

A field of vibrant red poppies under a blue sky with wispy clouds. The flowers are in various stages of bloom, with some fully open and others as buds. The background is a clear blue sky with light, wispy clouds.

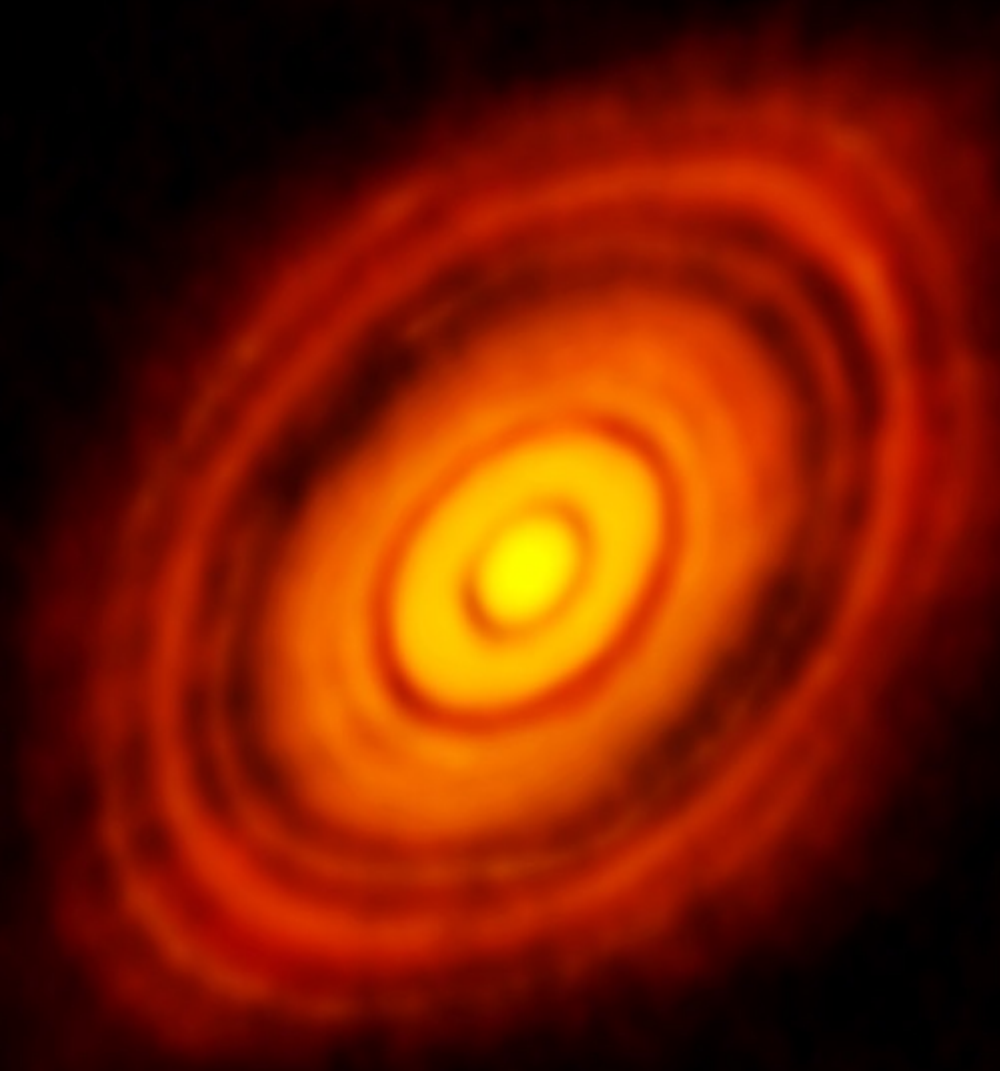
# *La lunga storia intrecciata del clima e della biosfera*

*Antonello PROVENZALE  
Istituto di Geoscienze e Georisorse  
Consiglio Nazionale delle Ricerche*

C'era una volta...  
una nube molecolare gigante



...e poi un disco polveroso intorno a una giovane stella



<http://www.almaobservatory.org/>

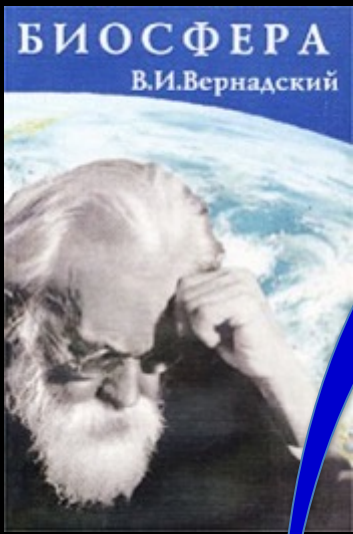


nel quale si è formata la Terra...

...circa 4 miliardi di anni fa,  
la superficie del pianeta si è solidificata,  
si sono formati gli oceani,  
ed è apparsa la vita...



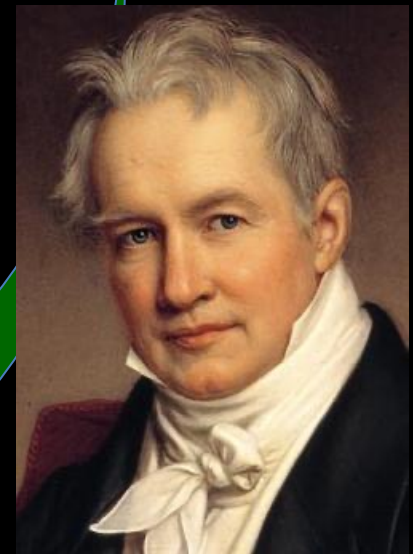
“Earthrise”, Apollo 8, 24 December 1968, photo B. Anders, NASA



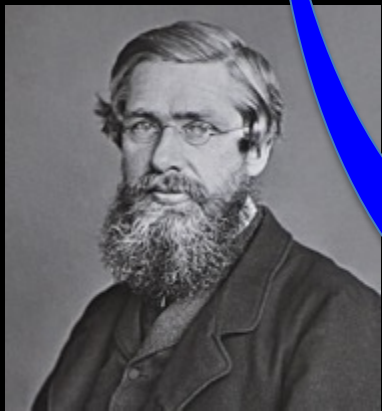
Clima



“One Grand Organic Whole”  
(A.R. Wallace)



Biosfera





*Geographie der Pflanzen in den Tropen-Ländern;*  
*ein Naturgemälde der Anden,*

*gegründet auf Beobachtungen und Messungen, welche vom 10<sup>ten</sup> Grade nördlicher bis zum 10<sup>ten</sup> Grade südlicher Breite angestellt worden sind, in den Jahren 1799 bis 1803.*

*von ALEXANDER VON HUMBOLDT und A. G. BONPLAND.*

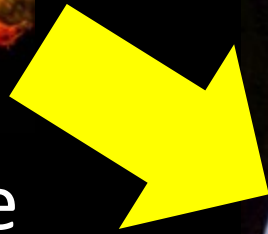
**von Humboldt e Bonpland "Naturgemalde"**

# Il più semplice modello di clima

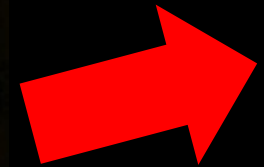
Composizione  
dell'atmosfera  
ed effetto  
serra



Radiazione  
solare



Trasporto di  
energia e  
materia



Caratteristiche della superficie e  
delle nubi: Albedo



A photograph of a rocky, forested landscape. The scene is dominated by tall, thin evergreen trees with dense green foliage. The ground is covered with a mix of green and reddish-brown vegetation, interspersed with large, grey, moss-covered rocks. The sky is visible through the canopy, showing a clear blue color. The overall atmosphere is that of a high-altitude or mountainous environment.

