



UNIVERSITY OF BOLOGNA  
DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY  
MASTER DEGREE IN SCIENCE OF CLIMATE

~ · ~

ACADEMIC YEAR 2024–2025

## MINOR - La sfida del Cambiamento Climatico

**Prof.**

Prof. Tiziano MAESTRI

**Student**

beautiful BABIES  
00000

DATE: March 26, 2025, [download latest](#)

---

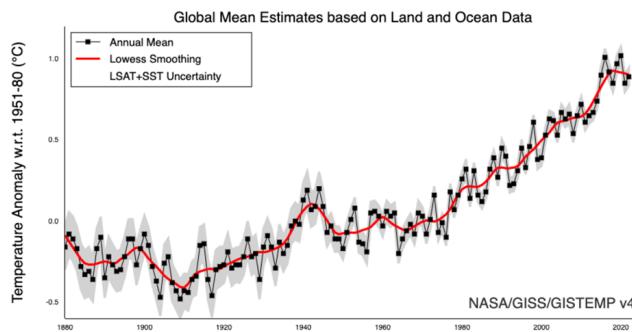
# Contents

<b>1 Il sistema climatico: componenti</b>	<b>2</b>
1.1 Evidenze del Climate Change negli ultimi anni . . . . .	2
1.2 Circolazione atmosferica . . . . .	3
1.2.1 Convezione . . . . .	3
1.3 Ocean Circulation . . . . .	6
1.4 Criosfera . . . . .	7
<b>2 Le forzanti del sistema climatico</b>	<b>9</b>
2.1 Introduzione . . . . .	9
2.2 Variabilità multidecadale . . . . .	10
2.3 Climate sensitivity . . . . .	11
2.3.1 Global radiative balance . . . . .	11
<b>3 Rischio geologico e adattamento ai cambiamenti climatici - Prof.ssa Claudia Romagnoli</b>	<b>14</b>
3.1 Rischi geologici . . . . .	19

# Chapter 1

## Il sistema climatico: componenti

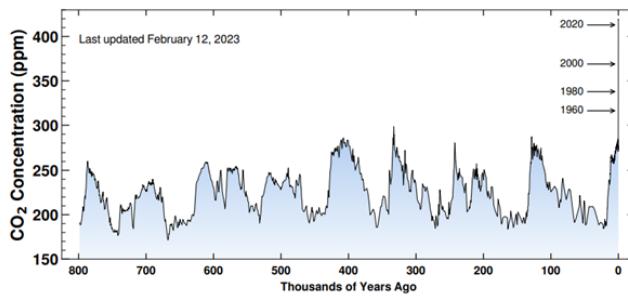
### 1.1 Evidenze del Climate Change negli ultimi anni



Rispetto ad un periodo di referenza come è cambiata la temperatura media. Nello studio del clima si studia l'anomalia: la differenza rispetto a una referenza, l'universo è scritto in differenze.

H0 quando vediamo qualcosa che non funziona, che cambia l'assunzione è che è la natura, poi si possono ipotizzare vari altri motivi.

Statistica e significanza: dopo quante volte devo indovinare testa o croce affinché l'evento abbia significanza? Humans are responsible perché si evidenziano dati di emissioni di combustibili fossili (facile trovare i dati),



confrontando con l'incremento della CO<sub>2</sub> sembra palese la responsabilità.

Clima è la statistica del tempo atmosferico.

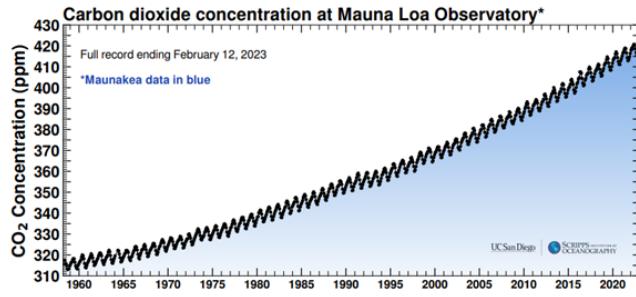


Figure 1.1: Mauna Loa Data

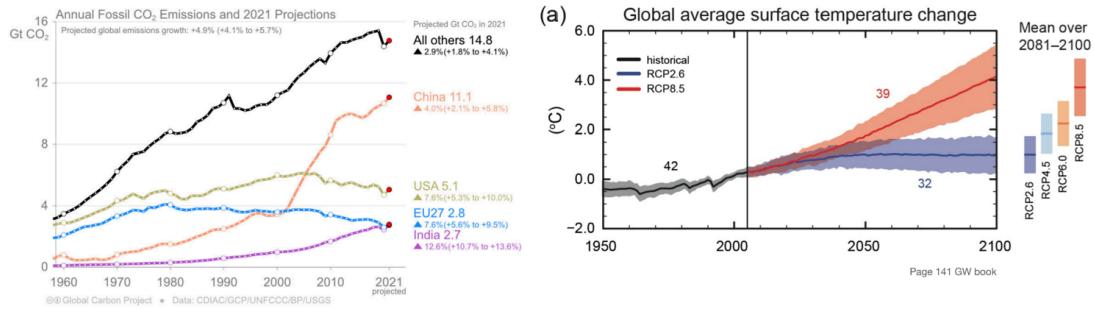


Figure 1.2: Aumento nel futuro

## 1.2 Circolazione atmosferica

L'energia che arriva ai tropici è più forte di quella che arriva ai poli. Ai poli la Terra emette più di quello che riceve: necessariamente parte dell'energia ai tropici arriva ai poli (energy transport) à la circolazione in atmosfera deve esserci. La circolazione atmosferica è forzata dalla differenza di ricezione di intensità luminosa.

900W/m<sup>2</sup> a giugno. La circolazione terrestre permette l'emissione di energia (più di quella che si ha in un pianeta senza atm e oceano) ai poli.

### 1.2.1 Convezione

Ai Tropici celle convettive, perturbazioni locali che si muovono molto poco. Extra tropici si muovono molto di più. Nell'oceano la variazione di pressione è lineare perché non è compresso, l'atmosfera sì. La forza del vento è data dal gradiente di temperatura. destra emisfero nord sx emisfero sud. Saturazione means 100% di umidità. Umidità relativa: quanto vicino sei alla saturazione.

Riscaldando l'aria la saturazione diminuisce: sto dando più energia all'aria che riesce a mantenere in sospensione più molecole d'acqua → va giù la umidità relativa: la quantità d'acqua che c'è (ed è costante da prima e dopo) è più piccola di quella che ora l'aria può contenere NB se tu l'acqua non gliela dai se la prende da te (metti una scodella vicino al termosifone). Riscaldare il pianeta crea area più calda che può mantenere più acqua del 7%, intensificando quindi precipitazioni più intense.

Cella di Hadley alle nostre lat: westerlies.

