

Filippo Giorgi

# L'UOMO E LA FARFALLA

6 domande su cui riflettere per comprendere  
i cambiamenti climatici



**FrancoAngeli**

**OrientaMenti**  
CONOSCERE PER DECIDERE

## Informazioni per il lettore

Questo file PDF è una versione gratuita di sole 20 pagine ed è leggibile con



La versione completa dell'e-book (a pagamento) è leggibile con Adobe Digital Editions. Per tutte le informazioni sulle condizioni dei nostri e-book (con quali dispositivi leggerli e quali funzioni sono consentite) consulta [cliccando qui](#) le nostre F.A.Q.



## **OrientalMenti**

Conoscere per decidere

*Collana diretta da Cesare Maffei e Carlo Bottani*

I lettori che desiderano informarsi sui libri e le riviste da noi pubblicati  
possono consultare il nostro sito Internet:  
[www.francoangeli.it](http://www.francoangeli.it) e iscriversi nella home page  
al servizio “Informatemi” per ricevere via e.mail le segnalazioni delle novità.

Filippo Giorgi

# L'UOMO E LA FARFALLA

6 domande su cui riflettere per comprendere  
i cambiamenti climatici

**FrancoAngeli**

 **OrientaMenti**  
CONOSCERE PER DECIDERE

*Grafica della copertina: Alessandro Petrini*

Copyright © 2018 by FrancoAngeli s.r.l., Milano, Italy.

*L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto d'autore. L'Utente nel momento in cui effettua il download dell'opera accetta tutte le condizioni della licenza d'uso dell'opera previste e comunicate sul sito [www.francoangeli.it](http://www.francoangeli.it).*

# Indice

---

<b>Introduzione. L'avvento dell'Antropocene</b>	pag.	9
Riferimenti bibliografici	»	15
<b>1. Che cosa è l'“effetto serra”? Alcuni concetti fondamentali sul funzionamento del clima terrestre</b>	»	17
1.1. Alcune caratteristiche della circolazione generale globale	»	18
1.2. L'effetto serra	»	22
1.3. Meccanismi principali di “retroazione” (feedback) del riscaldamento globale	»	29
1.4. L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)	»	31
1.5. Conclusioni e risposta alla prima domanda	»	33
Riferimenti bibliografici	»	34
<b>2. Il riscaldamento globale è effettivamente in atto? Il problema dell'“individuazione” (“detection”)</b>	»	35
2.1. Evidenza 1: misure di temperatura superficiale della Terra	»	36

2.2. Evidenza 2: riscaldamento della troposfera	»	41
2.3. Evidenza 3: riscaldamento degli oceani e immagazzinamento di calore	»	42
2.4. Evidenza 4: scioglimento dei ghiacci, terrestri e marini	»	43
2.5. Evidenza 5: innalzamento del livello del mare globale	»	48
2.6. Evidenza 6: intensificazione del ciclo idrologico e aumento di eventi meteorologici estremi	»	50
2.7. Conclusioni e risposta alla seconda domanda	»	53
Riferimenti bibliografici	»	54
<b>3. Che cosa sta causando il riscaldamento globale? Il problema dell'“attribuzione” (“attribution”)</b>	»	55
3.1. I modelli climatici	»	56
3.2. Forzanti naturali e forzanti antropici	»	63
3.3. Identificazione dell'impronta dei forzanti antropici sul riscaldamento globale	»	66
3.4. Il riscaldamento del 20mo secolo nel contesto del paleoclima recente	»	70
3.5. Conclusioni e risposta alla terza domanda	»	73
Riferimenti bibliografici	»	75
<b>4. Che cosa possiamo aspettarci per il futuro? Le proiezioni di cambiamenti climatici</b>	»	77
4.1. Previsioni meteorologiche e proiezioni climatiche	»	78
4.2. Come si effettua una proiezione climatica	»	80
4.3. Cosa ci dicono le proiezioni di clima futuro per il 21mo secolo?	»	83
4.4. Distribuzione geografica dei cambiamenti climatici e zone calde (“hot-spots”) del riscaldamento globale	»	90
4.5. Punti di non-ritorno (“tipping points”)	»	93