# **Interazione reciproca fra clima e organismi viventi**

**Ingegneri dell'ecosistema**

**Costruzione della nicchia**

**«Paesaggi» (Landscapes)**

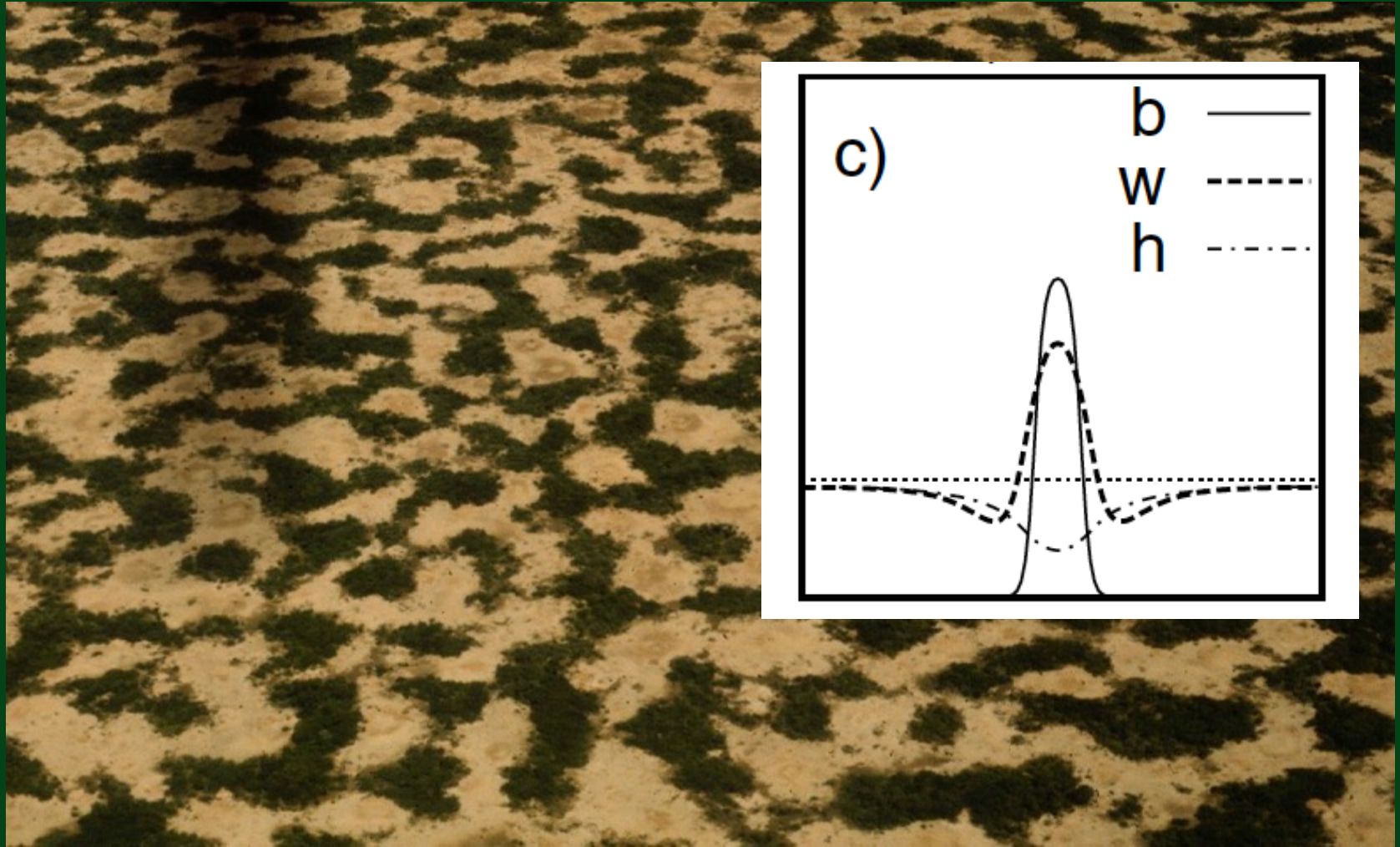
**Cicli biogeochimici globali**

# Ingegneri dell'ecosistema: Arbusti del deserto e castori



# Il sistema arbusti-cianobatteri nei deserti

Rietkerk et al., *The American Naturalist* 160 (4), 2002



Gilad et al PRL 2004, JTB 2007, Kletter et al JTB  
2009, Baudena et al AWR 2013

«Patterned vegetation» nelle zone aride

# Castori



<https://www.sciencefocus.com/nature/why-do-beavers-build-dams/>



ma andiamo agli effetti a grande scala...



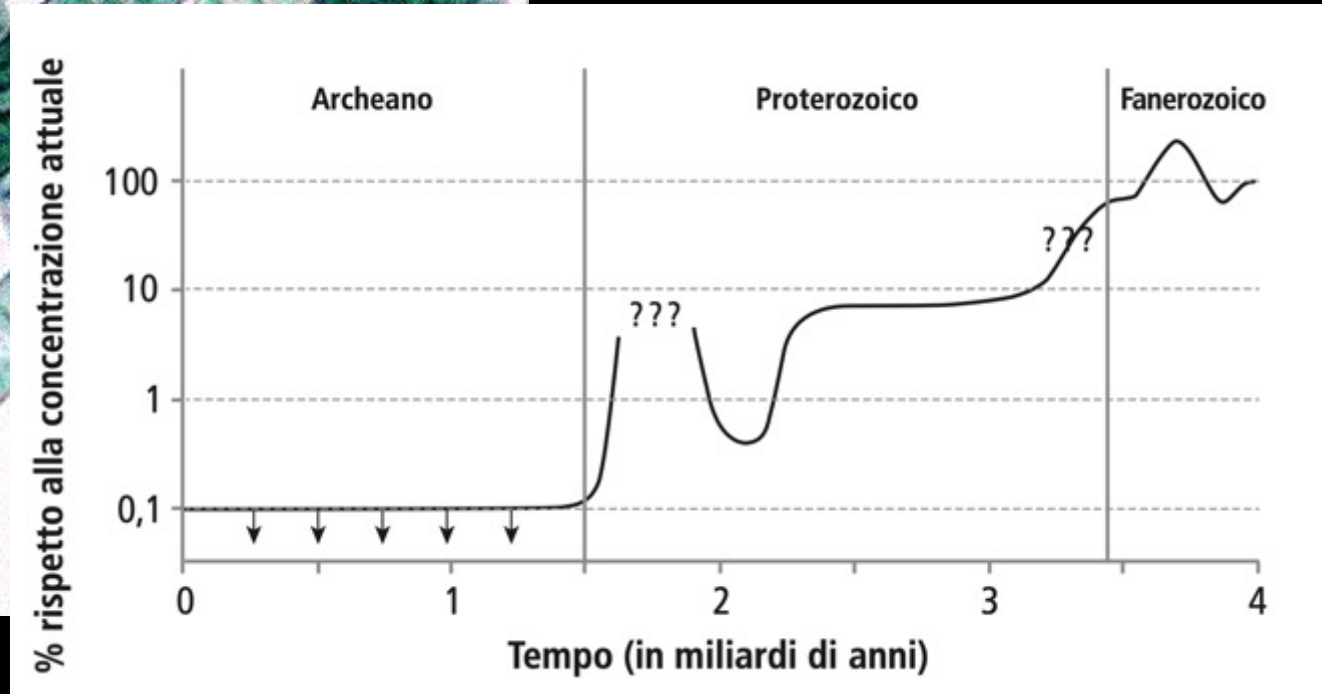
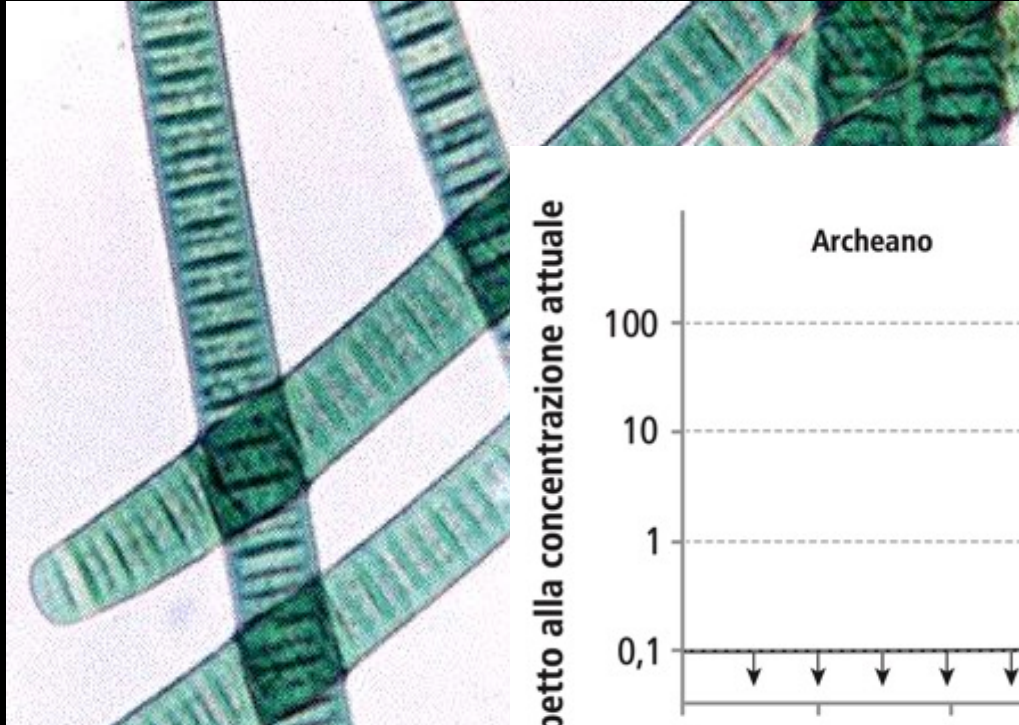
Archeano (4-2,5 Ga): un mondo alieno

Temperature probabilmente  
fra 30 °C and 70 °C

Atmosfera di anidride carbonica,  
biossido di zolfo, acqua e metano

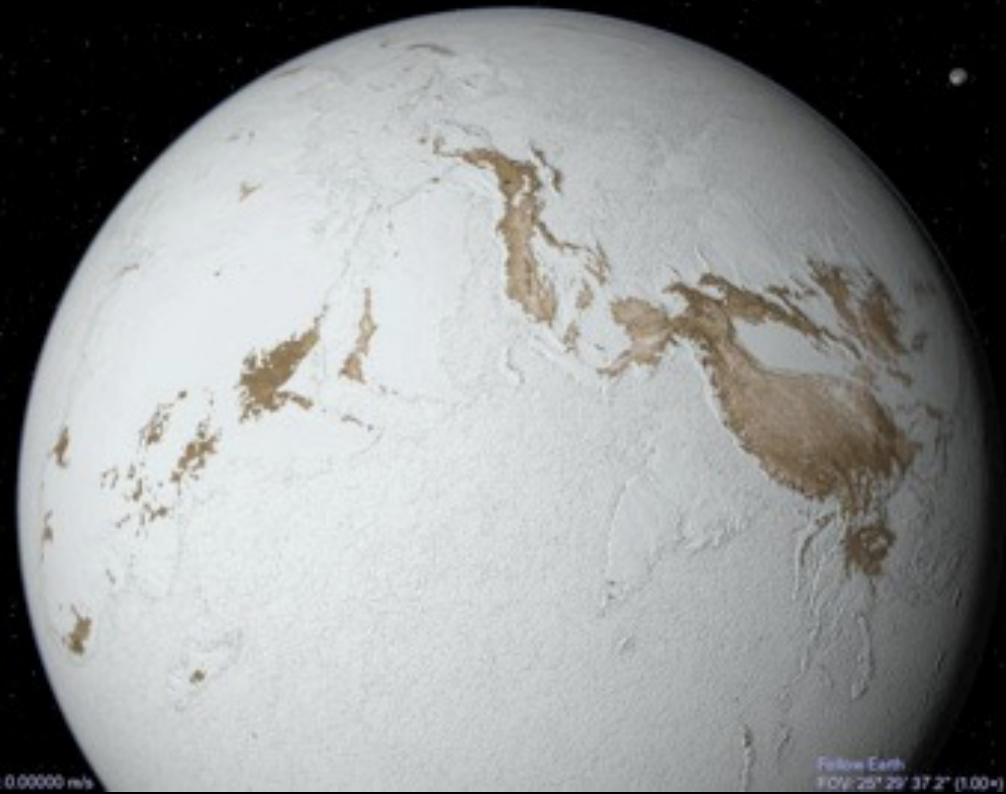
... oceani anossici con ecosistemi basati  
sulla chimica del ferro e dello zolfo  
(es. fotosintesi anaerobica)

