

# CLIMAS DEL PASADO, CLIMAS DEL FUTURO



## INTRODUCCIÓN

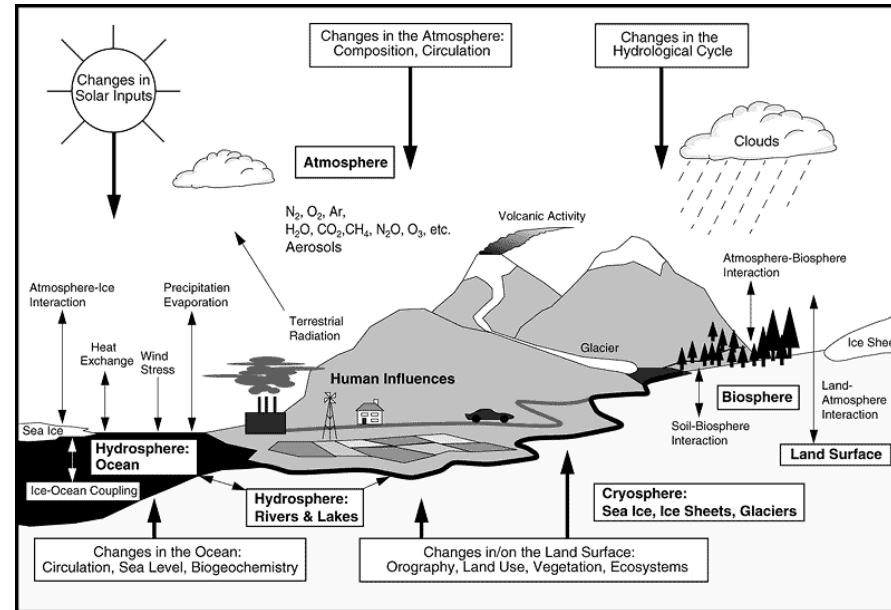
1. El sistema climático, el clima y los cambios climáticos
2. ¿Cambia el clima?
3. ¿Está cambiando nuestro clima?
4. ¿Podemos anticipar los cambios climáticos futuros?
5. ¿Qué podría pasar?

## INTRODUCCIÓN

1. El sistema climático, el clima y los cambios climáticos
2. ¿Cambia el clima?
3. ¿Está cambiando nuestro clima?
4. ¿Podemos anticipar los cambios climáticos futuros?
5. ¿Qué podría pasar?

Los climas terrestres, expresión de un complejo sistema, el **Sistema Climático**, integrado por

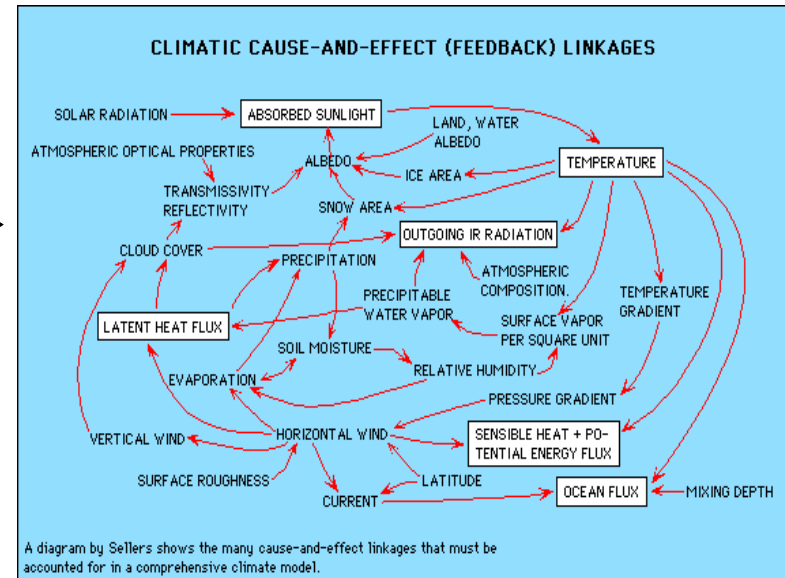
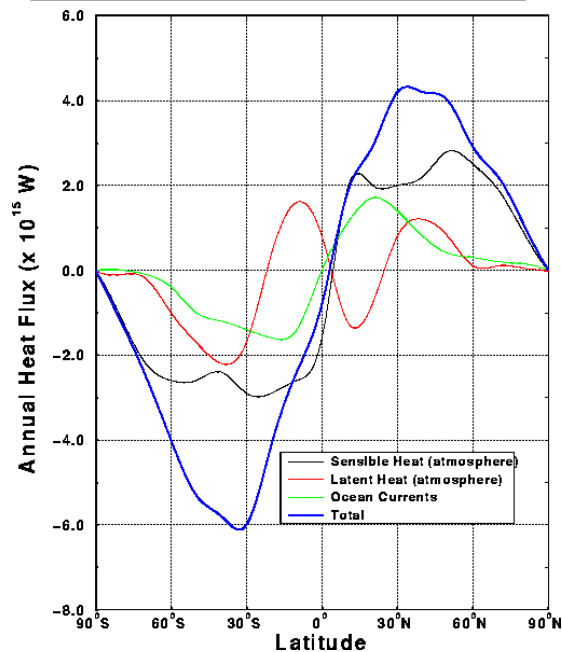
1. Atmósfera
2. Hidrosfera
3. Litosfera
4. Biosfera
5. Criosfera



- Sistema abierto
- Alimentado con la energía solar, que circula entre los subsistemas antes de ser devuelta al espacio: balance energético equilibrado.

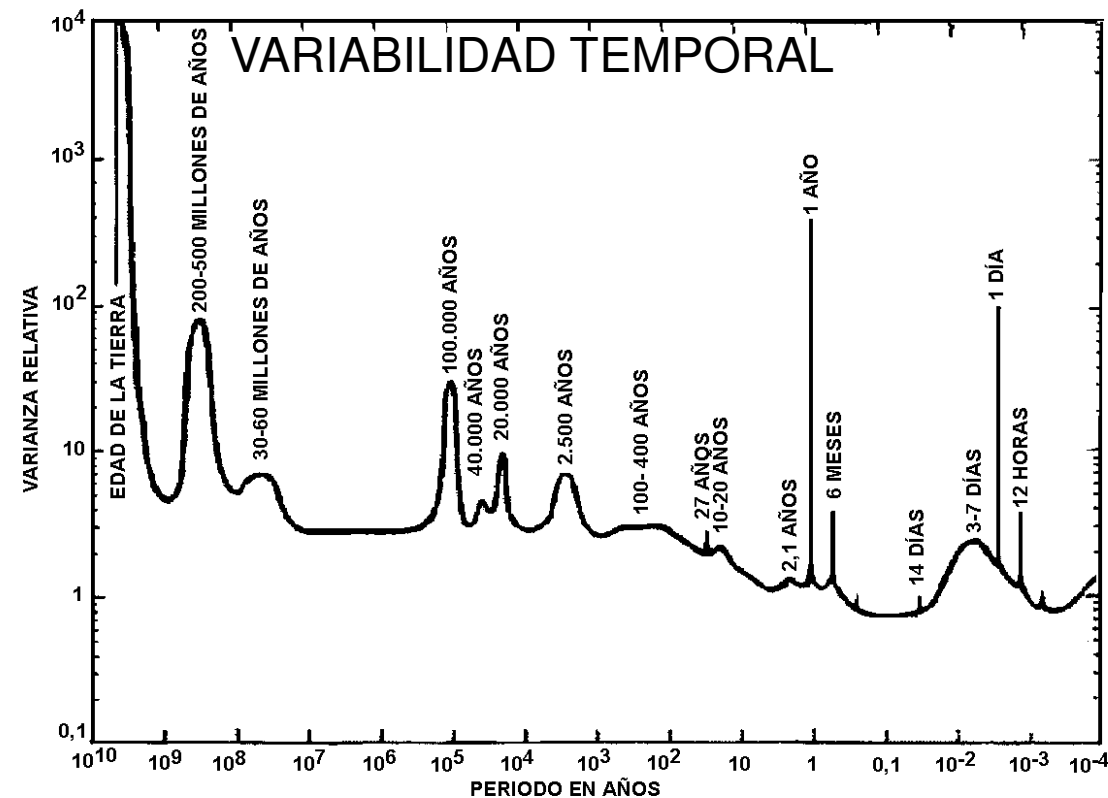
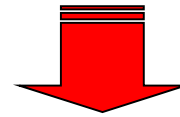
**Equilibrio** ni inmediato ni automático: continuos **mecanismos de compensación (transferencias de calor)** para amortiguar los

➤ Desequilibrios entre los componentes del sistema



➤ Desequilibrios entre las latitudes de la Tierra: circulación atmosférica y oceánica

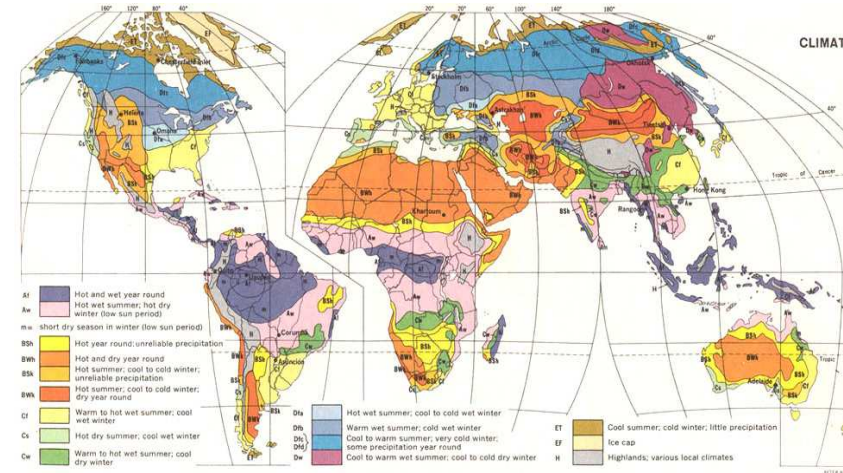
- **Transferencias** requieren un tiempo variable:
- Distintos periodo de respuesta de los componentes
  - Complejidad de fenómenos de realimentación (dependiendo de su signo, tienden a amplificar o amortiguar el desequilibrio)



TIEMPO Y CLIMA

3<sup>er</sup> Curso MONOGRÁFICO

**Variabilidad espacial:**  
plasmación geográfica del  
estado del sistema  
climático (*output*)



➤ **Clima (s):**

- Del griego “klinos”: inclinación “de los rayos solares”
- Generalización (“estado habitual”) del Sistema Climático durante un periodo de tiempo y área espacial determinadas
- Resultado de su estabilidad (a corto plazo)
- Cada clima
  - “medio natural” (vegetación, procesos morfodinámicos...)
  - “aprovechamientos humanos” (habitat, usos del suelo...)



**EVIDENCIAS DE LOS CLIMAS**

TIEMPO Y CLIMA

3<sup>er</sup> Curso MONOGRÁFICO

# El registro climático

Instrumental: mediados del XIX (antecedentes anteriores)



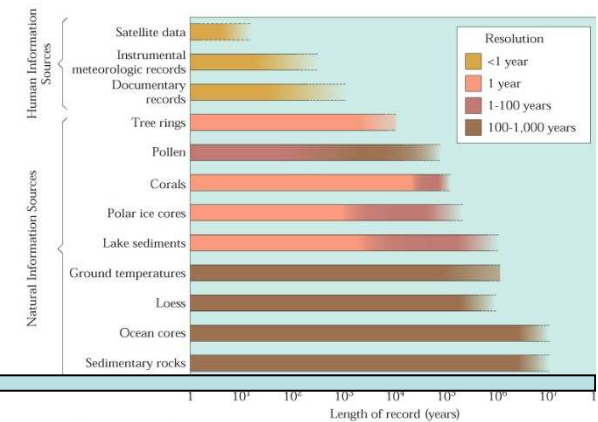
Reconstrucción a través de *proxies*: registros históricos, anillos de los árboles, sedimentos...



**Inconvenientes:** registro regional, temporalmente incompleto, resolución decrece hacia el pasado



**!!! Dificultad para encuadrar los sucesos actuales en el pasado!!!**



Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

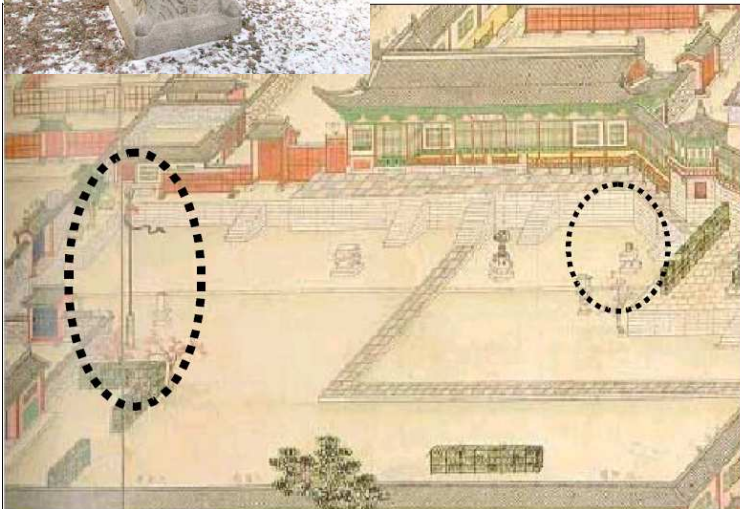
TIEMPO Y CLIMA

3<sup>er</sup> Curso MONOGRÁFICO



# “Arqueo-climatología”

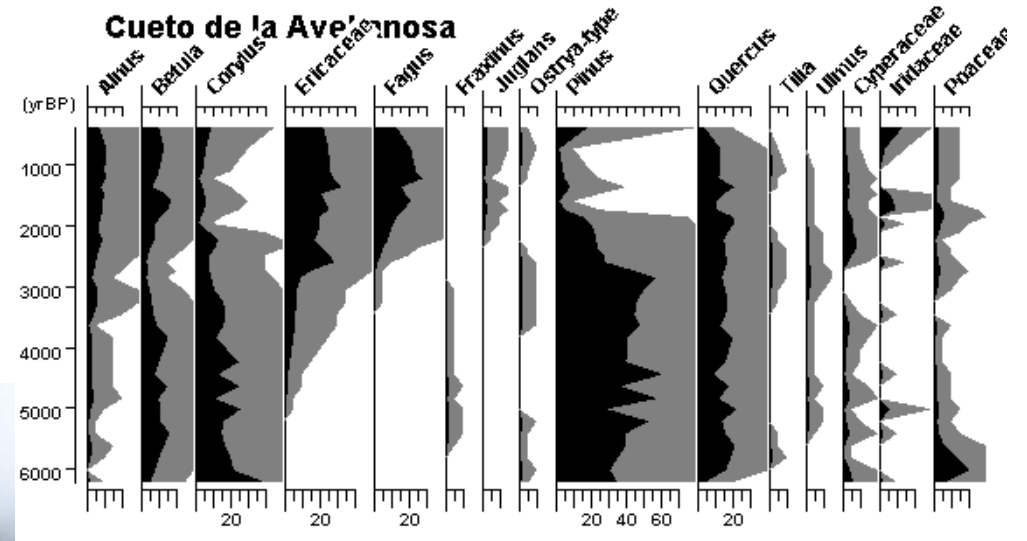
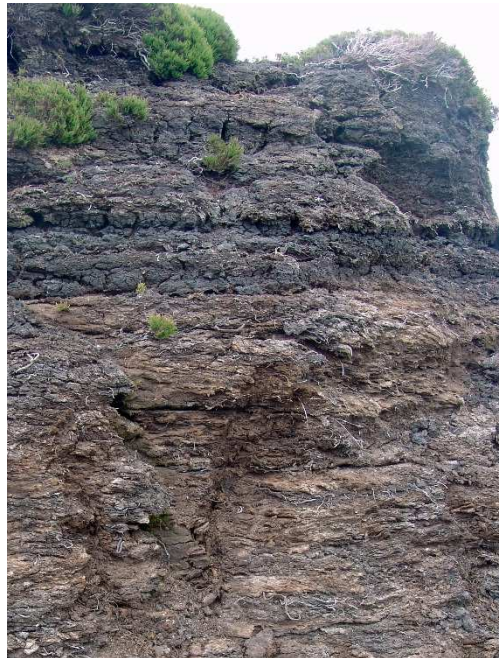
Termómetro-  
barómetro de  
Eugène Bourdon (s.  
XIX) y valores  
"record" en algunas  
ciudades.  
Fotografía J.C.G.C.



Vertical columns of Chinese text, likely a historical record or gazetteer, with a highlighted section.



## Turberas y análisis polínicos

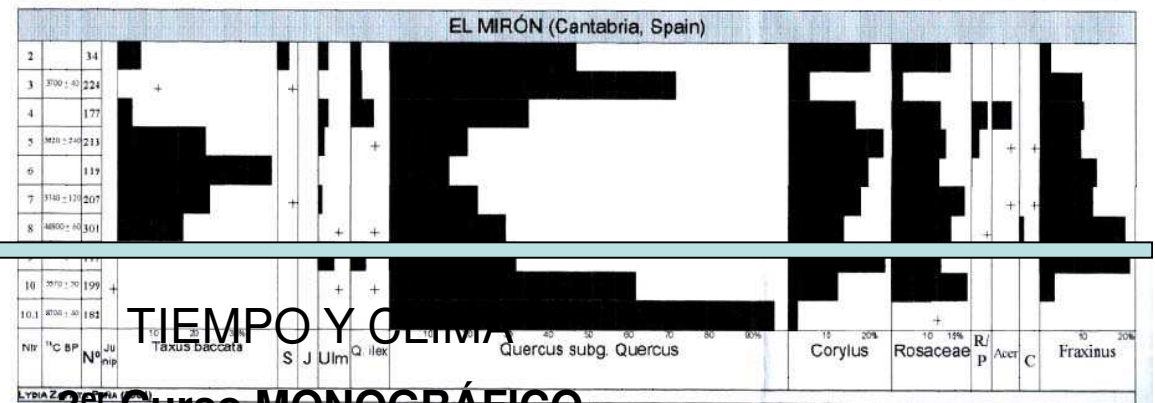


TIEMPO Y CLIMA

3er Curso MONOGRÁFICO

# Antracología

Diagrama antracológico que representa los restos de vegetación carbonizada aparecidos en la Cueva del Mirón



TIEMPO Y CLIMA  
3er Curso MONOGRÁFICO

## Climatología Histórica

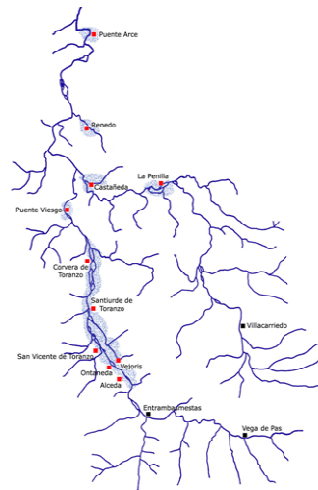
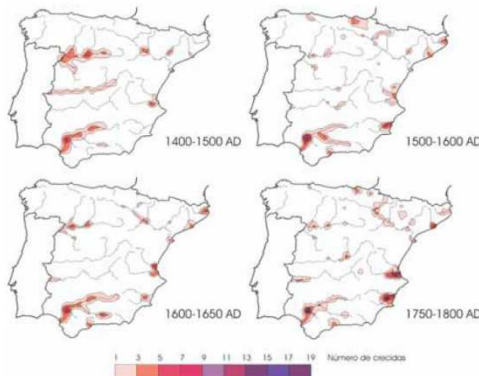
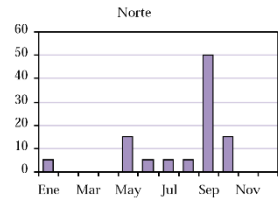
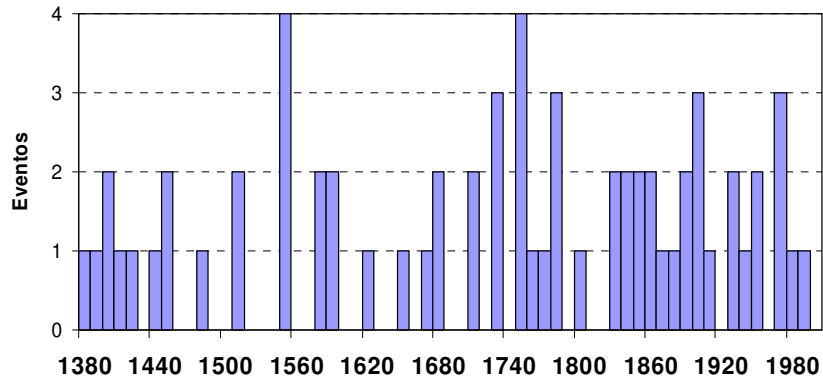
- Categorías de información:
  - Fenómenos atmosféricos (nevadas, heladas, olas de calor o de frío, lluvias intensas o prolongadas)
  - Fenómenos ambientales (*paraclimáticos*): sequías, inundaciones, naufragios o daños en puertos
  - Fenómenos biológicos (migración de aves) o fenológicos (floración, vendimia)
- Datos cualitativos
  - Escasa utilidad individual; buena imagen de los sucesos y estimación de su intensidad cuando son numerosos

~~Necesidad de elaboración de series temporales~~  
(índices)

TIEMPO Y CLIMA

3<sup>er</sup> Curso MONOGRÁFICO

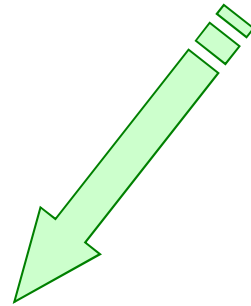
# Fuentes documentales e inundaciones



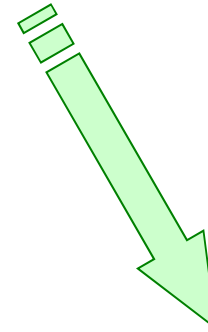
1511	Valley of Toranzo
September 1581	Valley of Toranzo
1682	Oruña
1730	
September 1736	69 victims
1737	93 victims
August 1834	Carriedo and Valley of Toranzo
September 1862	Renedo
October 1862	Puente Viego
October 1907	Puente Viego, Valley of Toranzo, Iruz, Villasevil and Ontaneda

➤ **Problema**

- ¿Cuándo se puede hablar de "cambio climático"?
- Dos respuestas diferentes pero no excluyentes



• Concepción estadística  
del clima



• Concepción sistémica  
del Clima

## ➤ CONCEPCIÓN ESTADÍSTICA

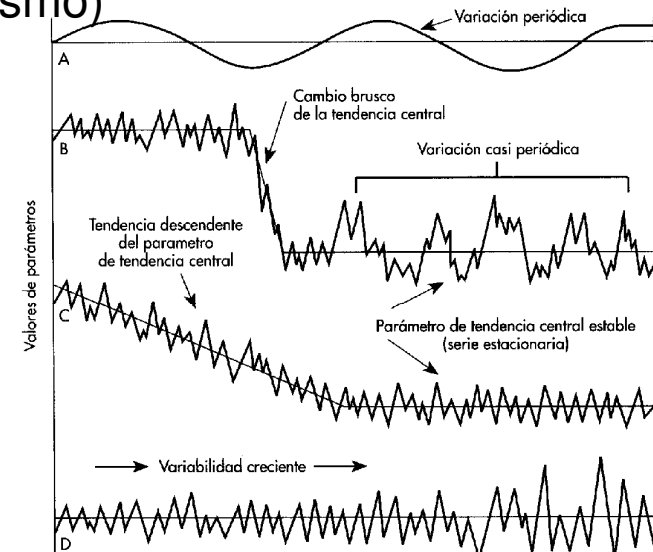
- Series climáticas definidas por
  - Parámetros de tendencia central (media, mediana...): expresión del estado de equilibrio
  - Parámetros de dispersión (desviación típica...): magnitud las fluctuaciones (expresión del dinamismo)

## ➤ Organización diversa registro climático

### • Fluctuaciones

- o Periódicas (ciclos anual y diario),
- o Casi periódicas (actividad solar, ENSO...)
- o Aleatorias

- Tendencias
- Puntos de cambio



**Cambio climático:**  
variación estadísticamente significativa y a largo plazo de los valores característicos de una serie

## ➤ **CONCEPCIÓN SISTÉMICA**

Cambio en alguno de los componentes del Sistema Climático de la suficiente magnitud como para alterar el equilibrio del conjunto dando lugar a un nuevo equilibrio tras un periodo de transición más o menos largo.

La anomalía en un componente suficientemente importante para rebasar el umbral de estabilidad del sistema

Génesis de anomalías en los restantes (mecanismos de realimentación positiva; incapacidad de los negativos para hacer que el sistema vuelva a su estado inicial)

### **!!!CAMBIO CLIMÁTICO!!!**

El sistema deja de ser estable: evoluciona hacia otra situación de equilibrio

El sistema no vuelve a su estado anterior.

El cambio afecta a la totalidad del sistema como consecuencia de la interrelación de sus componentes



## PROBLEMAS DE ESCALA

Definir umbrales espacio-temporales para diferenciar un cambio de una anomalía climática

### Dimensión temporal

“**Anomalía**” duración corta, se restauran las condiciones habituales (independientemente de su intensidad)

“**Cambio**”: fenómeno prolongado (varios milenios, pe. glaciaciones cuaternarias)

### Dimensión espacial:

“Anomalía”: regional, hemisférica

“Cambio”: global

Ambas dimensiones son esenciales: un cambio climático debe conducir a una nueva situación permanente y afectar a extensiones importantes

## INTRODUCCIÓN

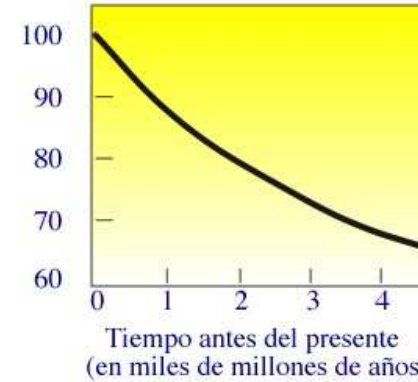
1. El sistema climático, el clima y los cambios climáticos
2. ¿Cambia el clima?
3. ¿Está cambiando nuestro clima?
4. ¿Podemos anticipar los cambios climáticos futuros?
5. ¿Qué podría pasar?

