

Il cambiamento climatico: le basi scientifiche, le cause, gli effetti, le misure per limitarne gli effetti

di *Sandro Fuzzi*

Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima – Consiglio Nazionale delle Ricerche, Bologna

Sommario

Il cambiamento climatico rappresenta la grande questione ambientale del nostro tempo. L'articolo descrive questo fenomeno: cause, effetti, proiezioni future e azioni per limitarne gli effetti deleteri per l'ambiente e per l'uomo, che sono comunque già in atto. Da ultimo viene richiamato l'accordo di Parigi mediante il quale la politica a livello mondiale si propone di gestire il contrasto al cambiamento climatico nell'interesse dell'intera umanità.

Parole chiave

Cambiamento climatico, effetto serra, Antropocene, emissioni antropiche, accordo di Parigi.

Summary

Climate change is the defining environmental issue of our time. The paper describes this phenomenon: causes, effects, future projections and the measures to limit the deleterious effects, that are already happening, on the environment and mankind. The paper then addresses the Paris agreement that the world governments have established to manage climate change for the benefit of humankind.

Keywords

Climate change, greenhouse effect, Anthropocene, anthropogenic emissions, Paris agreement.

1. Il sistema climatico terrestre

Con il termine clima (dal greco *klima*, inclinazione) si intende l'insieme delle condizioni meteorologiche e ambientali riferite ad una determinata area geografica, mediate su un tempo sufficientemente lungo, tipicamente 30 anni, come definito dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO).

Il sistema climatico terrestre comprende diverse componenti distinte che interagiscono fra loro in modo dinamico: atmosfera, oceano, superficie terrestre, neve e ghiacci, biosfera (la vita sulla Terra, incluso l'uomo). Il sistema evolve nel tempo influenzato sia dalla sua dinamica interna che da fattori esterni chiamati *forzanti climatiche*. Le forzanti climatiche possono essere causate da fenomeni naturali (ad esempio le eruzioni vulcaniche) o dalle attività umane; si parla in questo caso di *forzanti antropiche*.

Il "motore" del sistema climatico della Terra è il Sole. La superficie del pianeta riceve infatti energia dal Sole, principalmente sotto forma di radiazione visibile. Non tutta l'energia incidente viene però assorbita, e una parte è riflessa verso lo spazio dalla superficie terrestre e dalle nubi. La frazione di energia che viene riflessa è definita *albedo*. L'albedo terrestre è approssimativamente uguale a 0.3 (30% dell'energia

incidente viene riflessa), ma varia in maniera sensibile in diverse aree del globo a seconda che si tratti di superfici nevose, foreste, aree urbane, oceano.

La radiazione solare attraversa l'atmosfera, che è praticamente trasparente alla radiazione visibile, e la frazione che viene assorbita riscalda la superficie terrestre e l'oceano che riemettono poi parte dell'energia sotto forma di radiazione infrarossa. La Terra raggiunge quindi una temperatura di equilibrio dove assorbimento (radiazione incidente - radiazione riflessa) ed emissione si bilanciano (**Fig. 1**). In assenza di atmosfera, la temperatura di equilibrio radiativo della superficie terrestre sarebbe unicamente funzione della distanza della Terra dal Sole e dell'albedo terrestre, e pari a -18°C.

Nell'atmosfera però sono presenti alcuni gas come vapore acqueo, biossido di carbonio (CO₂), metano (CH₄), ossido nitroso (N₂O) e altri composti che assorbono una parte significativa della radiazione infrarossa emessa dalla Terra. L'energia assorbita da questi gas viene poi riemessa in tutte le direzioni contribuendo a riscaldare la superficie terrestre, dando luogo al cosiddetto *effetto serra naturale*, così chiamato in analogia con l'effetto di intrappolamento del calore da parte dei vetri di una serra illuminata dal Sole. Questi componenti atmosferici vengono perciò cumulativamente definiti *gas serra*.

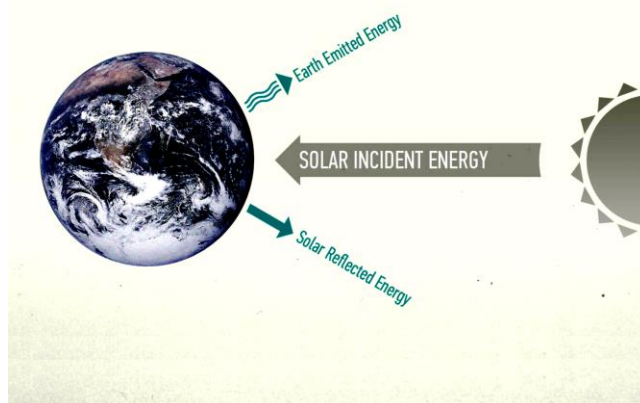


Fig. 1 – Rappresentazione schematica del sistema climatico terrestre: l'energia ricevuta dal sole principalmente sotto forma di radiazione visibile è uguale alla somma dell'energia riflessa dalla Terra e di quella riemessa sotto forma di radiazione infrarossa.

In conseguenza dell'effetto serra naturale, la temperatura media globale della Terra è di circa 15°C, ben 33°C in più della temperatura di equilibrio radiativo.

E' facile comprendere come, in assenza dell'effetto serra naturale, difficilmente la vita come noi oggi la conosciamo si sarebbe potuta sviluppare sul nostro pianeta.

2. L'effetto serra su altri pianeti

Può essere utile, per meglio inquadrare l'effetto serra, confrontare la temperatura della Terra con quella dei due pianeti a essa più vicini all'interno del sistema solare: Marte e Venere (**Fig. 2**).

Venere è distante dal Sole 108 milioni di km, la Terra 150 milioni di km e Marte 228 milioni di km. Sulla base di questo semplice fattore ci si attende che Venere sia il pianeta più caldo fra i tre e Marte il più freddo, con la Terra in una situazione intermedia, dato che l'energia ricevuta dal sole diminuisce con la distanza (2613 W/m², 1367 e 589 W/m² rispettivamente nel caso di Venere, Terra e Marte). Occorre però tenere conto che Venere ha un'albedo di 0.75 (75% dell'energia che riceve dal Sole viene riflessa) contro lo 0.3 della Terra e lo 0.15 di Marte. Tenendo anche conto di questo secondo fattore, le temperature di equilibrio radiativo dei tre pianeti sarebbero -39°C per Venere, -18°C per la Terra e -56°C per Marte.

