



Società Torricelliana
di Scienze e Lettere
di Faenza



con il patrocinio del
Comune di Faenza



CAMBIAMENTI CLIMATICI

Cause naturali ed antropiche
I protagonisti della ricerca

Convegno coordinato dal prof. Franco Prodi



SABATO 26 NOVEMBRE 2016

Sala "Dalle Fabbriche" della BCC
Faenza - via Laghi, 81



PROGRAMMA

Ore 8,45
SALUTI DELLE AUTORITÀ

Ore 9,30
Prof. FRANCO PRODI
(ISAC CNR)
Cambiamenti climatici: cause naturali e cause antropiche

Ore 10,00
Prof. GIAN BATTISTA VAI
(Università di Bologna)
Paleoclimatologia

Ore 10,30
Prof. GIANFRANCO LAGHI
(Università di Modena-Società Torricelliana)
Il clima tra fissismo e trasformismo

Ore 11,00 INTERVALLO

Ore 11,30
Dott. MICHELE BRUNETTI
(ISAC CNR)
Il clima storico

Ore 12,00
Prof. VALERIA RIGHINI
(Università di Bologna-Società Torricelliana)
Archeologia e storia del clima

SEDUTA POMERIDIANA

Ore 15,15
Prof. NICOLA SCAFETTA
(Università di Napoli Federico II)
Cause astronomiche dei cambiamenti climatici

Ore 15,45
Prof. CARLO BARBANTE
(Università di Venezia)
Il clima del passato: una lezione per il futuro

Ore 16,15
Dott. CLAUDIO TOMASI
(ISAC CNR)
Aerosol e clima: studio degli effetti radiativi diretti indotti da aerosol naturali e antropici e dei principali effetti indiretti prodotti da aerosol e nubi

Ore 16,45 TAVOLA ROTONDA

Per informazioni: 0546-682973
www.torricellianaenza.it

Indice

Introduzione (prof. Alessandro Montevercchi)	4
Presentazione del Convegno (prof. Silvano Mazzoni)	5
The Climate System (dott. Michele Brunetti e prof. Franco Prodi)	7
Previsioni fallite, illusioni climatiche e tempo geologico (prof. Gian Battista Vai)	19
Il clima tra fissismo e trasformismo (prof. Gianfranco Laghi)	32
Archeologia e storia del clima (prof. Valeria Righini)	36
Cause Astronomiche dei Cambiamenti Climatici (prof. Nicola Scafetta)	58
La memoria del ghiaccio (prof. Carlo Barbante)	70
Aerosol e clima: studio degli effetti radiativi diretti indotti da aerosol naturali e antropici e dei principali effetti indiretti prodotti da aerosol e nubi (dott. Claudio Tomasi)	77
Società Torricelliana di Scienze e Lettere di Faenza	96



**SOCIETÀ TORRICELLIANA
DI SCIENZE E LETTERE
FAENZA**

**Convegno sui *Cambiamenti climatici* Faenza, 26 novembre 2016
Sala “Dalle Fabbriche” della Banca di Credito Cooperativo ravennate
forlivese e imolese
Patrocinio del Comune di Faenza e della Regione Emilia-Romagna**

Scopo del Convegno odierno è quello di aiutarci nel tentativo di poter meglio comprendere, con l'indispensabile apporto di esperti qualificati, quanto sta accadendo nell'atmosfera che ci circonda. La storia però ci riporta indietro di molti millenni: da sempre l'uomo è su un'astronave che naviga nell'infinito spazio. Egli infatti è sempre vissuto (ignaro) su una navicella spaziale, chiamata Terra, che gli ha assicurato la possibilità di abitarla: l'esigua falda di aria che circonda il nostro globo ci consente di respirare; l'acqua che lambisce e permea ogni lembo di terra ci garantisce la vita e determina, in larga misura, le condizioni meteorologiche. Il Sole ci invia non solo luce e calore, ma anche energia, tanta quanta è necessaria per produrre ogni cosa a partire dagli alimenti fino a quanto serve per la vita di relazione. Per questo è nostro dovere cercare di mantenere “pulita” la nostra astronave, di rendere sempre respirabile l'aria, di assicurare acqua sufficiente per tutti, di usare con giudizio le fonti energetiche (oggi per lo più derivate da riserve prodotte dall'energia solare). È pertanto impegno collettivo evitare la dispersione di inquinanti nell'aria e nell'acqua (per troppo tempo i mari sono stati usati anche come discariche a cielo aperto!), risparmiare le fonti di energia e cercarne sempre di nuove e più costanti, nonché di alternative, meglio se rinnovabili, onde curare la terra per ottenere quanto ci serve, rispettandone però le sue reali potenzialità. Non è vero che la natura si ribella e si vendica, è vero piuttosto che noi ne stiamo abusando per fini utilitaristici e che così agendo, per di più violentandola, provochiamo danni.

Alla luce di questo è importante cercare di comprendere cosa può determinare mutamenti della meteorologia tali da divenire altamente dannosi (a tal proposito basti pensare all'influenza che hanno sull'agricoltura), ma anche come sia possibile intervenire per adeguare la nostra vita ai grandi cambiamenti climatici che da sempre si verificano ciclicamente (ere glaciali, piccole glaciazioni, periodi siccitosi e caldi). La materia è troppo importante per indurci a seguire risposte “emotive” (spesso “di moda”), o per affidarla a chi pensa solo a ottenere i massimi vantaggi economici possibili e immediati, senza curarsi degli effetti deleteri che ne possono derivare.

Siamo qui riuniti per sentire la parola di esperti, scienziati preparati che studiano i fenomeni che si sono verificati in passato e che oggi si ripresentano; questi potranno chiarire molti nostri dubbi e, partendo dalla storia, passando per le grandi scoperte (come quelle del nostro Torricelli), ci potranno condurre a una più cosciente, concreta e veritiera conoscenza delle nostre possibilità di intervento.

Ringrazio il prof. Silvano Mazzoni, già presidente della Società Torricelliana, che aveva concepito e organizzato questo Convegno, il prof. Franco Prodi che lo ha coordinato, il sig. Sindaco del Comune di Faenza che ha concesso il patrocinio e ha presenziato all'apertura dei lavori. Esprimo infine il mio ringraziamento alla Casa editrice Rubbettino per aver consentito la riproduzione del contributo del prof. Gian Battista Vai (pubblicato nel vol. *Prevedibile/Imprevedibile*, a cura di E. Guidoboni, F. Mulargia, V. Teti, 2015); e così pure all'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL di Roma, per aver consentito la riproduzione del contributo del prof. Carlo Barbante, *La memoria del ghiaccio*, pubblicato negli Atti dell'Accademia, “Rendiconti di Scienze fisiche e naturali”, *Memorie di Scienze fisiche e naturali*, serie V, vol. XL, p. II (2016).

Alessandro Montevecchi
Presidente della Società Torricelliana

Presentazione del Convegno

Autorità civili, Forze dell'ordine, gentili Signore, Signori, amici, colleghi e in particolare voi giovani studenti, innanzi tutto Vi ringraziamo per la vostra partecipazione a questo Convegno, voluto e organizzato dalla Società Torricelliana.

L'incontro odierno si propone di avere solo un carattere "conoscitivo" di quanto sta accadendo sulla terra intorno a noi con l'ausilio di studiosi che dedicano la loro attenzione e il loro tempo alla ricerca scientifica, ben consci che ogni ramo della scienza è in continuo divenire, nel tentativo di giungere alla verità che però in assoluto non la si può raggiungere con la necessaria totale certezza (se non quella, individuale, di Fedè!). La Società Torricelliana ha il compito statutario di difendere e diffondere la "cultura", specie fra i giovani. Due sono state le parole chiave che ci hanno guidato: *cultura e ricerca* poiché la Natura e i suoi fenomeni rappresentano il primo e prioritario interesse nel vasto campo della conoscenza umana. Per questo ci si è rivolti a "ricercatori" qualificati, con interessi focalizzati su questo argomento, studiosi che hanno risposto generosamente al nostro invito, ben consapevoli che, specie in campo scientifico, non vi sono verità assolute; la storia lo dimostra, osservando che, con il passare dei secoli e con l'aumento delle conoscenze (e degli strumenti), molte credenze, che si ritenevano assolutamente certe, sono state poi smentite: basti pensare a esempio alla teoria che trattava della rotazione del Sole attorno alla Terra, del "post hoc ergo propter hoc" (che ha sollevato ora qualche dubbio nel regno dell'infinitamente piccolo), della concezione dell'immutabilità del tempo percepito (rigidamente legato all'uso di strumenti basati sul ritmo di ore diurne e ore notturne) che invece nell'uomo varia non solo in base ai suoi stati d'animo, ma che viene condizionato anche da eventi astrali, per non citare l'influenza delle radiazioni luminose, delle forze magnetiche e della gravità dei diversi corpi celesti sul suolo e che potrebbero agire persino sulla dimensione spazio. È pertanto evidente che la ricerca continua la sua lunga erta via, affidata agli studi di scienziati che inseguono la verità, passo dopo passo, avvicinandosene nella speranza di trovarla. Ora è quindi necessario documentarsi per poter fare il punto su quanto sino a ora è stato accertato, ma soprattutto per agire di conseguenza.

Noi, astronauti, pur non del tutto consapevoli di svolgere questo ruolo, ci troviamo su una navicella, chiamata Terra, che viaggia nello spazio infinito e che, basandosi sull'utilizzo di energie rinnovabili, ci garantisce il sostentamento quotidiano (a es. per procurarci il vitto), nonché la vita di relazione; tutto questo ci viene assicurato dall'uso di quell'esile falda di aria che respiriamo (in proporzione spessa come la buccia di una mela), dell'acqua e delle risorse che ci vengono offerte dalla nostra "piccola" nave spaziale. L'uomo ha pertanto il dovere assoluto di mantenere il giusto equilibrio fra l'uso e la produzione di quanto serve per vivere, ma, in particolare, ha l'obbligo di mantenere pulita l'aria che respira, l'acqua che utilizza in modi diversi e che è del tutto indispensabile sia sempre fruibile, nonché di curare la terra sia per gli alimenti che ci fornisce, sia per i suoi giacimenti energetici. Dobbiamo imparare a custodire costantemente la nostra astronave, secondo quanto si richiede al "buon padre di famiglia" nelle formule contrattuali. Non è vero che la Natura è vendicativa, ma è vero piuttosto che siamo noi uomini ad abusarne a dismisura.

Dei diversi fenomeni che avvengono e che si modificano incessantemente sulla Terra, alcuni, quelli prodotti dalle attività dell'uomo, possono e debbono essere ben controllati e guidati per non recare danno, mentre su altri, che dipendono da eventi "cosmici", non possiamo in alcun modo intervenire per modificarli, ragion per cui dobbiamo prepararci per saperci poi adattare. Per tutto questo è necessaria una conoscenza il più possibile approfondita delle diverse componenti dei fenomeni che influenzano la natura per comprendere (o meglio cercare di capire) come si dovrebbe agire per essere pronti ad affrontare quanto potrebbe accadere: molto dipende quindi dalla ricerca e questa deve essere il più possibile libera da condizionamenti, specie da quelli legati alle così dette "esigenze economiche", ma anche da quelli legati alla reazione emotiva (spesso del tutto irrazionale).

Oggi noi membri dell'Accademia Torricelliana e cittadini di Faenza, con questo Convegno, vogliamo anche celebrare la memoria di quel grande scienziato che fu Evangelista Torricelli, quello che si proclamò sempre faentino, pur essendo nato casualmente a Roma (ma da genitori nati in terra di Romagna) e che, fra le sue tante altre intuizioni e scoperte, è stato anche il fondatore della moderna meteorologia, non solo per le sue ricerche sul vuoto, il cui risultato (pratico) fu il barometro (strumento fondamentale), ma anche per essere riuscito a capire cosa genera lo spostamento delle grandi masse d'aria, cioè il vento: aveva compreso l'importanza delle differenze di temperatura fra

le diverse zone della Terra, quindi del ruolo delle pressioni atmosferiche, preconizzando anche, in tal modo, l'influenza delle grandi masse d'acqua (oceani, mari e persino laghi) sul clima.

Di tutto questo si tratterà oggi per cercare di risolvere alcuni dubbi, ben sapendo che, nel contempo, ne sorgeranno tanti altri. Buon lavoro a tutti.

Silvano Mazzoni

The Climate System

Michele Brunetti and Franco Prodi
ISAC CNR, Via Gobetti 101, 40129 Bologna

Riassunto

Nel presente manoscritto viene presentata una panoramica di ciò che sappiamo sul clima del pianeta Terra fino a 5,5 milioni di anni da oggi, utilizzando la temperatura dell'aria in prossimità della superficie terrestre come parametro maggiormente rappresentativo.

Il comportamento della temperatura mostra una serie di periodicità ben distinte sovrapposte a fluttuazioni interne. Questa panoramica ci invita a una descrizione delle basi fisiche del sistema climatico, in grado di spiegare tali fluttuazioni. Il sistema è dato dal binomio stella-pianeta. Cause di natura astronomica ne influenzano la distanza stella-pianeta e l'inclinazione dell'asse di rotazione del pianeta (la Terra), mentre le cause astrofisiche influenzano l'intensità della radiazione emessa dalla stella (il Sole). Viene quindi spiegata la complicazione introdotta dall'atmosfera, essenzialmente attraverso le molecole di gas triatomico, l'aerosol e le nubi. La composizione dell'atmosfera influenza la radiazione solare in entrata e quella a infrarossi in uscita. Vengono successivamente esaminate le diverse componenti del sistema clima: atmosfera, litosfera, idrosfera, criosfera, biosfera inclusa vegetazione e esseri umani. Tuttavia le interazioni tra i diversi comparti non verranno qui descritti, ma ci limiteremo al trattamento dell'atmosfera.

Climate and weather

Common sense often leads us to confuse the two terms, and the need for a separate definition of climatology and meteorology is not completely clear to the general public. A simple widely accepted distinction between the two fields is in general based on the different temporal scales that characterize the two. However, in a scientific approach, the different objectives of the two disciplines imply that a clearer separation both in methodology and in the general theoretical formulations should be made.

The definition of weather is apparently simple. It is the state of the atmospheric system surrounding us at a given moment: clear or cloudy sky, it is raining or not, warm or cold temperatures, humidity, visibility and so on.

Instead, the definition of climate is more complex: in fact, climate is *represented by the mean state and variations over time, of the same system*. Since climatic phenomena have variations that occur on different time scales, from 1 day to 1 million years or more, it is not possible to consider them all together, but it is necessary to focus on a time scale of interest. So, we will consider the phenomena that have typical variations on longer time scales as constant, and those that have variations on shorter time scales as rapid and casual fluctuations of the system itself.

Then the problem rises of which meteorological parameter, or combination of parameters, we should choose as more appropriate to describe the climate. The air temperature in proximity of the surface is the preferred, but others could be chosen even with more scientific value, if data were available from the past as they are for the air temperature.

Moreover we can ask ourselves if there are significant space scales which connect different climates, or which time scales (of years, decades, centuries...) should be selected for the arithmetic mean operations. Statistics suggests in fact the arithmetic mean as the most intuitive for analyzing the behavior of climate parameters.

The answer to these questions is obtained by trial and error, and by testing the algorithms and concepts with experience on real data.

In doing so the quality and completeness of data series on which we operate is of great importance. But let's have a look to the climate in the past.

Climates in the past

We mentioned the air temperature as the main parameter. It is now measured in many thousands meteorological stations in the world following the rules of WMO, the World Meteorological Organization (two meters above the ground, in a white painted box to shield the direct solar radiation, etc). The reconstruction of reliable historical series of this parameter is not easy at all, since, before strict rules had been dictated, the thermometers were exposed in niches in walls of houses (Fig. 1), or exposed to the sun, shadowed by trees, in countryside locations that have been in decades invaded by large cities peripheries, or sometimes with instruments roughly calibrated. Thanks to specialized teams of scientists we are in conditions, especially in Europe, of having historical series corrected for all possible errors and events, from the beginning of 19th century and even before, in a few cases.

How to present the data? As departure, in tenths of °C from the average temperature in the thirty years from 1961 to 1990 (Fig.2). We notice temperatures lower from 1860 to 1920, an increase from 1920 to 1940, then a plateau up to 1980 followed by a remarkable increase from 1980 to 2000. Last 15 years seem to indicate again a plateau, even if 2014 is the hottest year on record.

An increase, globally, of 0.075°C per decade since 1901 (0.155°C per decade since 1979) is generally accepted, indicating heating of the earth atmosphere.

Before proceeding backward to inspect the past climates we need to recall that the historical series of data of temperature in Fig.2 and 3a are the only ones obtained by physical instruments, the thermometers. The three main meteorological instruments were invented (thermometer, by Galileo, barometer, by Torricelli, hygrometer by various experimenters in Italy) or perfected in the first half of 17th century. Their use in the Accademia del Cimento network of the Granducato di Toscana, first meteorological service in the world, established 19th of June 1657, soon interrupted ten years later, was then spreading in Europe rather slowly, in academies, observatories and universities.

In Fig. 3 other “indirect” data are shown. They are called proxy data in the sense that they are not directly giving a measure of the parameter “air temperature close to the surface”, but provide good indications of its behavior.

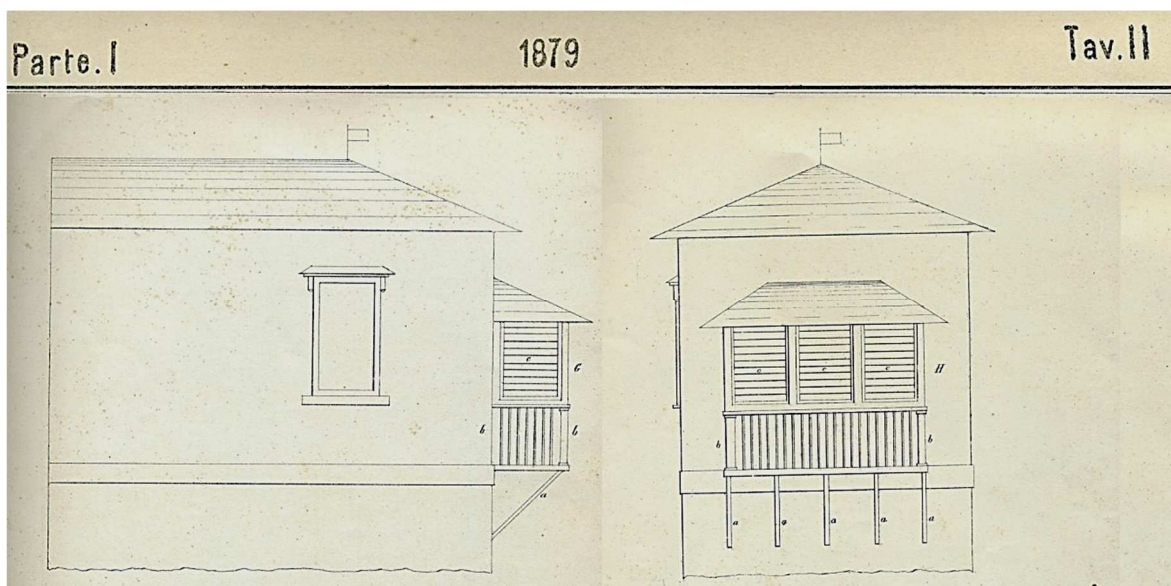


Figure 1. Meteorological window suggested by Italian Central Office for Meteorology and Climate in 1879 (Tacchini, 1879). In the last decades of the 19th century most of Italian observations were performed in urban environments, in screens located outside a north-facing window of the highest floor of a “meteorological tower”. The purpose of using such towers was to perform observations above the level of the roofs of the surrounding buildings

It is accepted that from 1000 to 1300 the northern hemisphere experienced a warm period (medieval warm period), then a little ice age up to the end of 18th century. If we move to 10.000 years from now paleoclimatologists suggest a Holocene maximum of 1 or 2 degrees and an ice age about 12000 years ago, Fig.4.

Next Fig.5 is providing us more information, on insolation, oxygen isotopes, methane, O₂, in addition to air temperature estimate. The reason is that all curves derive from ice-cores analyses obtained from Vostok ice core in Antarctica, investigated for all these parameters. Interestingly all parameters indicate similar behavior, with cycles of 41.000 years and sub cycles of 100.000 years to be ascribed to variations in eccentricity, axial tilt, and precession of the Earth's orbit. Oscillations from one ice age to the next are of the order of 6 to 8 degrees. Even longer term records were obtained from the recent Antarctic EPICA core (Fig. 6), which reaches 740.000 years and reveals 8 previous glacial cycles. Before 400 kyr the character of the ice ages is seen to be somewhat different: interglacial warmth is distinctly less than the four most recent interglacials. However, the interglacial periods before 400 kyr occupied a much larger proportion of each cycle than subsequently. It is also interesting to note how the dominant cycle before 400 kyr is 41kyr periodicity instead of 100 kyr as in the recent 400 kyr.

Even more instructive is Fig 7: on longer time scales, sediment cores show that the cycles of glacials and interglacials are part of a deepening phase within a prolonged ice age that began with the glaciation of Antarctica approximately 40 million years ago. This deepening phase, and the accompanying cycles, largely began approximately 3 million years ago with the growth of continental ice sheets in the Northern Hemisphere. It is interesting to note the dominant periodicity changes from 41.000yr to 100.000 yr. After this look to the

past, the problem is to explain these changes in the climate of the planet, which could avoid the two extreme stable cases, the ice ball and the arid water-free “roasted” one.

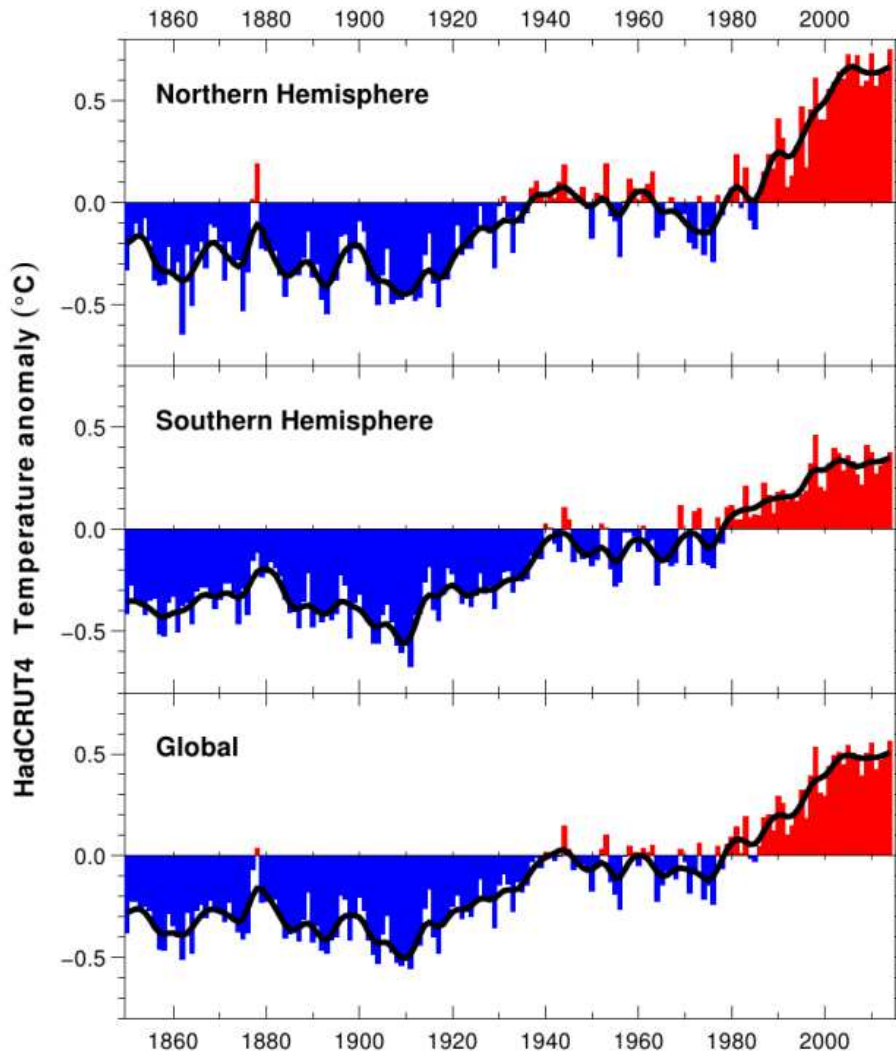


Figure 2. Global mean air temperature near to the surface.

It is time to present the basic physics behind the system of the couple star-planet in Fig 8.

Back to basics of the climate system

The earth generates heat internally, and this internal source drives plate tectonics, the magnetic field, volcanic eruptions and earthquakes. Some energy also comes in the fast protons and electrons of the solar wind, which cause interesting ionospheric and auroral effects, and there is even a small contribution from cosmic rays, which are mainly very energetic protons and photons. The light from the moon reaching the earth is reflected from the sun, and the light from all stars is negligible. All of these sources of energy are inconsequential compared to sunlight, which extends from 0.15 μm in the far ultraviolet to 4 μm in the infrared. We can, therefore, safely neglect these inputs and concentrate on the solar input. The total power received on a surface normal to the direction of the sun outside the atmosphere at the earth's distance is 1.94 cal/cm²-min or 1367 W/m². The spectrum is close to a black-body spectrum for 6000K, crossed by narrow absorption lines due to absorption in the chromosphere of the sun, the Fraunhofer lines.

We see at the right of Fig. 8 the surface of our star, the sun, with typical rice-grain like surface, and the dark sun spots. The distance separating the two actors is 150.000.000 km. The earth disk is intercepting 1367W /m² of the sun radiation and part of it is reflected back into space. If we redistribute on the earth surface (the earth is rotating and the disk intercepting radiation is changing continuously) the flux at the top of the atmosphere is 240 W/m².

The sun and the earth emit in two distinct bands of the e.m. spectrum, $\lambda_{\text{max}}T$ is constant so the sun emits centered at 6000 K and 0.5 μm and the earth at 288K and 9 μm .

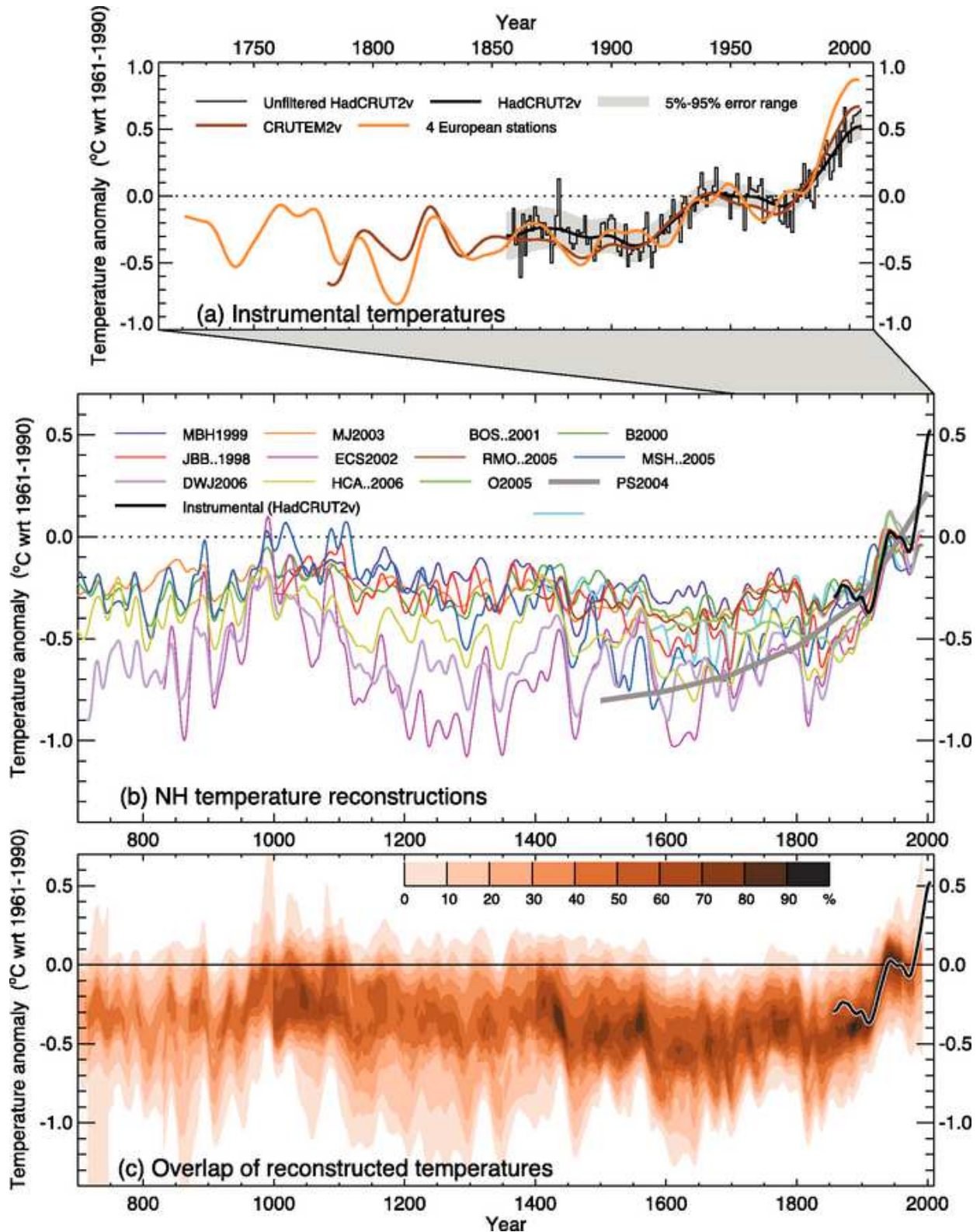


Figure 3. Records of Northern Hemisphere temperature variation during the last 1.3 kyr. (a) Annual mean instrumental temperature records. (b) Reconstructions using multiple climate proxy records and the HadCRUT2v instrumental temperature record in black. (c) Overlap of the published multi-decadal time scale uncertainty ranges of all temperature reconstructions, with temperatures within ± 1 standard error (SE) of a reconstruction 'scoring' 10%, and regions within the 5 to 95% range 'scoring' 5% (the maximum 100% is obtained only for temperatures that fall within ± 1 SE of all 10 reconstructions). The HadCRUT2v instrumental temperature record is shown in black. All temperatures represent anomalies ($^{\circ}\text{C}$) from the 1961 to 1990 mean.

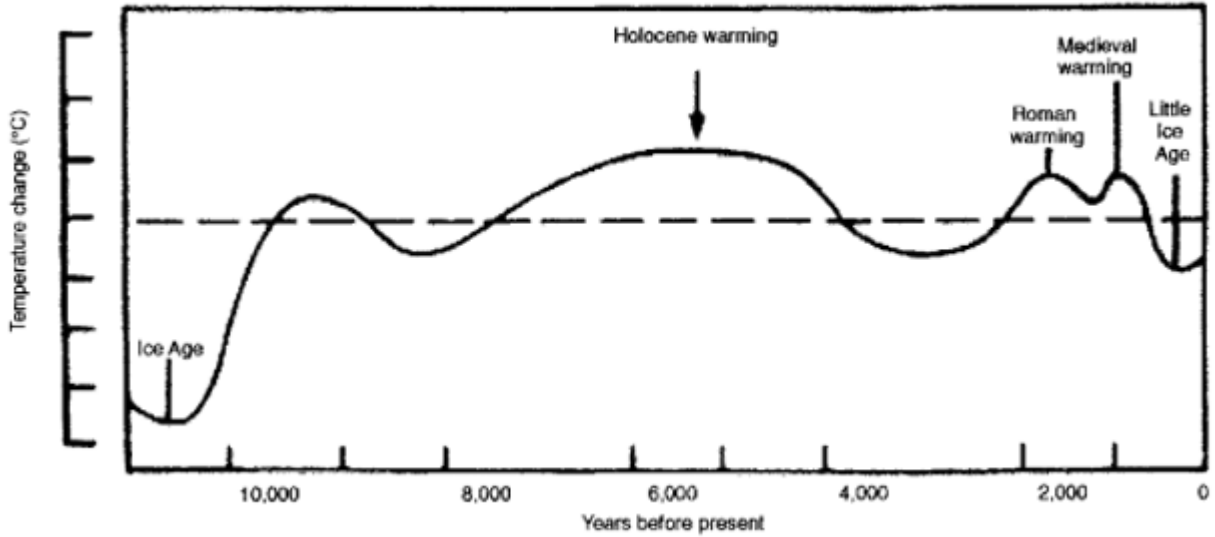


Figure 4. Global temperature variations for last 10,000 years. Composite of proxies from 1990 IPCC Report.

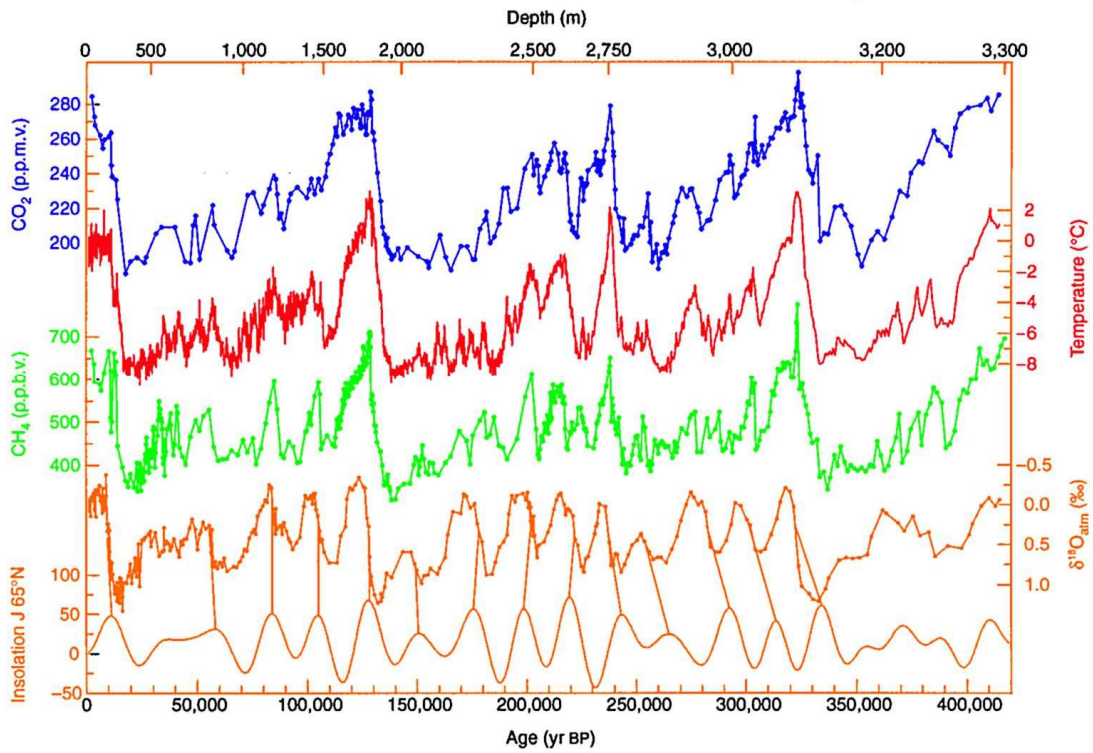


Figure 5. Vostok ice core reconstruction of temperature and CO₂ and CH₄ concentrations over the last 420 kyr.

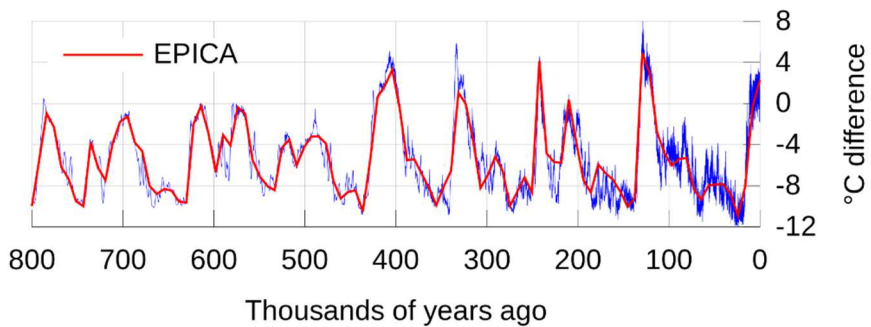


Figure 6. EPICA expedition ice core reconstruction of temperature and CO₂.

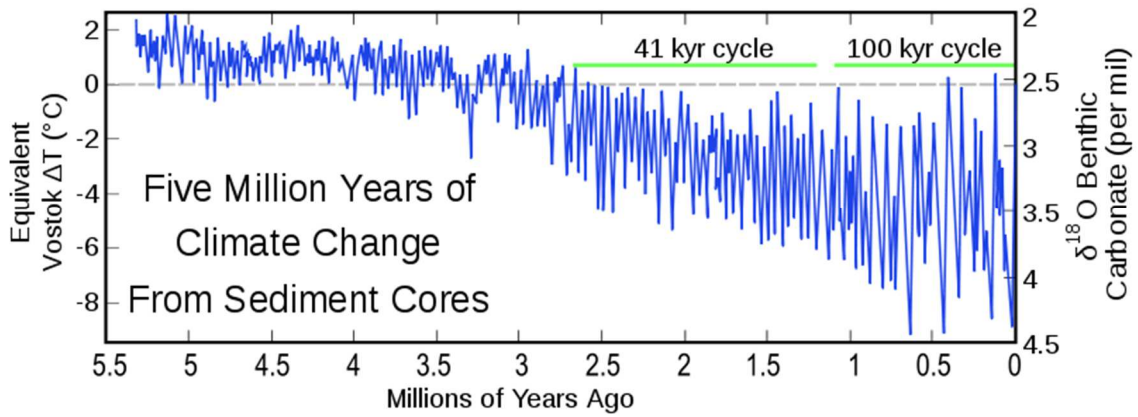


Figure 7. Five million years of climate change reconstructed with sediment cores

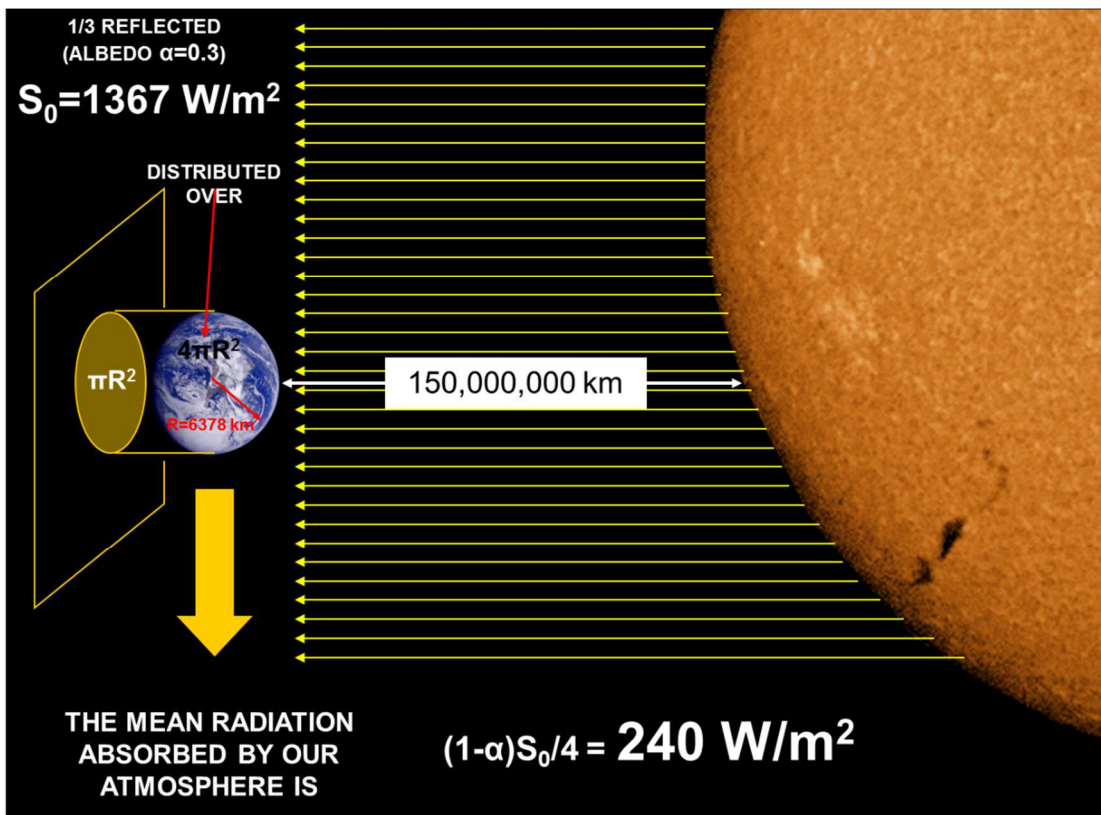


Figure 8. Basic radiative interactions of the Earth-Sun system.

If we assume that the energy absorbed is equal to the one emitted (the two radiative fluxes equal) and no atmosphere present on the planet (billiard ball scheme) we should obtain a temperature of the earth surface of -18°C , as shown by the following equation:

$$S_0(1 - \alpha_p)\pi r_p^2 = \sigma T^4 4\pi r_p^2 \quad \rightarrow \quad T = \sqrt[4]{\frac{S_0(1 - \alpha_p)}{4\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{1367(1 - 0.3)}{4 \cdot 5.6710^{-8}}} = 255\text{K} \cong -18^{\circ}\text{C}$$

Where S_0 is the Solar constant, α_p is the planetary albedo, σ is the Boltzmann constant, r_p is the Earth radius and T the planetary emission temperature.

However, the atmosphere is there, transparent enough to visible (sun) radiation, but with great ability to absorb infrared radiation. By introducing the effect of the atmosphere, we have a term T_A in equation, and a flux balance is obtained as in Fig. 9, leading to a surface temperature of about $+15^{\circ}\text{C}$. The atmosphere is nearly transparent to short-wave radiation, but is relatively opaque to long-wave radiation, except in a few

"windows" of transmission. Therefore, it acts like the glass of a greenhouse, absorbing and emitting long-wave radiation according to its temperature.

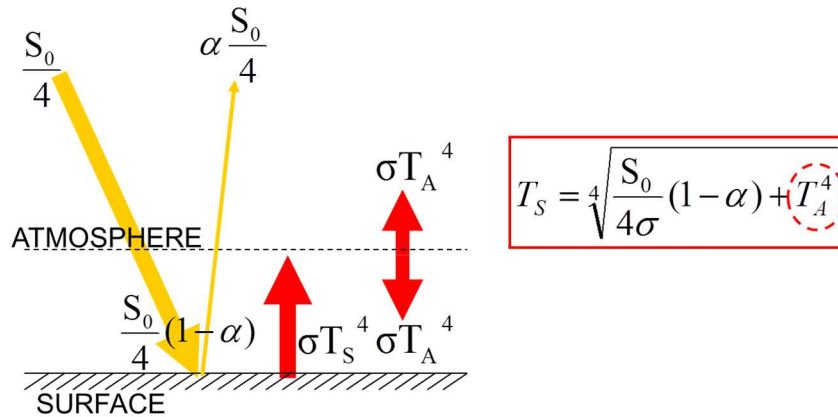


Figure 9. Schematic sketches of the greenhouse effect.

We need to explain why the gaseous envelop plays such important role. In Fig. 10, below the black body curves of solar and terrestrial radiation the curve of absorption/transmissivity is shown vs wavelength. The bands of O_2 , O_3 , H_2O , CH_4 are indicated combined, while separately in the following Fig.11. One observation comes immediately: those gases are negligible contributors to the total mixture of atmospheric gases, but have a fundamental role in the radiative transfer. They play such role because they are composed of three or more atoms.

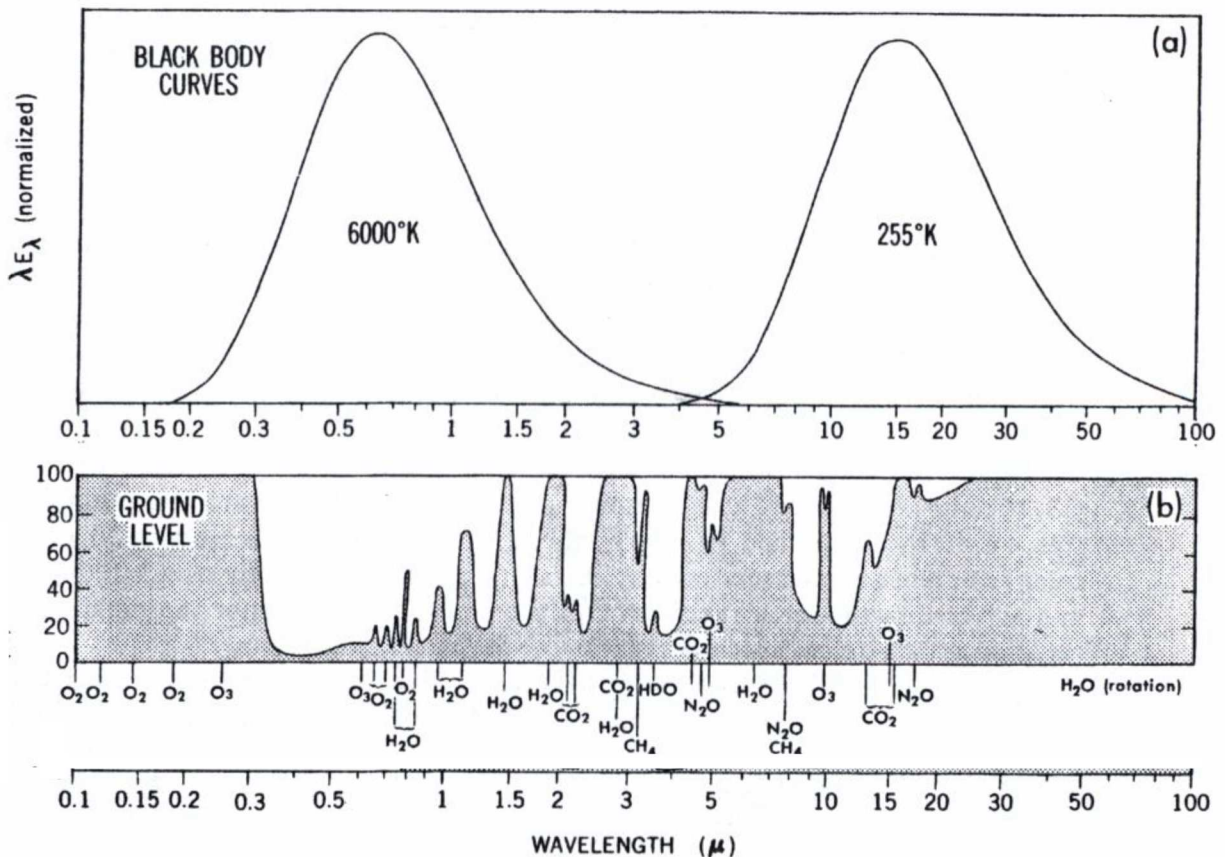


Figure 10. a) Black body emission curves of the Sun and the Earth; b) absorption spectra of the Earth's atmosphere.

While the visible light can make it through the surface the infrared radiation from the surface has only one, and not complete "window" towards the outer space, between 8 and 13 μm. In summary the atmosphere is transparent enough to visible radiation but has a great ability in absorbing infrared radiation. In Fig 11 the behavior of individual gases shows the important role of water vapor, N_2O ,

methane, CO₂ and O₃. The consequence is that only a small part of the radiation emitted by the surface of the earth and by the lower layers of the atmosphere can leave definitively the planet while most is absorbed by the above listed tri-atomic gases. The clear sky atmospheric gases reemit towards the surface, but even more effective in reemitting is the cloud cover in its lower part. This leads to an entrapment of infrared radiation and such entrapment is rather improperly called greenhouse effect. It is just the natural greenhouse effect which leads to a new surface radiation balance which is schematically shown in Fig. 9.

The major constituents of the atmosphere, the diatomic gases nitrogen and oxygen, and the 1% of argon, do not interact with electromagnetic radiation in the long-wave spectrum at all. The only trace gases present in significant amounts are water vapour and carbon dioxide. Water vapour has a permanent dipole moment, and so a strong pure rotation spectrum beginning at about 25 μm and extending with greater and greater absorption to longer wavelengths. It also has a vibration-rotation band for the bending mode at around 6.3 μm, and for an asymmetric stretching mode at 2.66 μm.

Carbon dioxide has a strong band at 14.7 μm which is very well placed for greenhouse activity, as well as an asymmetric stretching vibration at 4.26 μm which is less important, and no rotational spectrum at longer wavelengths, since it does not have a permanent dipole moment. However, the 14.7 μm band covers only a very limited part of the spectrum, and carbon dioxide is not present in large concentration (about less than 400 ppm), so carbon dioxide will have a much smaller effect than water vapour. It should be realized that both the greenhouse effect and carbon dioxide are essential to life on Earth.

The water vapour absorbs long-wavelength radiation very strongly, and will be nearly opaque to it, so that it is emitted and absorbed continuously. The radiation will be emitted at the surface at a temperature of 288K, but will be emitted into space at 217K, as required for equilibrium. Water vapour is by far the most important contributor to this process, by means of its large concentration and strong rotational spectrum.

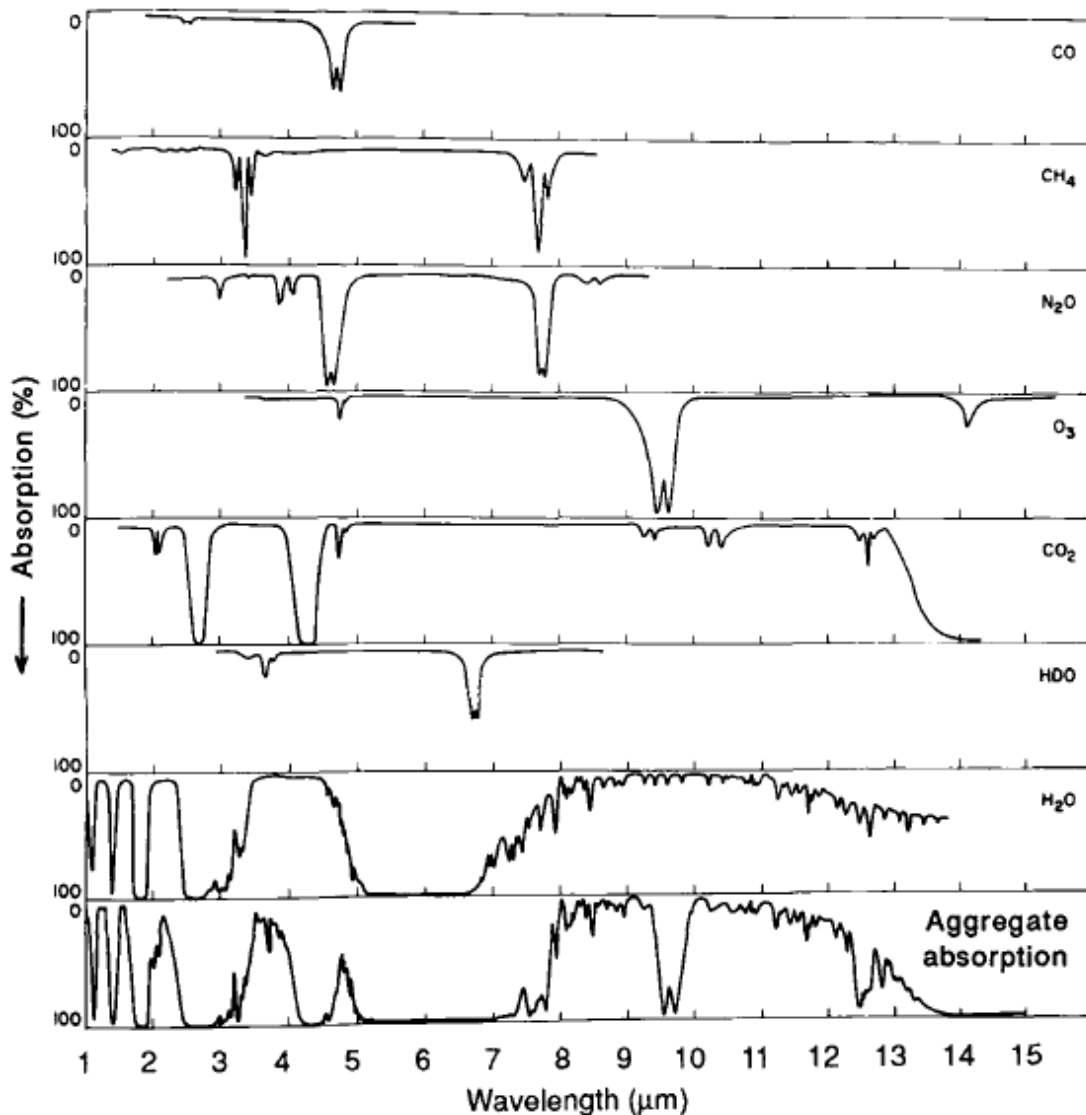


Figure 11. Infrared absorption spectra for various atmospheric gases. [From Valley (1965)]

The question now is posed, after our excursion in the past which has shown climate changes and the basics of the physics of climate, which are the causes of these changes?

Two main reasons: the lamp and the billiard ball scheme, we can suppose that the distance lamp ball changes and the intensity of the lamp changes. The first cause is called an astronomical cause and the second an astrophysical cause. They combine in changing the amount of radiation reaching the top of the atmosphere.

We will then recognize an additional cause, the change of atmospheric composition, through the processes of radiative transfer mentioned above. This is adding a complication which needs an explanation.

All the above considerations can be quantified in the scheme of Fig. 12 which indicates the contributions in Wm^{-2} to the steady state energy budget of the earth. The numbers represent energy in units of Watt m^{-2} the figures are rough estimates but show the relative contributions.

Causes of climate changes

Astronomic and astrophysical causes

Having evidenced the crucial role of the atmosphere in ensuring a surface temperature compatible with life of man and the biosphere and having recognized that the cause of change in climate is the change in the amount of radiation reaching the top of the atmosphere from the sun, and the change in the composition of the atmosphere itself, we come back to the two causes of changes of the radiation reaching from the sun the top of the atmosphere: astronomic and astrophysical causes.

