

IL BILANCIO “SBILANCIATO” DELL’ ENERGIA SULLA TERRA

Gianni Comini

CISM - Dipartimento di Energia e Ambiente

Piazza Garibaldi 18 - 33100 Udine

gianni.comini@cism.it

3 marzo 2024

1 Bilancio energetico della Terra

Nel bilancio energetico della Terra, riportato nella Figura 1, i valori dei flussi, si riferiscono alle medie decennali nel periodo 2000-2009. La radiazione solare sia entrante sia riflessa e la radiazione infrarossa uscente ai limiti dell’atmosfera sono state valutate nell’ambito delle misure satellitari effettuate dalla NASA nel corso del Programma CERES - Clouds and Earth Radiant Energy System. Invece, in corrispondenza alla superficie della Terra, le radiazioni infrarosse entranti ed uscenti, ed i trasporti convettivi di calore sensibile (associati alla risalita di masse d’aria riscaldata) e di calore latente (associati alla evapotraspirazione, cioè alla evaporazione dagli specchi d’acqua e dal suolo nudo, ed alla traspirazione dalle piante) sono stati valutati utilizzando sensori locali e tecniche simili a quelle descritte al Paragrafo 2.

(Come si può notare, nella Figura 1 i flussi sono espressi in watt per metro quadrato [W/m^2] e, avendo una sola cifra dopo la virgola, sono “significativi” al decimo di watt per metro quadrato).

Nel post “Gas Serra e Cambiamento Climatico” il bilancio di cui alla Figura 1 era stato utilizzato per illustrare come la “radiazione di ritorno” ($340,3 \text{ W}/\text{m}^2$), dovuta alla presenza dei gas serra nell’atmosfera, fosse responsabile della sproporzione tra il flusso totale emesso dalla superficie terrestre ($398,2 \text{ W}/\text{m}^2$) e la frazione di flusso emesso ($40,1 \text{ W}/\text{m}^2$) che, senza essere mai intercettata, riesce a uscire verso lo spazio attraverso la così detta “finestra atmosferica”.

La radiazione di ritorno può essere spiegata pensando all’atmosfera come ad una serie di strati omogenei sovrapposti che, a causa della presenza dei gas serra, sono in grado di assorbire le radiazioni, per poi riemetterle in tutte le direzioni nell’infrarosso. Di conseguenza, 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 riemette flusso radiante in tutte le direzioni compresa, evidentemente, quella verso il basso. Quindi, il flusso radiante emesso