La situazione reale è però molto diversa poiché la temperatura media della superficie di Venere è di 427°C, quella della Terra, come già detto, di 15°C e quella di Marte di -53°C. La differenza fra temperatura di equilibrio radiativo e temperatura effettiva è dovuta all'effetto serra, molto diverso per i tre diversi pianeti. Venere possiede un'atmosfera molto densa (circa 100 volte quella della Terra) composta in gran parte da CO₂ e vapore acqueo, due potenti gas serra, che determinano un enorme effetto serra (+466°C). La Terra, come già prima anticipato, è caratterizzata da un moderato riscaldamento dovuto all'effetto serra (+33°C), mentre l'atmosfera di Marte è caratterizzata da un effetto serra quasi nullo (+3°C) (Graedel e Crutzen, 1993).

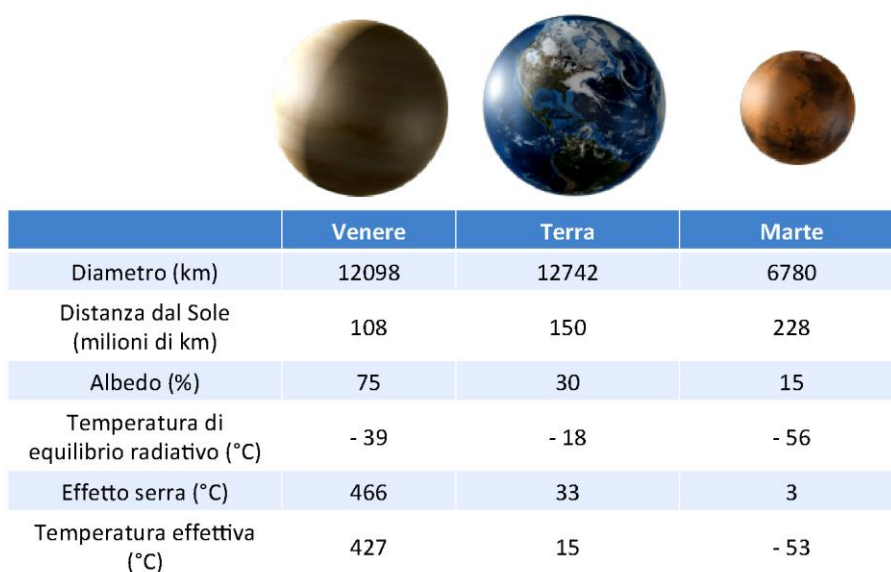


Fig. 2 – Confronto fra la temperatura di equilibrio radiativo e la temperatura effettiva della Terra e dei due pianeti ad essa più prossimi: Venere e Marte (adattato da: Graedel e Crutzen, 1993).

Si comprende quindi che la composizione dell'atmosfera dei pianeti ha un'importante influenza nel determinarne la temperatura e che cambiamenti della composizione stessa possono produrre importanti effetti sul clima planetario.

3. I cambiamenti climatici del passato

Il clima non può essere considerato come qualcosa di statico e invariabile, infatti può cambiare nel tempo, anche in modo molto evidente, basti pensare all'alternanza fra periodi glaciali e interglaciali che si sono avuti sulla Terra negli ultimi tre milioni di anni.

Come si può facilmente evincere dallo schema di Fig. 1, esistono tre tipi di processi che possono modificare il bilancio energetico della Terra, e quindi il clima:

- i. un cambiamento della radiazione solare incidente dovuto a variazioni dell'orbita terrestre o del Sole stesso;
- ii. un cambiamento della radiazione riflessa (quindi dell'albedo) dovuto, ad esempio, allo scioglimento dei ghiacci (albedo elevato) per lasciare spazio alla roccia che ha un albedo molto minore;
- iii. un cambiamento della radiazione infrarossa emessa dovuto alla variazione della concentrazione di gas serra nell'atmosfera.

Tutti questi tre fattori hanno avuto un ruolo nei cambiamenti climatici del passato. Le ere glaciali, alternate a periodi interglaciali, si sono ripetute ciclicamente per i passati tre milioni di anni e sono da attribuirsi alle variazioni dell'orbita della Terra attorno al Sole, i cosiddetti cicli di Milankovitch. Questi cicli, che possono essere calcolati con precisione astronomica, determinano la quantità di radiazione solare ricevuta dalla Terra nelle diverse stagioni e alle diverse latitudini. A sua volta, la aumentata superficie ricoperta dal ghiaccio nei periodi glaciali aumenta l'albedo terrestre e la quantità di radiazione riflessa dalla Terra.

Anche la CO₂ atmosferica ha avuto un ruolo nelle glaciazioni e i dati ricavati dalle carote di ghiaccio dell'Antartide ci mostrano come la concentrazione di questo gas serra sia inferiore durante le glaciazioni, ca. 190 ppm, (ppm = parti per milione) e più elevata nei periodi interglaciali più caldi, ca. 280 ppm (**Fig. 3**).

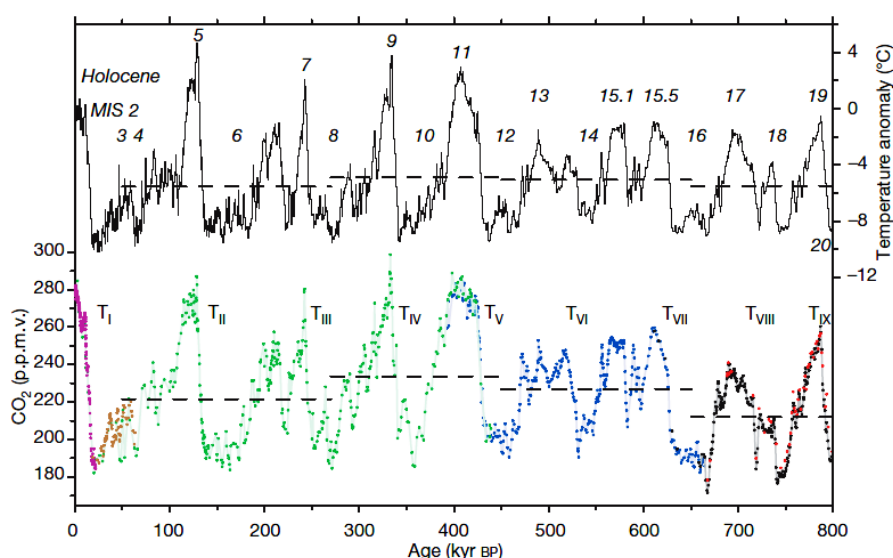


Fig. 3 - Andamento dell'anomalia della temperatura rispetto alla media delle temperature dell'ultimo millennio (curva in alto) durante gli ultimi 800.000 anni, ottenuta dai carotaggi in Antartide nell'ambito del progetto europeo EPICA. La curva in basso riporta invece i dati di concentrazione di CO₂ ottenuti dall'analisi delle bolle d'aria intrappolate nei ghiacci (Luthi et al., 2008). E' evidente la marcata correlazione fra gli andamenti dei due diversi parametri

L'ultima glaciazione si è conclusa circa 12.000 anni fa e ci troviamo attualmente in una fase interglaciale che va sotto il nome di Olocene (dal greco "del tutto recente"). L'inizio di questa era geologica coincide con lo sviluppo delle prime civiltà umane ed è tuttora in corso.

