Salvatore Mazzullo
SCI Task Force ESPERA:
Ethics and Science for Environment
turi.mazzullo@libero.it

CAMBIAMENTI CLIMATICI ATTRAVERSO IL MITO, LA POESIA E LA PREISTORIA

In questo lavoro, viene sviluppato un modello di calcolo di variazione periodica millenaria del clima della Terra, mutuato dalla scala paleo climatica di Milankovitch, che tiene conto dell'energia solare incidente, dell'inclinazione dell'asse e dell'eccentricità dell'orbita durante il ciclo di precessione che comprende il tempo presente. I calcoli mettono in luce non solo l'esistenza di un optimum climatico nel 2500 a.C., ma anche di un pessimum climatico nel 15000 a.C, in accordo con le risultanze geologico-climatiche nell'emisfero boreale. Attualmente, la Terra si sta allontanando dal favorevole periodo caldo per avviarsi al punto di inflessione (stima: 3500 d.C) dopo di che entrerà nella fase fredda del ciclo di precessione.

Tracce dell'*optimum climatico* della Terra

Vorrei dare un contributo, possibilmente rasserenante, al dibattito in corso sui cambiamenti climatici, facendo ricorso a tre categorie intellettuali inconsuete: il mito, la poesia e la preistoria, con l'aiuto della geografia, della geologia e dell'astronomia. I miti greci, rivisitabili attraverso il classico omonimo di R. Graves [1], rimandano a varie età dell'uomo, in particolare all'età dell'oro. Sono sempre stato tentato dalla speranza di riuscire a stabilire se l'età dell'oro possa essere considerata, oppure no, la rielaborazione mitologica di un reale periodo storico, particolarmente felice per l'umanità, in cui c'era sovrabbondanza di beni di sussistenza. Le considerazioni che seguono, inducono a rispondere positivamente a questo quesito e a collocare l'età dell'oro dopo l'ultima glaciazione, in corrispondenza di un imprecisato (per il momento) periodo di riscaldamento del pianeta che ha generato un *optimum climatico* per la vita sulla Terra. Al riguardo, osserviamo che, in un piccolo libro del 1928 di John Maynard Keynes "Possibilità eco-

nomiche per i nostri nipoti" [6], recentemente pubblicato da Guido Rossi presso l'editore Adelphi, si trovano alcune sconcertanti considerazioni: *"…Dai tempi più remoti dei quali conserviamo traccia – diciamo, da duemila anni prima di Cristo all'inizio del Settecento – il tenore di vita medio, nelle aree civilizzate, non è cambiato di molto. Ha avuto i suoi alti e bassi, come no. Ci sono state pestilenze, carestie, guerre. Età dell'oro, anche. Ma un cambiamento come quello che abbiamo conosciuto noi, inarrestabile e brutale, l'uomo non l'aveva mai visto. Nei quattromila anni che hanno preceduto, grossomodo, il Settecento ci sono stati tutt'al più periodi migliori di altri, però migliori al cinquanta, massimo al cento per cento, non di più. Le cause di un progresso così lento, se non inesistente, si potevano ridurre a due: l'assenza di invenzioni di qualche rilievo e la mancata accumulazione di capitale. L'assenza di significative invenzioni fra la preistoria e l'era moderna è davvero sorprendente. In sostanza, quasi tutto ciò che serve alla vita dell'uomo sulla Terra esiste fin dall'alba della Storia. Il linguaggio, il fuoco, gli animali domestici, il grano, l'avena, la vite, l'ulivo, l'aratro, la ruota, il remo, la vela, il cuoio, il lino, la tela, i mattoni, la terracotta, l'oro, l'argento, il rame, lo stagno, il piombo e, ai primordi della Storia, il ferro….Sono tutte cose talmente antiche che sembrano esistere da sempre. In un momento imprecisato, prima che la Storia iniziasse – forse addirittura in uno degli intervalli di serenità che hanno preceduto l'ultima glaciazione – ci deve essere stata un'era di progresso e cambiamento simile alla nostra".*

Ho citato alla lettera una fonte così autorevole come Keynes perché, in definitiva, mi pare che questo economista sembri mettere in guardia dal considerare il mondo attuale come il *migliore dei mondi possibili*, se vogliamo mutuare questo assunto dal "Candide" di Voltaire e che avanza la congettura che nella notte dei tempi debba essere necessariamente esistita una civiltà, capace di fare invenzioni, la quale sia risultata migliore se non superiore a quella attuale. Sorge spontanea la domanda su quale possa essere stata la causa di questo straordinario sviluppo umano, prima dell'inizio della Storia. Una ragionevole risposta, di tipo economico, mutuata da un irriverente libro di Carlo Maria Cipolla: "Allegro ma non troppo" [8], è che tale sviluppo umano possa essere stato dovuto a uno straordinario sviluppo demografico, che ha preceduto l'inizio della Storia. A sua volta, lo sviluppo demografico, dato il carattere arcaico di tale civiltà, non può essere attribuito ad altro che a un accesso straordinariamente facile al cibo. Infine, le fonti di cibo facilmente accessibili, sia vegetali che animali sembrano da attribuire, quasi esclusivamente a un clima particolarmente favorevole su tutta la Terra.

Un'ulteriore traccia dell'esistenza di un *optimum* climatico ci viene dal calendario ebraico. La suddivisione in grandi epoche, secondo cui gli storici hanno diviso la storia dell'umanità è una convenzione, generalmente fondata su alcuni eventi che hanno cambiato profondamente il corso della storia. Nel mondo cristiano, l'evento di riferimento è la nascita di Cristo e i processi di datazione delle varie epoche fanno capo a tale evento, con la specificazione: avanti Cristo (a.C.) oppure dopo Cristo (d.C.) a seconda che abbiano preceduto o seguito la data della nascita di Cristo. Nel mondo occidentale, popoli di religione diversa hanno stabilito i loro calendari su altri criteri di datazione di riferimento: i Greci dalla prima Olimpiade in onore di Zeus (776 a.C.), i Romani dalla fondazione di Roma (753 a.C.), gli Arabi dall'Egira del profeta Mohammad (622 d.C.). Il calendario ebraico conta gli anni a partire dal 3760 a.C., corrispondente all'atto conclusivo della Creazione, quando, secondo l'autore ispirato della Bibbia, l'Uomo e la Donna sono posti nel giardino di Eden, il Paradiso terrestre (Gen. 2,7-23). È sorprendente come il testo biblico e la tradizione ebraica ci conducano, ancora una volta, a un periodo felice dell'Umanità, associabile all'*optimum* climatico, il cui ricordo trasfigurato potrebbe essere letto nel racconto della Genesi come il momento puntuale nel quale l'Uomo ha avuto la capacità di dare al suo bisogno di trascendenza una risposta in termini di un unico Dio [7].