4.6. Conclusioni e risposta alla quarta domanda	»	96
Riferimenti bibliografici	»	97
<b>5. Perché preoccuparci del riscaldamento globale? Impatti e rischi principali per la società</b>	»	99
5.1. Il concetto di rischio	»	100
5.2. Risorse idriche e produzione di cibo	»	103
5.3. Zone costiere	»	107
5.4. Salute umana	»	109
5.5. Biodiversità	»	111
5.6. Rifugiati climatici	»	114
5.7. Conclusioni e risposta alla quinta domanda	»	115
Riferimenti bibliografici	»	117
<b>6. Come affrontare il problema del riscaldamento globale? Gestire l'inevitabile (adattamento) ed evitare l'ingestibile (mitigazione)</b>	»	119
6.1. La stabilizzazione del riscaldamento globale e la soglia di pericolo	»	120
6.2. Adattamento e mitigazione: gestire l'inevitabile ed evitare l'ingestibile	»	124
6.3. Politiche di mitigazione e riconversione del sistema energetico verso fonti a minor uso di combustibili fossili	»	126
6.4. I costi della mitigazione sono sostenibili?	»	132
6.5. Le opzioni di geoingegneria (“geoengineering”)	»	133
6.6. Conclusioni e risposta alla sesta domanda	»	135
Riferimenti bibliografici	»	136
<b>Epilogo. Evitare il “salto climatico nel buio”</b>	»	137
Riferimenti bibliografici	»	148



# Introduzione.

## L'avvento dell'Antropocene

---

Il livello del mare si alza inesorabilmente, i ghiacciai e la calotta artica si sciolgono, ondate di calore ed eventi meteorologici catastrofici diventano sempre più frequenti; tutti questi fenomeni, e molti altri, sono ormai davanti ai nostri occhi e ci pongono domande incalzanti: il clima sta cambiando? Perché? Siamo noi a causare il riscaldamento del pianeta o stiamo assistendo ad un fenomeno naturale? Possiamo fare qualcosa per evitare la “crisi climatica” o abbiamo raggiunto il punto di non ritorno?

Quella del riscaldamento globale, e dei cambiamenti climatici ad esso associati, è sicuramente una delle grandi sfide del 21mo secolo. È una sfida scientifica, tecnologica, socio-economica e politica, che pervade essenzialmente tutti i settori della società. È anche una sfida generazionale, e se vogliamo storica, perché le azioni che intraprenderemo nei prossimi anni avranno ripercussioni sulle generazioni future, e questo pone un problema di carattere etico che non può essere ignorato.

Ma forse la prima domanda, quella alla base di tutto il dibattito sui cambiamenti climatici, è: può la società umana avere un tale impatto sulla natura da modificare l'evoluzione del clima del pianeta? Nel corso della sua storia di centinaia

di milioni di anni, il clima terrestre è sempre mutato, sia a causa di processi interni al sistema climatico sia per effetto di fattori naturali esterni, come variazioni delle caratteristiche dell'orbita terrestre o dell'intensità della radiazione solare.

Negli anni '60 e '70 il fisico Edward Lorenz sviluppò la teoria del caos<sup>1</sup> e dimostrò come l'atmosfera abbia un comportamento di tipo caotico, in cui piccole perturbazioni possono crescere attraverso eventi concatenati e generare fenomeni meteorologici su scale sempre più grandi con un comportamento apparentemente casuale e non prevedibile. È ormai famoso il suo "effetto farfalla" in cui nel 1972<sup>2</sup> ipotizzò come il battito di ali di una farfalla in Amazzonia possa in principio generare, attraverso l'interazione non-lineare di processi atmosferici, un uragano in Texas. Questa è ovviamente una metafora tesa ad illustrare il concetto del caos (ci vuole ben altro che il battito di una farfalla per generare un uragano), ma se la estendiamo all'intero sistema climatico terrestre, dove atmosfera, oceani e biosfera interagiscono continuamente, serve a ricordarci come il clima terrestre sia sempre stato caratterizzato da una grande variabilità naturale.

