

# GAS SERRA E CAMBIAMENTO CLIMATICO

**Gianni Comini**

CISM - Dipartimento di Energia e Ambiente

Piazza Garibaldi 18 - 33100 Udine

*gianni.comini@cism.it*

18 luglio 2023

## **1 Bilancio energetico ed effetto serra**

Per capire il bilancio energetico della Terra schematizzato nella Figura 1, conviene fare riferimento a quel che succede ai limiti dell'atmosfera e in corrispondenza alla superficie terrestre. Ai limiti dell'atmosfera, il flusso medio radiativo ricevuto dal Sole nel campo delle onde corte (essenzialmente ultravioletto e visibile), è lievemente superiore alla somma del flusso solare radiativo riflesso da nubi, atmosfera e superficie terrestre, e del flusso radiativo emesso nel campo delle onde lunghe (essenzialmente infrarosso) da superficie terrestre, atmosfera e nubi. Lo sbilanciamento residuale si traduce negli aumenti di energia interna della Terra che si manifestano con la crescita nel tempo della temperatura media globale e con la progressiva fusione dei ghiacci.

In corrispondenza alla superficie terrestre escono la radiazione emessa nell'infrarosso, il flusso latente associato alla risalita di masse d'aria calda e umida e il flusso sensibile associato alla risalita di masse d'aria riscaldata. Per contro entrano la, già menzionata, radiazione solare assorbita e, soprattutto, la "radiazione di ritorno" dovuta alla presenza dei gas serra nell'atmosfera e responsabile, come vedremo, della sproporzione tra il flusso totale emesso dalla superficie terrestre e il flusso che riesce a uscire verso lo spazio senza essere mai intercettato, passando per la così detta "finestra atmosferica".

Per spiegare la radiazione di ritorno, conviene pensare all'atmosfera come ad una serie di strati omogenei sovrapposti che, a causa della presenza dei gas serra, sono in grado di assorbire e reirradiare nell'infrarosso. Infatti, il flusso radiativo emesso verso l'alto dalla superficie terrestre che non passa attraverso la finestra atmosferica, viene intercettato lungo il percorso e parzialmente assorbito da uno degli strati superiori. Lo strato interessato dall'assorbimento si riscalda e, a sua volta, riemette flusso radiante in tutte le direzioni compresa, evidentemente, quella verso il basso. Di conseguenza, il flusso radiante emesso dalla superficie terrestre che non passa attraverso la finestra atmosferica, prima di poter uscire verso lo spazio subisce una serie di assorbimenti e riemissioni che, in buona parte, lo reindirizzano verso il basso.

