

**Zeitschrift:** Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning

**Herausgeber:** Società Svizzera Ingegneri e Architetti

**Band:** - (2004)

**Heft:** 1

**Artikel:** Il CO<sub>2</sub> e la temperatura terrestre : metodi di misura

**Autor:** Vidale, P.L.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-132930>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 09.01.2026

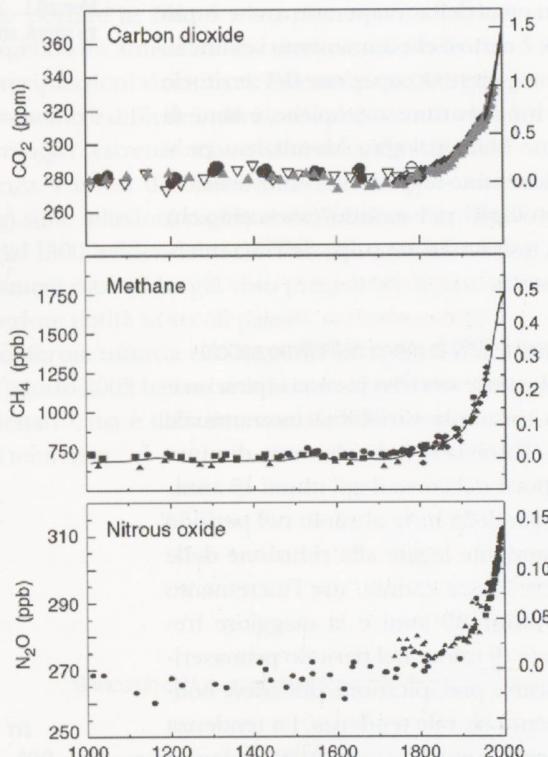
**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Il CO<sub>2</sub> e la temperatura terrestre: metodi di misura

P. L. Vidale  
Istituto per la ricerca sul Clima  
e l'Atmosfera, ETH

*La concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera terrestre si trova attualmente a 368 ppm (riferimento anno 2000), circa 30% più elevata che nel periodo pre-industriale (280 ppm, nel periodo 1000-1750). Utilizzando proiezioni di crescita demografica e sviluppo economico-tecnologico, è stato calcolato che questa concentrazione aumenterà, nel corso del prossimo secolo, di 2 a 4 volte rispetto al valore pre-industriale. Nel corso degli ultimi 140 anni, un graduale e crescente riscaldamento medio globale è stato rivelato da misurazioni dirette alla superficie e nell'atmosfera. L'evoluzione di questa tendenza positiva coincide chiaramente con quella del CO<sub>2</sub> ed è possibile invocare ben conosciuti processi fisico-chimici per spiegarle entrambi. La presente monografia intende riassumere l'attuale stato della nostra conoscenza sul legame tra CO<sub>2</sub> e temperatura media globale, tenendo in vista le necessità osservazionali future, che sono dettate dall'attuale stato delle incertezze.<sup>1</sup>*

I livelli di CO<sub>2</sub> negli ultimi 1000 anni e nel passato remoto La figura 1 indica chiaramente come la concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> si sia progressivamente innalzata sin dal periodo di industrializzazione (1750). Questo livello di CO<sub>2</sub> atmosferico è nuovo per il nostro pianeta, perlomeno per quel che riguarda gli ultimi 420'000 anni; il tasso di crescita non ha precedenti negli ultimi 10'000 anni. Il livello atmosferico di biossido di carbonio è certamente unico nel periodo storicamente accettabile, e riconducibile alle attività umane degli ultimi 250 anni. Queste informazioni ci provengono sia da misurazioni dirette che da misurazioni indirette: misure dirette e continue esistono sin dal 1957 (p. es. Mauna Loa, Polo Sud); una rete mondiale di misurazioni alla superficie è stata invece resa operazionale solo negli anni '70. I valori degli ultimi 1000 anni provengono dall'analisi di bollicine d'aria contenute in «carote» di ghiaccio estratte nell'antartico o su ghiacciai, ma esistono anche misurazioni (Taylor Dome) che si estendono a 12'500 anni fa e 400'000 anni fa (Vostok), queste ultime con risoluzione di circa 1000 anni. Per inferire indirettamente le concentrazioni di CO<sub>2</sub> atmosferico su scale di mi-



1 – Le concentrazioni atmosferiche dei principali gas serra negli ultimi 1000 anni

lioni di anni sono invece utilizzate tecniche geochimiche di analisi di carbonio organico contenuto in sedimenti e altri tracciati chimici, che si trovano sul fondo di oceani e laghi. Queste ultime misurazioni offrono meno risoluzione ed hanno un più alto indice di incertezza rispetto alle analisi dirette.

