

STORIA DEL CLIMA DELLA TERRA

1. Premessa

Descrivere l'evoluzione del clima della Terra nel corso della sua esistenza è cosa ben diversa dal prevederne il futuro climatico. Così come scrivere la storia della civiltà è cosa ben diversa dal prevederne l'evoluzione. L'impostazione di questa conversazione è rigorosamente fattuale e orientata alla descrizione e, ove possibile, alla spiegazione di eventi passati. Ci renderemo presto conto che il clima è determinato dall'esito del conflitto di molteplici contrastanti forze, il cui predominio è spesso determinato da cause imprevedibili. In sostanza si tratta di un sistema complesso a comportamento caotico. Può servirci, per facilitare la comprensione, un paragone con la borsa: l'andamento dell'indice di borsa è determinato dal bilanciamento di cause che inducono all'offerta e cause che inducono alla domanda, cause per lo più assai mutevoli e imprevedibili. Non è quasi mai possibile prevedere come andrà la borsa domani, ma tutti vi spiegheranno a posteriori perché è logico che sia andata così.

Lo stesso avviene di sovente in paleoclimatologia: le spiegazioni sono prevalentemente *ex post*. Ciò non toglie che si possano trarre indicazioni preziose per comprendere ciò che sta avvenendo oggi sul nostro pianeta e mettere alla prova sugli eventi del passato i modelli climatologici proposti. Vedremo che i risultati non sono molto lusinghieri e che gli eventi del passato mal si conciliano con i modelli moderni.

2. Il boom della Paleoclimatologia

La conoscenza del clima del passato è enormemente migliorata in precisione e definizione negli ultimi vent'anni. Grazie alla micropaleontologia e al decisivo miglioramento dei processi di frazionamento isotopico, si è ottenuto l'effetto di mettere a fuoco le variazioni climatiche su scale temporali molto più ridotte. Quella che sembrava una superficie liscia, con variabilità su scala di milioni di anni, oggi si è rivelata come una situazione in incessante evoluzione su scala secolare, salvo alcune eccezioni accertate ma inspiegate, come il lungo periodo caldo che ha accompagnato il regno dei dinosauri. Gli indicatori che permettono di stimare le temperature passate sono forniti essenzialmente dalla 'analisi dei frazionamenti isotopici caratteristici di alcune reazioni chimiche sia inorganiche che organiche. La temperatura a cui avvengono seleziona preferenzialmente alcuni isotopi e permette di determinare la temperatura ambientale dell'epoca di formazione dei depositi. Purtroppo, i residui del passato sono ridotti fortemente dal fenomeno planetario del riciclo della superficie. I fondali marini sono riciclati all'interno del mantello terrestre in circa 200 Milioni di anni. La crosta terrestre è soggetta ad erosione continua e a cicli di subsidenza e riemersione con nuova erosione. Il risultato è la graduale rarefazione delle rocce più antiche, intervallata da lunghi gap temporali in cui l'erosione ha prevalso ed eliminato ogni traccia. È un po' come esaminare le scatole nere dopo un disastro aereo: qualcosa si salva ma molto va perduto.

3. *L'equazione fondamentale dell'equilibrio termico planetario*

Un primo approccio schematico allo studio del clima è il calcolo del bilancio energetico del pianeta. In situazione di equilibrio l'energia ricevuta deve essere uguale all'energia emessa. L'energia ricevuta è quella intercettata dai raggi solari e che dipende dalla temperatura superficiale del sole, dal diametro del pianeta, dalla sua distanza e dal grado di assorbimento della superficie. Questa riflettività è un parametro variabile a seconda del tipo di superficie e viene chiamato "Albedo".

L'albedo è pari a 0 per un corpo perfettamente nero e pari a 1 per un corpo che riflette il 100% dei raggi incidenti, come uno specchio. Tutte le altre superfici hanno un valore di albedo compreso fra zero e 1. Ecco alcuni esempi di albedo:

Superficie	Valore di albedo tipico
Asfalto fresco	0.04 ^[2]
Oceano aperto	0.06 ^[3]
Asfalto consunto	0.12 ^[2]
Foresta di conifere (In estate)	0.08, ^[4] da 0.09 a 0.15
<u>Latifoglie</u>	0.15-0.18
Suolo libero	0.17 ^[5]
Erba verde	0.25 ^[5]
Sabbia del deserto	0.40 ^[6]
Cemento fresco	0.55 ^[5]
Ghiaccio oceanico	0.5–0.7 ^[5]
Neve fresca	0.80–0.90 ^[5]
Pianeta Terra	0,39

Quella emessa è la emissione radiativa del pianeta verso lo spazio che dipende dalla temperatura del pianeta e dal suo diametro. In assenza di atmosfera l'equazione risultante è la seguente:

$$T_{eq} = T_s(1 - \alpha)^{1/4} \sqrt{\frac{R_s}{2a}}$$

Di

La temperatura di equilibrio dipende quindi dall'energia emessa dal sole, dalla distanza del pianeta e dalla capacità di assorbimento o albedo. Per la Terra risulta una temperatura di equilibrio di -18°C. Quella effettiva media è invece di +15°C. La Terra, quindi, è più calda di come dovrebbe essere. Potremmo pensare ad altre fonti di calore.

Tab. 1 Valori assoluti e relativi al Sole della potenza fornita al pianeta Terra da diverse sorgenti di energia, calcolati integrando il flusso di radiazione su tutta la superficie terrestre

SORGENTE DI ENERGIA	ENERGIA FORNITA ALLA TERRA NELL'UNITÀ DI TEMPO	
	VALORI ASSOLUTI DI POTENZA (erg/s)	VALORI IN UNITÀ RELATIVE RISPETTO AL SOLE
Sole	$1,76 \cdot 10^{24}$	1
Luna (piena)	$3,09 \cdot 10^{19}$	$1,76 \cdot 10^{-5}$
Fulmini	$1,60 \cdot 10^{19}$	$9,09 \cdot 10^{-6}$
Luce stellare	$2,61 \cdot 10^{17}$	$1,48 \cdot 10^{-7}$
Aurora boreale	$2,53 \cdot 10^{17}$	$1,44 \cdot 10^{-7}$
Raggi cosmici	$1,63 \cdot 10^{17}$	$9,26 \cdot 10^{-8}$
Luminosità del cielo notturno	$1,12 \cdot 10^{17}$	$6,37 \cdot 10^{-8}$

L'energia proveniente dall'interno della Terra è circa un decimillesimo di quella del sole e quella prodotta artificialmente dall'uomo, circa un quaranta millesimo.

La differenza positiva di 33°C , che consente alla Terra di essere abitabile e di avere acqua allo stato liquido è dovuta al contributo dell'atmosfera tramite il famoso effetto serra.

Tutti abbiamo una diretta esperienza dell'effetto serra, proprio osservando ciò che succede dentro una serra. L'illuminazione solare fa salire la temperatura all'interno ben al di sopra della temperatura esterna e noi ne approfittiamo per crescere all'interno ortaggi o fiori anche d'inverno. Ciò si verifica per una particolare caratteristica del vetro. Esso è trasparente nella banda ottica, dove l'emissione solare raggiunge il suo massimo, ma è opaco nel campo degli infrarossi, che sono i raggi emessi dai corpi a temperatura ambiente.

Quindi in una serra l'energia è intrappolata, può entrare ma non può uscire e la temperatura si alza notevolmente. Alcuni gas atmosferici hanno comportamenti simili al vetro. In particolare, tutti i gas con molecole asimmetriche come la CO_2 , il metano e il vapore acqueo, sono opachi nell'infrarosso e trattengono calore sulla superficie della Terra. Un esempio noto a tutti, una notte nuvolosa sarà senz'altro più calda di una notte limpida e serena, perché il vapore acqueo delle nubi funziona da coperta.

