

Il Clima che cambia: stato della ricerca e prospettive future.

Marina Baldi, Alfonso Crisci, Giampiero Maracchi, Francesco Meneguzzo

**Istituto di BioMeteorologia – CNR
Via G. Caproni, 8 – 50145 Firenze**

1 novembre 2003

f.meneguzzo@ibimet.cnr.it

<http://www.ibimet.cnr.it/clima/>



1. La Climatologia: storia e metodi.

Breve storia della Climatologia.

La Climatologia e' stata una materia poco studiata nella prima parte del 20 secolo. Visto il pubblico che aveva interesse in informazioni sul clima di una regione, non solo lo studio era regionale, ma si esauriva completamente nella descrizione di condizioni medie calcolate in base ad analisi statistiche classiche peraltro noiosissime. Fino a quegli anni, infatti, unici utenti dei risultati delle ricerche scientifiche in campo climatico erano da una parte gli agricoltori, preoccupati delle loro colture e dei loro raccolti, dall'altra gli ingegneri per la progettazione di ponti e dighe. Se poi ci riferiamo allo studio dei cambiamenti climatici, non solo era visto dai più come una contraddizione in termini, e solo pochissimi studiosi vi si dedicavano, senza scambio di informazioni fra loro e in modo del tutto occasionale.

Fu solo nel corso della seconda meta' del 20 secolo, quindi, che la climatologia e i cambiamenti climatici furono oggetto di studi da parte di scienziati singoli e poi di istituzioni universitarie e governative a livello globale, anche se era difficile da parte della comunità scientifica accettare questi problemi come scientifici, quando ancora la meteorologia stessa, nata molto tempo prima, era ancora considerata un'arte piuttosto che una scienza basata su fondamenti matematici e fisici.

La Seconda Guerra Mondiale e la Guerra Fredda poi diedero un forte impulso alle ricerche in diversi campi della Geofisica, incluse la meteorologia e la climatologia, pur se i centri di ricerca ed i singoli studiosi non erano ancora organizzati in modo da facilitare lo scambio di conoscenze, risultati, dati osservativi. La Seconda Guerra Mondiale e successivamente la Guerra Fredda e la rapida crescita della aviazione civile e la espansione economica furono l'occasione per formare in breve tempo un numero elevato di meteorologi da impegnare durante le operazioni.

Dopo la Seconda Guerra Mondiale, un grosso impulso a queste discipline venne dato durante l'anno Geofisico Internazionale, il 1957-1958, che vide la organizzazione di campagne di misura e di diverse conferenze ed incontri a livello internazionale.

Con il crescere dell'attenzione verso il problema del riscaldamento globale, negli anni 60, alcune di istituzioni interdisciplinari promossero il contatto e lo scambio fra studiosi di diversi aspetti legati al clima ed ai cambiamenti climatici.

La rapida espansione di questi settori di ricerca, assieme alle richieste di informazioni e conoscenze, nonche' di risposte, sempre piu' specialistiche ha iniziato a portare e sta tuttora portando queste discipline ad una sempre maggiore frammentazione in molteplici settori, con il rischio di perder di

vista l'oggetto principale delle conoscenze: la climatologia del sistema Terra, i suoi cambiamenti sia naturali sia conseguenti a modifiche dell'ambiente a causa delle attività umane.

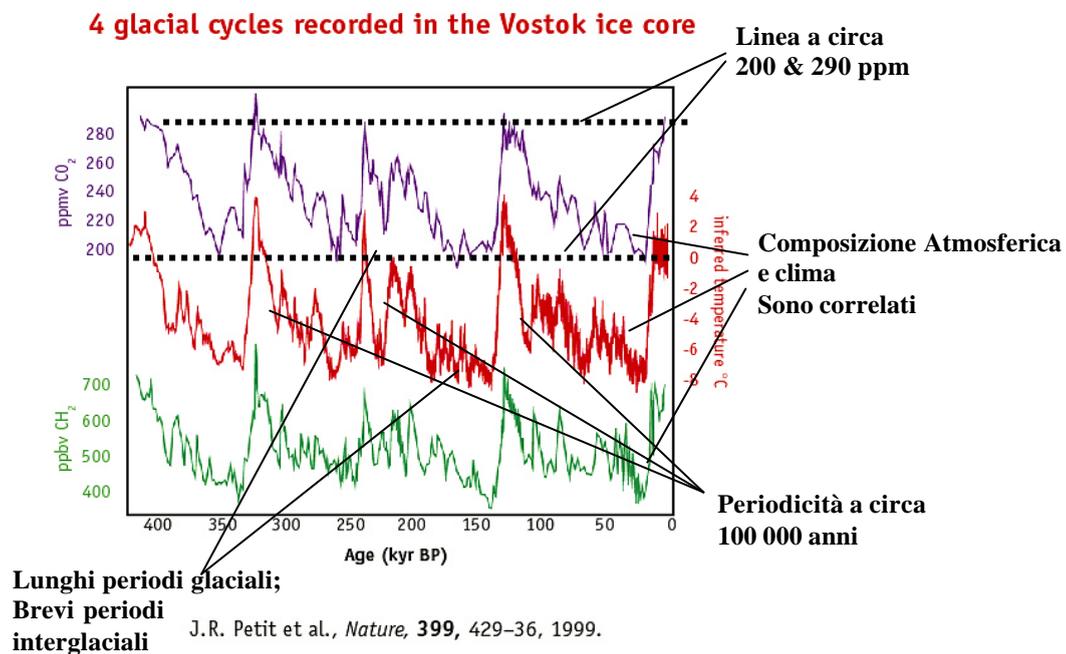


Fig.1.1 Variazioni di temperatura e di gas serra CH₄ e CO₂ negli ultimi 400 000 anni

2. Enti e Istituzioni preposte allo studio del Clima e dei Cambiamenti Climatici.

La Meteorologia e la Climatologia sono una delle Materie piu' antiche, gia' sciamani e sacerdoti delle piu' antiche civiltà si occupavano del tempo inteso in senso meteorologico, non fosse altro per assecondare i voleri degli Dei che comandavano la Natura, tuttavia solo dopo la Seconda Guerra Mondiale hanno iniziato ad assumere il carattere di vere e proprie Scienze e ad essere riconosciute come tali nel panorama mondiale, all'inizio come Scienze ancillari altre gia' consolidate quali la Fisica, la Geografia, fino ad assumere una connotazione ben precisa. Negli ultimi anni, data la relazione che vi e' fra queste Scienze e altre Scienze Biologia, Chimica, Geologia, si e' iniziato a parlare addirittura di una Scienza nuova che comprenda I diversi aspetti: la Earthlogy, ovvero il complesso delle Scienze che si occupano dello studio del Pianeta Terra nell'insieme.

Osservazioni meteorologiche sono state raccolte nel corso dei secoli da amatori, studiosi della disciplina (gia' egiziani, indiani, babilonesi, solo per citarne alcuni, e poi greci e romani per non parlare di personaggi del medioevo e rinascimento e del secolo dei lumi erano studiosi di meteorologia) ed in alcuni casi tramandate assieme al complesso di strumenti inventati ed adottati per misurare diverse variabili meteo-climatiche.

Meno sviluppato era il complicato compito delle previsioni meteorologiche basate in gran parte, fino agli inizi del XIX secolo su credenze popolari senza grandi progressi da quanto facevano antichi popoli quali i babilonesi. L'inizio della previsione sinottica ovvero su regioni vaste, previsione che presuppone la raccolta in tempi veloci e la contemporanea analisi di dati su tali regioni, si e' avuto solo nell'800, con la installazione di reti di osservatori di misura di variabili meteorologiche, reti che coprivano zone molto vaste. Solo nella seconda meta' del secolo XIX e' iniziato lo scambio di informazioni e dati fra le organizzazioni che gestivano le diverse reti di misura fino a confluire e coordinarsi nella Organizzazione Meteorologica Internazionale (OMI) nel 1873 e nella successiva Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM) nel 1951, tuttora attiva.

I servizi Meteorologici nazionali, la scuola di Bergen, la Meteorologia come supporto alle azioni belliche, diedero quindi impulso alla raccolta ed analisi di moli di dati sempre piu' ingenti e permisero l'affinamento di strumentazione sempre piu' sofisticata fino a sfociare nello sviluppo di satelliti in grado di fornire lo stato della atmosfera in tempo reale su tutto il globo. Attualmente tutti I diversi tipi di misura, da terra, da aereo, da satellite vengono utilizzati come dati di ingresso di sofisticati modelli di circolazione generale della atmosfera e dello oceano, utilizzati per la previsione meteorologica e climatologica. Diversi sono i centri che utilizzano tali modelli matematico-numeriche su scala globale, in grado quindi di prevedere la situazione meteo su una qualunque regione del Pianeta, in particolare il Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a

Medio Termine (ECMWF) a Reading, in UK, svolge tale attività nell'ambito di convenzioni con i diversi Paesi Europei e le previsioni da esso elaborate sono disponibili in tempo reale per qualunque utente via internet. Simili Centri o Servizi operano nei diversi Paesi Europei, Nord e Sud Americani, Asiatici, Africani, e insiemi di dati vengono raccolti in diversi centri specializzati. Vale la pena di citare a questo proposito, nuovamente l'ECMWF, ma anche l'University of East Anglia - Climate Research Unit (UEA-CRU, in UK), il Climate Prediction Center presso l'NCAR in USA, il GDCC per i dati di precipitazione, l'IRI, International Research Institute for Climate Prediction (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/>) per le previsioni stagionali, oltre ovviamente ai Servizi Meteorologici Nazionali: per l'Italia il compito spetta all'Ufficio Generale per la Meteorologia della Aeronautica Militare (www.meteoam.it). Accanto ai Servizi Meteorologici operano poi i servizi Agrometeorologici, sia Nazionali che Regionali, e per l'Italia il riferimento a scala Nazionale è rappresentato dall'UCEA, Ufficio Centrale di Ecologia Agraria (www.ucea.it) del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali, con sede a Roma.

Il lavoro svolto dai diversi servizi Meteorologici Nazionali e Regionali si inserisce in un quadro più ampio di ricerche e studi svolti presso le Università e i diversi Centri di Ricerca nazionali e internazionali, numerosi sia in Italia che all'Estero, con uno scambio ininterrotto e proficuo di informazioni, dati, risultati sia per quanto riguarda la Meteorologia che la Climatologia.

Nel nostro Paese un lavoro fondamentale viene svolto soprattutto presso Istituti del Consiglio Nazionale delle Ricerche (www.cn.it) presente in diverse città Italiane e presso l'ENEA (www.enea.it), oltre che da diversi Dipartimenti Universitari dove fra l'altro sono stati attivati numerosi corsi di Master non solo in Scienze Ambientali, ma anche più specificatamente in Meteorologia e Meteorologia Applicata. Un supporto fondamentale a queste ricerche viene poi dai dati da satellite e quindi, per quanto riguarda l'Italia, un ruolo importante è svolto dalla Agenzia Spaziale Italiana (www.asi.it) anche attraverso finanziamento di progetti che riguardano le osservazioni del pianeta Terra da satellite. È attualmente al varo del Governo il progetto di costituzione di un Centro Ricerche EuroMediterraneo che ha come scopo principale lo studio del clima, passato, presente e futuro della regione Mediterranea che dovrà contribuire ad un futuro analogo Centro di Ricerche Europeo.

La tesi dei cambiamenti causati dall'uomo ha il 95 % di probabilità di essere vera, e' quindi evidente che anche sulla base del principio di precauzione una probabilità così alta richiede una considerazione assai seria sia dei fenomeni in atto, che di quelli futuri, ed un atteggiamento di attenzione rispetto alle conseguenze di tali fenomeni.

