



3. *Cosa sappiamo del clima del passato*

Si deve al Granduca di Toscana Ferdinando II de' Medici il merito di aver fondato nel 1654 la prima stazione meteorologica, che ha raccolto misure della temperatura di un luogo al variare delle stagioni. La stazione era collocata nel centro di Firenze, nel Monastero degli Angeli. In pochi anni l'esempio è stato seguito da altre stazioni in Toscana (Cutigliano e Vallombrosa), in Italia (Bologna, Parma e Milano) e in Europa (Innsbruck, Osnabrück, Parigi e Varsavia) che hanno realizzato la prima rete di osservazioni meteorologiche. Le misure delle diverse stazioni venivano regolarmente inviate all'Accademia del Cimento di Firenze che le raccoglieva. Purtroppo nel 1670, con la morte di Ferdinando II, questa iniziativa si interrompe e bisogna aspettare molti anni prima che si facciano nuovamente misure sistematiche e si creino reti di osservazione coordinate.

Misure continuative, che arrivano fino ai giorni nostri, sono disponibili solo a partire dalla seconda metà dell'800, e sono di difficile utilizzo perché non sono sempre rappresentative delle condizioni medie di un luogo, e sono state effettuate con strumenti diversi, ognuno con le sue calibrazioni e i suoi piccoli errori. Se vogliamo capire il clima del passato dobbiamo ricorrere a informazioni complementari e utilizzare i segni che gli eventi climatici hanno lasciato: i così detti dati «proxy».

Nei prossimi paragrafi vedremo quali sono i dati proxy utilizzati e quale quadro questi concorrono a delineare.

Come si misura il clima del passato

Un esempio classico di proxy è fornito dall'analisi degli anelli degli alberi (dendrologia). In generale, un anno caldo e piovoso che ha favorito la crescita dell'albero lascerà come segno un anello di maggiore spessore. Pertanto lo spessore dell'anello è un proxy della temperatura dell'anno, ma l'esistenza di molteplici fattori che possono influenzare la crescita dell'albero rende la sola misura dello spessore insufficiente a determinare in modo sicuro la quantità ricercata. È questo un carattere ricorrente delle informazioni fornite dai proxy: una sola misura lascia spazio a grandi incertezze.

Nel caso degli anelli degli alberi si può andare oltre la misura dello spessore e caratterizzare i processi della crescita del legno con altre analisi sulla densità del materiale e sulle abbondanze relative degli isotopi (v. box 4) di alcuni atomi coinvolti in questi processi, quali idrogeno e ossigeno che compongono l'acqua.

Box 4. Isotopo

Atomi dello stesso elemento chimico hanno un ugual numero di protoni, ma possono averne un diverso numero di neutroni. Il numero totale dei protoni e dei neutroni presenti nel nucleo di un atomo (detto «numero dei nucleoni») ne determina il peso atomico. Gli isotopi sono atomi dello stesso elemento chimico che hanno diverso numero di nucleoni. In chimica il numero di nucleoni di un atomo è indicato con un numero posto in alto a sinistra rispetto alla sigla dell'elemento. Poiché l'ossigeno possiede sempre 8 protoni, l'¹⁶O possiede 8 neutroni e l'¹⁸O ne possiede 10.

L'acqua è direttamente coinvolta nella caratterizzazione dei processi termici dell'atmosfera. L'evaporazione, la condensazione e la solidificazione dell'acqua sono processi che avvengono a temperature diverse per molecole d'acqua che hanno peso diverso.

In media il peso molecolare dell'acqua è una quantità costante, ma in realtà, a livello microscopico, può cambiare a causa della presenza di un isotopo in uno dei suoi due costituenti: un atomo di deuterio al posto di un idrogeno o un atomo di ^{18}O al posto dell'ossigeno ^{16}O . Molecole che contengono un isotopo hanno pertanto un peso molecolare diverso e possono essere favorite o sfavorite nei cambiamenti di fase, così che la temperatura provoca una raccolta selettiva di alcune componenti isotopiche che diventano un importantissimo proxy della temperatura stessa.

Il rapporto isotopico dell'ossigeno e dell'idrogeno non è utilizzato solo per l'analisi degli anelli degli alberi. Ogniqualevolta si ha un accumulo stratificato di acqua (come nel ghiaccio formato dalle precipitazioni nevose) o di materia organica (anche questa contenente i residui dell'acqua che l'ha formata) o di composti minerali che contengono acqua, possiamo fare un'analisi della composizione isotopica al variare della profondità della stratificazione e questa operazione, detta «stratigrafia isotopica» (la famosa tecnica sviluppata da Cesare Emiliani, di cui abbiamo parlato nell'introduzione), ci fornisce un proxy della temperatura. Emiliani aveva applicato questo metodo ai sedimenti oceanici; nel caso dei continenti, analoga informazione è fornita dai sedimenti lacustri e da quelli dei ghiacciai. Come vedremo nei prossimi paragrafi, sono molto importanti i carotaggi dei ghiacciai presenti nelle calotte polari, dove, grazie alla grande profondità della sedimentazione, si possono osservare con un'ottima risoluzione strati risalenti a centinaia di migliaia di anni fa. Proxy che possono spingersi più lontano nel tempo, anche se con cattiva risoluzione temporale, sono infine forniti dalle formazioni minerali come le stalattiti e le stalagmiti.