Il modello che tratta tutte le componenti che influiscono sulla temperatura planetaria è molto complesso, ma ci basti sapere che ogni variazione scatena una serie di conseguenze con effetto spesso contrastante. Immaginiamo ad esempio che per qualche causa (è successo assai spesso nel passato), la temperatura dell'oceano si alzi.

L'anidride carbonica in esso disciolta viene liberata in atmosfera forzando un ulteriore aumento e così pure aumenterà l'evaporazione che contribuirà all'aumento dell'effetto serra. Allo stesso tempo aumenterà la copertura nuvolosa che aumenterà l'albedo, respingendo nello spazio una quota maggiore della radiazione solare e aumenteranno le piogge che laveranno via la CO_2 producendo carbonati e riducendo l'effetto serra. Sono dunque quattro effetti diametralmente opposti. Quale tendenza prevarrà? È impossibile

dirlo. È come prevedere l'esito di una partita di calcio fra due formazioni di uguale abilità. A volte è un piccolo evento casuale che sposta l'equilibrio e nella storia del clima si riscontrano evoluzioni contrapposte. In ogni caso la Terra, a differenza di Venere e di Marte ha sempre trovato, a volte anche assai bruscamente, un nuovo equilibrio, che anche nei casi più estremi, che ha consentito alla vita (non tutta) di sopravvivere. Prima di addentrarci nell'esame del passato può essere interessante ricordare alcuni dei fattori che hanno alterato profondamente l'equilibrio climatico del pianeta: frazionamento o raggruppamento dei continenti, super-eruzioni vulcaniche, ossigenazione del pianeta da parte delle alghe, presenza o assenza di terre emerse ai poli, velocità della circolazione oceanica ecc.

Rispondendo a questi stimoli il pianeta si è per lo più assestato in incessanti oscillazioni attorno a due grandi scenari: La Terra calda e la Terra Ghiacciaia. Noi viviamo in un periodo che dura da 30 milioni di anni di Terra Ghiacciaia, e particolarmente in un periodo interglaciale, non molto caldo e sicuramente non in una fase di squilibrio.

Il clima terrestre, anche nel brevissimo arco della storia oscilla continuamente. Abbiamo avuto crisi climatiche intorno all'anno mille avanti Cristo, poi il periodo caldo romano, il freddo dell'alto medioevo e il caldo del basso medioevo, la piccola era glaciale del Seicento e settecento e così via.

4. Il clima primigenio

Fino a pochi anni fa non sapevamo assolutamente nulla del clima dei primi quattro miliardi di anni della Terra. Innanzitutto, non ci sono praticamente fossili. I primi resti giunti fino a noi sono quelli della fauna di Ediacara, che risalgono a 630 milioni di anni fa.

Recentemente con nuovi strumenti si sono scoperti impronte, pur sempre rarissime, di organismi monocellulari. Ci si deve perciò basare unicamente sui depositi inorganici, cioè rocciosi. Non bastasse, 4 miliardi di anni sono molti per un pianeta dinamico come la Terra. Il fondo del mare viene completamente rinnovato ogni 200 milioni di anni e la superficie terrestre è soggetta continuamente ad erosione, sprofondamento e riemersione. Il risultato è che i reperti sono sempre più rari a mano a mano che ci inoltriamo nel passato e che ci sono centinaia di milioni di anni completamente perduti. È come avere qualche migliaio di fotogrammi di un film, per di più addensati nella parte finale. Da quei pochi fotogrammi persone acute possono ricavare interessanti informazioni, ma anche decine di storie assai diverse e tutte compatibili con ciò che i fotogrammi rimasti mostrano.

Sulla base di queste avvertenze si può capire come mai fino a circa un miliardo di anni fa siamo riusciti solamente a stabilire se faceva caldo o freddo e perché certi cambiamenti sono avvenuti, ma assai poco di più.

4.1 Il clima nell'Adeano (4600-4000 milioni di anni fa)

L'Adeano prende il nome dall'Inferno pagano: Ade. Convenzionalmente abbraccia i primi 600 milioni di anni del nostro pianeta. Quel periodo di iniziale formazione della Terra ha lasciato tracce indelebili e ha posto le fondamenta per l'abitabilità della Terra. La collisione planetaria che ha dato origine alla Luna dopo 50 milioni d'anni ha prodotto effetti permanenti: ha spazzato l'atmosfera primigenia costituita di Elio e Idrogeno,

sostituendola con gas emessi dalle profondità della Terra, come vapore acqueo, metano, anidride carbonica e azoto. Ha inoltre inclinato l'asse rotatorio della Terra, originando le stagioni e stabilizzato l'orientamento con l'effetto giroscopico rappresentato dalla Luna. Di quel periodo non ci è rimasto alcun residuo tranne alcuni cristalli di Zircone che hanno potuto essere datati a 4,3 miliardi di anni fa. La storia di questi zirconi è straordinaria. Si sono formati all'interno di camini vulcanici, che dovevano essere assai più frequenti allora, a una profondità di alcuni chilometri. La composizione isotopica dell'ossigeno contenuto dimostra che il magma da cui provengono era ricco di acqua, il che fa pensare che già ci fossero gli oceani. Il sistema vulcanico di cui facevano parte ha subito lentamente un'erosione e i cristalli sono stati dilavati da piogge in fiumi. In un'ansa di questo fiume, fossilizzata e riemersa recentemente nel deserto australiano, datata a tre miliardi di anni fa, gli zirconi sono riemersi e ci hanno raccontato la storia di una Terra già ricoperta di oceani, anzi, essendo ancora assai calda, la crosta non aveva sufficiente rigidità per sostenere corrugamenti dell'altezza necessaria per emergere dall'acqua. Nel frattempo, il continuo bombardamento della superficie da parte di planetesimi anche assai grossi fece probabilmente evaporare e riconsolidare molte volte gli oceani. Non si può quindi parlare ancora di un vero e proprio clima in questo periodo.

4.2 Il clima nell'Archeano (4000-2500 milioni di anni fa)

L'inizio dell'Archeano coincide con la fine dell'"ultimo grande bombardamento" (meteorico), le cui cicatrici vediamo ancora ogni notte sulla faccia della Luna e probabilmente dovuto a una risonanza destabilizzante fra le orbite dei due pianeti maggiori: Giove e Saturno. Circa 3500 milioni di anni fa, nelle rocce più antiche di cui disponiamo ci sono le prime tracce di vita monocellulare sotto forma di colonie di alghe, già ben sviluppate e organizzate. È lecito pensare che la vita sia comparsa almeno 100 o 200 milioni di anni prima. Il tipo di vita ricorda da vicino i batteri ipertermofili che troviamo oggi nelle fonti termali. Ciò fa presupporre che l'ambiente fosse costituito da oceani molto caldi, con temperature superiori ai 50°C. Per altre vie sappiamo che il mantello terrestre era allora almeno 200°C più caldo e notevolmente più plastico. Questo fatto ha permesso l'avvio della tettonica a zolle e la formazione graduale degli scudi continentali. Una delle istantanee che ci sono giunte da quel lontano passato, porta però i segni inconfondibili di una glaciazione. Questi segni, che compaiono qui e là in tutta la storia della Terra sono sostanzialmente di due tipi: la presenza di agglomerati di tipo morenico e cioè ghiaia e massi accumulati disordinatamente e le tipiche striature da sfregamento delle rocce sottostanti ai ghiacciai. Di alcune rocce sudafricane, databili a 2900 milioni di anni fa, sono evidenti le origini glaciali. E poiché giacciono sopra uno strato di sedimenti marini, si può dedurre che i ghiacciai fossero penetrati in mare aperto, scavando il fondo marino sottostante. Potrebbe essere stata la prima glaciazione globale. In mancanza di altre evidenze, non sappiamo quanto sia durata, né perché sia avvenuta. Una possibile spiegazione ha a che fare col mistero del sole debole. Dalla conoscenza del ciclo di vita delle stelle, sappiamo che il Sole a quell'epoca emanava solo il 75% della energia che emana oggi. Si suppone che un effetto serra assai potente abbia compensato la carenza di calore solare. Ricordiamo che l'atmosfera era assolutamente priva di ossigeno, quindi altri

gas serra importanti, che oggi vengono distrutti dall'ossigeno atmosferico, come il metano e l'ammoniaca, persistevano per milioni di anni e si accumulavano. Inoltre, l'atmosfera era probabilmente molto più densa di oggi, poiché la tettonica a zolle non aveva ancora assorbito nel mantello la maggior parte dell'anidride carbonica. Sono solo ipotesi, ma è chiaro che una riduzione dell'effetto serra per cause planetarie (giganteschi impatti o erosione atmosferica) potrebbe avere causato una glaciazione. Vedremo invece che per la successiva abbiamo le idee abbastanza chiare.

