



**Antonello
Pasini**

CNR, Istituto
sull'Inquinamento
Atmosferico, Roma

Alla ricerca delle cause del recente riscaldamento globale

ABSTRACT

2012 is the "International Year of Sustainable Energy for all" but most of the energy we use comes from fossil fuels. We know that increasing the amount of CO₂ in the lower atmosphere can trap infrared radiation, increasing its temperature. Climate change has always been a result of natural causes, so is now the higher temperature really due to human activities? This paper discusses how science faces this problem and what answers have been found.

Introduzione: i pionieri

Che il clima sia sempre cambiato – anche quando l'uomo non era ancora sulla faccia della Terra – è un'evidenza che oggi abbiamo in maniera molto chiara. I carotaggi dei ghiacci antartici e della Groenlandia, ad esempio, mostrano il susseguirsi di ere glaciali e di periodi caldi interglaciali nelle ultime centinaia di migliaia di anni.

Il primo a trovare un motivo scientifico attendibile per questo fenomeno è stato Milutin Milanković (figura 1), un matematico serbo che nel 1941 legò questi cambiamenti del clima terrestre a periodicità nell'orbita e nell'asse di rotazione del pianeta, che creano variazioni nella quantità di radiazione solare in arrivo e nella sua distribuzione sulla Terra.

Prima di lui, nel 1896, il fisico-chimico svedese Svante Arrhenius (figura 2), basandosi anche su lavori precedenti del fisico-matematico francese Joseph Fourier, calcolò l'impatto di un eventuale aumento di anidride carbonica in atmosfera sulla temperatura dell'aria e si rese conto del "potere riscaldante" della CO₂. Fu anche il primo a stimare quantitativamente l'eventuale effetto serra aggiuntivo creato dall'emissione di anidride carbonica di origine umana.



Figura 2. Svante Arrhenius (1859-1927).

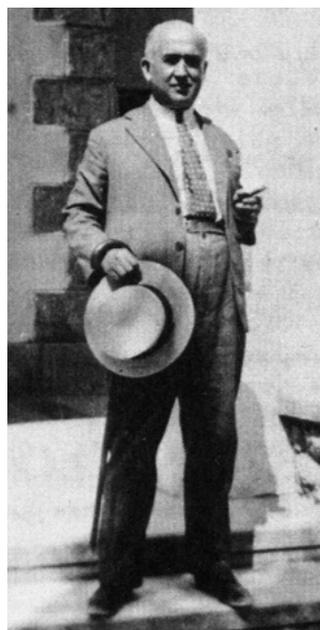


Figura 1. Milutin Milanković (1879-1958).

Le basi della moderna scienza del clima si fondano sicuramente sulle spalle di questi due giganti. Tuttavia, oggi sappiamo che i cicli di Milanković rendono conto egregiamente del passaggio dai periodi caldi alle ere glaciali, ma che per il passaggio inverso rappresentano probabilmente soltanto una causa di "innescò" delle deglaciazioni, perché la spiegazione della relativa rapidità di questi fenomeni necessita di fattori amplificanti come, ad esempio, il rilascio di gas serra intrappolati nei ghiacci in fusione. D'altro canto, anche l'incremento di temperatura causato dall'aumento di CO₂ va ad influire su altri processi in atmosfera e nel sistema clima che potrebbero amplificare o smorzare questo incremento. In sostanza, oggi sappiamo che in un sistema complesso

come il clima non possiamo analizzare soltanto l'effetto diretto di singole cause di cambiamento senza rapportarle con gli effetti (e le retroazioni) che esse innescano in tutto il sistema. Vediamo, allora, qual è la strategia per affrontare questo problema.

Il clima come sistema complesso

Una delle maggiori difficoltà nel parlare di clima a livello scolastico risiede nel fatto che la disciplina scientifica che si occupa dei cambiamenti climatici non rientra nei canoni della scienza che, generalmente, si studia a scuola. Per esempio, nei semplici esperimenti di meccanica che si effettuano alle superiori ogni fattore causale ha un determinato effetto e l'effetto finale di due o più cause è la somma degli effetti che sarebbero stati causati da ogni fattore preso singolarmente. Nel sistema climatico non è così. Qui abbiamo perduto quel "paradiso della linearità": non solo può mancare la diretta proporzionalità lineare tra una causa ed un effetto, ma addirittura possono esistere catene circolari causa-effetto in cui l'ultimo effetto della catena vada a retroagire sulla causa da cui è partita la catena stessa, cambiandone il valore. In questi casi si parla di retroazioni o *feedback*.