Un'originale risposta al possibile legame fra riscaldamento del pianeta e sviluppo della civiltà ci è offerta dalla rilettura dei poemi omerici, Iliade e Odissea, fatto da Felice Vinci nel suo libro "Omero nel Baltico" [2]. Come è noto, i poemi omerici descrivono una società arcaica dell'età del bronzo, tradizionalmente collocata nel Mediterraneo, sebbene, sin dall'antichità, siano state osservate molte incongruenze geografiche e climatiche tra i luoghi descritti dai poemi e i luoghi di ugual nome del Mediterraneo. La sorprendente tesi di Felice Vinci è che il mondo omerico vada collocato geograficamente non nel mar Mediterraneo, come comunemente si ritiene, ma nel Mar Baltico. Per lo sviluppo di questa tesi è stato essenziale l'accertamento di un fattore climatico favorevole, un *optimum climatico,* durante il quale le regioni polari sono state prevalentemente libere dai ghiacci e il polo Nord ha costituito una sorta di mar Mediterraneo attorno al quale si è sviluppata una potente civiltà marinara. Felice Vinci osserva, nel suo libro, che l'*optimum climatico* si è concluso, piuttosto bruscamente, verso la metà del secondo millennio avanti Cristo, in corrispondenza delle migrazioni verso la Grecia degli Achei, i biondi uomini del mare che hanno creato la splendida civiltà micenea. Questa tesi affascinante, sviluppata con dovizia di particolari, scioglie brillantemente molte contraddizioni geografiche, irriducibili se si colloca la guerra di Troia nel Mediterraneo, come si fa tradizionalmente, ma perfettamente risolte se si colloca la poetica dell'Iliade e dell'Odissea nel Mar Baltico e nel Mar di Norvegia, rispettivamente. Da un punto di vista geologico, l'*optimum climatico* potrebbe collocarsi durante il lungo e favorevole periodo Atlantico Antico, Medio e Recente (durato complessivamente 3.000 anni, dal 5000 al 3000 a.C.), preceduto dal favorevole periodo Boreale (durato 1.000 anni dal 7000 al 6000 a.C.) e Pre-boreale (durato 1.000 anni, dall'8000 al 7000 a.C.), Tab. 1 [3].

La lettura del libro di Vinci permette di rivivere insieme al suo autore, il piacere di questa folgorante scoperta e a me, personalmente, ha stimolato le riflessioni di queste pagine, mutuate dalla scala paleo climatica di Milankovitch. Vedremo che è possibile stabilire una scala millenaria di variazione climatica, di carattere quantitativo, basata sul moto di precessione e adatta a scandire lo sviluppo della Civiltà dell'Uomo. Premettiamo, ora, alcune valutazioni quantitative su due moti della

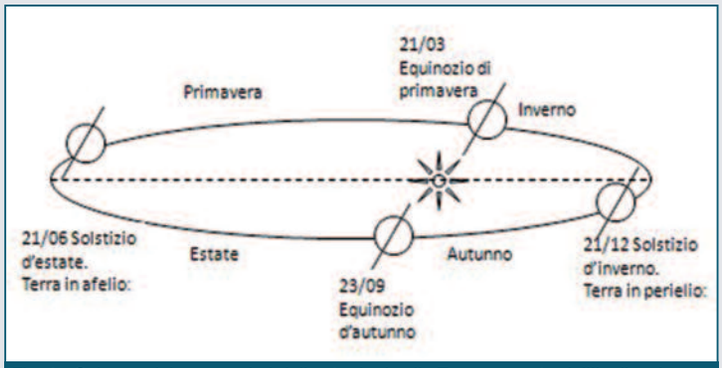


Fig. 1 - Schema del susseguirsi delle stagioni sulla Terra, causato dall'inclinazione dell'asse terrestre sul piano dell'eclittica e dal moto di rivoluzione attorno al Sole

Terra [4, 5], cui seguono le conseguenze che se ne possono trarre, lasciando tuttavia aperto il problema della individuazione delle cause dei cambiamenti climatici sulla Terra.

Moto di rivoluzione della Terra

La Terra compie un'orbita completa attorno al sole ruotando in senso antiorario, per un percorso complessivo di 940×10^6 km, ad una distanza media di 150×10^6 km dal Sole. La distanza varia da un minimo di 147×10^6 km al perielio, in corrispondenza del periodo invernale, ad un massimo di 152×10^6 km all'afelio, in corrispondenza del periodo estivo. L'asse terrestre mantiene un'inclinazione costante di 23°27' durante l'intero percorso orbitale e determina, quindi, differenti condizioni di irraggiamento e illuminazione nei due emisferi, causando l'alternarsi delle stagioni, Fig. 1. Durante il semestre freddo il circolo di illuminazione lascia all'oscuro il polo Nord, viceversa, durante il semestre caldo il polo Nord risulta prevalentemente illuminato. Solo alle date dei due equinozi, le condizioni di irraggiamento sono identiche nei due emisferi. Volendo stimare l'effetto dell'inclinazione dell'asse terrestre sulla quantità di energia solare ricevuta dalla Terra alle varie stagioni si può procedere come segue. Per comodità di calcolo, scegliamo un sistema di coordinate polari riferito alla linea di illuminazione che separa il giorno dalla notte, Fig. 2, dove, *R* è il raggio della Terra, θ è l'angolo di zenith misurato a partire dal punto di intersezione dell'equatore con la linea di illuminazione e ortogonale ad essa, ψ è l'angolo di azimuth misurato rispetto all'equatore, lungo il meridiano polare. Le considerazioni quantitative seguenti si riferiscono all'emisfero boreale, di conseguenza, l'angolo θ varia nell'intervallo $[0,\pi]$ per tutte le stagioni, mentre l'angolo di azimuth varia da ψ = 23°27' = 0,4093 sino a $\pi/2$ nel solstizio d'inverno; assume valori nell'intervallo $[0,\pi/2]$ agli equinozi e

