

Il risultato ottenuto è riassunto nella fig.17e, dove si può notare che la costanza delle concentrazioni di gas serra determina un aumento dell'avvezione termica meridionale anziché l'indebolimento osservato nell'esperimento di controllo o negli altri esperimenti di sensitività ai forzanti.

Tale meccanismo è coerente con un indebolimento della circolazione oceanica riscontrato nelle future proiezioni climatiche.

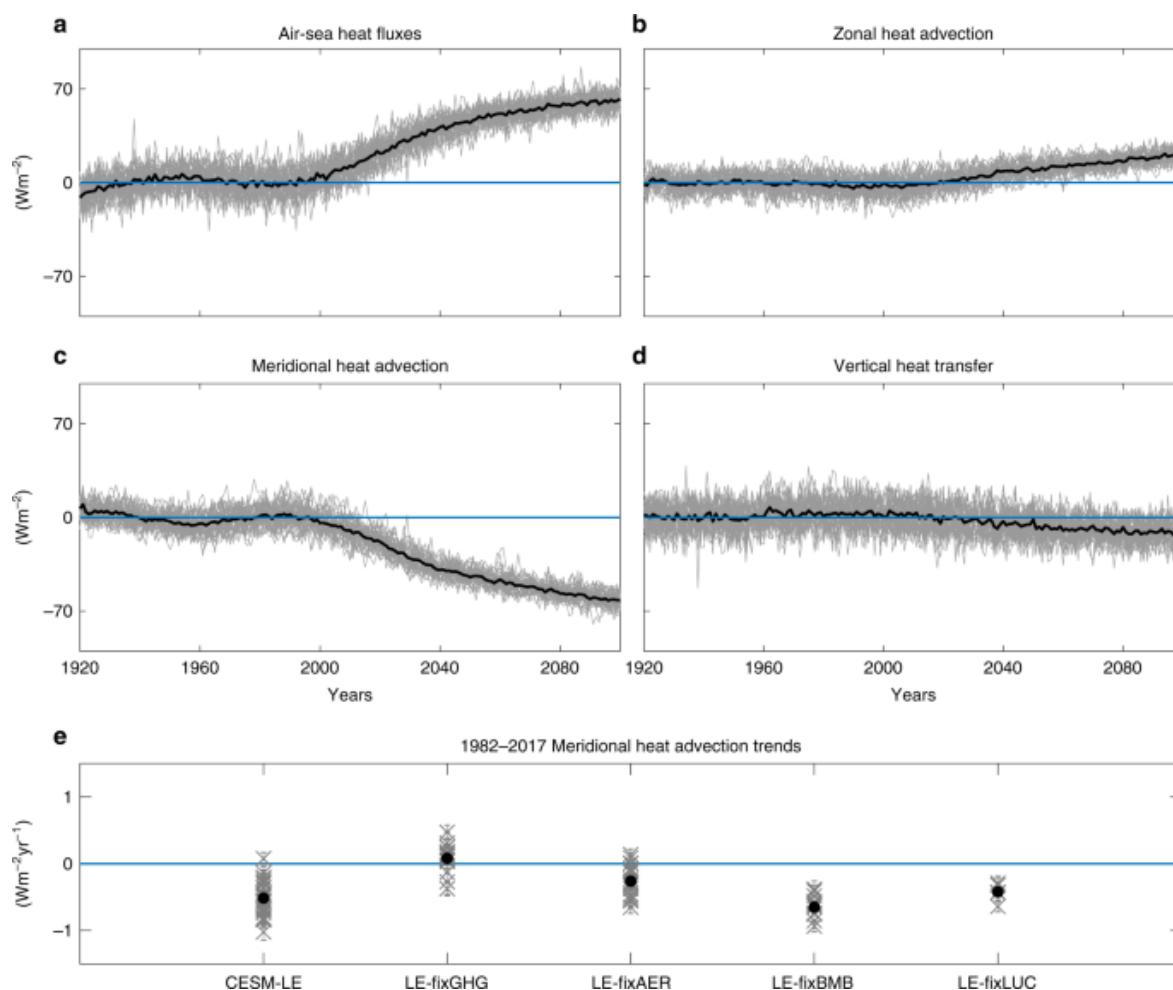


Fig. 17

Flussi di calore aria-mare (17a), Intensità dell'avvezione termica zonale (17b), Intensità dell'avvezione termica meridionale (17c), Intensità del trasporto verticale di calore(17d). Tutti i parametri contengono le previsioni fino al 2100 e sono espressi in forma di flusso di energia (W/m^2). La fig.17e rappresenta il trend del flusso di avvezione termica meridionale, andando a fissare i gas serra (GHG), gli aerosol (AER), la combustione di biomasse (BMB) e l'uso/cambiamento del suolo (LUC).

Fonte: *Rei Chemke et al (2020)*

3.3-POSSIBILI EFFETTI DEL WH SUL CLIMA EUROPEO

Dopo aver esaminato le possibili cause della formazione e mantenimento del WH nel Nord Atlantico, vengono ora descritti gli effetti che esso può avere sul clima europeo. Una porzione di Oceano Atlantico caratterizzata da un'anomalia negativa di SST può rendere più facile la formazione di strutture atmosferiche anticicloniche e di sistemi di blocco (interruzione della propagazione delle perturbazioni Atlantiche da ovest verso est, a causa di un anticiclone) che possono determinare importanti anomalie atmosferiche