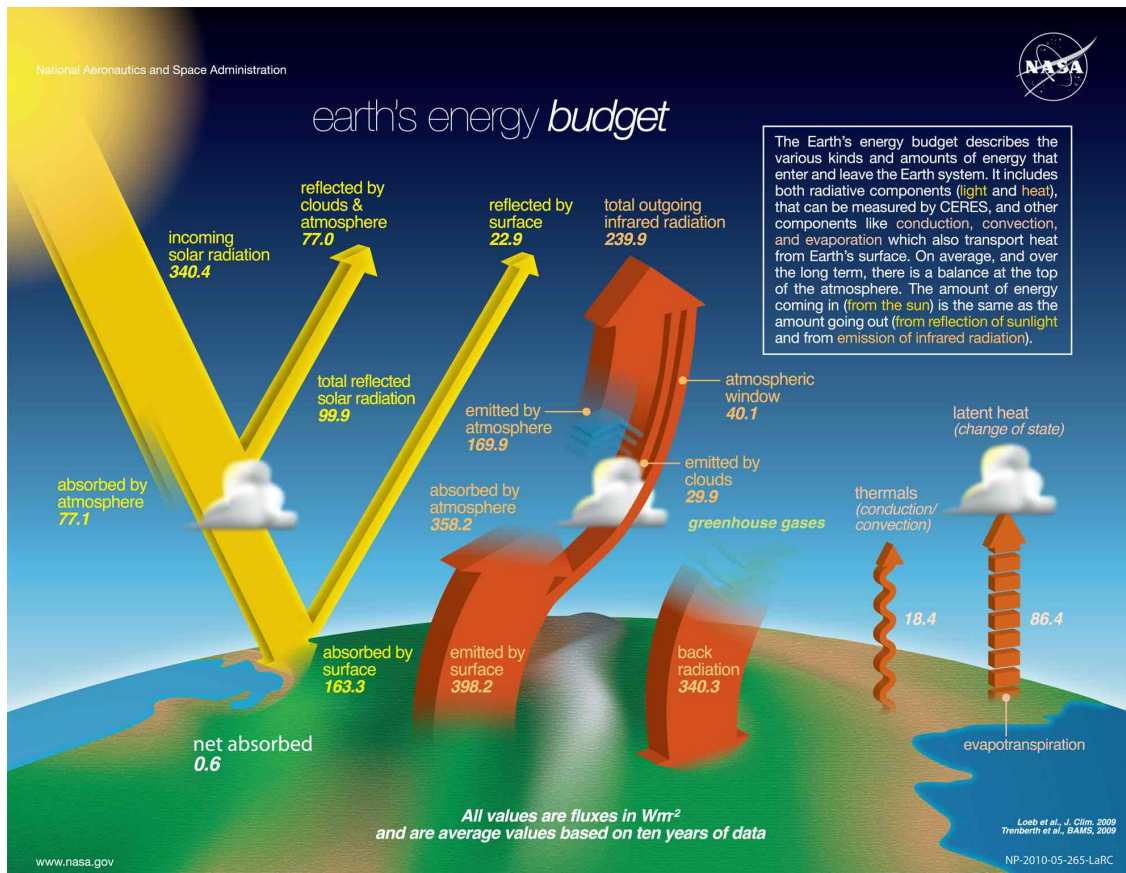


Figura 1: Bilancio energetico della Terra con evidenziati i flussi di energia radiativi (ai limiti dell'atmosfera, al suolo ed all'interno dell'atmosfera) ed i trasporti di calore sensibile e latente dal suolo all'atmosfera [NASA].

dalla superficie terrestre che non passa attraverso la finestra atmosferica, subisce una serie di assorbimenti e riemissioni prima di poter uscire verso lo spazio e, in questo modo, viene reindirizzato in buona parte verso il basso.

Il risultato finale è, la 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.

(Peraltro, in assenza di gas serra la vita sulla Terra non sarebbe stata possibile in quanto la temperatura media terrestre sarebbe stata pari a circa -18°C. 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.)

Nel presente studio ci si occupa, essenzialmente, del flusso netto assorbito dal Sistema Climatico Terrestre, ovvero dello “sbilanciamento” tra la radiazione solare entrante e la radiazione infrarossa uscente dal sistema al limite dell'atmosfera (TOA - Top of the Atmosphere). Dalla Figura 1 si può desumere che tale sbilanciamento era pari a $0,6 \pm 0,1$

W/m² nel decennio 2000 - 2009. Da allora, i flussi di energia hanno subito variazioni, sia pure non molto rilevanti, ma i valori numerici della Figura 1 restano storicamente validi e, di conseguenza, possono essere ancora utilizzati per spiegare le metodologie impiegate nella redazione dei bilanci energetici della Terra.

1.1 Capire il bilancio

Per capire il bilancio energetico generale della Terra conviene considerare separatamente quel che succede al limite dell'atmosfera (TOA - Top of the Atmosphere), in corrispondenza alla superficie terrestre e dentro l'atmosfera intesa come massa d'aria che sta nel mezzo. In armonia con questa esigenza, nella letteratura si usa istituire tre bilanci parziali che, per quanto già osservato, in questo studio sono "significativi" al decimo di watt per metro quadrato.

1.1.1 Limite dell'atmosfera

Come si è detto, il bilancio al limite dell'atmosfera confronta la radiazione solare che entra nel Sistema Climatico della Terra con la radiazione infrarossa che esce dal sistema stesso. Nella parte a sinistra della Figura 1 si vede che:

- la radiazione solare in arrivo è pari a 340,4 W/m²;
- la radiazione riflessa da nubi, particelle e gas atmosferici è pari a 77,0 W/m² e
- la radiazione riflessa dalla superficie terrestre è pari a 22,9 W/m².