Per la scala temporale da associare alle variazioni osservate nei carotaggi, oltre al conteggio degli strati annuali, possibile solo per le formazioni che hanno carattere ciclico, e al riferimento temporale fornito da alcuni eventi macroscopici, come le grandi eruzioni vulcaniche o i grossi meteoriti, che appaiono in quasi tutte le sedimentazioni, torna a essere importante l'analisi iso-

topica. In questo caso non si usano le diverse proprietà fisiche degli isotopi, ma il loro decadimento radioattivo. Il metodo di datazione più noto è quello che utilizza l'isotopo di carbonio con peso atomico 14: ^{14}C .

Il ^{14}C è formato nell'alta atmosfera terrestre dai neutroni che raggiungono la Terra con i raggi cosmici: il neutrone penetra in un atomo di azoto e gli fa perdere un protone. La perdita di un protone cambia la natura dell'atomo di azoto e lo trasforma in un atomo di carbonio con lo stesso peso atomico (14) dell'azoto, dato che con lo scambio neutrone-protone non cambia il peso atomico. Il ^{14}C è un isotopo radioattivo (cioè instabile) e, con un tempo di vita media di circa 5.700 anni, decade, per l'emissione di una particella beta che trasforma un neutrone in un protone, e torna a essere un atomo di azoto. Il rimescolamento atmosferico mantiene costante la concentrazione del ^{14}C che si forma e decade con uguale velocità, ma nel caso di materiale organico sottratto all'equilibrio atmosferico il decadimento radiativo non è più compensato dal processo di formazione e la concentrazione si riduce gradualmente nel tempo. La misura di quanto si è ridotta la concentrazione di ^{14}C è utilizzata per determinare l'età del campione. Anche altri isotopi possono essere usati per la datazione radiometrica e consentono di esplorare scale temporali diverse. Chiaramente l'applicabilità di un metodo dipende dalla composizione del campione a disposizione e dalla sua età.

In generale è compito del geologo determinarne la datazione, eventualmente utilizzando, oltre alla datazione isotopica, l'analisi dei processi che hanno portato alla formazione del sedimento. Su questa base interviene poi il paleoclimatologo per ricostruire le condizioni climatiche che si sono verificate a quel tempo.

Sebbene i singoli proxy, per la complessità dei processi che hanno portato alla loro formazione, siano inevitabilmente poco affidabili, l'insieme delle numerose osservazioni esistenti ci fornisce importanti opportunità di validazione e calibrazione incrociata, oltre a un'ampia copertura geografica e temporale. Abbiamo così

un quadro abbastanza preciso di come è cambiato il clima in epoche lontane.

Il pianeta Terra alle origini

Si pensa che la crosta terrestre abbia cominciato a formarsi 4,37 miliardi di anni fa e che all'inizio le condizioni ambientali della superficie del pianeta abbiano subito molti cambiamenti violenti. Sono state numerose le cause: il nostro Sole ha variato la sua luminosità; il nucleo della giovane Terra era più caldo e le attività vulcaniche, molto più intense di adesso, avevano effetti devastanti sul territorio; i movimenti delle placche tettoniche hanno cambiato la disposizione delle terre emerse e la circolazione oceanica; l'impatto di meteoriti e asteroidi ha alterato il clima. Fondamentale è stata anche l'interazione con la materia vivente. La vita inizia sulla Terra 3,6 miliardi di anni fa, e 2 miliardi di anni fa si sviluppano i primi batteri capaci di compiere il processo della fotosintesi. Nell'atmosfera primordiale era molto alta la concentrazione di biossido di carbonio e mancava l'ossigeno. La fotosintesi cattura il carbonio contenuto nel biossido di carbonio e immette ossigeno in atmosfera. Lentamente ma inesorabilmente la concentrazione di biossido di carbonio diminuisce e circa 600 milioni di anni fa l'ossigeno prende il suo posto raggiungendo la concentrazione attuale del 21%.

Con l'ossigeno si forma anche lo strato di ozono che protegge la superficie del nostro pianeta dai raggi ultravioletti solari più energetici (v. cap. 8) e rende possibile la diffusione della vita sulle terre emerse. La vita genera pertanto le condizioni che rendono possibile la sua diffusione e, con questa operazione, inizia a interagire con il clima del pianeta. Infatti, la sostituzione del biossido di carbonio, che è un gas serra, con l'ossigeno, che non lo è, provoca un raffreddamento climatico, solo parzialmente compensato dal riscaldamento causato dalla diminuzione di albedo dovuta alla diffusione della flora terrestre, iniziata circa 440 milioni di anni fa.