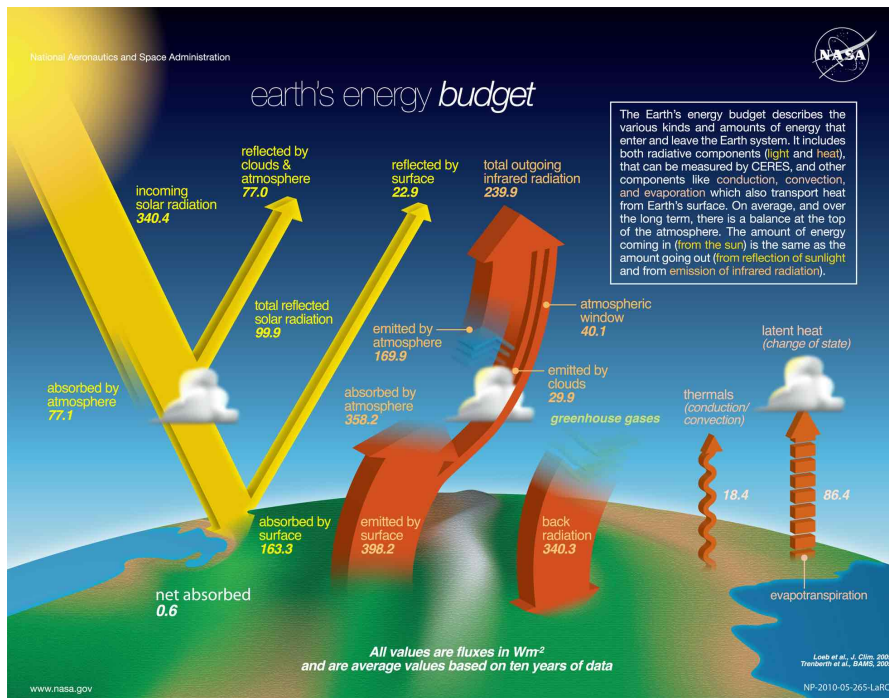


Figura 1: Bilancio energetico della Terra con evidenziati i flussi di energia che entrano ed escono dai limiti dell'atmosfera e dalla superficie terrestre, insieme con gli scambi termici che hanno luogo all'interno dell'atmosfera [NASA].

Il risultato finale è una “radiazione di ritorno” che, come si può intuire, aumenta al crescere della concentrazione atmosferica dei gas serra nei diversi strati. Per compensare tale radiazione la superficie terrestre deve emettere un flusso radiativo che cresce con la concentrazione atmosferica dei gas serra e, per farlo, deve aumentare la sua temperatura. D'altra parte, in assenza di atmosfera la temperatura media terrestre sarebbe pari a circa  $-18^{\circ}\text{C}$  e quindi, se la temperatura attuale è troppo alta, anche i  $-18^{\circ}\text{C}$  non sarebbero troppo confortevoli. Di conseguenza, appare ragionevole considerare “naturale” l'effetto serra che si aveva durante il periodo preindustriale (1850-1900) e misurare da quel livello l'aumento della temperatura media globale planetaria.

## 1.1 I gas serra

Come si vede nella Figura 2 in alto, sia le radiazioni solari (corte e comprese in gran parte nei campi dell'ultravioletto e del visibile), sia le radiazioni emesse dalla superficie terrestre (lunghe e interamente comprese nel campo dell'infrarosso) sono parzialmente assorbite durante l'attraversamento dell'atmosfera. Più precisamente, la figura in alto riporta in linea continua i poteri emissivi monocromatici adimensionali (ovvero divisi per i rispettivi valori massimi) delle radiazioni provenienti dal Sole (a sinistra), e di quelle provenienti dalla superficie terrestre (a destra). A causa dell'assorbimento atmosferico, descritto in dettaglio dalla Figura 2 al centro, la radiazione solare in arrivo sulla superficie terrestre (area colorata in arancione) risulta inferiore a quella emessa dal Sole, mentre