Da diverso tempo quindi gli organismi internazionali si sono fatti carico di questo problema attraverso la Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente del 1992 che ha dato luogo alla

Convenzione sul Clima e successivamente, nel 1997, al protocollo di Kyoto sulla riduzione delle emissioni, per altro non ancora assunto al ruolo di Legge internazionale in quanto non ratificato da grandi Paesi.

In sintesi il Protocollo di Kyoto prescrive una serie di azioni il cui risultato finale nella prima estensione doveva essere il taglio del 5 % dei gas ad effetto serra. Questi sono in effetti, ad oggi, già aumentati di più del 20 % e quindi il taglio, necessario per ritornare alla situazione del 1990, dovrebbe essere del 25 %. Nel frattempo economie di paesi che nel loro insieme contano quasi la metà della popolazione mondiale, Cina ed India, hanno subito una impressionante accelerazione. La Cina si sta sviluppando ad un tasso annuo di circa l'8% a cui, naturalmente, è proporzionale l'emissione di gas ad effetto serra. L'entità del taglio nei paesi industrializzati, che se realmente attuato comporterebbe probabilmente gravi problemi mondiali in un momento di economia già assai debole se non in vera recessione, combinato con lo sviluppo di Cina ed India rende l'efficacia del protocollo di Kyoto assai dubbia e, forse, un vero e proprio alibi per non intervenire in modo più realistico e significativo.

Sarebbe allora più opportuno parlare delle misure di "adattamento", cioè di tutte quelle azioni da intraprendere per far fronte ad un clima che cambia. Ad esempio, limitandoci all'agricoltura - nonostante il problema riguardi moltissimi altri aspetti della società civile e del sistema produttivo globale - dovremmo preoccuparci di garantire risorse idriche negli anni con siccità prolungate sia invernali che estive, dovremmo preoccuparci di valutare gli effetti degli sfasamenti stagionali sulle varietà in uso ed, eventualmente, studiare l'introduzione di nuove varietà o di tecniche colturali che tengano conto dei mutamenti già avvenuti e di quelli previsti. Poiché il numero degli eventi estremi tendenzialmente aumenta con gravi danni alle aziende, è sempre più necessario studiare formule assicurative - con il parziale intervento pubblico - per garantire agli agricoltori una redditività media annua aziendale compatibile con una attività economica sana. Naturalmente tutto ciò non significa che non si debba pensare a come risolvere il problema dell'effetto dell'attività dell'uomo sul clima per evitare che il pianeta collassi ma questo, certamente, non può essere solo un semplice taglio delle emissioni in un sistema economico che rimane uguale a se stesso. La risoluzione del problema richiede numerosi interventi tra i quali probabilmente anche la modifica degli stili di vita e di consumo che non possono essere cambiati radicalmente in poco tempo senza sconvolgimenti dello stesso ordine di quelli naturali a cui andiamo incontro.

Da questo punto di vista il ruolo dell'amministrazione pubblica, della ricerca ma anche delle associazioni di categoria nell'affrontare il problema in modo serio e non episodico studiando soluzioni realistiche ed economicamente sostenibili, diventa l'unica garanzia per un futuro vivibile.

Da ultimo un paragrafo a se' meritano a questo punto l'IPCC e l'IGBP, sigle ormai ben note agli esperti del settore Clima e Cambiamenti Climatici.

La sigla IPCC sta per International Panel on Climate Change (www.ipcc.ch) ed e' l'organo internazionale, nato nel 1988 per volonta' della Organizzazione Mondiale di Meteorologia (WMO) e del Programma Ambiente delle Nazioni Unite (UNEP), preposto alla raccolta, analisi valutazione, in modo chiaro, oggettivo, trasparente delle informazioni tecniche, scientifiche, socio-economiche circa il cambiamento climatico indotto dalle attivita' umane, il suo impatto e le eventuali opzioni per l'adattamento e la mitigazione dei rischi. Il Panel non svolge ricerca in campo climatico, ne raccoglie dati, ma si interessa della stesura dell'Assessment Report sul problema del cambiamento climatico. Il report, giunto alla sua terza edizione, e' suddiviso in tre parti, corrispondenti alle linee di lavoro dei tre gruppi del Panel: Basi fisiche del cambiamento climatico, Impatto, Mitigazione dei rischi. Una nuova edizione del Report e' ora nello stato di pianificazione e raccolta del materiale che verra' quindi analizzato e vagliato da gruppi di climatologi di ogni parte del mondo in veste sia di autori che di revisori delle diverse sezioni del report. Da notare la scarsa presenza di climatologi ed esperti italiani che hanno contribuito al terzo Report: solo nove su un totale di 935!

La sigla IGBP indica invece l'International Geosphere-Biosphere Programme: A study of global Change of the International Council of Science (www.igbp.kva.se) ed e' un programma scientifico internazionale costruito sulla interdisciplinarieta', la integrazione e il networking. Missione dell'IGBP e' quella di fornire le conoscenze scientifiche perche' la societa' possa svilupparsi in armonia con il Pianeta Terra ed il suo ambiente. Il programma quindi ha come obiettivo quello di descrivere e capire le interazioni fra processi fisici, chimici, biologici che regolano il sistema Terra nel suo insieme, i cambiamenti che in esso avvengono, in quale modo il sistema e' modificato dalle attivita' umane, in quale modo il sistema Terra fornisce le per lo sviluppo della vita. L'IGBP lavora in stratto contatto con l'IHDP International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, il WCRP the World Climate Research Programme, e con [DIVERSITAS](#), un programma internazionale di scienze della biodiversita'.

3. Metodi e strumenti di ricerca scientifica

Posto che sia necessaria una integrazione fra Scienza e Società (ad esempio e' necessario analizzare la fattibilita', anche in termini economici e di impatto, delle pratiche sostenibili), occorre ancora chiedersi quale sia il ruolo della Scienza in generale e delle Scienze Ambientali in particolare. Esulando in questo ambito dal fare una analisi approfondita di questi temi, possiamo dire che i due obiettivi fondamentali della ricerca in Scienze Ambientali, ivi incluse la Meteorologia e la Climatologia, sono:

- I. Capire le complesse interazioni fra diversi fattori:
 - L'ambiente terrestre e la Natura
 - La popolazione
 - La Tecnologia
 - L'industria
 - Le Risorse e l'Impatto dell'utilizzo di risorse
- II. Prevedere e Prevenire, laddove possibile, i diversi fenomeni, integrato ad un discorso piu' generale di Sviluppo Sostenibile.

Gli strumenti usati nella ricerca nel settore Ambientale sono due: il Metodo Scientifico ed i Modelli. Nella ricerca scientifica, specie in un settore cosi incerto come la Climatologia, occorre quindi attenersi ad alcune regole fondamentali che sono:

- Adozione di un Metodo Scientifico.
- Sviluppo di una Metrologia.
- Sviluppo di Teorie fondamentali o di base.
- Sviluppo di Modelli Scientifici.

Per prima cosa, compito dello Scienziato, a prescindere dalla disciplina in cui e' esperto, e':

- Osservare
- Raccogliere Dati
- Effettuare Misure ed Osservazioni
- Ipotizzare ed Elaborare delle Teorie
- Verificare le teorie sviluppate ed eventualmente fare previsioni.

I dati quindi sono la base di qualunque Ipotesi. Una Ipotesi, solo se confortata dai dati e dai test puo' diventare una teoria o legge. Poiche' non e' possibile studiare tutti i vari casi, ovvero tutte le manifestazioni di un determinato fenomeno, allora si procede con uno studio statistico che permetta di fornire la maggior informazione possibile del fenomeno.

Le informazioni che vengono estratte dallo studio, anche statistico, dei dati, permettono di formulare delle leggi e delle teorie. Occorre quindi una serie di misure che permettano di affinare e rendere piu' possibile rappresentative della realta' le leggi e teorie elaborate attraverso la Metrologia ("Misurare cosa e' misurabile e rendere misurabile tutto cio' che ancora non lo e'", Galileo Galilei, 1564 – 1642).

Ovviamente la Scienza e la elaborazione di Teorie e Leggi corrono dei seri rischi, in quanto elaborate da menti umane, dovuti a cattive interpretazioni dei dati e dei fenomeni analizzati, a credenze e opinioni personali o indotte. E' quindi necessario un processo di revisione di ciascuna teoria da parte di esperti dello stesso settore di ricerca che convalidino i risultati ottenuti e le teorie elaborate.

Le Scienze Ambientali e con esse la Climatologia, comportano una integrazione e connessione fra diverse discipline quali: Fisica, Chimica, Biologia, Geologia, Conservazione dei Beni Ambientali, Tecnologia, Politica, Scienze Demografiche, Sociologia, Psicologia, Etica, Studi Giuridici, Economia. Questo comporta delle limitazioni dovute principalmente al grande numero di variabili in gioco, alla loro complessita'. In particolare, dati in accurati portano a previsioni in accurate, a stime non accurate delle interazioni fra le diverse variabili.

Il metodo scientifico si serve di modelli, che altro non sono se non dei mezzi per riprodurre in modo piu' fedele possibile i fenomeni osservati. Essi possono essere di diversi tipi:

- **Modelli Matematici** i quali, attraverso equazioni e formule matematiche descrivono e prevedono il comportamento di un sistema, attraverso un numero limitato di parametri.
- **Modelli Fisici** che sono delle riproduzioni, in miniature, di sistemi piu' grandi e che vengono utilizzati per prevedere il comportamento del sistema attuale.
- **Modelli Concettuali.** Essi descrivono le relazioni fra le variabili del sistema ed in particolare mettono in relazione le variabili fondamentali con quelle secondarie, individuando cause ed effetti.

- **Modelli Semplici Teorici.** Questi non sono altro che le complesse relazioni fra le diverse variabili del sistema così come vengono elaborate dalla mente umana di colui che studia il problema prima di svilupparli in modelli di altro tipo, ad esempio concettuali.
- **Modelli Grafici.** Rappresentano in modo grafico, appunto, quindi facilmente interpretabile dalla mente umana, quello che è un modello astratto di tipo, ad esempio, teorico o concettuale, utilizzando una simbologia convenzionale.

I modelli possono essere utilizzati per fare delle previsioni del comportamento del sistema nel suo complesso, basandosi sulle relazioni e le contro-reazioni (feedback) positive e negative fra le varie componenti del sistema. Questo ovviamente comporta dei limiti in quanto non tutto ciò che sembra essere correlato lo è in realtà, né tutto ciò che è considerato causa provoca un effetto immediato, ma vi può essere uno sfasamento, né sempre l'effetto di più cause si somma algebricamente, ma diverse cause concomitanti possono amplificare l'effetto, non ultimo errori nelle osservazioni o dati, limiti intrinseci del sistema, comportamenti caotici del sistema stesso possono contribuire a rendere il sistema altamente imprevedibile.