Pressione è un po' come dire densità dell'aria. salendo in altezza diminuisce la pressione. Per ogni kg d'aria ci sono 15g di acqua nel caso di saturazione. Estremi di precipitazione dovuti al climate change: ogni 1°C warming l'umidità aumenta del 7%. Perché su fa più freddo? Perché l'aria è più fredda:  $\Gamma_d = -6.5C/km$  moist adiabatic

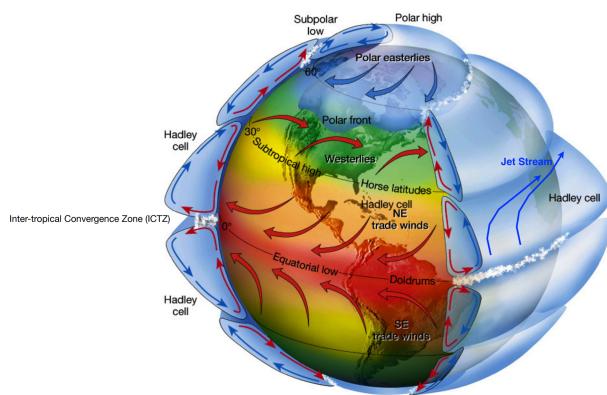
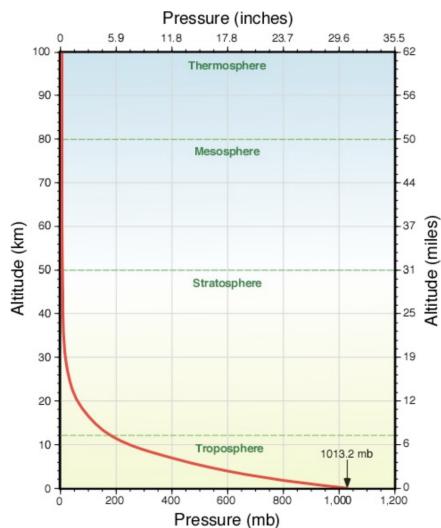
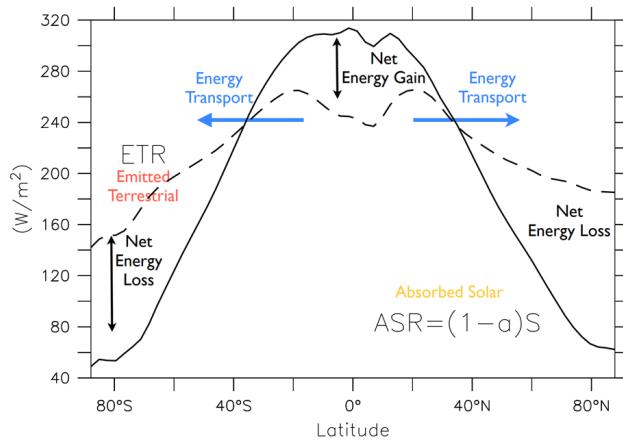
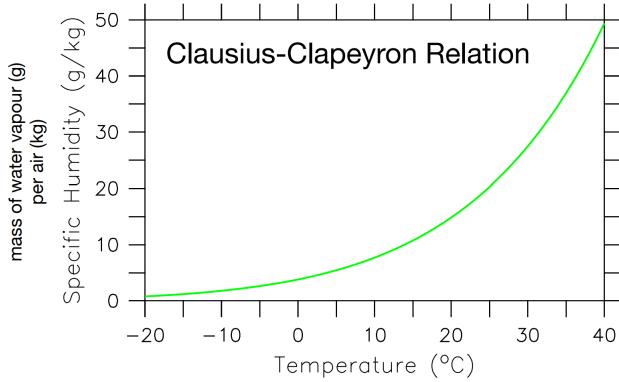


Figure 1.3: Modello a tre celle



lapse rate. pressione e densità per i gas sono praticamente la stessa cosa. molto in alto  $p$  è più bassa, le molecole si devono allontanare. Le particelle d'aria salendo aumentano di volume. Teoria cinetica della temperatura: la temperatura sono le vibrazioni delle molecole dentro a un gas. Se l'aria è secca la temperatura va giù con  $\Gamma_d = -10C/km$ . Se mi raffreddo l'umidità che posso contenere è molto più bassa (Clausius-Clapeyron) quindi le mol condensano.

NB per far salire l'aria potrebbe esserci un fronte d'aria che spinge in alto altra aria calda. In eq la sup è molto calda, l'aria tende a salire poi nuvole e precipitazione: celle convettive. Oppure l'aria sale per condizioni orografiche. Se raffreddi l'aria questa inizia a condensare: spugna che si stringe.

Alcuni oggetti trattengono il calore meglio di altri perché l'acqua assorbe un sacco di calore, questa abilità di trattenere il calore è desirata dalla capacità termica. Legato a questo concetto è il ciclo stagionale: l'acqua ha una capacità termica molto alta: è difficile cambiarle temperatura, tende ad essere molto stabile: vicino al mare il clima è più mite. earth nullschool stat24

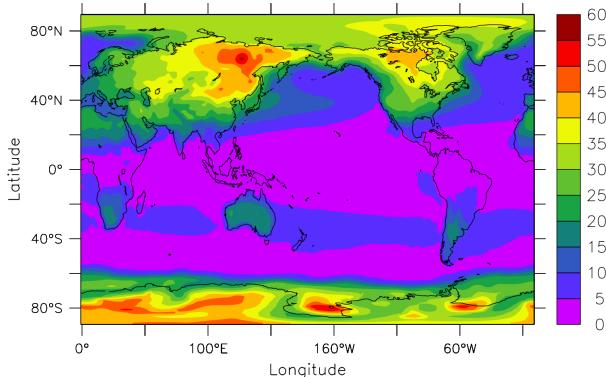
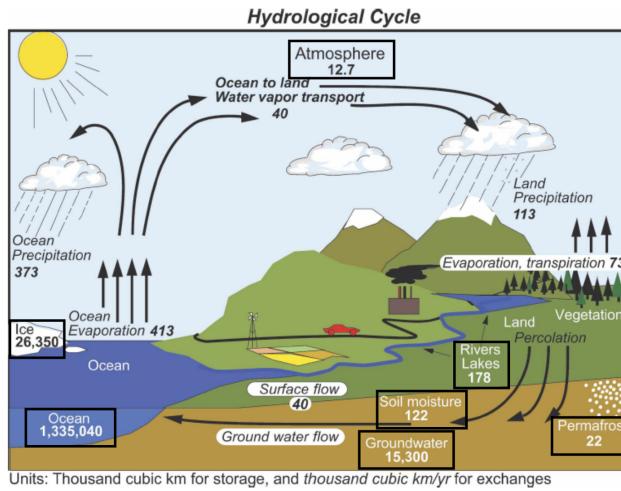


Figure 1.4: Amplitude of Seasonal Cycle of Surface Air Temperatures. Large heat capacity of ocean dumps temperature variations.

