

Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL Memorie di Scienze Fisiche e Naturali 134° (2016), Vol. XL, Parte II, pp. 17-26

CARLO BARBANTE*

La memoria del ghiaccio **

Il ghiaccio depositatosi nel corso degli anni passati rappresenta la memoria climatica ed ambientale del nostro Pianeta. Nel parlare della memoria del ghiaccio, vorrei affrontare due aspetti essenziali. Il primo riguarda il perché il ghiaccio riesca a mantenere al proprio interno la memoria del clima e delle condizioni climatiche del passato; oggi infatti siamo in grado di ricostruire la storia climatica ed ambientale della Terra andando indietro nel tempo per diverse centinaia di migliaia di anni. In Antartide, nel sito di Concordia possiamo ottenere un record climatico ed ambientale più lungo di 800.000 anni che descrive in modo continuo la storia del clima e delle variazioni ambientali che il nostro Pianeta ha avuto nel corso di questo lungo periodo. L'altro aspetto riguarda un progetto di conservazione che si intitola appunto «La memoria del ghiaccio» e che ha lo scopo di salvaguardare proprio le importantissime informazioni climatiche ed ambientali che sono contenute negli archivi glaciali e che, a causa del rapido riscaldamento climatico, sono destinate a sparire nel corso dei prossimi decenni.

Il nostro sistema climatico è un sistema estremamente complesso. Una simulazione fatta dalla NASA mostra come le particelle di aerosol, di gas, di nuvole, si muovano con degli andamenti simili, ma mai uguali e quindi difficilmente riproducibili. Un sistema caotico di questo tipo è estremamente complesso e di difficile predizione. Il clima del nostro Pianeta si presenta quindi governato da processi che reagiscono in modo non lineare, ecco perché è difficile riuscire a predire quello che succede e anche a studiare i processi che avvengono sia su scala globale che regionale.

^{*} Socio dell'Accademia dei XL. Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali del CNR, Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica, Università Ca' Foscari Venezia.

E-mail: barbante@unive.it

^{**} Prolusione tenutasi durante la Seconda Assemblea Annuale dei Soci, Roma, 15 novembre 2016, presso la Biblioteca dell'Accademia nazionale delle Scienze detta dei XL, Scuderie Vecchie di Villa Torlonia.

In questa sua complessità, il sistema presenta dei processi che avvengono su scale micrometriche (ad esempio i processi che portano alla formazione del plankton negli oceani) o di diverse migliaia di chilometri, come il trasporto di contaminanti dalle basse latitudini alle aree polari. Questi stessi processi possono avvenire molto rapidamente (nell'ordine dei millisecondi) oppure su scale temporali secolari. Dobbiamo tener conto di tutta questa complessità per spiegare come funziona il nostro sistema climatico che è costituito essenzialmente da un motore (il sole) e da cinque componenti principali: la biosfera, l'atmosfera, gli oceani, la terra solida e la criosfera. Quando si parla di criosfera si parla di tutte le zone ghiacciate del Pianeta, quindi dei poli per come li conosciamo, Artico e Antartide, ma anche del «terzo polo», il meno conosciuto, che comprende tutte le aree ghiacciate di alta quota che sono estremamente vulnerabili al cambiamento climatico.

Fatte queste premesse, se si va indietro nel tempo, utilizzando gli archivi climatici è possibile ricostruire la storia del clima del nostro pianeta addirittura fino a 500 milioni di anni fa. La Figura 1, che riporta le variazioni di temperatura rispetto a quella attuale, mostra quando sono avvenute le variazioni climatiche che la Terra ha sperimentato nel corso degli ultimi cinquecento milioni di anni. Per comodità di lettura i valori di temperatura sono riportati in cinque differenti pannelli su scale diverse di tempo: da 500 milioni a 100 milioni di anni, da 100 milioni a 5 milioni, e poi da 5 milioni ad un milione. Gli ultimi due pannelli a destra rappresentano le variazioni di temperatura in periodi di tempo che vanno da circa un milione di anni fa all'ultimo massimo glaciale (circa ventimila anni fa) e dall'ultima glaciazione ai giorni nostri. Viene infine anche rappresentata una proiezione futura, fino alla fine del secolo. Dall'insieme di dati riportati nella Figura 1 si evince come la temperatura della Terra abbia avuto un andamento decrescente a partire da circa 50/60 milioni di anni fa. Analizzando più in dettaglio il profilo di temperatura, si può vedere come all'interno di un andamento di temperatura decrescente si possano notare delle varia-

