

Chimica & Ambiente

CAMBIAMENTI PALEOCLIMATICI Parte 4: temperature dell'emisfero boreale e australe

Salvatore Mazzullo

ESPERA: Etica e Scienza per l'Ambiente

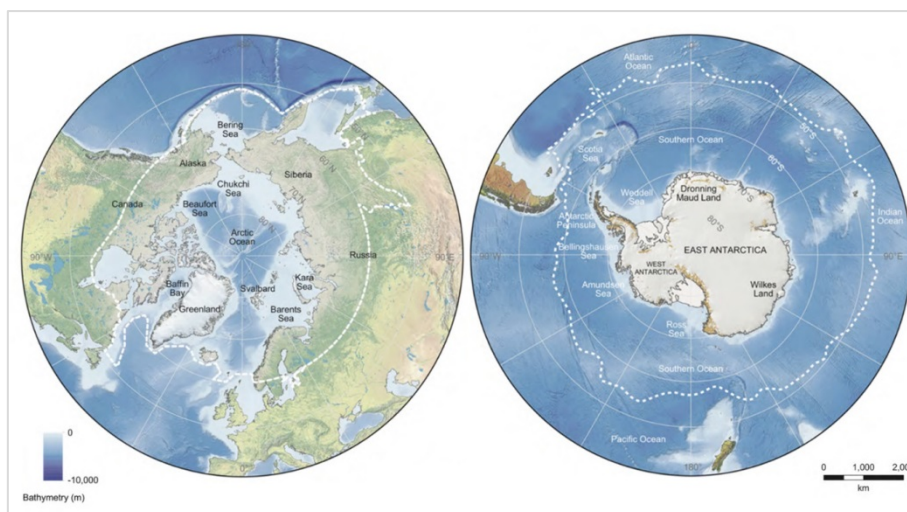
turi.mazzullo@libero.it



Le stagioni del ciclo annuale di rivoluzione della Terra sono sfasate di 180° nei due emisferi Nord e Sud. Un modello matematico paleoclimatico permette di dedurre che anche sulla scala millenaria del ciclo di precessione, le temperature millenarie sono sfasate di 180°, corrispondenti a circa sei millenni: di conseguenza all'optimum climatico del 2300 a.C. nell'emisfero Nord, corrisponde un "pessimum" climatico, alla stessa data, nell'emisfero Sud. Viceversa, alla glaciazione del 15 000 a.C. dell'emisfero Nord, corrisponde, alla stessa data, un optimum climatico nell'emisfero Sud.

Paleoclimatic Changes - Part 4: Temperatures of the Northern and Southern Hemisphere

The seasons of the Earth's annual revolution cycle are 180° out of phase in the two northern and southern hemispheres. A paleoclimatic mathematical model allows deducing that even on the millennial scale of the precession cycle, the millennial temperatures are 180° out of phase, corresponding to about six millennia: consequently, at the optimum climate of 2300 BC in the Northern Hemisphere, a climatic "pessimum" corresponds, on the same date, in the Southern Hemisphere. Conversely, to the glaciation of 15000 BC of the Northern Hemisphere, corresponds, on the same date, to a climatic optimum in the Southern Hemisphere.



Mappa delle regioni polari dell'Artico (a sinistra) e dell'Antartico (a destra), IPCC [1]

La temperatura media annuale della Terra nei millenni

I profili delle temperature annuali nell'emisfero Nord e nell'emisfero Sud sono sfasati di 180° , corrispondenti a circa sei mesi: di conseguenza, le stagioni della Terra sono sfasate dello stesso periodo, per esempio, all'estate a Nord corrisponde l'inverno a Sud. Un modello matematico paleoclimatico [2] permette di dedurre che anche sulla scala millenaria del ciclo di precessione, le temperature millenarie sono sfasate di 180° , corrispondenti a circa sei millenni. Il modello è stato 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. Il modello è stato risolto analiticamente e consente sia di ricostruire eventi storici del passato che di prevedere scenari ipotetici del futuro. In particolare, con riguardo al passato e con opportune ipotesi sui parametri liberi del modello, la soluzione analitica è in grado di prevedere la "Piccola Era Glaciale", culminata nel cosiddetto minimo di Maunder del 1645-1715. Con riguardo al futuro, mediante la soluzione analitica, si può risolvere sia il *problema annuale* (calcolo del profilo giornaliero di temperatura media della Terra) che il *problema millenario* (calcolo del profilo annuale delle temperature delle quattro stagioni della Terra durante il ciclo millenario di precessione che comprende il tempo presente). In questo lavoro esamineremo, con qualche dettaglio, i risultati del *problema millenario*, ponendo a confronto i profili di temperatura dei due emisferi della Terra.