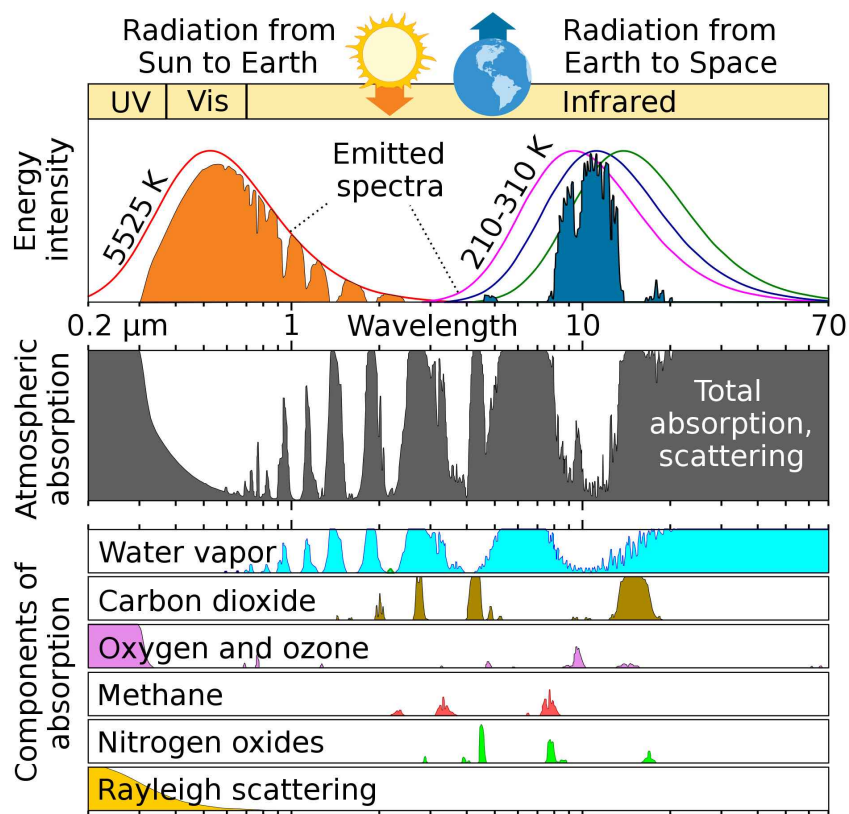


Figura 2: Radiazioni che attraversano l'atmosfera. In alto a linea continua: radiazioni provenienti dal Sole (a sinistra) e dalla superficie terrestre (a destra); evidenziate dalle aree sottostanti colorate: radiazioni solari in arrivo sulla superficie terrestre (arancione) e radiazioni "terrestri" che lasciano l'atmosfera senza subire alcun assorbimento (azzurro). Al centro: percentuali di assorbimento delle radiazioni in funzione della lunghezza d'onda. In basso: contributi percentuali all'assorbimento ascrivibili ai gas atmosferici e alla dispersione di Rayleigh [Wikipedia].

la radiazione emessa dalla superficie terrestre che passa attraverso la finestra atmosferica senza subire alcun assorbimento (area colorata in azzurro) è molto inferiore a quella totale emessa dalla superficie terrestre.

Le Figura 2 in basso completa le due precedenti mostrando le componenti dell'assorbimento atmosferico. A sinistra si vede che le radiazioni solari più corte sono assorbite in gran parte dall'ozono, mentre quelle solari più lunghe sono assorbite, ma in piccola parte, dal vapore d'acqua e dall'anidride carbonica. In aggiunta, ma non rappresentate nella figura, le particelle scure in sospensione (fuliggine) possono assorbire le radiazioni solari, mentre le particelle chiare in sospensione (polveri e goccioline) possono disperdere le radiazioni stesse. In tale contesto, appaiono particolarmente importanti le dispersioni isotrope causate dalle particelle più piccole ( $D < 0,1 \mu m$ ) che, avendo dimensioni confrontabili con quelle delle radiazioni ultraviolette, possono rimandare verso lo spazio buona parte delle radiazioni più corte in arrivo, dando origine a quella che viene definita dispersione di Rayleigh.

(L'assorbimento implica la successiva riemissione isotropa nell'infrarosso in quanto le particelle diventano, a loro volta, sorgenti di radiazione che si trovano ad una temperatura prossima a quella della superficie terrestre. Per contro la dispersione, in inglese "scattering" ovvero "sparpagliamento", implica solo deviazioni in direzioni diverse e, a differenza dell'assorbimento, non altera lo spettro di frequenze della radiazione solare deviata.)

A questo punto, appare naturale definire "gas serra" i gas atmosferici che, come evidenziato nella parte destra della Figura 2 in basso, presentano bande di assorbimento nell'infrarosso. Come si può vedere, nell'attraversamento dell'atmosfera le radiazioni infrarosse sono assorbite in gran parte dal vapore acqueo che, per questo motivo, può essere considerato il principale gas serra e in buona parte dall'anidride carbonica. Seguono, in ordine di importanza, il metano, il protossido di azoto, l'ozono (che ha bande di assorbimento anche nell'infrarosso) e i gas fluorurati (che non sono evidenziati nella figura).