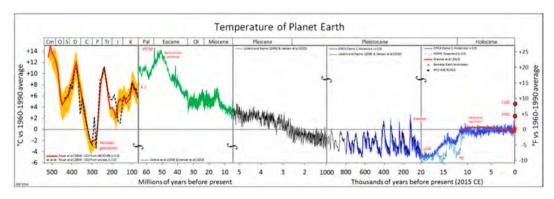


Fig. 1. Le ricostruzioni della temperatura del passato nel corso degli ultimi 500 milioni di anni. Zachos *et al.*, 2008.

zioni tra climi più freddi (periodi glaciali) e più miti (periodi interglaciali). Questa variabilità climatica è sostanzialmente legata a parametri orbitali, cioè alla posizione relativa della terra rispetto al sole e quindi alla quantità di energia che il nostro Pianeta riceve. Gli ultimi 800 mila anni sono proprio il periodo per il quale si ottengono informazioni dalle carote di ghiaccio estratte in Antartide. Come possiamo notare dalla Figura 1, viviamo attualmente in uno dei periodi interglaciali (Olocene) in cui il clima è estremamente stabile da circa diecimila anni.

Per dare un'idea di come il clima fosse durante l'ultima glaciazione, basta ricordare che, da un punto di vista geologico, 20 mila anni fa la Terra stava sperimentando un periodo decisamente più freddo (mediamente di circa 6-8 °C) dell'attuale periodo climatico. Le valli delle Alpi durante l'ultimo massimo glaciale (20 mila anni fa) erano completamente coperte dai ghiacciai che si estendevano per decine di chilometri fino a lambire la pianura Padana.

La Figura 2 riporta le anomalie di temperatura dal 1850 al 2012. I dati più recenti sono ottenuti da misure dirette di temperatura. Si può ovviamente andare indietro nel tempo, in alcuni casi anche centinaia di anni con osservazioni dirette, però è chiaro che prima del 1600 circa le misure dirette della temperatura erano inesistenti. È possibile notare come dal 1880 ad oggi, la temperatura sia aumentata progressivamente. La cosa interessante è che, se si considera l'andamento complessivo nella variazione della temperatura nel corso degli ultimi 130 anni, si vede che l'aumento medio è stato di circa 1 °C per secolo, che porta ad un tasso di incremento medio di quasi 2 °C per secolo se si considerano solamente gli ultimi trentacinque anni. La velocità con cui aumenta la temperatura nel corso degli ultimi decenni sta quindi aumentando rapidamente ed in modo preoccupante.

Se si valutano in dettaglio queste variazioni, si può notare come vi siano delle flessioni nell'aumento di temperatura; durante questi periodi il sistema climatico assorbe il calore soprattutto negli oceani, senza un apparente aumento di temperatura media dell'atmosfera. L'ultima flessione nel andamento della temperatura si è avuta nel periodo 2003-2010, ma nel corso degli ultimi anni la temperatura ha ricominciato a salire molto velocemente, come osservato dai data base della NASA.

La distribuzione spaziale delle temperature negli ultimi 120 anni mostra inoltre che la variazione non è omogenea, ma è anzi è stata a «macchia di leopardo», con alcune aree del Pianeta che si riscaldano più di altre e di altre che rimangono abbastanza fredde. Mediamente, dal 1880 al 2016, la temperatura è aumentata complessivamente di 1,0 °C rispetto ad un valore di riferimento medio calcolato tra il 1951 ed il 1980. Alcune aree continentali nell'emisfero settentrionale, e soprattutto nella zona dell'Artico, sono state estremamente più calde ed hanno reagito in maniera molto più significativa di altre. Questo è un effetto di amplificazione polare, dovuto a fenomeni di retrazione che tendono ad accelerare ed amplificare le variazioni iniziali. Le aree polari sono quindi aree molto sensibili. Nell'Antartide non si è osservato il fenomeno sia perché sono disponibili pochi dati sia perché una buona parte di Antartide, se si esclude la penisola antartica, è in una condizione di stato stazionario. Questi

