

OCEANO MINACCIATO

Gianni Comini

CISM - Dipartimento di Energia e Ambiente

Piazza Garibaldi 18 - 33100 Udine

gianni.comini@cism.it

19 maggio 2024

1 Le minacce

A partire dagli anni '70 del secolo scorso, le concentrazioni di gas serra nell'atmosfera sono aumentate con velocità crescente portando ad un riscaldamento ambientale che sta avendo effetti devastanti per tutti i Sistemi Terrestri. Tra i sistemi l'oceano, inteso come insieme unico e continuo di tutti i mari, è il più importante ed è quello che desta la maggior preoccupazione. Esso, infatti, ricopre il 70% della superficie terrestre, è l'habitat dell'80% delle specie viventi conosciute e, finora, ha assorbito il 90% circa dell'energia in eccesso arrivo sulla Terra e il 30% circa dell'anidride carbonica generata dalle attività umane. L'oceano è anche importante dal punto di vista della sostenibilità socio-economica in quanto, oltre ad essere utilizzato a scopi turistici e ricreativi, fornisce preziose risorse alimentari.

Purtroppo le azioni moderatrici sono ormai minacciate dal riscaldamento ambientale e dall'aumento della concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera, mentre il ruolo di sostegno socio-economico rischia di essere compromesso dal crescente inquinamento da sostanze chimiche e microplastiche.

In estrema sintesi, l'opinione prevalente tra gli esperti è che l'oceano sia minacciato da tutta una serie di pericoli, i più importanti dei quali sono:

- riscaldamento dell'acqua;
- ondate di calore marine;
- aumento del livello del mare;
- acidificazione;
- deossigenazione;
- inquinamento da plastica.

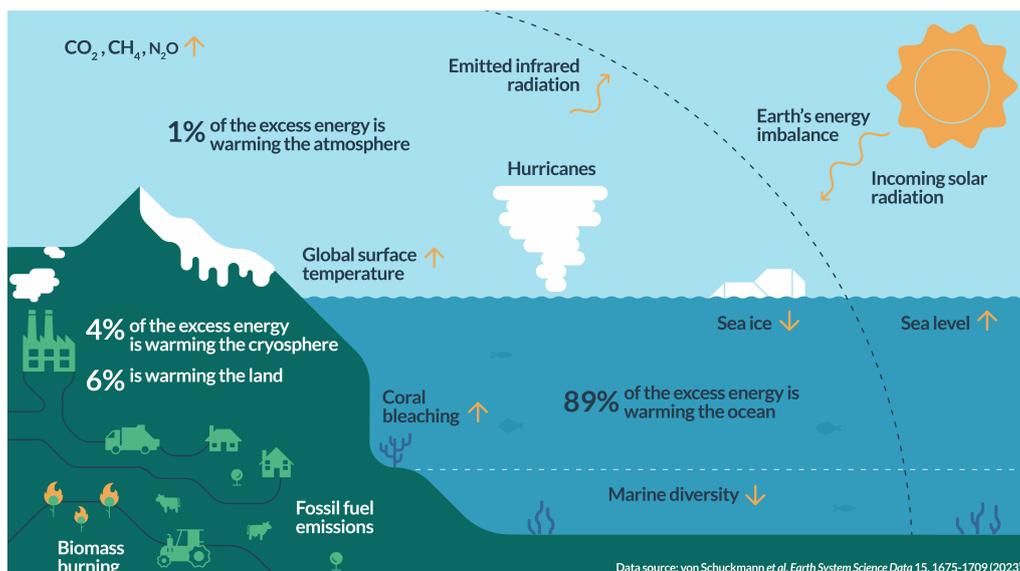


Figura 1: La crescente concentrazione atmosferica di gas climalteranti di origine antropica provoca lo sbilanciamento energetico tra radiazione solare entrante e radiazione infrarossa uscente. La ripartizione dell'energia in eccesso si traduce in riscaldamenti dell'oceano, del suolo e dell'atmosfera oltre che nella progressiva fusione dei ghiacci. [Copernicus Marine Service].

Nel seguito, tali pericoli saranno esaminati nell'ordine ma, in premessa, si è preferito esaminare il riscaldamento ambientale utilizzando una prospettiva storica per mostrare come la marcata accelerazione dell'aumento delle temperature globali, intervenuta negli ultimi 50 anni, sia causata dall'aumento delle emissioni di gas climalteranti di origine antropica.

2 Il riscaldamento ambientale

La Figura 1 illustra come, ai limiti dell'atmosfera, le emissioni antropiche di gas climalteranti, (essenzialmente anidride carbonica - CO₂, metano - CH₄ e protossido di azoto - N₂O), si traducano in una differenza positiva tra radiazione solare entrante e radiazione infrarossa uscente. (Con "antropiche" si intende legate ad attività umane come, ad esempio, utilizzo di fonti energetiche fossili e disboscamenti effettuati incendiando biomasse).

Attualmente, lo sbilanciamento tra radiazioni solari entranti e radiazioni infrarosse uscenti implica una fornitura continua di energia alla Terra che il Sistema Climatico ripartisce tra oceano, suolo, atmosfera e criosfera. (Con "criosfera" si intende l'insieme di tutti i ghiacci presenti sulla Terra).

In questo modo, lo sbilanciamento diventa il motore del riscaldamento globale, mentre la ripartizione dell'energia in eccesso controlla gli aumenti di temperatura che si riscontrano nell'oceano, al suolo e nell'atmosfera, oltre alla progressiva fusione dei ghiacci nella criosfera.

Per quanto riguarda la ripartizione dell'energia in eccesso la Figura 1 ci informa che, attualmente, gli assorbimenti relativi sono:

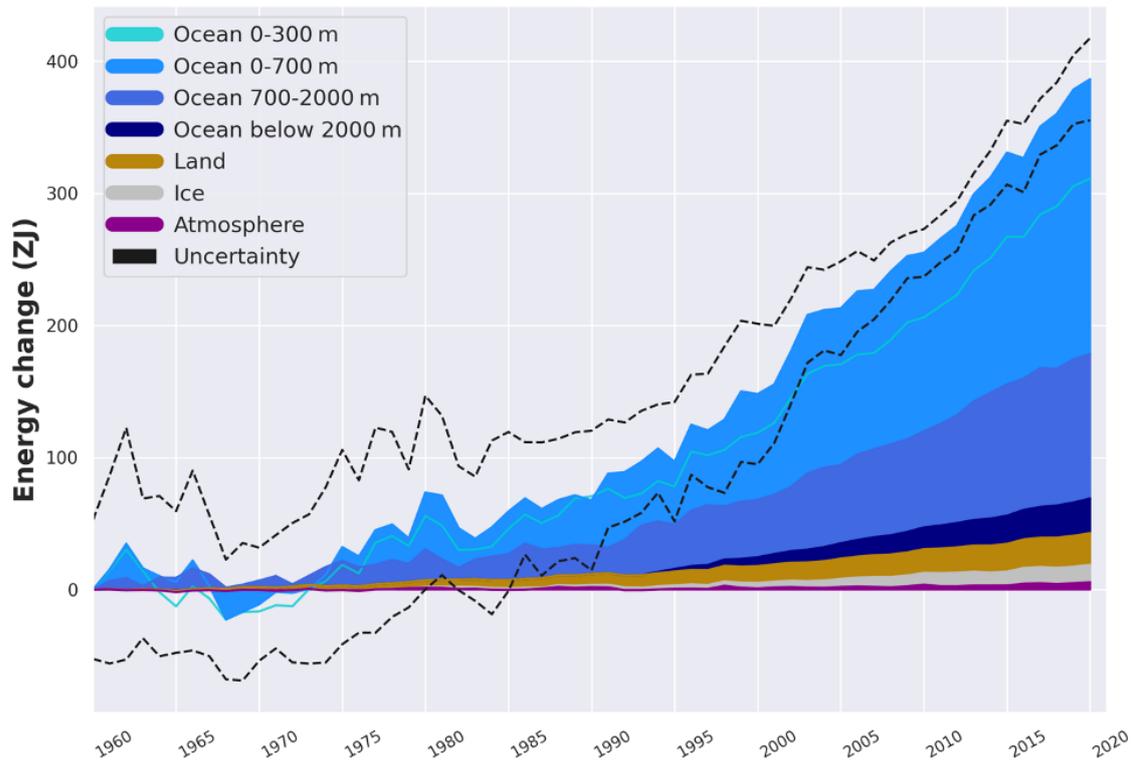


Figura 2: Energia accumulata complessivamente dal Sistema Climatico Terrestre, suddivisa nei componenti: Oceano superiore (0-300 m) e (0-700 m), Oceano medio (700-2000 m) e Oceano profondo (maggiore di 2000 m), Suolo, Criosfera ed Atmosfera [German Climate Computation Centre - DKRZ].