La **Fig. 4** mostra l'andamento della temperatura media globale durante periodi successivamente più vicini al presente a partire da 150.000 anni or sono (ultimo ciclo glaciale). Man mano che diminuisce la durata del periodo esaminato, la differenza fra temperatura massima e minima diminuiscono.

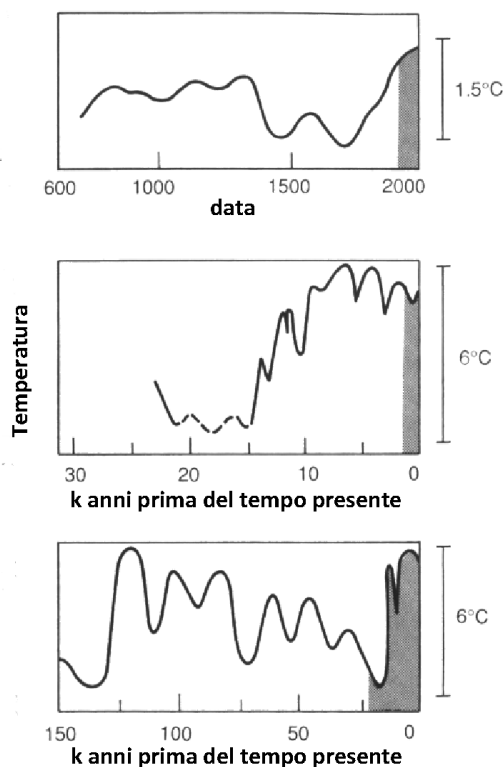


Fig. 4 – Andamento della temperatura media globale su diverse scale temporali, da 150.000 anni prima del tempo presente fino agli ultimi 1500 anni. L'area in grigio di ogni diagramma rappresenta il segmento temporale espanso nel diagramma immediatamente sopra (adattato da: Graedel e Crutzen, 1993).

Venendo a tempi molto più recenti, non vi è dubbio alcuno che la temperatura della Terra sia aumentata notevolmente negli ultimi 150 anni, come mostrato in **Fig. 5**. Questo aumento è particolarmente pronunciato a partire dall'inizio del XX secolo ed ha subito un'ulteriore accelerazione a partire dal secondo dopoguerra.

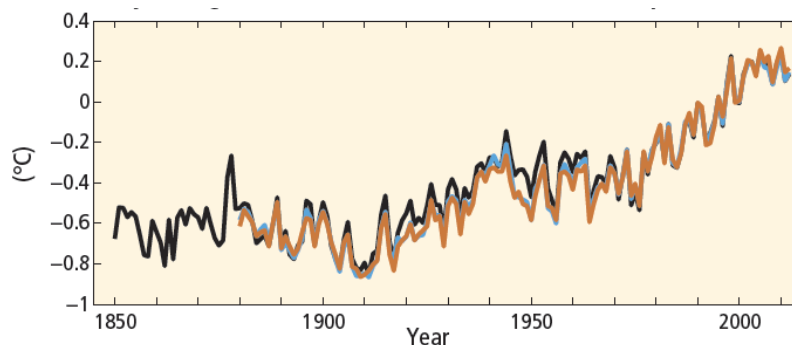


Fig. 5 – Andamento della temperatura media globale della Terra negli ultimi 150 anni rispetto alla media del periodo 1986-2005. I differenti colori del grafico si riferiscono a diversi set di dati utilizzati per costruire l'andamento (IPCC, 2014).

4. L'Antropocene

Come si è visto, la Terra è l'unico pianeta del sistema solare dove, grazie all'effetto serra naturale, si sono create le condizioni per lo sviluppo della vita e per la sua sussistenza.

Fino dagli albori della civiltà, l'uomo ha iniziato a modificare l'ambiente naturale per renderlo più adatto alle proprie esigenze, per esempio disboscando estese regioni al fine di ottenere terreno coltivabile. Fino a tempi molto recenti però la popolazione mondiale era molto limitata (solo 1000 anni fa la popolazione ammontava a poche centinaia di migliaia di individui su tutto il globo) e disponeva di tecnologie molto semplici, per cui l'impatto dell'uomo sull'ambiente era limitato sia in termini quantitativi che di estensione spaziale.

Con l'inizio della rivoluzione industriale l'uomo ha invece iniziato a modificare l'ambiente in modo sempre più profondo con effetti via via crescenti sulla salute umana, la qualità dell'aria, la qualità delle acque, la diminuzione della biodiversità, il clima.

L'influenza sempre maggiore dell'uomo sull'ambiente fu inizialmente evidenziata nel 1873 dal geologo italiano Antonio Stoppani, che notava la comparsa di una nuova forza geologica universale esercitata dall'uomo, sconosciuta nelle ere precedenti, e fece riferimento per questo a un'era *antropozoica*.

Da allora comunque, la rapida espansione della popolazione e della capacità di utilizzare le risorse della Terra è continuata ininterrottamente. Negli ultimi 300 anni la popolazione mondiale è cresciuta più di 10 volte, circa il 50% della superficie terrestre è oggi utilizzata dall'uomo, l'uso dell'energia è aumentato di 16 volte solo durante il XX secolo e l'utilizzo di combustibili fossili e le pratiche agricole e di allevamento hanno causato un enorme aumento dei gas serra che hanno raggiunto il livello più elevato degli ultimi 800.000 anni.

Per questo il Premio Nobel Paul Crutzen e il biologo Eugene Stoermer hanno suggerito, riprendendo l'idea di Antonio Stoppani, che l'Olocene, l'era geologica iniziata con la fine dell'ultima glaciazione circa 12.000 anni fa, era da considerarsi concluso e che la Terra era entrata in una nuova era geologica che hanno proposto fosse chiamata *Antropocene*, per evidenziare il ruolo centrale dell'uomo nella geologia e nell'ecologia del pianeta (Crutzen, 2002).