Le condizioni ambientali cominciano a stabilizzarsi 10 milioni di anni fa, quando le placche tettoniche hanno fatto assumere alle terre emerse la configurazione attuale e si è ridotta l'attività vulcanica. L'Antartide collocata nella sua posizione attuale, al centro del polo Sud, inizia ad accumulare ghiaccio e fa lentamente abbassare il livello del mare e aumentare le terre emerse. Questa serie di eventi porta a un ulteriore raffreddamento del clima. La formazione di ghiaccio (fortemente riflettente) ai poli e la riduzione dell'estensione degli oceani (fortemente assorbenti) fanno aumentare l'albedo del pianeta, mentre l'incremento della superficie terrestre favorisce la crescita della flora che, insieme alle ridotte emissioni vulcaniche, fa diminuire la concentrazione di biossido di carbonio e di metano in atmosfera e il corrispondente effetto serra.

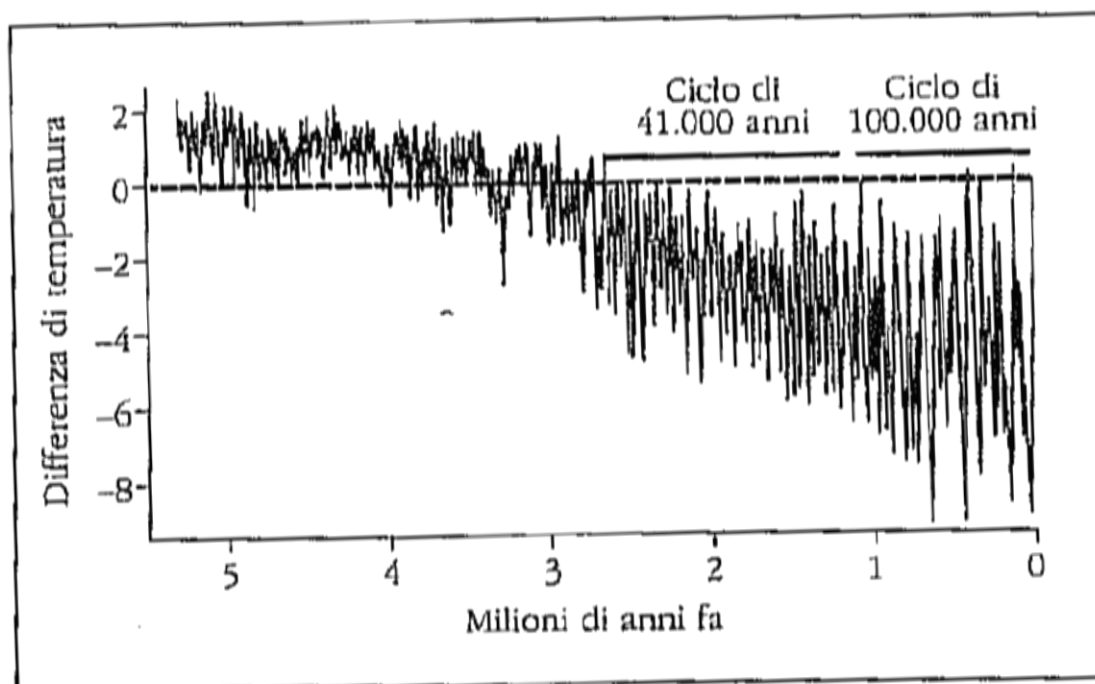


Fig. 7. Variazione della temperatura media della Terra negli ultimi 5,3 milioni di anni, misurata come differenza rispetto ai tempi moderni (circa il 1950-1980). Gli ultimi 400.000 anni di questa figura possono essere visti con maggior dettaglio nella figura 8.

Fonte: Dati da L.E. Lisiecki e M.E. Raymo, *A Pliocene-Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed Benthic D18O Records*, in *Paleoceanography*, 20, 2005 (doi: 10.1029/2004PA001071).

È questo nuovo equilibrio, raggiunto dal pianeta negli ultimi 10 milioni di anni e corrispondente a un clima più freddo rispetto alle condizioni precedenti, quello che caratterizza le condizioni climatiche in cui si è sviluppata la specie umana, apparsa sulla Terra 2,5 milioni di anni fa.