Di conseguenza ($77,0 + 22,9 =$) 99,9 W/m², pari al 30% circa dell'energia solare in arrivo, sono riflessi verso lo spazio e non giocano più alcun ruolo nel sistema climatico. I restanti ($340,4 - 99,9 =$) 240,5 W/m², pari al 70% circa dell'energia solare in arrivo, entrano nel sistema climatico sotto forma di:

- radiazione assorbita da gas e particelle presenti nell'atmosfera, pari a 77,1 W/m² e
- radiazione assorbita dalla superficie terrestre, pari a 163,3 W/m².

Nella parte a destra della Figura 1 si vede che vanno verso lo spazio:

- la radiazione emessa da gas e particelle presenti nell'atmosfera, pari a 169,9 W/m²;
- la radiazione emessa dalle nubi, pari a 29,9 W/m² e
- la radiazione, pari a 40,1 W/m², emessa dalla superficie terrestre nella "finestra" atmosferica (ovvero la radiazione terrestre che va verso lo spazio senza subire alcun assorbimento da parte di nubi, particelle o gas atmosferici).

Il totale delle radiazioni infrarosse in uscita dal Sistema Climatico Terrestre è quindi pari a ($169,9 + 29,9 + 40,1 =$) 239,9 W/m² ed è inferiore al totale della radiazione solare entrante nel sistema stesso (pari a 240,5 W/m²). Il risultato si accorda con le ricerche più recenti secondo le quali una frazione del flusso solare in arrivo, qui stimata in (240,5 -

239,9 \Rightarrow 0,6 W/m², viene accumulata dal pianeta Terra sotto forma di energia interna. Tale accumulo, ripartito tra oceano (soprattutto), terreno, atmosfera e criosfera (ovvero insieme dei ghiacci), è responsabile, degli aumenti di temperatura media che si riscontrano nell'oceano e in prossimità della superficie terrestre (suolo e atmosfera), oltre che della progressiva fusione dei ghiacci.

1.1.2 Superficie terrestre

Come si vede nella parte in basso della Figura 1, dalla superficie terrestre partono:

- la radiazione emessa nell'infrarosso dalla superficie stessa, pari a 398,2 W/m²;
- il flusso convettivo sensibile (cioè misurabile sotto forma di aumento di temperatura) pari a 18,4 W/m², associato alla risalita di masse d'aria riscaldata dalla superficie;
- il flusso convettivo latente (ovvero "nascosto" perché non misurabile sotto forma di aumento di temperatura) pari a 86,4 W/m², associato alla evapotraspirazione dalla superficie terrestre.

In totale, quindi, lasciano la superficie terrestre (398,2 + 18,4 + 86,4 \Rightarrow) 503,0 W/m².

Ancora dalla Figura 1 nel suo complesso si vede che arrivano alla superficie terrestre

- la già menzionata radiazione solare assorbita, pari a 163,3 W/m²;
- la radiazione di ritorno, pari a 340,3 W/m².

In totale, quindi, arrivano alla superficie terrestre (163,3 + 340,3 \Rightarrow) 503,6 W/m². La differenza tra arrivi e partenze è pari a (503,6 - 503,0 \Rightarrow) 0,6 W/m² e, come si è detto, viene accumulata dal pianeta Terra sotto forma di energia interna.

1.1.3 Atmosfera

Dalla Figura 1, si vede che arrivano all'atmosfera:

- la già menzionata radiazione solare assorbita, pari a 77,1 W/m²;
- la parte di radiazione emessa dalla superficie terrestre che viene assorbita dall'atmosfera, pari a 358,2 W/m²;
- i flussi convettivi latente, pari a 86,4 W/m², e sensibile, pari a 18,4 W/m², provenienti dalla superficie terrestre.

In totale, quindi, arrivano all'atmosfera (77,1 + 358,2 + 86,4 + 18,4 \Rightarrow) 540,1 W/m².

