



*Instituto de Ciencias Ambientales  
de Castilla-La Mancha*



# **Modelos climáticos globales y regionales**

## **Escenarios de cambio climático en Europa**

Manuel de Castro

# Modelos Climáticos Globales

## ¿Qué son los modelos?

Resuelven las ecuaciones de las leyes y principios de la Física que gobiernan los procesos en cada componente del sistema climático, así como los intercambios de energía y masa entre ellos

ATMÓSFERA

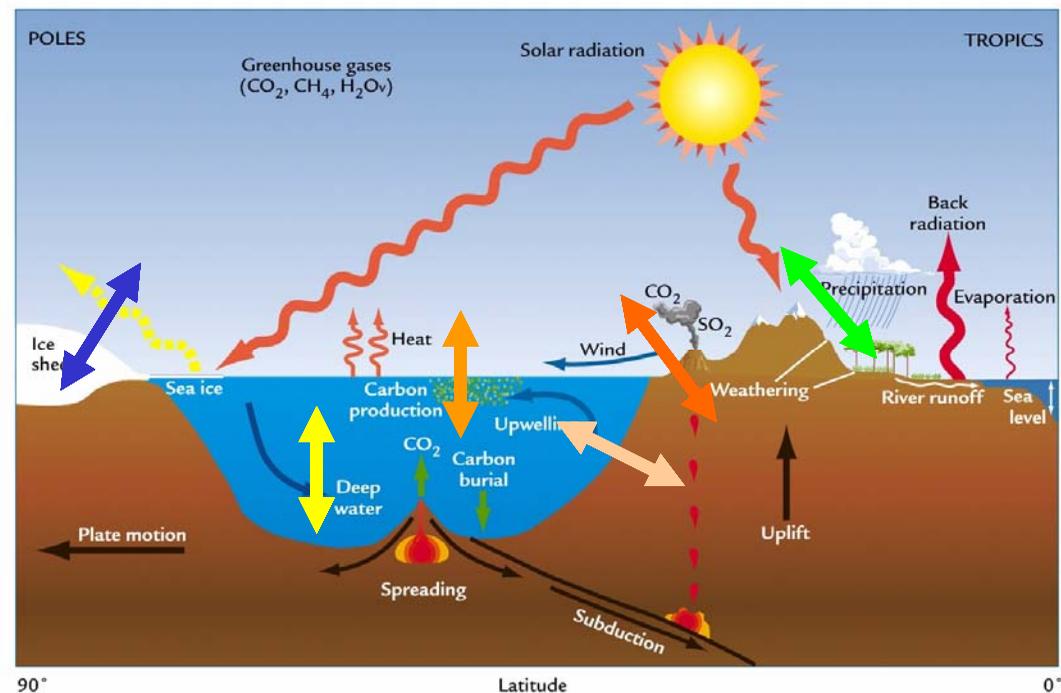
HIDROSFERA

CRIOSFERA

BIOSFERA

LITOSFERA

## EL SISTEMA CLIMÁTICO



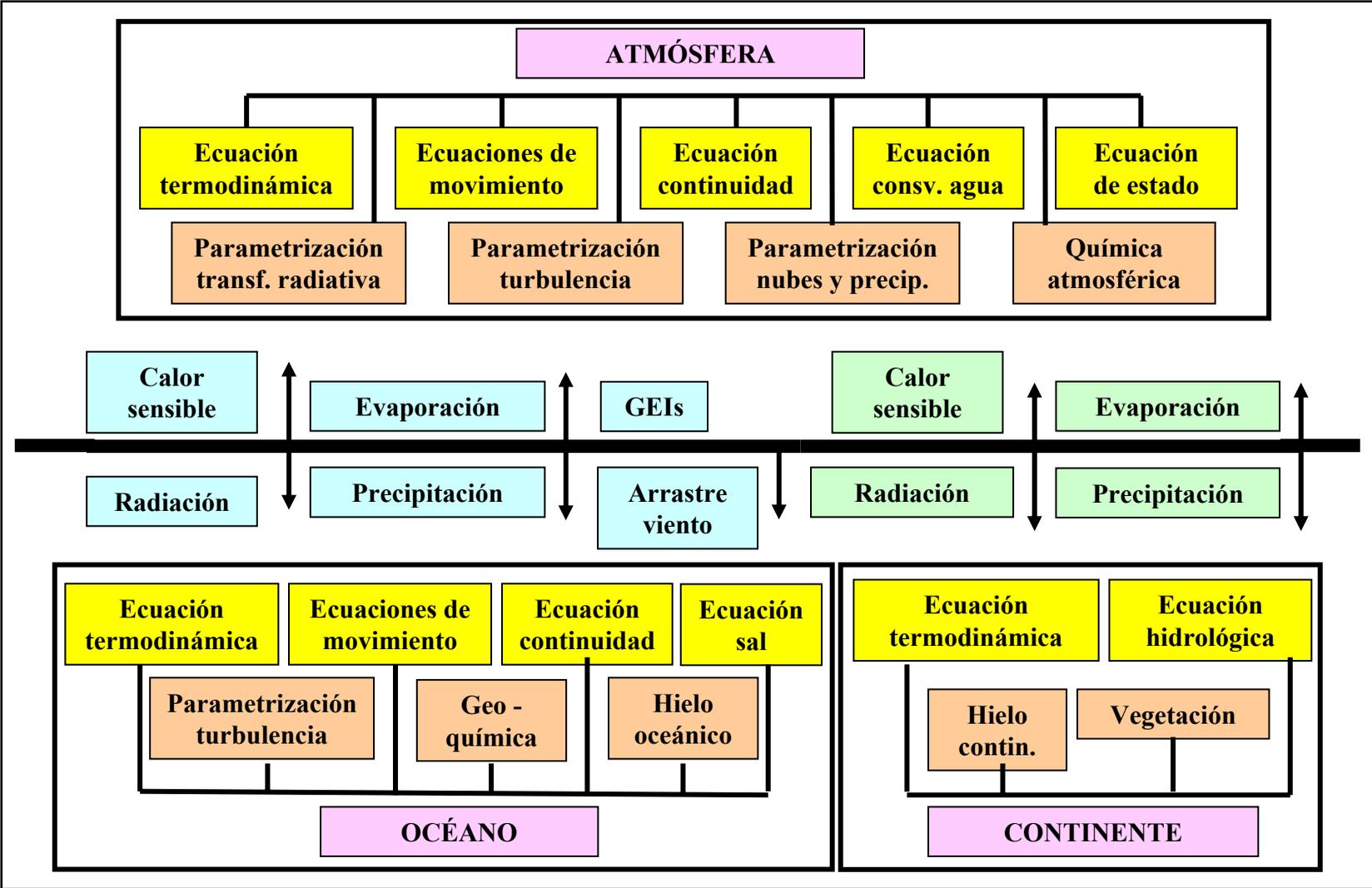
**MCGC: Modelos del Clima Global con aCoplamiento**

# Componentes de los MCGCs

**Ecuaciones de evolución de variables de predicción**

**Ecuaciones para resolver efectos de procesos subrejilla**

**Ecuaciones para resolver procesos de intercambio**



### ECUACIONES ATMOSFÉRICAS

Conservación de la energía :

$$\frac{dT}{dt} = (\nabla \cdot k_h \nabla) T + \frac{1}{c_p} \sum \frac{dQ}{dt}$$

Conservación del momento:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f \vec{k} \times \vec{V} - \nabla \Phi - \vec{F}$$

Conservación de la masa :

$$\nabla(\rho \cdot \vec{V}) = 0$$

Conservación del agua :

$$\frac{d(\rho q_i)}{dt} = (\nabla \cdot k_h \nabla)(\rho q_i) + E - P$$

Ecuación de estado :

$$p = \rho R_d T (1 + 0.61 q_v)$$

### ECUACIONES OCEÁNICAS

Conservación de la energía :

$$\frac{dT}{dt} = k_t \cdot \nabla^2 T$$

Conservación del momento:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = f \vec{k} \times \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \cdot \nabla^2 \vec{V}$$

Conservación de la masa :

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

Conservación de la salinidad :

$$\frac{dS}{dt} = k_s \cdot \nabla^2 S$$

Ecuación de estado :

$$\rho = \rho(T, S, p)$$

T: temperatura Q: flujos de calor V: vector velocidad

q<sub>i</sub>: fracción de agua en el aire S: salinidad f = 2 Ω sen φ

p: presión ρ: densidad φ: latitud Φ: geopotencial

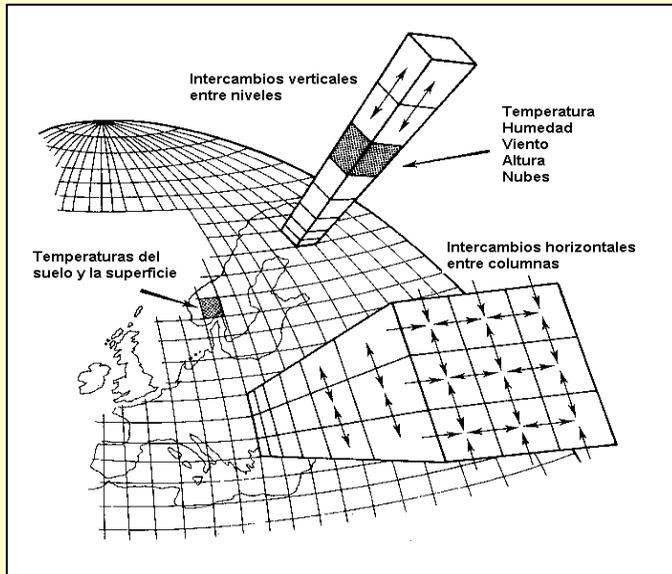
c<sub>p</sub>: calor esp. aire R<sub>d</sub>: cte. del aire k: coef. difusión ν: coef. viscosidad

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla$$

# ¿Cómo se resuelven las ecuaciones?

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

**Discretizando la  
variación espacial en  
celdillas 3D( $\Delta x, \Delta y, \Delta p$ )**



**~ 300 × 300 km atmosf.  
~ 100 × 100 km océano**

**Discretizando la evolución  
temporal en intervalos finitos ( $\Delta t$ )**

**Valores de  
variables  
en la celdilla  
(i, j, k)  
Viento (u, v)  
Temperatura (T)  
Presión (p)  
Humedad (q)  
...  
en el inicio de la  
simulación ( $t_0$ )**