Nella figura 7 è mostrata la ricostruzione della temperatura media della Terra negli ultimi 5,3 milioni di anni, ottenuta combinando le misure di stratigrafia isotopica fatte sui fondali marini di 57 siti diversi. Si osserva un progressivo raffreddamento e, circa 3 milioni di anni fa, iniziano oscillazioni con una periodicità che prima è di 41.000 anni e poi diventa di 100.000 anni. Queste oscillazioni corrispondono all'alternarsi di glaciazioni e periodi temperati e sono i famosi «cicli di Milanković», di cui parleremo nel prossimo paragrafo.

Le glaciazioni e i periodi temperati

Milutin Milanković è stato un ingegnere e matematico serbo, diventato famoso per i suoi studi di meccanica celeste e di climatologia. Agli inizi del secolo scorso già si discuteva la possibilità che in passato sulla Terra fossero avvenute delle glaciazioni, ma mancavano sia una verifica sia una giustificazione di questo fenomeno. Milanković, in un trattato del 1920, partendo dai suoi calcoli di meccanica celeste, sviluppò la teoria che le variazioni dei moti del pianeta Terra, indotte dalle interazioni con i campi gravitazionali degli altri pianeti, e in particolare di Giove e Saturno, potevano essere la causa di glaciazioni e ne calcolò la periodicità. In mancanza di una verifica sperimentale questa teoria è stata quasi dimenticata per più di 50 anni, finché il crescente interesse per le glaciazioni, e in particolare le straordinarie misure ottenute con i carotaggi delle calotte polari, non ne hanno fornito una sorprendente verifica.

I primi risultati dei carotaggi fatti in Antartide sono stati pubblicati alla fine degli anni '90 e provengono dalla base russa di

Vostok, dove è stato estratto ghiaccio antico fino a circa 440.000 anni. Poco dopo, nel 2005, analoghi risultati sono stati ottenuti dal carotaggio eseguito nella base italo-francese di Dome Concordia con il progetto europeo EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*), che si è spinto fino a oltre 800.000 anni fa.

Il ghiaccio si forma per compressione della neve e intrappola all'interno delle piccole bollicine d'aria. Pertanto le carote estratte,