termiche e pluviometriche di rilievo. Per spiegare meglio l'associazione fra anomalia negativa di SST e Anticicloni Subtropicali di Blocco (ASB) occorre rilevare che questi ultimi si formano di norma quando un anticiclone dinamico freddo che segue al transito di una saccatura (*Wexler,1937*) si dirige verso l'equatore, riscaldandosi (*North et al.,2014*). Una volta poi che gli ASB si sono formati, la loro persistenza è favorita da due fattori e cioè:

1. l'oceano freddo che stabilizza la massa d'aria sovrastante;
2. la circolazione monsonica estiva che accentua la convergenza in quota e la divergenza al suolo propria dell'anticiclone.

Ovviamente il primo fattore prevale nel periodo invernale e il secondo nel periodo estivo e tuttavia anche in estate un oceano più freddo può rivelarsi più favorevole all'instaurarsi di anticicloni subtropicali di blocco.

In tale chiave può essere spiegato quanto evidenziato da *Duchez et al. (2016)* i quali attribuiscono a fasi fredde dell'Atlantico le ondate di calore estive di lunga durata sull'Europa (2003, 2006, 2007, 2015) che sono come noto prodotte da un anticiclone di blocco da sud-sudovest, che dall'Atlantico subtropicale si protende verso il nostro continente, come mostrato in fig.18, ove si nota la presenza di una bassa pressione in Atlantico che favorisce il richiamo di un'alta pressione sull'Europa.

Come dunque descritto in precedenza, nel periodo estivo l'anomalia termica negativa nel Nord Atlantico (WH) può causare la persistenza di un anticiclone responsabile di prolungate ondate di caldo in Europa.