4.3 Il clima nel proterozoico (2500- 542 milioni di anni fa)

Nonostante si tratti del più lungo periodo convenzionalmente definito, della durata incredibile di 2000 milioni di anni, esso è, dopo un inizio spettacolare, particolarmente privo di eventi, tanto da comprendere in esso il cosiddetto "miliardo (di anni) noioso".

Abbiamo parlato di inizio spettacolare ed infatti si sono verificati due eventi, che lasciano sospettare una stretta correlazione fra di loro.

Partiamo da quella che sembra la causa: dopo circa due miliardi di anni, qualcosa sulla Terra scopre la fotosintesi clorofilliana. In che cosa consiste: si tratta di una reazione chimica: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{energia solare} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2$ probabilmente la più importante al mondo. Utilizzando anidride carbonica, acqua e raggi solari viene prodotto ossigeno e cellulosa. I batteri hanno imparato a replicare sfruttando l'energia solare. Il processo è molto più efficiente delle reazioni di estrazione dell'energia dall'ambiente e utilizza ciò che c'è di più abbondante. La scoperta ha un enorme successo, ma ha conseguenze catastrofiche sulla biosfera e sull'atmosfera. La prima conseguenza è che viene rilasciato Ossigeno libero. L'ossigeno è uno dei gas più aggressivi che ci siano e si combina praticamente con tutto. La combustione è causata dall'ossigeno, e così la ruggine. L'arrivo dell'ossigeno stermina tutti i batteri fino ad allora presenti (teniamo presente l'acqua ossigenata come disinfettante) e inoltre si combina con tutto, in particolare con il metano in atmosfera distruggendolo. Avviene la cosiddetta catastrofe dell'ossigeno: solo poche specie batteriche sopravvivono, ma si moltiplicano a dismisura. Per centinaia di milioni di anni l'ossigeno in eccedenza si combina con il Ferro disciolto negli oceani producendo ossido di Ferro, insolubile che precipita sul fondo marino. Ancora oggi tutto il Ferro che noi utilizziamo proviene da quei giacimenti. Dopo aver consumato tutto il Ferro oceanico l'ossigeno entra in atmosfera e distrugge il metano. Abbiamo quindi il consumo o addirittura la distruzione di due potenti gas serra: l'anidride carbonica e il metano. L'effetto è anche qui catastrofico e la temperatura della Terra precipita dando origine a due distinti periodi di Terra Palla di Neve, cioè interamente ghiacciata.

Viene un primo assaggio con la glaciazione Huroniana, all'inizio del periodo proterozoico. Ma 200 Milioni di anni dopo la Terra entra in un periodo super glaciale della durata di oltre 100 milioni di anni. La glaciazione di Makganyene arresta tutti i progressi in atto. Nel frattempo, l'ossigeno raggiunge anche l'alta atmosfera e comincia a produrre lo strato di Ozono (Molecola con 3 atomi di Ossigeno invece di 2), che schermava da allora in poi le terre emerse dagli effetti micidiali dei raggi UV solari. Terminata la grande glaciazione per un miliardo di anni sembra non succedere niente, ma in realtà è come se si stesse caricando una molla che avrebbe fatto più tardi esplodere la vita. La sparizione del Ferro aveva posto un grosso problema agli organismi viventi: essi si erano sviluppati in

oceano ricco di Ferro e avevano imparato a utilizzarlo per “digerire” l’azoto, molecola assai pigra. Sparito il Ferro lo sviluppo della vita incontrò un potente freno ambientale.

Ci volle quel miliardo di anni perché’ la vita imparasse ad usare altri elementi come il Manganese e perché’ il dilavamento dei continenti arricchisse a sufficienza gli oceani di questi elementi. Nel frattempo, erano comparse le cellule moderne, le cellule moderne dotate di nucleo e di riproduzione sessuata. Tutto era pronto per l’esplosione della vita che stava maturando da quasi quattro miliardi di anni. Ma come era cominciato con una catastrofe, così il proterozoico finì con un’altra immane catastrofe, che giunse a un passo brevissimo dalla sterilizzazione totale del pianeta.

4.3.1 Terra Palla di Neve

Abbiamo già incontrato alcune volte questa definizione. Al di là degli indizi risalenti alla grande ossigenazione, per oltre 1 miliardo e mezzo di anni non ci sono segni di alcuna glaciazione. È ipotizzabile che il clima si sia mantenuto caldo per lunghissimo tempo. Verso la fine del periodo proterozoico erano in corso due interessanti sviluppi. I continenti del globo formavano un unico continente chiamato Rodinia. Dal punto di vista biologico le cellule evolute dotate di nucleo stavano prendendo il sopravvento per la loro superiore organizzazione e adattabilità e deducendo dall’ orologio biologico di esseri vissuti in seguito, si può dedurre che dovevano esistere i primi organismi multicellulari, probabilmente simile alle attuali spugne e amebe.

Improvvisamente, da un punto di vista geologico, fra 800 e 700 milioni di anni fa, il clima della Terra si raffreddò bruscamente. Ciò portò alla formazione di estese calotte glaciali. Osserviamo che se la terra viene interamente ricoperta di ghiaccio, l’albedo sale da 0,39 a 0,90 e di conseguenza la temperatura di equilibrio scende di circa 70°C. Si è calcolato che se le masse glaciali scendono sotto il 30° parallelo, un ulteriore raffreddamento è inarrestabile e porta alla cosiddetta Terra Palla di Neve cioè una Terra ghiacciata dai Poli all’ equatore. In effetti i resti geologici dell’epoca mostrano segni di imponenti glaciazioni in tutti i continenti, inclusi quelli che allora si trovavano nei pressi dell’equatore. Il fenomeno, ormai generalmente accettato, pone due grandi interrogativi, privi di risposte pienamente soddisfacenti. Innanzitutto, cosa può aver scatenato questo squilibrio estremo e poi, come se né potuti uscire. Diciamo subito che non c’è consenso unanime su cosa abbia provocato la catastrofe. Un’ ipotesi, preferita dai più, è che la causa scatenante sia stata la rottura del supercontinente Rodinia. La frattura continentale porta una accelerazione dei processi di erosione e velocizza l’asportazione della CO₂ mediante l’aumento della circolazione atmosferica e delle piogge. Una volta innescata, la glaciazione sarebbe stata inarrestabile. Purtroppo, applicando i moderni modelli climatologici, anche ricorrendo a ipotesi estreme, non si riesce a riprodurre la Terra Palla di Neve. Gli scenari più spinti vedono un calo delle temperature medie di circa 15°C, assolutamente insufficiente per scatenare il fenomeno. Manchiamo quindi di una spiegazione soddisfacente. Di fatto la temperatura si abbassò di circa 70°C. A quel punto tutti i processi atmosferici si arrestarono: mancando l’evaporazione degli oceani, sparirono le nuvole e ogni tipo di precipitazione. Un enorme deserto ghiacciato. La Terra sfiorò il punto di non ritorno: l’anidride carbonica ghiaccia a -78°C. Se ciò fosse avvenuto l’era super glaciale non sarebbe mai finita. Siamo più fortunati nella comprensione del

meccanismo di uscita dalla glaciazione. Infatti, sopra i tipici depositi glaciali ci sono enormi sedimenti di calcare, tipici di temperature elevate. Ecco l'indizio risolutivo.