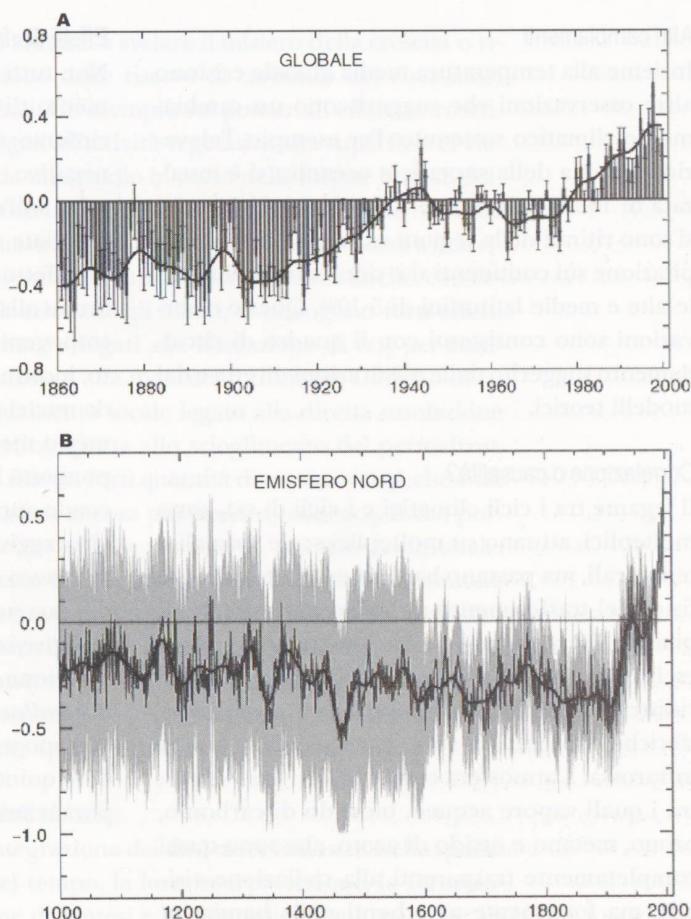
## Il riscaldamento globale degli ultimi 140 anni

Sin dal 1860 esistono misurazioni sistematiche dirette della temperatura prossima al suolo per una grande parte della superficie terrestre e allo stesso tempo esistono registri della temperatura del-