Il sistema climatico è proprio pensabile come costituito da vari sottosistemi in interazione tra loro: l'atmosfera, gli oceani, i ghiacci, il suolo, ecc. Ogni cambiamento in uno di questi sottosistemi influisce sugli altri e ne riceve *feedback* (figura 3). Di ognuno di questi sottosistemi conosciamo piuttosto bene la dinamica e le leggi che lo governano: ad esempio, sappiamo che l'atmosfera è un miscuglio di gas reali e che è anche un fluido, dunque per essa varranno le leggi della termodinamica e della fluidodinamica. Tuttavia, mentre i singoli elementi si possono studiare in laboratorio, la complessità dell'interazione tra i vari sotto-

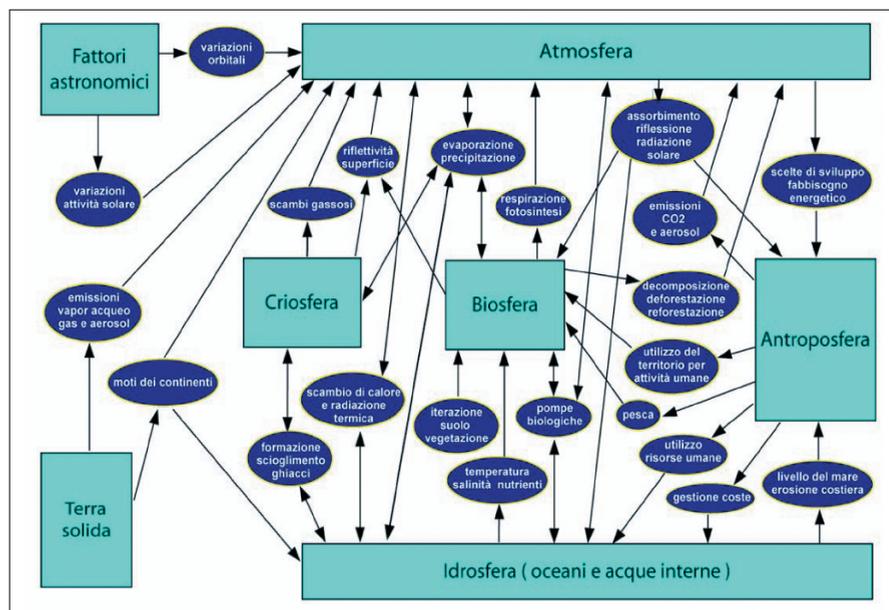


Figura 3. Il sistema climatico, come se lo rappresentano gli scienziati del clima. Variazioni in uno dei sottosistemi (nei rettangoli) si ripercuotono su tutti gli altri tramite le frecce che passano per fenomeni e processi fondamentali (nelle ellissi). Nel grafico si può sempre trovare almeno un percorso di frecce che costituisca una catena circolare che, alla fine, torna al sottosistema di partenza (retroazione o *feedback*). Figura tratta da P. Lionello (2006), in *Kyoto e dintorni. I cambiamenti climatici come problema globale* (a cura di A. Pasini), Franco Angeli editore.

sistemi non è gestibile nella realtà sperimentale: servirebbe una Terra gemella su cui fare esperimenti ma, è proprio il caso di dirlo, non ce la possiamo permettere!

In questa situazione, due cose appaiono chiare: non si possono fare quattro conti alla carlona sulle singole cause di cambiamento, ma tutti i fattori vanno pesati insieme; inoltre, non possiamo fare tutto ciò in un laboratorio reale. E allora?

La soluzione a questo rompicapo è venuta con l'avvento del computer: esso è divenuto un "laboratorio virtuale" in cui possiamo immettere la nostra conoscenza teorica dei sottosistemi, dei fenomeni e dei processi conosciuti, e possiamo valutare in maniera integrata i cambiamenti indotti da cause considerate esterne al sistema climatico, che qui è descritto nella sua dinamica. In sostanza, si sono sviluppati dei modelli climatici, i cosiddetti *Global Climate Models* (GCMs), che simulano nel computer il comportamento del clima, facendo evolvere nel tempo del modello il valore di grandezze come la temperatura e le precipitazioni, mediante sistemi di equazioni accoppiate.

