

Il ruolo della CO₂ e il contributo antropico

Il contributo antropico ai cambiamenti di concentrazione di anidride carbonica in atmosfera viene analizzato sulla base di recenti studi e indagini. L'andamento della concentrazione di CO₂ presenta una crescita di valore medio abbastanza lineare mentre le emissioni antropiche sono significativamente aumentate. Le proposte di drastica riduzione delle fonti fossili per la produzione di energia devono fare i conti con i fabbisogni energetici dei paesi in via di sviluppo.

**** Adalberto Porrino (è stato ricercatore presso Enel Ricerca e CESI s.p.a.)**

Per la prima volta, nella storia del Pianeta, ai cambiamenti di concentrazione della CO₂ in atmosfera indotti dai fenomeni naturali, si sovrappone il contributo antropico causato dalla attività dell'uomo, che fa grande uso dei combustibili fossili con conseguenti emissioni di CO₂, che è un gas serra.

Nella parte alta della figura sono indicativamente rappresentati i flussi di energia emessi dal Sole, effettivamente incidenti sulla superficie terrestre (in giallo), e quelli emessi dalla superficie terrestre e uscenti oltre l'atmosfera (in rosso). La radiazione solare incidente sulla Terra, che si situa prevalentemente nello spettro di frequenze del visibile, riscalda la superficie terrestre che in risposta emette verso lo spazio nel campo dell'infrarosso.

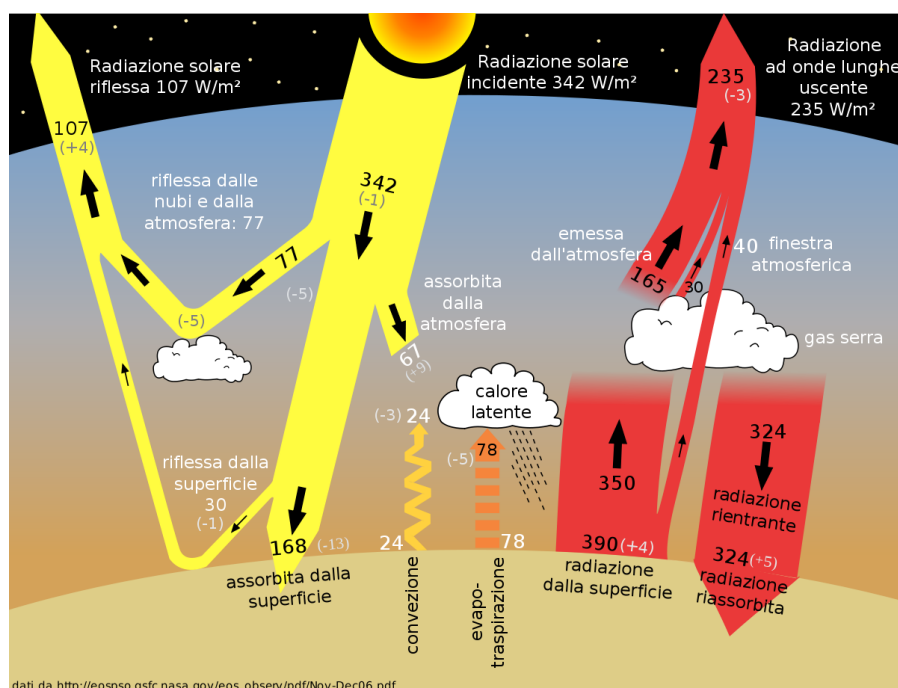


Figura 1, Bilancio energetico della Terra

Nella figura 2, parte bassa, sono rappresentati i fattori di assorbimento dei gas presenti nell'atmosfera. In particolare, si vede che l'acqua, nel campo degli infrarossi, è di gran lunga il più importante assorbitore, mentre la CO₂ assorbe la radiazione infrarossa in una banda abbastanza ristretta tra 13 e 17 µm dove è già significativamente attivo anche il vapore d'acqua. L'assorbimento da parte dell'atmosfera della radiazione infrarossa e la riemissione da essa in tutte le direzioni anche verso la superficie terrestre comporta il riscaldamento della superficie terrestre e dell'atmosfera stessa. Questo è l'effetto serra. Da quando il problema del clima globale è diventato molto studiato e dibattuto, diversi climatologi si sono impegnati per riuscire a capire come la CO₂ intervenga nel controllare la Tgm. Il problema è indubitabilmente molto complesso a causa di interazioni trasversali tra i diversi gas serra e di altri fattori coinvolti (vedi i rapporti *The Physical Science Basis in IPCC AR2007* e *IPCC AR2013*).

Per rappresentare e comparare i diversi fattori che contribuiscono all'effetto serra (CO₂, CH₄, altri gas, aerosol etc.) con altri fenomeni che condizionano la temperatura del globo terrestre si introduce per ognuno di essi la cosiddetta "Forzante Radiativa" (d'ora in poi indicata con F) che viene espressa come un incremento di potenza (di solito espresso in W/m²) che arriva sulla superficie terrestre.

In conseguenza delle leggi fisiche che presiedono all'effetto serra, la F della CO₂ diminuisce all'aumentare della sua concentrazione C in atmosfera e l'IPCC propone il seguente legame logaritmico tra F e la concentrazione di CO₂ in atmosfera.

$$\Delta F \text{ (W/m}^2\text{)} = 5,35 \ln(C/C_0)$$

C₀ viene assunto pari a 280 ppm (*parti per milione*) nel caso si voglia valutare il contributo rispetto al periodo preindustriale e la formula viene ritenuta valida per C fino a circa 1000 ppm.

Il fattore forzante F varia fortemente alle basse concentrazioni, ma riduce sempre più il suo effetto man mano che la concentrazione aumenta. Altri modelli climatici utilizzano formule simili. Per esempio nel modello *MODTRAN* viene utilizzata la formula

$$\Delta F \text{ (W/m}^2\text{)} = 2,94 \log_2(C) + 233,6$$

Nella figura 3, si mostra il confronto delle forzanti radiative F calcolate con il modello IPCC (linea blu) e con il modello MODTRAN (linea arancione). A fondo scala la differenza è inferiore allo 1%. Il modello MODTRAN ai valori di concentrazione di CO₂ superiori a circa 200ppm mostra un aumento di F leggermente minore della formula proposta da IPCC.