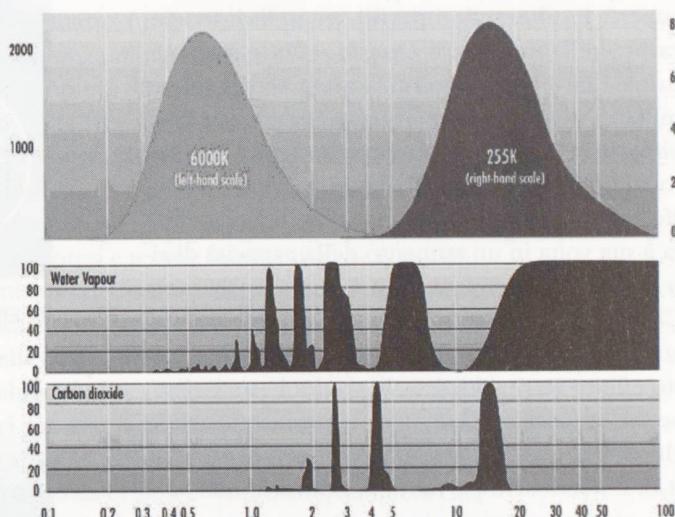
l'acqua oceanica superficiale. Grazie a queste misurazioni è possibile calcolare con ragionevole precisione l'evoluzione della temperatura media globale alla superficie. I risultati (fig. 2a) indicano un rimarchevole riscaldamento: nel corso del secolo xx la temperatura media terrestre è aumentata di 0.6 gradi centigradi. Questo riscaldamento osservato non si è però manifestato in modo continuo e varia parecchio in funzione di periodo e località: riscaldamenti superiori alla media sono osservati principalmente sulle masse continentali e nel periodo invernale. La provenienza dei dati è anche in questo caso molteplice: per gli oceani, misurazioni dirette, cioè misurazioni di campioni superficiali (in secchio) raccolti da navi sono state catalogate da milioni di registri storici e opportune correzioni (tenendo conto dei cambiamenti in tecnologia disponibile) sono state applicate. Per i continenti, misurazioni alla superficie hanno coperto il 50% della superficie (insieme a misurazioni di temperature massima e minima) sin dalla fine del secolo xix. Misurazioni nell'atmosfera, ottenute lanciando palloni meteorologici che raggiungono la stratosfera, esistono sin dal 1958, quattro volte al giorno, su una rete mondiale standardizzata. Rilevamenti satellitari dei profili di temperatura atmosferici esistono sin dal 1979 (MSU). La riduzione nelle incertezze di misurazione, visibile tramite le barre di errore nella figura 2, accompagna chiaramente l'evoluzione della rete di misurazione e il progresso tecnologico.

#### La temperatura globale degli ultimi 1000 anni

Annotazioni storiche, insieme all'analisi degli anelli di alberi, della crescita dei coralli e alle analisi del contenuto di isotopi (p. es.  $\delta\text{H}^2$ ,  $\delta\text{o}^{18}$ ) intrappolati in campioni («carote») di ghiaccio profondo, permettono di stimare le variazioni di temperatura prima del periodo di misurazione strumentale (diretta). Per l'emisfero nord, è così possibile ricostruire con sufficiente precisione la temperatura degli ultimi 1000 anni attraverso i cosiddetti dati di «proxy» (fig 2b). Questa ricostruzione indica oscillazioni climatiche naturali prima dell'industrializzazione, che dipendono da variazioni nella radiazione solare e nell'attività dei vulcani, così come da oscillazioni spontanee del sistema climatico. Risulta da queste analisi che, negli ultimi 1000 anni, non si è apparentemente mai verificato un periodo di riscaldamento continuo di 100 anni come quello che si è presentato nel corso del secolo xx. Risulta peraltro evidente che l'ultima decade del secolo xx sembra essere il più caldo degli ultimi 140 e anche degli ultimi 100 anni.



2a, 2b – Oscillazioni e tendenze della temperatura media della superficie terrestre negli ultimi 140 (a) e negli ultimi 1000 anni (b)



3 – Assorbimento di radiazione in funzione della lunghezza d'onda per due importanti gas serra: vapore acqueo e biossido di carbonio. La banda di radiazione solare è indicata in grigio chiaro (emissione massima a 6'000 K), la banda terrestre in grigio scuro (emissione massima a 255 K)

## Altri cambiamenti

Insieme alla temperatura media globale esistono altre osservazioni che suggeriscono un cambiamento climatico sostenuto. Per esempio, l'elevazione media della superficie oceanica si è innalzata di 10-20 cm durante il secolo xx; i ghiacciai si sono ritirati nelle regioni extra-polari; la precipitazione sui continenti si è ridotta in media nelle alte e medie latitudini di 5-10%. Queste osservazioni sono consistenti con il quadro di riscaldamento suggerito dalle misurazioni dirette e dai modelli teorici.

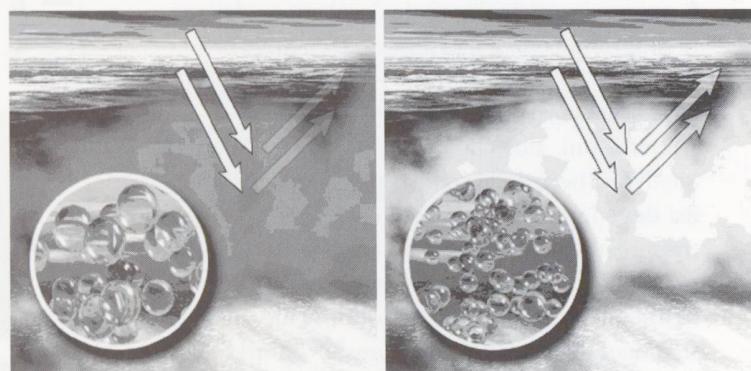
## Correlazione o causalità?