The astronomical processes leading to changes of the amount of radiation reaching the top of the atmosphere are the variation of earth orbit and of the orientation of the earth axis. The theory connecting these facts is the Milankovich theory.

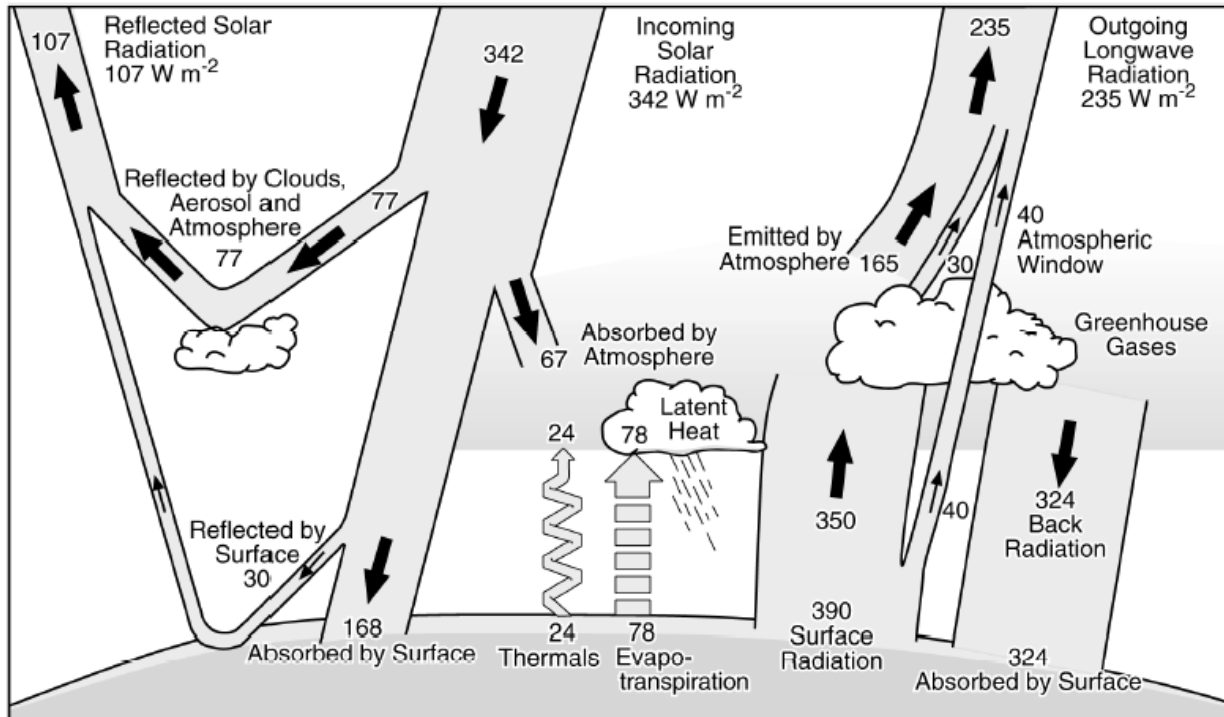


Figure 12. Schematic diagram of the global radiation budget in the climate system.

As astrophysical processes we indicate the processes which change the radiation emitted by the sun: sunspots, which have a cycle, the solar wind, the coronal mass ejections and the flares.

The sun is the source of energy that warms the Earth, therefore it is reasonable to expect a close relationship between the variation in the flow of that energy and our planet's climate.

There is observational evidence that relates particular climatic events of the past with different rates of energy received. An example is the so called Little Ice Age, an anomalously cold period between late 17th and early 18th century which happened during a long minimum in the sunspot number observed in the solar disc (see Fig. 13) known as Maunder Minimum.

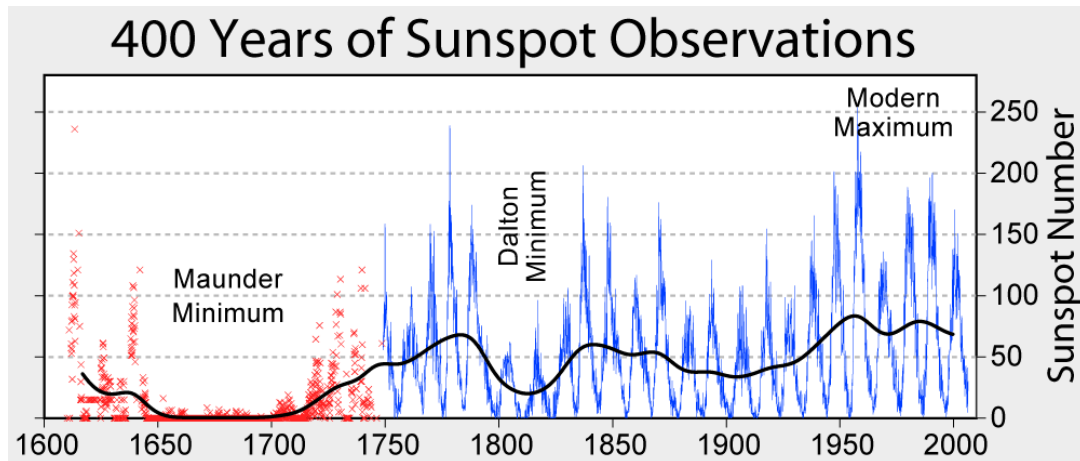


Figure 13. Sunspot number observations. Since c. 1749, continuous monthly averages of sunspot activity have been available and are shown here as reported by the Solar Influences Data Analysis Center, World Data Center for the Sunspot Index, at the Royal Observatory of Belgium.

However, sunspot number is not an exhaustive indicator of the incoming solar radiation. In fact their number changes significantly between maxima and minima of the Schwabe cycle (about 11 years long), ranging from about 150 sunspots in its maximum phase to about zero sunspots during minimum, such as during the long Maunder minimum, but the radiation reaching the top of our atmosphere changes of only by 0.1% within this cycle (as monitored by satellite observations since early 1980s) and the present knowledge about climate sensitivity with respect to the incoming solar radiation variability can justify only a variation of the magnitude of 0.1 degrees between maxima and minima.

Compartments and interactions

The compartments of climate systems are essentially five and processes relevant to climate systems take place inside each of them or between adjacent compartments.

Atmosphere: the gaseous component of the climate system is the most rapidly changing over time,.

Cryosphere: includes glaciers, snowfields, ocean ices.

Lithosphere: orographic structure of the earth, which changes very slowly over time.

Hydrosphere: oceans, seas, rivers, lakes.

Biosphere: flora, fauna, human activity.

Both atmosphere and hydrosphere are responsible of the latitudinal redistribution of the uneven solar heating through their respective circulations. The major difference is that atmospheric circulation is clearly separated into the two hemispheres, while the ocean one is a unique conveyor belt for the whole planet.

Changes in atmospheric composition and climate

We have shown that a cause of climate change is related to the variation in atmospheric composition. These are originated by nature or by humans. Among the natural causes leading to changes in atmospheric composition we mention those originated in the interaction between the climate system components, such as the atmosphere-oceans interactions, or atmosphere-biosphere interactions.

In fact, important exchanges take place between ocean and atmosphere in water vapor, momentum and CO₂. Same fluxes of CO₂ and water vapor are exchanged between vegetation, or the whole biosphere, and the atmosphere.

Volcanoes are introducing gases (CO₂, SO₂) and particulates into the atmosphere. Natural forest fires are affecting atmospheric composition, while the water cycle affects all circulations of ocean and atmosphere. Aerosols are naturally generated by dispersion of solids and liquids in deserts and oceans surfaces, and gas to particle conversion and combustion are important source mechanisms. Many anthropic activities imitate nature in these mechanisms for generating aerosols, while greenhouse gases such as CO₂, SO₂, O₃, CH₄ are generated by combustions and CH₄ by breeding of animals. The reduction of forest areas for agriculture or other uses leads to variations in albedo and consequently leads to climate changes.

An important interaction of atmosphere and ocean affecting climate but not related to changes in composition is the so called El Niño and La Niña, whereas the surface warm areas of the Pacific Ocean move

between eastern coasts of Australia to coasts of south America and vice versa with important consequences on weather in both hemispheres.

In normal non El Nino conditions:

- Trade winds blow westwards.
- Sea surface is about 1/2 meters higher at Indonesia than at Ecuador.
- SST is about 8 degrees C lower in the east supporting marine ecosystems fisheries.
- West Pacific regions are wet, while the east Pacific is relatively dry.

While during El Nino:

- Depression of the thermocline in the eastern Pacific and elevation of the thermocline in the west.
- Rise in SST and a drastic decline in primary productivity.
- Rainfall follows the warm water eastward, flooding in Peru and drought in Indonesia and Australia.
- Trade winds relax in the western Pacific
- Large changes in the global atmospheric circulation.

Aerosols, Clouds, Water-cycle and Climate

Aerosols, the liquid and solid particles suspended in the air influence climate through direct and indirect effects.

Direct effects are due to scattering and absorption of solar and terrestrial radiation.

Indirect effects are linked to the aerosol role as cloud condensation nuclei and ice forming nuclei, which determine the microphysical characteristics of clouds and then influencing their radiative properties and lifetime.

In Fig 12 we notice visually the role of clouds in the radiative transfer. More than that is shown there, we can say that clouds are at the core of the climate problem and until their presence is quantitatively represented with their true effects in climate models we cannot pretend of forecasting climate. At most we can produce scenarios with a very low degree of reliability.

Clouds increase the albedo and generate their own greenhouse effect. It is estimated that clouds increase on average the outgoing flux of solar radiation by -48 Wm^{-2} and decrease the outgoing flux of infrared radiation by -31 Wm^{-2} on a global scale. Thus, the effect of clouds on the net radiative flux is -17 Wm^{-2} , with a global mean effect of atmospheric cooling.

How this effect takes place? The radiative fluxes are affected when a cloud is present above and below and inside. Above and below because of temperature, aerosol and water vapor profiles, modulated by surface properties. Inside because of the macrophysical structure (optical thickness, vertical and horizontal inhomogeneities) and microphysical characteristics (cloud particles size distribution, shape, phase of cloud particles)

In Table 1 we show the importance of cloud type on the radiation budget.

Cloud type	Surface			TOA			Atmosphere		
	SW	LW	TL	SW	LW	TL	SW	LW	TL
Cirrus	-22.2	8.0	-14.2	-25.3	30.7	5.4	-3.1	22.7	19.6
Cirrostratus	-79.5	20.0	-59.5	-87.4	59.7	-27.7	-7.9	39.7	31.8
Deep convective	-118.6	16.3	-102.3	-126.2	60.7	-65.5	-7.6	44.4	36.8
Altostratus	-28.7	20.3	-8.4	-29.3	13.0	-16.3	-0.6	-7.3	-7.9
Altostratus	-79.6	35.4	-44.2	-80.9	22.1	-58.8	-1.3	-13.3	-14.6
Nimbostratus	-98.2	32.4	-65.8	-98.8	20.6	-78.2	-0.6	-11.8	-12.4
Cumulus	-35.4	33.4	-2.0	-33.8	4.0	-29.8	1.6	-29.4	-27.8
Stratocumulus	-77.7	46.8	-30.9	-74.7	7.7	-67.0	3.0	-39.1	-36.1
Stratus	-88.1	39.2	-48.9	-84.6	7.8	-76.8	3.5	-31.4	-27.9

Table 1. Global annual (4-day averaged) mean overcast sky cloud-induced radiative flux changes in Wm^{-2} at the surface, at the top of the atmosphere, and in-atmosphere. SW-shortwave, LW-longwave, TL-total.

There is not here the possibility to enter into the details of computations. However, it is noteworthy to say in a context of a school the great challenge for physicist to contribute to solve the climate problem through a correct description of scattering of e.m. radiation by cloud particles
Many problems remain unsolved. We mention the followings:

- Microphysical properties (phase, size distribution) are often fixed parameters in GCM

- The numerical solution of single scattering
- Single scattering treatment is not always realistic and multiple scattering approach is sometimes necessary
- Complexity of non-plane parallel clouds with highly inhomogeneous structures (3-D effects) are taken into account neither in cloud microphysical retrievals nor in GCM
- Optical properties of non-spherically shaped ice particles
- No multiple layered clouds (uncertainty in cloud base height), very important for surface LW fluxes, are considered in the models and difficulties exist in the parameterization of horizontal inhomogeneities.

Concluding, clouds exert a strong impact on climate through radiative energy redistribution via the scattering and absorption of radiation, playing also an important role in the hydrological cycle. They constitute the main source of uncertainty in global climate models, arising principally from two types of problems related to cloud-climate interactions:

- definition of the cloud radiative properties in climate models, through a knowledge of cloud morphology and microphysical characteristics
- and simulation of the behavior of clouds in a changing climate, along with their feedback mechanisms.

As a consequence, the water cycle of which clouds and precipitation are the visible leg in the atmosphere stands as the guide of the climate system.

Previsioni fallite, illazioni climatiche e tempo geologico¹

Gian Battista Vai

Museo Geologico Giovanni Capellini, Dipartimento BiGeA,
Alma Mater Studiorum – Università degli Studi di Bologna Via Zamboni 63–67
giambattista.vai@unibo.it

Il tempo geologico profondo

Solo meno di un secolo fa di è compiuta quella che forse è la maggior rivoluzione conoscitiva della storia umana, ancora maggiore della rivoluzione copernicana del 1543. Mi riferisco alla misura induttiva dell'età della Terra, e con essa dell'universo, nell'ordine dei miliardi di anni, realizzata solo nella prima metà del Novecento. La scoperta della radioattività di alcuni minerali contenuti nelle rocce terrestri e nelle meteoriti ha propiziato il cambiamento di paradigma, tanto radicale da non essere ancora stato non dico metabolizzato, ma neppure immaginato sia dal popolino che dagli acculturati.

In sostanza, siamo passati da un'età della Terra di ascendenza biblico-anglicana (6000 anni) a un'età scientifica di vari miliardi di anni. Solo due categorie di scienziati, i geologi e gli astrofisici, sono attrezzati per ragionare in questi nuovi termini, non senza difficoltà e con bisogno di formazione alla specifica mentalità. Gli stessi geologi sono rimasti inizialmente sbalorditi di un tale salto prodigioso. Per tutti gli altri, purtroppo, è difficile contrastare il buon senso e l'esperienza per cui la misura del tempo si limita alla nostra generazione, in qualche caso alla nostra vita, più raramente alla storia scritta e orale, e magari a un po' di preistoria (la notte dei tempi).

Questo significa che il mondo in cui viviamo non può essere capito guardando il passato, né predetto rivolti al futuro, se non forzando il senso comune, per il quale il vero percepito, come dato reale empirico, non risale a oltre i propri 30 anni. Ma fare questo è molto difficile. Così, ad es., tutto il mondo dei disastri naturali ciclici (terremoti, eruzioni vulcaniche, alluvioni, frane) rimane fuori dal nostro vissuto e ne veniamo sempre colti di sorpresa.

Un esempio di quanto poco questa rivoluzionaria concezione del tempo tocchi lo scienziato come l'uomo comune è l'ilarità compiaciuta che suscitano domande e risposte sull'età ultramilionaria di gran parte dei fossili.

È difficile avere memoria storica dello sterminio degli Ebrei. Figuratevi che cosa accade della memoria geologica. Ma il tempo geologico lungo consente l'esplicarsi di processi naturali che il tempo di memorizzazione umana (una generazione) fa ritenere insensati (contrari al senso comune): come un terremoto in una pianura.

Prevedere il futuro, se mai possibile, implica quindi di possedere una chiara concezione del tempo, che può sembrare banale solo se non si è cercato di approfondire il tema. Per chi non vuole fare neppure questo sforzo, basta prendere le *Confessioni* di S. Agostino, e leggere le pagine sublimi che egli dedica al problema del tempo nel libro undicesimo. Ci si convincerà subito che il quadro è assai complesso, pur rimanendo nell'ambito della memoria del proprio tempo individuale e di quello della storia e preistoria umana. Che dire poi se da questa brevissima parentesi della storia della Terra e del cosmo si passa al lungo profondo tempo geologico dei miliardi di anni? Come riuscire a far capire che il concorso del tempo geologico è in grado di produrre effetti a prima vista sovrumani, come il fluire di un granito che diventa uno gneiss (ce ne sono tanti nelle Alpi, in Sardegna e in Calabria), o come lo spaccarsi di una roccia al momento del terremoto dopo essersi a lungo caricata come una molla?

Senza una impegnativa educazione geologica della popolazione tutta è molto difficile fare della prevenzione seria in un paese come l'Italia che sembra sia stato eletto a sede esemplare di tutti i rischi geologici.

D'altra parte, senza un costante ravvivare della memoria, senza un esplicito culto dell'insegnamento che deriva dalla storia vista con gli occhi della scienza, la rimozione dei ricordi sgradevoli avviene in una generazione e fa piazza pulita di ogni educativo ricordo. La lezione del tempo umano, i trent'anni della tua generazione, non arriva a lambire la durata dei processi geologici disastrosi naturali, che quindi ti appaiono sconosciuti e inattesi.

Intravedere il divenire del futuro?

È sempre ancora un'arte difficile, molto difficile, anche in campo politico, e ancor di più in quelli economico e scientifico intravedere il futuro. Si dice che il grande politico è colui che vede avanti cinquant'anni. In Italia, a mio parere, forse solo Alcide De Gasperi lo è stato nel secolo passato. Chi mai aveva immaginato un papa

¹ Questo articolo è un parziale aggiornamento nel testo e illustrazioni di quello pubblicato a mio nome col titolo *Tempo umano e tempo geologico: i cambiamenti climatici sono un capro espiatorio?* nel volume *Prevedibile/Imprevedibile* a cura di E. Guidoboni, F. Mulargia, V. Teti, per i tipi di Rubbettino 2015, p. 31–52.

polacco e la dissoluzione dell'Unione Sovietica? E qualcuno aveva subodorato la crisi finanziaria globale del 2008 e quella economica del 2009?

Quando ero giovane universitario e appena laureato in geologia avevo appreso a lezione che le riserve (accertate) di petrolio bastavano per un decennio, e quelle di ghiaia dei fiumi romagnoli altrettanto. La prima però era una ipotesi giornalistica catastrofista (e doppiamente strumentale), mentre la seconda era una stima seria frutto di nostri accurati rilevamenti sul campo. Ero quindi già sensibilizzato, e quando il Club di Roma (Aurelio Peccei) nel 1972 fece pubblicare *I Limiti dello Sviluppo* non fui sorpreso. Tutt'altro. Ripensandoci ora, pur essendo convinto che lo sviluppo deve avere i limiti della sostenibilità contestuale, devo riconoscere che quegli scenari erano fallaci e inventati, ben altro che scientifici, forse effettivamente frutto di una grande *lobby* catastrofista. E, comunque, frutto di una previsione sbagliata.

Da allora, le riserve (accertate) di petrolio e gas sono sempre aumentate (limitandoci al convenzionale, oggi le prime si aggirano sul secolo e le seconde su mezzo millennio). Negli ultimi cinque anni lo shock positivo seguito all'entrata in produzione del non convenzionale *shale gas* non solo ha reso il nord America autosufficiente nell'approvvigionamento energetico, ma sta sostituendo la percezione di scarsità con quella di abbondanza di petrolio (puntualmente registrata nel crollo del prezzo del greggio e forse causa o concausa della crisi ucraina, perché proprio la parte orientale di quel paese è ricca di carbone e di *shale gas*).

Prevedere i tempi dei disastri naturali?

È ancor più difficile che prevedere il normale futuro politico, economico, scientifico. Tutti i parametri atemporali di queste categorie di eventi ricorrenti (terremoti, alluvioni, eruzioni, veri cambiamenti climatici e non semplici escursioni di temperatura e umidità) sono prevedibili statisticamente con approssimazioni maggiori o minori. Ma il tempo preciso di occorrenza, per ora almeno, rimane incognito. Tutti questi processi avvengono in un sistema Terra talmente complesso nel suo insieme e nei suoi sottoinsiemi (e così poco studiato) che risolvere deterministicamente la variabile tempo risulta impossibile. Peggio ancora se la volessimo abbinare a un luogo preciso e finito.

Per fare un esempio geologico verificato sperimentalmente *a posteriori* nel laboratorio naturale della storia della Terra, si pensi all'ipotesi del disseccamento del Mediterraneo occidentale (non importa se più o meno spinto, oppure improbabile, come si pensa oggi). Esso sarebbe stato assai più ragionevole (e quindi probabile) a verificarsi durante le glaciazioni quaternarie (a bassi livelli marini globali) negli ultimi due milioni di anni. E invece è avvenuto, o quasi, prima, fra 6 e 5,5 milioni di anni fa, quando il livello del mare era assai più alto (Roveri *et al.* 2014, Vai 2014). Altro esempio è offerto dal livello di CO₂ nell'atmosfera terrestre oggi, a cui non corrisponde (ancora?) un corrispettivo aumento apprezzabile del livello del mare per effetto di riscaldamento effettivo né di scioglimento adeguato di ghiacci (nel bilancio globale).

Fideizzazione della scienza come nuova religione?

Il mito del progresso inarrestabile alimentato dal positivismo è naufragato ormai da un secolo, ma l'illusione dell'onnipotenza della scienza e il tentativo di sostituirla alla religione e a Dio facendone la nuova fede è duro a morire, a cominciare da certi cosiddetti scienziati fanatici. In realtà non c'è nulla di fideistico nella scienza moderna galileiana, e anzi tutto vi è approssimativo (seppur calcolabile), relativo, limitato.

Il primo paradigma di comunicazione della scienza dovrebbe essere la sua finitezza, quanto maggiori e più varie sono le sue scoperte. Va detto che non sempre gli scienziati hanno contribuito a divulgare questa concezione presso il grande pubblico, coltivando il dogmatismo al posto dell'umiltà. Gli scienziati hanno una responsabilità duplice nella salvaguardia della natura e del Creato da un lato e del genere umano dall'altro. Primo, perché si trovano all'origine della catena logica della conoscenza della natura. Loro scoprono come la natura è costituita, come si evolve e si è evoluta, e come ci attendiamo che evolverà. Secondo, perché solo restando fedeli al loro ruolo potranno continuare l'opera di scoperta. E questa fedeltà impone loro di non trasformarsi nello stesso tempo in filosofi, in teologi, in politici, rischiando di diventare stregoni, sciamani, o semidei, troppo inclini a dire sciocchezze.

Divulgazione scientifica e comunicazione del rischio

Fatte le premesse doverose sui limiti della scienza, le condizioni in cui si esplica la divulgazione delle varie scienze è assai differente da una scienza all'altra, oltre che da tempo a tempo. Presso gli antichi egizi, ad esempio, l'astronomia godeva di considerazione altissima. A metà Ottocento, con l'esplosione della rivoluzione industriale, alimentata da carbone e ferro, la geologia era divenuta la scienza di maggiore impatto politico e sociale (*big science*), e in aggiunta era un tema ricorrente nei salotti borghesi sulla scorta delle scoperte e dei libri di Cuvier, Lyell, Darwin, Owen e tanti altri. Poi le cose sono molto cambiate. In periodi di guerra, a farla da padrone nella divulgazione scientifica sono subentrate chimica e soprattutto fisica, con tutte le loro appendici ingegneristiche. In tempi di relativa pace, nella scala di interessi oggi prevalgono medicina e salute, agricoltura, archeologia, fisica, astronomia. Per non parlare delle discipline umanistiche come letteratura, arte, filosofia (anche se debole), musica, e diritto, prima di tutto e specialmente in Italia, paese che

dal romanticismo in poi, complice l'idealismo, sembra aver voluto voltare le spalle alla scienza moderna, che proprio in Italia era nata tre secoli prima.

Per essere precisi, geologia e geofisica, riunite in ambito universitario nell'area disciplinare delle Scienze della Terra (ma per quanto tempo ancora riconosciuta?), sono le discipline che più direttamente si occupano dei disastri naturali, ma subiscono una vera e propria discriminazione a livello di informazione e divulgazione scientifica. Passato il momento caldo di una qualche emergenza, nessuno se ne cale più, e la divulgazione di fatto è bloccata. Chi ne voglia la prova non ha che da leggere i giornali e sintonizzarsi sulle reti televisive. Sarà presto servito, perché troverà pressoché nulla. Per ottenere un eco geologico nei giornali italiani dobbiamo sfruttare "cavalli di Troia" come il *National Geographic* o riviste scientifiche internazionali di alto impatto (che danno accesso, in genere, a ciò che vale). Evidentemente la scuola è lo specchio della televisione, ed è vano sperare una crescita di contenuti e di impegno sul lato educativo, quando è carente quello divulgativo, ossia quando il mondo stesso della ricerca non si impegna diffusamente in questa direzione.

Anche la memoria come esperienza personale e nell'ambito familiare generazionale è stata vanificata, in un paese in cui i due terzi della popolazione sono sradicati e inurbati, e in cui i legami familiari con i nonni, e spesso anche con i padri, sono ormai perduti.

Il tragico allora è che in un paese come l'Italia, luogo di frequenti e grandi pericoli naturali che spesso generano disastri (Guidoboni e Valensise 2011, 2014), anche se di gravità spesso solo intermedia, magari c'è conoscenza, anche eccellente, accademica e teorica, ma nessuna coscienza e tanto meno memoria diffusa nella stragrande maggioranza delle persone. I disastri naturali per gli italiani sono come la morte: avvengono certo, ma a spese degli altri. È come se non esistessero, anzi vengono istintivamente rimossi. L'esatto opposto di quanto fanno i giapponesi, pur in condizioni di gravità ben maggiore e ricorrenza assai frequente.

Benché il rischio in sé sia imponente, con esposizione e vulnerabilità altissime, tuttavia il disastro non è percepito imminente, e il rischio nella mentalità comune si annulla. Se la memoria del passato disastroso (anche lontano) è stata rimossa o non c'è più, non c'è rischio. È quanto tragicamente e dannosamente è avvenuto anche col terremoto emiliano nel 2012 ("Ma la Pianura Padana non è zona sismica!" esclamavano sbigottiti non solo i residenti, ma persino ingegneri e amministratori), e ad ogni tromba d'aria estiva.

In queste condizioni non serve spremersi il cervello per studiare strategie di comunicazione del rischio. Manca la formazione di una base sociale ricettiva. Se non c'è divulgazione ed educazione preventiva alla serie pericolosità-vulnerabilità-esposizione-rischio, ogni forma di comunicazione di emergenza, pur sempre doverosa, diventerà inefficace, o facilmente fraintendibile e magari controproducente. Si vedano le reazioni emotive ai comunicati della nuova Commissione Grandi Rischi sul procedere della sequenza sismica in corso nell'Italia Centrale dall'Agosto 2016. Anche qui dovrebbe valere il proverbio "aiutati che il Ciel ti aiuta", popolarissima espressione quasi sinonima della più blasonata *resilienza*.

La ricerca scientifica di geologi, geofisici della Terra solida, storici della sismicità e dell'ambiente, ingegneri strutturisti, fisici dell'atmosfera, e meteorologi ha fatto fare enormi progressi al Paese negli ultimi 40 anni. Ma senza un programma educativo specifico e sistematico sui rischi geologici da condursi nelle scuole di ogni ordine e grado, l'Italia non uscirà dalle risposte di sola emergenza, sempre più costosa e cruenta. Senza uno sforzo martellante e permanente di divulgazione scientifica mediatica, l'Italia non può sperare di attuare una seria politica di prevenzione. Senza una mappa scientifica (non burocratica) di vulnerabilità e micro zonazione comune per comune, a partire dai centri storici, edifici pubblici, edifici monumentali, chiese, scuole, ospedali (sarebbe un grande progetto di ricerca di sommo interesse nazionale), l'Italia non si sottrarrà al salasso delle ricostruzioni e degli indennizzi. Senza questa opera di educazione preventiva i cittadini onesti non riusciranno a contrastare la corruzione che distrae gli indennizzi dai loro primi fini di adeguamento sismico del patrimonio edilizio.

Senza un piano nazionale preventivo e graduale di risanamento antisismico di tutto l'edificato vecchio e storico (sarebbe un grande progetto di investimento e lavoro di sommo interesse nazionale e di sicura rendita, anche se non immediata nel tempo), l'Italia migliore dovrà continuare a piangere i suoi morti, a rimpiangere i capolavori perduti, a vedere i suoi mille borghi abbandonati e i loro fieri cittadini sradicati e depressi. E lo stesso dicasi per il risanamento idrogeologico e la delocalizzazione dell'edificato in zone alluvionali e franose.

Scelte strategiche sbagliate e priorità di investimenti

È risaputo che oggi e da tempo in Italia il costo dell'energia supera di circa 1/3 quello degli altri paesi europei. Ma non è sempre stato così. Il boom economico postbellico dell'Italia è stato favorito anche da un costo energetico (idroelettrico) più favorevole rispetto ai nostri concorrenti. A questo si è aggiunto il costo inferiore del metano interno ed estero permesso dalla politica del *fifty/fifty* contro le Sette Sorelle e gli USA abilmente imposta da Enrico Mattei (negli anni cinquanta del secolo scorso), che così poteva destinare il petrolio al successo dell'industria petrolchimica del Nobel Giulio Natta – assegnato nel 1963, assieme a Karl Zeigler, per la chimica dei polimeri. In seguito l'Italia ha perso la bussola della politica energetica, inanellando una catena di errori. La rinuncia precoce al nucleare, emotiva e ideologica, ci ha imposto il peso economico del disinvestimento e del risanamento delle centrali, che invece i nostri concorrenti sfruttavano e sfruttano fino in fondo vendendoci a caro prezzo quell'energia a cui noi, grati e sorridenti, abbiamo detto no. E questo lo

subiamo dai nostri primi e più vicini concorrenti, Francia, Svizzera e Germania. La Francia è il primo esportatore mondiale di elettricità (67 Twh, prodotti da centrali nucleari), la Germania è il quarto (34 Twh). Quasi la metà la vendono all'Italia (44 Twh) che è il secondo importatore al mondo dopo gli USA (53). Un felice suicidio energetico.

La scelta tardiva delle nuove fonti energetiche cosiddette pulite, e che pulite non sono, è risultata un salasso per industrie e cittadini, dopo che l'industria nazionale eolica e fotovoltaica era stata lasciata morire d'inedia, senza avvedersi che quelle fonti hanno un tasso di invecchiamento e costi di impianto, esercizio e smaltimento assai più alti delle fonti fossili, e senza sapere che l'Italia è un paese in gran parte senza vento adeguato e pieno di pendici franose, e che i campi fotovoltaici e solari non possono fare concorrenza alla buona agricoltura, alla qualità del paesaggio e al richiamo del turismo.

Ricorderò un caso esemplare di miopia politica e ignoranza geologica in una regione all'avanguardia come l'Emilia-Romagna. Uno degli ultimi assessori provinciali all'ambiente voleva coprire l'Appennino di una "selva di megatorri eoliche". Per fortuna glielo abbiamo impedito. Non sapeva che ne sarebbero occorse mille per competere solo col Bacino idroelettrico del Brasimone; e che la loro costruzione avrebbe costellato il territorio di centinaia di nuove frane. Ma era un biochimico, come tanti chimici che hanno fattivamente contribuito all'inquinamento vero del pianeta e ora si schierano astiosi contro le fonti fossili, senza ricordarne i vantaggi e senza proporre alternative concrete e sostenibili economicamente.

In sintesi: il contributo delle "pulite" ci può salvare da un *black out*, può farci apparire zelanti, ma in fin di tutti i conti è antieconomico per l'Italia, e affatto risolutivo, coprendo meno del 10% del fabbisogno elettrico, che è solo 1/3 di quello energetico totale (Vecchietini 2013). E noi paghiamo con le bollette profumatamente questi investimenti pubblici sbagliati, che vanno a vantaggio principale di tedeschi, cinesi, francesi, e... mafiosi. E non c'è giornale o autorità italiana che abbia l'onestà e il coraggio di informare l'inerte cittadino che a livello globale l'energia elettrica prodotta dalle nuove fonti è il 6,3%, mentre quella consumata è il 3,3% (fonte IEA 2016). Il divario risale in gran parte all'eolico di cui forse solo la metà dell'installato va in rete mentre l'altra va sprecata perché è prodotta quando non serve.

Difesa dell'ambiente e salvaguardia del Creato

Ho dedicato la vita a questi obiettivi con tante sconfitte (lo scavo di inerti in alveo, il metro di Bologna, la chiusura programmata della cava di gesso ex-Anic, il tracciato TAV Bologna-Firenze) e qualche successo (il Parco Regionale della Vena del Gesso Romagnolo, il parco Museo Geologico del Monticino a Brisighella, il blocco dei mega progetti eolici di Enel Green Power sul crinale Bolognese e di Poggio Tre Vescovi sul crinale Tosco-Romagnolo) spesso in contrasto di scarsa visione dei Verdi e delle loro *lobbies* (come Legambiente e WWF). In questo fervore corale di para- o pseudo ambientalismo è deprimente che a livello nazionale, regionale e locale passino praticamente sotto silenzio atti politici concreti e d'immagine quali il potenziamento (ampliamento) del Sistema Autostrada/Tangenziale (SAT) di Bologna e la candidatura di Bologna European Green Capital per il 2019. Di verde a Bologna c'è solo, per merito d'altri, la collina, che non è città. È appena uscita una graduatoria delle città con copertura arborea o indice di verde visibile secondo il MIT di Boston (Senseable City Lab). Su 17 indagate Francoforte è al 4° posto (21,5%) e Toronto al 9° (19,5%), Torino, unica italiana, al 13° (16%), Parigi in coda (8,8%). Quanto al SAT, ha il triste primato di essere forse il più inquinato nodo autostradale del mondo occidentale (non considero le megalopoli polverose di Asia e Africa). E per inquinanti intendo quelli tossici e pericolosi come PM_{2,5}, PM₁₀, NO₂, O₃ per i quali Bologna è oltre i limiti europei (compresi quelli derogati a termine), per non parlare di quelli consigliati dall'OMS. Francoforte e Toronto, pur avendo nodi autostradali con traffico ancor maggiore di Bologna, stanno entro i limiti per minor densità sia di residenti che di veicoli. Eppure la bulimia verde non arretra neppure di fronte all'inquinamento conclamato. Vedremo se anche il collegio giudicante a Bruxelles ne sarà affetto.

Ritornando alla politica energetica c'è un ultimo errore in cui è incappata l'intera Europa, con il Giappone, ma che noi italiani paghiamo a un prezzo assai più alto di tutti i concorrenti, perché non abbiamo o non vogliamo attivare altre difese di: è la trappola del cambiamento climatico, a cui dedico di seguito la riflessione centrale e conclusiva.

Il clima che cambia

Che il clima cambi non è una novità, ma una norma ciclica, con periodicità non proprio regolare (Guidoboni *et al.* 2010; Provenzale 2013). Solo otto mila anni fa la temperatura media del globo (tmg) era di circa (~) 2°C *maggiore* di oggi, e 20 mila anni fa ~ 4,5°C *minore* (Vai & Cantelli 2004). Dal 1850 la tmg è cresciuta di ~ 0,7 °C, ma nessuno ricorda che col 1850 è terminata la Piccola Età Glaciale in cui c'era stata una riduzione di ~ 1,5 °C. Eppure durante il Periodo Caldo Medievale c'era stato un aumento forse di ~ 1,5 °C, sempre rispetto a oggi. Coerentemente con questo quadro, mentre prima del 1850 i ghiacciai montani e quelli della calotta glaciale Nord si espandevano, dopo hanno cominciato a ritirarsi, come fanno oggi. Ma nessuno commenta che, contestualmente, al Polo Sud i ghiacci aumentano, come pare stiano facendo negli

ultimi anni in Tibet (Yi & Sun 2014). E pochi ricordano che c'è stata una fluttuazione ventennale con i ghiacciai in crescita durante il ventennio 1960–1980 (Fig. 1) (Cerutti 2013).

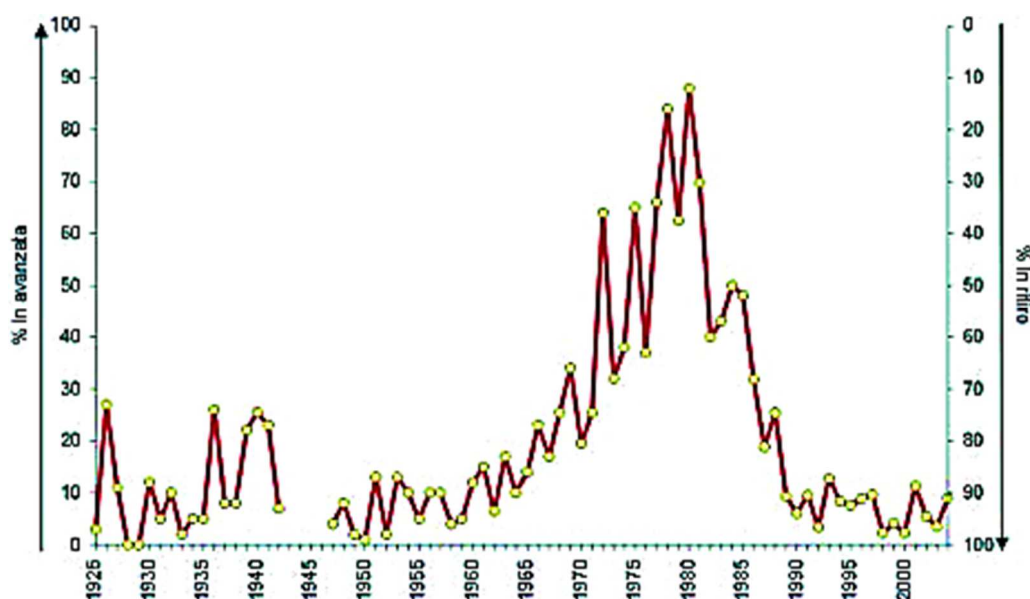


Fig. 1 – Avanzata e ritiro dei ghiacciai italiani tra il 1925 e il 2004 (da C. Baroni, Geoitalia 32, 2010)

Poi c'è la CO₂, anidride carbonica in atmosfera, noto gas serra e fonte primaria delle foreste, che negli ultimi 150 anni è aumentata di oltre 100 ppm, fino a 400. Ma nessuno o quasi rammenta che 3–4 milioni di anni fa (Ma) nel Pliocene era oltre 800, e che a 100 Ma (metà Cretaceo) e a 420 Ma (Siluriano), quando ai poli non c'erano ghiacci, superava 2000 e 5000 rispettivamente (Fig. 2).

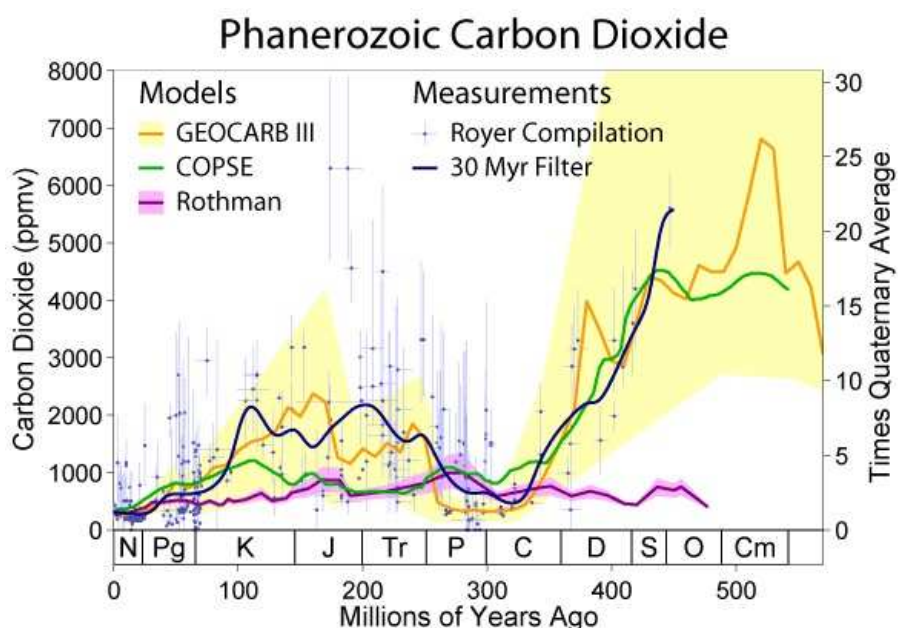


Fig. 2 – Misure ricostruite e stime su modello di concentrazione della CO₂ atmosferica dal Cambriano a oggi (da Wikipedia). Cm, Cambriano; O, Ordoviciano; S, Siluriano; D, Devoniano; C, Carbonifero; P, Permiano; Tr, Triassico; J, Giurassico; K, Cretaceo; Pg, Paleogene; N, Neogene e Quaternario.

La prima grande riduzione della CO₂ atmosferica infatti è avvenuta con lo sviluppo delle foreste del Carbonifero. In genere si ammette che ci sia una diretta correlazione fra livello di CO₂, livello del mare e livello di temperatura (Fig. 3), ma non sempre costante né sempre regolare, a testimoniare che la Terra è un sistema assai complesso.

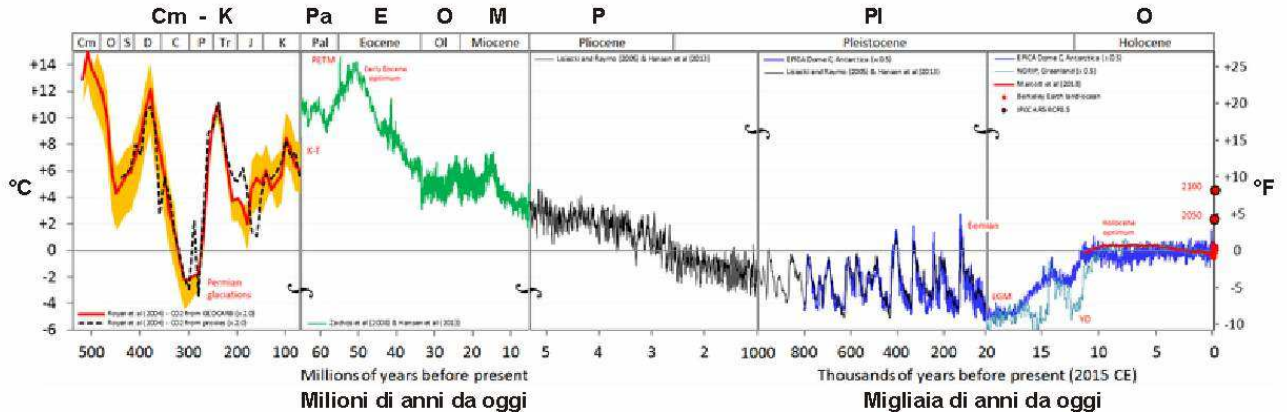


Fig. 3 – Frequenti e significative oscillazioni della paleotemperatura del pianeta Terra (in discostamento \pm dalla media 1960-1990), che in passato era assai piú caldo degli ultimi 2 milioni di anni, ad esclusione del Carbonifero superiore e Permiano inferiore. Si notino i cambiamenti nella scala tempo e la doppia scala di temperatura $^{\circ}\text{C}$ e $^{\circ}\text{F}$. Per altri autori gli ambiti di temperatura stimati sono circa metà. I due cerchi pieni sull'ordinata di destra sono le proiezioni IPCC al 2050 e 2100 (compilazione di Glen Fergus da varie fonti fra cui Berger & Loutre 2002, Berner 2006, Royer *et al.* 2004; Wikimedia Commons). Cm, Cambriano; K, Cretaceo; Pa, Paleocene; E, Eocene; O, Oligocene; M, Miocene; P, Pliocene; PI, Pleistocene; O, Olocene.

É quanto si vede nel diagramma (Fig. 4) in cui la curva continua della temperatura media globale appare relativamente indipendente dalla concentrazione della CO_2 atmosferica (curva punteggiata) e talora in opposizione di fase.

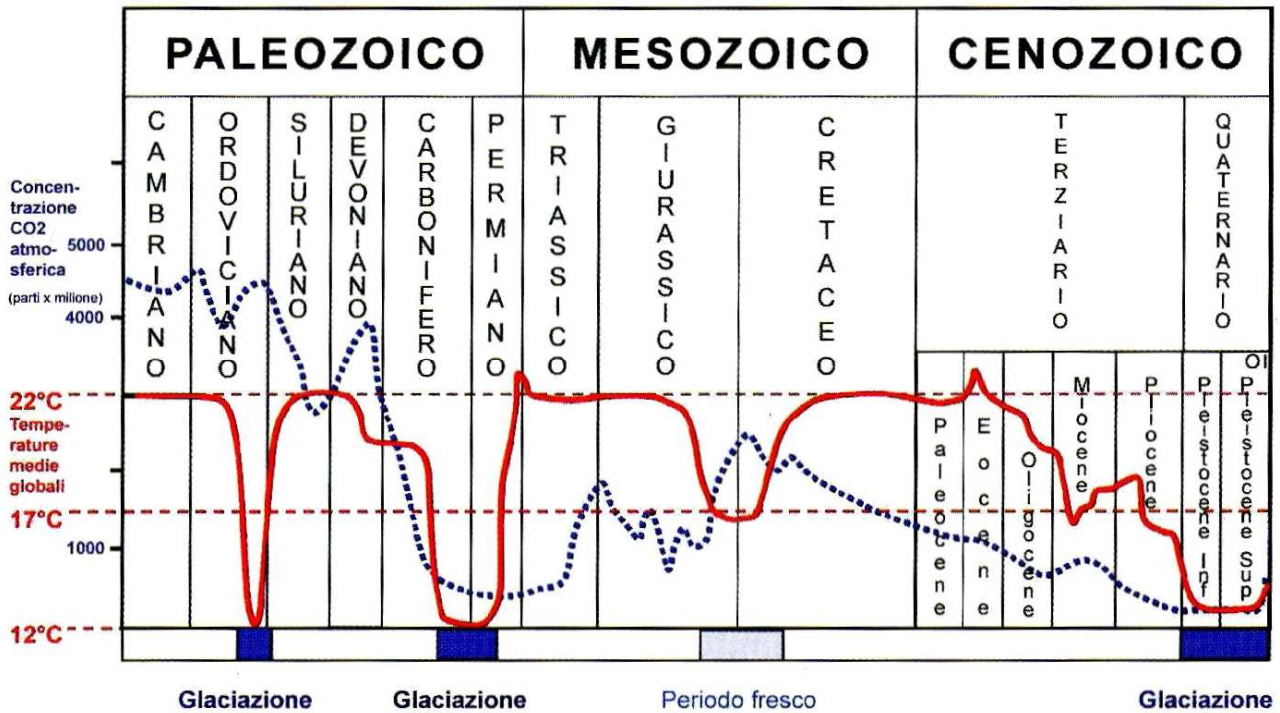


Fig. 4 – Ricostruzione delle fluttuazioni della temperatura media globale (curva continua rossa) e della concentrazione della CO_2 atmosferica (curva punteggiata nera) dal Cambriano a oggi. Si notino sia opposizioni che concordanze di fase.

Istruttivo anche osservare che le emissioni antropiche attuali di CO_2 vengano in pratica dimezzate dalla natura (Fig. 5).

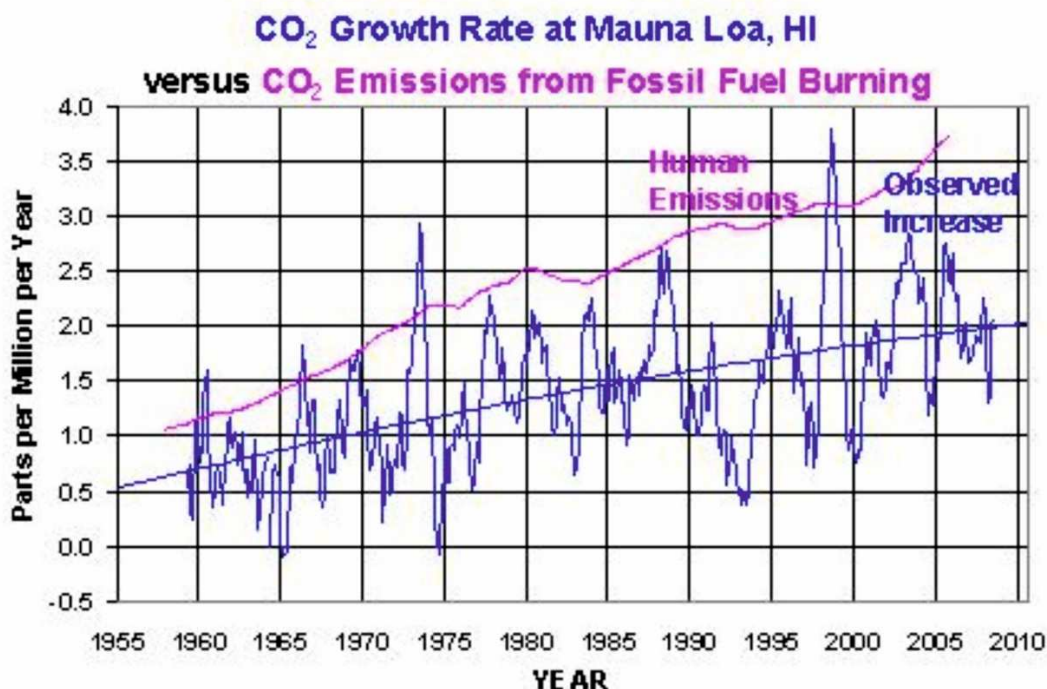


Fig. 5 – Tasso di crescita della CO₂ atmosferica al Mauna Loa (Hawaii) rispetto a quello (doppio) delle emissioni antropiche. Quindi le nostre emissioni vengono dimezzate dalla natura.

La carota GISP2 perforata attraverso i ghiacci della Groenlandia (Cuffey & Clow 1997) ha dimostrato che il riscaldamento climatico negli ultimi 15 mila anni di storia della Terra è stato assai maggiore di quanto conosciuto in precedenza (Figg. 6, 7, 8).

In particolare, l'incremento fino a ~ 1,5 °C durante il Periodo Caldo Medioevale, di cui ci sono evidenze storiche e geologiche incontestabili, è avvenuto quando la CO₂ aveva un livello ben inferiore a oggi (v. anche oltre).

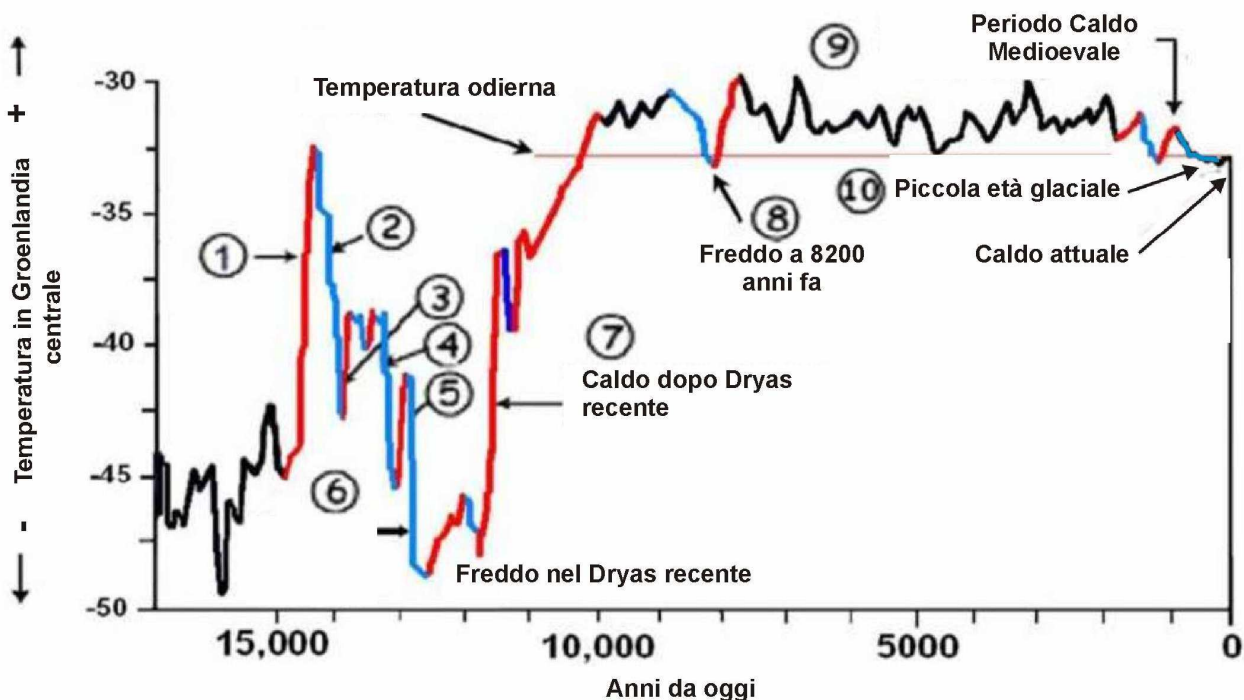


Fig. 6 – Fluttuazioni termiche registrate nella carota di ghiaccio GISP2 Groenlandia. Il clima degli ultimi 10 mila anni è stato più caldo di oggi in condizione di CO₂ più bassa e stabile. Grafico da Cuffey & Clow 1997, Fig. 3, ridisegnato e interpretato da D.J. Easterbrook (ho modificato la posizione delle frecce che indicano il Periodo Caldo Medioevale e la Piccola Età Glaciale).