Abbiamo detto che l'attività meteorologica si era completamente arrestata, ma non così l'attività tettonica e vulcanica. I vulcani continuavano ad emettere nell'atmosfera polveri e anidride carbonica, che nessun processo poteva eliminare dall'atmosfera. Nel corso di milioni di anni, l'anidride carbonica raggiunse livelli anche di cento volte superiori agli attuali e la polvere, ricadendo sulla neve, gradatamente ridusse l'albedo. In assenza di nuvole si può stimare che l'albedo sia sceso da 0,9 a 0,2. Questo porterebbe la temperatura di equilibrio a +50°C. L'enorme riscaldamento provocò uno scioglimento rapidissimo dei ghiacci con un effetto a catena inarrestabile. Abbiamo prove che il clima si risvegliò in modo estremamente violento con tempeste e piogge eccezionali per centinaia di migliaia di anni. L'effetto erosivo fu estremo e originò gli spessi strati di calcare. Ma la Terra non ritrovò l'equilibrio climatico. Le tremende tempeste dilavarono nuovamente l'anidride carbonica e ritorno l'era glaciale e tutto questo per ben tre volte.

Contrariamente alla logica, la vita sopravvisse, non sappiamo come, anzi negli intervalli fra le glaciazioni, l'abbondanza di nutrienti dilavati negli oceani favorì un'esplosione di vita che moltiplicò per dieci la quantità di ossigeno in atmosfera portandolo ai livelli attuali. Una enorme frana sottomarina avvenuta 630 milioni di anni fa ci apre una finestra su un mondo sorprendente e meraviglioso. La frana gigantesca seppellì in pochi secondi un intero habitat oceanico e il miracolo fu che preservò perfettamente i corpi di organismi "medusoidi" gelatinosi, che in nessun altro modo avrebbero potuto conservarsi.

Una nuova e ultima glaciazione incombeva e con essa sia la fine del lungo periodo proterozoico, sia la scomparsa della fauna di Ediacara, un tentativo fallito di colonizzazione del pianeta. Anche quest'ultima glaciazione fece la sua strage distruggendo la fauna di Ediacara. La successiva istantanea del mondo preistorico ci proietta a 542 milioni di anni fa: il clima dopo 250 milioni di anni di pazzie si è finalmente stabilizzato. L'ambiente marino ci appare improvvisamente popolato da una nuova generazione di animali, dotati per lo più di esoscheletro. Finalmente i fossili sono facilmente identificabili. Siamo entrati nel Cambriano, il primo periodo del paleozoico.

4.4 Il clima nel paleozoico (542-252 milioni di anni fa)

La paleoclimatologia assume caratteri completamente diversi a partire dal periodo Paleozoico. Si arricchiscono notevolmente gli indizi e le informazioni celati nelle rocce e nei reperti fossili, oltre ad aumentare in modo sostanziale gli strati sopravvissuti alle vicissitudini della evoluzione terrestre.

Il primo cambiamento radicale è dato dalla comparsa di animali dotati di parti dure resistenti alla fossilizzazione. Dall'analisi dei fossili marini si può determinare con una certa accuratezza, non solo la temperatura degli oceani ma anche il loro gradiente termico e la velocità di circolazione e di rimescolamento.

Dopo gli animali marini, circa 470 milioni di anni fa sono comparse le prime piante terrestri, che hanno cominciato a colonizzare i continenti, aumentando in modo considerevole la produzione di ossigeno e il consumo di anidride carbonica. Il combinato di

maggior ossigeno e formazione dello strato di ozono ha favorito lo “sbarco” degli animali, primi fra tutti insetti e anfibi.

Il lungo periodo paleozoico vide un’alternanza di lunghi periodi caldi, privi di ghiacci, interrotti da due intense serie di glaciazioni. Non tali però da rigenerare Terra Palla di Neve. Infatti, entrambe le serie non sono seguite dalla cataclismatica deposizione di carbonati dovuti allo scioglimento veloce e catastrofico dei ghiacci.

Il paleozoico comunque termina con la piu’ grande estinzione di massa della storia della terra concentrata nell’ arco di soli 60.000 anni. Vedremo che, secondo l’interpretazione piu’ recente, le estinzioni furono dovute a uno sconvolgimento chimico e termico globale innescato dalle gigantesche eruzioni siberiane.

4.4.1 Terra tropicale e terra glaciale e picchi ipertermici

L’ analisi dell’andamento del clima degli ultimi 500 milioni di anni consente di identificare, pur nella grande varietà di condizioni, due stati fondamentali del clima della terra: uno stato tropicale e uno stato glaciale. All’ interno di questi stati sono esistite continue fluttuazioni, ma di minore rilevanza e non tali da alterare il clima prevalente. Fanno eccezioni almeno tre picchi detti ipertermici” di intenso riscaldamento globale di brevissima durata che però possono essere assai indicativi per aiutarci a modellare il nostro futuro climatico.

Le Terra tropicale ha dominato per molto piu’ tempo, ma da trenta milioni di anni siamo entrati in un periodo di terra glaciale. Esaminiamone piu’ in dettaglio le caratteristiche.

4.4.2 Terra Tropicale

I periodi tropicali sono stati caratterizzati da una assai diversa distribuzione delle fasce climatiche. Mentre la temperatura ai tropici era di poco superiore alla attuale, il clima ai poli era temperato con medie fino a 40°C superiori alle attuali e che comportavano estati tiepide e inverni senza gelo. Non vi erano calotte polari e gli oceani avevano un livello superiore all’ attuale di circa 200 metri, dando origine a vastissime aree oceaniche a bassa profondità. L’ anidride carbonica in atmosfera era assai piu’ abbondante di quanto non sia oggi. Si stima che nel cambriano potesse essere stata da 20 a 30 volte superiore alla concentrazione attuale. Gli oceani erano caldi, ma la differenza piu’ marcata era la mancanza di gradiente termico. Oggi, al di sotto di una fascia superficiale che si riscalda in funzione dell’insolazione, la temperatura degli oceani varia tra i 2 e i 5 °C. Vi è quindi un importante gradiente termico, che da origine a un massiccio rimescolamento delle acque oceaniche. Nei periodi di Terra tropicale, la mancanza di gradiente impediva il rimescolamento e in particolare il trasporto dell’ossigeno alle acque profonde. I depositi sedimentari certificano l’anossia delle profondità per la presenza di abbondanti fossili delle acque superficiali, che si sono depositati indisturbati, mentre spicca l’assenza di tracce animali sui fondali, come tracce o tane. Complessivamente il clima tropicale è stato preponderante negli ultimi 500 milioni di anni coprendo circa l’80% del tempo.

4.4.3 Terra glaciale

I passaggi da regime tropicale a regime glaciale sono stati in genere repentini su scala geologica e dovuti a cause globali non sempre identificate. Il primo effetto della Terra glaciale è normalmente la formazione di calotte di ghiaccio a uno o entrambi i poli, a cui corrisponde un contemporaneo ritiro degli oceani e un aumento delle terre emerse.

Questo ha portato ad ampie lacune negli strati geologici precedenti le glaciazioni, perché le terre messe a nudo dagli oceani sono state oggetto di ampie erosioni, lasciando ampie discontinuità nella successione stratigrafica

I periodi glaciali sono caratterizzati da una estrema variabilità con molteplici avanzate e ritiri dei ghiacci e ampie fluttuazioni delle quantità di gas serra in atmosfera.

Gli oceani mostrano un importante gradiente termico e una notevole velocità di circolazione e rimescolamento che porta ad una ossigenazione abbondante dei fondali marini. La composizione dei depositi di fondo è perciò assai differente da quella della terra tropicale, perché c'è abbondanza di fossili di profondità, ma scarsità di quelli di superficie che, una volta morti, venivano eliminati prima di raggiungere il fondo.