- oceano 89%;
- suolo 6%;
- criosfera 4% e
- atmosfera 1%.

Dal punto di vista quantitativo la successiva Figura 2, già presentata nel post: “Il bilancio sbilanciato dell’energia sulla Terra” ma qui ripetuta per comodità, ci informa che fino ai primi anni ’70 del secolo scorso non si rilevava una tendenza decisa all’accumulo di energia nel sistema climatico. Infatti, come i diversamente giovani ricordano, prima del 1973 il clima era sostanzialmente stabile e la temperatura media globale non cresceva, da un anno all’altro, in misura incompatibile con le normali oscillazioni meteorologiche.

Per contro, negli ultimi 50 anni l’accumulo di energia nel sistema climatico è aumentato con velocità crescente causando l’attuale impennata della temperatura media globale. Copernicus Climate Service, ha così descritto la situazione: “Nel Marzo 2024 la media delle temperature superficiali globali registrata nei 12 mesi precedenti ha superato di 1,58°C il livello medio preindustriale riferito al periodo pre-industriale 1850-1900. Per-

tanto, se tale aumento persistesse avremmo già superato il limite di 1,5°C fissato per il 2100 dagli accordi di Parigi stipulati nel 2015”.

2.1 Impatti sul suolo

Gli impatti del riscaldamento ambientale sul suolo si fanno sentire con un aumento delle zone definite “aride” (ovvero delle zone nelle quali l’aumento di temperatura intensifica l’evaporazione dell’umidità contenuta nei terreni). Le conseguenze per tali zone sono la perdita di vegetazione, l’erosione e la riduzione dei raccolti, veri e propri flagelli che stanno colpendo il 38% della popolazione mondiale (quasi tre miliardi di persone), distribuite prevalentemente tra i Paesi in via di sviluppo dell’Africa subsahariana, dell’Asia meridionale e dell’America Latina.

Nella maggior parte delle zone abitate si registra, comunque, un aumento di frequenza delle ondate di calore (che è un’altra conseguenza del riscaldamento ambientale perché, partendo da valori medi già alti, basta poco per arrivare a valori estremi). Tale aumento di frequenza favorisce una lenta perdita di vegetazione perché ogni nuova ondata di calore accentua il rallentamento della fotosintesi e, quindi, della crescita delle foglie. (Con meno foglie, le piante perdono resistenza agli stress e diventano facile preda di insetti nocivi e incendi non necessariamente intenzionali).

Inoltre, l’aumento della temperatura media globale favorisce la riduzione delle masse di ghiaccio al suolo ed, infatti, ghiacciai e permafrost (dall’inglese PERMANent “permanente” e FROST “gelato”) stanno scomparendo in tutto il Pianeta. Gli impatti visivi sono evidenti e gli impatti idrogeologici sono facilmente riscontrabili nei territori a valle dove si riducono drasticamente le portate dei corsi d’acqua, mentre aumentano le profondità delle falde acquifere.

3 Il riscaldamento dell’oceano

Come si è già osservato, l’oceano ha svolto finora l’importantissimo ruolo di moderatore del cambiamento climatico assorbendo circa il 90% dell’energia arrivata in eccesso sulla Terra. Purtroppo, quest’azione moderatrice sta perdendo di efficacia perché gli strati superficiali si sono riscaldati e il rimescolamento ad opera dei venti e delle correnti fredde profonde si sta attenuando. (Una forte stratificazione aumenta sempre la stabilità verticale rendendo più difficile il rimescolamento: è il principio fisico su cui si basa il funzionamento dei banchi aperti dei surgelati al supermercato).

Infatti, la Figura 3 evidenzia che la temperatura media superficiale dell’oceano alle latitudini extra-polari è aumentata costantemente negli ultimi trent’anni. Inoltre, le prospettive per il futuro non inducono certo all’ottimismo dal momento che la temperatura superficiale media ha registrato un aumento senza precedenti nel 2023 ed è avviata verso un ulteriore aumento storico nel 2024.

Poiché l’oceano ricopre oltre il 70% della superficie terrestre, gli aumenti di temperatura nella temperatura superficiale dell’oceano impattano considerevolmente sull’atmosfera della maggior parte del Pianeta attraverso ben noti meccanismi di trasporto di calore e di umidità.

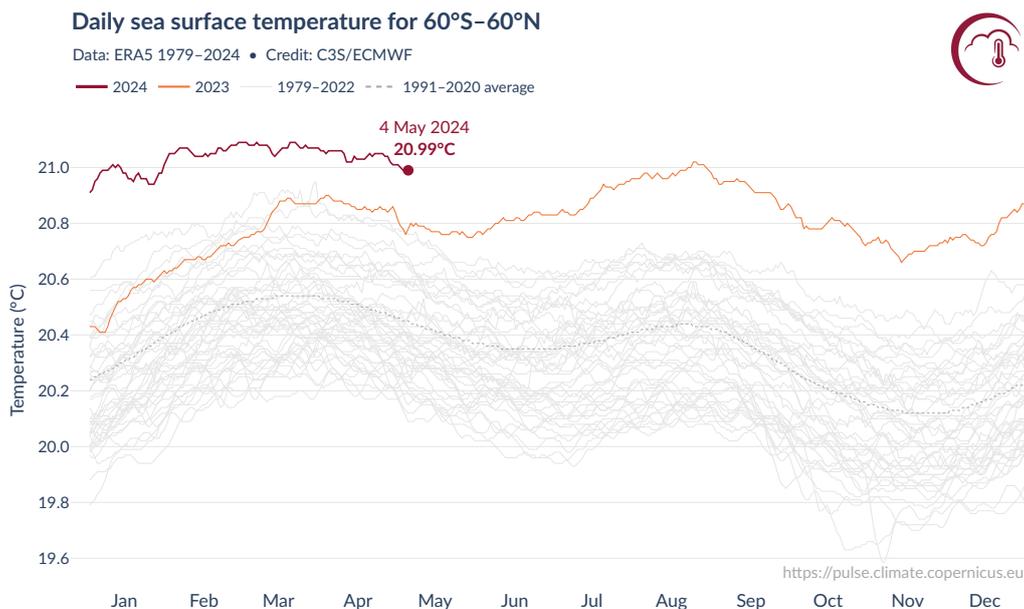


Figura 3: Temperature medie superficiali dell’oceano (°C) nelle zone extra-polari (60°S–60°N) per il 2023 in arancio e 2024 in rosso scuro. Tutti gli altri anni tra il 1979 e il 2022 sono segnati in grigio chiaro e la media del periodo 1991 - 2020 è evidenziata a tratteggio [Copernicus].

L’aria a contatto con l’oceano è pressoché satura ed è tanto più ricca di vapore quanto più alta è la temperatura superficiale dell’oceano stesso. Inoltre, l’aria a contatto è certamente più calda e, quindi, contiene più vapore, dell’aria negli strati alti dell’atmosfera. Poiché la densità dell’aria umida diminuisce all’aumentare della temperatura e del contenuto di vapore, la spinta di Archimede fa salire l’aria umida dalla superficie dell’oceano alle quote più elevate dell’atmosfera.

Arrivata in quota, l’aria umida si porta in equilibrio termico con l’aria secca alle temperature più basse delle zone circostanti e, in aggiunta, perde gran parte del vapore che condensa sotto forma di goccioline nelle nubi. In questo modo viene fornita energia all’atmosfera nelle due forme: calore sensibile (variazione di temperatura) e, soprattutto, calore latente (variazione del contenuto di vapore).

I venti in quota possono trasportare, anche a grandi distanze, l’aria ad alto contenuto energetico e la disponibilità di molta energia in quota alimenta eventi estremi, come tempeste ed uragani. Pertanto, al crescere della temperatura media globale del pianeta in generale, e della temperatura superficiale dell’oceano in particolare, gli eventi atmosferici estremi sono destinati ad aumentare in intensità e frequenza.

