



semana 7: bases del modelamiento del clima

eh1d3 - calentamiento global:
un análisis científico-humanista

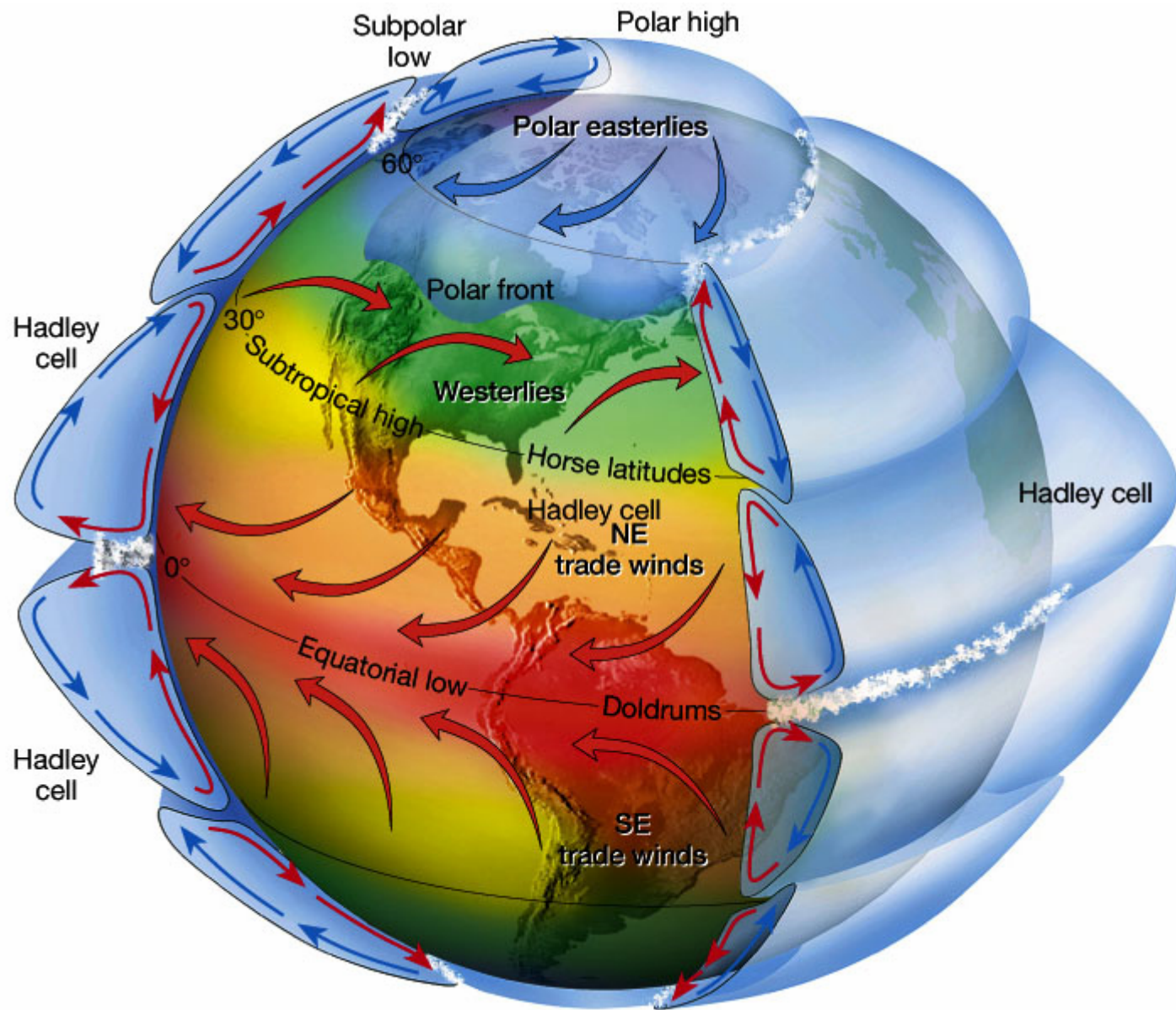
Martín Jacques Coper
martin@dgf.uchile.cl

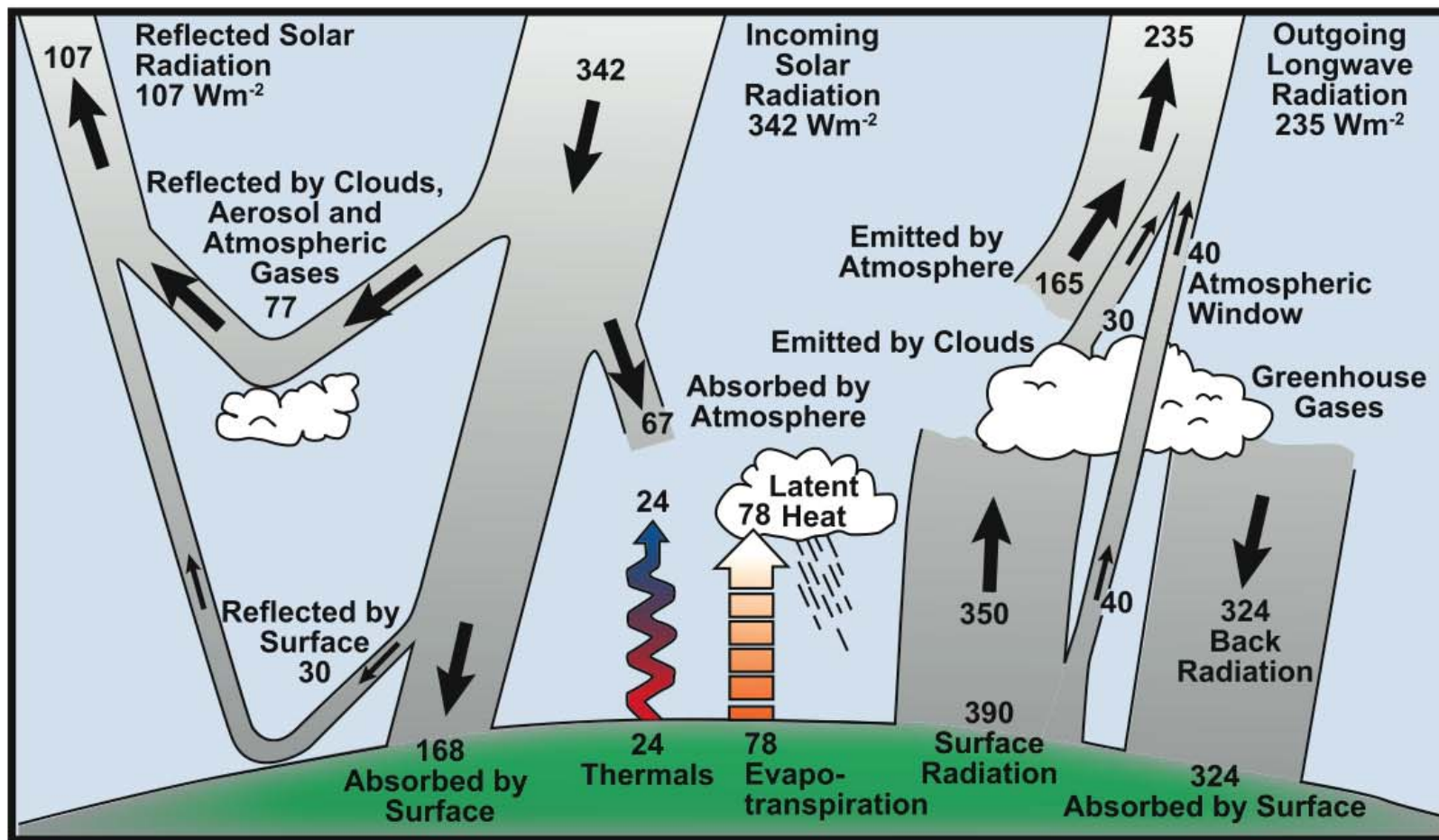
contenidos



Modelamiento numérico del tiempo y clima

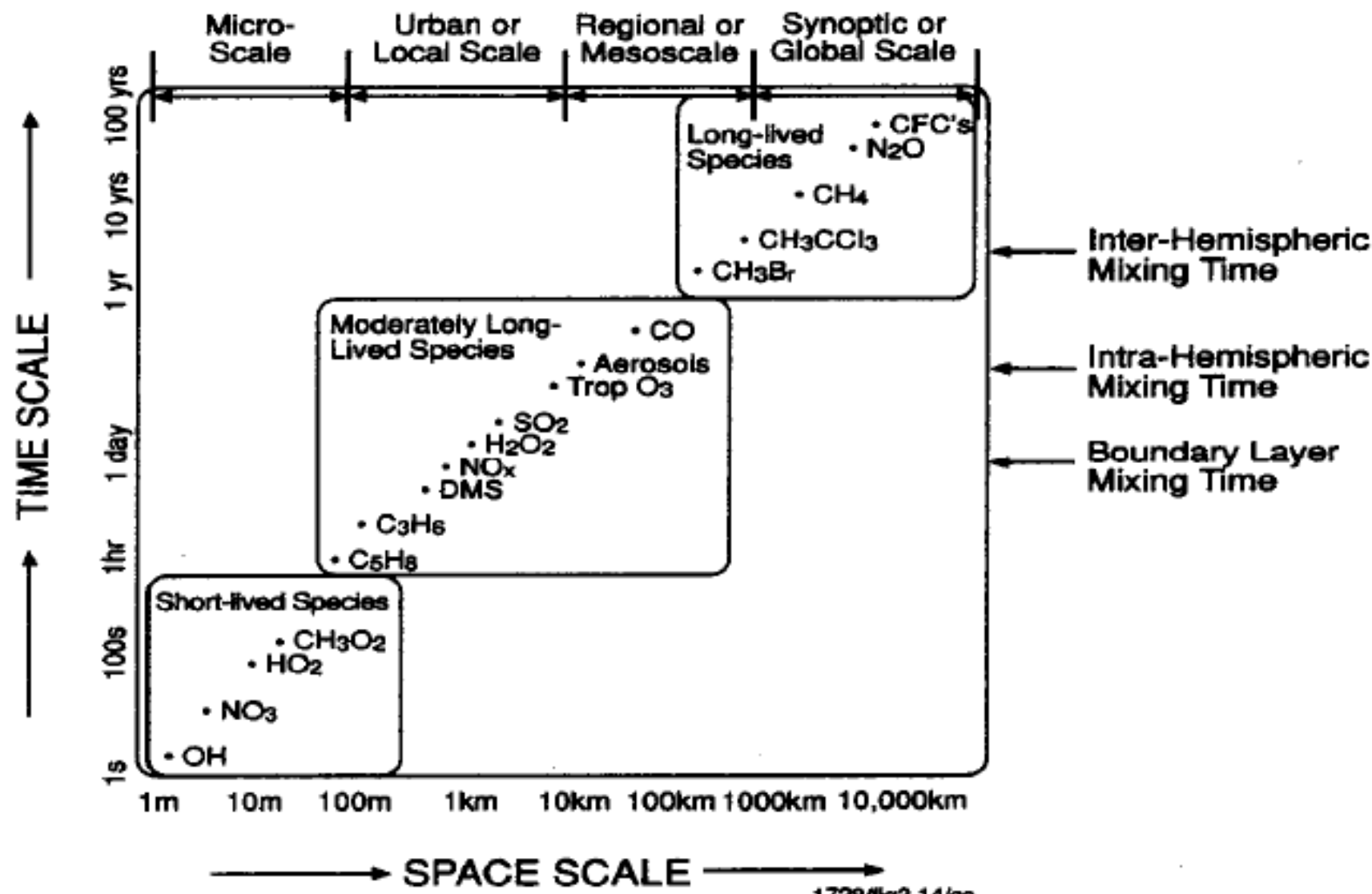
- fundamentos: sistema de ecuaciones diferenciales gobernantes
- diferencias finitas: aproximaciones para las derivadas
- problema del pronóstico del tiempo: CI observadas
- simulación climática: verificación ciclos diario y anual
- predicción climática: escenarios futuros de emisiones de GEI
- (resumen de resultados IPCC 4° informe)
- ejemplos...