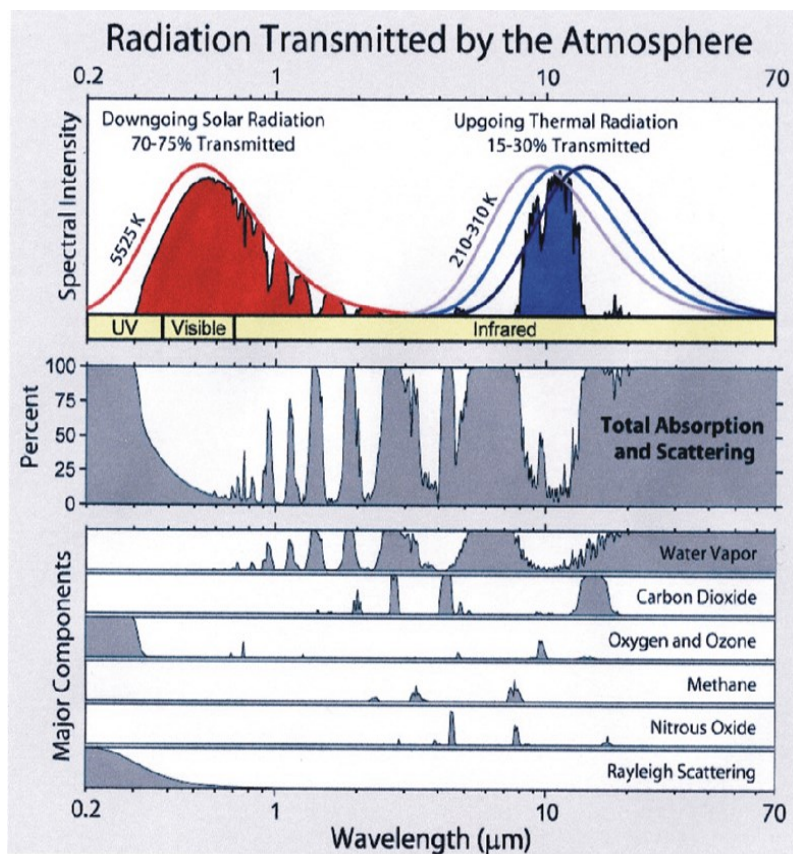


Figura 2. Radiazioni nell'atmosfera provenienti dal Sole e emesse dalla Terra, bande di assorbimento delle diverse sostanze. Il primo diagramma in alto è solo indicativo del posizionamento sullo spettro delle lunghezze d'onda della radiazione solare e di quella terrestre senza scale sulle ordinate per la forte differenza di intensità tra le due emissioni. Fonte "Climate4you"

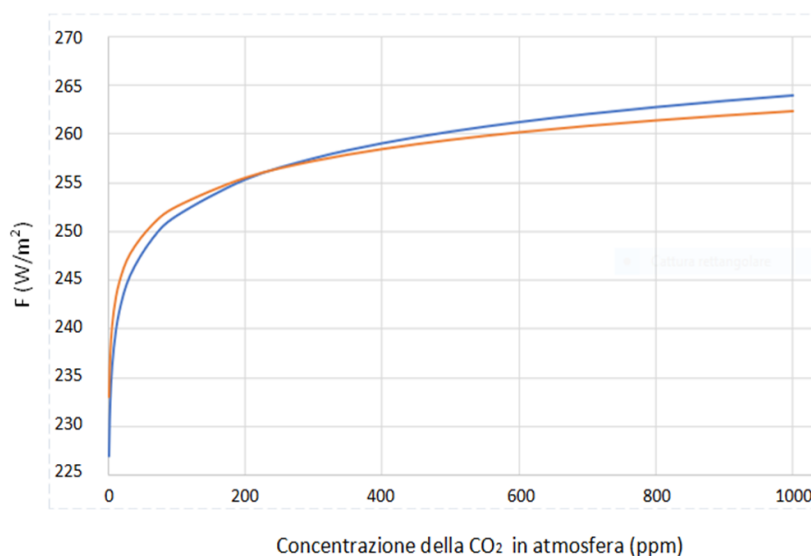


Figura 3: Andamento della forzante radiativa F (W/m²) in funzione della concentrazione di CO₂ (ppm) secondo la formula dell'IPCC (in blu) e quella utilizzata nel modello MODTRAN (in arancione).

Il legame tra F e T_{gm} (temperatura globale media del pianeta) derivato dalla relazione di Stefan Boltzmann, supponendo che la superficie terrestre si comporti come un corpo nero, è

$$\Delta T_{gm} (K) = 0,3 \Delta F (W/m^2) \quad (\text{vedi IPCC AR2007, pagina 133})$$

da cui, secondo la formula proposta da IPCC si ricava

$$\Delta T_{gm} (K) = 1,6 \ln(C/C_0)$$

L'andamento di ΔF e ΔT_{gm} in funzione di C (con $C_0 = 270$ ppm) è rappresentato nella figura 4.

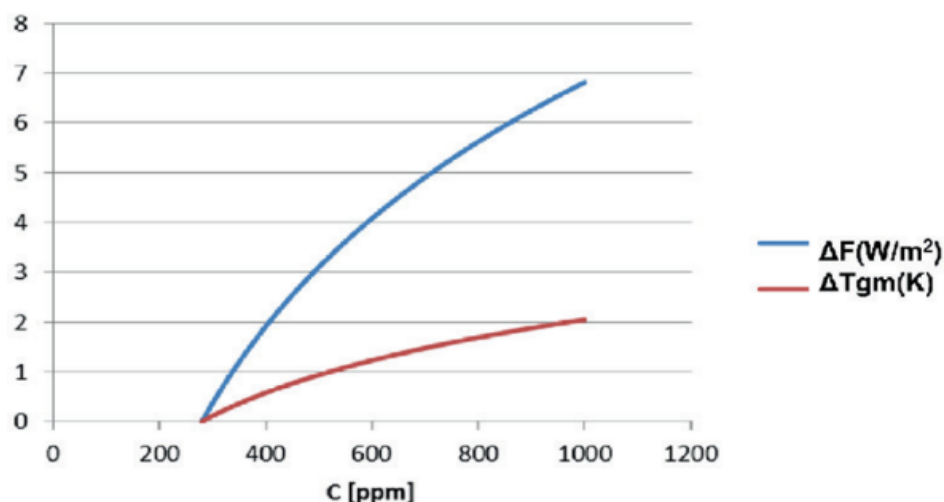


Figura 4. Andamento di ΔF e ΔT_{gm} in funzione di C secondo IPCC AR2007

Per rendere più facile la comprensione della correlazione tra di ΔF e ΔT_{gm} rappresentata in figura 4, se ne può dare una diversa rappresentazione mettendo in ascissa la variazione della concentrazione di CO_2 in atmosfera e in ordinata la variazione di T_{gm} per ogni 20 ppm di variazione della CO_2 , come nella figura 5.