Le temperature dell'emisfero boreale e dell'emisfero australe della Terra, nell'arco di durata di un ciclo di precessione

Consideriamo 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, 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 [3, 4], ricaviamo il diagramma di Fig. 1 che fornisce l'eccentricità e l'inclinazione in funzione del tempo millenario. Entrambi i parametri variano periodicamente: per l'eccentricità si può identificare, andando indietro nel tempo, un ciclo di circa 70.000 anni [3] e per l'inclinazione dell'asse terrestre un ciclo di circa 40.000 anni [4], ossia i due parametri presentano una variabilità ciclica in un orizzonte di durata superiore a un ciclo di precessione, (25'800 anni).

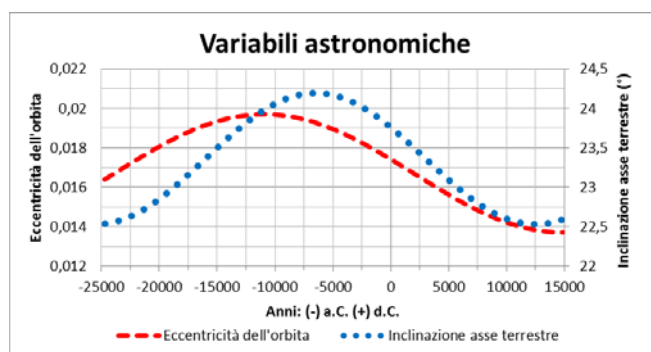


Fig.1 - Eccentricità dell'orbita, [3] e inclinazione dell'asse della Terra, [4] sul piano dell'eclittica

Inseriti questi dati parametrici nella soluzione analitica si ottengono le coppie di diagrammi seguenti, sui quali è opportuno soffermarsi per interpretarli adeguatamente.



Fig. 2a - Ricostruzione della temperatura media giornaliera della Terra e dell'energia solare incidente, nell'emisfero boreale



Fig. 2b - Ricostruzione della temperatura media giornaliera della Terra e dell'energia solare incidente, nell'emisfero australe

I profili delle temperature giornaliere nell'emisfero Nord e nell'emisfero Sud, Fig. 2a/b, sono sfasati di 180°, corrispondenti a circa sei mesi: di conseguenza, le stagioni della Terra sono sfasate dello stesso periodo, per esempio, a temperature estive a Nord corrispondono alla stessa data, temperature invernali a Sud, ovvero, più precisamente all'estate boreale (Nord) corrisponde, l'inverno australe (Sud) e analogamente per le altre stagioni. Dalle stesse figure possiamo notare che l'energia solare incidente anticipa il profilo di temperatura: con riferimento alla Fig. 2b, per esempio, l'energia raggiunge il minimo a un angolo di rivoluzione di 165° mentre la temperatura raggiunge il minimo a 210°.

I grafici precedenti possono essere compattati, molto efficacemente in un unico diagramma (Fig. 3), in cui la temperatura viene associata al rispettivo valore di energia solare, a parità di tempo. La linea chiusa del diagramma rende ragione della ripetitività di ogni ciclo annuale. Notiamo che il ciclo relativo all'emisfero Nord è contenuto nel ciclo relativo all'emisfero Sud: ciò evidenzia che, in questa posizione dell'angolo di precessione, l'emisfero Nord riceve, annualmente, meno energia solare dell'emisfero Sud.

