

# LA FÍSICA DEL CANVI CLIMÀTIC.

totes les claus per entendre la nova realitat climàtica a la Mediterrània occidental.

[Jordi.mazon@upc.edu](mailto:Jordi.mazon@upc.edu)

Prada, 21-23 Agost 2024

**PEDALANT  
COMBATS  
EL CANVI  
CLIMÀTIC**



**Marcel Costa, Daniel López-Codina, Jordi Mazón, Núria Pedrós**



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Departament de Física

UCe

UNIVERSITAT  
CATALANA  
D'ESTIU



Societat  
Catalana  
de Física

## Contingut

### 1. La física del canvi climàtic.

1.1 L'Atmosfera. Radiació solar i radiació terrestre. El balanç energètic de la Terra. Temperatura d'equilibri.

1.2 L'efecte hivernacle.

1.3 La circulació general atmosfèrica. Altes i baixes pressions. Fronts.

1.4 La circulació oceànica

1.5 Els climes. Factors que determinen el clima. Variabilitat natural del clima.

1.6 Canvi climàtic antròpic

### 2. Impactes del canvi climàtic en la salut, els éssers vius, el medi ambient i la societat.

2.1 Canvi climàtic i salut

2.2 Canvi climàtic, medi ambient, fenòmens extrems i societat.

### 3. Resiliència i adaptació

3.1 Descarbonització i neutralitat climàtica

3.2 Responsabilitat climàtica, Justícia climàtica i refugiats climàtics

## Calendari

21 d'agost

09:00 – 10:30 La física del canvi climàtic  
(part I) (JM)

10:30 - 12:00 La física del canvi climàtic  
(part II) (JM)

22 d'agost

09:00 - 10:40 Canvi climàtic i éssers vius  
(MC)

10:40 – 12:00 Canvi climàtic i salut (DL)

23 d'agost

09:00 - 10:00 Canvi climàtic i meteorologia  
extrema (MC)

10:00 - 12:00 Debat obert: De l'adaptació i  
resiliència a la justícia i solidaritat climàtica  
(NP, DL, MC, JM)

## Professorat

Daniel López-Codina, Universitat Politècnica de  
Catalunya

Marcel Costa, Universitat Pompeu Fabra

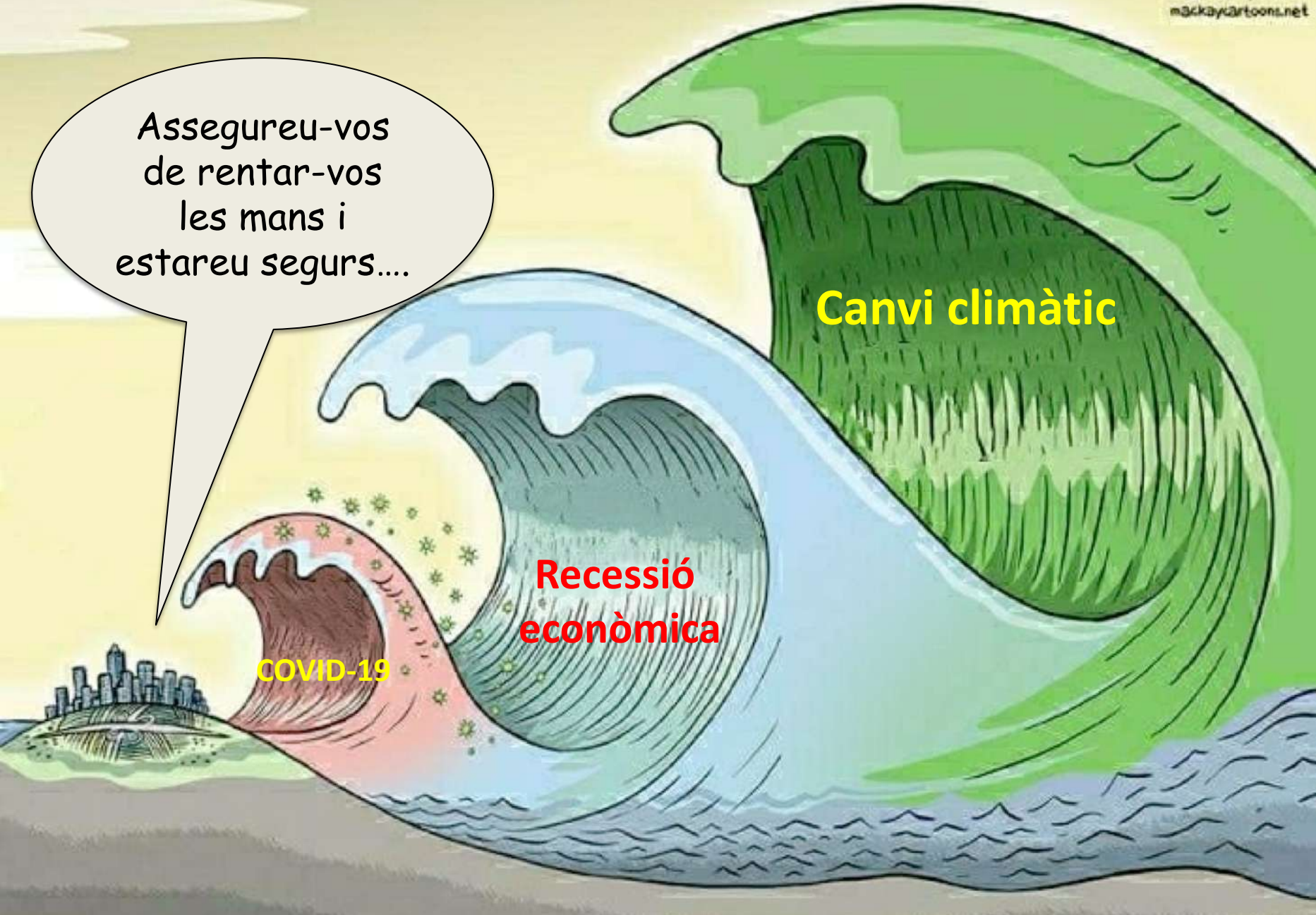
Núria Padrós, Universitat de Bremen

Jordi Mazon, Universitat Politècnica de Catalunya

# 1. La física del canvi climàtic.



Assegureu-vos  
de rentar-vos  
les mans i  
estareu segurs....



COVID-19

Recessió  
econòmica

Canvi climàtic

# 1

“



[Credit: NASA]

Els canvis recents en el clima són generalitzats, ràpids, cada cop més intensos i sense precedents en milers d'anys.

ipcc

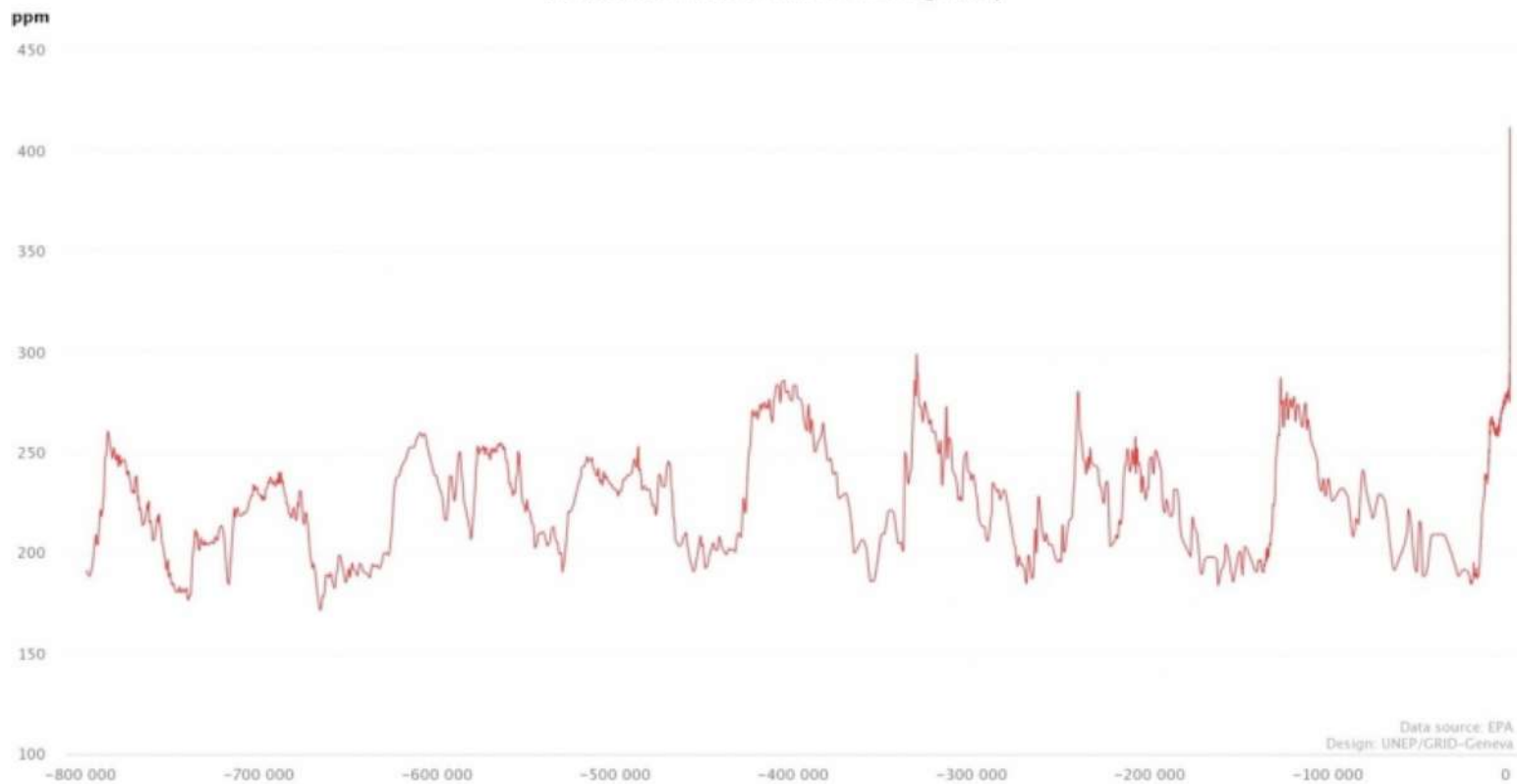
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change



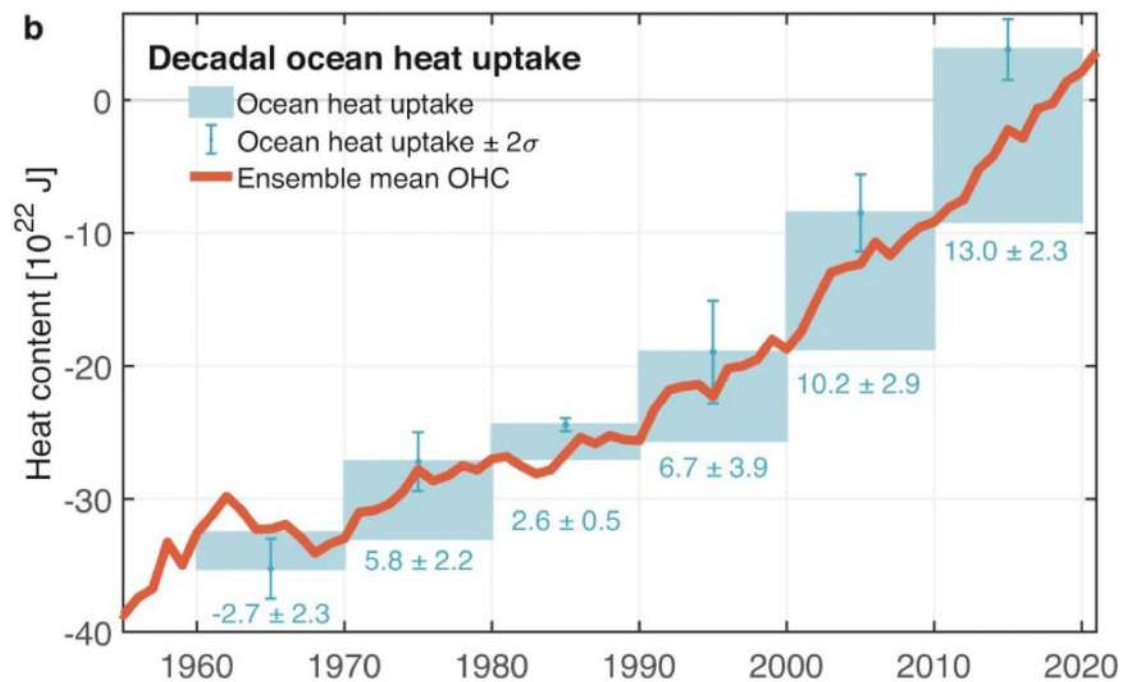
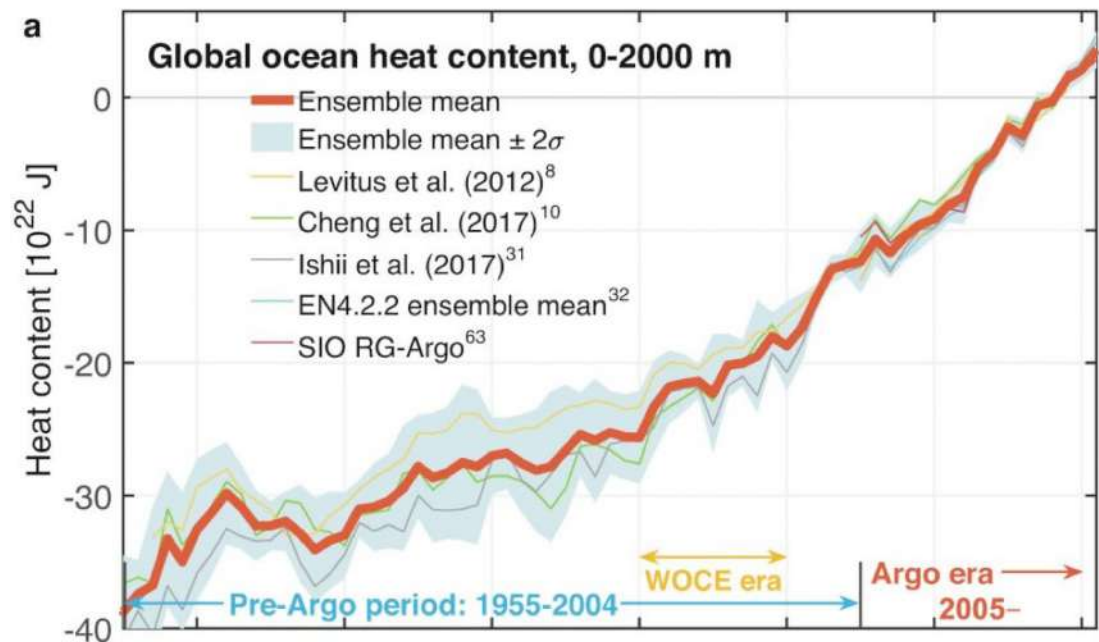
# El clima sempre ha canviat, però el que és excepcional és la rapidesa

## Trends in Atmospheric Carbon Dioxide Concentration

Mean carbon dioxide concentrations globally



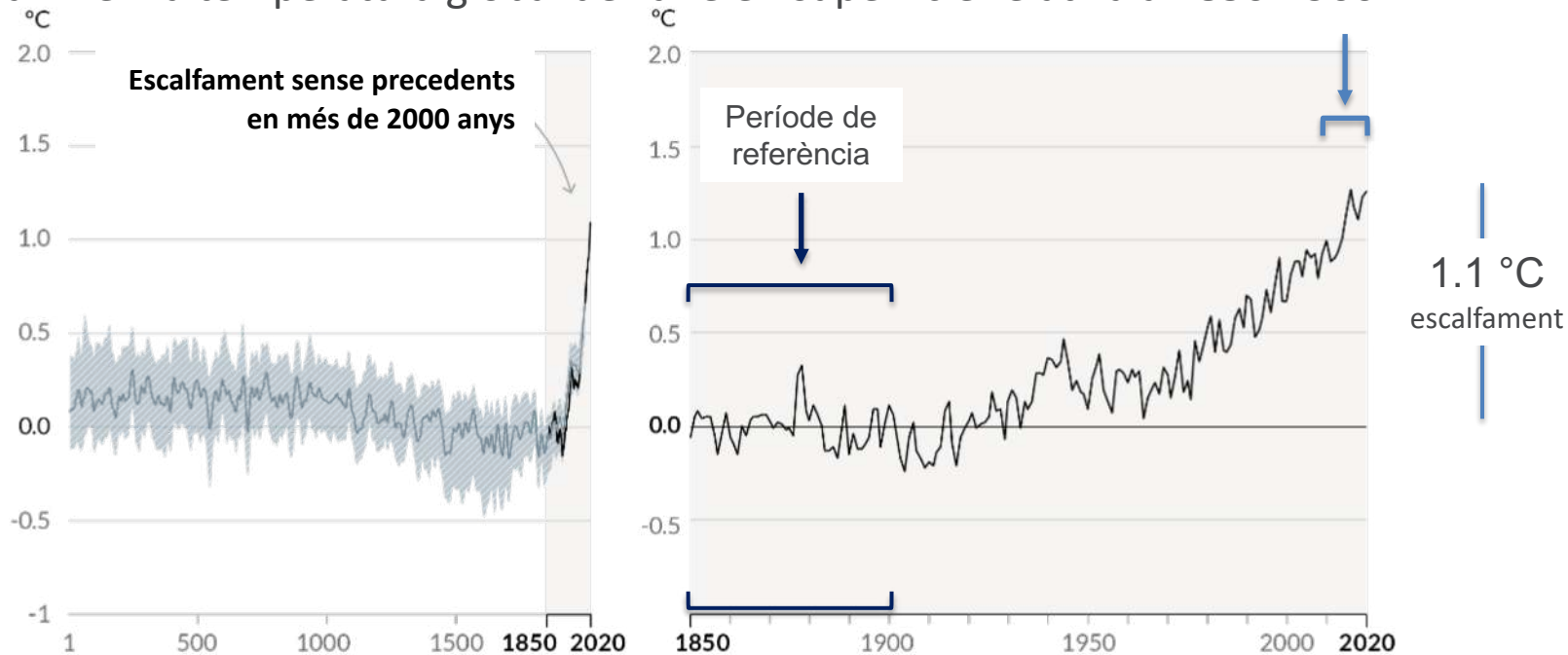
UNEP (2022)





La influència humana ha escalfat el clima a un ritme **sense precedents** en com a mínim els darrers 2000 anys