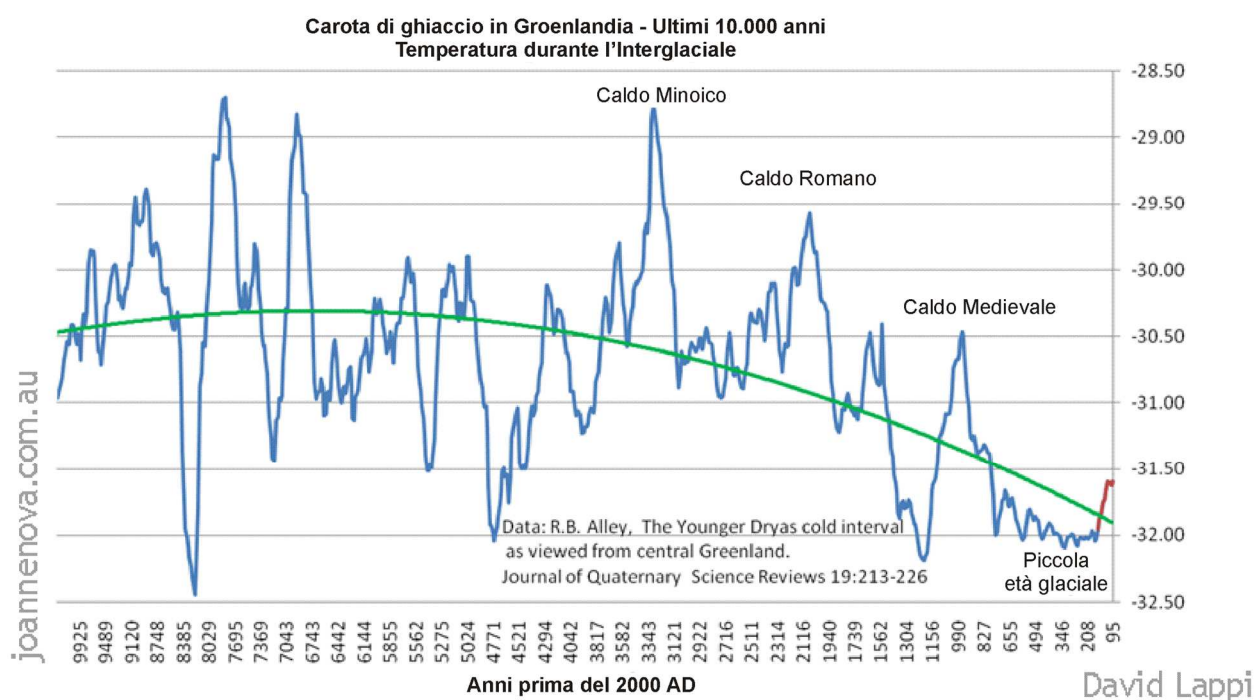


Fig. 7 – Oscillazioni di temperatura nell’Ultimo Interglaciale in Groenlandia (modificato da David Lappi, joannenova.com.au).

Il nome stesso di Groenlandia (*Greenland*) ci testimonia che quella terra, oggi bianca, solo mille anni fa era verde, quando i Vichinghi la colonizzarono con Erich il Rosso, raggiungendo poi l’isola di Terranova alla punta N, costruendovi una base per la colonizzazione della Nova Scotia e del New Brunswick per farne la *Vineland*, abbandonate dopo tre secoli ai primi accenni della Piccola Età Glaciale (Fig. 6).

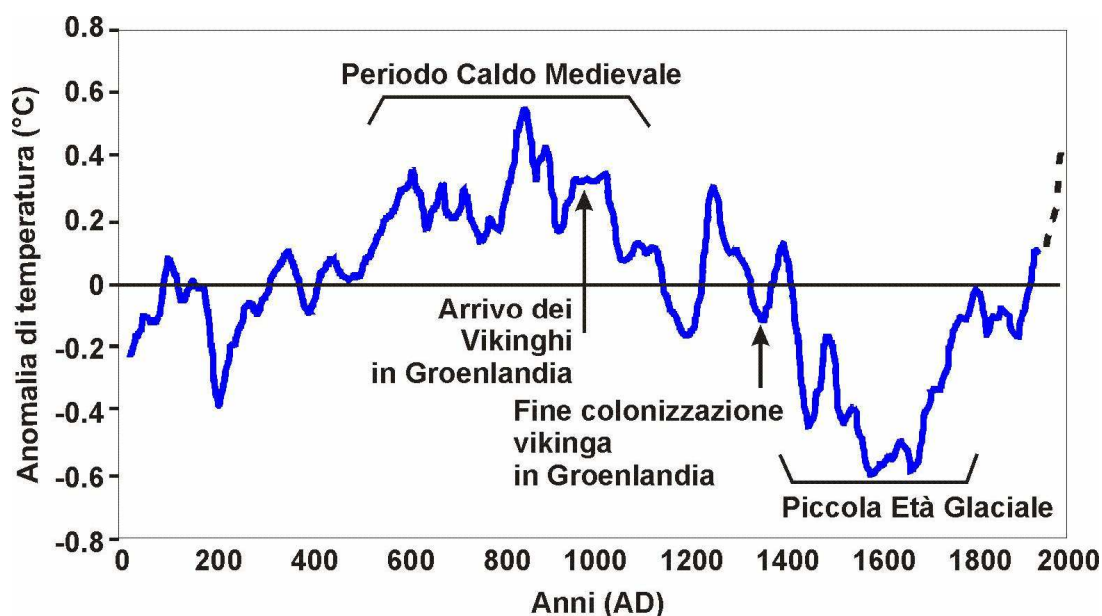


Fig. 8 – Andamento dell’anomalia termica globale negli ultimi 2000 anni (da Loehle 2007 e Loehle & McCulloch 2008).

Che cosa c’è di nuovo allora nel *Global Change*? Nulla o quasi di non già visto prima. C’è solo la “crociata” che una *lobby* potente di interessati nascosti e di scienziati palesi, prevalentemente meteorologi, ma non solo, ben annidata nell’ONU, protetta da un acronimo suggestivo come IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), ha intrapreso negli anni 1980, e che da campagna di opinione è divenuta teoria, quando ha deciso che la causa degli aumenti accertati erano le attività umane (AGW, *Anthropogenic Global Warming*). L’IPCC ha quindi *previsto* che entro la fine del XXI secolo il mondo, fra le altre sciagure, sarebbe stato sommerso da

un aumento del livello marino da almeno un metro a decine di metri (o 5–6 °C), a seconda dei vari indovini. Tutto questo simulato da semplici modelli, che nonostante gagliarde critiche e mancate verifiche sperimentali, e non pochi falsi scientifici, non sono mai stati aggiornati (Fig. 9).

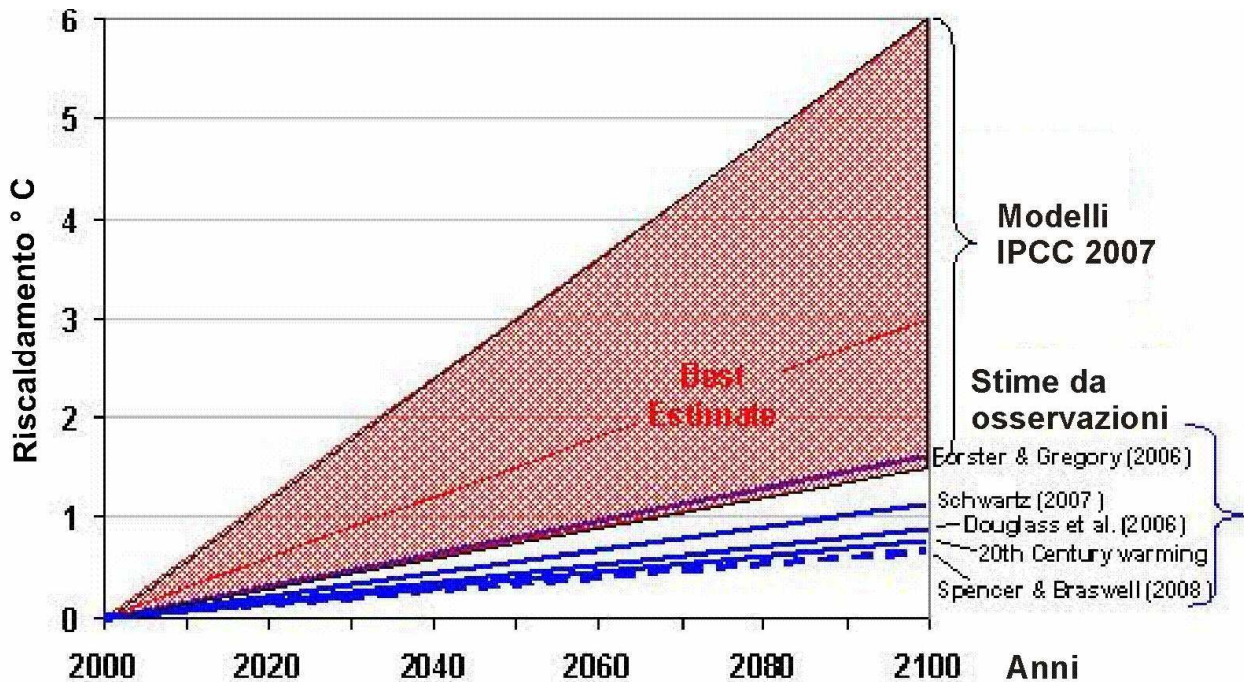


Fig. 9 – Proiezioni al 2100 sul riscaldamento globale secondo i modelli IPCC 2007 e le stime sperimentali di altri autori per un raddoppio della CO₂ in atmosfera (da R.W. Spencer 2008, di cui è diventato celebre il commento **ironico al video di Al Gore *An Inconvenient Truth*: “La reale verità inconveniente è che la scienza non ha idea** di quanto il riscaldamento recente sia naturale oppure effetto delle attività umane”)

Cura proposta: drastica riduzione delle emissioni di CO₂, costi quel che costi. Questa *lobby* non rappresenta affatto la totalità degli scienziati competenti, e neppure la maggioranza. È palesemente una minoranza molto presente nei *mass-media* e ben orchestrata, che riesce a sostituire una maggioranza dissenziente, definita scettica (si veda per esempio il sito www.climate-sceptics.com.au) ma piuttosto silenziosa. Lo documentano le defezioni importanti di chi non sopportava il clima antiscientifico di dogmatismo e manipolazione dei dati, sfociato nel clamoroso *Climategate* del 2009. Lo documentano i tentativi maldestri di addomesticare i dati, negando quelli scomodi del Periodo Caldo Medievale e della Piccola Età Glaciale (si veda Report dell'IPCC del 2001) pur ammessi prima (Report del 1990).

Non mancano scienziati italiani (per lo più emigrati all'estero) che contestano, inascoltati, la tesi antropica dell'IPCC anche sul piano metodologico (Scafetta 2013a, 2013b, 2013c; Battaglia 2013). Sorprende che la grande stampa internazionale (e con essa quella italiana non competente, che ne diviene quindi gregaria e succube) continui a fare lo struzzo o a minimizzare. In realtà, la vera novità informativa è che nell'ultima decade il riscaldamento globale si è bloccato, se non addirittura invertito, come mostrano i dati di www.drroyspencer.com 14, Nasa e HadCRUT4 (Figg. 10, 11, 12). Più in generale si può dire che il riscaldamento globale dell'ultimo secolo e mezzo è avvenuto secondo una sequenza di risalite di temperatura e stasi o raffreddamenti alternati nel tempo con un ciclo quasi sessantennale (Scafetta 2013c) e cicli minori.

Il fatto più sorprendente è che la lobby, pur potente e ben pagata, è riuscita a convincere in breve tempo la maggioranza dei governi dei paesi sviluppati del mondo, a cominciare dall'Europa, inducendoli a ridurre le emissioni di CO₂, almeno nominalmente. Si sono proclamati trattati internazionali (Rio 1992, Kyoto 1997), mai firmati o onorati dai paesi in via di sviluppo (Cina, India, Russia, Brasile) e neppure dagli USA (nonostante l'adesione fideistica di Al Gore) e Canada, se non negli ultimi tempi. Non a caso quelli sono i paesi che hanno risentito meno della crisi economica globale, a prescindere dal calo del prezzo del greggio. Anche il recente accordo USA-Cina a fine 2014 è tutto da verificare nella sua attuazione. Il trattato di Kyoto richiedeva la riduzione delle emissioni del 6%, l'Unione Europea, più zelante, del 20%, per i suoi paesi ovviamente. Il risultato globale è stato che le emissioni di CO₂ continuano a crescere (almeno nelle stime) e i paesi firmatari, con certezza nella bilancia dei pagamenti, hanno subito gravi danni economici, senza certezza di essere stati utili almeno al bene comune. E fra essi sono Europa, e Italia a primeggiare negativamente. Anche le possibilità che l'ultimo accordo di Parigi 2016 consegua qualche effetto sono assai incerte.

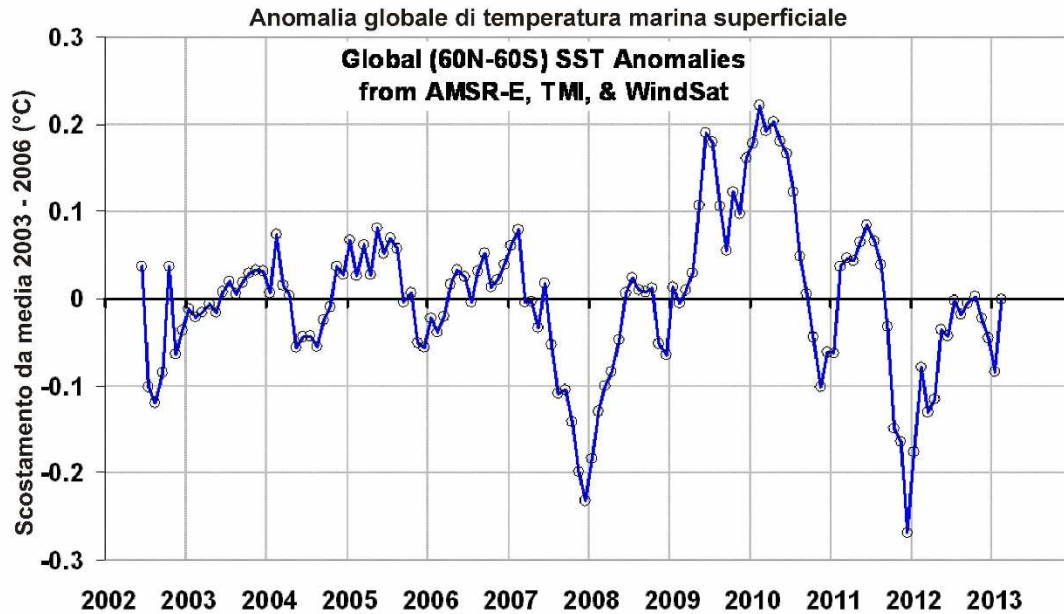


Fig. 10 – Temperatura media globale marina di superficie (da www.drroyspencer.com 2014).

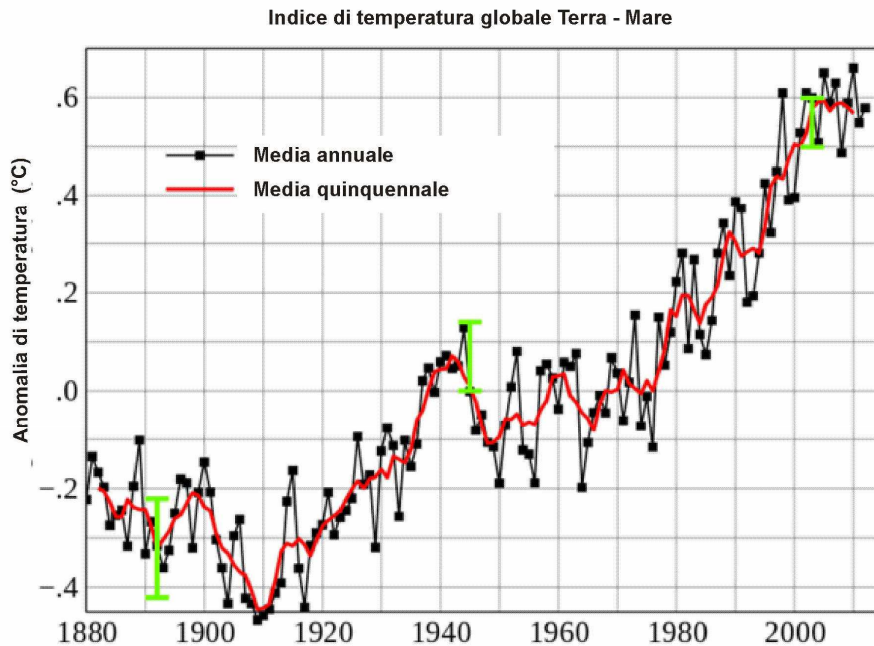


Fig. 11 – Indice di temperature globale continentale-oceanica (da Nasa, Goddard Inst. Space Studies 2013)

Quella giapponese è l'economia che più ha pagato la primogenitura a favore dei Trattati (per timore della sommersione delle sue isole). Per boicottare, coerentemente, l'uso del petrolio, il Giappone ha investito pesantemente in un programma faraonico di centrali nucleari (nonostante le ferite delle bombe di Hiroshima e Nagasaki). Purtroppo le ha progettate male (capita anche fuori Italia), resistenti ai terremoti ma a tiro di tsunami (troppo in basso e vicine all'oceano, per spendere meno a raffreddarle). Imperdonabile errore per eccesso di zelo. Dagli anni 1990 il Giappone non è più la potenza economica del futuro. Sul piano energetico la Francia e la Germania si sono difese bene, sempre con l'aiuto del nucleare (in più la Germania ha sfruttato l'eolico per ancorare all'attività agricola milioni di potenziali disoccupati della ex Germania comunista). L'Italia è invece il paese che ha subito i maggiori contraccolpi generati dall'aumento del costo dell'energia, che ha minato la competitività delle imprese, taglieggiato i bilanci dei consumatori e contribuito a bloccare l'aumento della ricchezza del Paese.

Esemplare, lo ripetiamo, il caso vizioso dell'eolico italiano, additato ormai come sperpero di risorse e frode dei cittadini contributori. Prima osteggiato, poi magnificato in omaggio all'adesione al trattato di Kyoto, è stato finanziato con ingenti incentivi trasferiti a carico delle bollette dei contribuenti, per poi andare fuori mercato (cioè in perdita), senza riuscire a mitigare le nostre dipendenze dall'estero e gli eccessivi costi energetici.

Quanto ai vantaggi industriali derivati dall'eolico, sono andati quasi tutti all'estero, in Germania per la tecnologia avanzata e in Cina per la produzione pesante.

Il "Riscaldamento Globale" per CO₂ scompare nei dati di Febbraio

IPCC Gold-Standard: CO₂ "Global Warming" Disappears During February

HadCRUT4 confirms February global cooling trend since 1998

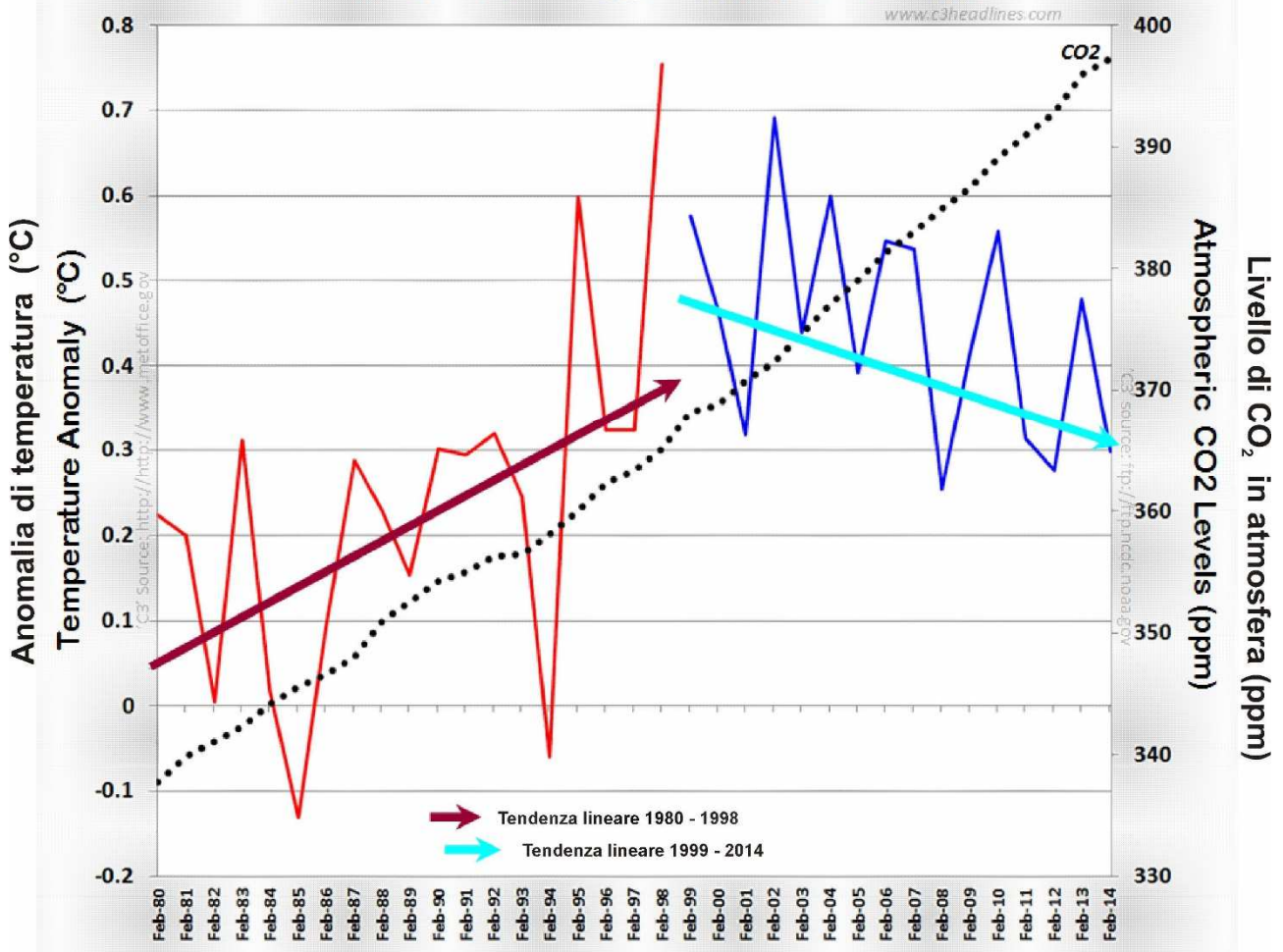


Fig. 12 – Le anomalie di temperatura del mese di Febbraio mostrano riscaldamento globale dal 1980 al 1998 e raffreddamento globale dal 1999 al 2014, in regime di costante aumento di CO₂ (da www.c3headlines.com; dati da HadCRUT4, Hadley Centre Climate Research Unit, UK).

Tanto fumo e poco arrosto. Per l'Italia dove stanno gli errori? Eccesso di demagogia, eccesso di credulità e di emotività, scarsa conoscenza dei problemi da parte governativa e parlamentare, e delle condizioni geologiche e fisiche del paese, nonché dei vincoli pregiudiziali che queste impongono; infine l'attestazione di un privilegio concesso al gregarismo europeo (per non dire germanico) rispetto alle peculiari esigenze nazionali. Nel giro di poco più di un decennio è apparso chiaro che alcune forme di energie cosiddette pulite e rinnovabili (come l'eolico e in parte il fotovoltaico) si sono rivelate più o meno estesamente energie dello spreco, per il loro alto costo e l'inutilità di tanta energia prodotta quando non è immediatamente utilizzabile e troppo costosa da immagazzinare.

In tutto questo gran vociare, per mandare in risonanza l'autoconvincimento, chi si occupa di sviscerare a fondo e senza pregiudizi che cosa e quanto è veramente avvenuto durante gli ultimi estremi climatici caldi (sono noti come *optima*) e in ottica interdisciplinare a partire dalla geologia, che sola ne conserva le testimonianze materiali? Troppo pochi. E non mi riferisco solo all'ultimo Optimum Climatico, quello di circa otto mila anni fa (Vai e Cantelli 2004, Antonioli e Vai 2004), ma soprattutto ai due ancor più cospicui di quello rispetto a oggi, il MIS 5 (sigla che indica il Marine Isotope Stage) a circa 125 mila anni fa e il MIS 11 a circa 400 mila anni fa, quando sulle coste del Mediterraneo prosperavano coralli coloniali e altri organismi capaci di costruire estese scogliere coralline bordiere (*fringing reefs*) e quando gli sparuti insediamenti umani non potevano certo influenzare in alcun modo le variazioni climatiche. Potremmo quindi disporre di un tracciante significativo.



Fig. 13 – Sviluppo iniziale di una colonia del corallo *Cladocora caespitosa* che 125 mila anni fa, nel Pleistocene superiore, formava scogliere costiere nel Golfo di Taranto e lungo l'intero bordo del Mediterraneo (foto G.B. Vai)

Il primo segnale di guardia dell'approssimarsi di condizioni di riscaldamento naturale del Mediterraneo (e quindi del globo), simili a quelle dei due massimi *optima* climatici ben registrati, sarà l'instaurarsi di piccole scogliere bordiere a *Cladocora caespitosa*, un elegante corallo arborescente (Fig. 13). Per ora non ce n'è alcuna evidenza, né a Taranto, né nella Penisola Salentina, né in Sardegna e neppure in Algeria, Tunisia e coste levantine che 125 mila e 400 mila anni fa ne erano piene. Per ora possiamo aspettare, e dedicarci, senza eccessi e con competenza a qualcosa di più serio e urgente.

Purtroppo per i nostri politici (ma non è diverso il discorso per i giornalisti e quindi per la popolazione tutta) la differenza fra CO₂ e CO non è gran cosa, per cui anche la CO₂ diventa un gas tossico nemico dell'umanità (come è ovvio lo sono altri gas e le polveri sottili, quelli sì da bandire dalle nostre città e dalle nostre pianure). Provate poi a spiegare loro che il mondo e la vita hanno convissuto elegantemente con molta più CO₂ nell'atmosfera quando l'uomo ancora non esisteva. Perciò, il responsabile dell'aumento di allora non erano certamente né l'uomo né le sue attività. E allora perché non rendere meno cervellotico il modello interpretativo dell'IPCC inserendovi i dati ben noti ai geologi anche prima degli ultimi 400 mila anni? "Ho ripetuto questa richiesta tante volte dal 1992", mi confidava André Berger, belga, uno dei padri storici della climatologia del passato in un Convegno in Provenza nel 2004. Ma la potente lobby dell'IPCC si è sempre opposta e la Comunità Europea, suo braccio secolare, "non ha più finanziato i progetti presentati" da Berger, che pur era stato un suo consulente. Tutto questo è mai stato riferito ai nostri ministri competenti, al CIPE, al Presidente del Consiglio, da parte di che ne aveva la responsabilità di assistenza tecnico-scientifica? Oppure ne sono stati tenuti all'oscuro? Se ci sono, come ci sono, fondati dubbi scientifici sull'interpretazione, sul modello e sulle previsioni dell'IPCC, ha fatto bene il Paese Italia a imbarcarsi in un'impresa economicamente insostenibile per le sue risorse? C'è da chiedersi quanto l'adesione così convinta e totale, sfoggiata in tono trionfalistico da alcune agenzie e organi competenti, abbia in realtà privato il Paese di investimenti in ambiti assai più pericolosi, privi di dubbio scientifico, di assai più grave e imminente necessità, quali sono la prevenzione, la difesa e la mitigazione dei grandi rischi geologici che affliggono e colpiscono quasi ogni anno il Paese e le esigenze drammatiche di bonifiche ambientali.

Vorrei che fosse chiaro che il mio è un messaggio equilibrato, non velleitario, ma forte e chiaro per un vero rispetto dell'ambiente e non di un'ideologia che con la salvaguardia del Creato a poco a che fare.

È questo problema di mancate priorità che va posto alla coscienza politica e culturale degli italiani, specialmente ora, quando le poche risorse devono essere spese in modo attento. Perché sperperare risorse ingenti per difenderci da un pericolo incerto, lontano e sfuggente nei suoi contorni reali (parte dei quali potrebbero anche essere favorevoli, se si verificassero) e non investire invece sistematicamente e preventivamente su pericoli e rischi certi, inevitabili e immediati, che già tessono la trama quotidiana delle nostre emergenze?

Non è più neppure una questione di memoria, se messa in questi termini; è solo incompetenza e quasi follia, quella cui abbiamo assistito a partire dall'ultimo decennio del secolo scorso, da cui ci si deve riprendere, pena una decadenza irreversibile. Questo, infatti, non è che uno dei tanti esempi di autolesionismo nazionale, che alla fine nuoce anche all'Europa nel suo insieme.

Bibliografia

- Antonioli Fabrizio e Vai Gian Battista (eds), Explanatory Notes to the Litho-Palaeoenvironmental Maps of Italy During the Last Two Climatic Extremes, Map 1-Last Glacial Maximum, Map 2-Holocene Climatic Optimum, 1:1000000 scale, 32nd IGC Florence 2004, Bologna, 80 p.
- Baroni Carlo 2010, La risposta dei ghiacciai alpini alle variazioni climatiche. *Geoitalia* 32 (2010), 50–52.
- Battaglia Franco 2013, Climate and Energy policy. In: AAVV, *Clima, quale futuro?* Milano 21^{mo} Secolo, 131–157.
- Cerutti Augusta Vittoria 2013, Storia del clima in Valle d'Aosta. In AA VV, *Clima, quale futuro?* Milano 21^{mo} Secolo, 27–51.
- Cuffey, Kurt M. and Clow Gary D. 1997, Temperature, accumulation and ice sheet elevation in central Greenland through the last deglacial transition. *Journal of Geophysical Research* 102(C12), 26383–396.
- Guidoboni Emanuela 2010, Storie mediterranee da esplorare. In: E. Guidoboni, A. Navarra, E. Boschi (a cura di), *Nella spirale del clima, culture e società mediterranee di fronte ai mutamenti climatici*, INGV, Bononia University Press, Bologna, pp. 11–15.
- Guidoboni Emanuela e Valensise Gian Luca 2011, Il peso economico e sociale dei disastri sismici in Italia negli ultimi 150 anni. EEDIS-INGV, Bononia University Press, 550 p.
- Guidoboni Emanuela e Valensise Gian Luca (a cura di) 2014, *L'Italia dei disastri. Dati e riflessioni sugli impatti dei fenomeni naturali (1861-2013)*, EEDIS-INGV, Bononia University Press, 430 pp.
- Loehle Craigh 2007, A 2000 Year Global Temperature Reconstruction based on Non-Tree Ring Proxy Data. *Energy & Environment* 18, 1049–1058.
- Loehle Craigh and McCulloch J. Huston 2008, Correction to: A 2000 Year Global Temperature Reconstruction based on Non-Tree Ring Proxy Data. *Energy & Environment* 19, 93–100.
- Provenzale Antonello (a cura di) 2013, *Il mutamento climatico. Processi naturali e intervento umano*. Il Mulino, Bologna, 357 pp.
- Roveri Marco, Manzi Vinicio, Bergamasco A., Falcieri F.M., Gennari Rocco, Lugli Stefano, Schreiber B. Charlotte 2014, Dense shelf water cascading and Messinian canyons: a new scenario for the Messinian salinity crisis. *American Journal of Science* 314, 751–784.
- Scafetta Nicola 2013a, Discussion on common errors in analyzing sea level accelerations, solar trends and global warming. *Pattern Recognition in Physics* 1, 37–57.
- Scafetta Nicola 2013b, Solar and planetary oscillation control on climate change: hind-cast, forecast and a comparison with the CMIP5 GCMS. *Energy & Environment* 24, 3 & 4.
- Scafetta Nicola 2013c, Discussion on climate oscillations: CMIP5 general circulation models versus a semi-empirical harmonic model based on astronomical cycles. *Earth-Science Reviews* 26, 321–357.
- Spencer Roy W. 2008, An Inconvenient Truth: blurring the lines between science and science fiction. *GeoJournal* (2007) 70, 11–14 (DOI 10.1007/s10708-008-9129-9).
- Vai Gian Battista 2014, Over half a century of Messinian Salinity crisis. In: *The late Cenozoic of Romagna, Tuscany and Umbria, 9th European Palaeobotany-Palynology Conference August 2014 Padova Italy, field trip guidebook*, 11–22.
- Vai Gian Battista and Cantelli Luigi 2004, Litho-palaeoenvironmental maps of Italy during the last two climatic extremes. *Climex Maps, Italia 2004*, Bologna, LAC Firenze.
- Vecchietini Mauro 2013, Riflessioni sui digestori anaerobici. *Natura & Montagna* 60, 2, 49–52.
- Yi Shuang and Sun Wenke 2014, Evaluation of Glacier Changes in High Mountain Asia Based on 10-year GRACE-RL05 Models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119, 2504–2517.

Il clima tra fissismo e trasformismo

Gianfranco Laghi

Socio Residente della Società Torricelliana

Illustri ospiti e gentili ascoltatori, come faentino e curatore del locale museo torricelliano non posso che essere soddisfatto che oggi si parli di clima nella città che vanta le radici famigliari di Evangelista Torricelli.

Parecchi secoli dopo l'Almagesto di Tolomeo, il nostro illustre concittadino, inventando il barometro, completò il gruppo di strumenti che permettono di conoscere le variabili misurabili o elementi del clima.

Questo strumento, qualora sia posto opportunamente in numerosi luoghi di stazione sparsi per il mondo, fornisce la rete di punti per i quali passano, nell'aria, le linee isobariche che delimitano zone di bassa ed alta pressione atmosferica, detti rispettivamente cicloni ed anticicloni. Questi costituiscono il motore della circolazione dell'aria ed i centri di azione dell'atmosfera. Dalla loro distribuzione spaziale dipende il *tempo atmosferico*, vale a dire le variazioni giornaliere dello stato del cielo. Da questo si ricava la descrizione degli stati dell'atmosfera che si presentano su di una regione nella loro successione abituale. Tali stati del cielo entrano poi in rapporto con gli aspetti geografici di ciascuna regione, per cui hanno un impatto su di noi, sulla nostra vita e sull'ambiente in cui viviamo.

Nel breve periodo, il tempo atmosferico sempre più anomalo ed il clima tendono ad identificarsi nel senso comune, dando la sensazione di un cambiamento climatico, anche quando forse cambia talvolta soltanto il regime delle variabili meteorologiche. D'altra parte però, registriamo anche surriscaldamenti stagionali, lo scioglimento della calotta polare artica e dei ghiacciai montani che inducono il sospetto di reali mutamenti climatici, cioè variazioni persistenti nella successione abituale degli stati del cielo, coniugati con gli aspetti geografici delle varie regioni.

Ci domandiamo quindi se il clima possa cambiare; e, se cambia, in che modo lo faccia. La nozione di *cambiamento climatico* chiama in causa l'immagine manifesta del nostro mondo. Grossomodo, quell'immagine che scaturisce dal senso comune e dalle teorie sul mondo implicite nei linguaggi naturali. È facile constatare come la maggior parte degli uomini abbia per varie ragioni, una mentalità, o concezione, per cui il mondo sia da sempre di per sé immutato, cioè sempre uguale a sé stesso. Questa mentalità o concezione è nota, in biologia, come *fissismo*; tale nozione può essere facilmente estesa a tutto il mondo fisico.

Il fissismo, anche nel nome, è agli antipodi di una teoria del cambiamento. Perciò, se in un mondo fisso si verifica un effettivo cambiamento, questo può avere soltanto la forma di una catastrofe accidentale che interviene dall'esterno nel sistema. Nel nostro caso, può provenire dall'attività dell'uomo. Almeno dalla rivoluzione industriale ottocentesca, alla insolazione si sommano gli effetti delle nostre produzioni e consumi. Questi disperdono calore degradato e rifiuti di ogni genere nell'ambiente. Il vapore d'acqua, il metano, l'anidride carbonica ecc. che liberiamo spesso in enormi quantità nell'aria, assorbono parte dell'energia radiante che dal suolo ritorna verso l'atmosfera, si riscaldano e rimandano radiazioni infrarosse, cioè calore, che va a sommarsi a quello di origine solare, potenziando l'*effetto serra* naturale che impedisce al calore di uscire nello spazio. È quindi chiaro che l'effetto serra può effettivamente produrre un riscaldamento dello strato geografico con conseguenze sul clima. Ce lo dicono i principi della termodinamica. Il problema è piuttosto quello di vedere se l'aumento di calore causato dall'uomo sia, come sembra, un corollario esclusivo di una particolare concezione del mondo.

Come abbiamo già detto, la concezione fissista considera il mondo di per sé immutabile, quindi non prevede cambiamenti naturali di nessun tipo, neppure climatici. Pertanto sembra difficile che questa mentalità possa essere scaturita dalla nostra coscienza che è intrinsecamente temporale e che possa essere costitutiva della nostra scienza, in quanto non avrebbe senso attribuire alla fisica una teoria nella quale si possa prescindere dal tempo. **Il fissismo appare piuttosto una concezione fortemente radicata nella nebulosa inverificabile della metafisica, senza alcuna funzione nell'empirismo scientifico, nemmeno quella di contenitore del fattore antropico del clima.**

Indagini sul passato della terra ci dicono invece che cambiamenti climatici sono sempre avvenuti, ancor prima della rivoluzione industriale. Sono numerosissime le indagini paleo- ed archeo-climatiche che ci dicono come nel passato del nostro pianeta si siano verificati cambiamenti nei climi ad ogni livello, causati da fenomeni sia terrestri che extraterrestri. Però quel poco che sappiamo del lontano passato è connesso con il fenomeno della deriva dei continenti. Particolari rocce indicano estese glaciazioni intervallate da periodi caldi. Poi un lungo periodo intermedio anch'esso caldo (Mesozoico). Finché, al passaggio Meso-Cenozoico, la massa continentale si frantuma in pezzi che si disperdono su di una vasta area e subiscono gli effetti di una maggiore differenziazione latitudinale. Nel Quaternario, allorché la frantumazione è massima, le zolle continentali meno estese risentono fin nell'interno dell'influsso oceanico condizionato da un complesso di correnti marine. Nuove orogenesi modificano la circolazione dell'aria. Fenomeni extraterrestri modulano pesantemente il flusso della radiazione solare.

Dalle evidenze del passato stiamo comprendendo che il fissismo non è l'unico approccio possibile ad una teoria del mondo. Il *trasformismo*, nella coscienza e nella scienza, può essere un'alternativa razionale al

fissismo poiché ci dice che il mondo può cambiare per sé stesso. Si tratta di una mentalità, o concezione, ancora poco radicata nel senso comune e spesso osteggiata in molti contesti. Basti pensare al faticoso travaglio associato con l'accettazione del paradigma darwiniano in campo biologico. Analogamente al darwinismo, il trasformismo sostiene che il mondo non è di per sé immutabile, ma che esso è in costante, lenta e totale trasformazione per cause naturali. A differenza dal fissismo, il trasformismo è molto bene inserito, così come la nostra coscienza e la scienza fisica, nel tempo. Anche se poi le cose non sono così lineari e pacifiche. Abbiamo idee abbastanza confuse su cosa sia la coscienza e di come essa si formi in noi. Inoltre, qualcuno ora teorizza che nella fisica il tempo neppure esista. Quello della coscienza è un grande problema tuttora irrisolto; mentre, quello del tempo è, a parer mio, più che altro un problema semantico. Il sostantivo tempo non indica un oggetto, ma piuttosto un cambiamento generico, una modalità, ed il cambiamento climatico è così una delle tante modalità "tipo tempo". Ogni evento di trasformazione irreversibile ha, nella nostra coscienza, l'aspetto della freccia del tempo introdotta, nel 1928, dall'astronomo inglese Eddington. Il presente è l'attimo fuggente, posto fra un passato che non è più ed un futuro che non è ancora. Il verso è soltanto dal passato al futuro. Probabilmente questa asimmetria ha, tra le altre, una giustificazione causale del tipo di quella del sasso gettato nello stagno e delle onde da esso generate, circolari e concentriche, che si allargano nell'acqua scorrendo soltanto verso la riva.

Scartato il fissismo, poiché si tratta di una concezione non-scientifica, rimane però in piedi la causa antropica del surriscaldamento. Essa potrà confluire nel trasformismo come elemento aggiuntivo dei suoi effetti di cambiamento. Si capisce perciò come non sarà sufficiente l'accordo di Parigi per risolvere l'intero problema del surriscaldamento, poiché anche se si riuscisse a ridimensionare il fattore antropico, la minaccia di un aumento di temperatura nello strato geografico non sarebbe affatto scongiurata. Questo, perché incombe sul nostro futuro una eredità naturale che viene dal passato, come ci suggerisce lo studio della storia recente della Terra.

Nel Pleistocene medio-superiore si verificarono, nel Nord America ed in Eurasia, quattro grandi glaciazioni. La causa di esse è, da tutti, ritenuta extraterrestre. Il geofisico Milankovich mostrò che le glaciazioni dipendono dai fenomeni che vanno sotto i nomi di precessione degli equinozi, eccentricità dell'orbita ed inclinazione dell'asse di rotazione, che potevano aver determinato oscillazioni climatiche con un periodo di 21500 anni compatibili con l'andamento del grande fenomeno glaciale quaternario. I mutamenti d'insolazione conseguenti avrebbero indotto una diminuzione di circa 7°C che, con opportune variazioni di umidità, sarebbero stati sufficienti per causare le suddette glaciazioni che, sulle Alpi, sono note con i nomi di Gunz, Mindel, Riss e Wurm. Esse sono intervallate da periodi di ritiro dei ghiacci detti interglaciali.

Nell'ipotesi che continui tuttora il *trend* pleistocenico, si potrebbe pensare che la nostra epoca sia un ultimo interglaciale. Perciò, la cosa più ragionevole da fare è quella di analizzare il recente andamento noto di questo nostro interglaciale onde farci una qualche idea su ciò che potrebbe succederci nel prossimo futuro. L'intervallo glaciale Wurm ha avuto termine più o meno 10.000 anni fa. Ricerche di paleobotanica hanno evidenziato, nell'Olocene europeo, il seguente andamento termico successivo al glaciale:

8.200 – 6.800 a.C.	Preboreale	Optimum termico
6.800 - 5.500 "	Boreale	
5.500 - 2.500 "	Atlantico	
2.500 a.C.- 800 d.C.	Subboreale	Calo termico
800 d.C.- Attuale	Subatlantico	Alternanze asciutto-umido

Dopo la fine dell'era glaciale si raggiunge dapprima un periodo di optimum termico, poi la temperatura media va di nuovo calando, tuttavia non in modo graduale, ma con rapide oscillazioni che la curva di Milankovich, di cui sopra, non è in grado di segnalare, ma che però sappiamo essere sicuramente presenti, ma delle quali purtroppo non conosciamo le cause che potrebbero essere astronomiche.

Di grande interesse sono le oscillazioni post glaciali quaternarie con ampiezza di circa 500 anni. Ricerche sui ghiacciai alpini (Fernau) hanno evidenziato, negli ultimi 3000 anni, espansioni delle lingue glaciali negli intervalli temporali indicati nella colonna A

A	B	
1400 - 1300 a. C.		Nuovo regno egizio
		3° Intermedio (Bronzo/Ferro)
900 - 300 a.C.	520 - 350 a.C.	Piccola età glaciale arcaica
	200 - 400 a.C.	surriscaldamento
400 - 750 d.C.	500 - 750 d.C.	Piccola età glaciale altomedioevale
1150 - 1250 d.C.	1000 - 1300 d.C.	surriscaldamento
1600 - 1850 d.C.	1500 - 1850 d.C.	Piccola età glaciale moderna
	???	surriscaldamento?

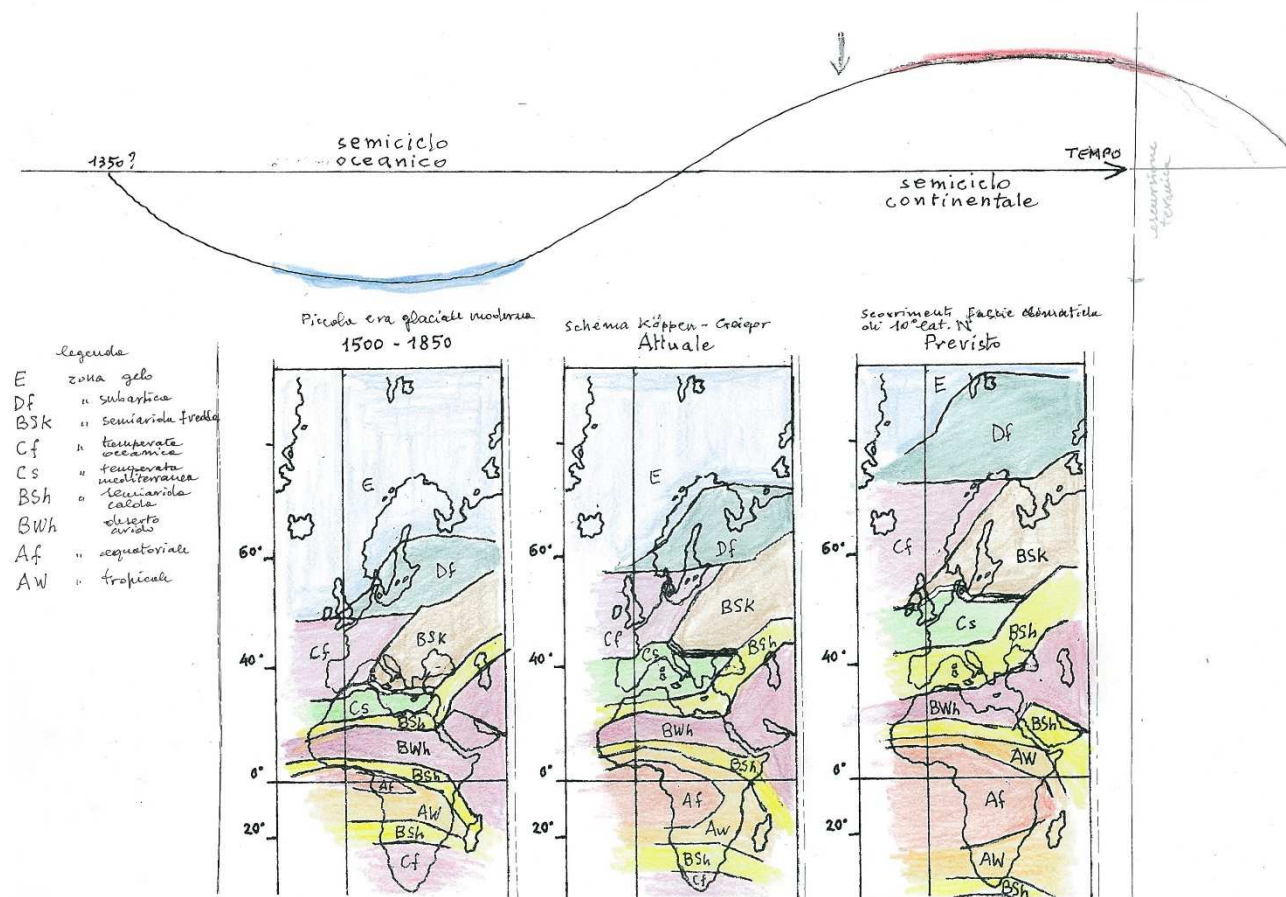
La storia nota e le ricerche di Ortolani e Pagliuca, attraverso lo studio di siti antichi posti fra 30° e 48° di latitudine N, hanno evidenziato in corrispondenza della colonna A, gli eventi B alternativamente caldi e freddi,

o meglio di clima continentale o di clima oceanico. Si tratta di stadi estremi all'interno delle oscillazioni climatiche suddette. Esse sono caratterizzate da un'escursione termica di alcuni gradi centigradi e da una sufficiente escursione di umidità.

Certamente, a questi cicli millenari, archeologicamente leggibili (sensibili), si sono andati sovrapponendo cicli ancora più brevi con escursioni minori, come quelli circa trentennali evidenziati da Bruchner ed altri ancora. La somma algebrica di detti cicli può avere a tratti rinforzato o mitigato l'oscillazione calorica complessiva.

Poiché, l'ultimo semiciclo di tipo oceanico di durata plurisecolare è terminato a metà del XIX° secolo, potremmo essere entrati nel semiciclo continentale successivo a cui si vengono via via sommando cicli più rapidi ed ora anche l'effetto aciclico della causa antropica. Cosa comporterebbe ciò? Nella parte centrale della figura, il clima inteso come risposta a livello geografico all'astrofisica del sistema solare, mediata attraverso la fisica dell'atmosfera, si concretizza in una serie di fasce climatiche con andamento latitudinale, secondo un noto schema classificatorio di Koppen - Geiger. Gli studi hanno evidenziato che, rispetto al recente passato si è avuto, tra Nord Africa ed il Sud Europa lo scorrimento latitudinale di 10 gradi di dette fasce. Si pensa che ciò potrà ripetersi anche nel prossimo futuro.

Forse, quanto è stato ora accennato potrebbe costituire lo scenario a cui dobbiamo fare riferimento. Ovviamente, non siamo indovini per cui non possiamo discutere qui qualcosa di più di tendenze. Tuttavia, sarebbe comunque saggio che ci preparassimo per tempo per ogni evenienza: servono energie pulite, molta acqua dolce e fonti sufficienti di cibo; il tutto distribuito in modo equo fra tutti gli abitanti del pianeta.



Per ragioni che dirò poi, vorrei qui brevemente accennare ad un'importante analogia storica relativa a questa figura, che potrebbe essere intervenuta nell'area mediterranea tanto tempo fa. Sappiamo che, fra V e IV secolo a.C., l'area settentrionale del Mediterraneo fu interessata da un semiciclo post glaciale con un clima oceanico culminante in uno stadio denominato "piccola era glaciale arcaica", perciò è verosimile che esso sia stato preceduto da un semiciclo con uno stadio climatico continentale che potremmo ubicare pressappoco tra 2° e 1° millennio a. C. Sappiamo poi che in quel periodo successe, in tutta l'area mediterranea, qualcosa di talmente catastrofico da segnare nella Storia della civiltà il passaggio tra il periodo del Bronzo e quello successivo. Scrive l'illustre archeologo Louis Godart che bisogna riconoscere come un aspetto così fondamentale per la storia del Mediterraneo antico è ancora avvolto, dopo tanti anni di indagini e ricerche, da una fittissima nebbia.

A livello di ipotesi suggestiva, vorrei in questa sede riprendere e sostenere la tesi di Rh. Carpenter secondo cui il suddetto evento indicativo sia la conseguenza di una di quelle oscillazioni di 500 anni che qui identifico con quella di clima continentale che precede la piccola era glaciale arcaica. Mi si chiederà la prova di quanto affermo. Penso che la prova si trovi nella Bibbia, nel punto in cui s'innesta la nota esegetica che cerca d'individuare il faraone dell'esodo. In questo notissimo testo e precisamente nel libro dell'Esodo, c'è il racconto delle 10 piaghe d'Egitto che potrebbe sottintendere il cambiamento climatico di cui parlo. Lo stile del racconto biblico è metaforico e simbolico. Riconducendo tale racconto ad un linguaggio diretto, senza metafore e simboli, emerge l'evento storico. Si tratta di una fitta sequenza di catastrofi naturali che si possono raggruppare in due fasi successive che persuasero infine gli ebrei a migrare più a Nord.

Nella prima fase, il fertile suolo ai lati del Nilo venne asportato dalle acque esondanti insieme al suolo ferrettizzato del deserto contiguo che tinse l'acqua del fiume di color rosso-sangue. È evidente che il cambiamento era iniziato con forti ed abbondanti piogge (bombe d'acqua). Quando queste si placarono, restarono ovunque sulla terraferma acquitrini paludosi (simbolo biblico: la rana) in cui proliferavano insetti (zanzare e mosconi). Questi trasmettevano agli uomini ed agli animali domestici malattie infettive che procuravano alle loro carni ulcerazioni nauseabonde. Nel Nilo morivano i pesci e sulla terraferma moriva il bestiame e si perdevano i raccolti. Seguirono naturalmente estrema povertà e fame. Su tutto regnava una grande instabilità atmosferica (simbolo la grandine) che creava un'enorme insicurezza. È assai probabile che tutto ciò abbia dato origine anche a gravi disordini sociali.

Alla fase descritta sopra, seguì poi una seconda fase che chiama in causa il vero e proprio stadio surriscaldato. Nell'Egitto di quel tempo si trattò di desertificazione (simbolo le cavallette) che acuì se possibile la povertà e la fame del popolo. La siccità provocava sete, aridità ed una totale mancanza di igiene, causa di malattie. Queste venivano trasmesse per via sessuale per cui colpivano di preferenza i giovani che, procreando, vedevano morire i loro primogeniti. Il tutto poi avveniva in un quadro terrorizzante di segni premonitori quali l'eclissi di sole che, in pieno giorno, precipitava ogni cosa nel buio. Dobbiamo immaginare tutto ciò in un tempo in cui, per la maggior parte degli uomini, la possibilità di vita era la semplice sussistenza; ed in un tempo in cui regnava superstizione ed ignoranza che impedivano ogni difesa dalle avversità naturali e dalle malattie.

Il racconto biblico va poi contestualizzato. Gli esegeti biblici indicano quale faraone dell'esodo uno dei sovrani della XIX dinastia (in particolare Ramses II o Merneptah) che regnarono nel XIII sec. a.C. Dobbiamo tener presente però che la cronologia biblica anteriore al 1° millennio non è molto affidabile e richiede il confronto con altre fonti, per cui nell'ipotesi che l'esodo sia dovuto soprattutto al cambiamento climatico descritto e che questo sia avvenuto con una scadenza temporale regolare, il periodo indicato appare, a parer mio, anticipato per le seguenti ragioni

- I. la XIX dinastia conclude il Nuovo Regno in cui c'era, nel nord Africa, una situazione ambientale di steppa semiarida calda, ma ben sopportabile nella striscia ubertosa del Nilo;
- II. le dinastie libiche ed etiopiche che seguono il disastro politico-sociale causato dal cambiamento climatico s'insediano con la forza in Egitto alla metà del X sec a.C.

Pertanto, si potrebbe pensare che l'ingresso nell'area egiziana del deserto arido caldo (Bwh), che prima dominava nelle aree attorno alla striscia del Nilo, possa essere avvenuto più tardi, al tempo della XX od anche XXI dinastia, cioè fra il 1200 ed il 1000, verso la fine del 2° millennio a.C.

