

CLIMA E CAMBIAMENTO CLIMATICO. I. PROFILO STORICO, ATMOSFERA E CLIMA, VARIABILITÀ DEL CLIMA, RUOLO DELLE NUBI

CLIMATE AND CLIMATE CHANGE. I. HISTORICAL PROFILE, ATMOSPHERE AND CLIMATE, CLIMATE VARIABILITY, ROLE OF CLOUDS

Teodoro Georgiadis¹ e Luigi Mariani^{1*2}

¹: CNR IBIMET, via Gobetti, 101, 40129 Bologna BO

²: Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Produzione Vegetale, Via Celoria 2, 20100 Milano MI

* Corresponding author: E-mail address luigi.mariani@unimi.it

Ricevuto 29 agosto 2005, accettato 23 marzo 2006

Riassunto

Questa review si propone di fornire una sintesi delle più recenti attività di ricerca sul tema del cambiamento climatico, tema quanto mai ampio e controverso sia per la mole di attività in corso sia per le implicazioni socio-politiche ed economiche che esso comporta. Ad un sommario profilo storico sull'argomento fa seguito un sintetico inquadramento sul sistema climatico e le sue componenti, con particolare riguardo all'importanza della circolazione atmosferica ed oceanica.

La variabilità del clima viene quindi analizzata con riferimento al ruolo delle forzanti esterne ed interne e specifici approfondimenti sono riservati al tema dei gas atmosferici, del ruolo delle nubi e degli effetti climatici dell'uso del suolo, evidenziando incertezze e lacune conoscitive attuali. Le fonti di dati (dati osservativi di superficie e da remote sensing) ed i proxy data paleoclimatici vengono analizzati in modo succinto evidenziando limiti attuali e prospettive future di tali ambiti di ricerca. Vengono poi definite le particolarità del sistema climatico che impongono severe limitazioni all'indagine fisica per mezzo di modelli matematici. Un'analisi critica circa i prodotti dei modelli climatici attualmente disponibili viene altresì condotta.

Dalla disamina effettuata emerge la necessità di garantire un giusto equilibrio fra approccio osservativo e approccio modellistico matematico, mantenendo più che mai vivo il senso critico che deve stare alla base di ogni attività di ricerca.

Parole chiave: clima, cambiamento climatico, modelli matematici, osservazioni.

Abstract

This review paper summarises recent research work on climate and climatic change, a theme wide and fuzzy due to the large variety of research activities and the social, political and economical implications.

A brief historical profile of this research field is followed by a synthetic description of the climatic system and its components, and the importance of atmospheric and oceanic circulation is particularly stressed.

Climate variability is analysed and referred to the role of external and internal forcing elements, with specific discussion carried out on the climatic effects of atmospheric gases, clouds and changes of soil use, highlighting the present uncertainties and lacks of knowledge. Data sources (observational data from surface networks of stations and remote sensing; paleoclimatic proxy data) are also shortly discussed. A description of the peculiarities of climatic system that impose severe limits to the physical research founded on mathematical models is followed by a critical analysis of climate models and by a discussion about the products of AOGCM models.

This analysis show first of all the need of a equilibrium between observational and modelling approach; the need of a critical approach to the study of climate and climatic change is also highlighted

Key words: climate, climatic change, mathematical models, observations.

1. Breve profilo storico

Il concetto di clima come entità dinamica è patrimonio dell'umanità da alcuni millenni almeno, come mostra la presenza in varie culture dei miti del diluvio e dell'età dell'oro. Sono inoltre innumerevoli gli autori del passato che ci hanno lasciato testimonianze scritte circa la variabilità del clima. Fra tutte citeremo quella di Saserna, georgico latino appartenente ad una famiglia di agricoltori di origine etrusca che conducevano terre di loro proprietà nel piacentino. Saserna, all'inizio del I sec. a.C., scrisse un trattato agronomico di cui ci rimangono frammenti riportati da Columella (*De agricultura*, I, 5) e da cui emerge che nel Nord Italia il clima era di molto mutato rispetto al passato, tanto che regioni in cui era prima im-

possibile coltivare la vite e l'olivo erano, ai tempi dell'autore, ricche di pingui oliveti e vigneti (Pinna, 1996).

Per problemi di spazio non possiamo affrontare in modo più sistematico il tema del rapporto degli uomini dell'evo antico, del medioevo e della prima parte dell'evo moderno con il clima e la sua variabilità; sull'argomento ci limitiamo a rimandare agli scritti di Lamb (1966, 1977) di Leroy Ladurie (1967) e dello stesso Pinna (1996).

Qualche considerazione merita il XVIII° secolo per la ricchezza di interrogativi circa la variabilità climatica. Lo attesta ad esempio il problema posto nel 1773 dall'Accademia delle Scienze di Siena che così recitava: "Non

possiamo sapere per mezzo di osservazioni meteorologiche se nell'estensione di tutta l'Europa l'acqua che cade in pioggia ai giorni nostri sia in maggiore o minor quantità di quella che cadesse ne' secoli a noi più remoti; si cerca però di sapere la verità del fatto per mezzo di ragioni fisiche, e quali utilità ricavar si potrebbero dalla scienza de' fatti per la coltivazione dei terreni."

Il padovano abate Vincenzo Chiminello, allievo del Tolaldo e vincitore del concorso, rispondeva a tale problema propendendo per un aumento delle piogge e proponendo l'introduzione dei prati artificiali per sfruttare le maggiori disponibilità idriche che si erano venute a creare rispetto al passato (Chiminello, 1776).

Nel 1827 il fisico francese Jean Baptiste Joseph Fourier iniziava la sua *Mémoire sur les Températures du Globe Terrestre et des Espaces Planétaires* con la frase "Il problema delle temperature globali, uno dei più importanti e difficili di tutta la fisica, è composto di elementi diversi, che dovrebbero essere tutti considerati sotto un unico punto di vista". In particolare in questo scritto di Fourier ed in un altro lavoro dello stesso autore (1824) fa la sua comparsa per la prima volta il concetto di effetto serra, con l'atmosfera terrestre che viene paragonata alla copertura a vetri di una serra.

Tale concetto venne poi ripreso dal chimico ed ingegnere irlandese John Tyndall, il quale nella sua opera *Heat a Mode of Motion* (1863) mise in evidenza l'importanza del vapor acqueo come gas serra scrivendo fra l'altro: "in ciò che concerne la Terra come sorgente di calore, stimo che almeno il 10% della sua emissione sia intercettata dai primi 10 piedi [tre metri circa] di atmosfera al disopra della sua superficie. Ciò rende una testimonianza unica dell'enorme influenza di tale nuova proprietà del vapor acqueo sui fenomeni atmosferici".

Fourier e Tyndall avevano basato le loro argomentazioni su un modello teorico fondato sul concetto di bilancio energetico del pianeta; tuttavia per giungere alla visione attuale della variabilità climatica era necessario un altro fondamentale tassello costituito dalla teoria sulle ere glaciali, i cui padri furono Louis Agassiz (1840), Jean de Charpentier (1841) e Ignace Venez. Questi scienziati, studiando i ghiacciai alpini, pervennero all'idea che in un passato più o meno remoto una vasta calotta di ghiaccio aveva ricoperto l'emisfero Nord, dal Polo fino a latitudini mediterranee. La rapida accettazione di tale teoria da parte della comunità scientifica spalancò le porte alla moderna idea di provvisorietà del clima attuale e di ciclicità dei climi del passato. Da notare la novità culturale rappresentata dal fatto che una ciclicità di tipo termico prendeva per la prima volta il posto della ciclicità pluviometrica, propria del mito del diluvio, che fino ad allora aveva assillato i nostri progenitori trovando eco anche in vari lavori scientifici (Bard, 2004). Un'ulteriore novità è costituita dal fatto che la teoria sui cicli glaciali fu prontamente divulgata dai mezzi d'informazione, giungendo ad influenzare il pensiero di vaste fasce della popolazione occidentale, tanto da trovare eco nella stessa poetica del Carducci, che dall'idea dell'umanità oppressa

da una futura era glaciale trae spunto per una sua poesia delle Odi barbare¹.

Su tali basi si innestò il lavoro del chimico svedese Svante Arrhenius che per primo (1896) preconizzò il fenomeno del riscaldamento globale come effetto dell'uso dei combustibili fossili, vedendo in tale fenomeno un risvolto positivo legato alla mitigazione del clima della sua fredde patria. Arrhenius ipotizzò inoltre che le ere glaciali potessero essere scatenate dalla riduzione del tenore di anidride carbonica in atmosfera.

Queste rapide pennellate danno una seppur sommaria idea del dibattito scientifico e culturale sulla variabilità climatica che caratterizzò il periodo fino alla fine del 19° secolo; per un profilo storico di maggior dettaglio su tale dibattito nel periodo che va dal 500 all'inizio del '900 si veda ad esempio Bard (2004).

Il 20° secolo vede la formulazione della teoria sulle cause astronomiche delle ciclicità glaciali da parte di Milutin Milankovitch (Berger, 1988), astronomo la cui attività si svolse nell'ambito di un gruppo scientifico che vedeva la partecipazione di Wladimir Koeppen (1846-1940), autore di alcune celebri classificazioni climatiche tuttora in uso, di Rudolph Geiger, uno dei padri della micrometeorologia, e di Alfred Wegener (1880-1930), autore di quella teoria sulla deriva dei continenti che costituì un'ulteriore rivoluzione nel nostro modo di leggere il passato anche climatico del pianeta.

Nella seconda metà del 20° secolo il grande sviluppo della climatologia pose il tema del cambiamento climatico all'attenzione della comunità scientifica.

A tale riguardo si segnala da un lato l'enorme impulso avuto dalle indagini sui cosiddetti proxy data (carote glaciali, sedimenti fluviali, lacustri e marini, pollini, ecc.) da cui ci viene una visione sempre più dettagliata del clima del passato. Dall'analisi dei proxy data emerge in particolare che l'episodio caldo dell'olocene rappresenta una eccezione per gli ultimi 100.000 anni, periodo per lo più dominato da condizioni del tutto inadatte alla vita umana a causa delle bassissime temperature e nel quale la transizione dalle condizioni glaciali a quelle dell'olocene è stata caratterizzata da brusche e violente oscillazioni, con un temporaneo ritorno a condizioni glaciali (fase del Dryas recente) che risulta segnalato da proxy data acquisiti in diverse aree del pianeta.

Un ulteriore elemento caratterizzante le attività di ricerca scientifica dal secondo dopoguerra ad oggi è l'introduzione ed il sempre più massiccio impiego di modelli matematici in chiave di analisi e previsione climatica. I modelli matematici del fluido atmosferico, nati negli Stati Uniti alla fine degli anni '40 del 900, si sono imposti negli anni più recenti come gli strumenti principe per gli studi sul cambiamento climatico.

In particolare il mondo scientifico ha seguito con attenzione l'aumento progressivo delle temperature fino al primo picco raggiunto negli anni trenta e la successiva

¹ Ci riferiamo alle ultime due strofe della poesia *Su Monte Mario*, che recitano come segue: fin che ristretta sotto l'equatore / dietro i richiami del calor fuggente / l'estenuata prole abbia una sola / femina, un uomo // che ritti in mezzo a' ruderi de' monti / tra i morti boschi, lividi, con gli occhi / vitrei te veggan su l'immane ghiaccia / sole, calare.

diminuzione degli anni 50 – 70. In merito a quest'ultima flessione delle temperature globali, H.H. Lamb (1973) pubblicava sulla Rivista mensile dell'Unesco un articolo divulgativo dal titolo "Il clima si raffredda" in cui constatava la flessione in atto delle temperature scrivendo fra l'altro: "...divenne presto evidente che l'anidride carbonica non poteva spiegare tutto. Infatti, nonostante l'aumento della sua produzione dovuto alla sempre maggiore industrializzazione ed al crescente consumo di oli e di altri combustibili, la variazione di temperatura si è invertita, e cioè negli ultimi 25-30 anni la Terra è progressivamente diventata più fredda. Il raffreddamento è stato particolarmente intenso intorno al 1960 e vi sono oggi molte prove di corrispondenti inversioni delle migrazioni degli uccelli e dei pesci e di variazioni nella estensione delle colture e delle foreste."