Il legame tra i cicli climatici e i cicli di CO<sub>2</sub> sono molteplici, attuano su molteplici scale spaziali e temporali, ma passano basicamente attraverso la fisica del trasferimento radiativo atmosferico. Il pianeta Terra assorbe radiazione dal sole, quasi esclusivamente alla superficie. Questa energia è ridistribuita dalle circolazioni oceaniche e atmosferiche e reirradiata verso lo spazio nella banda infrarossa. L'atmosfera contiene vari gas «serra», tra i quali vapore acqueo, biossido di carbonio, ozono, metano e ossido di azoto, che sono quasi completamente trasparenti alla radiazione visibile, ma fortemente assorbenti nella banda infrarossa (termica). Aumenti nella concentrazione di gas serra riducono l'efficienza con la quale la superficie terrestre irradia verso lo spazio, risultando in un *radiative forcing*<sup>2</sup> positivo che tende a riscaldare la parte inferiore dell'atmosfera e la superficie, alterando i profili verticali di temperatura nella troposfera. Questo «effetto serra naturale» ha operato nell'atmosfera terrestre per miliardi di anni e ha permesso l'emergere della vita, che è legata alla presenza di acqua allo stato liquido. L'elevazione della temperatura troposferica causata dall'innalzamento del CO<sub>2</sub> risulta a sua volta in un aumento della capacità di retensione di vapore acqueo (legge di Clausius-Clapeyron) nell'atmosfera, incrementando a sua volta l'assorbimento di radiazione termica. Questo effetto serra addizionale risulta in un *radiative forcing* positivo due volte superiore a quello che sarebbe presente senza il collegamento CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. È necessario pertanto monitorare non solo CO<sub>2</sub> e temperatura, ma anche altri gas serra, principalmente H<sub>2</sub>O. Ad esempio, la riduzione nell'intervallo tra temperatura massima e minima che è evidente sin dagli anni '50, coincide con l'aumentare in nuvolosità e anche, a cominciare dagli anni '70 nell'emisfero nord, con l'aumentare del contenuto di vapore acqueo atmosferico.

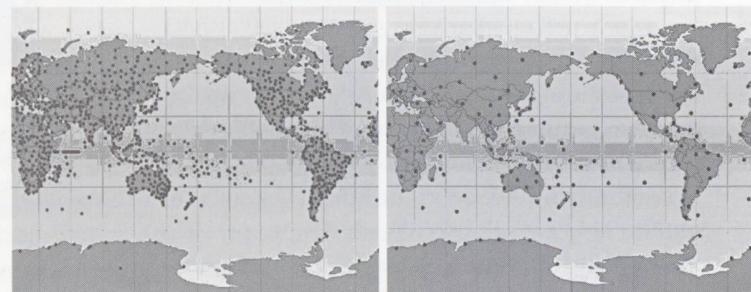
## Effetti di «feedback» negativo

Non tutti i processi legati alle emissioni e all'aumento di temperatura sono necessariamente di rinforzo; alcuni producono un effetto retroattivo negativo. Ad esempio, esiste ancora molta incertezza sull'effetto medio delle emissioni di aerosol associate alle attività industriali, che possono, in un effetto diretto, ridurre la radiazione solare che arriva alla superficie e mitigare l'effetto serra antropogenico. Attraverso un meccanismo indiretto, inoltre, alcuni tipi di aerosol possono fungere da nuclei di condensazione (CCN) e ridurre il diametro medio delle goccioline d'acqua che compongono le nuvole, alterandone l'albedo e riducendo ancora più la quantità di radiazione solare che raggiunge la superficie.

In questo caso, la maggior disponibilità di vapore d'acqua nell'atmosfera, che normalmente crea un *radiative feedback* positivo, potrebbe provocare un'evoluzione opposta, finendo per produrre un *radiative feedback* negativo. Questo tipo di alterazione antropogenica della composizione dell'atmosfera deve quindi essere monitorata e studiata contemporaneamente a quella legata al ciclo di CO<sub>2</sub>.