4.4.4 Picchi ipertermici

In alcuni periodi di Terra Tropicale si sono verificati periodi di instabilità che hanno provocato per periodi geologicamente brevi (da 100.000 a qualche milione di anni) incrementi sensibili della temperatura anche di 10-20°C che su scala globale significa un'alterazione completa dell'ecosistema. In questi periodi la concentrazione di CO₂ è stata anche di 100 volte superiore a quella attuale, al di là di quanto si potrebbe ottenere bruciando oggi tutte le riserve fossili conosciute. Questi periodi sono oggi di grande interesse perché potrebbero essere di utile insegnamento nello studio delle interazioni climatiche. La scintilla di queste instabilità è stata per lo più identificata in gigantesche eruzioni vulcaniche di estensione continentale che hanno riversato in atmosfera quantità inimmaginabili di gas serra. Analizzeremo in particolare il PETM (Permian-Triassic mass extinction) che ha causato la più grande estinzione di massa conosciuta, con la sparizione di oltre il 90% delle specie viventi sia animali che vegetali. Occorre osservare peraltro che non vi è un nesso biunivoco fra estinzioni di massa e picchi ipertermici, in quanto la maggior parte delle estinzioni di massa sono dovute a periodi glaciali e di converso solo un picco, quello PT, ha dato origine a un'estinzione se pur la più massiccia.

4.5 Mega-alteranti climatici

Si potrebbe avere l'impressione, dal dibattito politico-scientifico attuale, che il principale driver dei cambiamenti climatici sia l'effetto serra e in particolare la concentrazione di CO₂ atmosferica. Su scala geologica non è così. La CO₂, pur rivestendo un ruolo importante nei cicli climatici è storicamente stata un "follower", cioè ha subito e manifestato i contraccolpi globali dovuti ad altre cause, le più diverse nel corso della storia della Terra. Ritornando alla equazione che determina la temperatura di equilibrio della Terra:

$$T_{eq} = T_s(1 - \alpha)^{1/4} \sqrt{\frac{R_s}{2a}}$$

Possiamo osservare che, a parte il raggio del sole, di cui ci è ignota l'evoluzione nel tempo, tutti gli altri parametri hanno subito importanti modificazioni.

In base alle nostre conoscenze di fisica stellare sappiamo che il Sole è oggi circa il 30% più caldo che all'inizio del sistema solare. Allo stesso tempo l'albedo terrestre è aumentata gradatamente con l'estensione delle terre emerse ed è entrata poi in una fase oscillatoria con la comparsa della vita terrestre. Anche la distanza della Terra dal Sole ha variazioni cicliche ben studiate (cicli di Milankovic) che causano variazioni cicliche e ricorrenti del clima. A ciò si aggiungono altri importantissimi agenti:

- L'erosione superficiale delle terre emerse
- Il riversamento negli oceani dei carbonati dilavati
- Il loro deposito sui fondali
- L'incorporazione nel mantello per subduzione
- Il sequestro di carbonio nella struttura degli esseri viventi
- La sostituzione di CO₂ con O₂ da parte dei vegetali
- Il discioglimento nelle acque oceaniche dei gas atmosferici
- Il sequestro delle strutture organiche dei depositi fossili (carbone, petrolio ecc.)
- Le LIP (Large igneous Province) sia continentali che oceaniche, cioè le zone oggetto di colossali emissioni di lava
- Le eruzioni vulcaniche con emissione sia di gas serra che di particolato
- La presenza di continenti nelle zone polari

Geologicamente possiamo descrivere la linea evolutiva del clima terrestre, come un clima prevalentemente caldo, probabilmente caldissimo per i primi due miliardi di anni.

Un brusco abbassamento con intense glaciazioni quando emerse la fotosintesi clorofilliana e la conseguente catastrofe dell'ossigeno. La tettonica a zolle con il continuo rimescolamento delle terre emerse ha portato a diverse fasi di consolidamento e frazionamento delle terre emerse a cui hanno corrisposto variazioni del clima. In generale i supercontinenti determinano climi più caldi e aridi e una riduzione delle precipitazioni, mentre il frazionamento vede climi più freddi per maggior dilavaggio di CO₂ atmosferica e habitat più estesi per la vita marina. Alla fine del proterozoico, la frantumazione di Rodinia, con il proliferare di alghe e forte incremento di ossigeno ha portato alla Terra Palla di Neve del periodo Cryogeniano.

4.6 Il clima nel primo Paleozoico (542-444 milioni di anni fa)

Dopo le glaciazioni del Cryogeniano le terre emerse si raggrupparono in due supercontinenti: Gondwana e Laurentia. Il clima tornò caldo e stabile, favorendo la cosiddetta esplosione del Cambriano. Alla fine del Cambriano ci fu una estinzione di massa ma non ci sono evidenze di alcuna particolare fluttuazione del clima e tuttora le sue cause sono ignote. Verso la fine del periodo successivo: l'Ordoviciano, la Terra attraversò alcune brevi intense glaciazioni che portarono alla seconda più grande estinzione di massa della

storia. Le ragioni del sopravvento delle glaciazioni non sono state stabilite con certezza. Vi sono due ipotesi sul tavolo e forse hanno entrambe avuto un ruolo. La prima è che Gondwana sia passato sopra il polo Sud. L' interno del continente si sarebbe raffreddato abbastanza da originare la formazione di una estesa calotta polare. La seconda ipotesi è che lo sviluppo di vegetazione terrestre, iniziato una ventina di milioni di anni prima abbia aumentato grandemente la produzione di ossigeno e il consumo di CO₂. Nei fatti però la CO₂ era a livelli molto alti, circa 10 volte quelli attuali, come peraltro per quasi tutta la storia della Terra. Occorre notare che gli attuali livelli di CO₂ atmosferica sono i più bassi mai osservati in tutta la storia geologica, solamente avvicinati durante la glaciazione del carbonifero-Permiano. In buona sostanza sia la glaciazione ordoviciana che la contemporanea estinzione non hanno al momento spiegazioni soddisfacenti.

4.7 Il clima nel Paleozoico medio (444-360 Milioni di anni fa) il livello del mare

Dopo le misteriose glaciazioni dell'Ordoviciano, il clima si ristabilì e divenne gradatamente sempre più caldo. I ghiacci sparirono completamente e il livello del mare toccò un nuovo massimo sommergendo immense pianure costiere. È nel devoniano che si svilupparono le enormi foreste e l'ambiente umido tropicale che erroneamente in passato e nell'immagine collettiva si attribuiva al Carbonifero. La temperatura media toccò i 30°C e il clima tropicale si estese fino alle latitudini più elevate. L'enorme produzione vegetale cominciò ad intaccare la concentrazione di CO₂ e verso la fine del periodo ci fu un relativo raffrescamento.

4.8 Il clima nel Paleozoico tardo (360-251 milioni di anni fa)

Contrariamente alla credenza, il carbonifero fu un periodo di intense glaciazioni. Enormi quantità di CO₂ furono assorbite da una flora rigogliosa ed estesa anche in altezza con alberi imponenti. Hanno origine in questo periodo gli immensi depositi di carbone a cui attingiamo oggi. La CO₂ si ridusse a livelli appena superiori a quelli odierni. Queste sono state le più lunghe glaciazioni dell'epoca recente e hanno avuto una durata di almeno 80 milioni di anni. 280 milioni di anni fa la Terra uscì dalle glaciazioni e conobbe di nuovo un periodo di clima tropicale, arido in questo caso. Su una situazione già di caldo elevato si innestò un picco ipertermico, il più intenso e prolungato che conosciamo, che provocò la più grande estinzione di massa della storia: il 95 % delle specie viventi si estinse e per quasi 10 milioni di anni terra e mari furono distese desolate popolate solo da poche specie sopravvissute alla catastrofe. Per riportare flora e fauna a livello di diffusione e varietà precedenti ci vorranno 40 milioni di anni. Una vera devastazione. Ma quale ne fu la causa? Anche se non c'è unanimità, la maggior parte degli scienziati attribuisce la causa alle immense eruzioni siberiane che attraverso una reazione a catena avrebbero portato la terra al limite dell'abitabilità

4.9 PTME (251 Milioni di anni fa) una catastrofe immane

251 milioni di anni fa la crosta continentale siberiana si aprì in una serie di bocche vulcaniche che eruttarono per centinaia di milioni di anni circa 4 milioni di Km³ di lava su una superficie di oltre 2 milioni di Km². Sono state identificate una trentina di LIP nel corso degli ultimi 500 milioni di anni, ma l'eruzione siberiana è di gran lunga la più gigantesca. Per la sua peculiarità è stata studiata a fondo e oggi abbiamo un quadro abbastanza accettato del suo sviluppo.