**Valores de  
variables  
en la celdilla  
(i, j, k)  
Viento (u, v)  
Temperatura (T)  
Presión (p)  
Humedad (q)  
...  
en un instante  
posterior ( $t_0 + \Delta t$ )**

**... y así se continua avanzando en pasos  
de tiempo  $\Delta t$  hasta completar el periodo  
de tiempo de simulación (  $\approx 250$  años)**

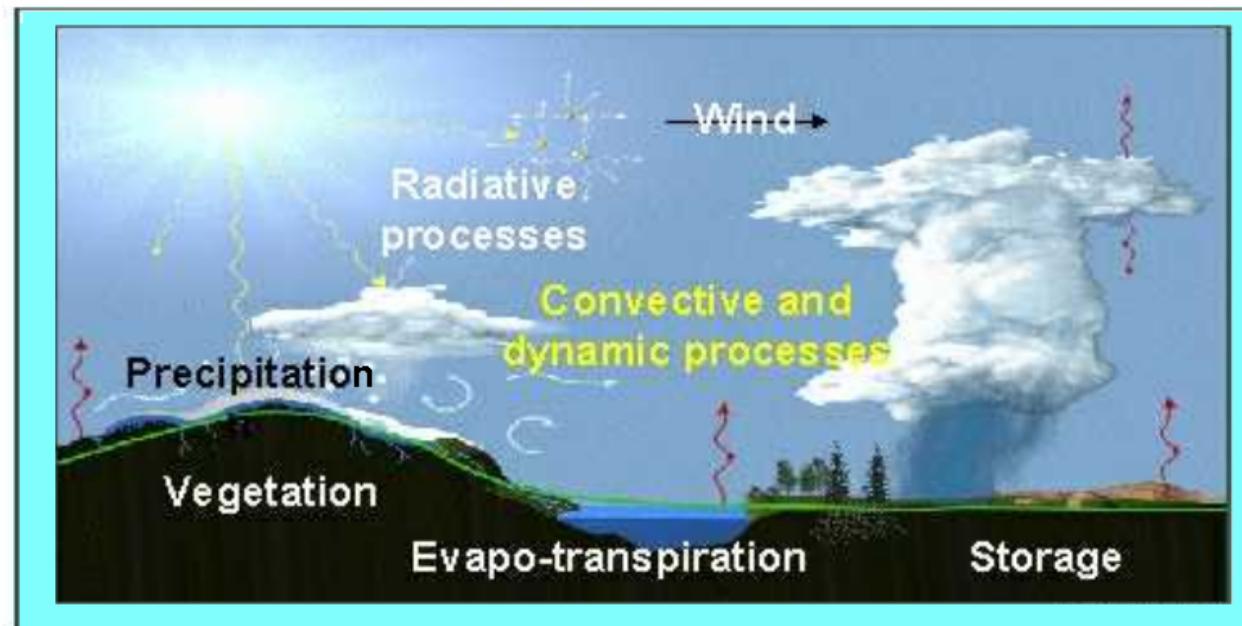
**Aumentar la resolución espacial requiere incrementar la resolución temporal**

# Parametrizaciones físicas

Las ecuaciones numéricas sólo pueden resolver adecuadamente los procesos meteorológicos cuyo tamaño sea mayor de  $2 \cdot \Delta s$ .

Los efectos de estos procesos atmosféricos de escala "subrejilla" deben ser deducidos a partir de variables pronosticadas por el modelo (T, q, p, r, ...)

Some processes simulated by Global Climate Models



## ¿Por qué se utilizan superordenadores?

**Cálculo necesario para realizar una simulación climática global de 250 años con un MCGC actual (Resolución : ~ 300 x 300 km atmosf., ~ 100 x 100 km océano)**

**Discretización espacial : ~  $3 \cdot 10^5$  celdillas**

**Discretización temporal :  $\Delta t = 1800$  s**

**Número de iteraciones :  $4.4 \cdot 10^6$**

**Número de variables de predicción : ~ 10**

**Número de ecuaciones a resolver : ~  $10^{13}$**

**Cada ecuación tiene varios términos**

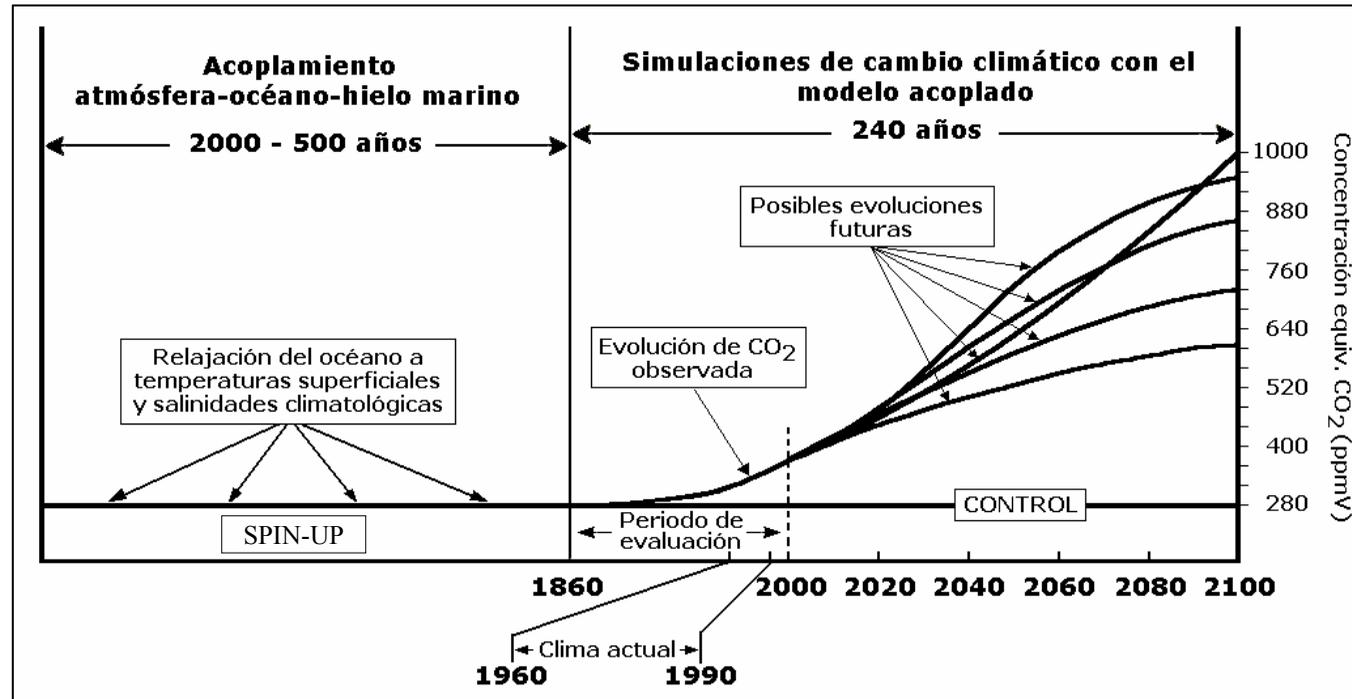
**Resolver cada término requiere varias operaciones**

**Las parametrizaciones necesitan el triple de cálculo**

**Número de operaciones matemáticas simples: ~  $10^{17}$**

**Para ejecutar ~  $10^{17}$  flop en aprox. 2 meses → ~  $10^2$  Gflops**

# ¿Cómo se simulan los escenarios con los MCGCs?



## SPIN-UP y CONTROL

Simulación de cientos de años con [CO<sub>2</sub>] = 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

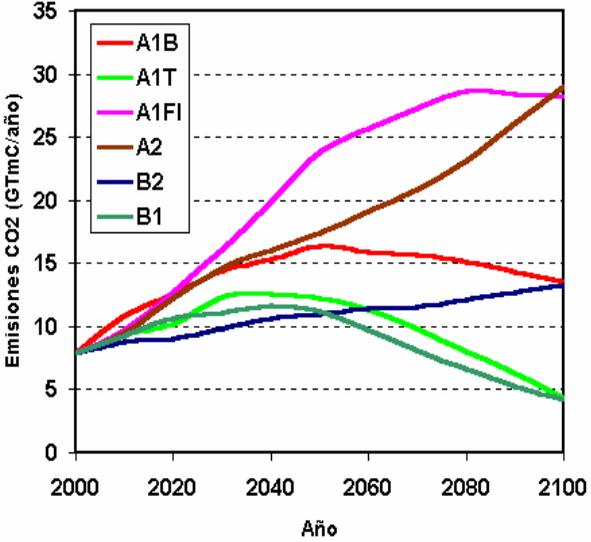
Otra simulación de 1860 a 2000 con el incremento observado de GEIs y sulfatos para evaluar la capacidad del modelo de reproducir la tendencia observada de la temperatura global. El "clima actual" (1960-90) se toma como referencia para derivar escenarios de cambio climático.

## ESCENARIOS

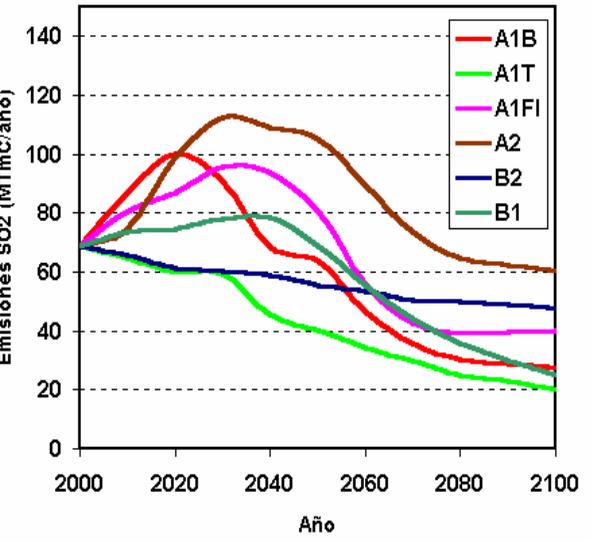
Simulaciones desde 2000 suponiendo diversas evoluciones de emisiones de GEIs y sulfatos. Para construir los escenarios se calcula la diferencia entre la simulación de "clima actual" y la de cualquier periodo futuro.