3.1 Indebolimento delle correnti oceaniche

Le correnti oceaniche sono influenzate dal riscaldamento dell’oceano e, a loro volta, influenzano in maniera significativa il clima della Terra in quanto trasportano calore, sostanze organiche e specie vegetali ed animali dai poli ai tropici. Evidentemente, il trasporto di

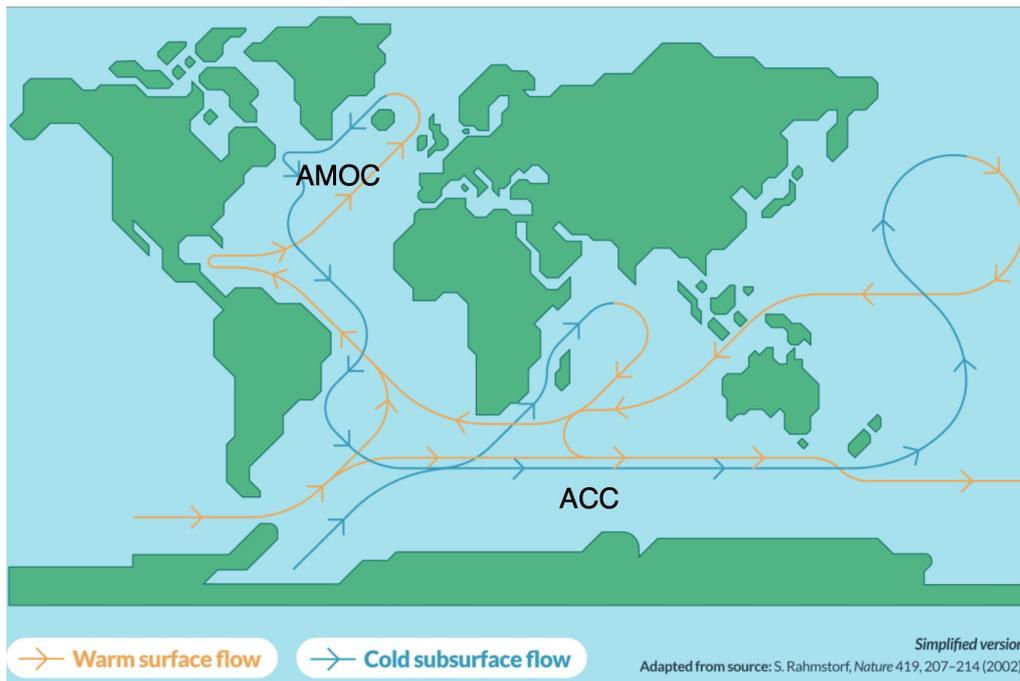


Figura 4: Rappresentazione schematica della Circolazione Meridionale di Ritorno - MOC (acronimo dall'Inglese Meridional Overturning Circulation). In rosso: correnti superficiali calde; in blu: correnti profonde fredde [Copernicus].

calore ha una influenza diretta e particolare sul riequilibrio delle temperature dal momento che, senza correnti, avremmo poli estremamente freddi e tropici estremamente caldi.

(Forse non è inutile ricordare che le zone dell'oceano a latitudini diverse ricevono e assorbono differenti quantità di radiazione solare, riscaldandosi in maniera diversa, e che le correnti oceaniche rappresentano il principale meccanismo di riequilibrio termico).

In generale, le acque oceaniche calde, mosse prevalentemente dai venti e dalle maree, si spostano dall'equatore ai poli restando in superficie. Una volta arrivate ai poli congelano separandosi in due fasi: la fase solida, sotto forma di ghiaccio a basso contenuto salino (a temperatura prossima a 0 °C), e la fase liquida, sotto forma di residuo ad alto contenuto salino (alla temperatura di congelamento dell'acqua fortemente salata, pari a circa -2 °C).

La densità dell'acqua di mare aumenta al crescere del contenuto salino e, di conseguenza, il residuo liquido si inabissa e, una volta affondato, ritorna verso l'equatore muovendosi in profondità. In questo modo, si forma il circuito del MOC (Meridional Overturning Circulation, in italiano: Circolazione Meridionale di Ritorno) schematizzato nella Figura 4.

Da quanto detto emerge che le variazioni di temperatura e densità dell'acqua marina sono il "motore" del MOC, al punto che diversi autori si sono spinti a definire "termoalina" l'intera circolazione meridionale di ritorno. In realtà non è corretto trascurare l'influenza dei venti che, ad esempio, spingono i due rami della Corrente Circumpolare Antartica (in inglese: Antarctic Circumpolar Current - ACC). Infatti, come si vede nella Figura 4, i due rami antartici operano come "collettori" per le correnti superficiali cal-

de e profonde fredde, e i venti che spingono le ACC rendono possibile la chiusura ed il funzionamento in continuo del MOC.

(A questo punto è interessante notare che i venti che spingono le ACC sono gli stessi venti perenni che avevano impedito ai velieri l'attraversamento dello stretto di Magellano navigando dall'Atlantico al Pacifico fin quando, nel 1577, Sir Francis Drake non scoprì il passaggio che, da allora, porta il suo nome).

Invece, le variazioni di salinità e temperatura hanno un'influenza fondamentale sull'AMOC, il ramo Atlantico del MOC, che è azionato essenzialmente dalle masse di acqua profonda e fredda ad alto contenuto salino prodotte nei mari della Groenlandia e del Labrador. Purtroppo lo scioglimento dei ghiacci nella regione artica, legato all'aumento della temperatura, ha ridotto la produzione di tali masse al punto che il Sesto Rapporto sul Clima dell'IPCC ha riconosciuto una chiara tendenza all'indebolimento dell'AMOC.

(Lo scioglimento dei ghiacci nella regione artica libera acqua pressoché dolce, mentre l'aumento della temperatura ostacola la formazione di nuovi ghiacci e, quindi, la parallela generazione di residuo liquido freddo ad alto contenuto salino. Senza residuo capace di affondare, il MOC resta senza il "motore" settentrionale e deve proseguire con il solo "motore" meridionale. Peraltro, tale motore continua a funzionare in quanto è azionato dallo sprofondamento del residuo freddo ad alto contenuto salino generato nei Mari di Wedell e di Ross, che si trovano nella regione antartica dove le temperature sono molto più basse di quelle che si hanno nella regione artica.)

3.2 Ondate di calore marine

Il riscaldamento dell'oceano non è mai omogeneo poiché le temperature superficiali sono caratterizzate da una notevole variabilità intorno al valore medio globale. In tale contesto si definiscono "ondate di calore marine" gli innalzamenti anomali di temperatura che durano per diversi giorni. Tali innalzamenti si possono avere in diverse zone dell'oceano e, negli ultimi 20 anni, la loro intensità e frequenza è aumentata con impatti sempre più pesanti sugli ecosistemi e sulle attività umane.

Nel 2023, l'Europa è stata interessata da due ondate di calore particolarmente forti. La prima ha colpito il Nordest Atlantico nel mese di giugno e, come si vede nella Figura 5 a sinistra, è stata caratterizzata da anomalie (ovvero scostamenti dalla media temporale in un periodo di riferimento) della temperatura media superficiale nell'area segnata a tratteggio superiori a 1,5 °C durante tutto giugno, con un picco di 2,25 °C il 21 giugno. Localmente, come vede nella Figura 5 a destra, si sono avute ondate di categoria cinque "oltre l'estremo" ad ovest dell'Irlanda, con anomalie dell'ordine di 4 - 5 °C, e ondate di calore marine di categoria quattro "estreme" intorno al Regno Unito e nel Mar Baltico, con anomalie dell'ordine di 2 - 3 °C.

La seconda ondata di calore, di categoria quattro, ha interessato il Mediterraneo occidentale in luglio e, come si vede nella Figura 6 a sinistra, ha portato ad un picco di temperatura media superficiale del mare nella zona segnata a tratteggio pari a circa 28,5 °C il 20 luglio, con punte di punte di temperatura locali superiori ai 30 °C in diverse zone, incluse alcune coste italiane. In questo frangente, come si vede nella Figura 6 a destra, si sono avute anomalie locali dell'ordine dei 5,5 °C lungo alcune coste italiane, greche e nord-africane .