L'articolo di Lamb si chiudeva con la seguente considerazione: "Tutti questi eventi hanno messo in luce l'urgente necessità di una previsione climatica a lunghissima scadenza, la quale però richiede maggiore impegno per la comprensione dell'atmosfera (e delle sue interazioni con gli oceani) ed una ulteriore ricostruzione dei fatti climatici del passato."

Questa frase di Lamb potrebbe rappresentare un'ottima conclusione anche per questa review. Infatti quello di una miglior comprensione dei meccanismi dell'atmosfera anche attraverso un maggior studio dei climi del passato è obiettivo condivisibile da tutti.

Bibliografia

- L. Agassiz, 1840. *Études sur les glaciers*, Jent & Gassmann, Neuchâtel, Switzerland, 346 p.
- S. Arrhenius, *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground*, Philos. Mag. 41 (1896) 237–275.
- Bard E., 2004. *Greenhouse effect and ice ages: historical perspective*, R. Geoscience 336 (2004), 603–638.
- Berger A., 1988. *Milankovitch theory and climate*, Rev. Geophys. 26 (1988) 624–657.

Tab.1 – Sorgenti e accumuli di energia (White, Mottershead e Harrison, 1992).

Tab. 1 - *Energy sources and energy stores* (White, Mottershead e Harrison, 1992).

Voce	Energia (x 10 ²⁰ J)
Energia totale annua intercettata dal Sole	54385
Energia emessa dal terremoto cinese del 1976	5006
Energia accumulata nelle riserve di carbone accertate*	52
Energia accumulata nelle riserve di petrolio accertate*	74
Energia accumulata nelle riserve di gas naturale accertate*	29
Calore latente assorbito annualmente dallo scioglimento di neve e ghiaccio	15
Flusso energetico dall'interno della Terra	27
Radiazione totale ricevuta dalla Luna	6
Energia emessa dall'eruzione del Krakatoa (1883)	1.49 x 10 ³
Radiazione totale ricavata dalle stelle	0.60 x 10 ⁻⁵

(*) dati 2004 (BP, 2005)

de Charpentier J., 1841. *Essai sur les Glaciers et sur le terrain erratique du bassin du Rhône*, M. Ducloux, Lausanne, 363 p.

Chiminello V., 1776. *Memoria che fu incoronata dall'Imperiale Accademia delle Scienze di Siena sul Problema posto per l'anno 1773, e aggiudicato nel 1775, stampato in Padova nella stamperia del Seminario appresso Giovanni Manfrè*, 95 pp.

Fourier J., 1824. *Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*, J. Fourier Ann. Chim. Phys. 27 (1824) 136–167.

Fourier J., 1827. *Mémoire sur les Températures du Globe Terrestre et des Espaces Planétaires*, Mémoires de l'Académie royale des sciences de France, 6, 570–605.

Lamb H.H., 1966. *The changing climate*, Methuen, London, 236 pp.

Lamb H. H. 1977. *Climate, present, past and future*, Methuen, London: 545 pp.

Le Roy Ladurie 1967. *Tempo di festa, tempo di carestia, storia del clima dall'anno mille*, Einaudi.

Pinna M., 1996. *Le variazioni del clima, dall'ultima grande glaciazione alle prospettive per il XXI° secolo*, Franco Angeli, 214 pp.

Tyndall J., 1863. *Heat a Mode of Motion*, 1st ed., D. Appleton, New York, 480 p. (7th ed., Longmans, Green, London, 1887, 591 p.).

2. L'atmosfera e il clima

2.1 Il sistema climatico e l'atmosfera

Quando si parla di sistema climatico viene spontaneo pensare all'atmosfera, un ambito che già di per sé riserva non poche difficoltà conoscitive poiché si tratta del fluido turbolento più complesso del nostro pianeta (Mariani, 2002). Tuttavia la complessità del sistema climatico è assai più elevata poiché l'atmosfera è solo un sottosistema del sistema clima, gli altri essendo rappresentati dagli oceani (ivi compresi i ghiacci oceanici) e dalle terre emerse (con le aree forestali, i ghiacciai, i deserti, le aree coltivate, i corsi d'acqua e le falde).

Si tratta di un sistema le cui variabili guida primarie (variabili che lo influenzano senza esserne influenzate) sono le classiche variabili astronomiche, essendo la Terra un sistema chiuso che scambia energia e informazione ma non materia con l'esterno (Peixoto e Oort, 1992).

Lo scopo principale del sistema climatico è quello di garantire il riequilibrio energetico alle diverse scale. Ad esempio a scala globale il riequilibrio fra basse e alte latitudini è ottenuto attraverso un flusso medio annuo di energia che a 40° di latitudine è stimato in 4.1*10¹⁵ J / s nell'atmosfera ed in 1.1*10¹⁵ J / s negli oceani. In tutto il flusso totale annuo di energia verso Nord a 40° di latitudine è pari a 1.3*10²³ J, una quantità di energia veramente enorme e pari a circa 1500 volte i consumi energetici globali annui dell'umanità (questi ultimi pari a circa 8.4*10¹⁹ J ovvero 7.000.000.000 di tonnellate equivalenti di petrolio). I dati in tabella 1 mostrano l'enorme divario esistente tra l'energia fornita al nostro pianeta dal sole da un lato e le riserve fossili ed i consumi energetici umani da combustibili fossili dall'altro.

Nello specifico il legame fra clima ed entità biologiche è un esempio evidentissimo di come sul nostro pianeta tutto si leghi attraverso interazioni che hanno luogo su piani diversissimi e che comportano il fatto che i viventi siano da un lato soggetti al clima e dall'altro agiscano a loro volta attivamente sul clima, influenzando ad esempio sulla composizione atmosferica e sull'albedo.

Fujita classificò i fenomeni meteorologici in relazione all'ordine di grandezza della dimensione orizzontale (Bluestein, 1992; Fujita, 1986) e, per i nostri scopi, può

Tab. 2 – Le scale della meteorologia con le dimensioni spaziali e temporali caratteristiche ed alcuni esempi di fenomeni associati (Fujita, 1986)**Tab. 2 - Scales of meteorology with spatial and temporal dimensions and some examples of associated phenomena (Fujita, 1986)**

Scala	Dimensione indicativa		Fenomeni nella bassa tropo-sfera e al suolo	Fenomeni nella media e alta troposfera
	spaziale	Temporale		
macroscala α (alfa)	> 10000 km	> 15 gg.		Onde planetarie
macroscala β (beta)	2000-10000 km	1 settimana	Cicloni extra-tropicali	Onde barocline, correnti a getto
mesoscala α (alfa)	200-2000 km	2 - 3 giorni	fronti freddi, caldi e occlusi	jet di bassa quota
mesoscala β (beta)	20-200 km	6 ore - 1 giorno	Linee dei groppi, Venti catabatici (foehn)	temporali supercella, banchi di strato-cumuli
mesoscala γ (gamma)	2-20 km	3 ore	rovesci temporaleschi, aree precipitative a mesoscala	cumulonembi, turbolenze in aria chiara
Microscala α (alfa)	200 m-2 km	0.5 h	banchi di nebbia, gelate	Traiettorie in quota di tornado e trombe d'aria
Microscala β (beta)	20-200 m	5 min	dust devils	Vortici interni ai corpi nuvolosi
Microscala γ (gamma)	< 20 m	10 s	pennacchi di fumo	-

essere utile utilizzare le scale presentate da tale autore e rappresentate in tabella 2 con i fenomeni più significativi ad esse associati.

Si noti che al diminuire della dimensione dei sistemi anche la loro durata nel tempo si riduce.

Le scale temporali hanno una precisa base fisica come mostrano gli spettri temporali dell'energia cinetica atmosferica, la cui analisi (Daley, 1993) evidenzia i picchi descritti in tabella 3. Di tipo fisico (la cosiddetta cascata energetica di Kolmogorof) è pure il legame esistente fra scale diverse, per cui ad esempio, andando dal grande verso il piccolo, un anticiclone (dimensione di migliaia di km) determina il tempo sull'Europa, sull'Italia, sulla Valpadana e giù giù fino a produrre un banco di nebbia in una golena del Po mentre, all'opposto (dal piccolo verso il grande) un piccolo temporale (dimensioni dell'ordine del km) va ad incidere sul bilancio energetico del pianeta.

Da tali considerazioni sulle scale dei fenomeni derivano alcuni importanti elementi pratici e cioè:

- la comprensione di un fenomeno a microscala non può prescindere dalla valutazione di ciò che avviene a macro ed a mesoscala, per cui ad esempio la conoscenza della circolazione a macroscale ed a mesoscala è utile per la comprensione del campo del vento nel boundary layer (Oke, 1978; Stull, 1997) oppure fra i fattori d'innescio di una gelata tardiva alle medie latitudini rientrano il bilancio energetico di superficie (microscala), i drenaggi di aria fredda dalle pendici (avvezioni a micro ed a mesoscala) e l'apporto di aria artica o polare continentale (avvezioni a macroscale). Si pensi anche all'anomalia termica tipica delle stazioni meteorologiche dell'Europa centrale e che sarà positiva in inverni in cui dominano le westerlies e negativa in inverni in cui domina la circolazione da est
- i dati meteorologici acquisiti con strumentazioni di misura (reti di stazioni a terra, radiosondaggi, satelliti, radar, ecc.) possono descrivere in modo realistico determinate strutture meteorologiche solo a condizione di adottare frequenze di campionamento nello spazio e

nel tempo adeguate allo scopo che ci si prefigge, onde evitare problemi di aliasing (Daley, 1993). Ad esempio una rete di stazioni che miri a descrivere il campo delle precipitazioni temporalesche dovrà essere orientativamente posta ai nodi di una griglia quadrata con passo di griglia dell'ordine dei 3-5 km e la totalizzazione dei dati di precipitazione delle singole stazioni dovrà avvenire su periodi dell'ordine dei 5 - 15 minuti.

- Trarre conclusioni di natura globale per fenomeni osservati a scale più piccola può rivelarsi fuorviante (tabella 4).

Bibliografia

- Bluestein H.B., 1992. *Synoptic-Dynamic meteorology of mid latitudes, Vol I, Principles of kinematics and dynamics, Oxford Univ. Press, 432 pp.*
- BP, 2004. *Statistical Review of World Energy 2005 (www.bp.com)*
- Daley R., 1993. *Atmospheric data analysis, Cambridge Univ. Press, 456 pp.*
- Fujita T.T., 1986. *Mesoscale classifications: their history and their application to forecasting, in Mesoscale meteorology and forecasting, American meteorological Society, Boston, 18-35.*
- Mariani L., 2002. *Dispensa di agrometeorologia, Clesav, Milano, 292 pp.*
- Oke T.R., 1978. *Boundary layer climates, Methuen & Co. Ltd, London, 371 pp.*
- Peixoto J.P., Oort A.H., 1992. *Physics of climate, American Institute of Physics, New York, 520 pp.*
- Strong, C. M., F.-F. Jin, and M. Ghil (1995). *Intraseasonal oscillations in a barotropic model*
- Stull R.B., 1997. *An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 670 pp.*

Tab. 3 - Picchi nella distribuzione temporale dell'energia cinetica atmosferica (da Daley, 1993 - modificato).**Tab. 3** – Peaks of time distribution of kinetic energy into the atmosphere (from Daley, 1993 - modified)

Scala temporale	spiegazione
1 minuto	Turbolenza a microscala
1 giorno	Ciclicità solare diurna
Fra 1 giorno e 1 mese	Perturbazioni delle medie latitudini
1 anno	Ciclicità solare annua

2.2 Clima e circolazione atmosferica

L'elemento cruciale che caratterizza la circolazione atmosferica del nostro pianeta (Houghton, 2002) è la circolazione globale a tre celle, con la cella di Hadley che agisce come cella termica diretta, con aria calda che sale all'equatore e ricade ai tropici. La dinamica delle celle e l'azione deviante della forza di Coriolis giustifica la presenza della zona di Convergenza Intertropicale (ITCZ) e le due cinture di alta (cintura degli anticicloni dinamici subtropicali) e bassa pressione (cintura dei cicloni delle alte latitudini) con la fascia delle medie latitudini dominata dalle grandi correnti occidentali (westerlies) e la fascia subtropicale dominata dagli alisei (trade winds). La generazione di tre grandi celle è funzione della velocità angolare del pianeta; se infatti tale velocità fosse superiore a quella attuale il numero di celle sarebbe maggiore.