# Escenarios de emisiones (IPCC-SRES)

Emisiones de CO2



Emisiones de SO2



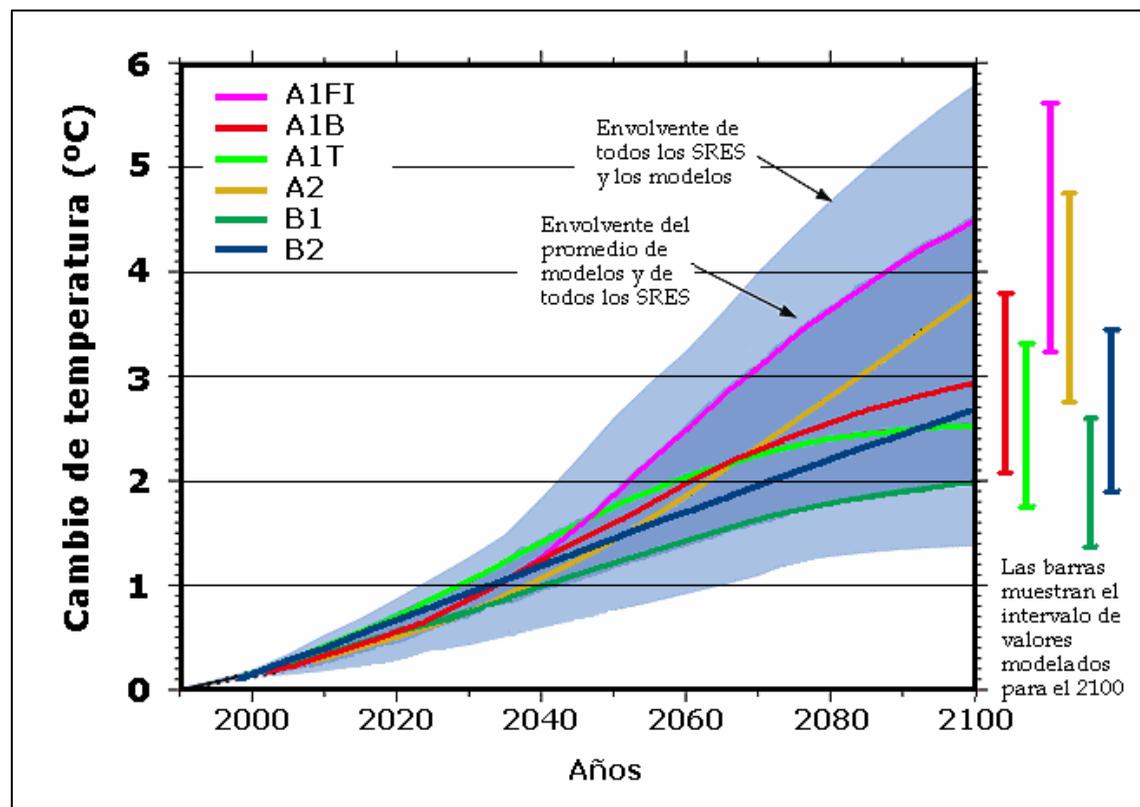
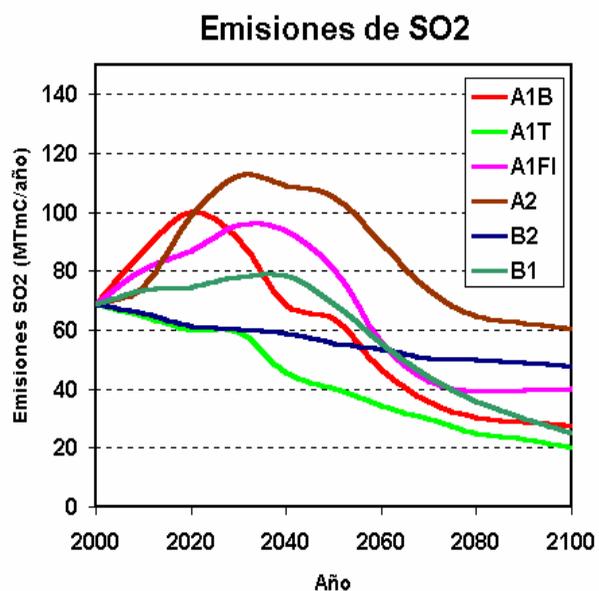
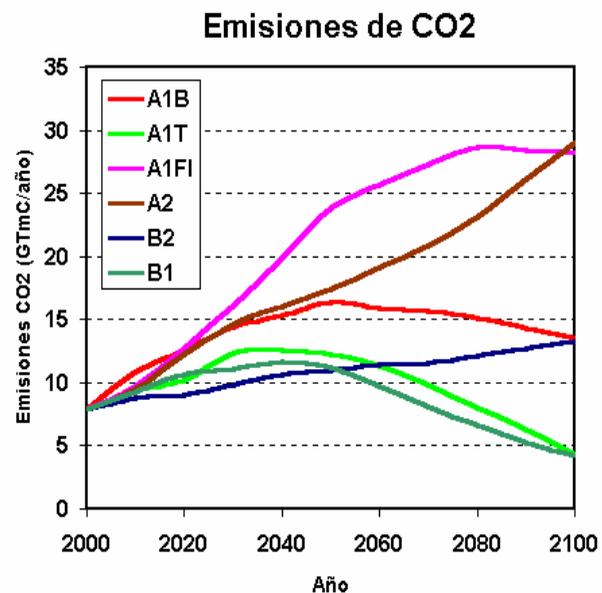
**Cuantificación de las posibles evoluciones de emisiones antropogénicas de GEIs y SUL a lo largo del siglo 21 basada en criterios socio-económicos y tecnológicos**

Escenario	Población	Economía	Medio ambiente	Equidad	Tecnología	Mundialización
A1FI	↷	↗	↘	↗	↗	↗
A1B	↷	↗	↗	↗	↗	↗
A1T	↷	↗	↗	↗	↗	↗
B1	↷	↗	↗	↗	↗	↗
A2	↗	↗	↘	↘	↗	↘
B2	↗	↗	↗	↗	↗	↘

**SRES**

<http://sres.ciesin.org/sres/>

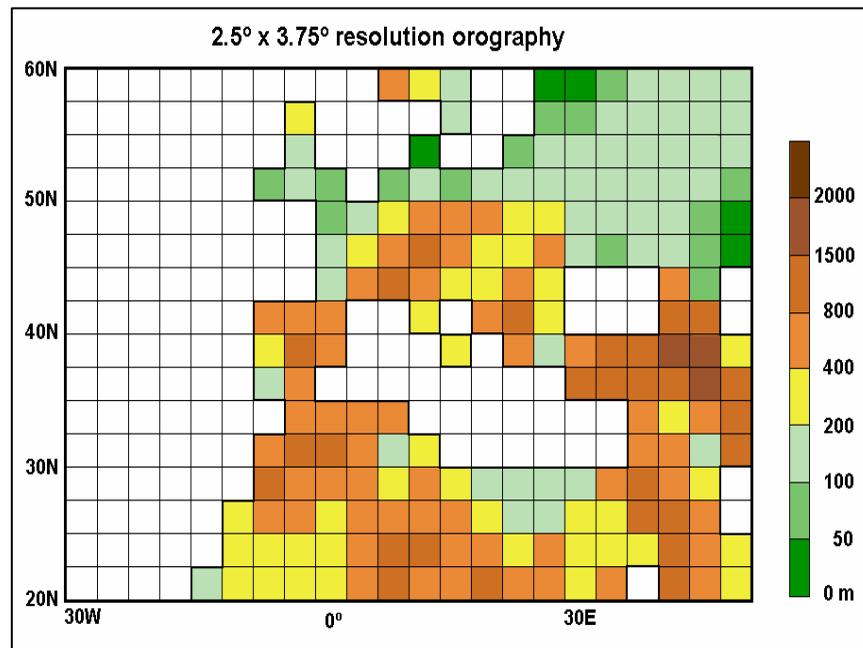
## Emisiones SRES y proyecciones de cambio global de temperatura



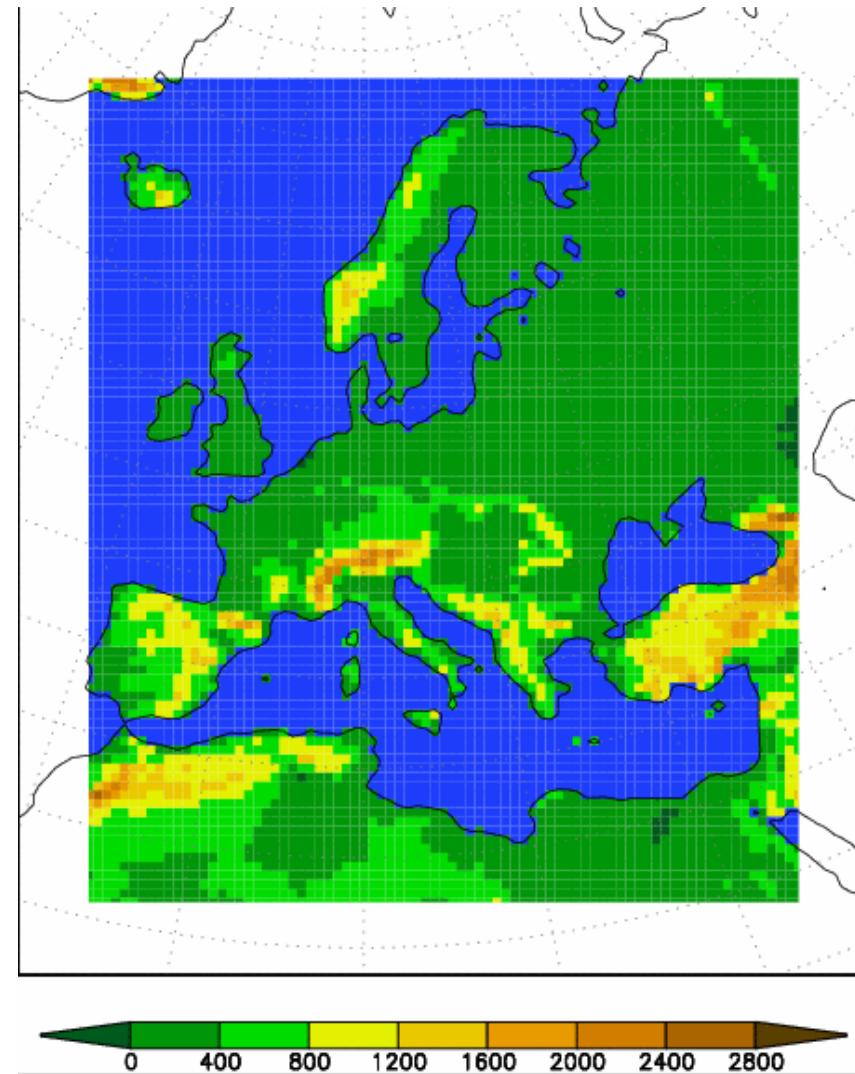
**En todos los escenarios se proyecta un calentamiento global, pero cambia la intensidad y la tendencia**

Los escenarios de cambio climático de los MCGC no deben aplicarse directamente para estudios de impacto a escala regional por su muy baja resolución espacial (IPCC, 2001).