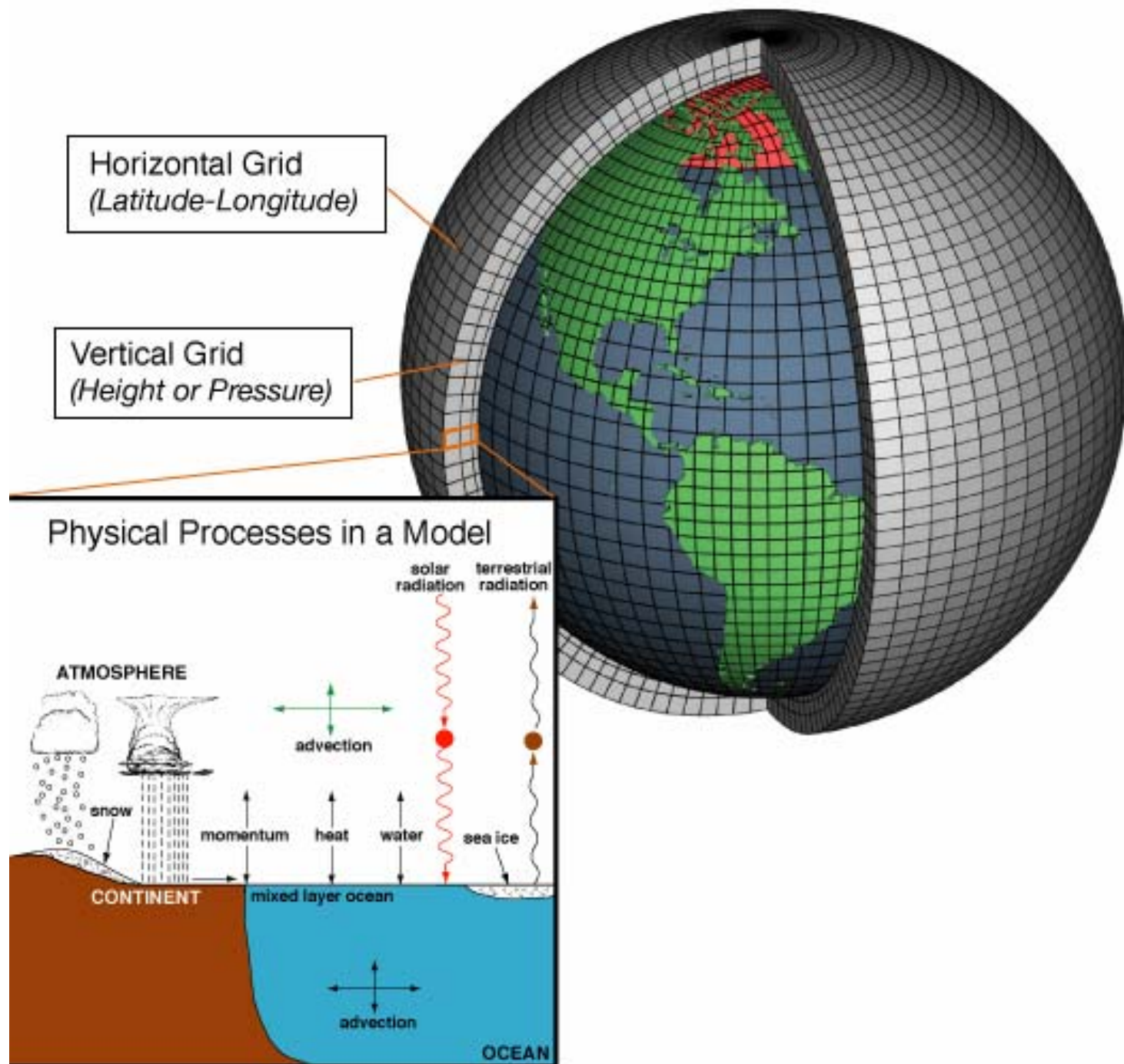




IPCC

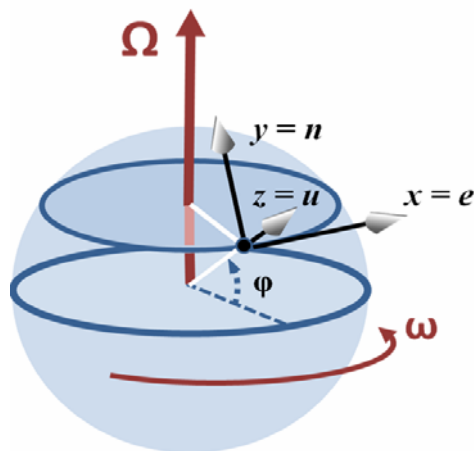
FAQ 1.1, Figure 1





las ecuaciones básicas de la atmósfera

- conservación de momentum: $F=ma$



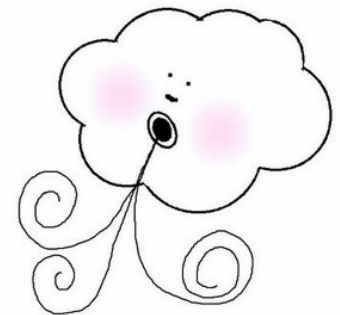
$$\frac{du}{dt} - \frac{uv \tan \theta}{a} - fv = -\left(\frac{1}{\rho}\right) \frac{\partial p}{a \cos \theta \partial \lambda} + F_u$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan \theta}{a} + fu = -\left(\frac{1}{\rho}\right) \frac{\partial p}{a \partial \theta} + F_v$$

$$\frac{dw}{dt} = -\left(\frac{1}{\rho}\right) \frac{\partial p}{a \partial z} - g + F_w$$

- ecuación de estado de la atmósfera

$$p = \rho R T$$



las ecuaciones básicas de la atmósfera

$$\frac{d\vec{V}}{dt} + f\hat{k} \times \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{F}_R + g$$

Conservación de momentum

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla\right)T - S_p \omega = Q_{RAD} + Q_{Conv} + Q_{Sfc}$$

Conservación de energía

$$\nabla \cdot \vec{V} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0$$

Conservación de masa

$$\frac{\partial(gz)}{\partial p} = -\frac{RT}{p}$$

Ecuación hidrostática

$$\frac{dq_v}{dt} = -C + E$$

Conservación de vapor de agua

$$\frac{dq_r}{dt} = +C - E + S_r$$

Conservación de agua líquida

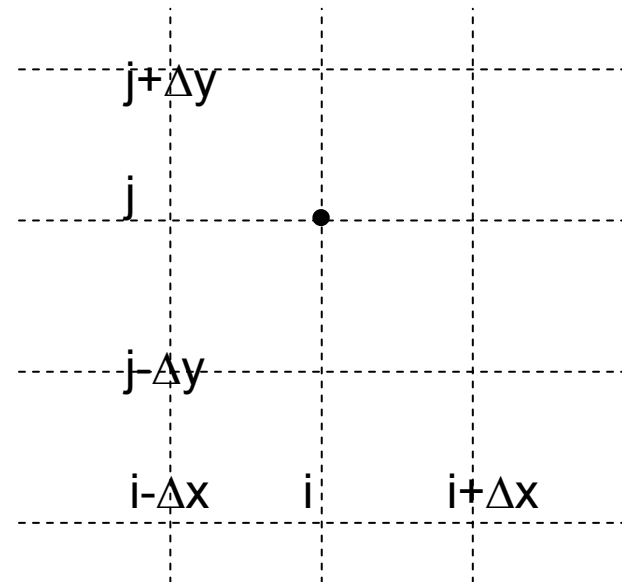
Fundamentos: Sistema de ecuaciones diferenciales gobernantes

Para parcela de aire de masa unitaria las leyes físicas conducen a EDP no lineales

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \sum F_x \quad \frac{\partial v}{\partial t} = \sum F_y \quad \frac{\partial w}{\partial t} = \sum F_z \quad \text{Newton 2a Ley}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \sum E \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = \sum fm \quad p = \rho RT \quad \text{Conservación de energía y masa y ec. estado gases}$$

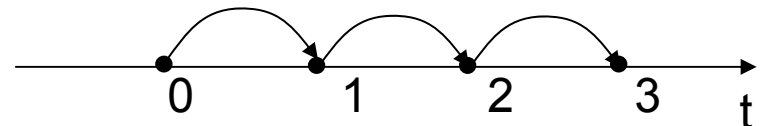
Ellas se integran numéricamente, aproximando las derivadas por diferencias finitas:



$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i-1,j}^t}{2\Delta x}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} \approx \frac{u_{i,j+1}^t - u_{i,j-1}^t}{2\Delta y}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{u_{i,j}^{t+\Delta t} - u_{i,j}^t}{\Delta t}$$

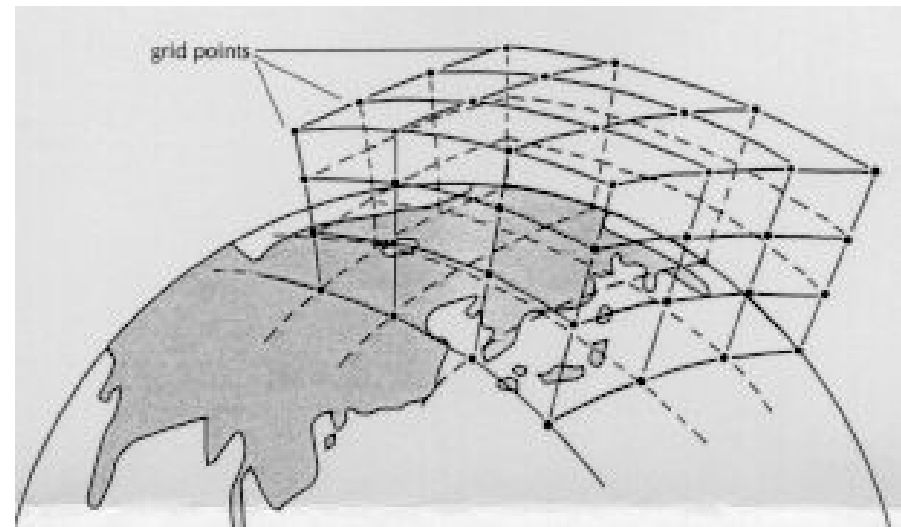


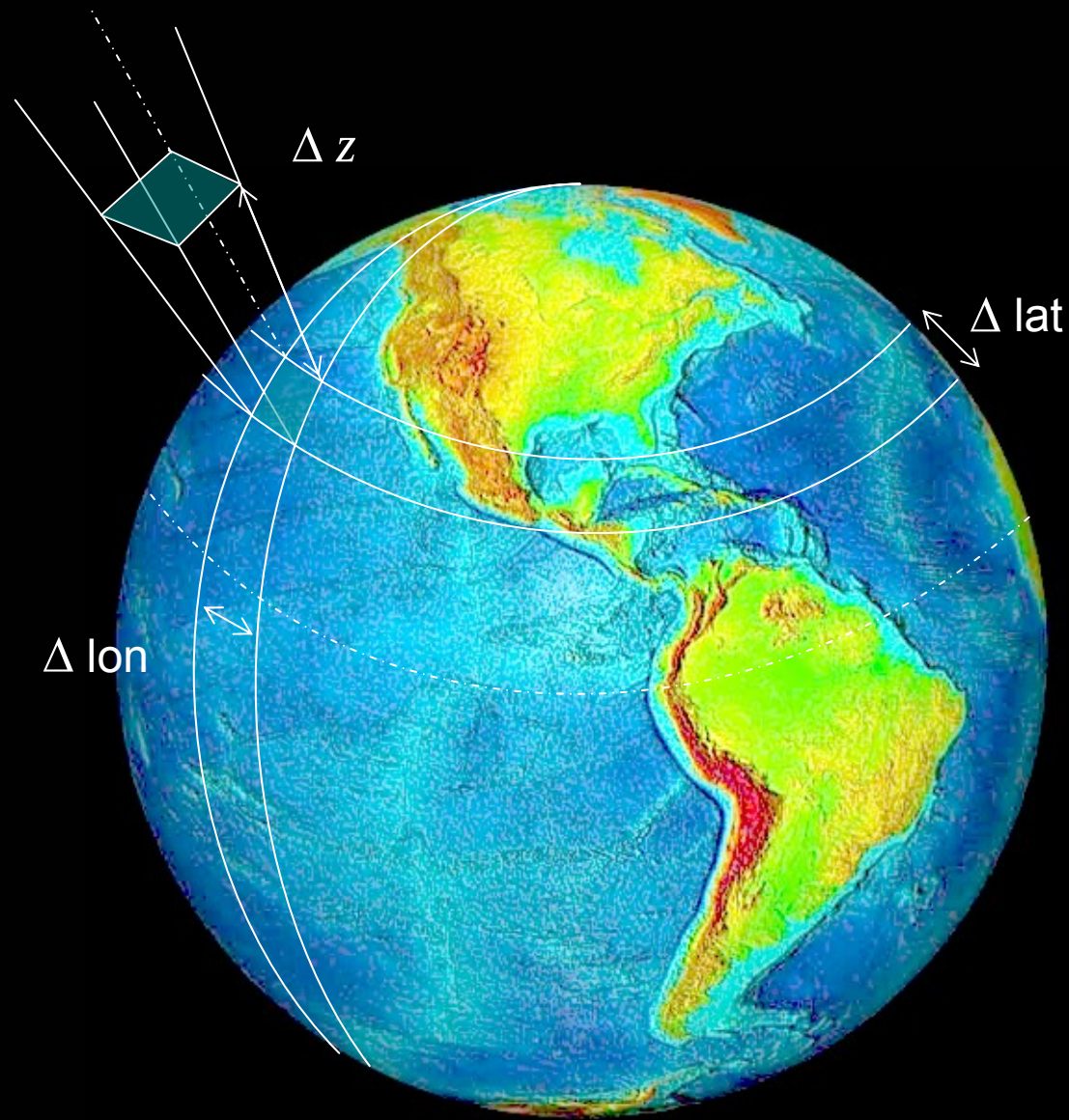
fuelle: Fuenzalida

En el caso del pronóstico del tiempo la condición inicial es proporcionada por un estado observado ($t=0$) y se progresa temporalmente con pasos pequeños hasta alcanzar el plazo del pronóstico, por ejemplo 24 horas.

En el caso de la simulación climática la condición inicial es arbitraria y se deja avanzar el tiempo hasta que empieza a replicar los ciclos fundamentales básicos, diario y estacional, con variaciones caóticas propias del sistema no lineal que origina estados no repetitivos y que en sus promedios replican el comportamiento del clima al estar forzados por los ciclos, diario y anual, de la radiación solar.

En un dominio con la forma de una cáscara esférica no existen indeterminaciones de condiciones de borde en las direcciones horizontales x e y , pero se requieren condiciones de borde en la superficie del planeta y en el tope del modelo, que se elige suficientemente alto para que no ejerza acciones determinantes en el clima de niveles bajos.





$\Delta \text{lat} \sim \Delta \text{lon} \sim 1^\circ - 3^\circ$

$\Delta z \sim 1 \text{ km}$

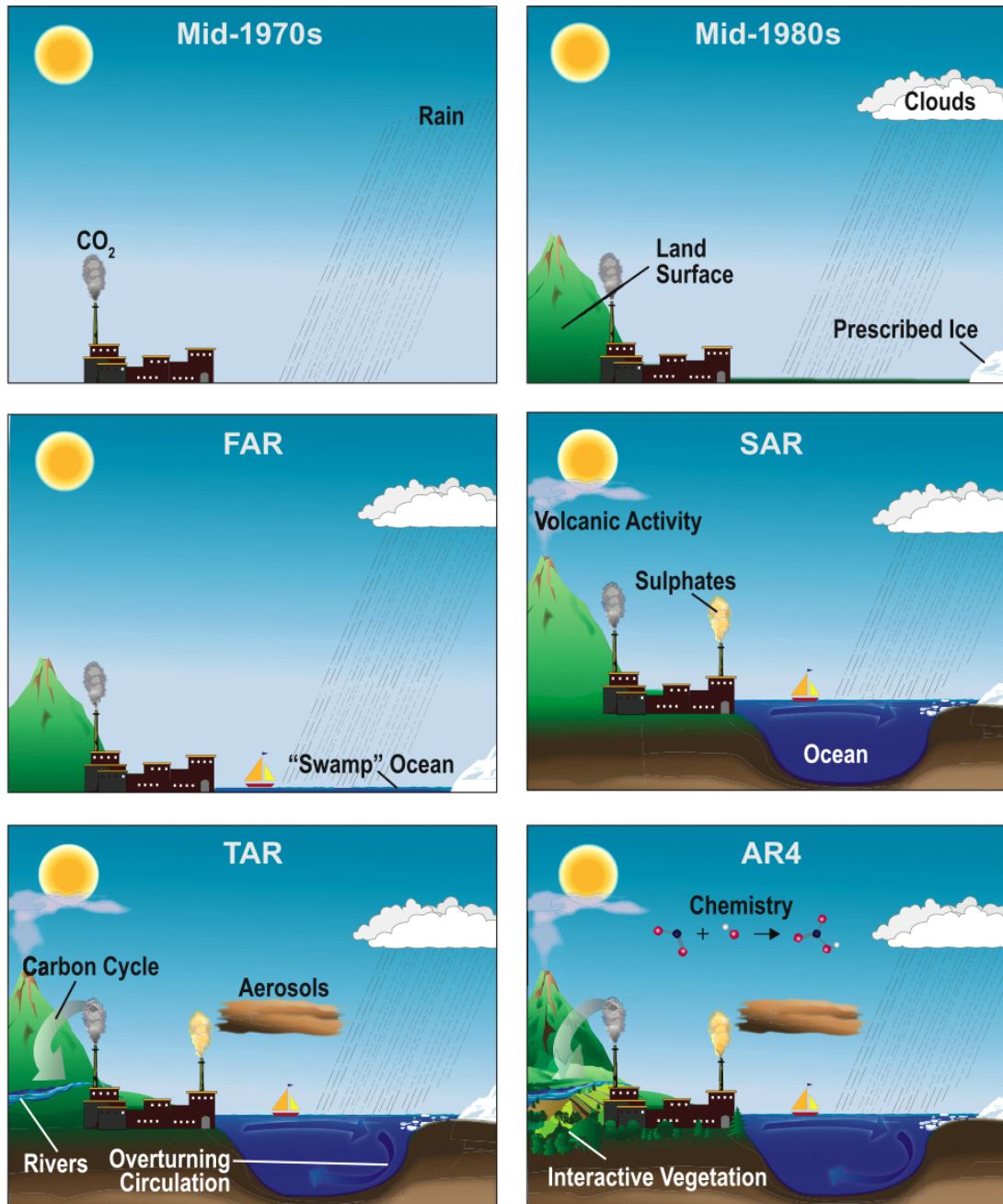
$\Delta t \sim \text{minutos-horas}$

Tope de atmosfera: 15-50 km

modelos de circulación global (GCM)