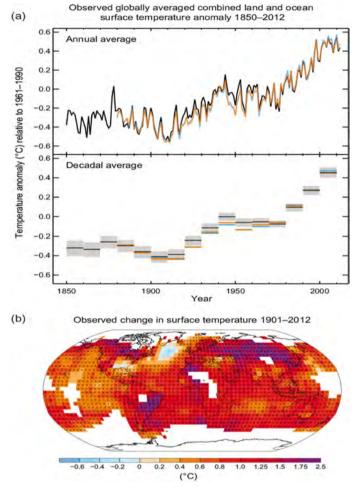


Fig. 2. Anomalie di temperature medie nel periodo 1850-2012. Nel pannello superiore sono riportare le temperature medie annuali, mentre nel pannello inferiore le medie decennali. Le anomalie di sono relative alla media 1961-1990. IPCC, 2013.

effetti, che non sono solo propri delle sole zone artiche ma anche di quelle alpine, sono molto preoccupanti per la velocità con cui avvengono. Anche nelle Alpi la variazione di temperatura negli anni più recenti è stata considerevolmente più elevata della media mondiale, a testimonianza del fatto che le aree alpine sono delle sentinelle dei cambiamenti climatici del nostro pianeta. L'aumento di temperatura così marcato nelle zone di alta quota può portare ad avere delle influenze notevoli oltre che sulle temperature stesse anche sulla componente ecologica e sugli ecosistemi.

L'applicazione di modelli climatici consente di fare delle proiezioni della temperatura nel futuro, ma anche di altri importanti parametri climatici, come l'estensione del ghiaccio marino in Artico; tali proiezioni dipendono dagli scenari che si verranno a creare, soprattutto riguardo all'emissione di gas serra. L'aumento di temperatura ha fatto fondere rapidamente, nel corso degli ultimi decenni, una buona parte del ghiaccio marino artico e se si misurano dal satellite le variazioni del ghiaccio marino, si vede che dagli anni '50 si ha una progressiva diminuzione (ca il 40% della superficie). Le stime per il futuro sono naturalmente influenzate dagli scenari di emissione dei gas serra, considerati la causa principale del riscaldamento climatico degli ultimi decenni. È ovvio che questi aspetti sono stati messi a fuoco nel contesto della convenzione di Parigi (CO21) che, in particolare, ha stabilito in 2° C il limite all'aumento di temperatura entro al fine del secolo, un limite che può essere mantenuto solamente con delle forti regolamentazioni nelle emissioni future di gas serra.

Naturalmente l'aumento di temperatura ha un effetto diretto oltre che sul clima del nostro Pianeta, anche sui ghiacciai, soprattutto quelli del cosiddetto terzo polo, cioè delle aree non polari di alta quota; tra queste l'Himalava, il Tibet, il Caucaso, le Alpi, tutta la parte settentrionale del continente americano e la parte l'occidentale del Sud America. Grazie ad un sistema satellitare si può misurare in modo accurato il bilancio di massa di questi ghiacciai, che mostra come la quasi totalità dei ghiacciai delle aree non polari sia soggetta ad un netto e continuo bilancio di massa negativo. Ciò vuol dire cha la massa di neve che si accumula annualmente è considerevolmente minore di quella che viene persa ogni anno a causa dei fenomeni di fusione e di ablazione. Un bilancio di massa negativo significa perdere una risorsa idrica importante, ma non solo. Dal punto di vista del ricercatore la perdita del ghiaccio significa anche una perdita di informazioni importantissime sulla storia del clima della Terra. La cosa particolare è che tutti questi ghiacciai, di ghiaccio continentale, contribuiscono all'innalzamento medio del livello del mare: la maggior parte del contributo è dato dai ghiacciai non polari. Tuttavia, dall'inizio del 2000 anche le aree polari, soprattutto la Groenlandia, ma anche l'Antartide occidentale, perdono un enorme quantità di massa. L'aumento di circa tre millimetri e mezzo del livello medio del mare è sicuramente dovuto per almeno la metà al contributo dei ghiacciai che vanno fondendosi anno dopo anno.

Le conseguenze di questo fenomeno sono importanti, come si vede dall'esempio del ghiacciaio Naimona'nyi, a 6050 metri di altitudine in Himalaya. È stato effettuato un carotaggio al quale sono stati applicati dei metodi di datazione che impiegavano gli isotopi radioattivi del trizio. Il trizio è liberato in atmosfera durante i test nucleari e si deposita negli strati di neve. In particolare nella scienza delle carote di ghiaccio quando si trova, ad una certa profondità, un picco elevato di trizio, questo è databile agli anni 1962/1963, anni in cui c'è stato il numero più elevato di test nucleari in atmosfera. Mentre molte delle carote di ghiaccio prelevate nei siti vicini mostravano dei picchi di trizio ben individuabili a diverse profondità, il sito di Naimona'nyi non mostra nessuna variazione del profilo dell'isotopo radioattivo, indicando in maniera inequivocabile che gli strati relativi all'anno 1962-1963 sono ormai perduti per sempre. A 6.000 metri quindi in un ghiacciaio alle basse latitudini il riscaldamento è talmente elevato da fondere gli strati superficiali e a farli percolare in profondità.