4 – Effetto della concentrazione di aerosol sull'albedo delle nuvole



5 – Reti osservazionali GCOS alla superficie (a) e in-atmosfera (b)

## Necessità e limitazioni osservazionali

I meccanismi e i relativi effetti retroattivi (*feedbacks*) previamente descritti implicano la necessità di monitorare e comprendere i cicli naturali di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O attraverso atmosfera, oceano, criosfera e superficie terrestre e di comprendere le perturbazioni antropogeniche superimposte. Una complessa rete di misurazioni è pertanto necessaria a livello globale. Reti sinottiche globali (superficiali e nell'atmosfera) sono in loco sin dal secolo XIX, rilevando multiple variabili meteorologiche (tra le quali la temperatura) in media ogni sei ore; reti climatologiche esistono da più tempo, ma non sono omogeneamente distribuite né sufficientemente dense. Misurazioni di CO<sub>2</sub> non esistono a livello sinottico e sono invece effettuate settimanalmente in pochissime località del globo, ma solo alla superficie. La distribuzione globale di CO<sub>2</sub> è pertanto conosciuta solo a livello di «gas completamente mescolato» e l'individuazione di sorgenti e pozzi è solo possibile attraverso tecniche matematiche di inversione. La forte eterogeneità delle caratteristiche di distribuzione (nel tempo e spazio) di calore, acqua e carbonio, insieme alla molteplicità e complessità delle loro interazioni, implicano che, per poter comprendere e monitorare i meccanismi responsabili per i cambiamenti climatici, dovremo sempre più ricorrere a una combinazione di osservazioni, insieme all'utilizzo e sviluppo di modelli teorici. Tali modelli possono in parte supplire alla carenza delle reti osservazionali e fornire informazioni preziose su come pianificare le reti osservazionali future.

## Osservazioni da satellite: la nuova generazione

Il vantaggio delle misurazioni da satellite è legato alla loro ubiquità ed omogeneità: per loro natura, complementano e integrano le misurazioni alla superficie. Fino a pochi anni fa, tuttavia, il rilevamento dei parametri fondamentali per lo studio del clima, al di là delle tipiche variabili meteorologiche, era ancora reso difficile da limitazioni tecniche. L'ultima generazione di satelliti ambientali (p. es. Terra, Aqua, «Missione al Pianeta Terra»), provvisti di nuovi e più precisi sensori, comincia a fornire un quadro più ampio sulla distribuzione planetaria di acqua (in tutte le sue fasi), calore e carbonio, e a permettere di calibrare i modelli teorici che sono responsabili per lo studio dei loro scambi e bilanci. Uno dei sensori a bordo di Terra e Aqua, per esempio, lo spettrometro MODIS, è in grado di misurare l'attività fotosintetica della vegetazione terrestre e del plancton. Questa misura ci fornisce un metodo diretto di misurazione del «sequestro» (fissaggio) di carbonio nella biomassa e

può aiutarci a svelare il mistero della crescita o riduzione delle riserve di carbonio nei riservatori globali. Un esempio sui potenziali effetti retroattivi legati all'attività vegetativa alla superficie ci viene da uno studio in corso nelle foreste boreali della Siberia. In queste foreste, che allo stato naturale sequestrano CO<sub>2</sub>, l'attività dell'uomo porta a una riduzione della capacità fotosintetica finché, con l'eliminazione degli alberi, si ottengono forti effetti retroattivi legati alla liberazione di CO<sub>2</sub> per combustione e alla mancata fotosintesi. L'effetto di riscaldamento locale legato alla diretta insolazione del suolo porta allo scioglimento del permafrost, che rilascia forti quantità di metano (CH<sub>4</sub>), che è un gas serra ancora più poderoso del CO<sub>2</sub>, il che porta a un effetto retroattivo positivo addizionale. Questo tipo di processo deve essere monitorato e allo stesso tempo una nuova classe di modelli matematici, che includano la parametrizzazione dell'impatto dei «cambiamenti di paesaggio» sulla dinamica del permafrost e del suo impatto sul rilascio dei gas serra, deve essere sviluppata.