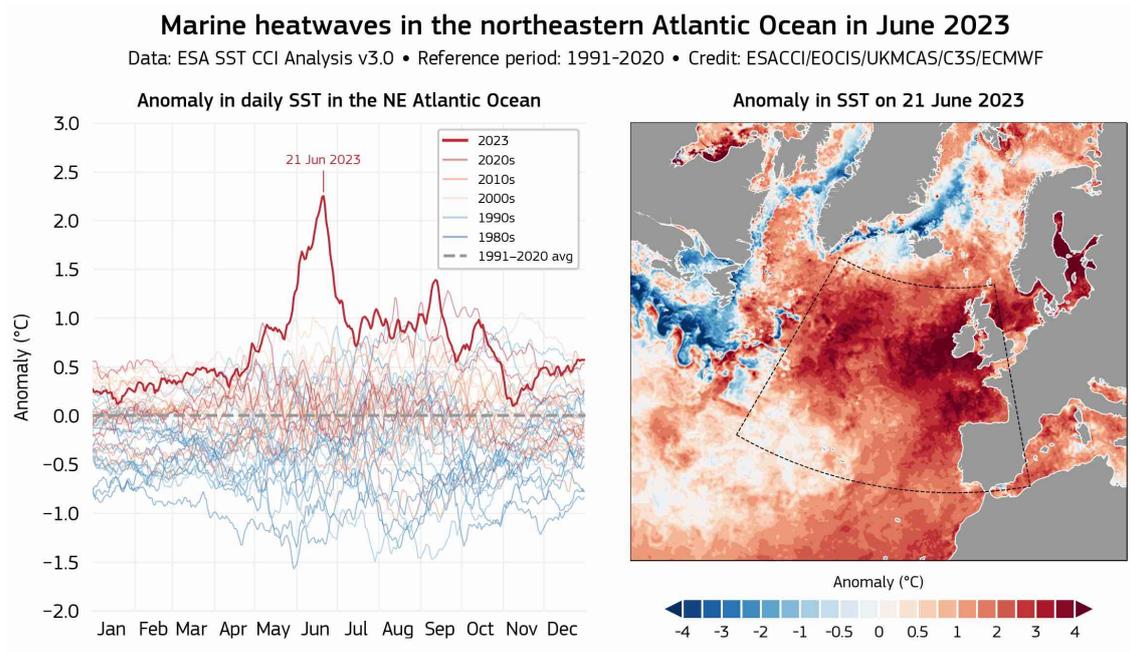


Figura 5: A nomalie medie giornaliere, riferite al periodo 1991 - 2020, della temperatura superficiale nella zona del Nordest Atlantico delimitato dal tratteggio (a sinistra). Anomalie superficiali del 21 giugno 2023 (a destra). [Copernicus].

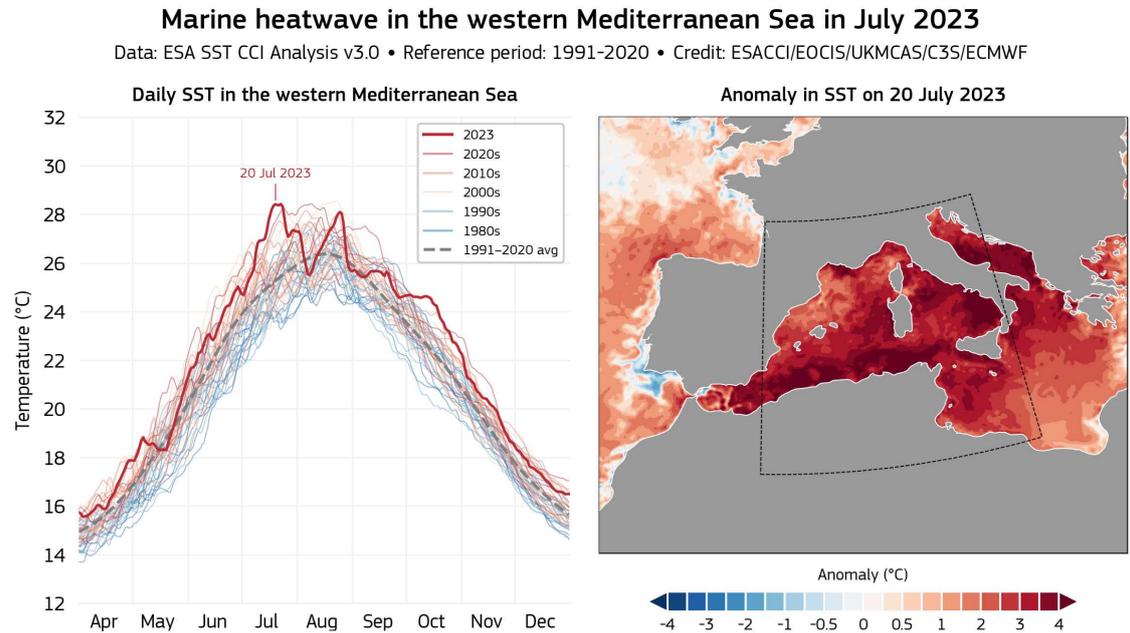


Figura 6: A sinistra: temperature medie superficiali nel Mediterraneo Occidentale durante il 2023. A destra: anomalie superficiali del 20 luglio 2023. [Copernicus].

Se i 30 °C di temperatura del Mediterraneo ci sembrano troppi, possiamo consolarci pensando alla temperatura di 37,6 °C registrata nel 2020 da una stazione meteorologica nel Golfo Persico al largo del Kuwait, o agli oltre 38 °C misurati informalmente nel 2023 sui litorali della Florida. In alternativa possiamo citare Dubai dove, secondo il New York Times del 28 agosto 2023 “quelle che in Europa sono considerate ondate di calore mortali diventano tipiche giornate estive nelle quali la normalità è l’apertura delle spiagge durante la notte con 32 °C di temperatura del mare e 79% di umidità relativa dell’aria”. In fondo noi lo sapevamo già: d’estate fa caldo ma basta sapersi arrangiare.

Al di là del folklore, per saperne di più si può ascoltare i climatologi che attribuiscono le sempre più frequenti e diffuse ondate di calore marine ad una combinazione di cause sia di lungo sia di breve periodo. Le cause di lungo periodo sono ancora oggetto di ricerca, anche se diversi autori stanno pensando che l’indebolimento delle correnti oceaniche, esaminato nel Paragrafo 3.1, giochi un ruolo importante.

Per quanto riguarda le cause di breve periodo ci sono meno dubbi: l’ondata di calore atlantica, è stata causata dall’indebolimento dell’Anticiclone delle Azzorre durante tutto il mese di giugno del 2023. Infatti, per tutto giugno 2023, i venti sul Nord Atlantico sono stati quasi assenti e, quindi, è mancato il rimescolamento tra strati di mare superficiali (caldi) e strati più profondi (freddi).

L’ondata di calore mediterranea, invece, ha avuto cause di breve periodo diverse in quanto, nel luglio del 2023, l’anticiclone delle Azzorre si era di nuovo rinforzato. Tuttavia, nello stesso tempo l’anticiclone delle Azzorre era stato deviato a nord-est dalla discesa dell’anticiclone islandese. La configurazione risultante, discussa in dettaglio nel post: “Correnti a getto nelle estati calde”, era quella di un blocco ad omega stazionario che per un lungo periodo ha consentito l’avanzata verso nord della corrente a getto sub-tropicale e, insieme, l’imperversare sul Mediterraneo dell’anticiclone africano.

Peraltro, qualunque sia la loro genesi, le ondate di calore marine hanno impatti proporzionali alla loro intensità. Esse colpiscono tutti gli ecosistemi, causano l’estinzione di molte specie vegetali e animali e, in aggiunta, hanno riflessi socio-economici molto negativi sulla pesca e l’acquacoltura.

Dal punto di vista biologico, le specie più danneggiate sono quelle non-mobili, come coralli, alghe e spugne, poiché non possono sfuggire allo stress termico. Per contro, le specie di pesci che migrano verso acque più temperate vengono generalmente sostituite nei luoghi d’origine da specie provenienti da altre regioni che, spesso, risultano invasive.

3.3 Aumento del livello del mare

Il livello del mare può essere misurato rispetto a un riferimento fisso, come il centro della Terra, quando interessa il livello medio globale (o eustatico), ovvero può essere misurato rispetto a un riferimento locale, come la costa su cui il mare si affaccia, quando interessa il livello relativo (o isostatico). Semplificando, si può dire che l’aumento del livello medio globale del mare è legato all’aumento del volume totale di acqua contenuta nell’oceano, mentre l’aumento relativo, che più interessa le popolazioni rivierasche, tiene conto anche dei fenomeni di subsidenza o di innalzamento della costa.

