

Chimica & Ambiente

CAMBIAMENTI PALEOCLIMATICI

Parte 3: Investigazione sulla stabilità della temperatura media millenaria della terra alla luce di un modello matematico paleo-climatico

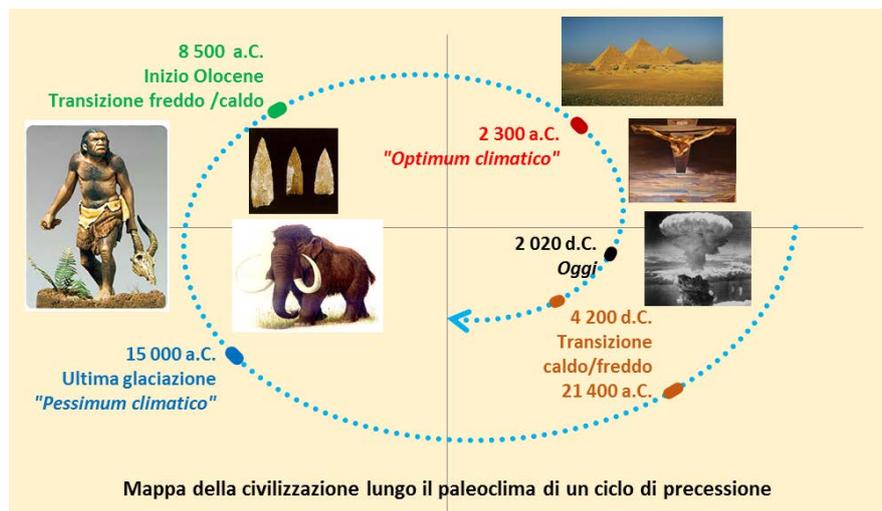
Salvatore Mazzullo

ESPERA: Etica e Scienza per l'Ambiente

turi.mazzullo@libero.it



Se il profilo storico moderno di temperature della Terra fosse l'effetto della perturbazione dei parametri ambientali, nel processo di trasferimento di energia Sole/Terra e tale perturbazione cessasse immediatamente, in quanto tempo la temperatura media della Terra ritornerebbe al suo valore asintotico di equilibrio? Il modello paleoclimatico descritto in questo lavoro ha fornito la seguente risposta: lo stadio lento, nel processo di variazione della temperatura non è il sistema planetario Sole/Terra; infatti, una qualunque perturbazione termica istantanea viene riassorbita in poco più di sei mesi. Il fattore limitante (rate determining step) va ricercato, piuttosto, nelle cause della perturbazione e nella sua rimozione. Con riferimento alla CO₂ come causa del Riscaldamento Globale è necessario, quindi, non solo ridurre le emissioni ma soprattutto rimuovere la quantità di CO₂ in eccesso che si è accumulata in atmosfera: è questa, infatti, la causa dell'effetto serra incrementale, rispetto al fondo naturale delle condizioni preindustriali.



La temperatura media annuale della Terra nei millenni

La temperatura media annuale della Terra, nel corso dei millenni, può essere descritta, analiticamente, come soluzione di un modello matematico paleo-climatico [1]. Il modello è mutuato dalla scala paleo-climatica di Milankovitch, ed è basato su un'equazione differenziale ordinaria a tre termini, di bilancio dell'energia solare incidente sulla Terra, (vedi Appendice, equazione A1). Possiamo attribuire a questa equazione il carattere di una definizione e

considerarla, a tutti gli effetti, come l'equazione costitutiva del modello di Terra considerato in questo lavoro. La soluzione di questa equazione differenziale si scrive come somma di una componente infinitesima (per $\alpha \rightarrow \infty$) periodica che dipende dalla condizione iniziale e di una componente asintotica finita periodica, che non dipende dalla condizione iniziale e, sostanzialmente, descrive l'andamento della temperatura terrestre in assenza di perturbazioni. Tuttavia, anche senza possedere l'espressione analitica della soluzione del modello è possibile calcolare, immediatamente, la temperatura media annuale T_M della Terra, ottenendosi la notevole, semplice espressione:

$$T_M = T_0 + \frac{F_M}{U} \quad (M1)$$

Secondo questa formula, la temperatura media della Terra dipende dall'energia solare media incidente sulla Terra F_M e dai parametri ambientali del bilancio energetico, (T_0, U). In linea di principio, la temperatura media annuale della Terra, in un orizzonte temporale di anni e di decenni, è lentamente variabile al variare dei parametri ambientali. In un orizzonte di secoli e di millenni varia, in aggiunta, al variare dei parametri astronomici, cioè della terna ($e; \delta; \beta$), eccentricità dell'orbita, inclinazione dell'asse terrestre e angolo di precessione, che modificano la quantità di energia solare entrante F_M , (Appendice, equazione A3).

