



# Modelización Atmosférica



Cloud-Resolving Modeling

General Circulation Model

HYDROSTATIC MODEL

Mesoscale Model

Nonhydrostatic Limited-Area Model

Large eddy simulation (LES)

NAM GFS NGM RUC WRF Ensemble ARPS ECMWF MM5 NOGAPS UKMET



**WRF** THE WEATHER RESEARCH & FORECASTING MODEL

HadCM3

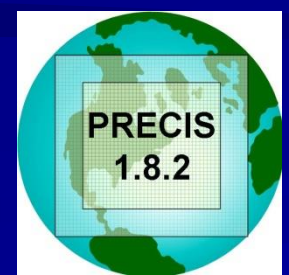


EtaModel

MM5  
Community Model

UCLA AGCM

Community Climate System Model




**Community Access to Global Cloud Resolving Model and Data**

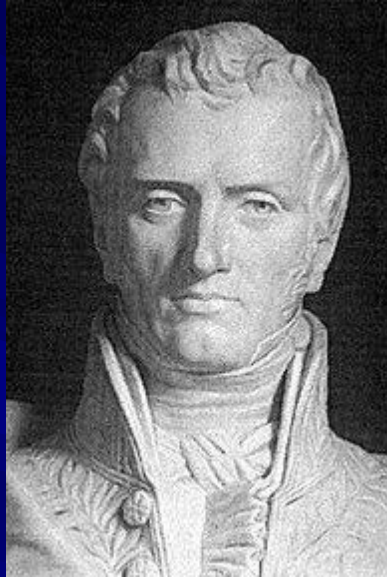
*Tools to subset and visualize the petabyte data set sizes that will be produced by the Global Cloud Resolving*



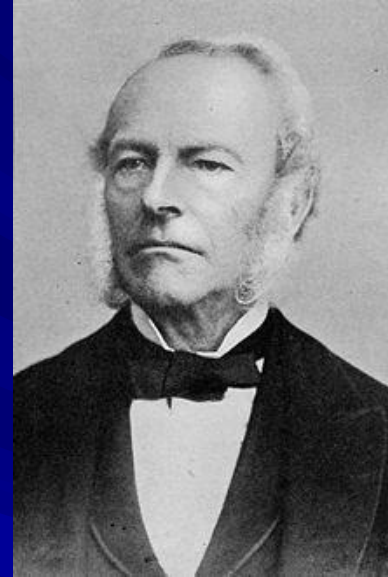
# Modelos Numéricos de la Atmósfera

## ■ Historia

# La modelación Físico-Matemática



**Henri Navier  
(1785 – 1836)**



**George Gabriel Stokes  
(1819 - 1903)**

Ecuaciones de Navier-Stokes  
Bases de la Mecánica de los Fluidos



## 1920's: Nace meteorología moderna Escuela de Bergen, Noruega (Vilhelm & Jacob Bjerkness)

- “Si es verdad, como los científicos piensan, que subsecuentes estados de la atmósfera derivan de los anteriores según leyes de la física, entonces las condiciones necesarias y suficientes para la solución racional del problema de la predicción son:
  - La determinación suficientemente precisa del estado de la atmósfera en el tiempo inicial
  - El conocimiento de las leyes a través de las cuales un estado se desarrolla a partir del anterior”

– **Vilhelm Vjerkness (1904)**

... weather forecasting is immoral and damaging to the character of a meteorologist ...