Generalizzando il dato relativo al solo Egitto, si può constatare che la figura mostra come, in tutta l'area tra i 10-15° e 40-45° di latitudine N, le fasce climatiche BSh e BWh, raggiungendo l'area mediterranea, distrussero direttamente l'economia palaziale di raccolta e redistribuzione dei prodotti agricoli che caratterizzava tutta l'area mediterranea ed il vicino oriente. A questa catastrofe seguirono certamente profondi rivolgimenti sociali e riposizionamento di popolazioni per cui, nei 2 secoli successivi, la civiltà sembra quasi sparire.

Ho accennato a questa analogia storica anche per proporre una riflessione agli archeologi. Ma, soprattutto perché essendo gli stadi freddi quelli che hanno lasciato testimonianze nella storia, mi è sembrato interessante citare un probabile stadio di surriscaldamento sufficientemente documentato, onde poter mostrare cosa comporterebbe un cambiamento come quello da noi ora paventato. Se nel passato però, esso può avere cancellato con relativa facilità intere aree civili, è perché esse erano basate su una economia di sussistenza che si avvaleva di una tecnologia rudimentale e, soprattutto, vi dominava una molto estesa e radicata superstizione. Noi invece, abbiamo una raffinata cultura e sufficienti mezzi scientifici e tecnologici per fare fronte ad un futuro climatico avverso. Speriamo di avere anche una sufficiente dose di buon senso per usare bene i nostri potenti mezzi.

Concludendo, c'è un fattore antropico, che dipende da noi, di cui non conosciamo la consistenza e neppure come esso s'inserisca nella dinamica terrestre. Dobbiamo però cercare di neutralizzarlo per impedirgli di convergere con gli effetti dei processi naturali, che non dipendono da noi, sommandosi con essi. Un primo passo per fare ciò consiste nell'affrontare il cambiamento climatico con una mentalità adeguata.

Archeologia e storia del clima

Valeria Righini
Professore associato f. r. dell'Università di Bologna

Introduzione

Nel corso degli ultimi tre decenni del Novecento si è venuto attuando un processo di collaborazione tra archeologi ed esperti di vari settori della ricerca scientifica. Si è trattato di un percorso lento e faticoso nelle fasi iniziali, che si è venuto evolvendo nella ricerca di una reciproca comprensione, che oggi può dirsi completata e consolidata.

L'archeologo odierno si rivolge per collaborazione a specialisti di vari settori: geologi, pedologi, esperti di paleoidrografia e di analisi paleoambientale per la comprensione dell'ambiente nella fase cronologica a cui si riferisce l'insediamento antropico portato in luce dallo scavo; esperti di paleobotanica – oggi si preferisce il termine archeobotanica – per l'analisi di tutti gli elementi vegetali recuperati, da quelli di dimensioni minuscole come i pollini a quelli di grandi dimensioni come i resti di legname, siano essi riferibili alla flora spontanea o coltivata oppure a strutture costruite in cui il legname è stato utilizzato; esperti di archeozoologia per l'esame dei resti faunistici e di antropologia umana per i resti scheletrici.

Lo stesso tipo di rapporto di collaborazione si articola anche per quanto concerne i materiali recuperati nello scavo: esperti di archeometria analizzano i manufatti di argilla, quelli di metallo e quelli di vetro tentando di identificare non solo le caratteristiche tecniche intrinseche dei singoli oggetti ma anche se essi presentano elementi utili per identificare l'area di produzione (1).

Nel frattempo, in particolare nel corso degli anni Ottanta, si andava evolvendo la tecnica di scavo, sempre più proiettata verso lo scavo stratigrafico che, essendo analitico, consente di identificare anche elementi di dettaglio (2).

Oggi uno scavo archeologico ben organizzato è pertanto una struttura complessa in cui, accanto all'opera dell'archeologo che scava manualmente il terreno ed interpreta i reperti secondo i metodi tradizionali di analisi formale e stilistica si articola un gruppo, il più possibile ampio e completo, di ricercatori scientifici, ciascuno dei quali apporta i propri risultati specifici, giungendo quindi a delineare un quadro completo del sito scavato. Con il progredire della tecnologia siamo giunti all'Archeologia virtuale, con la realizzazione anche di Musei virtuali (3).

Nell'ambito di tale situazione di rapporti sempre più stretti tra l'archeologia ed i vari settori di ricerca scientifica si può inserire l'attenzione che oggi si rivolge anche agli aspetti climatici.

Nel corso degli anni Settanta iniziarono a diffondersi anche fra gli archeologi le "Fasi climatiche" del Pinna (4), che offrivano un quadro generale di riferimento per comprendere le variazioni del clima in particolare negli ultimi tre millenni.

Una fase di peggioramento climatico comporta un incremento della piovosità che provoca l'esondazione dei corsi d'acqua e l'acqua ritirandosi lascia nel terreno uno strato di deposito alluvionale più o meno consistente in rapporto alla quantità d'acqua e di residui in essa contenuti. Gli strati alluvionali vengono in luce nello scavo e l'archeologo deve tenerne conto per interpretare correttamente la stratificazione (5).

Strettamente correlate alle fasi climatiche sono poi le ricerche relative alla paleoidrografia, che analizza le variazioni di percorso dei corsi d'acqua naturali e artificiali nel corso dei secoli, tentando di identificare l'andamento anche in età preromana – romana – altomedievale. In età romana ai corsi d'acqua maggiori era poi correlata tutta la rete di drenaggio dell'idrografia di superficie attuata mediante la centuriazione. Sarebbe infatti grave errore metodologico per l'archeologo considerare l'ambiente e la rete idrografica come si presenta attualmente, perché ciò potrebbe condurre a macroscopici errori di interpretazione dello scavo.

L'area in cui questi aspetti si presentano con maggior rilievo – pur essendo presenti anche in altre zone – è quella dell'Italia nordorientale, Veneto di pianura (6), Friuli costiero, territorio ferrarese e Romagna settentrionale, dove la presenza del basso corso del Po e del Delta – e di riflesso degli affluenti nel percorso di pianura – e del basso corso dell'Adige hanno determinato una trasformazione ambientale macroscopica rispetto all'antichità, con variazione dei rami principali del Delta, con notevole avanzamento della cuspidi delizia e con variazioni evidenti della costa anche in Friuli provocata dal Tagliamento e dall'Isonzo (7).

Il divagare delle acque ha inoltre provocato, in età altomedievale, la formazione di aree lagunari e di palude, per quanto ampie chiazze paludose fossero presenti anche in età romana (8).

Purtroppo per l'età romana non disponiamo di notizie da fonti letterarie, mentre sono numerose per quella altomedievale (v. *infra* Considerazioni). Solo per la città di Roma (9) sono segnalate alluvioni, nel corso del regno di Augusto, nel 27, 23, 22, 13 a.C. e nel 5 e 15 d.C. tanto che il successore Tiberio nel 15 d.C. istituì un'apposita commissione di *Curatores alvei Tiberis et riparum*, formula che nell'età di Traiano fu variata in *Curatores riparum et alvei Tiberis et cloacarum*, che dovevano occuparsi dei problemi del Tevere e della rete fognaria strettamente correlata al fiume.

Una serie così consistente di alluvioni in un arco cronologico circoscritto, come in questo caso di Roma, suggerisce una considerazione – per altro ovvia – che nel corso della fase di miglioramento climatico fra il 300 a.C. ed il 400 d.C. non è possibile che le condizioni climatiche e meteorologiche siano state sempre ottimali e che devono essersi verificate delle mini fasi di peggioramento con aumento della piovosità e con le conseguenze che ne derivano.

Quest'ultimo aspetto può emergere dagli scavi archeologici quando essi portano in luce delle stratigrafie miste, costituite da strati di formazione antropica e da strati di formazione naturale come i depositi alluvionali.

Il principale problema è quello di attribuire una datazione agli strati naturali e ciò è possibile o tramite materiali archeologici conglobati in essi o per elementi naturali come il legname che possono essere sottoposti ad analisi scientifiche oppure in base alla legge della cronologia relativa per cui uno strato in giacitura primaria indisturbata è più recente dello strato antropico sottostante e più antico di un eventuale strato antropico soprastante. Ma non in tutti i casi è possibile una datazione.

Un errore metodologico da evitare è di generalizzare. Una situazione riscontrata in una località non può essere attribuita *ipso facto* ad un'area vasta. Sarebbe necessario disporre di una mappatura relativa alla presenza di strati alluvionali, possibilmente datati, su un areale molto ampio, ad esempio tutta l'Italia settentrionale o meglio tutto il territorio italico per poterne dedurre aspetti generali di variazioni climatiche con relativa cronologia.

In considerazione di tutto ciò, si è scelto di presentare in questa sede alcuni esempi – fra i molti che potrebbero essere adottati – di situazioni archeologiche in cui gli elementi emersi dagli scavi consentono di identificare aspetti relativi al clima.

Este

Este è una cittadina veneta ubicata in prossimità dei Colli Euganei. Il nome latino *Ateste* è concordemente correlato a quello del fiume *Atesis* che in antico l'attraversava. Ebbe la fase di *floruit* in epoca protostorica, tanto da essere considerata il principale centro della cultura paleoveneta, documentata da un ampio ed articolato patrimonio archeologico, costituito prevalentemente da ceramiche e bronzi e da materiale religioso di tipo votivo (10).

In età romana è una cittadina come tante altre nell'Italia romanizzata, senza elementi di particolare rilievo (11).

Fra il 1978 ed il 1980 è stato effettuato uno scavo nell'area dell'Ospedale civile. La situazione si presentava particolarmente favorevole dal punto di vista archeologico poiché si trattava di un'area abbandonata in età romana e mai più riedificata, per cui è stato possibile effettuare lo scavo in forma estensiva (12).

Nello scavo è venuta in luce una stratigrafia particolarmente interessante poiché si tratta di una stratigrafia in giacitura primaria indisturbata (non alterata da interventi nelle epoche successive) di tipo misto in quanto presenta una regolare alternanza di strati di formazione antropica e di strati di formazione naturale costituiti da argilla alluvionale, fig.1.



Fig.1. - Este, scavo dell'Ospedale Civile. Stratificazioni alluvionali (da Baggio Bernardoni, 1992, p.307, fig. 217).

Nella stratigrafia sono conglobati otto secoli di vita del sito, con la seguente successione partendo dal basso e seguendo quindi la cronologia di formazione del deposito stratigrafico:

Antropico	Naturali
tracce di frequentazione VIII-VII secolo a.C.	alluvionale
pavimentazione e basi di pilastri VI-IV secolo a.C.	alluvionale
costruzione in muratura fine IV-II secolo a.C.	alluvionale
edificio di età repubblicana	alluvionale

abitazioni di età augustea (13) (strato sommitale della stratigrafia).

La cronologia degli strati alluvionali viene pertanto determinata da quella degli strati antropici contermini, in base ad una delle leggi elementari della stratigrafia (rapporto di cronologia relativa) per cui ogni strato è più recente di quello sottostante e più antico di quello soprastante.

Dopo l'età augustea quest'area non è più stata sede di insediamento antropico e per circa duemila anni è stata utilizzata come terreno agricolo.

Sequenze stratigrafiche analoghe sono state riscontrate anche in altre zone dell'abitato, con strati alluvionali provocati da esondazioni dell'Adige (14) che in età antica attraversava il centro di Este e che alla fine del VI secolo d.C., in un periodo di grandi piogge, nel 589 d.C. con la c.d. "rotta della Cucca" abbandonò il proprio alveo spostandosi verso sud, grosso modo sul percorso attuale.

Modena

La *colonia Civium romanorum* di *Mutina* (15) viene dedotta nel 183 a.C. da M. Emilio Lepido, il costruttore della *Via Aemilia* nel 187, in posizione intermedia fra i due fiumi Trebbia e Panaro, ricevendo un contingente di duemila coloni, a ciascuno dei quali fu assegnato un appezzamento di terreno di cinque iugeri. In età tardorepubblicana *Mutina* fu teatro del *Bellum mutinense* (44-43 a.C.), lo scontro di potere fra Ottaviano ed Antonio, che si risolse in favore del primo (16).

I dati archeologici relativi alla città in età repubblicana sono piuttosto scarsi sia per la notevole profondità (oltre m.5 con casi a m.7-8) per cui sono difficilmente raggiungibili sia per la presenza di abbondanti acque di falda (17).

Non molto numerosi anche i dati relativi all'abitato di età imperiale (18), che ugualmente giacciono a notevole profondità, costituiti da alcuni tratti di lastricati stradali, dai resti di *domus* in qualche caso di notevole livello, mentre mancano attestazioni relative ad edifici pubblici ed a luoghi di culto.

Mutina era una città indubbiamente prospera, con un benestante ceto medio di agricoltori, mercanti ed artigiani. *Splendidissima Mutina* l'aveva definita Cicerone (*Philippicae* V,24) alla fine dell'età repubblicana, *Opulentissima* la celebra Pomponio Mela (*Chorographia* 2,4,2).

In età imperiale le principali attività (19) documentate da fonti letterarie, epigrafiche ed archeologiche sono la viticoltura (Plinio, *Naturalis Historia* XIV,39,5), la produzione di tessuti di lana connessi con l'allevamento (Strabone V,1,12; Plinio *Naturalis Historia* II,129; Columella VII,2,3) e le produzioni di ceramica (Plinio *Naturalis Historia* XXXV,160-161). La produzione lanaria è confermata da quattro iscrizioni in cui sono citati *vestiarii* e *lanarii* e le produzioni ceramiche dai rinvenimenti archeologici.

Nel corso del III secolo d.C. si verifica un restringimento dell'area urbana (20), che proseguirà anche in seguito, ma non si tratta di una situazione locale bensì di un depauperamento urbanistico comune a tutto l'Occidente romano. Non sussistono molte informazioni relative al IV secolo d.C., quando la città ebbe il primo Vescovo Geminiano, ed al V secolo d.C. quando appare ormai in crisi, che si protrae fino alla fine del VI secolo d.C., per quanto in alcune aree si sia notata una continuità di insediamento.

Alla relativa scarsità di documentazione per l'abitato, fa riscontro una notevole quantità di dati relativi alle necropoli (21) in particolare quella occidentale e quella orientale distribuite lungo la Via Emilia, oltre a nuclei sparsi in varie zone. La necropoli orientale appare la più ricca ed ha restituito, oltre a numerose stele funerarie, anche sarcofagi e monumenti architettonici.

L'archeologia mutinense è caratterizzata dalla presenza, più o meno consistente (spess. da m.0,50 a m.7), di una coltre di terreno alluvionale sia sull'abitato sia sulle necropoli, che ha dato origine all'espressione "la grande alluvione che ha distrutto Modena romana" divenuta abituale nella bibliografia archeologica e nella storiografia locale.

Per capire l'origine dell'alluvione negli anni Ottanta del Novecento sono state condotte due analisi paleo ambientali, una geoarcheologica (22) ed una geomorfologica (23) sostanzialmente concordi nelle conclusioni: la causa dell'alluvione non va imputata ai fiumi Secchia e Panaro, troppo lontani dall'abitato, ma a due torrenti il Cerca / Formigine ed il Tiepido che scorrevano l'uno a Occidente e l'altro ad Oriente della città per poi confluire a valle di essa.

Gli anni Ottanta hanno visto anche l'inizio dell'applicazione sistematica della tecnica dello scavo stratigrafico, in particolare nello scavo della Cassa di Risparmio (24) ed in altri sondaggi in Piazza Grande (25), che hanno rivelato uno strato alluvionale dello spessore di m.4,50. Già da questi scavi sono emersi due aspetti importanti per la nostra comprensione della situazione di *Mutina* tardo antica – altomedievale: lo strato alluvionale non è stato deposto da una sola alluvione ma da almeno due o più episodi succedutisi a breve distanza di tempo e le alluvioni non hanno distrutto gli edifici della città ma si sono appoggiate su strutture già abbandonate e crollate. Entrambi questi aspetti sono stati confermati da scavi successivi.

È stato inoltre possibile determinare la cronologia delle alluvioni in base ad un sarcofago (26) rinvenuto in Piazza Grande, a m.3,85 di profondità, databile all'ultimo trentennio del VI secolo d.C., completamente ricoperto dai livelli alluvionali riferiti alle alluvioni posteriori al 590, e la tomba di Via Valdrighi (27) venuta in luce a m.1,80 di profondità, l'unica sepoltura di età longobarda rinvenuta presso la città antica, datata fine VI-inizi VII secolo d.C.

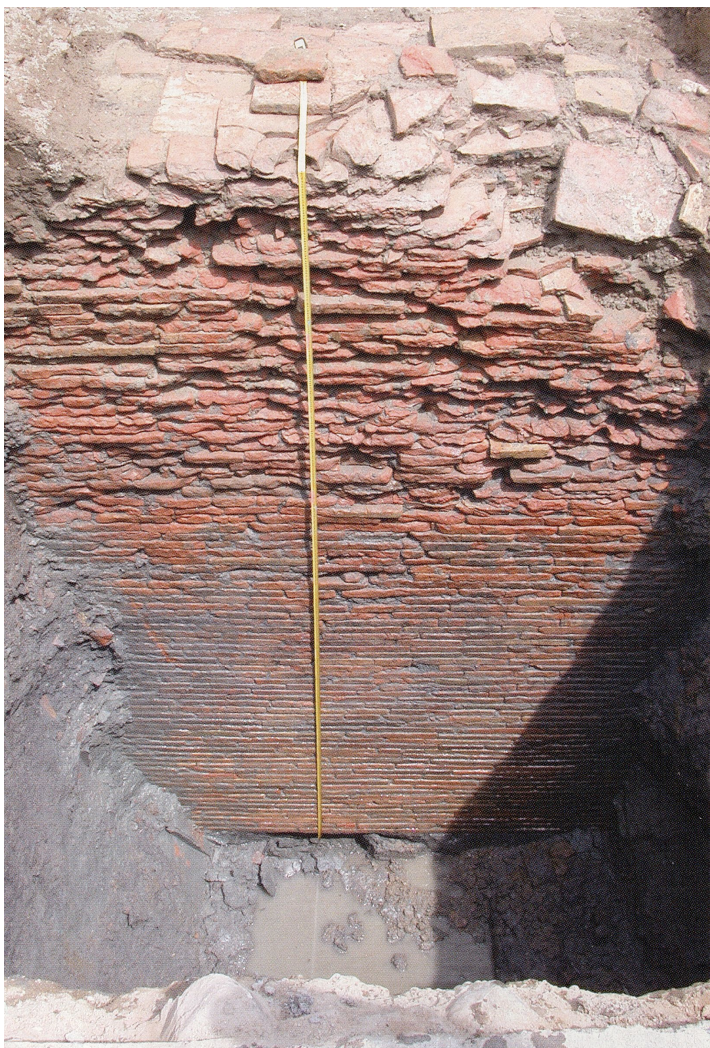


Fig. 2. - Modena, Piazza Roma. Le mura romane sommerse da alluvione in corso di scavo (da *Mutina*, 2011, p. 55).

Gli scavi degli anni Novanta e del primo decennio del secolo corrente, eseguiti con la tecnica dello scavo stratigrafico, hanno dato risultati interessanti.

Nel 2006-2007 è venuto in luce in Piazza Roma un lungo tratto delle mura settentrionali della città romana (28) (lunghezza oltre m.50; altezza m 4,50; spessore m 3,50) con la base a m 3,60 di profondità, per gran parte sommerse da terreno alluvionale, deposto da alluvioni di età longobarda (fine VI-inizio VII secolo d.C.) e da altre di età medievale, figg. 2-3.

Fra i vari scavi eseguiti nell'area della necropoli orientale (fig.4), uno in particolare – quello della Tangenziale Pasternak del 2007 – ha consentito di determinare dati cronologici puntuali per quanto riguarda le alluvioni (129). A m 3,30 di profondità è venuto in luce un tratto della Via Emilia, il cui manto stradale è stato rifatto varie volte fra l'impianto originale ed il V secolo d.C. Tra IV e V secolo d.C. un deposito alluvionale copre completamente la necropoli che si articolava lungo la strada e la datazione radiocarbonica eseguita su alcuni frustuli carboniosi contenuti nello strato indica una datazione calibrata fra il 340 e il 440 d.C. Un secondo deposito alluvionale (spessore m 0,60) esteso su tutta l'area è stato datato tramite datazione radiocarbonica di un albero adagiato sulla superficie della prima alluvione e ricoperto dalla seconda con datazione calibrata tra il 430 ed il 550 d.C. Altri depositi alluvionali si sono in seguito sovrapposti.

Il quadro generale dell'archeologia mutinense dimostra che non si è trattato di una sola alluvione, ma di numerosi episodi sovrapposti, articolati su un arco cronologico di vari secoli e rende pertanto inattuale l'espressione tradizionale "la grande alluvione che distrusse Modena romana".

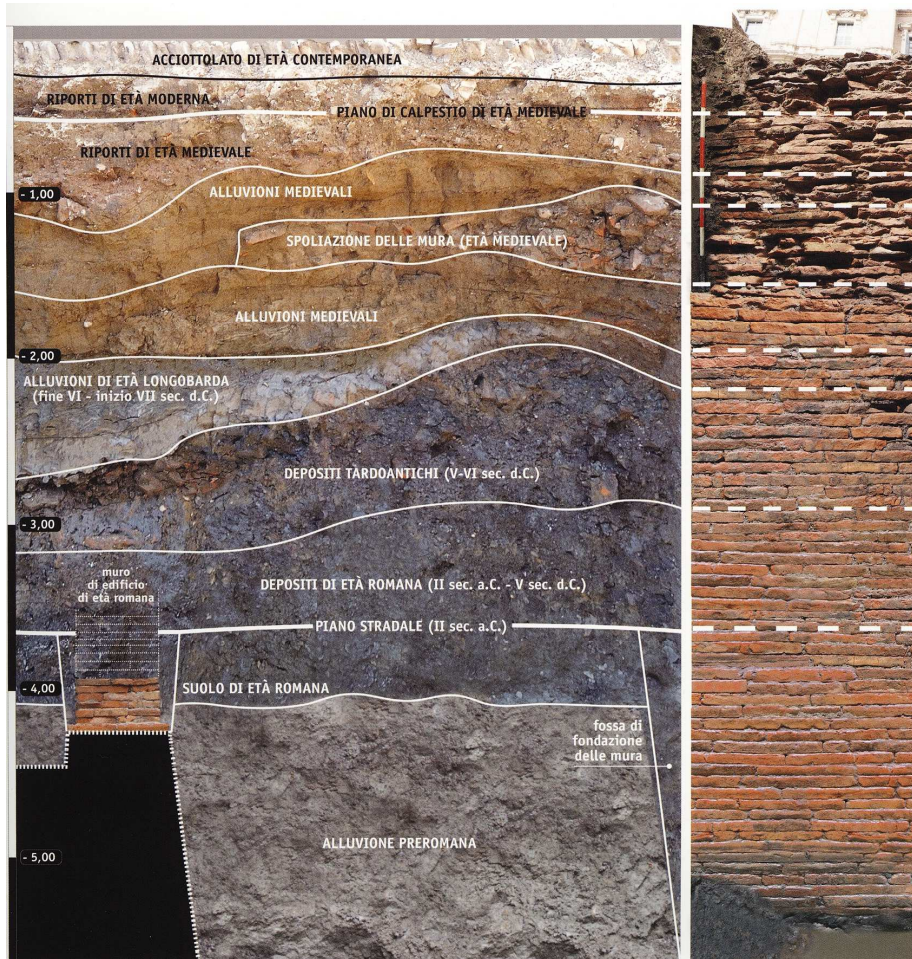


Fig. 3. - Modena, Piazza Roma. Stratigrafia rilevata nello scavo delle mura (da *Mutina*, 2011, p. 57).



Fig.4. - Modena, necropoli orientale. Stele funeraria di *Caius Fadius Zethus* sommersa da alluvioni in corso di scavo (da *Mutina*, 2011, p. 22).

Faenza

In età romana *Faventia* era una delle cittadine sorte per aggregazione spontanea lungo il percorso della *Via Aemilia*, fra *Bononia* ed *Ariminum*, nei punti in cui essa intersecava le vallate fluviali. Non abbiamo notizia di una fondazione ufficiale dello Stato, come nei casi di *Forum Corneli* (Imola), *Forum Livi* (Forlì), *Forum Popili* (Forlimpopoli) e *Caesena* (Cesena) e si ritiene probabile che esse si siano sviluppate sul sito di un preesistente nucleo ubicato in corrispondenza del guado.

Attualmente Faenza dispone di un consistente patrimonio archeologico costituito in prevalenza da pavimenti di mosaico, cronologicamente distribuiti fra l'età augustea e giulio-claudia ed il V-VI secolo d.C., nonché di altri tipi come cocchiopesto semplice e decorato e *opus scutulatum*.

In questa sede viene presentato uno scavo effettuato dalla scrivente nel 1984 nell'edificio in angolo fra Via Sant'Agostino e Via Varani (30), in occasione della ristrutturazione. L'edificio non era provvisto di cantine, le strutture in alzata appoggiavano su un terrapieno che è stato asportato, portando in luce le stratificazioni archeologiche sottostanti, che risultavano in giacitura primaria indisturbata.

Sono stati esplorati due ambienti (Stanza A e Stanza B) ed in entrambi la stratigrafia risultava mista, con alternanza di strati di origine antropica e di strati di origine naturale di terreno alluvionale.

Per la descrizione della stratigrafia si fa riferimento alla Stanza B (31), fig.5, dove essa si presentava più complessa, con rinvii alla Stanza A (32), fig.6.



Fig.5. - Faenza, scavo di via Sant'Agostino - via Varani. Panoramica della Stanza B (fotografia dell'Autore).

Al di sopra dello strato alluvionale di base (XV) (33) sono venute in luce le strutture di una piccola fornace quadrangolare con *praefurnium* (XIV; lato m 1 ca), alla prof. fra m 3,35 e m 3,45 sovrastata da un ammasso di argilla concotta (XIII) derivato dal crollo della struttura della volta e contenente numerose "fritte" (blocchi di oggetti di argilla fusi e vetrificati da eccesso di calore). Le strutture della fornace erano ricoperte da un sottile strato alluvionale dello spess. di m 0,10 - 0,15 (XII). Fra la fornace, l'ammasso di concotto, entro il *praefurnium* e nel terreno circostante è stato recuperato materiale ceramico in quantità consistente benché molto frammentato, costituito da ceramica a vernice nera, terra sigillata, ceramica tipo *Sarius*, a pareti sottili, comune di vari tipi, lucerne DR.2 e DR.3 (34).

Nello strato alluvionale di base (XV) erano inoltre presenti numerosi frammenti di anfore, ma non è stato possibile scavare per ragioni statiche. Fra i pochi frammenti recuperati uno presenta il bollo SEPVLLI (35) datato al I secolo a.C. mentre un altro è identificabile come ansa di anfora rodia e presenta il bollo EPI TIMOSTHENES (36) ugualmente datato al I secolo a.C.

Il quadro complessivo del materiale è cronologicamente omogeneo e suggerisce una datazione nella prima età augustea tra il 30 ed il 10 a.C.

Sopra allo strato alluvionale che ha sommerso la fornacetta fu poi costruita una vasca (XI) di cui resta un angolo, pavimentata con *opus spicatum* (mattoncini parallelepipedi disposti a spina di pesce).

La vasca fu a sua volta sommersa da uno strato di argilla alluvionale (IX; spessore m 0,50 ca) contenente numerosi frammenti di piccole dimensioni di intonaci sia di colore bianco sia dipinti di rosso,

giallo, nero e azzurro nonché numerosi carboncini in frammenti di dimensioni piccole e minime. L'ondata di alluvione che ha deposto questo strato deve essersi abbattuta sulla vasca con notevole violenza, tanto da strappare i mattoncini dell'*opus spicatum* dal letto di intonaco in cui erano allettati ed in cui restavano le impronte e da spargerli all'interno dello strato alluvionale.

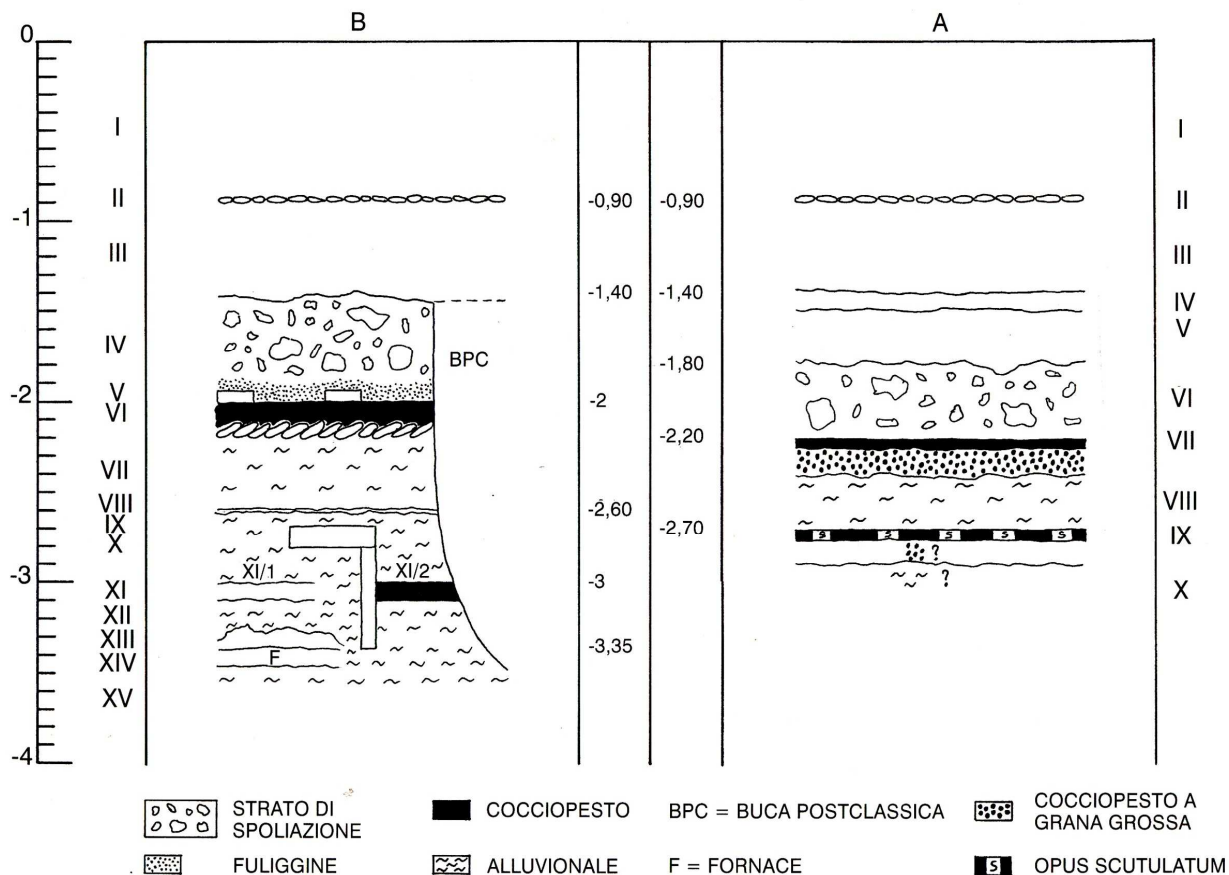


Fig.6. - Faenza, scavo di via Sant'Agostino – via Varani. Schema stratigrafico dello scavo (disegno dell'Autore).

Sulla sommità di quest'ultimo si stendeva uno straterello molto sottile (VIII; spessore m 0,4 - 0,6) in parte nero carbonioso ed in parte giallo chiaro alluvionale.

Lo straterello separava lo strato alluvionale IX dal soprastante strato alluvionale VII e si tratta sicuramente di due distinte alluvioni perché nella Stanza A fu costruito, al livello dello straterello separatore, un pavimento di *opus scutulatum* (A IX) di una tipologia databile indicativamente tra la fine dell'età repubblicana e l'inizio del I secolo d.C. Il pavimento è appoggiato sullo strato alluvionale corrispondente al IX della Stanza B, che quindi viene indirettamente datato alla tarda età augustea o giulio-claudia iniziale.

Sullo straterello VIII della Stanza B e sul pavimento di *scutulatum* della stanza A si è poi riversata un'altra alluvione, che ha deposto uno spesso strato alluvionale (VII in Stanza B e VIII in Stanza A) contenente fitti inclusi di frammenti di intonaco bianco e di vari colori di piccole dimensioni e di carboncini minuscoli, figg.7-8.

Sulla sommità dello strato VII (Stanza B) si è rinvenuto un piattello di ceramica a vernice arancione del tipo *Eastern Sigillata B* di forma HAYES 62A datata fra il 70 -75 ed il 120 d.C. (37). Questo elemento consente quindi di affermare che l'alluvione non può essersi verificata prima della fine del I secolo d.C. – inizi del II secolo d.C. o qualche tempo dopo.

Sullo strato alluvionale furono in seguito costruiti due impianti di *suspensurae* (VII A e VI B), un sistema di riscaldamento a circolazione di aria calda costituiti da due pavimenti sovrapposti e separati da colonnine di mattoncini fra le quali circolava l'aria calda prodotta da un combustibile acceso nel *praefurnium* (un camino esterno).

In entrambi i casi si è rinvenuto solo il cocchiopesto di base con mattoncini delle colonnine e mancavano totalmente i pavimenti superiori, asportati in età medievale quando l'edificio fu soggetto ad un'ampia opera di spoliazione.

La mancanza di materiali non ha consentito la determinazione della cronologia di costruzione, ma la tecnica costruttiva dei due impianti era nettamente differenziata e suggeriva un'antiorità di quello della Stanza A rispetto a quello della Stanza B, che presentava caratteristiche tardoantiche.



Fig.7. - Faenza, scavo di via Sant'Agostino – via Varani. Stanza B, dettaglio della parete con strato alluvionale (fotografia dell'Autore).



Fig.8. - Faenza, scavo di via Sant'Agostino – via Varani. Stanza A, dettaglio con strato alluvionale (fotografia dell'Autore).

In questo caso quindi i due strati alluvionali più consistenti sembrano indiziare due mini fasi di peggioramento climatico e meteorologico, l'una all'inizio del I secolo d.C. nella tarda età augustea o giulio-claudia iniziale e l'altra forse all'inizio del II secolo d.C. in età traiana o adrianea.

Russi

Attualmente Russi è un consistente borgo ubicato sulla via Faentina circa a metà strada fra Faenza e Ravenna. Non sono noti elementi attestanti la presenza di un agglomerato in età romana.

L'emergenza archeologica di Russi è data da una vasta villa romana (38), fig. 9, la più grande della regione ed una delle maggiori dell'Italia settentrionale, di tipo urbano-rustico, costituita da una *pars urbana* (settore residenziale) con pavimenti a mosaico e pareti dipinte e da una *pars rustica* (settore di servizio), che si articola in due vaste aree scoperte circondate da portici su cui si affacciano numerosi ambienti, figg.10-11.

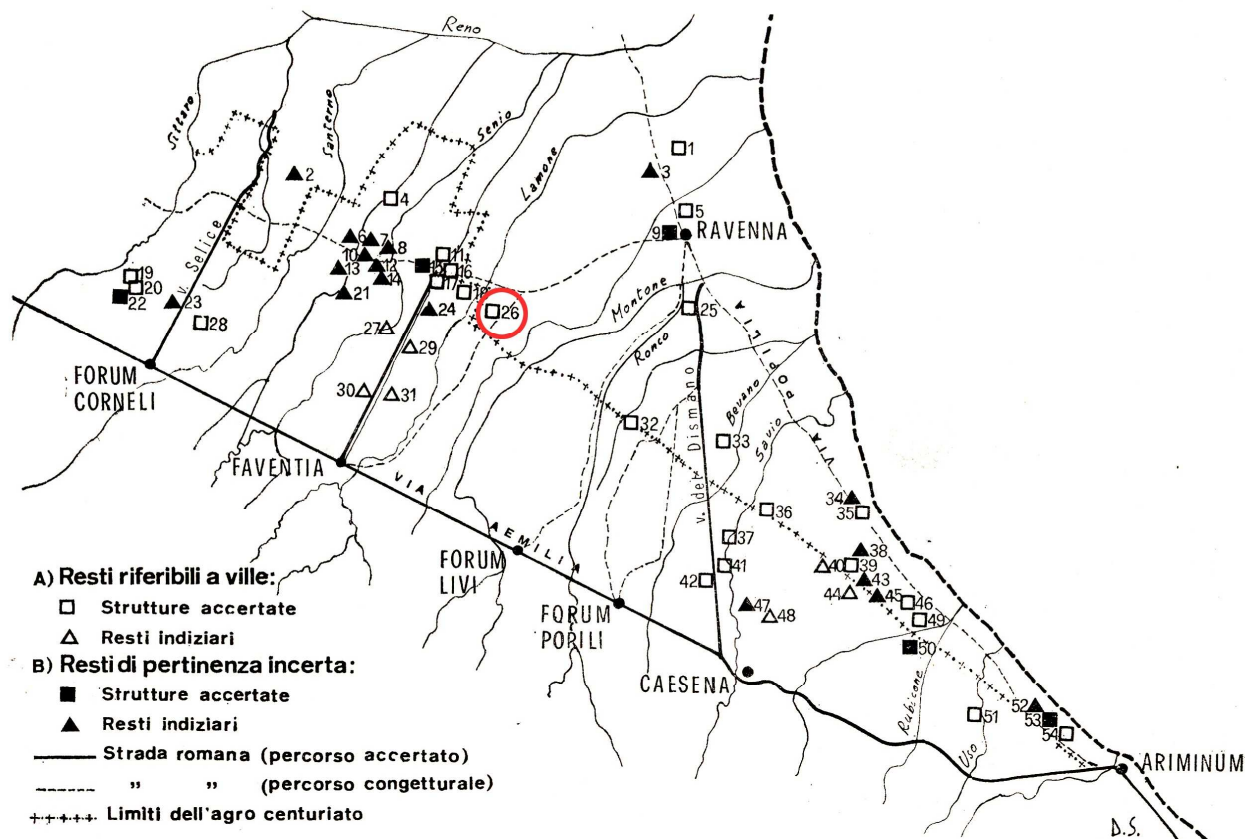


Fig.9. - Le ville romane in Romagna (da Scagliarini, 1968, p. 66).

La villa è stata costruita alla fine del I secolo a.C. ed è stata abbandonata nel III secolo d.C. Successivamente sono note tracce di frequentazione (monete di fine IV e V secolo d.C.) ed un riutilizzo parziale dell'edificio fra V e VI secolo d.C. quando fu definitivamente abbandonata e sommersa da alluvione.

Le strutture della villa si trovano ad una profondità fra 10 e 11 m sotto all'attuale piano di campagna. I primi elementi vennero in luce nel 1938 nell'ambito di una cava di prestito per l'estrazione dell'argilla (39) appartenente ad una locale fabbrica di laterizi. Scavi sistematici sono iniziati negli anni Cinquanta e proseguono saltuariamente ancor oggi.

La stratigrafia del terreno soprastante alle strutture mostra uno strato alluvionale contenente elementi di Paludine (40) e denotando pertanto la presenza di un ambiente acquitrinoso, formatosi a seguito dell'evento alluvionale. Seguirono periodi di calma, e nell'area si instaurò un bosco di querce e di olmi, cui fecero seguito altri alluvionamenti.

Il territorio di Russi è stato sicuramente investito da vari episodi alluvionali, come si può dedurre da due aspetti molto evidenti. Il primo riguarda il percorso del fiume Lamone (41) che in età romana tardoantica si trovava ad oriente del centro attuale e che attualmente scorre ad occidente di esso con uno spostamento di alcuni chilometri. La villa romana è ubicata circa a metà strada fra i due percorsi e pertanto deve essere stata investita, probabilmente a più riprese, dalle acque esondate (fig.12).



Fig.10. - Russi, panoramica della villa romana (fotografia dell'Autore.).



Fig.11. - Russi, panoramica della villa romana (fotografia dell'Autore.).

L'altra conseguenza delle alluvioni riguarda la centuriazione (42) che in età romana era presente sul territorio di Russi e che oggi appare quasi totalmente scomparsa tranne alcuni frustuli sporadici. Una puntuale revisione del territorio e della relativa cartografia ha consentito la ricostruzione grafica della centuriazione russiana (43), rendendo evidente come la cancellazione di essa sia stata quasi totale.

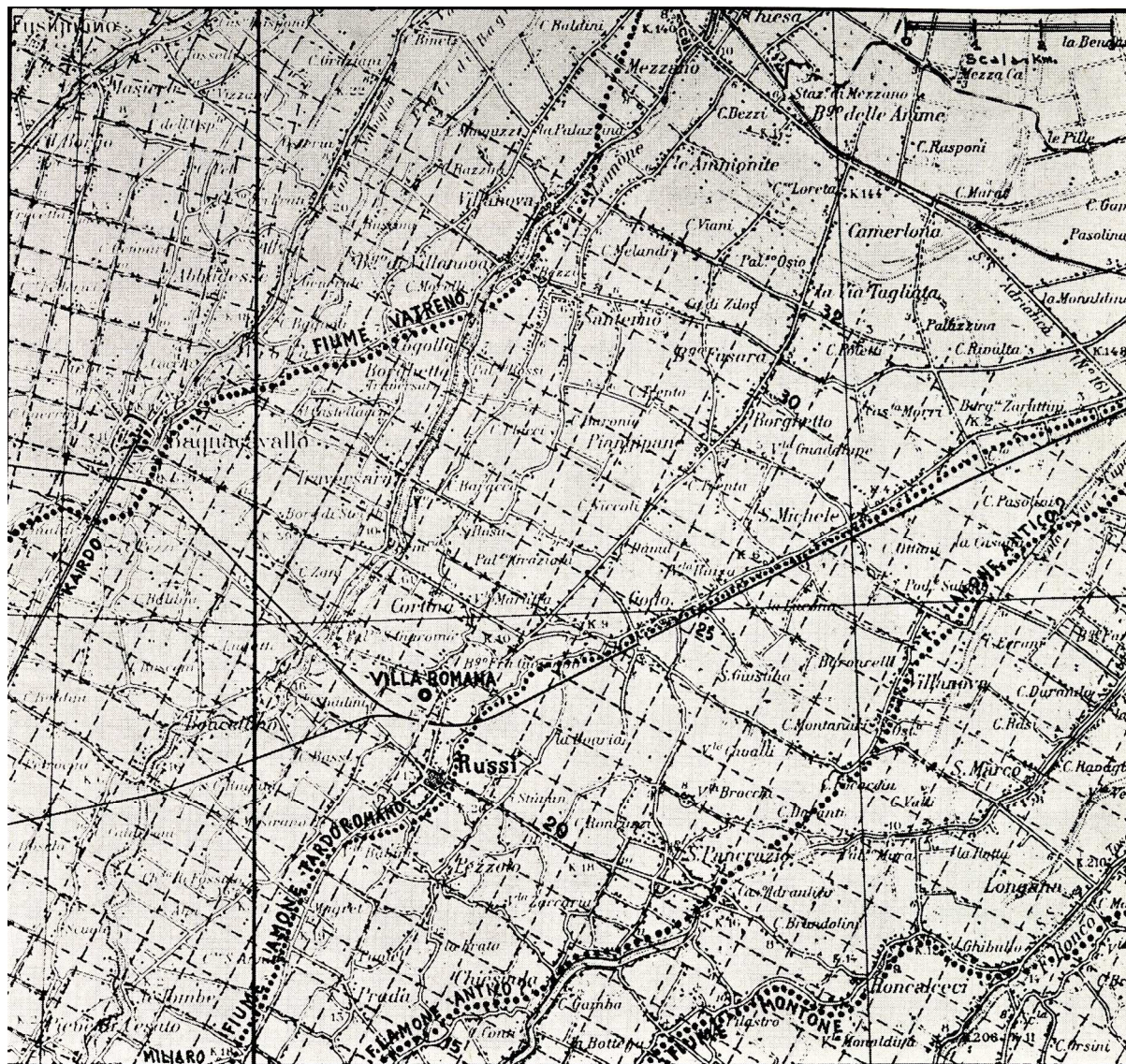


Fig.12. - Russi, variazioni di percorso del fiume Lamone (da Veggi – Roncuzzi, 1971, p. 148).

La mancanza di notizie desumibili da fonti scritte non consente di determinare la cronologia degli episodi alluvionali, che hanno provocato la cancellazione della centuriazione, la sommersione della villa romana sotto ad una coltre dello spessore di 10 m e lo spostamento del percorso del fiume Lamone. Qualche notizia si ricava da fonti basso medievali, ma non tale da chiarire esattamente la situazione (44).

Concordia

La *Colonia Civium Romanorum* di *Iulia Concordia* (45) fu dedotta, sul sito di un precedente insediamento paleoveneto, con lo stanziamento di un nucleo di veterani attorno al 40 a.C., nelle vicinanze del punto di incontro fra due strade consolari, la *Via Postumia* proveniente da Oderzo e la *Via Annia* da Adria e sulle rive del fiume Lemene, alla foce del quale era presente un approdo il *Portus Reatinum* (46).

La cittadina ebbe vita fiorente, ma senza elementi particolari, nei primi secoli dell'età imperiale ed acquisì un certo rilievo solo nel IV secolo d.C. (47), quando vi fu stanziata una fabbrica di *sagittae* (48), che comportò la presenza nella città di numerosi reparti militari (49), e da cui deriva la diffusa denominazione di *Concordia Sagittaria*, che tuttavia è una creazione degli eruditi ottocenteschi poiché non compare nella documentazione antica.

Nel IV secolo d.C. anche Concordia fu interessata dalla diffusione del Cristianesimo (50). Verso la fine del secolo la città ricevette in dono le reliquie dei Santi Apostoli Giovanni Battista, Giovanni Evangelista, Andrea, Luca e Tommaso e fu eretta, col concorso della popolazione, una grande basilica ad essi dedicata, la *Basilica Apostolorum*, inaugurata negli ultimi anni del secolo; nell'occasione fu consacrato anche il primo Vescovo, forse Eusebio fratello del Vescovo di Aquileia Cromazio (51). Tra IV e V secolo d.C. anche Concordia, come altre città del Veneto, fu colpita da varie invasioni barbariche (52).

La storia degli scavi di Concordia si articola in tre fasi (53). La prima alla fine dell'Ottocento quando fu localizzato il sepolcreto dei Militi (54), (fig.13), scavato da Dario Bertolini (55) a partire dal 1873, portando in luce circa 270 sarcofagi di tipo tardo antico. Il Bertolini si fece anche promotore, in accordo col Ministero, della realizzazione del Museo Nazionale Concordiese a Portogruaro inaugurato nel 1888 (56). In esso furono collocati alcuni sarcofagi integri e numerose iscrizioni ritagliate dagli altri sarcofagi (57) e l'area del Sepolcreto fu ricoperta. Dalle iscrizioni si ricavano dati di vario tipo: i nomi dei reparti militari (58), la provenienza etnica dei militi desumibile anche dall'onomastica, molti dei quali cristiani (59), la presenza di un consistente nucleo di Siriaci. Le iscrizioni dei militi sono datate fra la fine del IV secolo d.C. ed i primi decenni del V secolo ed in seguito la necropoli fu ricoperta da uno strato alluvionale.



Fig.13. - Concordia, Sepolcreto dei Militi (da Rinaldi – Vigoni, 2015, p. XVI).

La seconda fase di scavi risale agli anni Cinquanta del Novecento ed all'inizio degli anni Sessanta quando Bruna Forlati Tamaro prima e Giulia de' Fogolari poi intervennero nell'area dell'attuale Basilica di S. Stefano (60), fig.14. Gli scavi portarono in luce, al di sotto della Basilica attuale, le strutture restanti della *Basilica Apostolorum*, un vasto pavimento di mosaico, lacerti dei muri perimetrali e resti delle colonne che la dividevano in tre navate (61), fig.15. La Basilica fu distrutta da un incendio presumibilmente nella seconda metà del VI secolo d.C. (62). Le strutture erano ricoperte ed oblitee da uno strato alluvionale dello spessore medio di m 2.

Lo scavo fu tecnicamente difficoltoso in quanto condotto sotto alla Basilica attuale e si rese necessario sostenere il pavimento di quest'ultima mediante una struttura metallica con colonne, fig.16.

A lato della Basilica paleocristiana e in aderenza ad essa si rinvenne una piccola area cimiteriale costituita da una Basilichetta con cortile antistante in cui erano collocati vari sarcofagi, alcuni dei quali non utilizzati. Anche in quest'area le strutture erano ricoperte dallo strato alluvionale con spessore fra m 2,10 e m 2,40.

La presenza di uno strato alluvionale così consistente diede origine all'espressione "la grande alluvione che distrusse Iulia Concordia", espressione divenuta topica ed in prosieguo abituale nella letteratura antichistica locale.



Fig.14. - Concordia, la Basilica attuale (da Galliazzo, 2002, p. 180).

Fig.15. Concordia. Ipotesi ricostruttiva del complesso paleocristiano (da Croce da Villa, 2001, p. 253, fig.1).





Fig.16. - Concordia. Veduta interna della Basilica paleocristiana con pavimento di mosaico e strutture metalliche a sostegno del pavimento della Basilica attuale (da Croce da Villa, 2001, p. 255, fig. 2).

A partire dagli anni Settanta del Novecento è iniziata la terza fase dell'esplorazione archeologica di Concordia, tuttora in corso, che ha interessato l'area dell'abitato dove sono stati identificati e scavati sia edifici pubblici (Foro, Mura, Teatro, Terme) sia abitazioni private (63).

Da scavi e sondaggi recenti, condotti con metodo stratigrafico, sono emersi elementi che hanno chiarito la situazione delle alluvioni (64). Le stratigrafie mostrano con chiarezza vari strati alluvionali sovrapposti (65), figg.17-18.

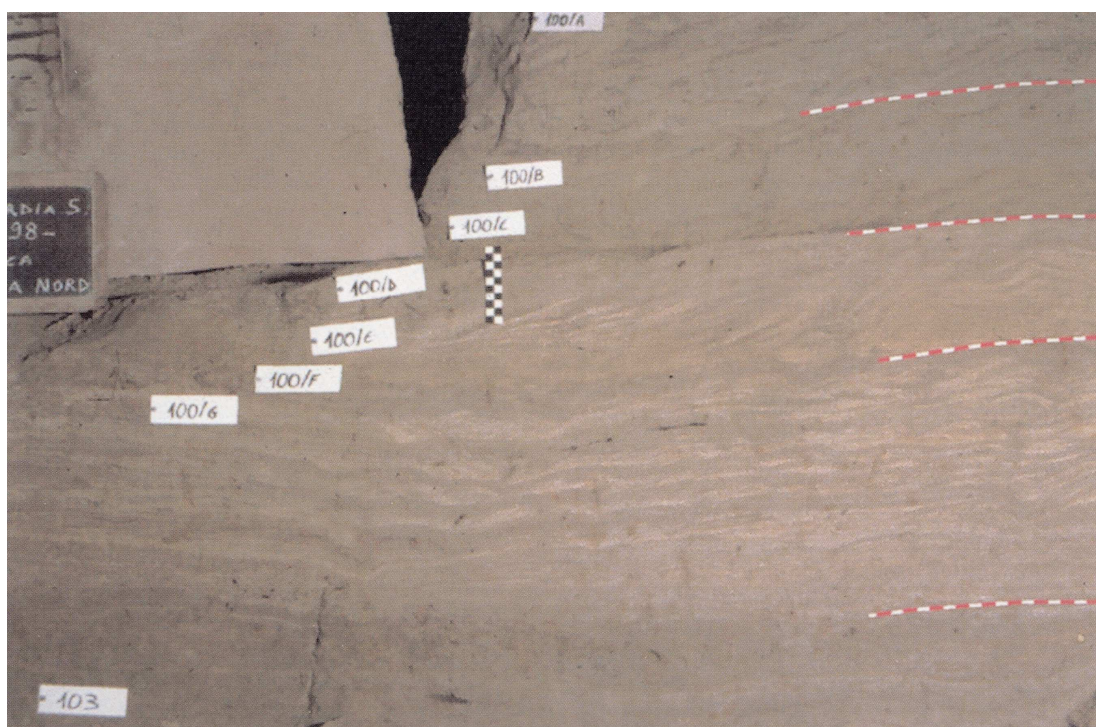


Fig.17. - Concordia. Scavo all'interno della Basilica paleocristiana. Sezione di scavo con ripetuti fenomeni di alluvionamento (da VALLE - VERGESI, 2001, p. 95, fig. 3).