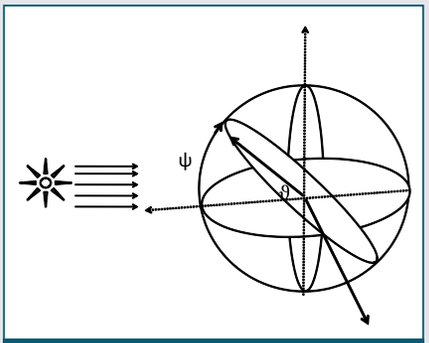


Fig. 2 - Sistema di coordinate alt-azimuthale a partire dal punto di intersezione della linea di illuminazione con l'orizzonte astronomico

varia da ψ = 23°27' sino a $\pi/2$ nel solstizio d'estate.
L'energia incidente al di sopra dell'atmosfera, il giorno d'inizio delle quattro stagioni, E_{Pri}, E_{Est}, E_{Aut}, E_{Inv} è data dall'integrale della componente normale I_N alla superficie sferica di area infinitesima dS, essendo I la radiazione incidente:

$$I_N = I\cos\psi \cdot \sin\theta$$
$$dS = (R\,d\theta)(R\sin\theta d\psi)$$
$$E_{Pri}, E_{Est}, E_{Aut}, E_{Inv} = \iint I_N\,dS = \iint I\cos\psi\, R\sin^2\theta\, d\psi\, Rd\theta$$
$$= I \cdot R^2 \int_{\psi}^{+\frac{\pi}{2}} \cos\psi\, d\psi \int_0^{\pi} \sin^2\theta\, d\theta = I \cdot R^2 \left[\sin\psi\right]_{\psi}^{+\frac{\pi}{2}} \left[\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4}\right]_0^{\pi}$$

Per effettuare dei confronti è opportuno far riferimento al suo valor medio E^m_{Pri}, E^m_{Est}, E^m_{Aut}, E^m_{Inv} sulla superficie illuminata:

$$Sil = 2R^2[+\pi/2 - \psi]$$

Si ottiene così la funzione dell'energia solare media stagionale:

$$E^m = \pi/4[l(1-\sin\psi)/(+\pi/2 - \psi)] \qquad [-23°27' < \psi < +23°27']$$

L'andamento della funzione dell'energia solare media stagionale, dis-

Tab. 1 - Schema temporale dei periodi geologico-climatici nell'emisfero boreale

Scala temporale		Periodo geologico climatico	Temperatura (+=caldo, -=freddo)	Umidità relativa	Civiltà umana
2000 d.C.		Attuale 700 anni	+++	alta	modernità
1000 d.C.	O	Subatlantico Recente 500 anni	++	media	medioevo
0 a.C.	L	Subatlantico Medio 800 anni	+++	media	Roma
1000 a.C.	O	Subatlantico Antico 500 anni	+++	alta	Etruschi
2000 a.C.	C	Subboreale 2.500 anni	++	bassa	Età ferro
3000 a.C.	E	Atlantico Recente 1000 anni	+++	bassa	Età bronzo
4000 a.C.	N	Atlantico Medio 1000 anni	++	media	eneolitico
5000 a.C.	E	Atlantico Antico 1000 anni	+	alta	neolitico
6000 a.C.		Boreale 1000 anni	++	bassa	
7000 a.C.		Preboreale 1000 anni	+	bassa	
8000 a.C.					
9000 a.C.	P	Artico Recente 1000 anni	-	alta	mesolitico
10000 a.C.	L	Oscillazione Allerod 700 anni	+	alta	
11000 a.C.	E	Artico Medio 300 anni	-	bassa	
12000 a.C.	I	Oscillazione Bolling 1000 anni	+	alta	
13000 a.C.	S	Artico Antico 2000 anni	--		paleolitico
14000 a.C.	T.	Ultimo massimo glaciale	---		superiore

ponibile al di sopra dell'atmosfera, è data dal diagramma di Fig. 3. Alle quattro differenti stagioni si ottiene così:

$$E^m_{Pri} = \frac{E_{Pri}}{Sil} = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot I_{Pri}\, R^2}{\pi \cdot R^2} = 0.500 \cdot I_{Pri}$$

$$E^m_{Est} = \frac{E_{Est}}{Sil} = \frac{2.196 \cdot I_{Est}\, R^2}{2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 0.409\right) \cdot R^2} = 0.555 \cdot I_{Est}$$

$$E^m_{Aut} = \frac{E_{Aut}}{Sil} = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot I_{Aut}\, R^2}{\pi \cdot R^2} = 0.500 \cdot I_{Aut}$$

$$E^m_{Inv} = \frac{E_{Inv}}{Sil} = \frac{0.946 \cdot I_{Inv}\, R^2}{2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 0.409\right) \cdot R^2} = 0.407 \cdot I_{Inv}$$

Notiamo che la formula di calcolo dell'energia media stagionale disponibile al di sopra dell'atmosfera terrestre è costituita di due termini: un fattore numerico stagionale costante (ottenuto come media integrale sulla superficie illuminata), dovuto all'inclinazione dell'asse terrestre sull'eclittica e un fattore intensivo dell'energia solare, determinato dalla distanza Terra-Sole e variabile in conseguenza del moto di precessione. Il fattore stagionale induce una variazione fra estate e inverno del (+11¸-19)% rispetto all'autunno e alla primavera.