Le cause di aumento del livello medio globale sono legate al riscaldamento ambientale in generale ed al riscaldamento dell'oceano in particolare. In ordine di importanza decrescente le tre cause principali sono:

- la dilatazione dell'acqua dovuta all'aumento della temperatura media dell'oceano;
- la riduzione delle calotte di ghiaccio nell'Artico e nell'Antartico;
- la riduzione dei ghiacciai, delle nevi perenni, e del permafrost in tutti i continenti.

(Si noti, invece, che le fusioni del ghiaccio marino e delle piattaforme di ghiaccio galleggianti contribuiscono solo marginalmente all'innalzamento del livello medio del mare, in quanto da solide già spostano una quantità d'acqua equivalente alla propria massa m . D'altra parte, il ghiaccio galleggiante è formato da acqua praticamente dolce e, quindi, meno densa dell'acqua del mare che il suo volume immerso sposta. Pertanto, quando il ghiaccio galleggiante fonde produce un volume d'acqua dolce V_{H_2O} maggiore del volume immerso V_{imm} innalzando, sia pure di poco, il livello del mare.

Per gli amanti delle formule si può scrivere:

$$m = \rho_{mare} V_{imm} = \rho_{H_2O} V_{H_2O} \Rightarrow V_{H_2O} = (\rho_{mare} / \rho_{H_2O}) V_{imm}$$

riassumendo in una sola riga tutte le considerazioni precedenti.)

Dal 1993 l'innalzamento globale è monitorato con rilevazioni satellitari i cui risultati sono riportati nella Figura 7. Come si vede, vi è stato un innalzamento totale del livello assoluto del mare di oltre 100 mm nel periodo gennaio 1993 - aprile 2024, ma gli innalzamenti annuali sono aumentati passando dai 2,1 mm/anno del periodo 1993 - 2003 ai 4,3 mm/anno del periodo 2013 - 2023.

Al ritmo attuale, peraltro già allarmante, il livello del mare si innalzerebbe di qualche decina di centimetri entro la fine del secolo, ma su questa semplice estrapolazione pesa l'incognita di una destabilizzazione, anche parziale, delle calotte polari. In Groenlandia, in particolare, lo scioglimento della copertura di ghiaccio, molto riflettente, mette allo scoperto il suolo, di gran lunga più assorbente, causando un aumento della radiazione solare netta in arrivo, e ciò accentua il riscaldamento ambientale (amplificazione artica).

A causa dell'amplificazione artica, la calotta settentrionale perde ogni anno masse di ghiaccio sempre più grandi mettendo in allarme tutto il Pianeta: anche se le probabilità di scioglimento completo dei ghiacci in Groenlandia sono basse i danni dell'evento sarebbero enormi in quanto il livello globale dell'oceano aumenterebbe di oltre 7 metri.

3.3.1 Allagamenti delle aree costiere

Pur senza eventi catastrofici, già adesso (2024) l'aumento del livello del mare sta mettendo a rischio buona parte delle aree costiere, soprattutto se queste ospitano città densamente popolate. In tal caso, infatti, all'innalzamento del livello medio globale si aggiunge quasi sempre la subsidenza del suolo causata, in genere, da prelievi d'acqua dalle falde e dal peso stesso delle costruzioni.

In questo quadro, va tenuto presente che gli allagamenti delle aree costiere sono dovuti ai livelli relativi più alti che il mare può raggiungere. Nelle situazioni "normali", che

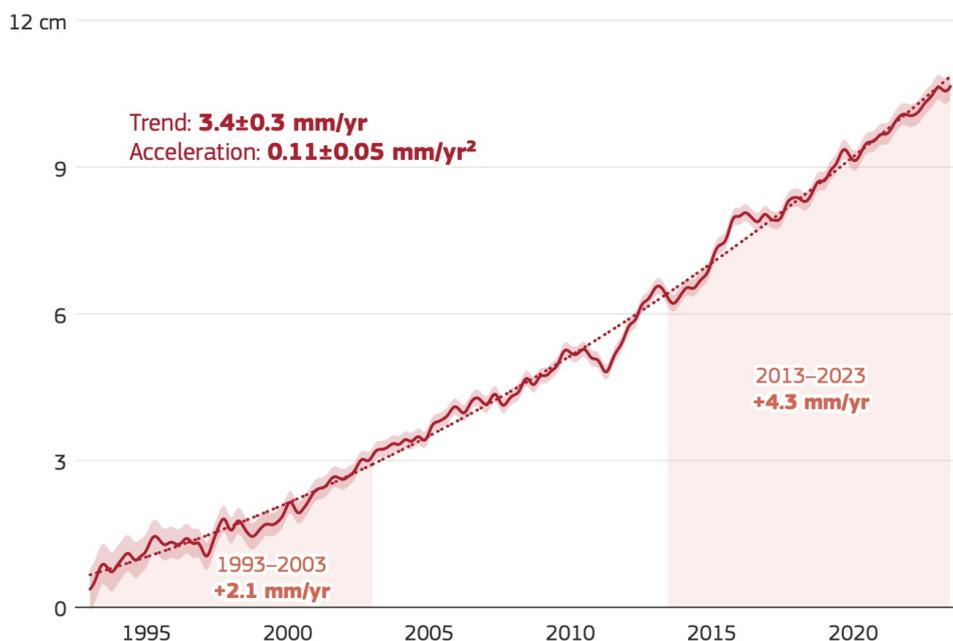


Figura 7: Variazioni del livello medio globale del mare risultanti dalle misure satellitari effettuate nel periodo gennaio 1993 - giugno 2023 [Copernicus].

fortunatamente sono le più frequenti, il livello massimo prevedibile è quello raggiunto durante le alte maree di sigizia”. (Le maree di sigizia si hanno durante le fasi di luna piena, e luna nuova, quando la Luna si trova, rispettivamente, in opposizione, o in congiunzione, col Sole e le rispettive attrazioni gravitazionale agiscono nella stessa direzione).

Nelle situazioni “estreme”, che negli ultimi anni si sono registrate con frequenza crescente, il livello massimo è quello raggiunto quando, durante un’alta marea di sigizia, si hanno, insieme, onde di tempesta e innalzamenti “anomali” dovuti, ad esempio, ad abbassamenti della pressione atmosferica e ad onde di tempesta. In tal caso si applica “in toto” lo schema della Figura 8 dove sono evidenziati il livello medio locale, l’innalzamento prevedibile dovuto ad un’alta marea di sigizia, l’innalzamento supplementare (definito anomalia) e l’innalzamento associato ad un’onda di tempesta.

Le cronache ci informano che gli allagamenti dei litorali sono in deciso aumento in tutti i continenti. Nei piccoli stati insulari, addirittura l’80% della popolazione vive in aree soggette ad allagamenti ed erosioni mentre, ad esempio, negli Stati Uniti, diversi quartieri di New York, Atlantic City e Miami si allagano durante le alte maree. In Cina il 16% delle aree occupate dalle città principali costiere sta sprofondando con una velocità superiore ai 10 millimetri all’anno, e per esse la prospettiva è quella di scendere sotto il livello del mare ben prima della fine del secolo. In Indonesia, la situazione è ancora peggiore, dal momento che il governo sta pensando di spostare la capitale da Giacarta, già in buona parte sprofondata, ad un’area meno minacciata dalla subsidenza. Notizie di allagamenti aggravati dalla subsidenza arrivano anche da Mumbai, la capitale finanziaria dell’India, e da Laos, la capitale della Nigeria.

Per completare il quadro, uno studio recente, ha rivelato che anche nel bacino del

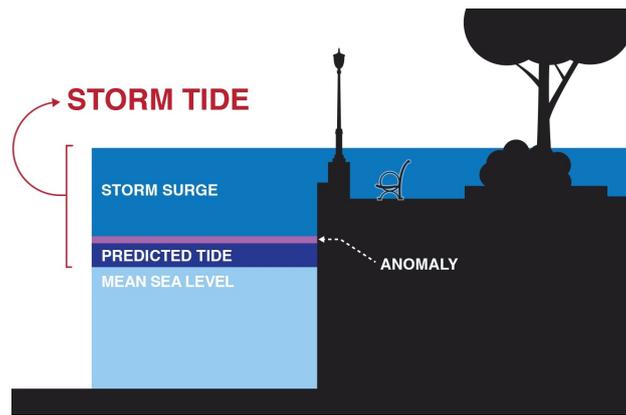


Figura 8: Contributi all'innalzamento del livello medio del mare durante una marea di tempesta: all'alta marea di sigizia (predicted tide), si aggiungono l'innalzamento supplementare dovuto, ad esempio, alla bassa pressione (anomaly) e l'onda di tempesta (storm surge) [NOAA].