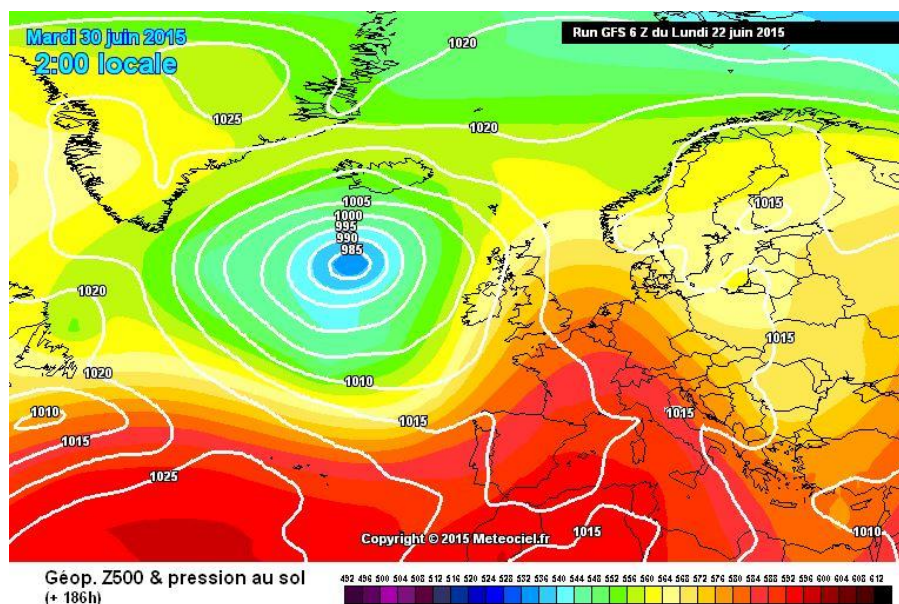


Fig. 18

Campo di pressione atmosferica (isolinee) e di geopotenziale (colore) riferito al 30 Giugno 2015 in cui notiamo una bassa pressione sull'Oceano Atlantico, caratterizzata da bassi valori di pressione atmosferica (in mbar, colore blu) e risalita anticlonica in atto sull'Europa, caratterizzata da elevati valori di pressione atmosferica (colore rosso/arancione)

Fonte: www.meteociel.fr

Nel periodo invernale invece un anticiclone di blocco posto nell'Oceano Atlantico, la cui permanenza in loco, come descritto precedentemente, è legata all'anomalia termica negativa presente nel Nord Atlantico (WH), può causare basse temperature e neve sull'Europa Centrale e il bacino del mediterraneo. L'anticiclone in questione, infatti, blocca correnti zonali (miti e umide) e, nel contempo, può favorire l'arrivo di masse d'aria fredda dall'est del continente europeo.

L'afflusso di aria fredda artica o polare continentale verso il Mediterraneo, può essere la scintilla per generare basse pressioni definite “da contrasto” in quanto esprimono la risposta tra l’interazione delle acque mediterranee con le gelide correnti orientali, come rappresentato in fig.19, dove notiamo appunto l’alta pressione di blocco disposta lungo i meridiani nell’Oceano Atlantico, la quale arresta il flusso umido e mite da Ovest. Contemporaneamente aria gelida da est irrompe nel Mar Mediterraneo, andando a formare la bassa pressione di cui si è discusso precedentemente.