Premettiamo che il clima si trovava già in uno stato di relativo surriscaldamento con temperature medie intorno ai 30°C. Ci sono due ipotesi sulla origine scatenante delle eruzioni: una prima ipotesi, minoritaria, associa l'inizio alla caduta di un grosso meteorite in Antartide dove è stato scoperto un cratere da impatto di circa 600Km di diametro, molto più grande di quello della estinzione dei dinosauri. La datazione però è assai incerta e i depositi fossili fanno propendere per un diverso andamento in fasi successive.

Per altri fu questo impatto a squarciare la crosta terrestre agli antipodi e cioè in Siberia dando origine alle eruzioni. Altri infine ritengono che queste eruzioni siano ricorrenti e funzione dell'emersioni di gigantesche gocce di mantello caldo con periodicità di 26 milioni di anni, periodo caratteristico delle estinzioni di massa più o meno estese.

In ogni caso la causa è ignota. Il Permiano, che aveva visto così grandi sviluppi e la colonizzazione della terraferma da parte di flora e fauna si concluse con la più grande estinzione di massa di cui abbiamo traccia.

Si stima che il 96% delle specie marine e il 70% di quelle terrestri andarono estinte inclusa l'estinzione, unico caso, di grandi famiglie di insetti.

I primi quattro milioni di anni del Triassico, l'era che seguì, sono praticamente privi di vita. Ho avuto la fortuna di vedere di persona l'effetto al Grand Canyon dell'Arizona. Proprio sul bordo del Canyon, sotto i piedi dei turisti ignari, si svolge una faglia. Fra la destra e la sinistra della faglia intercorrono parecchi milioni di anni. A destra la roccia è ricca di fossili marini, a sinistra non c'è nulla, il mare era diventato completamente disabitato.

Quali le cause? Non c'è accordo fra gli studiosi e le teorie sono le più varie e di varia plausibilità. Quello che è certo è che le creature marine soffrirono molto di più delle terrestri.

Il che fa pensare a qualcosa che abbia sconvolto l'equilibrio chimico degli oceani.

Forse una acidificazione spinta dovuta a grandi eruzioni vulcaniche. Tutti gli animali a conchiglia e le barriere coralline sarebbero scomparsi distruggendo la catena alimentare.

Forse un fenomeno anossico per l'eccessivo riscaldamento del pianeta.

Di fatto nel passaggio dal Permiano al Triassico il rapporto C12 C13 si alza del 9 per mille, segno inequivocabile di una drastica riduzione della massa vivente e un grande aumento di funghi, sintomo di grande abbondanza di animali e piante morti.

Un altro indizio di ciò che avvenne è il cambiamento del corso dei fiumi da meandri, sintomo di rigogliosa vegetazione a fiumara, sintomo di desertificazione.

Altro indizio, l'assenza di depositi di carbone e il cambiamento di colore dei depositi abissali, da rosso a grigio, a nero.

Quali le conclusioni: forse la risposta nelle rocce della Groenlandia. Qui si leggono gli 80.000 di durata del Great Dying passo passo.

Passo 1) La grande eruzione siberiana: un tappeto di lava grande come mezza Europa e

spesso 3 km ricopre la Siberia. I vulcani emisero grandi quantità di acido solfidrico e anidride carbonica. Si formarono piogge molto acide che nel giro di 40.000 distrussero la vegetazione terrestre e tutto l'ecosistema animale che se ne cibava, L' anidride carbonica provocò un rialzo termico stimato in 7/8 gradi con completa desertificazione dei continenti. L' acidità a poco a poco alterò la neutralità dell'acqua di mare, sciogliendo i carbonati e quindi tutte le conchiglie e i coralli. La fauna marina in circa 4000 anni venne devastata, da qui il primo picco di Carbonio12. Ma una seconda piaga stava per arrivare. La scomparsa di alghe e vegetazione smise di assorbire anidride carbonica. La temperatura continuò ad aumentare fino a far liberare il metano organico intrappolato nel fondo degli oceani. Il metano ha due caratteristiche letali, si combina facilmente con l'ossigeno ed è forse il più potente dei gas che causano l'effetto serra. La liberazione del metano, di origina organica, mise in circolazione una grande quantità di C12, che ancora oggi registriamo, distrusse enormi quantità di ossigeno, cominciando col rendere anossici gli oceani (da qui il cambio di colore dei sedimenti) e uccidendo quasi tutta la fauna e flora marina sia di superficie che di profondità'.

Non solo, una volta nell' atmosfera ridusse l'ossigeno dal 30% al 15% causando una stress enorme all' ecosistema e contemporaneamente innalzando la temperatura di altri 10 gradi. La terraferma divenne rapidamente un bollente deserto circondato da un caldo oceano a circa 50 gradi altrettanto deserto.

Con tutto ciò, la vita sopravvisse. La catastrofe fu così grande che fu presa come limite fra due ere: Paleozoico e Mesozoico.

Il primo periodo del Mesozoico è il Triassico. Per i primi milioni di anni i fossili sono estremamente rari e appartengono a un numero molto limitato di specie sopravvissute. Questi fossili sono chiamati: specie Lazzaro o specie Disastro. Inizialmente prendono possesso del pianeta, quasi ormai disabitato. Poi a poco a poco altre specie si sviluppano e lì equilibrio naturale si ristabilisce.

Gli scienziati ritengono che ci siano voluti da 10 a 30 milioni di anni per ripopolare i mari e quasi 100 milioni per tornare alla stessa ricchezza di varietà'-

Ma proprio questa nuova rinascita della vita inventa nuove forme sia animale che vegetali. Durante il triassico comparvero i primi dinosauri e i primi mammiferi.

Mentre per la vegetazione fecero la comparsa le angiosperme, le piante più diffuse oggi.

Il permiano era stato dominato da rettili anche di grandi dimensioni, ma del tipo lucertoloide, con gambe sporgenti dai lati ed estensione del corpo orizzontale.

Quasi tutti si estinsero fatta salvo alcune specie Lazzaro. Le poche specie rimaste occuparono velocemente il pianeta.

4.10 Il clima nel mesozoico: l'era dei dinosauri (251-65 milioni di anni fa)

Il Triassico non ebbe un buon inizio: oceani bollenti e anossici, atmosfera acida, vita quasi estinta. Ciononostante, il clima lentamente si ristabilì. Ci sono potenti agenti che agiscono a livello globale contrastando le deviazioni, per quanto grandi esse siano.

Gli scienziati ne hanno identificati tre che agiscono su diverse scale temporali:

- Nel breve termine (10000 anni), la CO2 in eccesso è assorbita dagli oceani che si acidificano e precipitano la CO2 come carbonati

- Più a lungo termine (10000- 1 milione di anni) il riscaldamento aumenta l'evaporazione e l'intensità dei fenomeni atmosferici, che combinati con l'ambiente acido dilava via sia la CO₂ atmosferica, sia le rocce carbonatiche
- Infine, l'aumento di nutrienti dilavati negli oceani provocò un'esplosione di microrganismi marini con guscio di carbonato, sequestrando imponenti quantità di Carbonio

Di fatto i periodi di picco termico conosciuti hanno avuto, tranne il P-T, durata relativamente breve. La Terra sa il fatto suo.