La circolazione poi complica le cose, anche per una previsione futura. Ad es Gulf stream porta energia e calore su. Che cosa accelera il ciclo idrologico?

- Più evaporazione
- più trasporto di water vapor
- Più precipitazione



Avere  $T$  più alta vuol dire che l'acqua evapora di più.

Quando fa molto freddo l'aria può trattenere meno vapore acqueo: vedo il fumo del respiro.

## 1.3 Ocean Circulation

Divisa in surface circulation and deep water circulation. In superficie l'acqua si muove perché spinta dal vento.

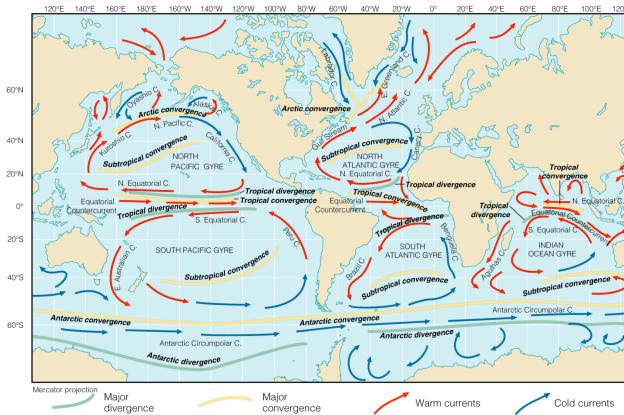


Figure 1.5: Sea surface circulation

**Stratification** Temperatura e salinità cambiano molto in profondità del mare: acqua superficiale è meno densa perché altrimenti sprofonderebbe: zone di generazione di acqua profonda vicino ai poli.

Vento superficiale genera mixing in superficie: mix di temperature. Quando un fluido è vicino a un bordo si creano turbolenze per l'attrito: boundary layers. Correnti di marea (attrazione gravitazionale) agiscono su tutta la colonna d'aria, ci sono poi altre correnti associate alla global deep water circulation driven by temperature and salinity (density). Il bottom flow si forma in Antartide: Ross Sea and Weddell Sea. Nel Labrador Sea e

Greenland Sea si forma acqua densa deep water. Quando fa freddo l'acqua è più densa. Le salinità nel Pacifico sono più basse, maggiore salinità maggiore densità. National snow and ice data center

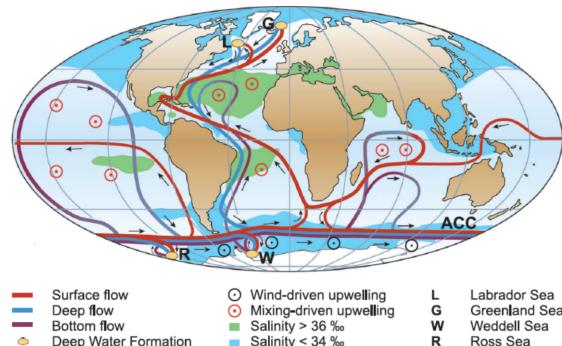


Figure 1.6: Global Deep water circulation

Antartica si forma molto sea ice: quando il mare ghiaccia il sale si deposita sotto: formazione di ghiaccio vuol dire più salinità nel mare: più densità: formazione di deep water. La chiamano anche Converior belt, Meridional overturning circulation, thermohaline, global deep water circulation.

## 1.4 Criosfera

In cui l'acqua è allo stato solido, Aumenta albedo, si raffredda di più, si possono formare più ghiacci: feedback positivo.<sup>3</sup> Riserve più grossi come l'Antartica o la Groenlandia avrebbero più effetti sul sea level rise. Ghiaccio

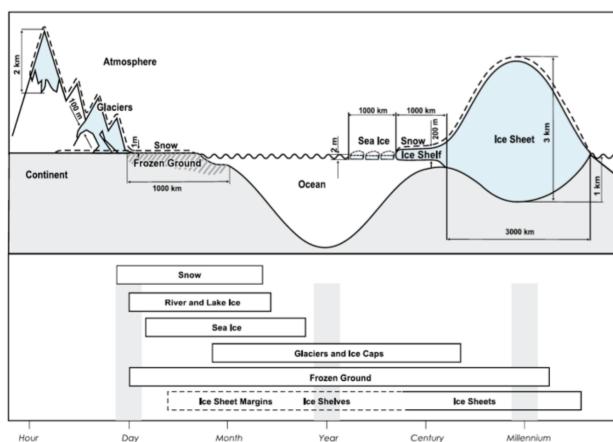


Figure 1.7: Components of the cryosphere

che galleggia non contribuisce al sea level rise: Spinta di Archimede, occupa il volume del liquido spostato.

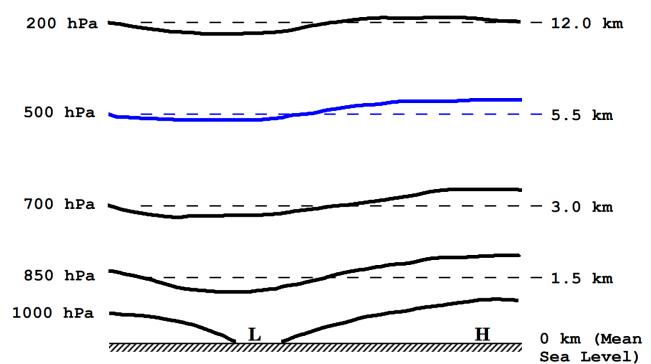


Figure 1.8: hPa

## Chapter 2

# Le forzanti del sistema climatico

### 2.1 Introduzione

Il clima è lo stato e l'insieme statistico di un sistema climatico, che possiamo definire in tanti modi con tanti livelli di difficoltà. Riscostruzione delle seie temporali partendo da uno sguardo che ci danno i nostri proxies. Modelli che usano circa 10km di lato di quadrato nella modellizzazione. “Climate is the composite or generalization of weather conditions of a region”.

Forzante esterna: una serie di effetti che interferiscono alla variabilità “variabilità forzata” attribuita ad un agente esterno responsabile. Oceano ha tempi caratteristici molto più lunghi che possono permetterci di spiegare alcune fluttuazioni.

Variabilità interannuale in cui emergono tanti processi con conseguenze immediate sul clima superficiale (ENSO). Global circulation è fondamentale per spiegare questo tipo di comportamento di distribuzione delle temperature. Alternanza terra-mare, presenza di ghiaccio, orografia contribuiscono alla distribuzione longitudinale della temperatura.

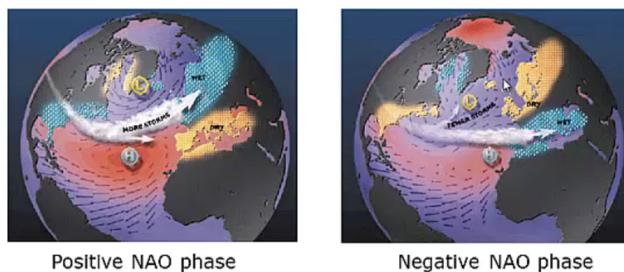
Nel caso delle precipitazioni serve studiare qualcosa in più: il trasporto di energia o masse d'aria per comprendere la distribuzione delle precipitazioni.