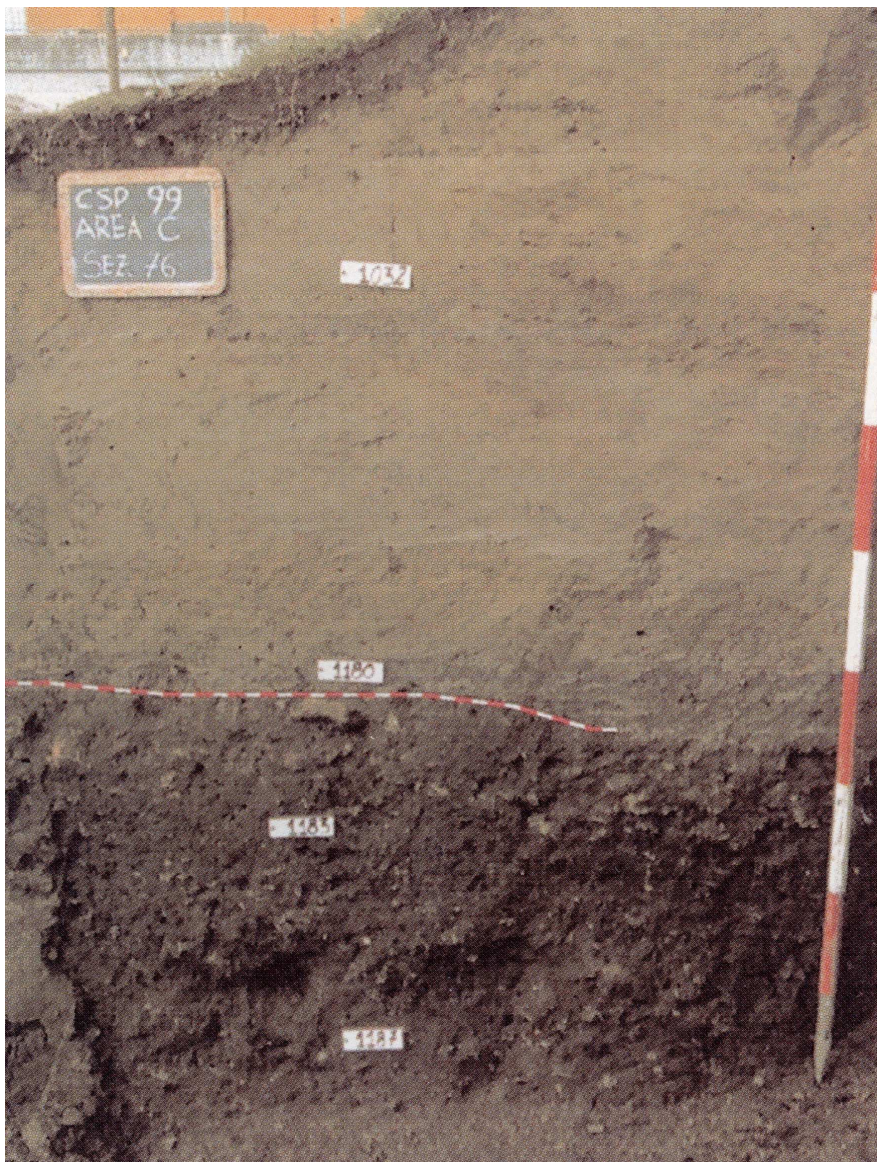


Fig.18. - Concordia. Scavo all'esterno della Basilica paleocristiana con strati di alluvione soprastanti allo strato tardoantico (da Valle – Vercesi, 2001, p. 96, fig. 4).

Nell'area della Basilica si sono riscontrati alcuni strati inferiori di modesto spessore, sopra ai quali si riversò un'alluvione tanto violenta da spezzare all'altezza di un metro alcune colonne all'interno della Basilica ed alcuni pioppi (66) che sorgevano nel piazzale antistante (67), lasciando un deposito alluvionale consistente che, sovrapponendosi ai precedenti, ha contribuito a formare il deposito globale dello spessore di m 2 rinvenuto sovrapposto alla *Basilica Apostolorum*. Da indizi emersi negli scavi recenti sembra che quest'ultima violenta alluvione si sia verificata dopo l'VIII secolo d.C. (68).

Una situazione simile di sovrapposizione di vari strati alluvionali è stata riscontrata anche nella necropoli di Via San Pietro 309, scavata di recente (69).

Considerazioni

Su un argomento di questo tipo non è possibile trarre delle conclusioni, in quanto sarebbe necessario disporre di una campionatura molto più ampia dei pochi esempi presentati. È però possibile presentare delle considerazioni che in qualche modo possono sorreggere nella comprensione del periodo.

La fase climatica di riferimento è quella altomedievale fra il 400 ca. e l'800 ca. d.C., per la quale disponiamo di notizie tratte dalle fonti letterarie.

La principale è Paolo Diacono (*Hist. Langobardorum* III,23-24):

“... fuit aquae diluvium in finibus Veneciarum et Liguriaie seu ceteris regionibus Italiae, quale post Noe tempore creditur non fuisse. Factae sunt lavinae possessionum seu villarum hominum pariter et animantium magnus interitus. Destructa sunt itinera, dissipatae viae, tantum tuncque Atesis fluvius excrevit, ut circa

basilicam beati Zenonis martyris ... usque ad superiores fenestras aqua pertingeret ... Facta est autem haec inundatio sexto decimo kalendas Novembris"

Oltre a questa, ben nota e definita correntemente come "diluvio di Paolo Diacono" del 589 d.C., quando le piogge caddero per un anno intero, sussistono molte altre fonti letterarie (70), che ci danno notizie delle piogge abbondanti, dei tanti fulmini, delle inondazioni provocate dal Po, dall'Adige e dal Tevere, che in alcuni casi provocarono una variazione del corso dei fiumi.

In particolare per la costa del Veneto si ha notizia di un diluvio, nel 586 o 587, che cambia il volto della laguna, delle paludi adriatiche, dei letti e delle foci dei fiumi (71) e di un'ingressione marina, nel 764/804, a Venezia, che ricoprì tutte le isole (72).

Nel complesso dalle notizie date dalle fonti letterarie emerge un quadro desolante, per non dire apocalittico: ponti crollati, strade sommerse e dissestate dalle acque, campi inondata con conseguente carestia, grande moria di uomini e di animali. A tutto ciò si aggiungono poi numerosi terremoti menzionati dalle fonti.

L'esondazione ed il permanere delle acque hanno depositato degli strati di terreno alluvionale, che vengono in luce nel corso degli scavi.

La causa principale del dissesto idrogeologico va probabilmente ricercata, oltre che nell'abbondanza delle piogge, nel venir meno della manutenzione idraulica. In età romana il territorio extraurbano era in larga parte centuriato, in particolare nel Veneto e nella Cispadana (Emilia Romagna). Con la centuriazione i Romani avevano creato una rete capillare di canali, canalini e canalette per il drenaggio delle acque di superficie. Nel momento in cui, tra il Tardoantico e l'Altomedioevo, non si provvide più alla regolare manutenzione della rete di deflusso ed alla manutenzione degli argini, le acque esondate ristagnavano a lungo nelle aree su cui si erano depositate.

Con un potere centrale quasi inesistente, le municipalità locali prostrate, una popolazione demograficamente depauperata e fiaccata da guerre, da invasioni barbariche ed in preda alla carestia, non avevano più la forza per far fronte ai lavori di bonifica e di restauro necessari.

Un aspetto su cui generalmente non si appunta l'attenzione è quello delle frane che, di grandi o di piccole dimensioni, devono essersi verificate in molte aree montuose; purtroppo solo in pochi casi sono rilevabili e databili all'epoca, mentre nella maggior parte sarebbero necessarie delle analisi geologiche. Un esempio per tutti. L'attuale abitato di Cortina d'Ampezzo in provincia di Belluno sorge su una grande frana, datata al V-VI secolo d.C. (73).

Per tentare di comprendere la situazione è inoltre opportuno tener conto della fase storica in cui questi avvenimenti si articolano. Il periodo tra il IV e l'VIII secolo d.C. è particolarmente tribolato, con cambiamenti epocali. Per creare un quadro di sintesi si indicano per sommi capi gli eventi salienti. All'inizio del IV secolo d.C. Costantino trasferisce la capitale da Roma a Costantinopoli; Roma resta la capitale morale, ma perde il potere effettivo. Costantino inoltre favorì la libertà di culto per i Cristiani. Il IV secolo è un periodo particolarmente turbolento, funestato da lotte intestine e da numerose invasioni barbariche dei Visigoti, degli Alani, che poco dopo, nel 410, giunsero alla distruzione di Roma ad opera di Alarico.

Nel frattempo alcune città preminenti erano state assunte al rango di capitale come Milano, Treviri, Aquileia, Sirmio e Nicomedia.

Questo ciclo termina nel 395 quando Teodosio morendo divide l'Impero fra i due figli Arcadio ed Onorio, dando origine all'Impero romano d'Occidente con Onorio e all'Impero romano d'Oriente con Arcadio. Quello d'Occidente, con Roma, fu abbandonato a sé stesso ed in breve si disgregò colpito dai barbari e da movimenti separatistici in varie zone, che condussero alla creazione di stati indipendenti. Quello d'Oriente, pian piano trasformato nell'Impero Bizantino, sopravvisse per mille anni.

In Occidente fatti salienti sono nel 404 il trasferimento della Capitale da Milano a Ravenna, facilmente difendibile in quanto circondata dalle paludi, nel 476 la fine dell'Impero d'Occidente per la caduta dell'ultimo Imperatore Romolo Augustolo. Anche questo periodo è funestato da invasioni barbariche e da lotte di potere. Dalla fine del V secolo d.C. l'Italia conosce i primi re barbari, prima Odoacre poi Teodorico che scende nel 493 con i suoi Goti, stabilisce la capitale a Ravenna e muore nel 526; gli succede Atalarico.

Nel frattempo in Oriente nel 527 era salito al trono Giustiniano, che regnerà fino al 565, il cui regno è caratterizzato anche da un'intensa attività costruttiva come, tra l'altro, la chiesa di S. Sofia a Costantinopoli, ampie opere di consolidamento delle strutture difensive lungo il *Limes*, la Basilica di S. Vitale a Ravenna.

Mentre l'Oriente prospera durante il lungo e fecondo regno di Giustiniano, in Occidente vaste aree dell'Italia sono sconvolte dalla lunga e rovinosa Guerra Gotica (535-553), voluta da Giustiniano per riconquistare i territori italici occupati dai barbari e condotta dai suoi generali Belisario e Narsete, che vincono gli ultimi re goti Teodato e Vitige. La parte dell'Italia riconquistata divenne l'Esarcato bizantino con capitale a Ravenna. Dopo solo quindici anni dalla fine della Guerra Gotica, una nuova invasione calò sull'Italia. Nel 568 arrivarono i Longobardi che si impadronirono di vaste aree, specie in Friuli e in Lombardia e che si trovarono in contrasto con i Bizantini.

Considerando globalmente il quadro meteorologico ed il per quanto sintetico quadro storico sopra presentati, emerge una considerazione, che può anche apparire semplicistica e deterministica: un'indubbia

concomitanza cronologica fra le due situazioni. Su un'Italia prostrata e indebolita dalle lotte di potere, da guerre e invasioni barbariche si abbatte una disastrosa situazione meteorologica.

È forse assurdo ipotizzare una forma di interconnessione fra eventi politici e militari e condizioni meteorologiche, dopo la dissoluzione del potere di Roma?

Note

Introduzione

- (1) Fra i primi quadri di sintesi di questi aspetti: MANNONI – MOLINARI 1990.
- (2) Si veda, ad esempio: BARKER 1981; HARRIS 1983; BADONI - GIOVE 1984; CREMASCHI 1990; CARANDINI 1991.
- (3) Per un esempio recente di questi aspetti: FORTE (a c.) 2016.
- (4) PINNA 1969. Hanno fatto seguito: PINNA 1977; PINNA 1984; PINNA 1992; PINNA 1996 nonché altri autori fra cui VEGGIANI 1994 e FAZZINI 2003 e Convegni specifici come, ad esempio, ALBORE LIVADIE – ORTOLANI (a c.) 2003. L'attenzione per l'incidenza dei fattori climatici aveva avuto dei prodromi negli anni Sessanta: CARPENTER 1969; VITA FINZI 1969.
- (5) Fra le prime relazioni di scavo con attenzione a questi aspetti: HUYZENVALD – MAETZKE 1988.
- (6) In particolare nel Polesine dove territorio e paleoidrografia sono stati esaminati tramite fotografia aerea: PERETTO – BEDETTI 2013.
- (7) CUSCITO (a c.) 2013.
- (8) TRAINA 1986; TRAINA 1988.
- (9) HOMO 1976, pp. 205-206, 230 – 232.

Este

- (10) *Este* 1992, pp. 1-204 (autori vari.)
- (11) BAGGIO BERNARDONI 1987; BAGGIO BERNARDONI 1992.
- (12) BAGGIO BERNARDONI 1987, pp.220-221; BAGGIO BARNARDONI 1992, pp. 307-308 e fig.217.
- (13) TOSI 1992, pp. 380-384.
- (14) BOSIO 1992, pp. 175-177; BAGGIO BERNARDONI 1992, pp. 311-313.

Modena

- (15) MALNATI 1988, pp. 309-311.
- (16) MANFREDI 1988.
- (17) MALNATI 1988, p. 313.
- (18) MALNATI 1988, pp. 391-331.
- (19) MALNATI 1988, pp. 329-331.
- (20) MALNATI 1988, pp. 332-335.
- (21) PARRA 1988; GIORDANI 2002; SANTOCCHINI GERG 2009.
- (22) BOTTAZZI 1986.
- (23) CREMASCHI-GASPERI 1988; CREMASCHI-GASPERI 1989; FAZZINI 2003; FAZZINI-GASPERI 2003.
- (24) LABATE-MALNATI 1988.
- (25) BERGONZINI et alii 1988.
- (26) GELICHI 1988, p.561; *Mutina* 2011, pp. 97-98 n. 38.
- (27) GELICHI 1988, pp.555, 561, 565; *Mutina* 2011, pp. 99-100 n. 54.
- (28) LABATE-PELLEGRINI 2009; LABATE-PELLEGRINI 2011.
- (29) BARRECA-LABATE- MARCHI 2011.

Faenza

- (30) RIGHINI 1996; RIGHINI 1997. Per l'inquadramento dello scavo nel contesto urbanistico RIGHINI 2000.
- (31) RIGHINI 1996, pp. 28-37 e figg. 12-24.
- (32) RIGHINI 1996, pp. 20-28 e figg. 2-11.
- (33) Per la numerazione degli strati si rinvia allo schema stratigrafico in fig. 6. In questa sede viene presentata una descrizione sintetica dei singoli elementi stratigrafici.
- (34) Per i materiali RIGHINI 1997, pp. 285-302 e figg. 1-9.
- (35) RIGHINI 1997, pp. 285-286 e fig. 1.
- (36) RIGHINI 1997, pp. 293-294 e nota 26; fig.7.
- (37) RIGHINI 1997, p. 297 e fig.9.

Russi

- (38) MANSUELLI 1962; SCAGLIARINI 1968, pp. 50-51 n. 26; MONTEVECCHI (a c.) 2003, pp. 118-122 n. 32 (quadro generale e bibliografia); *Villa romana* 2006, part. pp. 35-36.
- (39) In vari casi strutture archeologiche ubicate a notevole profondità sono venute in luce entro cave di argilla utilizzate da fabbriche di laterizi. Si veda, ad esempio, il caso dello stanziamento neolitico di Lugo,

rinvenuto a 14 m di profondità e sovrastato da strati alluvionali molto consistenti: DEGASPERI – FERRARI – STEFFÈ 1996.

(40) VEGGIANI 1966, pp. 11 n. 3,12.

(41) VEGGIANI 1966, pp. 12-13; VEGGI-RONCUZZI 1971, pp. 148-149.

(42) VEGGIANI 1966, pp. 14-15; VEGGI-RONCUZZI 1971.

(43) GIORGETTI 1978.

(44) FABBRI 1978.

Concordia

(45) Per la storia di Concordia: SCARPA BONAZZA BUORA VERONESE 1978; CROCE DA VILLA 1987a; ZACCARIA 1995; TREVISANATO 1999; CRESCI MARRONE 2001a; DI FILIPPO BALESTRAZZI 2001. Per l'ambiente in rapporto alla *via Annia*: BONDESAN *et alii* 2010, p. 28; GHIOTTO 2010, pp. 51-53.

(46) FOZZATI-TONIOLO 2001.

(47) PAVAN 1987; CRESCI MARRONE 2001b.

(48) La fabbrica di *sagittae* è citata in *Notitia Dignitatum Occidentis* IX,24; SCARPA BONAZZA BUORA VERONESE 1978, pp. 72-75; MASCARIN 2006a, pp. 27-28

(49) Alcuni di essi sono citati nella *Notitia Dignitatum*, altri si desumono dalle iscrizioni sui sarcofagi di militari rinvenuti nel Sepolcreto dei Militi (*v.infra*). Per l'elenco dei reparti militari: SCARPA BONAZZA BUORA VERONESE 1978, pp. 59-72; PAVAN 1987, pp. 18-23.

(50) Per le iscrizioni dei sarcofagi cristiani: FORLATI TAMARO 1978, pp. 147-158; MAZZOLENI 1987.

(51) Tutto ciò è narrato da Cromazio nel Sermone XXVI; CUSCITO 1984; VECCHI 1987; CUSCITO 1987; MASCARIN 2006a, pp. 26-27.

(52) SCARPA BONAZZA BUORA VERONESE 1978, pp. 16-20; PAVAN 1987, pp. 9,13.

(53) Per un quadro generale: MASCARIN 2006b, pp. 33-44.

(54) SCARPA BONAZZA BUORA VERONESE 1978, pp. 75-78; MASCARIN 2006a, pp. 146-148; MASCARIN 2006b, pp.33-37; PETTENÒ – PAULETTO 2015.

(55) Per la figura e l'opera di Dario Bertolini: *Concordia* 1995, pp. 5-112 (contributi di vari autori).

(56) MASCARIN 2006b, pp. 37-38; PAULETTO-PETTENÒ 2016.

(57) LETTICH 1983.

(58) SCARPA BONAZZA BUORA VERONESE 1978, pp. 59-72; PAVAN 1987, pp. 14-24.

(59) FORLATI TAMARO 1978, pp. 145-157; ZOVATTO 1995, pp. 321-328; MAZZOLENI 1987.

(60) FORLATI TAMARO 1978, pp. 159-182; FOGOLARI 1978, pp. 183-207; MASCARIN 2006b, pp. 40-42.

(61) Per la descrizione architettonica della Basilica: MIRABELLA ROBERTI 1978. Per un quadro generale del complesso paleocristiano: CROCE DA VILLA 2001; MASCARIN 2006a, pp. 123-130.

(62) FOGOLARI 1978, pp. 204-205.

(63) DI FILIPPO BALESTRAZZI 1995. Per un quadro della città: CROCE DA VILLA 1987b. Per gli scavi recenti: CROCE DA VILLA-DI FILIPPO BALESTRAZZI (a c.) 2001, pp. 125-243 (autori vari). Per un quadro di sintesi degli scavi: MASCARIN 2006b, pp. 42-44.

(64) Numerosi eventi alluvionali eccezionali sono attestati da fonte letteraria fra gli ultimi anni del IV secolo d.C. ed il IX secolo d.C.: DORIGO 1983, pp. 197-202 e part. nota 49. Per il diluvio di Paolo Diacono: MASCARIN, 2006a, p. 31.

(65) VALLE-VERCESI 2001, pp.93-96; VALLE 2001, p. 262.

(66) MARCELLO-COMEL 1957-1962; MASCARIN 2006a, p. 129.

(67) Per gli scavi nel Piazzale: CROCE DA VILLA 1989.

(68) MASCARIN 2006a, p. 129.

(69) FONTANA 2015, pp. 27-28; VIGONI, 2015, p. 5

Considerazioni

(70) Ampio elenco in DORIGO 1983, vol.I, pp. 197-203, nota 49ss.

(71) *Ibid.*, p. 200.

(72) *Ibid.*, p. 201.

(73) PANIZZA *et alii* 1986

Bibliografia

Introduzione

ALBORE LIVADIE – ORTOLANI 2003 = C. ALBORE LIVADIE – F. ORTOLANI (a c.), *Variazioni climatico – ambientali e impatto sull'uomo nell'area circum – mediterranea durante l'Olocene*, Bari, 2003 (Centro Universitario Europeo per i Beni Culturali, Ravello).

BADONI – GIOVE 1984 = F. P. BADONI – M. R. GIOVE (a c.), *Norme per la redazione della scheda del saggio stratigrafico*, Roma 1984 (Ministero per i Beni Culturali e Ambientali, Istituto centrale per il Catalogo e la Documentazione).

BARKER 1981 = PH. BARKER, *Tecniche dello scavo archeologico*, Milano 1981 (originale inglese del 1977).

- CARANDINI 1991 = A. CARANDINI, *Storie dalla terra. Manuale di scavo archeologico*, Torino 1991.
- CARPENTER 1969 = R. CARPENTER, *Clima e storia. Una nuova interpretazione delle fratture storiche nella Grecia antica*, Torino 1969.
- CREMASCHI 1990 = M. CREMASCHI, *Geoarcheologia: Metodi e tecniche delle scienze della Terra nella ricerca archeologica*, in MANNONI – MOLINARI (a c.) 1990, pp. 395 - 422
- CUSCITO (a c.) 2013 = G. CUSCITO (a c.), *Le modificazioni del paesaggio nell'alto Adriatico tra pre-protostoria ed alto medioevo*, Trieste 2013 (Antichità Altoadriatiche LXXVI).
- FAZZINI 2003 = P. FAZZINI, *Le variazioni climatiche nel passato*, "Accademia delle Scienze di Modena. Memorie Scientifiche Giuridiche Letterarie" s. VIII, VI (2003), pp. 237 – 337.
- FORTE (a c.) 2016 = M. FORTE (a c.), *Regium Lepidi 2200. Archeologia e nuove tecnologie per la ricostruzione di Reggio Emilia in età romana*, Bologna 2016.
- HARRIS 1983 = E. C. HARRIS, *Principi di stratigrafia archeologica*, Roma 1983.
- HOMO 1976 = L. HOMO, *Roma imperiale e l'urbanesimo nell'antichità*, Milano 1976.
- HUYZENVELD – MAETZKE 1988 = A. ARNOLDUS HUYZENVELD – G. MAETZKE, *L'influenza dei processi naturali nella formazione delle stratificazioni archeologiche. L'esempio di uno scavo al Foro romano*, "Archeologia Medievale" XV (1988), pp. 125 – 175.
- MANNONI – MOLINARI 1990 = T. MANNONI – A. MOLINARI (a c.), *Scienze in Archeologia*, Firenze 1990 (Certosa di Pontignano 1988).
- PERETTO – BEDETTI 2013 = R. PERETTO – S. BEDETTI (a c.), *Trasparenze di paesaggi. Atlante aerofotografico del Polesine*, Rovigo 2013.
- PINNA 1969 = M. PINNA, *Le variazioni del clima in epoca storica e i loro effetti sulla vita e le attività umane*, "Bollettino Società Geografica Italiana" s.9, X (1969), pp. 198 – 275.
- PINNA 1977 = M. PINNA, *Climatologia*, Torino 1977.
- PINNA 1984 = M. PINNA, *La storia del clima. Variazioni climatiche e rapporto clima – uomo in età post – glaciale*, "Memorie Società Geografica Italiana" 36 (1984), pp. 1-264.
- PINNA (a c.) 1991 = M. PINNA (a c.), *Le variazioni recenti del clima (1800 -1990) e le prospettive per il XXI secolo*, Roma 1991.
- PINNA 1996 = M. PINNA, *Le variazioni del clima. Dall'ultima grande glaciazione alle prospettive per il XXI secolo*, Milano 1996.
- TRAINA 1986 = G. TRAINA, *Paesaggio e "decadenza". La palude nella trasformazione del mondo antico*, in A. GIARDINA (a c.), *Società romana e impero tardo antico. III. Le merci. Gli insediamenti*, Bari 1986, pp.711 - 730.
- TRAINA 1988 = G. TRAINA, *Paludi e bonifiche nel mondo antico*, Roma 1988.
- VEGGIANI 1994 = A. VEGGIANI, *I deterioramenti climatici dell'Età del Ferro e dell'altomedioevo*, "Torricelliana" 45 (1994), pp. 3 – 80.
- VITA FINZI 1969 = C. VITA FINZI, *The mediterranean valleys: geological changes in historical times*, Cambridge 1969.

Este

- BAGGIO BERNARDONI 1987 = E. BAGGIO BERNARDONI, *Este*, in *Veneto* 1987, vol. II, pp. 217-234.
- BAGGIO BERNARDONI 1992 = E. BAGGIO BERNARDONI, *Este romana. L'impianto urbano*, in *Este* 1992, pp. 307-319.
- BOSIO 1992 = L. BOSIO, *L'agro atestino in età preromana e romana*, in *Este* 1992, pp. 173-204.
- Este* 1992 = G. TOSI (a c.), *Este antica. Dalla preistoria all'età romana*, Este 1992.
- TOSI 1992 = G. TOSI, *Este romana. L'edilizia privata e pubblica*, in *Este* 1992, pp. 357-418.
- Veneto* 1987 = *Il Veneto nell'età romana*, Verona 1987; Vol. I: *Storiografia, organizzazione del territorio, economia e religione*, a c. di E. BUCHI; Vol. II: *Note di urbanistica e di archeologia del territorio*, a c. di G. CAVALIERI MANASSE.

Modena

- ALBORE LIVADIE – ORTOLANI (a c.) 2003 = C. ALBORE LIVADIE – F. ORTOLANI (a c.), *Variazioni climatico – ambientali e impatto sull'uomo nell'area circum – mediterranea durante l'Olocene*, Bari 2003 (Centro Universitario Europeo per i Beni Culturali di Ravello).
- BARRECA – LABATE – MARCHI 2011 = D. BARRECA – D. LABATE – S. MARCHI, *Rotatoria via Emilia Est, Tangenziale Pasternak*, in *Mutina* 2011, pp. 79-81.
- BERGONZINI *et alii* 1988 = D. BERGONZINI *et alii*, *La successione stratigrafica rilevata nei recenti sondaggi presso l'abside centrale del Duomo*, in *Modena* 1988, vol. I, pp. 463-465.
- BOTTAZZI 1986 = G. BOTTAZZI, *L'alluvionamento di Modena romana. Relazioni tra corsi d'acqua, viabilità ed impianto urbano*, "Atti Mem. Deputazione di Storia patria di Modena" s.XI, VIII (1986), pp. 57-80.
- CREMASCHI – GASPERI 1988 = M. CREMASCHI – G. GASPERI, *Il sottosuolo della città di Modena. Caratteri sedimentologici, geopedologici, stratigrafici e significato paleo ambientale*, in *Modena* 1988, vol. I, pp. 285-303.

- CREMASCHI – GASPERI 1989 = M. CREMASCHI – G. GASPERI, *L'“alluvione” altomedievale di Modena (Modena) in rapporto alle variazioni ambientali oloceniche*. Memorie Soc. Geologica Italiana” XLII (1989), pp. 179-190.
- FAZZINI 2003 = P. FAZZINI, *Le variazioni climatiche nel passato*, “Accademia delle Scienze di Modena. Memorie Scientifiche Giuridiche Letterarie” s.VIII, VI (2003), pp. 237-337.
- FAZZINI – GASPERI 2003 = P. FAZZINI – G. GASPERI, *Il sottosuolo della città di Modena*, in ALBORE LIVADIE – ORTOLANI (a c.) 2003, pp. 341-347.
- GELICHI 1988 = S. GELICHI, *Modena e il suo territorio nell'Alto Medioevo*, in Modena 1988, vol. I, pp. 551 – 576.
- GIORDANI 2002 = N. GIORDANI, *Le necropoli di Modena*, in *Lapidario Romano dei Musei Civici di Modena*, Modena 2002, pp. 15-23.
- GIORDANI – GONZALES MURO 2011 = N. GIORDANI – X. GONZALES MURO, *Via Emilia Est, località Fossalta*, in *Mutina* 2011, pp. 83-86.
- LABATE – MALNATI 1988 = D. LABATE – L. MALNATI, *Il sondaggio stratigrafico nella sede centrale della Cassa di Risparmio di Modena (1985-1986)*, in Modena 1988, vol. I pp. 423-426.
- LABATE – PELLEGRINI 2009 = D. LABATE – S. PELLEGRINI, *4. Modena piazza Roma, Stratificazioni dall'età romana all'età moderna*, “Atti Memorie Deputazione di Storia patria di Modena” s.XI, XXXI (2009), pp. 301-303.
- LABATE – PELLEGRINI 2011 = D. LABATE – S. PELLEGRINI, *Le mura della città. Lo scavo di piazza Roma*, in *Mutina* 2011, pp. 55-57.
- MALNATI 1988 = L. MALNATI, *La città romana: Modena*, in Modena 1988, vol. I pp. 307-337.
- MANFREDI 1988 = V. MANFREDI, *La guerra di Modena (43 a.C.)*, in Modena 1988, vol. I, pp. 338-342.
- Modena 1988 = *Modena dalle origini all'anno Mille. Studi di archeologia e storia*, Modena 1988, 2 voll.
- Mutina* 2011 = *Mutina oltre le mura. Recenti scoperte archeologiche sulla via Emilia*, Modena 2011.
- PARRA 1988 = M. C. PARRA, *Le necropoli romane di Modena. Inquadramento topografico e cronologico*, in Modena 1988, vol. I pp. 366-376.
- PULINI 2011 = I. PULINI, *Ottocento anni di archeologia sulla via Emilia*, in *Mutina* 2011, pp. 17-23.
- SANTOCCHINI GERG 2009 = S. SANTOCCHINI GERG, *Ultimi dati dalla necropoli orientale di Modena: i monumenti iscritti*, in *Opinione pubblica e forme di comunicazione a Roma: il linguaggio dell'Epigrafia*, Atti Colloquio AIEGL – Borghesi 2007, a c. di M. G. ANGELI BERTINELLI e A. DONATI, Faenza 2009, pp. 360-375 (Collana “Epigrafia e Antichità” 27).

Faenza

- RIGHINI 1996 = V. RIGHINI, *Faenza. Scavo di Via S. Agostino Via Varani, 1984. Stratigrafie e strutture*, “Atti Memorie Deputazione di Storia patria Province di Romagna” n.s. XLVII (1996), pp. 19-56.
- RIGHINI 1997 = V. RIGHINI, *Faenza. Scavo di Via S. Agostino Via Varani, 1984. Lettura ed interpretazione dello scavo*, “Atti Memorie Deputazione di Storia patria Province di Romagna” n. s. XLVIII (1997), pp. 283-322.
- RIGHINI 2000 = V. RIGHINI, *Il Paleobondiollo. Riflessioni sull'area sud-orientale della Faventia romana*, in *Studi e ricerche per Bice Montuschi* (Atti Giornata di Studi, Faenza 10 aprile 1999), Faenza 2000 (Italia Nostra, Sezione di Faenza), pp. 15-56.

Russi

- DEGASPERI – FERRARI – STEFFÈ 1996 = N. DEGASPERI – A. FERRARI – G. STEFFÈ, *L'insediamento neolitico di Fornace Gattelli a Lugo di Romagna*, Ravenna 1996.
- FABBRI 1978 = P. FABBRI, *Trasformazioni idrografiche medievali nell'agro russo*, “Studi Romagnoli” XXIX (1978), pp. 95-109.
- GIORGETTI 1978 = D. GIORGETTI, *Alla ricerca dell'orizzonte romano nel territorio di Russi. Ricognizione topografica tra Lamone e Montone*, “Studi Romagnoli” XXIX (1978), pp. 43-58,
- MANSUELLI 1962 = G. A. MANSUELLI, *La villa romana di Russi*, Faenza 1962,
- MONTEVECCHI (a c.) 2003 = G. MONTEVECCHI (a c.), *Viaggio nei siti archeologici della provincia di Ravenna*, Ravenna 2003,
- SCAGLIARINI 1968 = D. SCAGLIARINI, *Ravenna e le ville romane in Romagna*, Ravenna 1968,
- VEGGIANI 1966 = A. VEGGIANI, *Geologia del sottosuolo e suoi riflessi sulla morfologia del territorio di Russi in epoca romana*, “Studi Romagnoli” XVII (1966), pp. 3-16,
- VEGGI - RONCUZZI 1971 = L. VEGGI – A. RONCUZZI, *Considerazioni sulla topografia del territorio di Russi in epoca romana*, in *La Villa romana* (Giornata di Studi, Russi 1970), Faenza 1971, pp. 143-150,
- Villa romana* 2066 = *La villa romana di Russi. Vecchie e nuove scoperte*, Russi 2006,

Concordia

- BONDESAN *et alii* 2010 = A. BONDESAN *et alii*, *La geomorfologia del territorio dell'Annia*, in ROSADA – FRASSINE – GHIOTTO 2010, pp. 25-36,
- CRESCI MARRONE 2001a = G. CRESCI MARRONE, *Nascita e sviluppo di Concordia Colonia Civium romanorum*, in CROCE DA VILLA - DI FILIPPO BALESTRAZZI (a c.) 2001, pp. 119-124,

- CRESCHI MARRONE 2001b = G. CRESCHI MARRONE, *Lo stanziamento militare, la fabbrica di frecce e la comunità di commercianti orientali nella Concordia tardo-antica*, in CROCE DA VILLA - DI FILIPPO BALESTRAZZI (a c.) 2001, pp. 245-249,
- CROCE DA VILLA 1987a = P. CROCE DA VILLA, *Iulia Concordia colonia romana: archeologia e letteratura*, in *Il Museo Civico di Concordia Sagittaria*, Musile di Piave 1987, pp. 9-16,
- CROCE DA VILLA 1987b = P. CROCE DA VILLA, *Concordia*, in *Veneto* 1987, vol. II, pp. 391-423,
- CROCE DA VILLA 1989 = P. CROCE DA VILLA, *Lo scavo del Piazzale*, in *La città nella città. Un intervento di archeologia urbana in Concordia Sagittaria*, Catalogo Mostra (Concordia 1989), Este 1989, pp. 9-34,
- CROCE DA VILLA 2001 = P. CROCE DA VILLA, *Il complesso paleocristiano di Piazza Cardinal Costantini*, in CROCE DA VILLA - DI FILIPPO BALESTRAZZI (a c.) 2001, pp. 253-261,
- CROCE DA VILLA - DI FILIPPO BALESTRAZZI (a c.) 2001 = P. CROCE DA VILLA - E. DI FILIPPO BALESTRAZZI (a c.), *Concordia Sagittaria. Tremila anni di storia*, Padova 2001,
- CROCE DA VILLA - MASTROCINQUE (a c.) 1995 = P. CROCE DA VILLA - A. MASTROCINQUE (a c.), *Concordia e la X Regio. Giornata di studio in onore di Dario Bertolini nel centenario della morte*, Atti Convegno (Portogruaro 22-23 ottobre 1994), Padova 1995.
- CUSCITO 1984 = G. CUSCITO, *Cromazio di Aquileia e la chiesa di Concordia*, in *Studi su Portogruaro e Concordia*, Udine 1984 (Antichità Altoadriatiche XXV), pp. 69-88
- CUSCITO 1987 = G. CUSCITO, *Rapporti tra Concordia e Aquileia in epoca tardo antica*, in *Rufino* 1987, vol. II, pp. 157-169.
- DI FILIPPO BALESTRAZZI 1995 = E. DI FILIPPO BALESTRAZZI, *Gli scavi di Concordia. Lo stato della ricerca*, in CROCE DA VILLA - MASTROCINQUE (a c.) 1995, pp. 157-174.
- DI FILIPPO BALESTRAZZI 2001 = E. DI FILIPPO BALESTRAZZI, *La romanizzazione*, in CROCE DA VILLA - DI FILIPPO BALESTRAZZI (a c.) 2001, pp. 111-117.
- DORIGO 1983 = W. DORIGO, *Venezia Origini*, Milano 1983.
- FONTANA 2015 = A. FONTANA, *Il contesto paleoambientale*, in RINALDI - VIGONI (a c.) 2015, pp. 21-29.
- FORLATI TAMARO - FOGOLARI 1978 = B. FORLATI TAMARO - G. DEI FOGOLARI, *Concordia paleocristiana*, in *Iulia Concordia* 1978, pp. 143-182 (Forlati) e pp. 183-207 (Fogolari).
- FOZZATI - TONIOLO 2001 = L. FOZZATI - A. TONIOLO, *Caorle*, in CROCE DA VILLA - DI FILIPPO BALESTRAZZI (a c.) 2001, pp. 83-88.
- GALLIAZZO 2002 = V. GALLIAZZO, *Adria. Civiltà dell'alto Adriatico dall'Impero romano al dominio veneziano*, Verona 2002.
- GHIOTTO 2010 = A. R. GHIOTTO, *Di là dal fiume e tra gli antichi pagi. Dal Tagliamento al Livenza*, in ROSADA - FRASSINE - GHIOTTO 2010, pp. 49-59.
- Iulia Concordia 1978 = B. SCARPA BONAZZI - B. FORLATI TAMARO - G. DEI FOGOLARI - L. COLETTI - R. CESSI - G. ZILLE, *Iulia Concordia dall'età romana all'età moderna*, Treviso 1978.
- LETTICH 1983 = G. LETTICH, *Le iscrizioni sepolcrali tardoantiche in Concordia*, Trieste 1983.
- MARCELLO - COMEL 1957-1962 = A. MARCELLO - A. COMEL, *L'alluvione che seppellì Iulia Concordia*, "Memorie di Biogeografia Adriatica 5 (1957-1962)", pp. 139-154
- MASCARIN 2006a = F. MASCARIN, *Concordia tra Tardoantico e Alto Medioevo*, Gruaro 2006 (Fondazione A. Colluto, Collana "L'album" 12.1).
- MASCARIN 2006b = F. MASCARIN, *Linee per una storia degli studi di Concordia e Bibliografia concordiese*, Gruaro 2006 (Fondazione A. Colluto, Collana "L'album" 12.2).
- MAZZOLENI 1987 = D. MAZZOLENI, *L'epigrafia cristiana a Concordia*, in *Rufino* 1987, vol. II, pp. 75-91.
- MIRABELLA ROBERTI 1987 = M. MIRABELLA ROBERTI, *La Basilica paleocristiana di Concordia*, in *Rufino* 1987, vol. II, pp. 93-106.
- PAVAN 1987 = M. PAVAN, *Concordia tra IV e V secolo*, in *Rufino* 1987, vol. II, pp. 7-28.
- PETTENÒ - PAULETTO 2015 = E. PETTENÒ - R. PAULETTO, *Scavare nei musei. Appunti, note e osservazioni circa le planimetrie del "Sepolcreto delle Milizie"*, "Quaderni Friulani di Archeologia" XXV (2015), pp. 79-94 (Atti Convegno "Scavare nei Musei. Elementi di novità e questioni di metodo", Aquileia 7 giugno 2013).
- PAULETTO - PETTENÒ 2016 = R. PAULETTO - E. PETTENÒ, *Il Museo Nazionale Concordiese di Portogruaro. Antologia di una storia per immagini*, "Quaderni Friulani di Archeologia" XXVI (2016), pp. 57-76 (Atti Convegno "Archeologia e documentazione fotografica d'archivio", Aquileia 2016).
- RINALDI - VIGONI (a c.) 2015 = F. RINALDI - A. VIGONI (a c.), *Le necropoli della media e tarda età imperiale (III-IV secolo d.C.) a Iulia Concordia e nell'arco alto adriatico. Organizzazione spaziale, aspetti monumentali e strutture sociali*, Atti Convegno (Concordia Sagittaria 5-6 giugno 2014), Rubano 2015 (Fondazione A. Colluto, Collana "L'album" 20).
- ROSADA - FRASSINE - GHIOTTO 2010 = G. ROSADA - M. FRASSINE - A. R. GHIOTTO (a c.), *...viam Anniam influentibus palustribus aquis eververatam...*, Treviso 2010 *Rufino* 1987 = *Rufino di Concordia e il suo tempo*, Udine 1987, 2 voll.
- SCARPA BONAZZA BUORA VERONESE 1978 = B. SCARPA BONAZZA BUORA VERONESE, *L'epoca preromana. La città romana. Scavi e monumenti. L'agro di Concordia*, in *Iulia Concordia* 1978, pp. 3-139.

- VALLE 2001 = G. VALLE, *Primi risultati degli scavi 1999 nell'area antistante la Cattedrale di S. Stefano*, in CROCE DA VILLA - DI FILIPPO BALESTRAZZI (a c.) 2001, pp. 262-264.
- VALLE - VERCESI 2001 = G. VALLE - P.L. VERCESI, *Concordia Sagittaria: Geomorfologia del sito antico*, in CROCE DA VILLA - DI FILIPPO BALESTRAZZI (a c.) 2001, pp. 91-96.
- VECCHI 1987 = A. VECCHI, *Il sermone XXVI di Cromazio*, in *Rufino 1987*, vol. II, pp. 135-155.
- Veneto 1987 = Il Veneto nell'età romana*, Verona 1987, vol. I *Storiografia, organizzazione del territorio, economia e religione*, a c. di E. BUCHI; vol. II *Note di urbanistica e di archeologia del territorio*, a c. di G. CAVALIERI MANASSE.
- VIGONI 2015 = A. VIGONI, *Il deposito stratigrafico*, in RINALDI - VIGONI (a c.) 2015, pp. 33-52.
- ZACCARIA 1995 = C. ZACCARIA, *Alle origini della storia di Concordia romana*, in CROCE DA VILLA - MASTROCINQUE (a c.) 1995, pp. 175-186.
- ZOVATTO 1995 = P. ZOVATTO, *Intorno alle origini del Cristianesimo a Concordia*, in CROCE DA VILLA - MASTROCINQUE (a c.) 1995, pp. 321-328.

Considerazioni

PANIZZA *et alii* 1986 = M. PANIZZA – R. ZARDINI – M. SPAMPANI, *La grande frana su cui è sorta Cortina d'Ampezzo. Nel V-VI secolo d.C. formò il basamento geomorfologico del paese*, S. Vito di Cadore 1986.

Cause Astronomiche dei Cambiamenti Climatici

Nicola Scafetta

Osservatorio meteorologico, Dipartimento di Scienze della Terra, Ambiente e Georisorse,
Università di Napoli Federico II, Largo S. Marcellino, 10 - 80138 Napoli, Italia
Email: nicola.scafetta@unina.it

Sommario

Dal 1850 la temperatura della superficie globale del pianeta è aumentata di circa 0.9°C. I modelli climatici tipicamente adottati dalle agenzie governative come l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) delle Nazioni Unite hanno previsto che il pianeta potrebbe riscaldarsi di altri 4-5 °C tra il 2000 e il 2100 se le emissioni di gas serra, come ad esempio l'anidride carbonica (CO₂), continuano ad essere sostenute. Tuttavia, questi modelli climatici non riescono a ricostruire correttamente la variabilità naturale del clima che è caratterizzata da diverse oscillazioni con periodi di circa 9.1, 10.4, 20, 60, 115, 1000 anni e altri. Simili oscillazioni sono trovate tra le risonanze stabili del sistema solare, un fatto che suggerisce un'origine astronomica delle suddette oscillazioni climatiche. Considerando queste oscillazioni naturali si può dimostrare che i modelli climatici dell'IPCC hanno raddoppiato il valore del riscaldamento antropico. Qui mostro alcuni esempi in cui i modelli climatici tipicamente usati per sostenere la teoria del riscaldamento antropico falliscono nel riprodurre le osservazioni. Alternativamente, il modello che tiene conto delle suddette oscillazioni naturali, che ho proposto sin dal 2010, ha predetto correttamente il modesto riscaldamento osservato fino al 2017 e predice che il riscaldamento globale sarà modesto fino al 2040 e sarà inferiore ai 2°C per il 2100. Questo risultato suggerisce che le politiche di adattamento, che sono meno costose di quelle finalizzate alla mitigazione, potrebbero essere sufficienti per affrontare le conseguenze negative indotte dal cambiamento climatico durante il XXI secolo.

Introduzione

Sin dal 1850 la temperatura della superficie globale della Terra si è riscaldata di circa 0.9°C e dal 1970 di circa 0.5°C: si veda la Figura 1. Questo riscaldamento è stato simultaneo ad un aumento della concentrazione atmosferica di alcuni gas serra (GHG), in particolare l'anidride carbonica (CO₂), dovuto principalmente alla combustione di combustibili fossili. I modelli usati per interpretare il clima - per esempio quelli del Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5 GSMS) [1], hanno predetto che le emissioni antropiche sono state responsabili per oltre il 90% del riscaldamento globale osservato sin dal 1900 e per il 100% di quello osservato dal 1970.

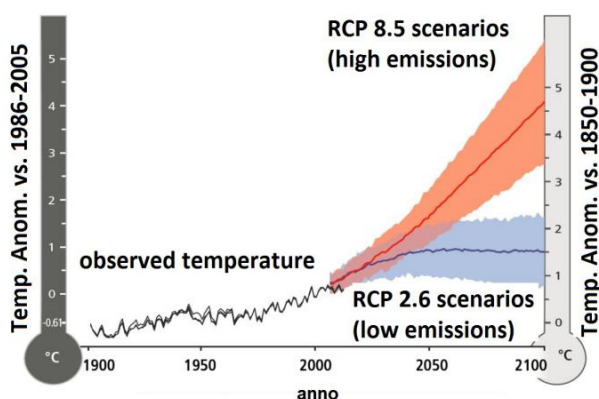


Fig. 1 - Andamento della temperatura superficiale globale (curva nera) e due alternative proiezioni (curve arancione e blue) per il XXI secolo [1].

Questa interpretazione è conosciuta come la teoria del riscaldamento globale antropogenico (AGWT) che sin dal 2001 è stata sostenuta principalmente dal Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) delle Nazioni Unite [1]. Questa organizzazione è l'organo principale per la valutazione dei cambiamenti climatici istituito dal Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP) e l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM).

Gli stessi modelli climatici sono stati utilizzati anche per ottenere delle proiezioni per il riscaldamento globale per il XXI secolo ed hanno concluso che il nostro pianeta potrebbe riscaldarsi di 4-5 °C tra il 2000 e il 2100: si veda la Figura 1. Un tale riscaldamento potrebbe essere allarmante a causa dell'innalzamento del livello del mare e di una significativa riduzione di acqua potabile in alcune regioni [2]. Queste stesse

proiezioni climatiche sono correntemente utilizzate per giustificare la necessità di attuare costose politiche di mitigazione con lo scopo di ridurre drasticamente le emissioni di GHG di origine antropica.

Tuttavia, la ricerca scientifica ha fatto anche notare che tali modelli climatici non riescono a ricostruire correttamente la variabilità naturale del clima e sovrastimano in modo significativo gli effetti climatici delle emissioni antropiche [3].

In questa breve recensione riassumo alcuni dei motivi principali per cui l'AGWT dovrebbe essere rigettata. Inoltre, mostrerò l'esistenza di un'interpretazione alternativa dei cambiamenti climatici basata sul fatto che il riscaldamento osservato sin dal 1850 sia in parte dovuto a specifiche oscillazioni naturali. Una modellazione climatica basata su tale interpretazione è dimostrata meglio riprodurre il quadro completo desunto dai dati climatici [4].

2. Il problema della sensibilità climatica ai forzanti radiativi.

La modellazione del clima si basa su un complesso sistema di equazioni descrittive della circolazione dell'atmosfera e dell'oceano sotto l'influenza di un insieme di forzanti radiativi [1]. Un cambiamento nel tempo dei forzanti climatici causano un cambiamento climatico.

I forzanti tipici sono quelli dedotti dai cambiamenti delle concentrazioni di gas serra in atmosfera come il CO₂, CH₄, ecc., di aerosol antropico e vulcanico, di irraggiamento solare e altri. Figura 2 riassume queste funzioni. Con l'eccezione delle forzanti solari e vulcaniche, tutti gli altri forzanti hanno una origine antropica. Si noti che il vapore acqueo (H₂O) è il più importante dei gas serra, ma non è incluso tra i forzanti in quanto la sua concentrazione atmosferica è calcolata dalle equazioni termodinamiche dei modelli.

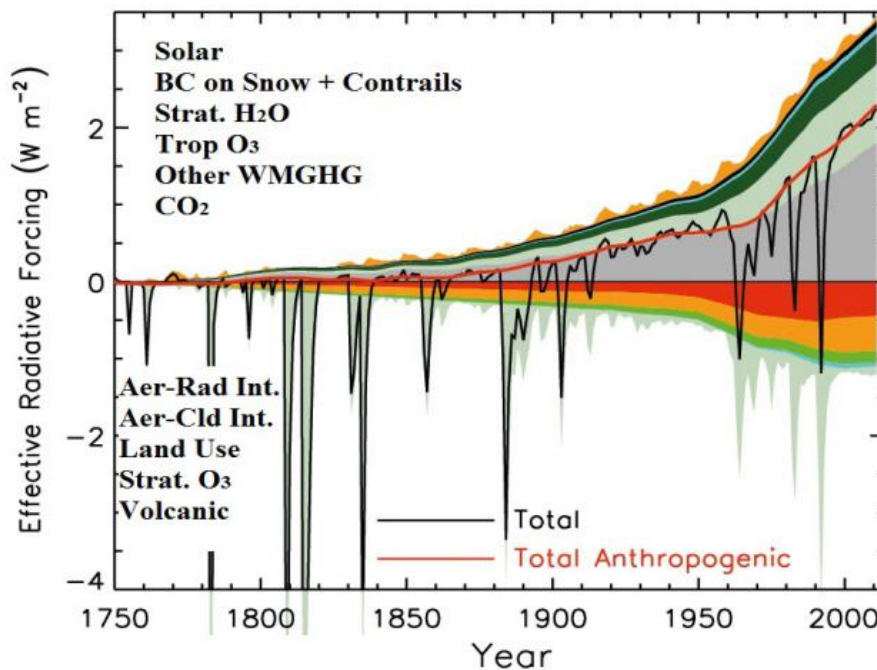


Fig. 2 - Tipiche funzioni di forzanti radiativi usati nei GCM dell'IPCC [1].

Il parametro climatico più importante è la sensibilità climatica al forzante radiativo. I modelli climatici come i GCM CMIP5 stimano che se la concentrazione della CO₂ atmosferica raddoppia, la superficie del pianeta si dovrebbe riscaldare di circa il 3°C a causa dell'aumento dell'irraggiamento dei gas serra. Tuttavia, questa stima è estremamente incerta a causa della scarsa capacità dei modelli nel modellare il vapore acqueo e il sistema nuvoloso. La figura 3 confronta un certo numero di queste stime della sensibilità climatica dove la grande incertezza è messa in evidenza dalla larghezza delle frecce.

Secondo la figura 3 la vera sensibilità climatica ai forzanti radiativi potrebbe essere anche circa la metà, circa 1.5 °C di quella calcolata dai GCM dell'IPCC. Evidentemente, in tal caso l'affidabilità di tali modelli dovrebbe essere messa in discussione e, di conseguenza, le politiche economiche proposte per affrontare il problema del cambiamento climatico per il XXI secolo dovrebbero essere riviste. Infatti, alcuni forzanti climatici potrebbero essere ancora ignoti, oppure le equazioni utilizzate per modellare il clima potrebbero essere ancora troppo semplicistiche.

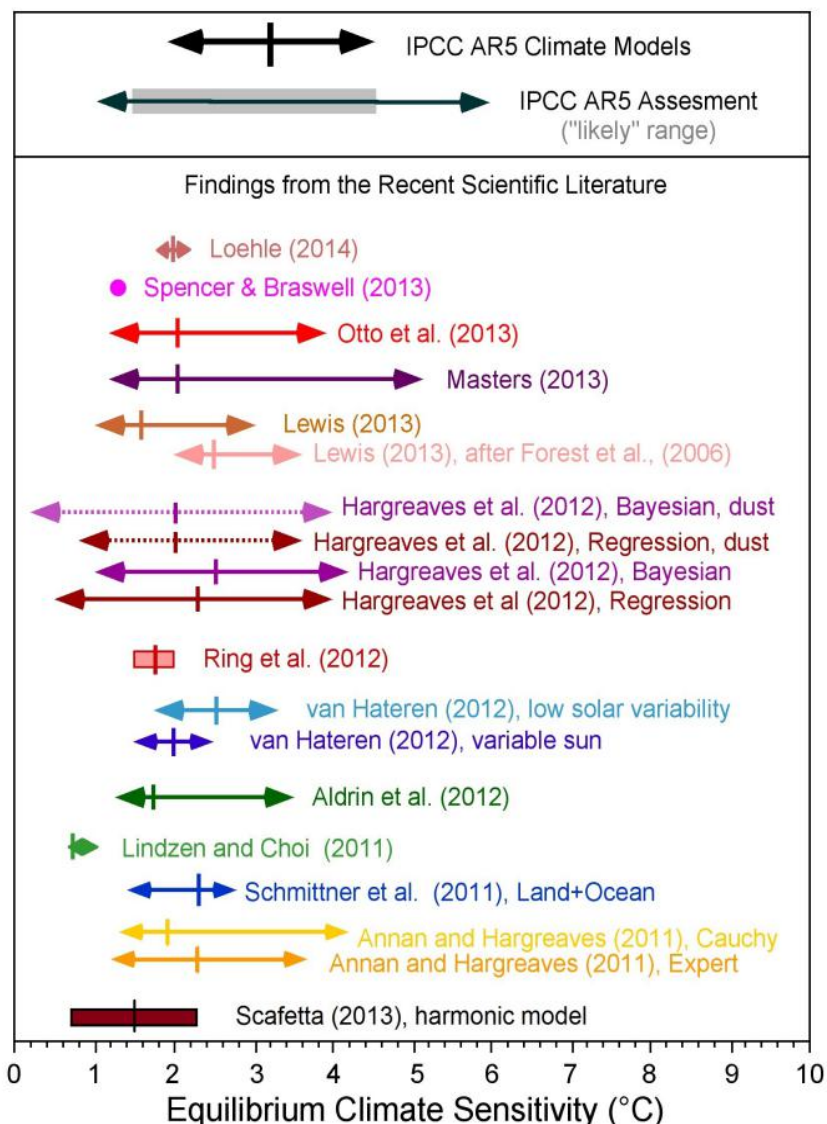


Fig. 3 - Confronto tra diverse stime della sensibilità climatica al forzante radiativo [1,2,4,5].

3. Confronto tra i modelli climatici e i dati

Ci sono diverse evidenze empiriche che suggeriscono che i GCM utilizzati per sostenere la AGWT non riproducono le osservazioni climatiche. Discutiamo alcuni casi.

Durante gli ultimi 100,000 anni, la variazione della temperatura globale ha preceduto la variazione di CO₂ [6,7]. Durante l'Olocene, la temperatura globale è anche diminuita di circa 1°C una volta raggiunto quello che è conosciuto come il Massimo dell'Olocene circa 8000 anni fa. Tuttavia, la concentrazione atmosferica di CO₂ è aumentata durante lo stesso periodo e i modelli climatici hanno previsto un riscaldamento di circa 1°C contraddicendo le osservazioni misurata durante lo stesso periodo [8]: si veda le Figure 4 e 5.

Figura 5 evidenzia anche che il record di temperatura dell'Olocene è caratterizzato da una grande oscillazione quasi millenaria che non è riprodotta dal record di CO₂ e dai modelli climatici. Questa grande oscillazione è stata responsabile per i periodi caldi osservati durante i primi secoli dell'impero romano (circa 2000 anni fa), durante il medioevo (circa 100 anni fa) ed anche durante il periodo attuale. Lo stesso ciclo è consistente con i periodi freddi che hanno caratterizzato i secoli bui dei secoli V-IX e la piccola era glaciale dei secoli XV-XIX [4]. Questa grande oscillazione climatica millenaria è osservata in indici usati per studiare la variabilità solare [10,11,12,13]: si veda la Figura 6.