# La «Grande Ossigenazione» produzione di ossigeno dai cianobatteri



La “Grande Ossigenazione”  
inizia circa 2,4 miliardi di anni fa

# Fra 2400 e 630 milioni di anni fa: Glaciazione Huroniana e «Snowball Earth»



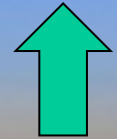


# Il ciclo del carbonio



Alterazione  
delle rocce

**Ciclo geologico**  
**≈ 1 miliardo Ton C/a**



Emissioni  
dei vulcani



Respirazione

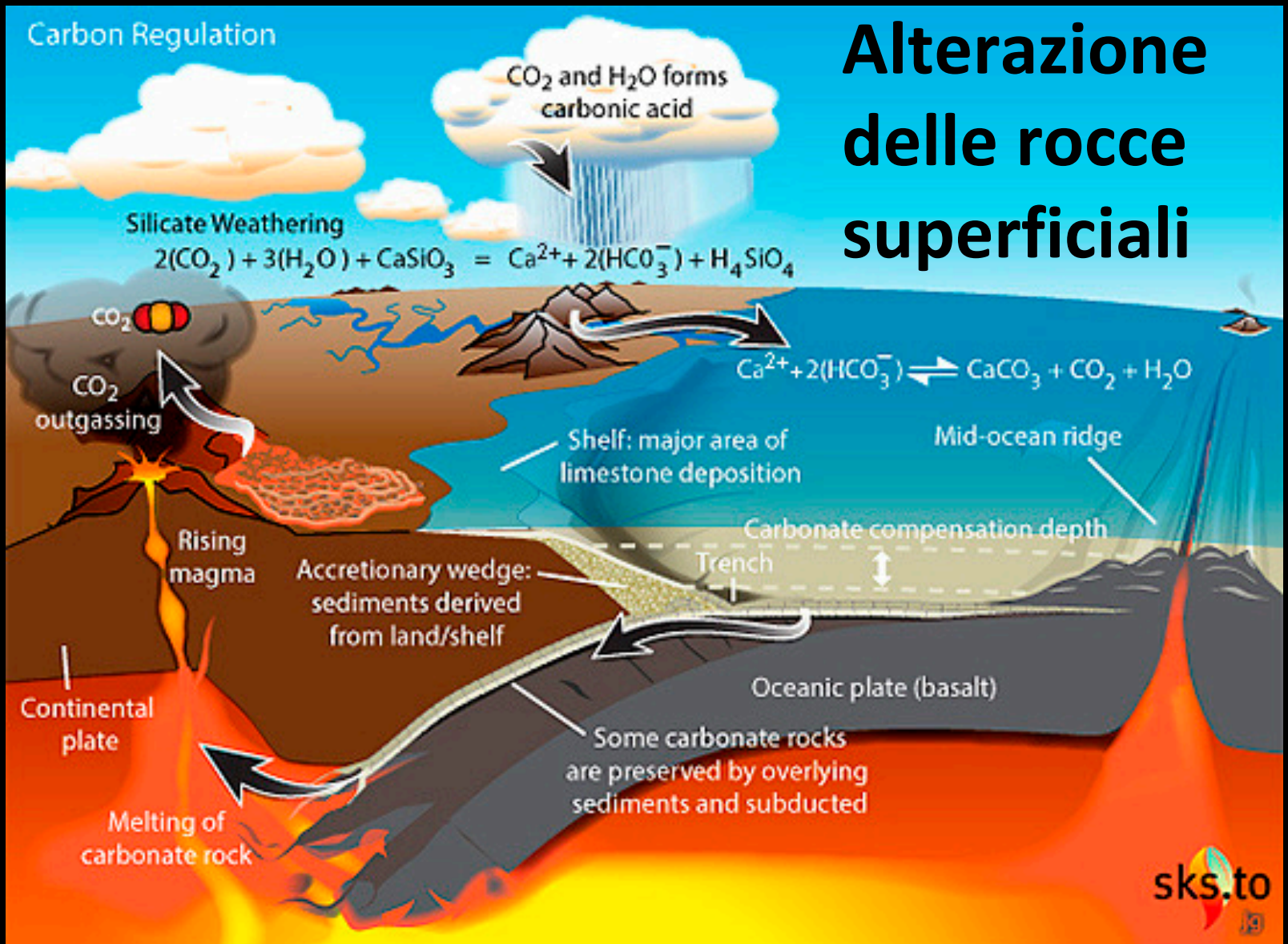


Fotosintesi

**Ciclo biologico**  
**≈ 200 miliardi Ton C/a**

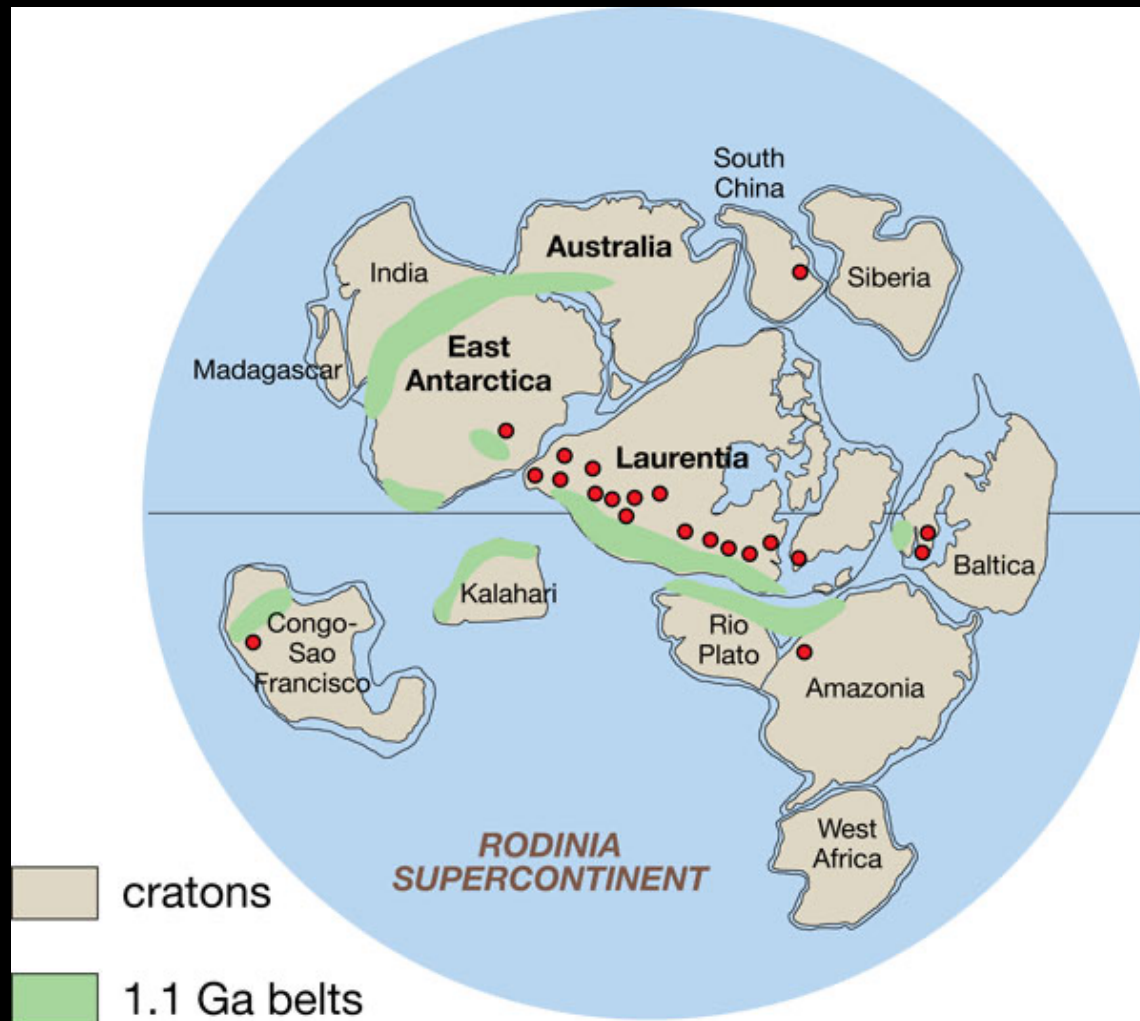
# Ciclo geologico del carbonio

## Alterazione delle rocce superficiali



Emissione di gas  
serra dai vulcani

# Frammentazione di Rodinia



[https://antarcticsun.usap.gov/science/images2/rodinia\\_map.jpg](https://antarcticsun.usap.gov/science/images2/rodinia_map.jpg)