Moto di precessione degli equinozi

Il fatto che le stagioni fredde si susseguano quando la Terra è in perielio, alla distanza minima dal Sole, indica che la minore o maggiore distanza dal Sole non è il principale fattore che causa l'alternarsi delle stagioni. A causa del moto di precessione, l'asse terrestre, pur mantenendo l'inclinazione costante rispetto alla verticale, ruota descrivendo un doppio cono con vertice al centro del pianeta. Il moto di precessione si completa in circa 25.800 anni. Una conseguenza del moto conico dell'asse terrestre è lo spostamento relativo delle stelle che segnano il Nord: duemila anni fa, questo punto cardinale era individuato dalla stella Thuban, che si trova a metà dello spazio compreso tra l'Orsa Maggiore e l'Orsa Minore. Fra ottomila anni il riferimento più comodo sarà la croce del Cigno e, fra diecimila anni, Vega. Un'altra conseguenza del moto di precessione è l'anticipazione dell'equinozio di primavera a un tasso medio di variazione pari a 50",256 d'arco ogni anno, [5], comprensivo dell'effetto dell'attrazione Sole-Luna e dei pianeti del sistema solare, portando così la durata del ciclo di precessione generale a:

(360°)/50",256)≈25.788 anni

Attualmente (2010 d.C.), il solstizio d'inverno ha luogo poco dopo il passaggio della Terra al perielio [4], precisamente a un angolo di 12°48'45" in direzione oraria rispetto alla linea degli apsidi, cioè della congiungente di perielio e afelio. Sulla base del moto di precessione degli equinozi, possiamo dedurre che il solstizio d'inverno ha avuto luogo esattamente al perielio nel 1092 d.C. come si ottiene andando a ritroso, da oggi, del numero di anni dati dal rapporto:

(12°48'45")/(50",256) = (46.125")/(50",256) = 918 anni

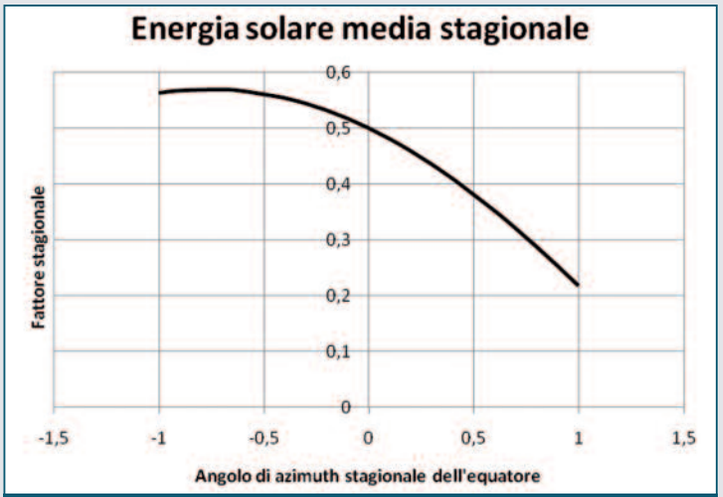


Fig. 3 - Andamento dell'energia solare media stagionale, in funzione dell'azimuth stagionale dell'equatore terrestre sul piano dell'eclittica

Da questa condizione di riferimento, possiamo andare a ritroso oppure in avanti nel tempo, per stabilire lo schema del volgere delle stagioni, sulla base del puro moto di precessione. Per comodità ci limitiamo a descrivere le quattro situazioni che competono a ogni rotazione di 90° in senso antiorario, cioè andando a ritroso nel tempo. Avendo stabilito che un ciclo completo del moto di precessione si compie in 25.788 anni, ogni 90° corrispondono a 6.447 anni; di conseguenza, la prima posizione, ruotando a ritroso di 90° corrisponde al 5355 a.C. cioè all'inizio del periodo Atlantico mentre le precedenti posizioni corrispondono al 11802 a.C., al 18249 a.C. e al 24696 a.C., come schematizzato in Fig. 4, arrotondando gli anni. È entusiasmante e anche promettente constatare che da semplici considerazioni sul moto di precessione sia emerso, immediatamente, che una particolare configurazione astronomica corrisponda alla speciale data del 5350 a.C., alla quale è associato l'inizio del climaticamente favorevole periodo Atlantico [3]. Resta ora da verificare se a questa speciale configurazione corrisponda, anche dai calcoli, una situazione climatica ottimale per la Terra.

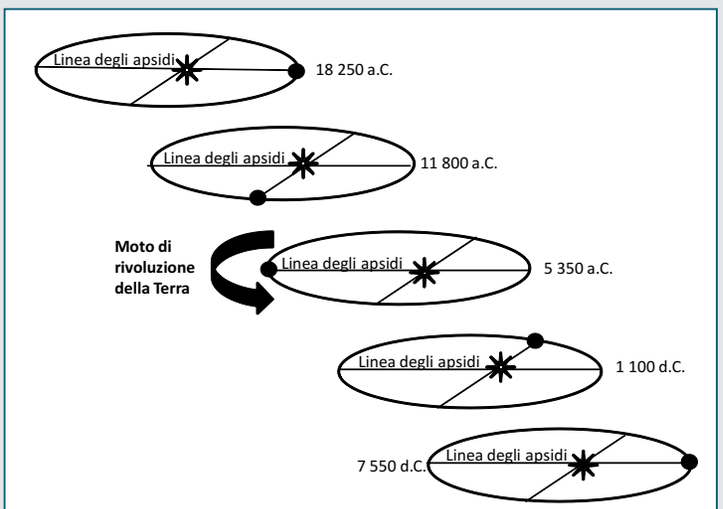


Fig. 4 - Posizione della Terra, nel piano di rivoluzione attorno al Sole, all'equinozio di primavera, in conseguenza del moto di precessione generale pari a 50",256/anno

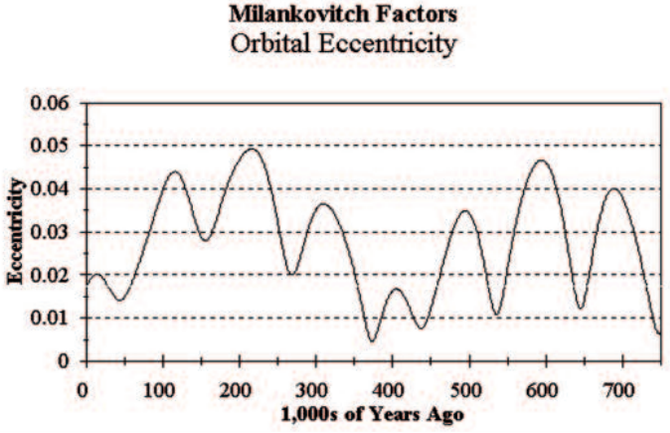


Fig. 5 - Variazione di eccentricità dell'orbita terrestre negli ultimi 750.000 anni (fonte: Berger e Loutre, 1991 [10])