Si perde così una risorsa fondamentale, la risorsa acqua che proviene dai ghiacciai. Nelle Alpi questa risorsa è sicuramente importante, ma non determinante per la nostra sopravvivenza. In alcune parti del mondo come l'India, vi sono 900 milioni di persone che vivono della risorsa acquea dei ghiacciai dell'Himalayani e Tibetani, quindi in futuro questo problema potrebbe essere vitale. Lo è già in città come La Paz dove nei periodi caldi circa il 35% dell'acqua deriva dalla risorsa glaciale.

Vi sono molti studi relativi ai bilanci di massa dei ghiacciai che riportano le variazioni glaciali. Alcuni sono stati ottenuti in maniera molto semplice ponendo delle macchine fotografiche nella fronte del ghiacciaio, in modo da fare delle foto in sequenza, con una frequenza giornaliera. Un ghiacciaio islandese (Solheim Glacier), ad esempio, seguito per un periodo di circa 4 anni e sei mesi, indica che il processo non è continuo perché durante i periodi invernali i ghiacciai aumentano di dimensione, ma complessivamente, in poco più di quattro anni, il sistema ha perso una enorme massa, un segno tangibile di quello che sta avvenendo. Il fenomeno avviene in maniera ancora più evidente, in un periodo più breve, nel Columbia Glacier in Alaska, dove il ghiacciaio in soli tre anni ha avuto un ritiro della lingua glaciale di oltre 4 km con una conseguente perdita di massa veramente considerevole.

Venendo più vicino a noi anche i ghiacciai delle Alpi stanno subendo un'enorme perdita di massa. Nella Figura 3 sono riportate tre fotografie riprese in anni differenti nel ghiacciaio del Cristallo (Dolomiti) e che testimoniano in maniera inequivocabile l'effetto del riscaldamento in atto.

Con il rapido ritiro dei ghiacciai stiamo perdendo quindi una risorsa importantissima, l'acqua, ma dal punto di vista del ricercatore stiamo perdendo anche dei formidabili archivi climatici; è come se perdessimo una libreria intera con informazioni sulla storia del nostro passato. Mano a mano che la neve cade, intrappola una serie di informazioni dall'atmosfera e le registra per sempre al proprio interno. In alcuni siti nel nostro Pianeta sostanzialmente non avviene la fusione stagionale e queste informazioni rimangono intatte, pronte per essere decifrate. I ghiacci, contraria-



Fig. 3. Il ritiro del ghiacciaio del Cristallo, nelle Dolomiti bellunesi. Le foto sono riferibili agli anni 1924, 1980, 2006.

mente ad altri archivi climatici, come per esempio gli anelli di accrescimento degli alberi, i sedimenti lacustri, le torbiere, contengono allo stesso tempo sia informazioni sulle forzanti climatiche, come ad esempio le concentrazioni delle polveri o dei gas serra intrappolati nelle bolle di ghiaccio, sia le risposte a queste perturbazioni che sono ben evidenti dalle registrazioni della temperatura che si possono ottenere dall'analisi isotopica delle molecole di acqua. In Antartide è possibile andare indietro nel tempo addirittura 800 mila anni, con un record climatico continuo.

La Figura 4 rappresenta una fotografia a luce polarizzata di una sezione di ghiaccio; la neve che cade si trasforma attraverso un processo di densificazione; fino ad una certa profondità, che dipende molto dalla collocazione del sito e dalla temperatura locale, l'aria può diffondere verso il basso. Quando la pressione diventa troppo alta i canali di diffusione tendono a chiudersi mantenendo all'interno piccole bolle d'aria che rimane così intrappolata, fornendo agli scienziati uno strumento importante per ricostruire la composizione dell'atmosfera dei secoli e dei millenni passati. L'aria che si trova all'interno delle bolle è più giovane del ghiaccio che la racchiude proprio perché c'è questo fenomeno gravitativo-diffusionale. Vi sono tuttavia dei metodi quantitativi che permettono di stabilire la differenza di età tra il ghiaccio e l'aria e quindi di mettere in una prospettiva corretta queste variazioni. Le informazioni che si ottengono dall'analisi delle carote di ghiaccio sono tantissime; otteniamo dati sulle temperature, sulle concentrazioni di gas, sui contaminanti del passato.