Nel mediterraneo esistono zone di storm track minori, ma guardano al generale vi sono tracks du cicloni extratropicali.

La statistica di una variabile meteorologica in questi dati devo simulare dei processi molto veloci.

Rwmwmbwer: atmosfera è un fluido forzato, dissipativo, stratificato in un sistema rotante. Lo studio del clima non può prescindere da quello che viene su scale temporali molto brevi.

NAO. Processo di Low frequency variability.



Blocking atmpspheric: processo di ostacolo che ferma la corrente, altro processo di low freq stability in tempi più lunghi della low freq variability c'è ad esempio El Nino Southern Oscillation: pulsazione della fascia

equatoriale del pacifico. Delle piccole perturbazioni distruggono l'equilibrio facendoci entrare in uno stato di disturbazione El Nino. Statistica stagionale nella variailità

Come prima queste fluttuazioni di t sono spiegate da simmetrie orografiche.

El nino teleconnections: introduzione di (a)simmetrie che si ripercuotono nella statistica

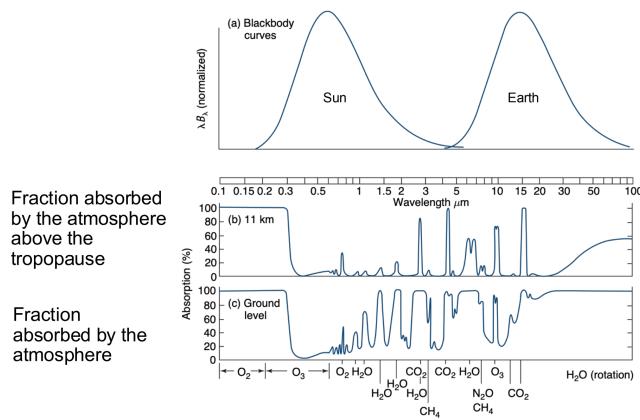
## 2.2 Variabilità multidecadiale

In una scala temporale in cui si mischiano molto le variabilità naturali con le forzanti esterne. Atlantic multi-decadal variability caratterizzata da pulsazione di tempi molto lunghi con comportamento quasi periodico di 6 decenni. Principale motore della previsione decadale. Punto di confine tra i tempi su cui è importante considerare la var nat e tempi in cui (più di 10 anni) in cui se considero la temperatura di 50 anni davanti a me non mi aspetto di vedere un ruolo significativo di fenomeni naturali ma forzanti climatiche antropogeniche.

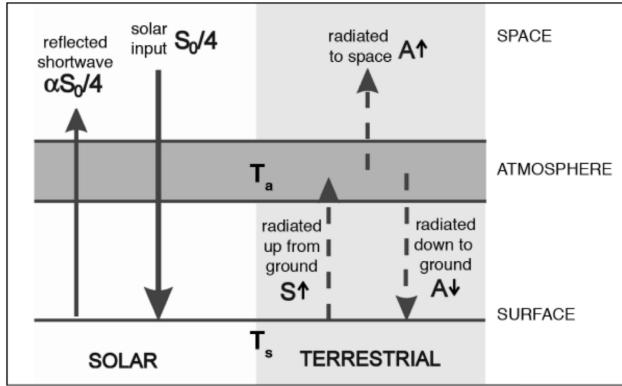
Se osservassi la temperatura da un satellite coe sarebbe la temperatura di emissione della Terra? 255K. Perché è diversa dalla temperatura che osserviamo sulla superficie? Per l'effetto serra.

Che significato ha questa  $T$ ? La temperatura di emissione  $T_e$  è un buon modello della temperatura superficiale della Terra? Come interpretarlo e come determinare se è un buon modello? Questa  $T_e$  è la temperatura che stimiamo dallo spazio, ma non è puramente rappresentativa della temperatura superficiale. L'effetto serra naturale in un pianeta è semplificato nel fatto che lascia passare la radiazione solare ma non la radiazione terrestre. Ci sono dei tipi di radiazione (lunghezza d'onda centrale) che rendono l'atmosfera opaca. L'atm influisce sulla temperatura terrestre tramite effetto serra, lo fa per effetto di alcune molecole presenti: cambiando la composizione chimica cambia effetto.  $T_s$  è mantenuta più alta dal fluido atmosferico che trattiene l'energia emessa dalla superficie terrestre non trasformandola in energia out.

Gas serra rendono una parte dell'atmosfera sostanzialmente opaca senza andare ad alterare l'assorbimento della radiazione solare.



**Modelli per il GH effect** è la riemissione dell'atmosfera che scalda la superficie terrestre. Da fuori vedo la temperatura dell'atmosfera  $T_e = T_a$ . Solar input non interagisce con l'atmosfera, nell'input solare c'è da considerare l'albedo obv. In realtà c'è una parte che scappa  $\varepsilon$  (nella figura 2.2 a grandi wavelength) che rappresenta la trasmissività che regola quanta radiazione rimane nella superficie: quanto ho popolato l'atm con gas che sono in grado di interagire. Forzante radiativa: quanto cambia la temperatura per un aumento della co2.



## 2.3 Climate sensitivity

**The Charney report** The science of Joule Charney ed Lorentz, è il primo assessment scientifico intorno al tema di carbon dioxide e clima.

Problema transiente: come il clima risponderà per variazioni negli anni futuri. *Trustworthy and actionable.*

"The primary effect of an increase of CO<sub>2</sub> is to cause more absorption of thermal radiation from the earth's surface and thus to increase the air temperature in the troposphere"

Quanto  $T_s > T_e$  dipende dalla capacità dell'atm di trattenere l'energia:  $T_s(\varepsilon)$  superficiale. L'atm vede l'introduzione di gas come una perturbazione molto grande anche se piccola dal punto di vista di ciclo biochimico. Il risultato della loro analisi è un  $\Delta T \simeq 3 \pm 1..5^\circ\text{C}$ . per un raddoppio di CO<sub>2</sub>. GCM cercano di rappresentare tutta la complessità, questi invece partono da posizioni più "semplici" di controllo che sono controllabili più facilmente; questi due approcci nell'assessment danno *similar results*.