Per esempio, ricostruzioni del clima dell'ultimo milione di anni mostrano come cicli glaciali ed interglaciali (i cosiddetti "cicli di Milanković"<sup>3</sup>) si siano succeduti ad intervalli relativamente regolari a causa di processi innescati da piccole variazioni cicliche di alcune caratteristiche dell'orbita terrestre, come l'inclinazione dell'asse della Terra, la precessione dell'asse terrestre e l'eccentricità dell'orbita attorno al Sole. I cicli di Milanković hanno vari periodi, dai ~20.000 anni ai ~120.000 anni. Il picco dell'ultimo periodo glaciale è avvenuto circa 21.000 anni fa, quando buona parte dell'Eurasia settentrionale e del Nord America erano coperte di ghiacci. Da allora il clima terrestre si è lentamente riscaldato fino a raggiungere un massimo fra i 6.000 e i 9.000 anni fa, ed oggi ci troviamo verso la fine di questo periodo interglaciale, per cui in condizioni "naturali" dovremmo lentamente procedere verso una nuova era glaciale nel corso delle prossime migliaia di anni.

Davanti all'immensa potenza di questi fenomeni naturali è difficile pensare che le attività umane possano avere un impatto significativo sul clima globale. Eppure non è così.

Dall'inizio dell'era industriale, diciamo dall'inizio del 19mo secolo, abbiamo cominciato ad immettere in atmosfera enormi quantità di gas e polveri che ne stanno modificando la composizione chimica. Inoltre, una larga parte della superficie dei continenti è continuamente modificata da attività come la deforestazione, l'agricoltura e l'urbanizzazione al punto che si può ormai affermare che la maggior parte della superficie dei continenti è controllata e regolata dalle attività umane piuttosto che da processi naturali. È quindi giustificato pensare che l'uomo possa modificare, in maniera più o meno consapevole, il comportamento del clima globale.

La prima volta che mi sono imbattuto nella possibilità che delle attività umane possano modificare il clima globale è stato quando, negli anni '80, ho lavorato per il mio dottorato sulla teoria dell'inverno nucleare<sup>4,5</sup>. Questa teoria fu proposta, fra gli altri, da una delle più brillanti menti nelle scienze del clima, il chimico Paul J. Crutzen, che ha ricevuto il premio Nobel per la chimica nel 1995 per i suoi lavori sull'assottigliamento dello strato di ozono in stratosfera. La teoria dell'inverno nucleare essenzialmente afferma che il fumo emesso da incendi su larga scala prodotti dalle esplosioni di un conflitto nucleare globale creerebbe una specie di scudo in atmosfera che assorbirebbe e rifletterebbe la maggior parte della radiazione solare, facendo piombare la superficie della Terra (o quel che ne rimarrebbe dopo le esplosioni nucleari) in un freddo e buio inverno perenne. Questa teoria, molto attuale durante gli anni della guerra fredda, fu infatti comprovata da vari studi con modelli climatici allora di avanguardia, uno dei quali sviluppato nel gruppo dove lavoravo al National Center for Atmospheric Research (NCAR) di Boulder, nel Colorado. Il tema dell'inverno nucleare fu vivacemente dibattuto per diversi anni, ma fortunatamente divenne sostanzialmente obsoleto con la caduta del muro di Berlino nel 1989.