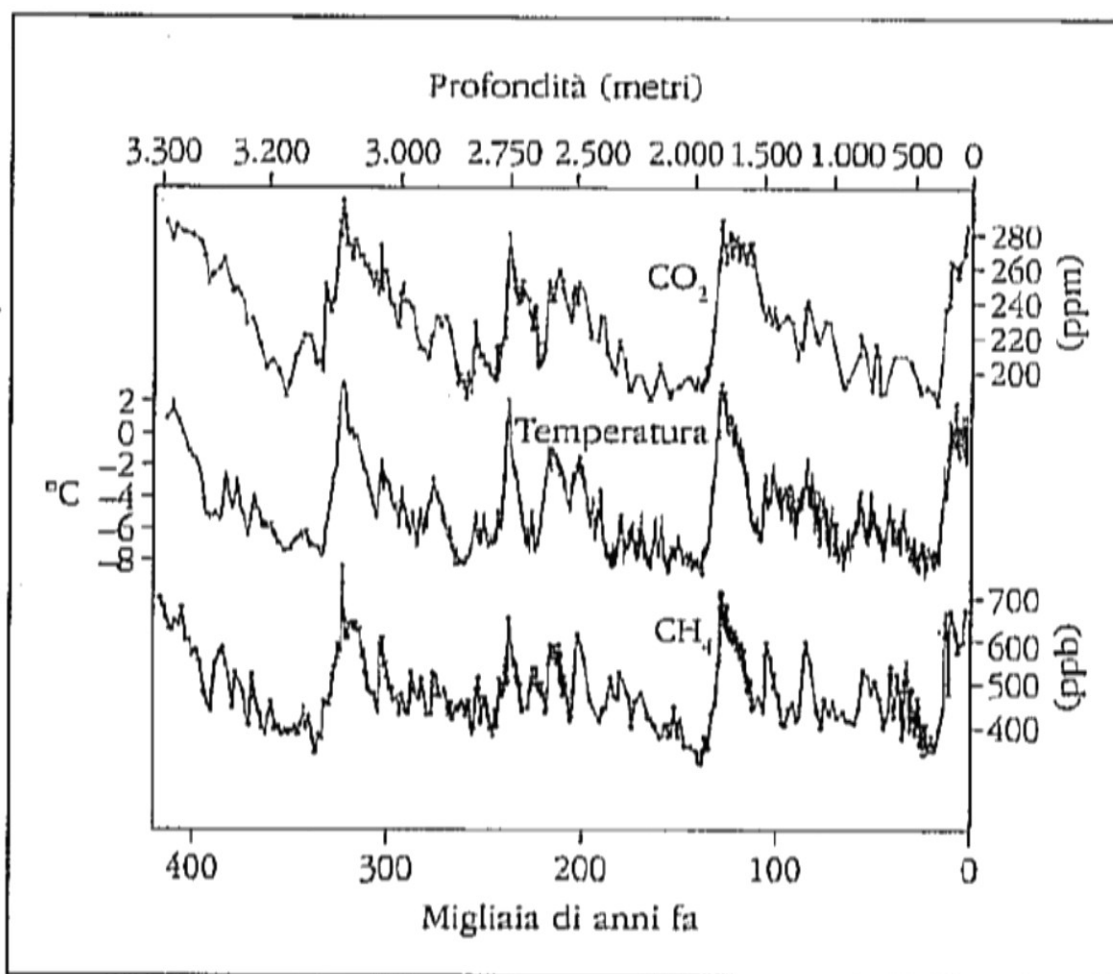


FIG. 8. Variazione della temperatura media della Terra e concentrazione dei gas serra negli ultimi 440.000 anni ricostruite con i carotaggi di Vostok (Antarctica). La temperatura è misurata come differenza rispetto ai tempi moderni ed è direttamente confrontabile con quella di figura 7. Gli ultimi 11.000 anni possono essere visti con maggior dettaglio in figura 9.

Fonte: Cortesia P. Saraceno, *Il caso Terra*, Milano, Mursia, 2007; dati da J.R. Petit et al., *Climate and Atmospheric History of the Past 420.000 Years from the Vostok Ice Core, Antarctica*, in *Nature*, 3 giugno 1999, 399, pp. 429-436 (doi: 10.1038/20859).

oltre a mantenere nella composizione isotopica dell'acqua l'informazione sulla temperatura media, forniscono con questi campioni d'aria anche informazioni sulla composizione atmosferica di quel tempo. Analizzando i depositi in funzione della profondità si ricostruisce a ritroso nel tempo la storia della temperatura e della concentrazione dei gas serra.

La figura 8 mostra i risultati ottenuti a Vostok. Dalla curva centrale che mostra la temperatura, si vede il susseguirsi, circa ogni 110.000 anni, di periodi temperati (caratterizzati da una più alta temperatura) intervallati da lunghe glaciazioni. Le variazioni di temperatura correlano con sorprendenti coincidenze con le variazioni della concentrazione dei due gas serra – CO_2 e CH_4 – mostrati rispettivamente sopra e sotto la temperatura. La durata delle glaciazioni coincide con le previsioni di Milanković. La teoria di Milanković, verificata da Emiliani con i sedimenti marini, trova nei carotaggi antartici un'ancor più precisa dimostrazione.

Il meccanismo che causa le glaciazioni e i periodi temperati non è banale. Dai calcoli sull'equilibrio radiativo (cap. 1), risulta che la temperatura media della superficie terrestre può variare solo per effetto di cambiamenti o dell'intensità solare (temperatura del Sole o suo angolo solido, cioè distanza Terra-Sole), o dell'albedo o dell'effetto serra. L'interazione gravitazionale con gli altri pianeti introduce dei moti terrestri (v. tab. 2) che hanno le perio-

Tab. 2. Periodicità di alcuni moti terrestri

Moto terrestre	Descrizione	Periodicità (mila anni)
Inclinazione asse terrestre	Angolo fra l'asse di rotazione della Terra e la perpendicolare al piano dell'eclittica	41
Precessione dell'asse terrestre	Rotazione dell'asse terrestre attorno alla perpendicolare al piano dell'eclittica	25,8
Eccentricità dell'orbita	Rapporto fra la distanza dei due fuochi dell'ellisse e il suo asse maggiore	$\approx 100 \approx 400$
Precessione dell'asse dell'ellisse	Rotazione dell'asse dell'ellissi	112

dicità di 41.000 e circa 100.000 anni osservate nelle glaciazioni, ma nessuno di questi modifica la temperatura del Sole o la sua distanza media dalla Terra. Anche l'eccentricità dell'orbita ellittica modifica la distanza massima e minima, ma non la distanza media. Sorprende pertanto che questi moti possano causare variazioni così macroscopiche.

Per capire il meccanismo con cui si verificano le glaciazioni, non è sufficiente considerare gli effetti medi delle forzanti, dobbiamo anche analizzare le trasformazioni annuali e considerare gli effetti delle reazioni positive di alcune variabili.

Durante l'anno esiste una variazione stagionale dell'irraggiamento. La variazione principale è quella dovuta all'inclinazione dell'asse di rotazione terrestre rispetto al piano dell'eclittica, che fa cambiare l'altezza del Sole sopra l'orizzonte e provoca l'alternarsi delle stagioni. Sappiamo che questa variazione ha effetti opposti nei due emisferi (all'inverno in un emisfero corrisponde l'estate nell'altro). Un'altra variazione stagionale più piccola, ma con effetto uguale nei due emisferi, è dovuta alla diversa distanza del Sole durante il moto della Terra lungo un'orbita ellittica.