Poiché le westerlies sono instabili a piccole perturbazioni, il flusso alle medie latitudini è caratterizzato da onde o vortici che sono i maggiori responsabili del trasporto di calore verso i poli. I vortici sono evidenti a scale comprese fra la macroscale alfa (innescati in tal caso soprattutto dal macrorilievo e dal contrasto termico fra terre e oceani), la macroscale beta (le onde barocline che estraggono energia dalle westerlies tramite i meccanismi di instabilità frontale) e giù giù fino ai singoli elementi convettivi propri della mesoscale gamma. I sistemi frontali (alias onde barocline alias cicloni extratropicali) hanno un ciclo di vita di circa una settimana e transitano lungo tracce imposte dalle più lente onde planetarie. I cicloni extratropicali hanno una larga componente rotazionale del vento ed una minore componente divergente; quest'ultima è tuttavia importante poiché la convergenza nella bassa troposfera e la divergenza nell'alta troposfera sono alla base dei moti verticali che danno luogo alla formazione di nubi ed alle precipitazioni.

L'interfaccia tra le masse d'aria fredda delle alte latitudini e le masse più calde delle medie latitudini, il cosiddetto fronte polare, è zona di genesi di nuove perturbazioni e si mantiene nel tempo grazie all'energia del robusto jet del fronte polare, di norma localizzato all'interno delle westerlies alla quota di circa 300 hPa.

Dallo studio della circolazione atmosferica e della sua variabilità temporale ci viene un'importante definizione (Sneyers, 1993) di cambiamento climatico come brusco e improvviso ("abrupt" in lingua inglese) cambiamento di frequenza e persistenza dei tipi circolatori. Un caso di questo genere è costituito dal brusco cambiamento del regime circolatorio osservato per l'area europea intorno al 1980 e che a livello di circolazione generale è segnalato ad esempio dalla discontinuità presente nell'indice NAO (Werner *et al.*, 2000). Un analogo cambiamento è stato evidenziato alla fine degli anni '70 per l'area pacifica del Nord America (Ramakrishna *et al.*, 2001).

Anche Holton (2004) sottolinea che la ripetuta osservazione di un'alternanza nella circolazione extratropicale fra uno stato "high index" - caratterizzato da forte flusso zonale e deboli ondulazioni - ed uno stato "low index" - caratterizzato da debole flusso zonale e ampie ondulazioni - suggerisce da un lato l'esistenza di più di un regime climatico compatibile con un certo livello delle forzanti esterne e dall'altro il fatto che il clima possa subire

Tab. 4 - Ordine dimensionale di alcune tipiche aree di riferimento per l'attività agrometeorologica. Si noti come i fenomeni percepiti o rilevati a livello di azienda agricola, di regioni e anche di nazioni si rivelino inadeguati per cogliere tendenze a livello globale.

Tab. 4 – Dimensional order of some typical reference areas for agrometeorological activities. Is evident that phenomena observed at farm level or also at local level or at country level are frequently unsuitable to highlight global phenomena and trends.

Area geografica	Dimensione (Km ²)	Rapporto rispetto alla superficie terrestre
Superficie terrestre	510.000.000	1 : 1
Italia	300.000	1 : 1.700
Una regione italiana	20.000	1 : 25.500
Un'azienda da 100 ha	1	1 : 510.000.000

transizioni di tipo caotico fra regimi alternativi. Il fatto che i due stati "low index" e "high index" corrispondano a due distinti regimi climatici quasi-stabili è oggetto di controversia. Tuttavia il concetto generale di oscillazione fra due regimi quasi - stabili può essere dimostrato in modo convincente tramite esperienze di laboratorio condotte con l'ausilio di contenitori cilindrici in rotazione riempiti con un fluido (Holton, 2004).

Le evidenze di transizioni repentine da un regime climatico ad un altro trovano un interessante riscontro nell'analisi delle proxy series, da cui emerge una messe crescente di cambiamenti bruschi, con transizioni di regime che hanno portato alcuni autori ad affermare che i cambiamenti climatici non procedono attraverso gradualità e lente modificazioni ma invece attraverso discontinuità (salti) da un regime circolatorio atmosferico ad un altro (Bryson, 1974; Lockwood, 2001). Tali constatazioni hanno portato alcuni ad esprimere dubbi sull'importanza delle forzanti astronomiche nei cambiamenti climatici in quanto, se si escludono eventi acuti come impatti con asteroidi o comete, non ci è dato di vedere elementi cosmici in grado di subire fluttuazioni tanto brusche. D'altro canto il ricorso a cause astronomiche presenta il vantaggio di giustificare cambiamenti bruschi (es: Dryas recente) rilevati in aree del nostro pianeta tanto lontane fra loro.

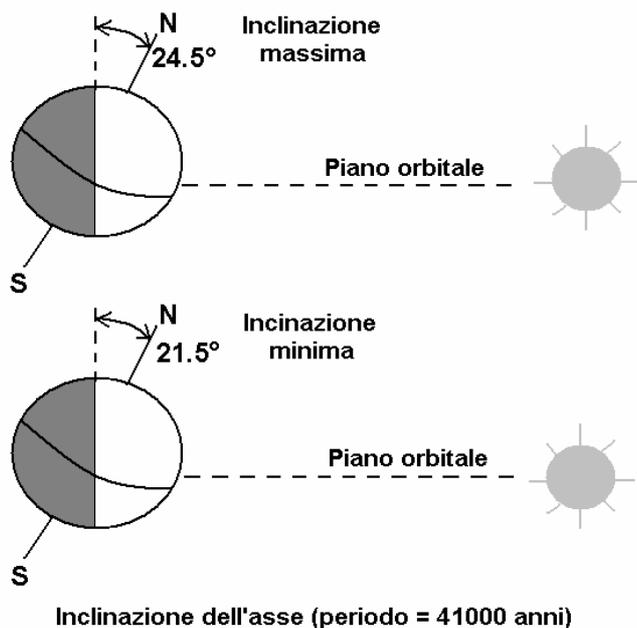
Bibliografia

- Bryson R.A., 1974. *A Perspective on Climatic Change*, Science 184: 753-60.
- Holton J.R., 2004. *An introduction to dynamic meteorology, fourth edition*, Elsevier, 535 pp.
- Houghton J., 2002. *The physics of atmospheres*, Cambridge University Press, 320 pp.
- Lockwood J.G., 2001. *Abrupt and sudden climatic transition and fluctuations: a review*, Int. J. Climatol., 21: 1153-1179 (2001).
- White I.D., Mottershead D.N., Harrison S.J., 1992. *Environmental systems, an introductory text, second edition*, Stanley Thornes Publishers Ltd, 616 pp.
- Ramakrishna R. N, White M.A., Cayan D.R., Jones G.V., Running S.W., Coughlan J-C., Peterson D.L., 2001. *Asymmetric warming over coastal California and its impact on the premium wine industry*, Climate research, Vol. 19, pp. 25-34.
- Sneyers R., Palmieri S., Siani A.M., 1993. *Characterising trends in climatological time series. An application to Brera observatory (Milan) rainfall series*, Proceedings of international conference on applications of time series analysis to astronomy and meteorology, Università di Padova, 6-10 settembre 1993, pp. 321-328.
- Werner, P. C., Gerstengarbe F.W., Fraedrich K, Oesterle K. *Recent climate change in the North Atlantic/European sector*, International Journal of Climatology, Vol. 20, Issue 5, 2000: 463-471.

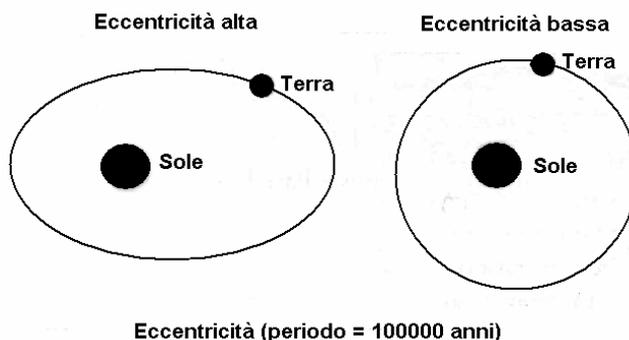
Fig. 1 - Variazioni cicliche delle variabili orbitali. In 1a viene riportata l'eccentricità (periodo dominante=100.000 anni). Le fasi ad alta eccentricità presentano traiettoria più ellittica quelle a bassa eccentricità una traiettoria più circolare; in 1b viene mostrata l'inclinazione dell'asse rispetto al piano orbitale e in 1c la precessione degli equinozi.

Fig. 1 – Cyclic variations of orbital variables of Earth. Eccentricity (dominant period=100.000 years) is presented in figure 1a. The phases with higher eccentricity present a more elliptic trajectory than phases with a more circular trajectory. 1b show the tilt of axis referred to the orbital plane and 1c the precession of equinoxes.

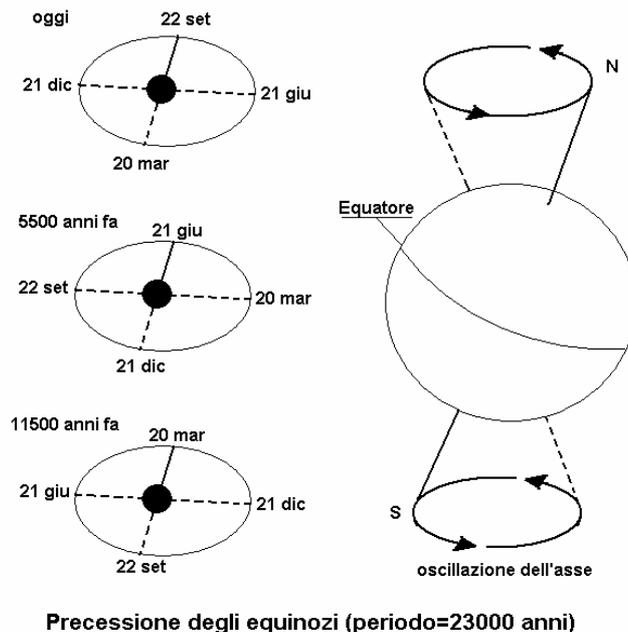
1.b



1.a



1.c



3. Variabilità del clima

Il clima terrestre varia significativamente e con continuità su scale temporali comprese fra pochi anni e l'età del pianeta (Peixoto e Oort, 1992).

La variabilità del clima si esprime in due modi fondamentali: (i) variazioni forzate che sono la risposta del sistema a cambiamenti nelle cause (forzanti) esterne (variabili che influenzano il clima senza esserne influenzate) (ii) variazioni libere che sono provocate da cause (forzanti) interne che conducono a interazioni non lineari fra le varie componenti del sistema climatico.

3.1 Clima e forzanti esterne

Le forzanti esterne sono rappresentate dall'insieme dei fenomeni che si producono ad una scala più ampia rispetto a quella del sistema terrestre e che possono influire sulle sue condizioni. L'attenzione a tali forzanti è molto importante in quanto ci permetterà in futuro di comprendere appieno il rapporto tra contributi umani e contributi naturali consentendo dunque previsioni più esatte sul futuro climatico della Terra.

Le forzanti esterne del sistema sono rappresentate da fattori astronomici, fra cui in particolare (i) l'attività solare che manifesta una variabilità dovuta ai processi fluidodi-

namici e di combustione interni, e che dunque produce mutevoli input di energia per il sistema terrestre (ii) l'orbita della Terra che presenta caratteristiche di variabilità e (iii) una serie di altri fattori tra i quali si annoverano i raggi cosmici.