# La paradoja del “joven Sol” o el milagro de la Tierra

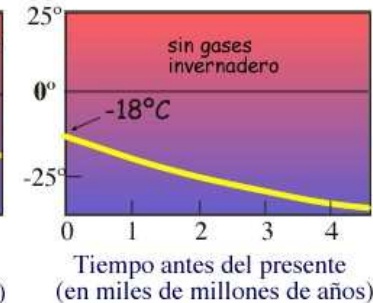
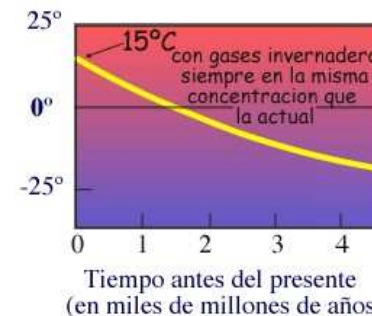
Aumento de la luminosidad del Sol (creación y combustión de helio) → **MAYOR ENERGÍA SOLAR**

Sin embargo, la temperatura media de la Tierra se ha mantenido constante

**CAUSA:** los gases invernadero (vapor de agua, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>).



Luminosidad del Sol con respecto al presente (en %)

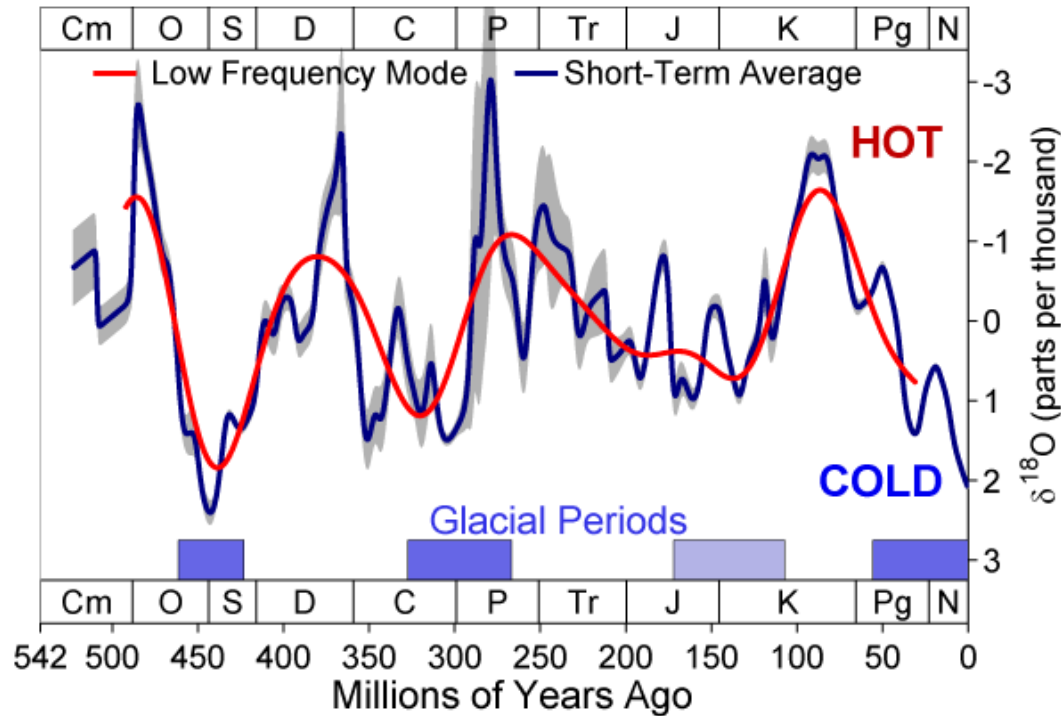


Temperatura media de la Tierra (°C)

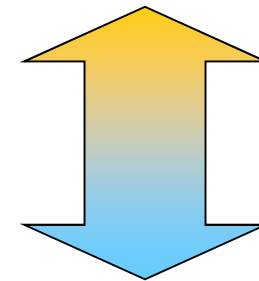
## Los últimos 600 millones de años

Fluctuaciones entre **dos estados** del sistema climático:

### Phanerozoic Climate Change

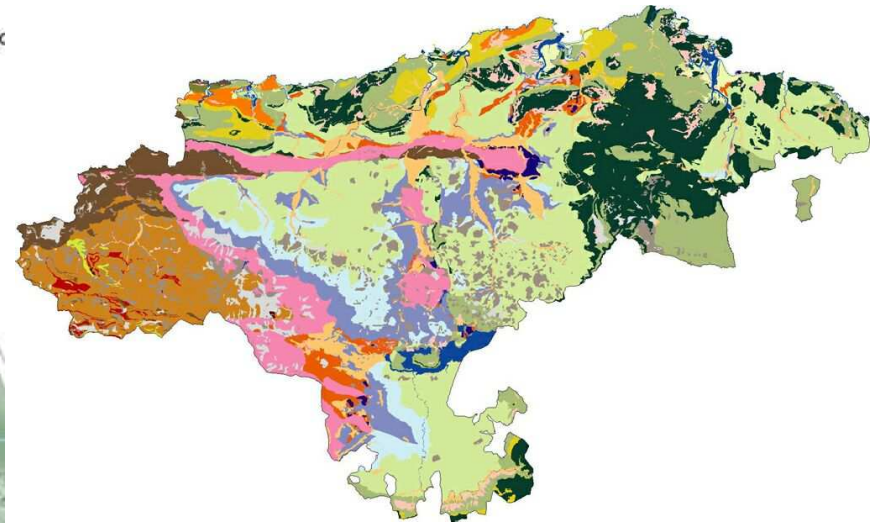
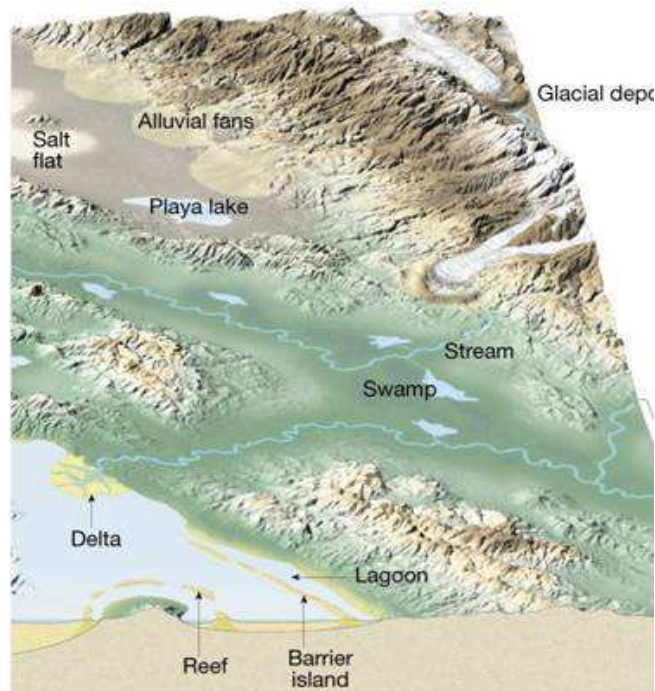


**Greenhouse:**  
temperaturas  
elevadas



**Icehouse:**  
temperaturas  
bajas  
(glaciaciones)

# El registro geológico

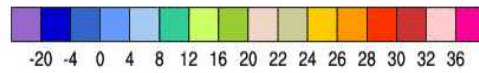
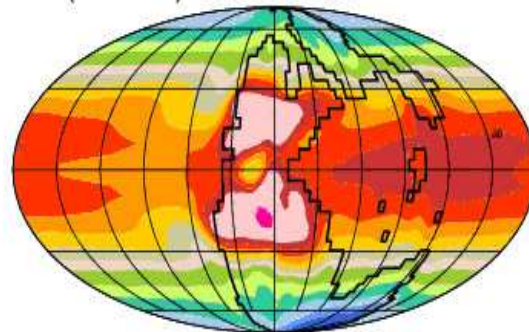


# El registro geológico en Cantabria

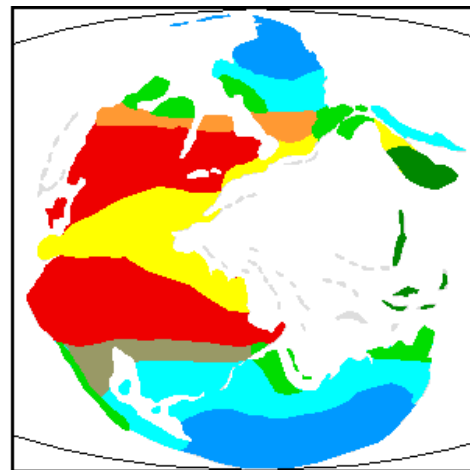


# El Triásico

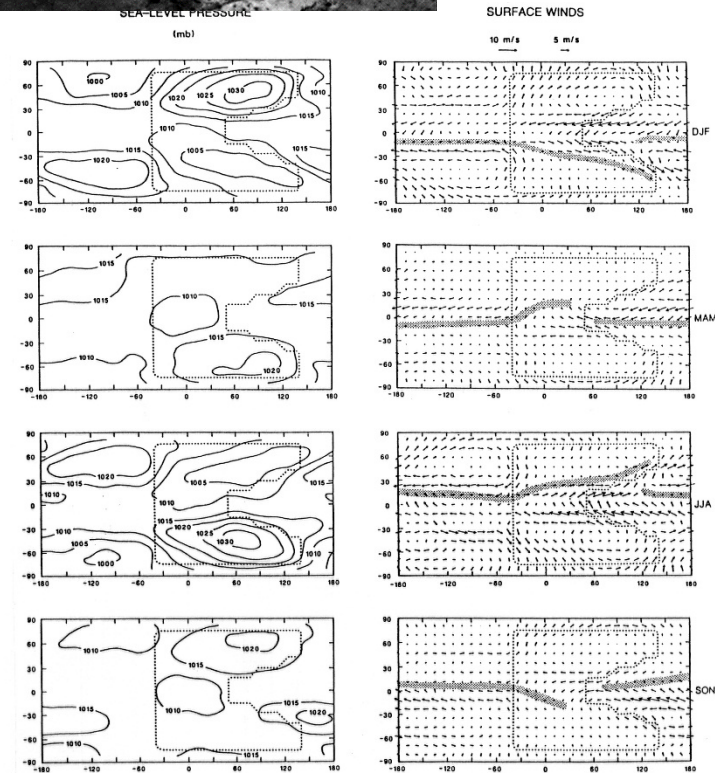
P/T (250 Ma)



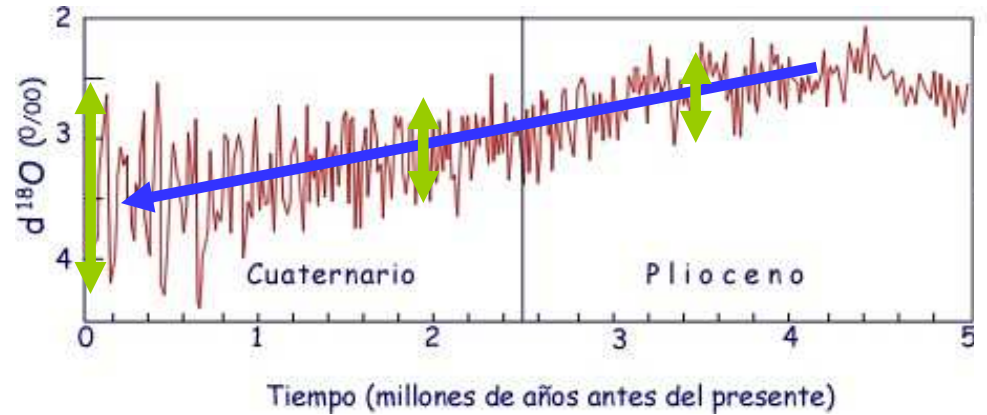
°C Surface Air Temperature



- 1 Tropical Everwet
- 2 Tropical Summerwet
- 3 Desert
- 4 Winterwet
- 5 Warm Temperate
- 6 Cool Temperate
- 7 Mid-Latitude Desert
- 8 Cold Temperate
- 9 Tundra



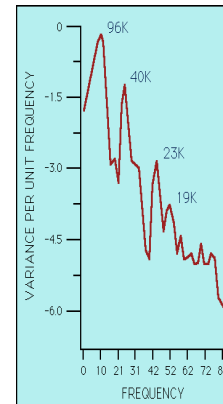
# El Cuaternario



**Enfriamiento** (formación de 2 casquetes continentales)

**Aumento de la variabilidad**

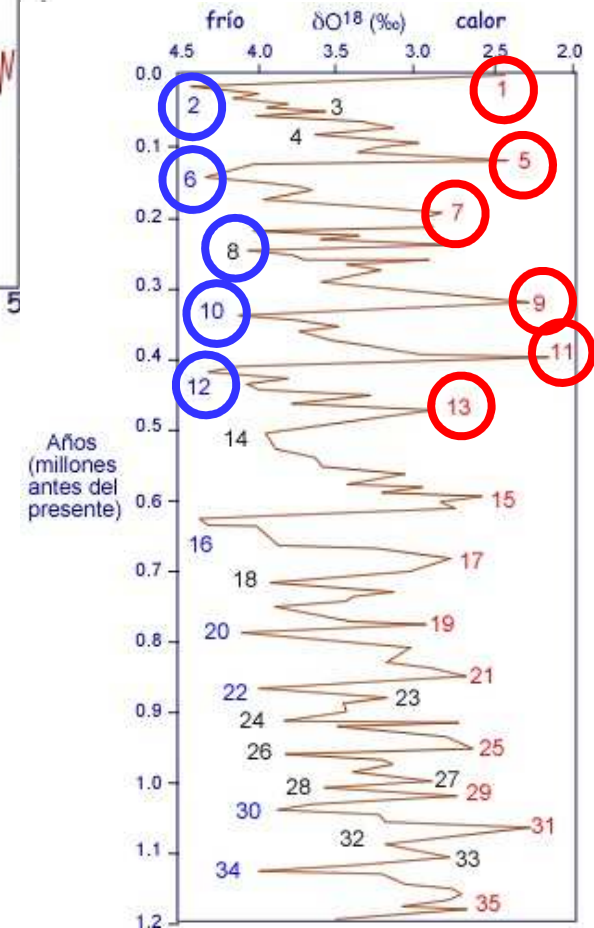
**Regularidad** de los ciclos



# Ciclos

glaciales

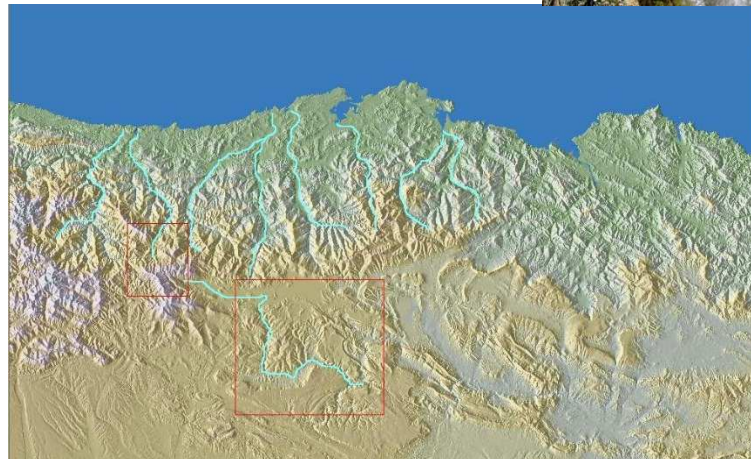
interglaciales







## Regímenes hidrológicos contrastados



# La última glaciación (WURM)

## Asimetría

Intensificación paulatina

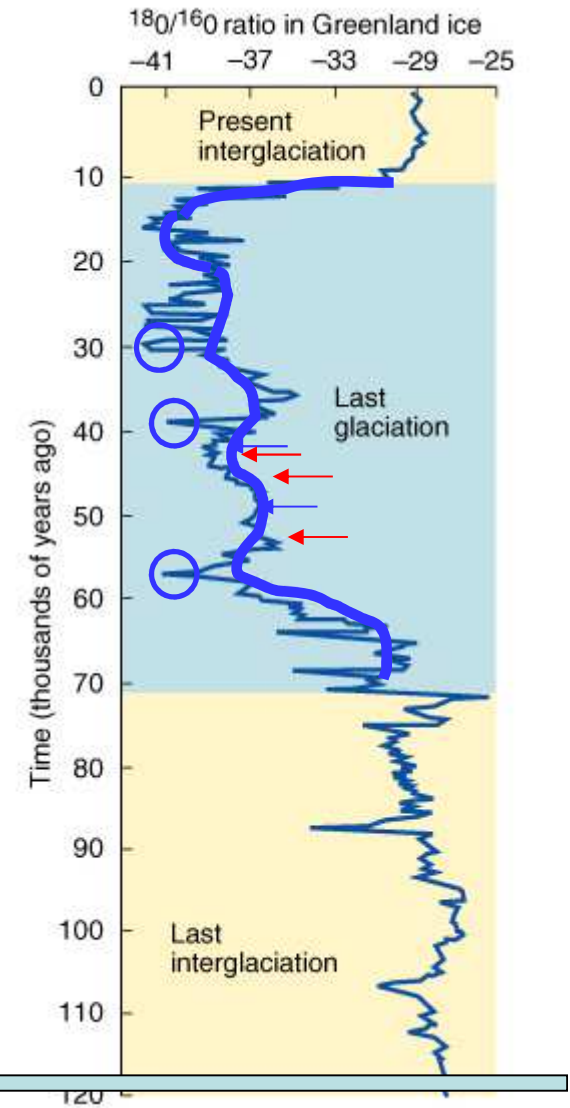
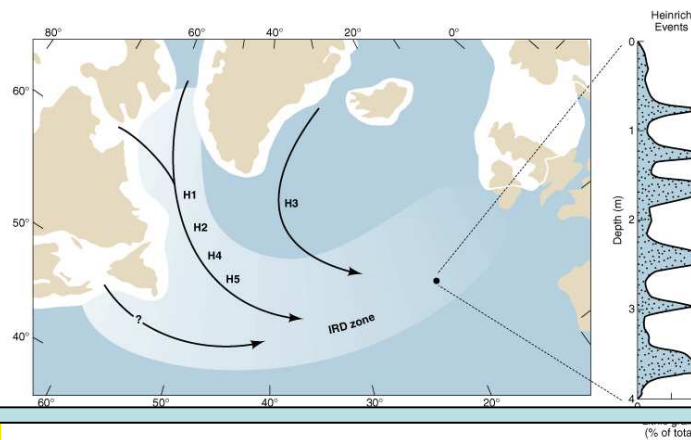
Climax final

Brusca mejoría

**Inestabilidad:** continuas fluctuaciones

Ciclo corto (1-3 ka) Dansgaard-Oeschger:  
**estadiales** (frío) e **interstadiales** (calor).

Ciclo largo (5-12 ka) Bond concluye  
con un **evento Heinrich**.

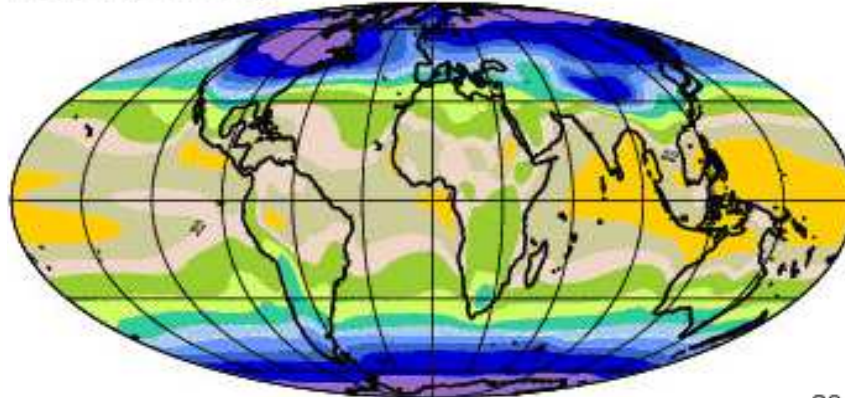


TIEMPO Y CLIMA

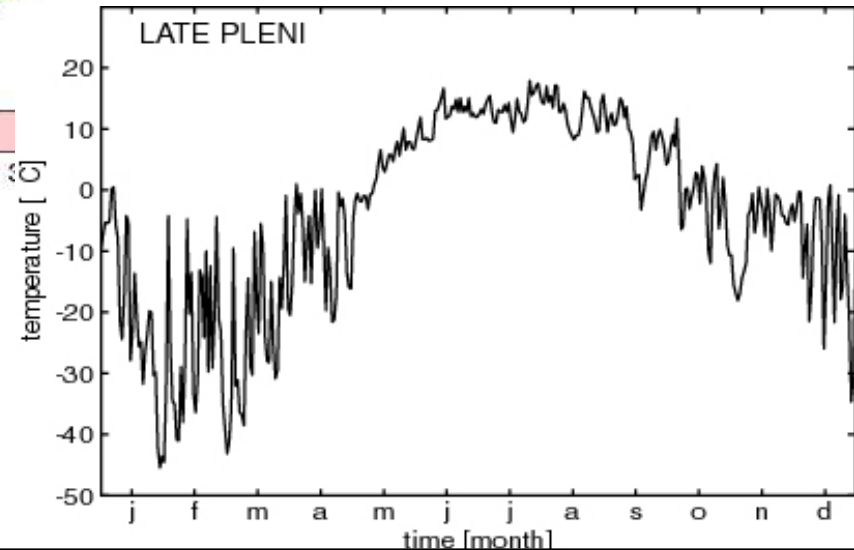
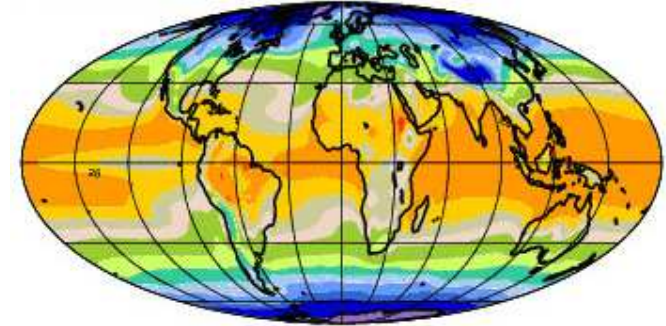
3<sup>er</sup> Curso MONOGRÁFICO

## Condiciones climáticas globales

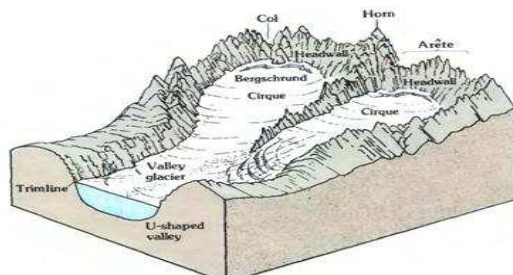
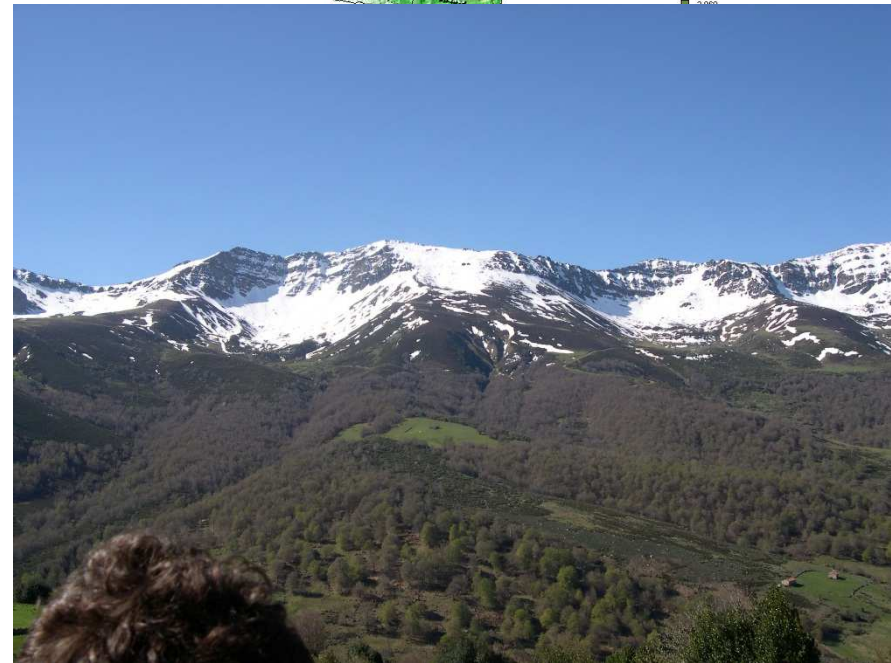
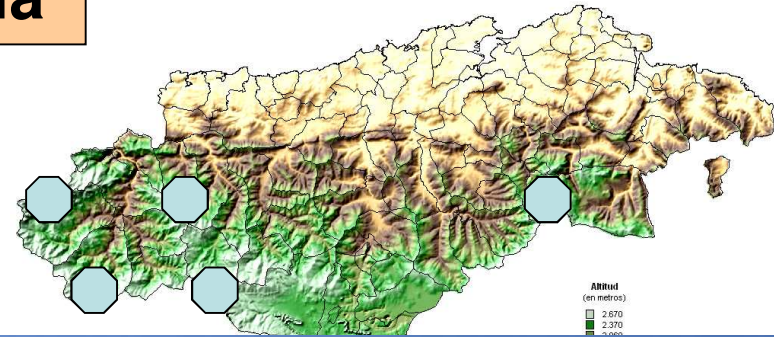
LGM (21 ka)



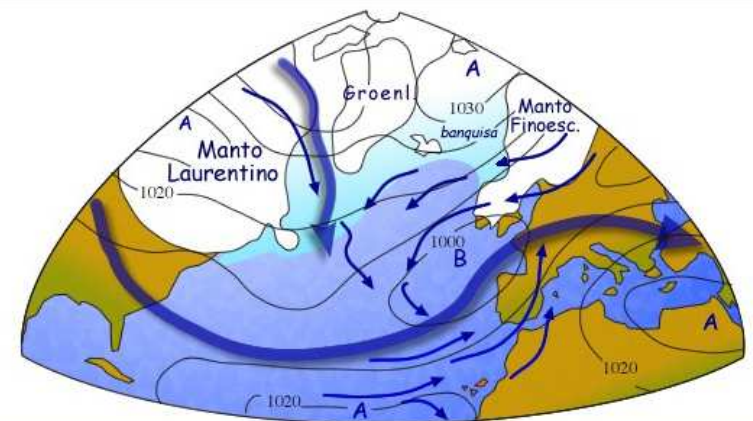
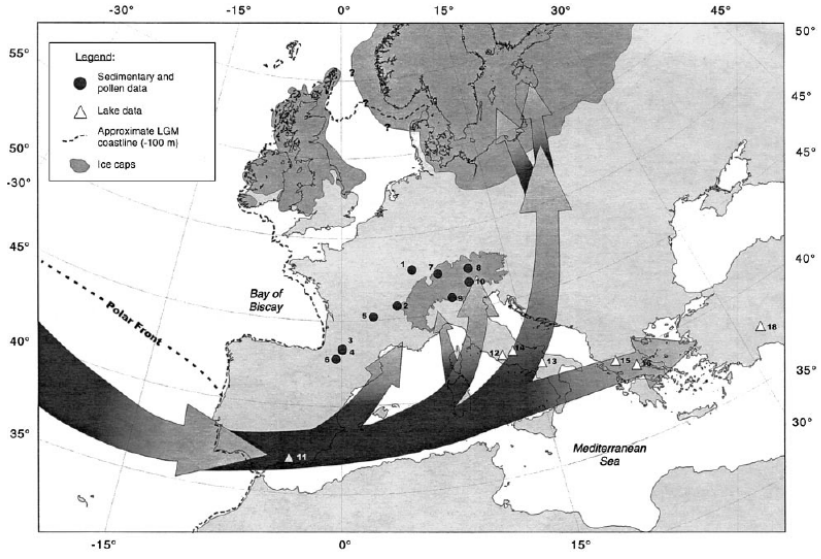
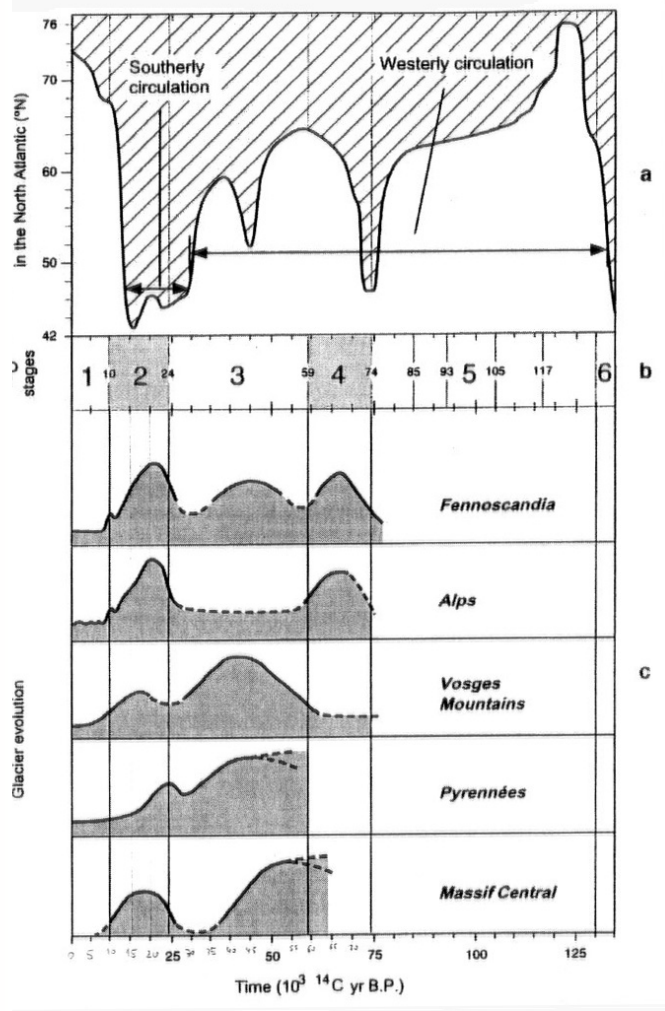
Present Day (1990s)



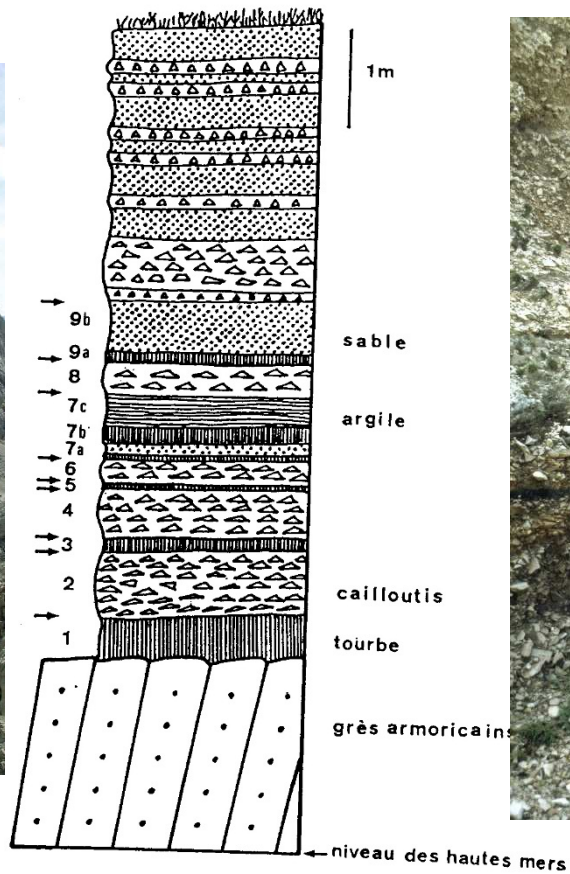
## Glaciarismo en Cantabria



# Algunas incognitas

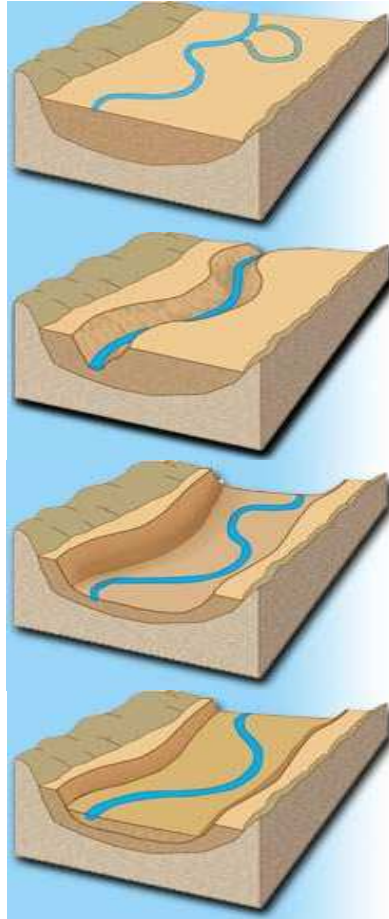


# Formas y depósitos periglaciares



La Franca 2

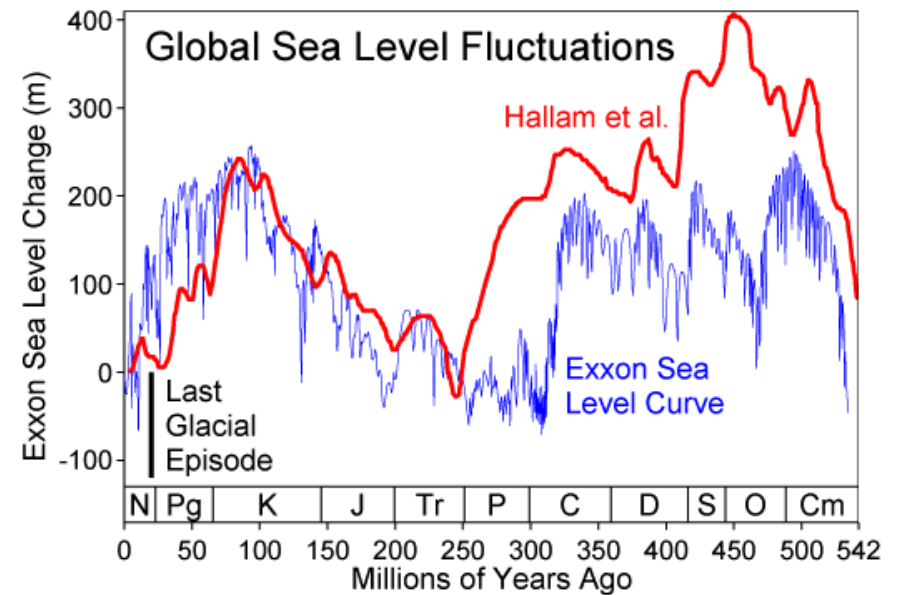
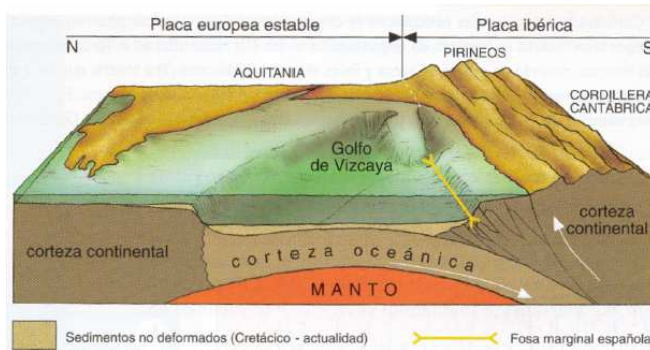
## Formas y depósitos fluviales