Ricostruzione della temperatura media della Terra nei millenni

Esaminiamo ora lo scenario di ricostruzione della temperatura della Terra, nell'ipotesi che la causa di variazione di temperatura siano solamente i parametri astronomici: eccentricità, inclinazione dell'asse terrestre e angolo di precessione, ovvero, in simboli e, δ, β , a parità di tutti gli altri parametri ambientali. Il senso di questa ipotesi è che vogliamo valutare il peso dei soli parametri astronomici nel modificare la temperatura terrestre. Dalla letteratura scientifica ([5, 6]) ricaviamo il diagramma di Fig. 1 che fornisce l'eccentricità e l'inclinazione in funzione del tempo millenario:

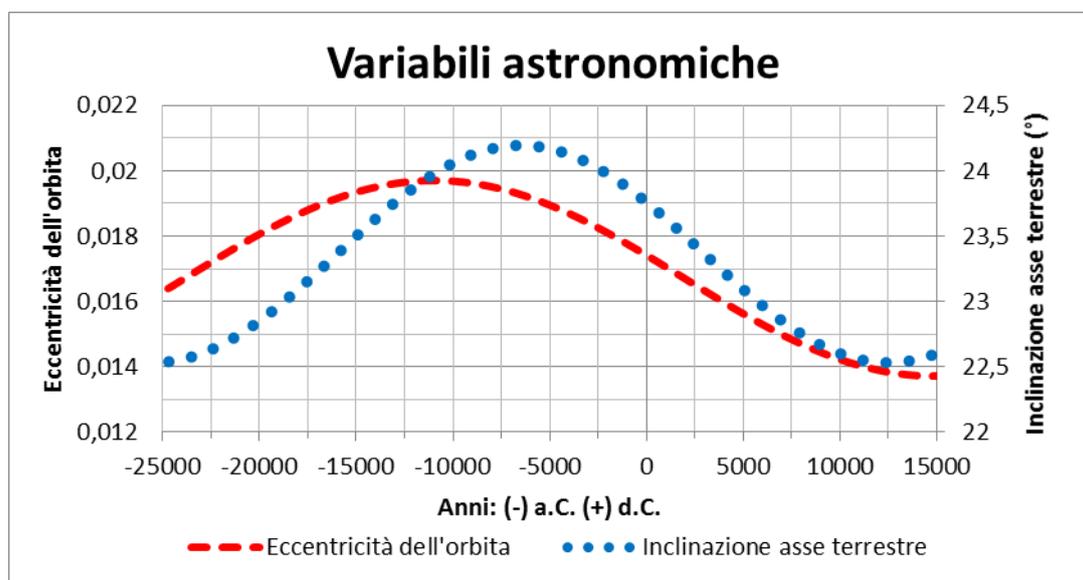


Fig. 1 - Eccentricità dell'orbita [5] e inclinazione dell'asse della Terra [6] sul piano dell'eclittica

Entrambi i parametri variano periodicamente: per l'eccentricità si può identificare, andando indietro nel tempo, un ciclo di circa 70.000 anni [5] e per l'inclinazione dell'asse terrestre un

ciclo di circa 40.000 anni [6] ossia i due parametri presentano una variabilità ciclica in un orizzonte di durata superiore a un ciclo di precessione, (25'800 anni).

Nella Fig. 2a è rappresentata, invece, la ricostruzione (linea azzurra) della temperatura millenaria della Terra per l'intervallo di tempo del ciclo di precessione che comprende il tempo presente, effettuata mediante l'equazione (A7). Sullo stesso diagramma è sovrapposta (linea rossa) anche la temperatura media della Terra misurata per il periodo 1880-2018 [7], riportata in fig.2b con la sua, più naturale, scala dei tempi.