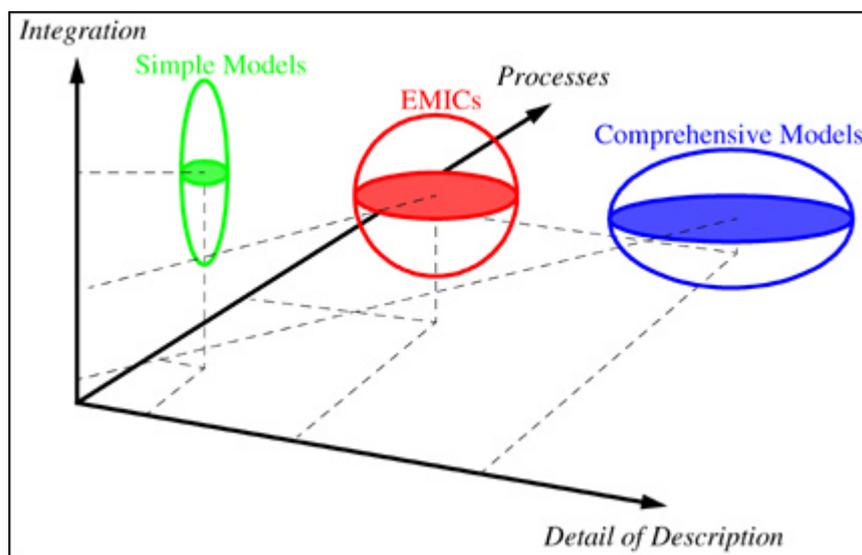


Fig 3.1 Dettaglio delle descrizioni introdotte nei Modelli per il Sistema Terra a diversi gradi di complessità: Modelli Semplici, Modelli di complessità intermedia (EMIC), Modelli Completi. Modelli di tipo EMIC, pur non essendo completi, se utilizzati per ricreare i climi del passato, sono in grado di riprodurre il collasso del sistema ecologico sahariano avvenuto circa 5500 anni fa.

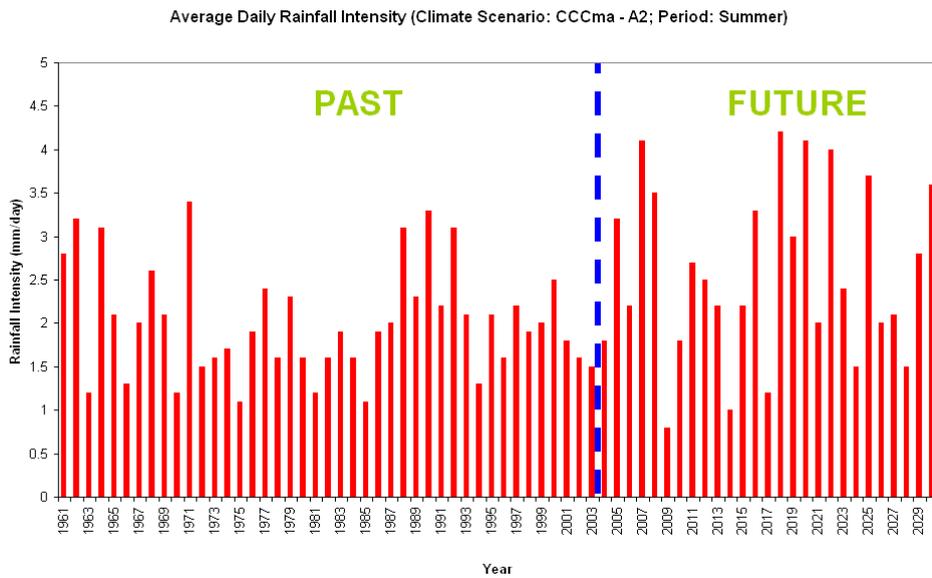


Fig. 3.2. Scenario futuro di precipitazioni sull'Italia prodotto dal modello di circolazione generale Canadese CCCma

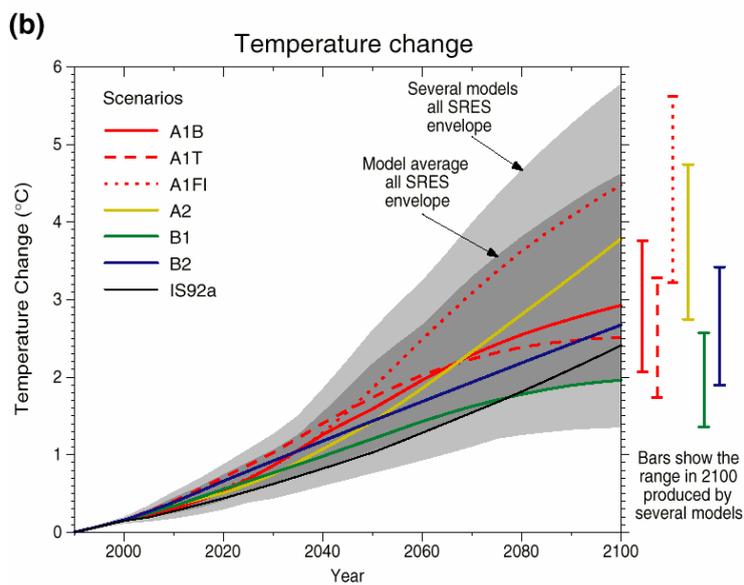


Fig. 3.3. Alcuni scenari futuri di variazioni di temperatura , corrispondenti a diverse evoluzioni del sistema Terra ipotizzate dall'IPCC, per diverse scelte socio-economiche. Fonte: IPCC, WG1, rapporto 2001, Summary for policymakers

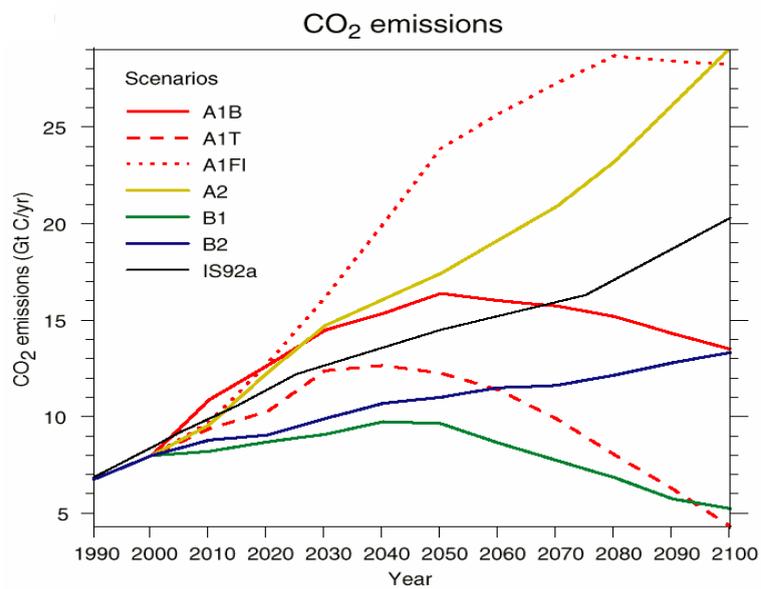


Fig. 3.4. Alcuni scenari futuri di emissione di gas serra espressi in tonnellate equivalenti di CO, corrispondenti a diverse evoluzioni del sistema Terra ipotizzate dall'IPCC, per diverse scelte socio-economiche. *Fonte: IPCC, WGI, rapporto 2001, Summary for policymakers*

4. Ricostruzione dei climi del passato.

Si definisce scenario una descrizione plausibile di come un sistema si può sviluppare nel futuro, in base ad una serie di assunzioni o ipotesi consistenti e di relazioni fra elementi che forzano il sistema stesso. Tale descrizione di per sé non costituisce né una predizione né una previsione.

La ricerca climatica attualmente si interessa per lo più di fornire degli scenari di andamento climatico possibile nei prossimi secoli in relazione alle modifiche della composizione chimica della atmosfera, modifiche legate alle attività umane, e quindi ad una variazione/potenziamento dell'effetto serra.

Tali ricerche si sviluppano secondo due linee fondamentali che sono la messa a punto di modelli di scenario climatico e la ricostruzione del clima del passato fino ai climi delle diverse ere geologiche del pianeta Terra.

Il primo metodo consiste nel fare delle simulazioni di come sarà il clima futuro con dei modelli matematici di circolazione generale della atmosfera (GCM – General Circulation Models). Si procede inizialmente con la riproduzione del clima attuale, quindi delle precipitazioni, temperature, campi di pressione atmosferica, tipi e moto delle perturbazioni atmosferiche.

Nella seconda fase si usa lo stesso tipo di modello per simulare quale sarà il clima del futuro e quindi di nuove piogge, temperature etc qualora il bilancio di energia del Pianeta Terra venga modificato dalla variazione della concentrazione di gas serra.

La terza fase consiste nel valutare quali sono gli impatti di questo clima futuro sugli ecosistemi e sull'ambiente, ivi inclusi il livello del mare, la quantità ed estensione dei ghiacciai e dei ghiacci marini, fino a giungere a valutazioni di tipo socio-economico che il cambiamento climatico porta.

Per la ricostruzione dei climi del passato occorre procedere tramite prove di campo e prove documentarie.

Sono prove di campo tutti quei dati *naturali* che vengono raccolti, analizzati, organizzati e studiati da ricercatori di diverse discipline quali la fisica, la chimica, la biologia, le scienze naturali, la geologia.

Questi archivi naturali conservano le tracce di processi influenzati dal clima e sono articolati in due sottogruppi: da un lato in supporti di dati non organici, come carote di ghiaccio, depositi in acque ferme (depositi lacustri, varve, sedimenti fortemente calcarei), morene di ghiacciai spariti e arretrati, materiale di riempimento accumulato in fosse, nei fondivalle, nel processo di formazione dei terrazzamenti; dall'altro in supporti di dati organici, come anelli di accrescimento delle piante (dal 700 ca.), resti vegetali e animali (ad esempio coleotteri, larve di tricotteri), pollini e spore fossili, legno fossile, formazioni di torbiere.

Vengono quindi considerati dei registratori naturali del clima alcuni parametri quali:

- gli anelli formati dagli alberi nel corso della loro crescita,
- gli scheletri dei coralli delle barriere tropicali,
- le carote dei ghiacci perenni e polari,
- i sedimenti geologici marini e lacustri,
- la torba,
- il polline,
- l'avanzata e il ritiro dei ghiacciai.

Questi "archivi del passato" vengono definiti proxy (indiretti) e per ridurre al minimo l'approssimazione, gli studiosi ricorrono ad un utilizzo multiplo ed incrociato dei loro dati.

Sono prove documentarie tutte quelle che, raccolte da studiosi del mondo umanistico, provengono da libri, diari di bordo, antiche cronache, archivi pubblici e privati (archivi di Chiese e Monasteri, di privati cittadini..) e le serie di dati di osservazione e misura di parametri climatici veri e propri raccolte da diversi gruppi, società, etc.

In Italia molti dati vennero raccolti dalla Accademia del Cimento, voluta dal Granduca di Toscana, e creata nella seconda metà del XVII secolo, che si dedicò a ricerche sperimentali, incluso lo studio della atmosfera e dei fenomeni ad essa correlati.

Successivamente, nel 1782 venne creata la Società Meteorologica Palatina, con sede a Mannheim, che raccoglieva dati e osservazioni meteo-climatiche da 35 stazioni sparse sul Vecchio Continente (in Italia facevano parte della rete Bologna Roma, Padova, Chioggia).

Gli archivi documentari contengono sia osservazioni sui processi influenzati dal clima, ma anche descrizioni di manifestazioni meteorologiche e misurazioni strumentali di elementi climatici, inclusi gli andamenti meteorologici anomali, catastrofi naturali, annotazioni sul tempo di ogni giorno e le sue variazioni stagionali e mensili.