Ancora dalla Figura 1 si vede che dall'atmosfera escono:

- la già menzionata radiazione di ritorno verso la superficie terrestre, pari a 340,3 W/m²;
- le radiazioni infrarosse emesse dall'atmosfera, pari a 169,9 W/m²;

- le radiazioni infrarosse emesse dalle nubi, pari a $29,9 \text{ W/m}^2$;

In totale, quindi, escono dall'atmosfera ($340,3 + 169,9 + 29,9 =$) $540,1 \text{ W/m}^2$ che bilanciano gli arrivi (sia pure entro il decimo di watt per metro quadrato).

1.2 Accuratezza dei bilanci parziali

Non tutti i valori dei flussi riportati nella Figura 1 sono ugualmente accurati e, attualmente (2023), il bilancio ai limiti dell'atmosfera (TOA) è il più affidabile dei bilanci parziali. Infatti, le misure satellitari basate su tecniche ottiche (CERES) vengono utilizzate come “standard” per stimare lo sbilanciamento tra flussi entranti e uscenti dal Sistema Climatico Terrestre.

Il bilancio relativo alla superficie terrestre è meno accurato di quello ai limiti dell'atmosfera, ma ha il vantaggio di basarsi su sempre più numerosi e sofisticati sensori locali e, di conseguenza, è destinato ad acquistare in accuratezza. (Peraltro, come ben documentato nel Sottoparagrafo 1.1.2, già ora la sua accuratezza è sufficiente a garantire un confronto soddisfacente tra gli sbilanciamenti valutati ai limiti dell'atmosfera e in superficie).

Ai fini di questo studio, invece, il bilancio relativo all'atmosfera è il meno “utilizzabile” dei bilanci parziali per la semplice ragione che lo sbilanciamento tra flussi entranti ed uscenti è molto piccolo, dell'ordine dei centesimi di watt per metro quadrato. Infatti, come si è visto nel Sottoparagrafo 1.1.3, tale sbilanciamento non viene rilevato facendo la differenza tra i flussi entranti ed uscenti dall'atmosfera che sono significativi solo al decimo di watt per metro quadrato.

2 Lo sbilanciamento

Come si è osservato più volte, la differenza positiva tra flussi energetici entranti e uscenti al limite dell'atmosfera si traduce in una fornitura continua di energia alla Terra, che il Sistema Climatico Terrestre ripartisce tra oceano, suolo, atmosfera e criosfera. In questo modo, lo sbilanciamento tra i flussi energetici entranti e uscenti al limite dell'atmosfera diventa il motore del riscaldamento globale. La ripartizione dello sbilanciamento, invece, controlla gli aumenti di temperatura che si riscontrano nell'oceano, in prossimità della superficie terrestre e nell'atmosfera, oltre a regolare la fornitura di calore alla criosfera e, quindi, la progressiva fusione dei ghiacci.

Nel Paragrafo 1.1.1, lo sbilanciamento “assoluto” del Sistema Climatico Terrestre è stato valutato come differenza tra flusso solare entrante e flusso infrarosso uscente ai limiti dell'atmosfera. Tuttavia lo sbilanciamento assoluto può anche essere valutato sommando direttamente gli sbilanciamenti parziali, ovvero gli incrementi annuali di energia interna dell'oceano, del suolo, dell'atmosfera e della criosfera.

In realtà, negli ultimi anni, la valutazione diretta degli incrementi ha già raggiunto un grado di accuratezza confrontabile con quello del bilancio ai limiti dell'atmosfera. Infatti, l'accordo tra i risultati delle misure satellitari di radiazione e quelli locali degli incrementi di energia interna è già sufficiente a confermare la correttezza di entrambe le procedure di valutazione (poiché è molto improbabile che due procedure sbagliate conducano agli stessi risultati).

Inoltre, come si è già osservato, le valutazioni dirette degli incrementi annuali dell'energia interna di oceano, suolo, criosfera e atmosfera sono destinate a diventare sempre più accurate in un futuro non lontano, grazie all'impiego di sempre più numerosi e sofisticati sensori locali.