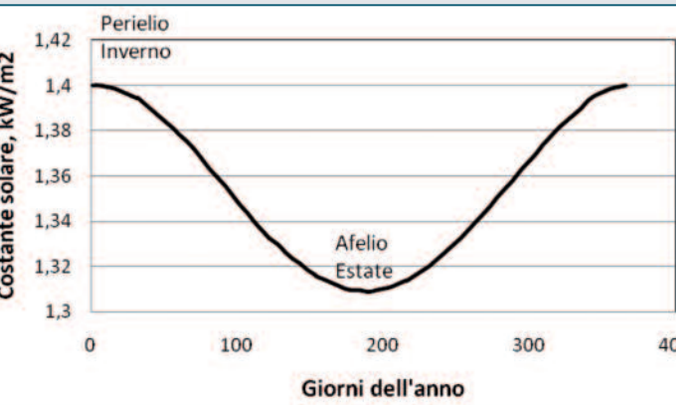
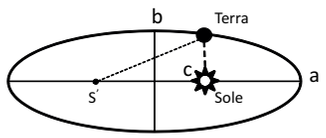


Fig. 7 - Radiazione solare al di sopra dell'atmosfera (fonte: Pollack, 1958 [9])

Eccentricità dell'orbita della Terra

Oltre che al sistema Sole-Luna, la Terra è soggetta anche alla forza di attrazione degli altri pianeti, che si manifesta con differenti modalità a seconda della posizione reciproca che essi occupano nello spazio; di conseguenza, lo schiacciamento dell'orbita non è costante. La linea curva del grafico di Fig. 5 mostra la variazione di eccentricità dell'orbita della Terra negli ultimi 750.000 anni [10-13].

Attualmente, la differenza fra la distanza all'afelio (r_1=a+c=152,55x10^6 km) e quella al perielio (r_2=a-c=147,45x10^6 km) è di 5,1x10^6 km, pari a un'eccentricità e=c/a=0,017 ma è variata da un minimo di 1,5x10^6 km a un massimo di 14x10^6 km negli ultimi 100.000 anni. Questo fatto determina una certa variazione climatica stagionale, nell'arco di tempo considerato. È infatti intuitivo comprendere che, alla massima eccentricità, con uno schiacciamento massimo di 14x10^6 km le condizioni di irraggiamento differiscono, in estate e in inverno, molto più di quando la terra percorre un'orbita, alla minima eccentricità, cui corrisponde la minima differenza fra gli assi di 1,5x10^6 km. La massima eccentricità implica, dunque, condizioni favorevoli a un sensibile sbalzo di temperatura stagionale, tanto da rendere più probabile l'inizio di una glaciazione.



a, b = asse maggiore, asse minore
r_1 = a + c; distanza afelia
r_2 = a – c; distanza perielia
e = c/a ; eccentricità
TS= a – e · c/2 distanza Terra-Sole alla quadratura

Fig. 6 - Elementi di calcolo dell'orbita terrestre

Osserviamo, dalla Fig. 5, che andando a ritroso negli ultimi 25.000 anni, l'eccentricità è gradualmente aumentata per poi ritornare ai valori attuali, come da Tab. 2 che raccoglie gli elementi dell'orbita di Fig. 6, assumendo che l'asse maggiore, a=150x10^6, sia rimasto costante.

Il Sole irradia nello spazio una quantità di energia enorme, che si propaga in tutte le direzioni. Di questa, solo una piccola frazione raggiunge la Terra e tuttavia è sufficiente ad alimentare tutti i processi dinamici dell'atmosfera e dell'idrosfera. Il calore e il mantenimento della temperatura sulla Terra sono gli effetti più evidenti dell'attività solare: il semplice oscuramento durante l'eclissi totale di Sole che si verificò nel 1961 fu sufficiente a provocare un netto calo di temperatura e un moto d'aria fredda più sconcertante del fenomeno in sé [9]. La Fig. 7 rappresenta la radiazione solare intercettata dalla superficie di 1 m^2 al di sopra dell'atmosfera terrestre, in funzione del tempo. Il valor medio della radiazione è pari a 1,354 kW/m^2.

Il rapporto fra il valore massimo, 1,400 kW/m^2, in corrispondenza del perielio (147,45x10^6 km) che si verifica in inverno il 4 gennaio e il valore minimo, 1,309 kW/m^2 in corrispondenza dell'afelio (152,55x10^6 km) che si verifica in estate, il 4 luglio è esattamente pari a:

$$\frac{1,4002}{1,3088} \approx 1,0698$$

La radiazione solare si propaga nello spazio come funzione inversa del quadrato del raggio. Infatti, posto:

$1,400=k/r^2_{perielio}$; $1,309=k/r^2_{afelio}$

risulta anche:

$r^2_{afelio}/r^2_{perielio}=(152,55/147,45)^2\approx1,0704$

Tab. 2 - Elementi di calcolo dell'orbita terrestre, nel ciclo di precessione che comprende il tempo presente

	e=c/a	TS=a(1-1/2e²) (10⁶ km)	r_1=a+c (10⁶ km)	r_2=a-c (10⁶ km)	Note
18250 a.C.	0,019	149,94	152,87	147,13	interpolato
11800 a.C.	0,020	149,94	153,00	147,00	interpolato
5350 a.C.	0,019	149,94	152,87	147,13	interpolato
1100 d.C.	0,017	149,96	152,55	147,45	interpolato
7550 d.C.	0,015	149,97	152,23	147,77	estrapolato

Tab. 3 - Intensità della radiazione solare che investe la Terra, in funzione dell'eccentricità, calcolata nelle quattro posizioni di riferimento dell'orbita (afelio, perielio e quadrature)

	e=c/a	I_{afelio}, kW/m²	I_{TS}, kW/m²	$I_{perielio}$, kW/m²	I_{TS}, kW/m²	Durata stagioni
18250 a.C.	0,019	1,3030 Autunno	1,3543 Inverno	1,4066 Primavera	1,3543 Estate	Calda=Fredda
11800 a.C.	0,020	1,3008 Inverno	1,3544 Primavera	1,4091 Estate	1,3544 Autunno	Calda<Fredda
5350 a.C.	0,019	1,3030 Primavera	1,3543 Estate	1,4066 Autunno	1,3543 Inverno	Calda=Fredda
1100 d.C.	0,017	1,3085 Estate	1,3541 Autunno	1,4005 Inverno	1,3541 Primavera	Calda>Fredda
7550 d.C.	0,015	1,3139 Autunno	1,3539 Inverno	1,3945 Primavera	1,3539 Estate	Calda=Fredda