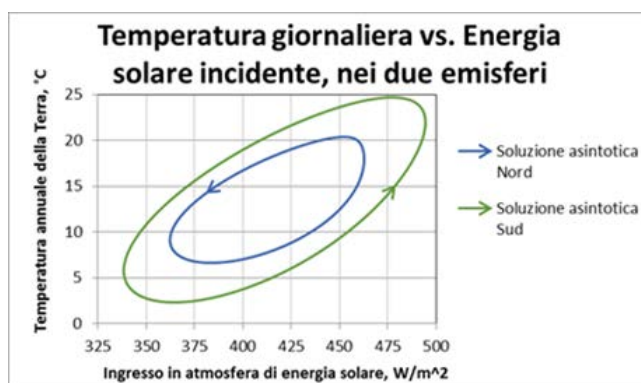


Fig. 3 - Diagramma di fase temperatura/energia solare nei due emisferi

Consideriamo ora le temperature millenarie di inizio delle quattro stagioni, Fig. 4a e Fig. 4b. In ciascun emisfero, le temperature d'inizio delle quattro stagioni sono a due a due simili: estate ed autunno oscillano attorno alla stessa temperatura media, come pure inverno e primavera. Inoltre, la coppia estate/inverno si presenta, quasi esattamente, in opposizione di fase e, analogamente, ma sfasata in avanti, la coppia primavera/autunno. È evidente, inoltre, lo sfasamento fra temperatura stagionale, Fig. 4a e Fig. 4b, e flusso di energia solare incidente, Fig. 5a e Fig. 5b, nella stessa stagione.

Nell'emisfero Nord, Fig. 4a, l'escursione termica annuale fra il solstizio d'estate e il solstizio d'inverno fornisce nitidamente un massimo, corrispondente al 15'000 a.C. e un minimo,

corrispondente al 2'300 a.C. Anche l'escursione termica agli equinozi segnala una notevole coppia: un minimo relativo all'anno 21'400 a.C. e un massimo associato all'anno 8'700 a.C. Si osserva ancora un minimo relativo all'anno 3'800 d.C. da associare, però, al successivo ciclo di precessione che comprende il tempo presente. Analoghe considerazioni possono essere fatte per l'emisfero Sud, Fig. 4b, solo che, a parità di date, i massimi diventano minimi e viceversa.

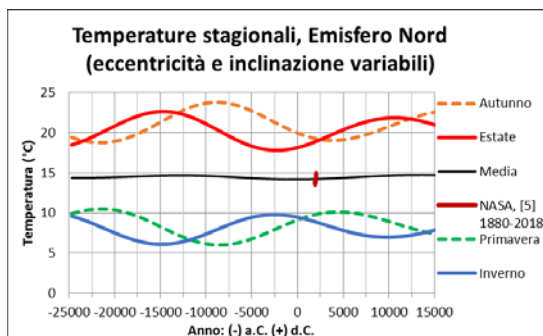


Fig. 4a - Ricostruzione delle temperature medie stagionali nell'emisfero Nord

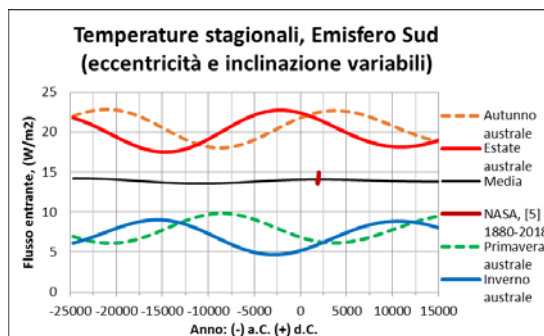


Fig. 4b - Ricostruzione delle temperature medie stagionali nell'emisfero Sud

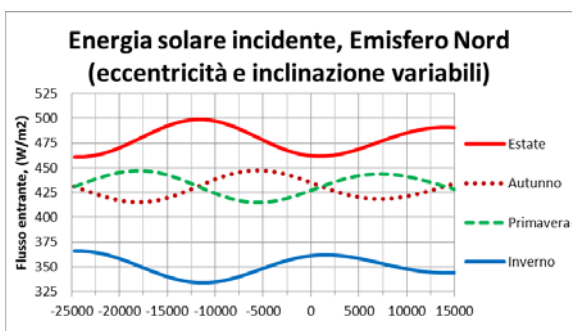


Fig. 5a - Ricostruzione del flusso di energia solare in ingresso nell'emisfero Nord