Data per buona questa correlazione risulterebbe che dal periodo preindustriale a ora, in cui la concentrazione di CO_2 è passata da circa 270 a 400 ppm, si avrebbe $\Delta T_{gm} \approx 0,5^\circ C$. Analogamente prevedendo un raddoppio della concentrazione di CO_2 dal valore attuale di 400ppm a 800ppm, si ricaverebbe $\Delta T \approx 1,1^\circ C$.

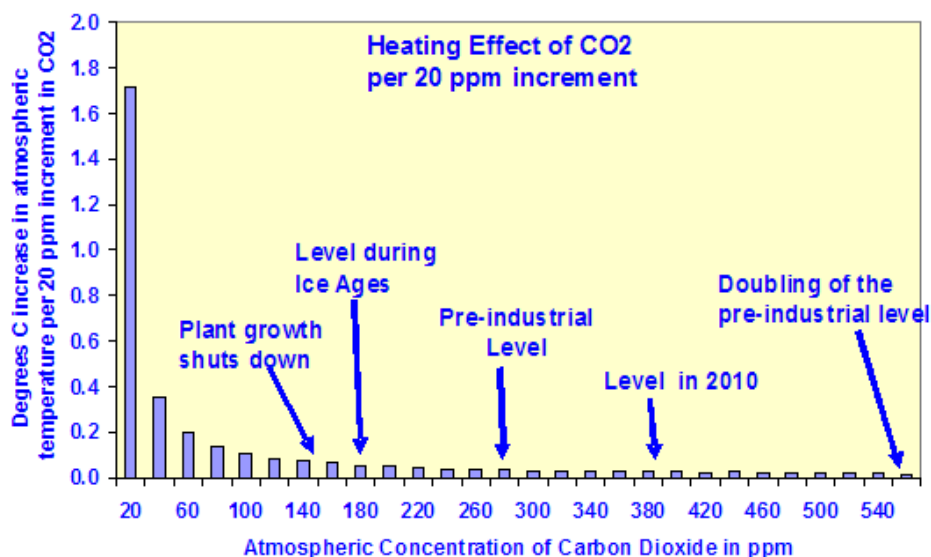


Figura 5. Andamento dell'aumento di T_{gm} per ogni 20 ppm di aumento della concentrazione di CO_2 riportata in ascissa.

Diversi componenti dell'atmosfera terrestre contribuiscono all'effetto serra. I più influenti dal punto di vista climatico sono quelli "natural", il vapore d'acqua e le nubi, seguono, come illustrato in figura 6, altri contributi e il principale di questi è la CO_2 che è in parte di origine antropica dovuta all'uso dei combustibili fossili.

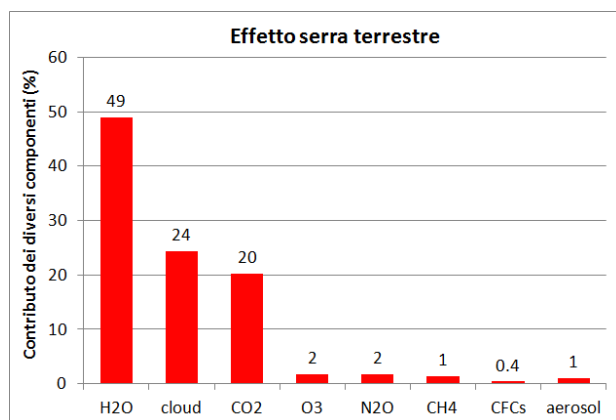


Figura 6. Contributo dei diversi componenti atmosferici all'effetto serra sulla Terra
Da: Andrew A. Lacis, Gavin A. Schmidt, David Rind, Reto A. Ruedy SCIENCE, 15 October 2010 vol. 330 Atmospheric CO_2 : Principal Control Knob Governing Earth's Temperature).

Le variazioni della concentrazione della CO_2 sul nostro pianeta

La concentrazione della CO_2 nella atmosfera terrestre ha sempre avuto notevoli variazioni come conseguenza dei cicli climatici determinati dalle forzanti orbitali del nostro sistema solare e da altri fenomeni naturali di più breve periodo. Il conseguente riscaldamento o raffreddamento degli oceani determina il rilascio o l'assorbimento della CO_2 con un certo ritardo temporale. Nella figura 6, di fonte IPCC, viene indicato un ritardo di circa 800 anni dell'andamento della concentrazione di CO_2 in atmosfera rispetto a quello della Tgm, nei periodi glaciali e interglaciali.