TIEMPO Y CLIMA

3<sup>er</sup> Curso MONOGRÁFICO

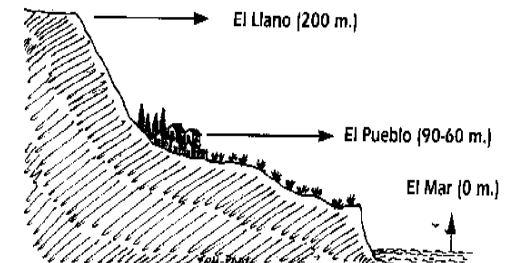
## Las rasas costeras



+/- 260 m

+/- 155 m

+/- 50-80 m

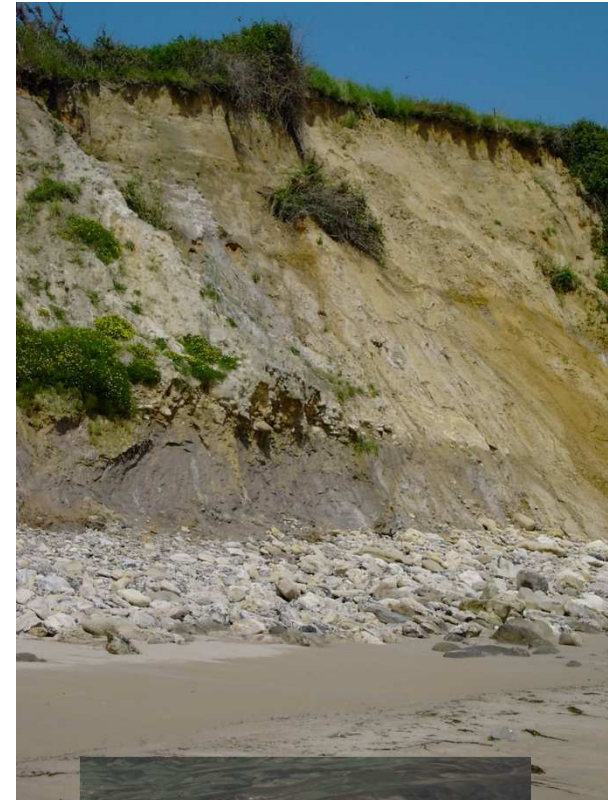
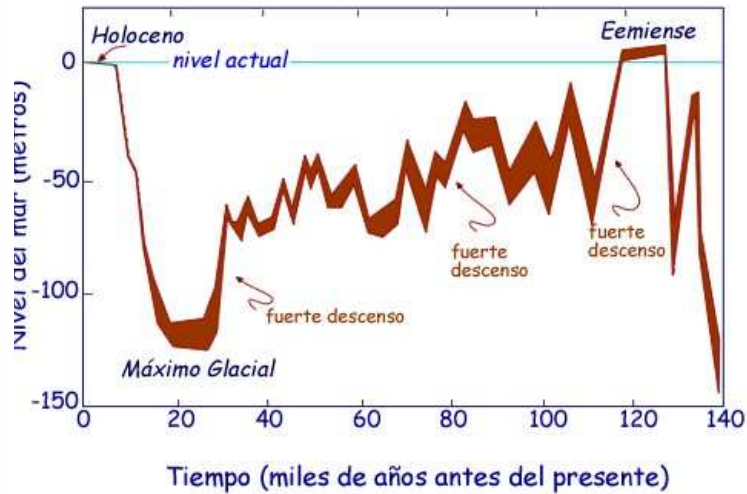


TIEMPO Y CLIMA

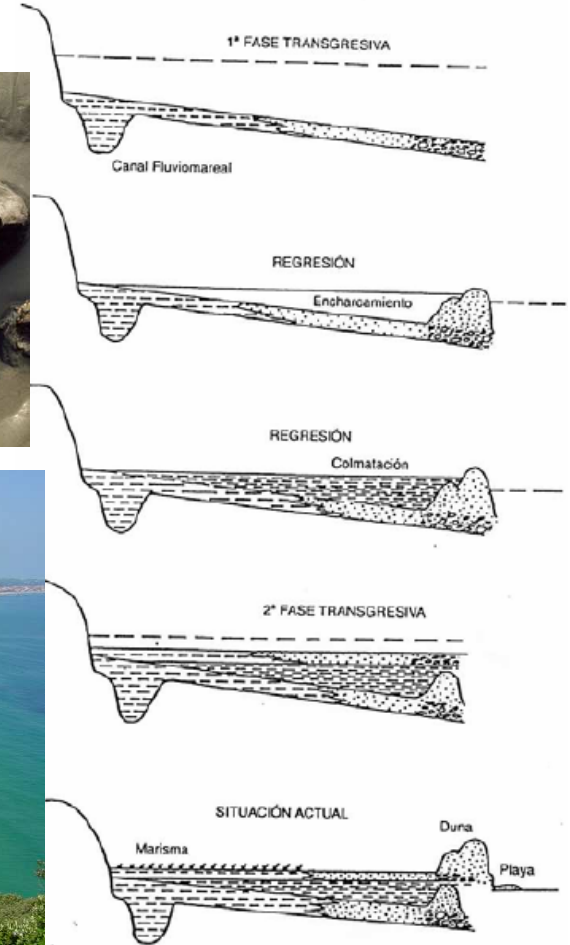
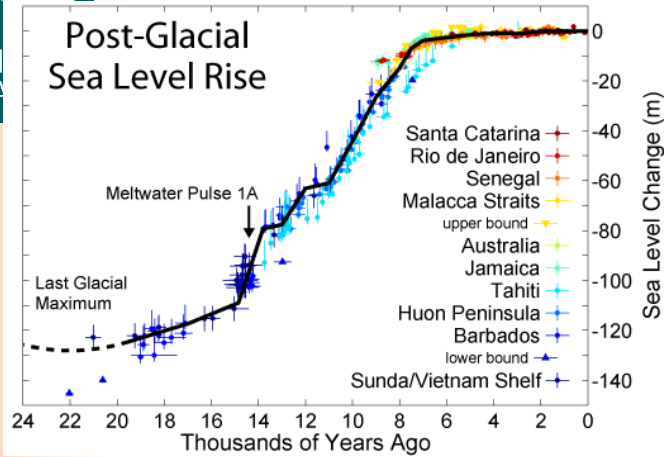
3er Curso MONOGRÁFICO



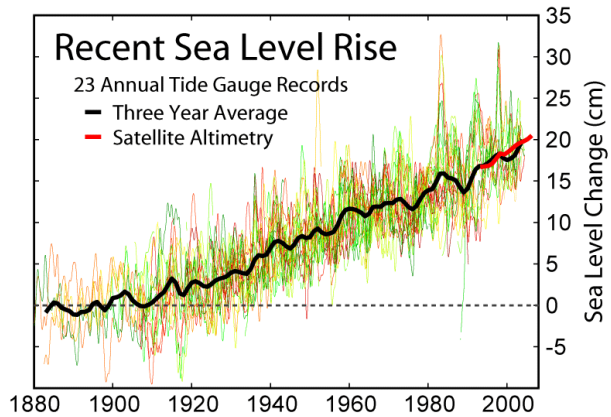
## Playas colgadas durante el Eemiense



## Transgresión holocena



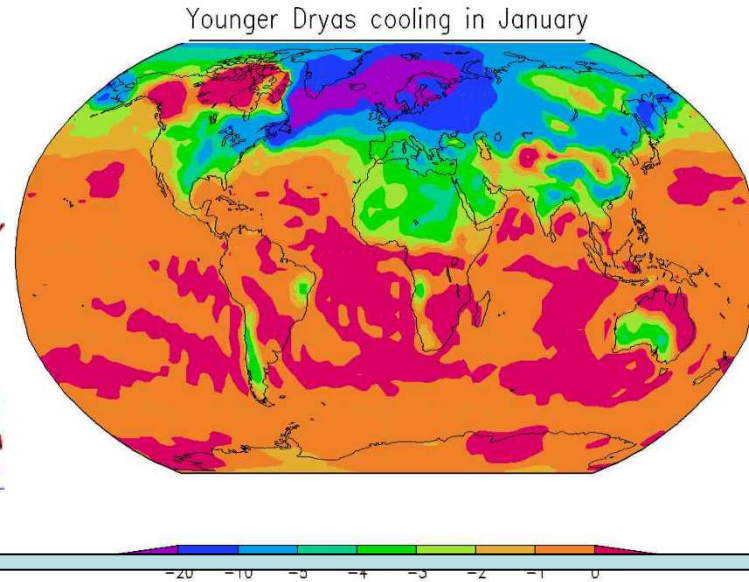
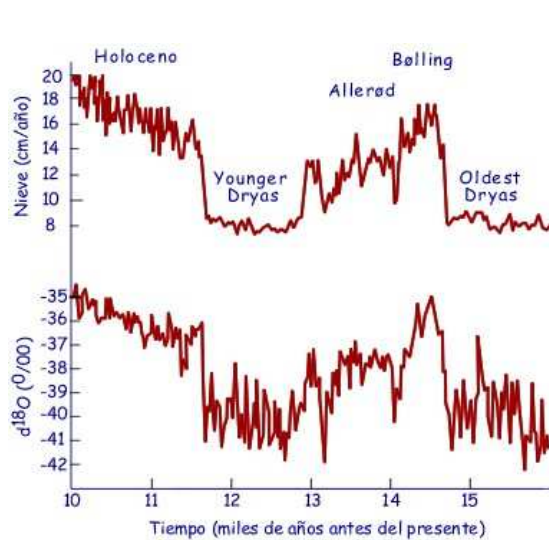
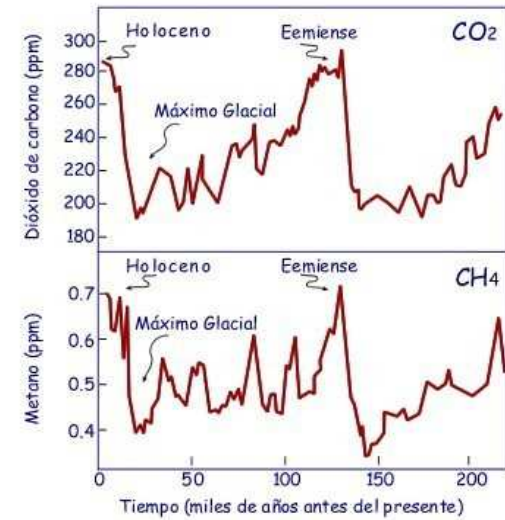
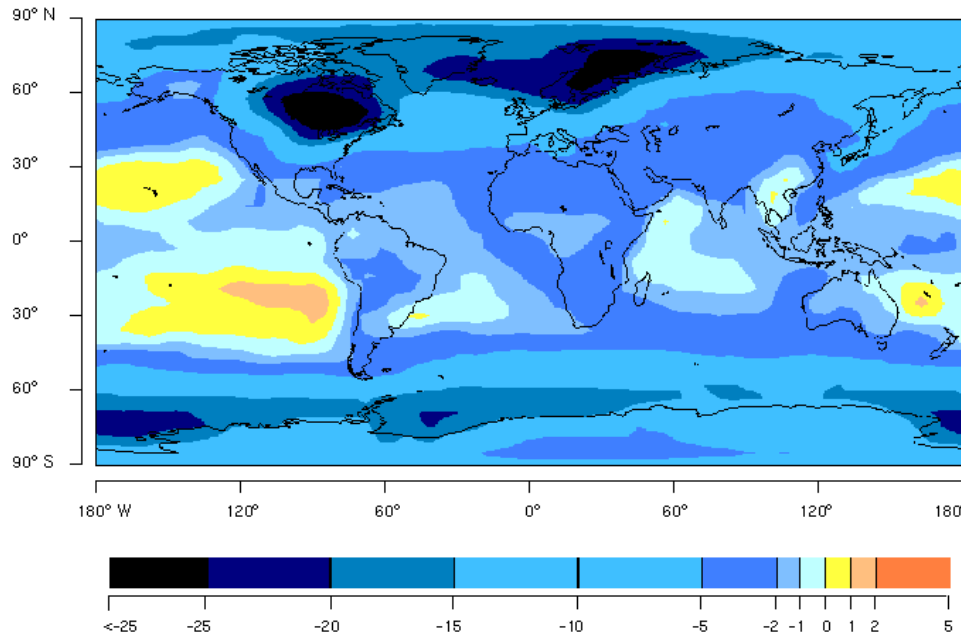
# La situación actual



TIEMPO Y CLIMA

3er Curso MONOGRÁFICO

<http://lood.firetree.net/>



TIEMPO Y CLIMA  
3<sup>er</sup> Curso MONOGRÁFICO



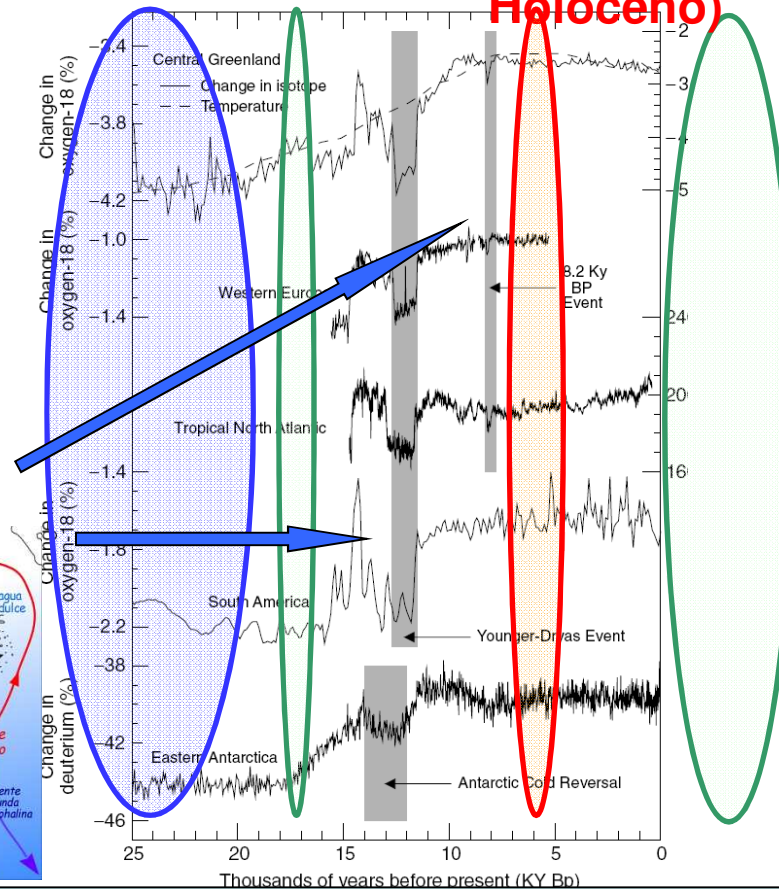
**Humedad y calor  
(Óptimo climático Holoceno)**

**Los últimos 10.000 años**

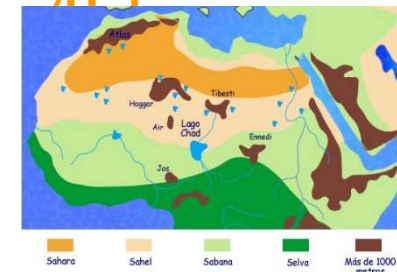
**Rápida deglaciación**

**Último máximo glaciar**

**Eventos fríos:**

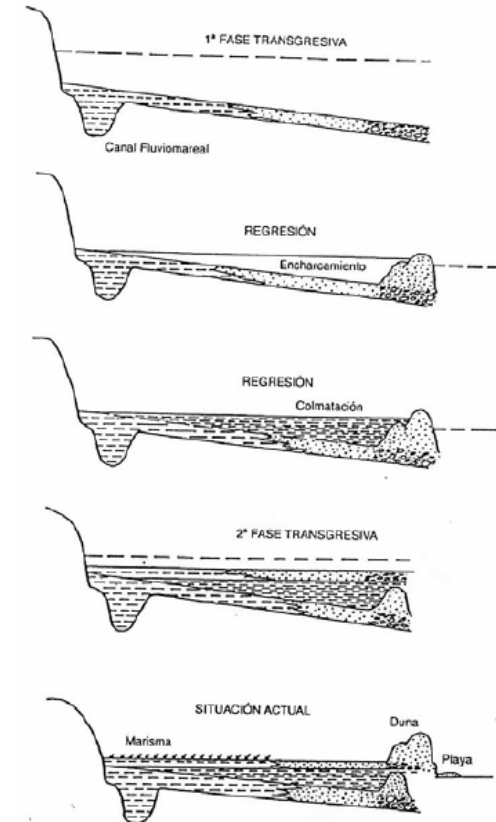


**Enfriamiento y aridificación**

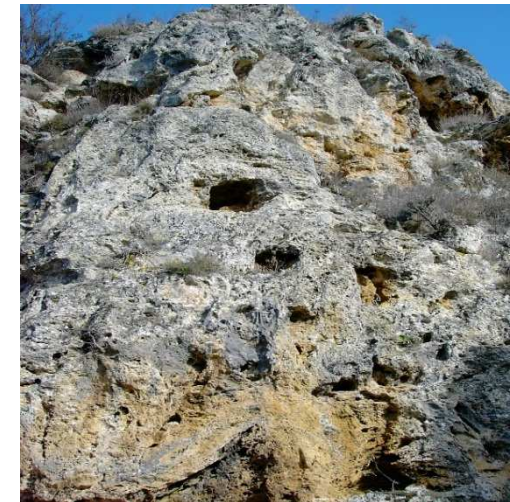
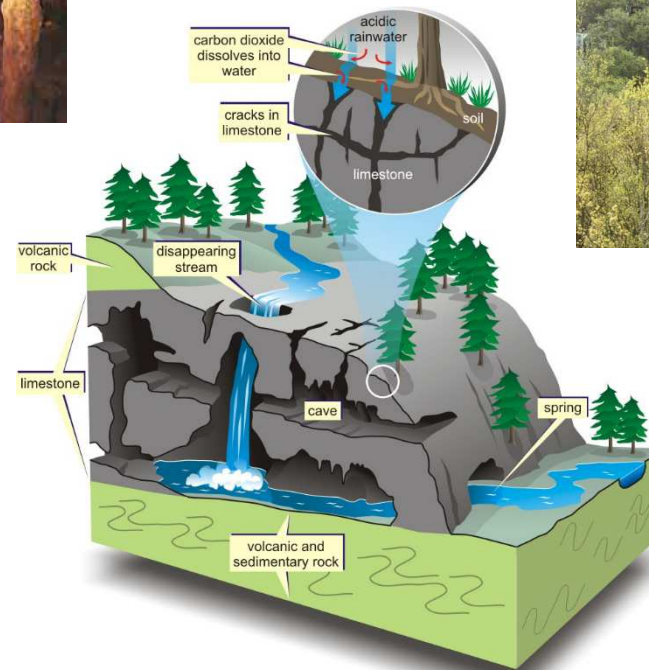




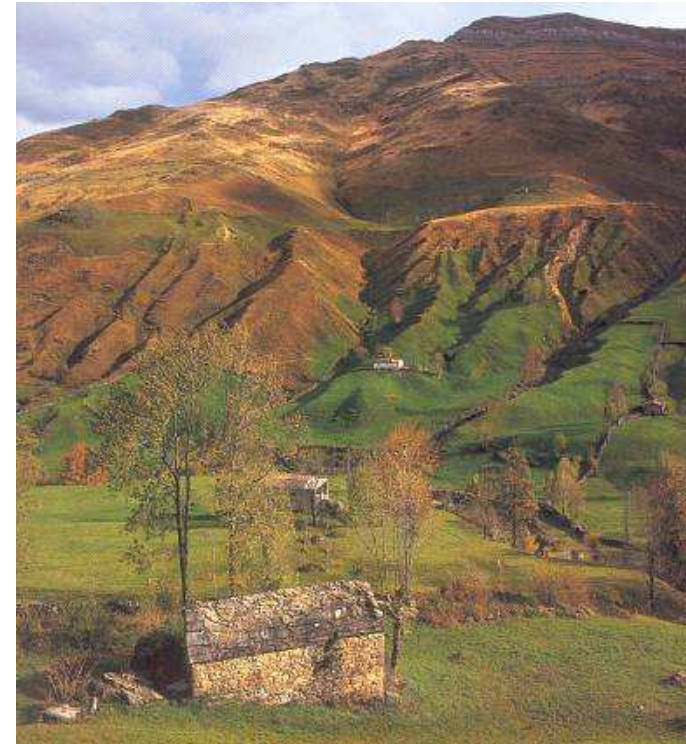
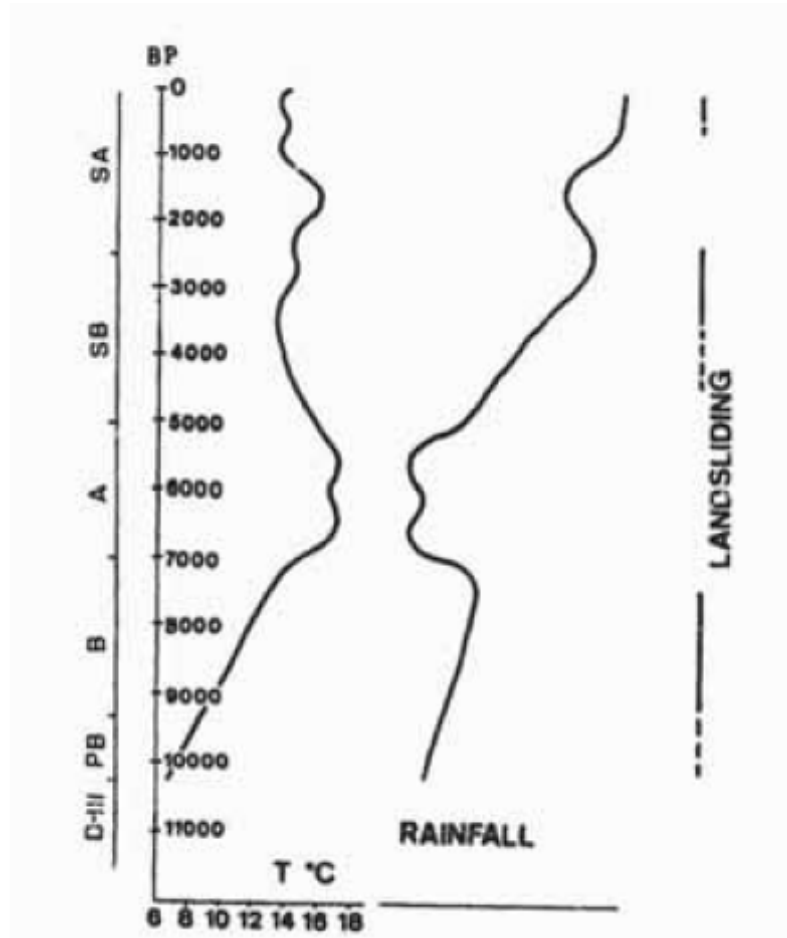
## Formaciones costras



## Espeleotemas y formaciones tobáceas



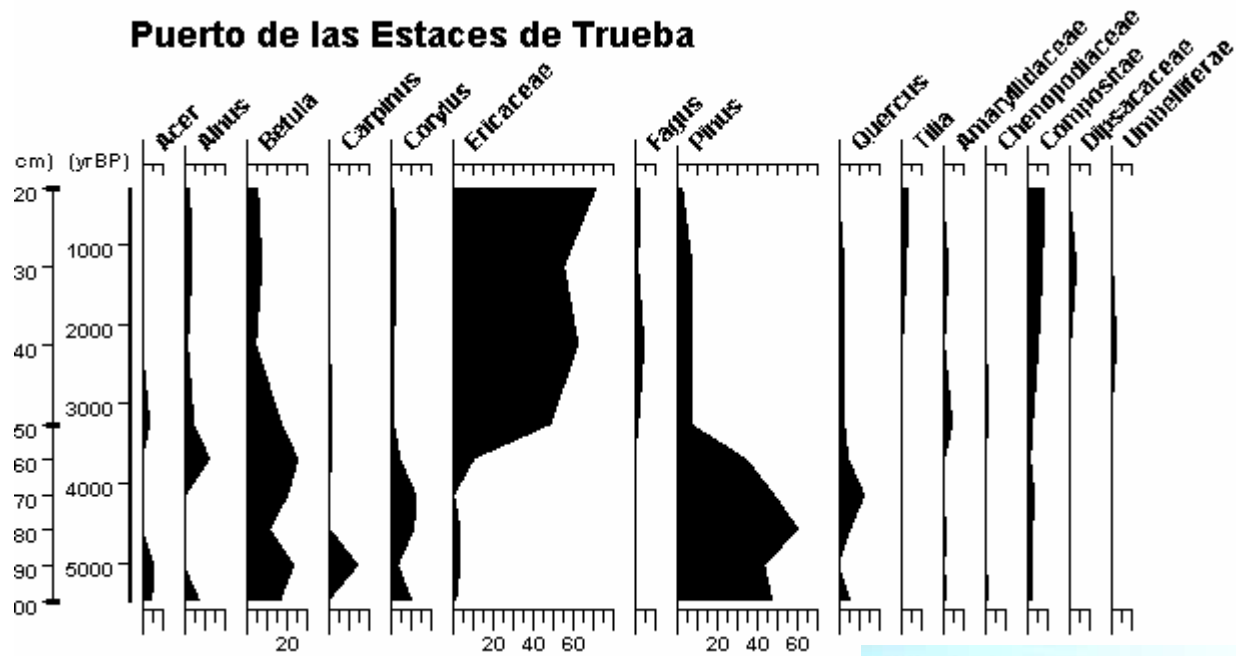
# Deslizamientos y formaciones tobáceas





# El paisaje vegetal "actual"

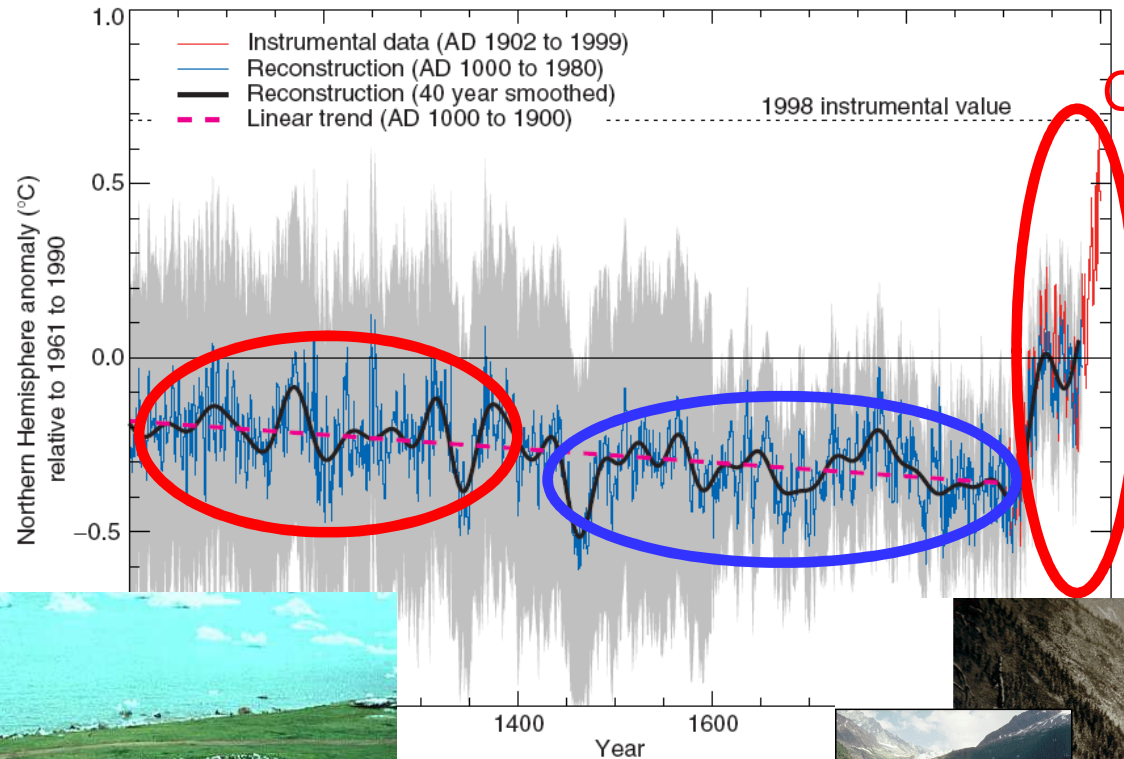
Puerto de las Estacas de Trueba



**Periodo cálido medieval**  
(1000-1300)

**El último milenio**

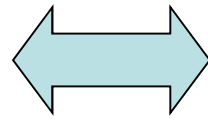
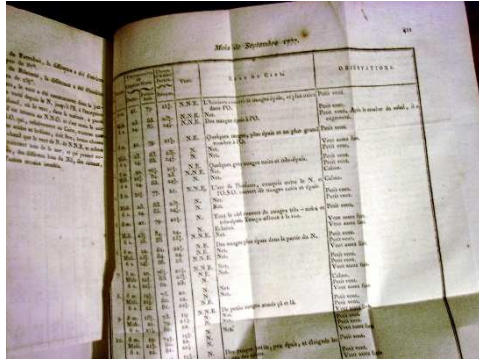
**Pequeña edad del hielo**  
(1600-1800)