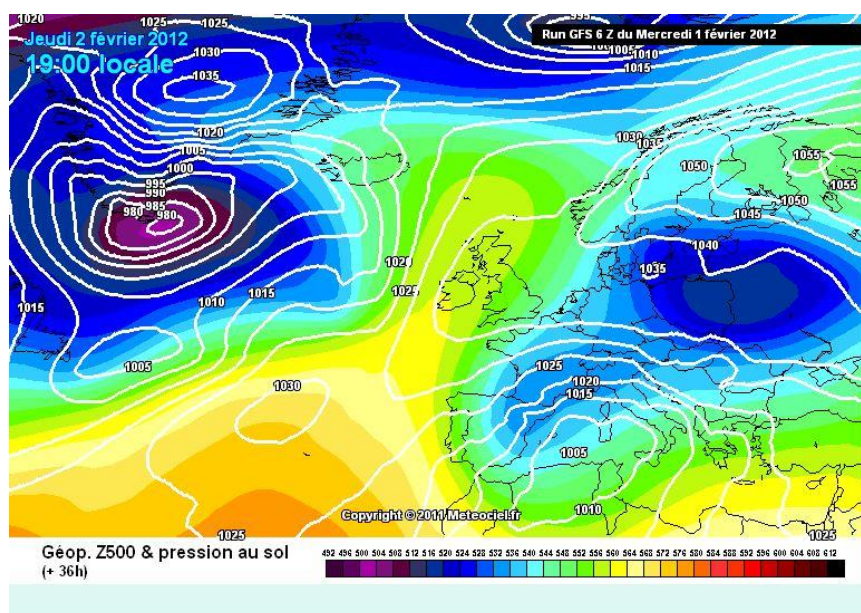


Fig. 19

Campo di pressione atmosferica (isolinee) e di geopotenziale (colore) riferito al 2 febbraio 2012 in cui notiamo un’alta pressione sull’Oceano Atlantico, caratterizzata da alti valori di pressione atmosferica (in mbar, colore giallo/verde) e aria fredda da est in arrivo sull’Europa, con formazione di una bassa pressione nel mediterraneo centro-occidentale, caratterizzata da bassi valori di pressione atmosferica (in mbar, colore blu/azzurro)

Fonte: www.meteociel.fr

Questo è il tipico schema barico che consente nevicate anche abbondanti soprattutto lungo il versante adriatico, come ad esempio nel febbraio 2012 ricordato per la grande quantità di neve caduta, come testimoniano i valori in cm presenti in fig.20.

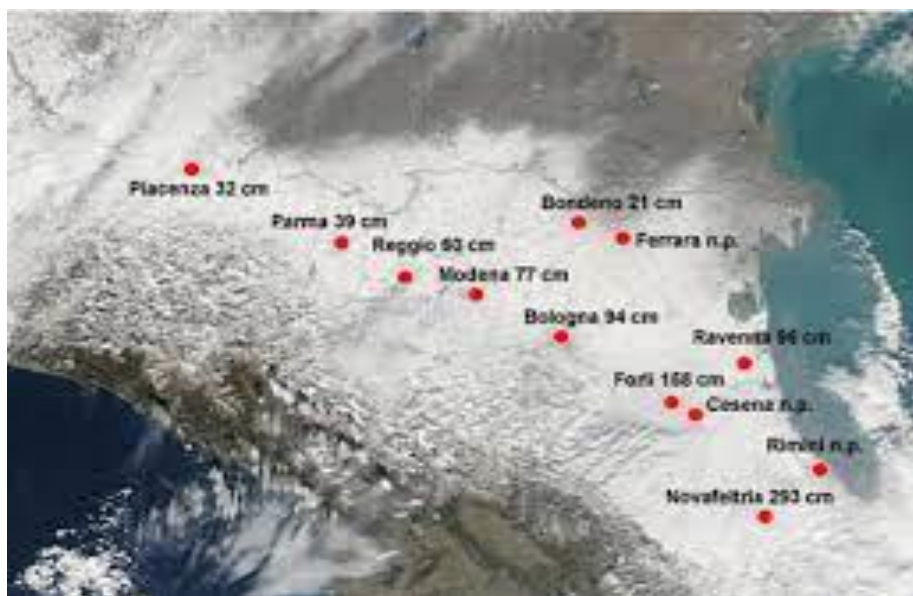


Fig.20

Estensione e quantità (in cm) di neve caduta nell'ondata di freddo del febbraio 2012. Si nota come l'accumulo nevoso aumenti man a mano che ci spostiamo verso sud/est.

Fonte: www.meteolive.it

4-CONCLUSIONI

Quello che emerge dai paragrafi precedenti è che il fenomeno del WH è ancora abbastanza sconosciuto e gli studi ad esso collegato andranno sicuramente approfonditi. Risulta però assai probabile che alla base della formazione del WH ci sia il processo di riscaldamento globale in corso, il quale causando lo scioglimento dei ghiacci polari Artici, altera, indebolendolo, il meccanismo di formazione delle acque profonde (motore della THC).