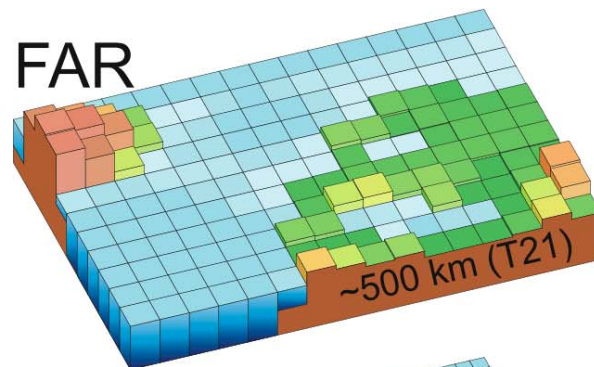
- escala regional-global
- representan procesos físicos en la atmósfera, océanos, criósfera y superficie terrestre
- procesos de escalas menores se parametrizan
- resolución espacial horizontal: 250-600 km
- resolución espacial vertical: 10-20 niveles verticales (hasta 30 en los océanos)

The World in Global Climate Models

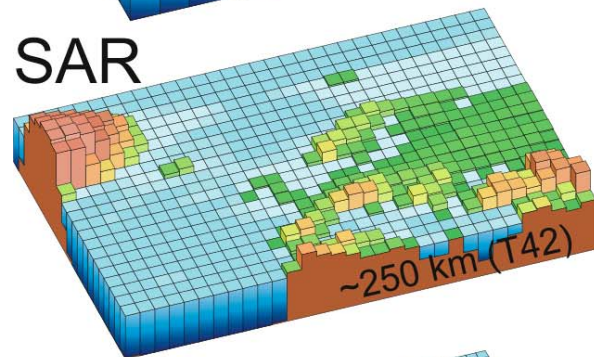


IPCC

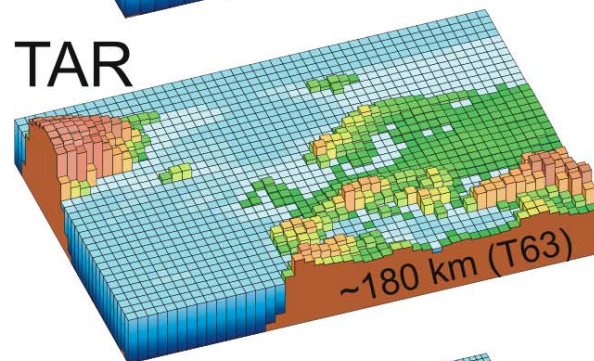
Figure 1.2



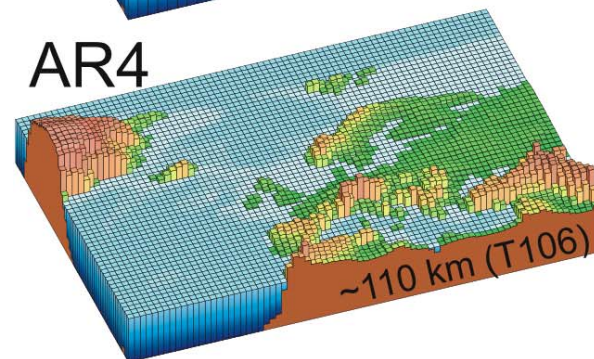
1990



1996



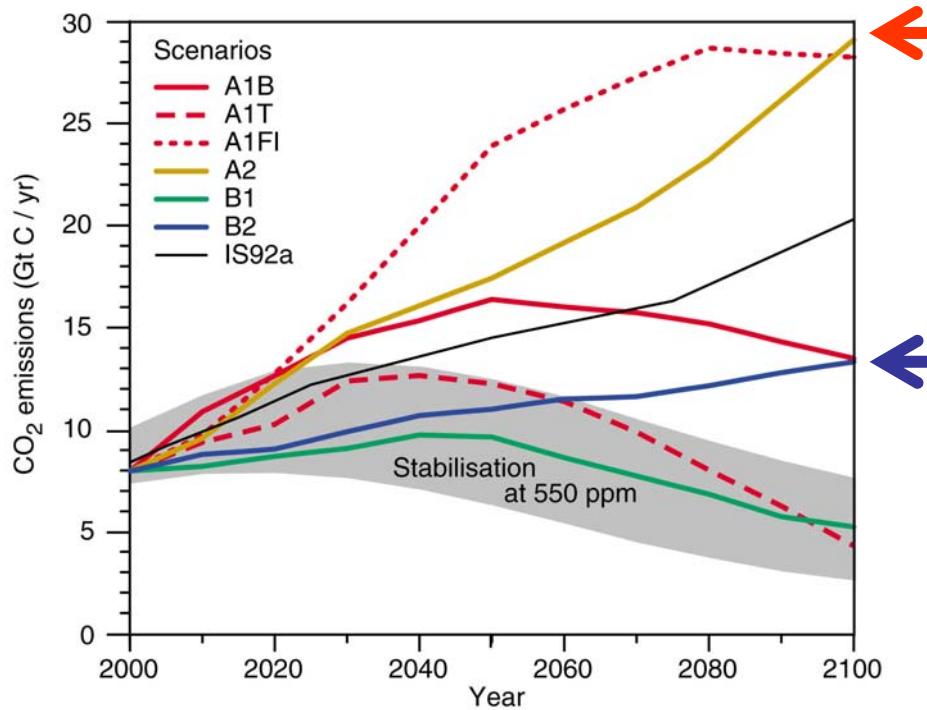
2001



2007

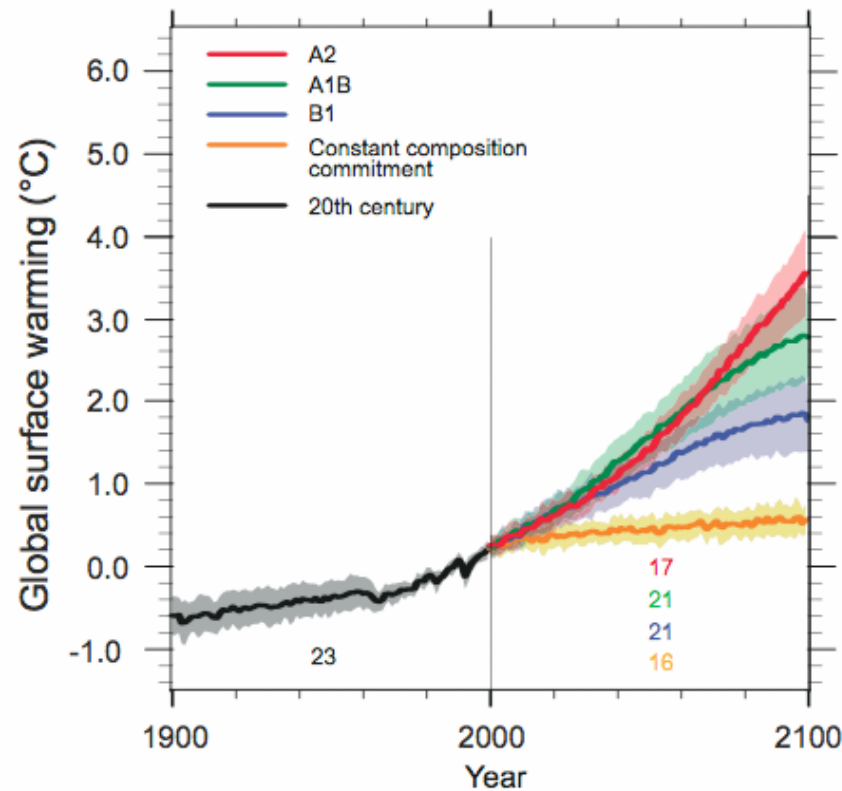
Figure 1.4

IPCC

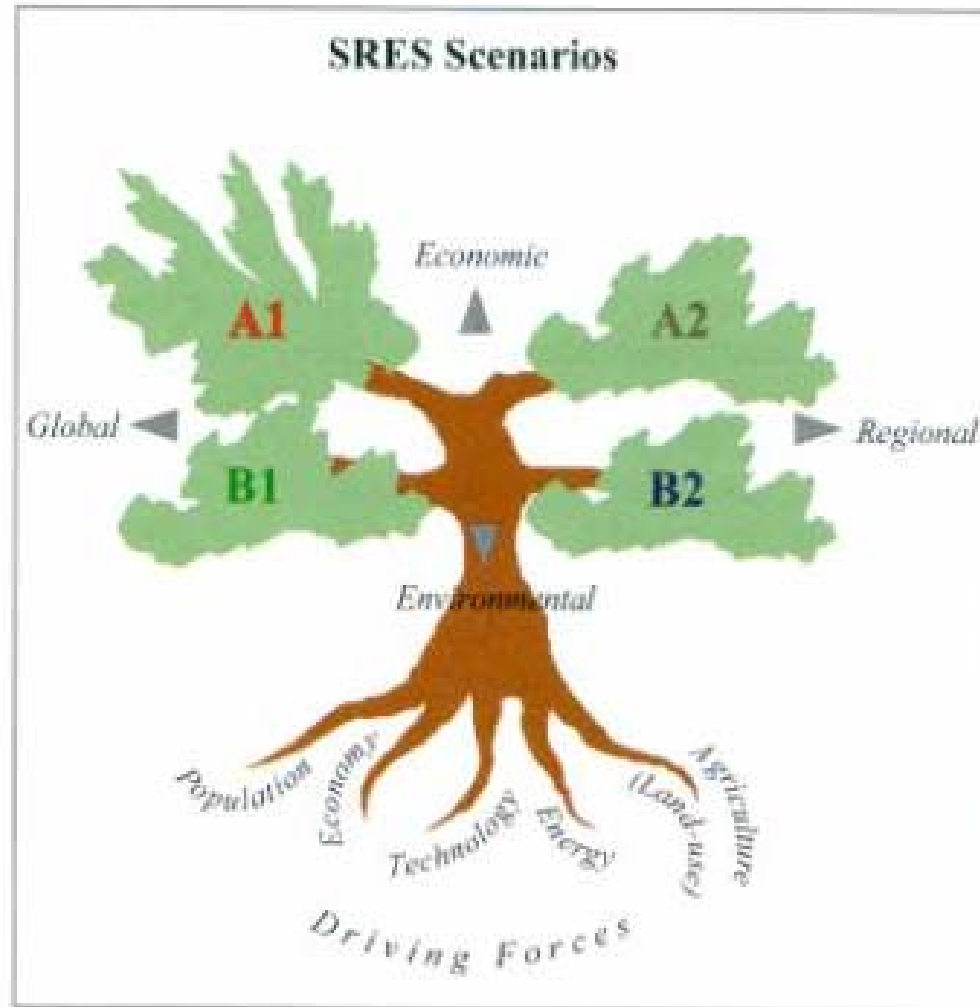


Escenarios Desarrollo
Economico-Social

GCMs



escenarios climáticos SRES



escenarios climáticos SRES

- A1: rápido crecimiento económico, población alcanza un máximo a mediados del s. XXI y decrece, introducción rápida de tecnología nueva y eficiente
 - *mundo más integrado y de gran crecimiento económico*
 - A1F1: énfasis en combustibles fósiles
 - A1B: énfasis tecnológico en todas las fuentes de energía
 - A1T: énfasis en combustibles alternativos
- A2: mundo heterogéneo; la población aumenta constantemente; crecimiento económico de carácter regional, fragmentado y más lento
 - *mundo más dividido*
- B1: población como A1, pero con cambios rápidos en estructuras económicas hacia economías de información y servicios, con reducción en intensidad material y uso de tecnologías limpias
 - *mundo más integrado y ecológico*
- B2: mundo basado en propuestas locales de sustentabilidad económica, social y ambiental; desarrollo económico intermedio y población creciente, aunque menos que en A2.
 - *mundo más dividido, pero ecológico*