Quasi come reazione alle mattane climatiche della fine del Paleozoico, il Mesozoico fu un lungo periodo di oltre 200 milioni di anni di relativamente stabile Terra Tropicale, con temperature medie nei 20°C e oceani caldi fino nelle profondità. La CO₂ in atmosfera viaggiava su livelli di circa 10 volte gli attuali. I nostri attuali modelli climatici non riescono a riprodurre il clima del mesozoico. Lo scarso gradiente termico fra poli ed equatore sia negli oceani, con conseguente blocco della circolazione termoalina, sia in atmosfera, è impossibile da riprodurre perché non si trova il modo di trasportare il calore dai tropici ai poli in assenza di questi meccanismi. Forse una imponente coperta nuvolosa, più estesa di quella attuale contribuiva, come oggi su Venere, a omogeneizzare le temperature. Occorre osservare umilmente che i modelli climatici attuali non riescono a simulare nessuna delle grandi escursioni passate, né terra palle di neve, né terra tropicale, né i periodi ipertermici, di cui non riescono a prevedere il riassorbimento. Prudenza suggerirebbe che se i modelli non riescono a predire il passato, forse meritano qualche dubbio supplementare anche per le previsioni future. Nonostante la moderazione del clima, nel Mesozoico ci furono due estinzioni di massa rilevanti: alla fine del Triassico e durante il Giurassico entrambe probabilmente dovute ad altri picchi ipertermici, rimarcati da depositi molto ricchi di carbonio, segno di un veloce rilascio di CO₂ in atmosfera seguito da un graduale riassorbimento nei depositi marini.

4.11 Cenozoico inferiore: il tramonto della Terra Tropicale (65-35 Milioni di anni fa)

Il passaggio dal Mesozoico al Cenozoico è stato drammatico. Sul mondo fiorente dei dinosauri stavano per abbattersi due colpi fa KO. Cominciarono le eruzioni vulcaniche del Deccan, in India, versione più piccola delle eruzioni siberiano che avevano causato l'estinzione del Permiano. La temperatura, già tropicale, subì un aumento di circa cinque gradi, mettendo sotto stress flora e fauna del pianeta. In questa situazione di disagio climatico, avvenne la caduta del famigerato meteorite dello Yucatan. Al confine degli strati geologici restano ancora le tracce di questa immane tragedia, testimoniata da residui di incendi su scala globale. La catastrofe biologica non fu però accompagnata se non da una intensa ma breve escursione climatica. Il clima si riprese assai presto e per altri trenta milioni di anni la Terra fu calda e priva di ghiacci. Ci furono altri tre episodi di picchi ipertermici. Di particolare rilevanza quello denominato PETM, 55 milioni di anni fa ai confini fra paleocene ed eocene. Ci fu un riscaldamento di oltre 10°C che non durò più di centomila anni. Per lo più questi picchi sono associati ad un incremento massiccio dell'attività vulcanica terrestre o sottomarina, con rilascio di abbondante CO₂ in atmosfera, fino a livelli da tre a 5 volte quelli attuali. Sullo sfondo operava da milioni di anni una

poderosa rivoluzione tettonica. Il supercontinente Pangea si era spezzato, l'oceano Atlantico si stava aprendo, grandi eruzioni facevano emergere l'Islanda e i pezzi sbandati del supercontinente collidevano come su un auto scontro generando nuove ed immense catene montagnose come le Alpi e soprattutto l'Himalaya. L' aumento dell'erosione lentamente asportava grandi quantità di Co2 dall' atmosfera. Il clima si stava lentamente raffreddando.

4.12 Tardo Cenozoico (35-5 milioni di anni fa)

Improvvisamente (in senso geologico), 35 milioni di anni fa la temperatura si abbassò di oltre 8 gradi e per la prima volta dal Carbonifero, si ricostituì la calotta glaciale antartica. Non è certa la causa, ma è opinione prevalente che essa sia dovuta allo scontro dell'India con l'Asia e al sollevamento dell'Himalaya e del Pamir. L' immensa catena, soggetta e precipitazioni intense divenne un potente distruttore di Co2. Il continente antartico, che fino ad allora aveva goduto di un clima paragonabile a quello scandinavo, formò una calotta permanente. L' aumentata albedo contribuì a un rapido decremento della temperatura. Un'altra ipotesi, non conflittuale con la precedente punta l'indice sul distacco dell'America del Sud dall' Antartide con l'apertura del canale di Drake. Si stabilì quindi una corrente circumpolare fredda che isolò l'Antartide dall' effetto mitigatore delle correnti marine provenienti dall' Equatore.

Stava tornando la Terra glaciale. Per tutto il Miocene il clima fu ancora benigno, con un ulteriore ultimo riscaldamento in corrispondenza di due super-eruzioni nel continente americano. L' artico era ancora libero dai ghiacci, ma la temperatura globale scendeva lentamente ma stabilmente

4.12 L'era glaciale attuale

Fino a circa 3 milioni di anni fa il clima si mantenne relativamente caldo, di circa 2-3 °C superiore all' attuale. Non c'era ancora una calotta artica permanente e i livelli di Co2 erano simili a quelli previsti per la fine del secolo, cioè circa 400ppm. C'era già la corrente del Golfo e la circolazione pacifica del Nino e la conformazione dei continenti poco diversa dalla attuale. Essendoci meno ghiacci. Il livello del mare era di circa 20 metri più alto dell'attuale. Tutte queste caratteristiche hanno appuntato l'attenzione degli scienziati su questo periodo geologico perché straordinariamente prossimo a quello che potrebbe essere il nostro mondo nei prossimi 50/100 anni. L' abbassamento del livello di Co2 continuava però inesorabile e circa 3 milioni di anni fa superò il limite oltre il quale si la calotta sulla Groenlandia e sul mar glaciale artico divenne permanente. L' aumento dell'albedo contribuì a un ulteriore raffreddamento facendo entrare la Terra nella corrente era glaciale. A mano a mano che esaminiamo epoche più ravvicinate cresce il dettaglio delle informazioni che otteniamo. La climatologia classica aveva identificato quattro fasi glaciali denominate: Gunz, Mindel, Riss, Wurm. Il progresso recente delle analisi dei residui delle glaciazioni e in particolare i carotaggi delle calotte antartica e groenlandese hanno completamente rivoluzionato la nostra conoscenza delle variazioni climatiche. I dati antartici ci danno con precisione il clima dell'ultimo milione di anni, la Groenlandia una storia puntuale del clima degli ultimi 120.000 anni e i depositi lacustri, degli ultimi 50.000.

Appare immediatamente evidente che vi sono due trend distinti, uno a breve termine con ampie oscillazioni seghettate di tutti i parametri rilevanti: temperatura, concentrazione di Co₂, umidità del clima e uno a lungo termine come una tendenza di fondo che ha visto un progressivo raffreddamento globale.

Rianalizzando i depositi più antichi, fino all'Eocene e al Cretaceo, si riscontrò traccia evidente di continue oscillazioni del clima analoghe a quelle glaciali, sia con Terra Tropicale che con Terra Glaciale. Le oscillazioni mostrano inoltre una regolarità impressionante come se la Terra avesse un respiro climatico con cicli di decine di migliaia di anni. La persistenza in condizioni endogene diversissime faceva pensare ad una forzante esogena. Pensando a ciò non si può fare a meno di pensare al Sole. Che il Sole abbia dei cicli è noto. V'è un ben noto ciclo undecennale legato alle macchie solari e cicli non confermati, di durata secolare con massimi e minimi dell'attività, ma l'analisi isotopica del recente passato non conferma cicli solari in sincrono con le oscillazioni climatiche. Ma un grande scienziato serbo, agli albori della paleoclimatologia, sviluppò una teoria che oggi, dopo un periodo di abbandono, ha ripreso grande credito.