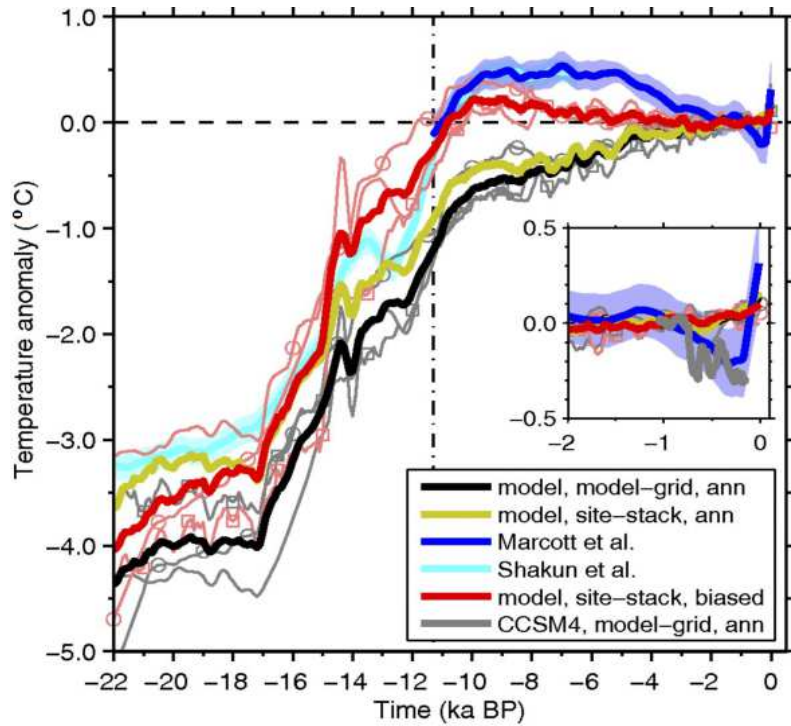


Fig. 4 - Confronto tra le temperature dell'Olocene (curve rosse e blue) e le previsioni climatiche dei modelli (curve verdi, nere e grigie) [8].

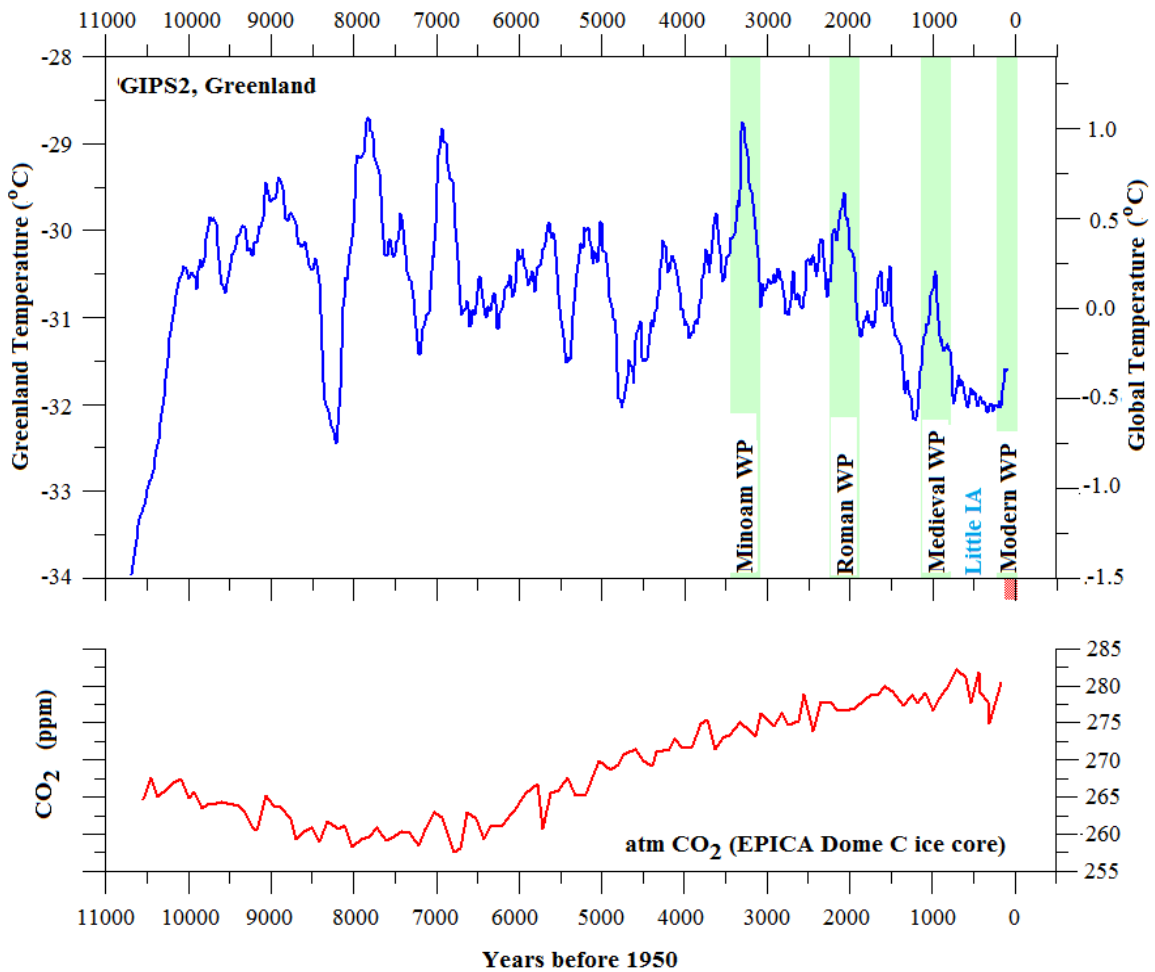


Figura 5. Confronto tra la temperatura dell'Olocene dedotta da un record della Groenlandia (GIPS2) [9] e il record di CO₂ [8].

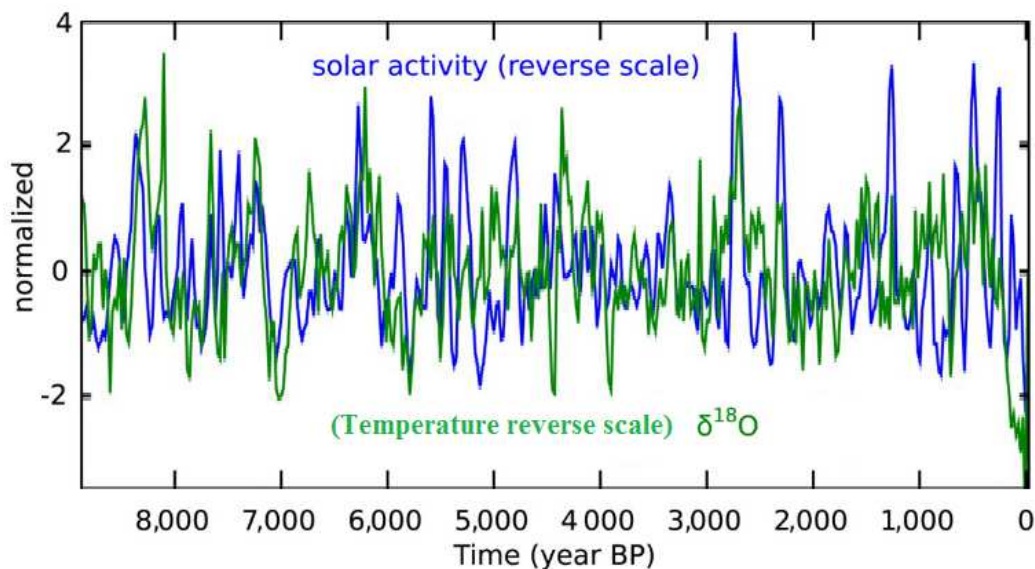


Fig. 6 - Confronto tra l'attività solare (curva blue) e una serie climatica cinese (curva verde) [12].

É' importante ricordare che sin dal 2000, i modelli climatici sono stati ritenuti sufficientemente corretti perché in grado di simulare alcune ricostruzioni della temperatura globale che suggerivano che questa fosse rimasta approssimativamente costante dal 1000 al 1900 per poi crescere bruscamente sin dal 1900 [14]. Queste ricostruzioni climatiche sono conosciute come le temperature a "bastone di hockey" (*Hockey Stick*) [15]: vedere il pannello superiore della figura 7. Tuttavia, sin dal 2005 ricostruzioni climatiche alternative per gli ultimi 2000 anni sono state proposte [16,17,18]: vedere i pannelli A e B della figura 7. Queste hanno confermato che il clima è stato caratterizzato da una grande oscillazione millenaria con una variabilità climatica 3 - 4 volte maggiore di quella indicata nelle ricostruzioni di temperatura a bastone di hockey. Così è risultato evidente che il riscaldamento osservato sin dal 1900 è in realtà incominciato nel XVIII secolo, cioè dalla fine della piccola era glaciale. Questo è stato ben prima che le emissioni di gas serra di origine antropica potessero influenzarlo. Quindi, anche il riscaldamento osservato sin dal 1900 potrebbe in parte essere dovuto al ciclo millenario che dovrebbe raggiungere un massimo nel XXI secolo.

La grande variabilità climatica rilevata dalle ricostruzioni climatiche recenti può essere interpretata correttamente solo se gli effetti della variabilità solare sul clima sono stati gravemente sottovalutati dai modelli climatici per un fattore da 3 a 6 e, contemporaneamente, l'effetto climatico del forzante radiativo, che comprende la CO₂, è stato sovrastimato per un fattore 2 [4].

I modelli climatici prevedono anche un hot-spot, cioè un significativo riscaldamento della troposfera a 10 km sopra i tropici e l'equatore. Tuttavia, questo non è mai stato osservato [20,21]. Figura 8 confronta l'andamento della temperatura osservata nella troposfera contro le previsioni dei modelli [21]. La differenza tra i due record è evidente. Anche questo risultato suggerisce che la sensibilità climatica alla CO₂ è sovrastimata dai modelli.

Scafetta e Mazzarella [22] hanno studiato i ghiacci marini dell'Artico e dell'Antartico sin dal 1980 e hanno dimostrato che, mentre l'Artico si è riscaldando circa come previsto dai modelli climatici, l'Antartico si è raffreddamento. La tendenza al raffreddamento osservata intorno all'Antartide contraddice in modo significativo il riscaldamento previsto dai modelli durante lo stesso periodo e nella stessa regione.

Un'attenta analisi dei record mondiali di temperatura superficiale, che è disponibile dal 1850 [23], ha stabilito che essi sono caratterizzati da un trend secolare di riscaldamento sovrapposto ad una serie di oscillazioni con periodi di circa 9.1, 10.4, 20, e 60 anni [4, 24]: vedi Figura 10. L'analisi dettagliata di queste oscillazioni ha concluso che nessuno dei CMIP5 GCM è in grado di modellarle [4,25]. Queste oscillazioni prevedono un andamento della temperatura globale quasi costante dal 2000 al 2030. Questo risultato deriva dall'oscillazione naturale di 60 anni che dopo il 2000 è stata nella sua fase di raffreddamento il che ha compensato il riscaldamento antropico durante lo stesso periodo. Al contrario, i modelli hanno in media previsto una tendenza al riscaldamento di 2°C/secolo, durante lo stesso periodo: vedi figura 9.

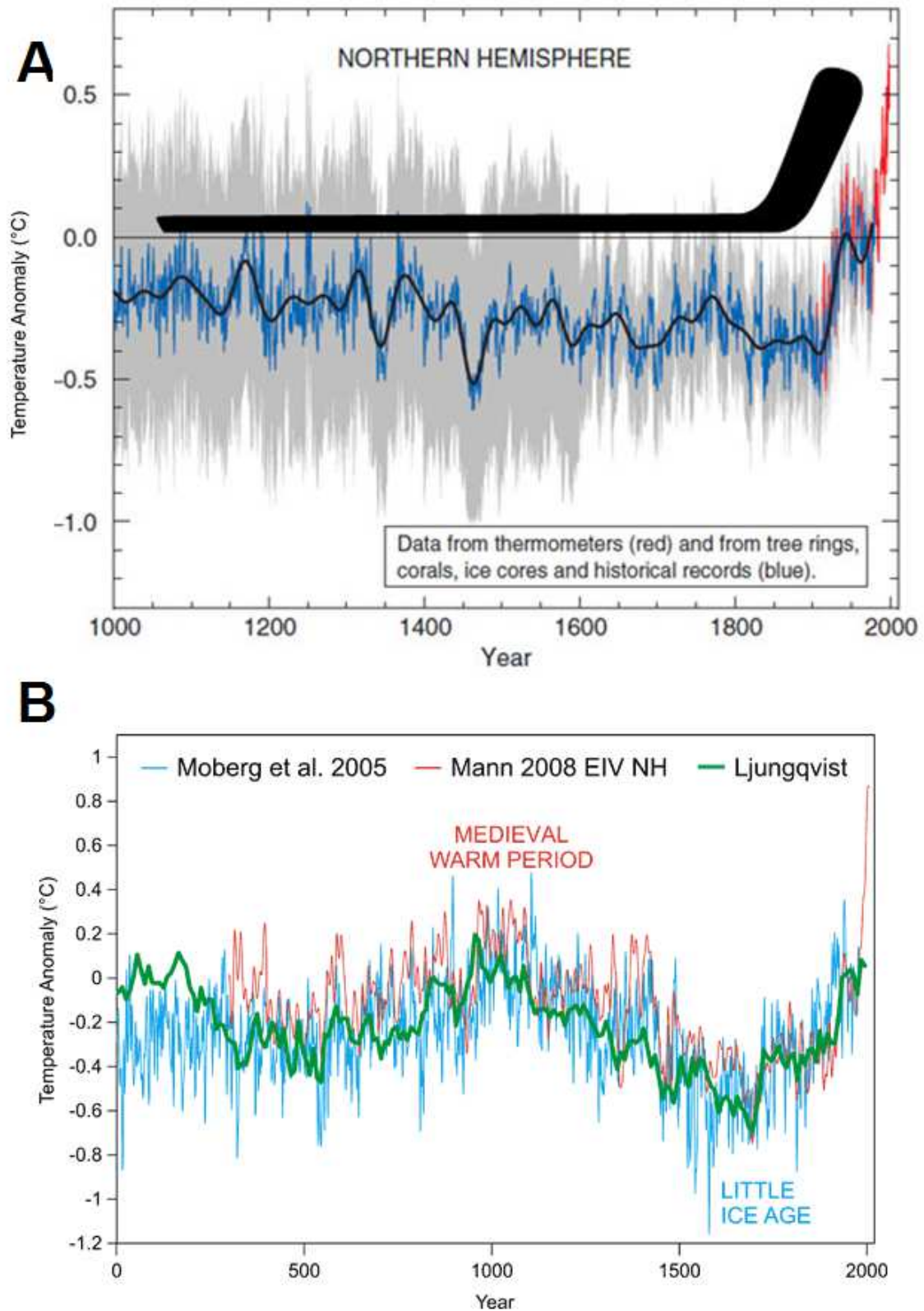


Fig. 7 - Confronto tra [A] le ricostruzioni della temperatura dette *Hockey Stick* del 2000 [14,15] e [B] quelle proposte sin dal 2005 [16,17,18, 19].

Tutte le evidenze discusse sopra suggeriscono che il sistema climatico è più complesso di quanto gli attuali modelli assumono. L'effetto solare, che include una varietà di fenomeni luminosi, elettromagnetici e particellari, appare molto sottovalutato, mentre gli effetti delle forzanti radiative, che sono gli unici presi in considerazione dai modelli climatici, appaiono sovrastimati.

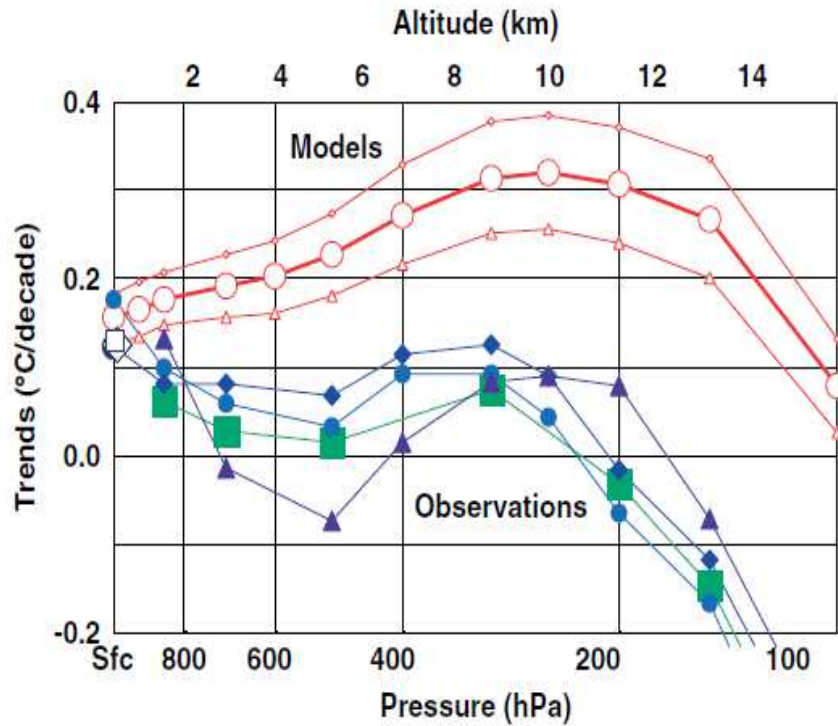


Fig. 8 - Confronto tra i trend delle temperature osservate nella troposfera (curve verdi e blu) contro quelli predetti dai modelli (curve rosse) [21].

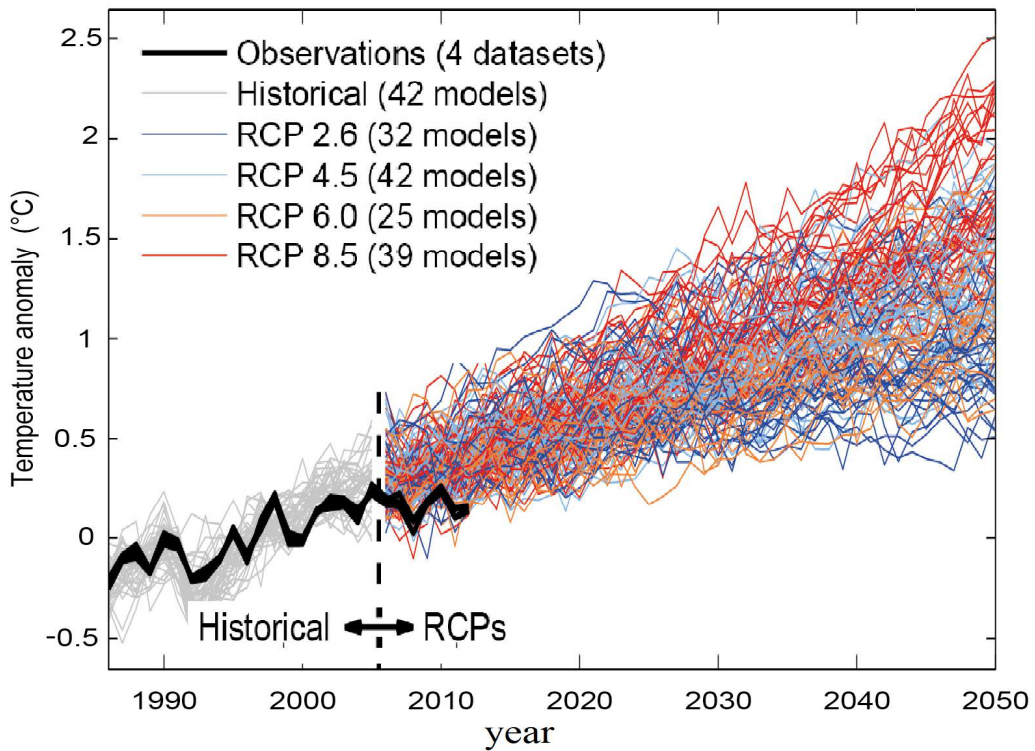


Fig. 9 - Confronto tra le simulazioni dei modelli e le temperature osservate (curva nera). Dalla figura 11.25a dell'IPCC AR5 [1].

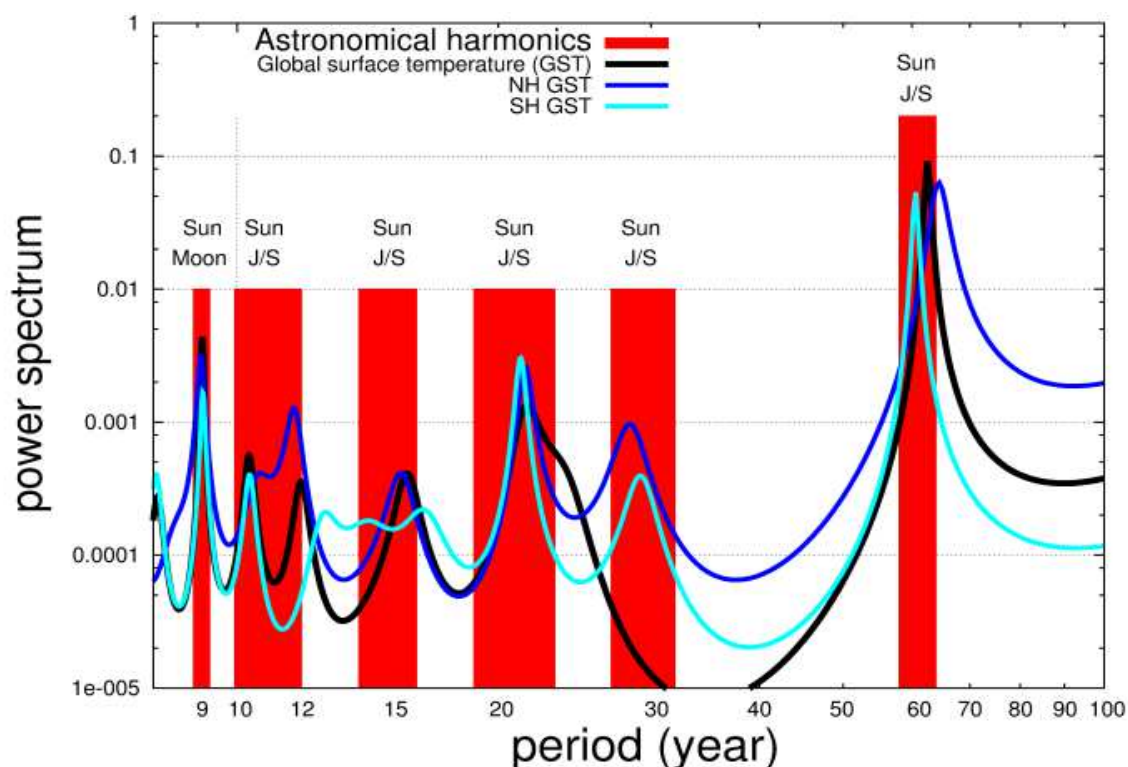


Fig. 10 - Analisi spettrale della temperatura superficiale globale [4]. Le aree rosse rappresentano le oscillazioni del sistema solare associate al Sole, la Luna, Giove e Saturno.

4. Un modello semi-empirico basato su oscillazioni naturali

Come già osservato sopra, l'analisi spettrale ha messo in evidenza che i record di temperatura sin dal 1850 sono caratterizzati da grandi oscillazioni con periodi di circa 9.1, 10.4, 20, e 60 anni [4, 24]: si veda la Figura 10.

In particolare, una grande oscillazione di circa 60 anni è evidente nei dati: i periodi 1850-1880, 1919-1940 e 1970-2000 sono stati caratterizzati da un riscaldamento, mentre i periodi 1880-1910 e 1940-1970 sono stati caratterizzati da un raffreddamento. Dal 2000 la temperatura superficiale globale è stata quasi stazionaria, anche se l'anno 2015-2016 è stato particolarmente caldo rispetto agli anni precedenti a causa di una forte picco caldo dovuto ad un evento del El-Nino, che è una oscillazione climatica del Pacifico equatoriale.

L'esistenza di oscillazioni di 20 e 60 anni implica che circa il 50% del riscaldamento osservato 1970-2000 deve essere stata indotto da esse. Questo lascia solo il rimanente 50% ai forzanti antropici. Questo dimezza la stima dei modelli usati dall'IPCC [1].

Queste oscillazioni sono astronomicamente indotte. Infatti, una attenta analisi della oscillazione gravitazionali del sistema solare e del sistema mareale ha concluso che le sequenze astronomiche e quelle climatiche condividono un gran numero di armoniche [4,24,25,26,27]. La Figura 11 dimostra questa relazione mostrando un confronto tra l'analisi spettrale continua della velocità del Sole rispetto al baricentro del sistema solare, che è usato come un rappresentante delle risonanze astronomiche e delle oscillazioni gravitazionali del sistema solare e della temperatura superficiale della Terra [4]. C'è una coerenza spettrale con una confidenza statistica del 95% almeno i seguenti periodi: 6.6, 7.4, 14, 20 e 60 anni [27].

Nota che l'oscillazione della temperatura osservata al periodo di 9.1 anni è una oscillazione di mareale. Essa è una media tra il ciclo lunare del perigeo di 8.85 anni, la seconda armonica del ciclo di Saros delle eclissi di circa 9 anni e quella del ciclo nodale di 9.3 anni [24,28]. L'oscillazione tra i periodi di 10 e 12 anni è dovuta al ciclo delle macchie solari di 11 anni che è delimitato dal ciclo delle maree di 9.93 e 11.86 anni dovuto a Giove e Saturno [29]. Ref. [29] dimostra anche che la combinazione delle due precedenti oscillazioni planetarie e il ciclo solare di 11 anni produce battimenti con periodo di circa 115 e 983 anni. Queste lunghe oscillazioni sono sincrone a quelle osservate nel clima e nei record solari durante l'Olocene [29].

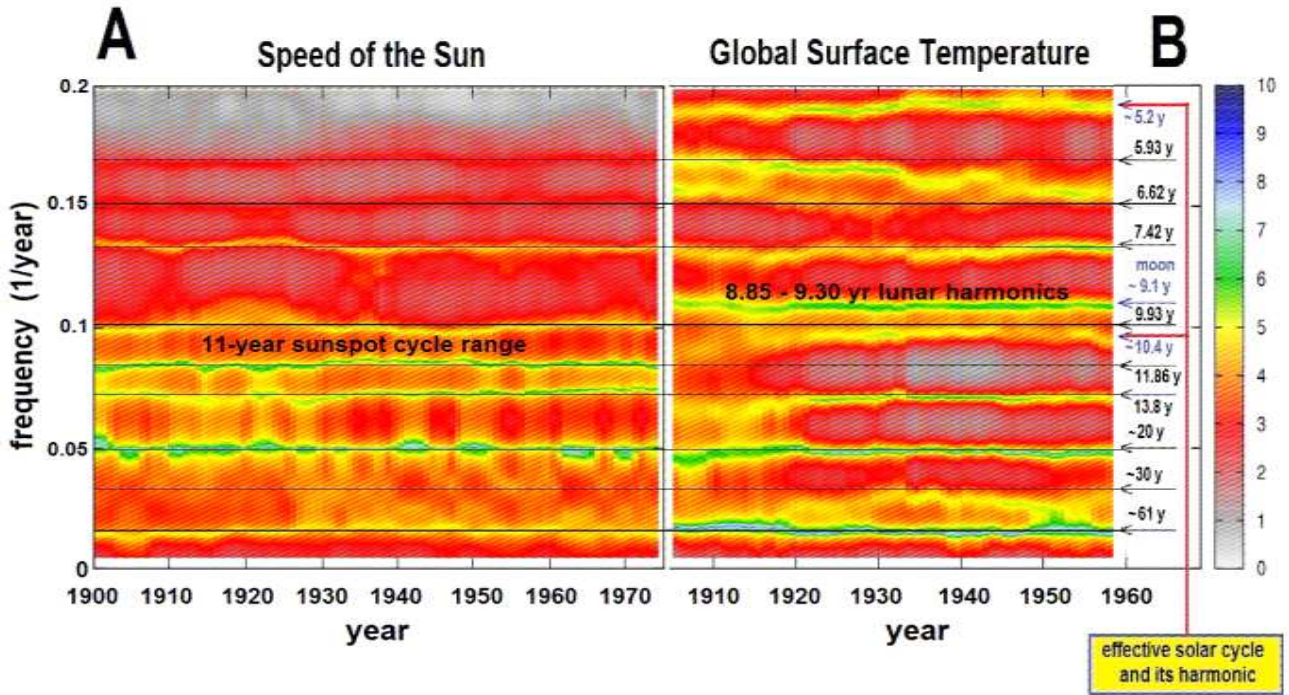


Fig. 11 - Confronto tra l'analisi spettrale continua della velocità del Sole rispetto al baricentro del sistema solare della temperatura superficiale [26].

Sin dal 2010 ho proposto che la temperatura superficiale globale potrebbe essere ricostruita usando un minimo di 6 armoniche a 9.1, 10.4, 20, 60, 115 e 983 anni, più il contributo antropico e vulcanico che può essere valutato usando le simulazioni dei modelli CMIP5 ridotte della metà. Infatti, la vera sensibilità climatica al forzante radiativo è circa la metà di quella assunta da essi, come spiegato sopra. Il dato mostrato in Figura 12 evidenzia la migliore performance del modello semi-empirico solare-astronomico rispetto ai modelli CMIP5. Ciò è particolarmente evidente sin dal 2000, come mostrato negli inserti della figura. Maggiori informazioni su questo modello e le sue prestazioni sono discusse in Ref. [4].

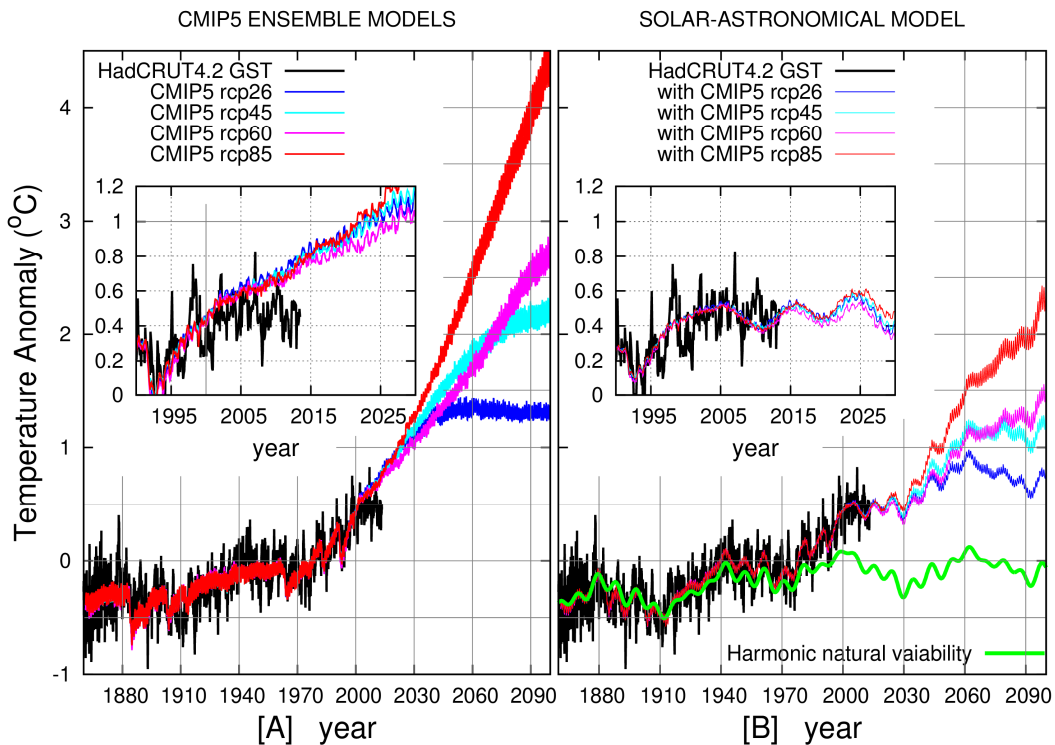


Fig. 12 - [A] Le proiezioni dei modelli CMIP5 (curve colorate) contro la temperatura HadCRUT4 (curva nera). [B] Il modello semi-empirico basato su cicli astronomici, Ref. [4].

5. Una validazione del modello proposto nel 2011

Nel 2011 ho preparato una previsione della temperatura superficiale globale sulla base del modello semi-empirico semplificato basato su quattro oscillazioni naturali (9.1, 10.4, 20 e 60 anni) più una stima del contributo antropico [25]. Figura 13 confronta la mia previsione contro la temperatura superficiale che ho usato nel 2011 (HadCRUT3, curva blu) e il record moderno fino a dicembre 2016 (HadCRUT4, curva blu). La figura 13 mostra anche in verde una rappresentazione schematica della previsione dei modelli dell'IPCC [25].

La figura indica chiaramente che a partire dal 2000 e anche dal 2011 (vale a dire, per il vero e proprio periodo di previsione di 5 anni) il record di temperatura superficiale globale ha seguito la mia previsione climatica significativamente meglio dei modelli utilizzati dall'IPCC [1]. Questo fatto non viene messo in discussione neanche dal picco di temperatura raggiunto tra la fine del 2015 e l'inizio del 2016, che è stato causato da un forte effetto di riscaldamento del El-Nino, che da allora si è rapidamente esaurito. Questo picco di temperatura non ha nulla a che fare con il riscaldamento antropico perché dovuto alle oscillazioni naturali dell'oceano Pacifico.

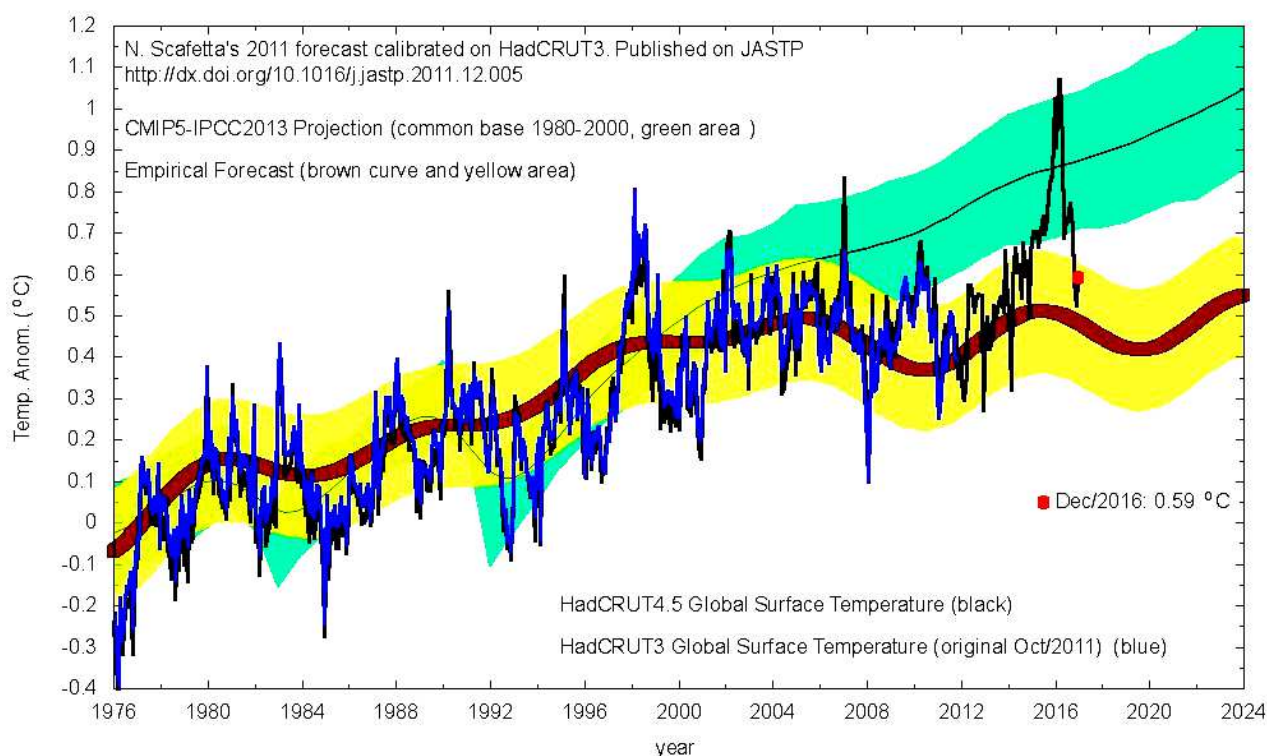


Fig. 13 - Confronto tra la previsione di Scafetta del 2011 [25] (area gialla), le previsioni dei modelli dell'IPCC (area verde) e i record della temperatura. Nel 2015-2016 c'è stato un forte picco caldo naturale causato da El-Nino.

6. Conclusioni

Dal 1850 la temperatura della superficie globale si è riscaldata di circa 0.9 °C. Questo riscaldamento è stato interpretato dai modelli usati dall'IPCC come dovuto all'uomo [1]. Gli stessi modelli climatici sono stati adottati per valutare che la temperatura potrebbe aumentare di 4-5 °C per il 2100 a causa delle emissioni antropiche. Queste proiezioni sono attualmente utilizzate per giustificare la necessità di costose politiche di mitigazione che possono danneggiare l'economia mondiale.

Tuttavia, ho mostrato che i modelli climatici dell'IPCC non riescono a ricostruire correttamente la variabilità naturale del clima. Questa variabilità sembra essere composta da specifiche oscillazioni che sembrano avere un'origine astronomica anche perché sono trovate tra le risonanze stabili del sistema solare [30]. Un modello climatico che fa uso di queste oscillazioni predice meglio i cambiamenti climatici passati e predice un riscaldamento molto moderato fino al 2040 e un riscaldamento complessivo inferiore ai 2°C per il 2100: si vedano le figure 12 e 13. Questo risultato suggerisce che le politiche di adattamento climatico dovrebbero essere preferite rispetto a quelle di mitigazione perché meno costose e sufficienti per affrontare la maggior parte delle conseguenze di un cambiamento climatico nel corso del XXI secolo.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. (eds Stocker, T. F. et al) (Cambridge Univ. Press, 2013). [<http://www.ipcc.ch/>]
- [2] Rockstrom J., et al., "A safe operating space for humanity," *Nature*, vol. 461, pp. 472-475, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1038/461472a>.
- [3] Idso, D. C., Carter, R. M., Singer, S. F., Karnick, S. T. and Bast, D. C., "Climate change reconsidered II: Physical science," The Heartland Institute (September 17, 2013). <http://www.climatechangereconsidered.org/>.
- [4] Scafetta, N., "Discussion on climate oscillations: CMIP5 general circulation models versus a semi-empirical harmonic model based on astronomical cycles." *Earth-Science Reviews*, vol. 126, pp. 321-357, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.008>.
- [5] Lewis, N., "An objective bayesian improved approach for applying optimal fingerprint techniques to estimate climate sensitivity," *J. Climate*, vol. 26, pp. 7414-7429, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00473.1>.
- [6] Shakun, J., Clark, P. U., He, F., et al., "Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation." *Nature*, vol. 484, pp. 49–54, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature10915>.
- [7] Marcott, S.A., Shakun, J.D., Clark, P.U., Mix A.C., "A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years," *Science*, vol. 339, pp. 1198–1201, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1228026>.
- [8] Liu, Z., Zhu, J., Rosenthal, Y., et al., "The Holocene temperature conundrum," *PNAS*, vol. 111, pp. E3501–E3505, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1407229111>.
- [9] Alley, R.B., 2004, GISP2 Ice Core Temperature and Accumulation Data. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2004-013. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.
- [10] Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., et al., "Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene," *Science*, vol. 294, pp. 2130-2136, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1065680>.
- [11] Kerr, R. A., "A variable sun paces millennial climate," *Science*, vol. 294, pp. 1431-1433, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.294.5546.1431b>.
- [12] Steinhilber, F., Abreu, J. A., Beer, J., et al., "9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings," *PNAS*, vol. 109, pp. 5967-5971, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1118965109>.
- [13] Kirkby, J., "Cosmic rays and climate," *Surv. Geophys.*, vol. 28, pp. 333–375, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-008-9030-6>.
- [14] Crowley, T.J., "Causes of climate change over the past 1000 years," *Science*, vol. 289, pp. 270–277, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.270>.
- [15] Mann, M. E., Bradley, R. S. and Hughes, M. K., "Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 26, pp. 759–762, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1029/1999GL900070>.
- [16] Moberg, A., Sonechkin, D. M., Holmgren, K., et al., "Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low and high resolution proxy data," *Nature*, vol. 433, pp. 613–617, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature03265>.
- [17] Mann, M. E., Zhang, Z., Hughes, M. K., et al., "Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia," *PNAS*, vol. 105, pp. 13252–13257, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0805721105>.
- [18] Ljungqvist, F. C., "A new reconstruction of temperature variability in the extra-tropical Northern Hemisphere during the last two millennia," *Geogr. Ann. A*, vol. 92, pp. 339-351, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2010.00399.x>.
- [19] Christiansen, B. and Ljungqvist, F. C., "The extra-tropical Northern Hemisphere temperature in the last two millennia: reconstructions of low-frequency variability," *Clim. Past*, vol. 8, pp. 765-786, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5194/cp-8-765-2012>.
- [20] Christy, J. R., Herman, B. and Pielke, Sr., R., et al., "What do observational datasets say about modeled tropospheric temperature trends since 1979?" *Remote Sensing*, vol. 2, pp. 2148-2169, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs2092148>.
- [21] Douglass, D. H., Christy, J. R., Pearson, B. D. and Singer S. F., "A comparison of tropical temperature trends with model predictions," *International Journal of Climatology*, vol. 28, pp. 1693-1701, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.1651>.
- [22] Scafetta, N. and Mazzeola, A., "The arctic and antarctic sea-ice area index records versus measured and modeled temperature data," *Advances in Meteorology*, vol. 2015, Article ID 481834, 8 pages, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4401/ag-6899>.

- [23] Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A. and Jones, P. D., "Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: the HadCRUT4 dataset," *J. Geophys. Res.*, vol. 117, D08101, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011JD017187>.
- [24] Scafetta, N., "Empirical evidence for a celestial origin of the climate oscillations and its implications," *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, vol. 72, pp. 951–970, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.04.015>.
- [25] Scafetta, N., "Testing an astronomically based decadal-scale empirical harmonic climate model versus the IPCC (2007) general circulation climate models," *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, vol. 80, pp. 124–137, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.12.005>.
- [26] Scafetta, N., "Discussion on the spectral coherence between planetary, solar and climate oscillations: a reply to some critiques," *Astrophysics and Space Science*, vol. 354, pp. 275-299, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10509-014-2111-8>.
- [27] Scafetta, N., "High resolution coherence analysis between planetary and climate oscillations," *Advances in Space Research*, vol. 57(10), pp. 2121–2135, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.02.029>.
- [28] Haigh, I. D., Eliot, M. and Pattiaratchi, C., "Global influences of the 18.61 year nodal cycle and 8.85 year cycle of lunar perigee on high tidal levels," *J. of Geophysical Research-Ocean*, vol. 116, Art. C06025, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010JC006645>.
- [29] Scafetta, N., "Multi-scale harmonic model for solar and climate cyclical variation throughout the Holocene based on Jupiter-Saturn tidal frequencies plus the 11-year solar dynamo cycle," *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 80, pp. 296-311, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.02.016>.
- [30] Scafetta, N., Milani, F., Bianchini, A., Ortolani, S., "On the astronomical origin of the Hallstatt oscillation found in radiocarbon and climate records throughout the Holocene." *Earth-Science Reviews*, vol. 162, pp. 24-43, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.09.004>

La memoria del ghiaccio¹

Carlo Barbante

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

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.

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.

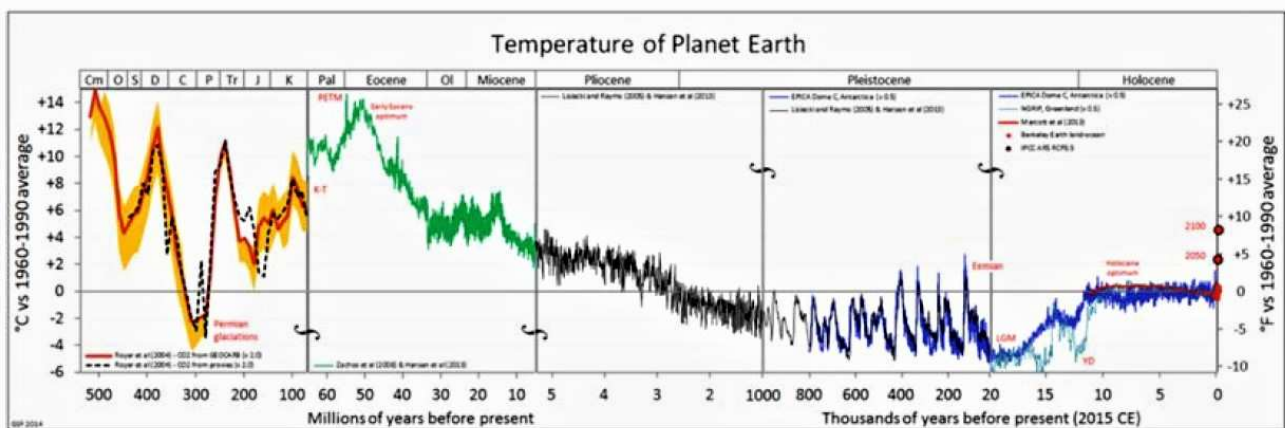


Fig. 1. - Le ricostruzioni della temperatura del passato nel corso degli ultimi 500 milioni di anni. Zachos *et al.*, 2008.

¹ Prolusione tenutasi durante la Seconda Assemblée Annuale dei Soci, Roma, 15 novembre 2016, presso la Biblioteca dell'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Scuderie Vecchie di Villa Torlonia. Pubblicata nei Rendiconti dell'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Memorie di Scienze Fisiche e Naturali 134° (2016), Vol. XL, Parte II, pp. 7-16.

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 variazioni 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.

Gli ultimi centosessanta anni sono rappresentati dal grafico nella Figura 2, che è diventato famoso come «la mazza da hockey» proprio perché riporta inizialmente un andamento progressivo e decrescente di temperature fino all'era preindustriale e poi, da circa 100 anni, un progressivo innalzamento che, sia pur con delle variazioni e delle variabilità naturali all'interno, sta portando verso l'ormai conosciuto riscaldamento globale.

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 nell'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 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.

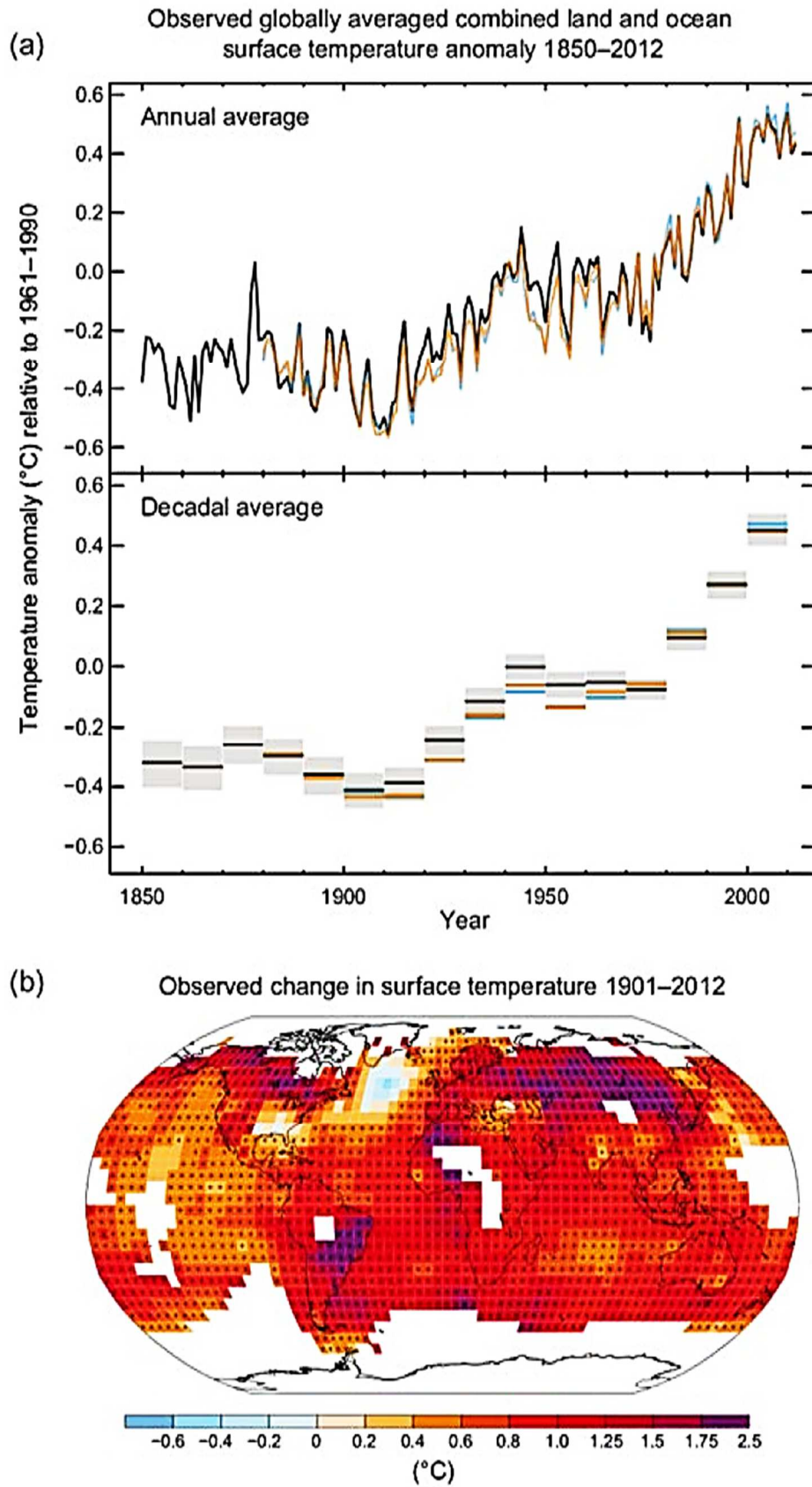


Fig. 2. - Anomalie di temperature medie nel periodo 1850-2012. Nel pannello superiore sono riportate le temperature medie annuali, mentre nel pannello inferiore le medie decennali. Le anomalie di sono relative alla media 1961-1990. IPCC, 2013.

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'Himalaya, il Tibet, il Caucaso, le Alpi, tutta la parte settentrionale del continente americano e la parte occidentale del Sud America. Grazie ad un sistema satellitare si può misurare in modo accurato il bilancio di massa di questi ghiacciai. I dati più recenti dicono come la quasi totalità dei ghiacciai delle aree non polari sia soggetta ad un netto e continuo bilancio di massa negativo. Ciò vuol dire che 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 acqua dei ghiacciai dell'Himalaya 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.



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

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, contrariamente 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.

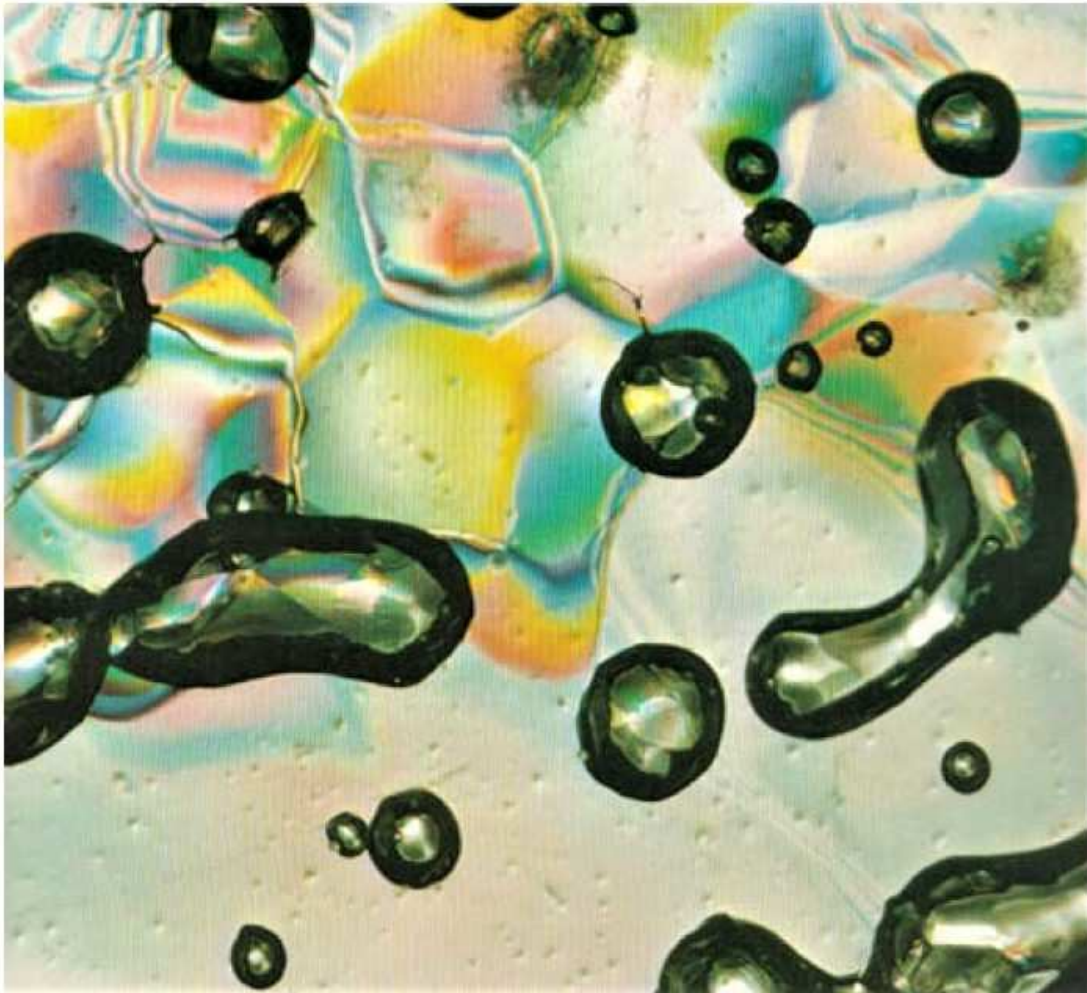


Fig. 4. Fotografia a luce polarizzata di una sezione di ghiaccio in cui sono ben visibili le bolle di aria intrappolate all'interno.