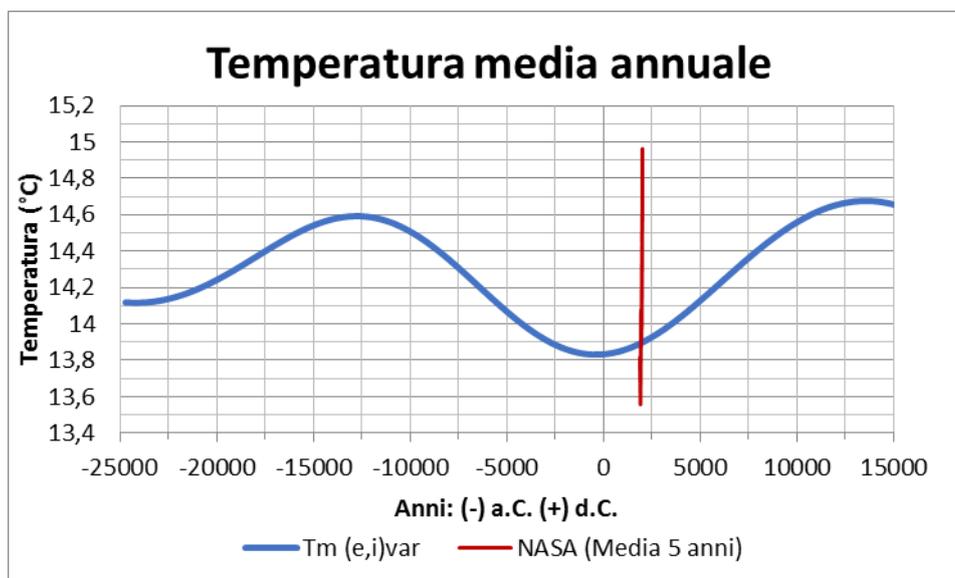


Fig. 2a - Ricostruzione della temperatura media millenaria della Terra (linea azzurra) al variare dei parametri astronomici: angolo di precessione, eccentricità e inclinazione dell'asse terrestre, in funzione del tempo. Sullo stesso diagramma è stata sovrapposta (linea rossa) anche la temperatura media della Terra misurata per il periodo 1880-2018 [7]

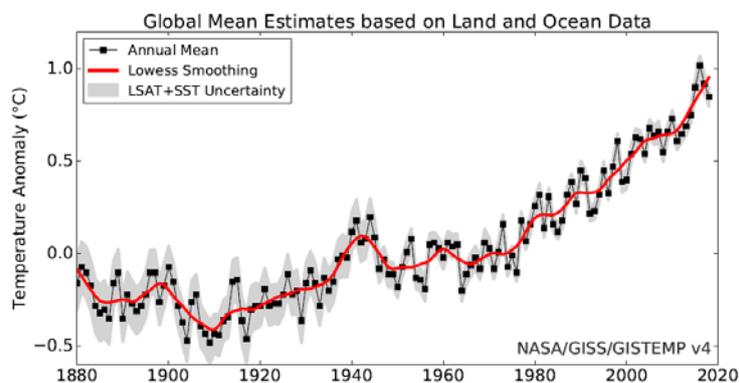


Fig. 2b - Temperatura media della Terra misurata per il periodo 1880-2018 [7]. Sommando l'anomalia alla temperatura di riferimento, ($T^*=13,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), si ottiene la temperatura media effettiva della Terra

Una prima analisi della ricostruzione di Fig. 2a stimola, immediatamente, alcune osservazioni:

1. il quadro astronomico è molto stabile: la variazione dei soli parametri astronomici non modifica significativamente la temperatura media annuale della Terra, nel corso dei millenni. Essa assume valori nell'intervallo $T_{\max}=14,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ nel 12'500 a.C. e $T_{\min}=13,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ nell'anno zero della nostra era. Pertanto la variazione totale di $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ viene raggiunta in un intervallo di tempo di oltre 12 mila anni;
2. attenzione però; non deve trarre in inganno questo risultato, apparentemente tranquillizzante: questa pur modesta variazione della temperatura media, comporta una

variazione delle temperature stagionali molto vistose [1], come appare dalla Fig. 3 che evidenzia la temperatura d'inizio delle quattro stagioni, primavera, estate, autunno e inverno. Segnaliamo, fra le altre, due date caratteristiche: l'anno 2'400 a.C. cui compete la minima escursione di temperatura fra estate e inverno, associata alla massima temperatura invernale e corrispondente all'*optimum climatico*; l'anno 15'000 a.C. cui compete la minima temperatura invernale, associata alla massima escursione termica fra estate e inverno: a questa epoca corrisponde l'ultima glaciazione dell'era moderna;

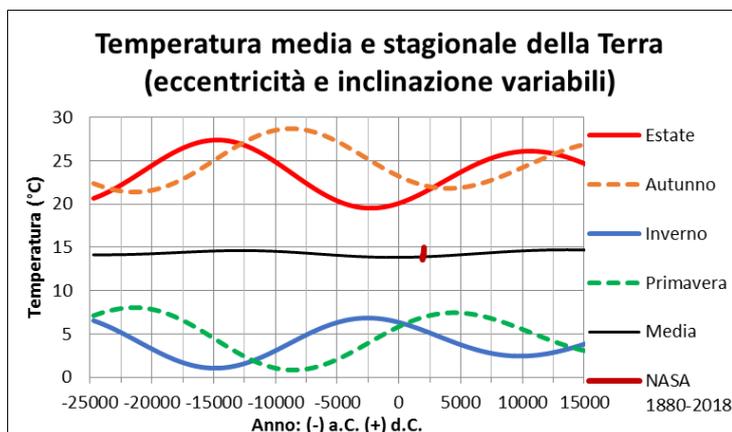


Fig. 3 - Ricostruzione delle temperature medie stagionali della Terra e della media annuale calcolata e misurata per il periodo 1880-2018 [7]

3. Nella scala dei tempi millenari del grafico di Fig. 2a, la variazione di temperatura annuale della Terra misurata in questi ultimi 140 anni appare come una perturbazione istantanea sovrapposta alla temperatura media annuale del modello paleoclimatico;
4. La temperatura media annuale della Terra, nel periodo di tempo 1880-2018 assume valori nell'intervallo $[T_{\max}=15,0; T_{\min}=13,6]$ pertanto la variazione totale è pari a $+1,4$ °C, raggiunta in poco meno di 140 anni.