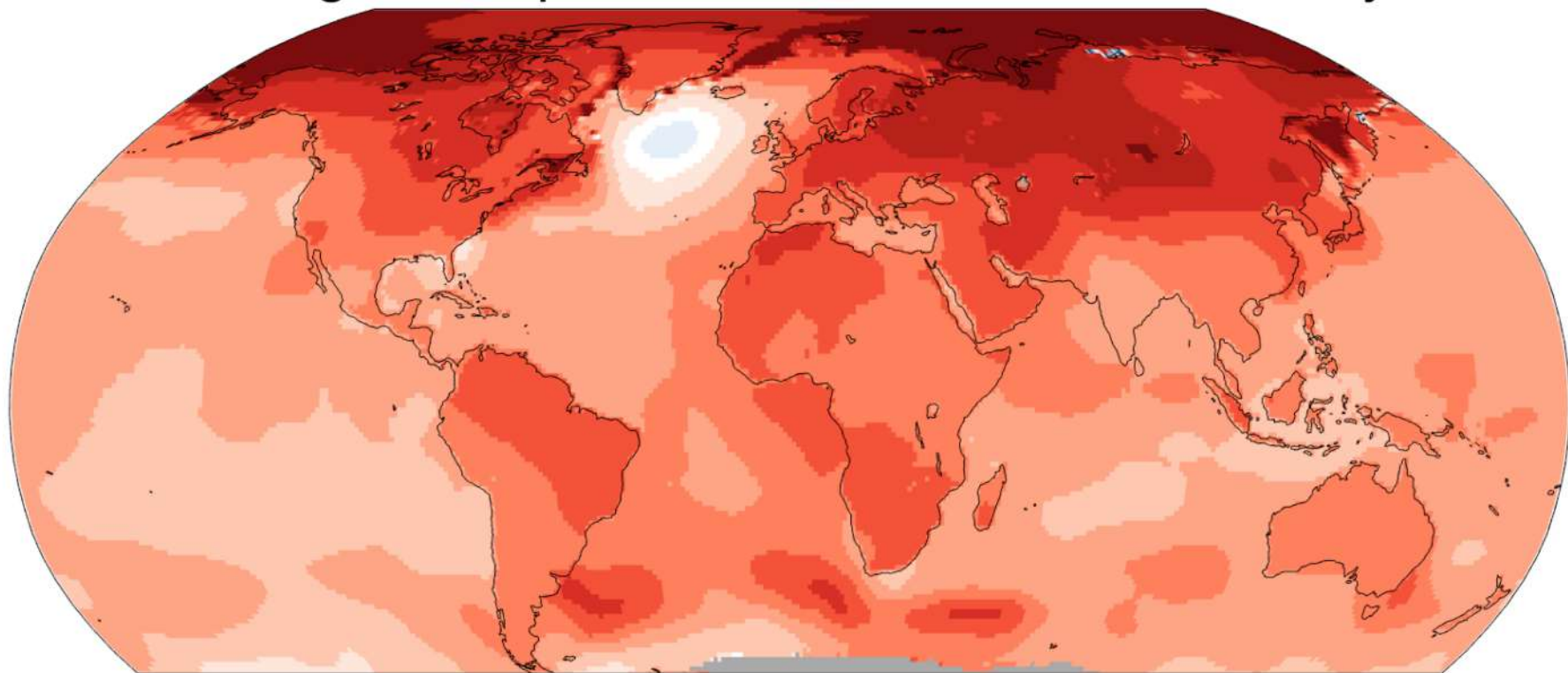
Canvi en la temperatura global de l'aire en superfície relativa a 1850-1900



IPCC 2022

L'escalfament és global, d'escala planetària

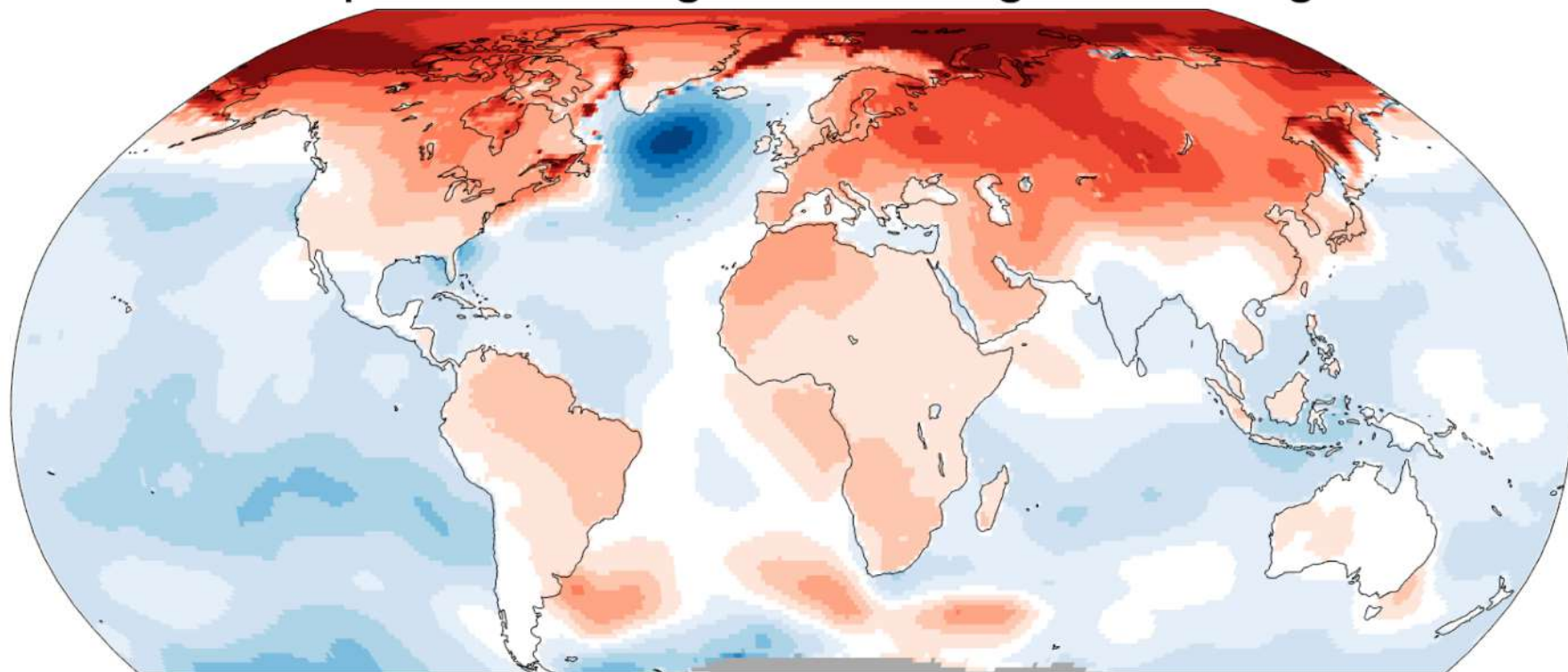
Change in temperature since the mid-19th century



IPCC, 2021

<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>

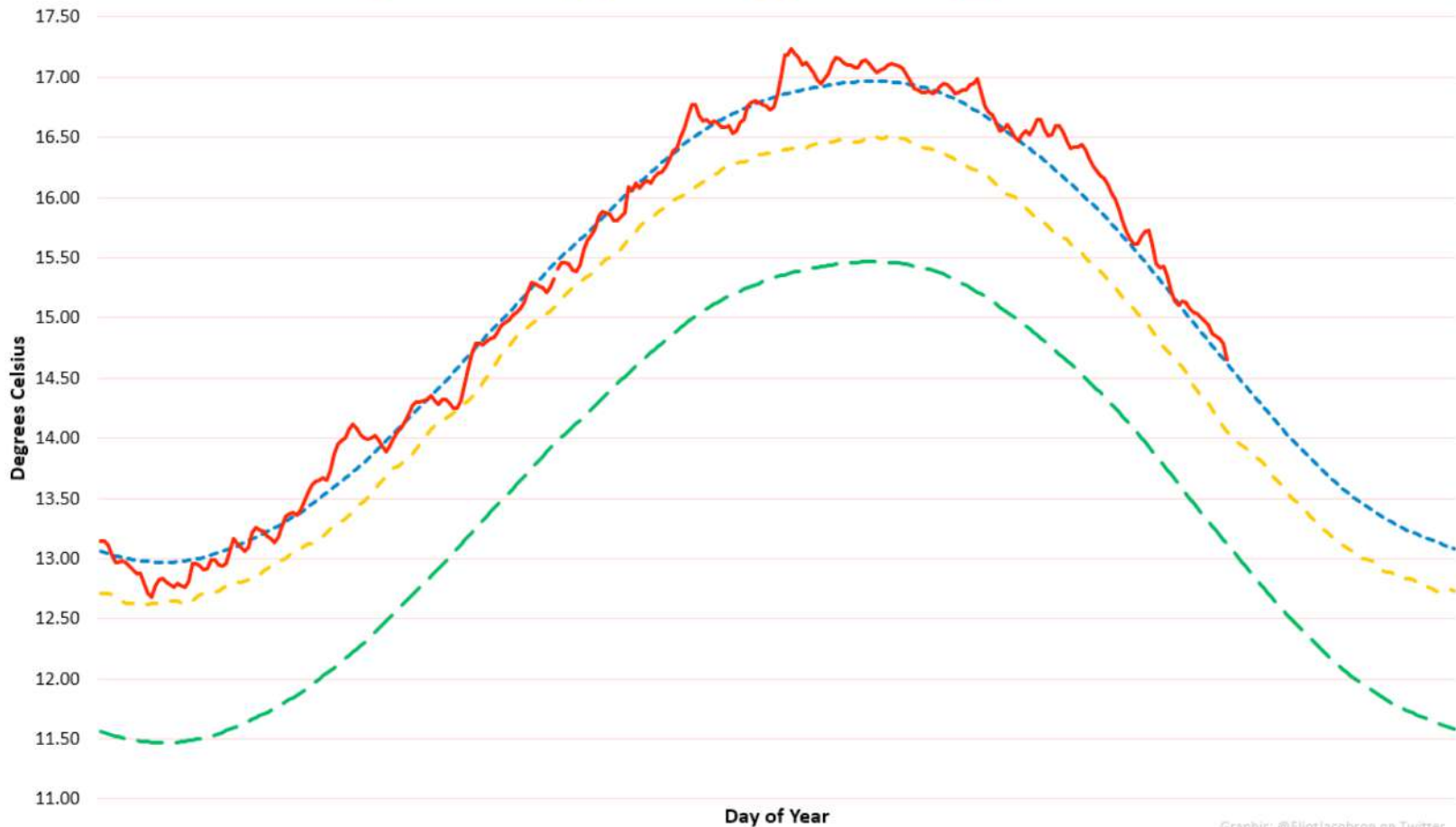
## Temperature change relative to global average



# Global Daily 2-Meter Surface Temperature

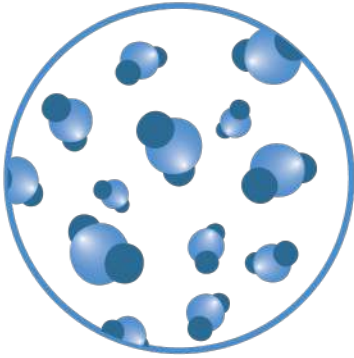
Current data: [https://climatareanalyzer.org/clim/t2\\_daily/json/cfsr\\_world\\_t2\\_day.json](https://climatareanalyzer.org/clim/t2_daily/json/cfsr_world_t2_day.json)  
1850-1900 baseline courtesy of Berkeley Earth

— 1850-1900 Baseline    - - 1991-2020 Mean    - - - 1.5C over Baseline    — 2023, Jan. - Oct.





**CO<sub>2</sub> concentration**



**The highest**

in at least

**2 million years**

**Sea level rise**



**Fastest rate**

in at least

**3000 years**

**Arctic sea ice  
area**



**Lowest level**

in at least

**1000 years**

**Retreating  
glaciers**



**Unprecedented**

in at least

**2000 years**

(IPCC, 2022)



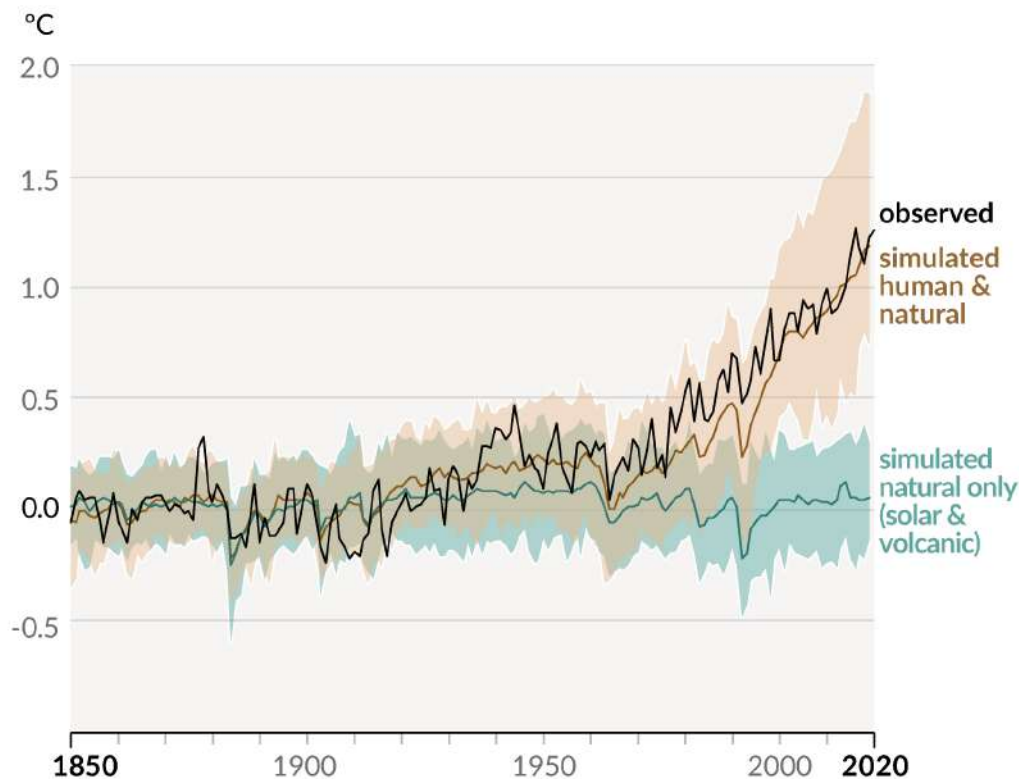
[Credit: Yoda Adaman | Unsplash]

“

És indiscutible que les activitats humanes estan provocant el canvi climàtic, fent que els esdeveniments climàtics extrems, incloses onades de calor, pluges intenses i sequeres, siguin més freqüents i greus.

**La influència humana** ha escalfat el clima a un nivell sense precedents en almenys els darrers 2000 anys.

El canvi en la temperatura mitjana global de l'aire a prop de la superfície en relació amb 1850-1900 observat i simulat utilitzant només factors naturals, i factors tant naturals com antropogènics.



(IPCC, 2022)



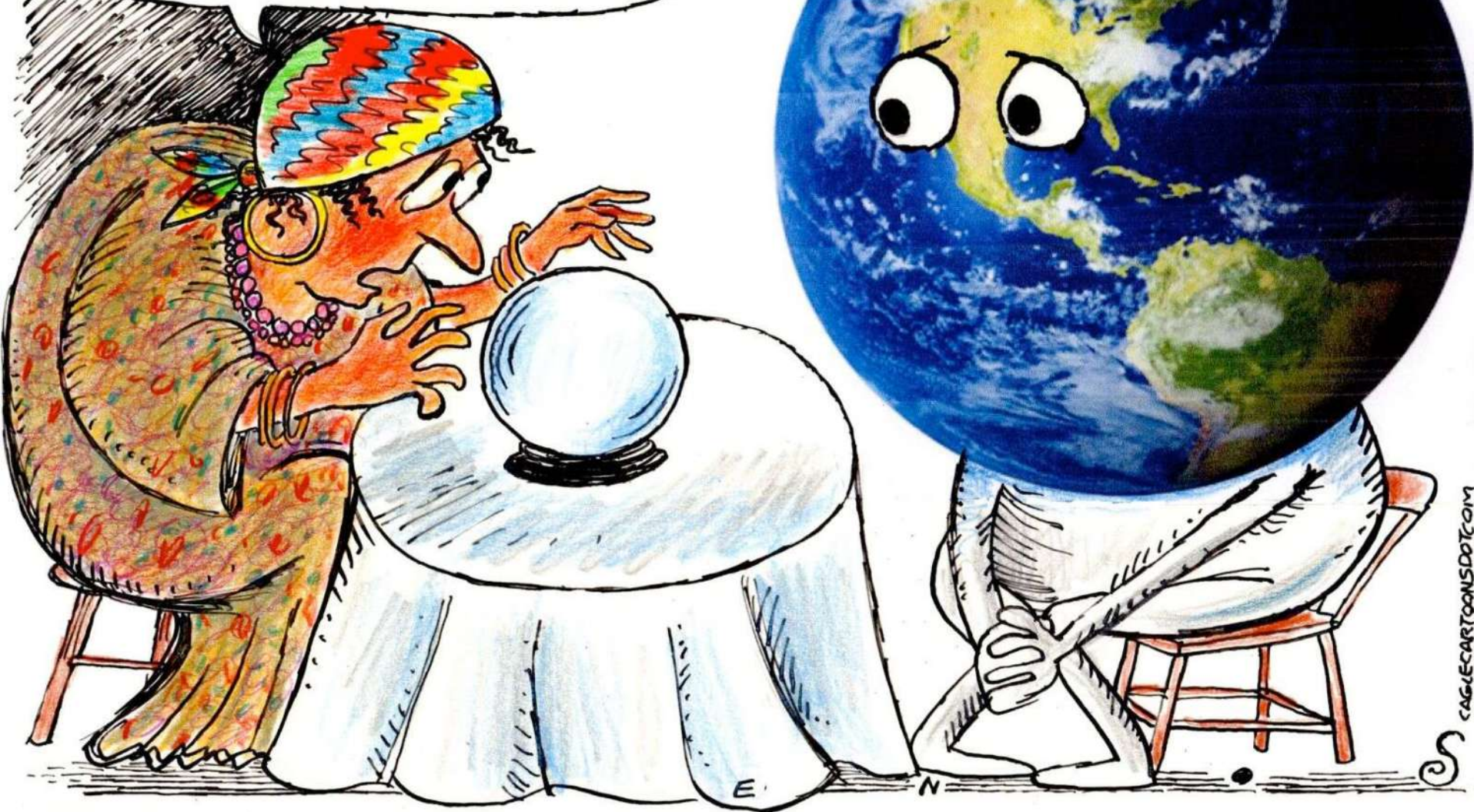
[Credit: Peter John Maridable]

“

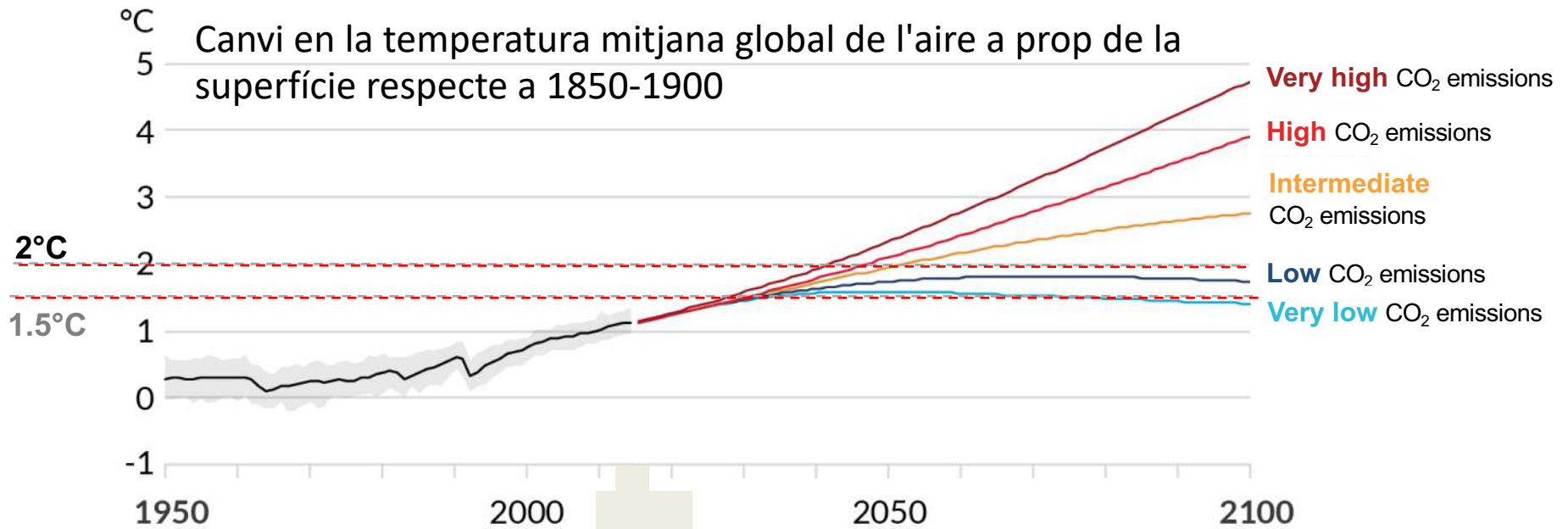
A menys que hi hagi reduccions immediates, ràpides i a gran escala de les emissions de gasos d'efecte hivernacle, limitar l'escalfament a 1,5 °C estarà fora de l'abast.