Questo rapporto è praticamente coincidente con il rapporto sperimentale fra le costanti solari al perielio rispetto all'afelio e conferma la bontà della rappresentazione. Di conseguenza, possiamo effettuare anche una preliminare identificazione del valor medio della costante di radiazione solare:

$k_{perielio} = 1{,}4002 r^2_{perielio} = 30.442 \times 10^{12}$ MW
$k_{afelio} = 1{,}3088 r^2_{afelio} = 30.458 \times 10^{12}$ MW
$k = (k_{perielio} + k_{afelio})/2 = 30.450 \times 10^{12}$ MW

Avendo accertato che la radiazione solare si propaga nello spazio come funzione inversa del quadrato del raggio, possiamo ora stimare il rapporto fra la radiazione solare al perielio rispetto all'afelio, alle condizioni di massima eccentricità dell'orbita terrestre:

$r^2_{afelio}/r^2_{perielio} \approx [1 + (14/147{,}45)]^2 = 1{,}1989$

A causa dell'eccentricità dell'orbita, la radiazione solare all'afelio e al perielio differiscono del 7%, alle condizioni di eccentricità attuale. Tale variazione può giungere sino al 20% alle condizioni di massima eccentricità.
Ai fini di questa analisi, avendo accertato che la radiazione solare si propaga nello spazio come funzione inversa del quadrato del raggio, possiamo anche estrapolare il valore dell'intensità della radiazione solare a ritroso nel tempo, all'afelio, al perielio, in corrispondenza delle date di Tab. 3, assumendo che il valore della costante di radiazione solare sia effettivamente costante e pari a $k = 30.450 \times 10^{12}$ MW.
A conti fatti, la variazione di eccentricità degli ultimi 25.000 anni incide marginalmente (poco meno di 1%) sull'intensità della radiazione solare, calcolata nelle quattro posizioni di riferimento dell'orbita della Terra (afelio, perielio e quadrature), come si può apprezzare dalla Tab. 3.

Ricostruzione del ciclo delle stagioni sulla Terra in base al moto di precessione degli equinozi

Abbiamo ora tutti gli elementi per effettuare la ricostruzione del ciclo delle stagioni sulla Terra in termini di energia solare incidente, per la durata del ciclo di precessione che comprende il tempo presente. Come abbiamo visto precedentemente la formula di calcolo dell'energia media stagionale disponibile al di sopra dell'atmosfera terrestre è costituita di due termini:

- un fattore numerico stagionale *costante* (ottenuto come media integrale sulla superficie illuminata), dovuto all'inclinazione dell'asse terrestre sull'eclittica;
- un fattore intensivo dell'energia solare *variabile* in conseguenza del moto di precessione, determinato dalla distanza Terra-Sole, assumendo che il valore della costante di radiazione sia pari a $k = 30.450 \times 10^{12}$ MW.

I grafici di Fig. 8 mostrano l'andamento stagionale dell'energia solare incidente al di sopra dell'atmosfera, effettuando il calcolo in termini di questi due fattori.
È emozionante questo diagramma, perché apre, per la prima volta, una finestra quantitativa sul passato mostrando con chiarezza molti elementi di interesse climatico. L'energia incidente nei quattro periodi dell'anno ha carattere periodico, con lo stesso periodo di 25.800 anni. La coppia estate/inverno si presenta in opposizione di fase mentre la coppia primavera/autunno è anch'essa in opposizione di fase ma spostata di 90° rispetto alla precedente.
Per comodità di lettura, raccogliamo questi elementi nella Tab. 4 in corrispondenza dei tempi caratteristici di cui alla Fig. 4.

Tab. 4 - Valore stagionale calcolato dell'energia solare incidente, al di sopra dell'atmosfera, nel ciclo di precessione che comprende il tempo presente

	Primavera kW/m²	Estate kW/m²	Autunno kW/m²	Inverno kW/m²
18250 a.C.	0,703	0,752	0,651	0,551
11800 a.C.	0,678	0,782	0,678	0,529
5350 a.C.	0,651	0,751	0,703	0,551
1100 d.C.	0,677	0,726	0,677	0,570
7550 d.C.	0,697	0,751	0,657	0,551

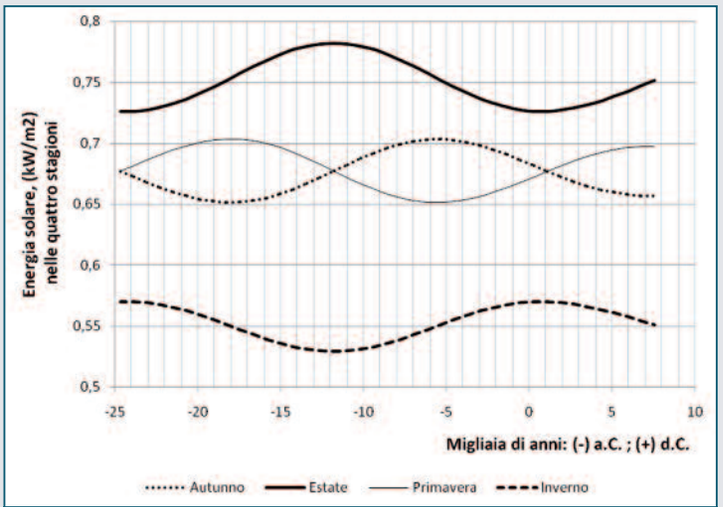


Fig. 8 - Calcolo dell'energia solare incidente al di sopra dell'atmosfera nelle quattro stagioni dell'anno, nel ciclo di precessione che comprende il tempo presente