## Orografía y línea de costa con celdillas de 300 km

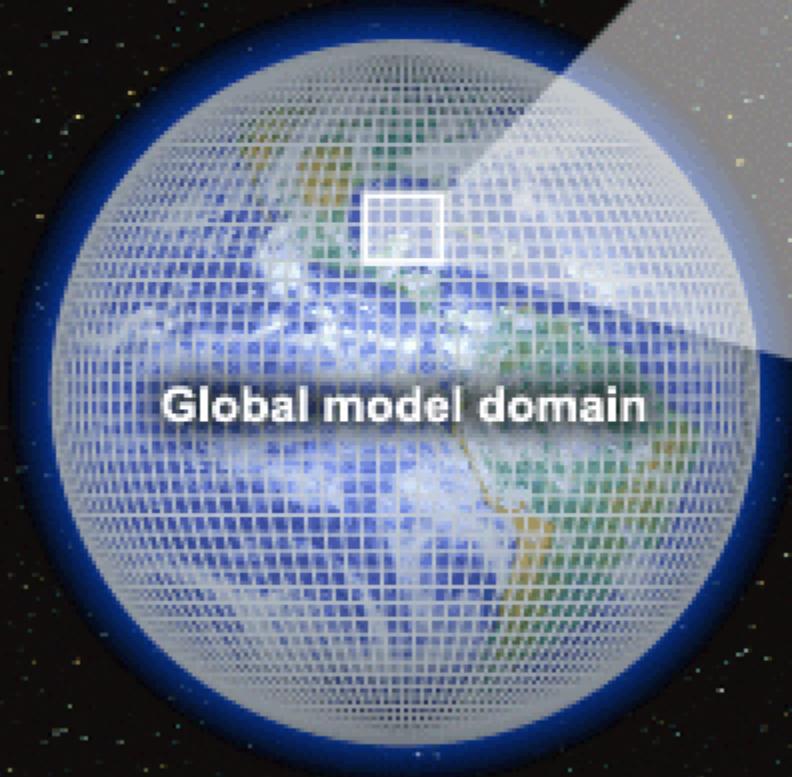


## Orografía y línea de costa con celdillas de 50 km



## Modelos climáticos regionales (MCR)

**Modelo con mayor resolución,  
anidado en la malla de un MCG**

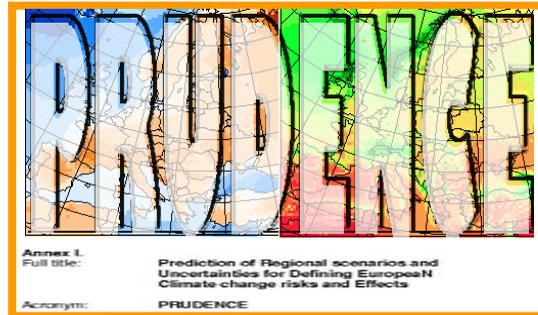


**Por los contornos se  
actualizan cada 6-12 h los  
valores de las variables  
simulados por el MCGC**

# Escenarios de cambio climático en Europa derivados con diversos modelos

## EU Project

<http://prudence.dmi.dk>



### **MCG (300 km, 150 km\*, 50 km\*\*)**

HadCM3 (HC, UK) SRES: A1, A2, B1, B2

HadAM3 (HC, UK)\* SRES: A2, B2

ECHAM4 (MPIM, GE) SRES: A1, A2, B1, B2

ARPEGE (CNRM, FR)\*\* SRES: A2, B2

### **MCR (50 km, 25 km\*)**

HadRM3 (HC, UK) SRES: A2, B2

HIRHAM (DMI, DK)\* SRES: A2, B2

REMO (MPIM, GE) SRES: A2, B2

RegCM (ICTP, IT) SRES: A2

CHRM (ETHZ, CH) SRES: A2

PROMES (UCLM, SP) SRES: A2, B2

RCA-O (SMHI, SW)\* SRES: A2, B2

CLM (GKSS, GE) SRES: A2

RACMO (KNMI, HO) SRES: A2

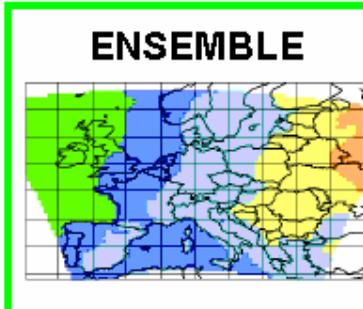
**Proyecciones de cambio climático en 2070-2100**

**Cambio de temperatura media estacional relativo al periodo 1960-90 (9 MCR anidados en HadAM3)**

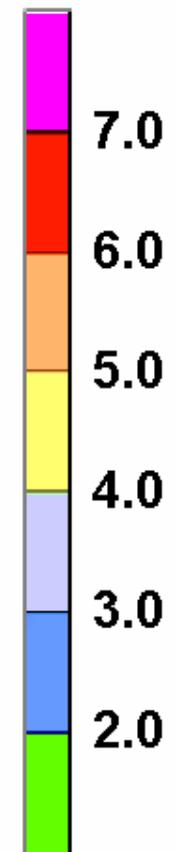
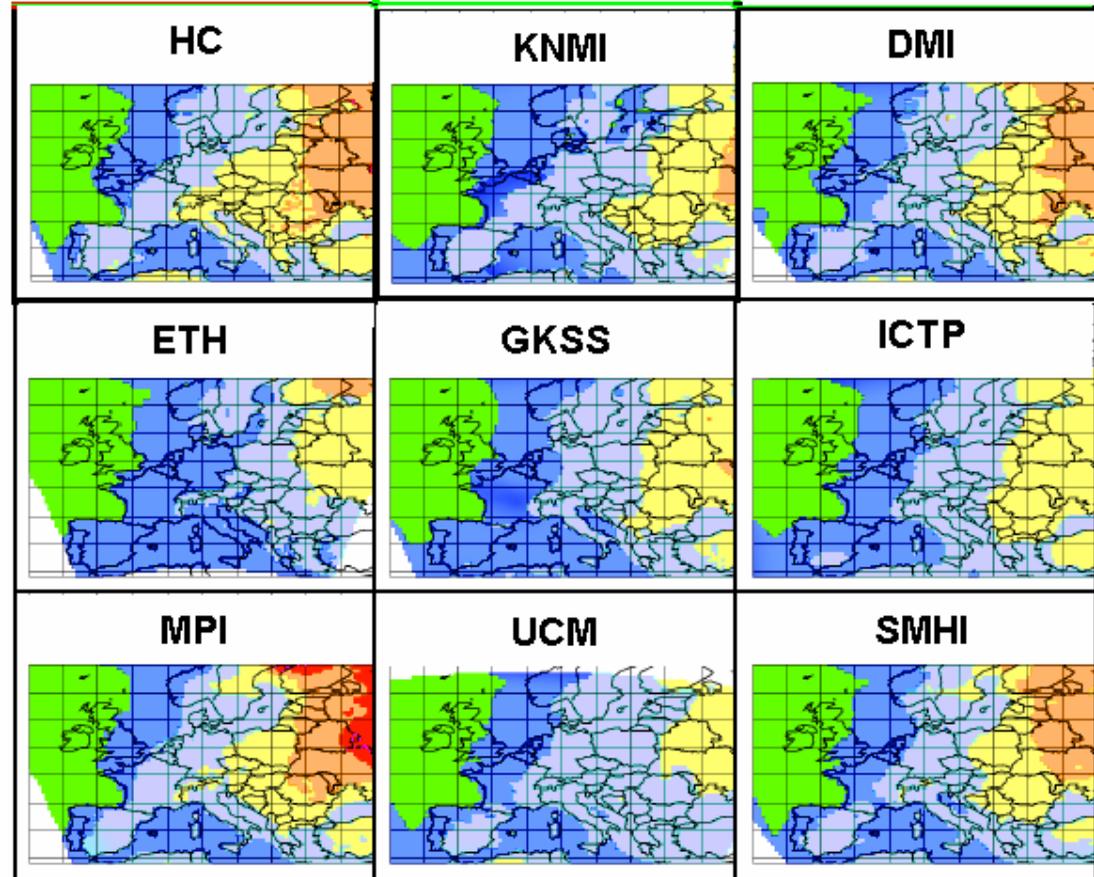
Temperature change (°C)