Come interpretare questi fatti? La lettura immediata è quella che il fenomeno del riscaldamento della Terra che, mediamente, stiamo osservando e misurando dal 1880 è un evento drammatico. Una lettura più ragionata, dopo aver riletto la storia geologica della Terra, suggerisce di inquadrare il Riscaldamento Globale nell'ambito degli eventi rari nella storia geologica della Terra, (più comuni, infatti, sono le glaciazioni). In questa prospettiva, la ricerca delle cause, vicine e lontane del Riscaldamento Globale, può trarre giovamento dalla Storia pregressa del clima della Terra e della sua interpretazione [8].

Analisi di stabilità della temperatura

L'attuale valore della temperatura media misurata della Terra può essere considerato una anomalia rispetto al valore medio di equilibrio, (linea azzurra di Fig. 2a) che avrebbe in assenza delle perturbazioni ambientali indotte da questa fase storica della vita della Terra. Poniamo, allora la seguente domanda: - Se le perturbazioni attuali cessassero immediatamente, in quanto tempo la temperatura media della Terra ritornerebbe al suo valore asintotico di equilibrio?

Costruiamo una possibile risposta a questa domanda attraverso la soluzione analitica completa dell'equazione del modello paleo-climatico (A1). Abbiamo visto che la temperatura media millenaria si costruisce come media delle temperature annuali. Vediamo allora quale è il comportamento annuale della Terra in presenza di una perturbazione, di qualunque origine. Matematicamente, possiamo assimilare la perturbazione all'applicazione di una condizione iniziale, diversa dal valore asintotico di equilibrio.

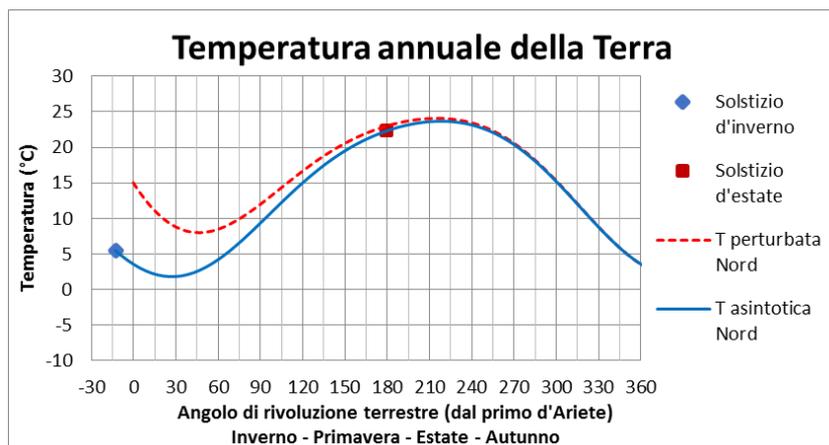


Fig. 4 - Temperatura asintotica annuale della Terra (linea continua) e temperatura perturbata da un disturbo positivo al solstizio d'inverno

Le Fig. 4 e 5 ci forniscono la risposta. La Fig. 4 descrive la temperatura della Terra, calcolata dal modello, in funzione dell'angolo di rivoluzione, grosso modo equivalente ai giorni dell'anno solare. La linea continua descrive la temperatura media annuale, in assenza di perturbazioni. Questa curva è stata identificata in modo tale da farla passare esattamente attraverso due valori caratteristici della temperatura della Terra dell'emisfero Nord: le temperature al solstizio d'inverno, (punto blu) e al solstizio d'estate, (punto rosso). La linea tratteggiata descrive invece l'andamento della temperatura in presenza di una arbitraria perturbazione termica istantanea, in aumento, applicata alla temperatura di inizio anno, poco dopo il solstizio d'inverno: la temperatura risultante è superiore alla media e tende gradualmente a riportarsi al valore asintotico della linea continua, in un arco di tempo di poco più di sei mesi. Questo tempo di ritorno all'equilibrio dipende dall'entità della perturbazione e aumenta con essa. Nella Fig. 5 vediamo lo stesso fenomeno ma rappresentato in maniera diversa: La temperatura della Terra è rappresentata in funzione dell'energia solare entrante in atmosfera ai vari giorni dell'anno. Il ciclo annuale di temperatura è descritto dalla linea chiusa continua (colore blu), la linea tratteggiata (colore rosso) descrive il percorso di fuori equilibrio dovuto a una perturbazione in aumento con la quale si rientra nel ciclo annuale e la linea puntinata (colore verde) l'analogo percorso per una perturbazione in diminuzione.