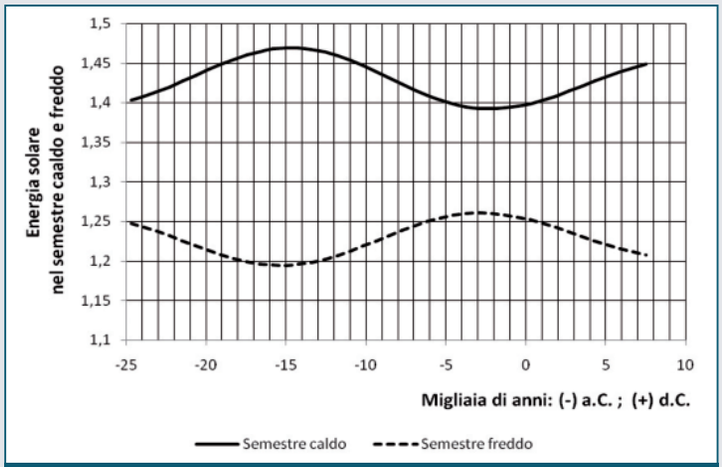


Fig. 9 - Andamento della somma delle energie nel semestre freddo autunno/inverno e nel semestre caldo primavera/estate

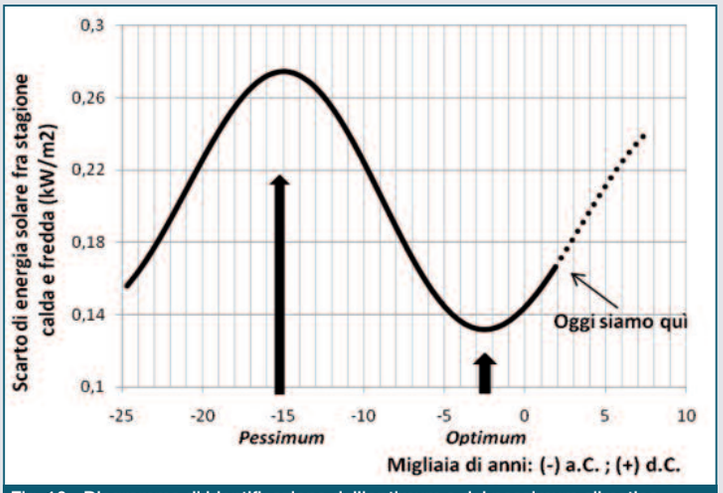


Fig. 10 - Diagramma di identificazione dell'optimum e del pessimum climatico

La colonna dell'autunno mostra un chiaro massimo di 700 W/m^2 in corrispondenza del 5350 a.C., associato al valor medio invernale di 550 W/m^2 e, in più, la coincidenza (nodo) delle due energie di primavera/autunno in corrispondenza delle quadrature, cioè, temporalmente, nel 1100 d.C. e nel 11800 a.C. e la contrapposizione (ventre) in corrispondenza degli apsidi, nel 5350 a.C. e nel 18250 a.C.

Si pone ora l'esigenza di valutare i grafici di Fig. 8 a fini climatici. A tal fine, si noti che l'atmosfera terrestre non costituisce un buon isolante termico e che l'oscuramento del Sole è immediatamente seguito da un abbassamento della temperatura. Solo l'acqua dei mari possiede una notevole capacità termica, i cui effetti, però non superano il volgere di una stagione, cioè l'arco di tre mesi. Di conseguenza, ai fini della predizione di condizioni climatiche favorevoli, l'attenzione andrà posta sulla quantità di energia che la Terra riceve durante il semestre freddo, piuttosto che durante il semestre caldo. Pertanto una semplice scala di giudizio climatico potrebbe basarsi sull'andamento della somma delle energie nel semestre freddo ed, eventualmente, nel semestre caldo, come evidenziato dalla Fig. 9.

Il semestre caldo si presenta in opposizione di fase rispetto al semestre freddo e le date alle quali hanno luogo i massimi ed i minimi si sono spostate all'indietro, in posizione intermedia fra nodo e ventre della coppia primavera/autunno. Per comodità di lettura, raccogliamo questi elementi nella Tab. 5.

La condizione di *optimum* climatico è quella che compete al valore massimo dell'energia incidente nel semestre freddo di 1,260 kW/m^2, corrispondente all'anno 2500 a.C., viceversa, la condizione di *pessimum* climatico è quella che compete al minimo di energia solare incidente nel semestre freddo di 1,190 kW/m^2 corrispondente all'anno 15000 a.C.

Più sinteticamente, possiamo basare la nostra previsione climatica sullo scarto energetico fra semestre caldo e semestre freddo (ottenuto facendo la differenza dei due) come mostrato dal grafico di Fig. 10. Un'ispezione della Fig. 10 permette di individuare immediatamente il minimo, corrispondente all'*optimum* climatico e il massimo, cui compete il *pessimum* climatico. Come si può notare dai dati raccolti in Tab. 6 lo scarto energetico fra semestre caldo e semestre freddo è molto netto e individua chiaramente due blocchi: i dati attorno allo scarto energetico massimo di ≈280 W/m^2 e i dati attorno allo scarto energetico minimo di ≈130 W/m^2. Per il criterio di valutazione climatica introdotto, ai primi compete un clima freddo e ai secondi un clima temperato, come indicato dalla colonna 5 di Tab. 6. Questa classificazione ci permette di dare, di conseguenza, anche un'ampiezza temporale ai due periodi: il freddo dal 18250 a.C. sino al 11800 a.C. con culmine (*Pessimum* climatico) nel 15000 a.C.; il temperato dal 5350 a.C. al 1100 d.C. con culmine (*Optimum* climatico) nel 2500 a.C.

Conclusione

Il risultato di questa investigazione è sintetizzato dalla Fig. 11 che colloca sul piano dell'eclittica la posizione temporale dell'*optimum* climatico (2.500 a.C.) e del *pessimum* climatico (15.000 a.C.).