YOU SURE YOU WANT TO HEAR THIS?

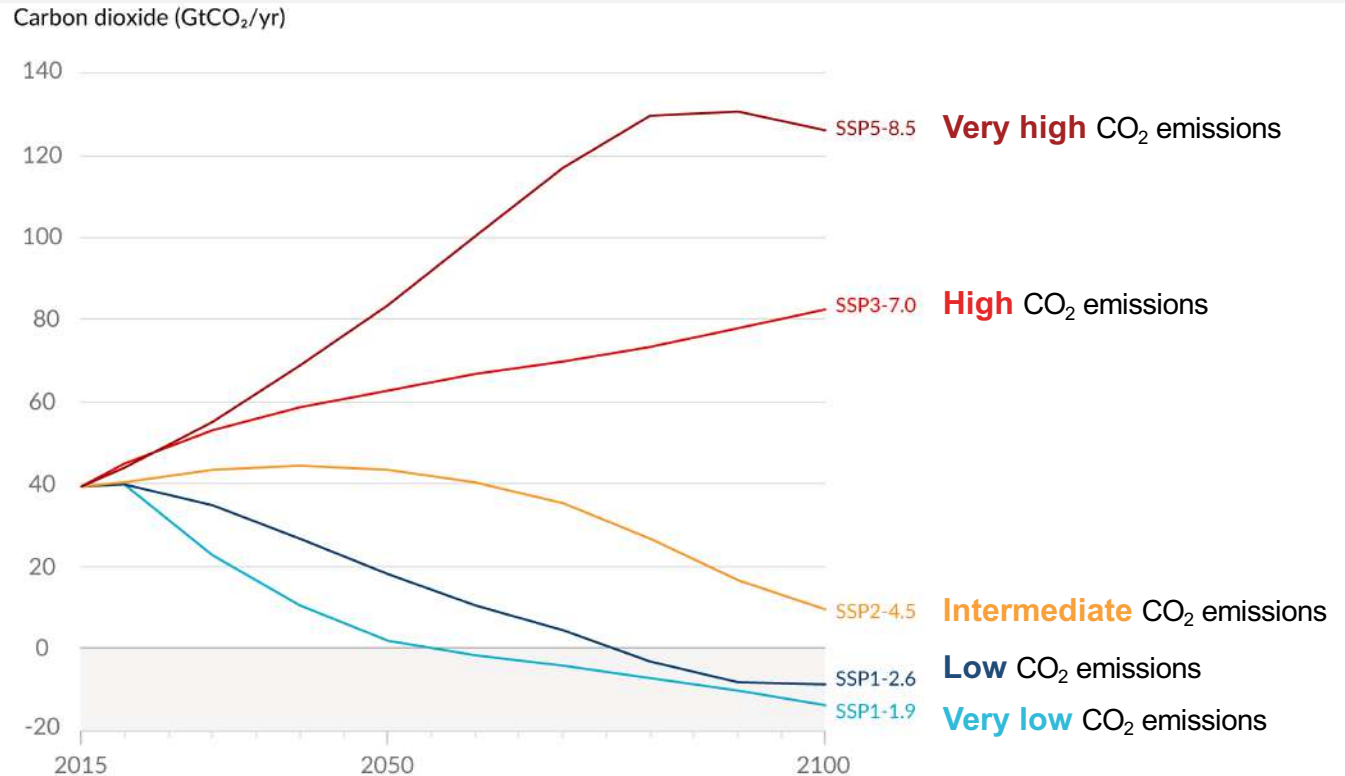


Les emissions futures originen l'escalfament addicional futur, encara que l'escalfament total està dominat tant per les emissions passades com futures.



IPCC (2022)

Les emissions futures originen l'escalfament adicional futur, encara que l'escalfament total està dominat tant per les emissions passades com futures.

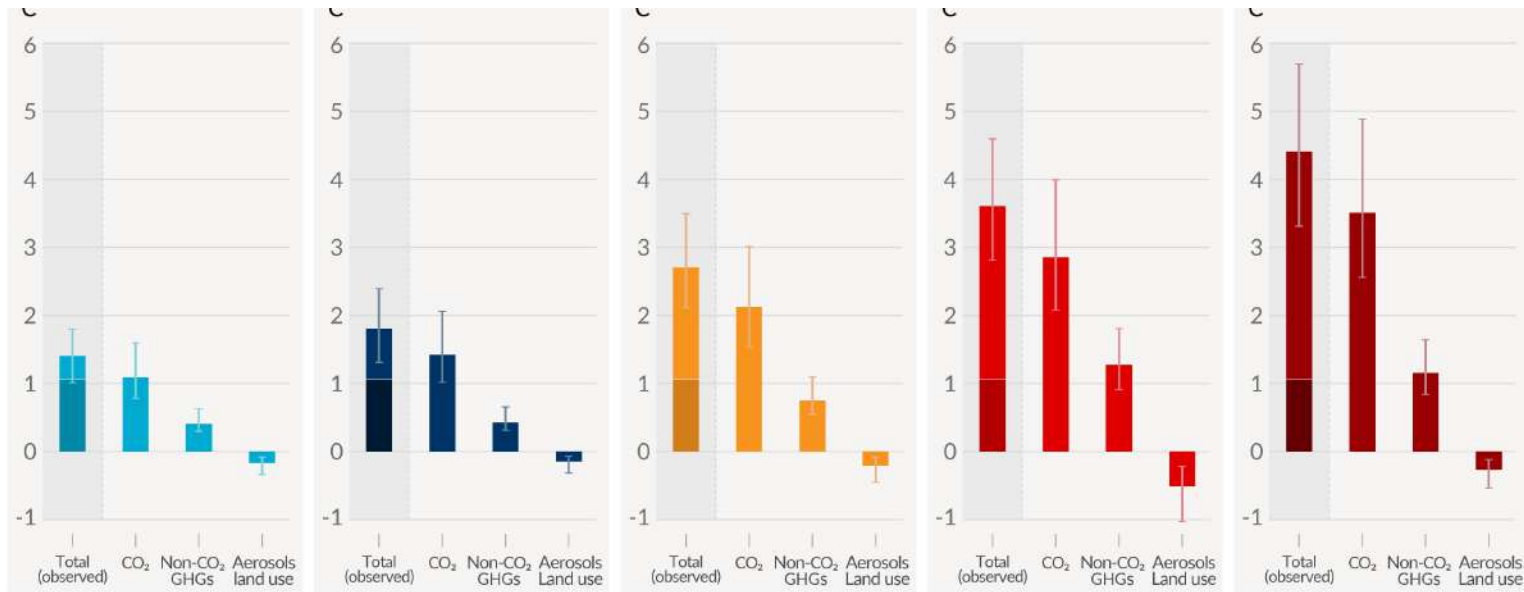


IPCC 2022



Les emissions futures provoquen l'escalfament futur addicional, tot i que l'escalfament total està dominat per les emissions passades i futures.

Canvi en la temperatura global de l'aire en superfície en 2081-2100 relativa a 1850-1900.



IPCC, 2022





[Credit: Hong Nguyen | Unsplash]

“

El canvi climàtic ja està afectant totes les regions de la Terra, de múltiples maneres. Els canvis que experimentem augmentaran amb l'escalfament.

Climate change affects already all the inhabited regions of the planet and human action contributes to a large number of changes, including climate extremes.

## Drought

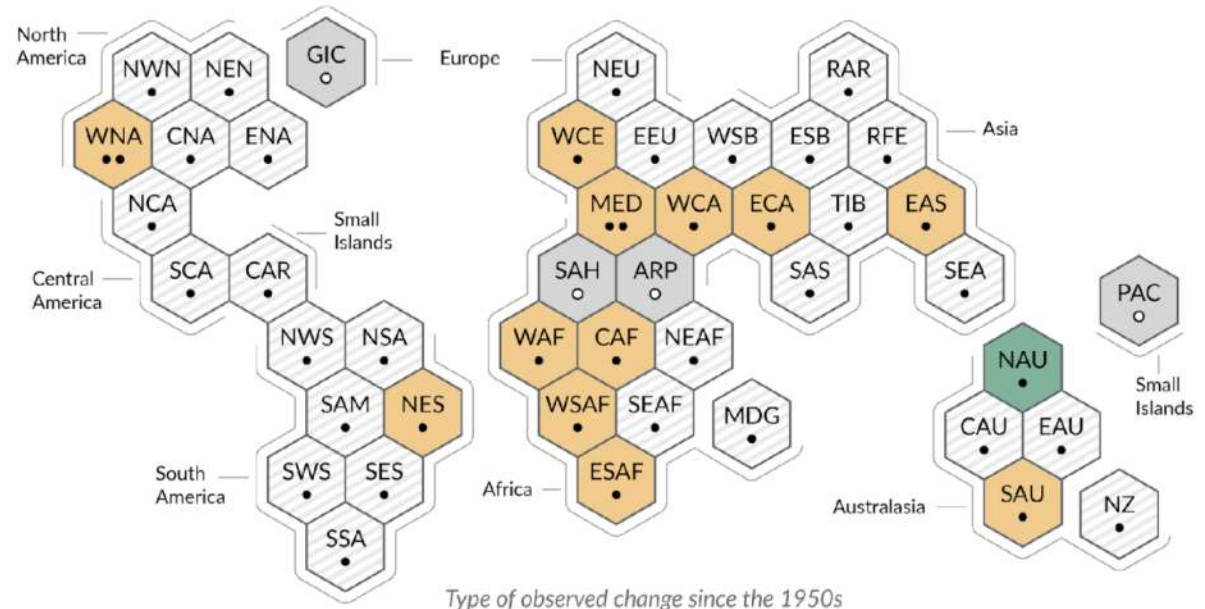
### Type of observed change

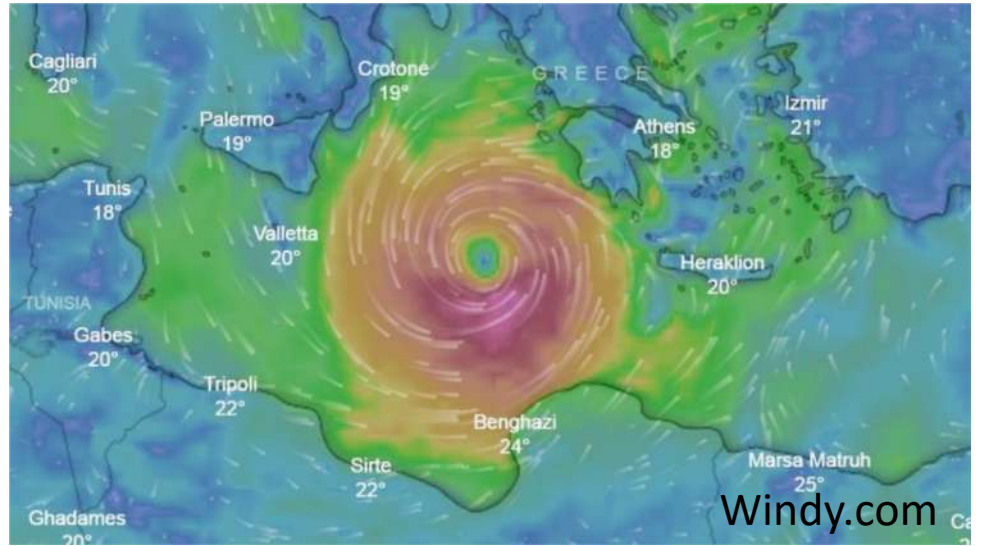
in agricultural and ecological drought

- Increase (12)
- Decrease (1)
- Low agreement in the type of change (28)
- Limited data and/or literature (4)

### Confidence in human contribution to the observed change

- High
- Medium
  - Low due to limited agreement
  - Low due to limited evidence









[Credit: Jenn Caselle | UCSB]

No hi ha marxa enrere d'alguns canvis en el sistema climàtic... Però alguns dels canvis es podrien frenar i altres es podrien aturar limitant l'escalfament.





[Credit: Jenn Caselle | UCSB]

“

Per limitar l'escalfament global, calen reduccions fortes, ràpides i sostingudes de CO<sub>2</sub>, metà i altres gasos d'efecte hivernacle. Això no només reduiria les conseqüències del canvi climàtic sinó que també milloraria la qualitat de l'aire.