In più, vi sono ben note ragioni metrologiche che, soprattutto nel caso di differenze piccole, consigliano il ricorso alle valutazioni dirette piuttosto che alle valutazioni per differenza. Si pensi, ad esempio, alla stima di una "tara" con procedura diretta oppure come differenza tra "peso lordo" e "peso netto" in grammi, utilizzando una bilancia accurata all'1%. Se con una misura per differenza si ottenesse:

$$1100 \pm 11 - 1000 \pm 10 = 100 \pm 21 \text{ g}$$

si avrebbe un risultato accurato al 21%. Se invece si valutasse direttamente la tara si otterrebbe: $100 \pm 1 \text{ g}$, ovvero un risultato accurato all'1%.

Nel quadro di questo studio, un ultimo vantaggio è che le valutazioni dirette degli incrementi forniscono già la ripartizione dell'aumento totale di energia di energia tra gli accumuli parziali dell'oceano, del suolo, dell'atmosfera e della criosfera.

2.1 Accumulo globale e ripartizione degli aumenti di energia

Come si è già osservato, l'accumulo di energia nel Sistema Climatico Terrestre è legato strettamente al riscaldamento planetario al punto che, secondo molti ricercatori, andrebbe utilizzato come riferimento nella valutazione del cambiamento climatico al posto del più tradizionale aumento della temperatura media globale.

Il vantaggio principale, sottolineato dall'IPCC nel recente rapporto "Climate Change 2021 - The Physical Science Basis", è quello di consentire una più facile identificazione delle tendenze pluriennali. Infatti, il semplice confronto tra i due parametri riportato nella Figura 2, dimostra che le oscillazioni casuali della temperatura media globale (in alto) hanno ampiezza molto maggiore delle oscillazioni omologhe dell'energia interna accumulata (in basso).

(Nel confronto, i gradi Celsius, utilizzati nella nella figura in alto, sono un'unità di misura familiare, ma altrettanto non si può dire degli zettajoule [ZJ], utilizzati nella figura in basso. Per i non specialisti, è allora opportuno dire che il prefisso Z sta per 10^{21} e, ad esempio, $1 \text{ ZJ/anno} = 10^{21} \text{ J/anno} = 277.778 \text{ TWh/anno}$, ovvero 1 zettajoule all'anno corrisponde a oltre 1,5 volte il consumo mondiale annuale di energia primaria, che è pari a circa 179.000 TWh/anno.)

Nella recentissima (2023) analisi "ufficiale" del bilancio energetico terrestre: "Il calore accumulato nel sistema climatico dal 1960 al 2020: dove va l'energia?", apparso nella rivista "Earth Systems Science Data" edita dalla "Copernicus Publications", un gruppo multidisciplinare di ricercatori provenienti da oltre 60 istituti scientifici internazionali ha tratto una serie di importantissime indicazioni riassunte nel seguito.

La prima e più importante, implicita nella Figura 2, è che fino ai primi anni '70 del secolo scorso, il clima è stato sostanzialmente stabile. La temperatura media globale non è aumentata in maniera significativa e lo sbilanciamento tra radiazione solare entrante e radiazione infrarossa uscente è stato prossimo a zero. Di conseguenza, nei primi 10