Nel tempo queste due oscillazioni annuali si possono combinare in modo diverso: il massimo della prima può cadere in momenti diversi della variazione della seconda. Questo scivolamento relativo avviene a causa delle due precessioni (precessione dell'asse terrestre e precessione dell'asse dell'orbita ellittica) che fanno cambiare la stagione in cui la Terra viene a trovarsi al perielio (minima distanza dal Sole e massimo irraggiamento su tutto il pianeta).

Attualmente il solstizio d'inverno, momento in cui nell'emisfero Nord c'è il minimo irraggiamento, per durata del giorno e inclinazione del Sole, cade il 21 dicembre e poco dopo, il 3 gennaio, la Terra è nel perielio della sua orbita intorno al Sole. Per la combinazione dei due effetti il contrasto fra estate e inverno è ridotto nell'emisfero Nord e accresciuto nell'emisfero Sud. Su scale di tempi multi millenarie, l'ampiezza del contrasto di temperatura fra estate e inverno varia per effetto dei moti terrestri elencati nella tabella 2.

Si pensa che questa variazione di ampiezza sia la causa dell'alternarsi delle glaciazioni. Quando la differenza di temperatura tra estate e inverno è minima, il calore estivo non è sufficiente a sciogliere tutta la neve caduta durante l'inverno. La neve con la sua albedo elevata riduce l'effetto di riscaldamento del Sole e, quando tutta la superficie è innevata, si scioglie poco anche quando il Sole è intenso: lo sanno bene gli sciatori in primavera. La neve che non si scioglie durante l'estate innesca un meccanismo di accumulo che, favorito dal concomitante abbassamento della temperatura, che si propaga dalle alte latitudini fino alle medie latitudini, provocando una glaciazione. Questo processo si manifesta esclusivamente nell'emisfero Nord dove le terre emerse, che si spingono fino alle alte latitudini, consentono l'innescamento e la propagazione del fenomeno e non è possibile nell'emisfero Sud dove ad alte latitudini si trova una fascia di oceani. Questo modello sembra convincente, anche se non spiega perché si è passati da una periodicità di 41.000 anni a una di 100.000 anni (v. fig. 8) e perché non si osserva la periodicità di 400.000 anni. Questi continuano a essere appassionanti argomenti d'indagine.

Da quanto detto emergono due considerazioni importanti. La prima è che i cicli di Milanković mettono in evidenza l'esistenza nel sistema climatico di reazioni positive, come quella provocata dall'albedo del ghiaccio, che possono amplificare gli effetti e indurre cambiamenti nel clima che non sono prevedibili considerando il semplice comportamento medio delle forzanti. La seconda è che siamo nella condizione di minima differenza fra estate e inverno nell'emisfero Nord e aveva ragione Emiliani a dire che in base ai meccanismi delle glaciazioni passate dovremmo essere nella fase di innescamento di una glaciazione.

CO₂: causa o effetto del riscaldamento?

Nella figura 8 sono riportate, insieme alla temperatura, le concentrazioni del biossido di carbonio e del metano. Le concentrazioni

di questi due gas serra erano nettamente inferiori a quelle attuali e le loro variazioni sono fortemente correlate alla temperatura.

Questa correlazione non sorprende, poiché i gas serra causano un aumento di temperatura, ed è stata inizialmente argomento a sostegno della tesi che come nei carotaggi un aumento dei gas serra correla con un aumento della temperatura, così l'attuale emissione di gas serra provocherà un riscaldamento climatico.

Tuttavia non bisogna mai fidarsi troppo delle correlazioni e delle facili interpretazioni. Infatti abbiamo visto che le glaciazioni sono innescate dall'albedo e non dall'effetto serra, inoltre da un'analisi approfondita di questa correlazione emerge che il ghiaccio e l'aria che si trovano nello stesso strato del carotaggio non sono esattamente contemporanei. Infatti mentre il ghiaccio è l'acqua di quando è caduta la neve, l'aria delle bollicine è quella di quando il ghiaccio si è sigillato formando al suo interno una celletta. Il processo di chiusura della celletta avviene quando lo strato di neve che si è accumulato esercita una pressione sufficiente per far fondere il ghiaccio, cioè molte decine di anni dopo la caduta della neve. Pertanto, nonostante il fatto che nella sequenza del carotaggio la temperatura e i gas serra crescano e diminuiscano contemporaneamente, suggerendo la possibilità che sia la temperatura a inseguire l'aumento dei gas serra, in realtà potrebbero essere le variazioni dei gas serra a inseguire le variazioni di temperatura. Cioè, in passato, i gas serra non sono stati la causa, ma l'effetto dell'aumento di temperatura.

Questo diverso nesso di causalità si può spiegare col fatto che il mare cambia la sua capacità di assorbimento dei gas serra al mutare della temperatura: può agire come pozzo quando la temperatura diminuisce e come sorgente quando aumenta.