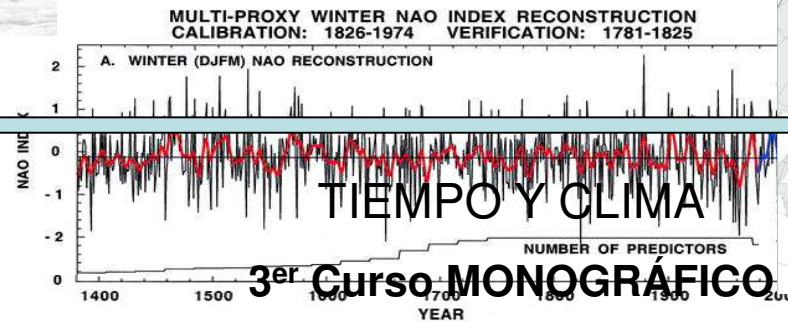
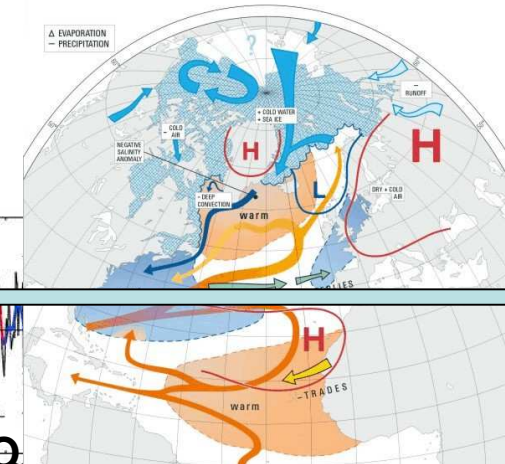
**Calentamiento s. XX**



# La PEH: temporales



NAO -

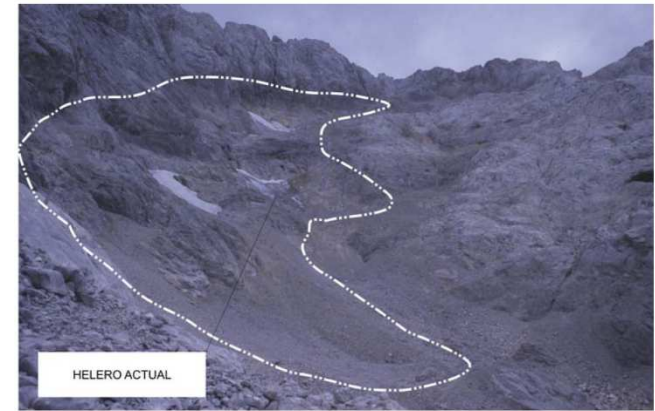


# El glaciario histórico en la C. Cantábrica

1892

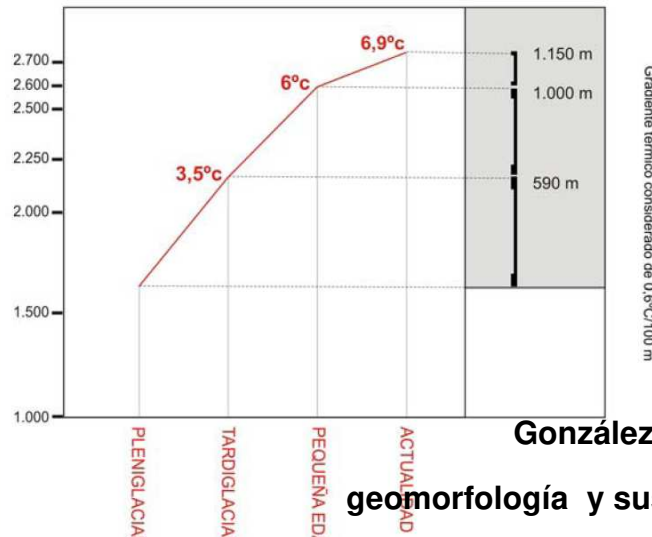


1932



a Palanca desde el norte, en 1892 (Foto Saint S. Vista de los circos del Traslambrión y la Palanca desde el norte, en 1932. En la foto se llega a los cuerpos de helos residuales en ambas localizaciones. (Foto de W. Rickmers titulada: The Group as seen from the Oriellos". En: Rickmers, W. (1932). The highlands of Cantabria. *The Alpine J.* 44, nº 244-245, pp. 216-236.

**HOY EN DÍA**

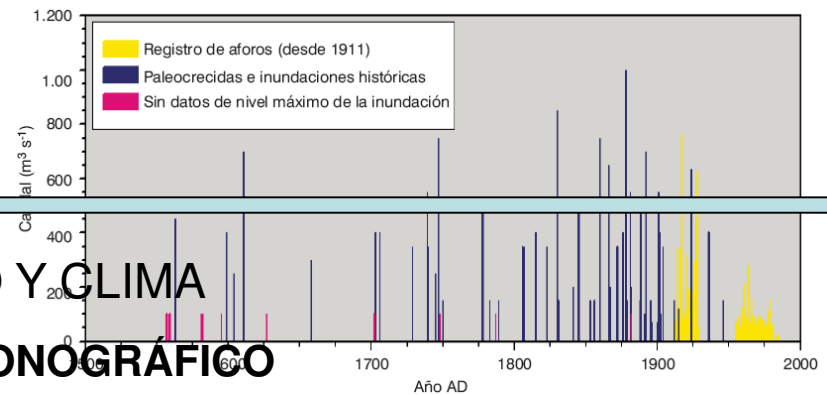
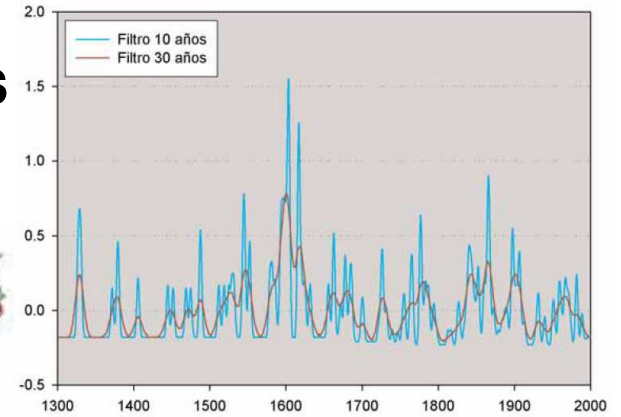
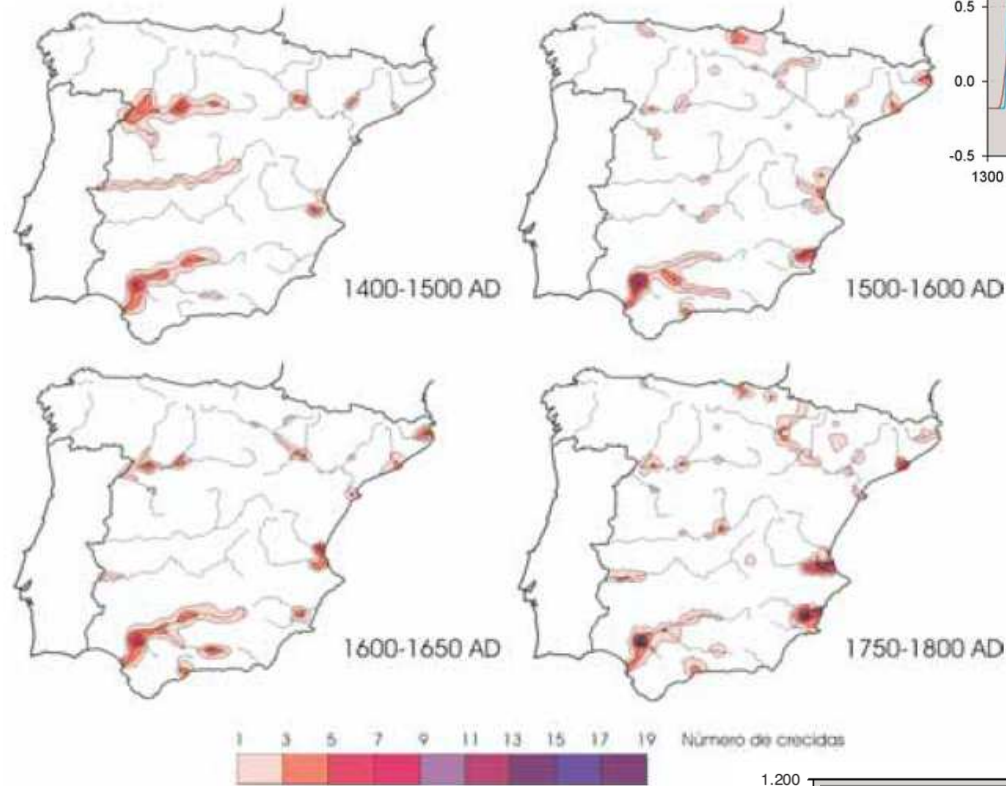


González Trueba, JJ (2007). El Macizo Central de los Picos de Europa: geomorfología y sus implicaciones geocológicas en la alta montaña cantábrica

TIEMPO Y CLIMA

3er Curso MONOGRÁFICO

# La Pequeña Edad de Hielo: las inundaciones



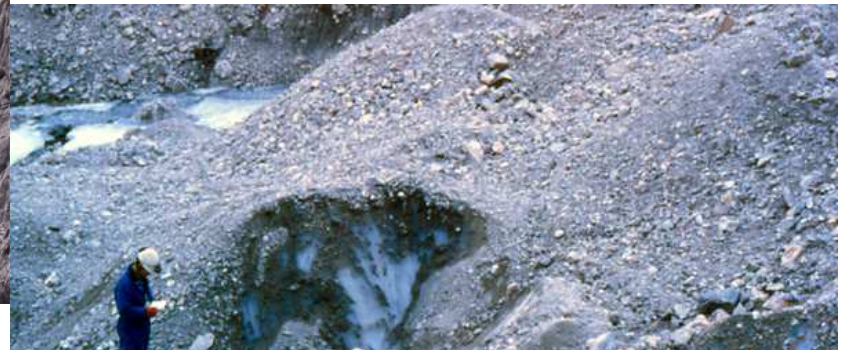
TIEMPO Y CLIMA

3er Curso MONOGRAFICO

## La Pequeña Edad de Hielo



¿Glaciarismo histórico en Picos de Europa?



TIEMPO Y CLIMA  
3er Curso MONOGRÁFICO

# 2

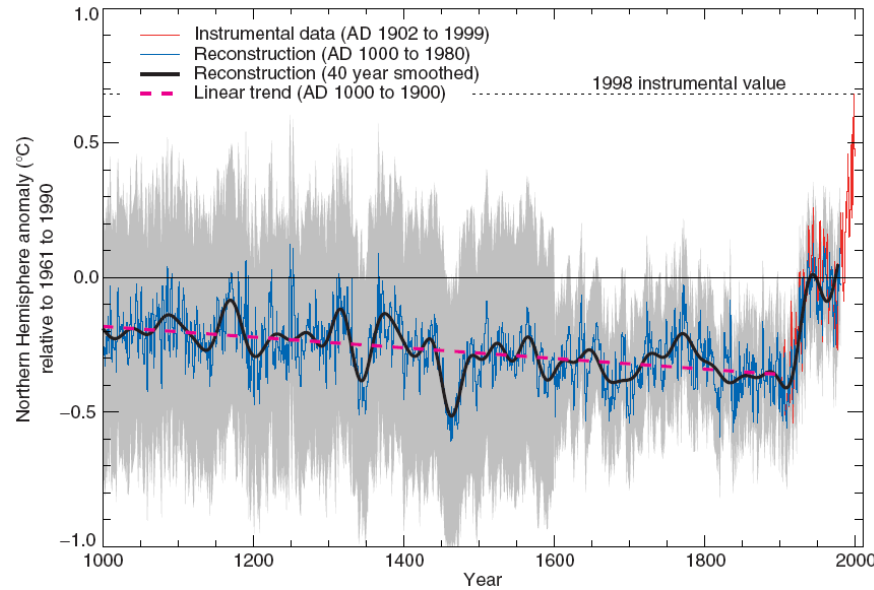
1. ¿Cambia el clima?

2. ¿Está cambiando nuestro clima?

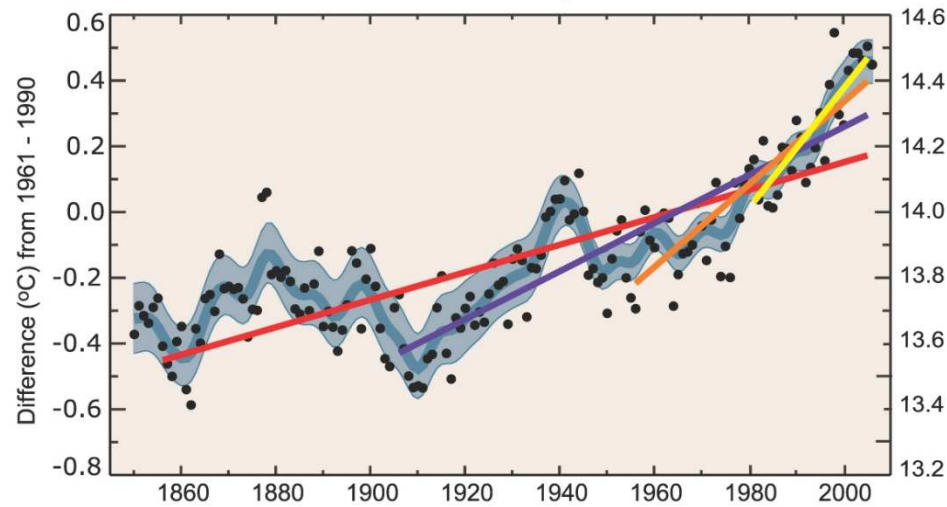
3. ¿Podemos anticipar los cambios climáticos futuros?

4. ¿Qué podría pasar?

# El calentamiento del planeta



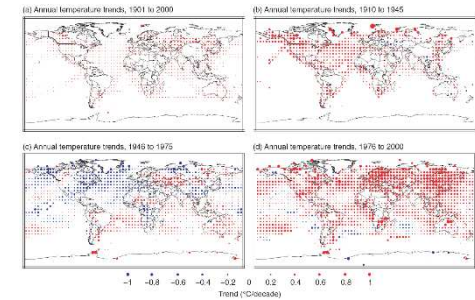
Global Mean Temperature



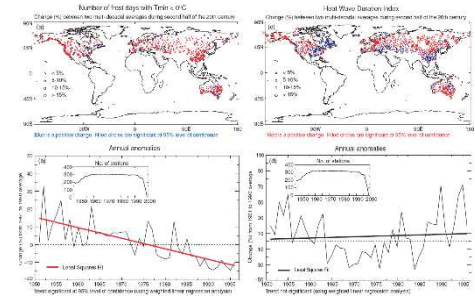
Period (Years)	Rate (°C per decade)
25	0.177 ± 0.052
50	0.128 ± 0.026
100	0.074 ± 0.018
150	0.045 ± 0.012

● Annual mean  
 — Smoothed series  
 ■ 5-95% decadal error bars

Especialmente contrastado: máximo en latitudes medias y polares HN



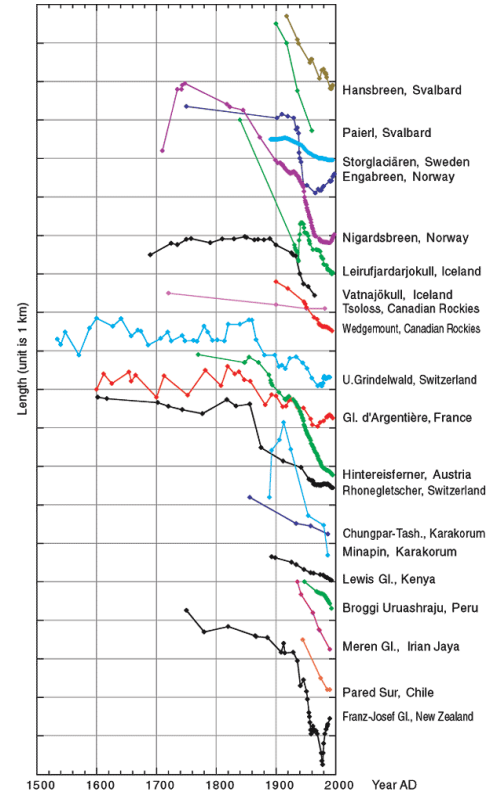
Afecta a las temperaturas nocturnas



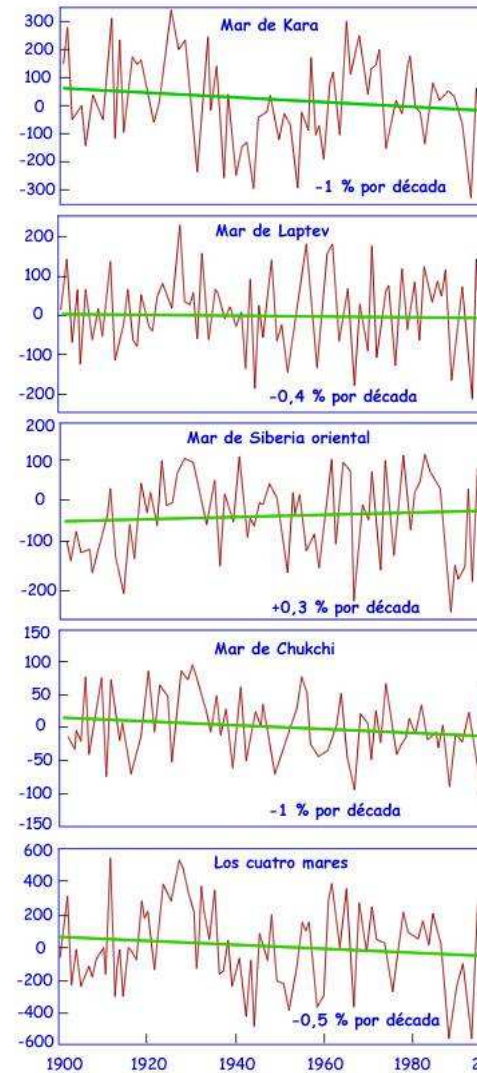


# Este calentamiento no es sólo instrumental: contracción de la criosfera

Los glaciares de montaña



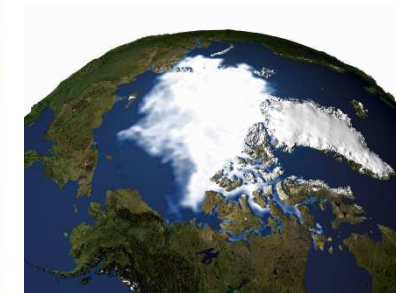
EL ártico

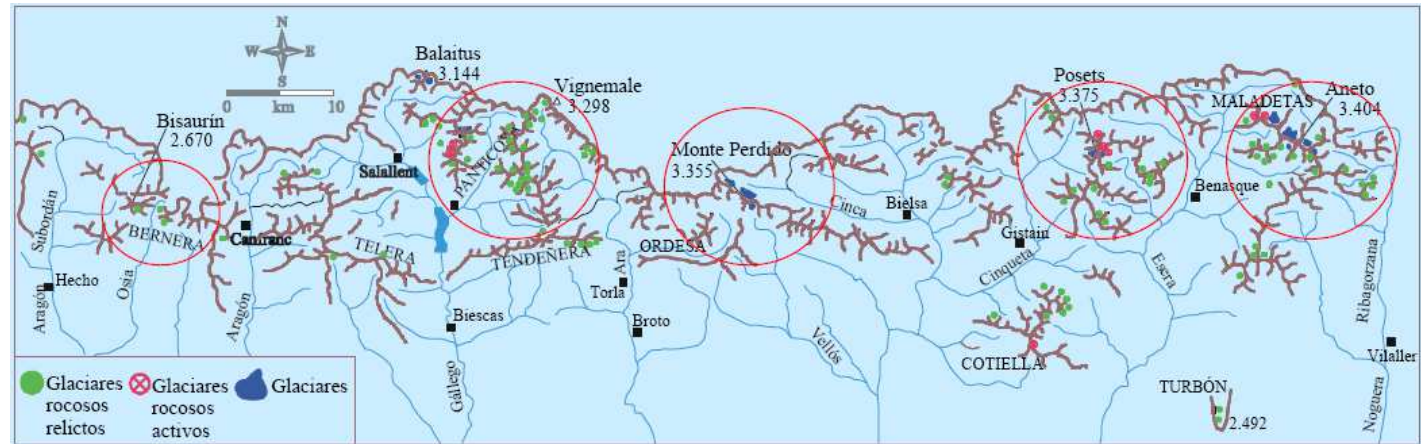


1973



2003

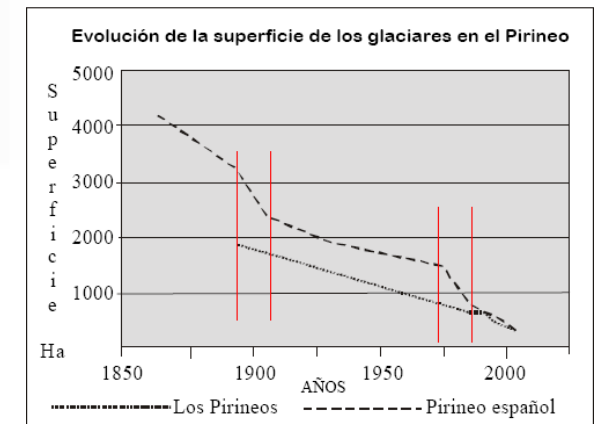




## El glaciario pirenaico

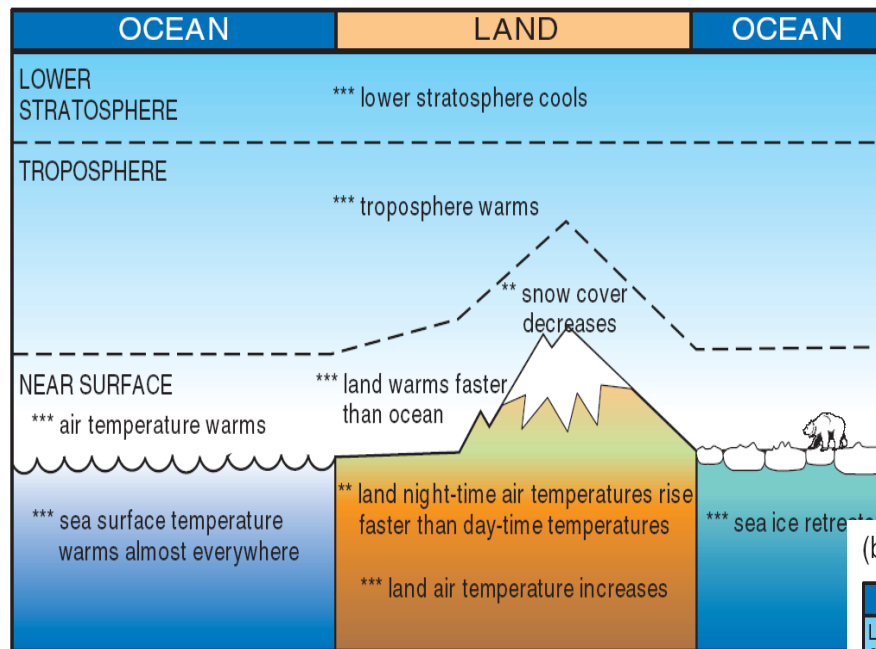
Evolución de la superficie glaciaria estimada en el macizo de monte perdido entre 1894 y 2000 (Programa ERHIN)

Macizo de MONTE PERDIDO	Año 1894	Año 1991	Año 2000
Ha	556	90	44



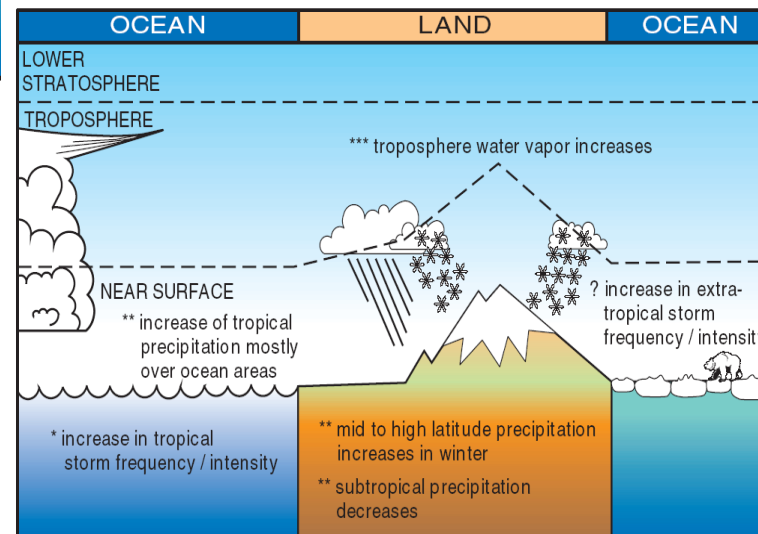
© LUCEN BEEY MAIZE PIRENEEN

(a) Temperature indicators



# Otros indicadores

(b) Hydrological and storm-related indicators



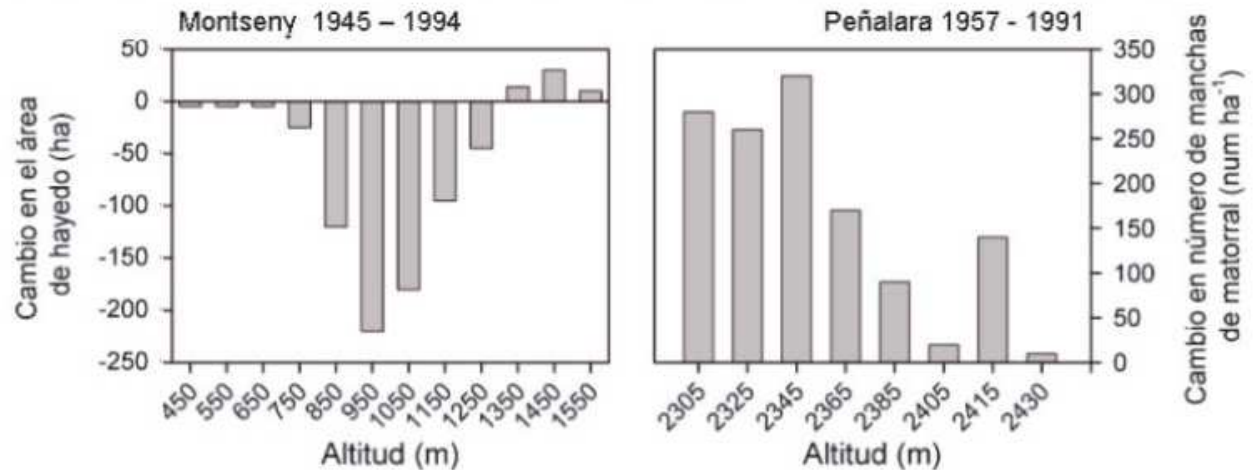
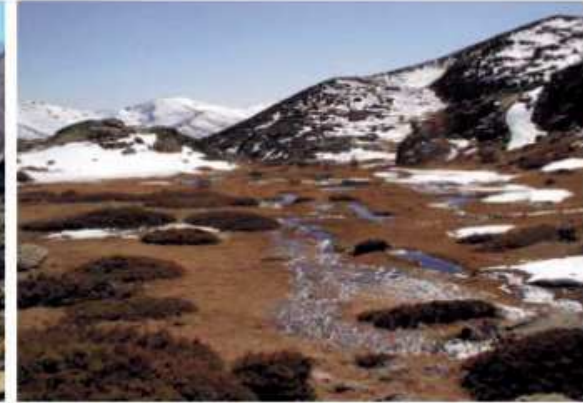
- \*\*\* virtually certain  
(many models analysed and all show it)
- \*\* very likely  
(a number of models analysed show it, or change is physically plausible and could readily be shown for other models)
- \* likely  
(some models analysed show it, or change is physically plausible and could be shown for other models)
- ? medium likelihood  
(a few models show it, or results mixed)

# Evidencias biogeográficas

Hayas y brezos en Les Agudes, 1703 m

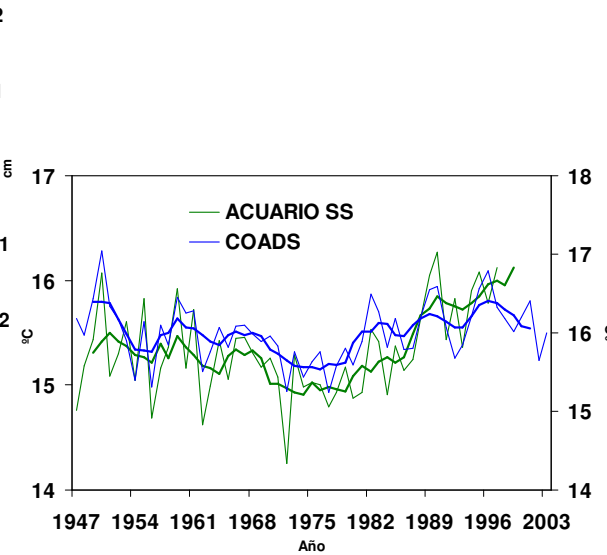
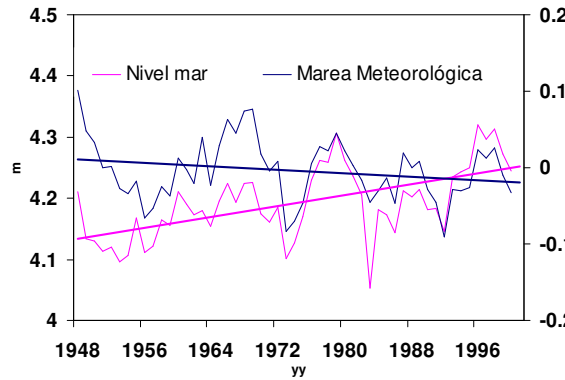
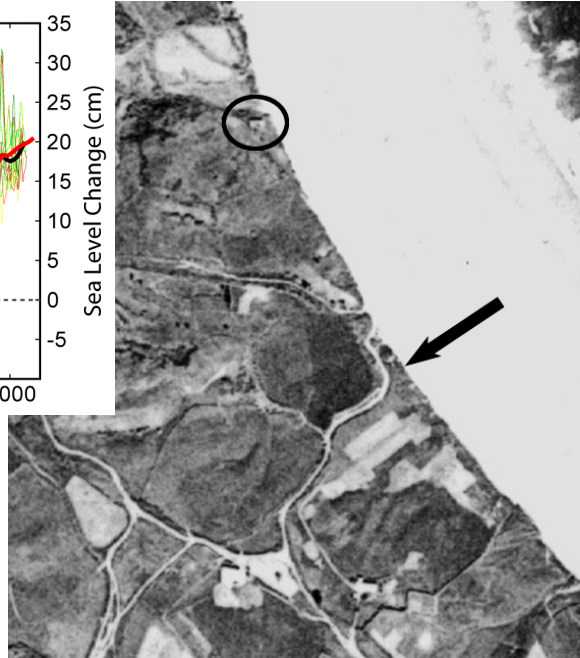
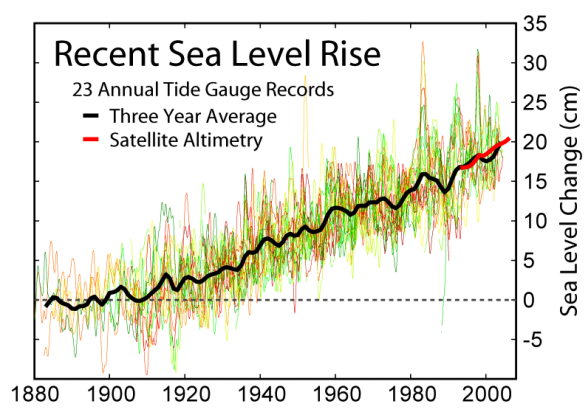


Enebros en las Lagunas de Peñalara, 2200 m



**Fig. 5.** Migración altitudinal de formaciones vegetales en dos montañas (Macizo del Montseny, Barcelona, y Peñalara, Sierra de Guadarrama, Madrid) durante la segunda mitad del siglo XX. En Montseny se muestran los cambios en la superficie de los bosques de hayas para un periodo de 49 años de progresivo calentamiento y cambios en los usos del suelo (tomado de Peñuelas y Boada 2003. *Global Change Biol.* 9: 131-140), mientras que en Peñalara se muestra el incremento en el número de manchas de arbustos por hectárea tras 34 años (elaborado a partir de promedios de los transectos SW-NE y W-E, De SANZ ELORZA *et al.* (2003): *Ann. Bot.* 92: 273-280).