## 2 Emissioni antropiche di gas serra

La comunità scientifica è d'accordo nell'attribuire la responsabilità maggiore del cambiamento climatico alle emissioni di gas serra collegate alle attività umane e, in coerenza, le statistiche "ufficiali" come quella della Figura 3 riportano le emissioni dei principali gas serra di origine antropica ripartite per fonti. In tali statistiche le emissioni dei gas diversi dall'anidride carbonica [CO<sub>2</sub>] sono moltiplicate per il loro potenziale di riscaldamento globale GWP (Global Warming Potential) in modo da ottenere i rispettivi potenziali "equivalenti" in anidride carbonica [CO<sub>2</sub> eq].

(Il GWP esprime il contributo all'effetto serra, in uno specifico intervallo di tempo, delle molecole di un gas climalterante rapportato all'effetto della CO<sub>2</sub>, il cui potenziale di riferimento è pari a 1. In genere, e nel seguito, i valori del GWP sono calcolati per un intervallo di tempo di 100 anni.)

Ciò premesso si trova che il GWP in 100 anni è pari a 21 per il metano [CH<sub>4</sub>] e 310 per il protossido di azoto [NO<sub>2</sub>] ovvero, in un periodo di 100 anni una molecola di metano ha un effetto climalterante in atmosfera pari a quello di 21 molecole di anidride carbonica, mentre una molecola di protossido di azoto ha un effetto pari a quello di 310 molecole di anidride carbonica.

(Le emissioni di metano sono associate alla fermentazione anaerobica di sostanze organiche come, ad esempio, le deiezioni degli animali negli allevamenti e i residui vegetali nelle risaie coperte d'acqua, ma provengono anche dalle attività di estrazione e trasporto del gas naturale. Il protossido di azoto, invece, è liberato nell'atmosfera dai fertilizzanti agricoli azotati.)

Va osservato anche che emissioni antropiche molto ridotte di gas con GWP molto elevati possono dare contributi importanti al cambiamento climatico. Questo potrebbe essere il caso, ad esempio, delle emissioni di gas fluorurati [F] i cui potenziali di riscaldamento globale sono molto alti. Fortunatamente, le loro emissioni sono limitate drasticamente dalle misure di contenimento entrate in vigore recentemente.