Nessuna «Snowball» negli ultimi 600 milioni di anni

# Vegetazione e clima



Flussi di carbonio

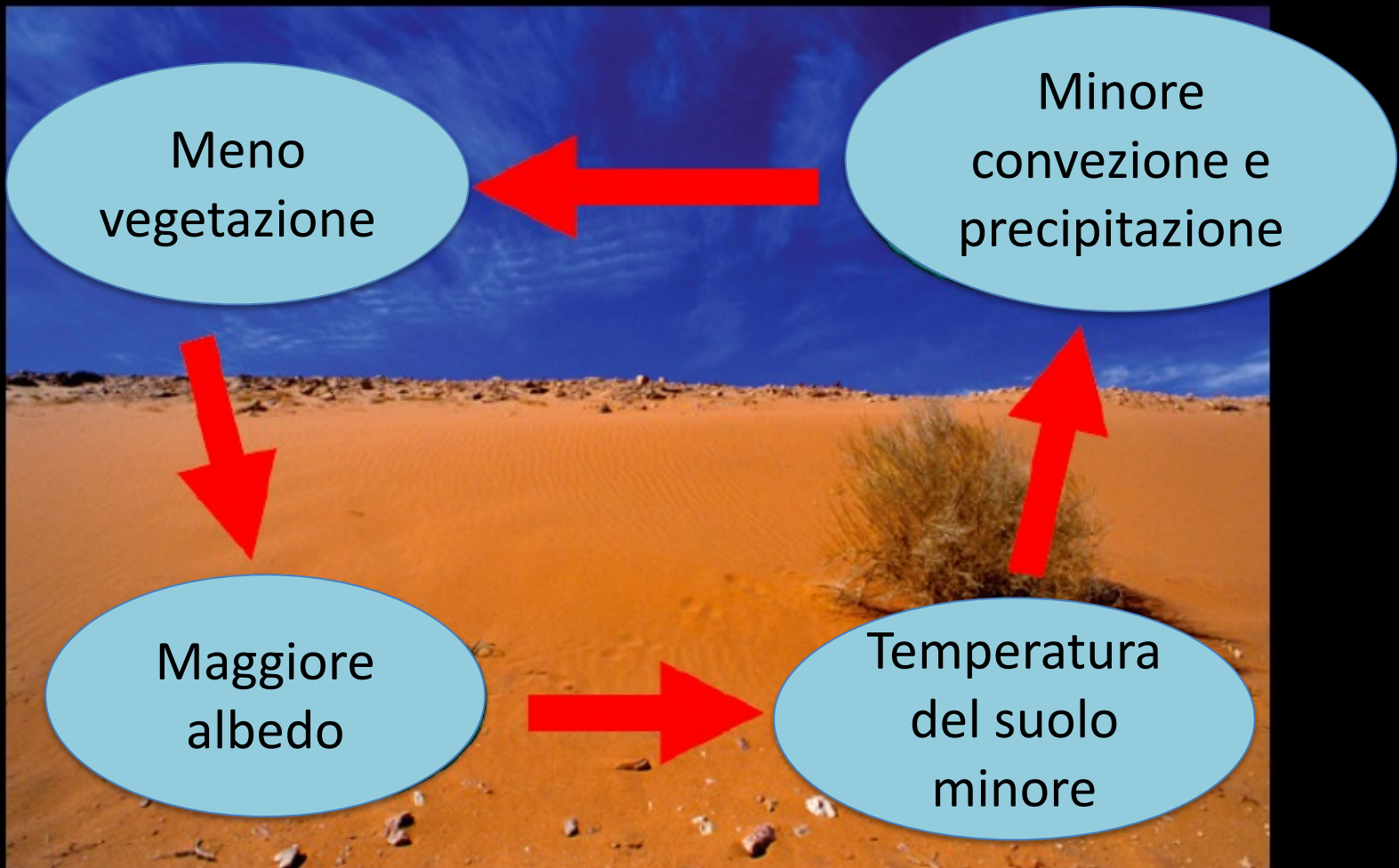


Evapotraspirazione



Albedo

# Il «meccanismo di Charney» (1975)



# Un semplice modello per il feedback vegetazione-albedo

$$\frac{dV}{dt} = gV(1 - V) - mV$$

$$g = g(P) \quad , \quad P \propto T$$

Dinamica della vegetazione:  
equazione logistica

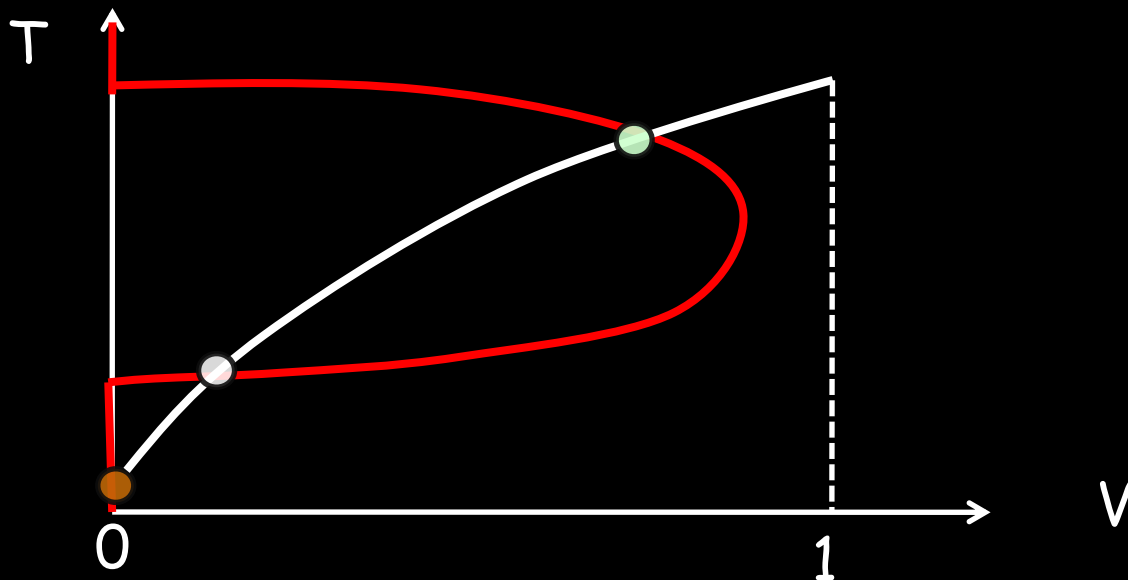
$$C_V \frac{dT}{dt} = \frac{S}{4} [1 - \alpha_V V - \alpha_B (1 - V)] - \sigma T^4$$

Primo principio  
della  
Termodinamica

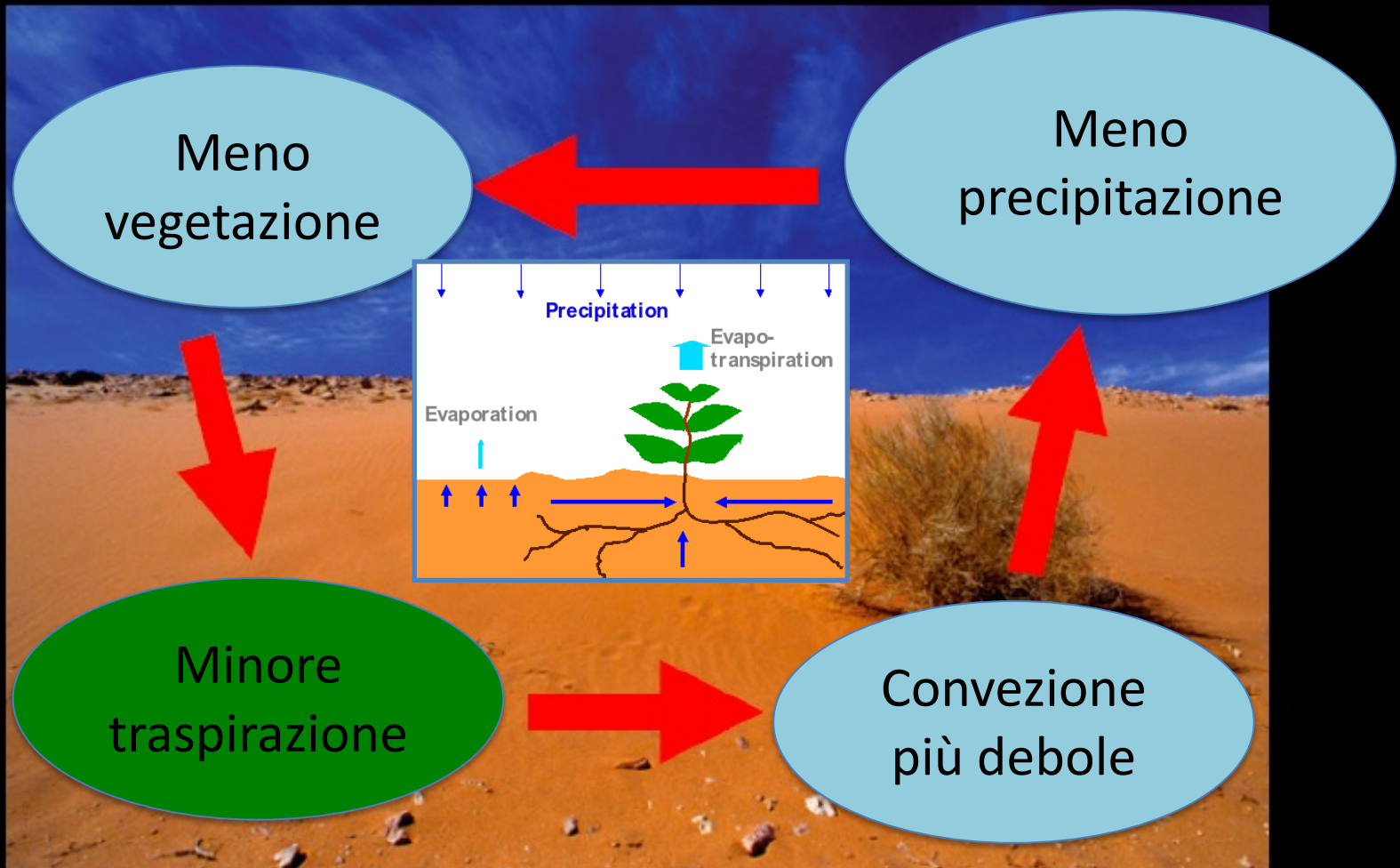
# Un semplice modello per il feedback vegetazione-albedo

$$0 = g(T)V(1-V) - mV \Rightarrow V = 1 - \frac{m}{g(T)}$$

$$0 = \frac{S}{4} [1 - \alpha_V V - \alpha_B (1 - V)] - \sigma T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{S}{4\sigma} [1 - \alpha_V V - \alpha_B (1 - V)]}$$