La più vecchia teoria che interpreta la variabilità climatica in termini di forzanti astronomiche è la già citata teoria di Milankovitch che si basa sulle leggi fondamentali della meccanica celeste le quali, regolando il moto della Terra attorno al Sole, regolano di fatto il succedersi delle stagioni ed i periodi di illuminazione giornaliera.

Le tre variabili orbitali fondamentali chiamate in causa da Milankovitch (figura 1) sono le seguenti: (i) l'eccentricità dell'orbita dovuta al movimento planetario su un'orbita ellittica (ii) l'inclinazione dell'asse terrestre sul piano orbitale (piano dell'eclittica) e (iii) la precessione degli equinozi legata alle attrazioni reciproche fra pianeti. Dal sovrapporsi di questi effetti diversi si verificherebbero le condizioni alla base del mutamento climatico. I periodi principali previsti dalla teoria sono: 21-23 mila anni per la precessione, 41 mila anni per l'obliquità e 90 - 100 mila anni per l'eccentricità.

Le attuali prove della correttezza scientifica di questa teoria riguardano principalmente i periodi più brevi, ovvero quelli associati alle ciclicità di venti e quarantamila anni, mentre il ciclo a centomila anni presenta ancora no-

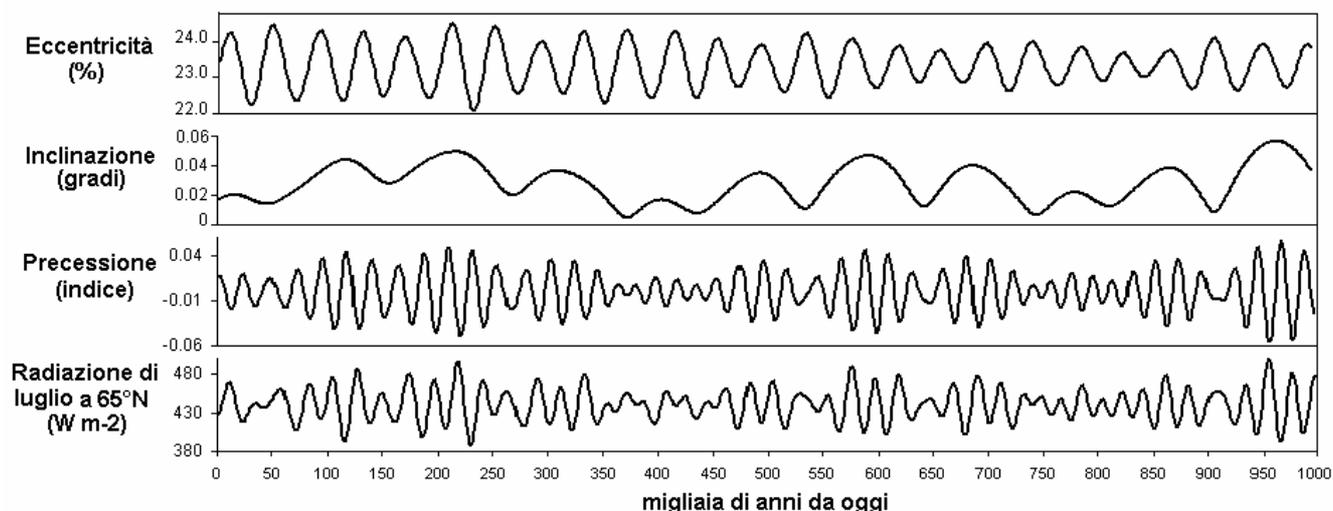


Fig. 2 - Ciclicità orbitali e flusso di radiazione solare medio a 65°N nel mese di luglio (Berger e Loutre, 1991).

Fig. 2 - Orbital Variations and mean flux of solar radiation at 65°N in July (Berger and Loutre, 1991).

tevoli difficoltà interpretative non essendo sufficientemente suffragato dai record storici. In particolare Muller e MacDonald (1997) imputano questa ciclicità all'inclinazione e non all'eccentricità dell'orbita mentre Berger (1999) imputa le variazioni rispetto al ciclo previsto dalla teoria ad oscillazioni interne del sistema climatico terrestre ovvero all'ipotesi dell'inclinazione. Altri studi sembrano ridare credito alla teoria di Milankovitch suggerendo che una crescita dei ghiacci nel corso delle stagioni caratterizzate da bassa insolazione possa produrre fenomeni isostatici che determinano un allungamento del periodo dei 100 mila anni (Ridgwell *et al.*, 1999; Parrenin e Paillard, 2003).

Nonostante esistano ancora forti opposizioni ad una teoria non-stocastica del fenomeno (Wunsch, 2004), quando si analizzano i battimenti relativi alle diverse frequenze dei fenomeni considerati, la corrispondenza fra la teoria ed i dati sperimentali risulta accentuata (figura 2) e l'esistenza di un clima non solo in perenne mutamento

ma che risponde a fenomeni ciclici e in larga misura parametrizzabili, rappresenta una importante oggettivazione delle nostre conoscenze.

Per quanto riguarda poi l'attività solare è necessario segnalare che la sua variabilità è stata studiata e stimata per gli ultimi 5 milioni di anni (Berger e Loutre, 1991) e stime accurate per gli ultimi 130 anni permettono di correlare questa variabile con la temperatura superficiale (Reid, 1987).

Tralasciando i processi termonucleari stellari che modificano nel lungo periodo la struttura magnetoidrodinamica del Sole e quindi l'irraggiamento prodotto, le osservazioni da satellite mostrano che le variazioni sono direttamente correlate al ciclo undecennale dell'attività magnetica solare, con un aumento dell'energia che perviene alla Terra dello 0.1% tra il minimo e il massimo di tale attività (Spadaro 2002).

Anche se queste variazioni appaiono sincrone rispetto a quelle della temperatura (Friis-Cristensen e Lassen, 1991- figura 3), la magnitudine assoluta di questa variazione non sembra poter essere dovuta direttamente alla quantità di calore ricevuto. Per questo motivo è stato recentemente proposto un meccanismo che coinvolge la variazione del campo magnetico durante il ciclo di attività solare.

Il campo magnetico medio aumenta durante i periodi di massima attività ed espandendosi nel mezzo interplanetario è in grado di modulare il flusso dei raggi cosmici galattici che raggiunge l'atmosfera terrestre. Un campo magnetico più intenso scherma maggiormente l'atmosfera dai raggi cosmici causando una diminuzione nella quantità di nubi e conseguentemente un aumento della temperatura superficiale (Shaviv, 2003; Shaviv e Veizer, 2003). Questa teoria risulta particolarmente attraente per il semplice meccanismo fisico e per le diverse coincidenze temporali fra attività solare e massimi e minimi di temperatura che è in grado di spiegare, come ad esempio il minimo termico in coincidenza con il minimo di attività solare che va dal 1645 al 1715 (minimo di Maunder). Per quanto riguarda l'ipotizzata azione dei raggi cosmici sulla formazione delle nubi si veda ad esempio la discussione condotta da Pallè e Butler (2002).

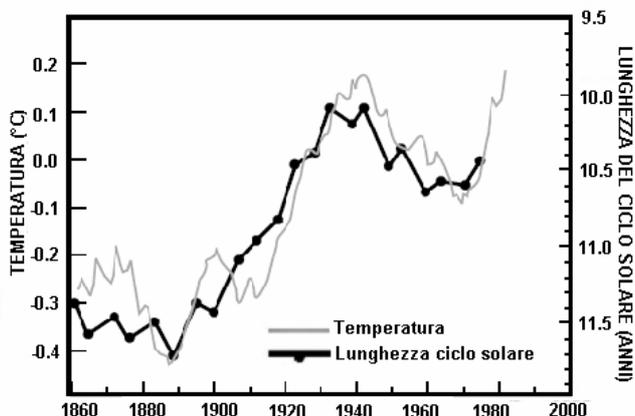


Fig 3 – Medie mobili undecennali dell'attività solare espressa come lunghezza del ciclo delle macchie solari (anni) comparata con le temperature globali (Friis-Cristensen e Lassen, 1991).

Fig. 3 – 11 years moving average of solar activity expressed as length of cycle of sunspots (years) compared to global temperatures (Friis-Cristensen e Lassen, 1991).

Bibliografia

- Berger, W.H., 1999. *The 100-kyr ice-age cycle: internal oscillation or inclinational forcing?* *Int. J. Earth Sci.*, 88, 305-316
- Berger, A. e Loutre, M.F., 1991. *Insolation values for the climate of the last 10 million years.* *Quat. Sci. Rev.*, 10, 297-317.
- Friis-Cristensen, E. and Lassen, K., 1991. *Length of solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate.* *Science*, v. 254, p. 698-700.
- Muller, R.A., e McDonald, G.J., 1997. *Spectrum of 100-kyr glacial cycle: orbital inclination, nor eccentricity.* *Procl. Nat. Acad. Sci. USA*, 94, 8329-8334.
- Pallè E., Butler C.J., 2002. *The proposed connection between clouds and cosmic rays: cloud behaviour during the past 50–120 years.* *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 64 (2002) 327–337
- Parrenin, F. e Paillard, D., 2003. *Amplitude and phase of glacial cycle from a conceptual model.* *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 214, 243-250.
- Reid, G.C., 1987. *Influence of solar variability on global sea surface temperature.* *Nature*, 329, 142-143
- Ridgwell, A.J., Watson, A.J., e Raymo, M.E., 1999. *Is the spectral signature of the 100 kyr glacial cycle consistent with a Milankovitch origin?* *Paleoceanography*, 14, 437-440.
- Shaviv N.J., 2003. *The spiral structure of the Milky Way, cosmic rays, and ice age epochs on Earth.* *New Astronomy* 8 (2003) 39–77
- Shaviv, N.J. e Veizer, J., 2003. *Celestial driver of phanerozoic climate.* *GSA Today*, 13, 4-10.
- Spataro, D., 2002. *L'irraggiamento solare e le variazioni del clima terrestre.* *ECOone*, 1-8.
- Wunsch, C., 2004. *Quantitative estimate of the Milankovitch-forced contribution to the observed Quaternary climate change.* *Quart. Sci. Rev.*, 23, 1001-1012.

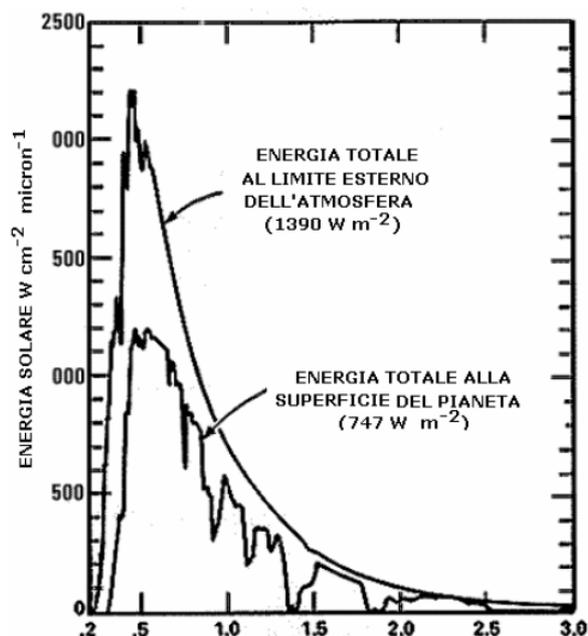


Fig. 4 – radiazione solare in funzione della lunghezza d'onda, in superficie e all'esterno dell'atmosfera.

Fig. 4 – solar radiation as function of wavelength at surface and outside the atmosphere.

3.2 Clima e forzanti interne al sistema

Fra le forzanti interne al sistema (Peixoto e Oort, 1992) possiamo considerare (i) le variazioni nella composizione atmosferica legate all'uomo, agli altri esseri viventi ed a cause abiotiche (es: attività vulcanica) (ii) le variazioni delle caratteristiche della superficie legate a processi quali l'urbanizzazione, la messa a coltura di terre e la de-

sertificazione e (iii) i processi a lungo termine legati a fattori tettonici quali la deriva dei continenti e l'orogenesi. Nella nostra trattazione ci limiteremo ad affrontare il tema dei gas atmosferici, delle nubi e dell'uso del suolo.