Le informazioni registrate nei diari meteorologici possono essere utilizzate in diversi modi:

- 1) permettono la ricostruzione dei parametri climatici di base
- 2) possono essere trasformate in serie di temperature stagionali continue e in indici di piovosità.
- 3) talune osservazioni, in particolare quelle della direzione del vento, sono proficuamente utilizzabili per la ricostruzione di modelli di circolazione atmosferica mensili.
- 4) permettono lo studio dei caratteri del tempo su scala inferiore al mese, come pure delle principali singolarità meteorologiche

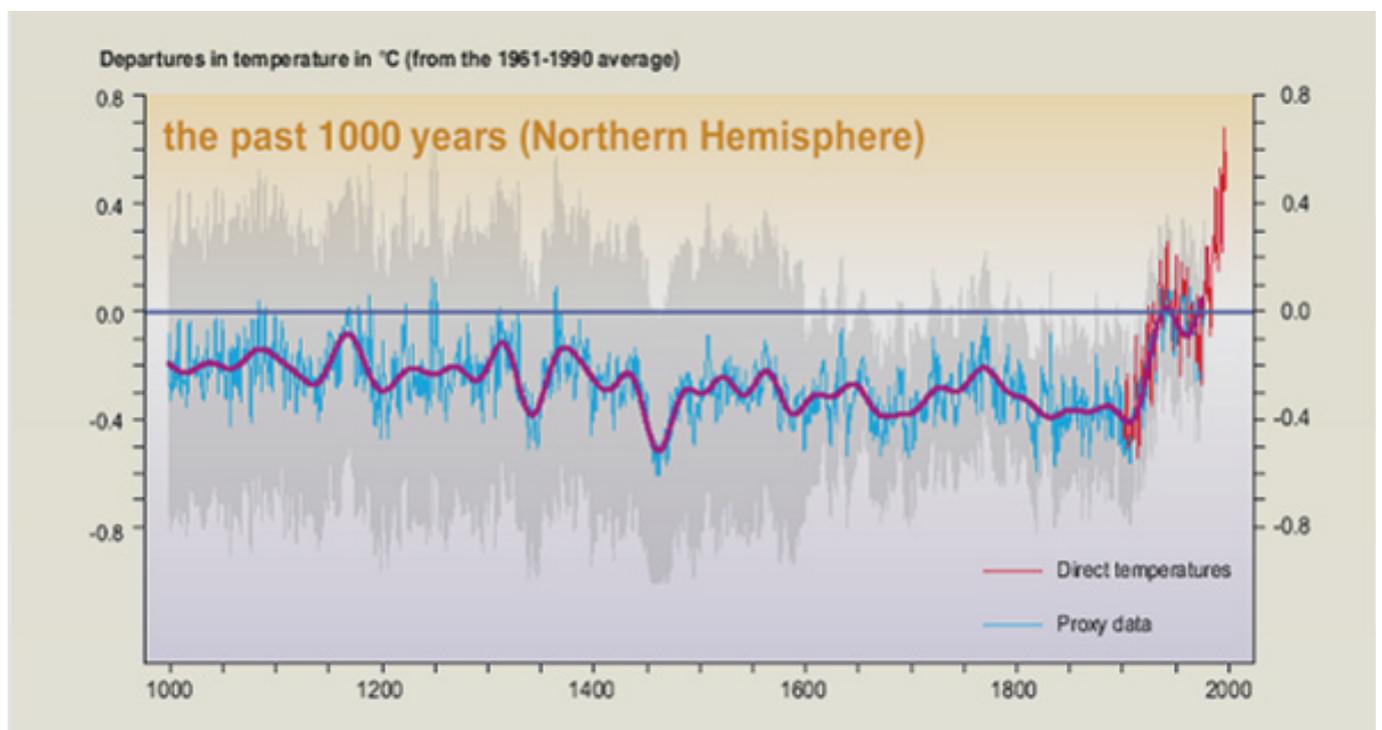


Fig. 4.1. Gli anni '90 sono stati i più caldi dell'ultimo millennio

5. Perché il Clima cambia?

Le componenti fisiche del sistema climatico includono l'atmosfera, gli oceani, il ghiaccio marino, la terraferma e le sue rispettive componenti quali vegetazione, colore (quindi le capacità di riflessione della radiazione solare), biomassa ed ecosistemi, la copertura nevosa, i ghiacciai e il permafrost (componente perennemente gelata del sottosuolo), le componenti del ciclo idrologico: nubi, fiumi, laghi, acque superficiali e sub-superficiali (Fig. 1).

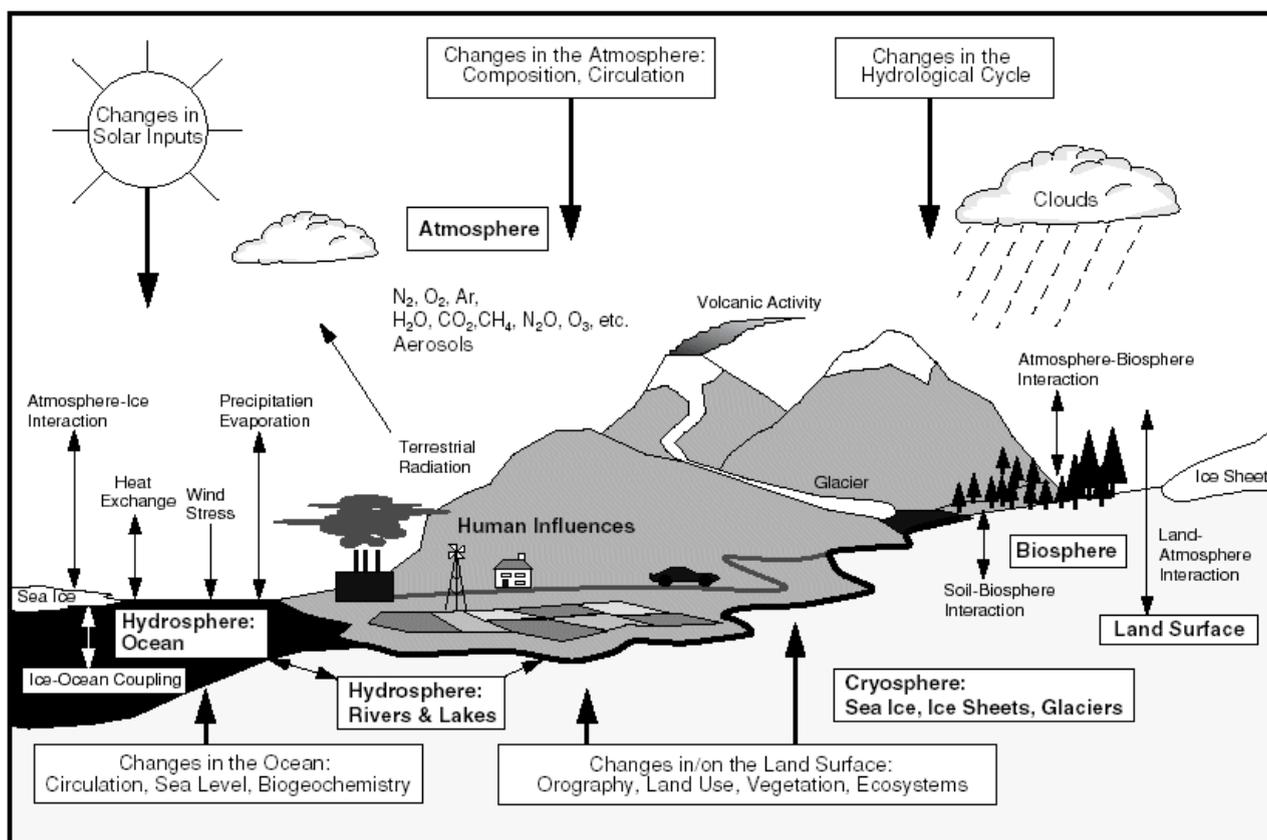


Fig. 5.1. Rappresentazione schematica del sistema climatico

Queste componenti interagiscono mutuamente su un ampio spettro di scale spaziali e temporali, oltre che con componenti esterne al sistema climatico, quali il sole e la sua radiazione, la rotazione della Terra e la geometria della sua orbita, le caratteristiche geografiche della superficie terrestre, e la massa e composizione chimica dell'atmosfera e l'oceano. Lo studio dettagliato del clima coinvolge tutte queste componenti e le interazioni tra esse.

A causa delle forti influenze delle attività umane sull'ambiente e sul clima sulla scala globale, sono naturalmente emerse le necessità di studio di tutti gli aspetti dei possibili cambiamenti, nonché dei dettagli sui relativi impatti. Programmi internazionali come il World Climate Research Programme (WCRP) e l' International Geosphere Biosphere Programme (IGBP) hanno fornito le maggiori

risorse umane e materiali, mentre l' Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), istituito dall'ONU, ha fornito le più complete e autorevoli valutazioni del cambiamento climatico indotto dalle attività umane, appunto di origine "antropogenica". Il Terzo Rapporto di Valutazione (Third Assessment Report, TAR) del IPCC, prodotto nel 2001, rimane il punto di riferimento e di sintesi di molti degli studi sul clima e i suoi effetti, anche se da allora numerose ricerche hanno fatto progredire la conoscenza.

Principi fisici

La sorgente di energia per il sistema climatico è rappresentata dalla radiazione solare, che a causa dell'elevatissima temperatura del sole presenta un picco di energia nella parte visibile dello spettro elettromagnetico. Il sistema terra-atmosfera non può indefinitamente assorbire energia: la condizione per l'equilibrio implica che questo sistema emetta a sua volta la stessa quantità di energia verso lo spazio; a causa della minore temperatura della superficie terrestre e dell'atmosfera rispetto al sole, queste emettono radiazione con il picco d'energia posto a una lunghezza d'onda superiore, nell'infrarosso. A queste lunghezze d'onda, alcuni gas presenti assorbono parte della radiazione terrestre: si tratta del vapor acqueo, prodotto dall'evaporazione delle superfici liquide, soprattutto gli oceani, dell'anidride carbonica (CO₂), prodotta dalla decomposizione delle rocce carbonatate, dalla respirazione della biosfera, dal consumo di combustibili fossili, in particolare nei sistemi di produzione energetica e nei trasporti, e dalla combustione di biomassa (le foreste), del metano, prodotto dalla decomposizione delle biomasse ed emesso in conseguenza del suo uso nei sistemi energetici e nei trasporti, e in misura minore di altri gas quali gli ossidi di azoto e i clorofluorocarburi (CFC), banditi ormai da 15 anni in quanto responsabili della riduzione della concentrazione dell'ozono stratosferico.

Quando questi gas, che diremo "gas serra", aumentano la propria concentrazione, una maggiore quantità di energia radiante è trattenuta nella parte più bassa dell'atmosfera, detta "troposfera". Per mantenere l'equilibrio energetico, il sistema terra-atmosfera deve emettere maggiori quantità di energia, il che può avvenire soltanto aumentando la propria temperatura. Questa è la chiave dell'interpretazione dell'effetto serra, sinteticamente illustrato in Fig. 2. Dall'effetto serra dipende la possibilità della vita sulla Terra, che altrimenti sarebbe troppo fredda (circa -15°C, 30 °C in meno rispetto alla media attuale), tuttavia, se amplificato (per cause naturali o artificiali), può rappresentare un terribile pericolo in termini di riscaldamento eccessivo, cui gran parte della vita sulla Terra potrebbe non adattarsi.