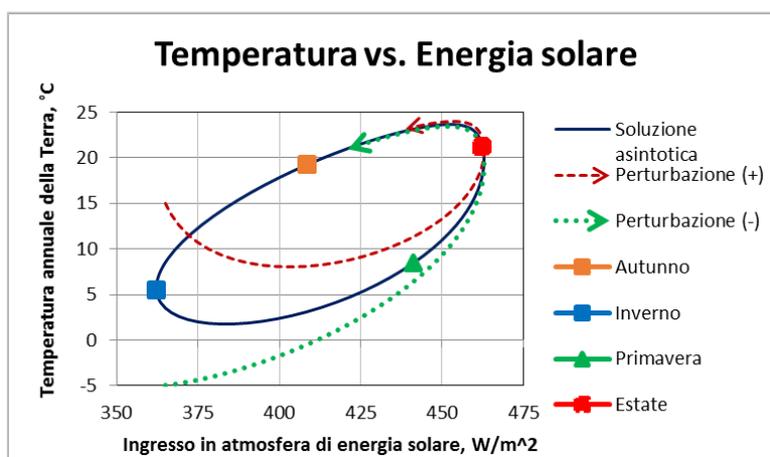


Fig. 5 - Diagramma di fase temperatura/energia solare. Ciclo annuale asintotico (linea continua), ciclo perturbato (+) da un disturbo in aumento e ciclo perturbato (-) da un disturbo in diminuzione della temperatura, entrambi al solstizio d'inverno

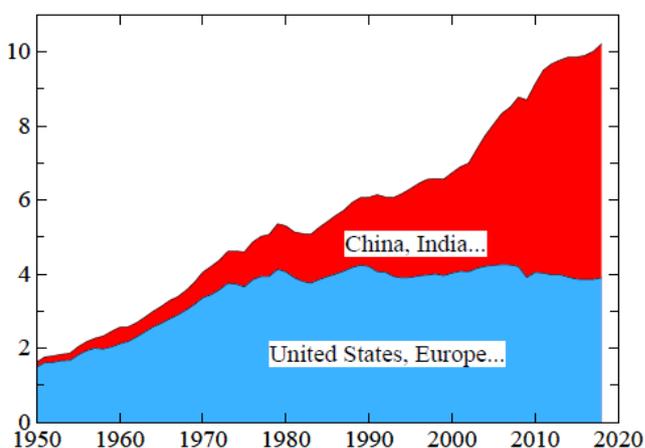
Conclusioni

L'analisi delineata, con l'aiuto di un modello paleo-climatico, ci permette di fare alcune considerazioni conclusive.

Teoricamente, il sistema planetario Terra/Sole è molto stabile per quanto attiene alla temperatura media annuale: a seguito della variazione dei soli parametri astronomici, la temperatura assume valori nell'intervallo $T_{\max}=14,6$ °C nel 12'500 a.C. e $T_{\min}=13,8$ °C nell'anno zero della nostra era. Pertanto la variazione totale è pari a 0,8 °C e viene raggiunta in un intervallo di tempo di oltre 12 millenni.

Sperimentalmente invece, la temperatura media annuale della Terra, nel periodo di tempo 1880-2018 assume valori nell'intervallo [$T_{\max}=15,0$ °C; $T_{\min}=13,6$ °C] pertanto la variazione totale è pari a +1,4 °C, raggiunta in poco meno di 140 anni. Sulla scala millenaria dei tempi di un ciclo di precessione, questa variazione appare come una perturbazione istantanea sovrapposta alla temperatura media annuale del modello paleoclimatico di Fig. 2a. Abbiamo visto che la temperatura media millenaria si costruisce come media delle temperature annuali. Il modello paleoclimatico ci permette di calcolare il comportamento della Terra in presenza di una perturbazione termica, di qualunque origine, che possiamo assimilare, concettualmente, all'introduzione di una condizione iniziale, diversa dal valore asintotico di equilibrio. A titolo di esempio, l'andamento della temperatura in presenza di una arbitraria perturbazione termica istantanea, in aumento, applicata alla temperatura di inizio anno, poco dopo il solstizio d'inverno fornisce questo risultato: la temperatura è superiore alla media e tende gradualmente a riportarsi al valore medio annuale in un arco di tempo di poco più di sei mesi. Questo tempo di ritorno all'equilibrio dipende dall'entità della perturbazione e aumenta con essa. Combinando queste osservazioni possiamo concludere che lo stadio lento, nel processo di variazione di temperatura della Terra non è il sistema planetario Terra/Sole: una qualunque perturbazione termica istantanea viene riassorbita dal sistema planetario Terra/Sole nell'arco di pochi mesi. Il fattore limitante, (*rate determining step*), va ricercato quindi nelle cause della perturbazione e nella sua rimozione. Con riferimento alle cause di riscaldamento della Terra, attribuite dall'ente intergovernativo IIPC, quasi esclusivamente, all'attività antropica di produzione di CO₂, da questa analisi deduciamo due cose:

1. non è sufficiente rimuovere le cause, per es. fermare le emissioni di CO₂, anche se siamo consapevoli di quale impatto economico e sociale abbia l'attuazione di questa decisione, soprattutto per le Nazioni emergenti, Fig. 6. Tuttavia, limitarsi alla sola riconversione portandosi verso una società "carbon free" non produrrà gli effetti desiderati, perché rimarrà in atmosfera, per lungo tempo, la quota in eccesso di CO₂ ed è questa la causa dell'effetto serra incrementale, rispetto al fondo naturale.
2. è necessario, in aggiunta, rimuovere la quantità di CO₂ in eccesso che si è accumulata in atmosfera: i processi naturali di fotosintesi vanno in questa direzione, pertanto le azioni di



rimboschimento a livello planetario sono benvenute ma lente. Quanto più rapidamente avverrà la rimozione di CO₂ in eccesso, con lo sviluppo di adeguate e innovative tecnologie, tanto più rapidamente diminuirà la temperatura della Terra.

Fig. 6 - Emissioni globali in Gt/anno per aree geografiche, 2019 [9]

Appendice: La temperatura media annuale della Terra nei millenni

La temperatura media annuale della Terra, nel corso dei millenni, può essere descritta, analiticamente, come soluzione di un modello matematico paleo-climatico [1]. Il modello è mutuato dalla scala paleo-climatica di Milankovitch, ed è basato su un'equazione differenziale, ordinaria, di bilancio dell'energia solare incidente sulla Terra, costituita da un termine di sorgente, costantemente uguale a un termine di perdita sommato a un termine di accumulo, al variare dell'angolo di rivoluzione, α . Il termine di sorgente tiene conto dell'inclinazione dell'asse terrestre, (δ), dell'eccentricità dell'orbita, (e), entrambe variabili sulla scala millenaria di tempo e dell'angolo di precessione, (β). Possiamo attribuire alla equazione del modello, il carattere di una definizione e considerarla, a tutti gli effetti, come l'*equazione costitutiva* del modello di Terra considerato in questo lavoro:

$$\underbrace{U_0 \cdot \frac{dT}{d\alpha}}_{\text{Accumulo}} + \underbrace{U \cdot (T - T_0)}_{\text{Perdita}} = \underbrace{F(\alpha, \beta, e, \delta)}_{\text{Sorgente}} \quad (A1)$$

dove si è posto $T(0)=T_i$ come condizione iniziale. L'equazione (A1) è il più semplice bilancio di energia solare che si possa scrivere per il sistema Sole/Terra. Tutte le informazioni relative al flusso di energia solare sono racchiuse nel termine di sorgente $F(\alpha, \beta, e, \delta)$, riflesso dalla superficie terrestre verso l'atmosfera, la cui formulazione analitica [1], costituisce l'aspetto qualificante e distintivo del modello. L'equazione (A1) ci dice, sostanzialmente, che il termine di sorgente risulta costantemente uguale al flusso uscente $U \cdot (T - T_0)$, linearizzazione dell'equazione di Stefan-Boltzmann per un corpo opaco, sommato al termine di accumulo $U_0 \cdot dT/d\alpha$. Il valore dei parametri liberi (U_0, U, T_0) viene determinato sulla base delle isoterme di gennaio e di luglio dell'emisfero Nord della Terra, mediante un apposito procedimento matematico di identificazione dei parametri incogniti [1]. Questo procedimento fa sì che la soluzione analitica del modello paleoclimatico, tenga conto, implicitamente, della diversa distribuzione di suolo e mare alle varie latitudini e dell'effetto di questa distribuzione nel determinare il profilo di temperatura delle isoterme di riferimento. La soluzione di questa equazione differenziale si scrive come somma di una componente infinitesima (per $\alpha \rightarrow \infty$) periodica che dipende dalla condizione iniziale e di una componente asintotica finita periodica [1] che non dipenda dalla condizione iniziale e, sostanzialmente, descrive l'andamento della temperatura terrestre in assenza di perturbazioni. Tuttavia, anche senza possedere l'espressione analitica della soluzione del modello, se calcoliamo l'integrale dell'equazione (A1) su un ciclo annuale, in condizioni asintotiche, il primo termine è nullo perché la temperatura annuale si ripete ciclicamente, il secondo fornisce la temperatura media T_M e il terzo la sorgente media F_M . Si ottiene così la notevole relazione (M1). Per calcolare il termine di sorgente medio F_M è necessario esplicitare il termine di sorgente istantaneo. Esso si scrive come prodotto di sei fattori $F(\alpha, \beta, e, \delta) = F_0 F_1 F_2 F_3 F_4 F_5$ [1]. Il fattore F_0 descrive la costante solare. Il fattore F_1 descrive la distanza Sole/Terra, secondo la legge di Kepler, variabile con la posizione angolare e l'eccentricità dell'orbita terrestre. Esso evidenzia che il flusso giornaliero di energia solare incidente al bordo esterno dell'atmosfera è funzione esclusivamente della posizione angolare della Terra sul piano dell'eclittica e dell'eccentricità dell'orbita, variabile nei millenni. Il fattore F_2 è una funzione polinomiale che modula il valore stagionale dell'energia solare in funzione dell'angolo di rivoluzione α e dell'angolo di precessione β tenendo conto dei parametri orbitali della Terra, inclinazione dell'asse, δ ed eccentricità dell'orbita, e . Il fattore $F_3 = (1-A)$ è la funzione di attenuazione dell'energia solare dovuta all'albedo A della Terra. Per definizione, l'albedo è il potere di riflessione dei pianeti e indica quale frazione della quantità totale di energia ricevuta dal Sole viene riflessa verso lo spazio. Il valore dell'albedo della Terra si può stimare attraverso i dati della Tab. 1; il suo valore medio è: $A=0,357$.