3.2.1 I gas atmosferici

Il bilancio radiativo del sistema terrestre si fonda sull'equilibrio fra radiazione solare entrante - a onda corta in quanto proveniente da un corpo con temperatura superficiale di circa 6000 K - e radiazione terrestre uscente, a onda lunga in quanto emessa da corpi con temperatura superficiale di circa 300 K. La differenza tra la composizione spettrale in ingresso e quella in uscita è determinata dalle interazioni tra la radiazione solare ed il sistema terrestre che avvengono sia in atmosfera sia in superficie. Un'alterazione fondamentale della marcatura spettrale è dovuta alla composizione chimica dell'atmosfera e, più in particolare, ai gas in traccia (componenti minoritari). I gas in traccia vengono talvolta confusi con i gas inquinanti; a tale riguardo si deve tuttavia segnalare che l'atmosfera, essendo una miscela di diversi composti chimici, presenta normalmente una struttura composita. La presenza di questi gas produce un assorbimento selettivo a carico delle bande della radiazione solare in quanto ogni singolo gas è capace, in funzione della propria struttura molecolare, di dar luogo ad un assorbimento a diverse lunghezze d'onda.

In figura 4 è mostrato l'effetto di assorbimento dell'atmosfera nel suo complesso rispetto alla radiazione solare incidente alla sommità dell'atmosfera stessa.

Alcuni composti atmosferici vengono definiti gas serra (GreenHouse Gases o GHG) o climalteranti per le proprie capacità di effettuare assorbimenti selettivi sulla radiazione uscente dal nostro pianeta. Il meccanismo è il seguente. La radiazione in ingresso nell'atmosfera viene parzialmente alterata dai composti presenti e giunge in superficie modificata, in qualità e quantità. Alla superficie tale radiazione - che ricade nelle bande dell'ultravioletto, del visibile e dell'IR vicino - viene ulteriormente assorbita ed una quota viene utilizzata per i processi superficiali mentre la restante parte viene riflessa (albedo) oppure riemessa dalla superficie come radiazione termica ad una lunghezza d'onda che ricade nell'infrarosso lontano e che è funzione della temperatura raggiunta dalla superficie stessa (Peixoto e Oort, 1992).

A questo punto la radiazione in uscita con componente corta e lunga incontra di nuovo l'atmosfera con i suoi composti ma l'effetto è diverso rispetto a quello osservato in occasione del suo primo ingresso. Infatti, i gas che prima presentavano un finestra spettrale nella componente corta, ovvero non la assorbivano o lo facevano molto poco, ora sono in grado di effettuare forti assorbimenti sulla radiazione nell'infrarosso lontano impedendone la "fuga" nello spazio e riemettendola in parte verso la superficie (Figura 5). Tra i principali composti GHG vi sono il vapor d'acqua (H_2O), l'anidride carbonica (CO_2), il metano (CH_4) ed il protossido d'azoto (N_2O).

Si può dunque dire che questi composti fungono da "coperta", riscaldando la superficie del pianeta. In generale questo effetto non è una cosa disprezzabile in quanto la vita sul nostro pianeta si sarebbe sviluppata

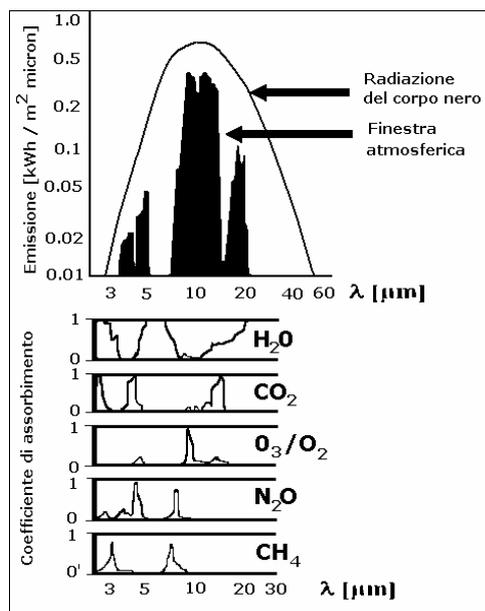


Fig. 5 – Spettri di assorbimento nell'IR lontano dei principali gas serra.

Fig. 5 – Spectra of absorption of principal greenhouse gases in the far IR.

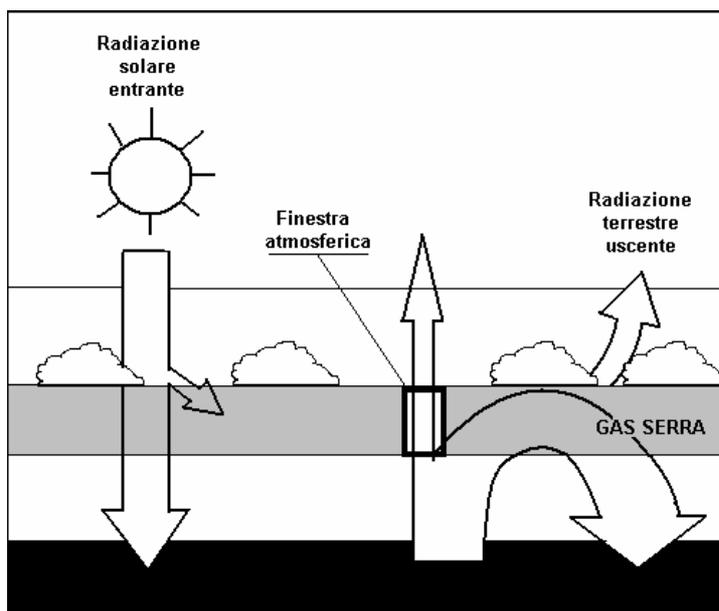


Fig. 6 – Schema semplificato del bilancio radiativo del nostro pianeta.

Fig. 6 – A simplified scheme of radiation balance of Earth.

proprio in virtù dell'effetto "coperta" prodotto dai GHG nel corso delle ere geologiche.

In passato l'attività dei vulcani ha rilasciato anidride carbonica in quantità sufficiente da permettere alla temperatura superficiale del pianeta di crescere da un valore intorno a -18°C a quello che sperimentiamo tutti i giorni e ci permette di avere a disposizione acqua liquida e cioè a temperatura maggiore di 0°C . Infatti, mediamente la superficie della Terra emette 390 Wm^2 , ma da satellite si può misurare un'emissione di 237 Wm^2 , la differenza di 153 Wm^2 è l'effetto dovuto all'atmosfera (Visconti, 1989). In questo effetto serra non 'patologico' la CO_2 è responsabile per qualche punto percentuale del fenomeno complessivo, mentre il ruolo di primo attore è giocato dal vapore d'acqua.

Può essere interessante cercare di esprimere in termini quantitativi il contributo dei diversi gas all'effetto serra complessivo del nostro pianeta. In tal senso è possibile proporre due diversi modi di stima del peso relativo dei diversi GHG in termini di effetto serra: uno basato sul peso attuale e l'altro basato sul peso atteso in coincidenza con l'aumento delle temperature ipotizzato per il futuro da modelli circolatori globali. Rispetto al primo tipo di calcolo occorre premettere che ogni stima sul peso relativo attuale dei diversi GHG in termini di effetto serra è in qualche misura inficiata dal fatto che le rispettive bande di assorbimento sono in parte sovrapposte. Un modo ragionevole che è stato utilizzato per affrontare il problema è dunque quello di utilizzare un modello matematico e rimuovere un gas alla volta vedendo cosa succede.

Tab. 5 – Contributo dei diversi gas all'effetto serra.

Tab. 5 – Contribution of different atmospheric gases to greenhouse effect.

Specie gassosa rimossa	% di radiazione a onda lunga intrappolata rispetto a quella intrappolata senza rimozione di gas	% radiazione a onda lunga emessa rispetto a quella emessa senza rimozione di gas	peso come gas serra (in % rispetto alla sommatoria dei contributi dei singoli gas)
1 altri GHG	98	2	3.6
2 O_3	95	5	9.1
3 CO_2	88	12	21.8
4 H_2O	64	36	65.5
5 sommatoria contributi singoli gas (1+2+3+4)		55 (*)	100
6 rimozione congiunta di $\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2, \text{O}_3$ e altri GHG	52	48 (*)	

(*) NB: la sommatoria dei contributi all'emissione dovuti alla rimozione dei singoli gas è superiore rispetto all'effetto ottenuto con la rimozione di tutti i gas contemporaneamente, in virtù della sovrapposizione parziale degli spettri di assorbimento

In tal modo si è realizzata la tabella 5, da cui si deduce che i tre principali gas serra (O_2 , CO_2 , O_3 e altri GHG) sono responsabili dell'intercettamento di circa il 52% della radiazione a onda lunga uscente. Di tale frazione il 66% viene intrappolata da H_2O , il 22% da CO_2 ed il 9% da O_3 e il 4% dagli altri GHG.

L'aumento di vari °C delle temperature globali in superficie pronosticato dai modelli climatici per i prossimi 100 anni si fonda sull'attesa di un feed-back positivo del vapor acqueo in atmosfera (Cubasch *et al.*, 2001). In molti modelli climatici globali infatti un riscaldamento iniziale da CO_2 provoca un aumento di evaporazione di superficie con generale inumidimento dell'atmosfera che dà luogo ad un ulteriore riscaldamento legato all'effetto serra da vapore acqueo. L'effetto di amplificazione può essere assai ampio, accrescendo il riscaldamento globale medio del 70-90% in rapporto a calcoli effettuati con vapor acqueo fisso (Cess *et al.*, 1990). Da osservare comunque che l'aumento di vapore acqueo in atmosfera causato dall'aumento di CO_2 non è stato a tutt'oggi dimostrato (Minschwater e Dessler, 2004).

Fra i diversi gas serra l'attenzione del mondo scientifico e dell'opinione pubblica si è focalizzata sull'anidride carbonica perché è il prodotto delle reazioni di qualunque tipo di combustione che preveda l'utilizzo di materiale organico e da questo punto di vista è indissolubilmente legata alle attività umane; tali attività hanno visto un'enorme sviluppo negli ultimi 200 anni e, conseguentemente, una crescita marcata nell'utilizzo di risorse fossili per la produzione di energia.

La relazione "incriminata" è illustrata in figura 7, da cui si evidenzia la correlazione esistente fra temperatura in superficie e concentrazione di CO_2 .

L'aumento di concentrazione di anidride carbonica è un fenomeno ubiquitario e quindi fortemente indagato per l'aumento globale delle temperature. La serie storica di misure di concentrazione di tale gas più lunga e famosa è quella dell'Osservatorio geofisico del monte Mauna Loa sulle isole Hawaii mentre per il nostro Paese la serie più nota è senza dubbio quella del Monte Cimone, curata dal Teleposto dell'Aeronautica Militare Italiana.

Chiaramente il problema posto in questi termini apre inquietanti prospettive di ordine sociale e genera preoccupazioni sul futuro. Queste preoccupazioni vengono ancora più enfatizzate se si ipotizza uno sviluppo esponenziale della popolazione e con esso dei consumi e, conseguentemente, dell'emissione di composti inquinanti e climalteranti.