NO LATER THAN  
**2050**



SUSTAINABILITY



CIRCULAR ECONOMY



ZERO CARBON



SUSTAINABLE  
URBAN ENERGY LOOP

ENGAGED CITIZENS



EUROPEAN UNION



# EU MISSIONS

CLIMATE-NEUTRAL & SMART CITIES

Concrete solutions for our greatest challenges



#EUmissions #HorizonEU #MissionCities

# NET ZERO CITIES

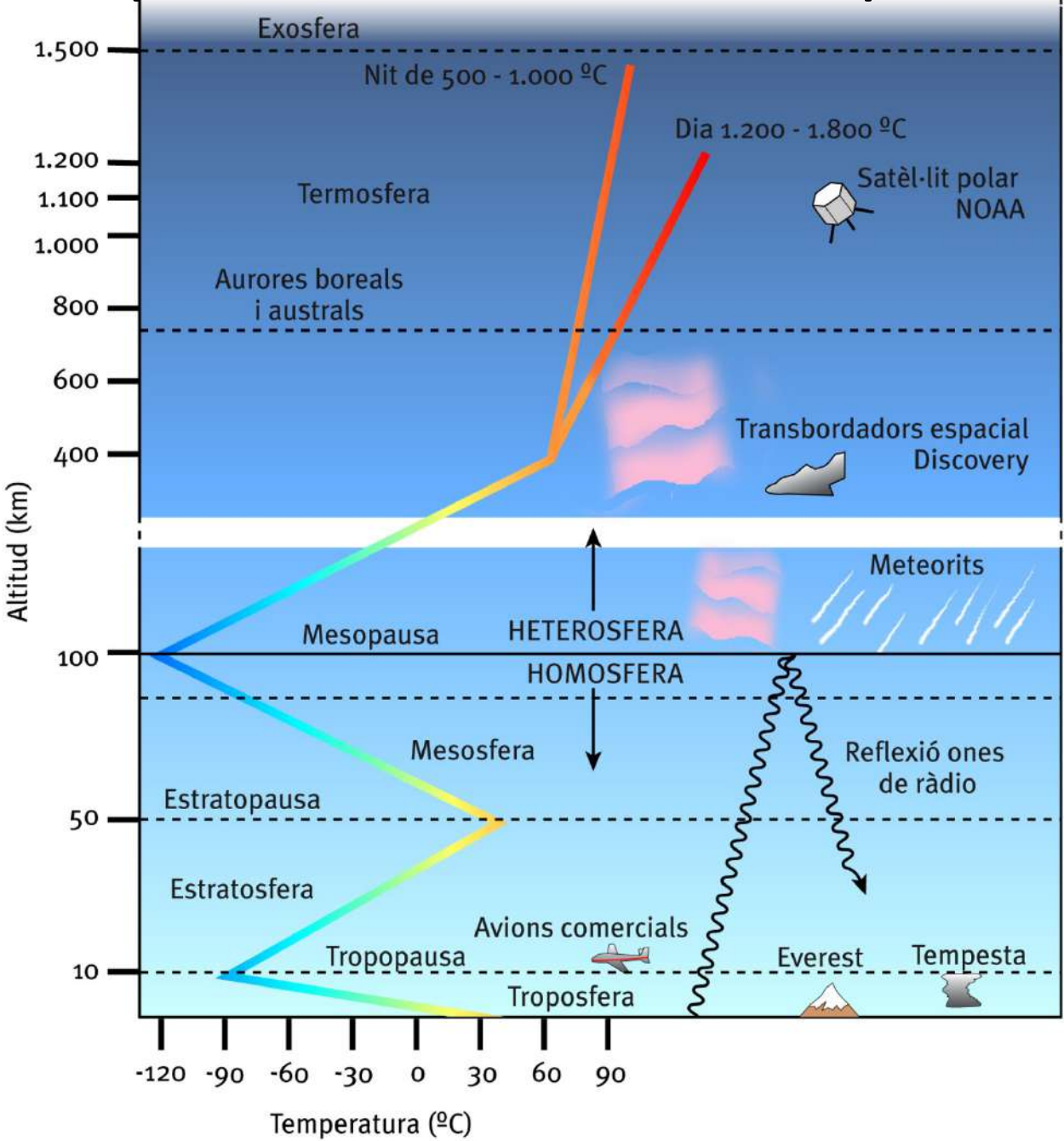


**Perquè de tots aquests canvis?**

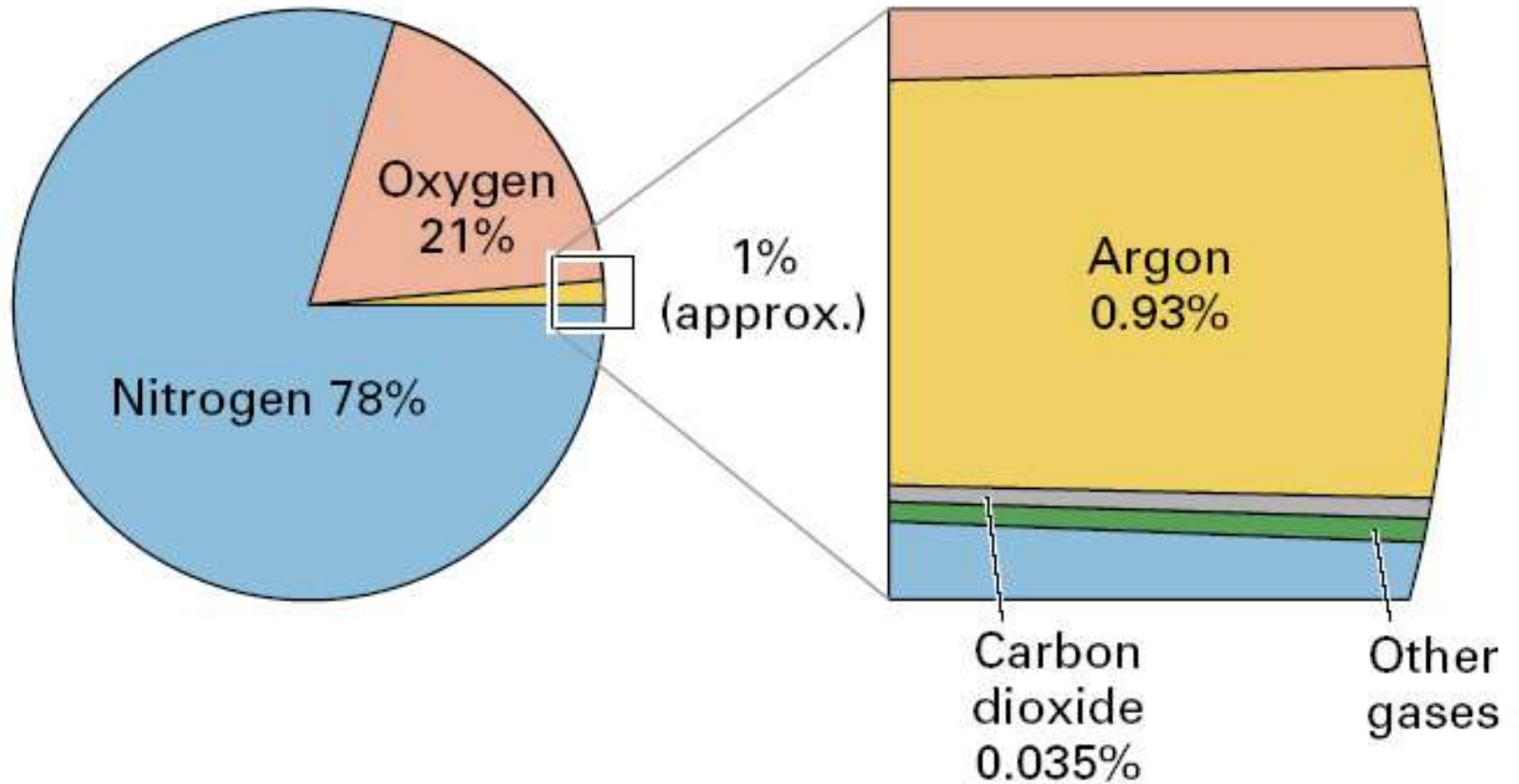
**La física del canvi climàtic**



# La troposfera, la ínfima i vulnerable capa de l'atmosfera...



# COMPOSICIÓ QUÍMICA DE L'ATMOSFERA

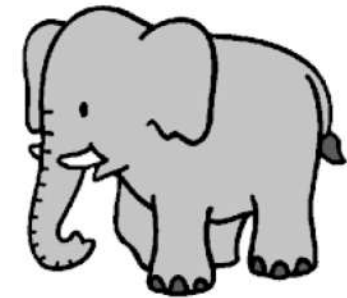


# Composició química de l'atmosfera

Component	Concentració	Variabilitat
Nitrogen	78 %	Fix
Oxigen	21 %	Fix
Argó	0.93 %	Fix
Vapor d'aigua	0-4 %	Variable
Diòxid de Carboni	413 ppm	Variable
Neó	18 ppm	Fix
Heli	5 ppm	Fix
Metà	2 ppm	variable
Hidrogen	0.5 ppm	Fix
Ozó	0.02 ppm	Variable
TOTAL	100 %	

Densitat mitja de l'aire:  $1 \text{ kg/m}^3$

Densitat mitja de l'aigua:  $1000 \text{ kg/m}^3$



Pressió atmosfèrica en superfície: 1013  
hPa = 101.300 Pa = **101.300 N/m<sup>2</sup>**

Un elefant de 1000 kg de massa té un pes  
de 9800 N = **9800 N/m<sup>2</sup>**

# TROPOSFERA

- Conté aproximadament el 80% del total de l'atmosfera
- El moviment de l'aire és tant vertical com horitzontal.
- El perfil tèrmic és degut a la transferència de calor del sòl, a través de la turbolència. El gradient tèrmic vertical és aproximadament  $-6.5 \text{ }^\circ\text{C km}^{-1}$ .
- A l'equador, l'alçada és d'uns 18 km, i als pols d'uns 8 km.



# ESTRATOSFERA

- Temperatura augmenta amb l'altura, degut a la baixa densitat de l'aire (gran llibertat de moviment)
- La capa d'ozó (22 km) absorbeix la radiació UVB. La seva concentració es mesura en unitats Dobson (1 DU =  $10^{-5}$  m in n.c.)
- Als 48 km es concentra el 99.99% de l'atmosfera.

## MESOSFERA

Temperatura decreix, assolint els  $-120^{\circ}\text{C}$  a 85 km d'alçada a l'estiu i els  $-50^{\circ}\text{C}$  a l'hivern.

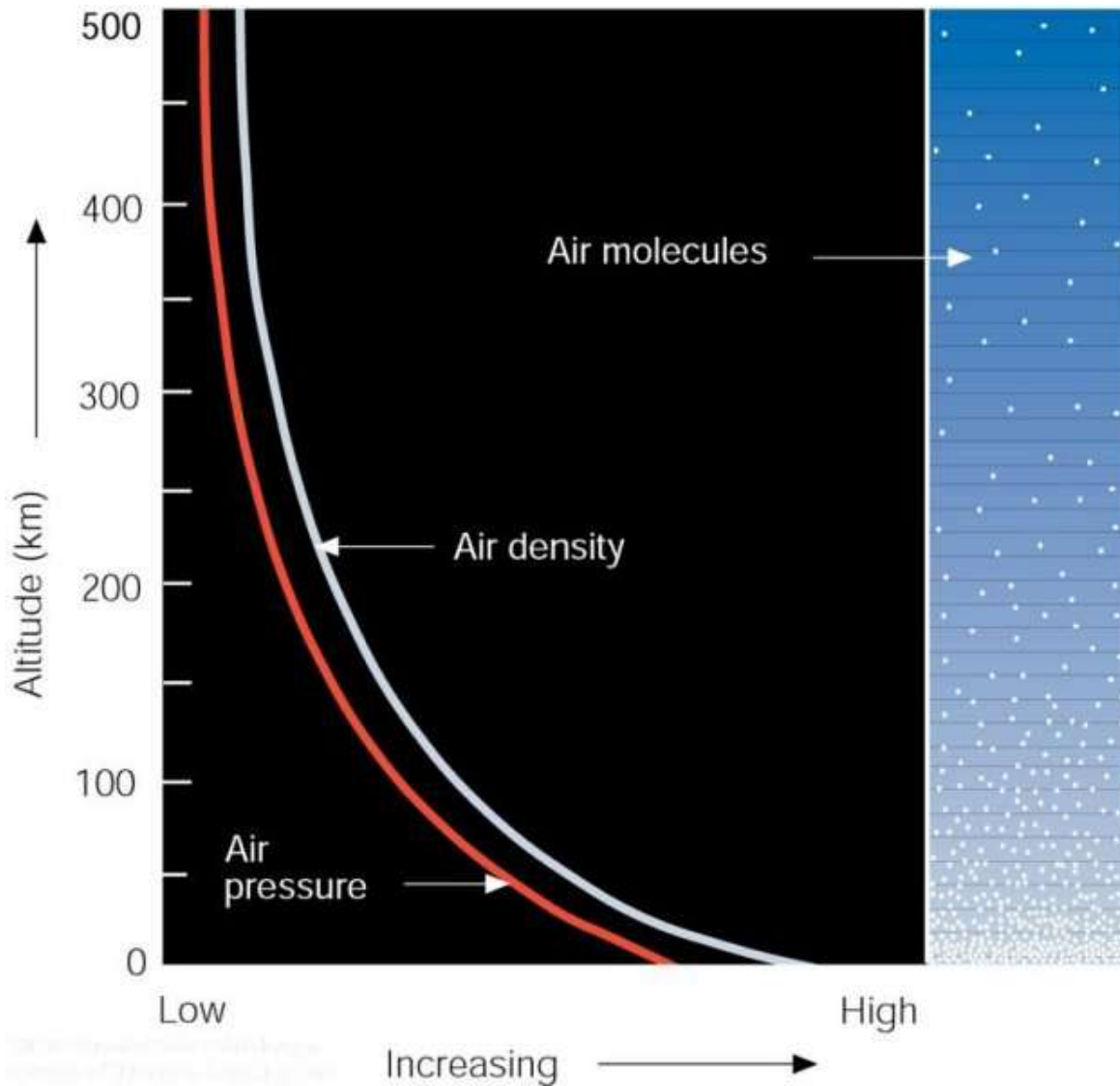
- L'estratificació inestable d'aquesta capa afavoreix el moviment vertical de l'aire. S'han trobat traces de núvols a l'alta mesosfera a les zones polars.



# TERMOSFERA O IONOSFERA

- Temperatura varia entre 500 K i una 2000 K, segons l'activitat solar.
- Hi ha canvis de centenars de graus entre el dia i la nit.
- Es formen ions per la ionització dels raig X i gamma provinents del Sol, que en aquesta capa són absorbits.

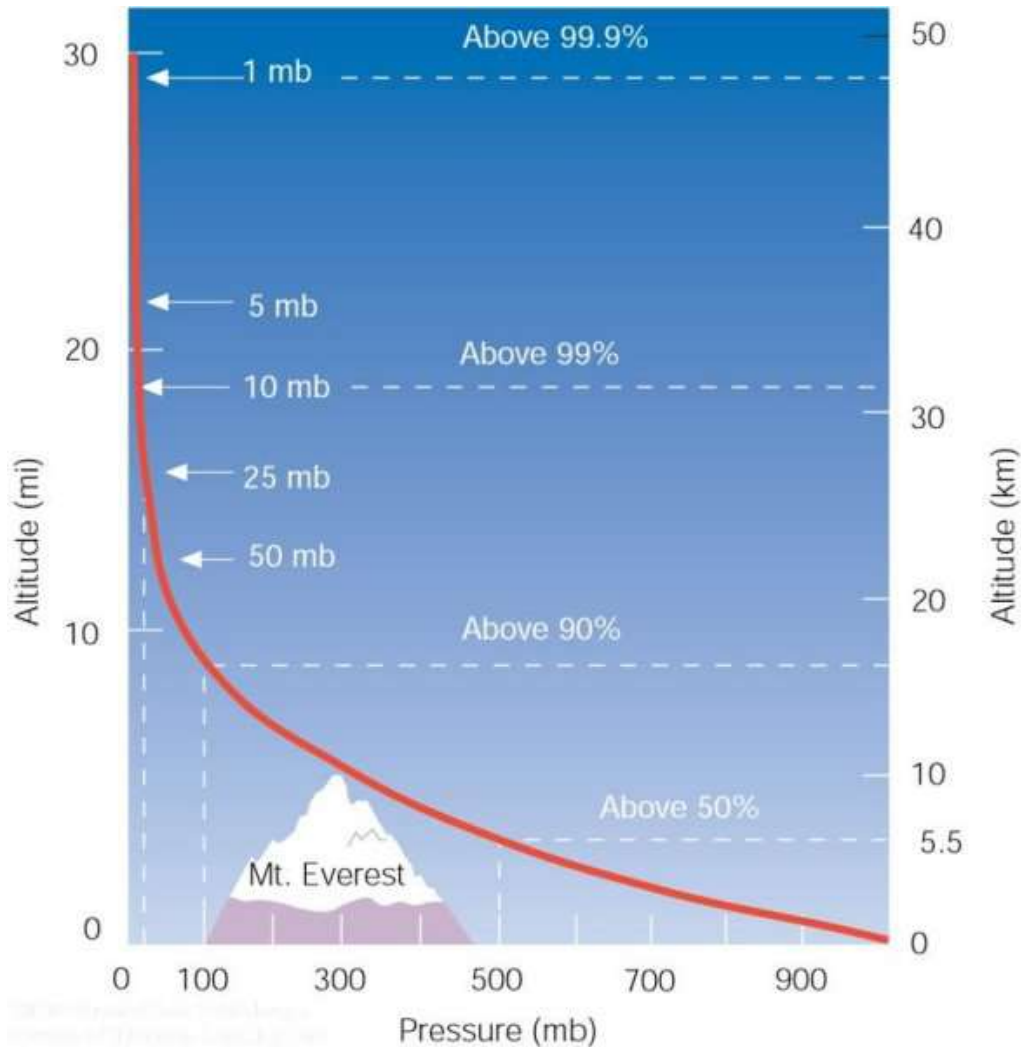
**Densitat:** Massa per unitat de volum. Disminueix amb l'alçada de forma exponencial.



$$p = p_0 e^{-z/\alpha}$$



Les molècules d'aire constantment xoquen entre si i amb els objectes, exercint una pressió. A mesura que es guanya alçada la densitat disminueix exponencialment, i per tant també la pressió segons aquest perfil.



$$P = P_0 e^{-(a/T)z},$$

$$a = 0.0342 \text{ K/m},$$

$$P_0 = 101.325 \text{ kPa}$$

# FUNCIONS DE L' ATMOSFERA

- Protecció de l'impacte de meteorits, escalfant-los degut a la fricció.
- L'ozó estratosfèric absorbeix els raigs UVB, i la ionosfera els X i gamma.
- Regula la T. de l'aire. Sense atmosfera hi hauria grans contrastos tèrmics entre ombra-Sol, dia-nit.



# Temperatura d'equilibri planetària

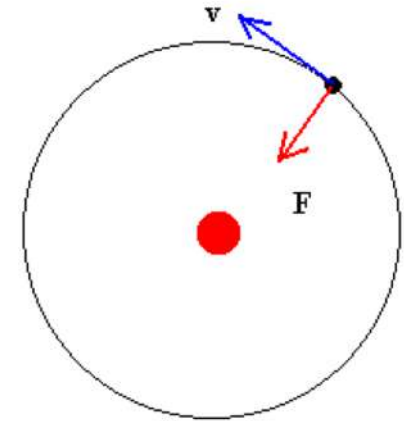
$$P_{SOL} = 3.9 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

$$r = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$$

$$I = \frac{P_{SOL}}{4\pi r^2} = 1380 \text{ Wm}^{-2}$$



Contant solar, S



$$P_{in} = (1 - \alpha) \cdot S \cdot \pi \cdot R^2$$

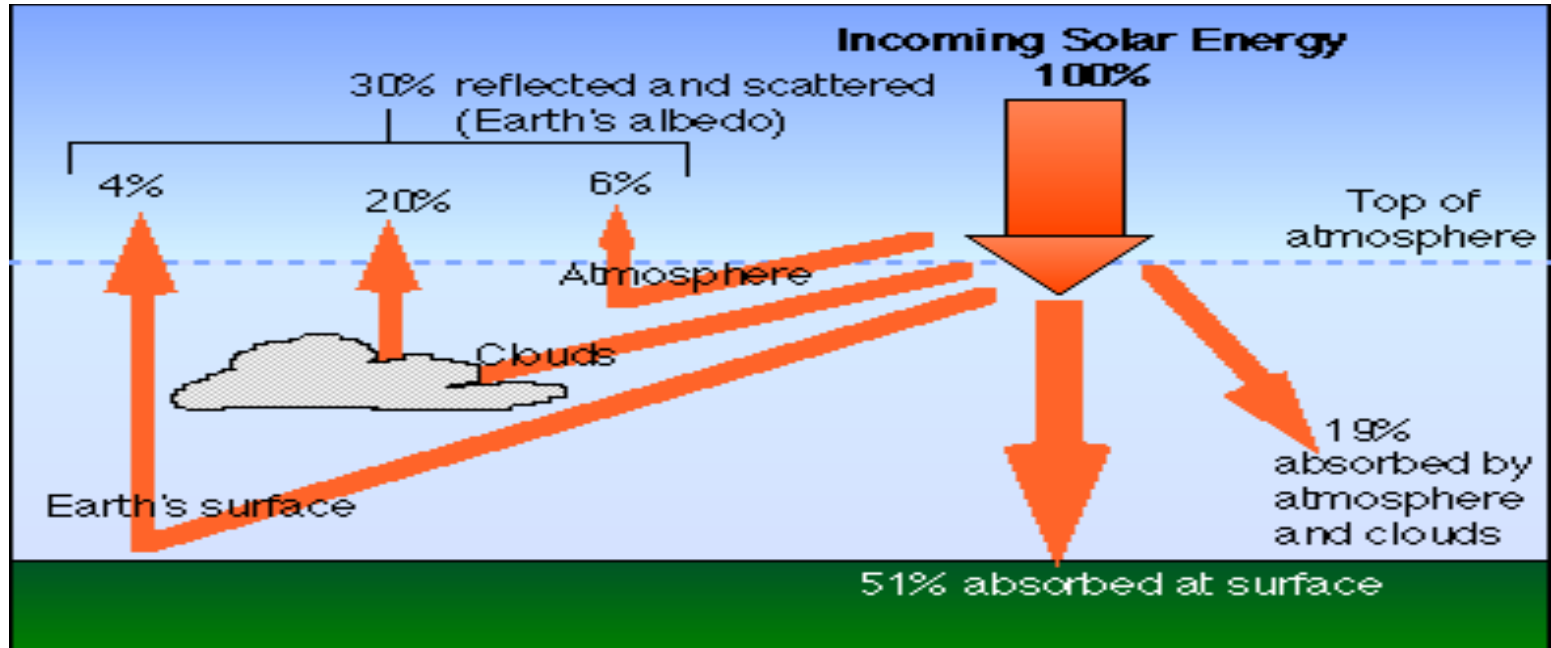
$$P_{out} = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T^4$$

$$I = \frac{P_{SOL}}{4\pi r^2} = 1380 \text{ Wm}^{-2}$$

$$P_{in} = P_{out} \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha) \cdot S}{4 \cdot \sigma}}$$



**Constant solar:** quantitat d'energia que en promig assoleix el cim de l'atmosfera en una superfície quadrada als raigs solars. El seu valor és de: **1370 W/m<sup>2</sup>**.