### The 4th IPCC report

"Warming of the climate system is unequivocal, as is now evident from observations of increases in global average air and ocean temperatures, widespread melting of snow and ice, and rising global average sea level"

#### 2.3.1 Global radiative balance

Che succede se trattengo un po' di questa energia intorno alla Terra e vedo cosa succede nel sistema. La prima importante risposta del sistema è emettere più energia=scaldarsi. Quanto si deve scaldare il pianeta per il ristabilirsi di un nuovo equilibrio? (Domanda che si sono fatti nel report) Balanced eq:

$$\frac{Q_0}{4}(1 - \alpha) - \sigma T^4 = 0$$

ma poi supponiamo un imbalance:

$$\frac{Q_0}{4}(1 - \alpha) + \Delta R - \sigma T^4 \neq 0$$

Allora stiamo cercando una nuova temperatura che emetto per stare di nuovo in eq posto che un po' ne sto trattenendo con  $\Delta R$ ,  $T_{\text{new}}$  cosicché:

$$\frac{Q_0}{4}(1 - \alpha) + \Delta R - \sigma(T_{\text{new}})^4 = 0 \quad (2.1)$$

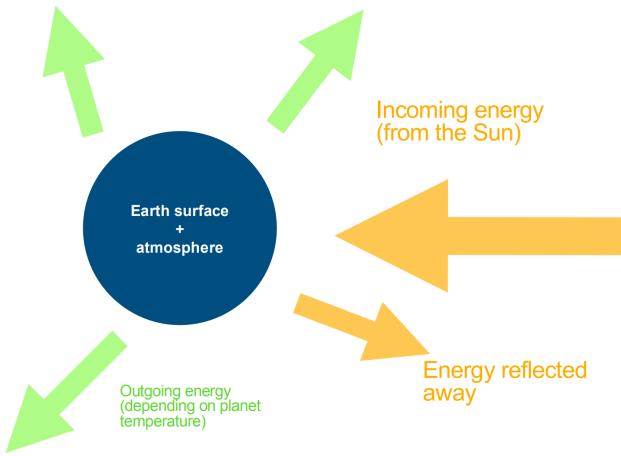


Figure 2.1: Global radiative balance tra energia che entra ed esce

con

$$T_{\text{new}} = T + \Delta T$$

approximating:

$$(T + \Delta T)^4 \approx T^4 + 4T^3\Delta T$$

Hence,

$$\begin{aligned} \frac{Q_0}{4}(1 - \alpha) + \Delta R - \sigma(T^4 + 4T^3\Delta T) &= 0 \\ \Leftrightarrow \cancel{\frac{Q_0}{4}(1 - \alpha)} + \Delta R - \sigma T^4 + 4\sigma T^3\Delta T &= 0 \\ \Leftrightarrow \Delta R &= 4\sigma T^3\Delta T \end{aligned} \tag{2.2}$$

Posso fare quindi una proporzione tra delta climate and delta radiative forcing:

$$\Delta T = \lambda \Delta R$$

dove  $T$  è la temperatura dell'equilibrio iniziale. Perturbo eq, raggiungo un nuovo eq che è ottenuto scaldando il pianeta in modo da bilanciare la forzante radiativa. Come faccio? Devo ottenere una stima di  $\lambda$  che tenga conto anche di altri pezzi, non solo la temperatura. Ma il primo metodo di stima è questo, tutto il lavoro dopo è migliorare la stima di  $\lambda$ : coefficiente che dice quanto cambia  $T$  del pianeta in risposta a una forzante radiativa.

$$\lambda \approx 0.25 \text{ K/(W/m}^2)$$

Poi potrei contare tutti i feedback che influiscono sulla forzante. Considerando nuovi feedback,  $\lambda$  era tale da essere circa  $3 \text{ K/(W/m}^2)$ . Alcuni di questi feedback sono il sea-ice, GHGs. C'è evidenza nella osservazione, non c'è dubbio scettico ora.

Il futuro della previsione climatica è il cambiamento climatico regionale actionable. Il passo in avanti è che ora abbiamo capito come stimare il cambiamento climatico regionale. Approcci semplici e complessi che possono dare pov interessanti a modo loro.

Facile la policy sull'adattamento, è bottom up (parte dal locale) (UE l'ha fatto) ma mitigation (è top down: serve coordinamento a livello internazionale)?

La community scientifica non dà probabilità a questi scenari, ma analizza semplicemente la risposta agli diversi stimoli. Check out technical summary of IPCC.

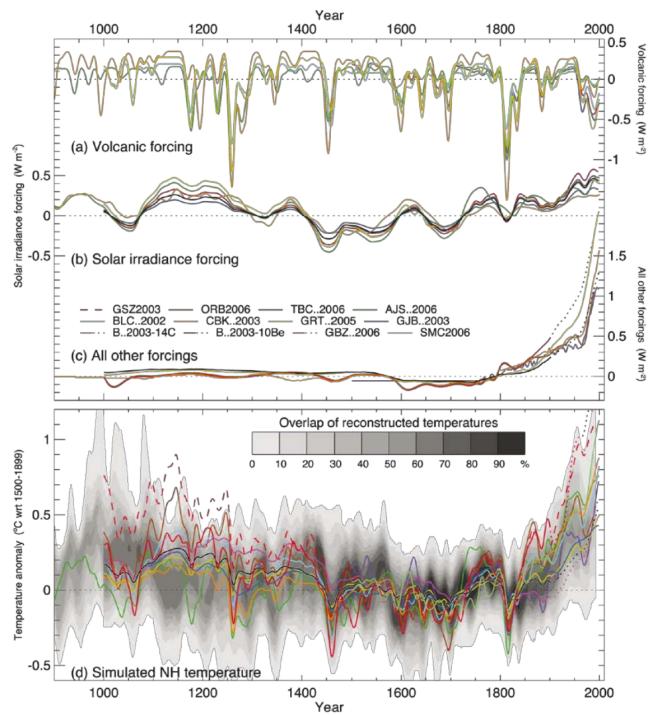
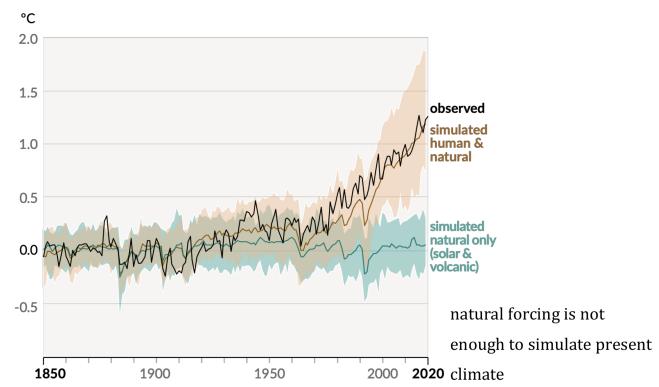


Figure 2.2: We have been able to simulate the climate of the past with natural radiative forcing.