# Evapotraspirazione e il ciclo idrologico



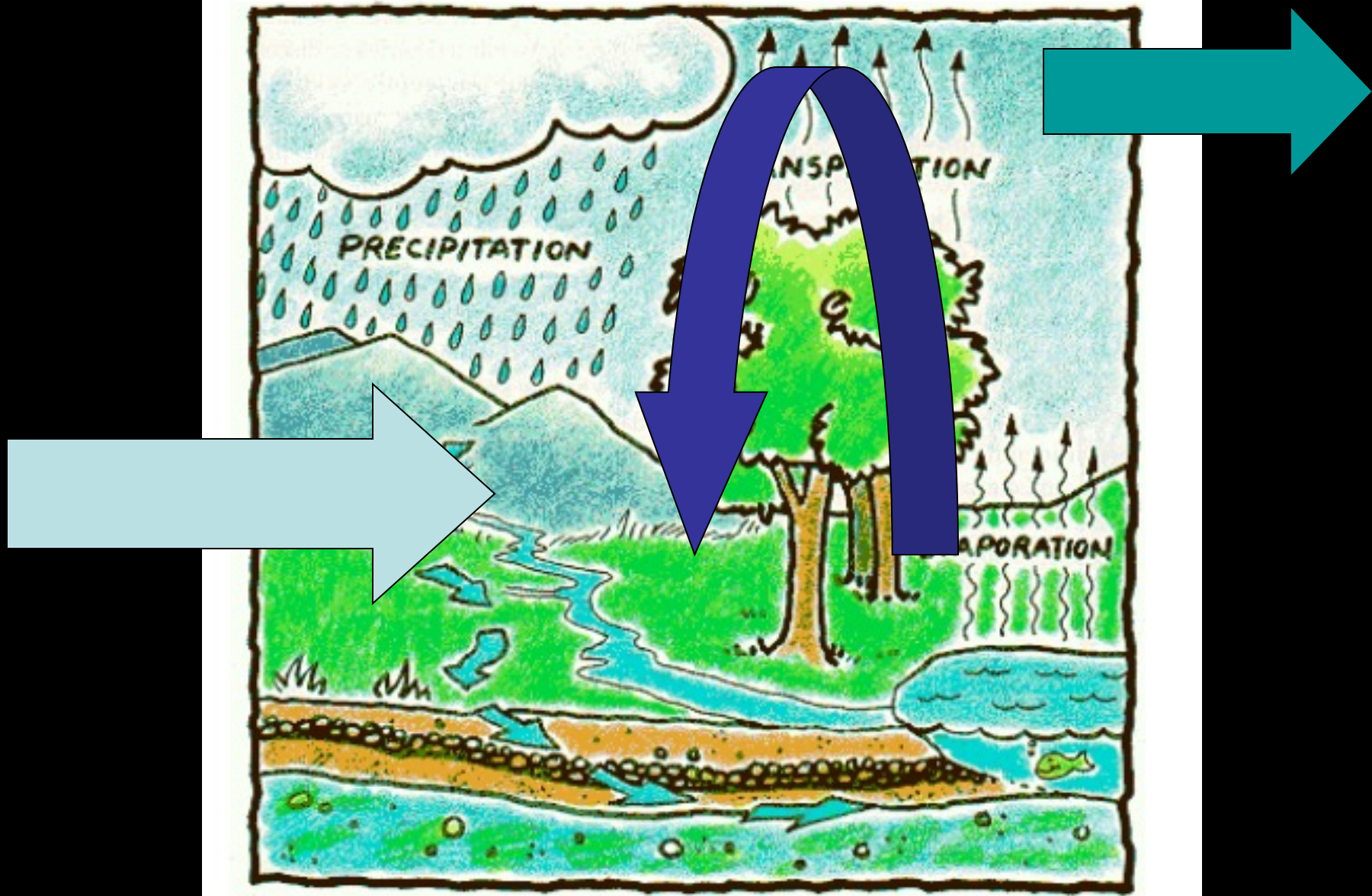


# Onde di calore estive alle medie latitudini continentali (e.g., estate 2003 in Europa)

Le cause includono:

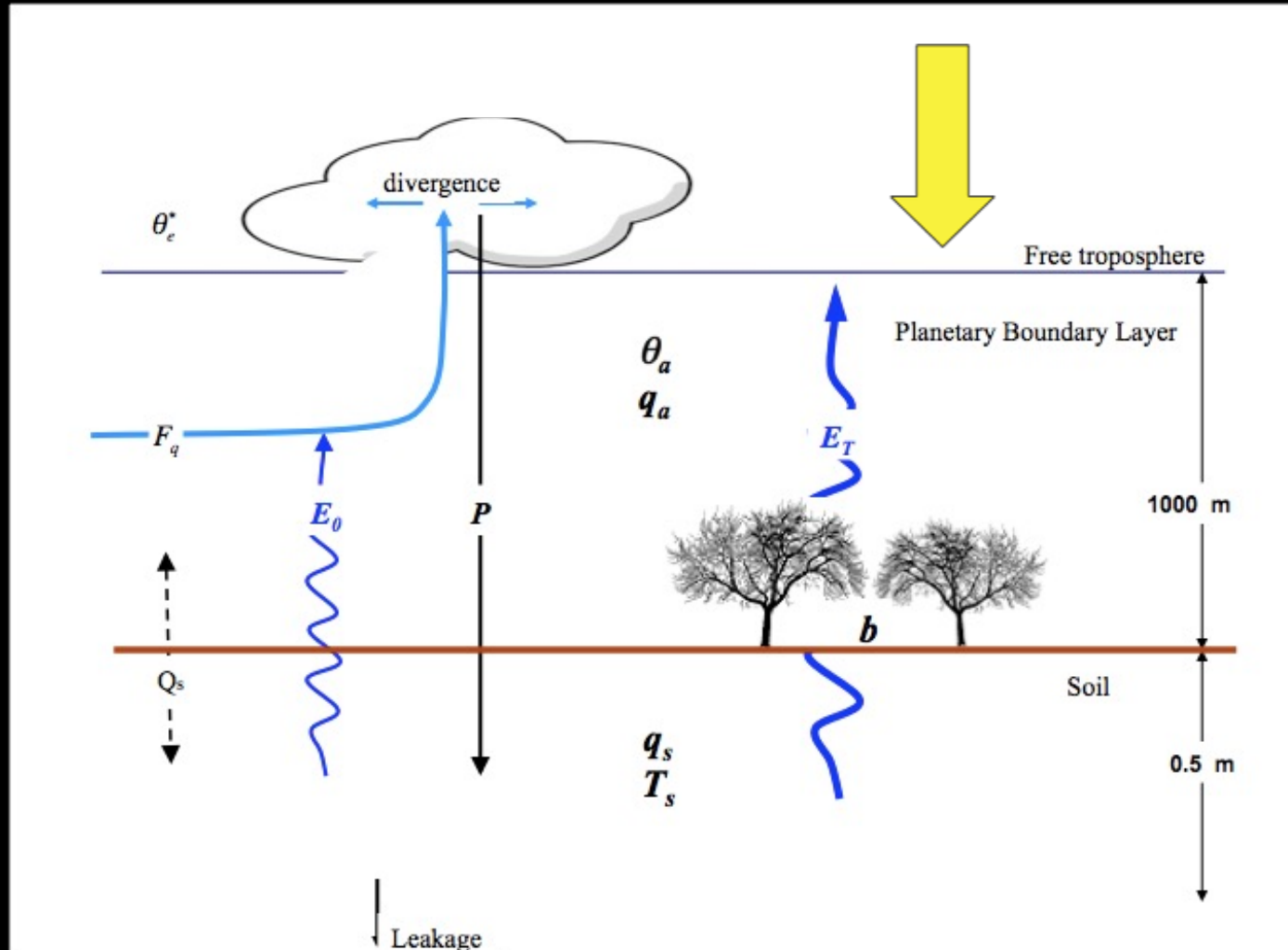
- Condizioni anticicloniche prevalenti
- Anomalia di scarsa umidità del suolo