# Evidencias oceanográficas



## INTRODUCCIÓN

1. El sistema climático, el clima y los cambios climáticos
2. ¿Cambia el clima?
3. ¿Está cambiando nuestro clima?
4. ¿Podemos anticipar los cambios climáticos futuros?
5. ¿Qué podría pasar?

## Las causas “naturales” de los cambios climáticos

PREMISA: el Sistema Climático es un gran motor que funciona gracias a la energía solar...

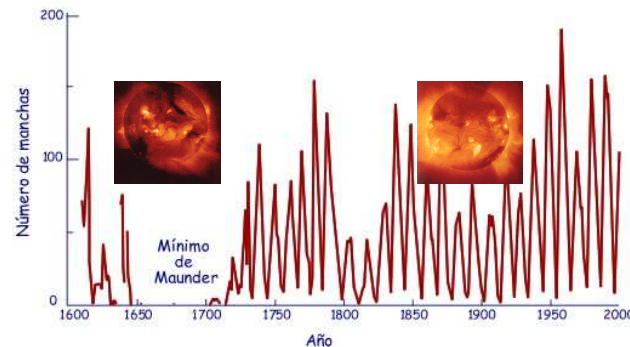
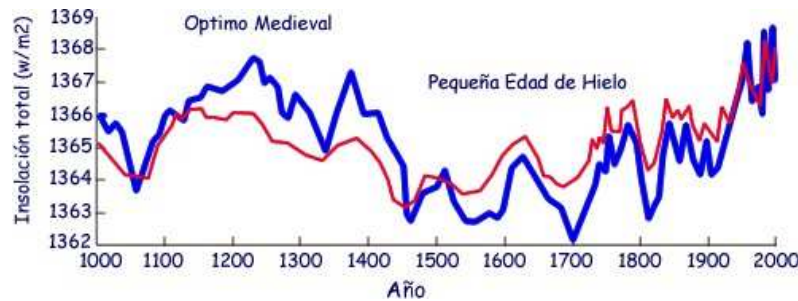
Su funcionamiento es alterado si lo hace su combustible

**CONSECUENCIA:**  
**¡¡¡UN CAMBIO CLIMÁTICO!!!**

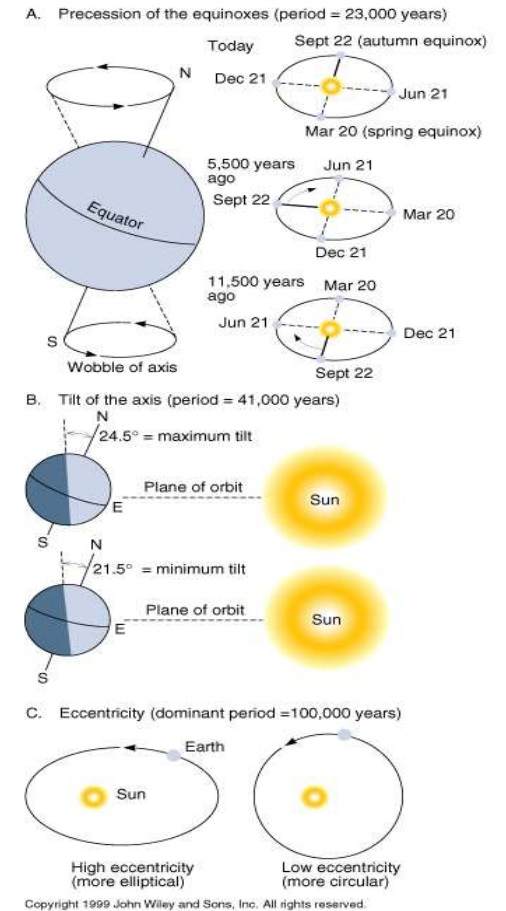
# Variaciones en la cantidad y/o calidad de la radiación solar que alcanza la atmósfera

Alteraciones en la energía recibida por cambios en la geometría de la órbita terrestre.

Alteraciones de la cantidad suministrada por la fuente emisora (actividad solar)



Alteraciones en la energía interceptada tras su recorrido por el espacio exterior



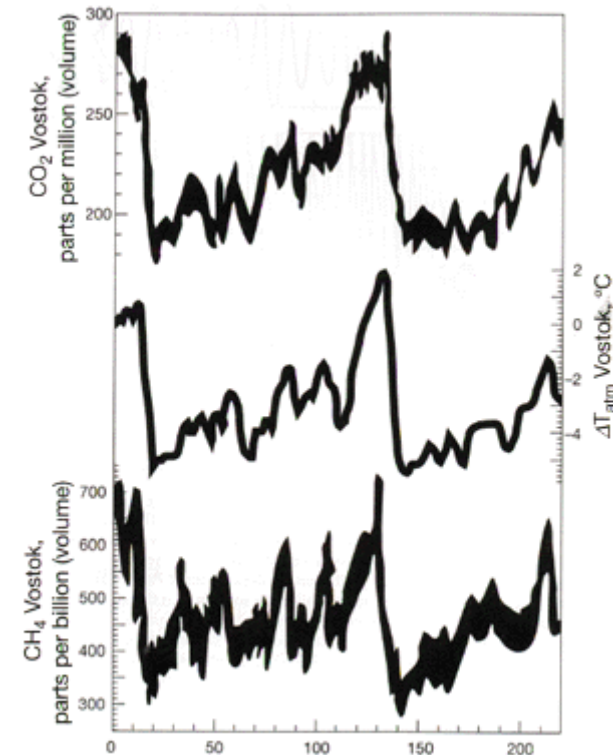


## Variaciones en la composición de la atmósfera (absorción, transmisión o reflexión)

Variaciones en el grado de turbidez de la atmósfera -aerosoles y productos volcánicos-



Variaciones en la concentración de gases invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, vapor de agua)

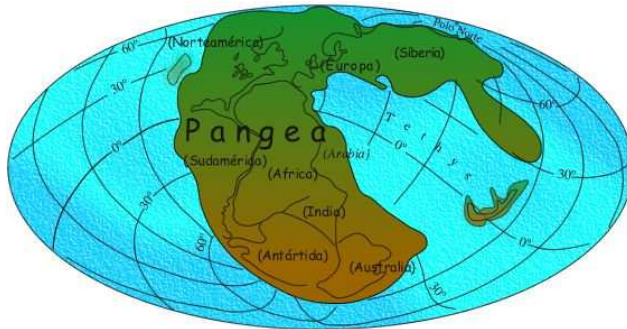


TIEMPO Y CLIMA

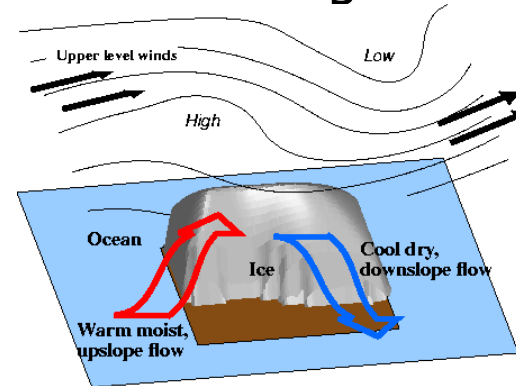
3<sup>er</sup> Curso MONOGRÁFICO

# Variaciones en la distribución de la energía sobre la superficie del planeta

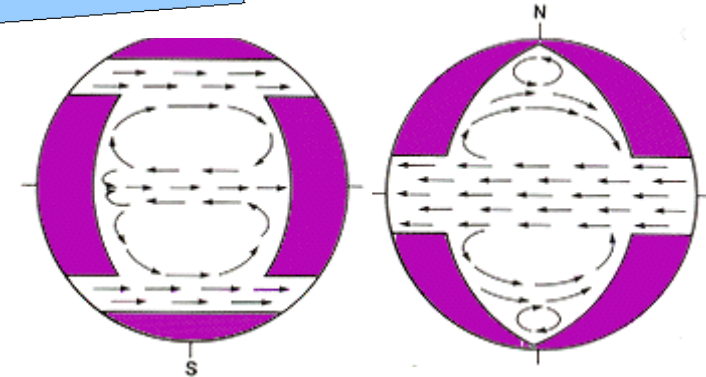
La tectónica de placas.



La criosfera y la dinámica glaciar



Circulación oceánica.



# ¿Qué ha causado el incremento térmico del s. XX?

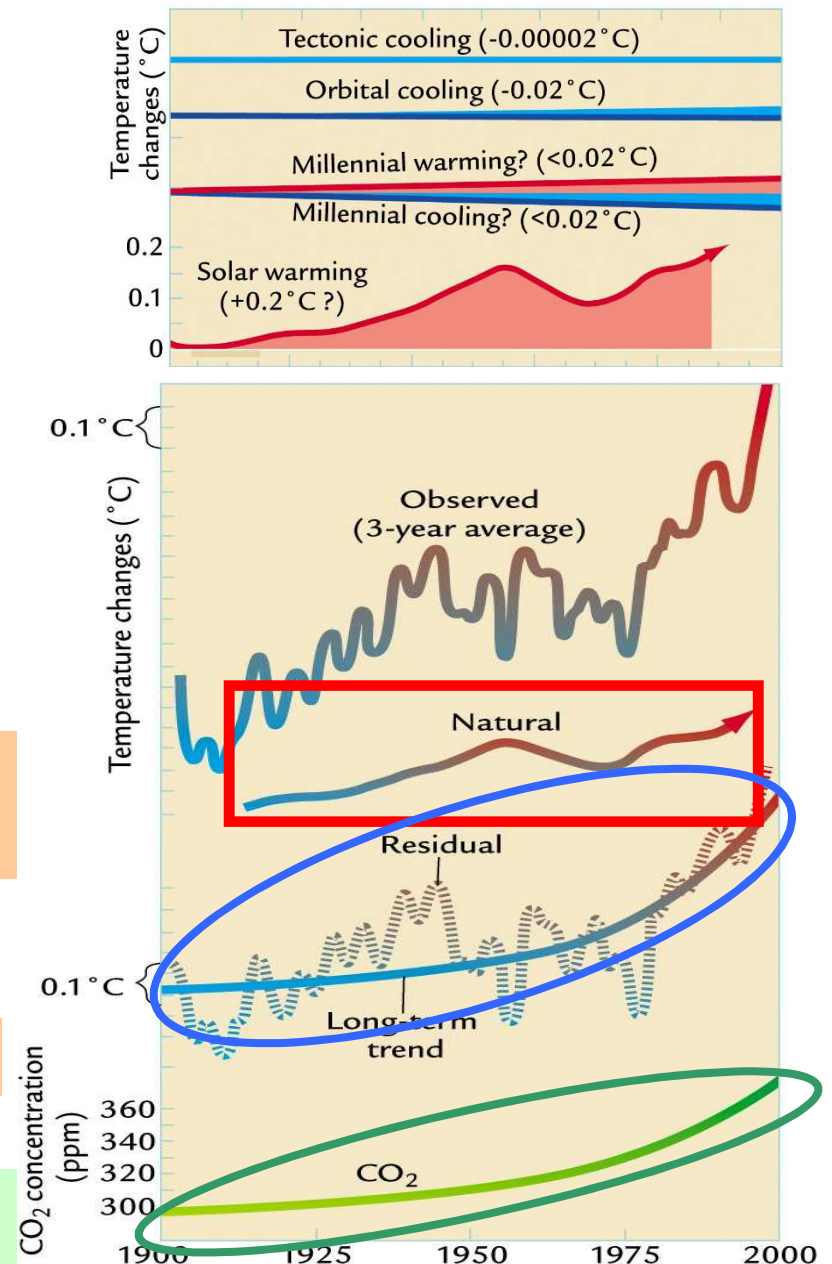
Circulación oceánica  
("Gran Anomalía de Salinidad")  
Erupciones volcánica  
(Agung, Pinatubo)  
Fluctuaciones en la  
energía solar ( $C_{14}$ )...

**!!! Tendencia por causas naturales!!!**

+

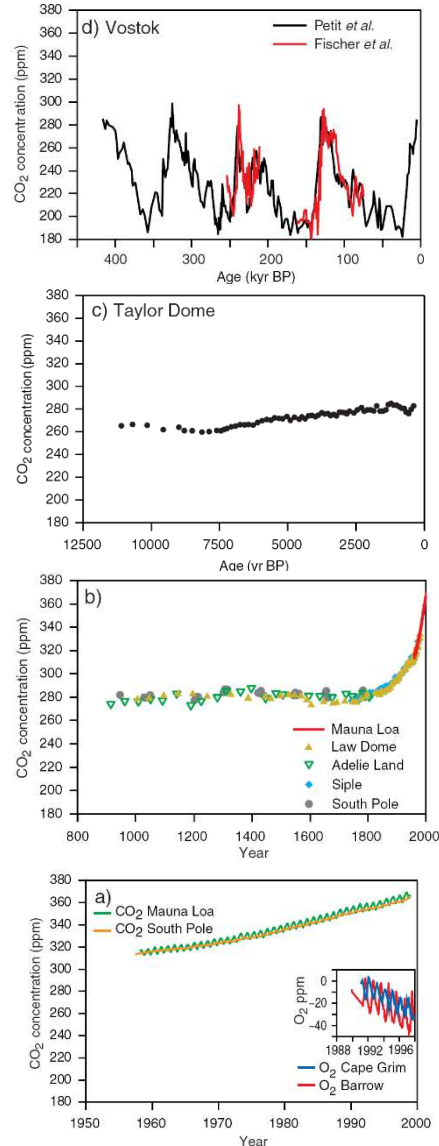
Resíduo (tendencia creciente)

¿cuál es su origen?



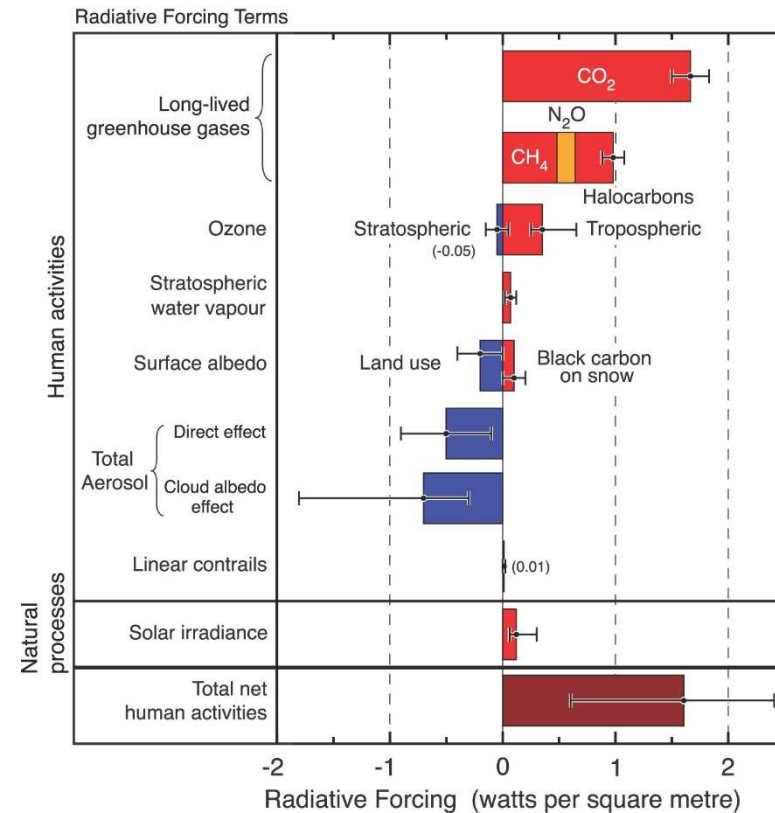
# ¿Cambios en la composición de la atmósfera por las actividades humanas?

“FLUCTUACIONES NATURALES”



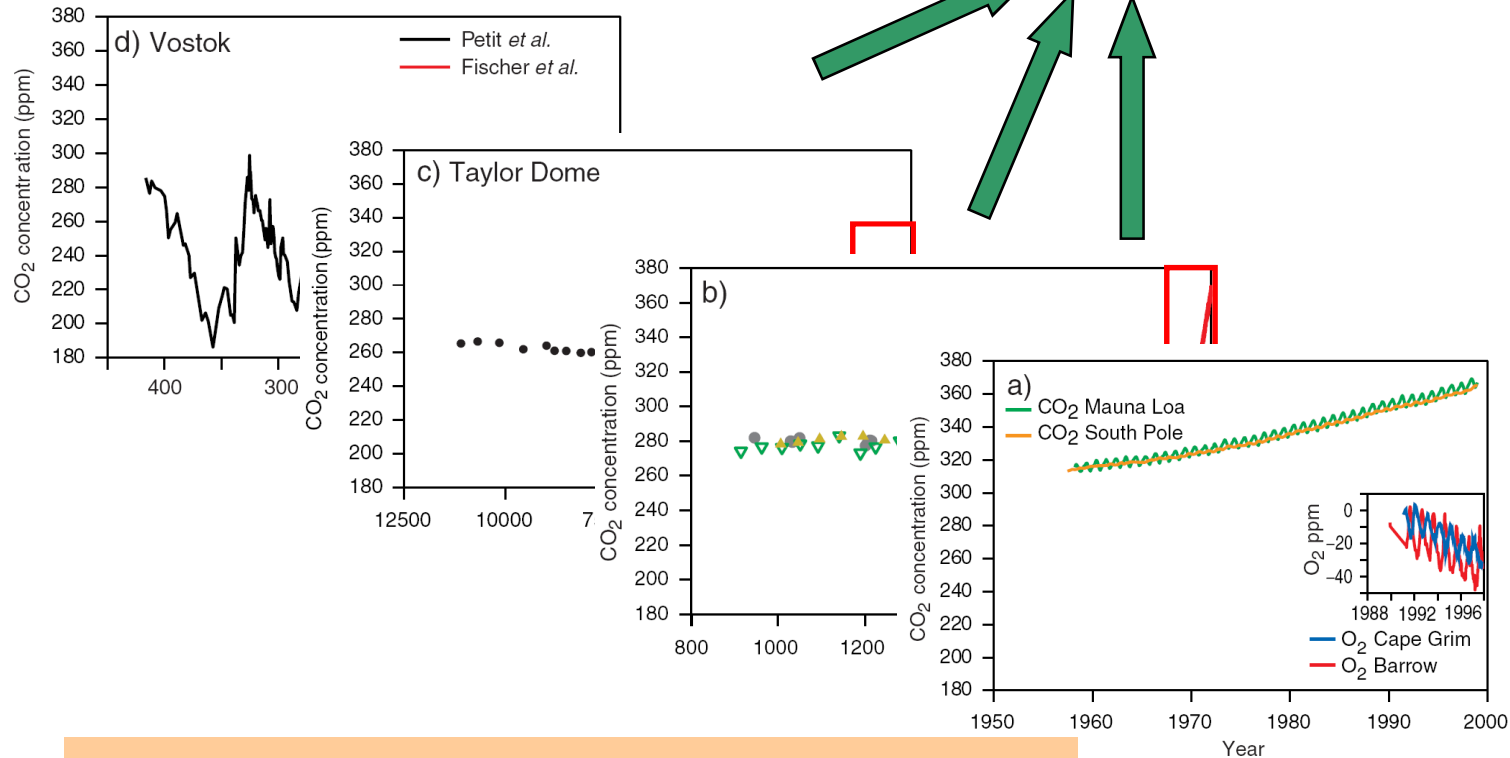
Incremento de la concentración de CO<sub>2</sub>: 34% desde 280 ppm (s. XVIII) hasta 375 ppm en 2004 (70% desde 1950)  
Fuentes: deforestación, combustibles fósiles (dominante desde 1900)

Radiative forcing of climate between 1750 and 2005



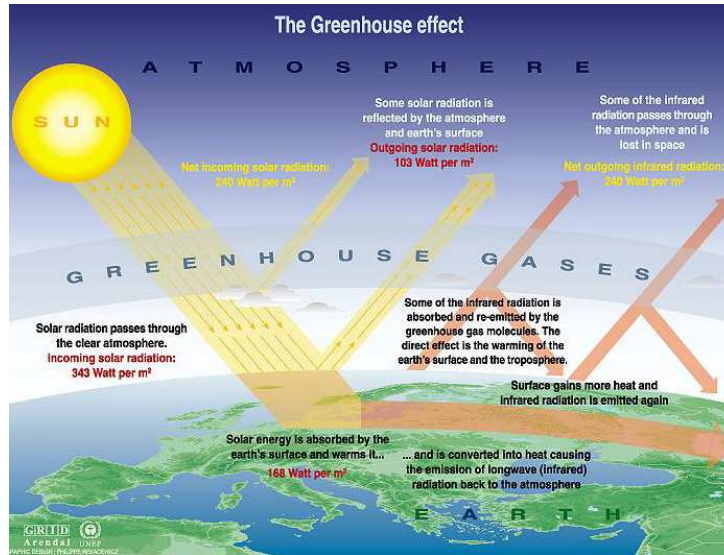
# ¿Cambios en la composición de la atmósfera por las actividades humanas?

“FLUCTUACIONES NATURALES”



Incremento de la concentración de CO<sub>2</sub>:  
34% desde 280 ppm (s. XVIII) hasta 375  
ppm en 2004 (70% desde 1950)  
Fuentes: deforestación, combustibles  
fósiles (dominante desde 1900)

# ¿Que es el efecto “invernadero”?

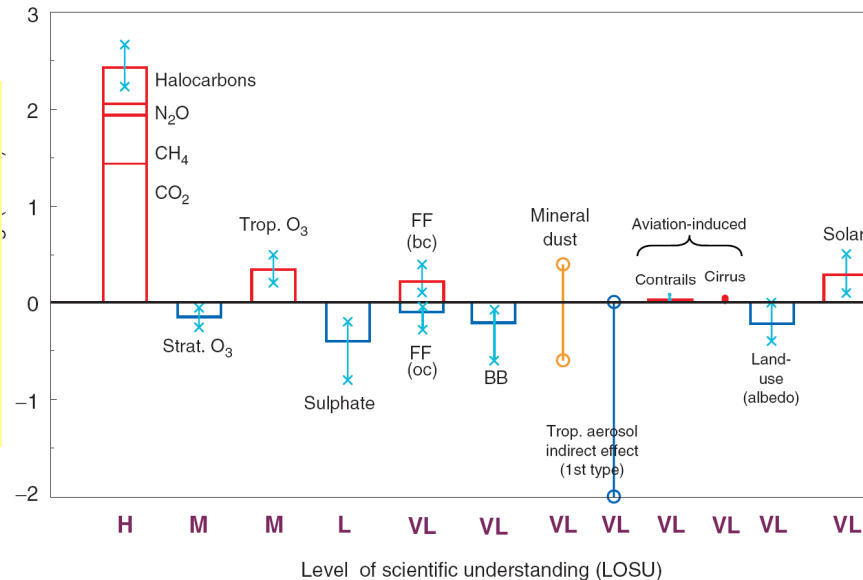


Capacidad de ciertos compuestos atmosféricos para dejar pasar la radiación incidente (solar, onda corta) y retener la radiación saliente (terrestre, onda larga)

Gases: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, vapor de agua

No todos los componentes de la atmósfera han actuado de la misma manera

Global and annual mean radiative forcing (1750 to present)



Calentamiento

Enfriamiento

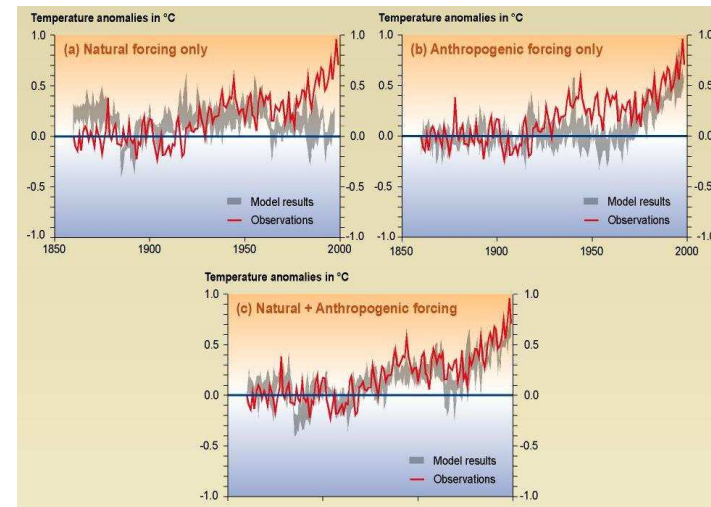
El III Informe del IPCC (Houghton et al.,2001) señala que:

“la tendencia [al aumento de las temperaturas] desde 1976 es... 3 veces la observada en los últimos 100 años...”

“...el incremento de la temperatura en el s. XX es probablemente el más elevado en los últimos 1000 años...”

**“...existen nuevas evidencias de que la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años es atribuible a las actividades humanas...”**

Sin embargo, la sensibilidad del Sistema Climático al aumento de los gases invernadero ha sido retrasada por los océanos y amortiguada por los aerosoles



1. Los cambios climáticos: ¿qué son y por qué aparecen?

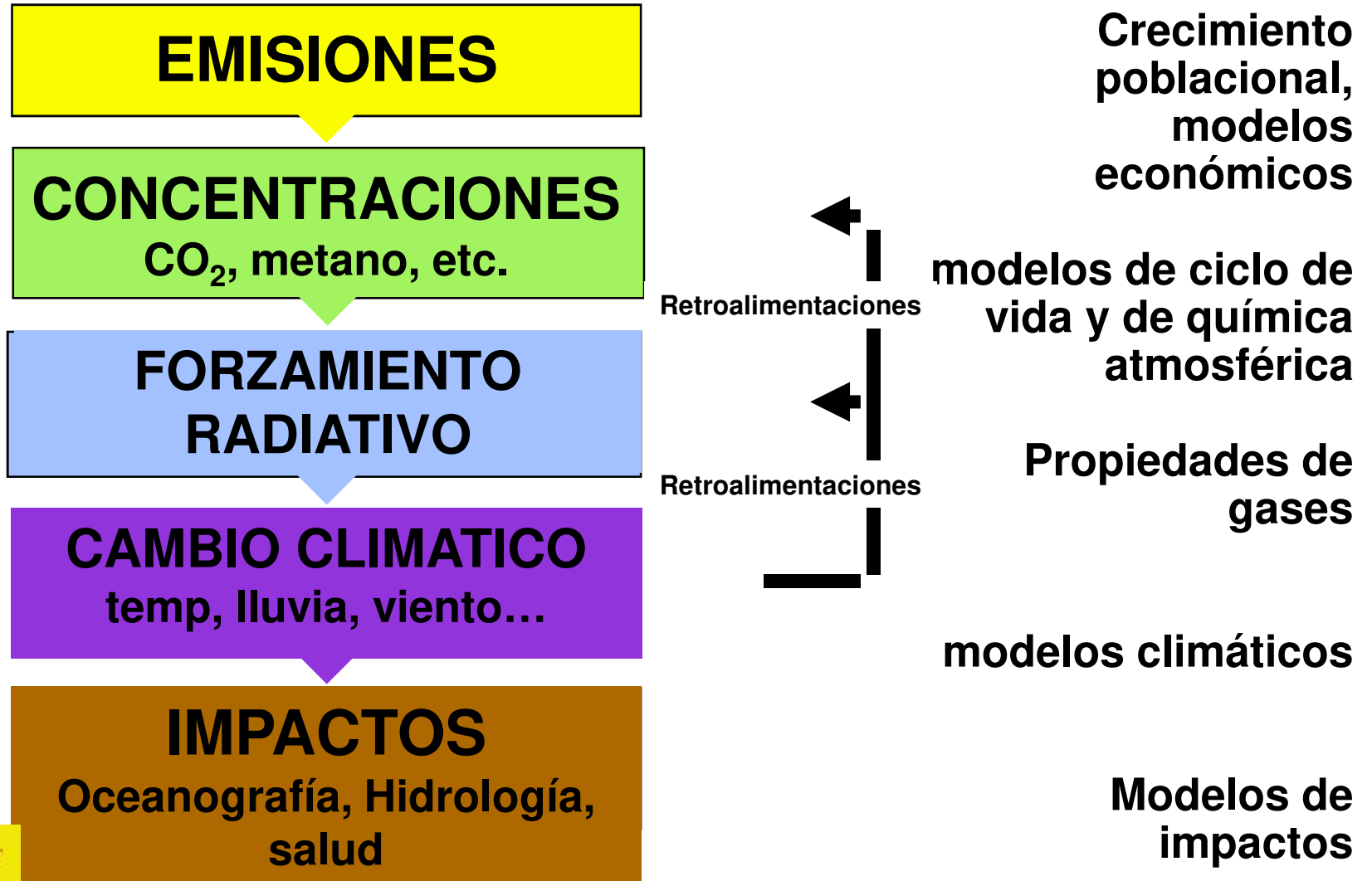
2. ¿Está cambiando el clima terrestre?  
Algunas evidencias

3. ¿Podemos anticipar los cambios climáticos futuros?