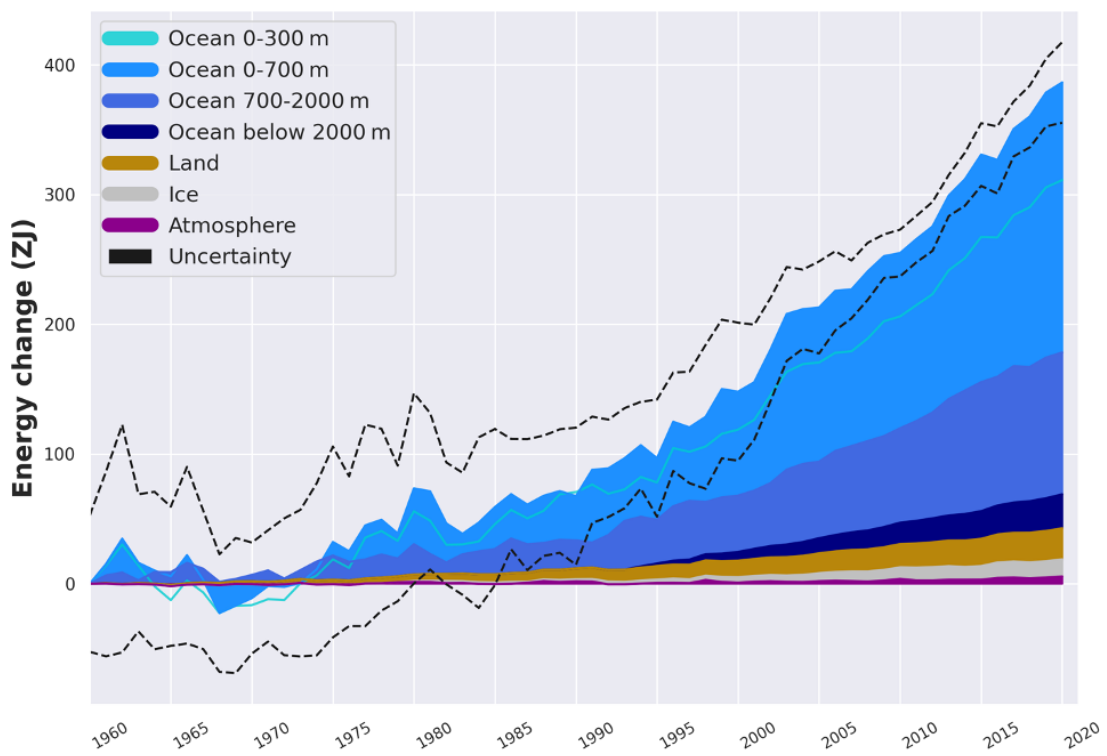
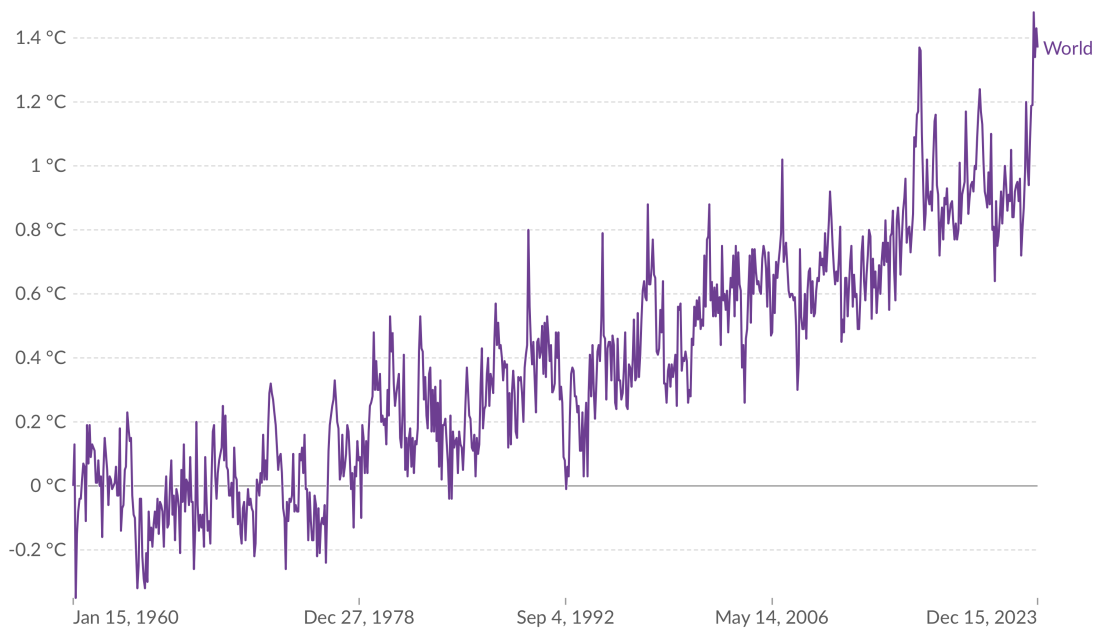


Figura 2: Confronto tra gli andamenti temporali nel periodo 1960 - 2020 dell'anomalia della temperatura media globale in alto [NASA - GISS], e dell'energia accumulata complessivamente dal Sistema Climatico Terrestre in basso, suddivisa nei componenti oceano superiore (0-300 m) e (0-700 m), oceano medio (700-2000 m) e oceano Profondo (maggiore di 2000 m), Suolo, Criofera ed Atmosfera [German Climate Computation Centre - DKRZ].