A ben guardare i diversi comparti del sistema climatico nel quale il bilancio del carbonio è coinvolto, ci accor-

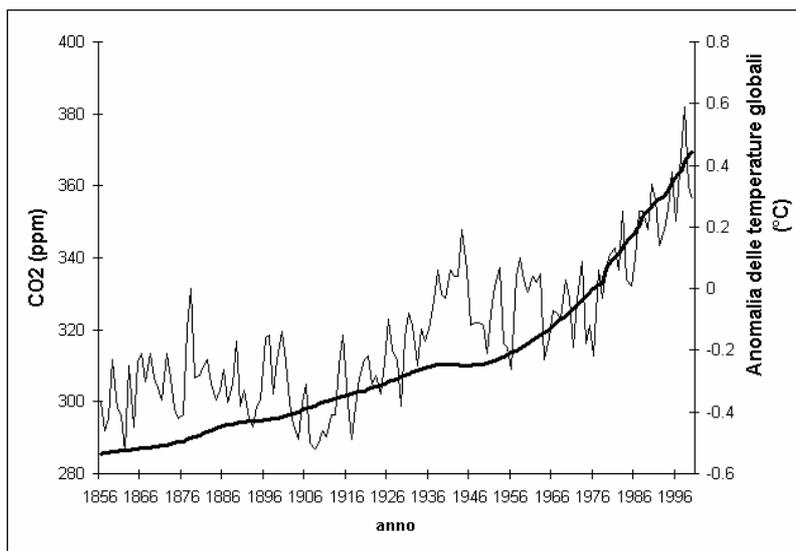


Fig. 7 – Andamento delle concentrazioni atmosferiche di CO_2 (ppm) e delle temperature globali, queste ultime espresse come anomalia rispetto al periodo 1961-90 (Jones *et al.*, 2001). Le concentrazioni atmosferiche di CO_2 per il periodo 1856-1978 sono state ricavate da campioni di ghiaccio del Law Dome DE08 e DE08-2 (Etheridge *et al.*, 1998) e quelle per il periodo 1979-2000 provengono da misure effettuate a Mauna Loa (Keeling e Whorf, 2005).

Fig. 7 – Behaviour of atmospheric concentration of CO_2 (ppm) e of global temperature expressed as anomaly from 1961-90 average (Jones *et al.*, 2001). Atmospheric concentration of CO_2 for 1856-1978 are obtained from ice samples of Law Dome DE08 and DE08-2 (Etheridge *et al.*, 1998) and these for 1979-2000 are from Mauna Loa measurements (Keeling e Whorf, 2005).

riamo che la produzione di CO_2 da combustibili fossili rappresenta una percentuale molto bassa dell'intero ciclo (figura 8). Gli oceani rappresentano la più grande fonte di carbonio terrestre ma purtroppo la descrizione esatta del ciclo del carbonio in ambito oceanico ci è tutt'oggi preclusa perché le nostre conoscenze attuali sono estremamente scarse. La regione superficiale, ben rimescolata dai venti, si trova praticamente in equilibrio con l'atmosfera sovrastante, mentre al di sotto del termocline la quantità totale di carbonio è stimata in 35.000 miliardi di tonnellate. Questa regione, i cui scambi con la superficie sono assai lenti, sembra invece avere una estrema importanza su scale temporali geologiche e quindi climatiche. L'atmosfera, che oggi contiene dai 700 agli 800 miliardi di tonnellate di carbonio, conteneva prima dell'era industriale circa 600 miliardi di tonnellate e le attività antropiche contribuiscono quindi con 5-7 miliardi di tonnellate anno. La teoria che vede le emissioni umane come causa dell'aumento della CO_2 si fonda sul trend decrescente nella concentrazione di C^{14} nell'atmosfera. Infatti la concentrazione di C^{14} , costante fino agli anni 30, è aumentata moltissimo con gli esperimenti nucleari degli anni 40 e 50 ed ora sta calando gradualmente il che sembrerebbe legato alla cessione di carbonio da parte dei combustibili fossili (carbonio che essendo "fossile" non presenta C^{14}). Per inciso il calo del C^{14} per effetto della combustione di combustibili fossili è indicato come effetto Suess dal nome dello scienziato che lo ipotizzò negli anni '50 (Suess e Revelle, 1957).

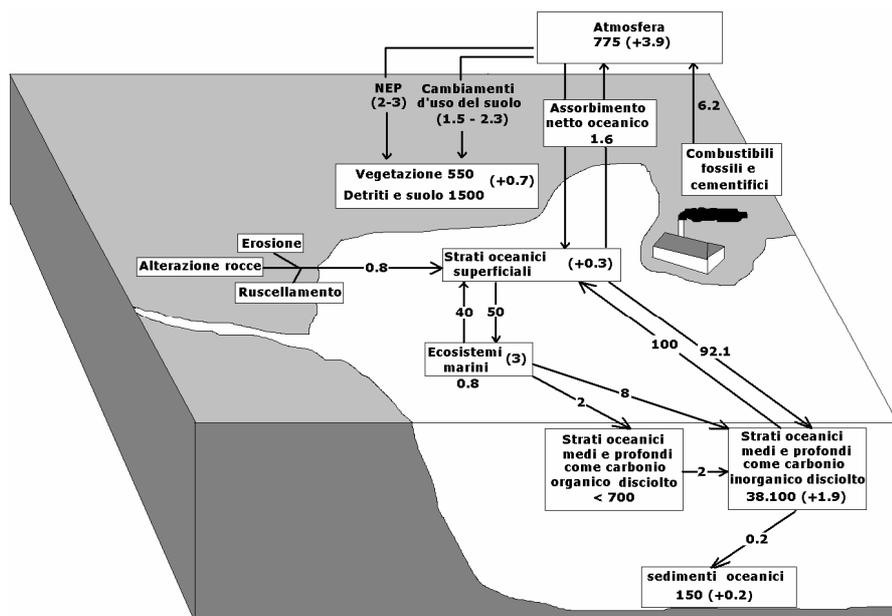


Fig. 8 – Ciclo globale del carbonio per il periodo 1992-1997. L'accumulo terrestre netto (+0.7) tiene in considerazione la produzione primaria lorda (+101.5) la respirazione delle piante (-50), la decomposizione della sostanza organica (-50) e le rimozioni aggiuntive dirette e indirette dall'atmosfera da parte di vegetazione e suolo, nonché il ritorno agli oceani tramite la degradazione delle rocce, l'erosione ed il ruscellamento (-0.8). NEP è la produzione netta ecosistemica. L'assorbimento oceanico netto considera gli scambi atmosfera-mare (90.8 è il rilascio lordo dagli oceani, 92.4 l'acquisizione lorda). Tutti i dati sono espressi in GT di carbonio (1 GT= 10^{15} g di carbonio) con gli incrementi annui messi fra parentesi. Tutti i flussi sono in GT di carbonio per anno (fonte: Oak Ridge National Laboratory, <http://www.esd.ornl.gov>).

Fig. 8 – Global carbon cycle for 1992-1997. The net terrestrial storage (+0.7) considers gross primary production (+101.5), respiration of plants (-50), decomposition of organic matter (-50), direct and indirect subtraction from atmosphere by vegetation and soil and carbon back to the oceans due to weathering of rocks, erosion and runoff (-0.8). NEP is the net primary ecosystemic production. The net oceanic storage takes into account the ocean - atmosphere exchanges (90.8 is the gross release of oceans, 92.4 is the net acquisition). All data are expressed in GT of carbon (1 GT= 10^{15} g of carbon) with yearly increases in brackets. All fluxes are in GT of carbon per year (source: Oak Ridge National Laboratory, <http://www.esd.ornl.gov>).

Come ulteriore prova dell'origine "fossile" dell'aumento della CO₂ atmosferica viene inoltre considerato il trend di C13 in atmosfera, anch'esso in calo. La teoria ora enunciata è oggi generalmente accettata anche se permangono voci critiche di quanti sostengono che la concentrazione di CO₂ in atmosfera sia regolata in primis da fenomeni geologici che agiscono sui grandi serbatoi di tale molecola, ad esempio gli oceani (Segalstad, 1996 e 1998; Dettinger e Ghir, 1998; Soon et al., 1999).

Bibliografia

- Cess, R.D., G.L. Potter, J.P. Blanchet, G.J. Boer, A.D. Del Genio, M. Deque, V. Dymnikov, V. Galin, W.L. Gates, S.J. Ghan, J.T. Kiehl, A.A. Lacis, H. Le Treut, Z.-X. Li, X.-Z. Liang, B.J. McAvaney, V.P. Meleshko, J.F.B. Mitchell, J.-J. Morcrette, D.A. Randall, L. Rikus, E. Roeckner, J.F. Royer, U. Schlese, D.A. Sheinin, A. Slingo, A.P. Sokolov, K.E. Taylor, W.M. Washington, R.T. Wetherald, I. Yagai, and M.-H. Zhang 1990. Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation models. *J. Geophys. Res.* 95, 16601-16615.
- Cubasch, U., G. A. Meehl, G. J. Boer, R. J. Stouffer, M. Dix, A. Noda, C. A. Senior, S. C. B. Raper, and K. S. Yap, 2001: Projections of future climate change. *Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. I. Johnson, eds., Cambridge University Press, 525-582.
- Dettinger DM, Ghil M (1998) Seasonal and interannual variations of atmospheric CO₂ and climate. *Tellus* 50B:1-24
- Etheridge D.M., Steele L.P., Langenfelds R.L., Francey R.J., Barnola J.-M., Morgan V.I., 1998. Historical CO₂ records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A*
- Jones, P.D., D.E. Parker, T.J. Osborn, and K.R. Briffa. 2001. Global and hemispheric temperature anomalies -land and marine instrumental records. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change.*

Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

Keeling, C.D. and T.P. Whorf. 2005. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.*

Minschwater K., Dessler A.E., 2004. Water vapour in the tropical atmosphere: model results and observations, *Journal of climate*, vol 17, 1272-1282.

Ramanathan, V., and J. A. Coakley, 1978: Climate modeling through radiative-convective models. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 16, 465-489.

Peixoto J.P., Oort A.H., 1992. *Physics of climate*, American Institute of Physics, New York, 520 pp.

Revelle, R., and H. E. Suess, 1957: Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean, and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades. *Tellus*, 9:18-27.

Segalstad, T, 1996. The Distribution of CO₂ between Atmosphere, Hydrosphere and Lithosphere; Minimal Influence from Anthropogenic CO₂ on the Global Greenhouse Effect in European Science and Environment Forum: "The Global Warming Debate", London 1996

Segalstad TV, 1998. Carbon cycle modeling and the residence time of natural and anthropogenic atmospheric CO₂: on the construction of the 'greenhouse effect global warming' dogma. In: Bate R (ed) *Global warming the continuing debate. European Science and Environmental Forum, Cambridge*, p 184-218 Senior CA (1999) *Comparison of mechanisms.*

Soon W., Baliunas S.L., Robinson A.B., Robinson Z.W., 1999. Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide (review), *Clim.Res.*, Vol. 13: 149-164.

4.2 Il ruolo delle nubi

Il ciclo dell'acqua rappresenta uno dei principali modi d'interazione fra i vari comparti del sistema climatico. Infatti l'acqua svolge nell'ecosistema terrestre un ruolo fondamentale sia come gas serra sia come vettore dei trasferimenti energetici attraverso i cambiamenti di stato sia ancora come componente essenziale della materia vivente. Il nostro livello di conoscenza a livello globale del

ciclo dell'acqua e più specificamente del comportamento della sua componente 'vapore' è per molti versi inadeguato rispetto alle necessità legate alla comprensione del sistema. In particolare le fondamenta teoriche delle nostre analisi sono assai rozze e troppi assunti vengono formulati senza tenere nel debito conto sia i dati sperimentali sia i fenomeni di retroazione che inevitabilmente si innescano nei processi in esame (Stephens, 2005).

Le nubi sono da questo punto di vista uno dei più complicati capitoli della fisica dell'atmosfera e dell'evoluzione del clima. In ogni istante la Terra è coperta per circa il 60-70% da nubi, la cui presenza modula direttamente la radiazione solare ricevuta alla superficie, modificando il bilancio di energia e tutti i processi a questo associati. Modificazioni sostanziali e protratte nell'indice di copertura (normalmente chiamato *N* e compreso fra 0, assenza di nubi, e 1, copertura totale del cielo) possono causare effetti consistenti alla superficie tanto da giungere addirittura a determinare cambiamenti radicali nella copertura del suolo. Inoltre la presenza delle nubi determina il verificarsi di precipitazioni, le quali a loro volta agiscono sia sul bilancio energetico sia sul bilancio idrico di un areale.