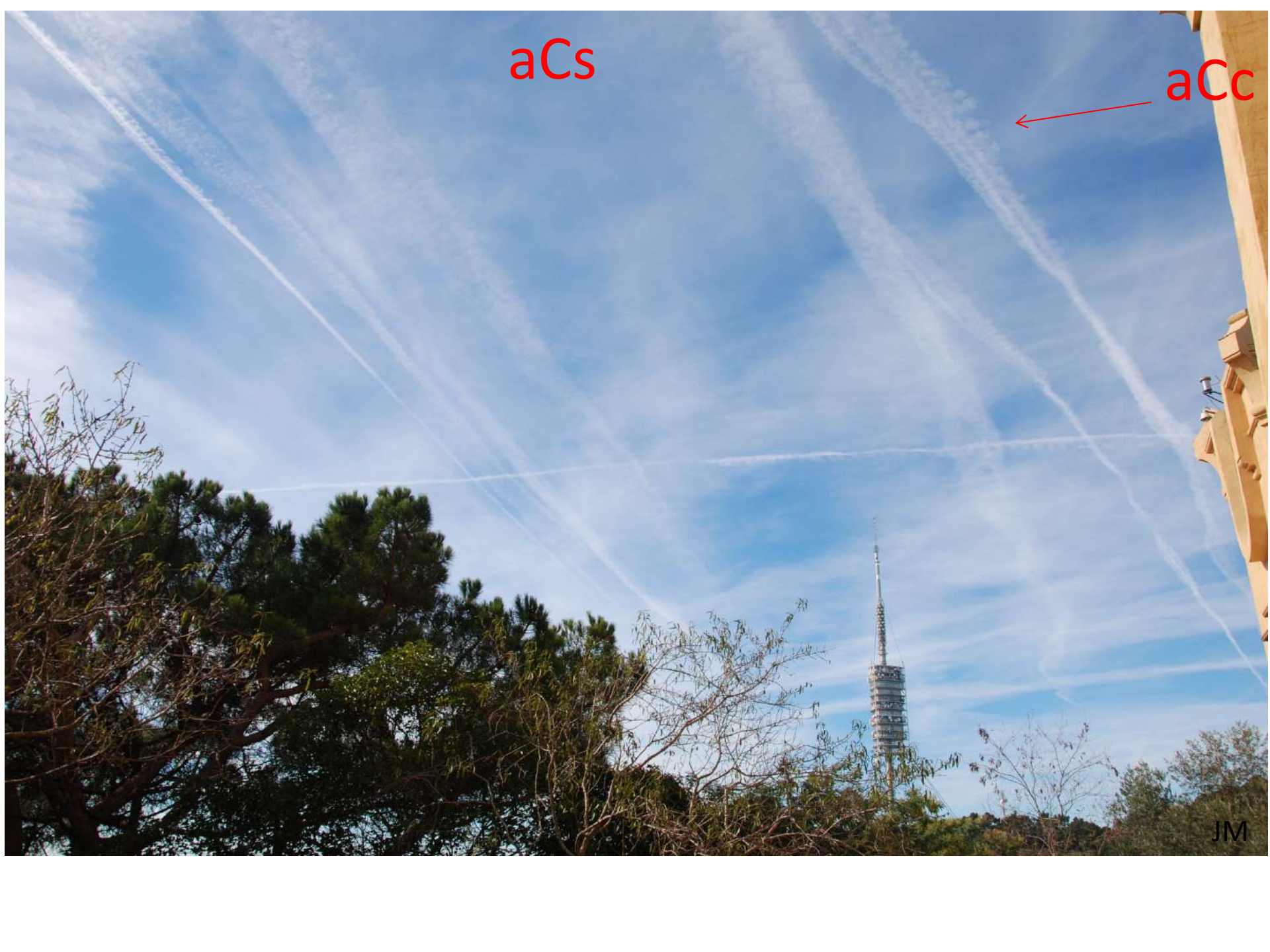
- 19% escalfa l'atmosfera.
- 51% arriba al sòl: 47% escalfa el sòl; el 4% és reflexada de nou cap a l'atmosfera.
- 30% es perd for a de l'atmosfera (ALBEDO).



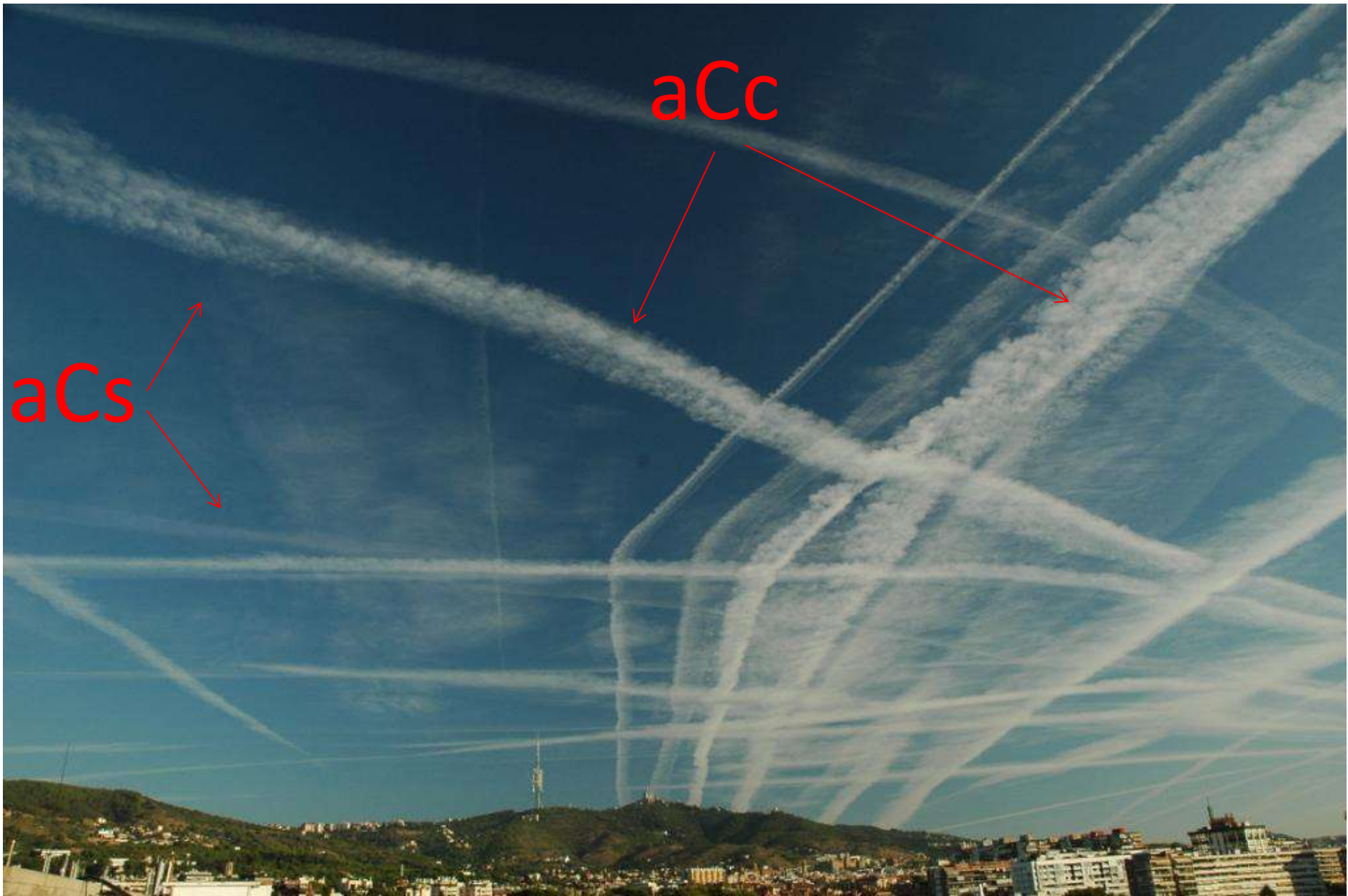


aCs

aCc



JM

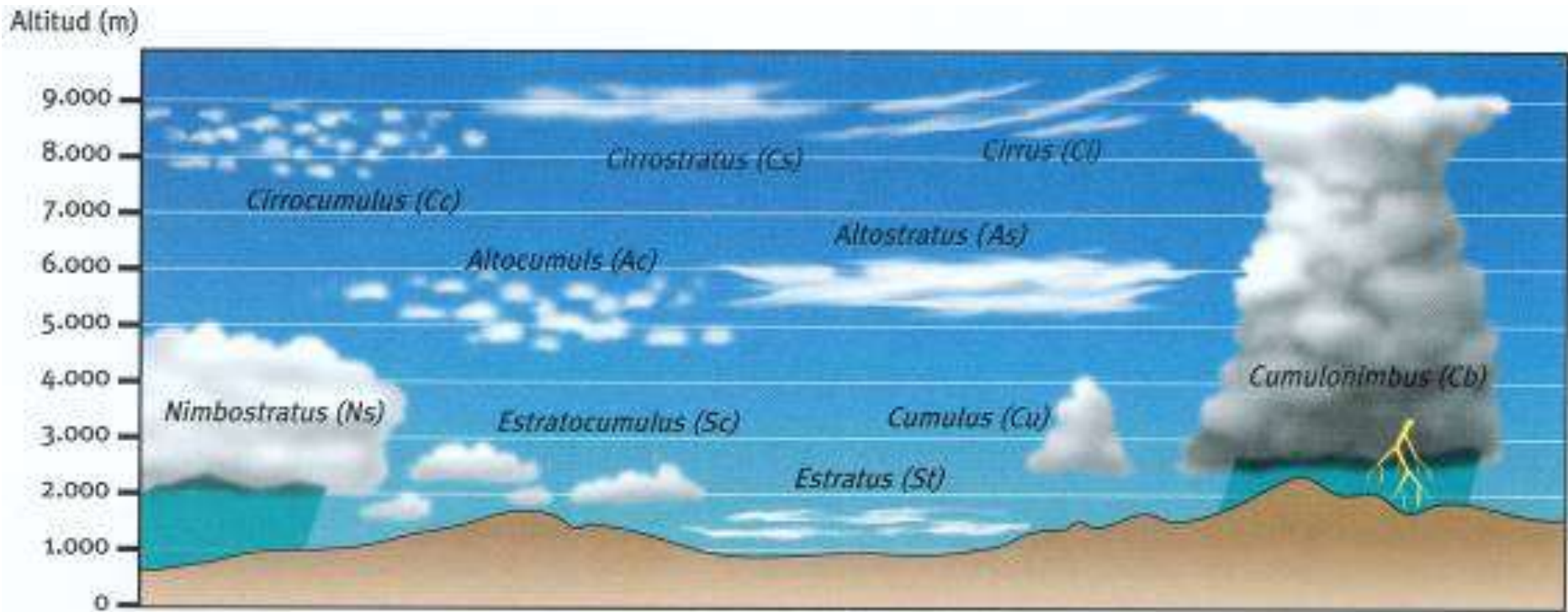


aCs

aCc



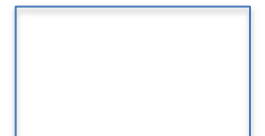
# TIPUS DE NÚVOLS



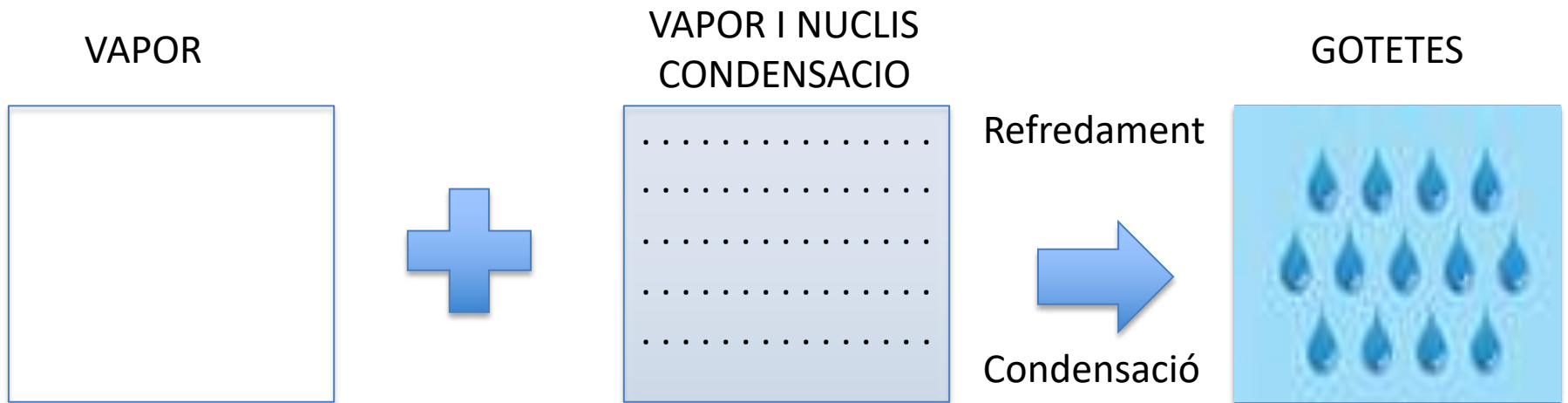
Gotetes líquides, en subfusió, o cristalls de gel



**NO** és vapor d'aigua. Aquest gas és **INVISIBLE**



# QUE ES I COM ES FORMA UN NÚVOL?



# *Què cal fer formar un núvol?*



Què cal per fer una truita de patates?



i



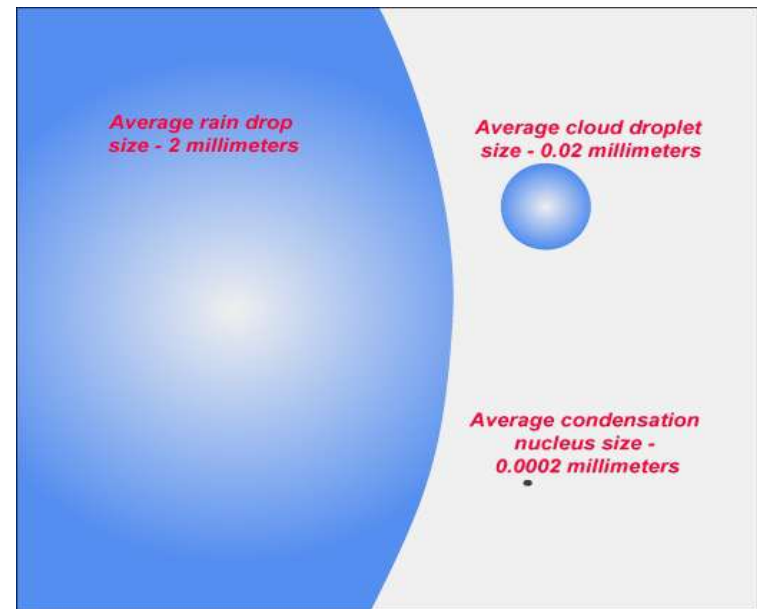
i





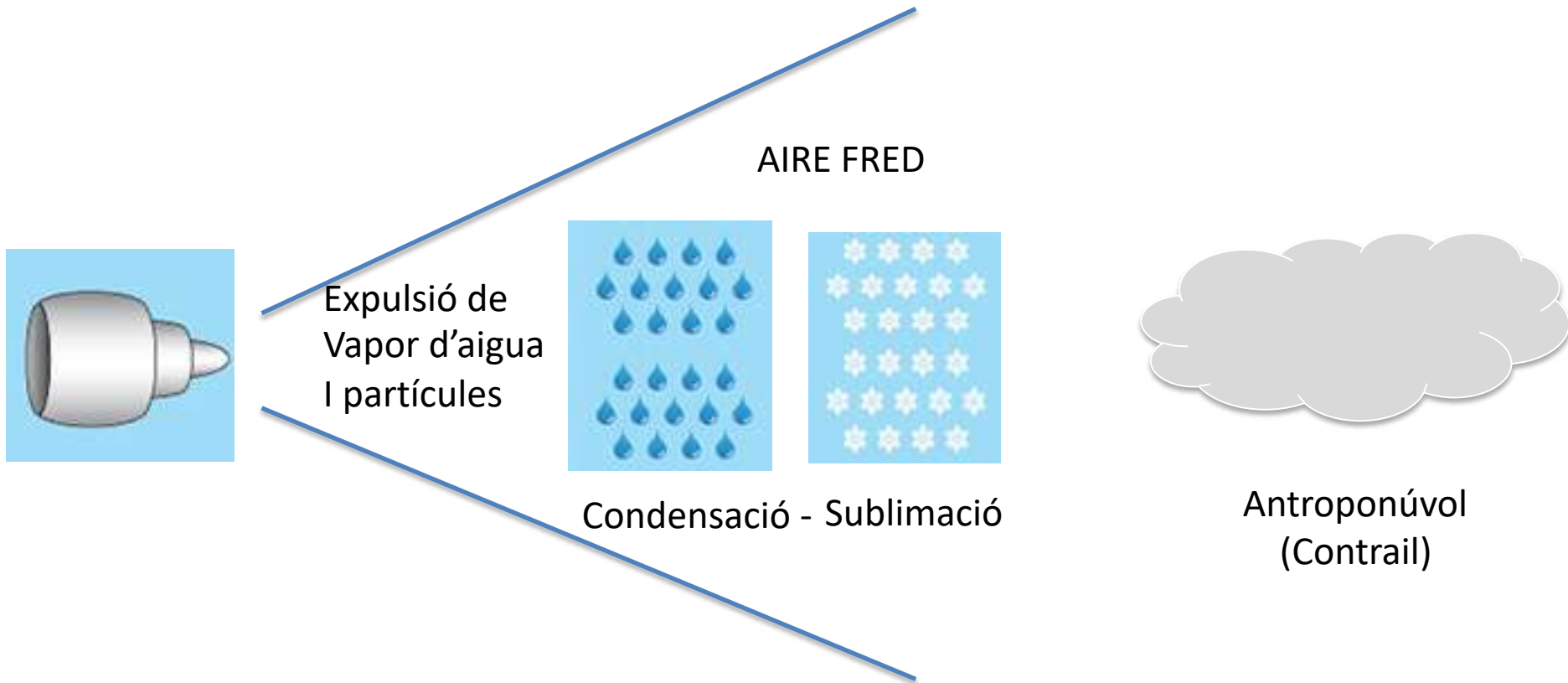
Las activitats humanes faciliten a la troposfera els elements bàsics per a la formació dels núvols:

- nuclis de condensació** (contaminants)
- Vapor de agua** (combustió)
- Moviments **convectius**



El refredament de l'aire que contè nuclis i humitat pot condensar/sublimar formant núvols (**antroponúvols**)

# Com es forma un contrail?



Condió per a que els contrails s'estenguin

$$T_{\text{aire}} \leq -45^{\circ}\text{C}$$



Aire humit



Condió per a que els contrails es dissipin

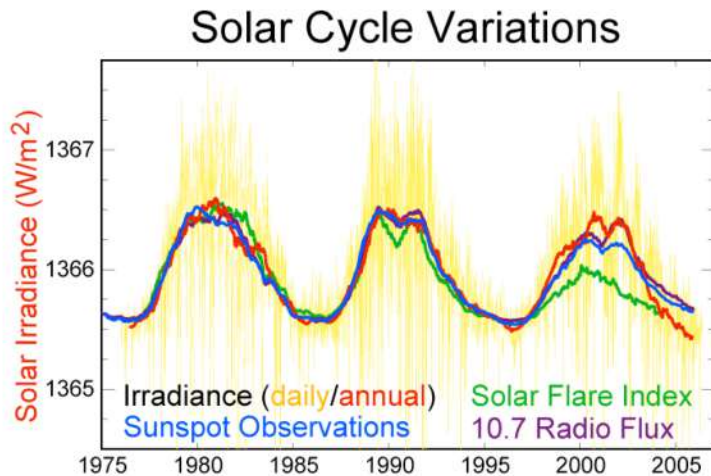
$$T_{\text{aire}} \geq -45^{\circ}\text{C}$$



Aire sec



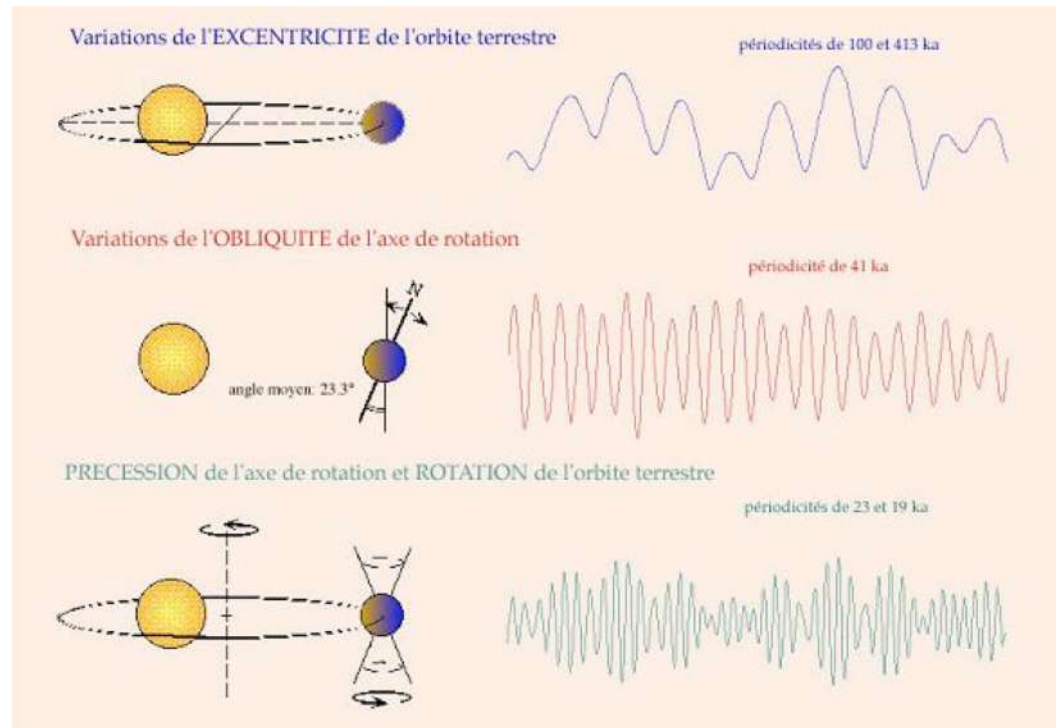
# Variations de la constant Solar, S



Menys de 0.1%

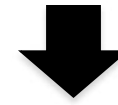
Mínim Maunder 1650-1700, 0.6%

## Cicles de Milankovich



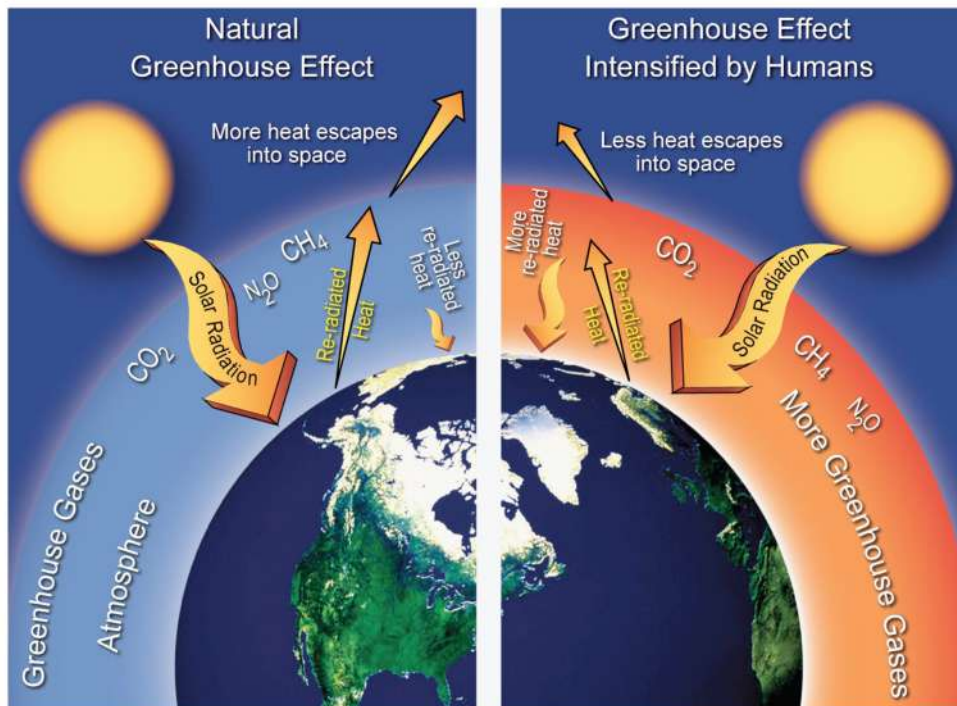
$T_{eq}$  teòrica,  $-17^{\circ}\text{C}$

$T_{eq}$  real,  $+16^{\circ}\text{C}$



**Efecte hivernacle**

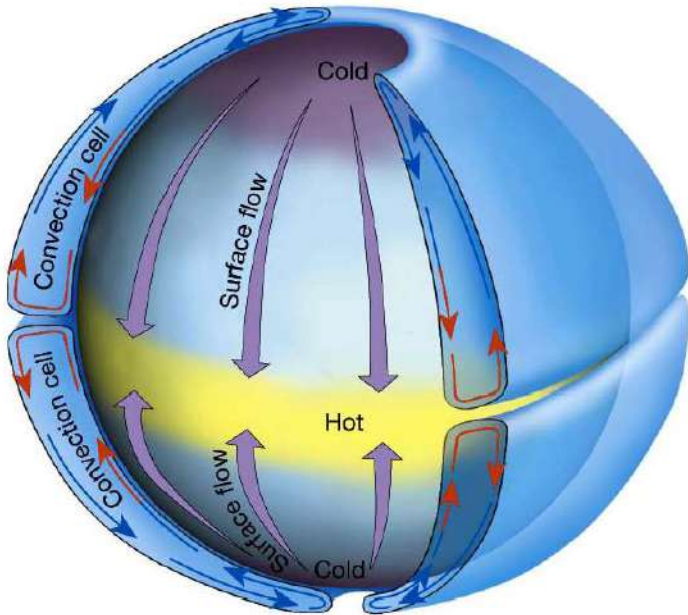
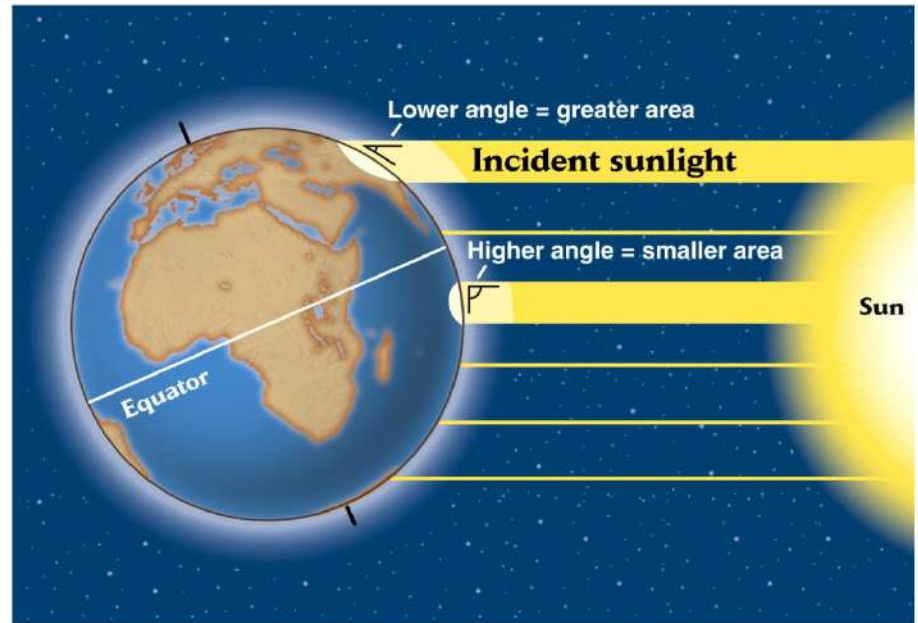
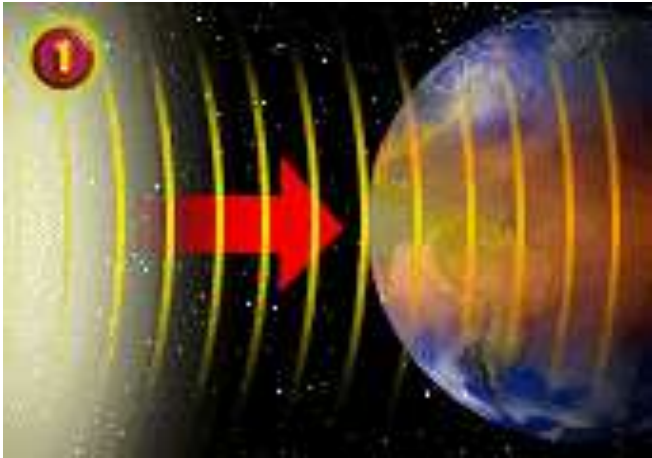
Human Influence on the Greenhouse Effect



<https://www.youtube.com/watch?v=JQHtjT-c7U>

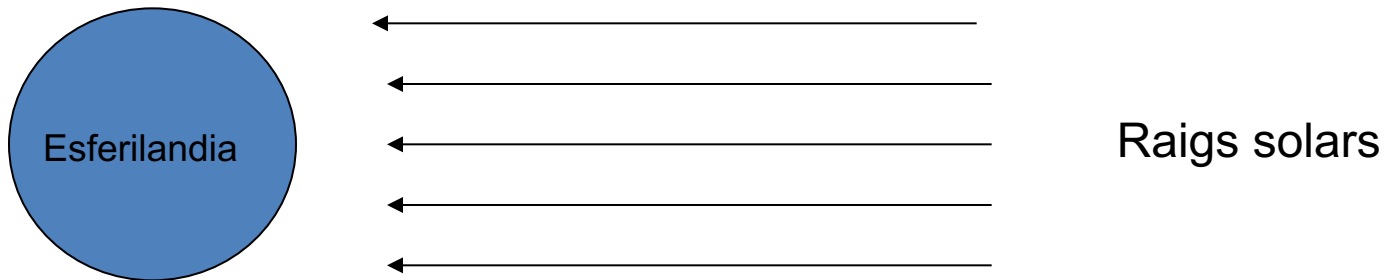
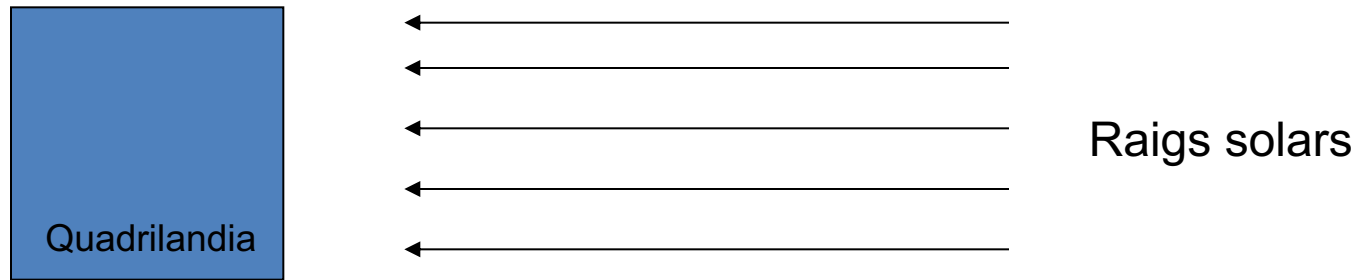


# Com afecta l'energia del Sol a l'atmosfera?

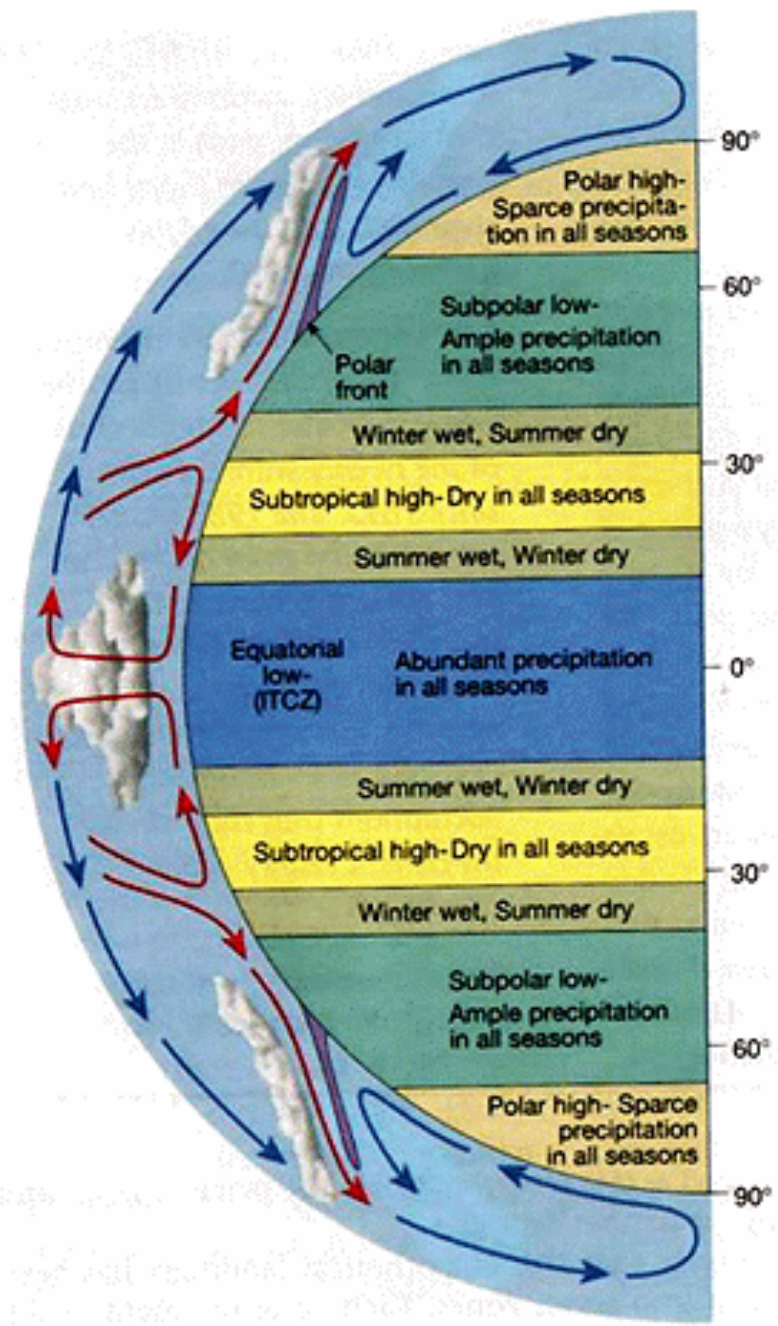
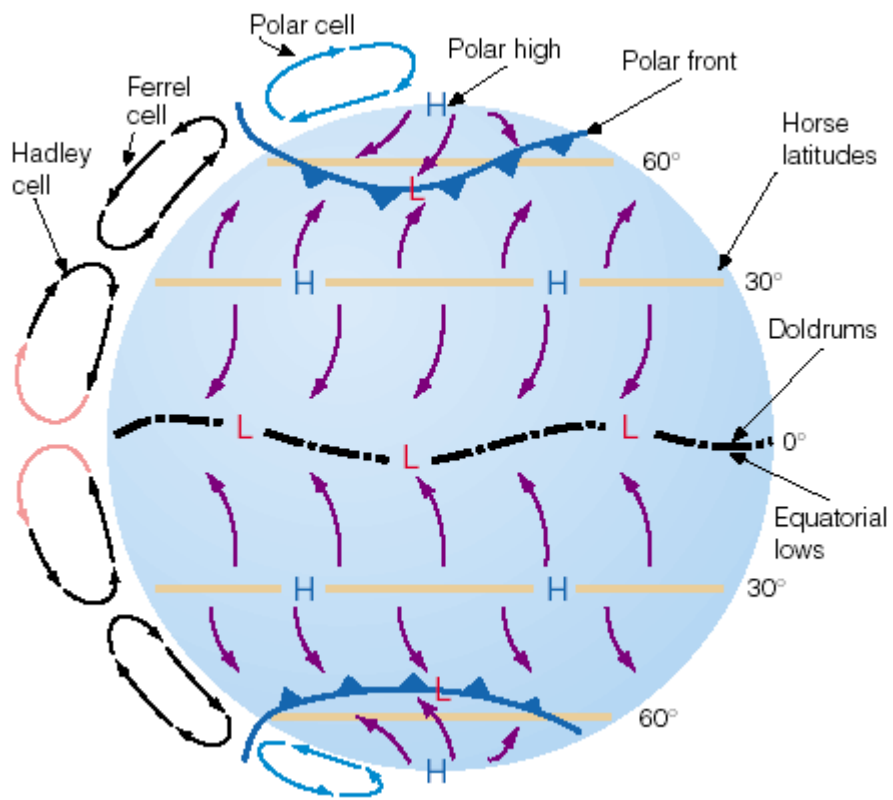