L'argomentazione che già nel paleoclima l'aumento dei gas serra ha causato un aumento di temperatura non è pertanto corretta. Tuttavia questo non fa diminuire la preoccupazione per l'attuale aumento dei gas serra: tutt'altro, la fa aumentare. Infatti, se gli oceani sono un serbatoio reversibile che ora agisce come pozzo, ma può facilmente diventare una sorgente, allora la possibilità di

rendere reversibile il cambiamento climatico si allontana molto nel tempo, perché non basterà aspettare che si smaltisca il biossido di carbonio che ora è nell'atmosfera, ma bisognerà aspettare che si smaltisca anche tutto quello che, finora assorbito dagli oceani, sarà da questi nel tempo riemesso.

Il nostro periodo temperato

Abbiamo visto che per l'attuale coincidenza fra solstizio d'inverno nell'emisfero Nord e perielio dell'orbita dovremmo già essere all'inizio di una glaciazione. Questa però non è l'unica sorpresa. Se si guarda nella figura 8 la forma dei picchi di temperatura che sono stati raggiunti nei periodi temperati, si nota che il nostro periodo temperato dura un tempo significativamente più lungo rispetto ai precedenti periodi. La cosa è strana perché questo allungamento di millenni non può essere spiegato con le emissioni della rivoluzione industriale che hanno poco più di due secoli.

Il nostro lungo periodo temperato ha raggiunto una durata di circa 11.000 anni ed è spesso indicato come l'epoca geologica dell'Olocene. Il suo inizio coincide nella storia dell'uomo con l'inizio del periodo Neolitico, quando si verifica il completo passaggio di alcuni gruppi umani da comunità nomadi dedite alla caccia, alla pesca e alla raccolta, a comunità stabili dedite all'agricoltura e all'allevamento. Alcuni studi hanno messo in relazione l'allungamento del periodo temperato con lo sviluppo di queste nuove attività antropiche e avanzano l'ipotesi che sia stata l'emissione di gas serra causata dal disboscamento condotto dall'uomo per avviare l'allevamento del bestiame e l'agricoltura a causare il prolungamento dell'attuale periodo temperato. Questa ipotesi sembrerebbe confermata dall'aumento di biossido di carbonio (da 260 ppm a 280 ppm) degli ultimi 10.000 anni. Si tratta di una ipotesi non certa, ma possibile e suggestiva.

Una ricostruzione dettagliata di come è cambiata la temperatura della Terra negli ultimi 11.300 anni è fornita da un recentissimo