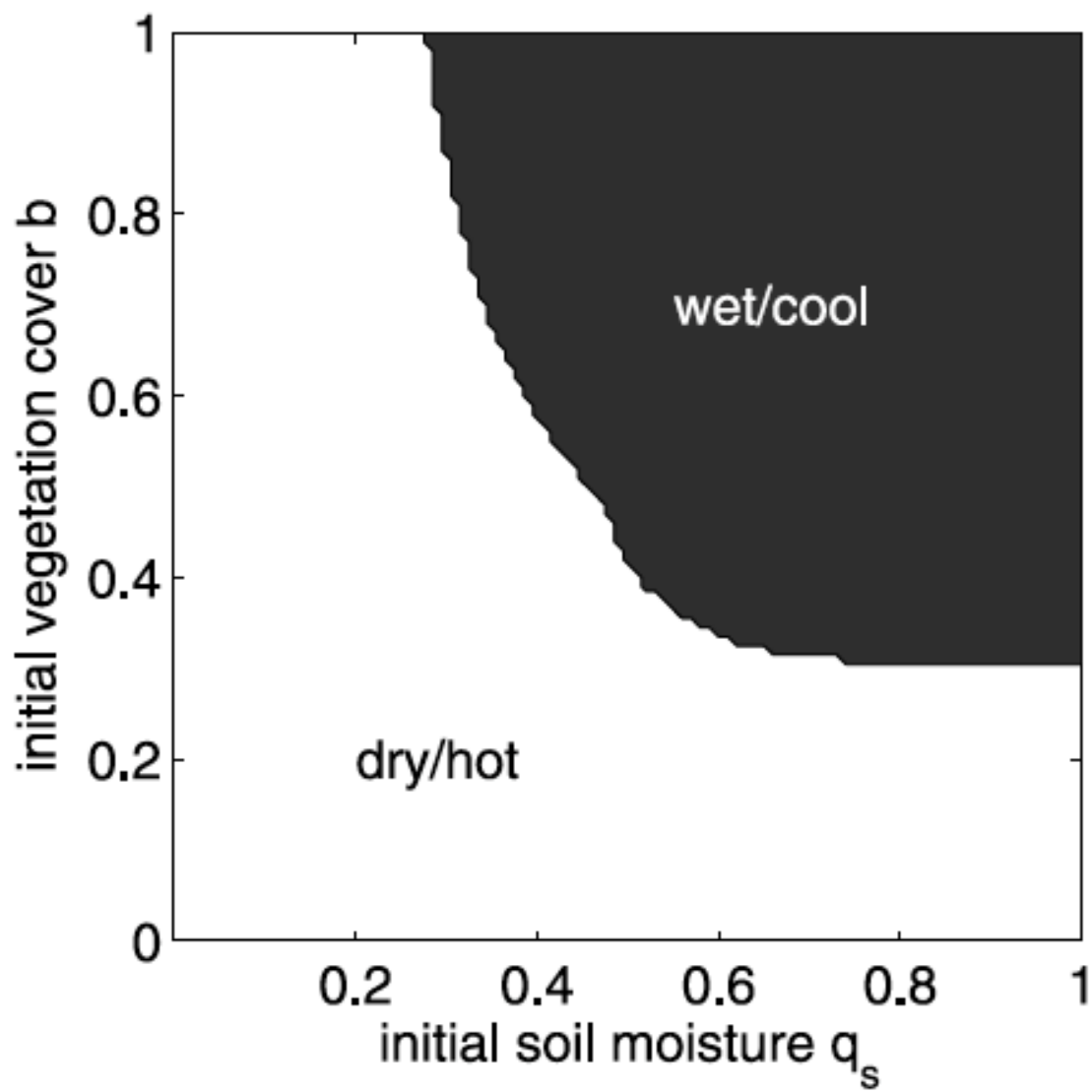


Trasporto long-range e riciclo locale

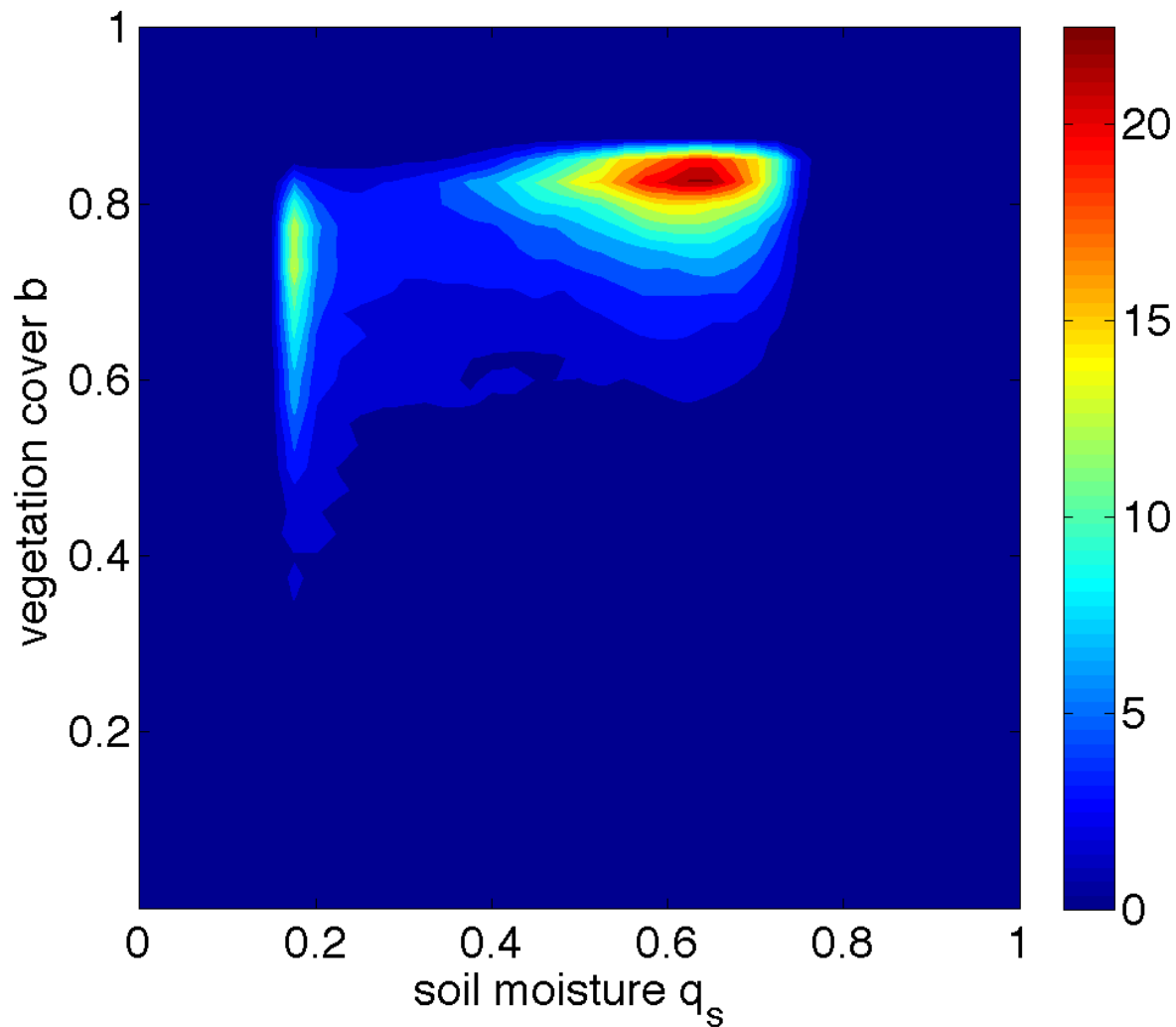
# Un modello concettuale per l'interazione suolo-vegetazione-atmosfera



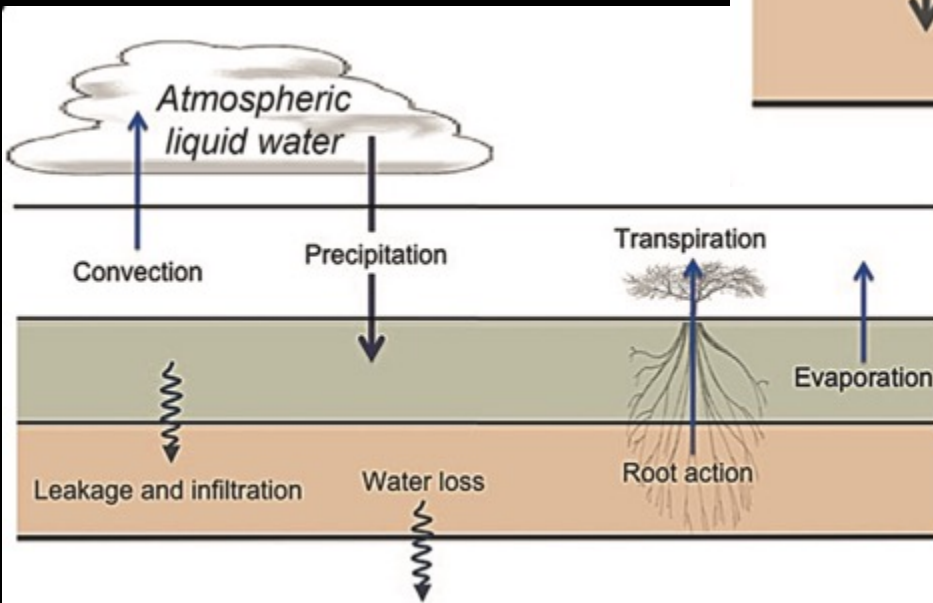
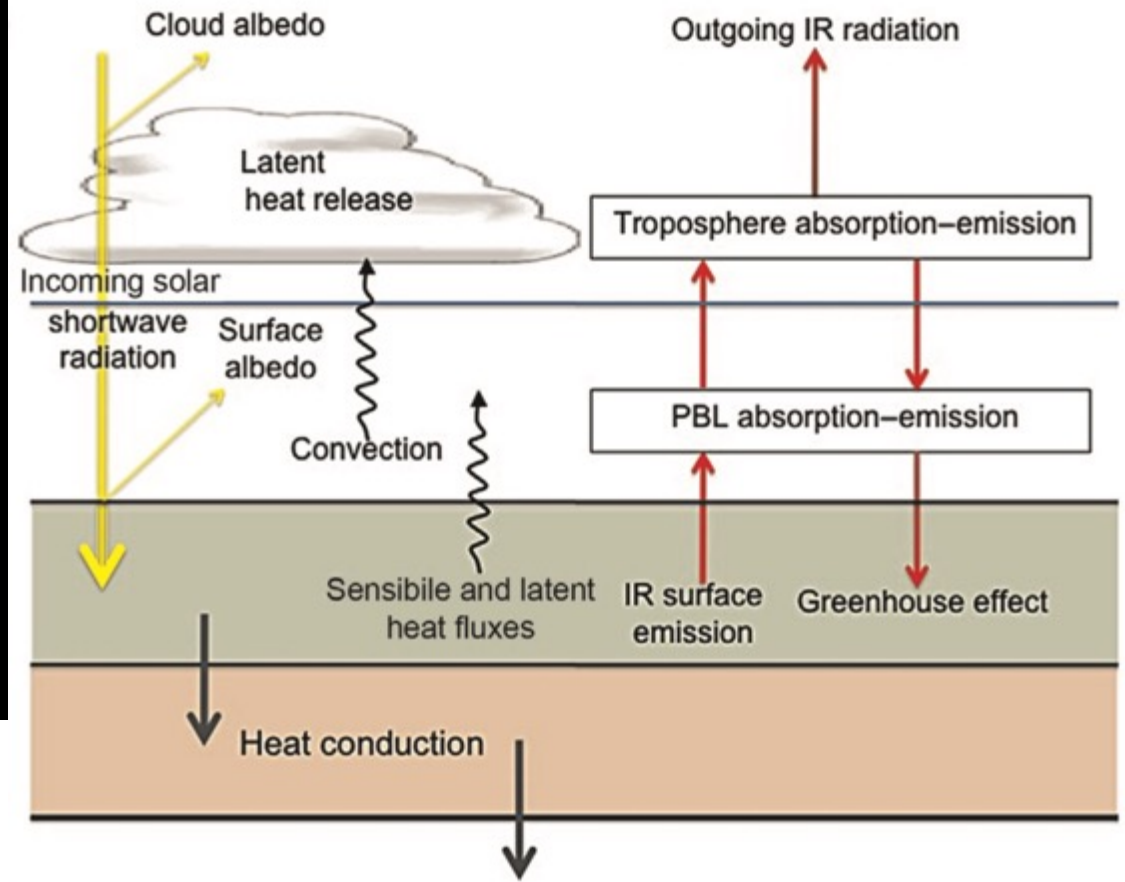
D'Andrea et al, GRL,2006; Baudena et al, WRR, 2008; F. Cresto Aleina et al, *Tellus B* 2013, Elisa Lovecchio, *Tesi di laurea* 2013, Sara Lenzi, *Tesi di Laurea* 2016