Perché si possano modellizzare le precipitazioni a partire dalla copertura nuvolosa è necessario introdurre, oltre al termine quantitativo (indice di copertura nuvolosa), anche un termine di qualità delle nubi; tale termine è legato alla morfologia delle nubi presenti, la quale a sua volta riflette le loro proprietà microfisiche (temperatura, stato di aggregazione dell'acqua, quota della base e della cima, ecc.) (Sommerville e Remer, 1984; Tseloudis e Rossow, 1994; Greenwald *et al.*, 1995; DelGenio e Wolf, 2000)

Se può apparire eccessivo in questa sede elencare quali nubi si devono considerare precipitanti e quali no, è quantomeno importante ricordare che le nubi generalmente evolvono forzate dalla struttura termica verticale dell'atmosfera, per cui possiamo così rapidamente ripercorrere i due classici schemi (figura 9) di fronte freddo e caldo, da cui ci viene la spiegazione più immediata di quella che è la base della teoria della formazione delle nubi.

In particolare è importante discutere dello stretto legame tra la nube, intesa come insieme di proprietà chimico-fisiche, e lo stato termico dell'atmosfera. Per meglio comprendere il problema, diciamo che la nube si forma quando l'umidità specifica locale supera il valore di saturazione e quando un numero sufficiente di nuclei di condensazione è presente. Coperture disomogenee implicano che in alcuni punti si abbia condensazione mentre in altri no: quindi le proprietà termiche verticali dell'atmosfera per quell'areale sono anch'esse disomogenee.

Consideriamo ora un fatto molto importante, ovvero che le nubi hanno generalmente una tessitura che è di molti ordini di grandezza più piccola rispetto all'area elementare considerata in un modello di circolazione globale. Quando si "gira" un modello climatico GCM, l'area elementare su cui opera il modello è dell'ordine dei 300 x 300 km e la dinamica dei valori medi delle quantità fisiche possiede anch'essa un tempo caratteristico di risposta alle variazioni delle forzanti. Le nubi reali, rispondendo ai processi microfisici che le caratterizzano, hanno tempi

di scala tendenzialmente diversi da quelli del modello (Colman *et al.*, 2001).

Si impone allora di utilizzare una rappresentazione stocastica almeno delle variabili temperatura e umidità in termini di funzioni di densità di probabilità (Jakob e Klein, 1999; Jakob, 2003). Sfortunatamente queste funzioni di distribuzione non sono completamente note e si diversificano in funzione dei differenti processi fisici considerati.

Molto approcci, alcuni dei quali assai promettenti, sono

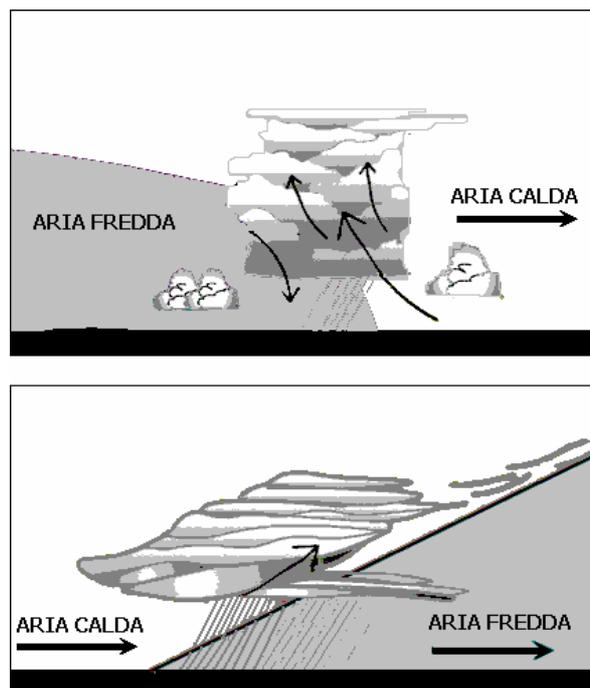


Fig. 9 – Schematizzazione di un fronte freddo (in alto) e di un fronte caldo (in basso).

Fig. 9 – Scheme of cold (upper picture) and warm front (lower).

stati tentati per riuscire a parametrizzare la tipologia e consistenza della copertura nuvolosa, con particolare enfasi sulle nubi convettive; sfortunatamente, allo stato attuale il grado di realismo con cui sono rappresentati questi processi è ancora troppo scarso e ciò inficia considerevolmente l'attendibilità della simulazione prognostica dello stato dell'atmosfera e conseguentemente del clima; il grado di incertezza è particolarmente rilevante in riferimento alla previsione climatica delle precipitazioni (Jakob, 2003b).

Uno studio condotto da Senior e Mitchell (1993), più direttamente legato all'aumento dell'anidride carbonica, ha dimostrato l'estrema criticità della risposta dei modelli alla parametrizzazione della copertura nuvolosa. Nella figura 10 si può vedere che il feedback delle nubi può produrre sotto diverse condizioni una variazione di temperatura di circa 4°C. Infatti i differenti tipi di nube producono effetti diversi in termini di riscaldamento superficiale in quanto le loro proprietà microfisiche influenzano gli scambi radiativi a corte e lunghe lunghezze d'onda; in particolare i cirri tendono a scaldare la superficie, gli stratocumuli tendono a raffreddarla mentre i cumulonemi hanno un effetto termicamente neutro.

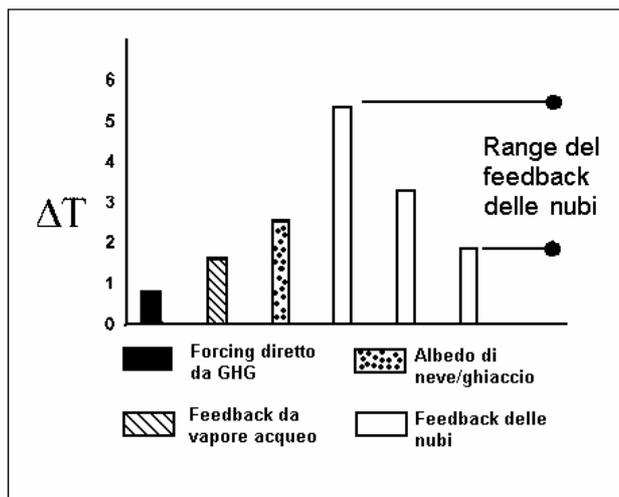


Fig. 10 – Response of a single climate model to imposed doubling of CO₂ as different feedbacks are systematically added in the model (left to right, adapted from Senior and Mitchell 1993).

Fig. 10 – Risposta di un singolo modello climatico all'ipotizzato raddoppio della CO₂ allorchè differenti feedback sono progressivamente aggiunti al modello (adattato da Senior and Mitchell 1993).

Questa crucialità delle nubi nel determinare il clima è ormai chiaramente riconosciuta, tanto che un vasto progetto di ricerca (ISCCP, International Satellite Cloud Climatology Project) è stato posto in essere per creare una banca dati delle nubi ai fini di un più approfondito studio del loro comportamento. In tale progetto si sono individuati diversi argomenti di studio prioritari: il ruolo dei cirri sulla pianeta nel suo complesso, quello delle nubi basse nelle regioni polari, la microfisica dei cristalli di ghiaccio e delle goccioline in nube ed infine le variazioni nelle proprietà globali delle nubi (Rossow e Schiffer, 1999). Il data base ISCCP viene continuamente analizzato dalla comunità scientifica e risulta fonte di dibattito

serrato sull'effettiva rappresentatività sia dei dati che degli algoritmi di analisi per l'analisi dei trend che risultano di importanza fondamentale nella rappresentazione dei cambiamenti globali: una review dei risultati unitamente ad una nuova valutazione della copertura globale è riportata in Wylie *et al.* (2005).

Si deve purtroppo evidenziare che proprio su una tematica così critica come quella delle nubi il mondo scientifico evidenzia negli anni più recenti un crescente grado di disaccoppiamento tra modellisti e sperimentali. Le evidenze sperimentali di effetti tanto marcati delle nubi sul bilancio energetico del sistema climatico spingono infatti a guardate con estrema cautela le previsioni climatiche basate sui GCM in mancanza di parametrizzazioni soddisfacenti delle nubi stesse.

Poiché le nubi sono il risultato di un equilibrio termodinamico tra masse d'aria forzate dalle condizioni superficiali e dalla struttura verticale stessa dell'atmosfera, ne consegue che se si cambia l'uso del suolo si alterano anche le caratteristiche superficiali che contribuiscono a determinare tipologia e copertura nuvolosa; le dinamiche si estendono quindi alle diverse scale temporali e spaziali e non possiamo dunque pensare di fare una fotografia 'una tantum' che sia in grado di descrivere per sempre il sistema.

Per fare un esempio concreto si prenda lo studio condotto su una zona deforestata dell'Amazzonia (Cutrim *et al.*, 1995). Nel 1988 in Rondonia si operò una vasta deforestazione la cui prima conseguenza fu quella di indurre l'improvviso aumento nell'occorrenza delle nubi cumuliformi pomeridiane. Se consideriamo che i modelli climatici avevano previsto ampie diminuzioni della copertura nuvolosa sopra il bacino considerato in caso di deforestazione, i risultati sperimentali sono quantomeno sorprendenti per la discrepanza riscontrata.

Una interessante posizione sull'argomento è quella proposta da Lindzen *et al.* in uno studio del 2001 in cui viene ipotizzata l'esistenza di una sorta di 'iride adattivo' terrestre nell'infrarosso. Si può infatti osservare che ai

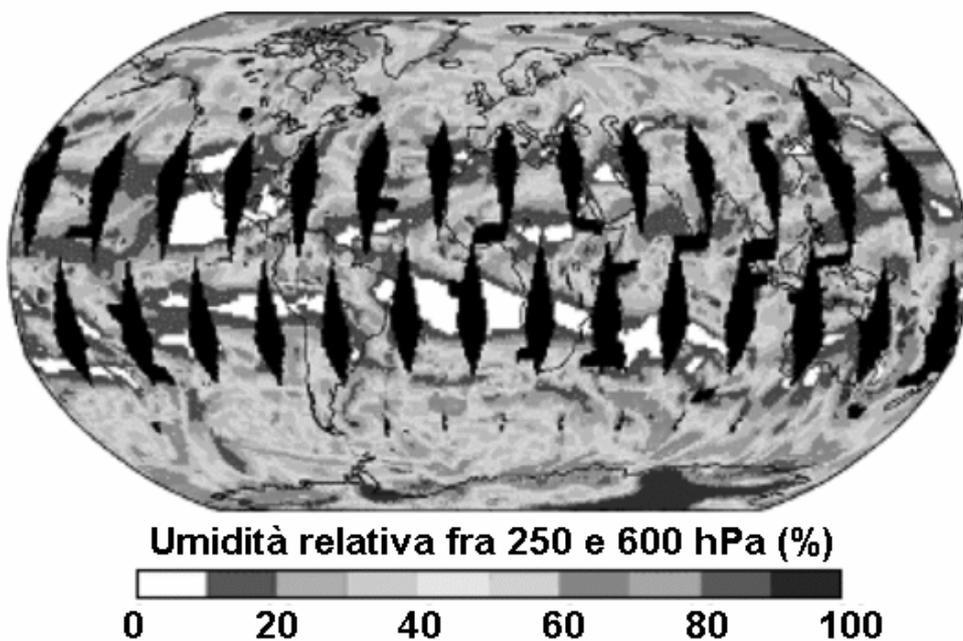


Fig. 11 - Distribuzione globale dell'umidità relativa (adattato dal Bulletin of American Meteorological Society): le aree nere rappresentano punti con un tempo di rivisitazione troppo elevato per essere incluse conservando ancora significatività alla mappa.

Fig. 11 – Global distribution of relative humidity (from Bulletin of American Meteorological Society, adapted): black areas represent points with insignificant estimates due to a very long time of revisiting.