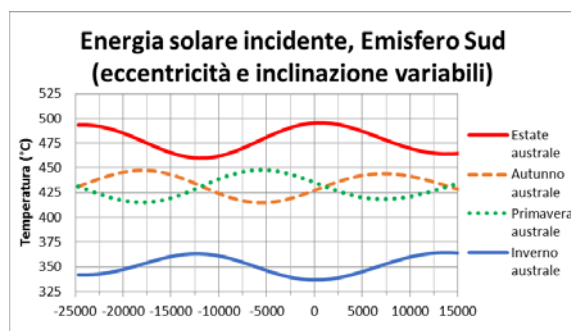


Fig. 5b - Ricostruzione del flusso di energia solare in ingresso nell'emisfero Sud

Si pone ora l'esigenza di classificare unitariamente queste osservazioni, da un punto di vista climatico. Sorge spontanea la domanda se fra i cicli millenari delle quattro stagioni se ne possano identificare quattro con delle speciali caratteristiche di unicità. La risposta è affermativa e, per continuità con i nomi dati alle quattro stagioni annuali del ciclo di rivoluzione terrestre, le denomineremo le quattro *stagioni millenarie* del ciclo di precessione terrestre. C'è in questo un'economia di pensiero e una facilitazione mnemonica formidabile, in quanto le stagioni millenarie possiedono proprietà che la nostra mente è abituata a sentire soddisfatte dalle consuete stagioni annuali della Terra. Per esempio, nell'emisfero Nord l'inverno millenario è identificabile, in maniera naturale dalla Fig. 4a, come l'anno cui compete la minima temperatura del solstizio d'inverno. La sequenza delle altre *stagioni millenarie* della Terra segue l'ordine temporale consueto, cioè primavera, estate, autunno e tutte si identificano, facilmente, attraverso la sequenza dei massimi e minimi delle escursioni termiche individuate, a partire dall'inverno millenario, come segue:

1. *Inverno millenario*, nell'anno 15'000 a.C., (già classificato *Pessimum* climatico [3] e corrispondente all'ultima glaciazione nell'emisfero Nord), identificato dalla massima escursione termica annuale fra il solstizio d'estate e il solstizio d'inverno;
2. *Primavera millenaria*, nell'anno 8'700 a.C., in corrispondenza con la massima escursione termica annuale fra l'equinozio d'autunno e l'equinozio di primavera;

3. *Estate millenaria*, nell'anno 2'300 a.C., (già classificato *Optimum* climatico [3] e corrispondente al culmine dell'optimum climatico dell'Olocene), identificato dalla minima escursione termica annuale fra il solstizio d'estate e il solstizio d'inverno;
4. *Autunno millenario*, nell'anno 3'800 d.C., in corrispondenza con la minima escursione termica annuale fra l'equinozio d'autunno e l'equinozio di primavera.

Analoghe considerazioni possono essere fatte per l'emisfero Sud, Fig. 4b, solo che, a parità di date, i massimi diventano minimi e viceversa e i nomi delle stagioni millenarie si invertono assumendo il nome opposto: all'inverno millenario a Nord corrisponde l'estate millenaria a Sud e così via per le altre stagioni millenarie.

Conclusioni

Non solo a livello annuale ma anche a livello millenario si riproduce il fenomeno della opposizione di fase delle stagioni: un modello matematico paleoclimatico ha permesso di dedurre che anche sulla scala millenaria del ciclo di precessione, le temperature millenarie sono sfasate di 180°, corrispondenti a circa sei millenni: di conseguenza all'optimum climatico del 2300 a.C. nell'emisfero Nord, corrisponde un "*pessimum*" climatico, alla stessa data, nell'emisfero Sud e così, di seguito per le altre stagioni millenarie. La mappa della Fig. 6 riassume sinteticamente tutti i concetti esposti.