Tab. 1 - Parametri per la valutazione dell'albedo media della Terra [3]

Materiale	Peso Superficie P	Albedo	Albedo media Am	Albedo pesata AmxP
Neve	3/50	0,80±0,90	0,85	0,04080
Acqua	27/50	0,05±0,60	0,325	0,14040
Foresta	14/50	0,05±0,10	0,075	0,0168
Cemento	1/50	0,20±0,30	0,25	0,00400
Asfalto	1/50	0,05±0,10	0,075	0,0012
Sabbia	4/50	0,30±0,60	0,45	0,02880
Nuvole	1/50	0,50±0,75	0,625	0,125
				0,357

Il fattore F_4 incorpora l'effetto dei gas serra, (Green House Gases, GHG) e limitandosi ai più emblematici, vapore d'acqua e anidride carbonica, si può scrivere come segue:

$$F_4 \equiv \frac{H_2O^* + CO_2^*}{H_2O + CO_2} = 1 + \frac{CO_2 - CO_2^*}{H_2O + CO_2} \quad (A2)$$

Chimica & Ambiente

Secondo questa definizione, il fattore F_4 aumenta linearmente con la variazione di concentrazione di CO_2 atmosferica, pesata sulla totalità dei gas serra presenti in atmosfera, a una assegnata condizione di riferimento $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2^*$, per esempio, alle condizioni preindustriali. Questo fattore è maggiore di uno e quantifica l'effetto serra incrementale dovuto all'eccesso di CO_2 in atmosfera, rispetto alle condizioni preindustriali. Il fattore F_5 descrive gli aerosol di alta quota, di origine naturale o antropica. Fra le cause degli aerosol di origine naturale si possono citare le eruzioni vulcaniche con indice $\text{VEI} > 3$, i terremoti e associata emissione di gas oppure eventi rari quali l'impatto di meteoriti con la superficie terrestre. Fra le possibili cause degli aerosol di origine antropica andrebbero considerate le due guerre mondiali, gli esperimenti nucleari e termonucleari in atmosfera, gli incendi su scala regionale delle foreste e/o dei boschi. Avendo identificato tutti gli elementi di calcolo, la temperatura media della Terra si scrive:

$$T_M \equiv T_0 + \frac{1}{U} \cdot \frac{\varphi F_0}{2a_0} \left(1 + \frac{b_0 + b_1 \cos \beta + b_2}{2} \right) \quad (\text{A3})$$

Sottolineiamo che la formula è stata ricavata nell'ipotesi che i nove parametri $T_0; \varphi; F_0; U; a_0; b_0; b_1; b_2; \beta$ siano costanti oppure lentamente variabili nell'arco di durata di un anno solare. Sostituendo i valori numerici dei nove fattori ambientali e astronomici, otteniamo la temperatura media della Terra: $T_M = +13,90^\circ\text{C}$, nell'anno di riferimento 1975. Secondo questa formula, la temperatura media della Terra dipende dall'energia solare media F_M incidente sulla Terra e dal valore assunto dai nove parametri del bilancio energetico. In linea di principio, quindi, la temperatura media annuale della Terra, in un orizzonte temporale di anni e di decenni, è lentamente variabile al variare dei parametri ambientali. In un orizzonte di millenni varia, in aggiunta, con l'angolo di precessione β , con l'eccentricità e dell'orbita terrestre da cui dipendono $a_0; b_0; b_1$, con l'inclinazione δ dell'asse terrestre sul piano dell'eclittica da cui dipende b_2 , come definiti in Tab. 2:

Tab. 2 - Fattori ambientali della troposfera e fattori orbitali astronomici che hanno determinato la temperatura media annuale della Terra, nel 1975 [1]