5. I cambiamenti climatici nell'Antropocene

Le attività umane sono responsabili dell'emissione di grandi quantità di CO₂, CH₄ e N₂O, gas serra caratterizzati da un lungo tempo di permanenza nell'atmosfera che, per questo, si accumulano causando l'aumento esponenziale della loro concentrazione (**Fig. 6**).

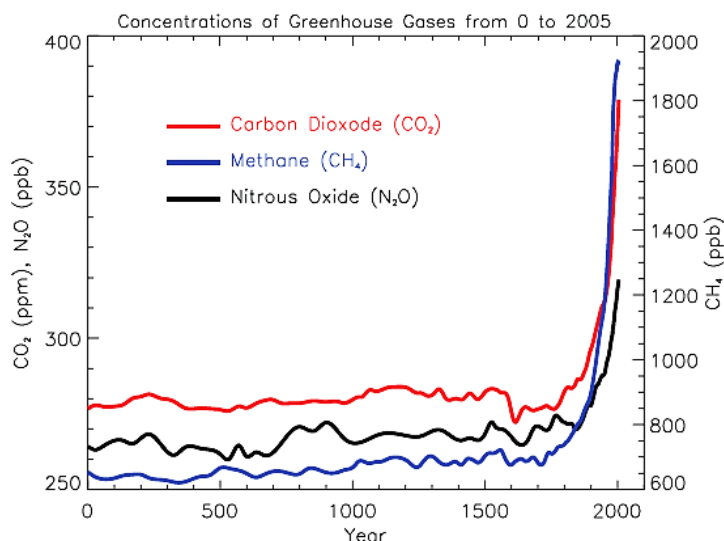


Fig. 6 – Concentrazione in atmosfera dei principali gas serra a lungo tempo di vita negli ultimi 2000 anni. E' chiaramente visibile l'aumento repentino delle concentrazioni a partire dalla metà del XVIII secolo, attribuibile al contributo delle attività umane. E' anche evidente un'ulteriore impennata delle emissioni nel secondo dopoguerra in coincidenza con la ricostruzione post-bellica (IPCC, 2014).

L'aumento della concentrazione di CO₂ è dovuto principalmente all'utilizzo dei combustibili fossili per la produzione di energia, i trasporti e gli usi domestici e industriali. Inoltre, la deforestazione, che riduce l'assorbimento di CO₂ da parte della vegetazione, costituisce un'ulteriore causa dell'accumulo di questo gas in atmosfera. L'aumento della concentrazione di CH₄ è invece dovuto alle attività agricole e di allevamento, alla estrazione e distribuzione del gas naturale e alla gestione dei rifiuti. N₂O infine viene emesso dai suoli agricoli e dagli incendi forestali. Altri componenti atmosferici rivestono un ruolo importante per il cambiamento climatico, ma si preferisce evitare di trattarli in questa sede per semplicità espositiva.

6. Il Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC)

Il Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (*Intergovernmental Panel on Climate change, IPCC*) è stato istituito nel 1988 dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) e dal Programma Ambientale delle Nazioni Unite (UNEP) con il compito di fornire a tutti i governi periodici aggiornamenti sullo stato delle conoscenze riguardo i cambiamenti climatici associati alle attività antropiche, il loro impatto e le opzioni per l'adattamento e la mitigazione. Le politiche ambientali elaborate dai governi sui cambiamenti climatici utilizzano le basi scientifiche dei rapporti IPCC. Le azioni concrete per il contrasto al cambiamento climatico sono, infatti, compito della politica e

dei governi e i rapporti IPCC sono formulati secondo il principio *policy-relevant but not policy-prescriptive*, rilevanti per le politiche ma non prescrittivi. È bene infatti ricordare che IPCC è composto da scienziati che si prestano volontariamente per sintetizzare la corposa letteratura scientifica del settore. Le politiche ambientali dei vari Paesi costituiscono poi la base per le negoziazioni nella Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC).

Nel 2013-2014 IPCC ha pubblicato il suo quinto rapporto. Dalle oltre 6000 pagine del rapporto, basato sull'analisi di oltre 30.000 pubblicazioni scientifiche, emergono due conclusioni chiave:

- i. il riscaldamento del clima della Terra è inequivocabile;
- ii. è evidente l'influenza delle attività umane sul sistema climatico e le attività umane sono la causa dominante del riscaldamento osservato dalla metà del XX secolo.

7. Le evidenze sul riscaldamento del clima della Terra

In particolare nell'ultimo secolo sono stati osservati cambiamenti in tutti i comparti del sistema climatico terrestre: l'atmosfera e l'oceano si sono riscaldati, l'estensione e il volume dei ghiacci terrestri e marini si sono ridotti, il livello medio degli oceani si è innalzato. Molti di questi cambiamenti non trovano riscontro su una scala temporale di secoli o, addirittura, millenni. Questi fenomeni vanno sotto il nome generale di riscaldamento globale (*global warming*). In particolare:

- a. il primo decennio del XXI secolo è stato il più caldo dal 1850, il trentennio 1983-2012 è stato il più caldo degli ultimi 800 anni, la temperatura media globale nel periodo 1880-2012 è aumentata di 0,85 °C;
- b. il livello medio del mare è cresciuto di 19 cm nel periodo 1901-2010, l'aumento più elevato degli ultimi 2000 anni;
- c. i ghiacciai si stanno riducendo su tutto il pianeta e l'estensione del ghiaccio nell'Artico è diminuita fra il 3,5 ed il 4,1% per decennio nel periodo 1979-2012.

La **Fig. 7** illustra schematicamente i cambiamenti che si sono verificati nei vari comparti del sistema climatico terrestre.

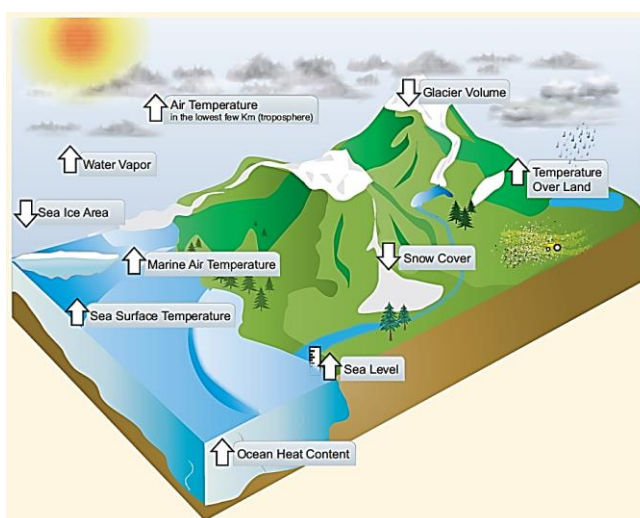


Fig. 7 - Rappresentazione dei principali cambiamenti dei vari comparti del sistema climatico della Terra. La direzione delle frecce indica per ognuno dei parametri considerati il segno del cambiamento osservato, positivo (freccia verso l'alto) o negativo (freccia verso il basso) (IPCC, 2014).