## Chapter 3

# Rischio geologico e adattamento ai cambiamenti climatici - Prof.ssa Claudia Romagnoli

L'Antropocene ha una scala geologica molto breve rispetto ai cambiamenti climatici geologici naturali. Proterozoico prime fasi di vita in cui ufficialmente conosciamo di più. Fanerozoico è la fase più simile alla Terra attuale. Organismi più specializzati e meno adattabili sono le specie più a rischio di estinzione di massa. I primi ominidi

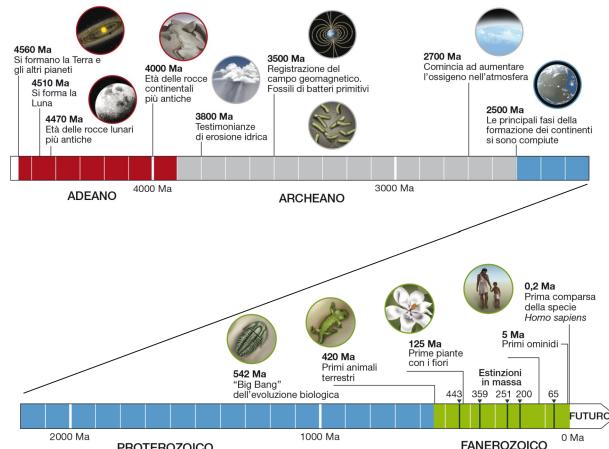


Figure 3.1: Linea del tempo

compaiono negli ultimi anni. Prime forme di vita fine febbraio, prime forma di vita complessa fine ottobre, macro rettili - dicembre, l'uomo compare il 31/12 alle ore 23. Siamo arrivati negli ultimi secondi dell'evoluzione della terra. 20 000 anni fa l'ultimo evento di glaciazione massima. L'Olocene è una fase degli ultimi 10 000 anni che era di relativa stabilità climatica, momento di stallo delle fasi glaciali e interglaciali. Antropocene (P. Crutzen, 2000): epoca geologica attuale, in cui l'ambiente terrestre, nell'insieme delle sue caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche, viene fortemente condizionato su scala sia locale sia globale dagli effetti dell'azione umana, con alterazioni sostanziali degli equilibri naturali. Vi sono componenti (e aree) del sistema climatico che risentono più del cambiamento climatico, Il record isotopico dell'ossigeno registrato nei sedimenti di mare profondo (tramite gusci

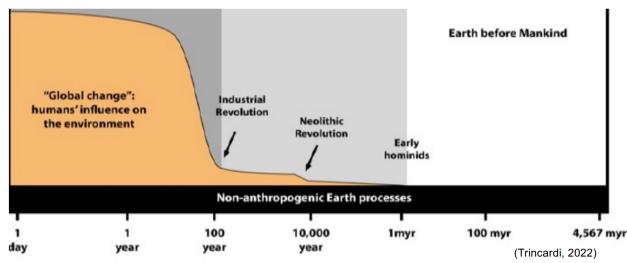
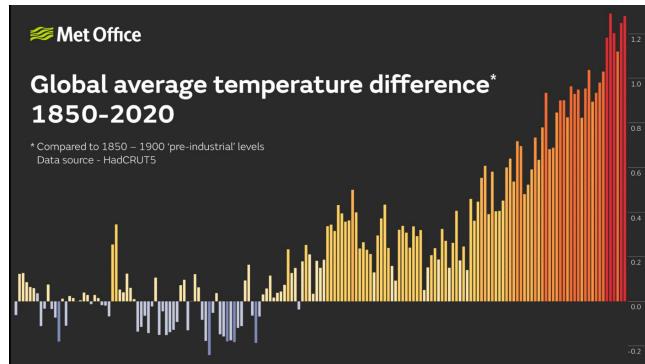


Figure 3.2: Antropocene



di organismi fossili) fornisce un dato indiretto, relativamente continuo e sincrono, sul cambiamento delle masse glaciali e sulle paleo-temperature degli oceani negli ultimi Ma. L'inizio della formazione di ghiacci nell'emisfero Nord (NHG) si ritiene iniziata circa 2.7 Ma ago, probabilmente in connessione a vari processi geologici, quali chiusura di passaggi oceanici e l'innalzamento della catena himalayana e plateau tibetano, ed il conseguente cambio nello schema di circolazione oceanica e dei venti, nella distribuzione del calore, albedo, ecc. In fig.3.3

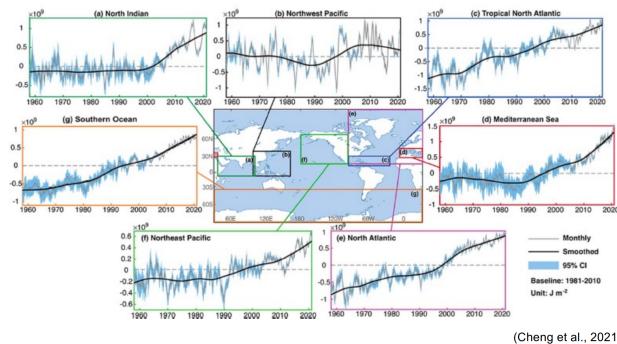
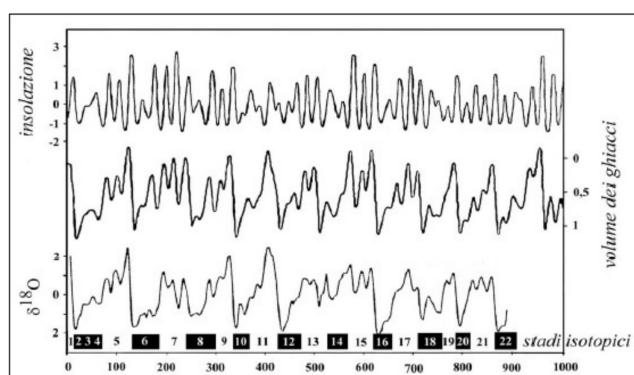
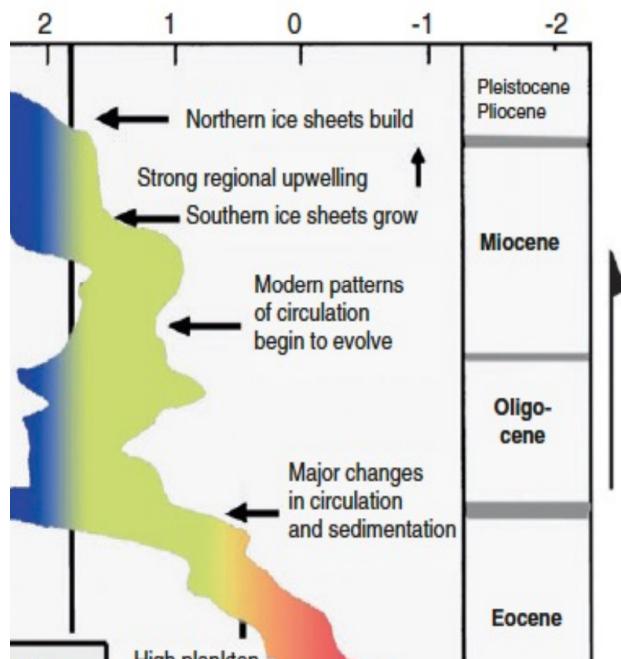


Figure 3.3: Come il contenuto in calore è variato dal 1960 al 2020 nei vari bacini.