Fattori ambientali troposferici			Fattori orbitali astronomici		
T_0	-120,011	$^\circ\text{C}$	β	-0,22362	precessione
φ	+0,633		δ	+0,40928	inclinazione
F_0	+1361,25	W/m^2	e	+0,0167	eccentricità
U	+3,14918	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$a_0 = (1 - e^2)^2$	+0,999442	
			$b_0 = e^2$	+0,000279	
			$b_1 = -2e(1 - 2/\pi)\delta$	-0,004967	
			$b_2 = -2/\pi(1 - 2/\pi)\delta^2$	-0,038751	

A determinare la temperatura T_0 contribuiscono interazioni chimico-fisiche ed elettromagnetiche dell'energia solare con la sempre più rarefatta alta atmosfera, al di sopra della troposfera, fino allo spazio interplanetario dove si osserva la temperatura di fondo, prossima allo zero assoluto. Il peso di questo addendo è, però, rilevantissimo, di poco superiore al 50 % della temperatura media assoluta della Terra. Il secondo addendo contribuisce per poco meno del 50 % ed è costituito da due fattori: il primo ambientale, dovuto a fenomeni della troposfera e l'altro astronomico, dovuto all'eccentricità dell'orbita, all'inclinazione dell'asse di rotazione della Terra e all'angolo di precessione β . Il parametro $\varphi = 0,633$ rappresenta il fattore intensivo netto di insolazione [2]. Esso è descritto da una funzione di attenuazione/amplificazione dell'energia solare costituita dai tre termini, $\varphi = F_3 F_4 F_5$. Infine, il fattore U rappresenta la trasmittanza termica della troposfera, un parametro empirico che però può essere espresso in termini della costante di Stefan-Boltzman, σ , attraverso la relazione: $U = 4\sigma \cdot E \cdot T_M^3$ dove $E \cong 0,58$ è l'emissività della superficie terrestre [4] e T_M è la temperatura media della Terra. Tutti questi parametri contribuiscono a formare la temperatura della Terra e, se è noto il loro andamento temporale, permettono di determinarne, a tavolino, la variazione nel tempo, non solo, ma di effettuare, anche, ricostruzioni della temperatura del passato che, per confronto con l'andamento sperimentale della temperatura stessa permettono di identificare fenomeni storici oppure di effettuarne previsioni del suo andamento futuro. Attualmente l'attenzione è focalizzata sui fenomeni che avvengono nella troposfera, in particolare, l'accumulo di CO_2 in atmosfera e sui relativi parametri ambientali, tuttavia è importante prendere coscienza che altri fenomeni contribuiscono alla variazione della temperatura della Terra, come sottolineato attraverso l'analisi della formula che ne fornisce il valore medio annuale nel volgere dei millenni.

Bibliografia

- [1] S. Mazzullo, *La Chimica e l'Industria*, 2012, **94**(5), 75; 2012, **94**(6), 94.
- [2] W.T. Norton, *Gli esperimenti facili: Energia solare*, Cap.2.4, Insolazione; Muzzio Ed., 1980, pp. 128-132.
- [3] C. Mercatali, *Geodinamica*, Cap. 1, Atmosfera, Giunti Marzocco, 1990, pp. 8-9.
- [4] H.S. Carslaw, J.C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, Cap. 1, Black body radiation p. 21; Oxford Univ. Press, 1980.

- [5] A. Berger, M.F. Loutre, *Quaternary Science Reviews*, 1991, **10**, 297.
- [6] J. Laskar, *Secular Terms of Classical Planetary Theories Using the Results of General Relativity*, *Astronomy and Astrophysics*, 1986, **157**(1), 59.
- [7] Temperatura globale http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/
- [8] W. Bheringer, *Storia culturale del clima: dall'era glaciale al riscaldamento globale*, Bollati Boringhieri, 2019.
- [9] J.E. Hansen, Carbon reality, CSAS Columbia University website: <https://csas.earth.columbia.edu/>, 2019.

Paleoclimatic Changes - Part 3: Investigation of the Stability of the Earth's Average Millennial Temperature in the Light of a Paleo-Climatic Mathematical Model

In case the modern historical profile of the Earth's temperature were the perturbation effect of the environmental parameters in the Sun/Earth energy transfer process and this perturbation immediately ceased, in how long would the average temperature of the Earth return to its asymptotic equilibrium value. The paleo-climatic model, described in this paper, has provided the following answer: the slow stage, in the temperature variation process is not the planetary Sun / Earth system; in fact, any instant thermal disturbance is re-absorbed in just over six months. The rate determining step is to be found, rather, in the causes of the disturbance and its removal. With reference to the CO₂ as the cause of Global Warming, it is necessary, not only to reduce the emissions of CO₂ but above all to remove the excess CO₂ accumulated in the atmosphere. This atmospheric CO₂ excess is, in fact, the cause of the incremental greenhouse effect, compared to the natural background of pre-industrial conditions.