**Escenario de emisiones SRES-A2**



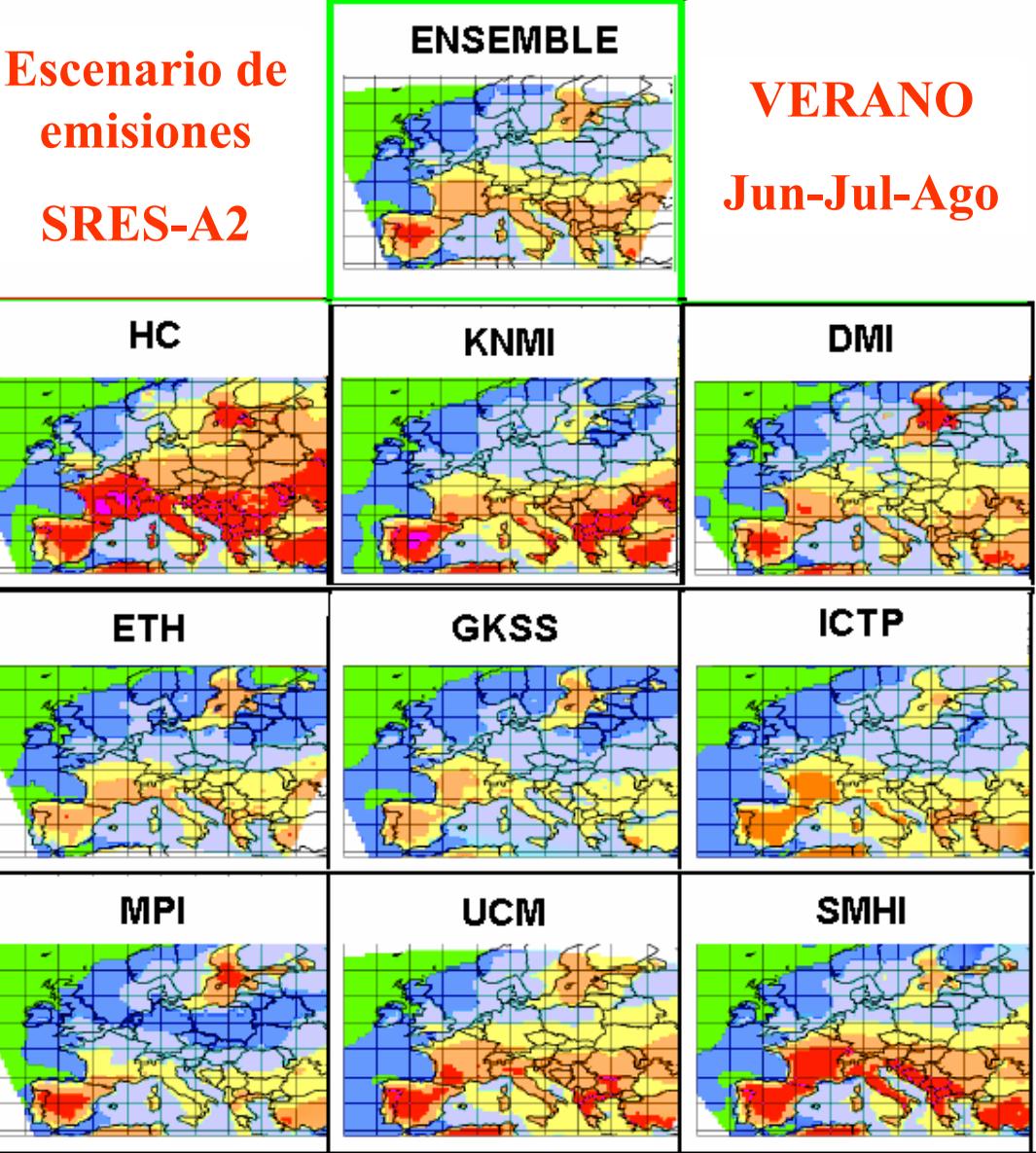
**INVIERNO  
Dic-Ene-Feb**



**Proyecciones de cambio climático en 2070-2100**

**Cambio de temperatura media estacional relativo al periodo 1960-90 (9 MCR anidados en HadAM3)**

Temperature change (°C)

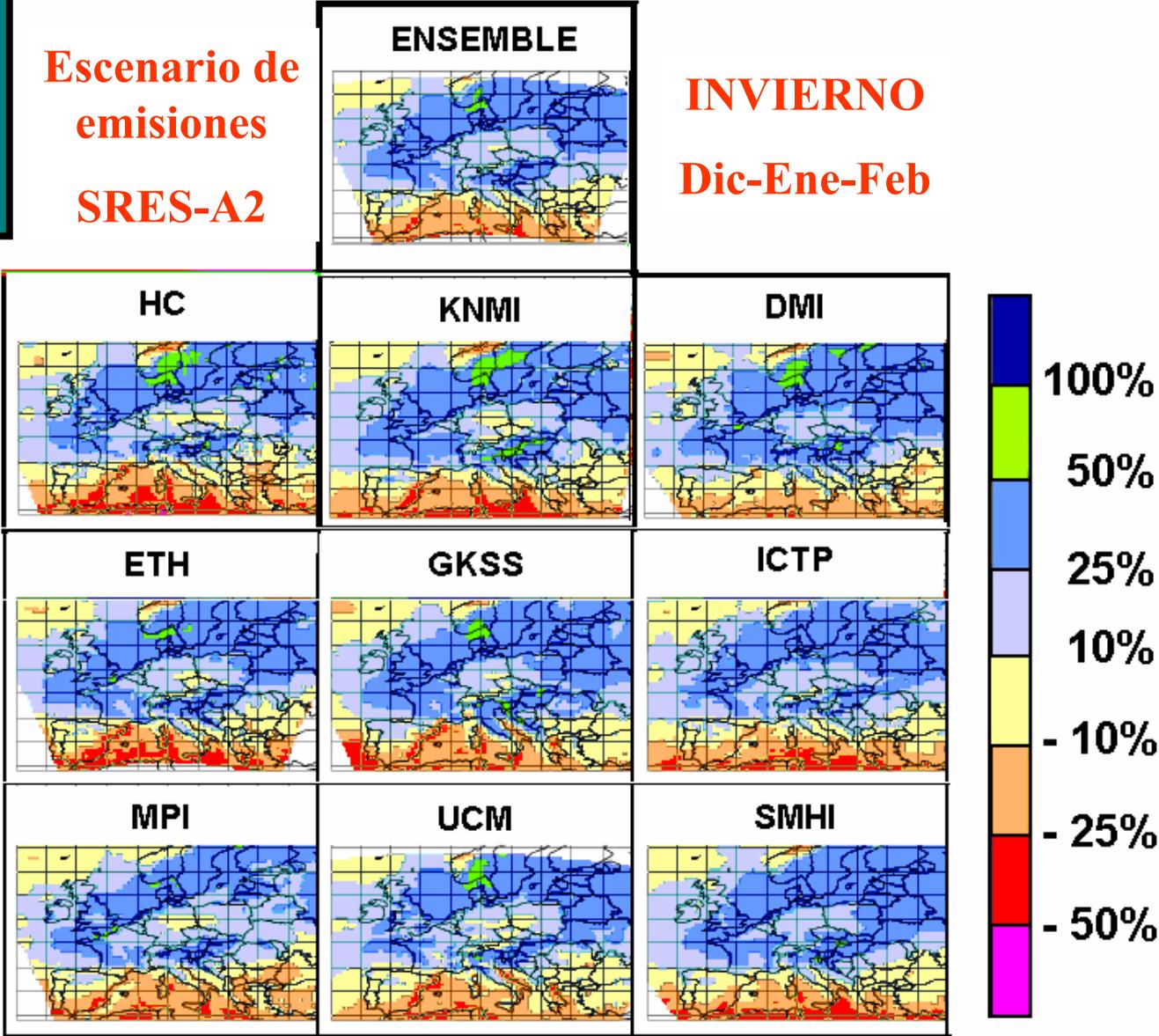


Christensen et al. *Climatic Change* (2006)

**Proyecciones de cambio climático en 2070-2100**

**Cambio % de precipitación media estacional relativo al periodo 1960-90 (9 MCR anidados en HadAM3)**

**Precipitation change (%)**

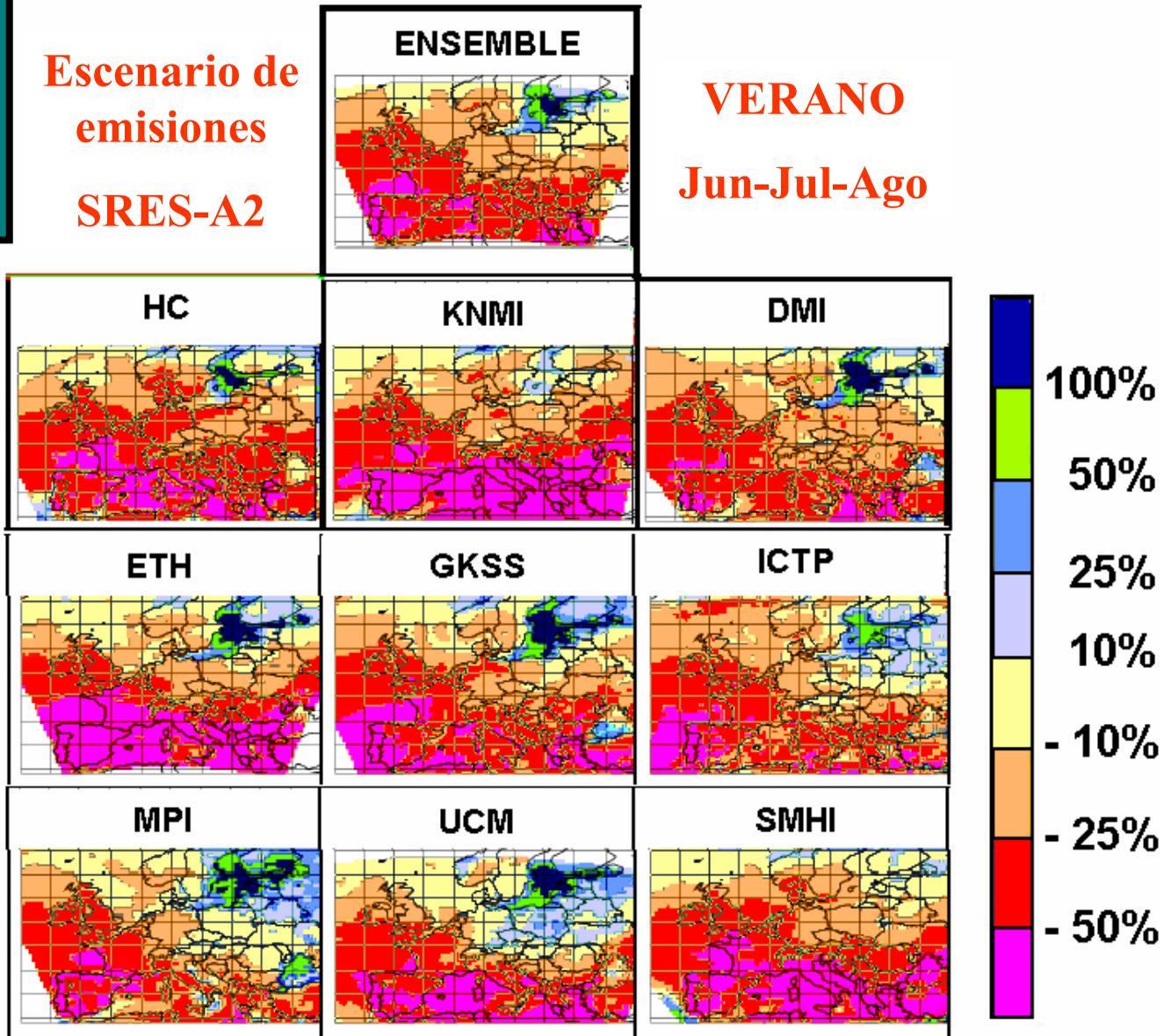


Christensen et al. *Climatic Change* (2006)