La temperatura media globale è il parametro a cui più spesso ci si riferisce per indicare il cambiamento del clima e dal grafico di Fig. 5 risulta evidente l'aumento osservato negli ultimi decenni. Di pari passo con l'aumento della temperatura dell'aria si registra anche un aumento della temperatura degli oceani in quanto più del 90% dell'energia in eccesso assorbita dal sistema climatico terrestre è oggi immagazzinata nelle acque marine.

Man mano che gli oceani si scaldano l'acqua si espande e aumenta di volume. Questo è uno dei principali fattori dell'innalzamento osservato del livello dei mari, unitamente allo scioglimento dei ghiacci.

8. Il contributo delle attività antropiche al riscaldamento del clima della Terra

Le emissioni di gas serra dall'inizio della rivoluzione industriale hanno portato a un aumento esponenziale (vedi Fig. 6). Fra il 1750 e il 2011 le emissioni antropiche del solo CO₂ sono state di circa 2000 Gt (miliardi di tonnellate). Di queste circa il 45% sono rimaste in atmosfera (circa 900 Gt), mentre il restante è stato rimosso dall'atmosfera e immagazzinato, in parti pressoché uguali, nella vegetazione e nell'oceano. Ciò che è ancora più importante, la metà delle emissioni cumulative di CO₂ dall'inizio della rivoluzione industriale a oggi ha avuto luogo negli ultimi 40 anni. Questo ci fa intuitivamente capire come l'accelerazione dell'aumento delle emissioni nelle ultime decadi costituisca il principale agente responsabile del riscaldamento climatico del pianeta. Con questa velocità di crescita delle emissioni, l'oceano e la vegetazione non sono in grado di rimuovere CO₂ come avveniva nei passati secoli e millenni e questo ha determinato l'enorme crescita della sua concentrazione in atmosfera dando luogo al cosiddetto *effetto serra antropico*.

Tutte le attività umane comportano infatti l'emissione di gas serra e la Fig. 8 mostra il contributo dei vari settori economici alle emissioni globali, che nel 2010 hanno raggiunto 49 GtCO_{2eq} per anno (miliardi di tonnellate di CO₂ equivalenti all'anno, la somma di tutti i gas serra espressi come CO₂).



Fig. 8 – Contributo percentuale dei vari settori economici alle emissioni globali di gas serra.

L'ultimo rapporto IPCC riporta che il contributo antropico all'aumento della temperatura media globale dal 1951 al 2010 rappresenta la gran parte dell'incremento di temperatura osservato durante lo stesso periodo. Infatti, la stima del contributo umano

all'aumento di temperatura è molto vicina all'aumento effettivo osservato, pur tenendo in debito conto le incertezze di questi dati (Fig. 9)

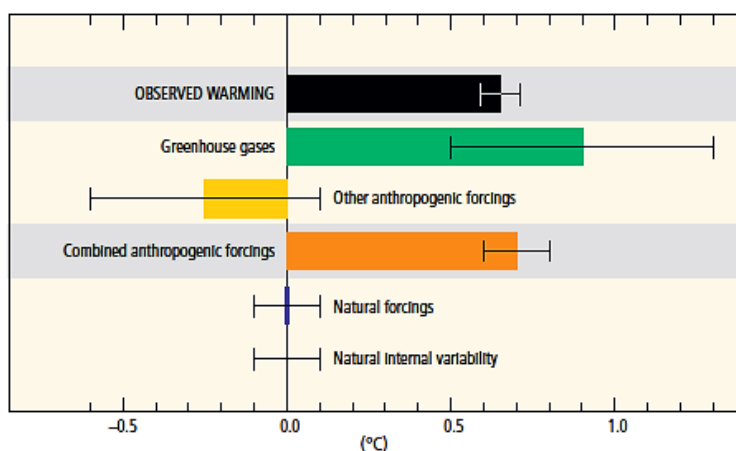


Fig. 9 – Confronto fra l'aumento della temperatura media globale osservato nel periodo 1951-2010 e le stime del contributo antropico al riscaldamento stesso. La barra nera rappresenta l'aumento osservato della temperatura. La barra verde mostra la stima dell'aumento della temperatura dovuto all'emissione dei gas serra antropici e la barra gialla rappresenta il contributo di altre specie di natura antropica che cumulativamente hanno un effetto di raffreddamento del clima (principalmente il particolato atmosferico che non è stato, come detto, qui trattato per semplicità espositiva). La somma delle barre verde e gialla corrisponde alla barra arancio che rappresenta quindi la stima totale del contributo antropico all'aumento di temperatura osservato nel periodo in esame. Le linee barrate rappresentano l'incertezza delle stime. La figura riporta anche i contributi naturali all'aumento della temperatura (variazione della radiazione solare, emissioni vulcaniche, ecc.) e la variabilità interna al sistema climatico terrestre, con i relativi margini di incertezza. Come si vede, il contributo naturale al riscaldamento climatico risulta minimale, se non completamente trascurabile (IPCC, 2014).

9. Effetti del riscaldamento climatico

Gli effetti del riscaldamento del clima della Terra sono stati anch'essi descritti in grande dettaglio nel 5° rapporto IPCC e si possono riassumere schematicamente in funzione di alcuni parametri climatici. Gli effetti riportati sono chiaramente valutati globalmente e possono differire, anche in misura sostanziale, a seconda delle diverse aree del pianeta.

Aumento della temperatura. L'aumento della temperatura sta già influenzando negativamente le rese in agricoltura ponendo in serio pericolo la disponibilità di risorse alimentari (Zhao et al., 2017). Allo stesso modo, l'aumento della temperatura dell'oceano sta influenzando sulla biodiversità marina influenzando, fra l'altro, le risorse ittiche. In un mondo più caldo aumentano inoltre le probabilità di incendi forestali. Infine, l'aumento della temperatura influenza anche la salute umana, si pensi ad esempio al numero anomalo di decessi causati in Europa dall'ondata di calore dell'estate 2003. Il riscaldamento climatico sta inoltre portando a un'alterazione del regime delle precipitazioni con effetti sulla disponibilità di risorse idriche e, ovviamente, sulla produzione agricola.