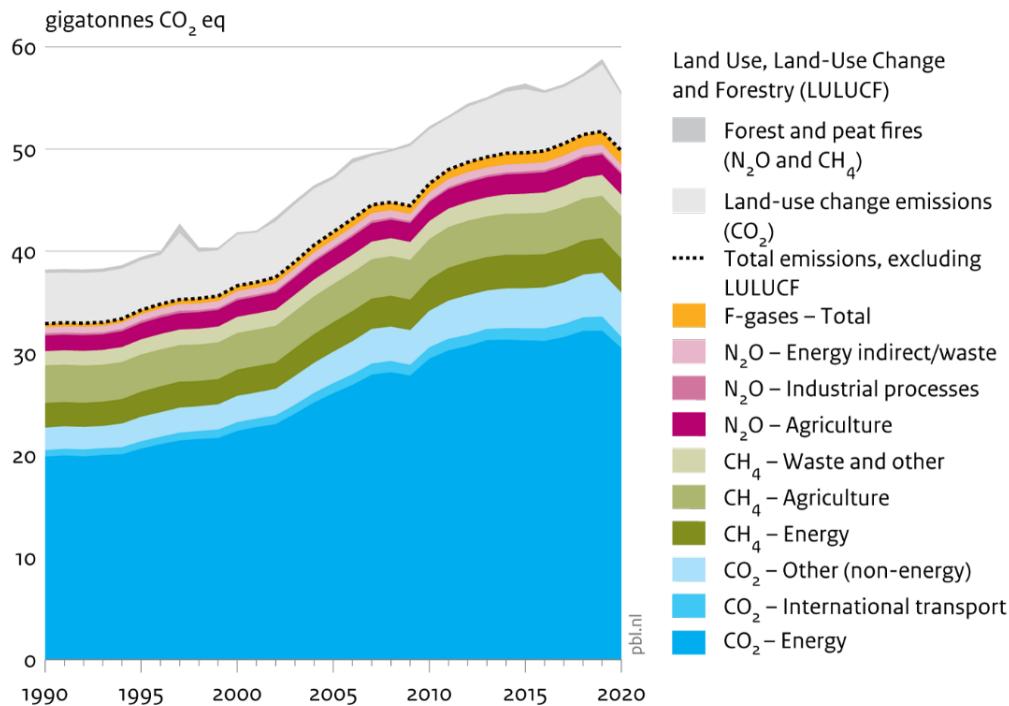


Figura 3: Emissioni antropiche annuali dei principali gas serra ripartite per fonti ed espresse in miliardi di tonnellate di anidride carbonica equivalente [PBL].

(In Europa vige, anche se in attesa di modifiche, il Regolamento UE 517/2014 recepito in Italia dal DPR 146/2018, che ha istituito l'obbligo di registrare gli interventi di installazione, riparazione, manutenzione, controllo delle perdite e smantellamento, delle apparecchiature tecnologiche contenenti gas F. Le più diffuse tra queste apparecchiature sono i frigoriferi e le pompe di calore, e quindi, restrizioni ed obblighi imposti dal Regolamento e dal DPR prima citati vanno ad impattare sulla vita di tutti i giorni.)

Com'era da aspettarsi, la maggior parte delle emissioni di anidride carbonica proviene dall'uso dei combustibili fossili a scopi energetici. Tuttavia, nella Figura 3, si vede che un ruolo importante è rivestito anche dalle emissioni, contraddistinte dall'acronimo LULUCF (Land Use Land Use Change and Forestry), collegate alla gestione del territorio ed ai cambiamenti di destinazione d'uso dei terreni agricoli e delle foreste. Senza entrare in troppi dettagli tecnici si può osservare, a titolo di esempio, che il prosciugamento delle torbiere per far posto a coltivazioni, l'abbattimento delle foreste o l'aratura delle praterie generano emissioni perché liberano gli stock di carbonio presenti nel terreno. All'opposto, azioni come l'imboschimento o la conversione delle terre arabili in pascoli possono proteggere gli stock di carbonio presenti nel terreno o, addirittura, determinare il sequestro nel terreno di nuovo carbonio catturato dall'atmosfera.

Nei casi più frequenti, le emissioni collegate al cambiamento di destinazione d'uso dei terreni sono associate, essenzialmente, al rilascio di anidride carbonica durante i processi aerobici di decomposizione dell'humus per opera dei batteri del suolo. Le conseguenze del cambiamento di destinazione d'uso sono particolarmente devastanti quando si procede

al taglio di boschi per fare posto a coltivazioni stagionali, e quando aree agricole (o peggio boschive) vengono urbanizzate.

Il LULUFC, tuttavia, tiene conto anche delle emissioni di anidride carbonica durante gli incendi boschivi. A questo proposito può essere interessante notare che il picco chiaramente visibile nella curva del LULUFC nel 1997 è stato provocato dall'incendio delle foreste in Indonesia mentre il picco del 2019 è associato agli incendi in Amazzonia, nell'Artico e in Australia. (Interessante è anche la diminuzione delle emissioni antropiche complessive nel 2020 associata al COVID che, purtroppo, è stato più che compensata dalla ripresa delle emissioni negli anni successivi).

## 2.1 Ozono e vapore acqueo

L'ozono e il vapore acqueo sono gas serra di origine naturale, in quanto l'ozono [O<sub>3</sub>] si forma nella stratosfera per l'azione dei raggi solari ultravioletti sull'ossigeno molecolare [O<sub>2</sub>], mentre il vapore si forma durante il ciclo idrologico dell'acqua. Poiché la Figura 3 non si occupa di ozono e vapore acqueo, appare opportuno spiegare tali assenze andando al di là della giustificazione riduttiva che “le emissioni antropiche sono le uniche su cui è possibile intervenire per mitigare il cambiamento climatico”.