## Modelli climatici

L'integrazione dei dati osservazionali nello spazio e nel tempo, la loro interpretazione, la formulazione di ipotesi e la loro validazione, passano attraverso la costruzione di modelli teorici di vari livelli complessità. Tra questi, i più utilizzati nello studio dei cambiamenti climatici sono i modelli climatici, che ci permettono, oltre a riesaminare il passato, di calcolare «scenari» sui possibili regimi climatici futuri. Senza questi modelli teorici, in assenza di un «laboratorio atmosfera» sul quale compiere esperimenti empirici, non sarebbe possibile fare alcun tipo di esercizio di test di ipotesi («*hypothesis testing*»). I modelli teorici ci permettono di estrarre lezioni sui processi legati ai cambiamenti climatici passati e presenti e di formulare ipotesi e testare meccanismi per i possibili cambiamenti, e i loro impatti, che potrebbero verificarsi nel futuro. Per esempio, attraverso i modelli, è stato possibile in passato separare e pesare chiaramente i contributi ai cambiamenti climatici già avvenuti che derivano da oscillazioni naturali (p. es. causati da variazioni nella «costante solare» o da eruzioni vulcaniche) da quelli causati dalle attività umane e in questo modo interpretare correttamente le misurazioni disponibili e le loro incertezze.

## Il processo IPCC

Il processo internazionale di revisione e sintesi dello stato della conoscenza sui cambiamenti del clima, amministrato dalle Nazioni Unite e deno-

minato Pannello Internazionale sui Cambiamenti Climatici (IPCC), avviene ogni cinque anni e coinvolge la maggior parte gli esperti mondiali sulle varie materie scientifiche, socio-economiche e politiche che compongono il complesso problema del funzionamento del nostro pianeta. Un enorme numero di risultati e pubblicazioni sono analizzati e relazioni con vari livelli di complessità sono preparate e divulgare alla stampa, ai singoli governi, alla comunità scientifica internazionale.

Queste le conclusioni IPCC nell'ultima decade:

- I. 1990 – la magnitudine del riscaldamento osservato è consistente con le previsioni dei modelli climatici, ma è anche della stessa magnitudine di quello delle oscillazioni naturali;
- II. 1996 – il bilancio delle evidenze disponibili suggerisce un'influenza umana distinguibile;
- III. 2001 – esiste nuova e più convincente evidenza che il riscaldamento degli ultimi 50 anni sia attribuibile alle attività umane.

Il terzo rapporto IPCC non esaurisce certamente la scienza legata ai cambiamenti climatici. Una serie di questioni scientifiche sono ancora aperte, specialmente per quel che riguarda l'effetto combinato di tutti i *feedbacks*.

#### Note

1. Numeri e figure di questo capitolo sono stati estratti dal terzo rapporto scientifico del comitato IPCC (*Climate Change 2001: Third Assessment Report; Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. Riassunti in varie lingue possono essere ottenuti presso il sito dell'Accademia Svizzera di Scienze Naturali: <http://www.proclim.ch/IPCC2001.html> in forma digitale). Ulteriori informazioni sui cambiamenti climatici e la politica svizzera in relazione al clima sono disponibili presso il portale clima di ProClim (<http://www.climate-change.ch>) e presso l'amministrazione federale per l'ambiente e il territorio ([http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/it/fachgebiete/fg\\_klima/index.html](http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/it/fachgebiete/fg_klima/index.html)).
2. Su una media annuale e globale per il nostro pianeta, la radiazione ricevuta è approssimativamente bilanciata dalla radiazione terrestre fuoriuscente. Qualunque fattore che possa alterare la radiazione ricevuta dal sole o persa verso lo spazio, o che alteri la ridistribuzione di energia dentro l'atmosfera, oppure tra l'atmosfera, la superficie terrestre e gli oceani, può alterare il clima. Un cambiamento nella radiazione netta disponibile al sistema Terra-atmosfera è chiamato qui, così come nei rapporti IPCC, un *forcing radiativo*. Un *radiative forcing* positivo tende a riscaldare la Terra, mentre uno negativo tende a raffreddarla.