Escenarios climáticos SRES

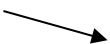
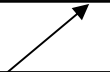
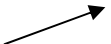
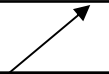
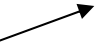
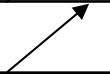
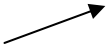
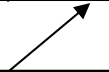
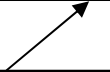
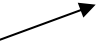
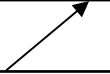
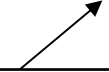
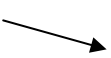
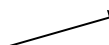
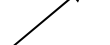
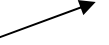
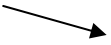
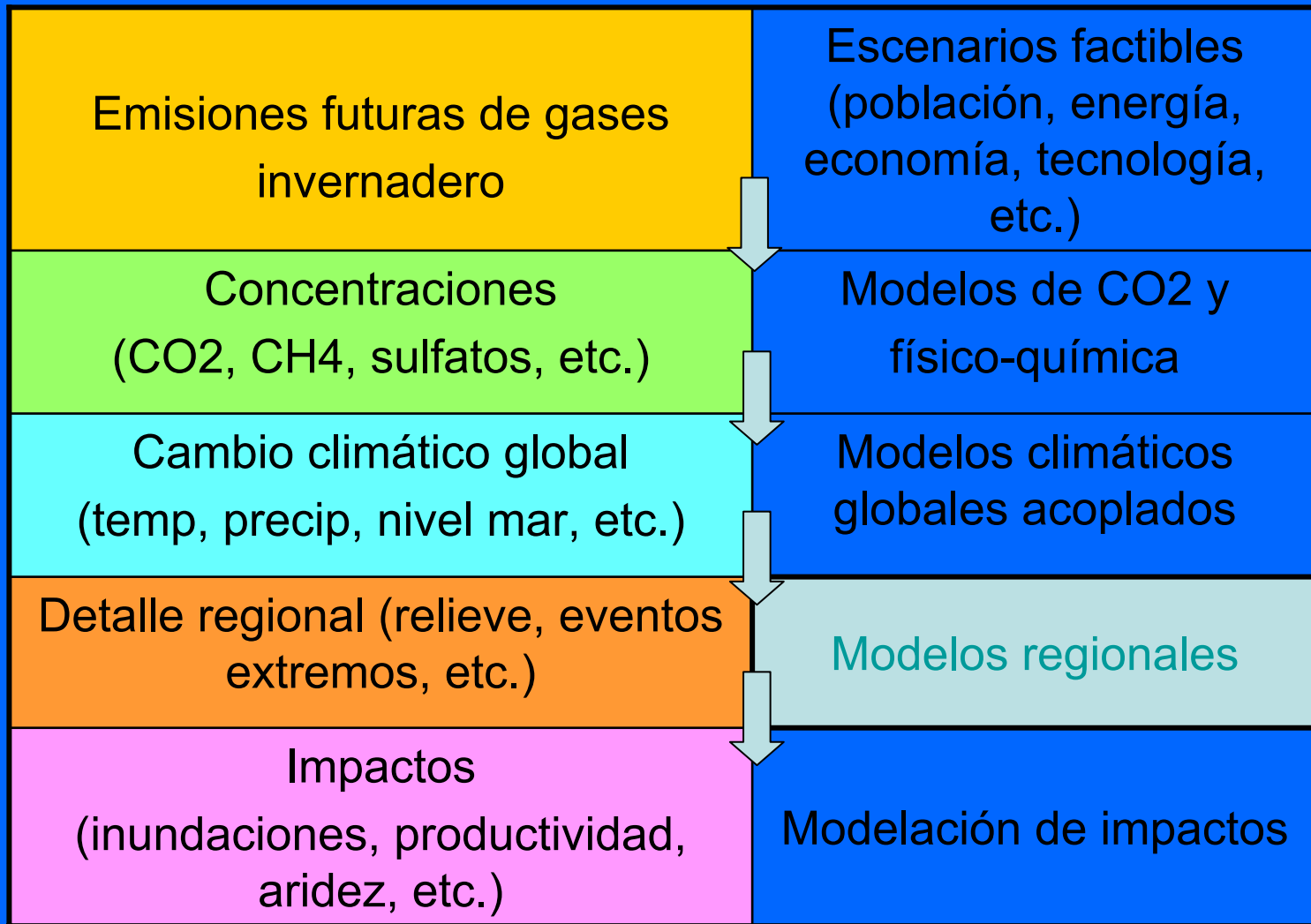
Escenario	Poblac.	Econo.	Ambien.	Equid.	Tecnol.	Globalizac.
A1F1						
A1B						
A1T						
B1						
A2						
B2						

Table SPM-3. Projected globally averaged surface warming and sea level rise at the end of the 21st century. {10.5, 10.6, Table 10.7}

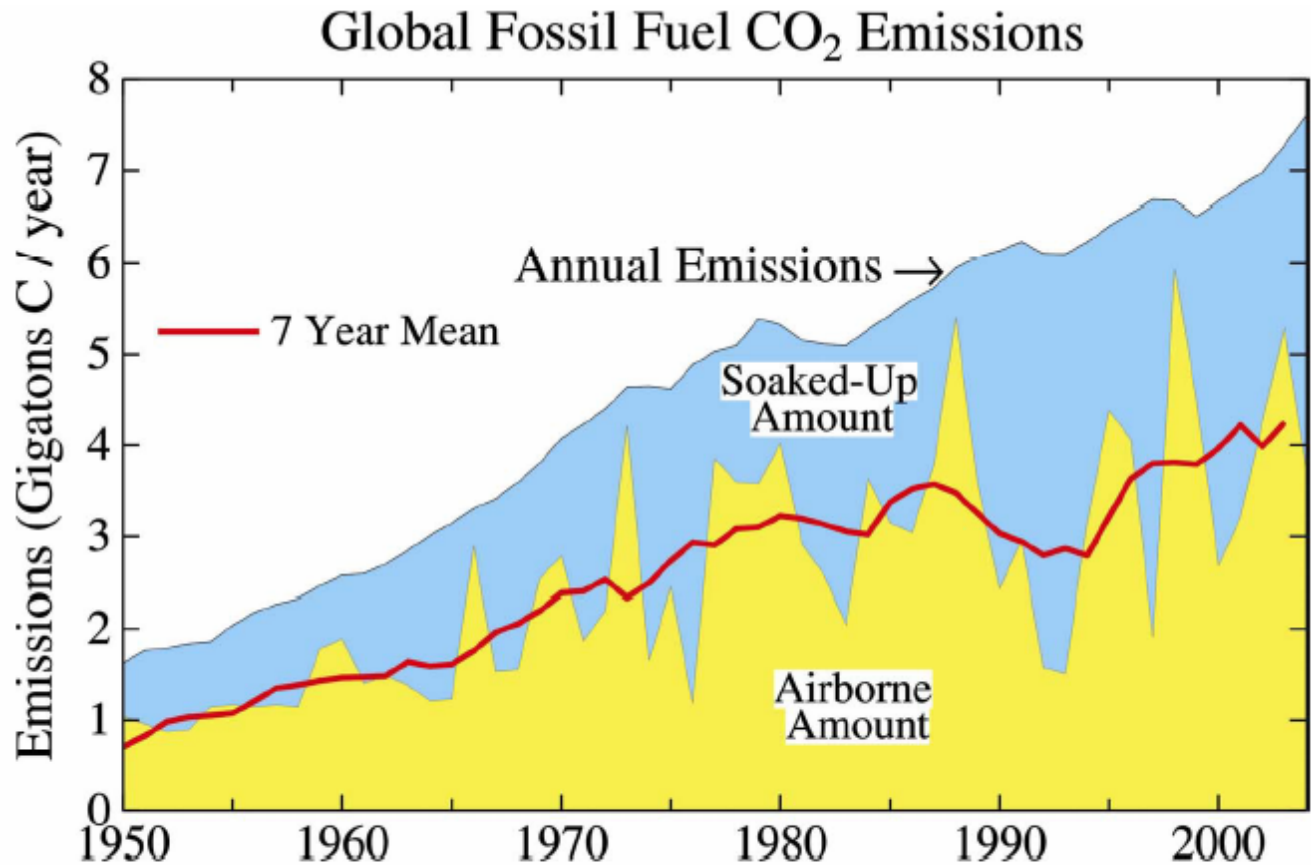
Case	Temperature Change (°C at 2090-2099 relative to 1980-1999) ^a		Sea Level Rise (m at 2090-2099 relative to 1980-1999)
	Best estimate	Likely range	Model-based range excluding future rapid dynamical changes in ice flow
Constant Year 2000 concentrations ^b	0.6	0.3 – 0.9	NA
B1 scenario	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
A1T scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
B2 scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
A1B scenario	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
A2 scenario	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
A1FI scenario	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