# Els climes existeixen per la forma esfèrica de la Terra:

Tirra quadrada → homogeneïtat en l'energia rebuda

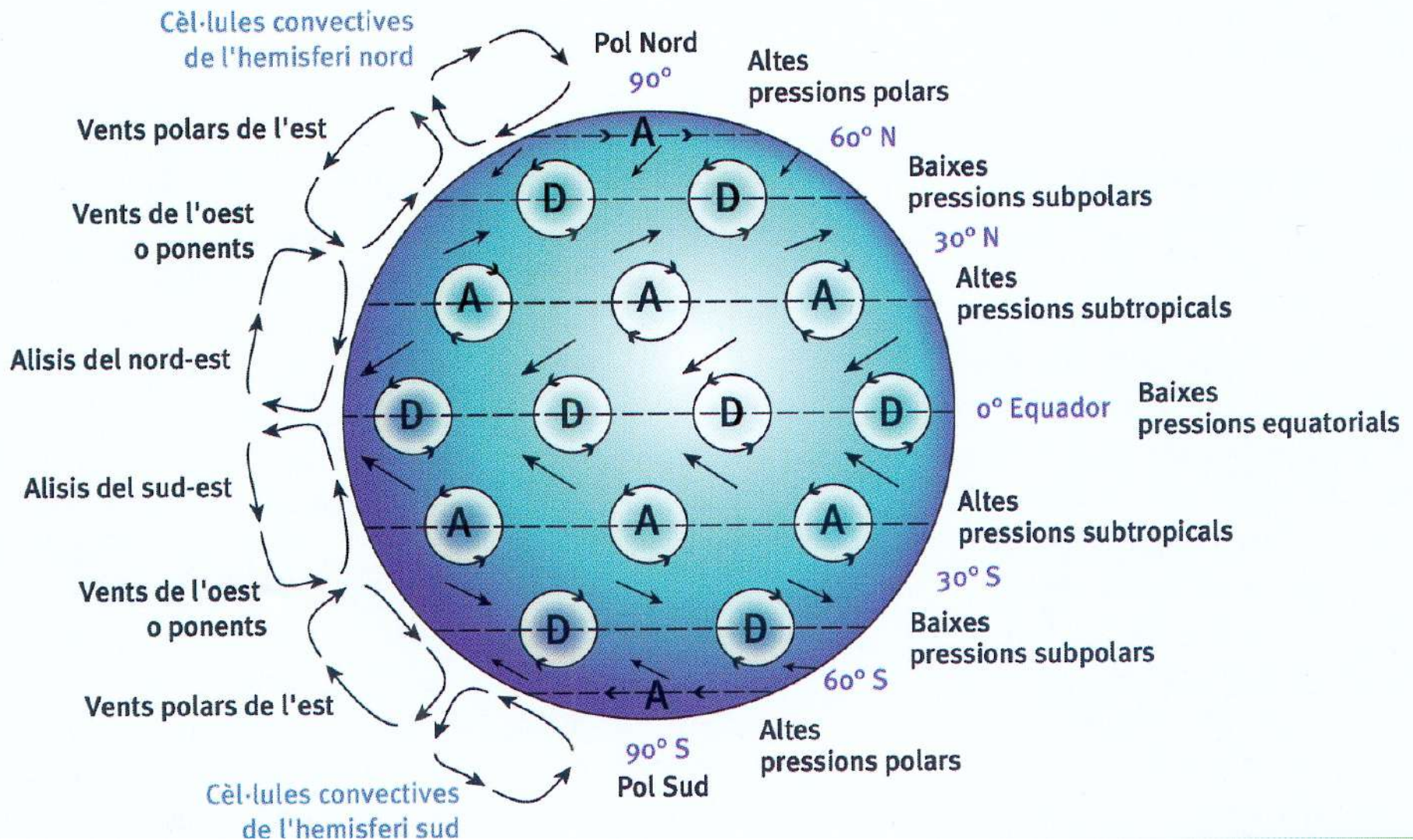


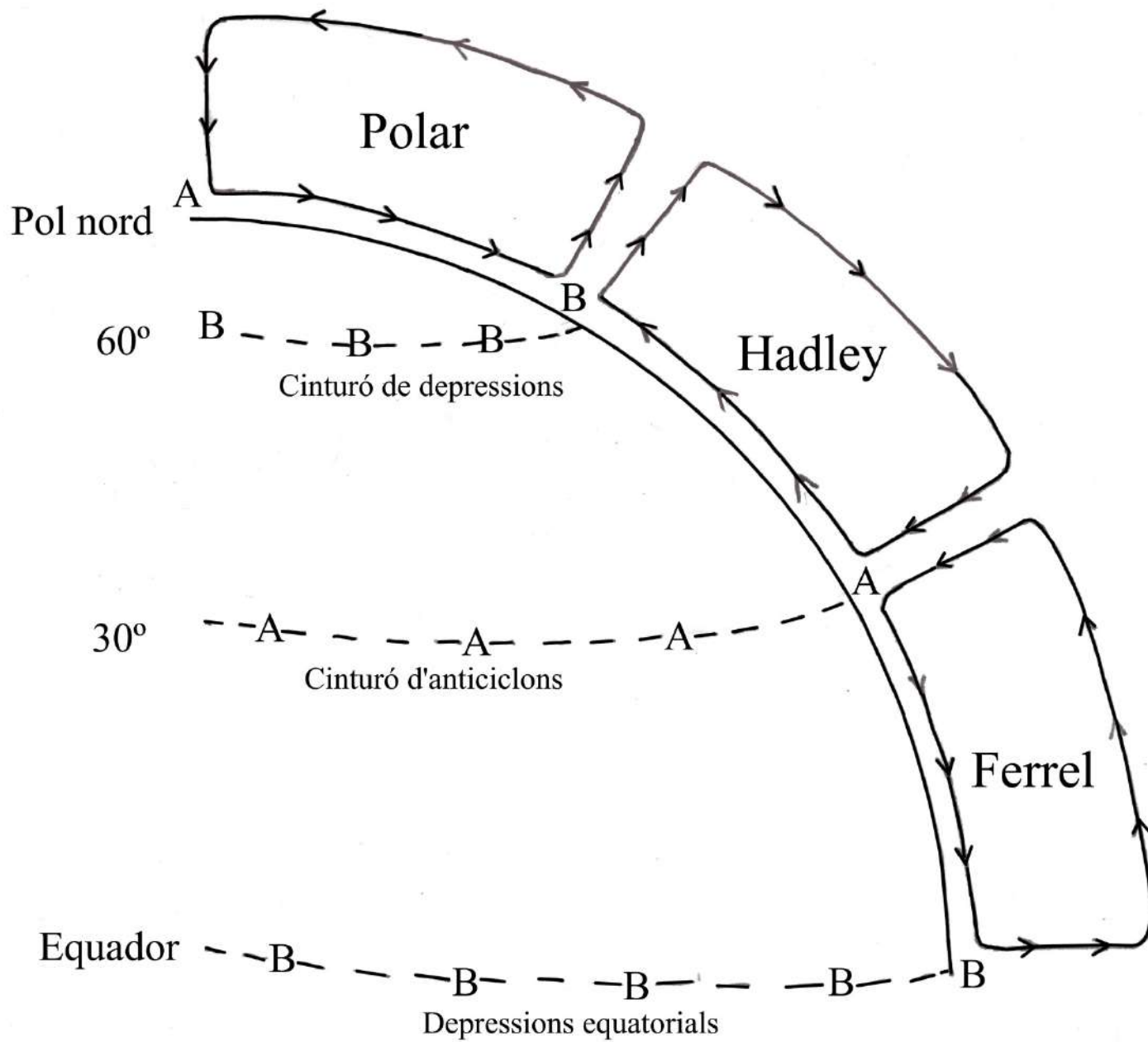
Terra esfèrica → diferència en l'energia rebuda



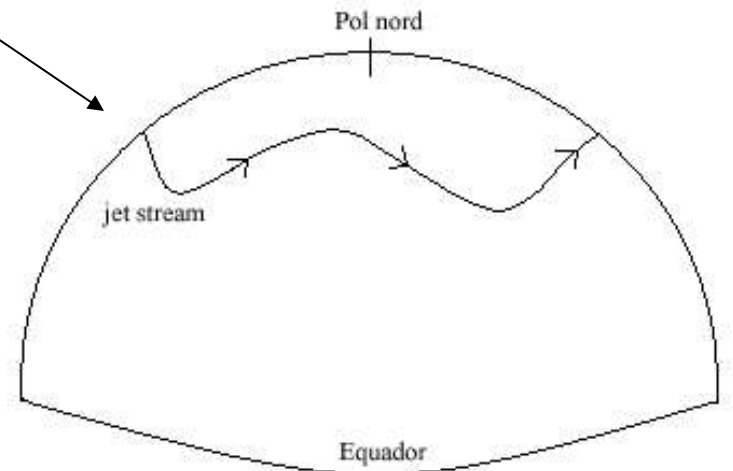
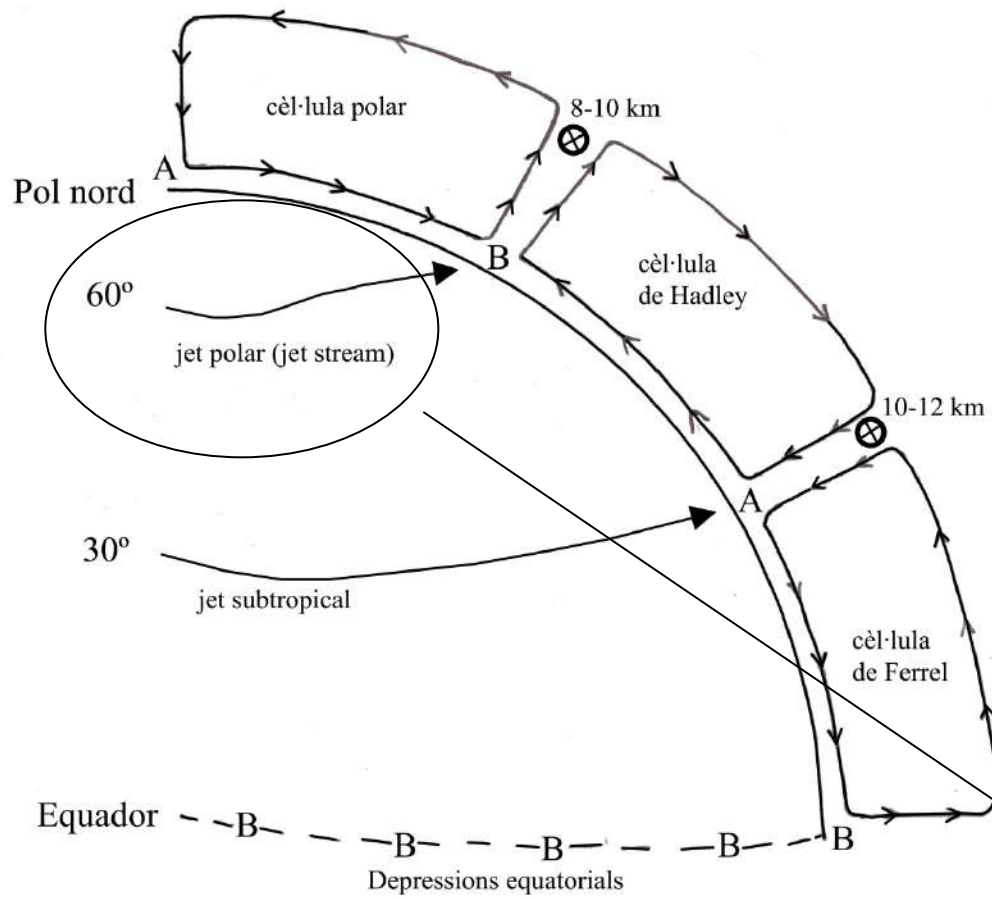


# Circulació general de l'atmosfera: posició dels anticiclons i de les baixes pressions

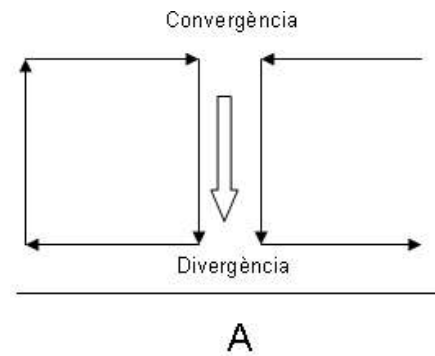
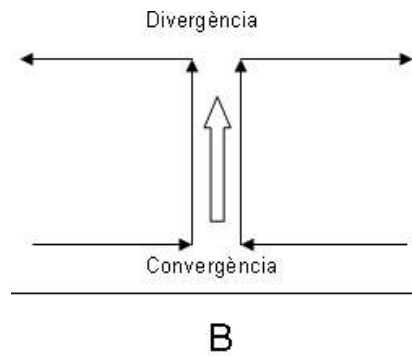
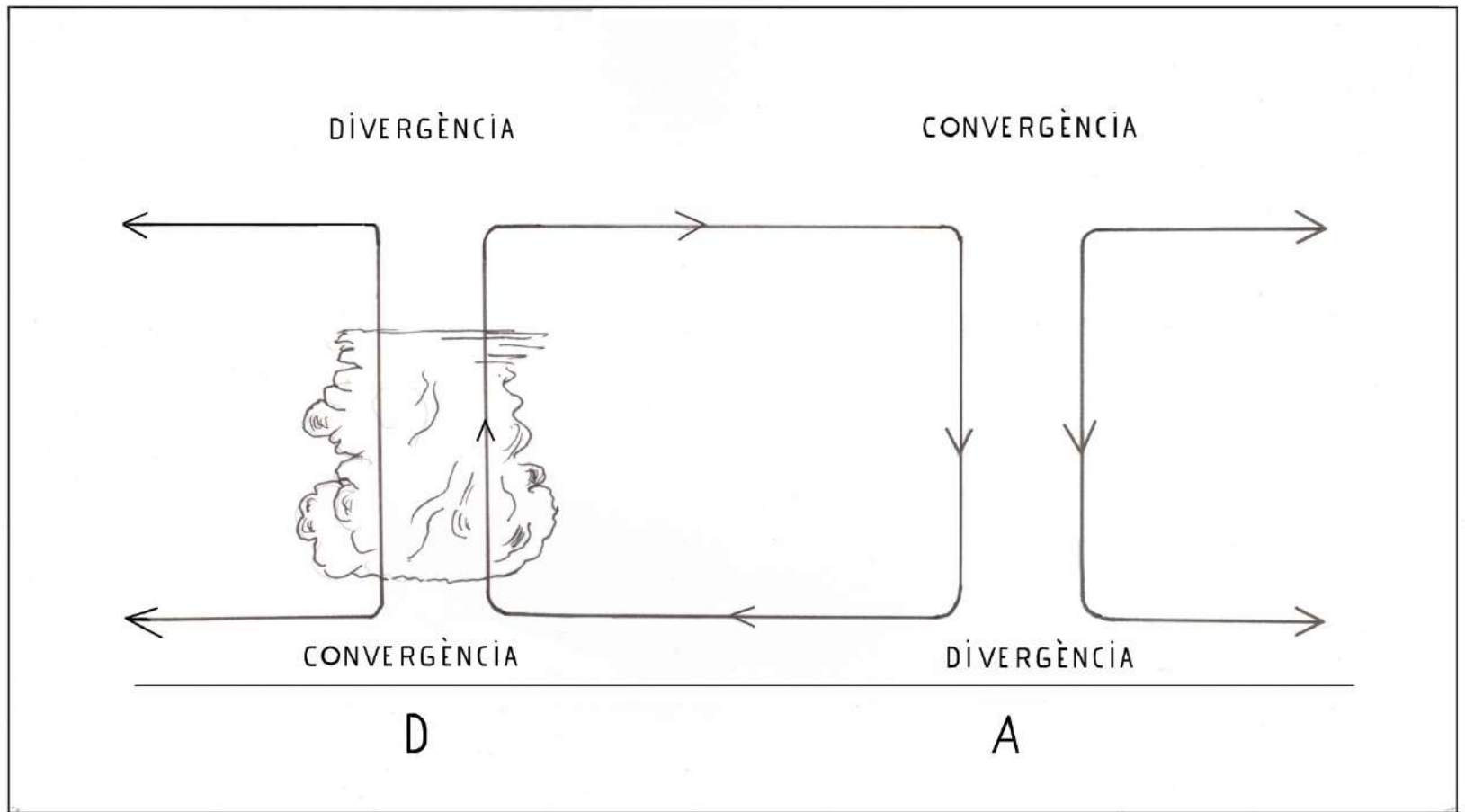