In effetti, per quel che riguarda l'ozono, si può affermare con tranquillità che i benefici offerti da questo gas nella schermatura dalle radiazioni solari ultraviolette sono certamente superiori, qualitativamente e quantitativamente, all'impatto negativo sul cambiamento climatico esercitato dalla sua modesta azione di assorbimento delle radiazioni infrarosse.

Per quel che riguarda il vapor d'acqua, invece, il discorso è necessariamente più articolato dal momento che il vapor d'acqua è il più importante dei gas serra (al punto che, secondo studi recenti, è responsabile per 2/3 dell'aumento della temperatura media globale rispetto all'epoca preindustriale). Infatti, l'assenza del vapor d'acqua dalle statistiche del tipo riportato nella Figura 3 è stata spesso interpretata in modo strumentale dai “negazionisti” del cambiamento climatico che hanno accusato i climatologi di ignorare la principale forzante climatica naturali per concentrarsi sulla (secondo loro) falsa necessità di ridurre i consumi dei combustibili fossili. In realtà, come si cercherà di dimostrare nel seguito, il vapore d'acqua presente nell'atmosfera non è la causa ma una conseguenza del cambiamento climatico.

In primo luogo va osservato che il comportamento del vapor d'acqua è diverso da quello degli altri gas serra in quanto può condensare a temperature prossime a quelle dell'ambiente e, in aggiunta, può essere contenuto nell'aria solo in quantità limitate, sia pur crescenti con la temperatura. Più precisamente, la Termodinamica stabilisce che la massa di vapor acqueo che può essere contenuta in una massa unitaria di aria secca aumenta del 7% circa per ogni grado Celsius di aumento della temperatura. (Infatti, a causa del cambiamento climatico in corso, la quantità massima di vapore contenibile nell'unità di massa di aria sta aumentando di una percentuale compresa tra l'1 e il 2% per decennio).

La spiegazione sta nel fatto che la pressione parziale del vapore nell'aria può arrivare, al più, alla pressione di saturazione che, a sua volta, è una funzione crescente della temperatura. Perciò, quando la temperatura di una massa d'aria umida diminuisce, diminuisce anche la pressione di saturazione e, con essa, la quantità massima di vapore che può essere contenuta in quell'aria, costringendo la quantità eccedente a condensare.

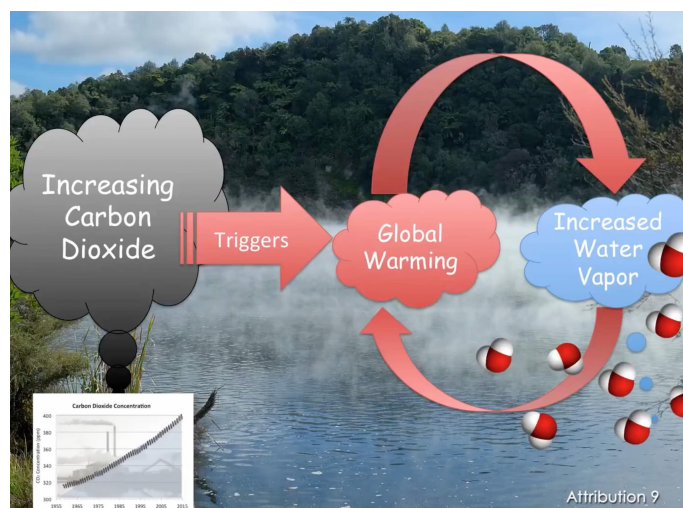


Figura 4: Un esempio di retroazione positiva: le emissioni di anidride carbonica equivalente innescano il riscaldamento globale che il vapore d'acqua presente nell'atmosfera amplifica causando, a sua volta, un aumento dell'evaporazione e, quindi, della concentrazione di vapore nell'atmosfera [PBL].

Per questo motivo, ad esempio, l'aria fredda ai Poli contiene pochissimo vapore a differenza dell'aria calda all'Equatore che, generalmente, è molto ricca di umidità. Tuttavia, quando l'aria calda e umida all'Equatore viene trasportata dalle correnti convettive a quote alte e fredde, dà origine a grandi sistemi di nubi ed a precipitazioni molto intense che, nei secoli, hanno favorito la formazione delle grandi foreste equatoriali.