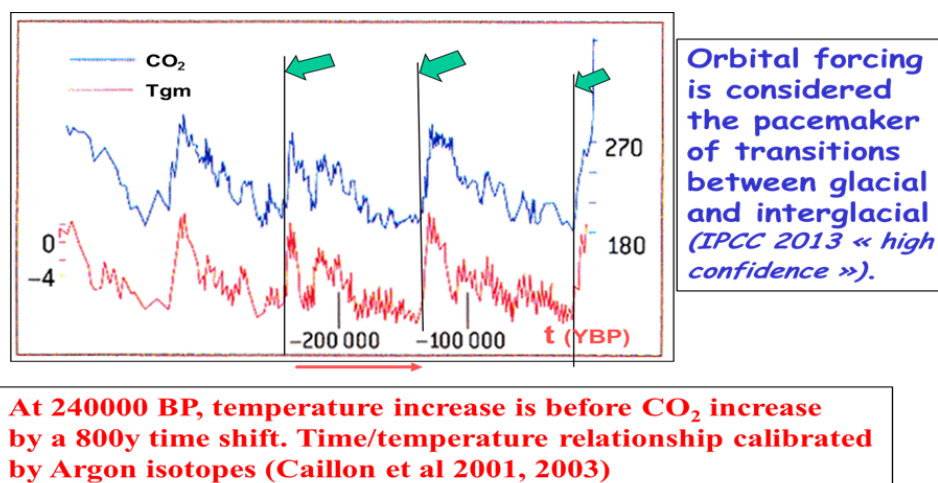


Figura 7. Andamenti di Tgm e concentrazione di CO_2 da 240000 anni fa

In scala a tempi ridotti, anche per gli altri fenomeni naturali che influenzano il clima (variazioni della irradianza solare, il vulcanismo, i cicli delle correnti marine tipo ENSO ecc. (vedi parte 1 di questo Articolo) la Tgm anticipa la variazione della concentrazione di CO_2 .

La ricostruzione, riportata in figura 8, dell'andamento della Tgm e della concentrazione di CO₂ nell'olocene (il nostro periodo interglaciale iniziato circa 11000 anni fa) merita particolare attenzione.

L'ultima parte della curva rossa, che rappresenta l'andamento della concentrazione della CO₂, a partire dalla cosiddetta "piccola glaciazione" (XVII secolo), potrebbe dare una idea della significatività delle emissioni antropiche della CO₂ a partire dalla rivoluzione industriale, rispetto ai precedenti andamenti di origine "naturale". Bisogna però segnalare che ci sono diversi dubbi circa la "saldatura" tra gli andamenti di concentrazione di CO₂ tra i *proxi data* rilevati da carotaggi nelle zone polari e le misure dirette rilevate con particolare accuratezza dopo il 1958 in diversi osservatori posizionati opportunamente per non risentire di effetti locali. In particolare il valore assunto secondo IPCC per il periodo preindustriale è 270/290 ppm (G.S. Callendar 1958 (*tellus* v. 10)), ma è stato fortemente contestato da Jaworowski et al. e da Beck che

propongono valori di circa 330/335 ppm¹.

Per quanto riguarda invece l'andamento della concentrazione della CO₂ dall'inizio dell'olocene fino all'inizio della piccola glaciazione, si nota dalla stessa figura un aumento abbastanza regolare della concentrazione di CO₂, a partire da circa 7000 anni fa, per un totale di circa 20 ppm. Questo aumento, che è in larga parte concomitante con la decrescita della Tgm durante l'olocene, pare sorprendentemente in contraddizione con tutti gli andamenti precedenti, nei quali la concentrazione di CO₂ ha seguito temporalmente l'andamento della Tgm.

Nella letteratura scientifica si trova la documentazione dei diversi tentativi compiuti per cercare una spiegazione a questo andamento inusuale della concentrazione di CO₂. Particolarmente significativo è l'articolo di Wallace S. Broecker et al il cui titolo si può tradurre: "L'incremento della CO₂ atmosferica, visto dai fondali marini". Attraverso una campagna sperimentale di prelievi nei fondali marini, si è cercato di verificare se questo aumento anomalo della CO₂ nell'atmosfera potesse essere la "risposta all'accumulo di calcite (CaCO₃), e triossido di carbonio (CO₃) indotta nei mari dall'incremento della biomassa terrestre durante la prima parte dell'olocene". L'articolo conclude che la ricerca effettuata non consente di dare ragione dell'aumento "anomalo" della CO₂ negli ultimi 8000 anni.

L'approccio seguito è però interessante in quanto pone in rilievo che l'accumulo di carbonio che avviene nei mari sotto forma di calcite e triossido di carbonio, interagisce in modo significativo con la concentrazione della CO₂ atmosferica che si discioglie nei mari.

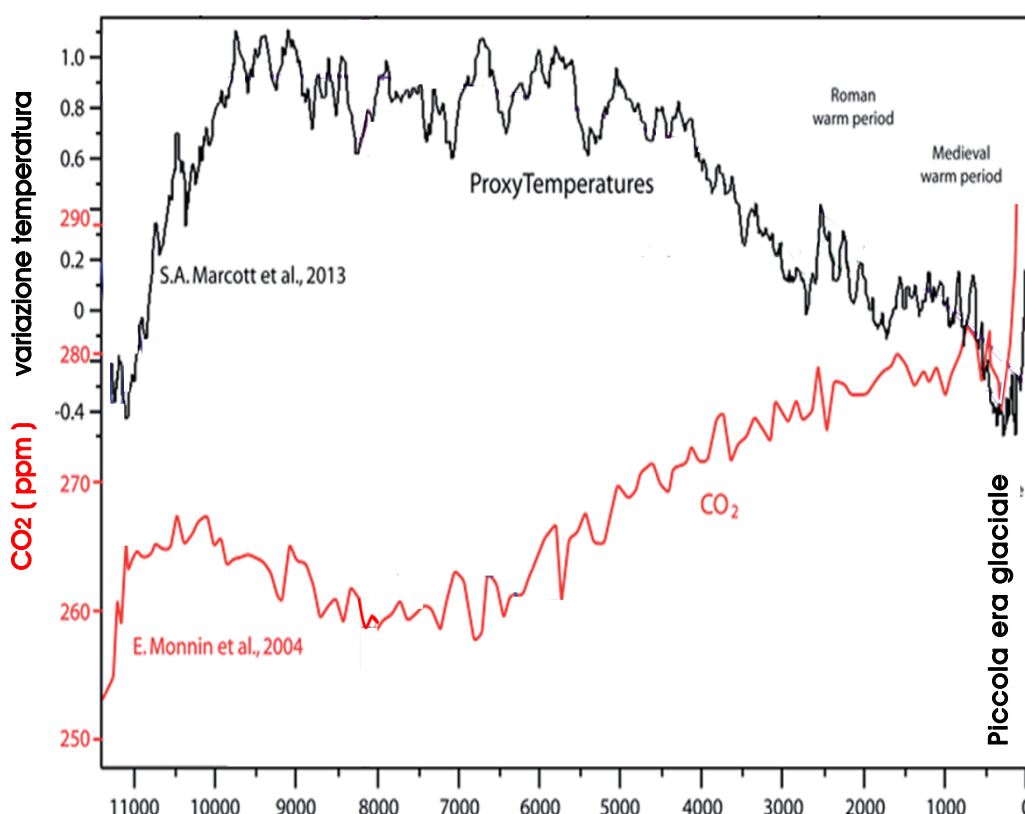


Figura 8. Linea nera. Andamento della Temperatura Globale media (Tgm) dell'olocene, ricostruita da Marcott et al.. Linea rossa, andamento della concentrazione di CO₂ in atmosfera ricostruita da Monnin et al.