fuelle: Fuenzalida

Estimación de impacto del Cambio Climático



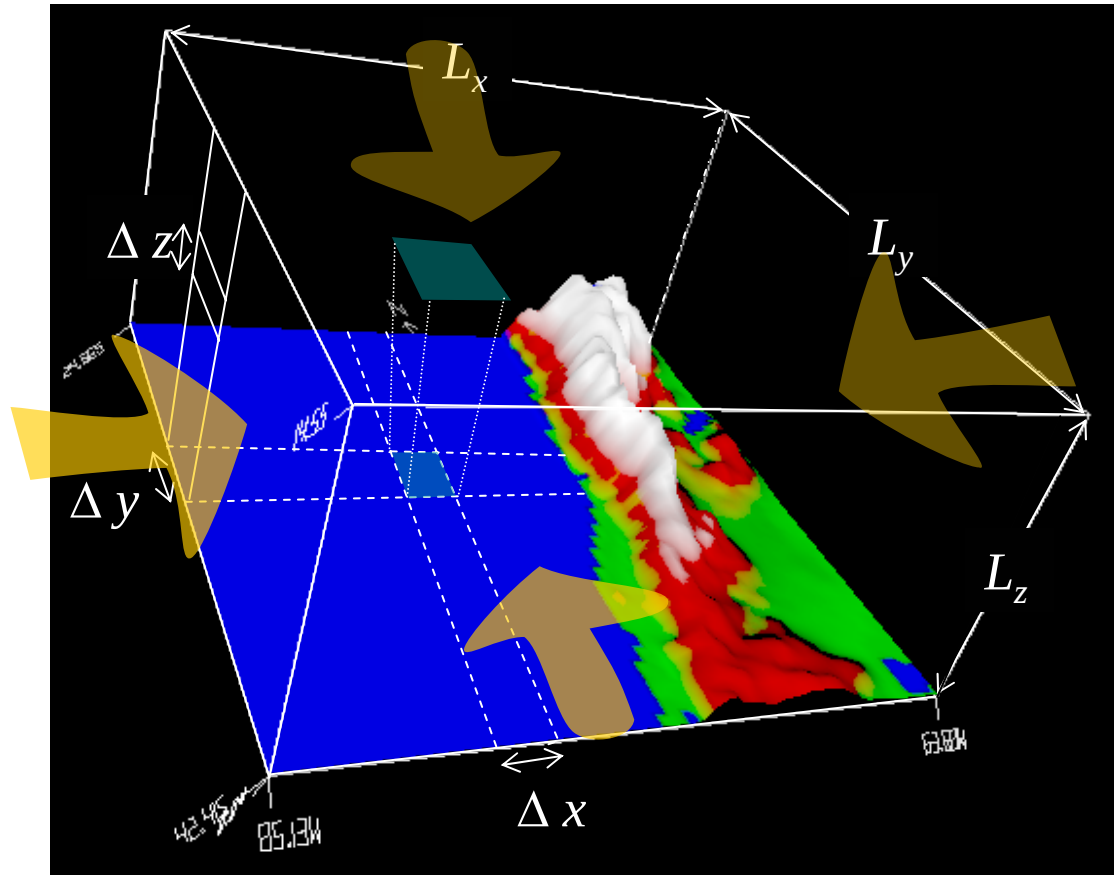
Durante el siglo XX el océano/biosfera ha capturado cerca del 40% del CO₂ emitido...captura puede variar ($\pm$?) con incremento de T



Global fossil fuel CO₂ emissions with division into portions that remain airborne or are soaked up by the ocean and land.

Source: Hansen and Sato, *PNAS*, **101**, 16109, 2004.

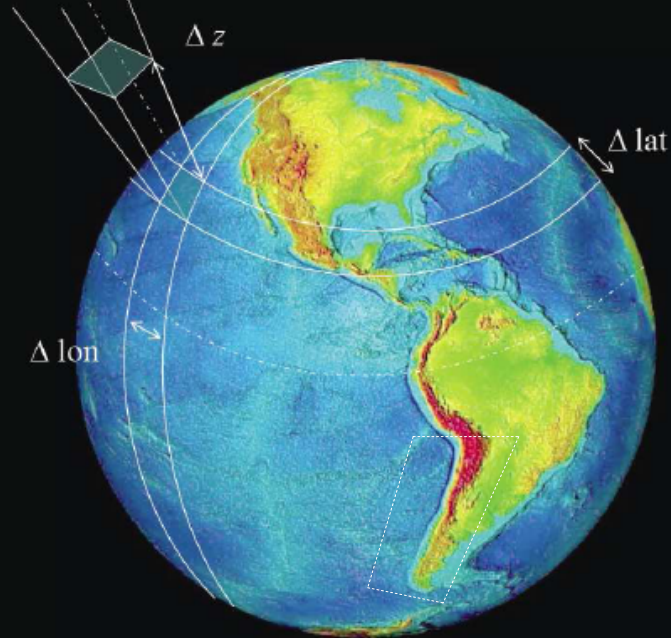
Modelos Regionales (LAM, modelos de mesoescala)



$\Delta x \sim \Delta y \sim 1-50 \text{ km}$ $\Delta z \sim 50-200 \text{ m}$ $\Delta t \sim \text{segundos}$
 $L_x \sim L_y \sim 100-5000 \text{ km}$ $L_z \sim 15 \text{ km}$ LBC de GCMs

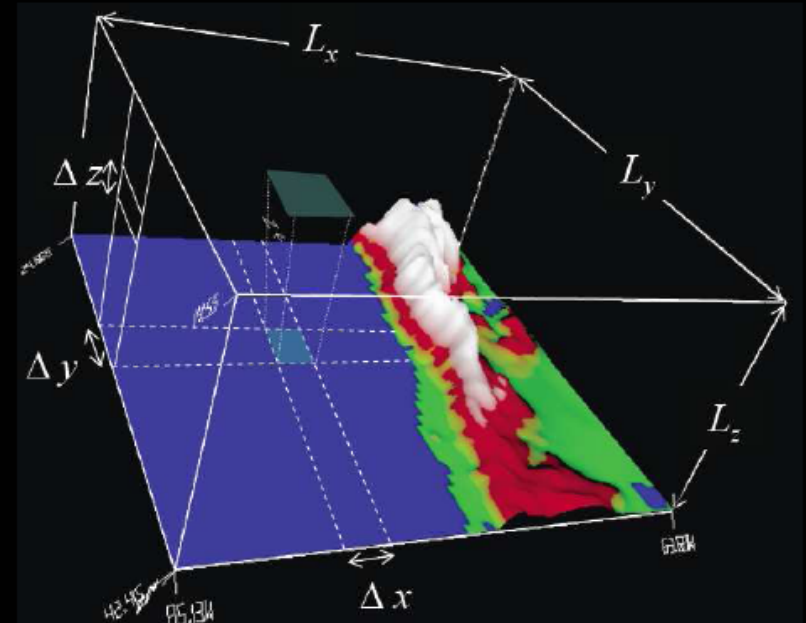
problema principal: *Garbage in – Garbage out (GIGO)*

Global Models (GCM)



$\Delta \text{lat} \sim \Delta \text{lon} \sim 1^\circ - 3^\circ$ $\Delta z \sim 1 \text{ km}$ $\Delta t \sim \text{minutes-hours}$
 Top of atmosphere: 15-50 km

Regional Models (RCM)



$\Delta x \sim \Delta y \sim 1-50 \text{ km}$ $\Delta z \sim 50-200 \text{ m}$ $\Delta t \sim \text{segundos}$
 $L_x \sim L_y \sim 100-5000 \text{ km}$ $L_z \sim 15 \text{ km}$

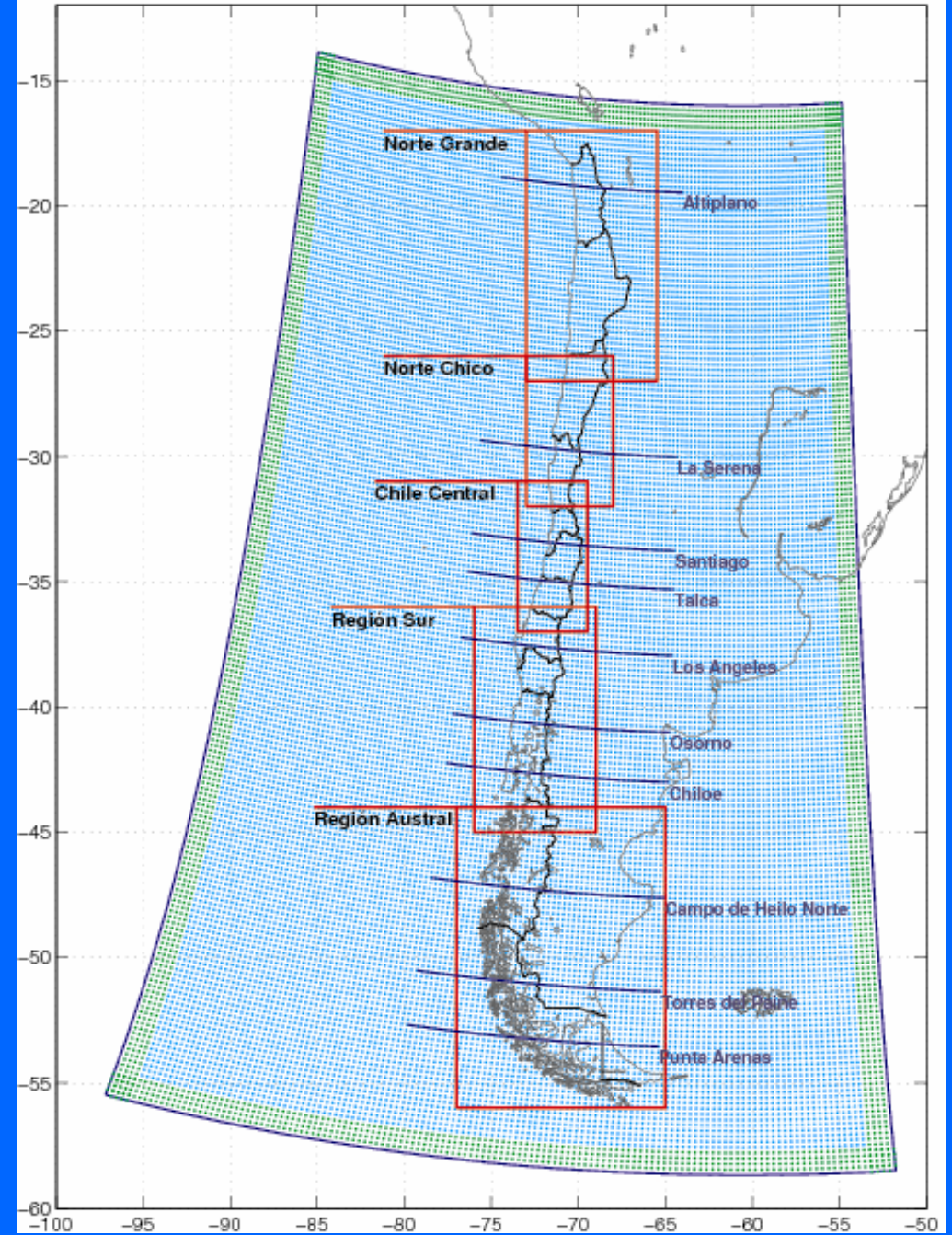
Modelos Globales vs Modelos Regionales:

CB tomadas de MG se renuevan cada 6 h en MR

TSM se renuevan cada 24 h con valores históricos

MR tiene física completa expresada en EDP

CI arbitraria y se hace irrelevante en aprox. 1 año



Malla de cálculo

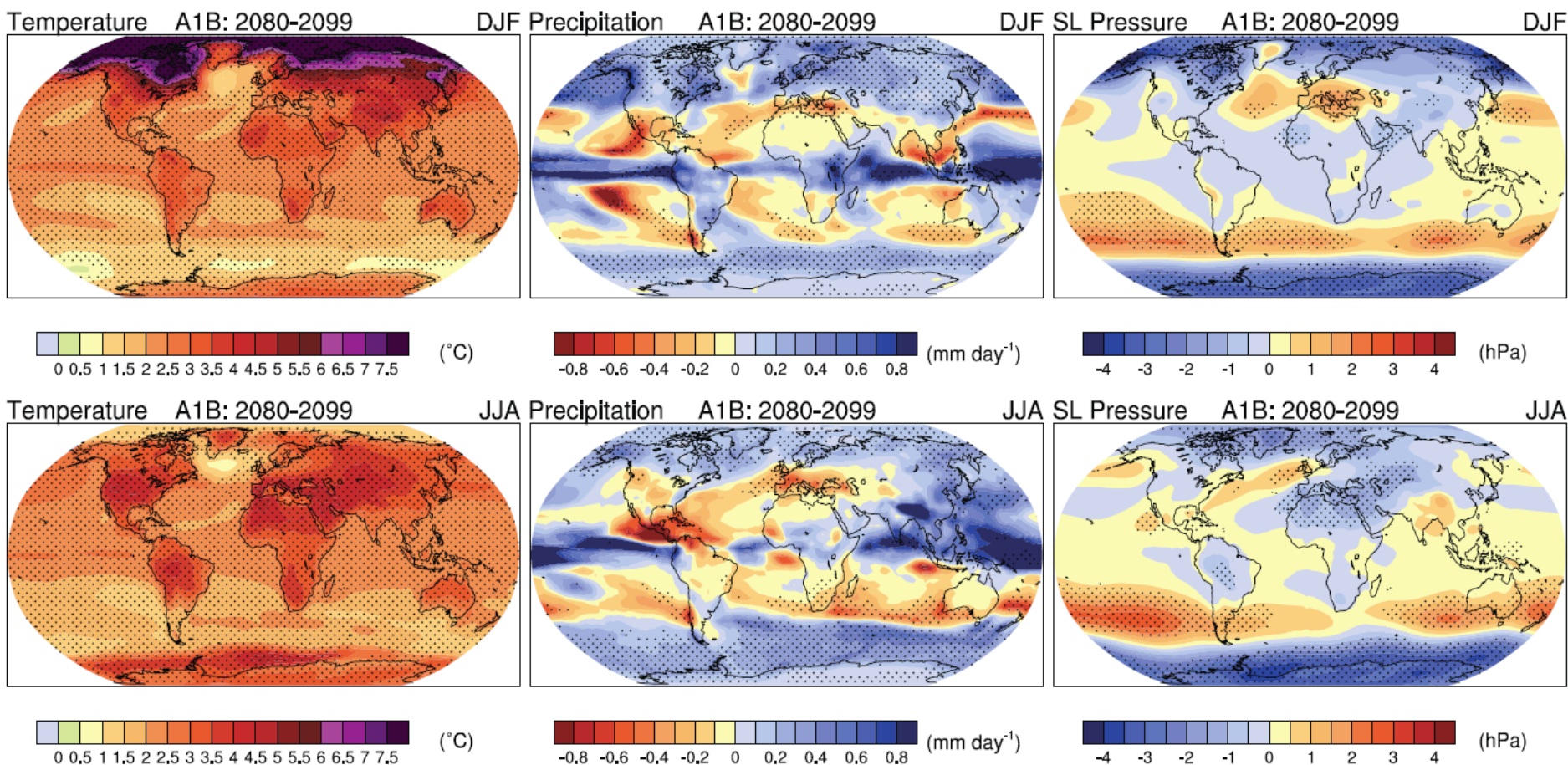
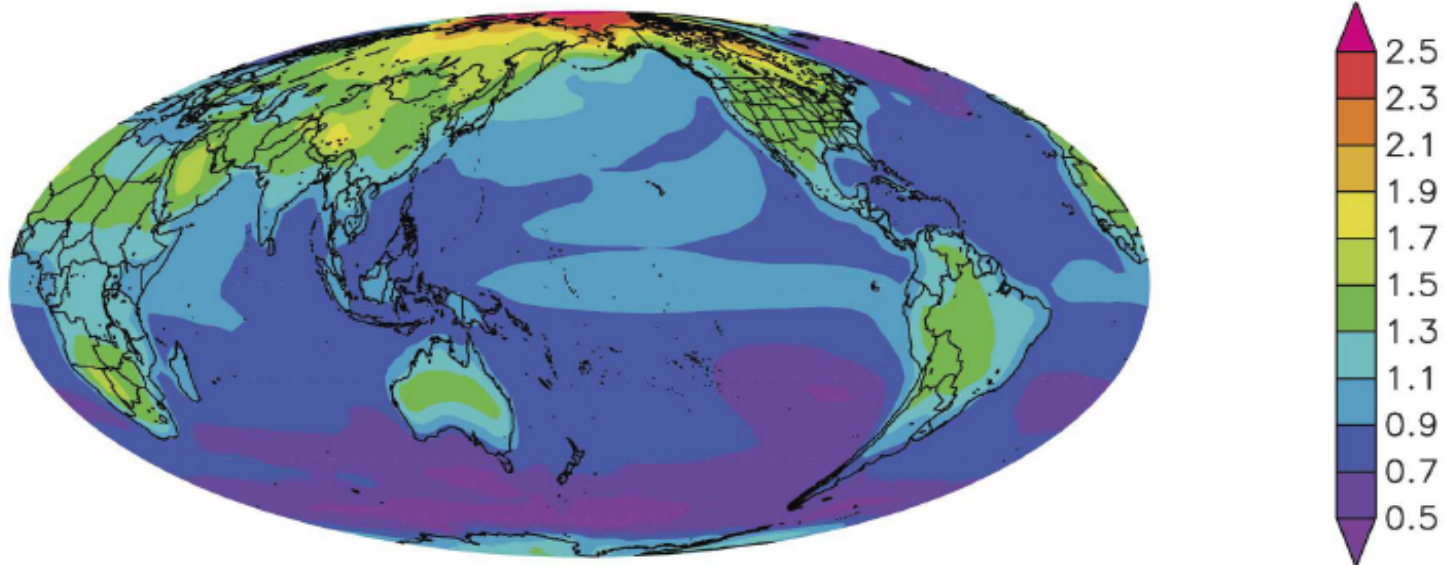
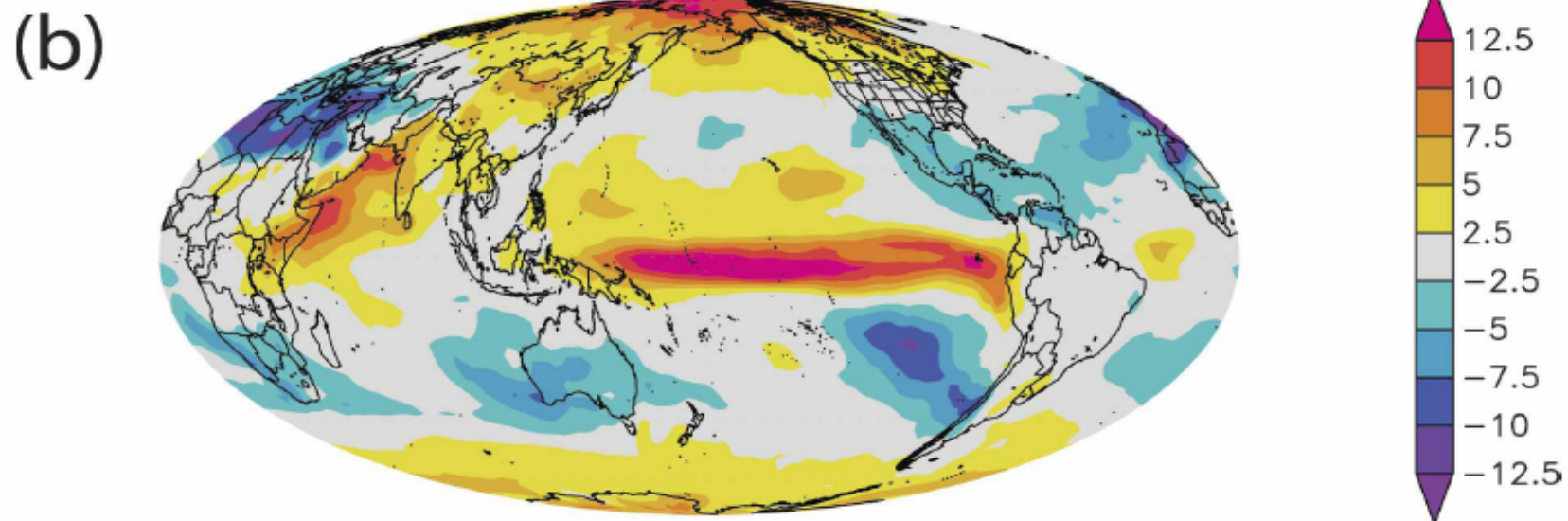


Figure 10.9. Multi-model mean changes in surface air temperature (°C, left), precipitation (mm day⁻¹, middle) and sea level pressure (hPa, right) for boreal winter (DJF, top) and summer (JJA, bottom). Changes are given for the SRES A1B scenario, for the period 2080 to 2099 relative to 1980 to 1999. Stippling denotes areas where the magnitude of the multi-model ensemble mean exceeds the inter-model standard deviation. Results for individual models can be seen in the Supplementary Material for this chapter.