Un secondo caso di importante ingerenza umana sull'atmosfera terrestre è l'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico<sup>6,7,8</sup>. La stratosfera è una zona rarefatta di atmosfera che si estende dai 10-15 km fino a circa 60 km dalla superficie terrestre. Una sua importante caratteristica è di contenere alti livelli di ozono prodotti dalla fotolisi dell'ossigeno. Questo strato di ozono stratosferico è molto importante per la vita sulla Terra, perché scherma la superficie terrestre dalla radiazione ultravioletta proveniente dal Sole, che è estremamente dannosa per i tessuti organici. Per esempio, può causare il melanoma della pelle, danneggiare la vegetazione o distruggere il plankton oceanico. Quindi una diminuzione dei livelli di ozono stratosferico rappresenta una forte minaccia per la vita. Negli anni '70 fu prima ipotizzato e poi confermato sia teoricamente che sperimentalmente come alcuni agenti chimici, in particolare i clorofluorocarburi emessi per esempio nell'uso di impianti di refrigerazione e di bombolette spray, possano raggiungere la stratosfera e distruggere l'ozono. Negli anni '80 fu poi scoperto, quasi per caso, che questo assottigliamento dello strato di ozono era particolarmente pronunciato sull'Antartico in primavera, il cosiddetto "buco dell'ozono", a causa della presenza sull'area di nubi polari e di una circolazione stratosferica circumpolare particolarmente stabile.

Il problema del buco dell'ozono non ha nulla a che fare con quello del riscaldamento globale, ma la sua storia ha delle analogie (ma anche delle differenze importanti) con quella del riscaldamento globale. In particolare, offre un esempio di come la ricerca scientifica possa contribuire a risolvere dei problemi ambientali di grande rilevanza per la società. Una volta scoperta la diminuzione dell'ozono stratosferico e le sue cause, la comunità scientifica lanciò un allarme che fu recepito dai governi del mondo, i quali nel 1987 approvarono il Protocollo di Montreal in cui ci si impegnava ad eliminare l'uso delle sostanze chimiche che distruggono l'ozono. Le tecnologie per sostituire queste sostanze con altre non

pericolose per l'ozono erano disponibili, ed il Protocollo entrò in vigore nel 1989. Da allora i livelli di ozono stratosferico si sono stabilizzati e già ci sono indicazioni che stiano gradualmente aumentando verso i loro valori naturali.

Questi due esempi, fra molti altri, mostrano che, all'interno del sistema climatico globale, la società umana non può più essere considerata come un semplice recettore, ma come una sua componente interattiva che ne può alterare in maniera fondamentale le caratteristiche ed il funzionamento. In altre parole, possiamo affermare che a partire dall'inizio dell'era industriale, e per alcuni studiosi anche prima, siamo entrati in quella che Paul Crutzen ha definito l'era dell'"Antropocene"<sup>9,10</sup>. Come vedremo in questo libro, il riscaldamento globale legato all'aumento dei cosiddetti "gas serra" di origine antropica (dove il termine "antropico" indica "derivante da attività umane") è forse il fenomeno più rimarchevole di questa nuova era, un fenomeno che può potenzialmente cambiare l'evoluzione futura del clima della Terra e quindi l'evoluzione futura del pianeta.

Proprio per questa sua importanza, il dibattito sul riscaldamento globale è stato finora caratterizzato da posizioni molto polarizzate, dal negazionismo assoluto al catastrofismo estremo. La difficoltà nella comunicazione di un tema così complesso ha anche portato ad una informazione molte volte parziale, ambigua, fuorviante o addirittura errata, al punto che spesso si tende a "credere" o no ai cambiamenti climatici, dimenticando che il problema del riscaldamento globale è basato su dati scientifici oggettivi e non su posizioni di principio.

Una corretta informazione è quindi il primo passo verso lo sviluppo di politiche tese ad affrontare gli effetti del riscaldamento del pianeta.

Lo scopo di questo libro è quindi di esporre in maniera chiara, semplice ed esauriente i termini del dibattito sul riscaldamento globale, partendo dagli aspetti più prettamente fisici per arrivare a quelli di natura maggiormente socio-economica.

In particolare, il libro affronta sei domande fondamentali che spesso emergono quando si parla di cambiamenti climatici:

1. Che cosa è l'effetto serra?
2. Stiamo effettivamente assistendo ad un riscaldamento globale del pianeta?
3. (Se sì) Questo riscaldamento è dovuto a cause di origine antropica o a cause naturali? All'uomo o alla farfalla?
4. Quali cambiamenti climatici legati al riscaldamento globale ci aspettano nelle prossime decadi? Abbiamo già raggiunto il punto di non ritorno?
5. Quali sono i principali impatti dei cambiamenti climatici sullo sviluppo sostenibile della società e sugli ecosistemi naturali?
6. Che cosa si può fare per affrontare il problema del riscaldamento globale?