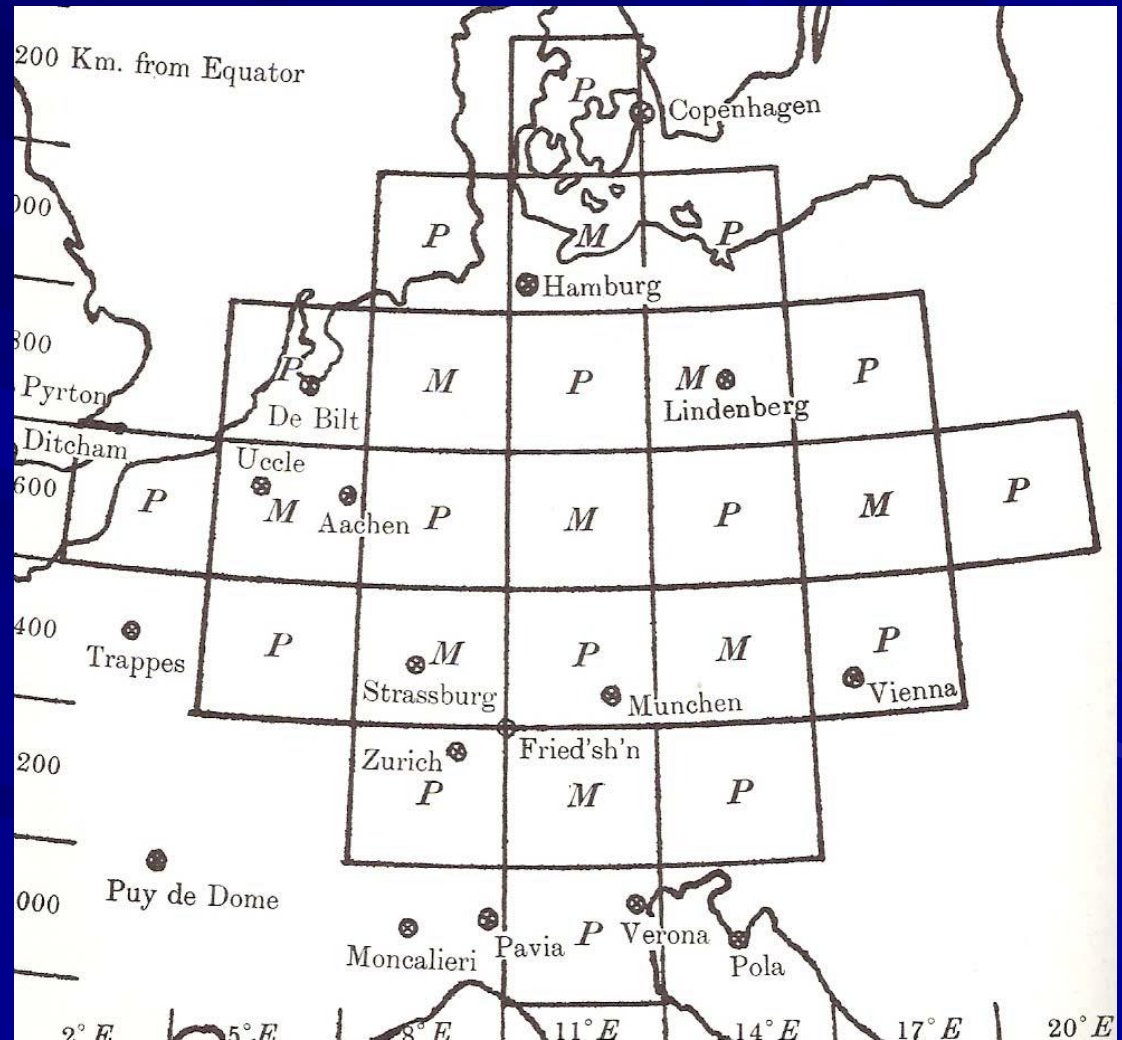
**Margules (1904)**



# 1922 – Primer pronóstico numérico del tiempo (Richardson)

“The scheme is complicated because the atmosphere is complicated.”