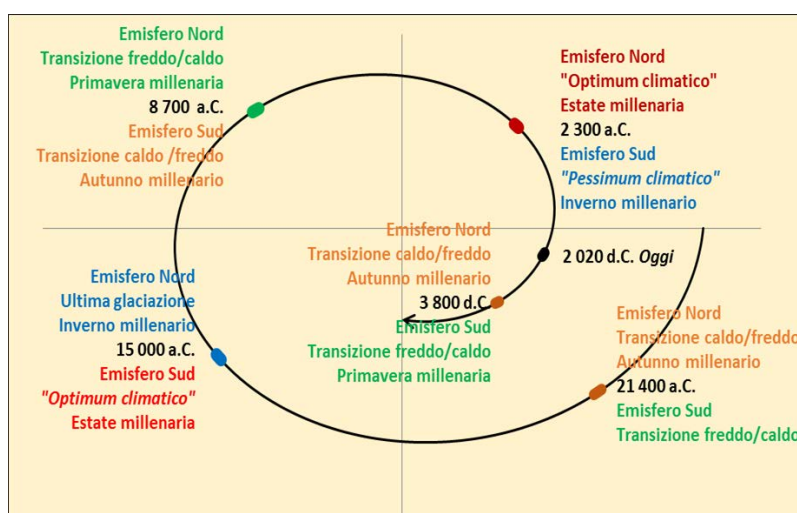


Fig. 6 - Mappa paleoclimatica dei due emisferi della Terra (Boreale e Australe) lungo un ciclo di precessione

L'emisfero Nord sta uscendo dall'*optimum* climatico del 2'300 a.C. per avviarsi verso la transizione caldo/freddo del 3'800 d.C. la quale porterà a un nuovo *pessimum* climatico nel 10'300 d.C.; quest'ultimo evento potrebbe dar luogo a una nuova glaciazione. L'emisfero Sud sta, invece, uscendo dal *pessimum* climatico del 2'300 a.C. (l'attuale spessa coltre di ghiaccio dell'Antartide potrebbe conservare l'impronta di questo evento), per avviarsi verso la transizione freddo/caldo del 3'800 d.C.; questo evento porterà a un nuovo *optimum* climatico che culminerà nel 10'300 d.C.

Appendice: Modello matematico paleoclimatico della Terra

La temperatura media annuale della Terra, nel corso dei millenni, può essere descritta, analiticamente, come soluzione di un modello matematico paleo-climatico, mutuato dalla scala paleo-climatica di Milankovitch [2]. Per la costruzione del modello di calcolo della temperatura terrestre ci siamo posti nella prospettiva planetaria, di un osservatore lontano, che vede la Terra come una piccola sfera, sostanzialmente azzurra per la prevalenza dell'acqua che la ricopre, circondata da una tenue e sottile atmosfera gassosa. Tre sono le ipotesi costitutive del modello planetario paleoclimatico:

- 1) i pianeti descrivono un'orbita ellittica attorno al Sole, (Kepler);
- 2) i pianeti sono considerati punti materiali, (Newton);
- 3) a ogni pianeta si associa, nello stesso spirito di Newton, un bilancio di energia. In questa prospettiva, il modello paleoclimatico si applica a tutti i pianeti del sistema solare.

Per scrivere il bilancio di energia si è tenuto conto della geometria sferica della Terra: l'energia solare incidente sulla superficie esterna dell'atmosfera risulterà funzione della posizione sulla superficie sferica attraverso una funzione di estinzione di Lambert, specificamente modificata dall'autore, per le coordinate orizzontali di questo modello [2]. Per quanto attiene alle problematiche più propriamente astronomiche si è tenuto conto delle seguenti scale dei tempi: scala giornaliera di rotazione della Terra, scala annuale di rivoluzione, scala millenaria di variazione dell'eccentricità [3], dell'inclinazione dell'asse di rotazione [4] e della scala millenaria di precessione.

Il modello è basato su un'equazione differenziale, ordinaria, di bilancio dell'energia solare incidente sulla Terra, costituita da un termine di sorgente, (forzante radiativa), 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 su 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:

$$\underbrace{U_0 \cdot \frac{dT}{d\alpha}}_{\text{Accumulo}} + \underbrace{\sigma E \cdot (T^4 - T_0^4)}_{\text{Perdita}} = \underbrace{F(\alpha, \beta, e, \delta)}_{\text{Sorgente}} \quad (A1)$$

con la condizione iniziale:

$$T(0) = T_i \quad (A2)$$

Tutte le informazioni relative al flusso entrante di energia solare sono racchiuse nel termine di sorgente $F(\alpha, \beta, e, \delta)$, la cui formulazione analitica costituisce l'aspetto qualificante e distintivo del modello. Esso si scrive, [2], come prodotto di sei fattori $F(\alpha, \beta, e, \delta) = F_0 F_1 F_2 F_3 F_4 F_5$. Il termine di perdita $\sigma E \cdot (T^4 - T_0^4)$ è descritto dall'equazione di radiazione di Stefan-Boltzmann per un corpo opaco. Negli sviluppi successivi, allo scopo di ottenere una soluzione analitica, l'equazione di radiazione viene linearizzata, mediante sviluppo in serie troncato al primo ordine, nella forma $U \cdot (T - T_0)$ cioè nella forma dell'equazione di flusso lineare di Newton, dove si è posto $U = 4\sigma \cdot E \cdot T_0^3$ mentre la temperatura $T_0 = -70^\circ\text{C}$ è un parametro che viene imposto al modello e corrisponde alla temperatura media della tropopausa a 13 Km di altezza:

$$\underbrace{U_0 \cdot \frac{dT}{d\alpha}}_{\text{Accumulo}} + \underbrace{U \cdot (T - T_0)}_{\text{Perdita}} = \underbrace{F(\alpha, \beta, e, \delta)}_{\text{Sorgente}} \quad (A3)$$

Il valore dei parametri liberi (U_0, U) viene determinato sulla base delle isoterme di gennaio e di luglio dei due emisferi Nord e Sud della Terra, mediante un apposito procedimento matematico di identificazione dei parametri incogniti, per i due emisferi. 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.

L'inclinazione dell'asse terrestre sul piano orbitale dell'eclittica evidenzia il carattere antisimmetrico del bilancio di energia che è necessario scrivere per i due emisferi della Terra. Infatti, con riferimento alla Fig. 7, l'inclinazione dell'asse è $\delta = +23^\circ 27'$ a Nord mentre a Sud il suo valore è opposto $\delta = -23^\circ 27'$. Si

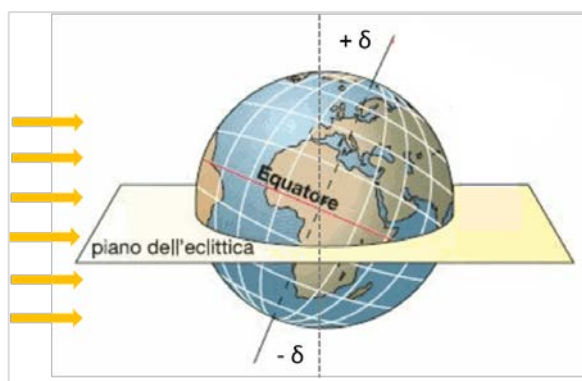


Fig.7 - Inclinazione dell'asse terrestre sul piano dell'eclittica al solstizio d'inverno

scriverranno, pertanto, due bilanci di energia e due soluzioni analitiche del modello. Le due soluzioni si scrivono come somma di una componente infinitesima (per $\alpha \rightarrow \infty$) periodica che dipende dalla condizione iniziale (A2) 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. Per ciascuna delle due equazioni di bilancio, i parametri di calcolo delle rispettive soluzioni [2] sono raccolti nella Tab.1.

Chimica & Ambiente

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

Fattori ambientali troposferici			Fattori orbitali astronomici		
T_0 ; °C	-70		β_0	-0,22362	
φ	0,633		e	+0,0167	
F_0 ; W/m ²	1361,25		$a_0=(1-e^2)^2$	+0,999442	
			$b_0=e^2$	+0,000279	
			$a_1=2e$	+0,0334	
			$b_2=-2/\pi(1-2/\pi)\delta^2$	-0,038751	
	Emisfero Nord	Emisfero Sud		Emisfero Nord	Emisfero Sud
U ; W/(m ² ·°C)	5,007202	5,041994	δ	+0,40928	-0,40928
U_0 ; W/(m ² ·°C)	5,336667	4,840207	$b_1=-2e(1-2/\pi)\delta$	-0,004967	+0,004967
P	0,938265	1,041690	$a_2=- (1-2/\pi)\delta$	-0,148724	+0,148724
E	0,930292	0,938145			

Bibliografia

- [1] IPCC: Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, 2019.
 [2] S. Mazzullo, *La Chimica e l'Industria*, 2012, **94**(5), 75; 2012, **94**(6), 94.
 [3] A. Berger, M.F. Loutre, *Quaternary Science Reviews*, 1991, **10**, 297.
 [4] J. Laskar, *Astronomy and Astrophysics*, 1986, **157**(1), 59.
 [5] Temperatura globale http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/