¹Jaworowski et al 1994 «Ancient Atmosphere : Validity of Ice Records» *Environmental Science and Pollution Research*, e E. G. Beck "180 years accurate CO₂ -Gas Analysis of Air by Chemical Methods" .

Bilancio della CO₂ in atmosfera

Dalla figura 9 che riporta il bilancio* annuo della CO₂ in atmosfera secondo il rapporto *Global Carbon Budget* dell'IPCC (2011 e 2013) si rileva che il contributo antropico dovuto all'industrializzazione, 9,5 Gt di carbonio, costituisce oggi meno del 5% delle totali immissioni naturali della CO₂, dovuti alla degassazione degli oceani (40%) e alla decomposizione di tutti i componenti organici biologici (55%).

In sintesi, secondo il bilancio della figura 8 l'immissione annua netta di CO₂ in atmosfera corrisponde a circa 6,3 Gt (10⁹ tonnellate) di carbonio.

All'incirca 1 ppm di CO₂ in atmosfera corrisponde a 2,2 Gt di carbonio, quindi 6,3 Gt corrispondono a circa 2,9 ppm. L'aumento di contenuto di CO₂ in tutta l'atmosfera dal 1850 ad ora corrisponde a circa 220 Gt di carbonio, mentre la CO₂ totale immessa dall'uomo da tale data è stata stimata in circa 400 Gt di carbonio. Ne segue che, ammesso che tutto l'aumento derivi dalla immissione antropica, accordo con il rinverdimento di quasi tutto il pianeta come illustrato in figura 10.

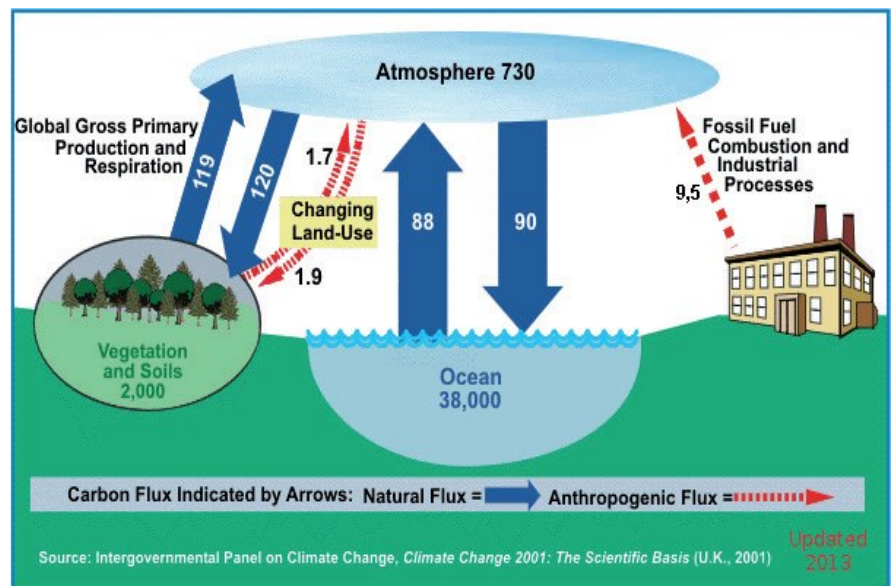
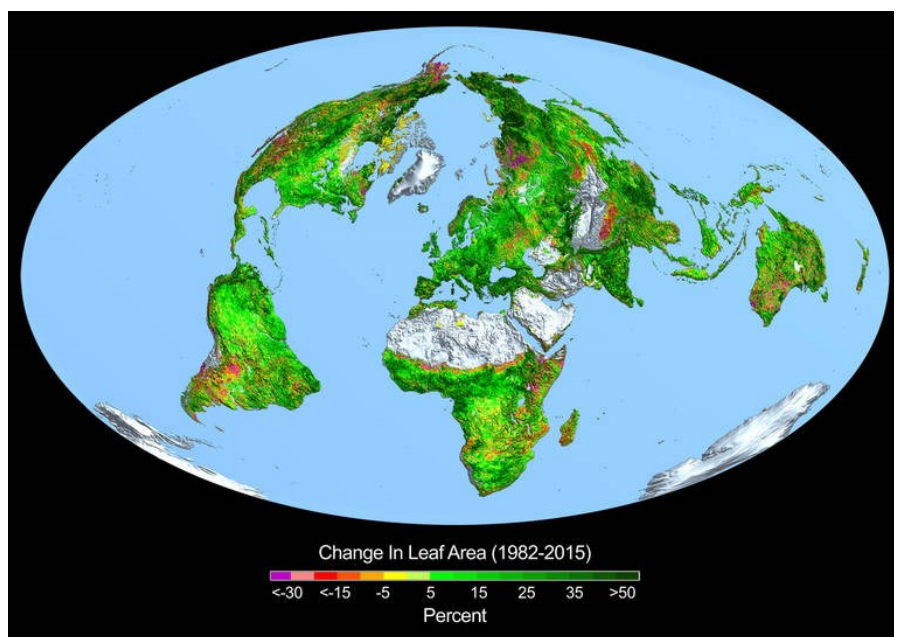


Figura 9. Bilancio annuo della CO₂ in atmosfera (Gt di carbonio) secondo IPCC
Fonte IPCC AR5 (Climate Change 2013- The Physical Science Basis SPM)