Innalzamento del livello del mare. L'innalzamento del livello del mare mette in pericolo le zone costiere di tutto il globo causando la sommersione di ampie aree, inondazioni e potenziali ondate migratorie dalle zone a rischio. Si calcola che un innalzamento di un

metro del livello dei mari porterebbe a dovere ricollocare circa 190 milioni di persone a scala globale (Nicholls *et al.*, 2011).

Scioglimento dei ghiacci. Il progressivo scioglimento dei ghiacci sta mettendo in pericolo la disponibilità di acqua dolce le cui riserve già stanno diminuendo. In conseguenza di ciò è purtroppo da mettere in conto anche il rischio di nuove guerre per l'accesso alle risorse idriche (Mastroieni e Pasini, 2017). Lo scioglimento dei ghiacci contribuisce chiaramente anche all'innalzamento del livello del mare.

Eventi estremi. Nella maggior parte del globo è cresciuta la frequenza delle ondate di calore. Mentre è cresciuta la frequenza di precipitazioni intense in determinate aree del globo, è anche aumentata l'estensione delle zone aride del pianeta. E' inoltre aumentata la frequenza dei cicloni tropicali.

La scienza ritiene che per limitare gli effetti deleteri del riscaldamento climatico in modo che possano essere gestiti con le risorse economiche e tecnologiche disponibili, limitare l'aumento della temperatura media del pianeta per la fine di questo secolo (anno 2100) a 2°C sopra la temperatura del periodo pre-industriale possa essere un obiettivo ragionevole. E' importante comunque ricordare che al 2012 la temperatura della Terra era già cresciuta di 0.85°C rispetto al periodo preindustriale.

A ogni possibile obiettivo di aumento della temperatura della Terra corrisponde una quantità di gas serra che può ancora essere emesso in atmosfera, ed eccedendo il quale non sarebbe possibile raggiungere l'obiettivo prefissato. La relazione fra emissioni globali di gas serra e aumento della temperatura è riportata in Fig. 9. Come si vede dalla figura, per limitare il riscaldamento della Terra al 2100 a 2 °C rispetto all'epoca preindustriale, le emissioni cumulative di gas serra di origine antropica non devono superare 3000 Gt di CO_{2eq} (freccia rossa). A oggi le attività antropiche hanno già immesso in atmosfera, come già ricordato, circa 2000 Gt di CO_{2eq} (freccia blu).

Come si vede, uno spazio di manovra veramente molto limitato!

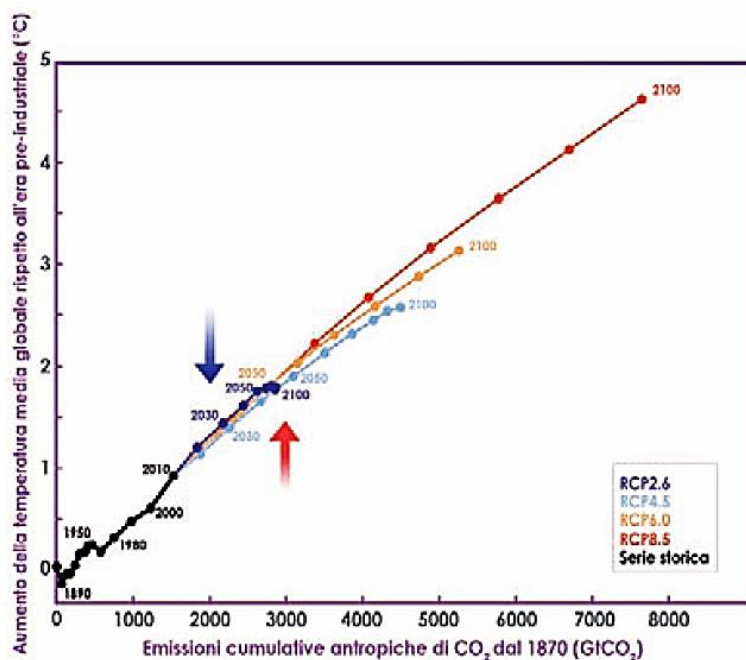


Fig. 9 - Le emissioni cumulative di gas serra e la risposta del sistema climatico in termini di aumento della temperatura media globale sono linearmente correlate, quindi a un dato livello di riscaldamento corrisponde un intervallo di emissioni cumulative di gas serra. Le frecce indicano

rispettivamente le emissioni cumulative di gas serra di origine antropica emesse fino ad oggi (blu) e le missioni totali alla fine del secolo che permettono di rimanere entro i 2 °C di riscaldamento del clima della Terra (IPCC, 2014).

10. Proiezioni del clima futuro

L'osservazione dei cambiamenti climatici del passato e di quelli in corso e la stima di quelli futuri costituiscono il presupposto indispensabile per la valutazione degli impatti e la definizione delle strategie di mitigazione e dei piani di adattamento. Se la conoscenza delle variazioni del clima passato e presente si fonda sulle osservazioni e sull'applicazione di metodi e modelli statistici di riconoscimento e stima degli andamenti, quella del clima futuro si basa essenzialmente sulle proiezioni dei modelli climatici.

I modelli climatici sono basati sulle leggi fondamentali della fisica, della chimica e della biologia e descrivono la dinamica dell'atmosfera e dell'oceano, della criosfera, del suolo e della vegetazione. Questi modelli, sempre più perfezionati con l'aumentare delle conoscenze frutto della ricerca scientifica, possono quindi simulare la dinamica del clima e le sue variazioni, in risposta a diversi scenari socio-economici di evoluzione delle emissioni di gas serra e di gestione del territorio.

Nell'ultimo rapporto IPCC sono riportate le proiezioni dell'andamento di alcuni parametri climatici fino alla fine del secolo. In **Fig. 10** sono presentate le proiezioni relative all'andamento della temperatura media globale e dell'innalzamento del livello degli oceani.