**Proyecciones de cambio climático en 2070-2100**

**Cambio % de precipitación media estacional relativo al periodo 1960-90 (9 MCR anidados en HadAM3)**

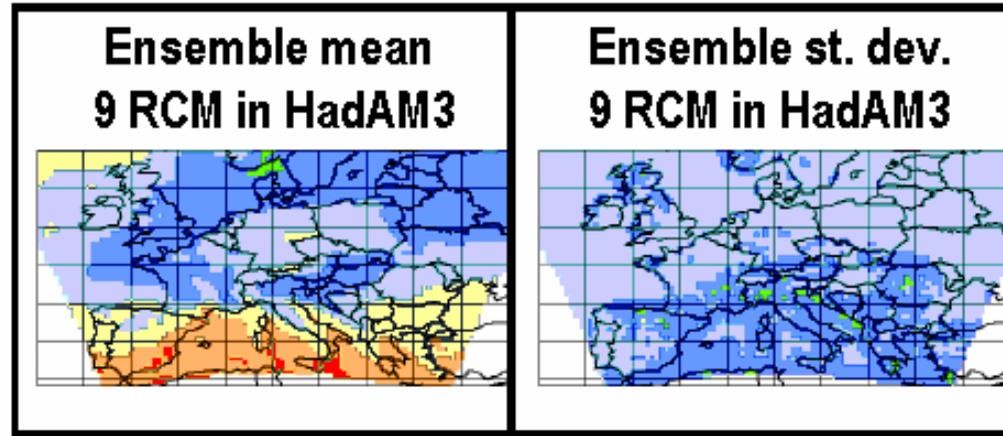
**Precipitation change (%)**



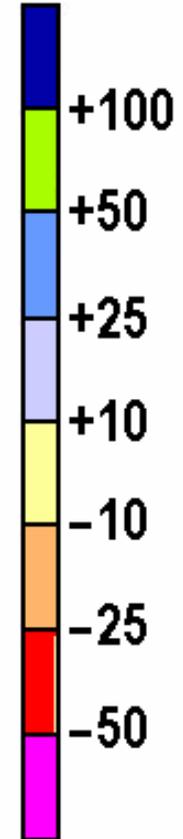
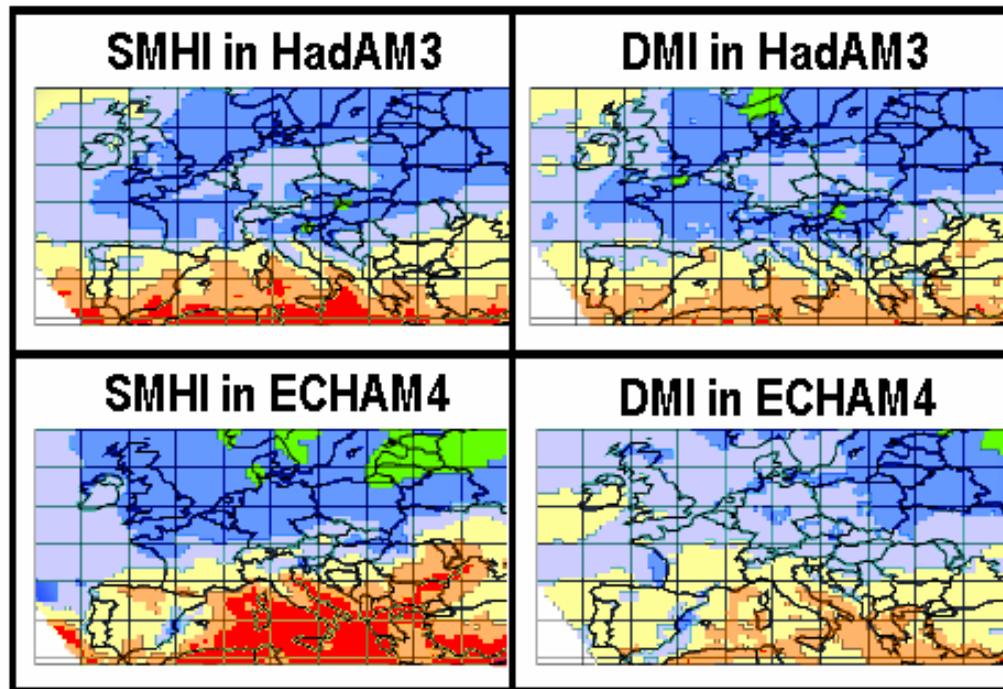


### Precipitation change (%) DJF

Diferencias entre los 9 MCR anidados en el mismo MCG



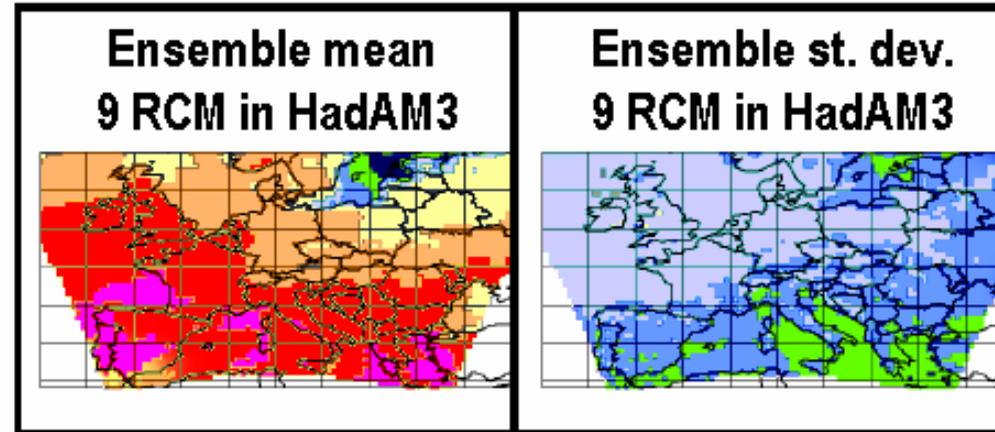
Diferencias entre 2 MCR anidados en 2 MCG



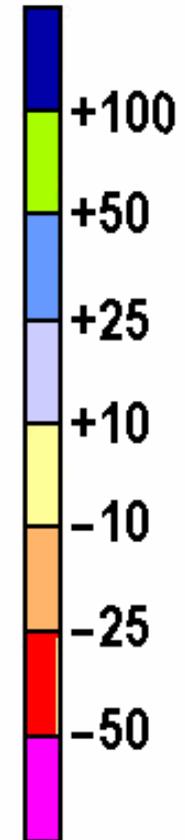
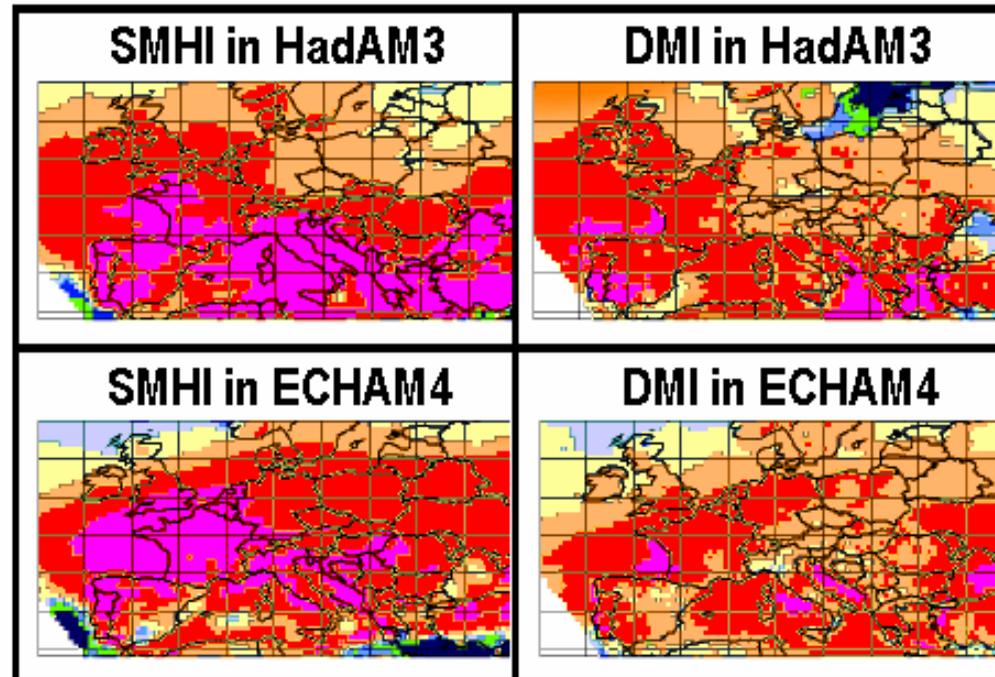