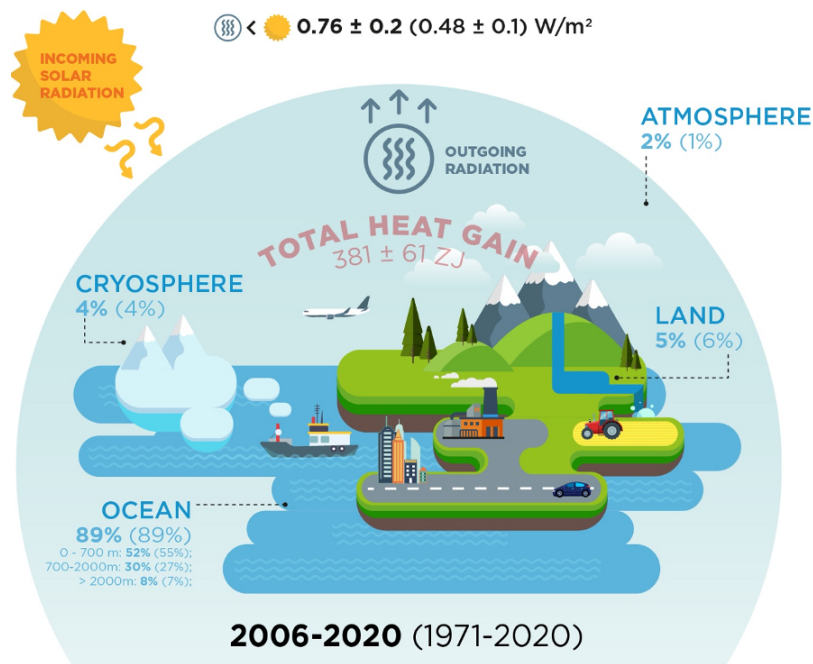


Figura 3: Lo sbilanciamento tra radiazione solare entrante e radiazione infrarossa uscente è misurato ai limiti dell'atmosfera, mentre la ripartizione percentuale degli accumuli è ricavata dalle misure locali. I dati in grassetto si riferiscono all'intero periodo 1970-2020, mentre i dati entro parentesi si riferiscono all'intervallo 2006-2020 [German Climate Computation Centre - DKRZ].

anni di osservazione non si è rilevata alcuna tendenza all'accumulo di energia nel sistema climatico.

Invece, negli ultimi 50 anni la concentrazione di gas serra nell'atmosfera è aumentata considerevolmente e, con essa, sono aumentate sia la temperatura media globale, sia l'accumulo di energia nel sistema climatico. Le stime quantitative degli aumenti, rilevate da DKRZ, sono riassunte nell'infografica di Figura 3 e da esse si ha che:

- l'aumento totale di energia interna nel Sistema Climatico Terrestre è stato di 381 ± 61 ZJ nel periodo 1971 - 2020;
- tale, aumento, ripartito su tutta la superficie della Terra ($5,1 \cdot 10^{14}$ m²) equivale ad uno sbilanciamento di $0,49 \pm 0,1$ W/m²;
- nel periodo 2006 - 2020 lo sbilanciamento è aumentato considerevolmente passando a $0,76 \pm 0,2$ W/m² ed indicando così una intensificazione del cambiamento climatico in atto.

Per quanto riguarda la ripartizione percentuale degli accumuli di energia, la stessa infografica di Figura 3 ci informa che nel periodo 1971-2020 gli assorbimenti relativi sono stati:

- oceano 89%, a sua volta suddiviso per il 55% nei primi 700 metri di profondità, per il 27% tra i 700 e i 2000 metri e per il 7% al di sotto dei 2000 metri;

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

Nel periodo 2006-2020 la ripartizione percentuale degli accumuli di energia totale è marginalmente cambiata e gli assorbimenti relativi sono stati:

- oceano 89%, a sua volta suddiviso per il 52% nei primi 700 metri di profondità, per il 30% tra i 700 e i 2000 metri e per l'8% al di sotto dei 2000 metri (la discrepanza tra totale, pari a 89, e somma degli addendi, pari a 90, è dovuta agli arrotondamenti);
- suolo 5%;
- criosfera 4% e
- atmosfera 2%.