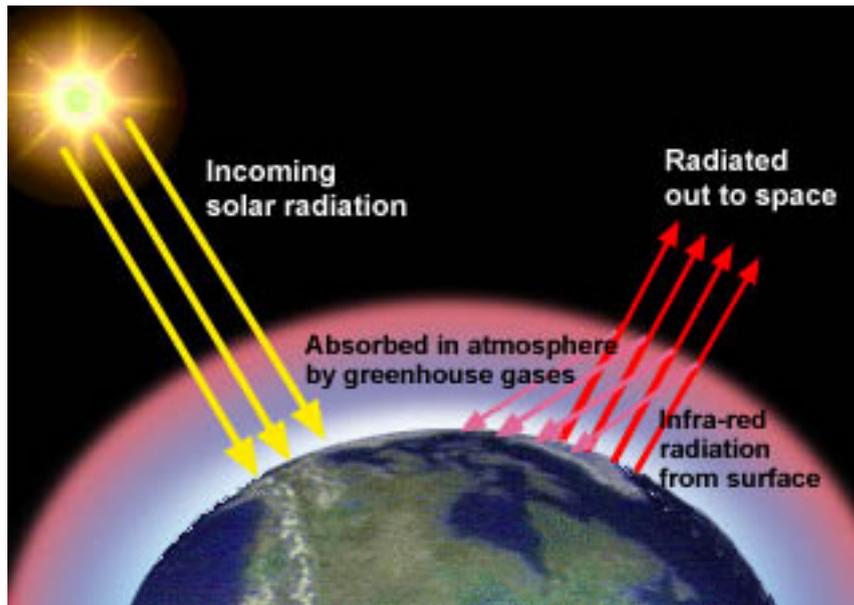


Fig. 5.2. Rappresentazione schematica dell'effetto serra

La migliore illustrazione della relazione tra concentrazioni di CO_2 e temperatura dell'aria è fornita dalle serie temporali ricostruite in base ai campionamenti glaciali realizzati presso la stazione russa di Vostok, in Antartide, che consentono di ricostruire queste grandezze negli ultimi 450.000 anni. La Fig. 3 illustra la relazione quasi lineare tra la concentrazione di CO_2 e la temperatura dell'aria, rappresentata come differenza rispetto ai valori correnti, mentre la circonferenza rossa indica la concentrazione di anidride carbonica attuale, che evidentemente supera nettamente qualsiasi valore del passato. Emerge che la temperatura attuale, in base al rapporto con la CO_2 , dovrebbe essere molto superiore ai valori osservati, il che in un primo momento potrebbe porre alcuni dubbi sulla relazione causale tra CO_2 e temperatura stessa, dissipati tuttavia dalla considerazione che un aumento rapido come quello che si è verificato della concentrazione di CO_2 allontana costantemente dall'equilibrio il sistema climatico, e soprattutto che gran parte dell'energia in eccesso si è verosimilmente accumulato sotto forma di calore negli oceani, in particolare quelli tropicali, in gran parte entro i primi 3000 metri sotto la superficie, ma probabilmente anche nelle grandi profondità oceaniche. Non appena tale calore fosse rilasciato all'atmosfera, il riscaldamento di quest'ultima subirebbe una improvvisa e devastante accelerazione.

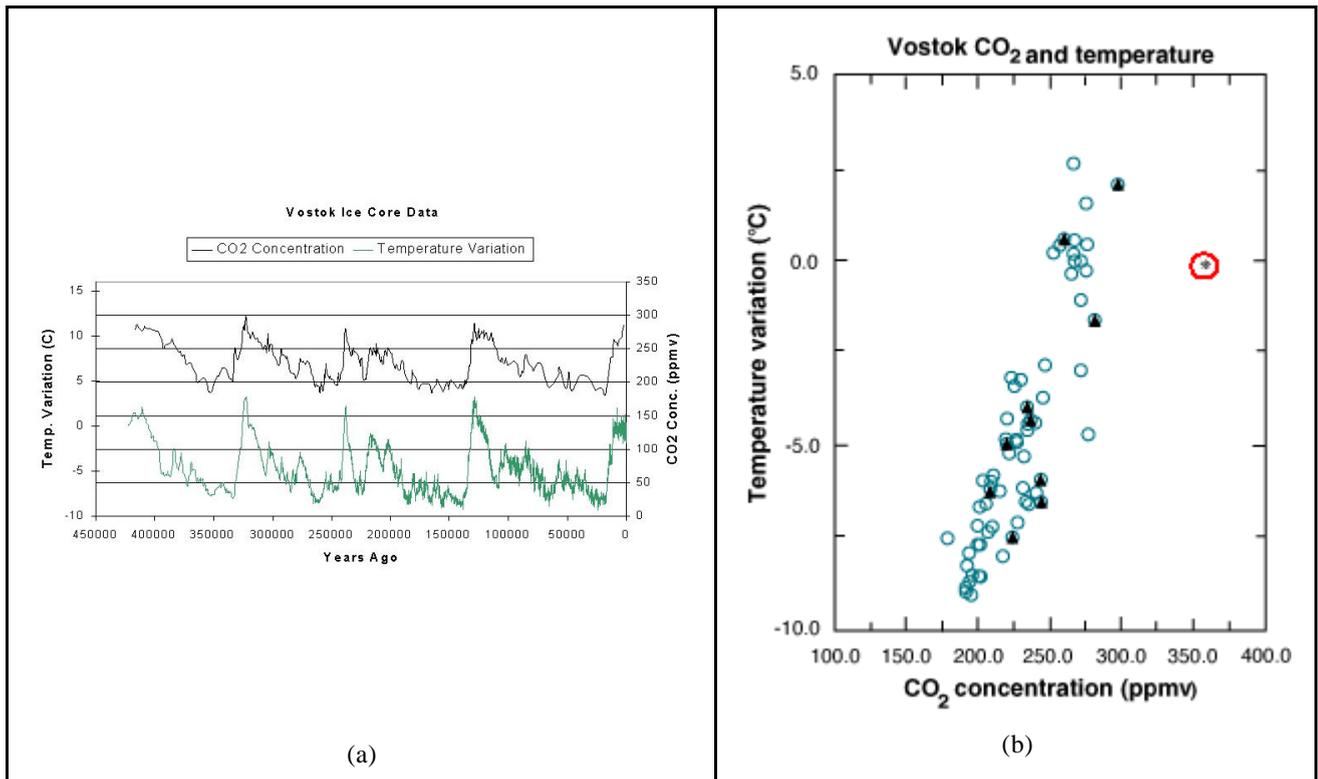


Fig. 5.3. (a) Serie storiche della concentrazione di CO₂ e della temperatura dell'aria presso la superficie e (b) relazione tra le due grandezze. Fonte: Vostok Ice Core

L'analisi di analoghi dati paleoclimatici ha anche consentito di escludere l'esistenza di relazioni molto strette tra le variazioni dell'attività solare (cioè della energia portata sulla Terra dalle radiazioni solari) e le variazioni di temperatura (Fig. 4), non escludendo tuttavia che le prime possano aver parzialmente concorso all'innesco di alcune delle trasformazioni climatiche.

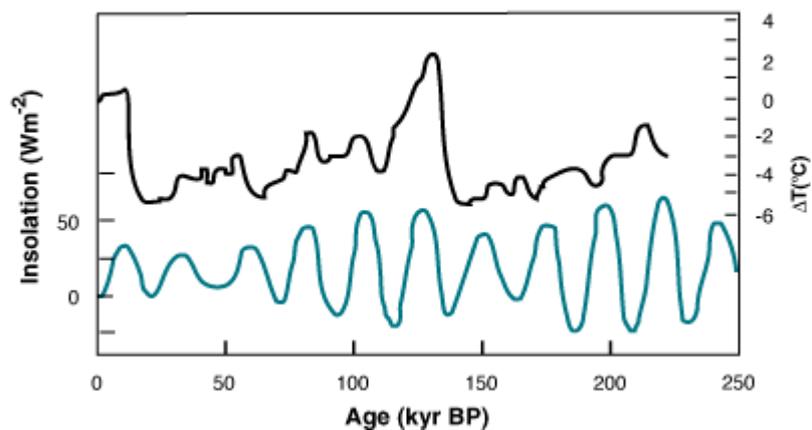


Fig. 5.4. Serie storiche dell'attività solare e della temperatura dell'aria presso la superficie

E' infine da sottolineare che l'effetto di raffreddamento, che in parte bilancia l'incremento dell'effetto serra, da parte del pulviscolo (aerosol), in particolare solfati, emessi anch'essi dalle attività umane, che riflettendo la radiazione solare contribuiscono a ridurre lo sbilancio energetico.

Tuttavia, sia la minor permanenza media degli aerosol in atmosfera (da settimane a mesi) rispetto alla CO₂ (intorno a 70 anni) e la crescente regolamentazione delle emissioni degli aerosol inquinanti (risiedendo questi in prevalenza nei bassi strati dell'atmosfera) non potrà che lasciar prevalere l'effetto di riscaldamento indotto dall'anidride carbonica.

La Fig. 5 illustra il ruolo relativo dei vari gas serra nel bilancio radiativo legato all'effetto serra: vengono considerate le rispettive concentrazioni, la vita media e la capacità di assorbire radiazione a determinate lunghezze d'onda.

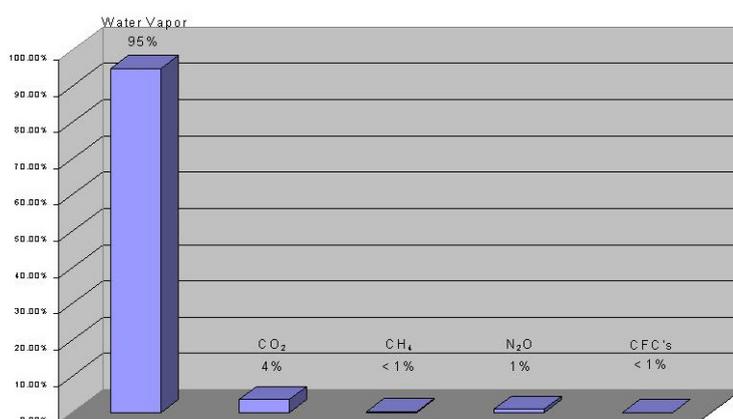


Fig. 5.5. Effetti relativi di riscaldamento prodotti dalle varie specie di gas serra nell'atmosfera

Emerge il ruolo preponderante del vapor acqueo, che tuttavia è un costituente i cui livelli di concentrazione non sono direttamente legati alle attività umane. Poiché tuttavia le variazioni della temperatura superficiale del pianeta sono strettamente connesse alla velocità dell'evaporazione dagli oceani, questa aumentando rapidamente con la temperatura, e variazioni anche modeste della concentrazione del vapor acqueo inducono grandi trasformazioni dell'effetto serra, il ruolo di questo componente è stato oggetto di recenti approfondite analisi.

Il riscaldamento dell'aria produce un aumento della concentrazione del vapor acqueo, tuttavia questo fenomeno verosimilmente induce una variazione della copertura nuvolosa, che a sua volta potrebbe condurre a un raffreddamento del sistema, mediante la riflessione della radiazione solare incidente o l'aumento dell'emissione nell'infrarosso dalla superficie terrestre. Quale effetto prevale? Una attenta e complessa analisi dei più recenti dati satellitari ha portato a concludere che le variazioni della nuvolosità indotte dall'aumento del vapor acqueo inducono un raffreddamento, ma

non tale da bilanciare l'effetto di riscaldamento prodotto dall'incremento della concentrazione del vapor acqueo stesso. Il risultato netto sarebbe quindi un ulteriore incremento dell'effetto serra. Limitando l'analisi alla sola CO₂, la sua concentrazione è salita da meno di 270 ppmv (parti per milione, in volume) dell'era pre-industriale (1750) alle attuali circa 375 ppmv, superando quindi i valori ricostruiti negli ultimi 450.000 anni, nonostante gli assorbimenti di una frazione delle emissioni da parte degli oceani e della vegetazione. La relazione tra le serie di concentrazione di CO₂, misurate all'Osservatorio di Mauna Loa, Hawaii, dal 1958 al 2002, e di temperatura globale dell'aria presso la superficie nello stesso periodo, appare molto significativa e sostanzialmente lineare, almeno negli ultimi 30 anni del periodo (Fig. 6).