Figura 10. Rinverdimento percentuale del pianeta nel periodo 1982-2015

Credits: Boston University/R. Myneni



* In questo bilancio l'unico dato veramente attendibile è il valore delle emissioni antropiche. I dati di scambio con l'oceano e con la terraferma sono affetti da notevole incertezza, ma sono espressi da IPCC con numeri quali 119-120 e 88-90. Questa scrittura, secondo la logica matematica, implicherebbe che su tali grandezze si abbia una conoscenza a circa $\pm 1\%$ di precisione, ovvero ad esempio le 90 Gt che vanno dall'atmosfera negli oceani non sono né 91 né 89. Questo non è credibile, è impossibile che tali grandezze siano conosciute con quella precisione. Ne consegue che le differenze fra i flussi in uscita e in entrata sia per gli oceani sia per la terraferma, possono variare ampiamente fino a cambiare di segno. Quindi il bilancio della fig.8 è solo vagamente indicativo dell'ordine di grandezza dei vari contributi, ma da esso non si possono dedurre ulteriori informazioni. Risulterebbe secondo il bilancio della fig.8 che l'immissione annua netta di CO₂ in atmosfera corrisponde a circa 6,3 Gt (10⁹ tonnellate) di carbonio. L'unico controbutto conosciuto con una certa precisione è quello della CO₂ di origine antropica, pari a 9,5 Gt.

Il monitoraggio della concentrazione di CO₂ in atmosfera

La concentrazione della CO₂ in atmosfera viene rilevata in modo affidabile all'osservatorio di Mauna Loa una delle isole Hawaii solo dal 1958 e solo a partire dagli anni '70 in quattro stazioni di rilevamento altrettanto affidabili, due nell'emisfero Nord e due nell'emisfero Sud. L'andamento della concentrazione di CO₂ in atmosfera presenta una crescita di valore medio abbastanza lineare mentre le emissioni antropiche di CO₂ sono significativamente aumentate.

Il tasso di crescita annua media (rappresentato dalla curva nera in figura 11) è di circa 2 ppm all'anno.

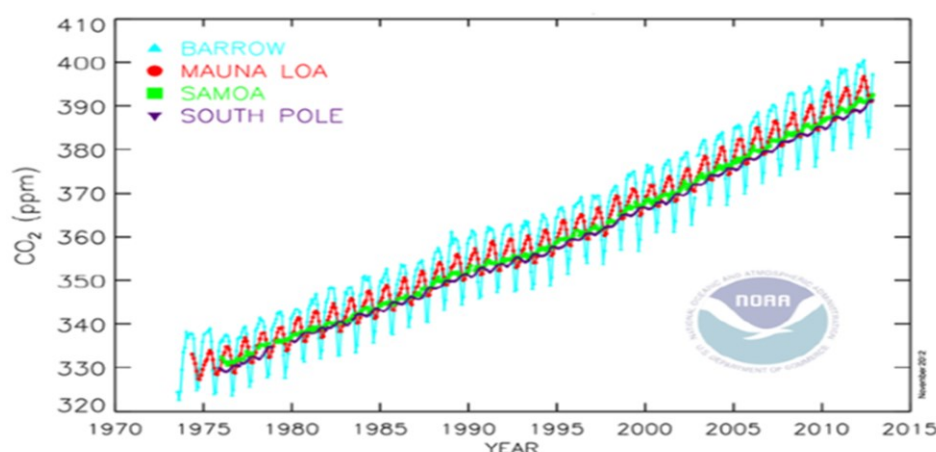


Figura 11. Andamenti della concentrazione di CO₂ dagli anni '70 in quattro stazioni di rilevamento, due nell'emisfero Nord e due nell'emisfero Sud <https://www.earth-syst-sci-data.net/11/1783/2019/essd-11-1783-2019.pdf>

Da questo diagramma risulta anche evidente che le concentrazioni di CO₂ in atmosfera variano in modo praticamente eguale, salvo piccoli sfasamenti stagionali, tra i due emisferi, mentre le emissioni antropiche sono concentrate al 90% nell'emisfero nord.

E' ben noto che la barriera equatoriale a livello dell'atmosfera è piuttosto impervia e solo i gas e il particolato leggero a vita abbastanza lunga riescono col tempo a passare tra i due emisferi. Questo è confermato dalle eruzioni vulcaniche che praticamente limitano i loro effetti nell'emisfero in cui c'è stata l'eruzione, ma è anche più rigorosamente provato dal fatto che esplosioni per test di bombe nucleari (atomiche nel gergo di allora) avvenute nei primi anni '60 nell'emisfero nord (Siberia) hanno causato un picco di concentrazione di CO₂ con C¹⁴, formatosi a seguito di reazioni nucleari, nell'emisfero nord che solo dopo quasi una decina d'anni è tornato al livello dell'emisfero sud (Figura 12).

La quasi eguaglianza di concentrazione di CO₂ tra i due emisferi, confermata anche dai dati della figura 12, non si accorda quindi con l'ipotesi che la variazione di tale concentrazione sia prevalentemente dovuta alle emissioni antropiche fortemente concentrate nell'emisfero nord. Secondo J. M. Kauffman* l'aumento di temperatura negli oceani con la conseguente degassazione potrebbe essere la causa principale dell'aumento della concentrazione di CO₂ in atmosfera.