I sei capitoli che seguono affrontano queste sei domande nell'ordine indicato, un ordine che segue un filo logico per il quale ogni domanda emerge dalla risposta alla domanda precedente. Per quanto possibile, non è richiesta una conoscenza specifica nel campo della climatologia, se non per concetti fondamentali o per fenomeni che sono parte della nostra esperienza di tutti i giorni.

Voglio però sottolineare che ogni domanda è affrontata sulla base della ricerca ad oggi più avanzata e consolidata. Nonostante questo, è spesso difficile dare risposte precise o inequivocabili, a causa delle incertezze di dati, modelli e comprensione dei fenomeni. A dispetto di queste incertezze, c'è molto che la comunità scientifica oggi conosce sul problema del riscaldamento globale ed il lettore potrà valutare se questa conoscenza è tale da rendere poco giustificabile la mancanza di azione su questo problema.

## Riferimenti bibliografici

<sup>1</sup> Lorenz E.N. (1963). Deterministic non-periodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 130-141.

<sup>2</sup> Lorenz E.N. (1972). *Predictability: Does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas?*. Address at the 139th Annual Meeting of the American Association for the Advancement of Science, Boston, December 29.

<sup>3</sup> Zachos J.C., Pagani M., Sloan L. *et al.* (2001). Trends, rhythms and aberrations in global climate 65 MA to present. *Science*, 292, 686-693.

<sup>4</sup> Crutzen P.J., Birks J. (1982). The atmosphere after a nuclear war: Twilight at noon. *Ambio*, 11, 114-125.

<sup>5</sup> Turco R.P., Toon O.B., Ackerman T.P. *et al.* (1983). Nuclear winter: Global consequences of multiple nuclear explosions. *Science*, 222, 1983-1992.

<sup>6</sup> Molina M.J., Rowland S.F. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249, 810-812.

<sup>7</sup> Crutzen P.J., Arnold F. (1986). Nitric acid cloud formation in the cold Antarctic stratosphere: A major cause for the springtime "ozone hole". *Nature*, 324, 651-655.

<sup>8</sup> Solomon S. (1999). Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. *Reviews of Geophysics*, 37, 275-316.

<sup>9</sup> Crutzen P.J. (2002). Geology of mankind. *Nature*, 415, 686-7.

<sup>10</sup> Crutzen P.J., Steffen W. (2003). How long have we been in the Anthropocene era? A comment. *Climatic Change*, 61, 251-257.



# 1

## Che cosa è l'“effetto serra”?

*Alcuni concetti fondamentali  
sul funzionamento del clima terrestre*

---

Prima di addentrarci nei dettagli del dibattito sul riscaldamento globale è importante rivedere alcuni concetti fondamentali sul comportamento del clima, in particolare per il lettore non esperto su queste tematiche.

Chiaramente è molto al di là degli scopi di questo libro riportare una descrizione completa del clima terrestre, per la quale vi sono già ottimi testi introduttivi<sup>1-5</sup>.

Piuttosto, qui esamineremo quei processi climatici la cui conoscenza è necessaria per una migliore comprensione delle problematiche legate ai cambiamenti climatici.

In particolare, è importante capire il cosiddetto “effetto serra” che è il meccanismo alla base del riscaldamento globale di origine antropica, un fenomeno ben conosciuto alla scienza ma a volte origine di confusione nell'opinione pubblica.

Cominciamo quindi con l'esaminare alcune delle caratteristiche principali del clima terrestre.

## 1.1. Alcune caratteristiche della circolazione generale globale

Il comportamento del sistema climatico terrestre è regolato dalle interazioni fra le diverse componenti che lo compongono: l'atmosfera, gli oceani, la biosfera e la criosfera.