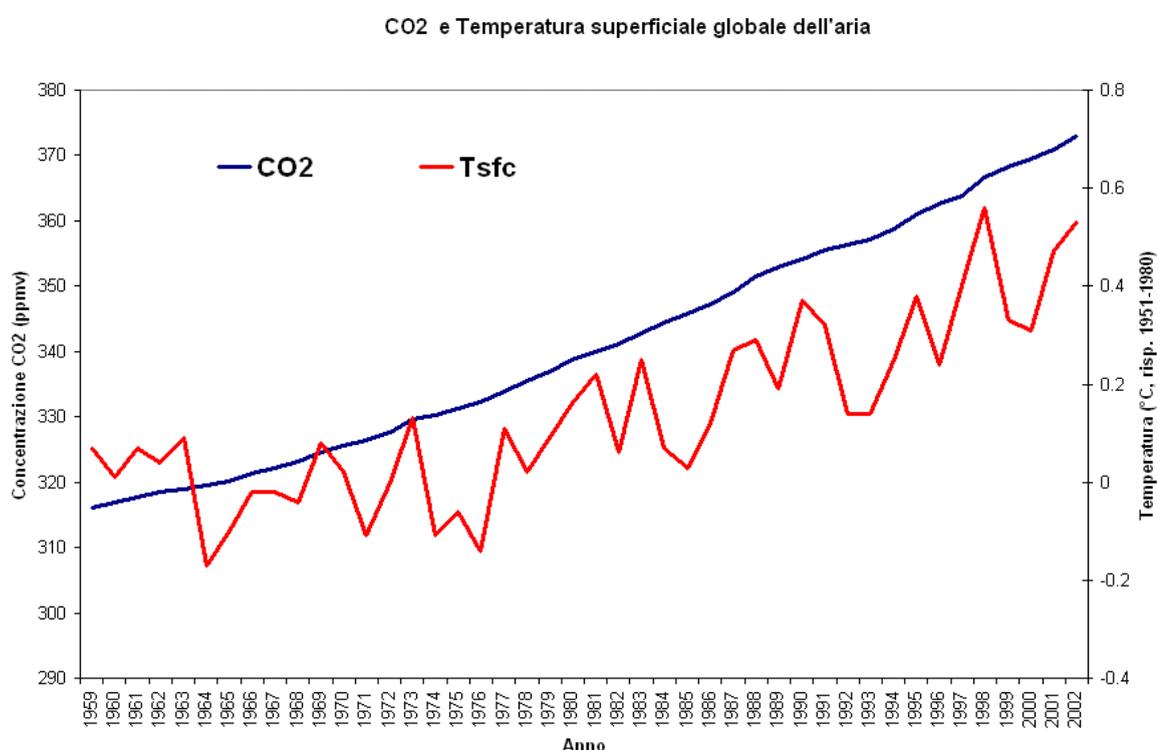


Fig. 5.6. Serie temporali delle concentrazioni medie annuali di CO₂ e delle temperature medie globali dell'aria presso la superficie (Tsfc), espresse come deviazioni rispetto al periodo 1951-1980

L'analisi della serie termica globale per un periodo più lungo mostra anche una discreta relazione con l'evoluzione dell'attività solare (Fig. 7), che tuttavia fallisce in gran parte nella spiegazione del riscaldamento degli anni '30-3 in parte '40 del '900 e soprattutto del prolungato riscaldamento degli ultimi 30 anni, quando invece è ottimo l'accordo con le variazioni della concentrazione di anidride carbonica.

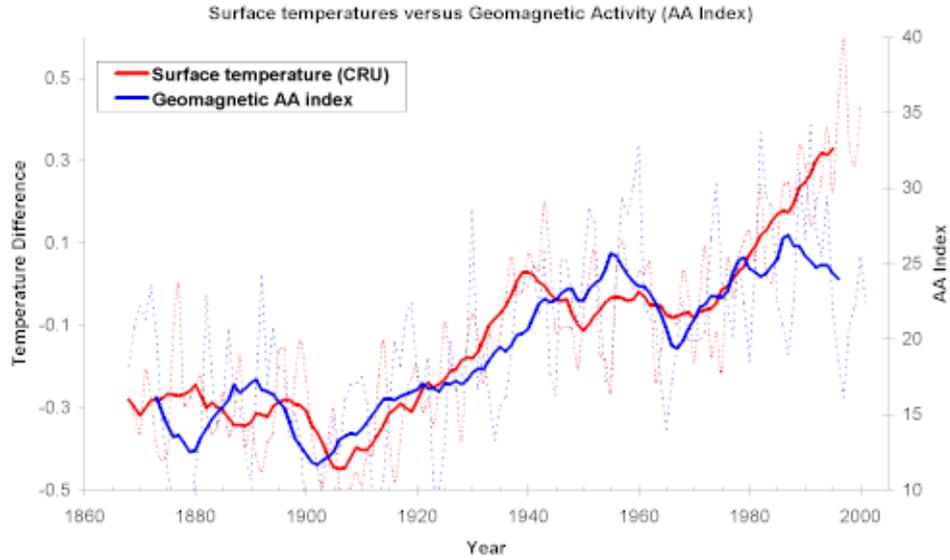


Fig. 5.7. Serie temporali dell'attività solare, rappresentata dall'indice geomagnetico AA, e delle temperature medie globali dell'aria presso la superficie (T_{sfc}), espresse come deviazioni rispetto al periodo 1961-1990

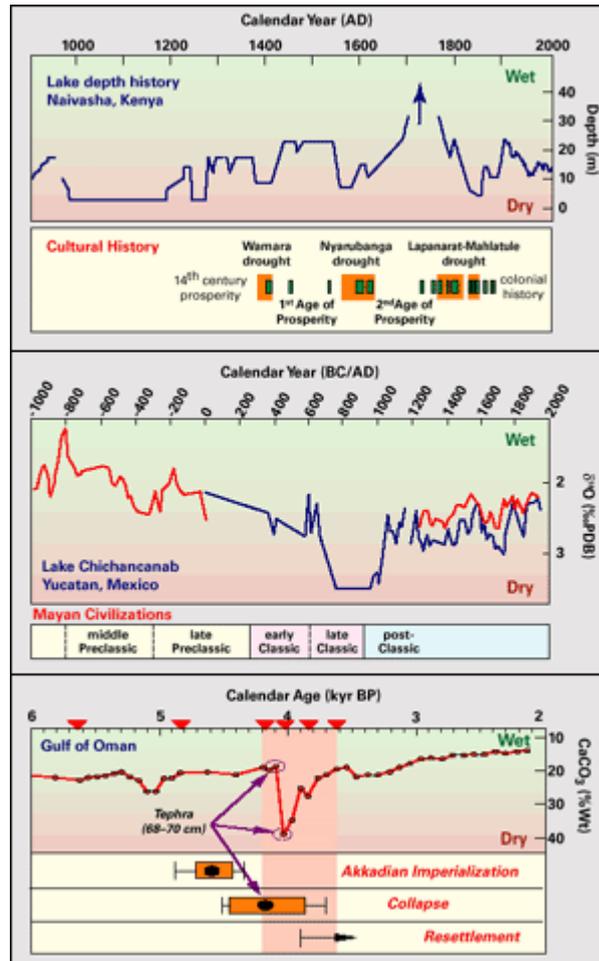


Fig. 5.8. Il clima e le variazioni climatiche, più o meno rapide del passato hanno influenzato lo sviluppo delle società e delle culture. Cambiamenti climatici improvvisi e persistenti sono stati la causa del crollo di alcune civiltà: si pensi alla civiltà che fioriva nella attuale Siria, collassata circa 4200 anni fa, o all'impero dei Maya crollato nell'800 AC. In entrambi i casi si è trattato del verificarsi di periodi di siccità prolungati. Cambiamenti rapidi, persistenti e devastanti si sono verificati più volte nel corso della umanità in aree vastissime che hanno interessato tutti i Continenti.

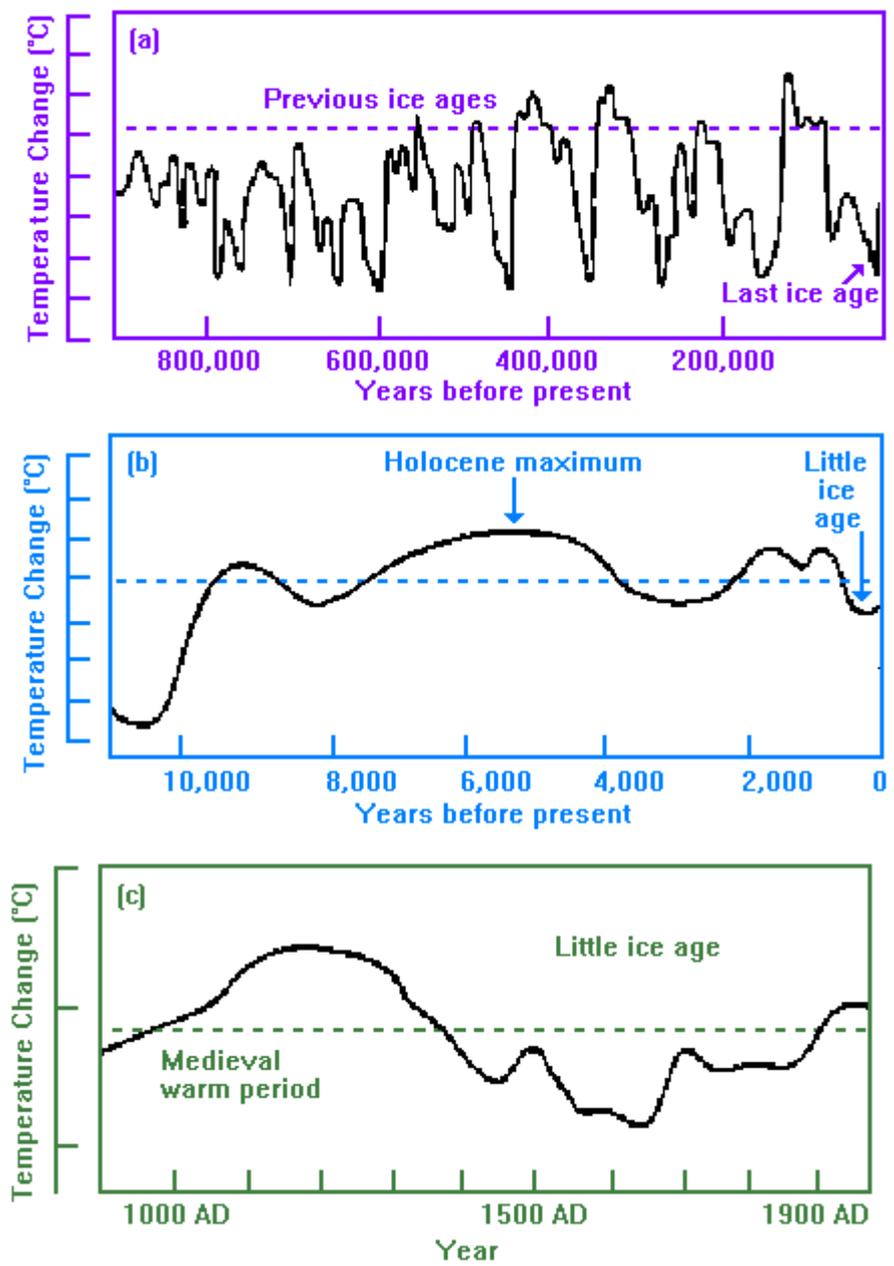


Fig. 5.9. Variazione della Temperatura in diverse ere geologiche e nell' ultimo millennio
 La linea tratteggiata indica la T media attuale di 15 gradi Centigradi. Ogni tacca rappresenta 1 grado Centigrado

6. Il Clima e l'Ambiente

Le variazioni del Clima nelle diverse ere geologiche hanno determinato in modo fondamentale la evoluzione della vita sulla Terra. Sia il mondo animale che vegetale hanno, fin dagli albori della vita sul Pianeta, assistito a cambiamenti climatici drammatici, subendone le conseguenze e/o adattandosi a tali cambiamenti.