I progetti di perforazione delle calotte polari richiedono una logistica piuttosto pesante, visto che molto spesso i siti di perforazione si trovano in zone remote del

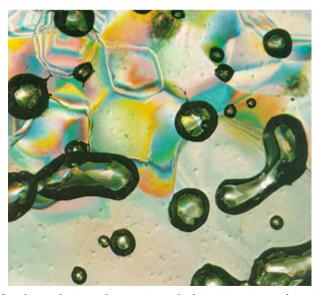


Fig. 4. Fotografia a luce polarizzata di una sezione di ghiaccio in cui sono ben visibili le bolle di aria intrappolate all'interno.

Pianeta, lontano dalle stazioni di ricerca scientifica cha sono solitamente collocate sulla costa. Durante una campagna di prelievo, che nelle regioni polari dura generalmente tre o quattro mesi, si possono recuperare circa seicento metri di campioni, che sono costituiti da cilindri di ghiaccio di 10 centimetri di diametro tagliati in spezzoni di un metro. Questi campioni di ghiaccio vengono caratterizzati rapidamente in situ per conoscere i parametri fondamentali, ma sono poi trasportati nei laboratori delle nostre università e centri di ricerca dove possono essere analizzati accuratamente per determinare in dettaglio la composizione chimica ed isotopica e fornire un'esatta datazione, essenziale per mettere in una giusta prospettiva temporale i risultati ottenuti. Una parte dei campioni è anche conservata nel sito di perforazione, dove la temperatura media annua è largamente al di sotto dello zero.

Le tipiche informazioni ottenibili dallo studio delle carote di ghiaccio sono riportate nella Figura 5 che si riferisce ai risultati ottenuti nell'ambito dell'European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA), che ha fornito informazioni climatiche databili fino a 800 mila anni fa. Come è possibile vedere dalla figura, le temperature in Antartide sono variate in modo considerevole e con una freguenza abbastanza riproducibile negli ultimi 800 mila anni, passando da valori di temperatura molto bassi (i periodi glaciali) a periodi più caldi, (interglaciali) simili al presente. Le variazioni delle concentrazioni dei gas serra (metano ed anidride carbonica) sono fortemente correlate alle variazioni di temperatura. È oramai assodato come queste importanti variazioni glaciali/interglaciali siano influenzate da variabili orbitali ed in particolare dalla posizione relativa della terra rispetto al sole. Andando più nel dettaglio, si può notare che le oscillazioni climatiche nel periodo tra gli 800 e 400 mila anni sono più frequenti (ca. 40 mila anni), ma meno ampie, mentre nei periodi più recenti si nota una diminuzione della frequenza (ca. 100 mila anni), ma una ampiezza più elevata. Lo stesso andamento è riscontrabile anche nelle concentrazioni dei gas serra che sono intrappolati nelle bolle d'aria; tali variazioni oscillano tra un massimo di 280-300 ppmv (parti per milione in volume) nell'era pre-inustriale fino ad un minimo di circa 180 ppmy durante i periodi glaciali.

Queste variazioni di frequenza e di ampiezza nelle forzanti climatiche (gas serra) e nelle risposte (temperatura) non sono ancora state completamente spiegate e costituiscono alcune delle sfide più importanti della ricerca paleoclimatica; dare risposta a queste domande porterà a meglio comprendere quale sia la sensitività climatica del sistema Terra. Se si vogliono mettere in una prospettiva corretta i cambiamenti climatici in atto, si deve infatti cercare di capire come il sistema funziona in condizioni naturali, un'opportunità data dallo studio sugli archivi climatici, quali le carote di ghiaccio estratte dalle calotte polari.