si vede come il Mediterraneo è un grande hotspot del cambiamento climatico. Siamo in grado di pensare a strategie che riducano l'impatto del cambiamento climatico? Mitigazione a adattamento. Proxy sisgnifica dato indiretto: rapporto isotopico dell'ossigeno O<sub>18</sub> o O<sub>16</sub> strettamente legato alle paleotemperature conservato nei gusci carbonatici dei plankton. caroteca Negli interglaciali c'è rilascio del metano dai fondali marini. Cicli di Milankhovitch combinati assieme causano variazioni dell'insolazione sul pianeta fig.3. stadi isotopici means neri

**(enthic foraminifers, Atlantic, permil)**



(Antonioli & Silenzi, 2005)

glaciali, bianchi interglaciali ma questi cicli di paleotemperature non sono simmetrici. Picco 5e "tirreniano"

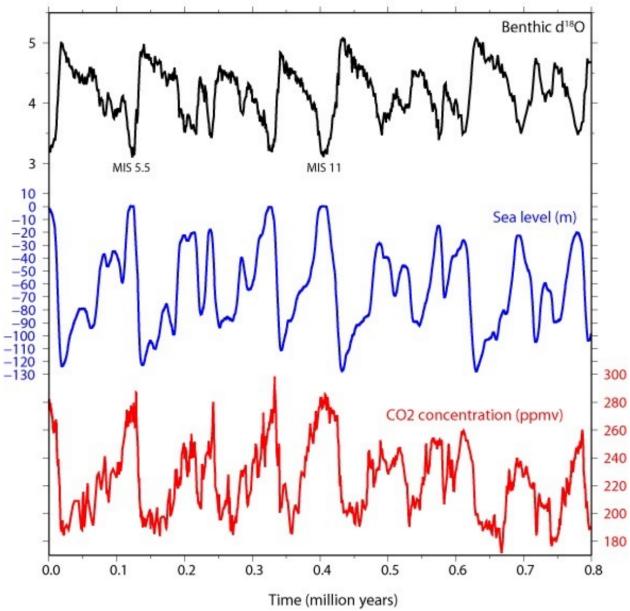


Figure 3.4:  $\delta^{18}\text{O}$  stack (LR04) from Lisieki and Raymo (2005), sea level estimates (Bintanja et al., 2005) and CO<sub>2</sub> concentration from EPICA, Dome C, Antarctica (Lüthi et al., 2008) for the last 0.8 million years.

riconosciuto da certi fossili di fauna senegalese nel Mediterraneo. Passaggio di fasi glaciali e interglaciali sono più netti da fasi integralciali e glaciali in termini di innalzamento di livello del mare (fig.3.5) Scioglimento di calotte

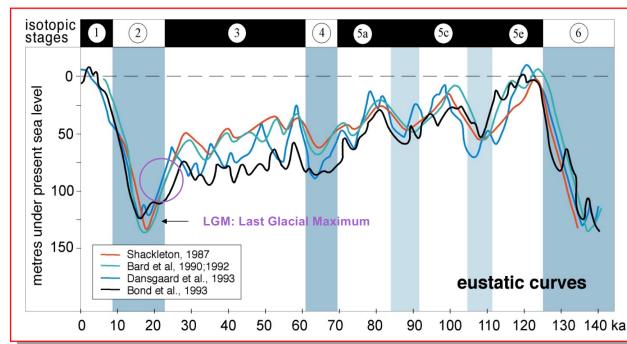


Figure 3.5: Curve riconosciute di innalzamento del livello del mare ed associati stadi isotopici negli ultimi 140 ka.

glaciali è molto più veloce (meltwater pulses) dando luogo a tassi di risalita inimmaginabili: scioglimento di calotte è più veloce della loro formazione). Nell'ultimo periodo glaciale tutto il mare del Nord era terra emersa, LGM 120m più basso). Concetto di rischio e pericolo è legato alla vita umana. Tassi di trasporto dei fiumi (già effetto antropico) negli ultimi migliaia di anni sono stati accelerati dall'uomo. è cambiato il nostro utilizzo del suolo, mettendoci a rischio. Olocene, fase di relativa stabilità climatologica. Certi processi puramente antropogenici aumentano a dismisura in confronto con processi naturali. è importante contestualizzare i moderni

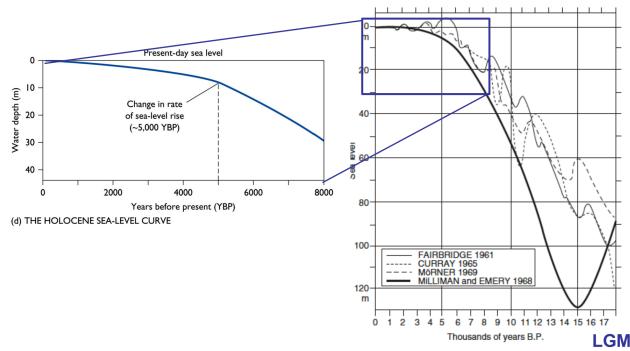
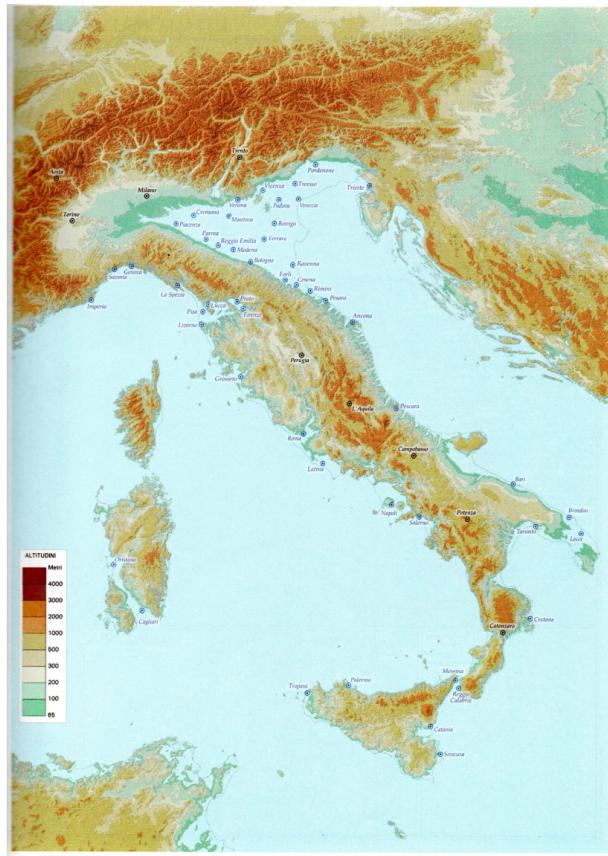


Figure 3.6: Tassi medi di innalzamento del livello marino (ultimi 18 ka, da LGM)



Pievani e Varotto, 2021

Figure 3.7: Italia alla fine del secolo

cambiamenti climatici rispetto a quelli avvenuti sul nostro pianeta a scala geologica, ricostruendo come il sistema climatico ha risposto e a che tassi (ma potrà rispondere in modo diverso nel futuro...). Nell'Antropocene ci troviamo in una condizione in cui è l'uomo a modificare gli equilibri e, contribuendo a cambiare il clima sulla terra, diventa egli stesso potenzialmente un agente influente anche nella sua evoluzione; questo fenomeno, che non era mai accaduto in tempi così rapidi e con conseguenze così vaste, ha allontanato il pianeta dal suo «stato olocenico» di stabilità climatica, verso un'evoluzione futura difficile da modellare.