## Precipitation change (%) JJA

Diferencias entre los 9 RCM anidados en el mismo GCM

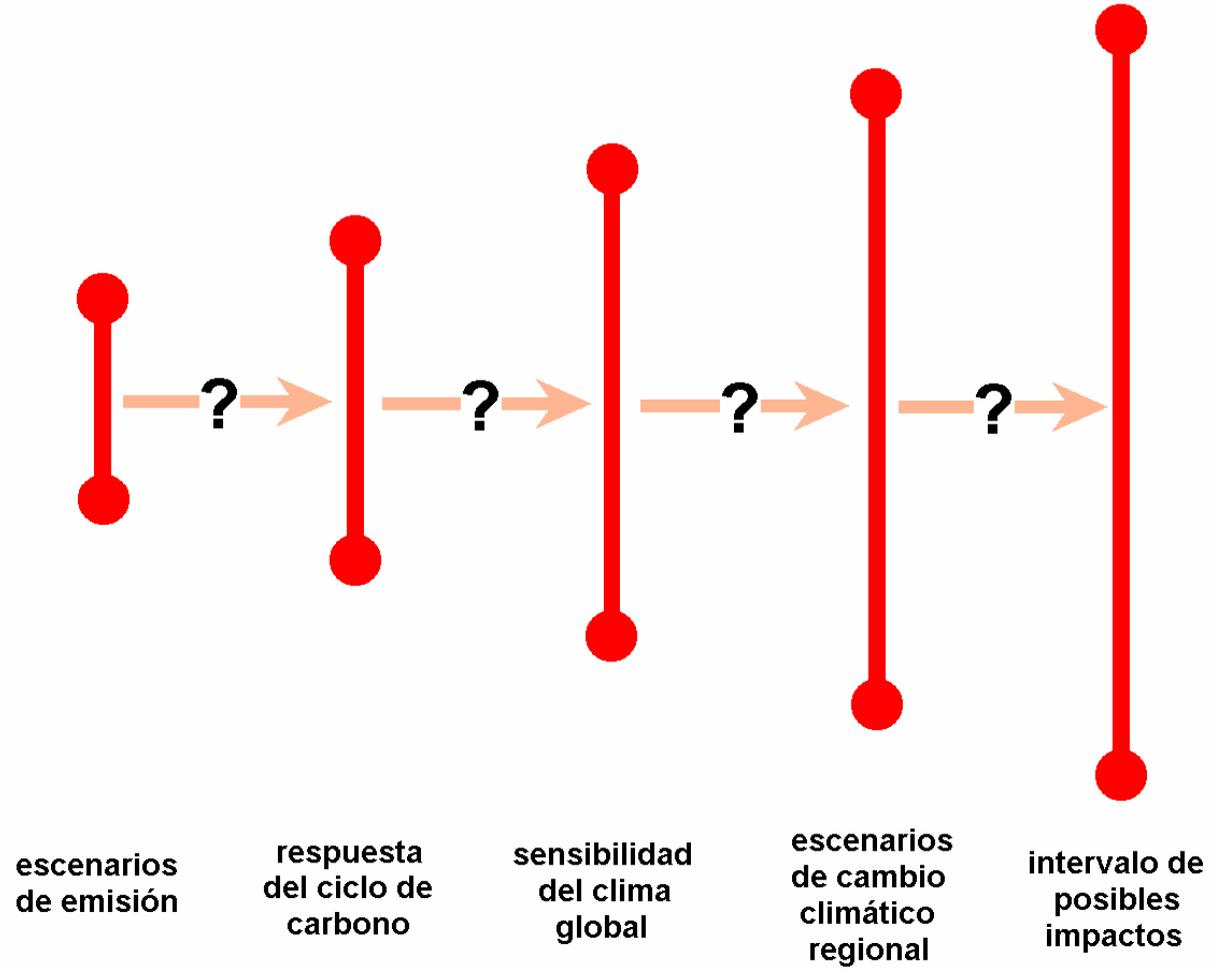


Diferencias entre 2 RCM anidados en 2 GCM





# INCERTIDUMBRES



**Mayor coincidencia entre modelos**



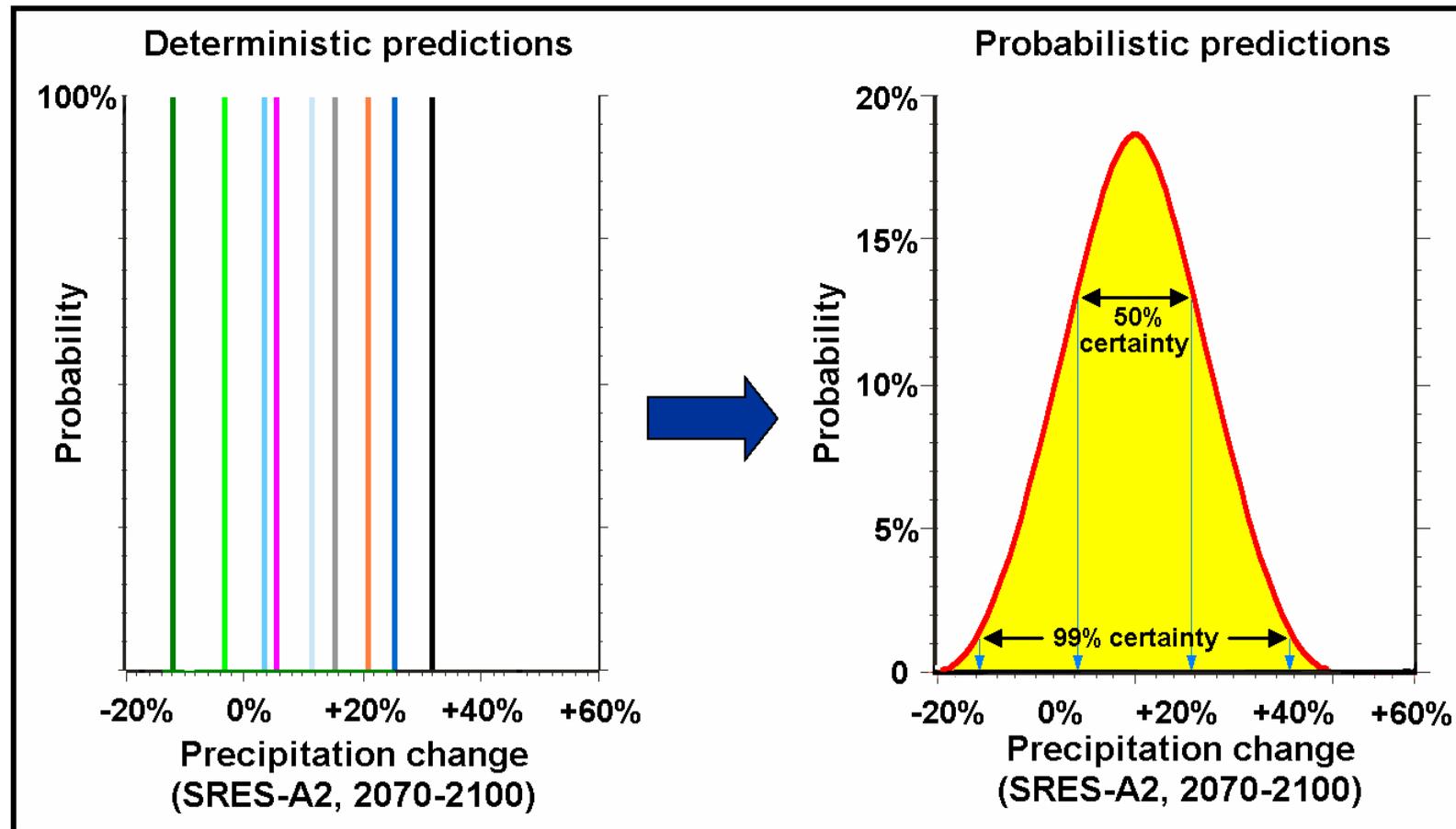
**Menor incertidumbre**

# Concepto clave:

Más coincidencia  
entre simulaciones



Menos incertidumbre  
en las predicciones

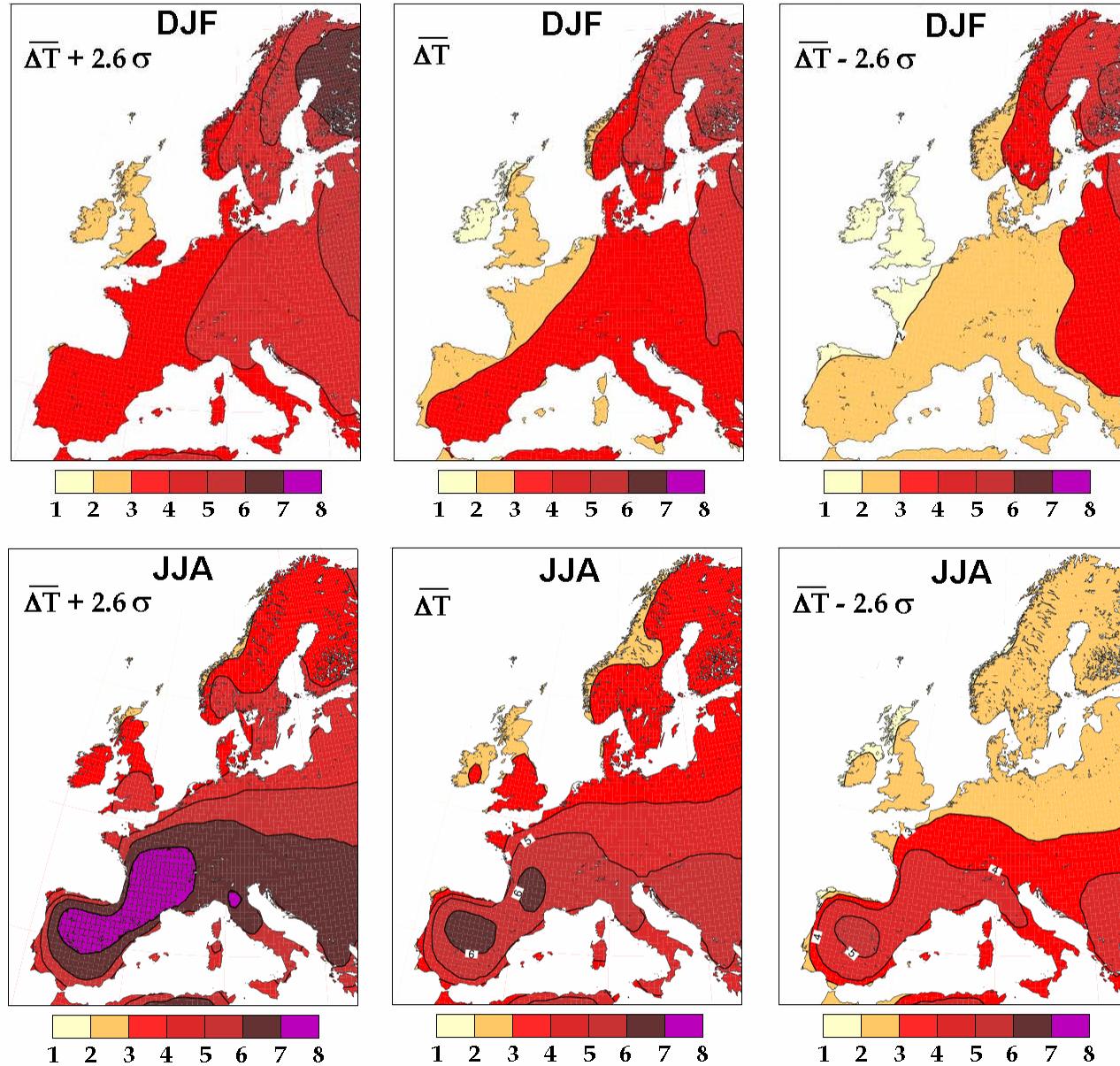




**Cambio de temperaturas estacionales con intervalo de confianza (99%), derivado del "ensemble" de los 3 GCM y los 9 RCM**