Dai risultati ottenuti dall'analisi sugli archivi ambientali e climatici e da quelli derivanti dalle osservazioni dirette è oramai assodato che stiamo vivendo in un sistema attualmente in rapido riscaldamento. È anche oramai acclarato come l'uomo, a causa della fortissima e continua emissione di gas serra in atmosfera, sia la maggior causa del riscaldamento in atto. In questo contesto, sono quindi sotto agli occhi di

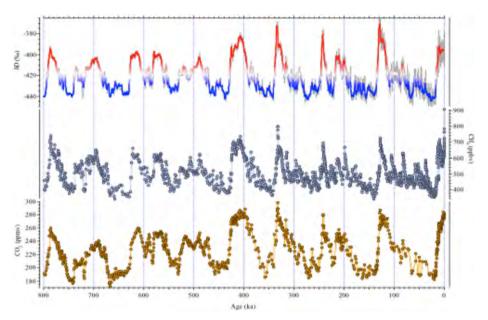


Fig. 5. Antartide, Dome C. Variazioni di temperatura, espresse come cambiamenti nella composizione isotopica dell'idrogeno (δD); valori più negativi di δD indicano temperature più basse (in blu) mentre i valori meno negativi indicano periodi più caldi (in rosso), i cosiddetti periodi interglaciali. Nel pannello centrale sono riportate le concentrazioni di metano, mentre le variazioni di anidride carbonica sono visibili in basso. Jouzel *et al.*, 2007, Lüthi *et al.*, 2008.

tutti alcuni effetti del riscaldamento globale, come ad esempio l'innalzamento del livello di medio mare (ca. 19 cm nell'ultimo secolo) e la fusione continua dei ghiacciai. In quest'ultimo caso stiamo perdendo non solo una risorsa essenziale, l'acqua, ma anche, come delle informazioni importantissime sulla storia climatica ed ambientale del nostro Pianeta.

È per evitare di perdere irrimediabilmente questi preziosi campioni che recentemente è stata data vita ad un progetto intitolato «La memoria del ghiaccio», che ha lo scopo di salvaguardare le informazioni contenute negli strati di ghiaccio prima che sia troppo tardi, prima che la fusione dei ghiacciai ne cancelli irrimediabilmente le tracce. Il progetto prevede di andare nei siti di alta quota, per esempio nelle Alpi, prelevare delle carote di ghiaccio, studiarle e caratterizzarle, ma mantenerne anche almeno un paio per ogni sito di perforazione per trasportarle in un sito sicuro, in Antartide. Alcune di queste carote di ghiaccio già prelevate in diversi siti sono state attualmente immagazzinate nei frigoriferi delle varie Università partecipanti al progetto. In Sud America, in Nord America, nel Kilimangiaro, nelle Alpi, Caucaso, Himalaya, Tibet, Nuova Zelanda, Papa Nuova Guinea, ci sono dei siti di alta quota le cui informazioni andranno irrimediabilmente perdute nel corso dei prossimi decenni. È quindi essenziale intervenire il più presto possibile per attivare questa

banca campioni internazionale che preserverà le informazioni climatiche ed ambientali contenute nei ghiacciai per le future generazioni di scienziati.

Sostanzialmente vi sono due tipologie di ghiacciaio che si vorrebbero preservare nell'archivio: il primo tipo sono quei ghiacciai che sicuramente preservano informazioni e sono quindi come dei libri da portare in salvo; i secondi sono i cosiddetti ghiacciai fossili, come per esempio la Marmolada (Dolomiti) o i ghiacciai del Montasio (Friuli) o del Calderone (Gran Sasso), che sono per così dire dei ghiacciai relitti; essi infatti non contengono più informazioni che si possono leggere oggi, ma potrebbero averne alcune che oggi non riesce a decifrare e che magari tra cinquant'anni, con delle tecnologie che ancora oggi non immaginiamo, sarà possibile decifrare.

L'Antartide è il luogo ideale per conservare le carote di ghiaccio dell'archivio, è un frigorifero naturale che per le prossime centinaia, migliaia di anni rimarrà in queste condizioni. Inoltre attualmente non esiste sovranità di nessun paese, è un terreno neutrale adatto a realizzare un progetto internazionale. L'idea di avere un qualcosa che venga preservato per le generazioni future di scienziati ha già trovato il sostegno di fondazioni a livello internazionale. Ecco dunque come il titolo di questa prolusione «La memoria del ghiaccio» si presti ad una doppia interpretazione. Da un lato per le informazioni contenute in questi formidabili archivi climatici ed ambientali e da un altro, forse più evocativo, che fa vedere come il salvare le carote di ghiaccio consenta di preservare delle informazioni che sono un patrimonio per l'umanità.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Jouzel J. *et al.*, Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. *Science* **317**, (2007), 793-797.

Lüthi D. et al., High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, *Nature* **453**, (2008), 379-382.

Zachos J.C. et al., An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics, *Nature* **451**, (2008), 279-283.