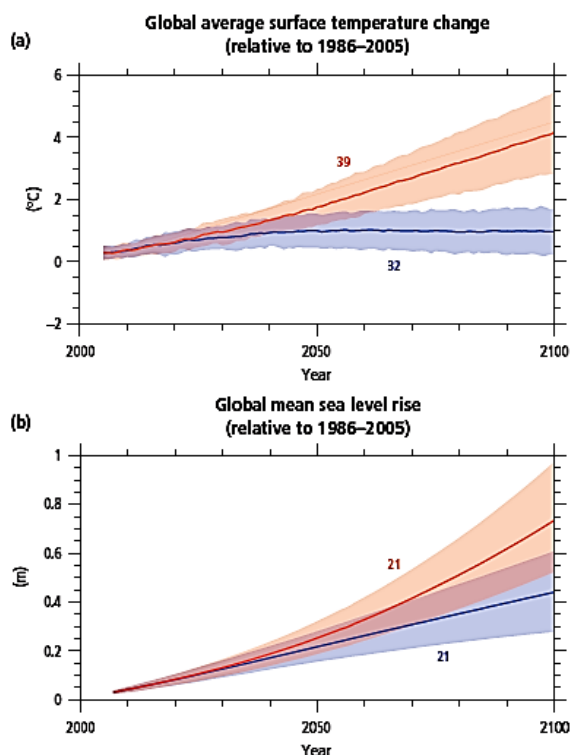


Fig. 10 – Proiezione (a) dell'aumento della temperatura media globale e (b) dell'innalzamento del livello dell'oceano fino a fine secolo fatta con riferimento alle medie del periodo 1986-2005 secondo due diversi scenari socio-economici (vedere testo) (IPCC, 2014).

Le linee blu in ambedue i grafici, con le relative bande d'incertezza, corrispondono a uno scenario particolarmente aggressivo di riduzione delle emissioni di gas serra, mentre le linee rosse rappresentano l'evoluzione dei due parametri climatici a legislazione costante (*business-as-usual*). Appare chiaro come secondo lo scenario più favorevole si possa (potrebbe) mantenere l'aumento della temperatura e l'innalzamento del livello dei mari entro limiti gestibili con le risorse e le tecnologie oggi disponibili, mentre il caso *business-as-usual* richiama scenari futuri con possibili conseguenze catastrofiche per l'ambiente e per l'uomo.

Ma quali sono gli interventi possibili per limitare gli effetti dannosi del cambiamento climatico che, ricordiamo, si stanno già manifestando?

Le politiche che occorre implementare riguardano due tipologie di intervento.

Mitigazione. Si tratta di politiche di riduzione delle emissioni di gas serra di origine antropica mediante l'aumento dell'efficienza energetica (fare le stesse cose con un minore consumo energetico) e la decarbonizzazione della società, che implica la sostituzione dei combustibili fossili con fonti energetiche rinnovabili.

Adattamento. Sono misure tecnologiche e infrastrutturali che permettono di contrastare gli effetti del cambiamento climatico che si stanno già manifestando. Le misure di adattamento sono le più varie e riguardano tutti i settori della società andando, ad esempio, dalla costruzione di barriere per evitare inondazioni a un diverso regime dietetico che possa limitare i consumi idrici.

Le politiche di mitigazione e di adattamento non sono alternative le une alle altre e debbono necessariamente essere implementate contemporaneamente. Le politiche di adattamento interessano maggiormente l'immediato e possono ridurre l'impatto sulla società del cambiamento climatico in atto, ma anche le misure di riduzione dell'emissione di gas serra debbono essere implementate in modo incisivo e nel più breve tempo possibile.

Infatti, anche nel caso, chiaramente soltanto ideale, in cui le emissioni di gas serra potessero essere azzerate istantaneamente, il riscaldamento climatico persisterebbe nel futuro per almeno alcuni secoli. La ragione di questo risiede nel lungo tempo di permanenza dei gas serra in atmosfera. CH₄ ha un tempo di permanenza in atmosfera di circa 10 anni, mentre N₂O persiste per circa 100 anni. Il caso di CO₂ è più complesso, ma nella sostanza si può dire che il 40% circa di CO₂ emesso oggi sarà ancora presente nell'atmosfera dopo 1000 anni. Per questo la concentrazione dei gas serra non può ritornare in breve ai livelli pre-rivoluzione industriale, anche nel caso in cui le emissioni fossero azzerate. La concentrazione di CH₄ ritornerebbe ai livelli pre-industriali in circa 50 anni dopo l'azzeramento delle emissioni, per N₂O il tempo richiesto è di diversi secoli, mentre nel caso di CO₂ si può ragionevolmente affermare che la sua concentrazione non potrà mai ritornare ai livelli pre-industriali.

Va anche considerato che la risposta del sistema climatico alle variazioni di concentrazione di gas serra è caratterizzata da una elevata inerzia, dovuta principalmente all'oceano. Gran parte dell'energia in eccesso del sistema climatico è infatti immagazzinata, come già ricordato, nelle acque dell'oceano che ha una elevata capacità di assorbimento e un rimescolamento molto lento delle acque superficiali con quelle profonde. Questo significa che occorreranno diversi secoli perché l'oceano raggiunga l'equilibrio termico rispetto all'effetto serra prodotto dalle emissioni attuali.

Per tutte queste ragioni, gli interventi di riduzione delle emissioni devono avvenire molto rapidamente, compatibilmente con i tempi degli accordi politici a livello mondiale. Infatti, l'impegno a contrastare il riscaldamento climatico può essere

solamente globale: una certa quantità di gas serra emessa in atmosfera ha infatti lo stesso effetto sul clima indipendentemente da dove l'emissione si è verificata. Politiche che non comportino il coinvolgimento di tutti i Paesi del mondo non potranno quindi essere efficaci nel contrasto al riscaldamento climatico, anche considerando che, per mantenere l'innalzamento della temperatura entro 2°C rispetto al periodo pre-industriale, una inadeguata politica di riduzione delle emissioni nell'immediato comporterà necessariamente misure più drastiche nel prossimo futuro, con il conseguente aumento dei costi economici e sociali o, ancora peggio, l'impossibilità di raggiungere l'obiettivo (Figuers *et al.*, 2017).

11. L'Accordo di Parigi

La Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC) è un trattato ambientale internazionale derivante dalla Conferenza sull'Ambiente e sullo Sviluppo delle Nazioni Unite tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992. Il trattato punta alla riduzione delle emissioni dei gas serra, per contrastare il riscaldamento globale.