Mediterraneo molte aree costiere sono a rischio allagamenti causati dalla subsidenza, e le nazioni più colpite sono l'Egitto e l'Italia, con, rispettivamente, oltre 12.000 e oltre 10.000 chilometri quadrati di costa minacciati.

3.4 Acidificazione

Tra i gas climalteranti l'anidride carbonica è il più impattante sia perché da solo rappresenta oltre i tre quarti delle emissioni complessive di gas serra sia perché, una volta entrata nell'atmosfera, può uscire solo per effetto dell'assorbimento chimico nell'oceano o della fotosintesi. Le emissioni di anidride carbonica in atmosfera sono attribuibili, soprattutto, all'utilizzo di combustibili fossili a scopi energetici e industriali ed ai cambiamenti di destinazione d'uso dei terreni. Attualmente:

- il 30% circa dell'anidride carbonica generata dalle attività umane è assorbito dall'oceano;
- il 25% circa è assorbito dal suolo attraverso la fotosintesi clorofilliana ad opera dei vegetali terrestri e
- il 45% circa rimane nell'atmosfera incrementando la concentrazione di anidride carbonica.

Purtroppo, l'assorbimento chimico di anidride carbonica nell'oceano non è privo di costi ambientali poiché, come illustrato nella Figura 9, l'anidride carbonica (CO_2) reagisce con l'acqua (H_2O) per dare acido carbonico (H_2CO_3) che, nel tempo, si dissolve in ioni idrogeno (H^+) e ioni bicarbonato (HCO_3^-). In questo modo si riduce la concentrazione atmosferica dell'anidride carbonica nell'atmosfera ma si aumenta il numero di ioni idrogeno presenti nell'oceano riducendo il pH, ovvero aumentando l'acidità, con le conseguenze ambientali descritte più sotto. (Rinunciando al rigore si può dire che maggiore è

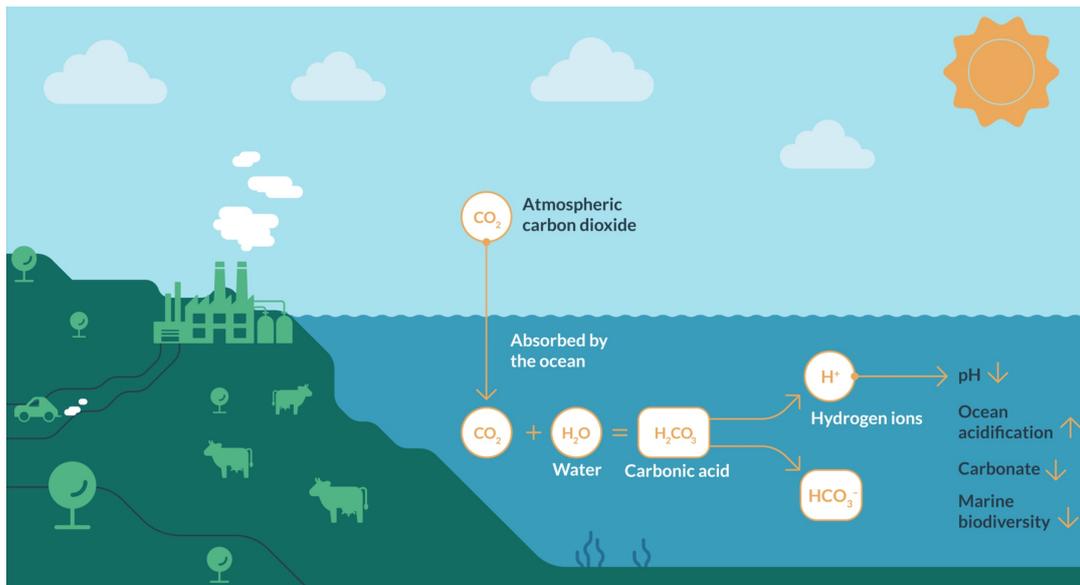


Figura 9: A sinistra: l'uso di combustibili fossili ed i cambiamenti di destinazione d'uso dei terreni immettono anidride carbonica nell'atmosfera. A destra: l'assorbimento chimico di anidride carbonica nell'oceano porta all'acidificazione dell'oceano stesso [Copernicus].

l'acidità, maggiore è la presenza di ioni idrogeno e minore è il valore del pH, che decresce all'aumentare della concentrazione di ioni idrogeno).

La prima conseguenza riguarda gli organismi acquatici (come coralli, crostacei e gran parte dello zooplancton) che utilizzano gli ioni calcio (Ca^{++}) e carbonato (CO_3^{--}) presenti nell'acqua per ottenere carbonato di calcio (CaCO_3) con cui formano i loro scheletri o le loro conchiglie. In questo caso gli ioni idrogeno, immessi in abbondanza nell'acqua dall'assorbimento di anidride carbonica, riducono la concentrazione degli ioni carbonato poiché si legano a questi ultimi per produrre ioni bicarbonato (HCO_3^-).

Al diminuire degli ioni carbonato nell'acqua, si riducono progressivamente, fino ad estinguersi, tutte le popolazioni di organismi acquatici che per svilupparsi devono poter sintetizzare il carbonato di calcio. Oltre a causare la riduzione della biodiversità, l'acidificazione ha conseguenze economiche notevoli in quanto riduce, ad esempio, la produttività degli allevamenti di vongole, ostriche e crostacei e fa scarseggiare nel mare lo zooplancton che è alla base della catena alimentare di tutte le specie di pesci. Non mancano nemmeno le conseguenze ambientali con risvolti turistici: basti citare il fatto che la quasi scomparsa delle barriere coralline ha ridotto, insieme, la protezione naturale e il richiamo principale di molte coste oceaniche.

3.5 Deossigenazione

L'ossigeno sulla Terra viene prodotto dalla fotosintesi clorofilliana, sia nell'oceano sia al suolo. Nell'oceano contribuiscono alla fotosintesi soprattutto le migroalghe (fitoplancton) ma anche, sia pure in misura minore, le macroalghe come le laminarie (kelp) e le fanerogame. Al suolo contribuiscono alla fotosintesi tutti gli organismi vegetali terrestri che,

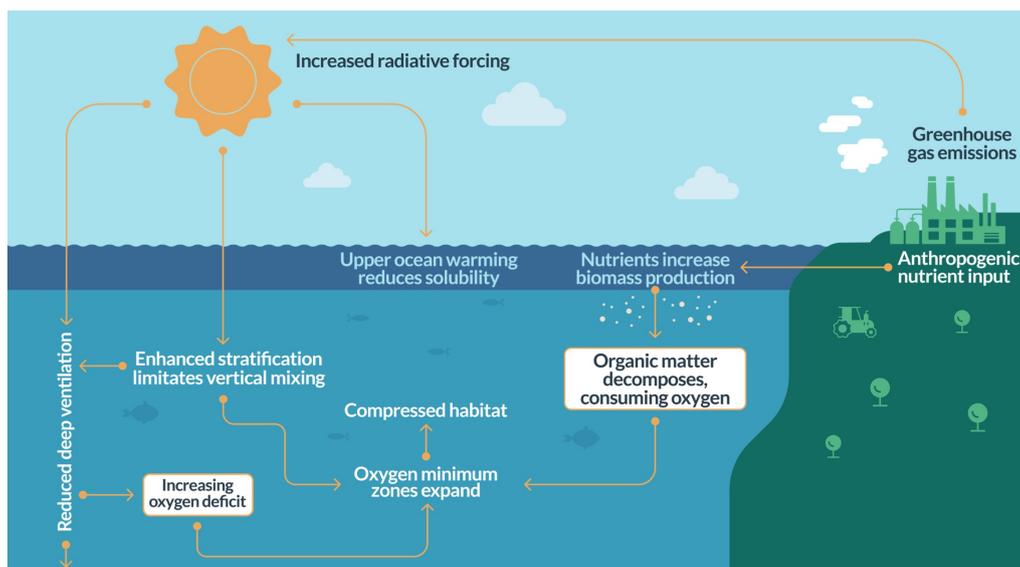


Figura 10: A sinistra: il riscaldamento ambientale riduce la solubilità dell'ossigeno, accentua la stratificazione delle temperature e riduce il trasporto di ossigeno in profondità. A destra: nitrati e fosfati, sversati in acqua, agiscono come nutrienti favorendo l'eutrofizzazione [Copernicus].

dalla fotosintesi, ricavano un componente fondamentale: i blocchi di carboidrato. [Come è noto, la fotosintesi clorofilliana è il processo che, utilizzando anidride carbonica (CO_2), acqua (H_2O) ed energia solare, produce ossigeno (O_2) e blocchi di carboidrato (CH_2O)].