La cosa che va sottolineata è che nell'attività di simulazione esiste un rapporto biunivoco tra le variabili presenti nel modello e quelle che possono essere misurate là fuori, nel sistema reale: così, la modellistica non rimane un bel gioco sganciato dalla realtà, ma, nel confronto con essa, fornisce direttamente un metodo per essere validata.

La validazione dei modelli e un esperimento numerico

E infatti, la bontà dei modelli climatici si apprezza sulla loro capacità di ricostruire il clima passato. Ciò che generalmente si vuole valutare sono i cambiamenti climatici apportati dalla variazione di cause (che diremo "forzanti") considerate esterne al sistema. Tra le forzanti naturali possiamo considerare le variazioni nella radiazione proveniente dal Sole e nelle polveri vulcaniche; tra quelle antropogeniche, cioè di origine umana, si possono annoverare le quantità di gas serra presenti in atmosfera, quelle di solfati o di polveri di vario tipo, e magari i cambiamenti nell'uso del suolo e nella deforestazione. Per validare un modello climatico, allora, si immettono nel modello i valori misurati o stimati di queste grandezze, ad esempio per l'ultimo secolo, e si va a vedere se il modello simula correttamente gli andamenti di alcune variabili medie (come la temperatura globale) e se presenta una loro distribuzione sul pianeta consistente con le osservazioni.

Un esempio di validazione di questo tipo è presentato in Figura 4 (parte a). Come si vede, l'insieme di questi GCMs è in grado di ricostruire egregiamente l'andamento crescente della temperatura globale nell'ultimo secolo, sia pur con una leggera sottostima del massimo termico intorno al 1940 e sovrastimando un po' il minimo relativo degli anni '50. È poi interessante vedere come venga colta molto bene la crescita decisa che parte dagli anni '60. Ulteriori validazioni (sia pur talvolta meno evidenti di questa) vengono dalla considerazione di altre variabili e dalle mappe spaziali degli output di questi modelli. Un aspetto che non va sottovalutato è che, anche se non esiste una ricetta univoca per costruire un modello, modelli diversi danno tutti ricostruzioni molto simili.

Un valore aggiunto estremamente importante del lavorare con i modelli è che, una volta che si abbia a disposizione un modello validato, si possono effettuare esperimenti che nella realtà non sarebbero possibili. I più interessanti sono quelli di *attribution*, tramite i quali cerchiamo di rispondere ad una serie di domande: quali sono state le cause fondamentali del recente riscaldamento globale? A cosa lo possiamo "attribuire"? Dipende da cause naturali o antropogeniche?

Sfruttando la libertà che abbiamo nel manipolare la realtà simulata nei nostri modelli, possiamo fare un esperimento numerico in cui le forzanti antropogeni-

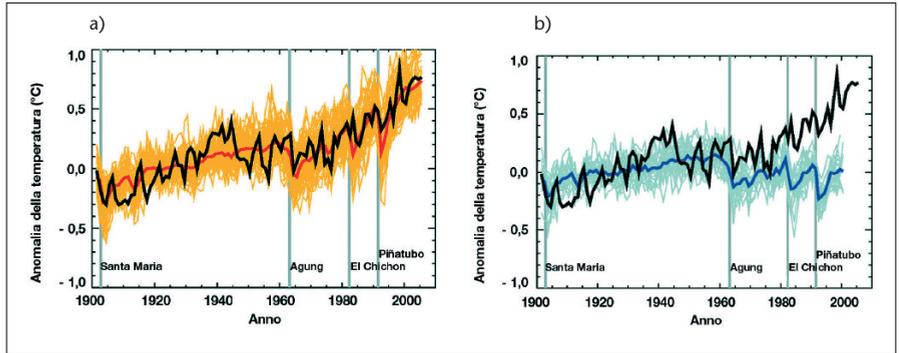


Figura 4. I risultati di un insieme di GCMs quando vengono loro forniti i dati reali di forzanti naturali e antropogeniche (a) e quando invece gli influssi umani vengono tenuti costanti a valori preindustriali (b). Linea nera = anomalie di temperatura globale; linee colorate sottili = risultati dei vari modelli; linee colorate spesse = media dei vari modelli. Le linee verticali mostrano le quattro più violente eruzioni vulcaniche del periodo. Figura adattata da IPCC (2007).

che si fissino arbitrariamente per tutto l'ultimo secolo a valori costanti caratteristici dell'epoca preindustriale. Ciò che accade nel modello viene mostrato in Figura 4 (parte b): in questo caso, a partire dagli anni '60 la temperatura media globale rimarrebbe quasi costante, a fronte della decisa crescita che è avvenuta nella realtà. Ciò è ovviamente un forte indizio che questa crescita è stata dovuta essenzialmente proprio al mutato valore delle forzanti antropogeniche, in primis dei gas serra, che quindi appaiono come le cause fondamentali del recente riscaldamento globale.