Per più di 20 anni i governi di tutto il mondo hanno dibattuto per trovare un accordo internazionale che potesse limitare gli effetti sull'ambiente e sulla società del riscaldamento del clima. I principali punti di disaccordo riguardavano criteri di equità fra i Paesi. Occorre infatti ricordare che i Paesi industrializzati sono responsabili di più del 50% delle emissioni di gas serra dall'inizio dell'era industriale a oggi e solo negli ultimi decenni le economie emergenti hanno iniziato a contribuire sostanzialmente alle emissioni globali di gas serra, con la Cina divenuta solo 6 anni fa il principale responsabile delle emissioni di gas serra (ca. 25% del totale mondiale), sorpassando gli Stati Uniti che erano stati fino ad allora i primi in questa non invidiabile graduatoria. Tuttora comunque gli Stati Uniti detengono ancora il discutibile primato a livello di emissioni pro-capite (**Fig. 11**).

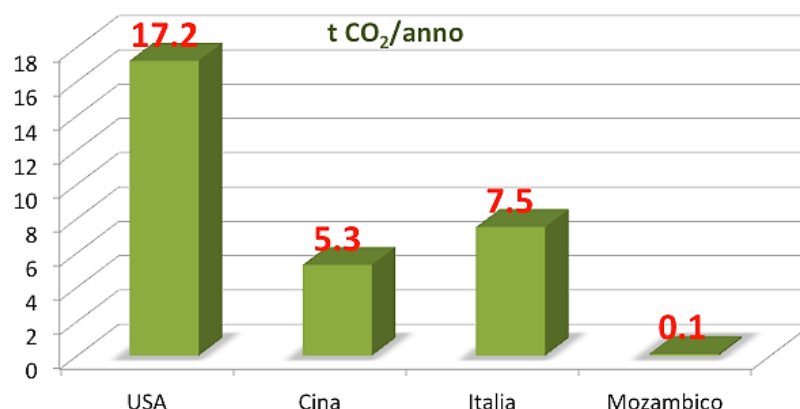


Fig. 11 – Confronto fra le emissioni annuali pro-capite di gas serra in 4 diversi Paesi espresse in tonnellate di CO₂/anno. Ogni cittadino degli Stati Uniti è responsabile dell'emissione di una quantità di gas serra più che tripla rispetto a un cittadino cinese e più che doppia rispetto a un italiano. Il Mozambico, uno dei Paesi più poveri del mondo, contribuisce in percentuali assolutamente trascurabili all'effetto serra globale.

Finalmente, Il 12 dicembre 2015, nell'ambito della XXI Sessione della UNFCCC, 196 Paesi, responsabili del 95% delle emissioni globali di gas serra, hanno approvato il documento finale denominato "Accordo di Parigi" che ha finalmente gettato le basi per un coordinamento delle politiche internazionali di contrasto al riscaldamento climatico.

Gli obiettivi principali dell'Accordo di Parigi sono:

- i. mantenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto di 2 °C rispetto ai livelli pre-industriali, e proseguire l'azione volta a limitare l'aumento di temperatura a 1.5° C, riconoscendo che ciò potrebbe ridurre in modo significativo i rischi e gli effetti dei cambiamenti climatici;
- ii. aumentare la capacità di adattamento agli effetti negativi dei cambiamenti climatici e promuovere lo sviluppo resiliente al clima e a basse emissioni di gas ad effetto serra, di modo che non minacci la produzione alimentare;
- iii. rendere i flussi finanziari coerenti con un percorso che conduca a uno sviluppo a basse emissioni di gas ad effetto serra e resiliente al clima.

Al di là di alcune critiche, anche giustificate, sui limiti di questo accordo, non si può non valutare positivamente il consenso raggiunto, dopo un ventennio di tentativi falliti, dai governi di tutto il mondo su un problema che riguarda non solo tutti noi, ma anche le generazioni future.

Si attende ora che la politica faccia il suo corso, sperabilmente virtuoso, sulla base dei risultati che la scienza ha prodotto e continua a produrre.

12. Conclusione

Il riscaldamento del clima della Terra è una realtà scientificamente acclarata e rappresenta la grande questione ambientale del nostro tempo, che mette in discussione la sussistenza stessa della nostra specie. Senza indulgere ad approcci catastrofisti, occorre collocare nella giusta prospettiva le informazioni e le proiezioni, oggi disponibili grazie al lavoro degli scienziati, sul cambiamento climatico. È poi compito dei legislatori intraprendere le opportune azioni per la mitigazione (riduzione delle emissioni) e per l'adattamento (cambiamenti infrastrutturali e sociali) al cambiamento climatico già in atto. Occorre poi considerare che molti aspetti del cambiamento climatico persisteranno per secoli e che un'efficace opera di contrasto a questo fenomeno rappresenta un impegno per molte generazioni a venire: maggiori emissioni oggi implicano la necessità di una maggiore riduzione domani, con costi economici e sociali più elevati. Poiché oggi sono disponibili tutti gli strumenti tecnologici e le conoscenze scientifiche necessarie per intervenire efficacemente, le strategie di riduzione delle emissioni dipendono unicamente da scelte politiche ed economiche (Silvestrini, 2015). Va comunque ricordato che i costi economici e sociali del non intervento sono senz'altro più elevati di quelli per le necessarie azioni di mitigazione e adattamento (Stern, 2007).

Bibliografia

La gran parte delle informazioni riportate in questo contributo fa riferimento al 5° Rapporto IPCC:

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

Altre referenze, citate nel testo:

Crutzen P.J., 2002. Geology of mankind. *Nature*, 415, 23.

Figueres C., Schellnhuber H.J., Whiteman G., Rockstrom J., Hobley A., Rahmstorf S., 2017. Three years to safeguard our climate. *Nature*, 546, 593-595.

Graedel T.E., Crutzen P.J., 1993. Atmospheric change: an Earth system perspective. W.H. Freeman and Company, New York.

Mastrojeni G., Pasini A., 2017. Effetto serra effetto guerra. Chiarelettere, Milano.

Nicholls R.J., Marinova N., Lowe J.A., Brown S., Vellinga P., De Gusmão D., Hinkel J., Tol R.S.J., 2011. Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4 °C world' in the twenty-first century. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369, 161-181.

Silvestrini G., 2016. Due gradi. Edizioni Ambiente, Milano.

Stern N. H., 2007. The economics of climate change: the Stern review. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Zhao C., Liu B., Piao S., Wang X., Lobelli D.B., Huangj Y., Huang M., Yao Y., Bassuk S., Ciais P., Durand J-L., Elliott J., Ewert F., Janssens I.A., Lis T., Lint E., Liu Q., Martre P., Müller C., Peng S., Peñuelas J., Ruaney A.C., Wallachz D., Wang T., Wu D., Liu Z., Zhu Y., Zhua Z., Asseng S., 2017. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *PNAS*, 114, 9623-9631.