4.12.1 I cicli di Milankovic

Ricordando la equazione dell'equilibrio termico, portiamo in evidenza un fattore che finora abbiamo dato per scontato e cioè la distanza della Terra dal Sole. Non abbiamo motivi di supporre che tale distanza sia variata in modo apprezzabile dalla formazione della Terra. Ma analizzando meglio il moto orbitale scopriamo ben quattro variazioni cicliche dei suoi parametri. Tutti conosciamo la precessione degli equinozi che ha un ciclo di 26000 anni.

Oltre a ciò, l'inclinazione dell'asse orbitale oscilla fra 22° e 24,5° con periodo di 41.000 anni. L'orbita della Terra, come tutti i pianeti, è ellittica. La sua eccentricità, pur piccola, varia di oltre 10 volte con periodo di 100.000 anni. Queste tre oscillazioni combinate fanno sì che ciclicamente l'energia solare raggiunga gli emisferi terrestri con intensità e durata variabili. Il grafico risultante combacia in modo molto soddisfacente col grafico delle temperature. Si è quindi identificato un fattore esogeno che è alla base delle continue mutazioni climatiche attorno a una tendenza di fondo più generale. Una sorpresa secondaria ma importante osservata con queste analisi, è che i cicli di riscaldamento iniziano prima dell'aumento di concentrazione di Co₂. Quindi, nell'epoca pre-antropica, è il riscaldamento a causare l'aumento della Co₂ e non viceversa, almeno come impulso iniziale. Naturalmente, più espandiamo la scala temporale, più le oscillazioni esogene predominano sulla tendenza di fondo. Se poi espandiamo la scala ancora di più, si possono notare oscillazioni ancora più ravvicinate su scala di millenni o addirittura di centinaia di anni.

4.12.2 Gli ultimi 50.000 anni

Sulla scala di centinaia di migliaia di anni i cicli di Milankovic sono ancora chiaramente riconoscibili, ma se passiamo a una scala di decine di migliaia di anni, altri cicli prendono rilevanza. Le caratteristiche di questi picchi sono repentini aumenti di temperatura seguiti da più lenti raffreddamenti con una periodicità di circa 1500 anni. Essendo possibile il confronto con il clima antartico si osserva che le variazioni sono

invertite.

Si pensa che a seguito di riscaldamenti veloci, anche di pochi anni, le calotte si spezzassero e finendo nell' Atlantico interrompessero la circolazione termoalina e la Corrente del Golfo. Come conseguenza si produceva una grandissima quantità di iceberg che raffreddavano tutta la parte nord del pianeta. In pratica un' interruzione ciclica della Corrente del Golfo, che deviava verso l' antartico la calda corrente marina.

L' ultimo di questi eventi, chiamato Younger Dryas, è stato piu' violento di tutti i precedenti e ha ributtato la Terra in una breve nuova era glaciale. In questo caso il raffreddamento è stato quasi immediato, essendo avvenuto in meno di tre anni. Gli scienziati ritengono di avere trovato il colpevole. Ci sono evidenze che a Sud della baia di Hudson in Canada si sia formato un lago, il lago Agassiz, piu' grande del mar Caspio e contenete piu' acqua dolce di tutti i laghi odierni messi insieme. La barriera di ghiacci che lo separava dall' Oceano sarebbe crollata dando origine ad un' alluvione biblica, che provocò l' innalzamento dei mari di circa 5 metri e addolcimento delle acque artiche con arresto della corrente del golfo per circa 3000 anni. Da allora il clima si è evoluto in modo completamente diverso. Il riscaldamento si è consolidato e gli ultimi 10.000 anni hanno visto una stabilità senza precedenti. Le oscillazioni, pur esistenti sono state minime rispetto al passato e, soprattutto, negli ultimi 5000 anni non c'è stata alcuna variazione dei livelli marini, consentendo le formazioni di amplissimi delta fluviali, come quelli del Bangladesh, del Nilo, del Mekong, del Mississippi e del Po.

5. Uno sguardo d' insieme sugli ultimi 300 milioni di anni.

Dopo la glaciazione del carbonifero la Terra ha avuto un lunghissimo periodo di clima tropicale durante il quale si sono manifestati surriscaldamenti, alcuni dei quali dalle conseguenze catastrofiche. La causa fu per lo piu' dovuta a gigantesche eruzioni di magma durate milioni di anni in varie parti del pianeta. Il pianeta ha sempre recuperato in tempi geologicamente rapidi e ha vissuto un periodo straordinariamente favorevole alle specie viventi. Anche il disastroso incontro con il meteorite che causò l' estinzione dei dinosauri, fu riassorbito in fretta. I mammiferi trovarono terreno fertile per espandersi e prendere il posto dei dinosauri. Nel frattempo, le forze geologiche spingevano il pianeta verso una prolungata fase glaciale. La rottura di Pangea e il sorgere di grandi catene montuose come effetto degli scontri continentali, gradualmente deprivò l' atmosfera di anidride carbonica, finche' le estati antartiche non furono piu' sufficienti a sciogliere il ghiaccio invernale e si ricostituì una calotta glaciale permanente. Per altri 30 milioni di anni il clima restò mite, ma non resistette alla comparsa di una calotta polare artica. La Terra scivolò in una intensa era glaciale in cui si trova tuttora. Pur trovandoci in un intervallo interglaciale, noi stiamo vivendo in un periodo freddo.

6. Il riscaldamento globale futuro: segnali dal passato

Raramente la terra ha avuto una calotta glaciale e ancora piu' raramente due. Gli oceani sono sempre stati assai piu' caldi. Non avremmo quindi motivo di temere un aumento della temperatura. Pur astenendoci dal dibattito su cause ed entità del riscaldamento futuro possiamo fare alcune considerazioni valide in ogni caso.

- C'è da temere l'effetto Venere e cioè un aumento esponenziale incontrollabile? È altamente improbabile. La Terra ha avuto in passato concentrazioni di Co2 anche 100 volte superiori alle attuali ed è riuscita a riassorbirle. Il ciclo naturale del carbonio sta funzionando normalmente e per di più partiamo da una situazione di terra fredda. La capacità termica degli oceani è assolutamente sottoutilizzata.
- Quali sono gli effetti negativi del riscaldamento globale? In primo luogo, il cambio delle condizioni presenti da molto in molte parti del pianeta. Abbiamo visto che il riscaldamento non tocca quasi i tropici, ma riscalda molto le zone artiche con conseguente scioglimento dei ghiacci. Un effetto indiscutibile sarà l'innalzamento del livello degli oceani. Per tutto il periodo di Terra Tropicale il livello degli oceani era di circa 200 metri più elevato. Immaginate quanta parte di terre emerse sparirebbe, che esodi biblici, quante città perdute, Un fenomeno mai visto da che l'uomo ha raggiunto la civiltà.
- Inoltre, più caldo, più nuvole, più precipitazioni, più scambio termico fenomeni più violenti.
- Possibile cambio di alisei e monsoni. Zone aride diventano fertili e zone fertili diventano aride
- Sarebbe allora preferibile un raffreddamento?
- Nossignore, darebbe altrettanto se non più temibile. La fascia temperata diventerebbe più arida, espansione dei deserti, interrimento di tutti i porti del mondo. Perdita di abitabilità ad alte latitudini.

Noi siamo nati e abbiamo colonizzato il pianeta con questo clima. Le pur piccole variazioni storiche del clima hanno portato carestie, fame e guerre, con milioni di morti. È prevedibile che variazioni più marcate portino conseguenze ancora più catastrofiche.

Considerato che stiamo consumando in pochi secoli energie fossili prodotte in centinaia di milioni di anni dalla Terra e sicuramente non rinnovabili, è comunque interesse vitale della nostra civiltà trovare un approvvigionamento energetico interamente rinnovabile.

Ci sono due possibilità: l'energia solare sfruttabile in tutte le sue forme e l'energia solare prodotta sulla terra in reattori a fusione (progetto ITER). La transizione non è una scelta, perché petrolio, carbone e gas finiranno e comunque costerà moltissimo. Ma se verrà troppo ritardata non potrà avvenire in modo ordinato e globalmente coordinato e il suo costo potrebbe essere insostenibile.