E se adottassimo un altro punto di vista modellistico?

Ovviamente un modello è sempre una rappresentazione approssimata della realtà: la nostra conoscenza teorica non è perfetta, immettiamo nei modelli i fenomeni e processi che riteniamo più importanti, altri li trattiamo in maniera indiretta, altri li trascuriamo perché ritenuti poco influenti. Pur con queste approssimazioni, i GCMs hanno mostrato buoni risultati e affidabilità nella ricostruzione del clima passato, tanto che ora li utilizziamo anche per effettuare proiezioni future. Nonostante ciò, in alcuni ambienti si continua ad asserire che le incertezze insite in questi modelli minerebbero l'affidabilità dei loro risultati.

Oggi, allora, la scienza del clima percorre anche altre strade di modellizzazione, con l'intento di analizzare il sistema climatico da diversi punti di vista, cosa questa che, in sistemi complessi, spesso fa scoprire aspetti complementari del problema sotto analisi o conduce a corroborare o a falsificare risultati ottenuti per altre vie.

Così, ad esempio, al CNR di Roma abbiamo cominciato ad affrontare il problema dell'*attribution* con metodiche diverse, cioè con modelli di intelligenza artificiale (reti neurali) e modelli regressivi precedentemente sviluppati per applicazioni econometriche (*Granger causality*). Tutti questi modelli hanno confermato, in maniera assolutamente indipendente e con metodiche esenti dalle critiche rivolte ai modelli precedenti, che sono state le forzanti antropogeniche a guidare il recente riscaldamento globale. In questi modelli, tra l'altro, è possibile inserire esplicitamente anche alcuni elementi di variabilità naturale del clima: facendo ciò si vede che neanche questi sono in grado di spiegare l'aumento di temperatura dell'ultimo secolo. Tutti questi risultati, per il modo assolutamente indipendente con cui sono stati ottenuti, appaiono particolarmente impressionanti!

Conclusioni

Insomma, la ricerca delle cause del riscaldamento globale recente non può essere condotta con l'analisi di singole cause alla ricerca della cosiddetta "pistola fumante" che, unica, possa spiegare tutti i cambiamenti. In questo sistema complesso non si può prescindere dall'uso di modelli che pesino in maniera integrata le varie cause di cambiamento e i vari effetti. Così facendo, utilizzando tra l'altro approcci modellistici molto diversi tra loro, emerge la chiara evidenza che i cambiamenti recenti del clima sono stati guidati essenzialmente dagli influssi delle attività umane.

Ecco quindi che, anche dal punto di vista climatico, l'Anno internazionale dell'energia sostenibile per tutti appare avere un senso molto chiaro.

Bibliografia

- [1] A. ATTANASIO, A. PASINI, U. TRIACCA (2012), "A contribution to attribution of recent global warming by out-of-sample Granger causality analysis", *Atmospheric Science Letters*, 13, 67-72.
- [2] S.E. HAUPT, A. PASINI, C. MARZBAN (eds.) (2009), *Artificial intelligence methods in the environmental sciences*, Springer, capitolo 12, pp. 235-254.
- [3] IPCC (2007), *Climate change 2007. The physical science basis*, Cambridge University Press, capitolo 9, pp. 663-745.
- [4] A. PASINI (2003), *I cambiamenti climatici. Meteorologia e clima simulato*, Bruno Mondadori.
- [5] A. PASINI (2007a), "Modelli matematici nello studio del clima". Prima parte: i modelli dinamici, *Lettera Matematica Pristem* 64, 24-34.
- [6] A. PASINI (2007b), "Modelli matematici nello studio del clima". Seconda parte: i modelli a rete neurale, *Lettera Matematica Pristem* 65, 35-43.
<http://matematica-old.unibocconi.it/interventi/pasini/pasinihome2.htm>
- [7] A. PASINI, *Il Kyoto fisso*, blog sulle pagine web di Le Scienze, <http://pasini-lescienze.blogautore.espresso.repubblica.it/>



Torino, ITIS "Avogadro", 26 maggio 2012.