Dequé et al.,  
*Climatic Change*  
2006

SRES-A2 Seasonal temperature change in °C (2071-2100)

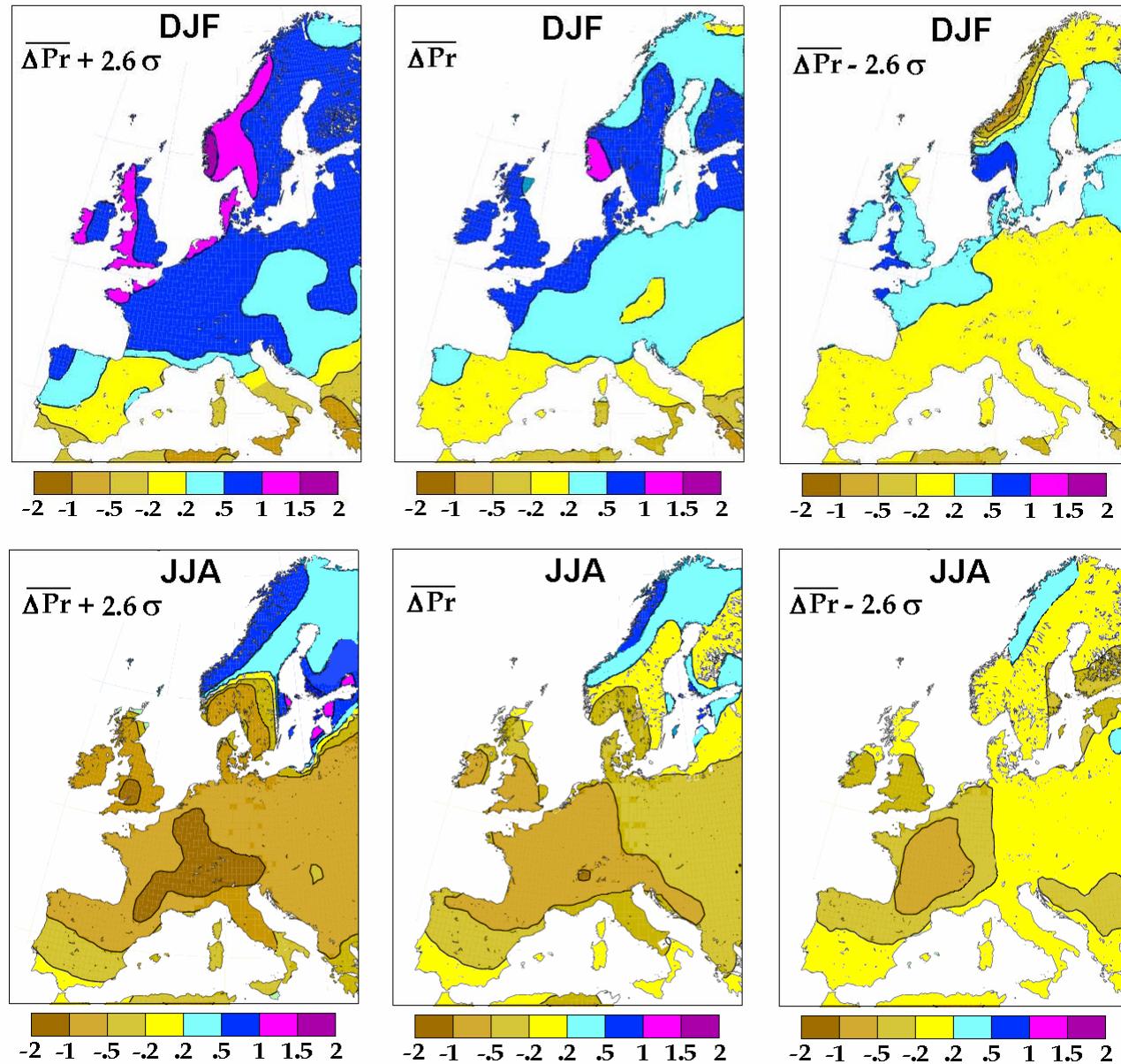




**Cambio de precipitaciones estacionales con intervalo de confianza (99%), derivado del "ensemble" de los 3 MCG y los 9 MCR**

Dequé et al.,  
*Climatic Change*  
2006

SRES-A2 Seasonal precipitation change in mm/day (2071-2100)





## PRINCIPALES CONCLUSIONES

1. Los MCR reproducen aceptablemente los patrones regionales de temperatura y precipitación estacionales, aunque por lo general presentan bias significativos en determinadas regiones y estaciones del año, en parte “heredados” de los MCGCs.
2. Ningún MCR puede señalarse como superior a los demás, siendo el promedio del “ensemble” el que mejor se ajusta a la climatología (*Jacob et al., Climatic Change 2006*).
3. Las distribuciones espaciales de los cambios de temperatura proyectados para 2070-2100 presentan patrones similares en la mayor parte de las simulaciones con los MCR.
4. Las distribuciones de los cambios de precipitación presentan más dispersión entre los modelos que los de temperatura
5. La incertidumbre de las proyecciones de cambio climático en un escenario de emisiones (SRES-A2) se ha cuantificado componiendo un “ensemble” con los 9 MCR y los 3 MCG.



**Full title: ENSEMBLE-based Predictions of Climate Changes and their Impacts**

**Acronym: ENSEMBLES**

**EU Project: GOCE-CT-2003-505539**

**Start: Sept-2004**

**End: Sept-2009**

**<http://www.ensembles-eu.org>**

# Objetivos científicos



- 1. Producir predicciones probabilistas en escalas estacionales, decadales y multidecadales, para explorar los impactos asociados**
- 2. Integrar procesos adicionales en los modelos climáticos**
- 3. Aplicar modelos climáticos regionales con alta resolución evaluados con datos climatológicos "gridded" de alta calidad en Europa**
- 4. Reducir la incertidumbre en las predicciones climáticas y en las estimaciones de impactos**
- 5. Incrementar la aplicación de las predicciones climáticas**
- 6. Aumentar el conocimiento científico y la provisión de información relevante relacionada con los impactos del cambio climático**

# Modelos globales (RT2A)



<b>Group</b>	<b>PI</b>	<b>Model</b>	<b>Short description of model runs to be carried out</b>	<b>Expected completion date</b>
<b>CNRM</b>	<b>J-F Royer</b>	<b>ARPEGE + OPA 8</b>	<b>20th Century hindcasts and 21st century scenarios</b>	<b>October-2006</b>
<b>MPIMET</b>	<b>E. Roeckner</b>	<b>ECHAM 5 + MPI-OM</b>	<b>20th Century hindcasts and 21st century scenarios</b>	<b>October-2006</b>
<b>DMI</b>	<b>E. Kaas</b>	<b>ECHAM 5 + MPI-OM</b>	<b>20th Century hindcasts and 21st century scenarios</b>	<b>October-2006</b>
<b>FUB</b>	<b>U. Cubasch</b>	<b>EGMAM (ECHO-G-MA-Mecca)</b>	<b>20th Century hindcasts and 21st century scenarios</b>	<b>October-2006</b>
<b>METO-HC</b>	<b>P. Stott</b>	<b>HadCM3</b>	<b>20th Century hindcasts and 21st century scenarios</b>	<b>October-2006</b>
<b>IPSL</b>	<b>J-L. Dufresne</b>	<b>IPSL-CM4</b>	<b>20th Century hindcasts and 21st century scenarios</b>	<b>October-2006</b>
<b>INGV</b>	<b>M. Vichi</b>	<b>ECHAM4.6 + OPA 8.2 + LIM</b>	<b>20th Century hindcasts and 21st century scenarios</b>	<b>October-2006</b>
<b>NERSC</b>	<b>H. Drange</b>	<b>ARPEGE + MICOM</b>	<b>20th Century hindcasts and 21st century scenarios</b>	<b>October-2006</b>

## Modelos regionales (RT2B)



<b>Group</b>	<b>PI</b>	<b>Model</b>	<b>Short description of model runs to be carried out</b>	<b>Expected completion date</b>
<b>DMI</b>	<b>J.H. Christensen</b>	<b>HIRHAM</b>	Transient simulations at a 20 km resolution for <b>1950-2100</b>	<b>September-2007</b>
<b>SMHI</b>	<b>M. Rummukainen</b>	<b>RCA</b>	Transient simulations at a 20 km resolution for <b>1950-2050</b>	<b>September-2007</b>
<b>KNMI</b>	<b>B. van den Hurk</b>	<b>RACMO</b>	Transient simulations at a 20 km resolution for <b>1950-2050</b>	<b>September-2007</b>
<b>ICTP</b>	<b>F. Giorgi</b>	<b>RegCM</b>	Transient simulations at a 20 km resolution for <b>1950-2050</b>	<b>September-2007</b>
<b>METO-HC</b>	<b>R. Jones</b>	<b>HadRM</b>	Transient simulations at a 20 km resolution for <b>1950-2100</b>	<b>September-2007</b>
<b>CNRM</b>	<b>M. Déqué</b>	<b>ALADIN</b>	Transient simulations at a 20 km resolution for <b>1950-2050</b>	<b>September-2007</b>
<b>MPIMET</b>	<b>D. Jacob</b>	<b>REMO</b>	Transient simulations at a 20 km resolution for <b>1950-2100</b>	<b>September-2007</b>
<b>UCLM</b>	<b>M. de Castro</b>	<b>PROMES</b>	Transient simulations at a 20 km resolution for <b>1950-2050</b>	<b>September-2007</b>
<b>ETH</b>	<b>Ch. Frei</b>	<b>CHRM</b>	Transient simulations at a 20 km resolution for <b>1950-2050</b>	<b>September-2007</b>