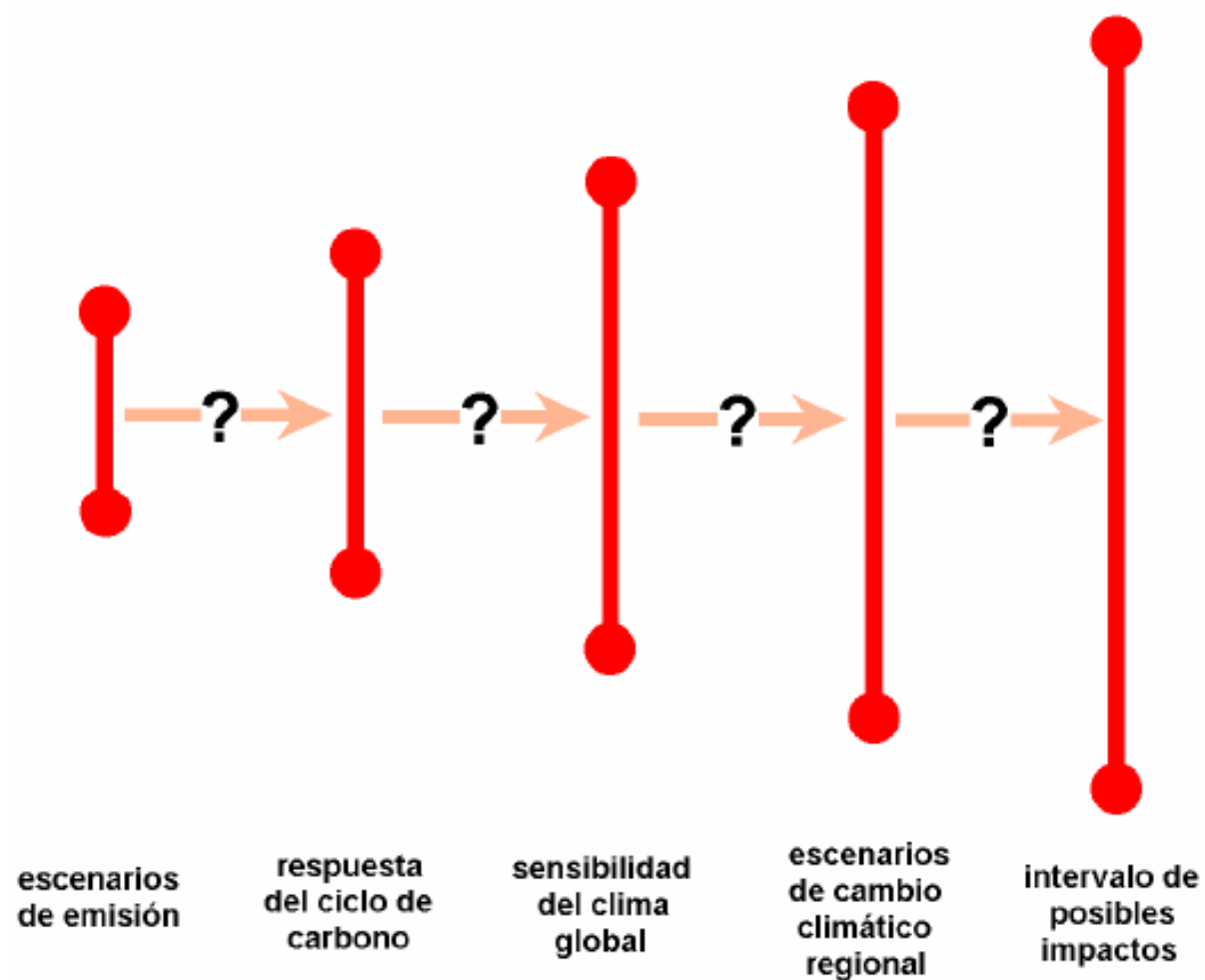
4. ¿Qué podría pasar?



# Escenarios de cambio climático



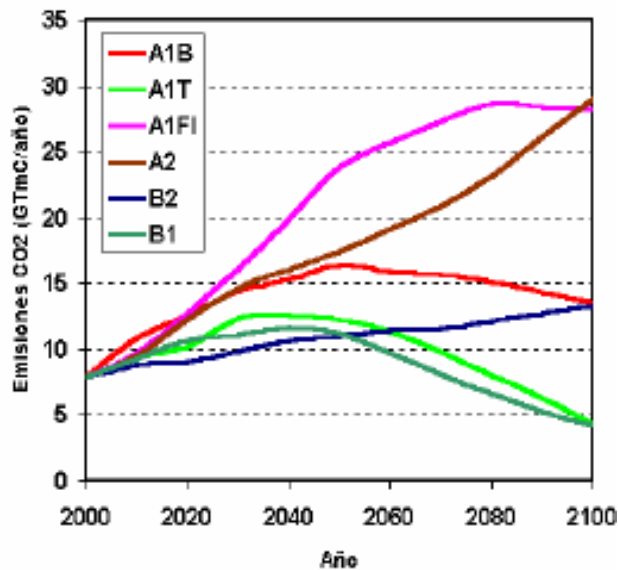
# Incertidumbres



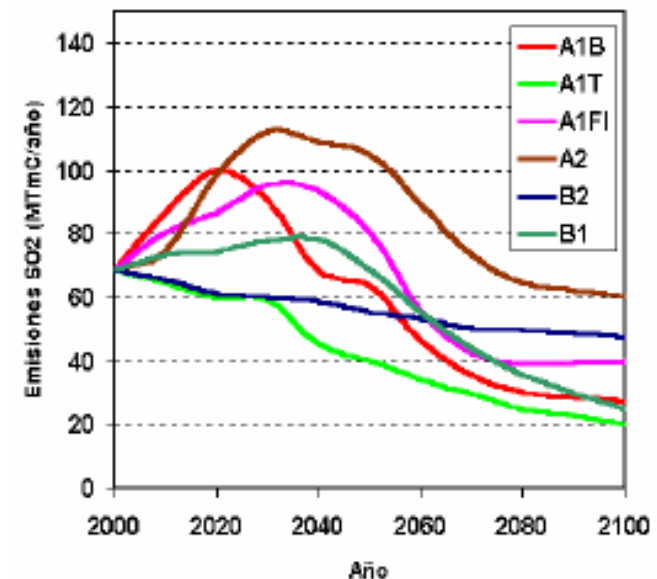
# Escenarios de emisiones

ESCENARIO	POBLACIÓN	ECONOMÍA	MEDIO AMBIENTE	EQUIDAD	TECNOLOGÍA	GLOBALIZACIÓN
A1FI	↘	↗	↘	↗	↗	↗
A1B	↘	↗	↗	↗	↗	↗
A1T	↘	↗	↗	↗	↗	↗
B1	↘	↗	↗	↗	↗	↗
A2	↗	↗	↘	↘	↗	↘
B2	↗	↗	↗	↗	↗	↘

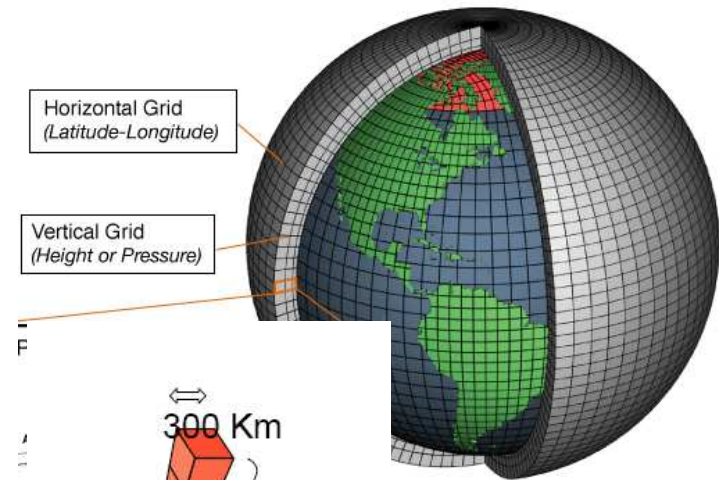
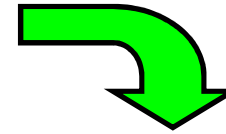
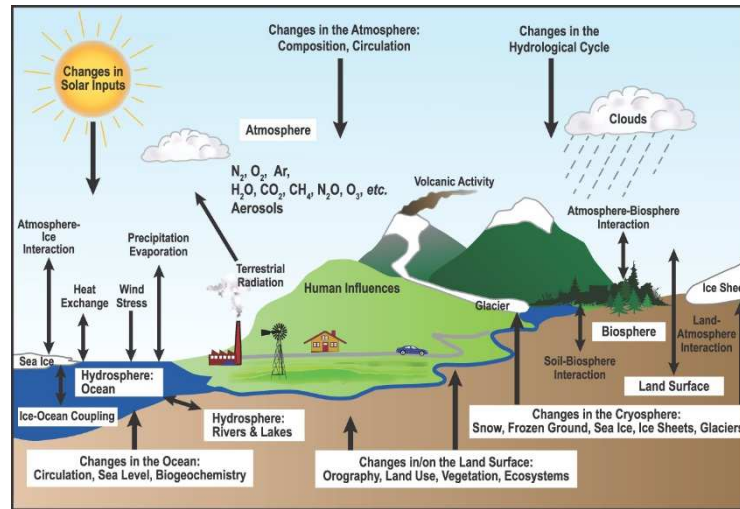
Emisiones de CO2



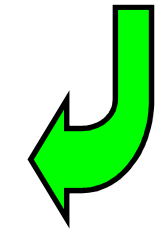
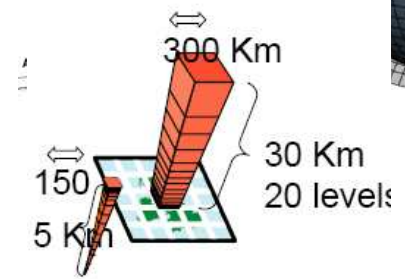
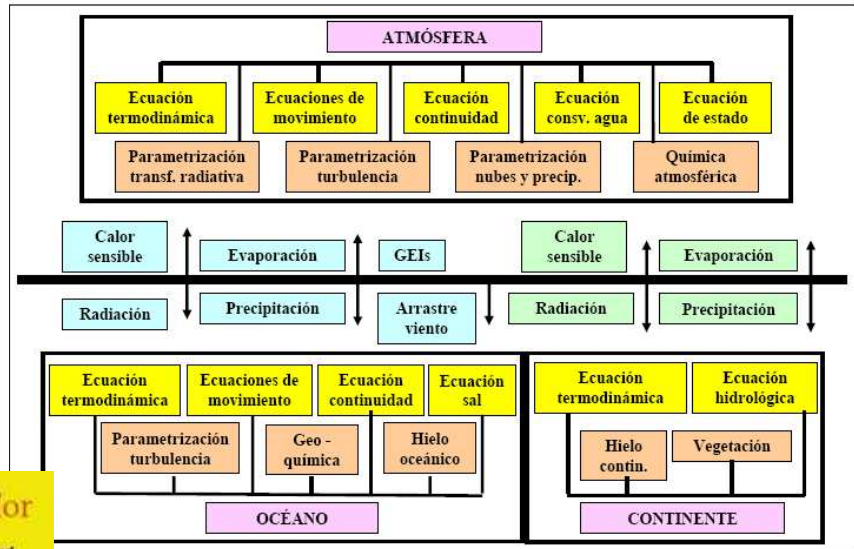
Emisiones de SO2



# ¿Qué es un modelo climático?

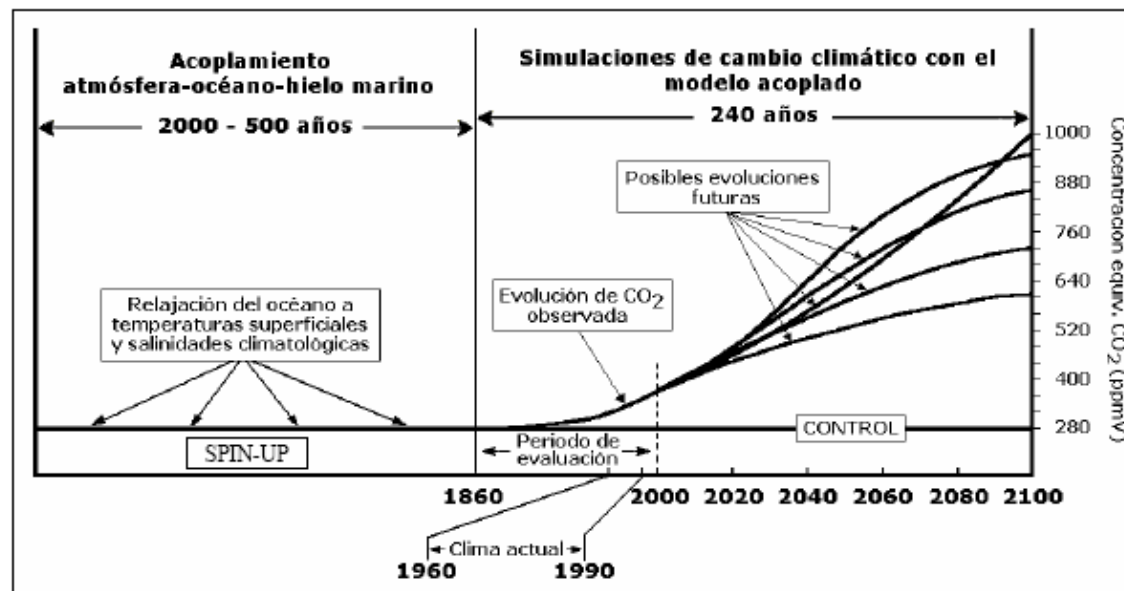


**Ecuaciones de evolución de las variables de predicción**      **Ecuaciones para resolver efectos de procesos subrejilla**      **Ecuaciones para resolver procesos de intercambio**



ECUACIONES ATMOSFÉRICAS	ECUACIONES OCEÁNICAS
<p>Conservación de la energía :</p> $\frac{dT}{dt} = (\nabla \cdot k_h \nabla) T + \frac{1}{c_p} \sum \frac{dQ}{dt}$ <p>Conservación del momento :</p> $\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f \vec{k} \times \vec{V} - \nabla \Phi - \vec{F}$ <p>Conservación de la masa :</p> $\nabla(\rho \cdot \vec{V}) = 0$ <p>Conservación del agua :</p> $\frac{d(\rho q_i)}{dt} = (\nabla \cdot k_h \nabla)(\rho q_i) + E - P$ <p>Ecuación de estado :</p> $p = \rho R_d T (1 + 0.61 q_v)$	<p>Conservación de la energía :</p> $\frac{dT}{dt} = k_v \cdot \nabla^2 T$ <p>Conservación del momento :</p> $\frac{d\vec{V}}{dt} = f \vec{k} \times \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p + v \cdot \nabla^2 \vec{V}$ <p>Conservación de la masa :</p> $\nabla \cdot \vec{V} = 0$ <p>Conservación de la salinidad :</p> $\frac{dS}{dt} = k_s \cdot \nabla^2 S$ <p>Ecuación de estado :</p> $\rho = \rho(T, S, p)$

## ¿Cómo se efectúa una simulación?



### SPIN-UP y CONTROL

Simulación de cientos de años con  $[CO_2] = 280$  ppmV constante hasta que océano-atmósfera-hielo se acoplan (SPIN-UP). Una simulación continua así hasta el año 2100 (CONTROL) para examinar la variabilidad interna del modelo

### PERIODO de EVALUACION

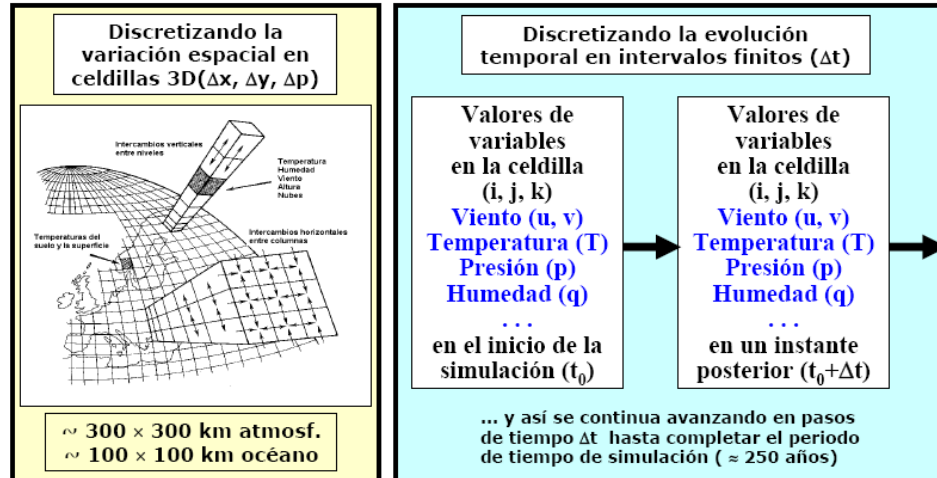
Otra simulación de 1860 a 2000 con el incremento observado de GEIs y sulfatos para evaluar la capacidad del modelo de reproducir la tendencia observada de la temperatura global. El "clima actual" (1960-90) se toma como referencia para derivar escenarios de cambio climático.

### ESCENARIOS

Simulaciones desde 2000 suponiendo diversas evoluciones de emisiones de GEIs y sulfatos. Para construir los escenarios se calcula la diferencia entre la simulación de "clima actual" y la de cualquier periodo futuro.

## ¿Cómo se efectúa una simulación?

**METODOS NUMERICOS :**  $\frac{\partial V}{\partial t} = m \frac{\partial V}{\partial s} \Rightarrow \Delta V \cong \Delta t \cdot m \frac{\Delta V}{\Delta s}$



**Aumentar la resolución espacial requiere incrementar la resolución temporal**

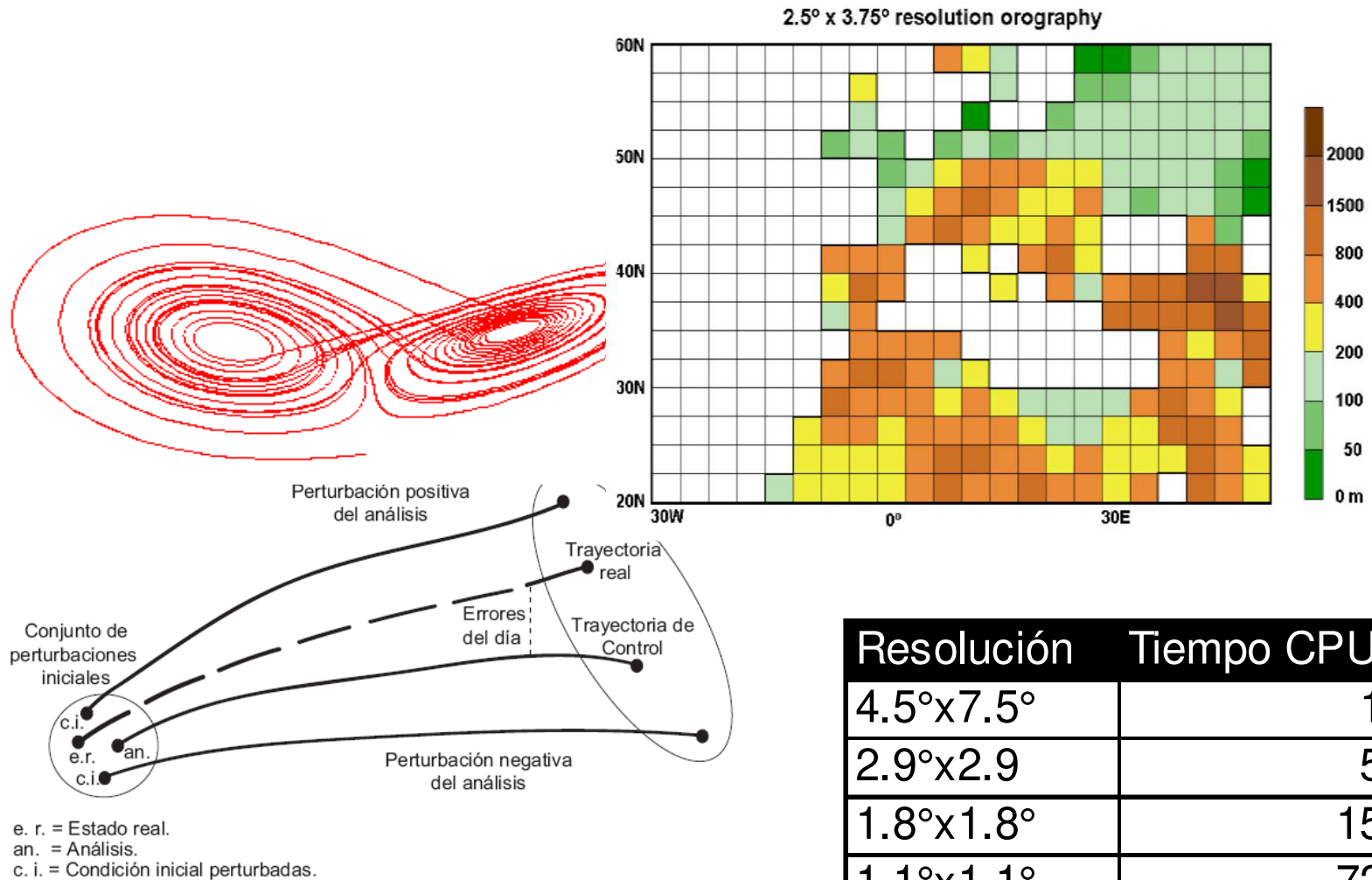
### Cálculo necesario para una simulación de 250 años

(Resolución: atmósfera 300x300 km;  
océano 100x100 km)

- Discretización espacial :  $\sim 3 \cdot 10^5$  celdillas
- Discretización temporal :  $\Delta t = 1800$  s
- Número de iteraciones :  $4.4 \cdot 10^6$
- Número de variables de predicción :  $\sim 10$
- Número de ecuaciones a resolver :  $\sim 10^{13}$
- Cada ecuación tiene varios términos
- Resolver cada término requiere varias operaciones
- Las parametrizaciones necesitan el triple de cálculo
- Número de operaciones matemáticas simples:  $\sim 10^{17}$

Para ejecutar  $\sim 10^{17}$  flop en aprox. 2 meses  $\rightarrow \sim 10^2$  Gflops

# La resolución espacial y temporal y el caos

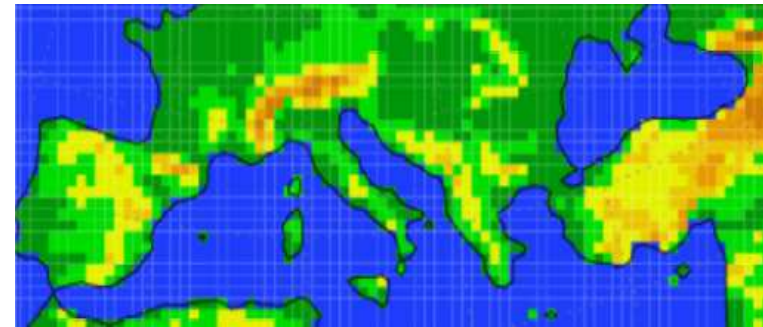
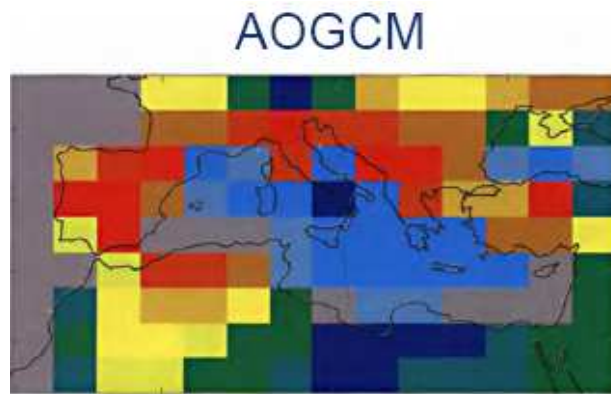


Resolución	Tiempo CPU
4.5°x7.5°	1
2.9°x2.9	5
1.8°x1.8°	15
1.1°x1.1°	72
0.30°x0.30°	3000

TIEMPO Y CLIMA

3er Curso MONOGRÁFICO

# Técnicas de downscaling



**Dinámico**

**Historical Records**



*Statistical Downscaling is based on empirical models fitted to data using historical records.*



$$Y = f(X; \theta)$$

*The form and parameters of the model depend of the different techniques used.*

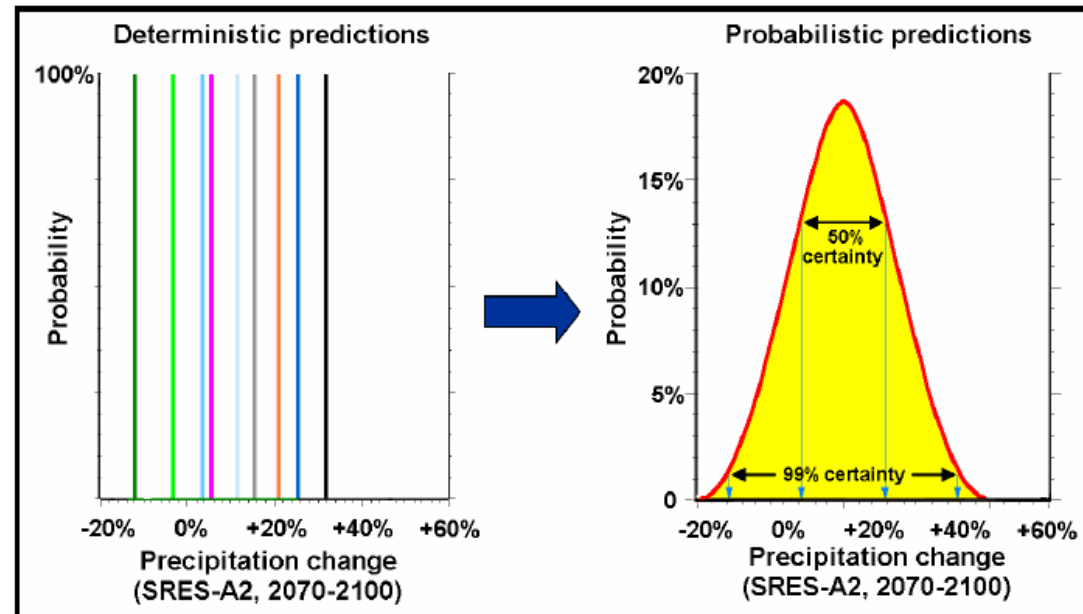
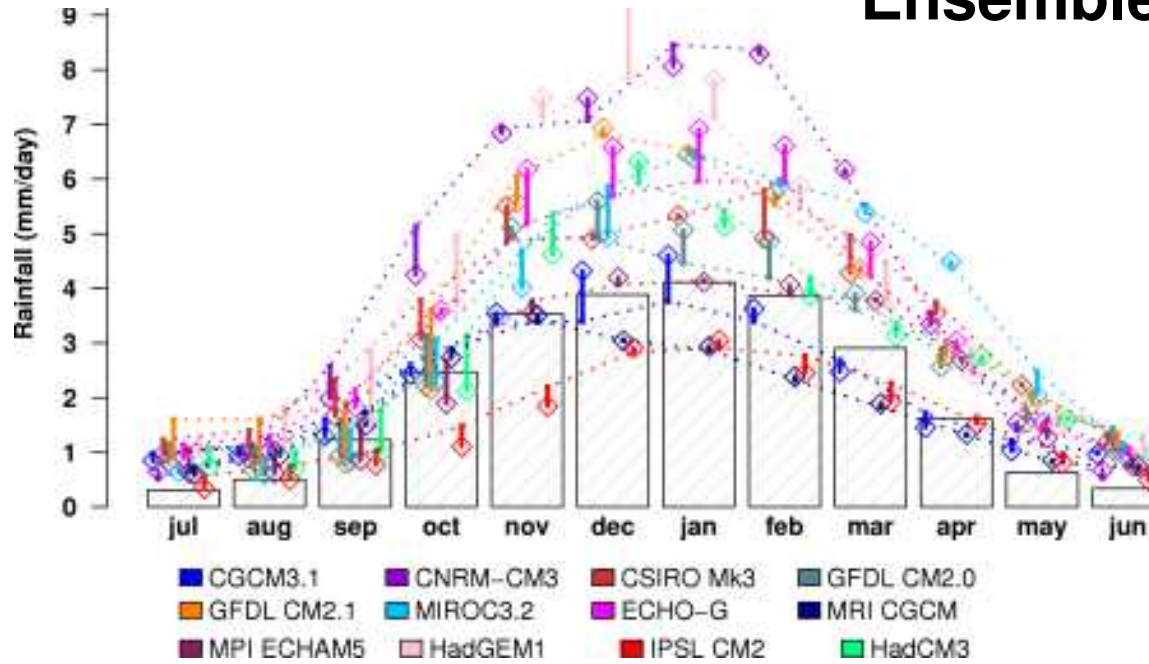