L'atmosfera è la componente che si evolve più velocemente ed è caratterizzata da una grande variabilità temporale e spaziale, dalla scala diurna a quella interannuale e da una rapida risposta ad agenti esterni.

A causa della loro elevata inerzia e capacità termica, invece, gli oceani si evolvono più lentamente, su scale temporali di decenni o centinaia di anni, rappresentando in un certo senso la memoria a lungo termine del sistema climatico.

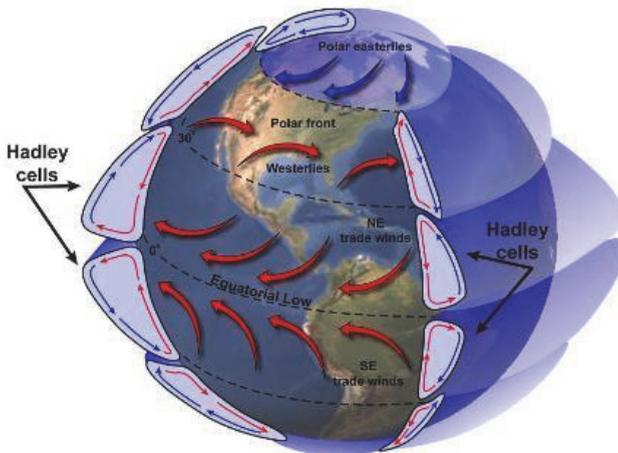
La biosfera e la criosfera, d'altro canto, sono caratterizzate da processi che variano su scale temporali da stagionali a secolari.

Le interazioni fra queste componenti, insieme con la complessità della conformazione del suolo, fanno dunque sì che il clima terrestre mostri una grande variabilità su una vasta gamma di scale sia temporali che spaziali. Il clima di un anno non è mai lo stesso di quello dell'anno successivo e può cambiare rapidamente anche a distanze di pochi chilometri.

Il motore principale del clima terrestre è l'energia proveniente dal Sole, circa  $340 \text{ W/m}^2$ , con un massimo di intensità nella porzione dello spettro delle lunghezze d'onda visibili. Di questa energia solare, circa  $100 \text{ W/m}^2$  (o  $\sim 30\%$ ), viene riflessa da nubi, gas e particolato atmosferico, e dalla superficie della Terra, mentre il resto va principalmente a riscaldare continenti ed oceani. La superficie della Terra, come ogni corpo, riscaldandosi emette radiazione infrarossa, cioè a lunghezze d'onda maggiori di quelle visibili. In particolare, la radiazione infrarossa emessa da un corpo è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura, e quindi più alta è la temperatura del corpo, maggiore è la radiazione infrarossa emessa. Questa radiazione viene a sua volta per la maggior parte assorbita e

riemessa in tutte le direzioni da alcuni gas, detti “gas serra” (che analizzeremo più in dettaglio in seguito), e dalle nubi, per poi eventualmente sfuggire nello spazio. In questo modo si genera un equilibrio energetico fra la radiazione proveniente dal Sole e quella emessa da superficie ed atmosfera della Terra, un equilibrio molto delicato per cui perturbazioni anche relativamente piccole, come nel caso dei cicli di Milanković, possono avere effetti enormi a causa di interazioni non-lineari fra le diverse componenti del sistema climatico.

Il riscaldamento della superficie da parte del Sole non è omogeneo, ma è maggiore nelle zone equatoriali che in quelle polari a causa dell’angolo di incidenza dei raggi solari. Per raggiungere una configurazione energetica più stabile, l’atmosfera e gli oceani hanno quindi il compito di trasportare energia dalle zone equatoriali a quelle polari, mettendo in moto la circolazione generale del sistema atmosfera/oceano. La maggior parte di questo trasporto di energia, circa il 75%, è dovuta alla circolazione generale atmosferica, che è schematicamente illustrata nella Figura 1.1, e che avviene nello strato che include i primi 10-15 km dell’atmosfera, chiamato “troposfera”.



**Figura 1.1.** Illustrazione schematica della circolazione generale dell’atmosfera (cortesia della National Aeronautics and Space Administration, NASA, USA).