Come abbiamo avuto modo di conoscere, la persistenza di un'anomalia termica negativa nel nord Atlantico, confermata dai modelli presenti negli articoli citati nei paragrafi precedenti, può e potrà causare un'estremizzazione delle condizioni climatiche europee, con estati sempre più calde e inverni in cui le ondate di gelo potrebbero essere più intense anno dopo anno. Occorre dunque mettere in campo tutte le azioni possibili per limitare l'aumento termico globale per i prossimi anni, siamo ancora in tempo.

5-RINGRAZIAMENTI

Giunto alla fine del mio percorso di studi desidero ringraziare tutti i professori che nel corso di questi anni mi hanno accompagnato a questo risultato, in particolare il Prof. Marco Zavatarelli per avermi seguito e aiutato nella redazione di questo elaborato. Ringrazio la mia famiglia, mio padre Domenico, mia madre Anna, mio fratello Alessandro e ovviamente mia nonna Tina, per avermi supportato ed essermi stati sempre vicini anche nei momenti più difficili, ringrazio i miei nonni che saranno sicuramente fieri di me, i miei zii ed in particolare un ringraziamento speciale a mia zia Elvira, senza la quale probabilmente non sarei giunto a questo importantissimo traguardo.

6-BIBLIOGRAFIA

Anthes A.R., Corell R.W., Holland G., Hurrell J., McCracken M.C., Trenberth K.E. (2006) Hurricanes and global warming – “*Potential linkages and consequences*”. Bulletin of American Meteorological Society 87, no.1 (2006):623–628.

Broecker W., Wallace S. “*The Great Ocean Conveyor*.” *Oceanography* 4, no. 2 (1991): 79-89.

Bryden, H., Longworth, H., Cunningham, S. “*Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N*”. *Nature* 438, 655–657 (2005)

Chemke, R., Zanna, L. & Polvani, L.M. – “*Identifying a human signal in the North Atlantic warming hole*.” *Nat Commun* **11**, 1540 (2020)

Clark, P., Pisias, N., Stocker, T. et al. “*The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change*”. *Nature* **415**, 863–869 (2002)

Cunningham S.A., Kanzow T, Rayner D., Baringer M.O., Johns W.E, Marotzke J., Longworth H. R., Grant E., Hirschi J.M, Beal L. M., Meinen C.S., Bryden H.L. – “*Temporal Variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26.5°N*”. American Association for the Advancement of Science (2005)

Duchez A., Frajka E., Williams, Simon A Josey, Dafydd G Evans, Jeremy P Grist, Robert Marsh, Gerard D McCarthy, Bablu Sinha, David I Berry and Joël J-M Hirschi – “*Drivers of exceptionally cold North Atlantic Ocean temperatures and their link to the 2015 European heat wave*” Environmental Research Letters, Volume 11, Number 7 (2016)

Jeff R. Knight Robert J. Allan Chris K. Folland Michael Vellinga Michael E. Mann “*A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate*” Geophys. Res. Lett., 32, L20708, (2005)

Keil, P., Mauritsen, T., Jungclaus, J. et al. “*Multiple drivers of the North Atlantic warming hole*”. Nat. Clim. Chang. **10**, 667–671 (2020)

Rahmstorf S.: “*Thermohaline Ocean Circulation.*” In: Encyclopedia of Quaternary Sciences, Edited by S. A. Elias. Elsevier, (2006)

Wexler H. - “*Formation of polar anticyclones*” Monthly Weather Review (1937)

Wood.R – “*Explainer: nine tippings point that could be frigged by climate change*”. Carbonbrief.org (2020)

7-SITOGRAFIA

Carbonbrief, <https://www.carbonbrief.org/scientists-shed-light-on-human-causes-of-north-atlantics-cold-blob>

Carbonbrief, <https://www.carbonbrief.org/explainer-nine-tipping-points-that-could-be-triggered-by-climate-change>

Meteonetwork, http://www.meteonetwork.it/sites/default/files/Circolazione_oceanica.

IPCC, <https://www.ipcc.ch/>

Meteociel, www.meteociel.fr

Meteolive www.meteolive.it