**Estadístico**

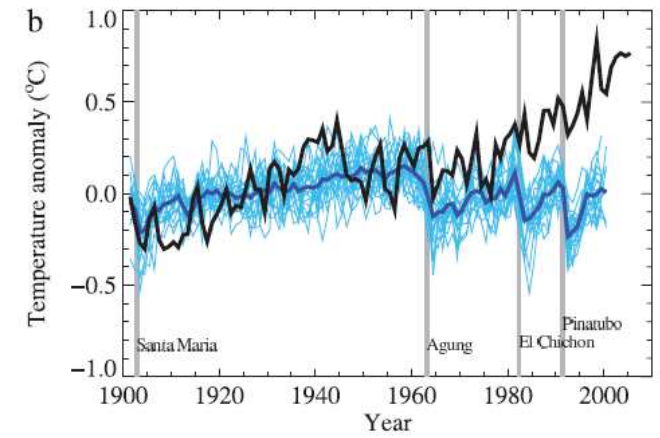
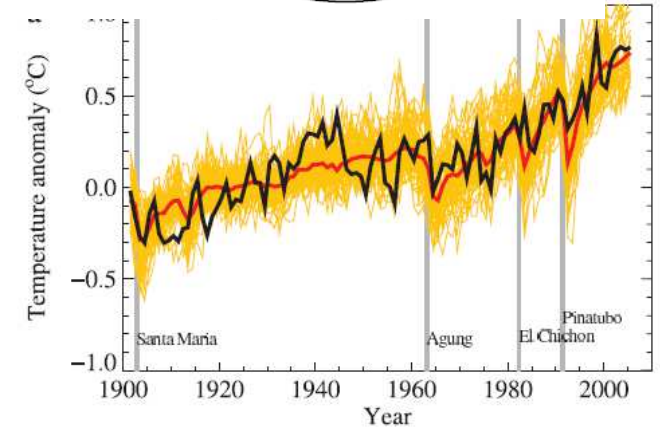
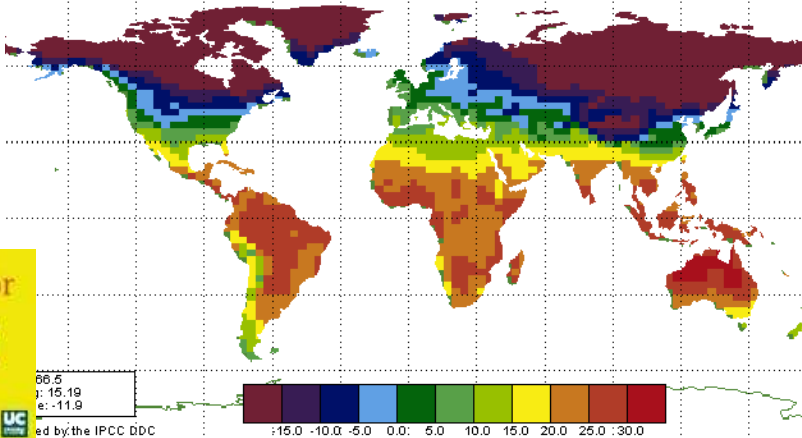
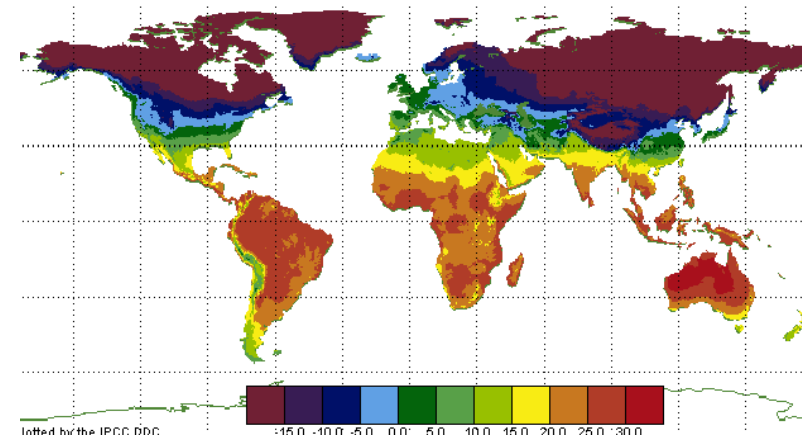
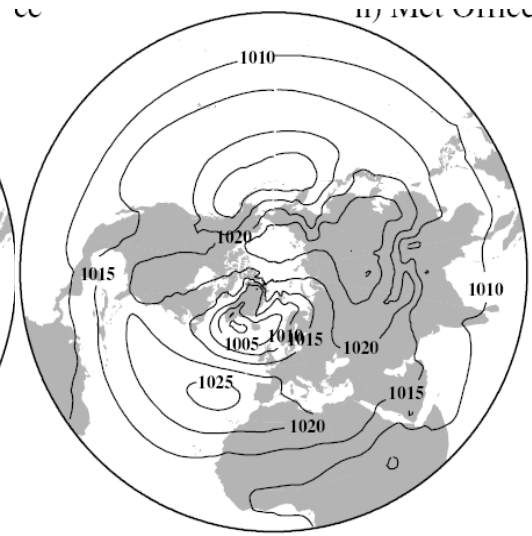
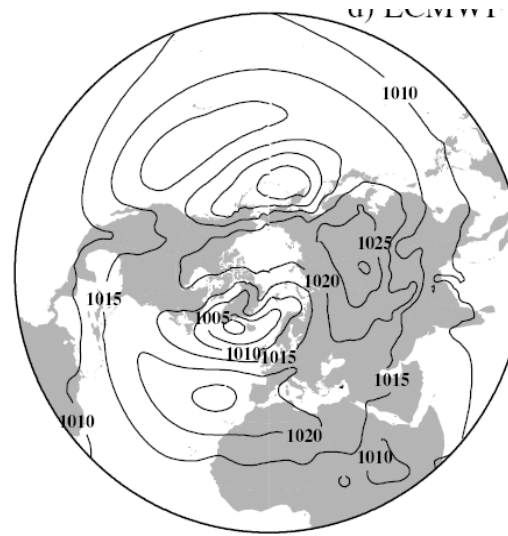
<http://meteo.unican.es>



# Ensembles y predicción probabilística



# ¿Funcionan los modelos?



1. Los cambios climáticos: ¿qué son y por qué aparecen?

2. ¿Está cambiando el clima terrestre?  
Algunas evidencias

3. ¿Podemos anticipar los cambios climáticos futuros?

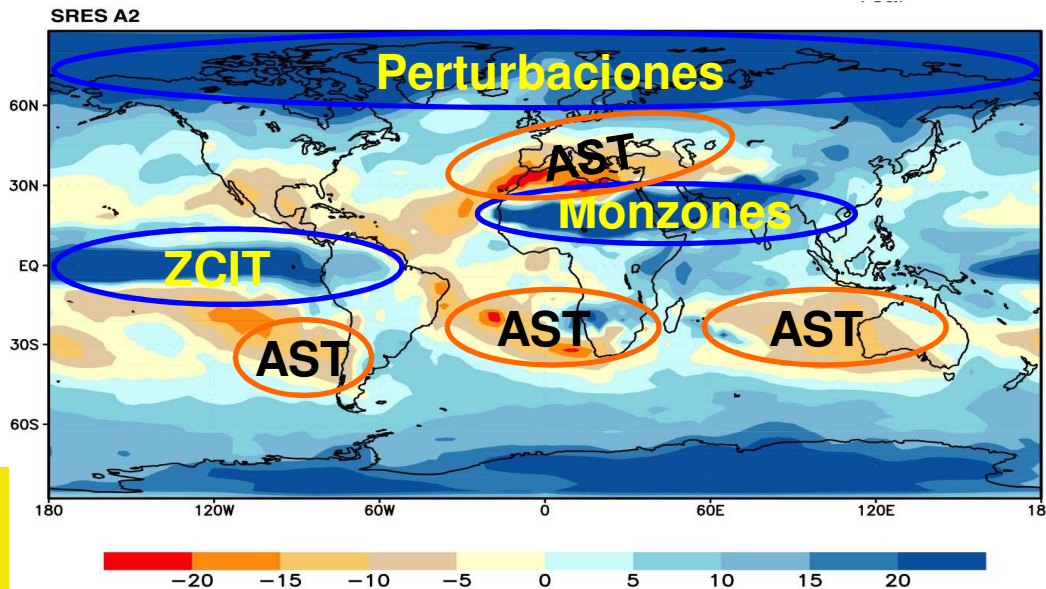
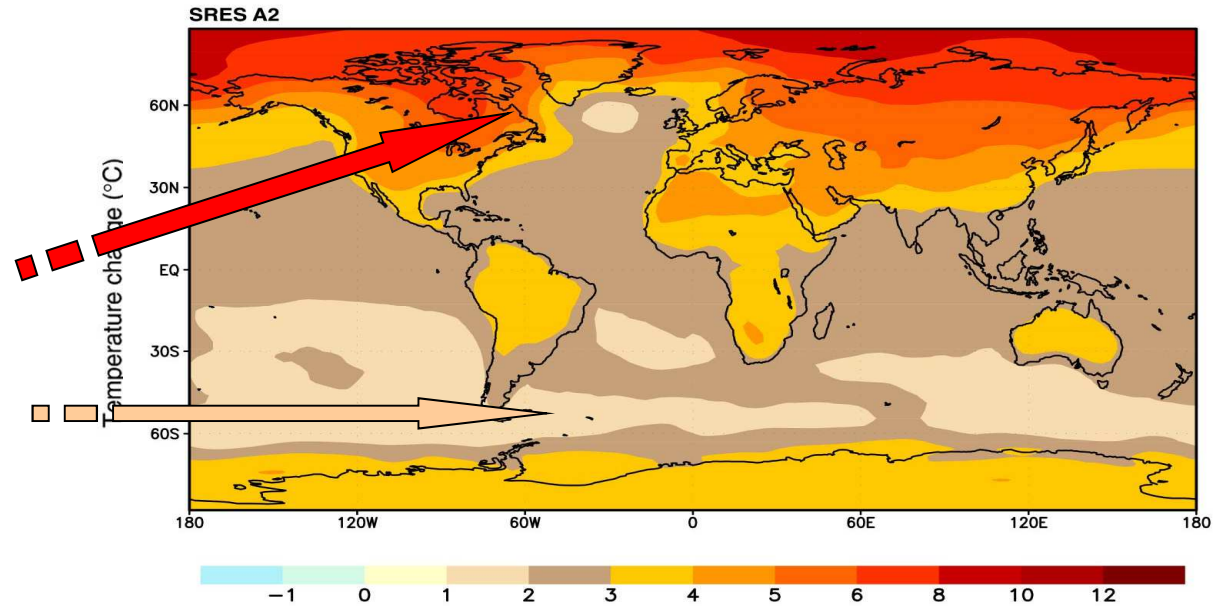
4. ¿Qué podría pasar?

## Proyecciones globales (2070-2100)

**Calentamiento generalizado**

Zonas polares y continentales Hn

Más limitado Hs y océanos



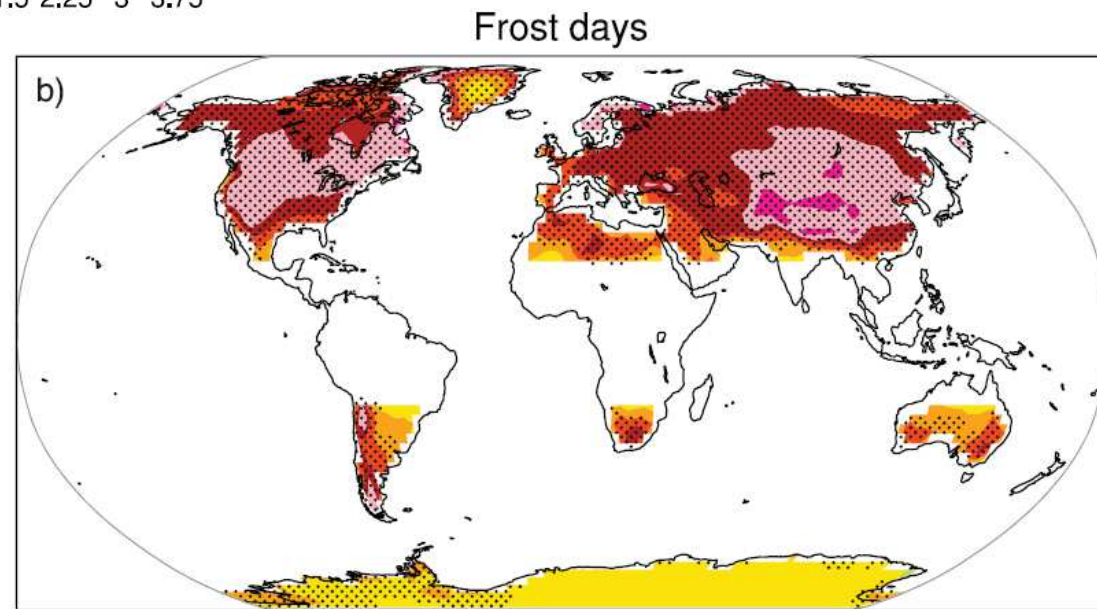
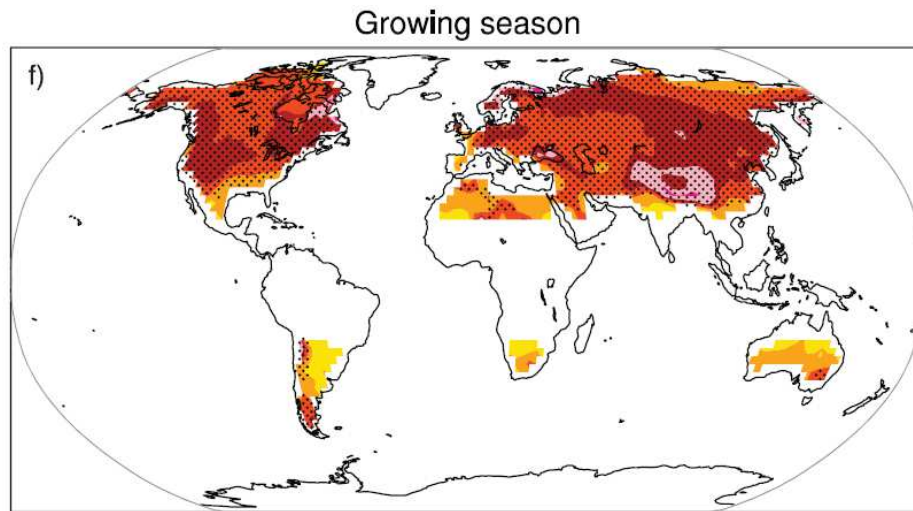
**Diversidad regional**

Aumento

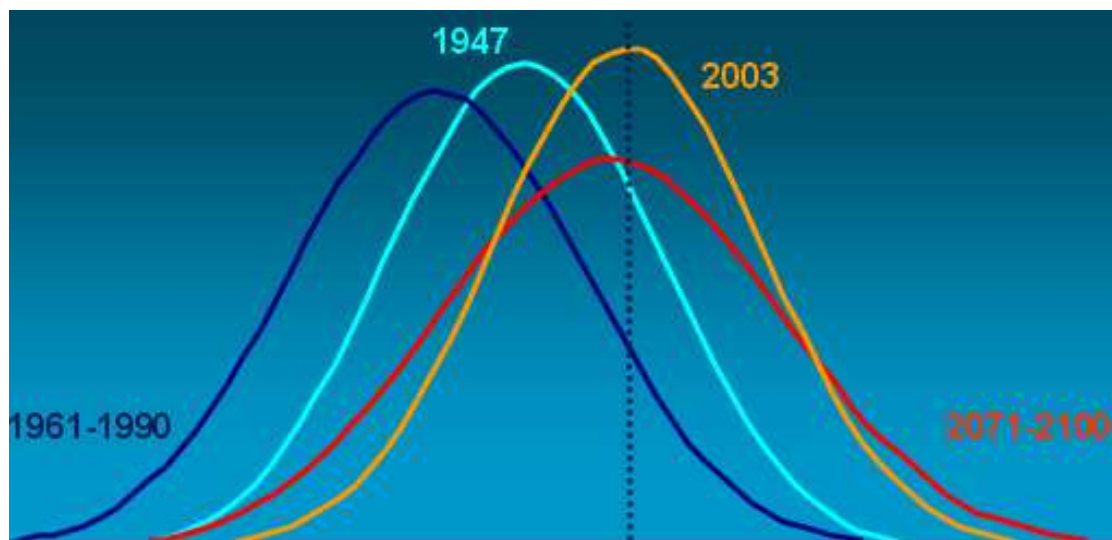
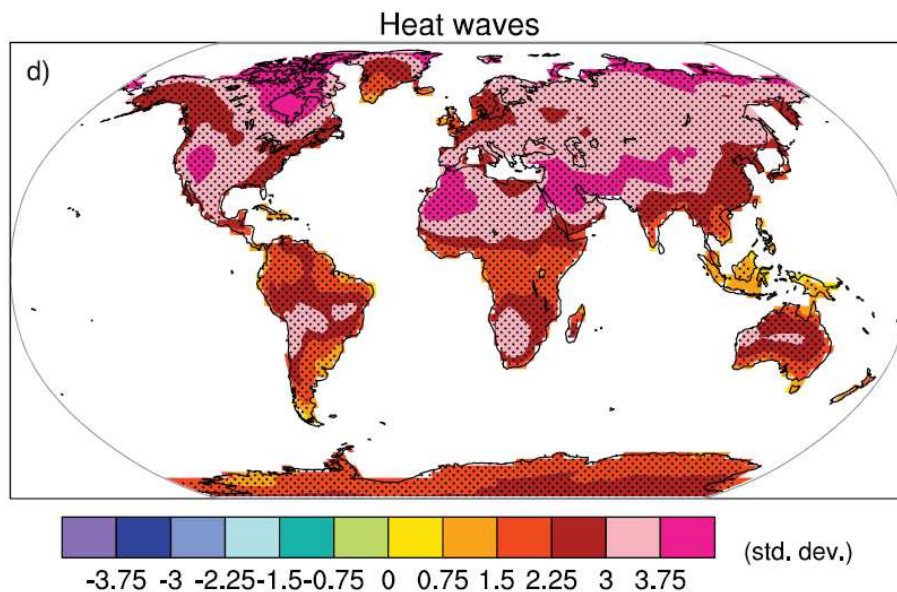
Reducción

**¿Intensificación del ciclo hidrológico?**

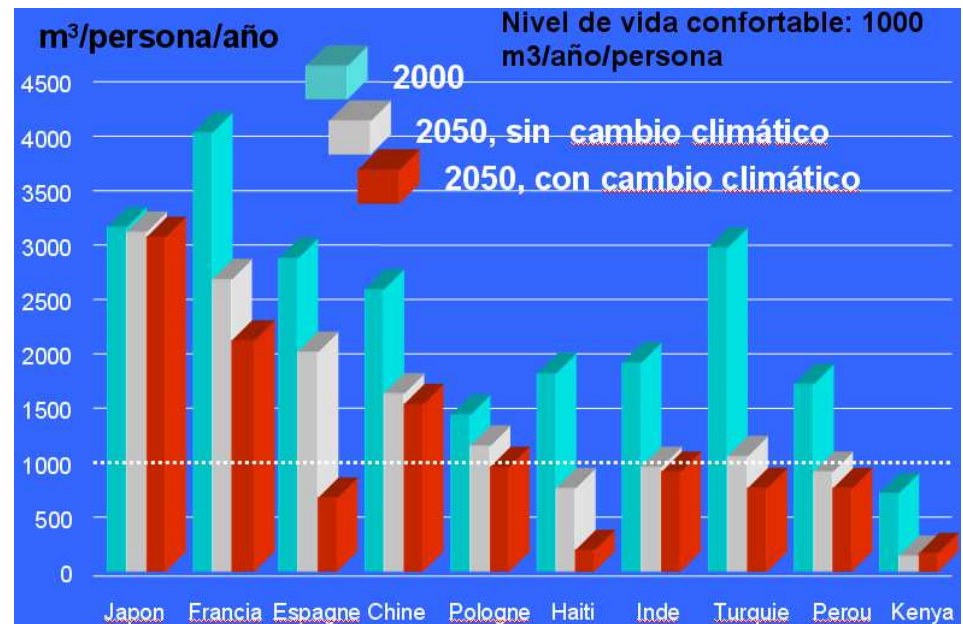
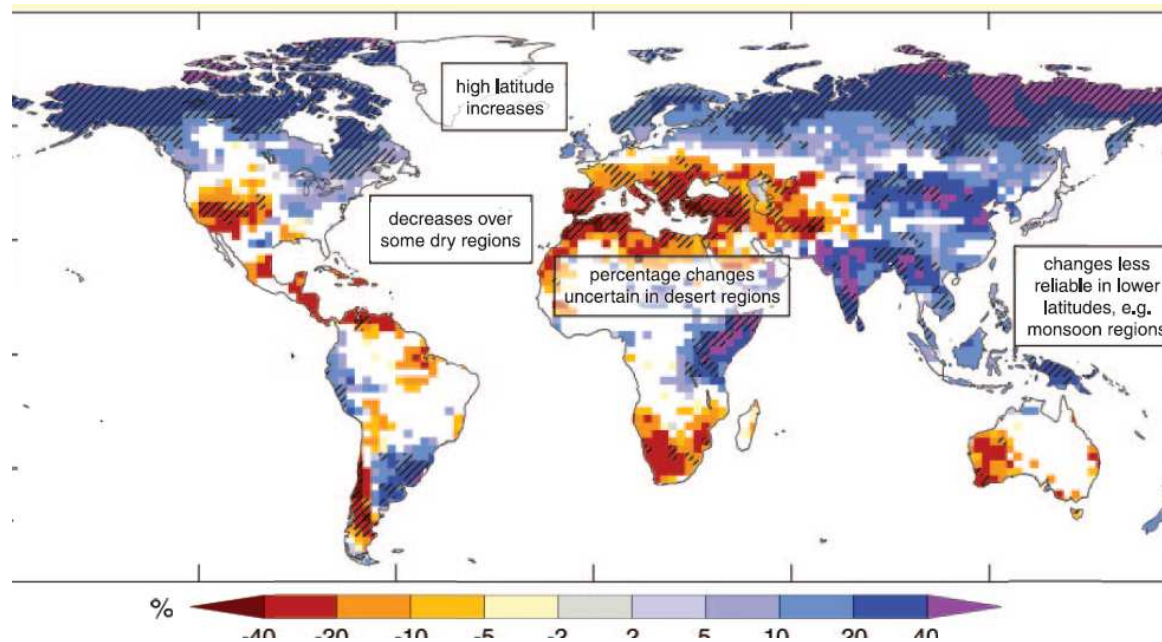
**...Un mundo más cálido puede beneficiar a la agricultura**



...pero también supone..



## ...Un mundo con recursos hídricos peor distribuidos



# Efectos sobre grandes biomas

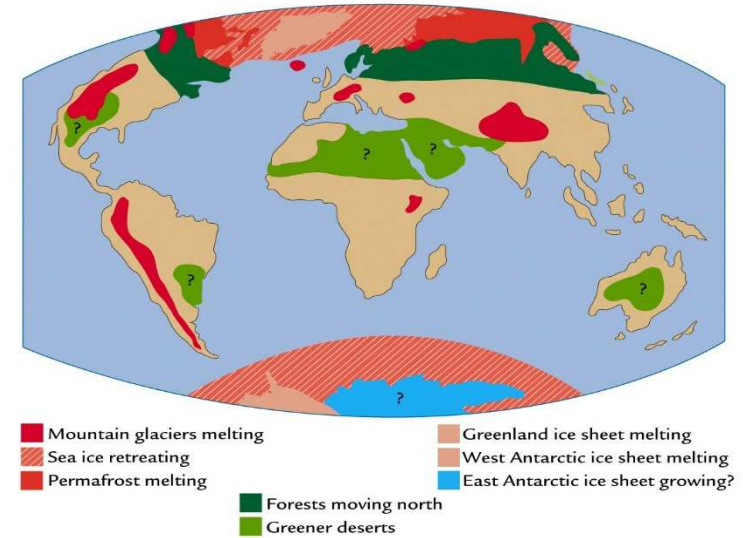
Reducción de la banquisa ártica,  
fusión del casquete Occidental de la  
Antártida, crecimiento del Oriental

Fusión de glaciares de montaña

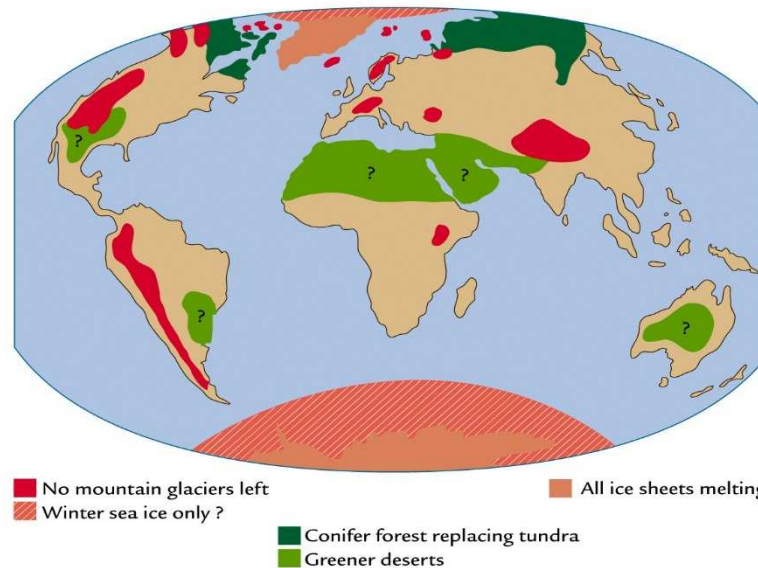
Retroceso de la tundra y  
desaparición del permafrost (CH<sub>4</sub>)

Expansión de los bosques  
boreales

**Escenario 2xCO<sub>2</sub> (entre 50 y 100 años)**



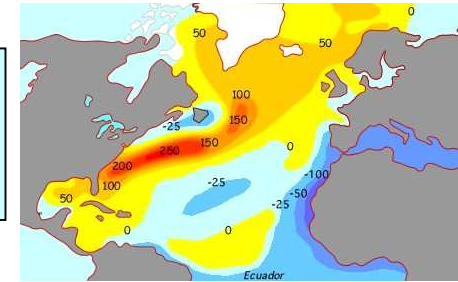
**Escenario 4xCO<sub>2</sub> (entre 200 y 300 años)**



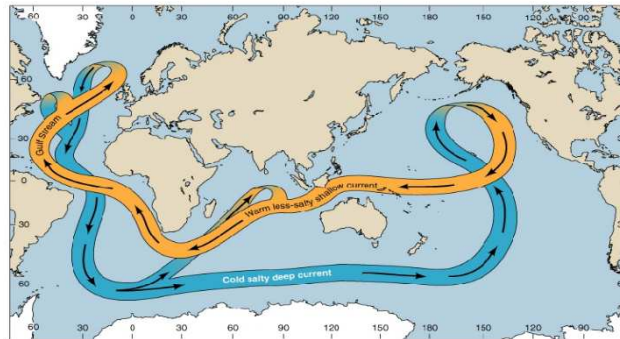


# ¿Alguna sorpresa climática?

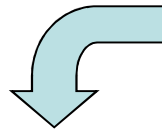
**Clima templado de Europa:**  
transporte de calor desde latitudes  
subtropicales por la circulación



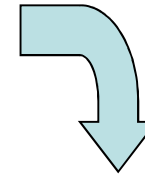
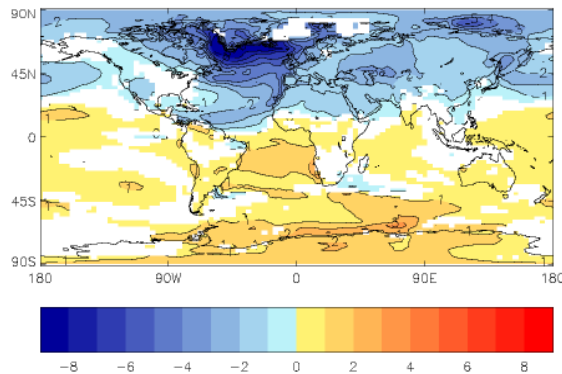
Rápida fusión  
del casquete  
de  
Groenlandia



Reducción de la densidad  
de las aguas del Atlántico  
(interrupción NADW y cinta  
transportadora)



**A corto plazo**  
**Reducción temperaturas Hn**

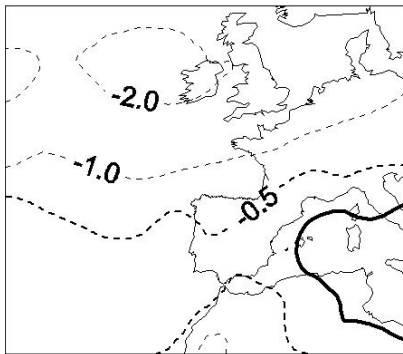


**A medio/largo plazo**  
**!!!Aumento aún mayor de los niveles de CO2!!!**

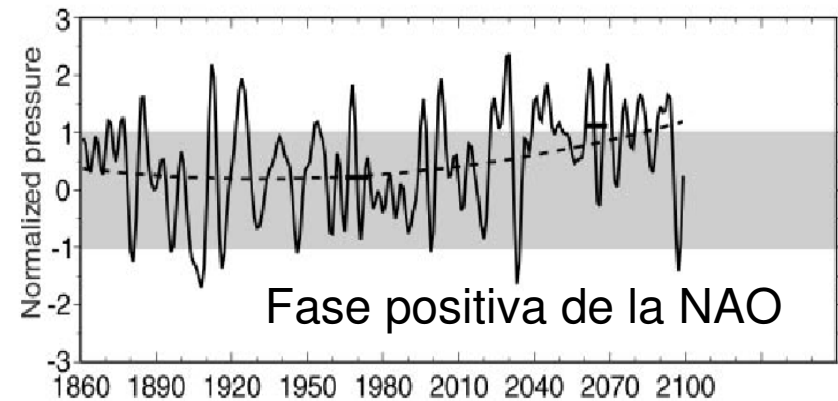
# Proyecciones regionales: la circulación atmosférica