# Effetti della variazione stocastica del flusso di umidità

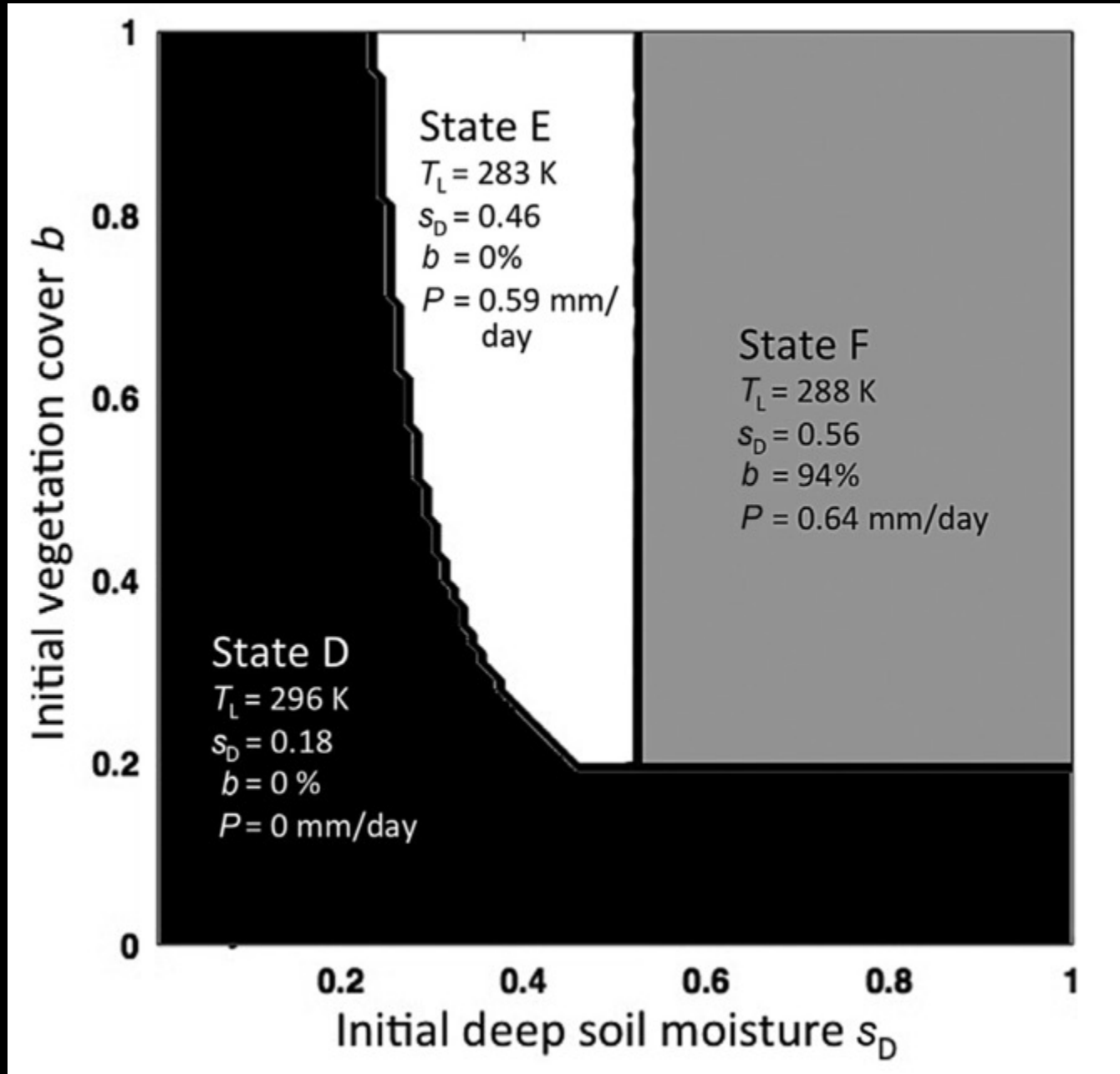


# Dune: un pianeta a quattro strati



F. Cresto Aleina et al,  
*Tellus B* 2013,

# Equilibri multipli



# Nessuna «Snowball» negli ultimi 600 milioni di anni



Eduard Riou (1838-1900) from The World  
Before the Deluge 1872, United States  
derivative work

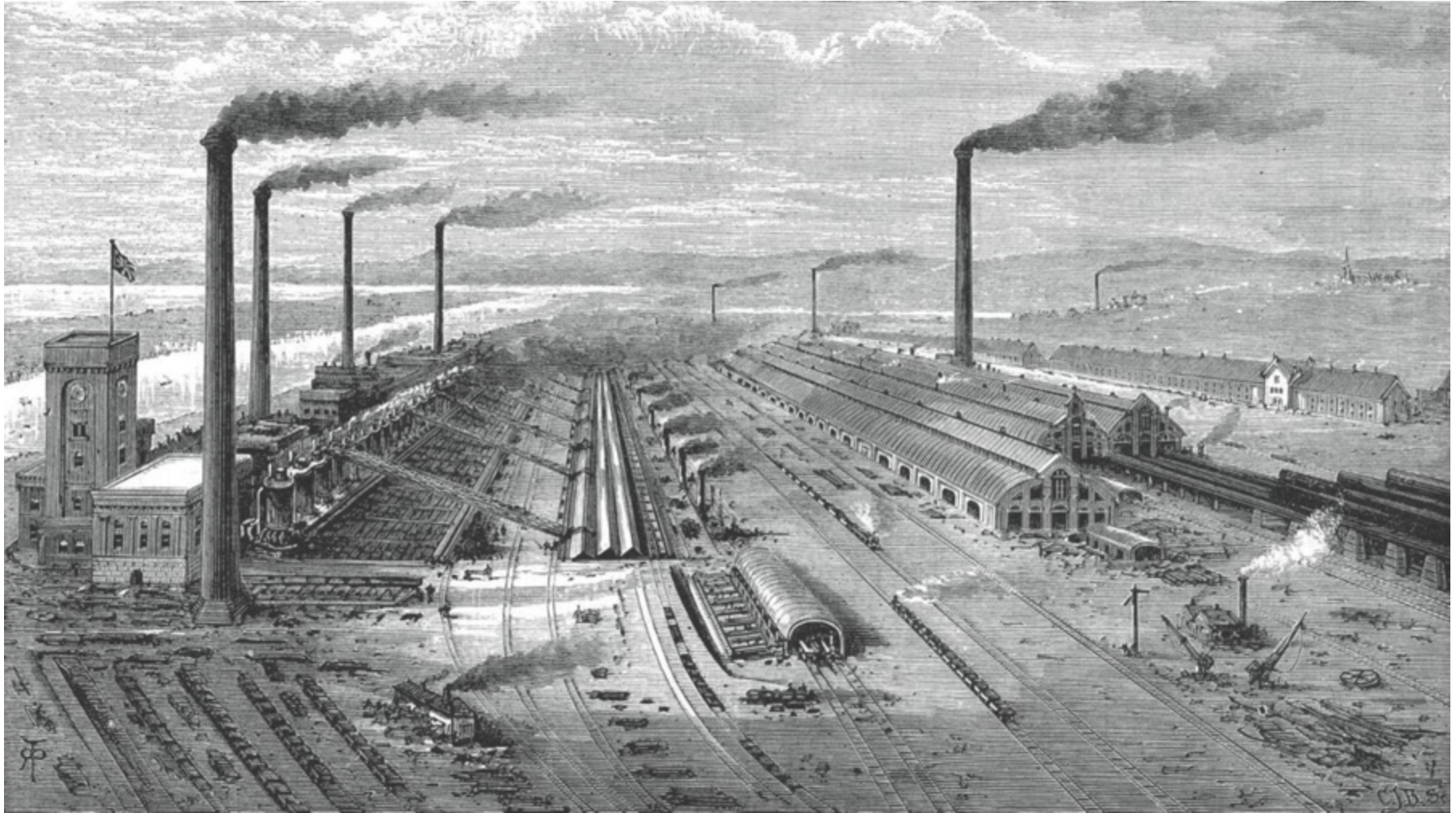


**... circa 4 milioni di anni fa,  
appaiono strani ominidi**

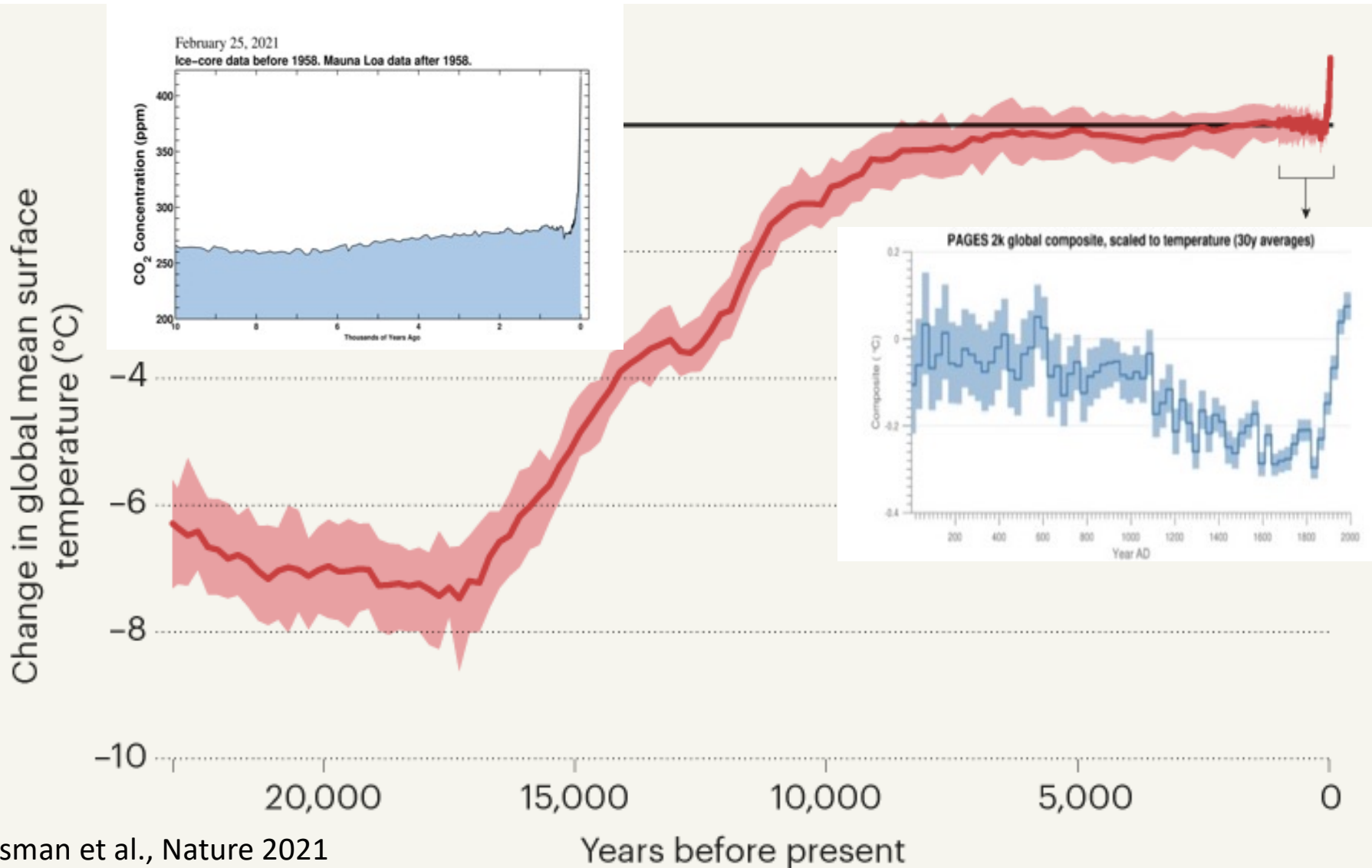


**Scoprono il fuoco, sviluppano il linguaggio astratto,  
l'arte. L'arco e le frecce. Diventano grandi cacciatori.  
Poi sviluppano l'agricoltura. Fondano regni e imperi.  
Sviluppano la filosofia e la scienza, si fanno la guerra**