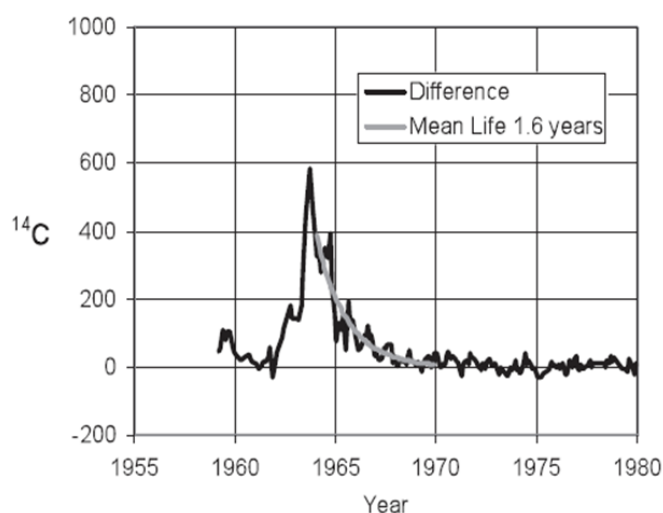


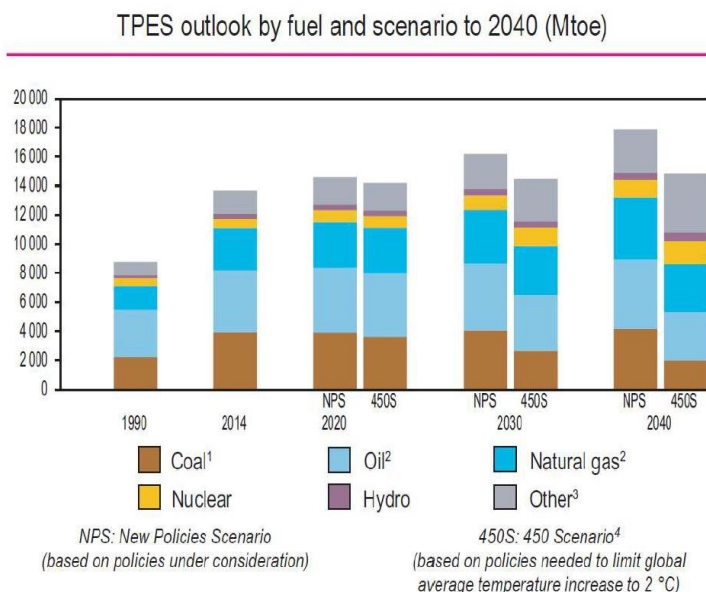
Figura 12. Differenza della concentrazione di CO₂ con C¹⁴ tra i due emisferi conseguente l'esplosione di bombe nucleari in Siberia (Fonte T. Quirk 2009 Energy & Environment)

* Joel M. Kauffman "Climate Change Reexamined" Journal of Scientific Exploration vol 21No 4 pp723-749 y2007

Mitigazione delle emissioni antropiche della CO₂

Dall'inizio della rivoluzione industriale l'umanità ha progressivamente goduto di una forte crescita dello sviluppo e del benessere, che è stata possibile solo grazie alla sicura disponibilità di energia a basso costo. Questa condizione è essenziale anche ora perché specialmente i popoli sottosviluppati possano progredire e si constata infatti un continuo aumento del loro fabbisogno energetico. L'IEA (*International Energy Agency*) prevede che per il 2040, anche nell'ipotesi di scenari orientati a limitare le emissioni di CO₂, il maggior contributo ai fabbisogni energetici, dell'ordine del 60%, verrà dai combustibili fossili, utilizzati in massima parte dai paesi in fase di forte sviluppo (figura 13).

Figura 13. Previsioni di fabbisogni energetici e della loro copertura con le diverse fonti fino al 2040 (Mtoe milioni di tonn. di olio equivalente). IEA 2017 "Key world energy statistics 2017"



Nella seguente figura 14 viene invece mostrato l'andamento, aggiornato al 2019, delle emissioni di CO₂ totali, per i principali paesi consumatori di fonti fossili, per tipologia di combustibile fossile e per consumi pro capite.