In teoria la concentrazioni di ossigeno “disciolto” nelle acque dell'oceano e la concentrazione di ossigeno “libero” nell'atmosfera non dovrebbero variare nel tempo in quanto l'ossigeno viene prodotto in parti, grosso modo, uguali nell'oceano e al suolo, e tutto l'ossigeno prodotto viene anche “respirato”, rispettivamente, dagli organismi marini e terrestri. La situazione, nell'oceano però si è alterata a partire dalla metà del secolo scorso e, negli ultimi 70 anni, l'oceano ha perso circa il 2% dell'ossigeno globalmente disciolto. Tale perdita, peraltro, potrebbe aumentare di un ulteriore 4% entro la fine del secolo se l'attuale “scenario” socioeconomico “business as usual” non dovesse variare. (Fortunatamente, da questo punto di vista l'atmosfera, contenendo oltre il 99% dell'ossigeno presente sul Pianeta, non sembra avere problemi di deossigenazione, nonostante l'uso crescente di combustibili fossili).

Per quanto riguarda le cause della deossigenazione dell'oceano, dalla Figura 10 si vede che la responsabilità maggiore va attribuita all'azione su tre fronti del riscaldamento ambientale. Il primo fronte è la riduzione del contenuto di ossigeno disciolto negli strati superficiali del mare, dovuto alla riduzione della solubilità dell'ossigeno all'aumentare della temperatura dell'acqua. Il secondo fronte è l'accentuata stratificazione delle temperature, e quindi delle densità, nell'oceano. Il terzo fronte sono le difficoltà di affondamento delle masse d'acqua fredda ricca di ossigeno nelle aree polari, esaminate nel Paragrafo 3.1. Infatti, tali difficoltà, create dall'aumento di temperatura superficiale del mare, hanno ridotto la “ventilazione” connessa al trasporto di ossigeno dai poli all'equatore ad opera delle correnti profonde.



Figura 11: Fioritura algale nel Golfo del Messico vista dal satellite, a sinistra [NASA], e moria di pesci sulle coste del Texas, a destra [Smithsonian Magazine].

Sempre dalla Figura 10 si vede che una responsabilità globalmente minore, ma ugualmente importante nelle aree costiere, è attribuibile alla eutrofizzazione associata allo sversamento in acqua di nitrati e fosfati. I nitrati provengono, essenzialmente, dai fertilizzanti azotati impiegati in agricoltura, mentre i fosfati, utilizzati ampiamente nei detersivi per ridurre la durezza dell'acqua, provengono da scarichi fognari non sufficientemente depurati. Nitrati e fosfati insieme agiscono come nutrienti e stimolano fioriture algali che, talvolta, arrivano addirittura a colorare la superficie del mare. Giunte alla fine del loro ciclo vitale le alghe muoiono e, lentamente, affondano. Durante la discesa, però, la materia organica viene decomposta nel corso di processi di fermentazione che si svolgono aerobicamente almeno fino a quando, nelle acque circostanti, è disponibile sufficiente ossigeno disciolto.

In questo modo, il riscaldamento ambientale e la eutrofizzazione operano in sinergia, riducendo la concentrazione di ossigeno e spostando verso profondità minori le zone dove è disponibile ossigeno disciolto in quantità sufficiente a consentire la respirazione di molte specie marine. Vaste regioni dell'oceano vengono così trasformate in "zone morte" con danni socio-economici evidenziati da immagini iconiche come quella di Figura 11.

3.6 Inquinamento da plastica

A partire dagli anni '50 del secolo scorso, lo sviluppo di prodotti in plastica ha avuto un'accelerazione così grande che un Mondo senza plastica non è più immaginabile. Attualmente, come illustrato nella Figura 12, la produzione mondiale globale di plastiche è pari a circa 460.000 tonnellate all'anno e, in assenza di norme limitanti (ovvero con scenario BAU "business as usual") tale valore potrebbe pressoché triplicare entro il 2060.

D'altra parte sta aumentando anche la consapevolezza che una diffusione illimitata della plastica costituirebbe una seria minaccia per il Pianeta a causa, soprattutto, della cultura "usa e getta" che si è instaurata negli ultimi anni. (I prodotti monouso costituiscono attualmente il 40% in massa della produzione totale di plastica e spesso, a causa di uno smaltimento non corretto, dopo una "vita utile" di poche ore restano nell'ambiente per centinaia di anni). In questo quadro, va ripensato lo smaltimento di tutti i prodotti in plastica, e non solo di quelli monouso, in quanto, ogni anno, ulteriori 100 milioni

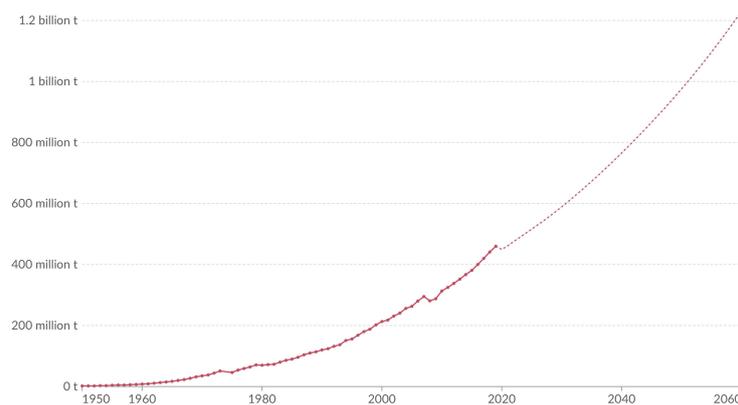


Figura 12: Produzione storica e prevista di plastica nell'attuale scenario "Business As Usual" [OurWorldinData]

circa di tonnellate di plastica vengono abbandonate nell'ambiente e, conseguenza quasi inevitabile, circa 8 milioni di queste tonnellate vanno nell'oceano.

I rifiuti in plastica che finiscono nell'oceano provengono da:

- spazzatura stradale contenente particelle di pneumatico, vernice e fibre tessili;
- scarichi industriali non trattati;
- abbandoni nell'ambiente (coste e spiagge incluse) dovuti spesso a semplice incuria (ma talvolta associati a veri e propri reati ambientali).

Come si vede nella Figura 13 a destra, piogge e alluvioni trasportano i rifiuti dall'ambiente ai corsi d'acqua e questi ultimi li scaricano nel mare, mentre le mareggiate portano al largo i rifiuti abbandonati su coste e spiagge. Infine, molti rifiuti anche ingombranti (caso tipico: le reti da pesca smesse) vengono abbandonati direttamente in mare, con il risultato che, attualmente (2023), nell'oceano si trovano almeno 120 milioni di tonnellate di plastica. (Le conseguenze sono gravi in quanto, come si vede nella Figura 13 a sinistra, le reti da pesca abbandonate possono ancora intrappolare i pesci sul fondo mentre i manici in plastica delle classiche 4 o 6 lattine, possono risultare fatali per le tartarughe marine).

La maggior parte della plastica che arriva nel mare resta in vicinanza delle coste ma, come si vede nella Figura 13 al centro, una frazione non trascurabile viene trasportata in tutto l'oceano dai venti e dalle correnti marine. La plastica, a differenza delle sostanze organiche, non si degrada ma, piuttosto, si frammenta sotto l'azione dei raggi ultravioletti e delle sollecitazioni meccaniche associate al moto ondoso. Il risultato è che nell'oceano si trovano macroplastiche (con dimensioni superiori ai 20 centimetri), mesoplastiche con dimensioni comprese tra i 20 e i 5 centimetri, microplastiche con dimensioni inferiori ai 5 centimetri e, in più, nanoplastiche che non si vedono ma ci sono. Per quanto riguarda la provenienza, da quanto detto finora si intuisce che micro e nano plastiche possono essere sia primarie, cioè prodotte con quelle dimensioni, o secondarie, cioè derivanti dal parziale degrado di macro- e mesoplastiche.