(a) Ensemble Mean ΔT (K/K): IPCC MIP

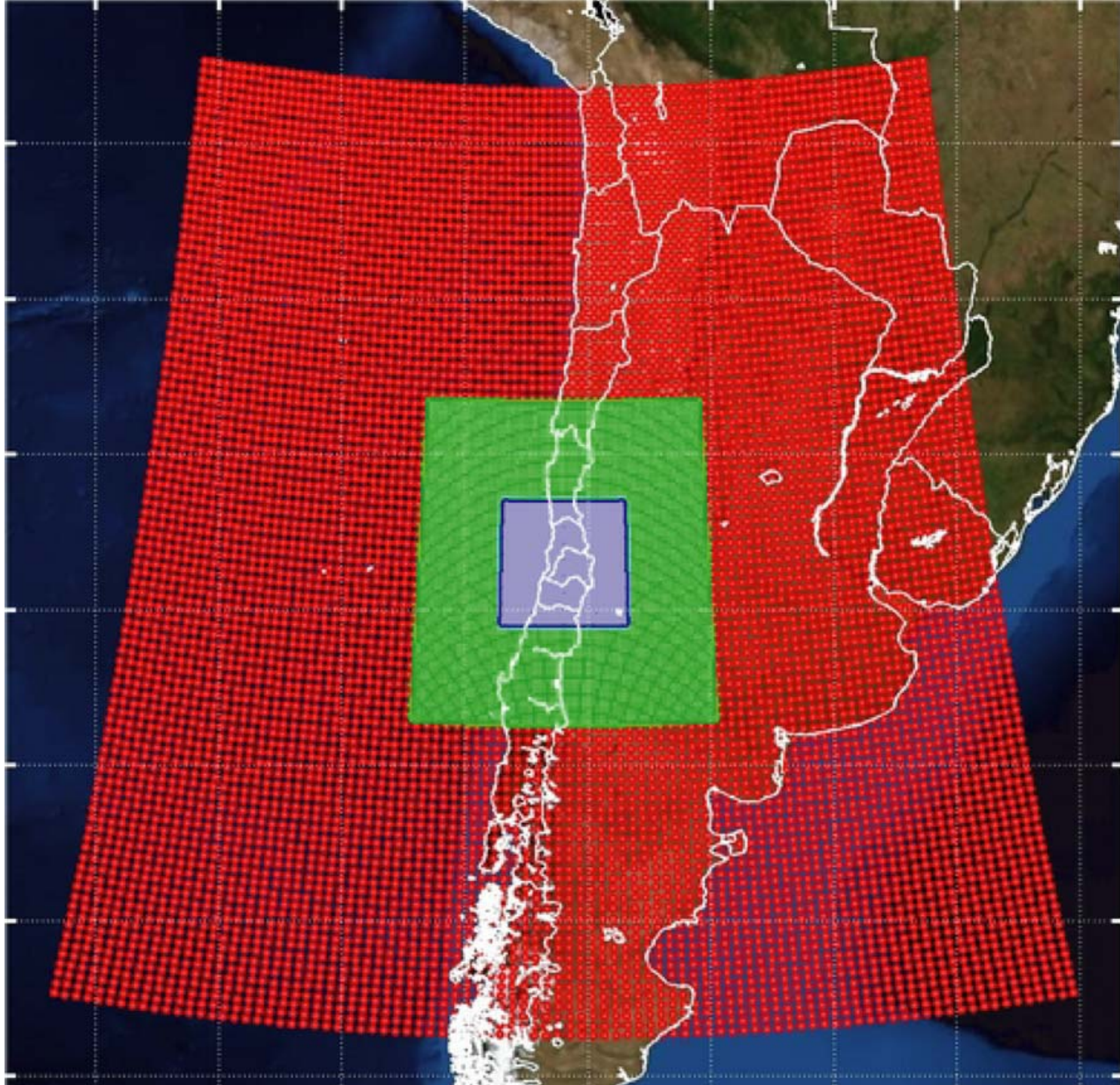


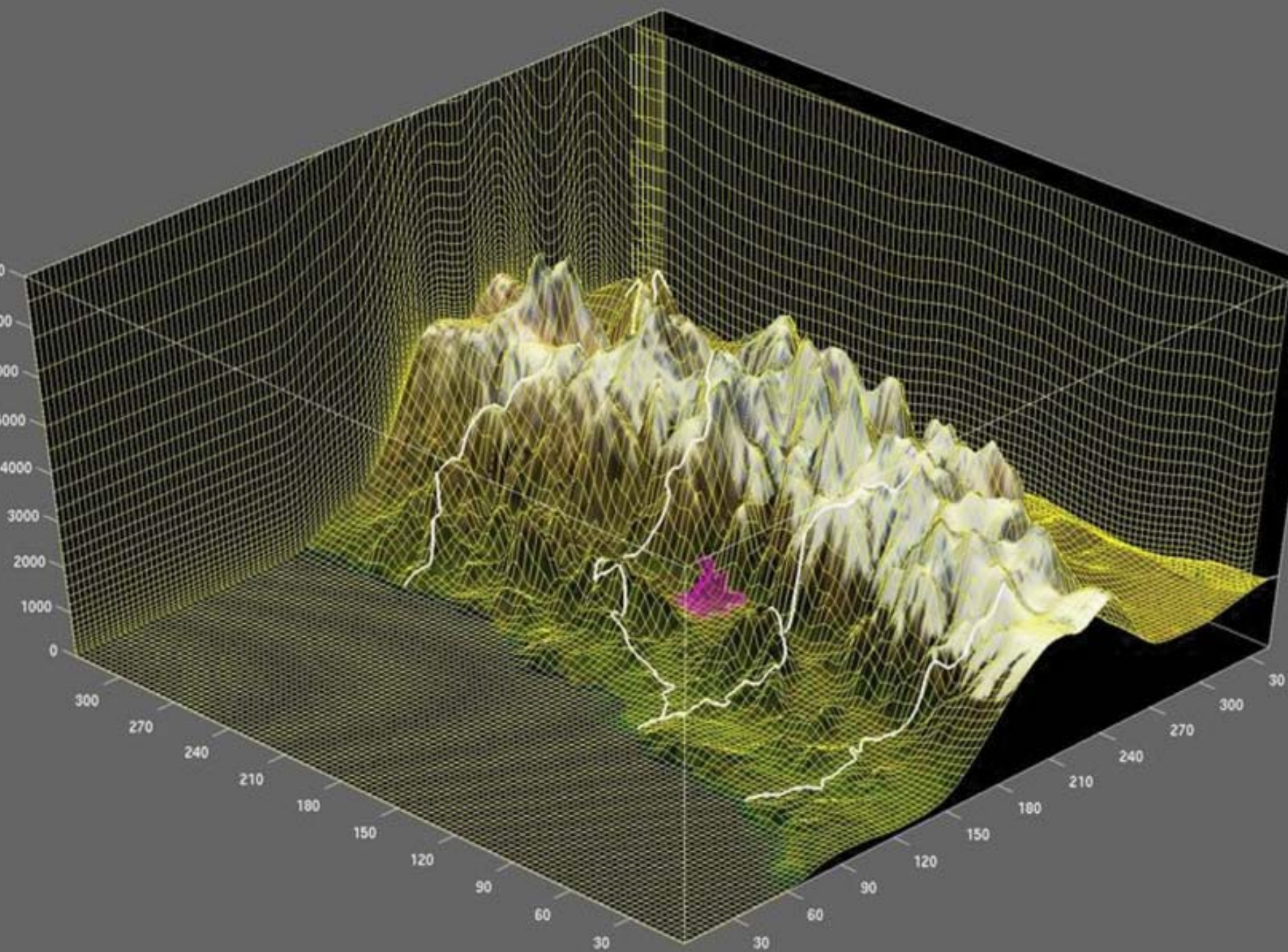
Ensemble Mean ΔPrecip (%/K): IPCC MIP



modelo anidado: WRF-Chem

- simulación DGF a cargo de Mark Falvey
- alta resolución espacial: circulación local
- módulo químico online
- $\Delta x = 4$ km
 - N-S: 126 ptos (504 km)
 - E-W: 114 ptos (465 km)
- 36 niveles verticales

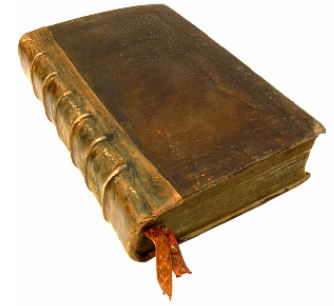




el tiempo requerido

- para simular un día, se requieren 3 horas de computación
- un año: >6 semanas
- considerando química... 6 semanas más!

bibliografía principal



INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC).
2007. *IPCC Fourth Assessment Report - Climate Change 2007:
The Physical Science Basis*

WALLACE, J. M. & HOBBS. P. V. 2006. *Atmospheric Science: An
Introductory Survey*, 2da edición.