Si può quindi dire che l'oceano ha continuato ad assorbire la frazione maggiore dell'eccesso di energia entrante, incrementando però il riscaldamento alle profondità medie. Inoltre l'atmosfera si è riscaldata considerevolmente aumentando in proporzione il quantitativo di vapore acqueo (e quindi di calore latente) in essa contenuto.

2.2 Conseguenze degli accumuli di energia

Innanzitutto, va chiarito che ogni "conseguenza" dovrebbe essere illustrata nel contesto di una trattazione indipendente e molto più estesa di quella riportata nel seguito. Infatti, per ragioni di spazio e semplicità, qui è solo possibile accennare in estrema sintesi ad alcuni punti particolarmente significativi.

- L'oceano è la componente più importante del Sistema Climatico Terrestre in quanto ricopre il 70% della superficie e accumula il 90% circa dell'energia in eccesso.
- Accumulando energia, l'acqua dell'oceano si riscalda e si espande, tanto è vero che circa la metà dell'aumento del livello del mare verificatosi negli ultimi 25 anni è attribuibile all'aumento di temperatura.
- Gli aumenti di temperatura nell'oceano sono diversi nelle diverse aree e ciò favorisce i cambiamenti nella distribuzione delle concentrazioni saline, interferendo con le correnti termoaline (cioè dovute all'azione combinata delle variazioni di densità con la temperatura e la concentrazione).
- Le eventuali variazioni future delle correnti oceaniche potrebbero avere conseguenze catastrofiche non facilmente prevedibili al momento.
- L'aumento di temperatura superficiale dell'oceano e del suolo riscalda l'aria nella prima troposfera e intensifica l'evaporazione, dai mari e dal suolo nudo, e la traspirazione delle piante.

- A questo punto, si può dire che l'intera superficie del Pianeta contribuisce in maniera significativa agli aumenti di temperatura e umidità dell'aria.
- Le variazioni della densità dell'aria legate agli aumenti di temperatura e umidità provocano cambiamenti nel regime dei venti e aumentano la frequenza delle precipitazioni anomale.
- Gli aumenti di temperatura del terreno in profondità nelle zone fredde, portano allo scongelamento del permafrost con conseguenze geologiche importanti quali frane e smottamenti.
- Nella criosfera il ghiaccio assorbe energia sotto forma di calore latente scongelandosi e, di conseguenza, i cambiamenti associati all'aumento della temperatura media globale del Pianeta causano la riduzione dei ghiacciai, la diminuzione delle banchise e la perdita di grandi masse di ghiaccio nelle calotte polari artica e antartica.

Bibliografia

C.D. Ahrens e R. Henson, *Meteorology Today - An Introduction to Weather, Climate and the Environment - 13^a ed.*, Cengage, Boston, Ma., 2022.

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.

L. Cheng e al., *New Record Ocean Temperatures and Related Climate Indicators in 2023*, Advances in Atmospheric Sciences, Accesso Libero, 2024.

G. Comini, *Gas Serra e Cambiamento Climatico*, CISM, 2023.

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.

Copernicus, *Global sea surface temperature reaches a record high*, Climate Change Service, Visto il 28 febbraio, 2024.

IPCC, *Climate Change 2021 - The Physical Science Basis*, Capitolo 7, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report, 2021.

R. Lindsey e L. Dahlman, *Climate Change: Ocean Heat Content*, NOAA Climate.gov, 6 settembre 2023.

G. Schmidt, *Riscaldamento globale e contenuto di calore negli Oceani*, Climalteranti.it, 2011.

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.

K.E. Trenberth, *The Changing Flow of Energy Through the Climate System*, Cambridge University Press, 2022.

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

World Meteorologic Organization, *State of the Global Climate 2022*, WMO - No. 1316, 2023.

World Meteorologic Organization, *State of Global Water Resources 2022*, WMO - No. 1333, 2023.