In particolare, l'agricoltura è per sua natura un sistema fortemente dipendente dal tempo atmosferico e dalla sua distribuzione durante l'anno cioè, dal clima di una determinata regione. L'agricoltura moderna tende, attraverso i mezzi tecnici, a ridurre al massimo l'effetto dei parametri atmosferici fino al caso estremo delle colture in ambiente controllato ma, in ragione della natura dei cambiamenti climatici, gli effetti che ci possiamo attendere possono essere particolarmente importanti. In particolare le produzioni di grande qualità, come vino, olio, frutta e ortaggi, sono a rischio nelle loro caratteristiche peculiari laddove fasi delicate del loro sviluppo fenologico - nelle quali si delinea il carattere qualitativo della produzione - coincidano con eventi avversi.

Le modifiche della circolazione generale, infatti, si esplicano in variazioni stagionali importanti come, ad esempio, autunni particolarmente caldi, gelate nella primavera avanzata, lunghi periodi di siccità estiva con temperature assai elevate oppure, al contrario, lunghi periodi di pioggia persistente, anticipato inizio dell'estate, tarda primavera particolarmente asciutta. Numerosi fasi delle piante sono regolate dal succedersi di eventi specifici di carattere termico, in primavera ed in autunno, e di carattere idrico durante la tarda primavera e l'estate. Tali eventi hanno sempre avuto una variabilità interannuale anche marcata tanto che buona parte dei proverbi - che riassumono l'esperienza di secoli di agricoltura - si riferiscono a questi momenti cruciali per lo sviluppo delle colture, deducendone elementi di previsione sui risultati finali in termini di quantità o qualità del prodotto. Poiché i fenomeni a cui assistiamo si concretizzano in un allontanamento degli estremi delle popolazioni statistiche dei dati climatici, tale fenomeno si può trasformare in un evento non sopportabile da una determinata coltura.

Per chiarire questo concetto ricorriamo ad alcuni esempi legati alla tendenza degli ultimi anni:

- cicli accorciati dei cereali invernali (Fig. 1), combinati con temperature molto elevate e venti meridionali possono causare un cattivo riempimento della granella;

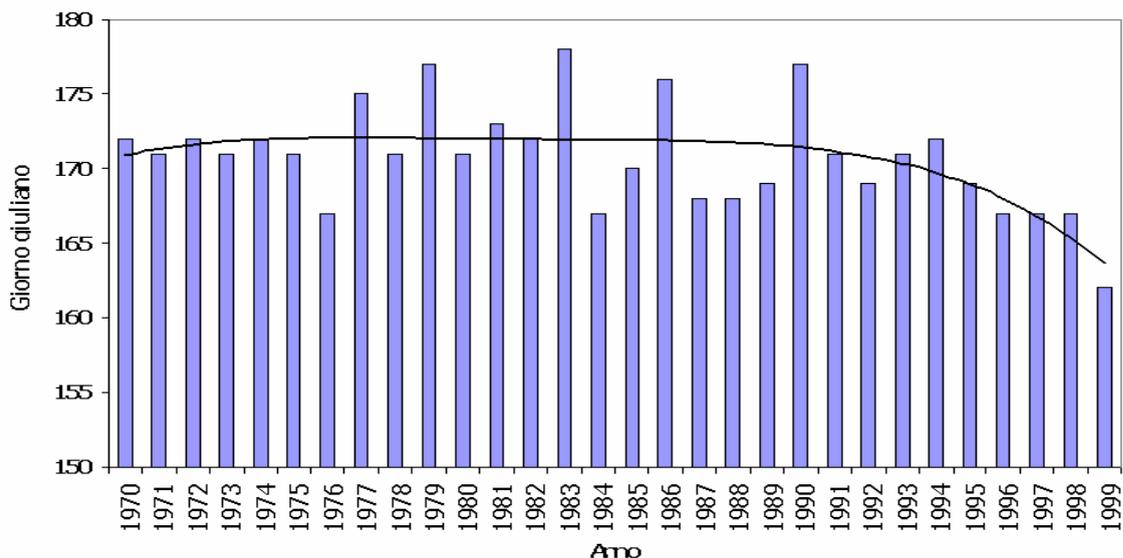


Fig. 6.1. Anticipo della data di maturazione del grano

- temperature elevate sopra i 33 °C, nel momento in cui dalla fioritura dell'olivo si passa alla allegagione, provocano l'aborto di un alta percentuale di fiori;
- una primavera anticipata di 15 – 25 giorni (Fig. 2) che determina un germogliamento precoce della vite. Se a questo si accompagnano gelate nella primavera inoltrata dovute ad una circolazione nord-orientale (situazione che si è affermata negli ultimi anni) ciò causa danni ingenti alla vegetazione già avanzata e lo stesso fenomeno si verifica anche per le piante da frutto;

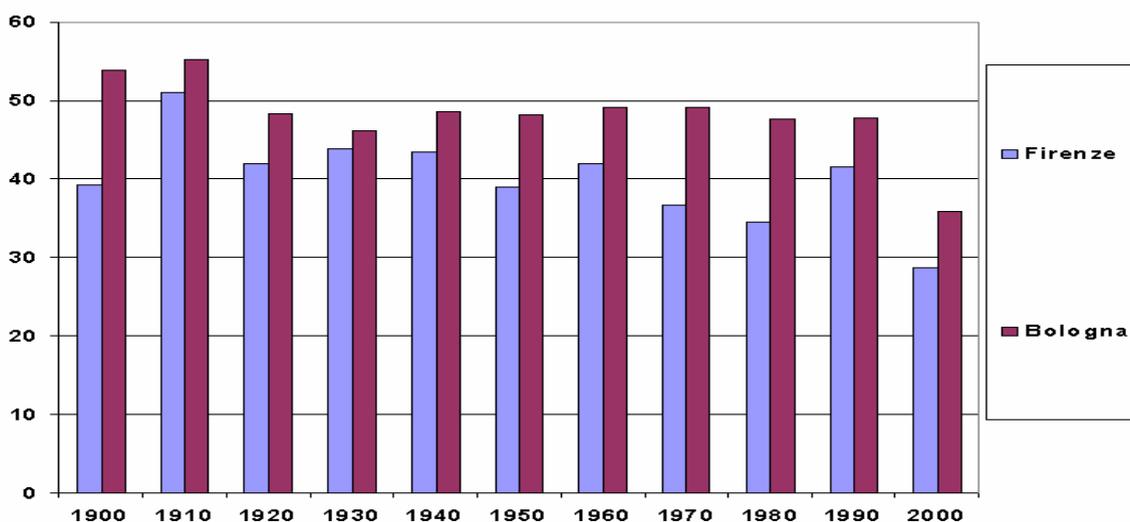


Fig. 6.2. Media decennale del giorno di inizio della stagione vegetativa (T° media > 10)

- la siccità estiva combinata con un numero di giorni con temperature superiori a 34 °C non solo causa problemi di carenza idrica assai importanti (Fig. 3) ma, anche dove l'acqua per

irrigazione sia disponibile, causa fenomeni di allessatura delle foglie per la combinazione del carico radiativo e di quello termico come accade, per esempio, per il pomodoro.

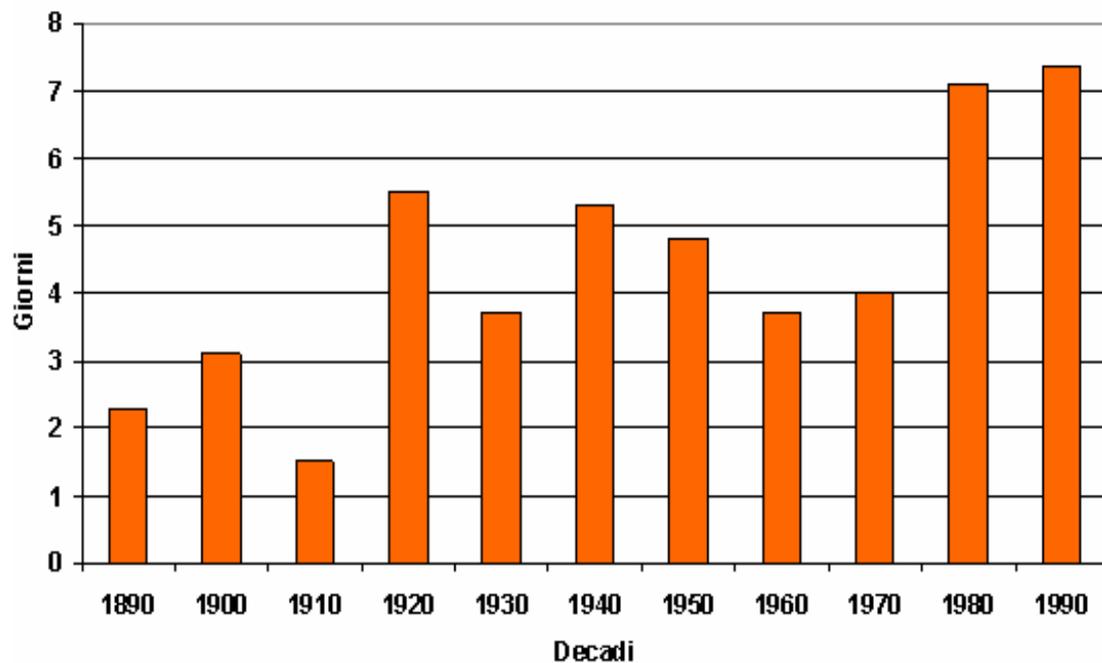


Fig. 6.3. Media decennale numero di giorni con temperature superiori a 34 °C a Firenze

Temperature troppo elevate o troppo basse nei momenti delicati della fioritura e della allegazione dei frutti, o carenze idriche prolungate e combinate con temperature eccezionalmente alte, possono quindi rendere il nostro clima non più adatto alla coltivazione di alcune specie o spostano l'areale tipico di certe coltivazioni da certe regioni ad altre.

E' il caso delle caratteristiche dei vini del Veneto che si stanno spostando dalla categoria dei vini da tavola a quella dei vini da dessert tipici delle regioni meridionali (Fig. 4).

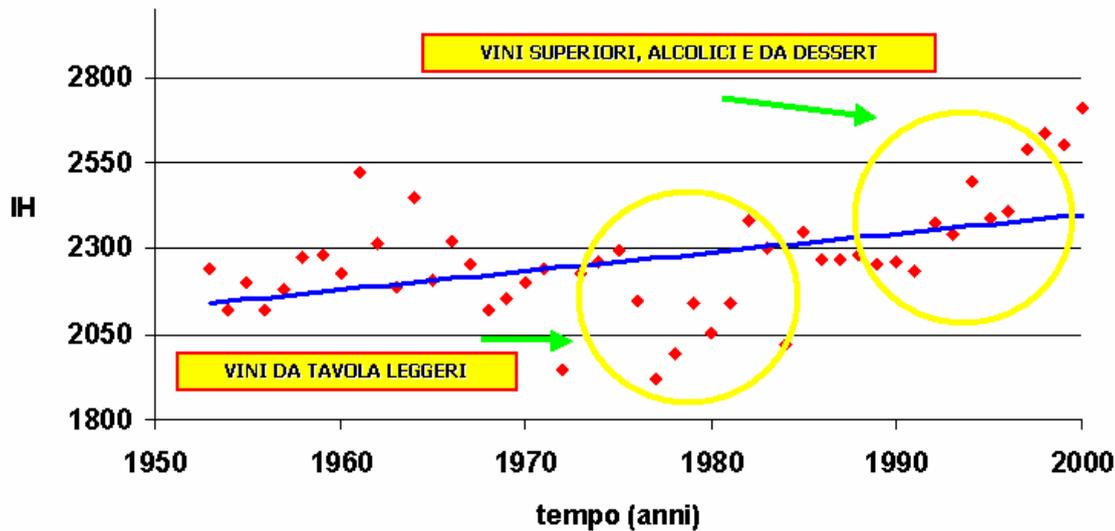


Fig. 6.4. Serie storica Indice di qualità del vino di Huglin

Segnali di questi mutamenti ci vengono anche dalla vegetazione spontanea o dagli uccelli migratori che negli ultimi anni tendono a modificare le loro abitudini (Fig.5).