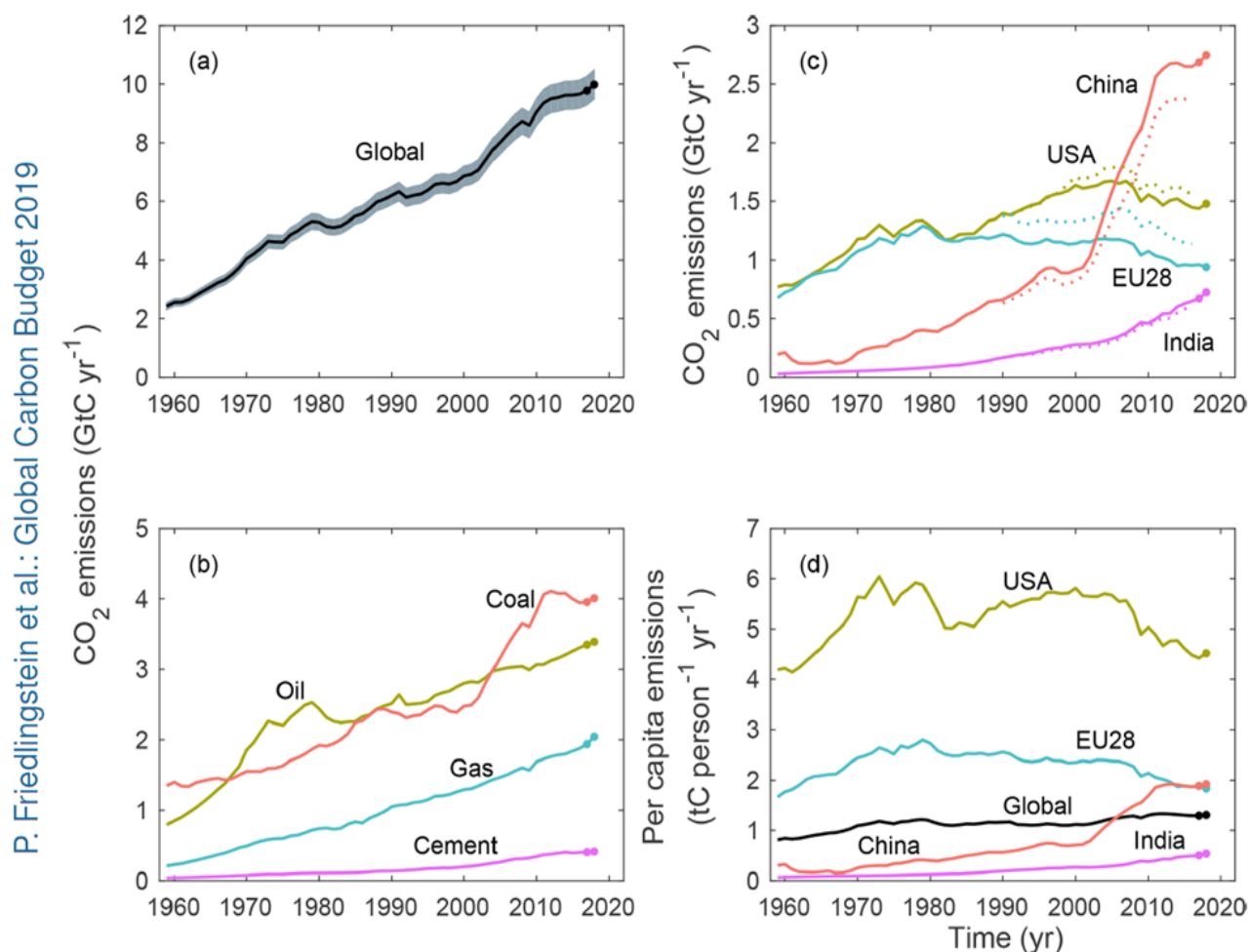


Figura 14. Andamento delle emissioni di CO₂ globali, per i paesi più emettitori e, in base al combustibile fossile. Ultimo diagramma emissioni pro capite nei paesi più emettitori <https://essd.copernicus.org/articles/11/1783/2019/essd-11-1783-2019.pdf>

Le emissioni totali di Stati Uniti e Europa sono in discesa. I paesi più popolosi e in fase di forte sviluppo, Cina e India con un certo ritardo, contribuiscono in modo molto significativo all'aumento delle emissioni CO₂. Le politiche di contenimento delle emissioni sono principalmente a carico di Europa e Stati Uniti.

Sulla base di questi grafici, si possono fare le seguenti osservazioni.

- L'andamento globale delle emissioni di CO₂ per uso di combustibili fossili mostra una crescita senza flessioni.
- I consumi di petrolio e gas naturale crescono linearmente dal 1980. Il carbone appare avere una stabilizzazione negli ultimi 10 anni
- Le emissioni totali di India e Cina sono in crescita, con livelli particolarmente elevati per la Cina. Stati Uniti e Europa (EU28) mostrano un decremento delle emissioni totali rispettivamente da 15 anni e 30 anni.
- I consumi pro capite degli Stati Uniti sono in decrescita da circa 15 anni. Quelli dell'Europa sono in leggera diminuzione da quasi 40 anni con un decremento maggiore negli 10 anni, segno di un certo effetto delle politiche di contenimento. Da circa 10 anni i consumi pro capite cinesi si sono stabilizzati. Le emissioni pro capite degli USA sono circa il doppio di quelle di EU28 le quali, da qualche anno, sono circa eguali a quelle della Cina.

Occorre tenere presente che, dal momento che l'India è partita in ritardo rispetto alla Cina nell'incremento dei consumi pro capite, molto probabilmente nei prossimi anni intensificherà in modo significativo l'uso di fonti fossili per consentire alla sua popolazione un maggior benessere come ha già fatto la Cina. Si tenga inoltre presente, a questo proposito, che l'India ha una popolazione (1,38 miliardi di persone) non tanto inferiore a quella della Cina (1,5 miliardi di persone). Ci si deve attendere che altrettanto facciano altri paesi sottosviluppati o agli inizi del loro auspicabile sviluppo. Come vedremo nel punto successivo, a tutti questi paesi non si richiederà di rinunciare allo sviluppo del loro benessere facendo ricorso alle fonti energetiche fossili.

Le politiche di contenimento delle emissioni antropiche di CO₂

Dopo il primo allarme, in concomitanza con la Conferenza a Rio de Janeiro nel 1992, supportato dal riscaldamento in atto in quegli anni, molti paesi hanno di principio aderito prima al Protocollo di Kyoto del 2005, poi ad altri accordi internazionali di contenimento delle emissioni antropiche di gas serra, in particolare della CO₂, ritenuta responsabile del cambiamento climatico in atto.

La tappa importante più recente di questo processo è l'accordo di Parigi del 2015. In base a questo, i paesi sviluppati sono e saranno chiamati a contenere le loro emissioni di CO₂ con un grave impegno economico, mentre quelli in fase di sviluppo o sottosviluppati non sono, per il momento, chiamati a fare altrettanto. Tale accordo è stato magnificato come un traguardo importante e storico che cambierà il mondo. La realtà è diversa: l'accordo, un sofisticato esercizio diplomatico e burocratico, è stato condizionato dagli USA con l'obiettivo prioritario che non contenesse obiettivi vincolanti di riduzione delle emissioni e di compensi economici, perché ciò avrebbe esposto l'Amministrazione Obama alla verifica del Congresso con la maggioranza a 2/3. Anche l'UE voleva un accordo più vincolante, ma per non mettere in difficoltà gli USA, oborto collo, ha dovuto appoggiare la richiesta dell'Amministrazione americana.

Nell'accordo è stato formalizzato un vincolo sull'aumento di Tgm a fine secolo rispetto al 1850, inferiore a 2°C, o al meglio inferiore a 1,5°C (ora siamo a circa +1°C). E' da sottolineare che questo vincolo è sulla Tgm e non sulle emissioni di CO₂, quindi dovrebbe coinvolgere tutta l'umanità. Questo è un vincolo fittizio, privo di ogni base scientifica, e non alla portata dell'uomo.

Va comunque detto che un vincolo sulla Temperatura globale media, Tgm, anziché sulle emissioni di CO₂, potrebbe, alla fine, essere naturalmente conseguito. Infatti, a questo proposito, si rileva che già ora si è in presenza di un ciclo solare debole e in concomitanza con il fenomeno de La Niña che potrebbero preludere a una diminuzione della Tgm, inoltre nella *prima parte* di questo articolo si riporta che il nostro periodo interglaciale potrebbe essere alla vigilia di una nuova era glaciale, per la concomitanza di alcuni fattori orbitali correlati significativamente con gli incipit delle precedenti glaciazioni.

Ernesto Pedrocchi (*Professore emerito di Energetica al Politecnico di Milano*)

Adalberto Porrino (*è stato ricercatore presso Enel Ricerca e CESI s.p.a.*)

Bibliografia

Ernesto Pedrocchi: "IL CLIMA GLOBALE CAMBIA. QUANTA COLPA HA L'UOMO?" Società Editrice ESCULAPIO.

Joel M. Kauffman "Climate Change Reexamined" Journal of Scientific Exploration vol 2, 1N° 4, pp723-749 y2007