Tropici, oltre lo strato limite planetario, esistono regioni caratterizzate da una elevata umidità e regioni dove l'umidità è estremamente scarsa; la transizione tra queste regioni è molto marcata (figura 11). Le regioni secche sono caratterizzate da zone con subsidenza di ampia scala mentre quelle umide sono caratterizzate da nubi cumuliformi torreggianti (cumulonembi) a bassa copertura spaziale.

Queste diverse coperture spaziali possono dare luogo ad ampi errori nel computo dei feedback effettuati dalla modellistica climatica. In particolare lo studio condotto in una ampia zona dell'Oceano Pacifico a nord-est dell'Australia ha rivelato una forte correlazione positiva tra le aree coperte da cirri ad alta quota e temperatura del mare. Dato che i cirri operano come una specie di coperta, se all'aumentare della temperatura dell'oceano la loro presenza diminuisce a causa della minor quota di cirri prodotta dai cumulonembi che diverrebbero più efficienti scaricando in forma di precipitazione una maggior frazione dell'umidità da essi convogliata verso l'alto, la quota di calore persa nello spazio risulterebbe più elevata. Questo effetto sarebbe quindi paragonabile a quello dell'iride umana che si adatta automaticamente alla quota di luce ricevuta.

Se tale effetto di controllo del calore fosse effettivo, l'aumento di temperatura previsto dall'IPCC per il 2100 (tra 1.4 e 5.8 °C), si ridurrebbe al più modesto valore di 0.6 - 2.3 °C (figura 12).

Sulla teoria dell'Iride il dibattito fra fautori e detrattori è tuttora aperto (DelGenio e Kovari, 2002; Hartman e Michelson, 2002, Lin *et al.*, 2002).

Il problema della parametrizzazione delle nubi nei GCM sta comunque diventando sempre più una necessità unitamente a quella dei processi di scambio radiativo: la descrizione microfisica della nube è ormai una frontiera sempre più esplorata della moderna modellistica per una corretta descrizione del ciclo ideologico (Rosenfield, 1999; Grabowski, 2001; Randall *et al.*, 2003).

L'inserimento di queste parametrizzazioni microfisiche oltre a migliorare la descrizione dei processi forniscono nuove informazioni sulla sensitività dei modelli (Senior e Mitchell, 1993; Yao e DelGenio, 2002; Soden *et al.*, 2002; Soden *et al.*, 2004). Una delle più complete e recenti review sui feed-back delle nubi sul sistema climatico e sulla valutazione della relativa modellistica è dovuta a Stephens (2005) che fra l'altro tratta il problema degli effetti delle nubi sulla dinamica atmosferica.

Bibliografia

- Colman, R. J. R. Fraser, e L. Rotstayn, 2001: *Climate feedbacks in a general circulation model incorporating prognostic clouds*. *Climate Dyn.*, 18, 103-122.
- Cutrim E., D.W martin e R. rabin, 1995. *Enhancement of cumulus clouds over deforested lands in Amazonia*. *BAMS*, October, 1802-1805.
- Del Genio, A., e A. B. Wolf, 2000: *The temperature dependence of the liquid water path of low clouds in the southern Great Plains*. *J. Climate*, 13, 3465-3486.
- Del Genio, A, e W. Kovari, 2002: *Climatic properties of tropical convection under varying environmental conditions*. *J. Climate*, 15, 2597-2615.
- Grabowski, W. W., 2001: *Coupling cloud processes with largescale dynamics using cloud resolving convection parameterization*. *J. Atmos. Sci.*, 58, 978-997.

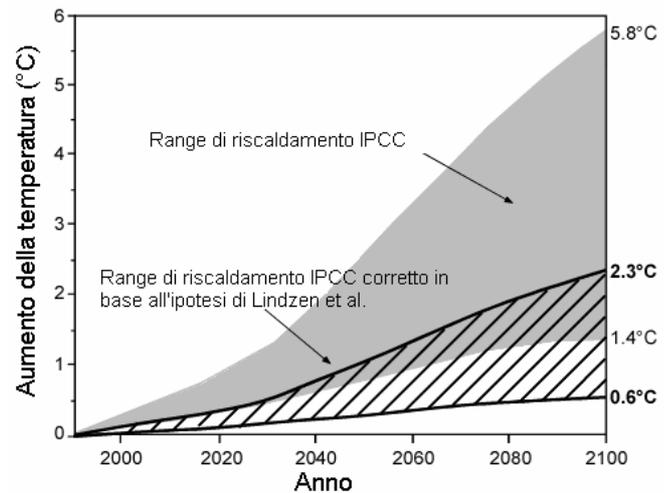


Fig. 12 - Intervalli di temperatura stimati da IPCC (area grigia) e dai risultati di Lindzen (area tratteggiata)

Fig. 12 - Temperature ranges estimated by IPCC (grey area) and by Lindzen (hatched area)

- Greenwald, T. J., G. L. Stephens, S. A. Christopher, e T. H. VonderHaar, 1995: *Observations of the global characteristics and regional radiative effects of marine cloud liquid water*. *J. Climate*, 8, 2928-2946.
- Hartmann, D. L e M. L. Michelson, 2002: *No evidence for iris*. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1233-1238.
- Jakob C., 2003a. *Cloud parametrization - Progress, Problems and Prospects*. Report ECMRWF. pp.12.
- Jakob C., 2003b. *An improved strategy for the evaluation of cloud parameterizations in GCMs*. *BAMS*, October, 1387-1400.
- Jakob C., S.A. Klein, 1999. *A parametrization of the effects of cloud and precipitation overlap for use in general circulation models Report 289 ECMRWF*. pp.22.
- Lin, B. B., A. Wielicki, L. H. Chambers, Y. Hu, e K.-M. Xu, 2002: *The iris hypothesis: A negative or positive feedback?* *J. Climate*, 15, 3-7.
- Lindzen R.S., M-D. Chou, e A.Y. Hou, 2001: *Does the Earth have an adaptive infrared iris*. *BAMS*, March, 417-432.
- Randall, D. A., M. Khairoutdinov, A. Arakawa, e W. Grabowski, 2003: *Breaking the cloud parameterization deadlock*. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 1547-1564.
- Rosenfield, D., 1999: *TRMM observed first direct evidence for smoke from forest fires inhibiting precipitation*. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3105-3108.
- Rossow W.B., R.A. Schiffer, 1999: *Advances in understanding clouds from ISCCP*. *BAMS*, November, 2261-2287.
- Senior, C. A., e J. F. B. Mitchell, 1993: *Carbon dioxide and climate: The impact of cloud parameterization*. *J. Climate*, 6, 393-418.
- Soden, B. J., R. T. Wetherald, G. L. Stenchikov, e A. Robock, 2002: *Global cooling after the eruption of Mt. Pinatubo: A test of climate feedback by water vapor*. *Science*, 296, 727-730.
- Soden, B.J., A. J. Broccoli, e R. S. Hemler, 2004: *On the use of cloud forcing to estimate cloud feedback*. *J. Climate*, 17, 3661-3665.
- Sommerville, R., e L. A. Remer, 1984: *Cloud optical thickness feedbacks in the CO2 climate problem*. *J. Geophys. Res.*, 89, 9668-9672.
- Stephens G.L., 2005: *Cloud feedbacks in the climate system: a critical review*. *J. Climate*, 18, 237-273
- Tselioudis, G., e W. B. Rossow, 1994: *Global, multiyear variations of optical thickness with temperature in low and cirrus clouds*. *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2211-2214.
- Wylie, D., D.L. Jackson. W.P. Menzel e J.J. Bates, 2005: *Trends in global cloud cover in two decades of HIRS observation*. *J. Climate*, 18, 3021-3031.
- Yao, M.-S., e A. Del Genio, 2002: *Effects of cloud parameterization on the simulation of climate changes in the GISS GCM. Part II: Sea surface temperatures and cloud feedbacks*. *J. Climate*, 15, 2491-2503.

4.3 Clima e uso del suolo

Abbiamo già discusso delle relazioni esistenti fra uso del suolo e copertura nuvolosa. In termini più generali si deve rammentare che il massiccio cambiamento nell'uso del suolo attraverso processi di urbanizzazione, messa a colture di nuove terre e desertificazione è uno dei tratti più caratteristici dell'azione umana. Il primo effetto di tali modificazioni si coglie a livello micrometeorologico attraverso cambiamenti nel bilancio energetico di superficie che hanno ripercussioni immediate all'interno dei boundary layer (Stull, 1997). Inoltre lo strettissimo legame energetico esistente fra le scale fa sì che tali modificazioni si ripercuotano inevitabilmente alle scale maggiori.

Se tuttavia tentiamo una quantificazione dell'effetto dell'uso del suolo sul macroclima (clima planetario o di grandi aree geografiche), effetto che a prima vista potremmo ritenere di entità limitata, ci accorgiamo che la stima quantitativa per mezzo di modelli meccanicistici appare proibitiva in virtù del fatto che l'energia dallo strato limite si disperde in un volume ben più grande, la libera atmosfera, la quale fino al limite della stratosfera è alta in media 10-12 km alle nostre latitudini.

Esistono diversi lavori scientifici riferiti a tale argomento. Ad esempio Berglund (2003) analizza l'evoluzione dell'agricoltura in Europa nell'Olocene e formula alcune ipotesi sugli effetti climatici indotti dal cambiamento nell'uso del suolo. Tuttavia i livelli d'incertezza insiti in tali lavori sono elevatissimi in ragione dello scarso livello di comprensione dei fenomeni in gioco.

Un possibile approccio a tale problema dovrebbe basarsi sull'adozione di un modello concettuale di cambiamento climatico di tipo circolatorio (Lamb, 1966 e 1977) secondo il quale ogni cambiamento nel bilancio energetico del pianeta si traduce in modifiche della posizione delle grandi strutture circolatorie (anticiclone delle Azzorre, grandi correnti occidentali, ecc.); tali modifiche di posizione causano a loro volta il cambiamento della frequenza e persistenza dei tipi di circolazione che influenzano un dato territorio (nel caso dell'Italia si pensi ad esempio alla frequenza e persistenza delle situazioni di foehn, di bora, di perturbazioni atlantiche, di situazioni anticicloniche, ecc.); tale cambiamento a sua volta perturberà i valori delle grandezze meteorologiche al suolo (temperatura, precipitazione, vento, radiazione, ecc.) influenzando così il bilancio energetico di superficie; quest'ultimo va a sua volta ad incidere sulla posizione delle grandi strutture circolatorie e così il ciclo si chiude.

Occorre peraltro considerare che il segnale legato alle maggiori temperature urbane è almeno in parte² incorporato nei dati che esprimono l'andamento climatico globale, poiché le serie storiche di molte stazioni risentono dell'effetto urbano. Comunque il nocciolo del problema è che chi vive in città (cioè oltre la metà della popolazione mondiale, e domani quasi tutta) deve fare i conti più con l'effetto urbano che con il cambiamento climatico globale (Mariani e Sovrano, 2005). E se il global warming ha comportato un aumento delle temperature medie di 0.5-

0.6 °C in un secolo, nello stesso periodo l'effetto delle grandi realtà urbane è stato in molti casi superiore. Ad esempio, la città di Milano in 158 anni ha manifestato un aumento complessivo della temperatura dell'aria al suolo di 2.54°C per la massime e di 0.88°C per le minime (Chlistovsky, Buffoni e Maugeri, 1997).

Bibliografia

- Berglund B.E., 2003. *Human impact and climate changes—synchronous events and a causal link?*, *Quaternary International* 105 (2003) 7–12
- Chlistovsky F., Buffoni L., Maugeri M., 1997. *La temperatura a Milano – Brera*, Edizioni CUSL, 200 pp;
- Lamb H.H., 1966. *The changing climate*, Methuen, London, 236 pp.
- Lamb H. H. 1977. *Climate, present, past and future*, Methuen, London: 545 pp.
- Mariani L. e Sovrano G., 2005. *Approccio quantitativo all'analisi degli effetti urbani sul clima*, *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, n.3/2005, 31-36.

² la depurazione delle serie storiche dagli effetti urbani si basa su opportune procedure statistiche che tuttavia non sono garanzia di un risultato totalmente efficace.