## Aumento de las situaciones estables

INVIERNO

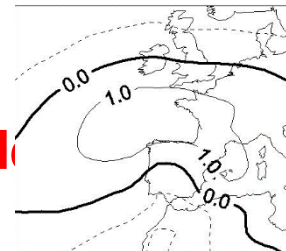


Inviernos perturbados

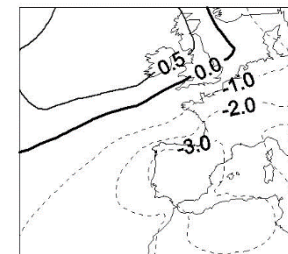


**Desplazamiento anticiclón de las Azores** sobre la PI/Mediterráneo Occidental (¿más Suradas?)

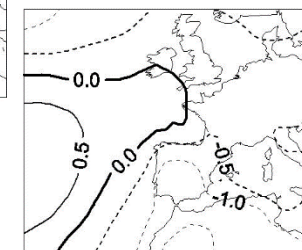
PRIMAVERA



VERANO



OTOÑO

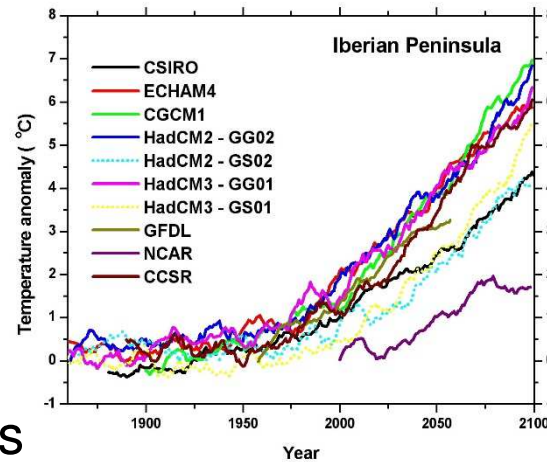


**Intensificación de baja térmica** (¿brisas?)

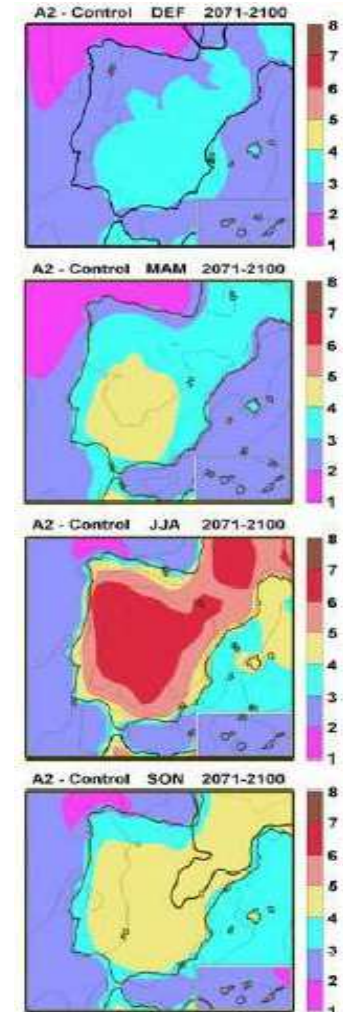
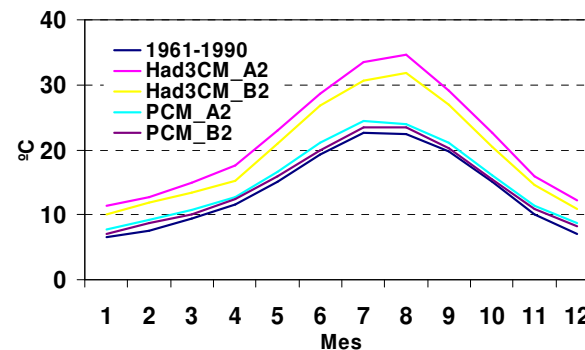
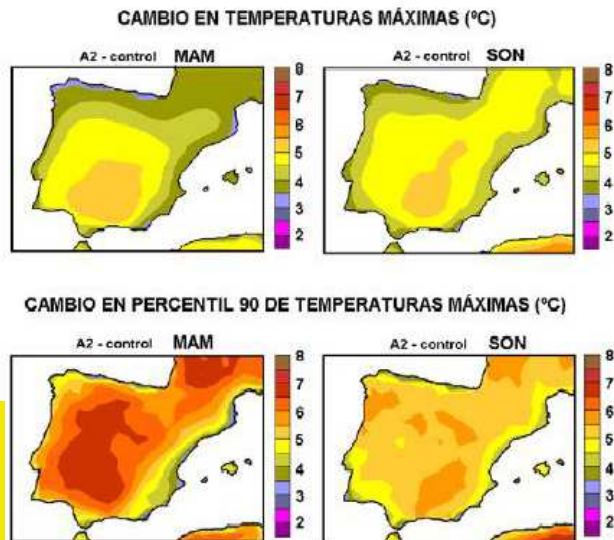
# Proyecciones regionales: las temperaturas

Aumento anual: **entre 2°C y 8°C**

**Disimetría estacional:** más acusado en verano y en las máximas (>8°C) → olas de calor más intensas



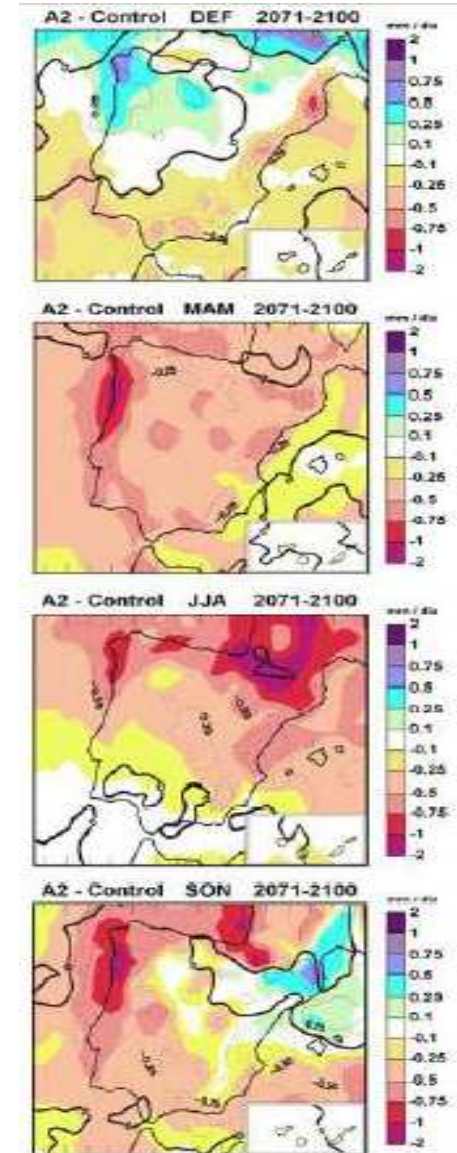
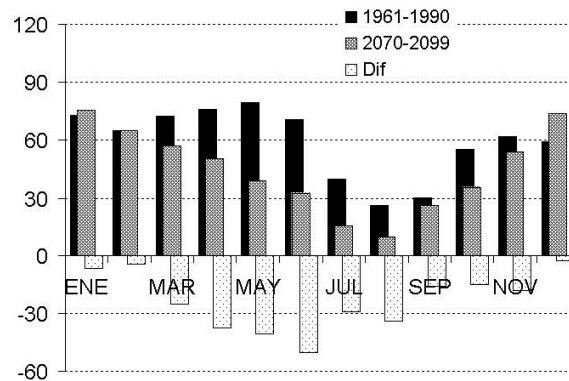
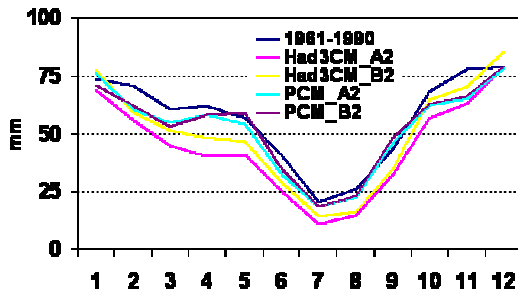
**Disimetría espacial:** incidirá en la mitad S y el interior



# Proyecciones regionales: las precipitaciones

**Descenso moderado** de los totales anuales (5%- 15%).

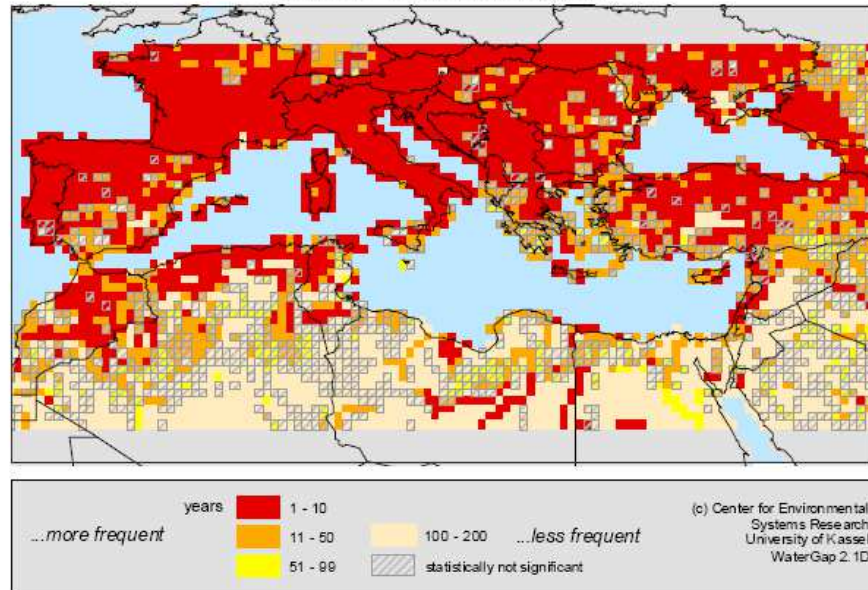
**Intensificación del ciclo anual:** ligero aumento invernal (+10/15%) acusado descenso primaveral y estival (30%)



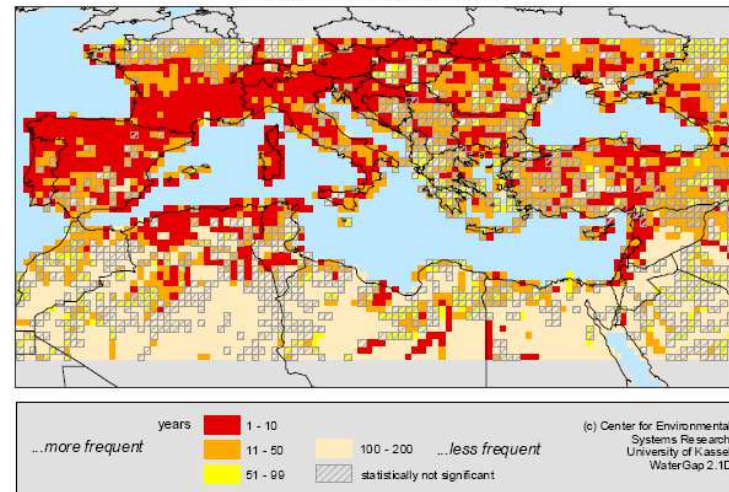
**Incremento de la variabilidad interanual** (sequías más frecuentes y prolongadas)

# Las sequías

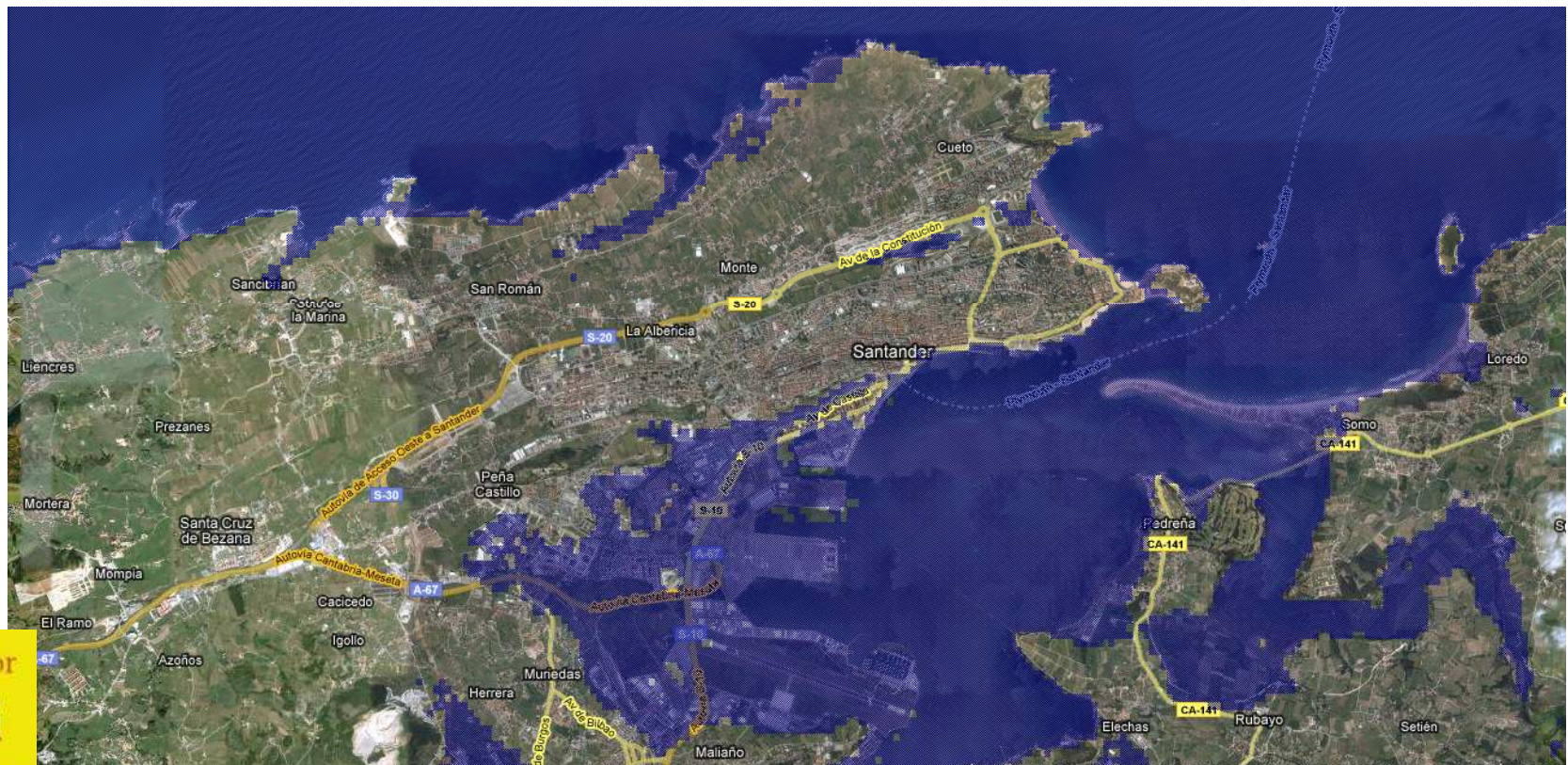
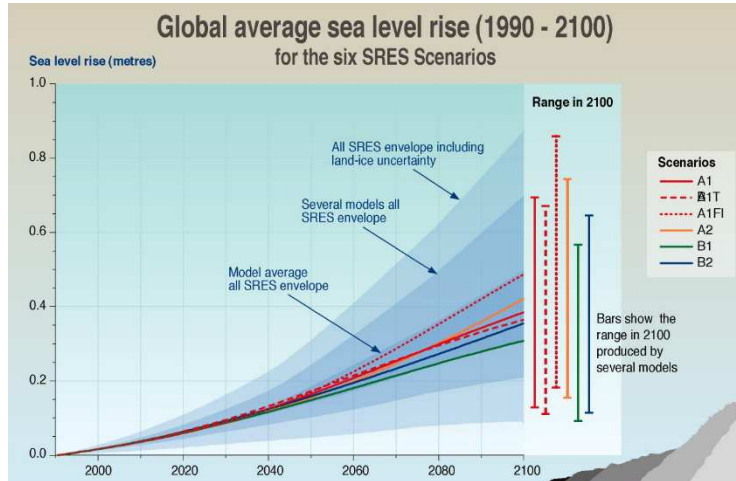
current 100-year droughts return in the 2070s  
under A2 - ECHAM4 conditions



current 100-year droughts return in the 2070s  
under B2 - ECHAM4 conditions



# El aumento del nivel del mar



# Consecuencias hidrológicas

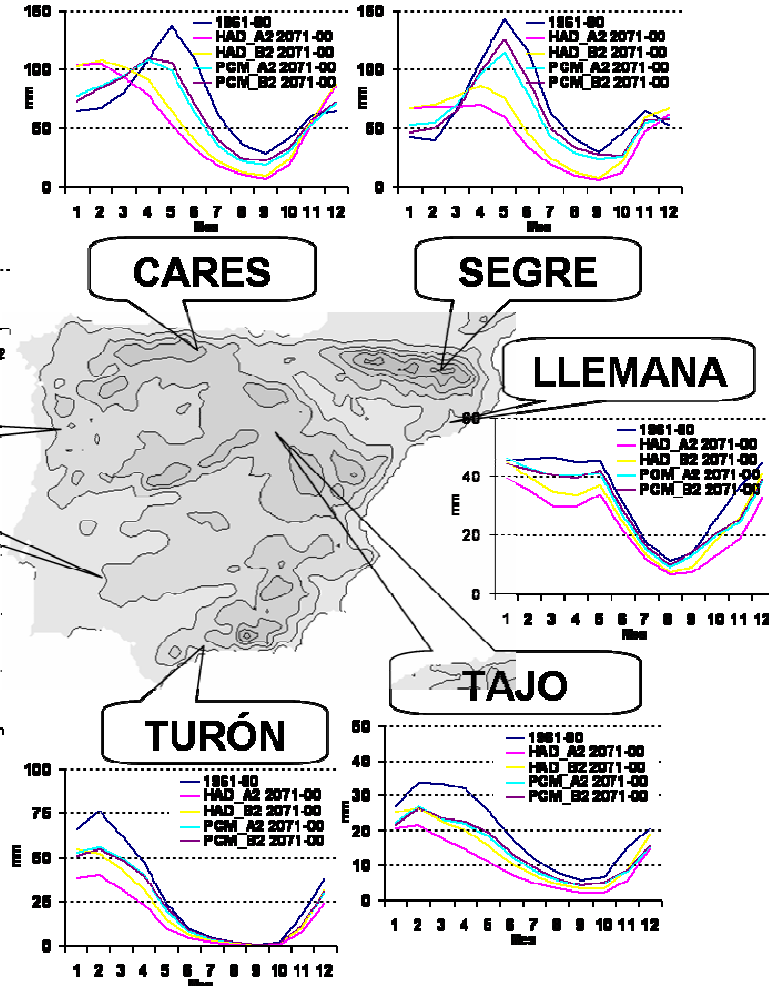
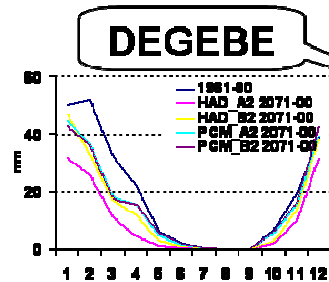
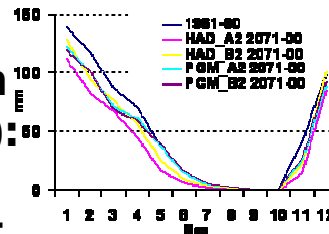
## Cuencas de montaña:

Disminución de la nieve  
Inestabilidad del manto nival

Sustitución del máximo primaveral por otro invernal

## Cuencas de régimen pluvial (baja altitud):

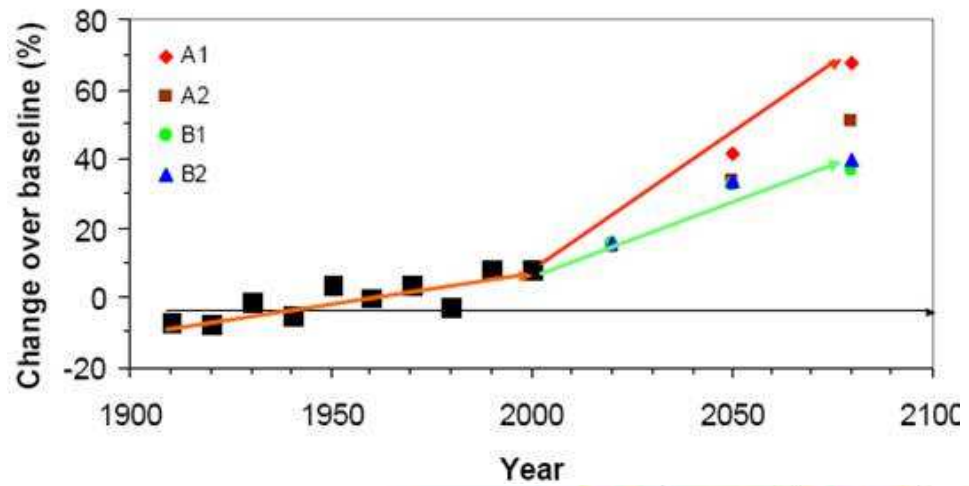
Estiajes más prolongados:  
mayo-junio/octubre-noviembre



**Ríos atlánticos:**  
Sin modificaciones perceptibles

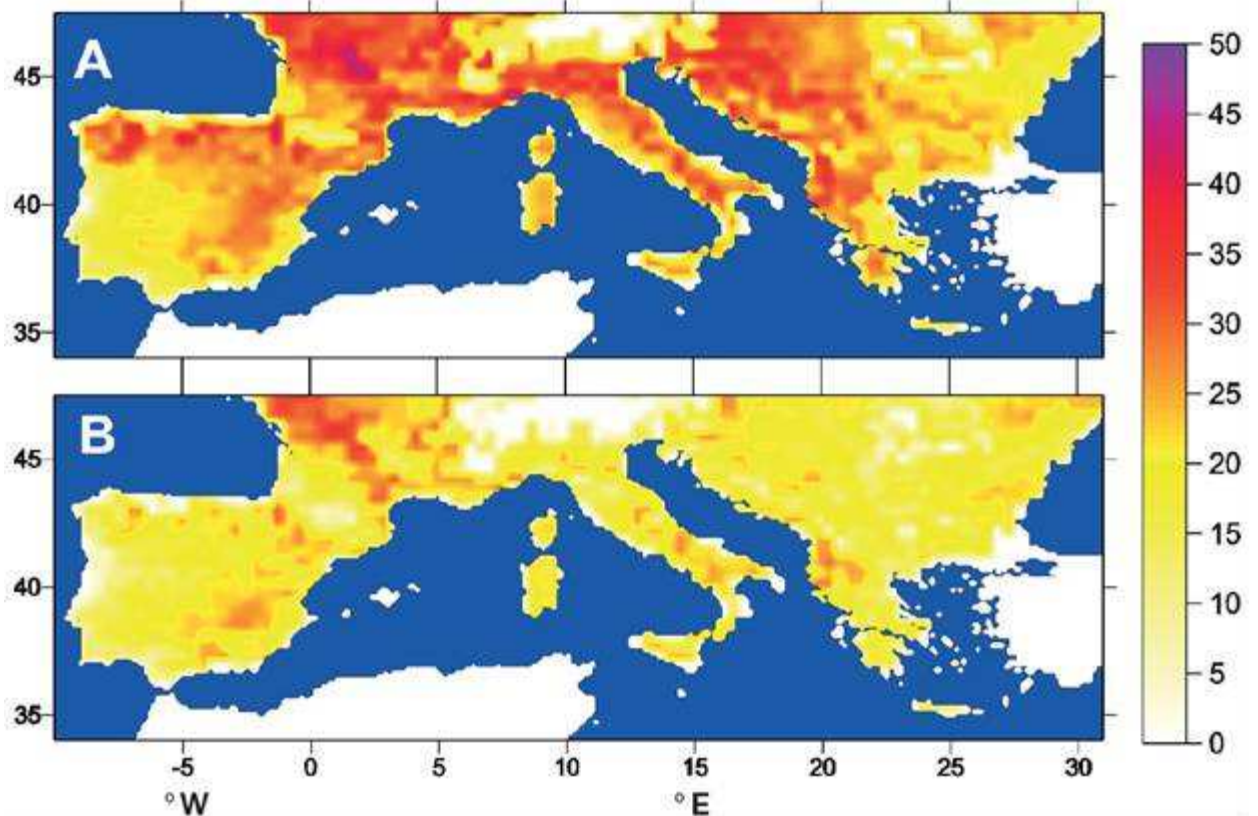
**Ríos mediterráneos:**  
Reducción caudales equinocciales (primavera)

Monthly severity rating index of the FWI



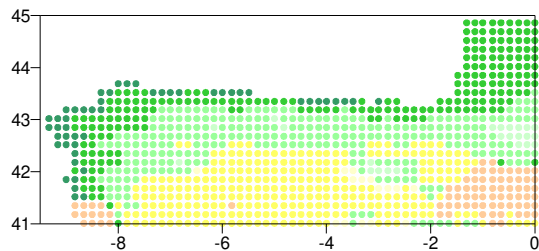
# Incendios forestales

Variación en el Índice Canadiense de Incendios forestales. Según Moriondi et al (2006).



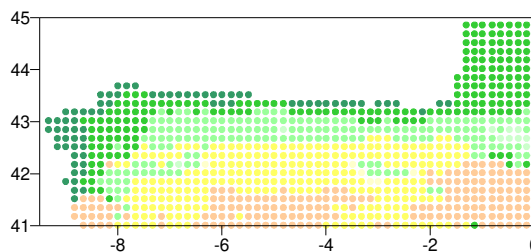


# Distribución potencial de pisos bioclimáticos

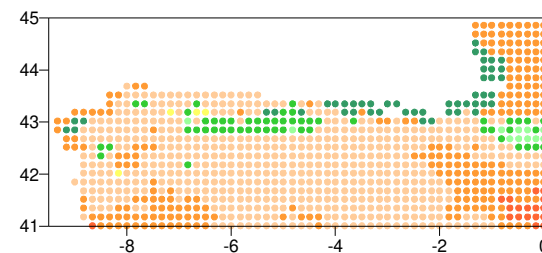


**PCM B2**

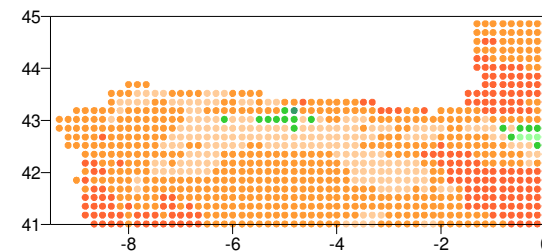
**PCM A2**



**HaD3CM B2**



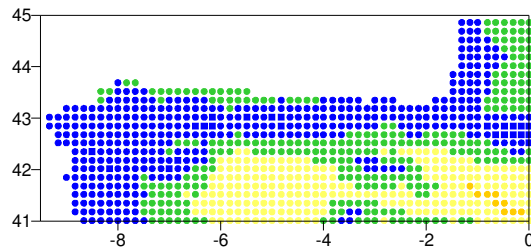
**HaD3CM A2**



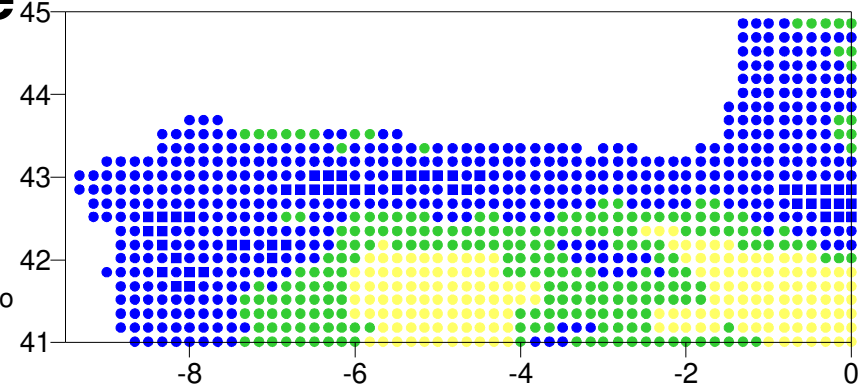
- Termotemplado
- Mesotemplado
- Supratemplado
- Orótemplado
- Inframediterráneo
- Termomediterráneo
- Mesomediterráneo
- Supramediterráneo
- Oromediterráneo

# Distribución potencial de pisos bioclimáticos

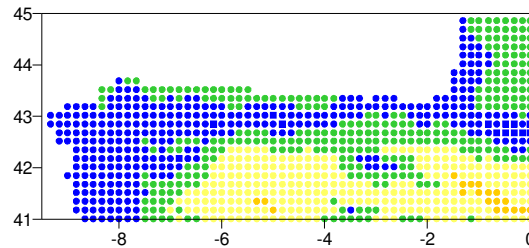
**PCM B2**



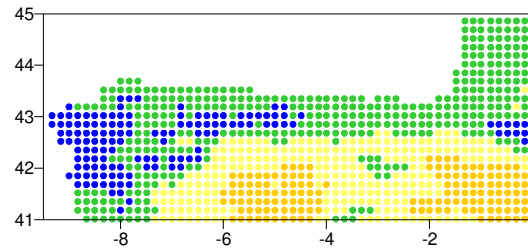
- Hiperárido
- Árido
- Seco
- Subseco
- Húmedo
- Hiperhúmedo



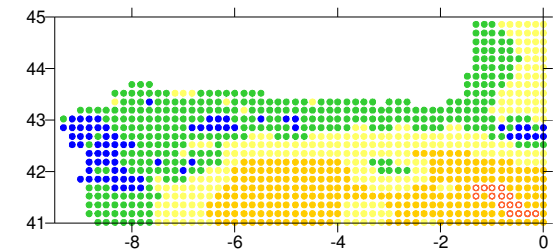
**PCM A2**



**HaD3CM B2**



**HaD3CM A2**



# El potencial turístico