### 3.1 Rischi geologici

Rischi vulcanici o sismici sono detti "geofisici" in cui l'umano non ha controllo, rischio idrogeologico e ambientale invece può essere influenzata dalla gestione dell'ambiente. Rischio deriva da beni vulnerabili.

Noi ci concentreremo sul rischio delle coste, no other region is more threatened by natural perils than coasts.

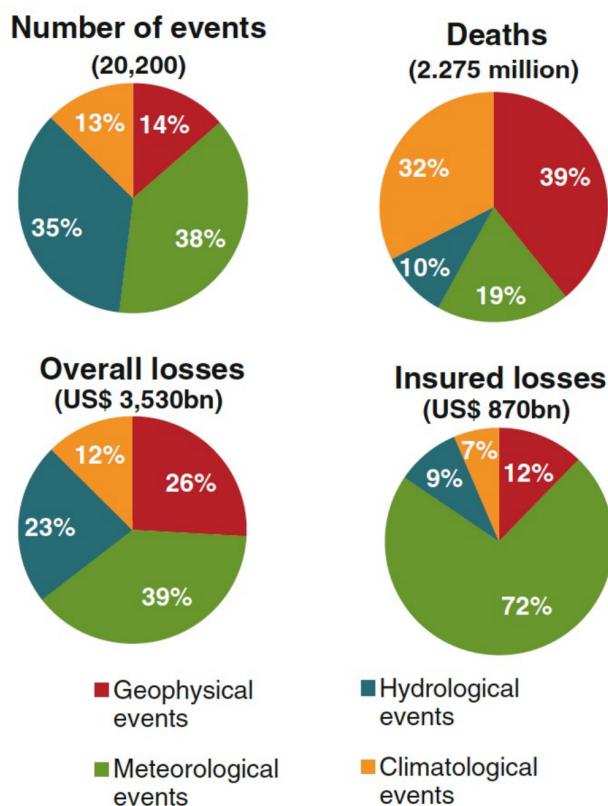


Figure 3.8: Enter Caption

**Coasts: the high-risk areas of the world** Le grandi megalopoli sono molto a rischio per la loro quota di beni a disposizione. Il rischio è definito in base ai beni esposti (vulnerabilità umana)!!

**Four Global Catastrophic Risks - A personal view** Nel 2019 la popolazione a rischio per l'innalzamento del livello del mare ha raggiunto 190 milioni di persone. Gli effetti impatteranno pesantemente a livello socioeconomico ed ambientale.

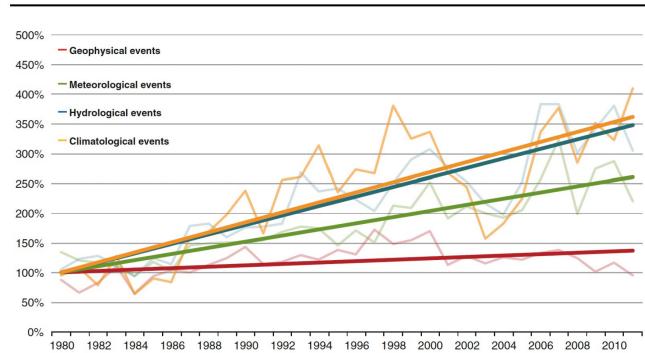


Figure 3.9: Enter Caption

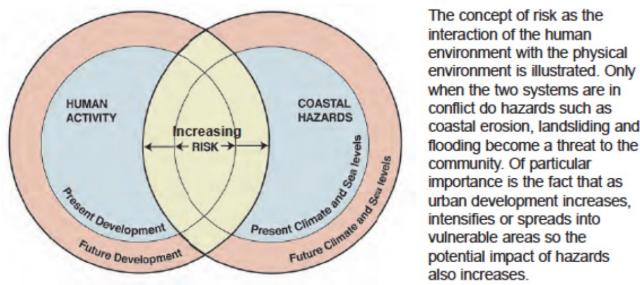
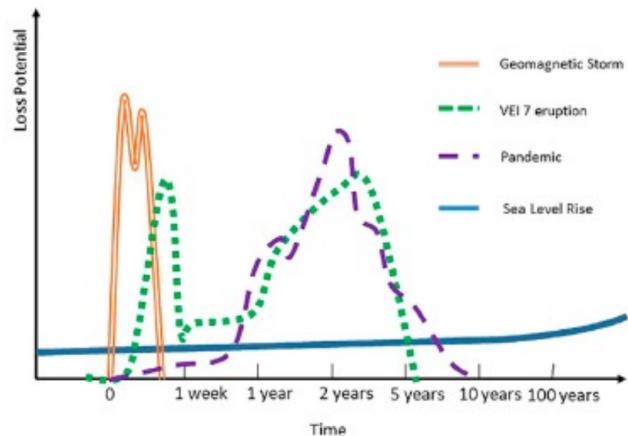


Figure 2.4: Coastal Hazards, Human activity and Risk. (Adapted from DOE)

Figure 3.10: Rischio



**FIGURE 3|4** Global GCRs – a schematic of the duration of the physical event initiating four global catastrophes and loss potential. Note the time intervals per unit width on the X-axis vary from 1 week to 90 years. The Y-axis Loss Potential scale has no units here; it encompasses the potential consequences in the five lower boxes on **Figure 1**.

Figure 3.11: Catastrophic risk

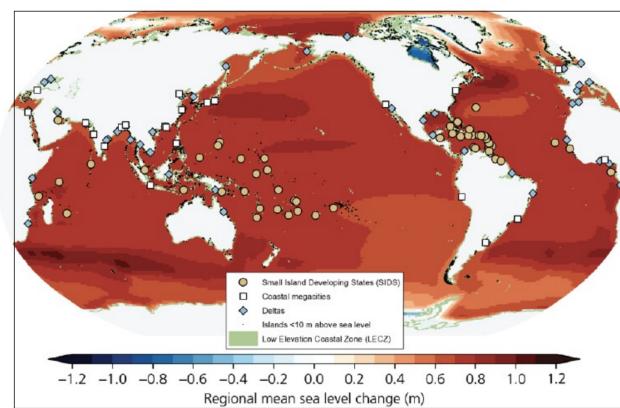


Figure 3.12: SLR impact