Il confronto degli elementi previsionali di questo modello climatico con i

Tab. 5 - Energia solare incidente nel semestre freddo autunno/inverno e nel semestre caldo primavera/estate

	Primavera	Estate	Prim.+Est.	Autunno	Inverno	Aut.+Inv.	Posizione
	kW/m^2	kW/m^2	kW/m^2	kW/m^2	kW/m^2	kW/m^2	Equin. Prim.
18250 a.C.	0,703	0,752	1,455	0,651	0,551	1,202	apsdi
15000 a.C.	0,696	0,773	1,469	0,658	0,536	1,194	*pessimum*
11800 a.C.	0,678	0,782	1,460	0,678	0,529	1,207	quadratura
5350 a.C.	0,651	0,751	1,402	0,703	0,551	1,254	apsidi
2500 a.C.	0,660	0,732	1,392	0,695	0,565	1,260	*optimum*
1100 d.C.	0,677	0,726	1,403	0,677	0,570	1,247	quadratura
7550 d.C.	0,697	0,751	1,448	0,657	0,551	1,208	apsidi

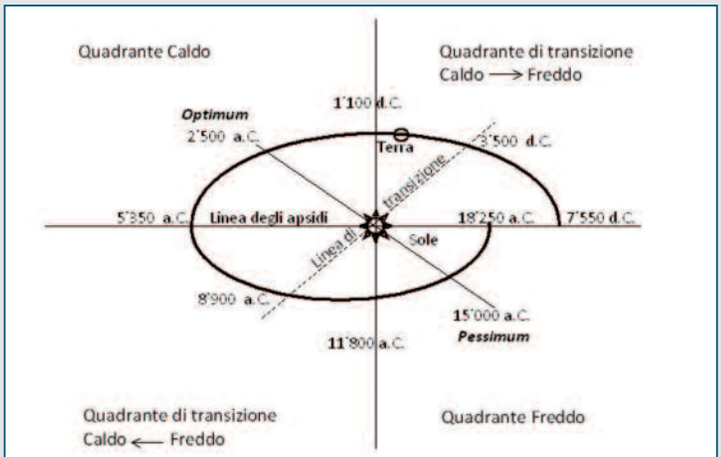


Fig. 11 - Moto di precessione dell'equinozio di primavera e posizione prevista dell'Optimum e del Pessimum climatico

dati geologico-climatici di Tab. 1, [3], genera un quadro di notevole coerenza, a partire dal remoto passato venendo verso il presente: il *pessimum* climatico, è assimilabile all'ultimo massimo glaciale del Pleistocene (14000 a.C.); la coda del Pleistocene dal 12000 a.C. al 9000 a.C. improntata a un graduale e oscillante miglioramento climatico coincide con la previsione di durata della transizione freddo→caldo. L'inizio dell'Olocene (Preboreale e Boreale) dal 8000 a.C. sino al 5000 a.C. è improntato a un netto e stabile riscaldamento, anch'esso coincidente con il superamento della linea transizione freddo→caldo (previsione: 8900 a.C.). Il cuore dell'Olocene (Atlantico Antico, Medio e Recente) dal 5000 a.C. al 3000 a.C. caratterizzato da un crescente riscaldamento identifica l'optimum climatico (previsione: 2500 a.C.). La coda dell'Olocene (Subboreale, Subatlantico Antico, Medio e Recente) dal 2000 a.C. al 1000 d.C chiude perfettamente l'ampiezza del quadrante caldo (previsione: dal 5350 a.C. al 1100 d.C.). Infine, il periodo geologico attuale, temperato, si colloca nel quadrante di transizione caldo→freddo. Più precisamente, attualmente l'equinozio di primavera avviene a poco più di un quarto di distanza angolare dalla linea di transizione caldo→freddo (previsione: 3500 d.C.). La prossima configurazione astronomica che culminerà nel 10800 d.C. darà luogo al minimo nel semestre autunno/inverno che, data la simmetria con la condizione già avvenuta del 15000 a.C., si prospetta come una condizione di clima freddo glaciale.

Tab. 6 - Energia solare incidente nel semestre caldo primavera/estate, freddo autunno/inverno e differenza fra i due semestri

	Prim.+Est.	Aut.+Inv.	Differenza (Caldo-Freddo)	Clima previsto
	kW/m²	kW/m²	kW/m²	kW/m²
18250 a.C.	1,455	1,202	0,253	freddo
15000 a.C.	1,469	1,194	0,278	*pessimum*
11800 a.C.	1,460	1,207	0,253	freddo
5350 a.C.	1,402	1,254	0,148	temperato
2500 a.C.	1,392	1,260	0,132	*optimum*
1100 d.C.	1,403	1,247	0,156	temperato
7550 d.C.	1,448	1,208	0,240	freddo

Bibliografia

[1] R. Graves, I miti greci, Longanesi & C., 1983.
[2] F. Vinci, Omero nel baltico; XVIII. L'optimum climatico e il paradiso indoeuropeo, Palombi Editori, 2008, pp. 422-462.
[3] P. Giulini, "L'evoluzione del paesaggio padano. I: La natura". Contributo al volume: Per un giardino della terra a cura di A. Pietrogrande, L.S. Olschki (Ed.), 2006, pp. 245-274.
[4] C. Mercatali, Geodinamica; Cap. 4, Geografia astronomica, pp. 365-382, Ed. Giunti Marzocco, 1990.
[5] K. Stumpff, Astronomia, Enciclopedia Feltrinelli Fischer, Feltrinelli Ed., Milano, 1971.
[6] J.M. Keynes, Possibilità economiche per i nostri nipoti, Guido Rossi (Ed.), Adelphi Edizioni, 2009, pp. 13-15.
[7] O. Van Deth, *Oreundici*, 2010, **11**, 7.
[8] C.M. Cipolla, Allegro ma non troppo, il Mulino, 1988.
[9] T.W. Norton, Gli esperimenti facili. Energia solare, Muzzio Editore, 1980.
[10] A. Berger, M.F. Loutre, *Quaternary Science Reviews,* 1991, **10**, 297.
[11] A.S. Dyke, V.K. Prest, *Geographie Physique et Quaternaire*, 1987, **41**, 237.
[12] J. Imbrie *et al.,* The orbital theory of Pleistocene Climate: support from a revised chronology of the Marine del-180 record, Contributed paper from A. Berger *et al.* (Eds.), Milankovitch and Climate, Part 1, Dordrecht, Reidel Publishing Co., 1984, pp. 269-305.
[13] G.M. Richmond, D.S. Fullerton, *Quaternary Science Reviews*, 1986, **5**, 183.

ABSTRACT

Climate Changes. Myth, Poetry and Prehistory

This paper develops a mathematical model of millennial periodic climate change of the Earth, based on the Milankovitch palaeo-climate scale. The model takes into account the incident solar energy, the inclination of the axis and the eccentricity of the orbit during the present precession cycle. According to the model there is evidence, not only of a warm climate optimum at 2500 b.C., but also of a cold climate pessimum at 15000 b.C. At present the Earth is leaving the geological favorable warm half-cycle and is approaching the turning point, after that it will enter the cold phase of the precession cycle.