**e poi arriva la rivoluzione industriale..**



# Entriamo nell' «Antropocene»

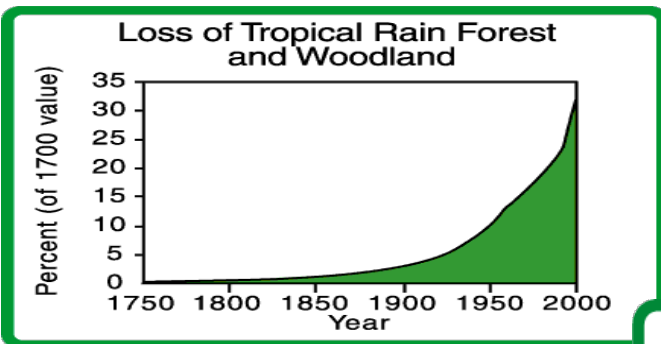
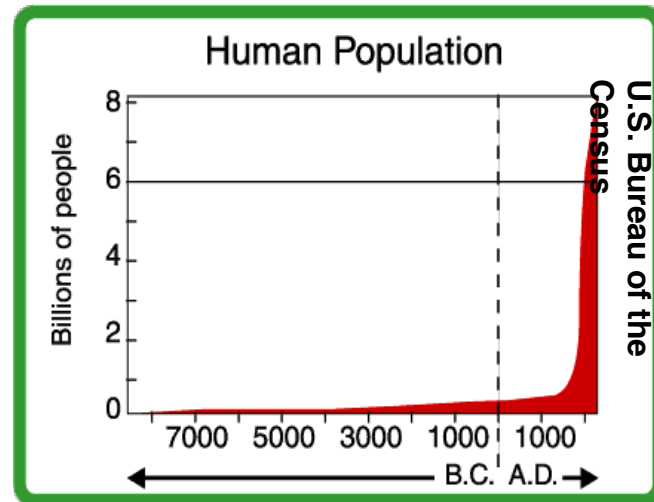
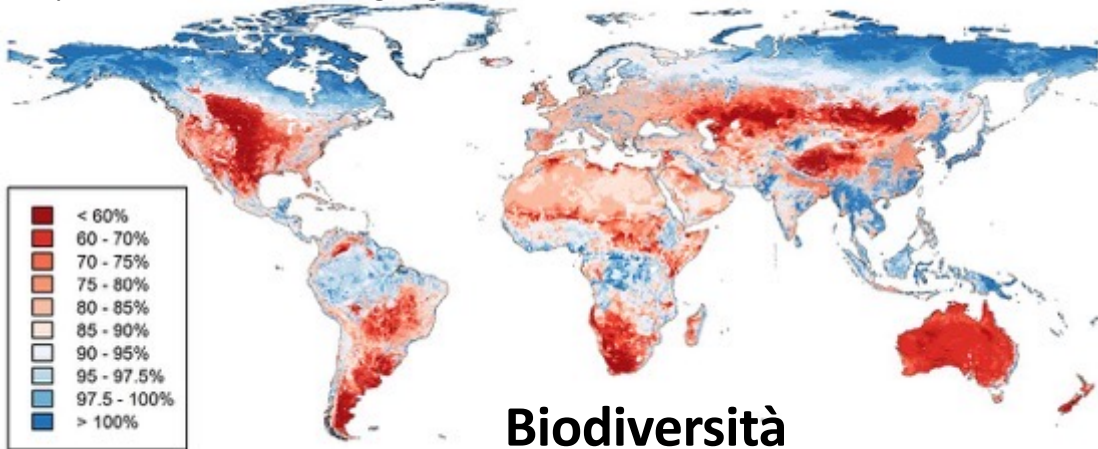


Osman et al., Nature 2021

Marcott e Shakun, Nature 2021

# Oltre il riscaldamento globale:

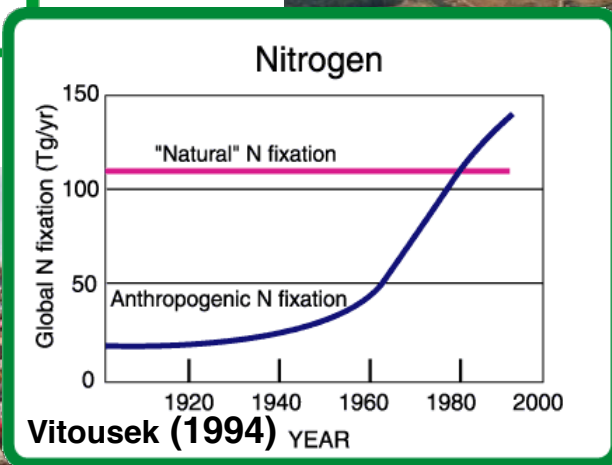
<https://science.sciencemag.org/content/353/6296/288>



Richards (1991),  
WRI (1990)

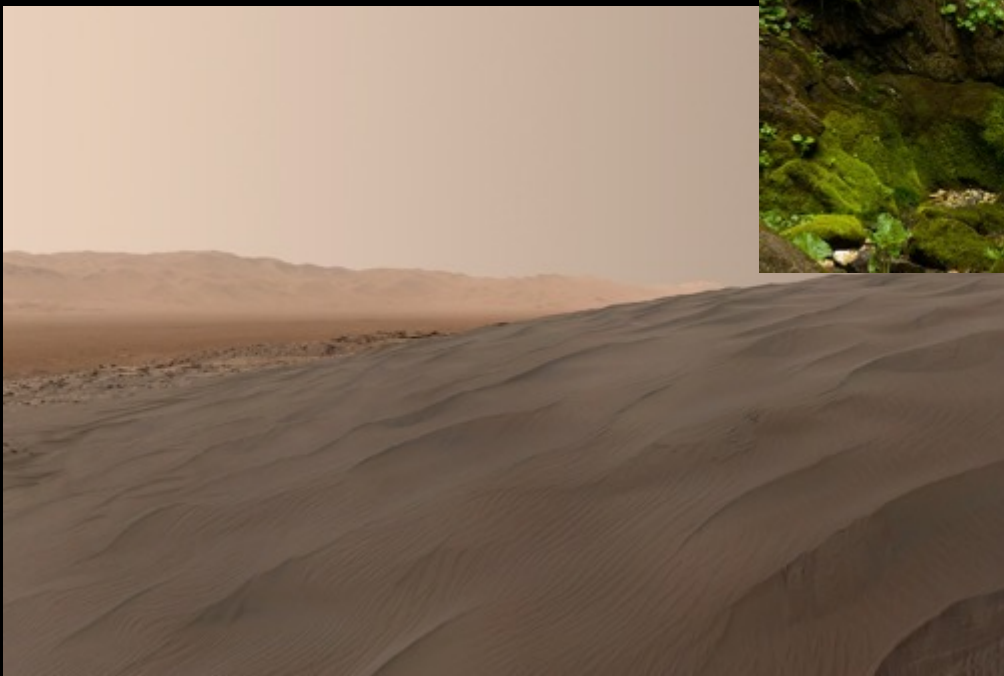
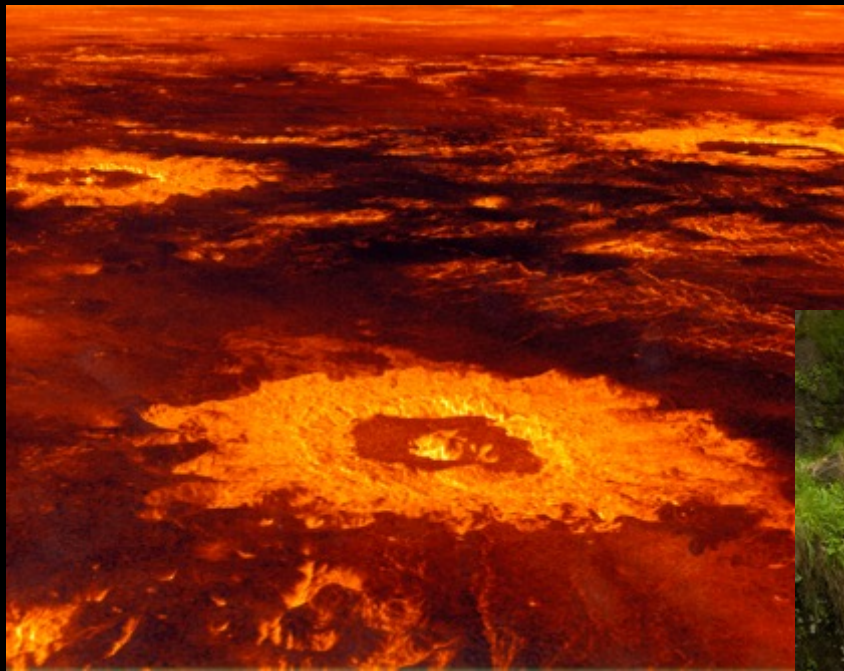


## Inquinamento



**Perdita di habitat**  
**Perdita di suolo**

Quanto dobbiamo preoccuparci?



Il clima della Terra è stato molto stabile



**Il «pianeta»  
non è in pericolo**

**Tuttavia... i «fragili» siamo noi**