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 Pianeta, lontano dalle stazioni di ricerca scientifica che 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 frequenza 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 ormai 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-industriale fino ad un minimo di circa 180 ppmv durante i periodi glaciali.

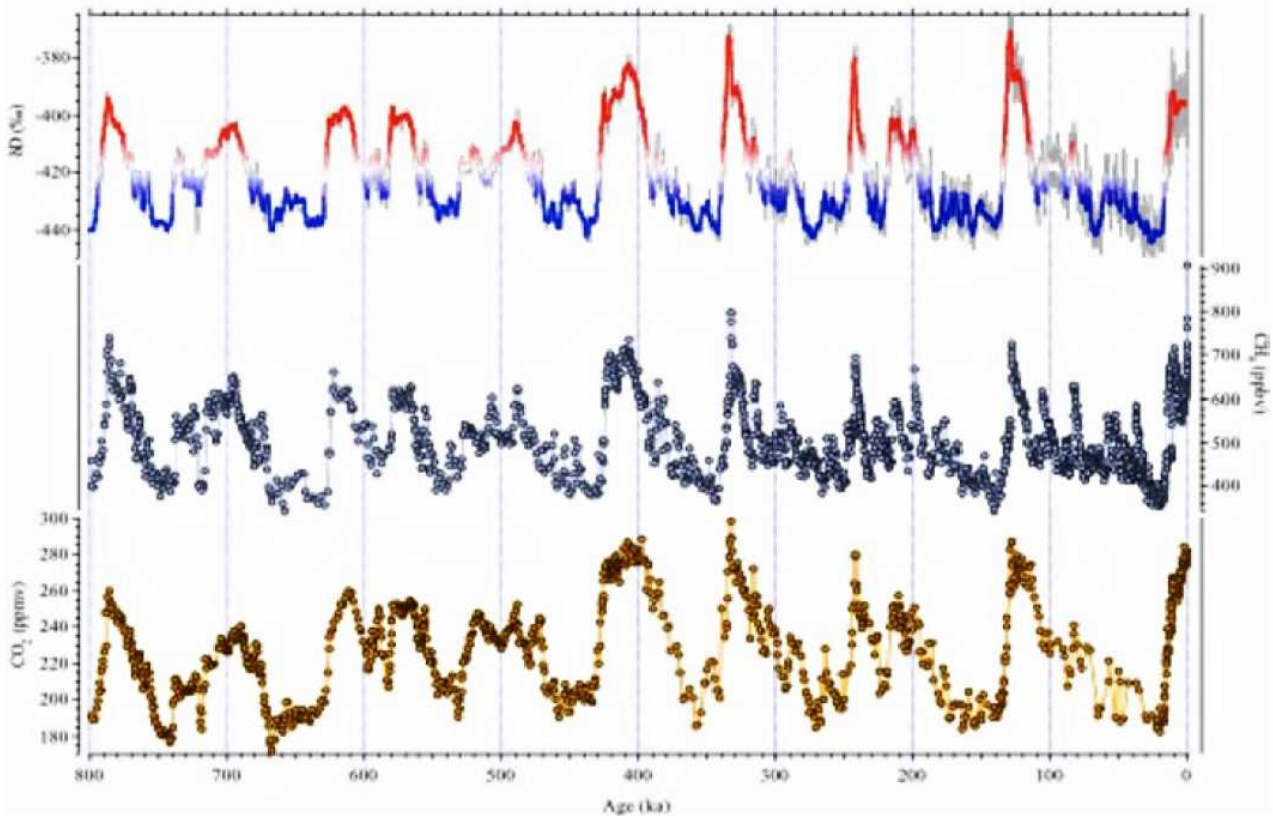


Fig. 5. Antartide, Dome C. Variazioni di temperatura, espresse come cambiamenti nella composizione isotopica dell'idrogeno (δD); valori più negativi di δD indicano temperature più basse (in blu) mentre i valori meno negativi indicano periodi più caldi (in rosso), i cosiddetti periodi interglaciali. Nel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

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 sensibilità 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 ormai assodato che stiamo vivendo in un sistema attualmente in rapido riscaldamento. È anche ormai 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 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 alii*, Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. *Science* 317, (2007), pp. 793-797.
 Lüthi D. *et alii*, High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, *Nature* 453, (2008), pp. 379-382.
 Zachos J.C. *et alii*, An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics, *Nature* 451, (2008), pp. 279-283.

Aerosol e clima: studio degli effetti radiativi diretti indotti da aerosol naturali e antropici e dei principali effetti indiretti prodotti da aerosol e nubi

Claudio Tomasi

Ricercatore Associato presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (ISAC),
Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Bologna

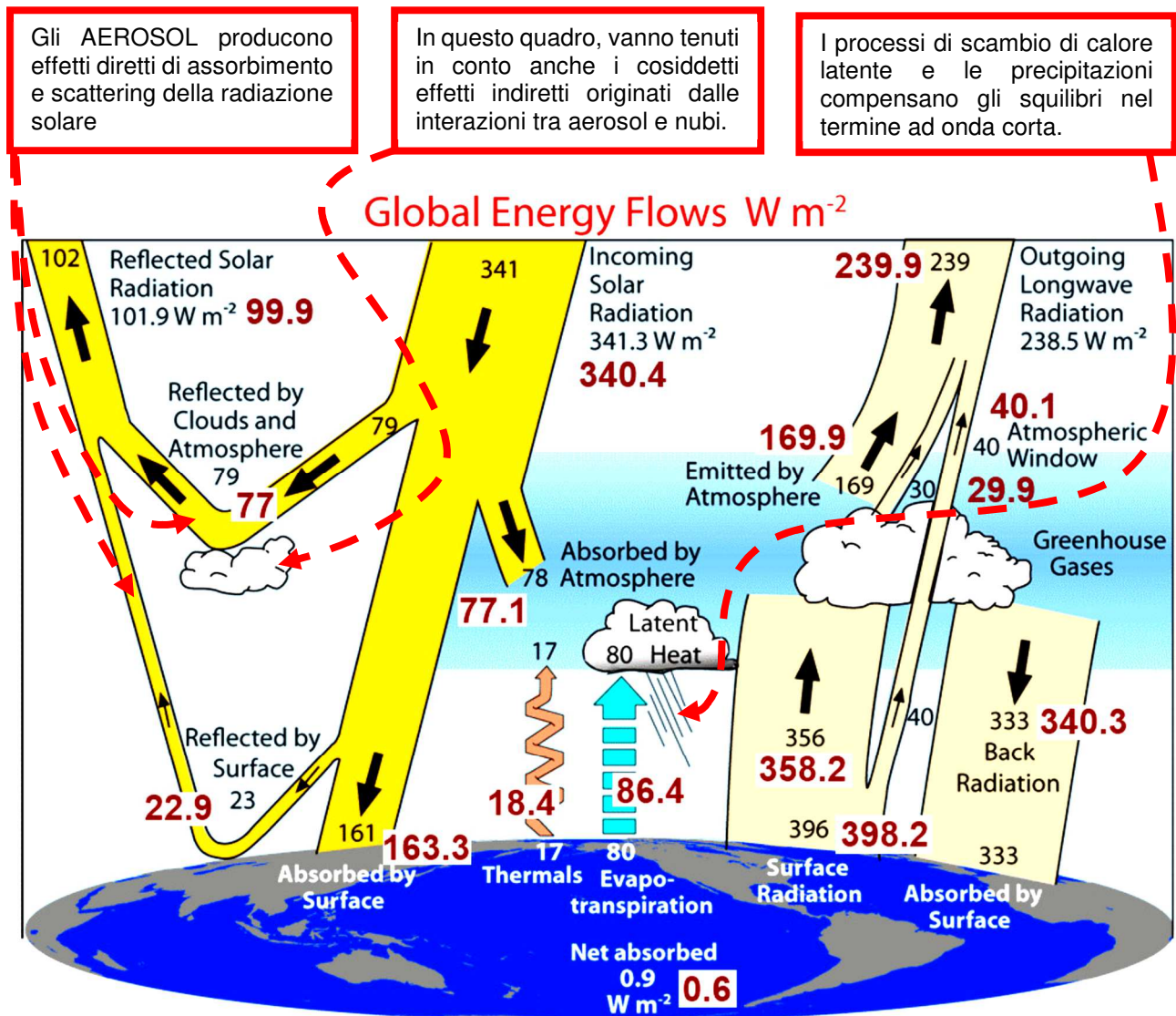
Il pianeta Terra è un sistema "termodinamicamente chiuso". I contributi al flusso entrante di energia forniti da fonti diverse da quella solare (come la radiazione solare riflessa dalla Luna, la luce stellare, i raggi cosmici e le meteore) sono pari allo 0.002% della radiazione solare extra-terrestre.

Il bilancio di energia della Terra è pertanto costituito da due soli termini "radiativi":

- 1) il primo termine entrante, dato dalla radiazione solare (onda corta, da circa 0.25 μm a 4 μm), e
- 2) il secondo, costituito dalla radiazione emessa dal sistema terrestre (onda lunga, da circa 4 μm a 30 μm) verso lo spazio esterno.

Il flusso entrante di radiazione solare è fortemente attenuato dai processi di (i) scattering delle molecole d'aria (scattering di Rayleigh), (ii) assorbimento dei gas minori (vapore acqueo, ozono, ossigeno, anidride carbonica...), (iii) scattering ed assorbimento degli aerosol naturali ed antropici, e (iv) scattering e assorbimento delle nubi.

Il flusso di radiazione ad onda lunga è principalmente influenzato dall'assorbimento dei gas-serra che presentano forti bande nell'infrarosso (vapore acqueo, anidride carbonica, ozono, metano, protossido d'azoto, clorofluorocarburi (CFC), e idroclorofluorocarburi (HCFC)).



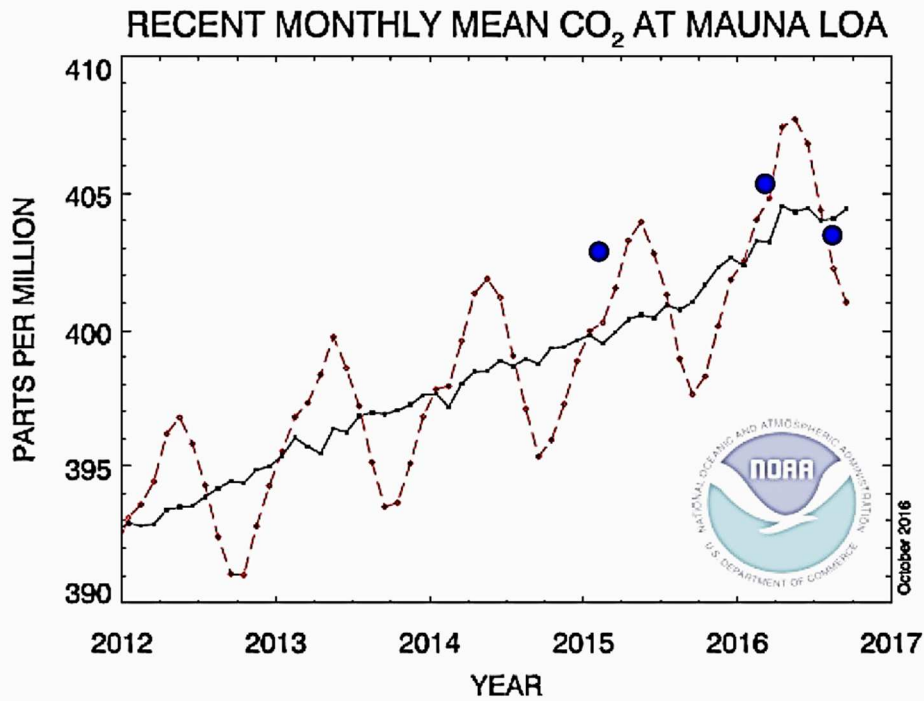
Gli AEROSOL producono effetti diretti di assorbimento e scattering della radiazione solare

In questo quadro, vanno tenuti in conto anche i cosiddetti effetti indiretti originati dalle interazioni tra aerosol e nubi.

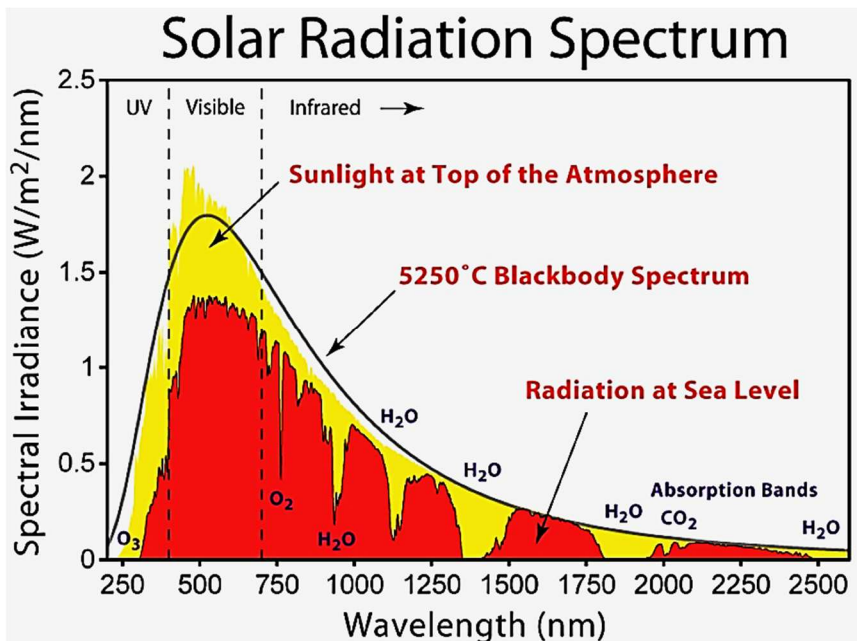
I processi di scambio di calore latente e le precipitazioni compensano gli squilibri nel termine ad onda corta.

L'assorbimento della radiazione ad onda lunga (radiazione infrarossa) è principalmente dovuto al vapore acqueo e all'anidride carbonica. Si tenga presente che la concentrazione media atmosferica di anidride carbonica CO₂ ha raggiunto nel corso del 2016 un valore medio di 405 parti per milione di volume (ppmv). Al Monte Cimone la concentrazione di CO₂ misurata dall'Aeronautica Militare è stata di 403.2 ppmv nel febbraio 2015, 406.1 ppmv nel febbraio 2016, e 403.8 ppmv nell'ottobre 2016.

Si valuta che l'aumento della concentrazione di CO₂ da 330 ppmv (nel 1970) a 405 ppmv (nel 2016) abbia prodotto una forzatura radiativa di circa 1.5 W m⁻², alla quale si è aggiunta una forzatura radiativa di circa 0.7 W m⁻² dovuta all'aumento delle concentrazioni degli altri gas-serra (metano, protossido d'azoto, vapore acqueo stratosferico, CFCs e HCFCs).



La radiazione solare extra-terrestre presenta una curva spettrale simile a quella di un corpo nero alla temperatura di 5777 °K (Fröhlich, 2013). I processi di attenuazione che hanno luogo in un'atmosfera priva di nubi determinano una diminuzione nell'intensità dello spettro solare, dovuta in parte allo scattering di Rayleigh, in parte all'assorbimento dei gas atmosferici minori (principalmente vapore acqueo e anidride carbonica) e in parte allo scattering/assorbimento delle particelle di aerosol che presenta caratteristiche spettrali continue.



I processi di scattering della radiazione solare prodotti dall'aerosol atmosferico sono ben descritti dalla teoria elettromagnetica di Gustav Mie (Rostock, 1869 – Friburgo, 1957):

- (1) The **wavelength (λ) of the incident radiation**
- (2) The **size of the scattering particle**, usually expressed as the non-dimensional size parameter, x :

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

- r is the radius of a spherical particle, λ is wavelength
- (3) The particle optical properties relative to the surrounding medium: **the complex refractive index**
- Scattering regimes:

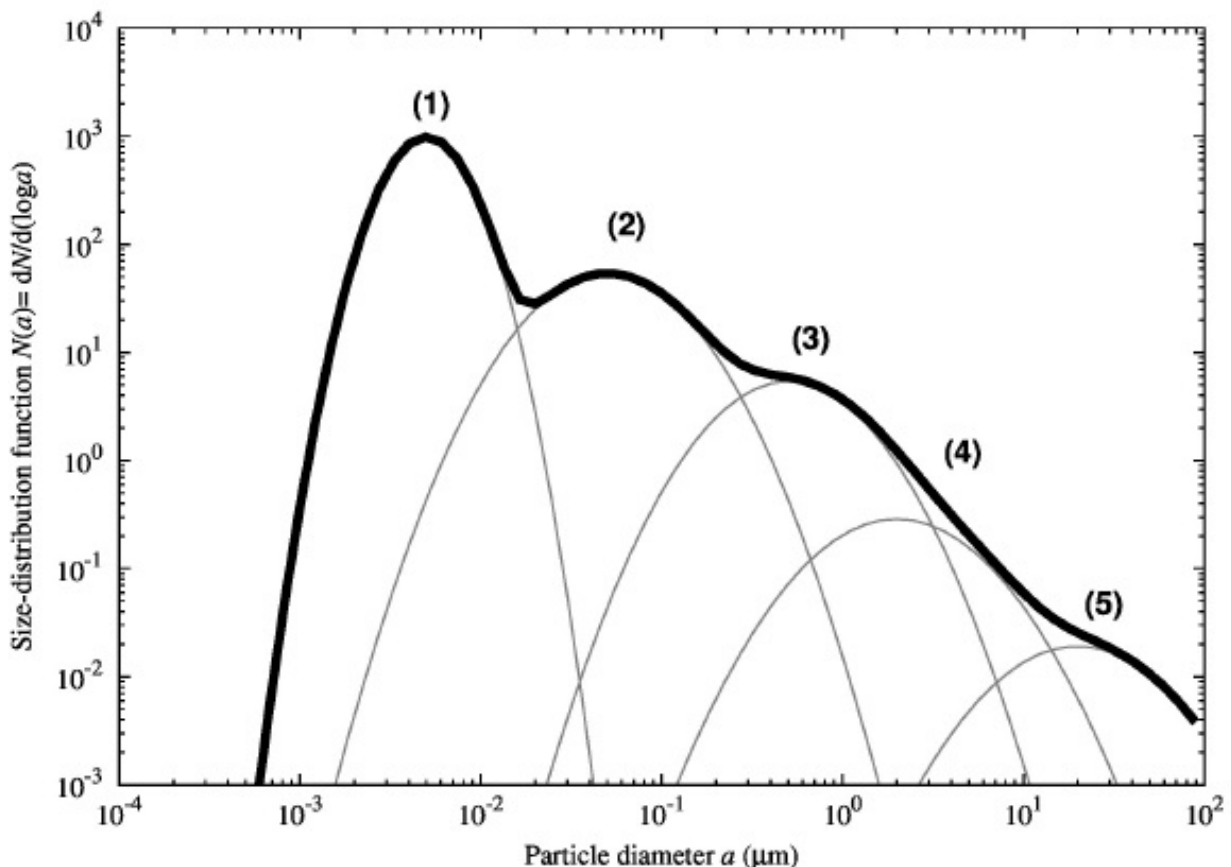
- $x \ll 1$: **Rayleigh scattering**
- $x \sim 1$: **Mie scattering**
- $x \gg 1$: **Geometric scattering**

I parametri fondamentali della teoria di Mie sono:

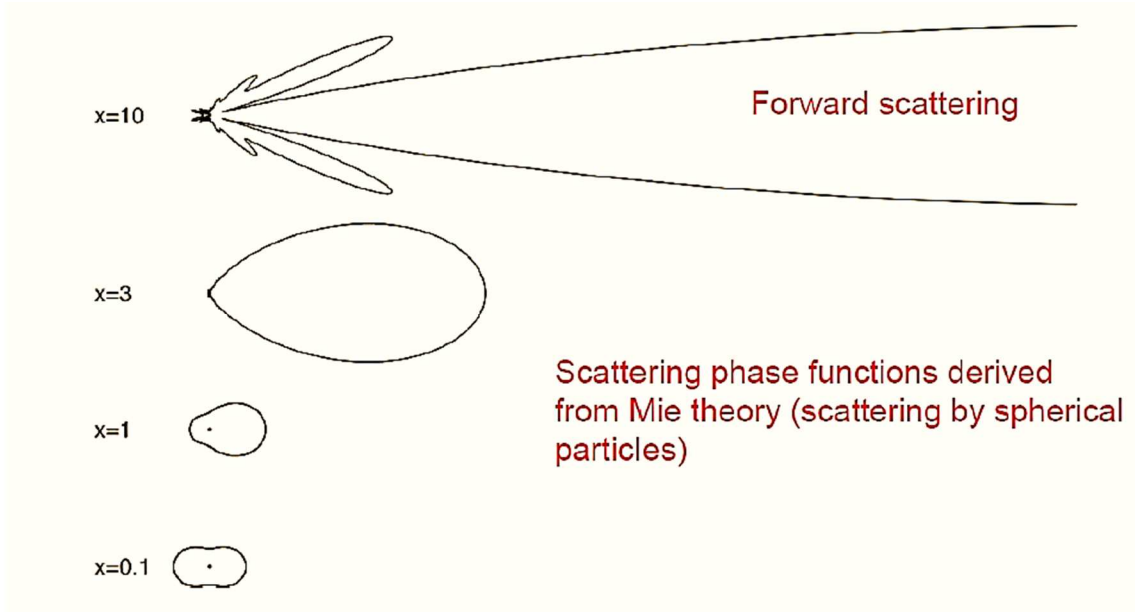
- 1) Il rapporto tra raggio e lunghezza d'onda.
- 2) L'indice complesso di rifrazione del materiale particolato.

Le dimensioni delle particelle di aerosol variano principalmente tra alcune decine di Ångström (aggregati molecolari) e non più di 100 μm (idrometeore e goccioline di nube) (Heintzenberg, 1994).

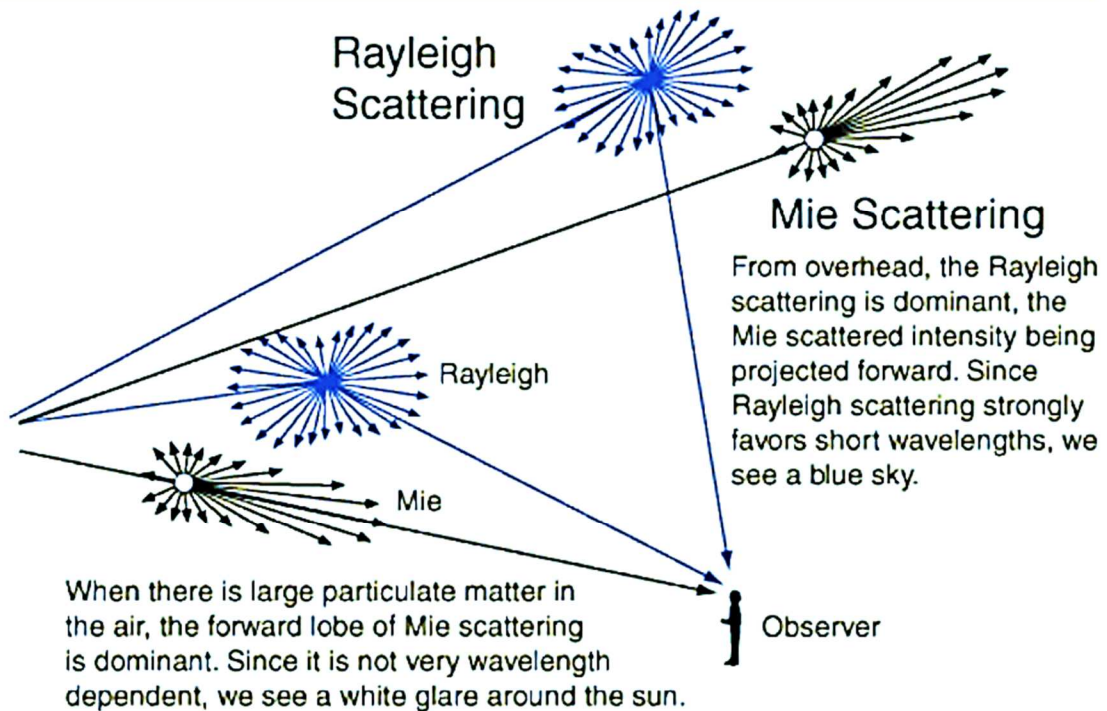
La distribuzione dimensionale degli aerosol è generalmente multimodali, includendo mode di nuclei di Aitken (1, 2), di particelle di accumulazione (3), di grandi particelle (4) (principalmente eoliche) e particelle giganti (5).



Pertanto, gli effetti di scattering di una polidispersione di particelle di aerosol sono dati dal sommarsi degli effetti prodotti dalle diverse classi dimensionali. Il coefficiente di scattering di Rayleigh è approssimativamente proporzionale all'inverso della quarta potenza della lunghezza d'onda.



The scattering phase function, or phase function, gives the angular distribution of light intensity scattered by a particle at a given wavelength

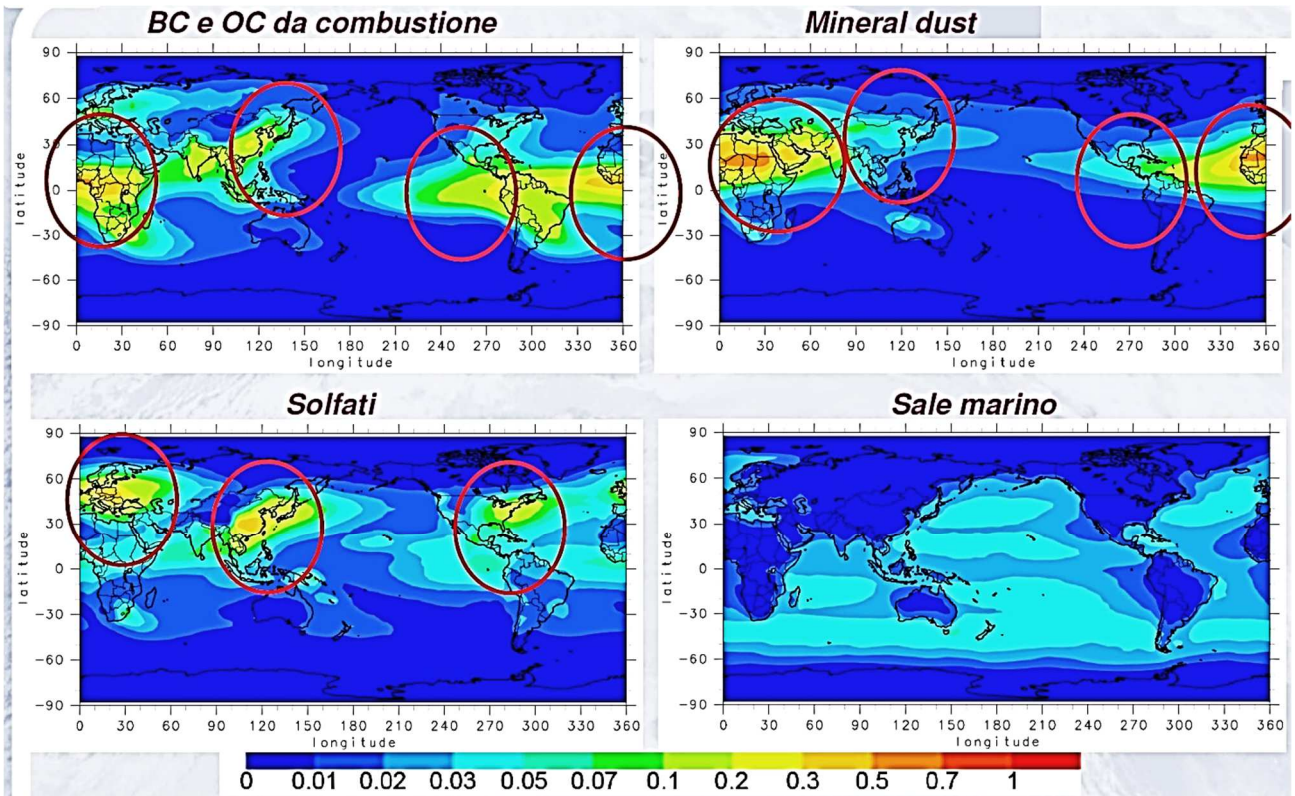


- Scattering determines the brightness and color of the sky

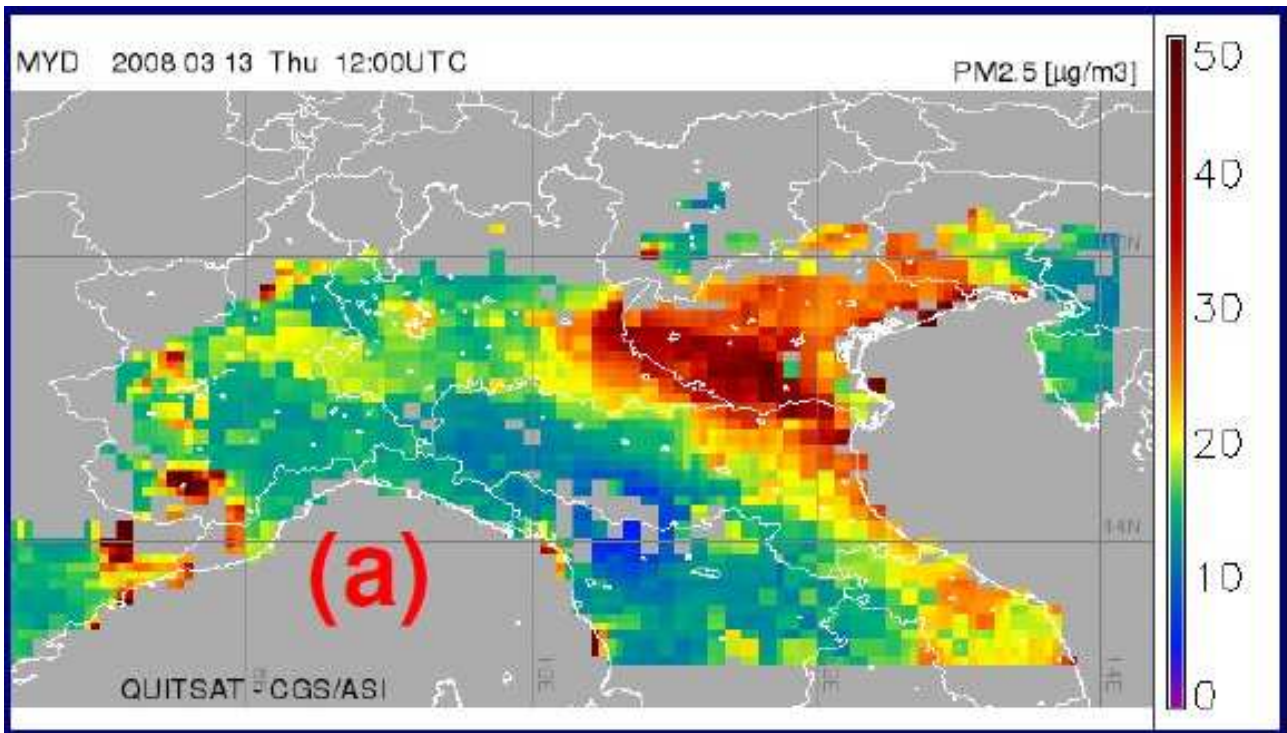
La parte reale dell'indice di rifrazione nel visibile varia generalmente tra 1.31 (ghiaccio) (1.33 per l'acqua liquida) e 1.56 per le particelle di origine desertica, potendo assumere valori prossimi ad 1.9 per sostanze carboniose. La parte immaginaria assume valori compresi tra 10^{-8} (aerosol marino) e $5 \cdot 10^{-1}$ (aerosol industriale).

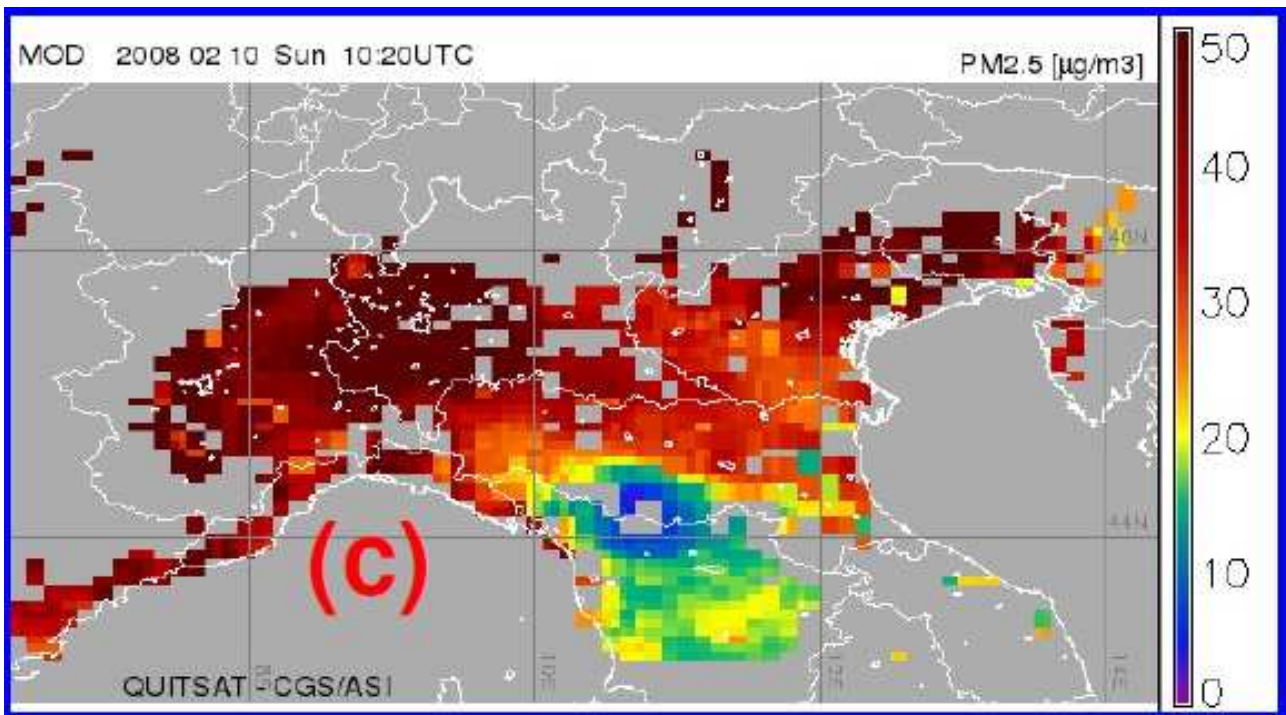
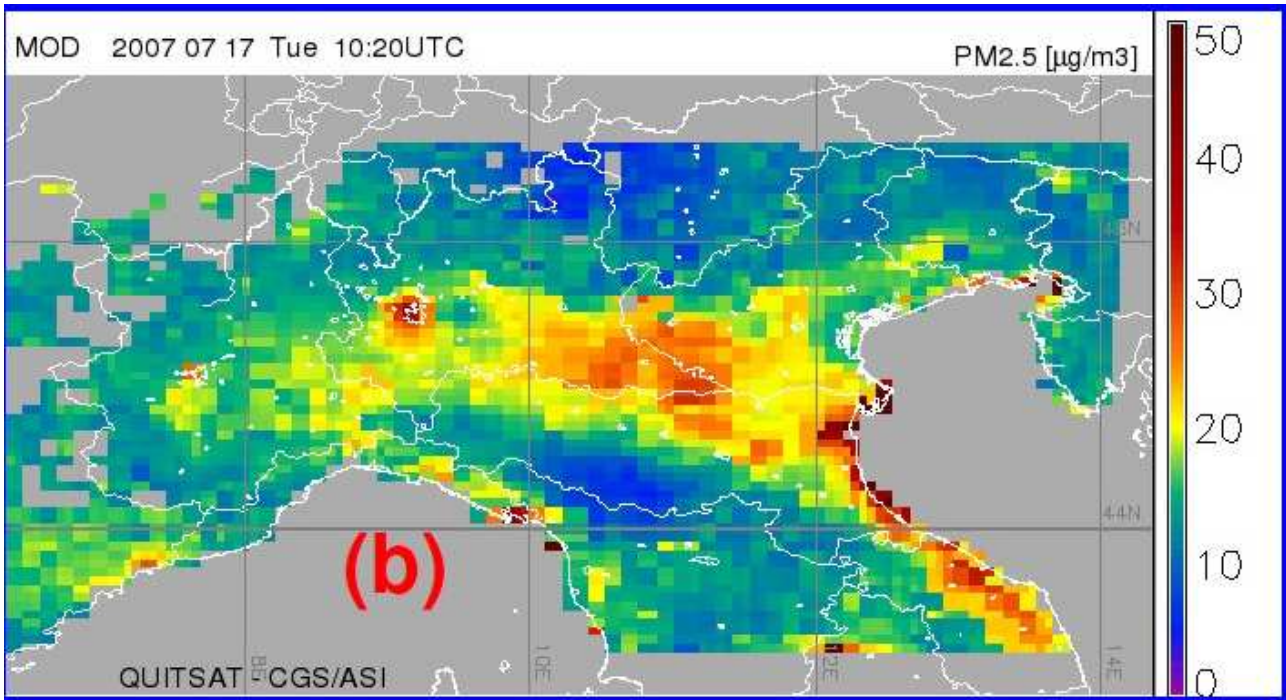
Si riportano le immagini dell'Esperimento SPRINTARS (valutazioni di Tamio Takemura et alii, JGR, 2005):

Annual mean distributions of the optical thickness at 550 nm for each aerosol



Seguono le mappe di concentrazione di PM2.5 al suolo, ottenute mediante l'analisi di osservazioni satellitari MODIS/Aqua effettuate durante le campagne QITSAT nei giorni: (a) 13 marzo 2008 (12:00 UTC), (b) 17 luglio 2007 (10:20 UTC), e (c) 10 febbraio 2008 (10:20 UTC).





Le tre mappe QUITSAT mostrano chiaramente come la pianura padana sia caratterizzata durante tutto l'anno da valori elevati di concentrazione PM_{2.5} al suolo (compresi generalmente tra 20 e 50 $\mu\text{g m}^{-3}$) con significative variazioni sulla scala di qualche decina di chilometri).

Gli effetti di forzatura radiativa diretta prodotta dagli aerosol hanno quindi una distribuzione tipicamente regionale e con valori più alti nelle aree di media-latitudine più densamente popolate dall'Uomo. Considerando il fatto l'effetto serra avviene invece sulla scala globale, se ne arguisce che una maggiore presenza degli aerosol antropici possa contribuire ad incrementare l'instabilità del sistema climatico terrestre.

Il calcolo dei termini di Direct Aerosol-induced Radiative Forcing (DARF) al (i) livello ToA (Top of the Atmosphere), (ii) alla superficie (ovvero al BoA level) e (iii) dentro l'atmosfera è stato fatto da noi seguendo il procedimento descritto nei seguenti due articoli:

Tomasi C., C. Lanconelli, A. Lupi, and M. Mazzola (2013), Dependence of direct aerosol radiative forcing on the optical properties of atmospheric aerosol and underlying surface. In *Light Scattering Reviews*, Volume 8,

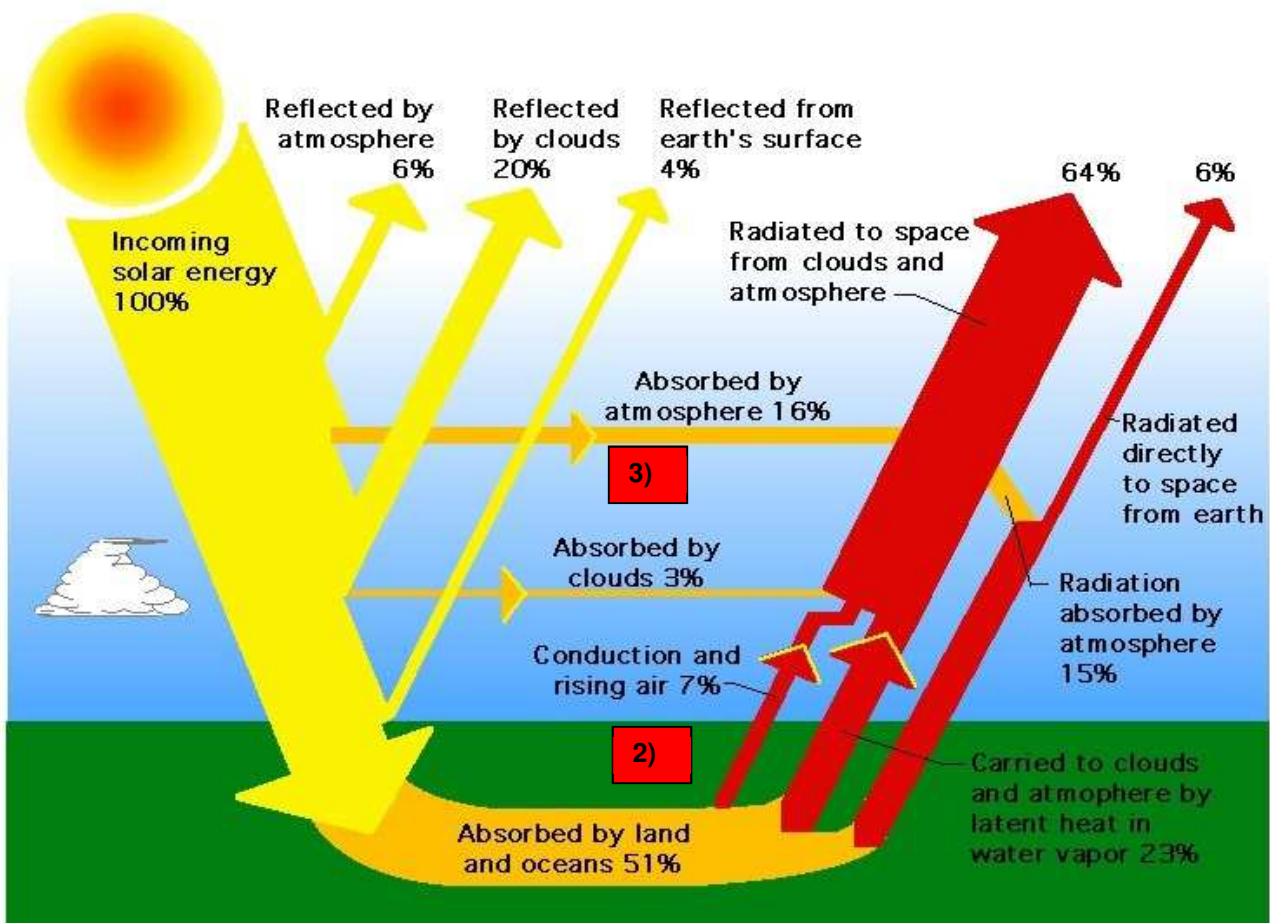
Radiative Transfer and Light Scattering (Kokhanovsky, A. A., ed.), Chapter 11, pp. 505-626, Springer-Praxis Books in Environmental Sciences, Springer-Verlag, Berlin (Germany), doi:10.1007/978-3-642-32106-1.

Tomasi C., C. Lanconelli, A. Lupi, and M. Mazzola (2015), Diurnally averaged direct aerosol-induced radiative forcing from clear-sky field measurements performed during seven regional experiments. In *Light Scattering Reviews*, Volume 9, Light Scattering and Radiative Transfer (Kokhanovsky, A. A., ed.), Chapter 8, pp. 297-425, Springer-Praxis Books in Environmental Sciences, Springer-Verlag, Berlin (Germany), doi:10.1007/978-3-642-37985-7.

Nell'immagine che segue:

- 1) Flusso uscente della radiazione solare.
- 2) Flusso incidente della radiazione solare al suolo.
- 3) Flusso della radiazione solare assorbito dagli aerosol.

Si sono calcolate dapprima le forzature radiative istantanee prodotte dagli aerosol ai tre summenzionati livelli.



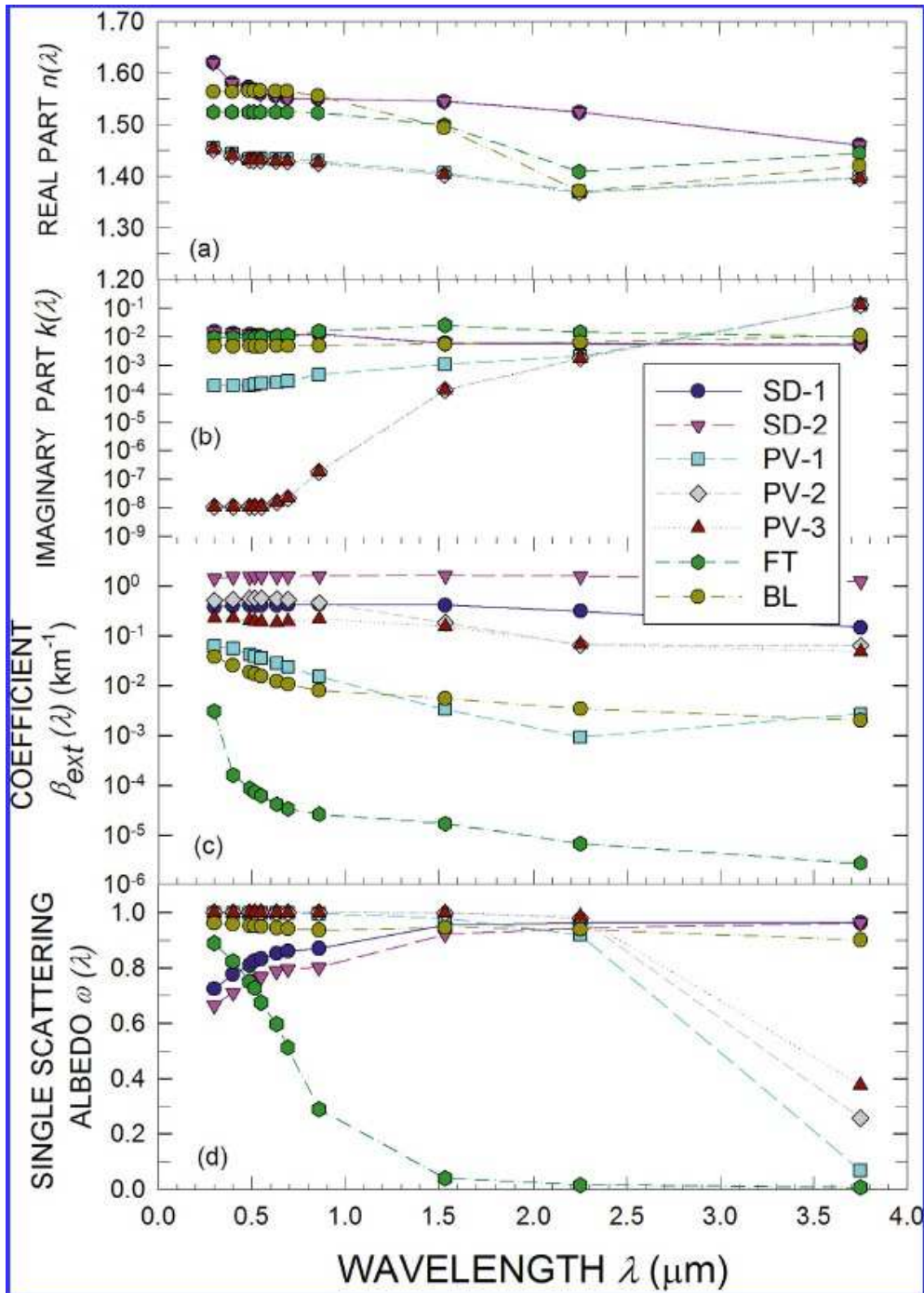
I tre termini di DARF al livello ToA, alla superficie e dentro l'atmosfera sono calcolati come differenze tra i flussi uscenti di radiazione solare calcolati per un'atmosfera con gli aerosol ed un'atmosfera senza aerosol. Ogni rappresentazione dell'atmosfera con aerosol è fatta definendo:

- 1) I profili verticali di pressione, temperatura, umidità relativa ottenuti da misure di radiosondaggio;
- 2) I profili medi di distribuzione verticale delle concentrazioni dei gas minori (vapore acqueo, ozono) e degli aerosol;
- 3) le caratteristiche spettrali e geometriche della riflettanza superficiale e dell'albedo di superficie di Lewis e Barnsley (1994);
- 4) le distribuzioni dimensionali multimodali della concentrazione di particelle degli aerosol, derivate attraverso procedimenti d'inversione da misure ottiche dei principali parametri di estinzione spettrale degli aerosol;
- 5) le proprietà ottiche degli aerosol (indice complesso rifrazione nel visibile e vicino infrarosso, coefficienti di estinzione, scattering ed assorbimento, fattore di asimmetria e *single scattering albedo*).
- 6) le curve spettrali dell'irradianza solare ai tre livelli significativi definiti sopra.

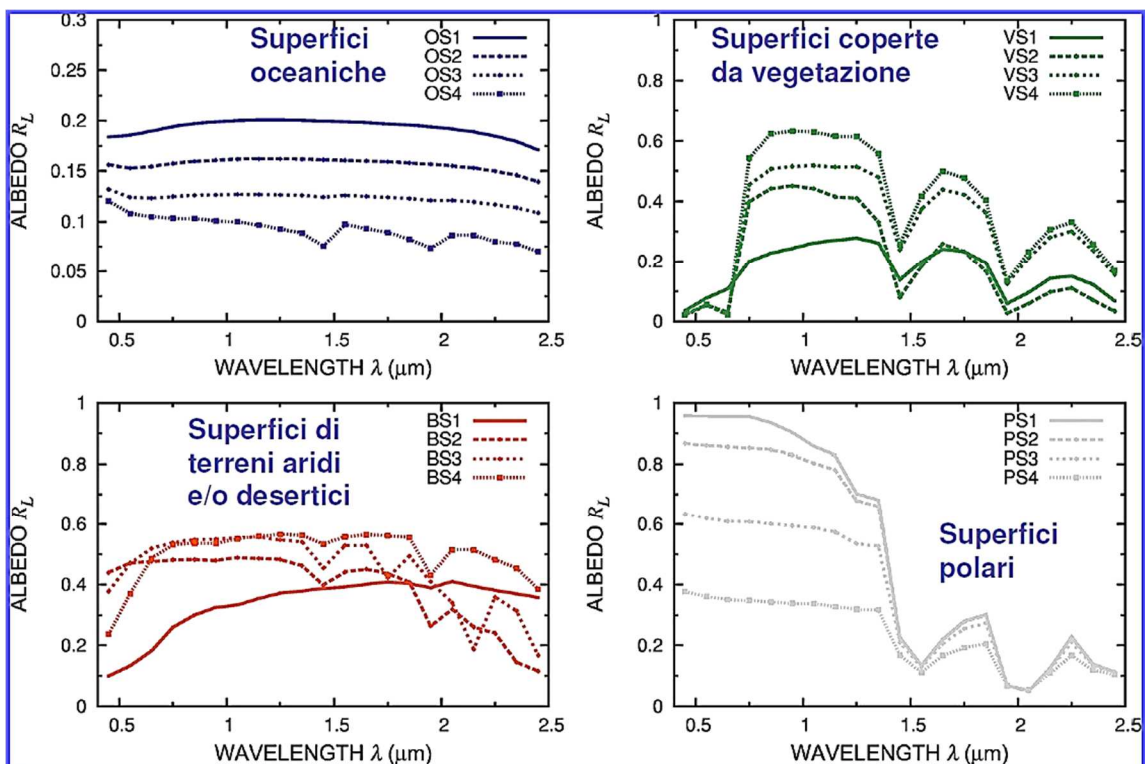
Esempio del procedimento seguito nel caso “Ruralcontinental aerosols over land surfaces”

Esempi di calcolo dei parametri necessari per la valutazione dei termini di DARF per diversi modelli di aerosol:

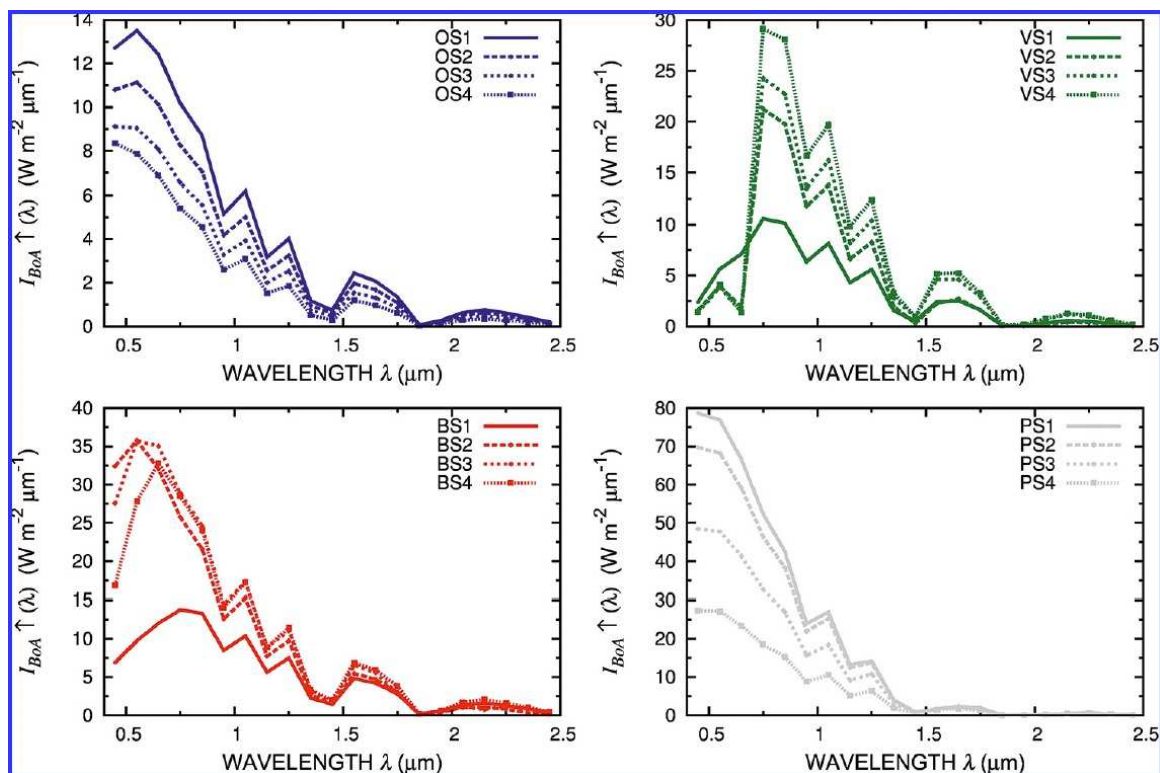
- Sopra: curve spettrali della parte reale $n(\lambda)$ e parte immaginaria dell'indice di rifrazione del materiale particolato definito prima per i modelli di aerosol SD-1 e SD-2 (Saharan Dust), PV-1, PV-2, PV-3 (Pinatubo volcanic particles), FT e BL (biomass burning particles).
- Sotto: curve spettrali del coefficiente di estinzione $\beta_{ext}(\lambda)$ e dell'albedo di singolo scattering $\omega(\lambda)$ per gli stessi otto modelli, normalizzati ad una concentrazione numerica totale di 1000 particelle per cm^3 di aria. Da Tomasi et al. (2013)



Nel calcolo del flusso di radiazione solare riflesso dalla superficie terrestre verso l'alto assume particolare importanza il tipo di superficie riflettente in quanto essa può dare valori di riflettanza della radiazione solare che sono nettamente diversi da un luogo all'altro. Si riportano esempi di riflettanza BRDF per diverse superfici:



Nelle immagini sopra si vedono le curve spettrali di albedo superficiale di Lewis e Barnsley (1994), definite sull'intervallo spettrale da 0.40 a 2.50 μm, per quattro quaterne di funzioni distributive della riflettanza bidirezionale (BRDF) definite per superfici oceaniche (OS) con diverse velocità del vento, superfici coperte da tipi diversi di vegetazione (VS), superfici di terreni aridi (BS) e superfici polari (PS). Da Tomasi et al. (2013). Seguono esempi di curve spettrali d'irradianza solare riflessa:



Nelle immagini sopra si vedono le curve spettrali dell'irradianza solare riflessa verso l'alto dalla superficie: essa è data dal prodotto dell'albedo spettrale della superficie terrestre per l'irradianza globale (diretta + diffusa) incidente al suolo, ottenuta per i 16 modelli di riflettanza superficiale considerati da Tomasi et al. (2013) per (i)

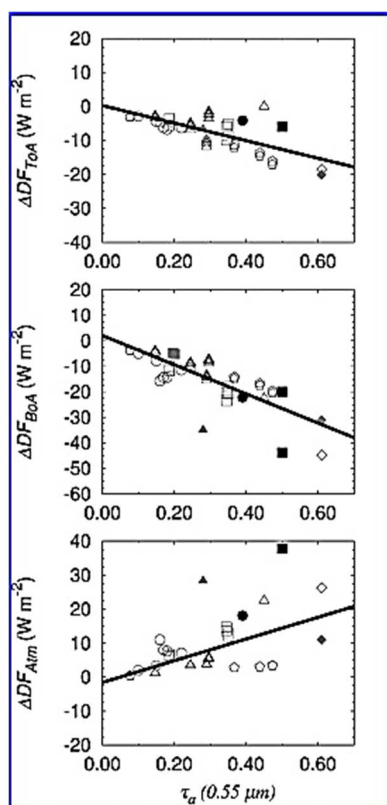
le caratteristiche ottiche del modello atmosferico "US62 atmosphere model" di Dubin et al. (1966), (ii) le proprietà di scattering e assorbimento del modello M-8 per aerosol di sola origine continentale, e (iii) spessore ottico dell'aerosol AOT ($0.55 \mu\text{m}$) = 0.10.