Da un altro punto di vista si può osservare che il vapore d'acqua viene immesso in quantità crescenti nell'atmosfera durante i processi di evaporazione sempre più intensi che hanno luogo al di sopra di mari sempre più caldi a causa del cambiamento climatico. In ottemperanza al limite termodinamico, però, se quest'aria umida viene trasportata in aree fredde dà origine a precipitazioni tanto più intense quanto maggiore è la quantità di vapore in essa contenuto.

A causa di questi continui processi di evaporazione-condensazione, i tempi medi di residenza del vapore acqueo in atmosfera non superano le due settimane. Per contro, i gas serra incondensabili hanno tempi di residenza dell'ordine di anni e, una volta immessi nell'atmosfera, sono rimossi a fatica ed esercitano un impatto sul cambiamento climatico che non dipende né dalla temperatura né dalla quota alla quale si trovano.

Tutto ciò ha spinto i climatologi ad affermare che la sempre più grande quantità di vapore d'acqua presente nell'atmosfera non è la causa ma una conseguenza del cambiamento climatico. Il ragionamento alla base di tale affermazione è semplice: i gas serra incondensabili innescano un aumento della temperatura, e tale aumento intensifica i processi di evaporazione immettendo nell'aria più vapore acqueo che, essendo un gas serra molto potente, amplifica ulteriormente l'aumento di temperatura che ci sarebbe stato anche in sua assenza. Siamo, quindi, in presenza di quello che, in teoria dei sistemi, viene definito un processo a feedback (in italiano "retroazione") positivo schematizzabile come nella Figura 4.

In conclusione, a causa del feedback positivo, la presenza del vapor d'acqua nell'atmosfera aumenta considerevolmente l'incremento di temperatura che ci sarebbe stato in presenza dei soli gas serra incondensabili. Peraltro in assenza di vapore, e quindi di acqua, la vita sulla Terra non sarebbe stata possibile e, in assenza dei gas serra incondensabili che hanno innescato il cambiamento climatico, il nostro sarebbe ancora un Pianeta inabitabile alla temperatura di equilibrio di  $-18^{\circ}\text{C}$ .

## Bibliografia

**A. Buis**, *Steamy Relationships: How Atmospheric Water Vapor Amplifies Earth's Greenhouse Effect*, ASK NASA CLIMATE, February 8, 2022.

**G. Comini e S. Savino**, *La Captazione dell'Energia Solare - Liberamente Disponibile su Google Books*, International Centre for Mechanical Sciences, Monografie CISM, 2013.

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

**G. Comini e G. Cortella**, *Fondamenti di Trasmissione del Calore, Ristampa della Quarta Edizione*, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

**G. Comini e S. Savino**, *Fondamenti Termodinamici dell'Energetica, Terza Edizione Rivista e Aggiornata*, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

**EIA**, *Is ozone a greenhouse gas?*, US Energy Information Administration, Visto 28 giugno 2023.

**D. H. Hartmann**, *Global Physical Climatology - Second Edition*, Elsevier, Amsterdam, 2016.

**J. Marshall e R.A. Plumb**, *Atmosphere, Ocean and Climate Dynamics - An Introductory Text*, Elsevier Academic Press, Amsterdam, 2008.

**Meteo Expert**, *Manuale di Meteorologia*, Alpha Test, Milano, 2019.

**G.J.J. Olivier**, *Trends in Global and Total Greenhouse Gas Emissions - 2021 Summary Report*, PBL, Netherlands Environmental Assessment Agency, 2022.

**K. Schuenemann**, *Water vapor amplifies warming*, Youtube.com, Visto 8 luglio 2023.

**Wikipedia**, *Greenhouse gas*, Visto 28 giugno 2023.

**Wikipedia**, *Earth's energy budget*, Visto 1 luglio 2023.