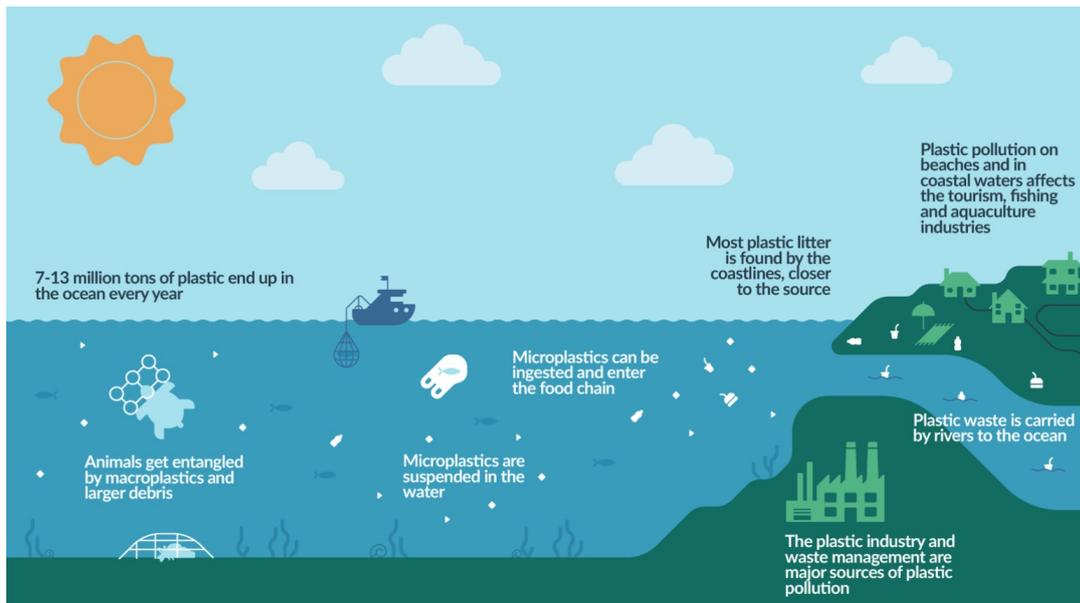


Figura 13: A destra: forti piogge trasportano i rifiuti in plastica dall'ambiente ai corsi d'acqua che poi li scaricano a mare. Al centro: venti e correnti marine trasportano in tutto l'oceano la plastica che, una volta degradata e frammentata viene inghiottita dagli organismi marini ed entra nella catena alimentare. A sinistra: i rifiuti ingombranti in plastica possono intrappolare pesci e animali marini [Copernicus].

Un discorso interessante riguarda anche le diverse profondità a cui si trovano le plastiche. All'origine, le plastiche possono essere più o meno dense dell'acqua di mare e, quindi, possono, rispettivamente, sprofondare o galleggiare. Le plastiche galleggianti, però, possono essere colonizzate da microrganismi infestanti, come alghe e invertebrati, che formano incrostazioni sempre più spesse. Tali incrostazioni aumentano la densità dei rifiuti galleggianti che, ad un certo punto, affondano. Arrivati a grandi profondità, tuttavia, i microrganismi muoiono per mancanza di luce e le incrostazioni si staccano consentendo ai rifiuti di tornare a galleggiare.

Per questo motivo, plastiche e microplastiche si trovano a tutte le profondità e, nelle vicinanze della superficie, possono venir inghiottite da pesci e animali (come mammiferi marini e tartarughe) che le scambiano per cibo. Una volta entrate in questo modo nella catena alimentare, le microplastiche entrano, inevitabilmente, a far parte anche dell'alimentazione umana. (Per dare un'idea di quanto plastiche e microplastiche siano ormai pervasive, l'UNEP - United Nations Environment Programme cita il fatto che, di recente, una borsa della spesa in plastica è stata trovata nella Fossa delle Marianne, la depressione di quasi 11 km nel Pacifico nord-occidentale, conosciuta come il "punto più profondo di tutti gli Oceani").

Bibliografia

F. Antonioli e al., *Sea-level rise and potential drowning of the Italian coastal plains: Flooding risk scenarios for 2100*, Quaternary Science Reviews, vol. 158, pp. 29-43, 2017.

G. Comini, *Le correnti a getto nelle estati calde*, CISM, 2022.

G. Comini, *Il bilancio sbilanciato dell'energia sulla Terra*, CISM, 2024.

G. Comini e M. Libralato, *Il Cambiamento Climatico - Il Punto di Vista Fisico-Tecnico, Nuova Edizione*, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

G. Comini e S. Savino, *Fondamenti Termodinamici dell'Energetica - Terza Edizione rivista ed aggiornata*, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

Copernicus, *Global Temperature record streaks - April 2024 was the hottest on record*, Climate Change Service, April Climate Bulletins, 7 maggio 2024.

Copernicus, *Ocean Warming*, Copernicus Marine Services, Visto il 18 maggio 2024.

Copernicus, *Marine Heat Waves*, Copernicus Marine Services, Visto il 18 maggio 2024.

Copernicus, *Ocean Acidification*, Copernicus Marine Services, Visto il 18 maggio 2024.

Copernicus, *Ocean Deoxygenation*, Copernicus Marine Services, Visto il 18 maggio 2024.

Copernicus, *Eutrophication*, Copernicus Marine Services, Visto il 18 maggio 2024.

Copernicus, *Plastic Pollution*, Copernicus Marine Services, Visto il 18 maggio 2024.

Copernicus, *Heat Storage*, Copernicus Marine Services, Visto il 18 maggio 2024.

Copernicus, *Ocean Currents*, Copernicus Marine Services, Visto il 18 maggio 2024.

Copernicus, *Sea Ice*, Copernicus Marine Services, Visto il 18 maggio 2024.

Copernicus e World Meteorological Organization, *ESOTC - European State of the Climate 2023*, Visto il 18 maggio 2024.

Copernicus e World Meteorological Organization, *European Ocean*, Copernicus Climate Change Service, Visto il 18 maggio 2024.

C. Craig e B. Palmer, *Guide - Sea Level Rise 101*, NRDC, 25 marzo 2024.

EPA - United States Environmental Protection Agency, *The Effects: Dead Zones and Harmful Algal Blooms*, 3 gennaio 2024.

S. Kuta, *Why Thousands of Dead Fish Washed Ashore in Texas*, Smithsonian Magazine, 14 giugno 2023.

R. Lindsey, *Climate Change: Global Sea Level*, NOAA Climate.gov, 19 aprile 2022.

New York Times, *101°F (38 °C) in the Ocean Off Florida: Was It a World Record?*, 26 luglio 2023.

New York Times, *To Escape the Heat in Dubai, Head to the Beach at Midnight*, 28 agosto 2023.

IPCC, *Climate Change 2021 - The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report, 2021.

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, *Ocean Acidification*, Visto il 18 maggio 2024.

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, *What is storm surge?*, Visto il 18 maggio 2024.

H. Ritchie, *How much plastic waste ends up in the ocean?*, Our World in Data, 5 ottobre 2023.

J.B. Sallée e al., *Summertime increases in upper-ocean stratification and mixed-layer depth*, Nature, 591, 25 marzo 2021.

K.V. von Schuckmann e al., *Heat stored in the Earth system 1960–2020: where does the energy go?*, Earth System Science Data, Copernicus Publications, vol. 15, pp. 1675–1709, 2023.

E. Thomas e C.V. Davis, *What is ocean acidification?*, Yale Experts Explain, 21 settembre 2021.

UNEP, *What is plastic pollution?*, SDG Explainers, agosto 2023.

UNEP, *Turning off the Tap - How the world can end plastic pollution and create a circular economy*, 2023 United Nations Environment Programme.

A. Vecchio e al., *Sea level rise projections up to 2150 in the northern Mediterranean coasts*, Environ. Res. Lett. 19, 014050, 2024.