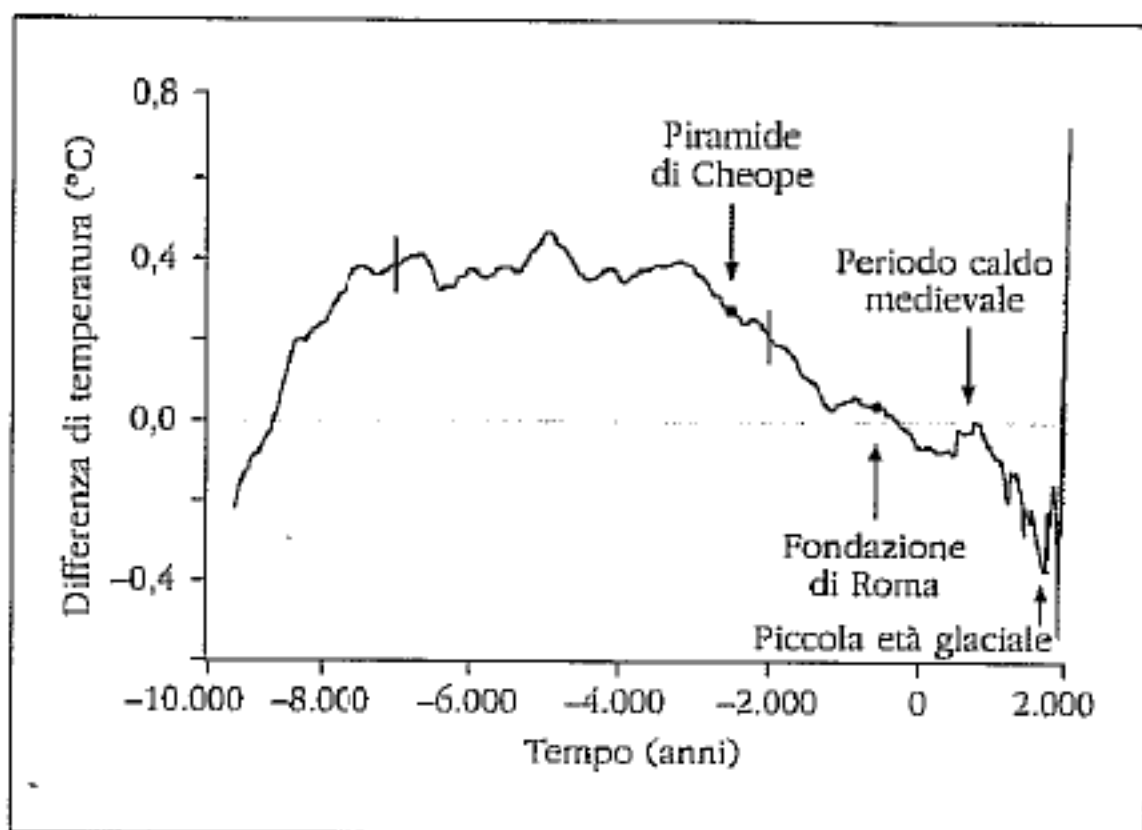


Fig. 9. Temperatura media della Terra negli ultimi 11.300 anni ricostruita usando i dati proxy ottenuti in diverse parti del pianeta e le misure dirette degli ultimi 70 anni. La temperatura è misurata come differenza rispetto ai tempi moderni ed è direttamente confrontabile con quella nelle figure 7 e 8. Gli ultimi 130 anni possono essere visti con maggior dettaglio nella figura 11.

Fonte: Dati fino al 1950 da S.A. Marcott *et al.*, *A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11.300 Years*, in *Science*, 339, 1198 (2013) e dopo il 1950 da *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP)*, NASA Goddard Institute for Space Studies.

studio in cui sono state combinate le informazioni di 73 diverse misure proxy. La figura 9 mostra il risultato di quest'analisi, combinato con le misure dirette ottenute negli ultimi 70 anni.

Dopo un periodo caldo e stabile, che è durato circa 5.000 anni, si è verificato un lento raffreddamento, interrotto temporaneamente circa 1.000 anni fa dal cosiddetto «periodo caldo medievale»; successivamente il raffreddamento è diventato più rapido fino a provocare, circa 400 anni fa, la piccola età glaciale di cui abbiamo parlato nel capitolo 2 a proposito del minimo di Maunder nelle macchie solari.

Durante il periodo caldo medievale le viti erano coltivate in tutta l'Europa del Nord fino all'Inghilterra e la navigazione nei mari del Nord, facilitata dalla ritirata dei ghiacci, ha consentito ai Vichinghi un'intensa attività di colonizzazione delle coste nordeuropee e la conquista della Groenlandia.

Durante la piccola età glaciale le cronache registrano inverni particolarmente rigidi con frequenti gelate dei fiumi (nel caso del Tamigi fino a 14 settimane consecutive) che colpiscono con grande intensità anche i corsi d'acqua dell'Italia settentrionale. L'eccezionalità di questi eventi appare evidente se si considera che in Italia sono più di 50 anni che non si sente parlare di un fiume che gela d'inverno in pianura. È in questo periodo che i ghiacciai alpini raggiungono la loro massima estensione.

Sorprende che eventi come il periodo caldo medievale e la piccola età glaciale, che hanno avuto una grande influenza nella vita delle popolazioni e hanno lasciato un segno tangibile nella memoria storica, corrispondano a così piccole variazioni della temperatura media globale. In realtà si ritiene che ci siano state oscillazioni regionali che hanno amplificato in Europa e nel Nord America gli effetti del piccolo cambiamento di temperatura avvenuto a livello globale. In ogni caso il risultato sottolinea il fatto che piccole variazioni di temperatura possono provocare grandi cambiamenti climatici locali.

Nell'ultimo secolo il raffreddamento è cessato e la temperatura è salita con una velocità che non ha precedenti negli ultimi 11.000 anni (e probabilmente neanche negli ultimi 5 milioni di anni), raggiungendo i massimi valori rispetto a tutto il periodo temperato. Vedremo nel prossimo capitolo i cambiamenti avvenuti negli ultimi anni: possiamo tuttavia fin d'ora affermare che le forzanti orbitali, che hanno caratterizzato il paleoclima e ci stavano lentamente portando verso una nuova glaciazione, sono state ampiamente superate dagli effetti antropici e recenti studi prevedono che, contrariamente ai calcoli di Milanković e alle previsioni di Emiliani, non ci saranno in futuro glaciazioni perlomeno per altri 50.000 anni.

Dobbiamo compiacerci del fatto che il clima con questo lungo periodo temperato ha contribuito allo sviluppo della civiltà umana e che l'uomo con i suoi interventi prima sulla flora e poi sui combustibili fossili ha prima rallentato e poi impedito lo sviluppo di una nuova glaciazione. Tuttavia le perturbazioni antropiche degli ultimi anni stanno causando una variazione climatica che, per l'intensità e la rapidità senza precedenti con cui sta avvenendo, può avere effetti che vanno ben oltre quello di interrompere il lento alternarsi delle glaciazioni.