Il calcolo dei termini di Direct Aerosol-induced Radiative Forcing (DARF) ai tre livelli significativi del sistema superficie atmosfera è stato fatto per i seguenti nove tipi di aerosol di diversa origine sospesi sopra aree oceaniche o continentali:

- 1) Aerosol continentale in aree remote.
- 2) Aerosol rurale-continentale.
- 3) Aerosol continentale inquinato (da attività antropiche).
- 4) Aerosol misto di origini marine e continentali.
- 5) Polvere desertica (desert dust).
- 6) Aerosol prodotto da combustione di biomassa e incendi di foreste.
- 7) Aerosol di origine urbana e industriale.
- 8) Aerosol stratosferico di origine vulcanica.
- 9) Aerosol polare da diverse sorgenti.

ELENCO DEGLI ESPERIMENTI ESAMINATI PER VALUTARE GLI EFFETTI DI FORZATURA RADIATIVA DIRETTA DEGLI AEROSOL DI ORIGINE CONTINENTALE SU SUPERFICI OCEANICHE E CONTINENTALI		
Tipo di particella	Tipo di superficie	Esperimenti considerati
Remote continental	Land	PRIN-2004 (Tomasi <i>et al.</i> , 2015), AEROCLOUDS (Tomasi <i>et al.</i> , 2015a), ARCTAS (Le Blanc <i>et al.</i> , 2012), AERONET (Garcia <i>et al.</i> , 2012).
Rural-continental	Ocean	PRIN-2004 (Tomasi <i>et al.</i> , 2015), AERONET (Tafuro <i>et al.</i> , 2007).
Rural-continental	Land	PRIN-2004 (Tomasi <i>et al.</i> , 2015), AEROCLOUDS (Tomasi <i>et al.</i> , 2015), DOE/ARM/AIOP (Tomasi <i>et al.</i> , 2015), Granada University 1999 (Horvath <i>et al.</i> , 2002), NOAA/CMDL campaign (Delene and Ogren, 2002), AERONET (Yu <i>et al.</i> , 2006), Joint US – China 1999 project (Xu <i>et al.</i> , 2003), Joint US – China 1999 project (Yu <i>et al.</i> , 2006), East-AIRE (Liu <i>et al.</i> , 2007), East-AIRE (Xia <i>et al.</i> , 2007), East-AIRE (Liu <i>et al.</i> , 2011).
Continental polluted	Ocean	CLEARCOLUMN/ACE-2 (Tomasi <i>et al.</i> , 2015), PRIN-2004 (Tomasi <i>et al.</i> , 2015), CLEARCOLUMN/ACE-2 (Tomasi <i>et al.</i> , 2003), TARFOX (Hignett <i>et al.</i> , 1999), TARFOX (Russell <i>et al.</i> , 1999; Hignett <i>et al.</i> , 1999; Kinne and Poeschel, 2001).
Continental polluted	Land	CLEARCOLUMN/ACE-2 (Tomasi <i>et al.</i> , 2015), PRIN-2004 (Tomasi <i>et al.</i> , 2015), AEROCLOUDS (Tomasi <i>et al.</i> , 2015), DOE/ARM/AIOP (Tomasi <i>et al.</i> , 2015), INTEX-NA Phase A (Redemann <i>et al.</i> , 2006), ABC (Ramana <i>et al.</i> , 2004; Ramanathan <i>et al.</i> , 2007), East-AIRE over the whole China (Li <i>et al.</i> , 2007a, 2007b; Xia <i>et al.</i> , 2007a, Xia <i>et al.</i> , 2007b; Liu <i>et al.</i> , 2007).

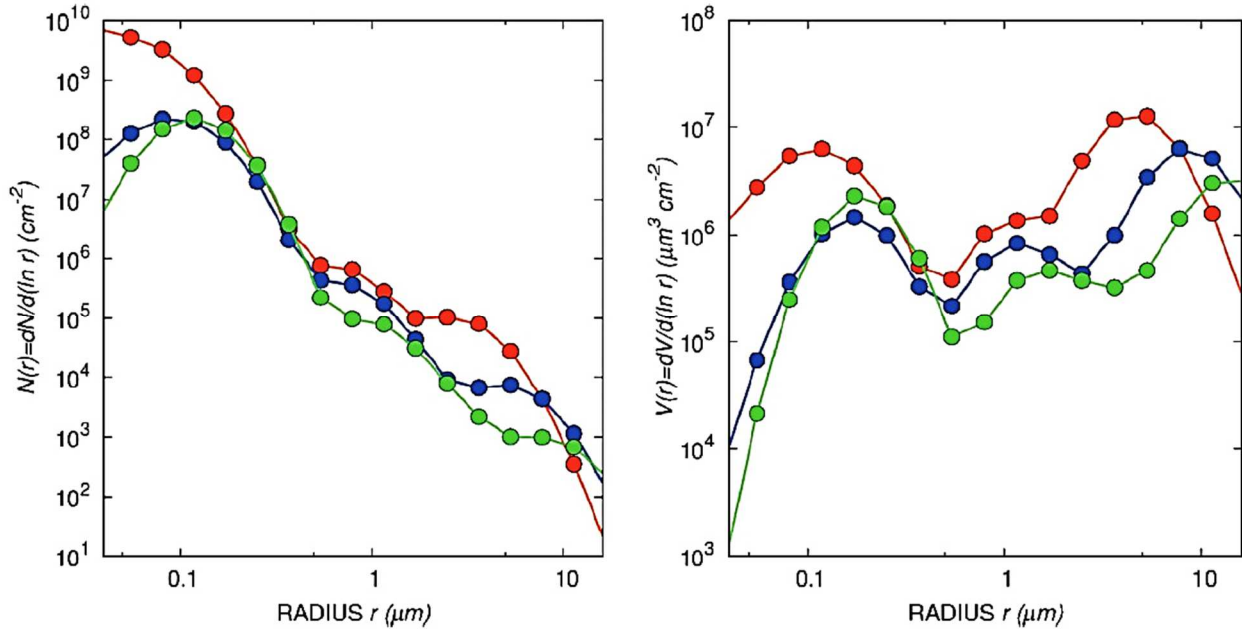
Si riporta come esempio il procedimento seguito nel caso "Ruralcontinental Aerosols over Land Surfaces":



Scatter plots dei valori medi giornalieri dei termini di DARF DDF_{ToA} (in alto), DDF_{BoA} (in mezzo) e DDF_{Atm} (in basso) in funzione dei corrispondenti valori medi giornalieri di spessore ottico dell'aerosol $\tau_a(0.55 \mu\text{m})$, determinati per diverse campagne di misura condotte per carichi di particelle di origine rurale-continentale sospesi sopra superfici continentali.

Tale regressione lineare dei termini DARF è garantita dal fatto che le forzature radiative DARF sono proporzionali allo spessore ottico dell'aerosol con variazioni contenute legate alle proprietà radiative delle particelle di aerosol.

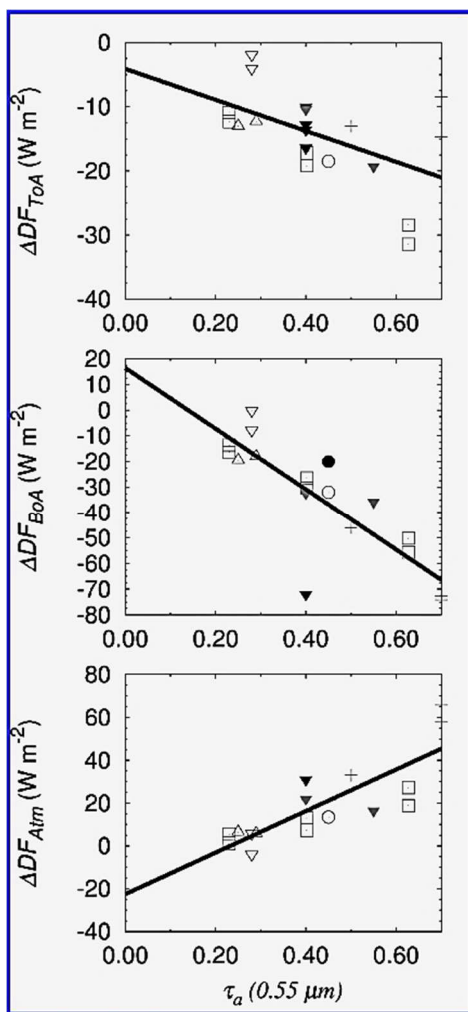
Nelle immagini che seguono si vedono le distribuzioni dimensionali di concentrazione numerica (a sinistra) e di volume (a destra) delle particelle di aerosol presenti nella colonna vertical atmosferica, derivate dalle misure SKYNET di fotometria solare condotte presso la stazione ISAC-CNR di San Pietro Capofiume (Italia) in tre giorni di misura dell'esperimento AEROCLOUDS: (i) 1 luglio, 2007 (07:45 UTC) (pallini rossi) per aerosol misto marino/continentale trasportato dall'Oceano Atlantico, Francia e Mar Ligure ($a = 1.347$); (ii) 15 ottobre, 2007 (11:45 UTC) (pallini blu) per aerosol continentale proveniente dall'Oceano Artico, Scandinavia ed Europa centrale ($a = 1.107$); e (iii) dicembre 19, 2007 (08:22 UTC) (pallini verdi) per aerosol continentale dall'Europa orientale ($a = 1.694$).



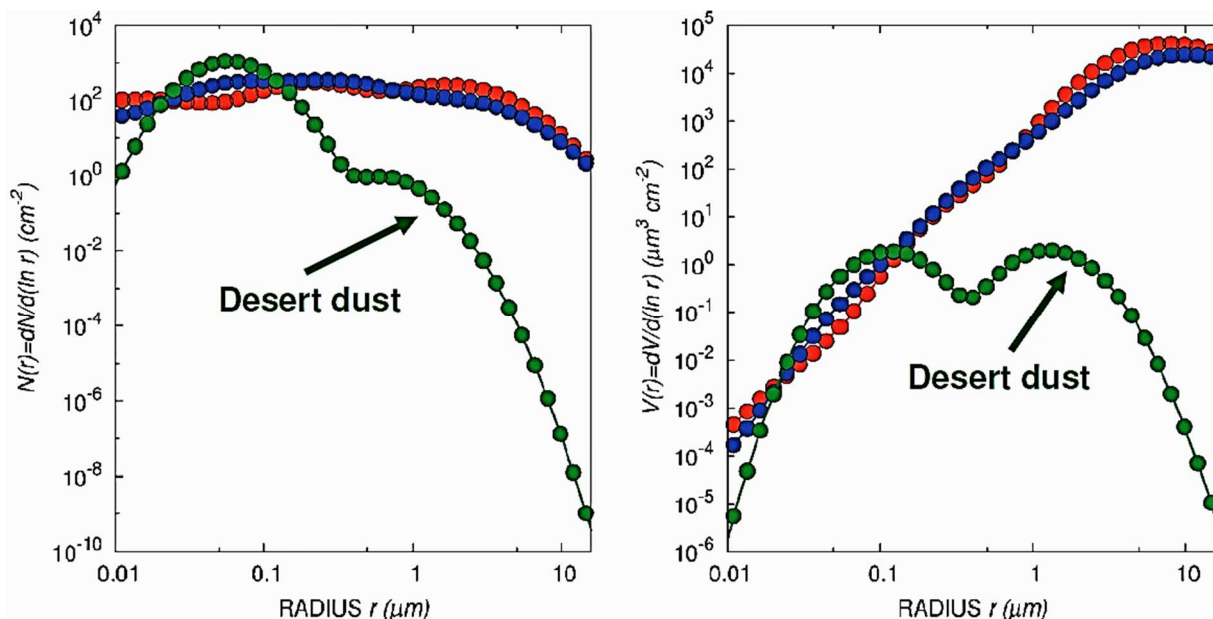
ELENCO DEGLI ESPERIMENTI ESAMINATI PER VALUTARE GLI EFFETTI DI FORZATURA RADIATIVA DIRETTA DEGLI AEROSOL DI ORIGINE MARINO-CONTINENTALE E DESERTICA SU SUPERFICI OCEANICHE E CONTINENTALI

Tipo di particella	Tipo di superficie	Esperimenti considerati
Maritime-continental	Ocean	CLEARCOLUMN/ACE-2 (Tomasi et al., 2015), PRIN-2004 (Tomasi et al., 2015), MINOS (Lelieveld et al., 2002; Markowicz et al., 2002; Yu et al., 2006), AERONET (Tafuro et al., 2007), MILAGRO (Schmidt et al., 2010), ACE-2, INDOEX and NASA DC-8 aircraft campaign (Kinne and Poeschel, 2001), ACE-2 (Yu et al., 2006), INDOEX (Meywerk and Ramanathan, 1999; Satheesh et al., 1999; Conant, 2000; Podgorny et al., 2000; Satheesh and Ramanathan, 2000; Podgorny and Ramanathan, 2001; Rajeev and Ramanathan, 2001; Ramanathan et al., 2001a, 2001b; Bush and Valero, 2002; Collins et al., 2002; Satheesh, 2002; Satheesh and Srinivasan, 2002; Markowicz et al., 2003; Sumanth et al., 2004; Redemann et al., 2006; Yu et al., 2006), R/V Sagar Kanya & MODIS and NOAA-14 AVHRR data (Tahnk and Coakley, 2002), ACE-Asia (Kim et al., 2005).
Maritime-continental	Land	CLEARCOLUMN/ACE-2 (Tomasi et al., 2015), PRIN-2004 (Tomasi et al., 2015), AEROCLOUDS (Tomasi et al., 2015), NOAA/CMDL campaign (Delene and Ogren, 2002), APEX (Nakajima et al., 2003), ACE-Asia (Bush and Valero, 2003; Won et al., 2004; Kim et al., 2004, 2005a, 2005b), AERONET (Yu et al., 2006), EAREX 2005 (Nakajima et al., 2007).
Desert dust	Ocean	PRIN-2004 (Tomasi et al., 2015), Aerosols99 (Tomasi et al., 2015), ACE-Asia (Yu et al., 2006; Kim et al., 2005; Christopher and Zhang, 2002), PRIDE (Christopher et al., 2003), CERES & MODIS (Li et al., 2004; Yu et al., 2006), UAE2 (Markowicz et al., 2008).
Desert dust	Land	PRIN-2004 (Tomasi et al., 2015), AERONET (Garcia et al., 2012), ACE-Asia (Won et al., 2004; Seinfeld et al., 2004; Kim et al., 2005a, 2005b), East-AIRE (Xia et al., 2007; Liu et al., 2011), ARM/AAF/SMART-COMMIT 2008 (Ge et al., 2010, 2011), satellite-borne observations over Cape Verde and Bidi Bahn (Hsu et al. (2000), AERONET and SHADE data (Tanré et al., 2003).

I risultati per il caso di "Desert Dust over Ocean Surfaces" sono riportati nei tre diagrammi dell'immagine che segue. Essa contiene gli: *scatter plots* dei valori medi giornalieri dei termini di DARF $DDFT_{oA}$ (in alto), $DDFBoA$ (in mezzo) e $DDFAtm$ (in basso) in funzione dei corrispondenti valori medi giornalieri di spessore ottico dell'aerosol $\tau_{a(0.55 \mu m)}$, determinati per diverse campagne di misura condotte per carichi di particelle di polvere desertica sospesi sopra superfici oceaniche.



Nell'immagine che segue sono riportate le distribuzioni dimensionali di concentrazione numerica (a sinistra) e di volume (a destra) delle particelle di aerosol presenti nella colonna verticale atmosferica, derivate dalle misure condotte in tre giornate di misura durante la campagna Aerosols99: (i) il primo caso si riferisce ad aerosol di origine marina nel mezzo dell'Oceano Atlantico (pallini blu); (ii) il secondo caso si riferisce ad aerosol di origine desertica trasportato sull'Oceano Atlantico dal Sahara (pallini verdi); e (iii) il terzo caso (pallini rossi) si riferisce ad aerosol originato da combustione di biomassa nella savana (Africa sud-occidentale).



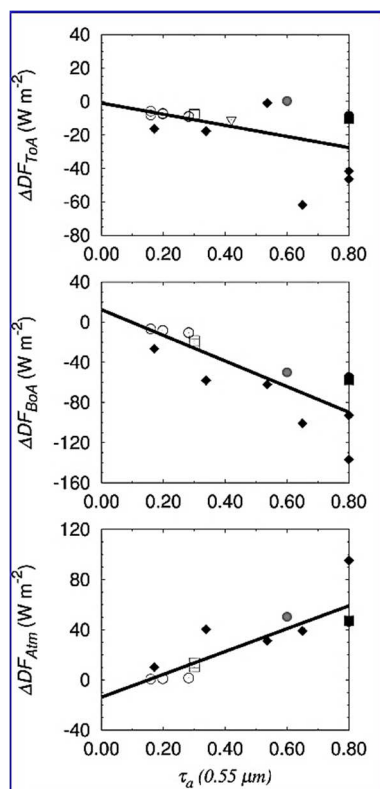
**QUADRO COMPLESSIVO DEGLI EFFETTI DI FORZATURA RADIATIVA DIRETTA
PRODOTTA DA AEROSOL CONTINENTALI, MARINI E DESERTICI SU SUPERFICI
OCEANICHE E CONTINENTALI PER IL VALORE DI SPESSORE OTTICO $\tau_a(0.55 \mu m) = 0.10$**

Tipo di particella	Tipo di superficie	Stime di ΔDF_{ToA} ($W m^{-2}$)	Stime di ΔDF_{BoA} ($W m^{-2}$)	Stime di ΔDF_{Atm} ($W m^{-2}$)
Remote continental	Land	0	- 8	+ 10
Rural-continental	Ocean	- 6	- 7	0
Rural-continental	Land	- 3	- 4	0
Continental polluted	Ocean	- 4	- 10	0
Continental polluted	Land	- 5	0	- 2
Maritime- continental	Ocean	- 5	- 8	0
Maritime- continental	Land	- 3	- 6	0
Desert dust	Ocean	- 6	+ 5	- 15
Desert dust	Land	+ 2	- 7	+ 8

In rosso sono indicati gli effetti diretti di riscaldamento

**ELENCO DEGLI ESPERIMENTI ESAMINATI PER VALUTARE GLI EFFETTI DI FORZATURA RADIATIVA DIRETTA
DEGLI AEROSOL DI ORIGINE ANTROPICA SU SUPERFICI OCEANICHE E CONTINENTALI**

Tipo di particella	Tipo di superficie	Esperimenti considerati
Biomass burning smoke particles	Ocean	Aerosols99 (Tomasi et al., 2015), SCAR-B (Ross et al., 1998), satellite data (Podgorny et al., 2003), CERES & MODIS data (Yu et al., 2006).
Biomass burning smoke particles	Land	DOE/ARM/AIOP (Tomasi et al., 2015), AERONET (Yu et al., 2006; Garcia et al., 2012), SCAR-B (Ross et al., 1998; Kinne and Pueschel, 2001; Yu et al., 2006), SAFARI-92 (Kinne and Pueschel, 2001), GOES-8 & CERES data (Christopher and Zhang, 2002; Yu et al., 2006).
Urban and industrial aerosol	Land	AERONET (Garcia et al. (2012), SCAR-A (Kinne and Pueschel (2001), Vienna City Experiment (Horvath et al. (2002), MILAGRO (Schmidt et al., 2010), CALNEX (Le Blanc et al., 2012), ACE-Asia (Kim et al., 2005).

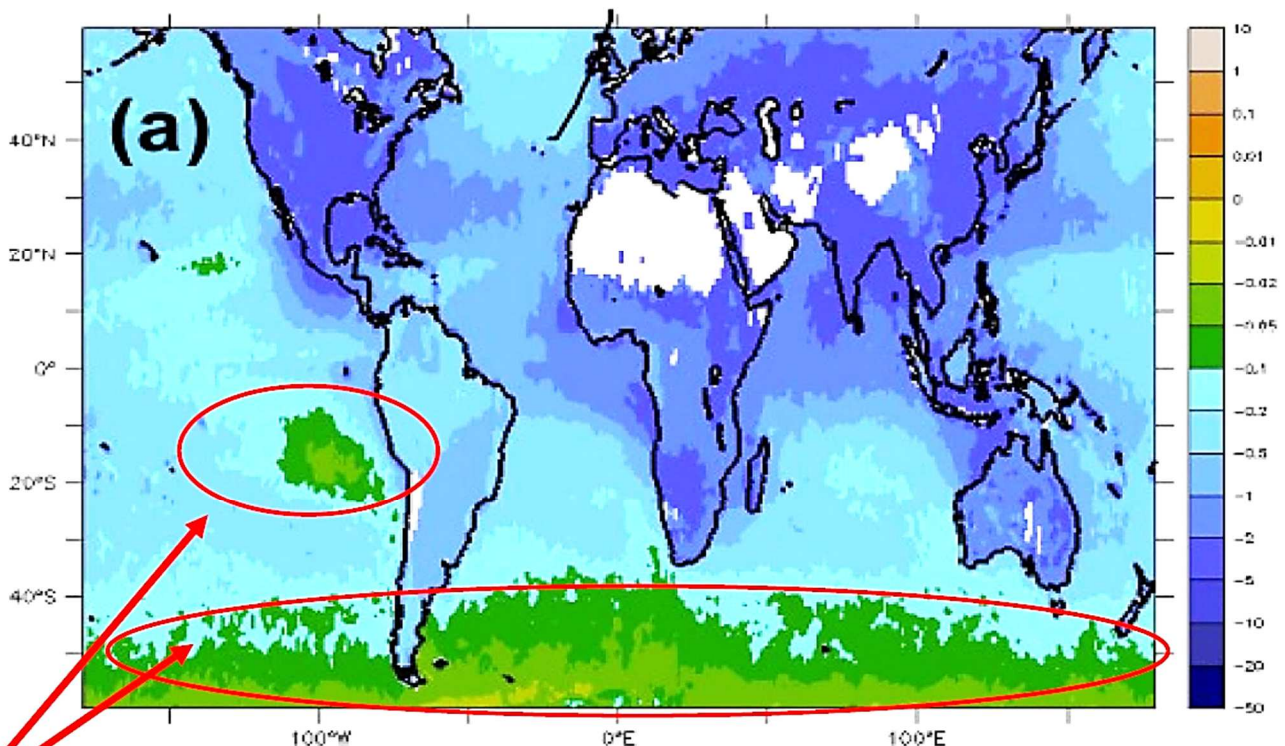


Nell'immagine a sinistra sono riportati i risultati del caso "Biomass Burning Smoke Particles over Land": gli *scatter plots* dei valori medi giornalieri dei termini di DARF DDF_{ToA} (in alto), DDF_{BoA} (in mezzo) e DDF_{Atm} (in basso) in funzione dei corrispondenti valori medi giornalieri di spessore ottico dell'aerosol $\tau_a(0.55 \mu m)$, determinati per diverse campagne di misura condotte per carichi di particelle di combustione (*biomass burning smoke*) sospesi sopra superfici continentali.

ELENCO DEGLI ESPERIMENTI ESAMINATI PER VALUTARE GLI EFFETTI DI FORZATURA RADIATIVA DIRETTA DEGLI AEROSOL DI ORIGINE POLARE E VULCANICA SU SUPERFICI OCEANICHE E CONTINENTALI		
Tipo di particella	Tipo di superficie	Esperimenti considerati
Polar aerosol	Ocean	POLAR-AOD IPY project (Tomasi et al., 2015) for (1) background Arctic summer aerosol, (2) background Antarctic summer aerosol, (3) Arctic haze, (4) dense Arctic summer aerosol, (5) Asian dust, e (6) boreal forest fire smoke.
Polar aerosol	Land	NOAA/CMDL measurements at Barrow (Delene and Ogren, 2002); POLAR-AOD IPY project (Tomasi et al., 2015) for (1) background Arctic summer aerosol, (2) background Antarctic summer aerosol, (3) Arctic haze, (4) dense Arctic summer aerosol, (5) Asian dust, e (6) boreal forest fire smoke.
Stratospheric volcanic aerosol	Land	Ev-K2-CNR (Tomasi et al., 2015), Mauna Loa Observatory measurements (Kinne and Poeschel, 2001).

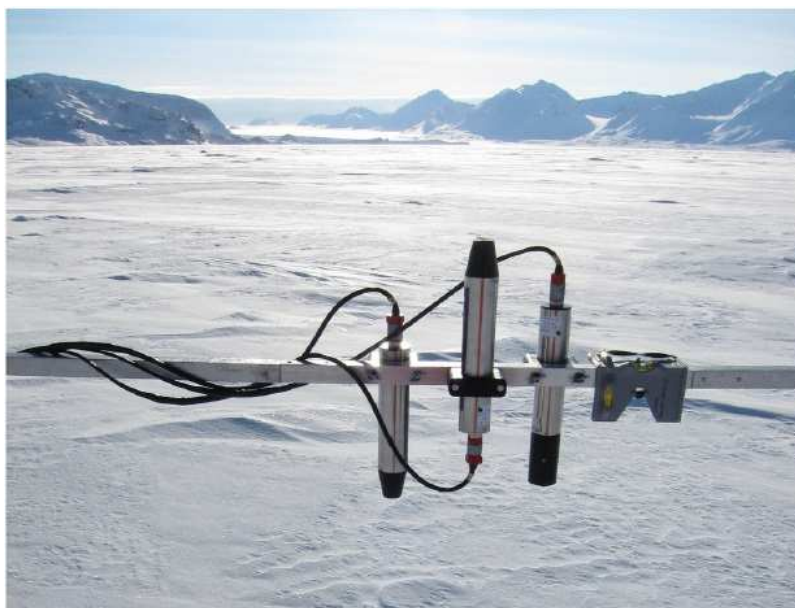
QUADRO COMPLESSIVO DEGLI EFFETTI DI FORZATURA RADIATIVA DIRETTA PRODOTTI DA AEROSOL ANTROPICI, POLARI E VULCANICI SU SUPERFICI OCEANICHE E CONTINENTALI PER IL VALORE DI SPESSORE OTTICO $\tau_a(0.55 \mu m) = 0.10$				
Tipo di particella	Tipo di superficie	Stime di ΔDF_{ToA} ($W m^{-2}$)	Stime di ΔDF_{BoA} ($W m^{-2}$)	Stime di ΔDF_{Atm} ($W m^{-2}$)
Biomass burning smoke particles	Ocean	- 12	- 26	0
Biomass burning smoke particles	Land	- 7	- 6	- 10
Urban and industrial aerosol	Land	- 4	- 4	0
Polar aerosol	Ocean	- 10	0	- 11
Polar aerosol	Land	0	- 4	+ 5
Stratospheric volcanic aerosol	Land	- 3	- 12	+ 7

Mappa globale della forzatura radiativa diretta media degli aerosol, derivata da Quaas et al. (2008) analizzando i dati satellitari raccolti dal marzo 2000 al febbraio 2005. Si noti la predominanza di bassi valori negativi e la presenza di valori leggermente positivi nell'Oceano Pacifico meridionale e in Antartide.



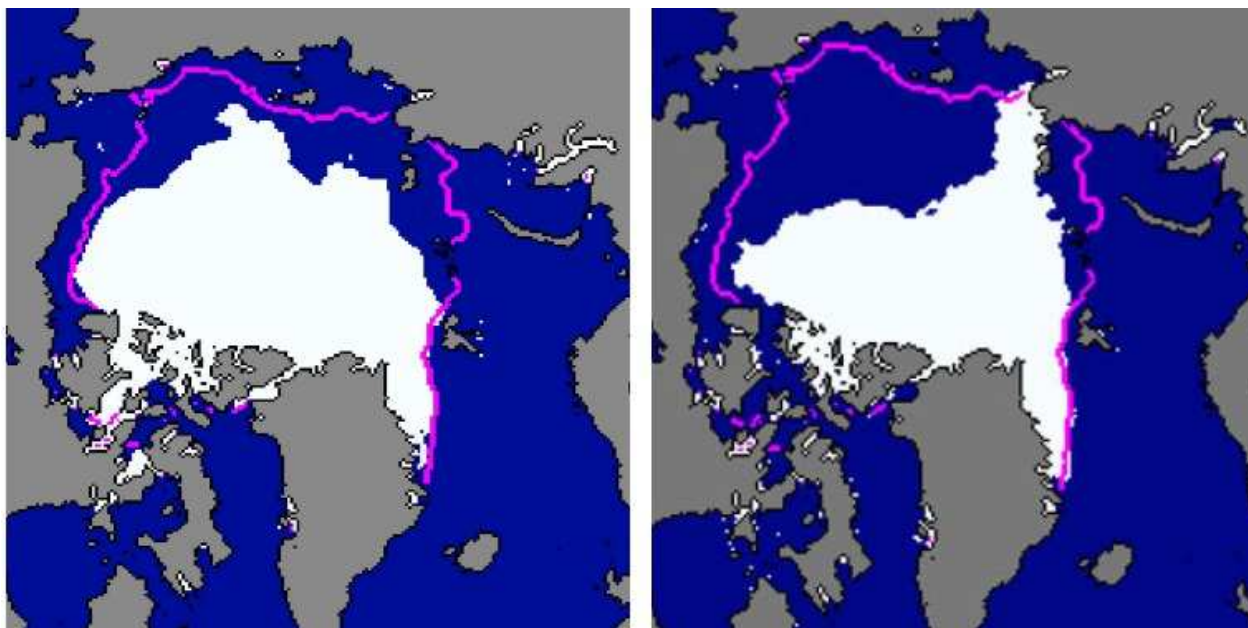
Un effetto di forzatura radiativa che potrà diventare sempre più intenso alle alte latitudini (con effetti più marcati in tutta l'area Artica) nei prossimi decenni è prodotto dalla deposizione di aerosol contenenti Black Carbon sulle superfici coperte da neve e ghiaccio, con la conseguente marcata diminuzione dell'albedo superficiale da valori di circa 0.6 – 0.8 nel visibile (per superfici coperte da ghiaccio non inquinato) a valori minori di 0.40 (per superfici coperte da ghiaccio "sporco").

Si stima che tale effetto di forzatura radiativa legato alla deposizione di BC alla superficie sia di + 0.04 Wm^{-2} , con piccole variazioni comprese per lo più tra + 0.02 e + 0.09 Wm^{-2} . Esso risulta essere considerevolmente più piccolo del termine complessivo di forzatura radiativa diretta prodotto dalle interazioni aerosol-radiazione nella regione Artica, che è stimato essere mediamente eguale a - 0.35 Wm^{-2} (con un range compreso tra - 0.85 e + 0.15 $W m^{-2}$).

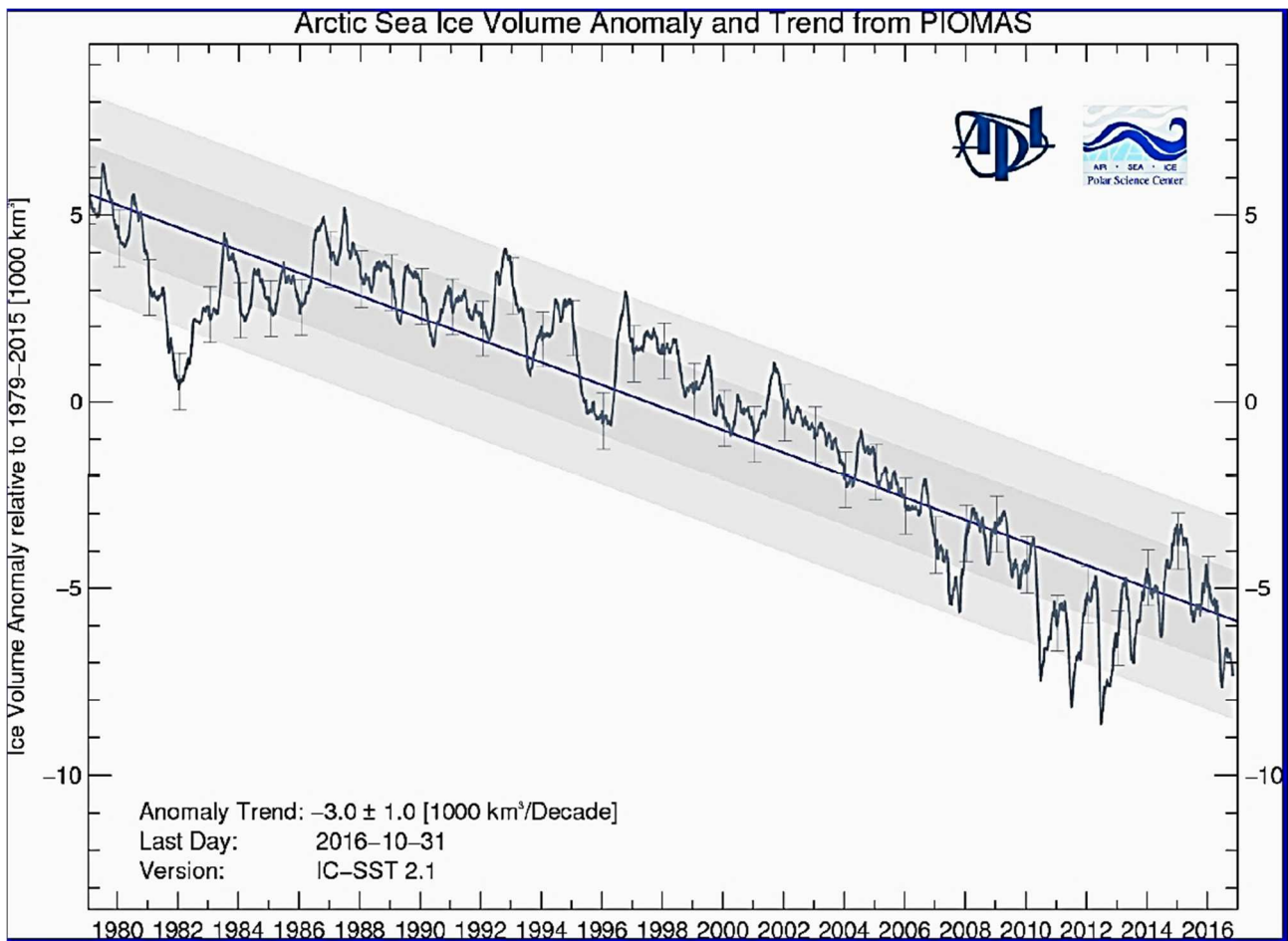


Sopra, immagine degli strumenti usati per le misure di riflettanza superficiale del ghiaccio effettuate nel Kongsfjorden Sea Ice (costa occidentale dell'isola di Spitsbergen nell'arcipelago delle Svalbard) in data 8 aprile 2011 (progetto Europeo CLIMSLIP).

Nella regione Artica è in atto un crescente effetto di forzatura radiativa prodotto dalla graduale diminuzione della superficie oceanica coperta da ghiaccio marino (e quindi dovuto alla variazione di albedo superficiale). Nelle due immagini che seguono è riportato un confronto tra la copertura estiva di ghiacci marini in Artico osservata a metà settembre del 2005 (a sinistra) e nel settembre 2007 (a destra). La curva color fucsia indica l'estensione media registrata negli anni precedenti tra il 2000 e il 2005.



Sotto: andamento dell'anomalia nel volume di ghiaccio marino presente nell'Oceano Artico secondo le stime fatte con il PIOMAS (Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System) durante il periodo dal 1979 al 2016. Secondo le previsioni fatte con i modelli dell'NCAR, la copertura di ghiaccio marino sopra l'Oceano Artico potrebbe scomparire completamente verso il 2100.



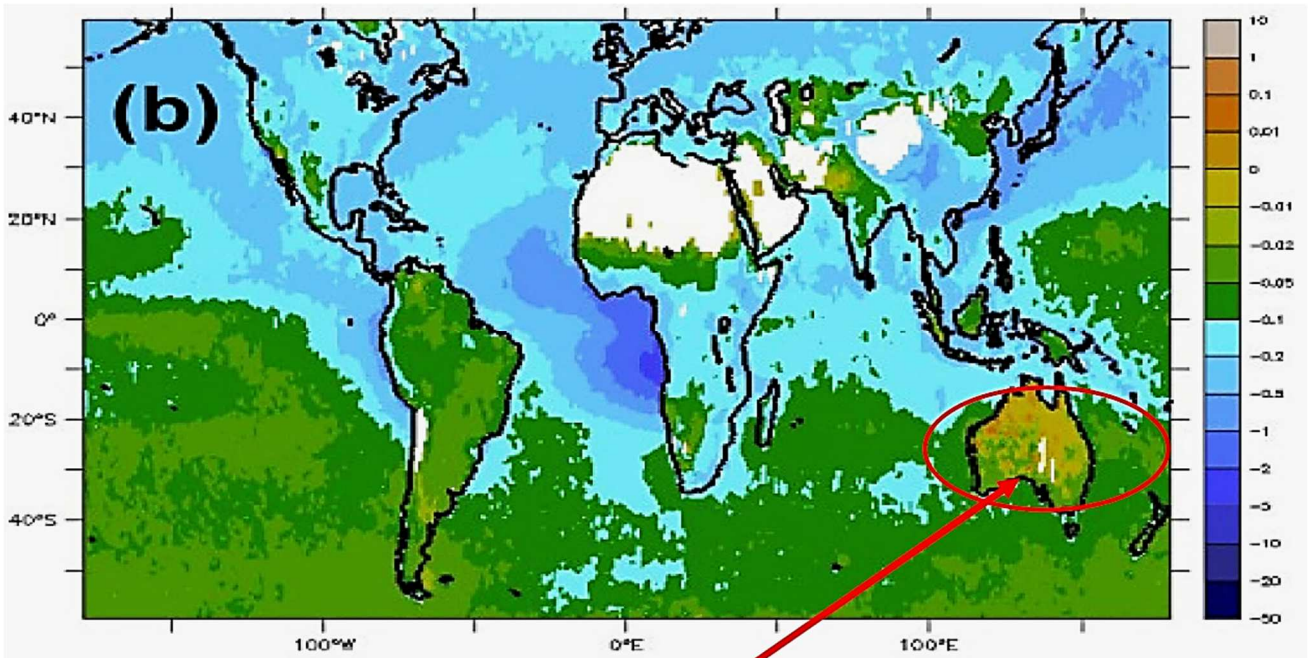
Gli effetti indiretti degli aerosol (derivanti dalle interazioni aerosol – nubi) costituiscono una delle cause di maggiore incertezza nella definizione degli attuali modelli climatici sulla scala globale (IPCC, 2000). I più importanti tra essi sono:

- 1) Il cosiddetto “*cloud albedo effect*”, chiamato anche “*Twomey effect*”.
- 2) Il cosiddetto “*cloud lifetime effect*” o “*Albrecht effect*”.
- 3) L’effetto semi-diretto.
- 4) L’effetto indiretto di “glaciazione”.
- 5) L’effetto “termodinamico”.

1) **Cloud albedo effect**

È l’effetto microfisicamente indotto dagli aerosol sulla concentrazione numerica (e sulle dimensioni) delle goccioline di nube, restando fisso il contenuto di acqua liquida. Esso è comunemente chiamato *primo effetto indiretto* (Ramaswamy et al., 2001), oppure *cloud albedo effect* (Lohmann and Feichter, 2005) oppure *Twomey effect* (Twomey, 1977). In esso più particelle di aerosol portano ad una più alta concentrazione di goccioline più piccole. Queste variazioni portano alla formazione di una nube che presenta caratteristiche di albedo più elevata. In questo processo, una più alta concentrazione di particelle di aerosol “inquinata” vicino al suolo può causare nubi di bassa quota più “scure” che presentano quindi caratteristiche di più bassa luminosità [Twomey, Atmos. Environ., 8, 1251, 1974].

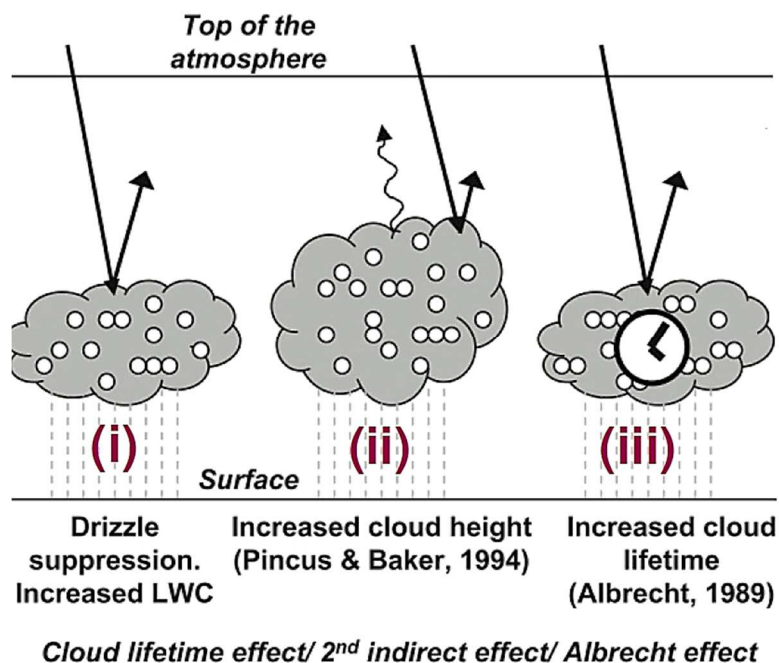
Nell’immagine che segue si vede la mappa della forzatura radiativa dovuta a questo primo effetto indiretto (*cloud albedo effect*) derivata da Quaas et al. (2008) dall’analisi di dati satellitari raccolti dal marzo 2000 al febbraio 2005. Si noti la prevalenza dei valori compresi tra -0.01 e -0.10 $W\ m^{-2}$ alle latitudini australi e di valori ancor più marcatamente negativi nell’emisfero boreale. Valori positivi (indicanti effetti di riscaldamento) sono stati trovati in Australia.



2) **secondo effetto indiretto** (Ramaswamy et al., 2001)

Consiste in un effetto microfisicamente indotto dagli aerosol (i) sul contenuto di acqua liquida, (ii) sull'altezza delle nubi e (iii) la vita media delle nubi. Esso è chiamato anche "*cloud lifetime effect*" (Lohmann and Feichter, 2005) o "*Albrecht effect*" (Albrecht, 1989). Accanto ad esso possono aver luogo altri processi d'interazione tra aerosol, nubi e precipitazioni che possono amplificare ed estendere questo secondo effetto indiretto.

Il *cloud lifetime effect* coinvolge tutti i tipi di nube. Alcune valutazioni delle forzature radiative indirette prodotte da questo effetto al livello ToA hanno fornito valori compresi tra -0.8 e -2.4 Wm^{-2} (Nakajima et al., 2001; Ramanathan et al., 2003; Takemura, 2004).



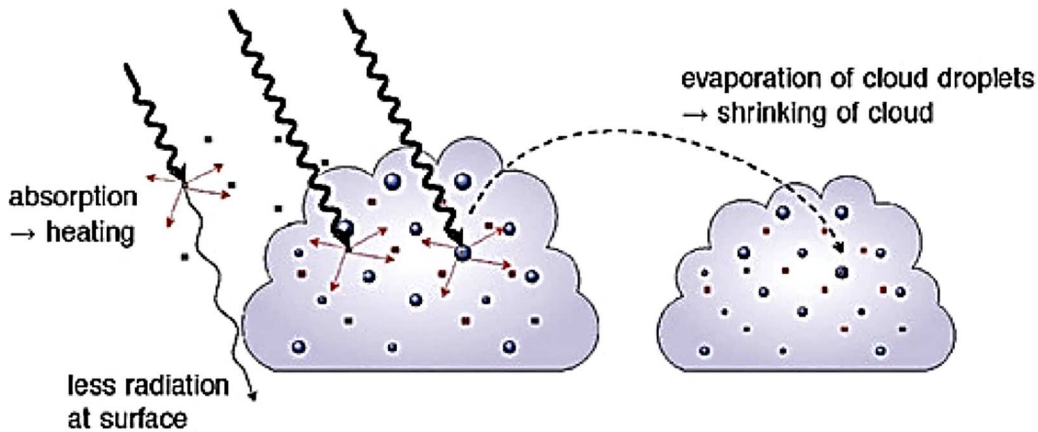
3) **Il cosiddetto effetto semi-diretto**

Il riscaldamento dello strato limite per assorbimento della radiazione solare da parte degli aerosol determina la conseguente alterazione delle caratteristiche di nuvolosità. Esso ha luogo in tutti i tipi di nube nei quali le particelle di aerosol altamente riflettenti (come quelle marine, generalmente a basso contenuto di sostanze assorbenti del tipo *soot*) tendono a rendere più luminose le nubi e a prolungarne la vita media. Al contrario, le particelle di aerosol molto assorbenti (in generale contenenti *black carbon* generatosi in processi

di combustione) producono l'effetto opposto, contribuendo a riscaldare l'atmosfera circostante e a far evaporare le goccioline di nube.

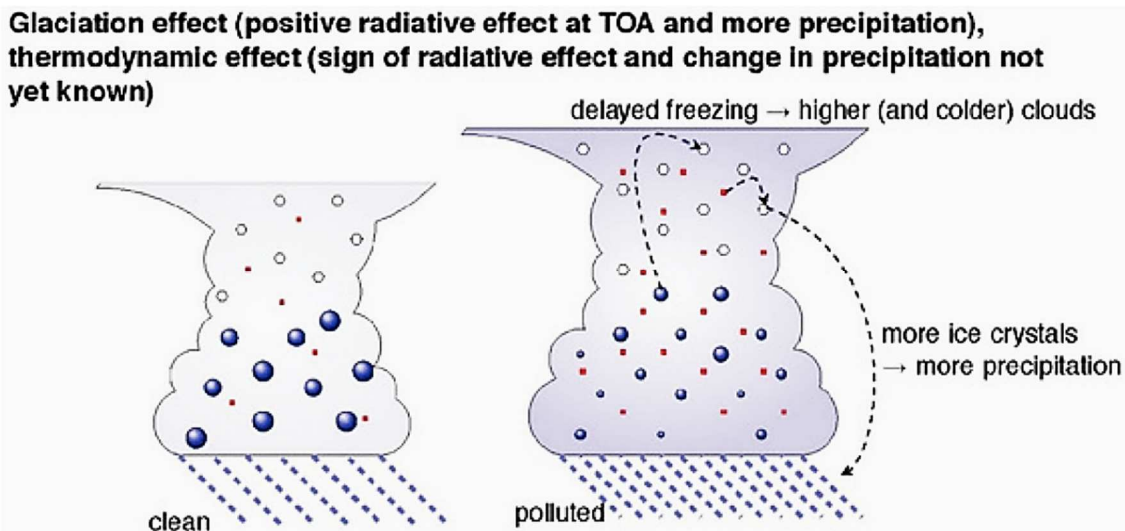
Questi processi possono indurre piccole variazioni sia nel flusso netto di radiazione al ToA level sia nel flusso globale medio della radiazione solare in arrivo alla superficie terrestre (vedi immagine seguente).

Semi-direct effect (positive radiative effect at TOA for soot inside clouds, negative for soot above clouds)



4) Il cosiddetto “effetto di glaciazione”

Interessa le nubi in fase mista, nelle quali un aumento della concentrazione di nuclei di ghiaccio porta ad un rapido ghiacciamento dell'acqua liquida super-raffreddata che si trova dentro la nube. A causa di tale effetto indiretto, un aumento nella concentrazione di nuclei di ghiaccio porta ad un aumento dell'efficienza di precipitazione, accompagnato da: (i) un aumento del flusso netto di radiazione al *ToA-level*, e (ii) un aumento del flusso netto globale di radiazione ad onda corta in arrivo alla superficie.



5) Il cosiddetto “effetto termodinamico”

Si forma a causa di un ritardo nel ghiacciamento delle goccioline più piccole di nube, che porta le nubi super-raffreddate ad estendersi a temperature più basse. Esso può generare cambiamenti non trascurabili nel flusso radiativo netto al *ToA-level* e nel flusso globale medio della radiazione ad onda corta in arrivo alla superficie.

Stime della forzatura radiativa effettiva (ERF) complessivamente dovuta agli effetti indiretti di aerosol e nubi

La ERF totale dovuta a tutti gli effetti dell'aerosol (calcolata escludendo l'effetto degli aerosol assorbenti su neve e ghiaccio) è valutata in media variare da - 1.9 a - 0.1 Wm^{-2} , e presenta un valore medio di - 0.9 Wm^{-2} , tale stima comprende gli effetti legati alle variazioni della vita media delle nubi e gli effetti microfisici degli aerosol nelle nubi (in fase mista, in fase solida e di tipo convettivo).

Contributi addizionali di forzatura radiativa effettiva (ERF) dovuta ad interazioni tra aerosol e radiazione hanno luogo tramite le emissioni di particolato da

- (i) *biomass burning* (con stime comprese tra -0.2 e $+0.2 \text{ W m}^{-2}$),
- (ii) nitrati (con stime comprese tra -0.3 a -0.03 W m^{-2}), e
- (iii) *mineral dust* (con stime da -0.3 a $+0.1 \text{ W m}^{-2}$).



**SOCIETÀ TORRICELLIANA
DI SCIENZE E LETTERE
FAENZA**

Corso Garibaldi n. 2 - 48018 Faenza
torricellianaafaenza@libero.it
www.torricellianaafaenza.it

Orario apertura sede

Sabato dalle 10.00 alle 12.00
oppure su appuntamento
(tel. 0546-682973)

Descrizione attività

Istituzione a carattere accademico, raccoglie cultori di scienze fisiche, naturali, morali, sociali letterarie divisi in soci residenti e soci corrispondenti. Fra i suoi obbiettivi rientra la promozione degli studi relativi a Evangelista Torricelli, della cultura scientifica, letteraria e storica in generale e della storia di Faenza, dalle origini ai giorni d'oggi.

Strutture gestite

Museo Torricelliano e Biblioteca Torricelliana.
Pubblicazione rivista "Torricelliana"