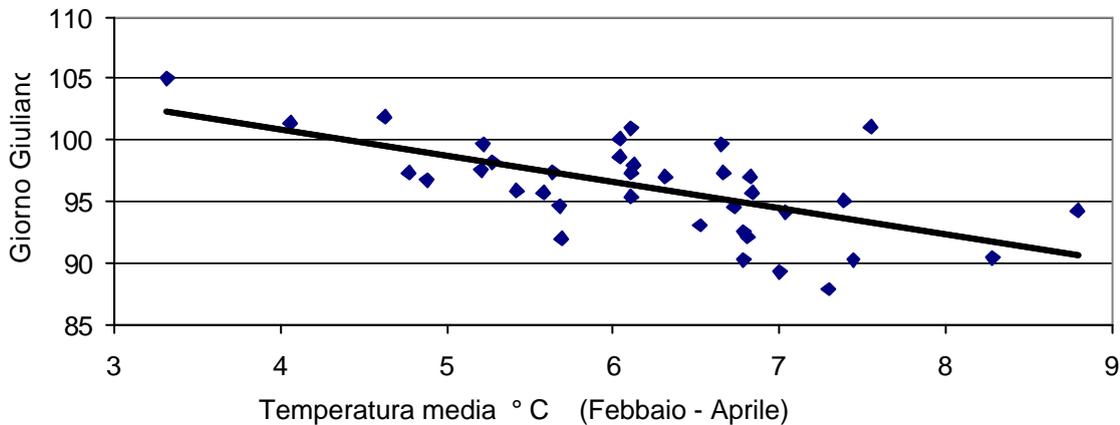


Fig. 6.5. Data dell'arrivo delle rondini in Inghilterra (data in Giorno giuliano). Fonte : European Phenology Network

L'autorità ambientale svizzera riporta, per esempio, che in seguito alla rapidissima e drastica diminuzione dei giorni senza disgelo (cioè con temperature costantemente inferiori a zero gradi), numerose specie di piante ornamentali sono - per così dire - "fuggite" dalle serre o dagli appartamenti, ambientandosi nelle foreste naturali e colonizzandone gradualmente gli spazi.

Il veloce riscaldamento dell'atmosfera si è trasferito più lentamente agli oceani e al mare, e anche al Mar Mediterraneo; in Fig. 6 sono rappresentate le serie delle temperature superficiali del Mediterraneo occidentale, dal 1854 al 2003. Spiccano il riscaldamento praticamente continuo dagli anni '20 del '900, temporaneamente interrotto negli anni '60 e '70 e ripreso, con maggiore velocità,

dalla seconda metà degli anni '80. In Estate, il riscaldamento ha avuto luogo negli stessi periodi, ma di entità più limitata; dalla fine degli anni '80, tuttavia, l'aumento della temperatura è stato rilevante, e spicca il valore dell'Estate 2003, senza precedenti nella lunga serie storica rappresentata.

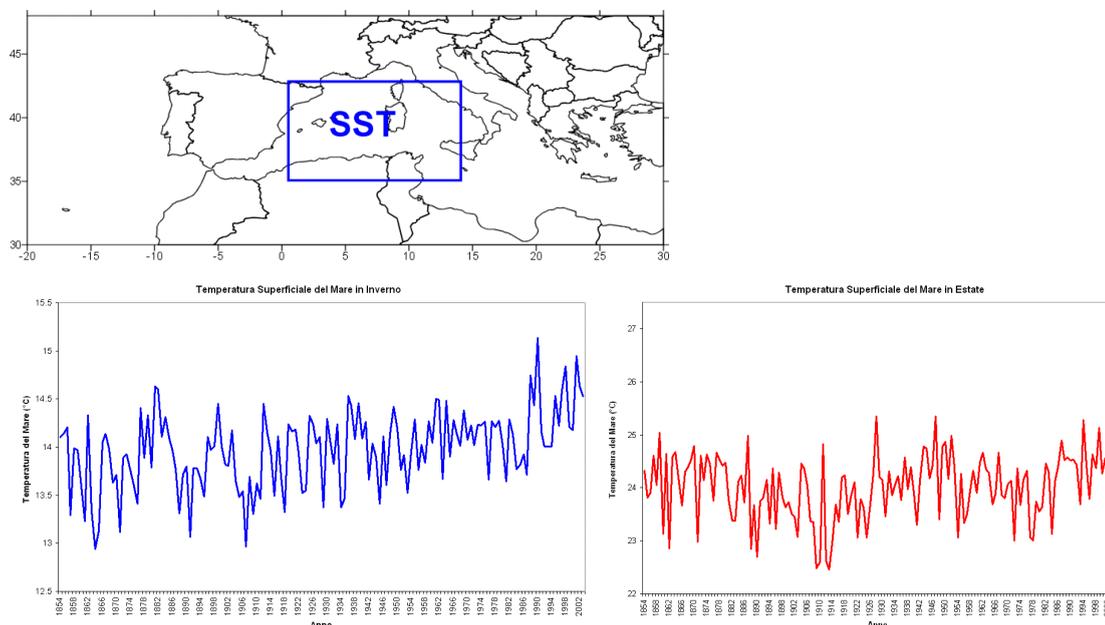


Fig. 6.6. Serie storiche delle temperature superficiali del mare sul Mediterraneo occidentale (area rappresentata dal rettangolo nella mappa). Fonte: dati COADS

Il riscaldamento della superficie del mare, e presumibilmente anche delle sue profondità, è all'origine dell'arrivo di nuove specie come il Pesce Serra, il Pesce Pappagallo e il Pesce Pavone, e in particolare della loro estensione fino alle coste più settentrionali.

Il progressivo riscaldamento dell'atmosfera ha determinato un forte impatto sui ghiacciai, in particolare del ghiaccio marino nelle zone artiche, la cui estensione si è ridotta del 10-20% dall'inizio del secolo scorso, dei ghiacciai residenti sulle vette più alte delle montagne tropicali, che hanno perso dal 75 al 95% del proprio volume, e dei ghiacciai delle medie latitudini, tra cui quelli alpini (Fig. 7), il cui volume si è ridotto del 50% rispetto all'inizio del '900, mentre della stessa percentuale si è ridotta l'estensione occupata dai ghiacciai italiani (da 1000 km² a 500 km²), aumentando potenzialmente il rischio di dissesto dei versanti, oltre che contribuendo alla modifica radicale degli ecosistemi montani.



Fig. 6.7. Il ritiro di un ghiacciaio alpino

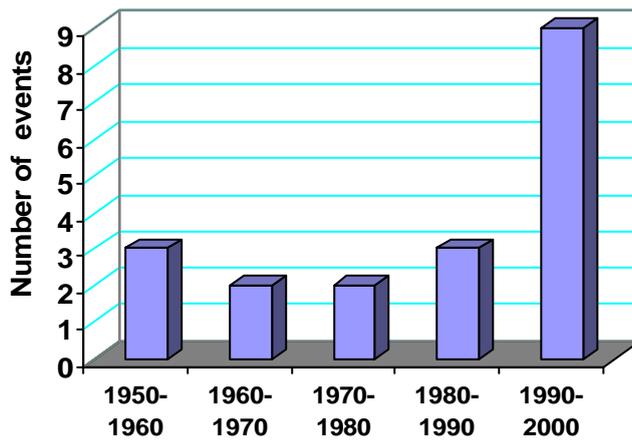


Fig. 6.8 .Numero di eventi di precipitazione intensa sull'Italia negli ultimi 50 anni.

7. Conclusioni

Mentre gli studiosi si interrogano su cause ed effetti del riscaldamento globale, modificazioni della superficie terrestre al momento in atto possono potenzialmente influenzare il clima di determinate regioni. Ad esempio diversi studi mostrano come una grossa percentuale dell'acqua che precipita nel bacino del Rio delle Amazzoni torna alla atmosfera attraverso la evaporazione e la traspirazione delle foglie degli alberi. Di conseguenza creare zone adatte all' agricoltura e all'allevamento del bestiame in Sud America favorisce senz'altro una diminuzione del raffreddamento dovuto alla evaporazione. Questo a sua volta porta ad un riscaldamento di alcuni gradi della regione. La capacità della superficie disboscata di riflettere, cioè la sua albedo, subisce una variazione che in determinate circostanze favorisce il processo di desertificazione.

Oggi miliardi di acri di terreno sono affetti dal processo di desertificazione e non sono più considerati produttivi. Le cause sono quindi il pascolo e la coltivazione estreme, una irrigazione insufficiente e la deforestazione. Poco si sa sulle conseguenze sul clima di queste variazioni di albedo, maggior estensione dei terreni sabbiosi, maggior trasferimento di sabbia dalla superficie alla atmosfera.

Possiamo concludere questa nota con alcune considerazioni generali. Per prima cosa abbiamo visto come il Clima del pianeta Terra e' variato in modo considerevole nelle ere geologiche passate. Evidenze di questi cambiamenti vengono ad esempio dallo studio degli anelli degli alberi, da analisi chimiche degli isotopi dell'ossigeno in campioni di ghiaccio e conchiglie fossili, dall'avanzamento e dal successivo ritirarsi dei ghiacciai alpini. Durante gran parte del passato la Terra e' stata molto più calda di quanto non sia oggi, tuttavia vi sono stati periodi freddi, durante i quali gran parte del Nord America e dell'Europa erano coperti dai ghiacci.

Se analizziamo le possibili cause dei cambiamenti climatici, il discorso non è affatto semplice: la variazione di un parametro comporta la variazione, non sempre nella stessa direzione, di altri parametri. Negli ultimi due milioni di anni, in base alla teoria di Milankovitch, si sono susseguiti periodi glaciali ed interglaciali dovuti a piccole variazioni dei parametri della orbita terrestre, quindi a fattori puramente astronomici. Alcuni studi mostrano, utilizzando sofisticati modelli di proiezioni climatiche, come la temperatura potrebbe aumentare di 1.5C ne i prossimi 100 anni, in seguito ad un raddoppio della CO₂ e di altri gas serra in atmosfera. Modifiche della superficie terrestre possono indurre variazioni del clima, in particolare variazioni della albedo dovute a sfruttamento abnorme del suolo per deforestazione, pascolo, coltivazione, inducono ad un processo di desertificazione e susseguente impoverimento del suolo.

Abbiamo poi visto come negli ultimi 100 anni vi sia stato un aumento ormai accertato di circa 0.6C. A questo punto la atmosfera continuerà a scaldarsi? In caso affermativo, si riscalderà a un tasso

maggiore a causa dell'effetto dei gas serra? Siamo in un ciclo naturale, per cui ad un riscaldamento conseguira' poi un raffreddamento? L'Emisfero Boreale entrera' in un periodo freddo, come previsto dalla teoria di Milankovitch? Certamente il clima e' cambiato nel passato, ma quanto e con quale rapidita' variera' nel futuro e' ancora incerto, nonostante la comunita' scientifica internazionale abbia fatto, negli ultimi anni, scoperte importanti e ad abbia dato risposta ad alcune domande del problema Clima e Variazioni Climatiche. I passi futuri possono essere riassunti, infine, nella lista di seguito riportata, molto breve, ma fondamentale per trovare le risposte al Problema Clima:

- Necessità di una migliore comprensione dei fenomeni
- Esigenza di suddividere i fenomeni su varie scale
- Esigenza di un monitoraggio climatico
- Impegni nazionali e regionali
- Formazione degli specialisti
- Informazione e formazione dell'opinione pubblica