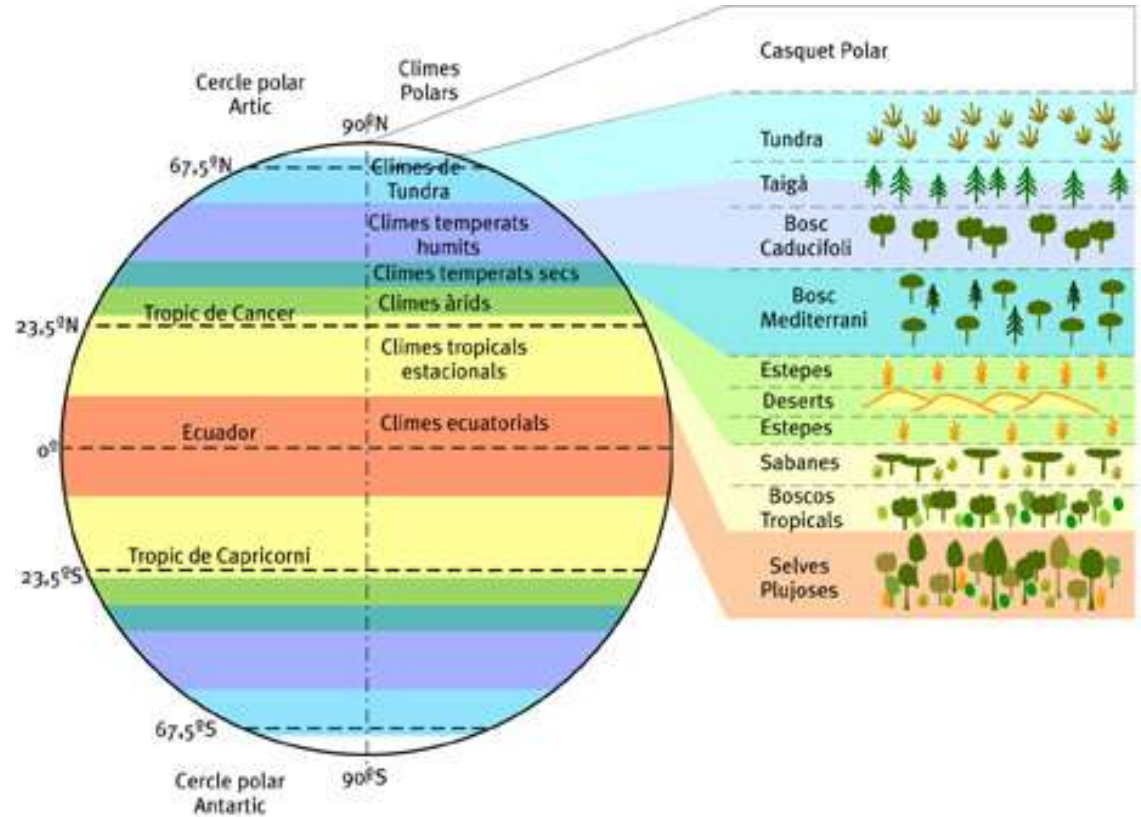
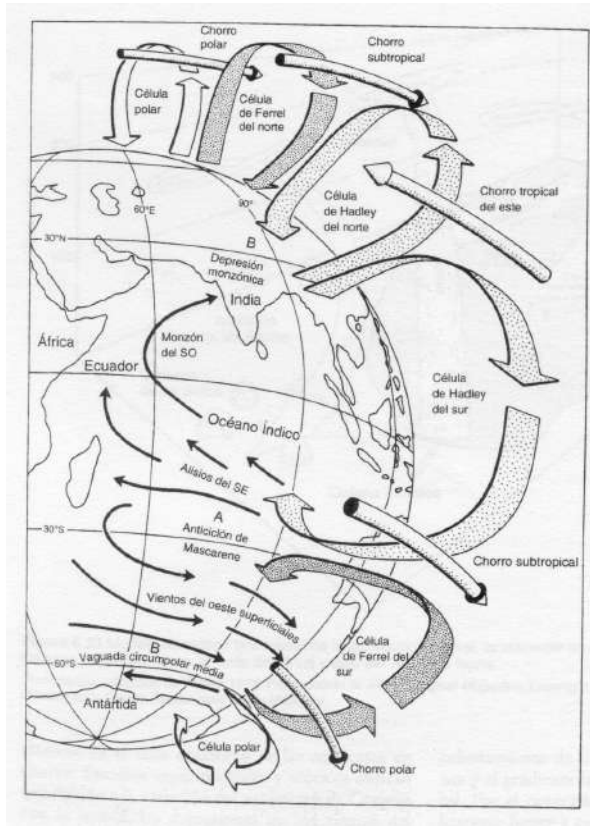








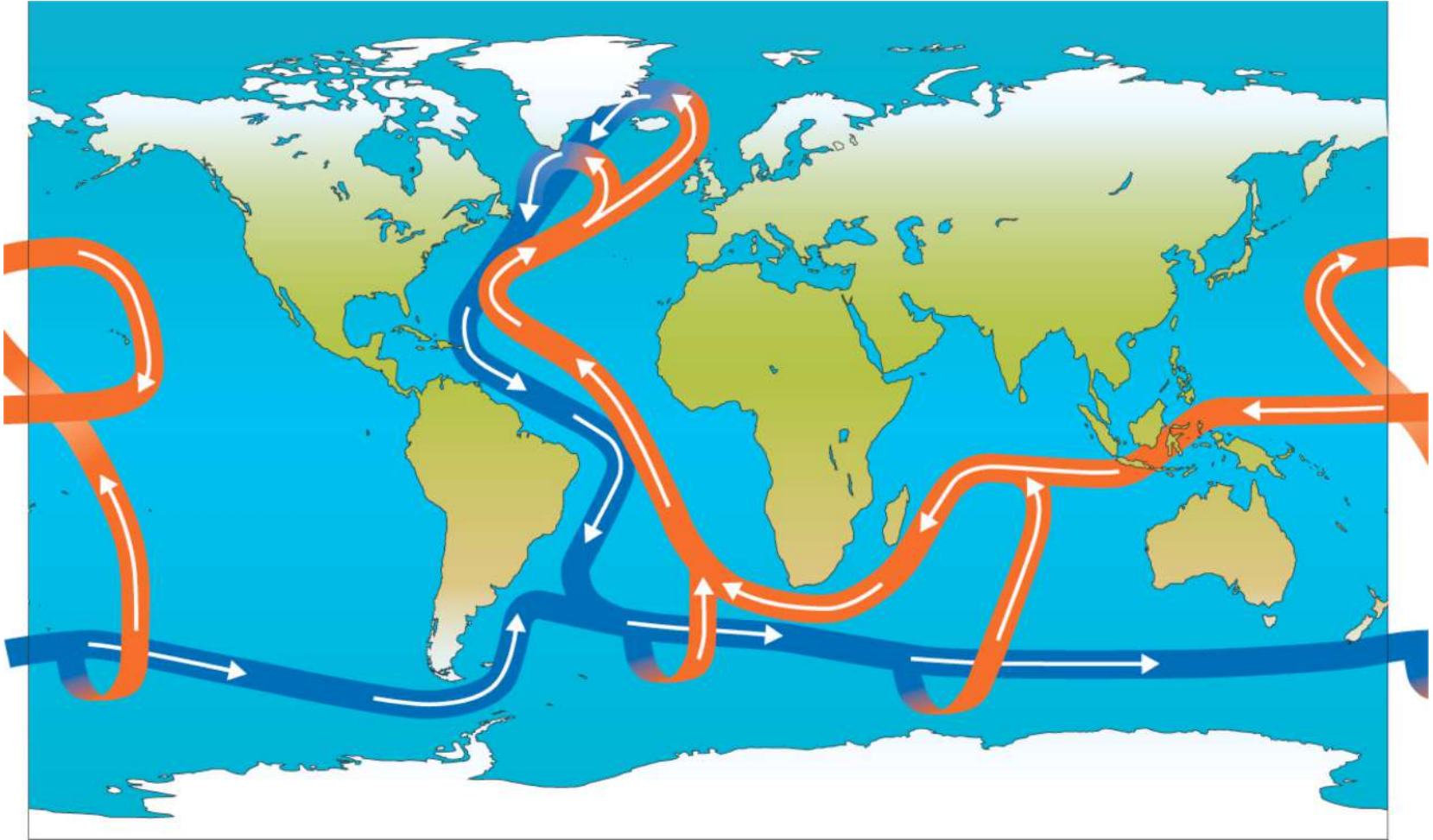
# La temperatura, distribució horitzontal: centres de pressió i biomes.



-Les franges de altes i baixes pressions i les seves oscil·lacions estacionals expliquen la distribució climàtica i dels diferents biomes entre d'altres aspectes.



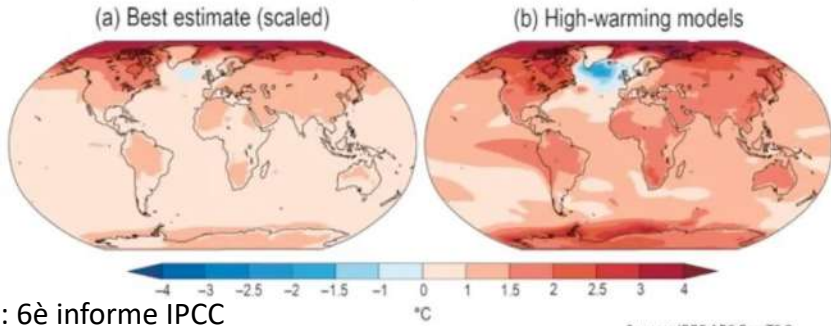
## La AMOC i el clima



Circulació oceànica: en blau, aigua Freda profunda; en vermell, aigua càlida superficial. (Metoffice UK)



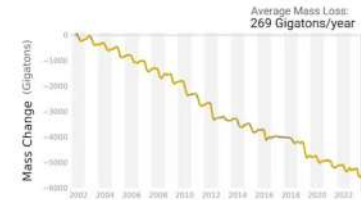
## SSP1-2.6 (2081–2100)



Font: 6è informe IPCC



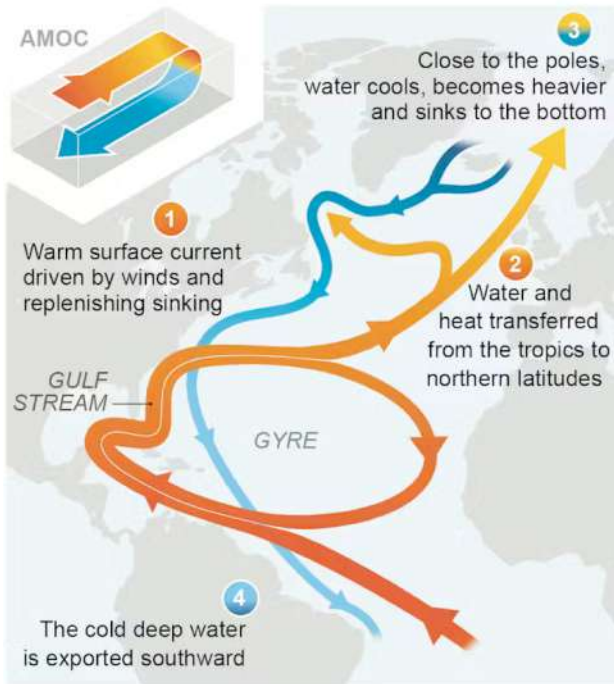
## GRACE AND GRACE-FO Observations of Greenland Land Ice Mass Changes



Font: NASA

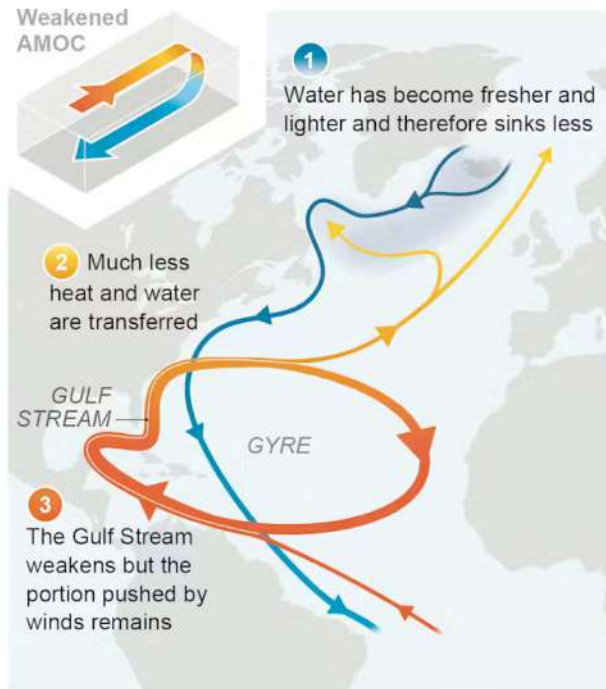
## Today

The Gulf Stream is part of both the horizontal, subtropical gyre and the vertical, Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)



## In a warmer world

Climate change weakens the AMOC, which slows the Gulf Stream down



Font: 6è informe IPCC

# L'Energia i canvi climàtic

Ésser humà fa 200 anys, 8 MJ / any d'energia

Actualitat, 300 MJ/ any  USA 10 kJ/dia  
Zones Àfrica 0.1 kJ/dia

Població:  $7 \cdot 10^9$  habitants

Demanda d'energia:  $6.3 \cdot 10^{20}$  J/any  
Producció d'energia:  $1.5 \cdot 10^{21}$  J/any

Població en augment,  
amb major exigència  
energètica

D'on obtenim l'energia??

# NO RENEVABLE

## Tipus      Font

Nuclear      U-235

Fòssils      Petroli  
                 Carbó  
                 Gas

# RENOVABLE

## Tipus      Font

Solar      Radiació

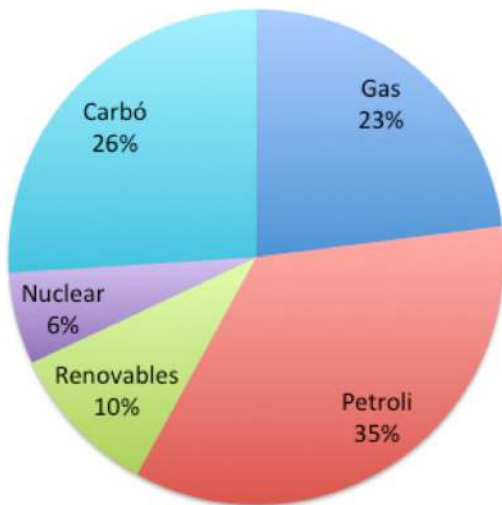
Hidràulica Ep

Eòlica      Ec

Biomassa Química

Geotèrmica      Tèrmica

Font d'energia (2017)



90% és fòssil → Un 84% emet CO<sub>2</sub>

10% és renovable → No CO<sub>2</sub>

Combustible	Energia específica (MJ/kg)	Densitat d'energia (MJ/m <sup>3</sup> )
Fusta	26	10 <sup>4</sup>
Carbó	20-60	20-60 · 10 <sup>6</sup>
Gasolina	45	35 · 10 <sup>6</sup>
Gas natural	55	3.5 · 10 <sup>4</sup>
Urani (fissió)	8 · 10 <sup>7</sup>	1.5 · 10 <sup>15</sup>
Deuteri/triti (fusió)	3 · 10 <sup>8</sup>	6 · 10 <sup>15</sup>
Caigua 100 m aigua	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>3</sup>

Energia eòlica

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A v^3$$

*12 m d'hèlix, 11 m/s, 1.7 MW*



Energia hidroelèctrica

$$P = \rho Q g h$$

*250 m de salt, 600 kg/s, 65%  
eficiència, 1 MW*



Energia Solar

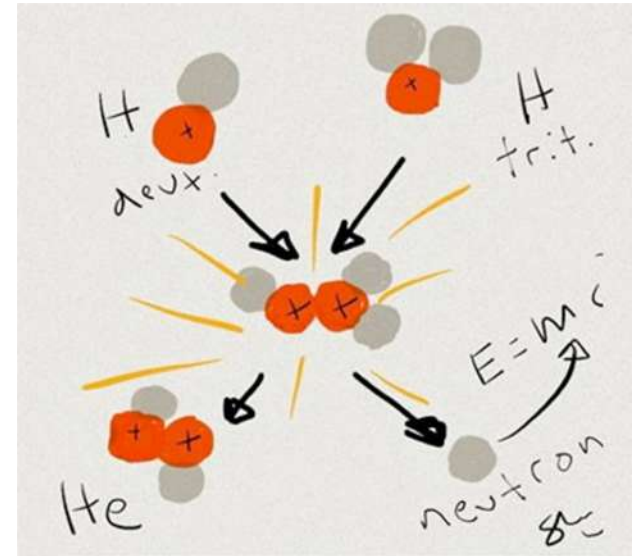
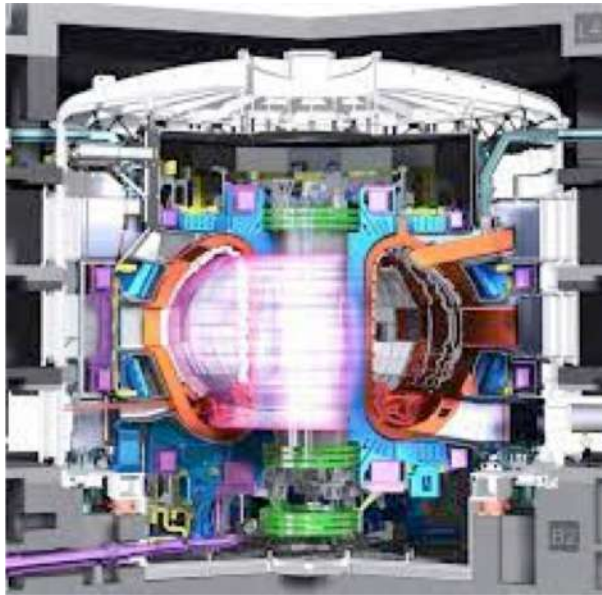
*4 kW per escalfar aigua, amb  
 $S = 650 \text{ Wm}^{-2}$ , l'eficiència del 22%,  
calen  $28 \text{ m}^2$*



*Fissionar 1 kg d'Urani  $\rightarrow$  425.000 kw·h d'energia (1 família 3000 kw·h/any)*



# I la fusió nuclear? El projecte ITER

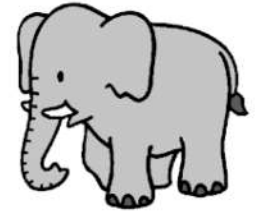


<https://www.iter.org/sci/whatisfusion>

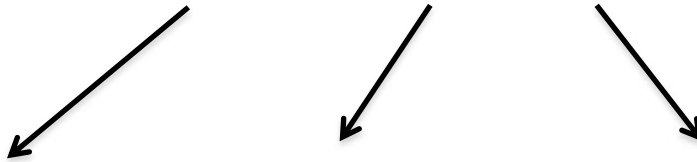
 **OBJECTIUS DE DESENVOLUPAMENT SOSTENIBLE**



# Consum sostenible?



$$E = P \cdot t$$



Provinent de fonts renovables

Reduir potència

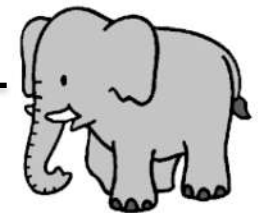
Reduir temps

360 m

$$E = 1000 \text{ W} \cdot 1 \text{ h} = 1 \text{ Kw} \cdot \text{h} = 3.600.000 \text{ J}$$



305 km/h



Quin impacte té el canvi climàtic en la salut i les persones?

Quin impacte té el canvi climàtic en els sistemes biològics?

Els fenòmens extrems, com ens afectaran a les societats del planeta?

D'on vindran els refugiats climàtics? Del nord o del sud?

Moltes gràcies per la vostra atenció!