- Predijo (en 6 semanas) el cambio de presión en superficie en un punto del centro de Europa a 6 horas en base a observaciones relevadas en todo el continente:



COMPUTING FORM P XIII. Divergence of horizontal momentum-per-area. Increase of pressure

The equation is typified by :  $-\frac{\partial R_{88}}{\partial t} = \frac{\partial M_{E88}}{\partial e} + \frac{\partial M_{N88}}{\partial n} - M_{N88} \frac{\tan \phi}{a} + m_{H88} - m_{H88}^* + \frac{2}{a} M_{H88}$ . (See Ch. 4/2#5.)

\* In the equation for the lowest stratum the corresponding term  $-m_{G88}$  does not appear

Longitude  $11^\circ$  East

$$\delta e = 441 \times 10^5$$

Latitude  $5400$  km North

$$\delta n = 400 \times 10^5$$

Instant 1910 May 20<sup>a</sup> 7<sup>h</sup> G.M.T.

$$a^{-1} \cdot \tan \phi = 1.78 \times 10^{-9}$$

Interval,  $\delta t$  6 hours

$$a = 6.36 \times 10^8$$

REF.:-				previous 3 columns	previous column		Form P xvi	Form P xvi	equation above	previous column	previous column	previous column	
$h$	$\frac{\delta M_E}{\delta e}$	$\frac{\delta M_N}{\delta n}$	$-\frac{M_N \tan \phi}{a}$	$\text{div}'_{EN} M$	$-g \delta t \text{div}'_{EN} M$		$m_H$	$\frac{2M_H}{a}$	$-\frac{\partial R}{\partial t}$	$+\frac{\partial R}{\partial t} \delta t$	$g \frac{\partial R}{\partial t} \delta t$	$\frac{\partial p}{\partial t} \delta t$	
	$10^{-5} \times$	$10^{-5} \times$	$10^{-5} \times$	$10^{-5} \times$	$100 \times$		$10^{-5} \times$	$10^{-6} \times$	$10^{-5} \times$		$100 \times$	$100 \times$	
$h_0$						Leave the subsequent columns to be filled up after the vertical velocity has been computed on Form P xvi	0				$100 \times$	0	
	-61	-245	-6	-312	656				-229	49.5	483		
$h_2$							-83						483
	367	-257	2	112	-236			0.06	-136	29.4	287		
$h_4$							165						770
	93	-303	-16	-226	478			0.11	-124	26.8	262		
$h_6$							63						1032
	32	-55	-12	-35	74			0.07	-110	23.8	233		
$h_8$							138						1265
	-256	38	-8	-226	479		0.03	-88	19.0	186			
$h_G$												1451	
	NOTE: $\text{div}'_{EN} M$ is a contraction for $\frac{\delta M_E}{\delta e} + \frac{\delta M_N}{\delta n} - M_N \frac{\tan \phi}{a}$				SUM = 1451 $= \frac{\partial p_G}{\partial t} \delta t$							check by $\Sigma -g \delta t \text{div}'_{EN} M$	



# Ecuaciones continuas

Análisis de escala

$$\frac{du}{dt} - \frac{u.v.\tan\phi}{a} + \frac{u.w}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega.v.\sin\phi - 2\Omega.w.\cos\phi + F_x$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{u^2.\tan\phi}{a} + \frac{v.w}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega.u.\sin\phi + F_y$$

$$\frac{dw}{dt} - \frac{u^2 + v^2}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + 2\Omega.u.\cos\phi + F_z$$

Navier-Stokes  
esfera  
rotante

Balance de  
masa

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \vec{v} = 0$$

$$p = \rho.R.T$$

Gas ideal

1er  
Principio

$$c_P \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = Q$$

Formulación de  
"Proceso Físicos"

¡Advección de Vapor de agua, agua líquida y hielo!

## 2. Ecuaciones primitivas

Las ecuaciones que gobiernan la atmósfera son

$$\begin{aligned}x - \text{momentum:} \quad & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = \\ & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mathcal{A} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mathcal{A} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_E \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ y - \text{momentum:} \quad & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = \\ & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mathcal{A} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mathcal{A} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_E \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ z - \text{momentum:} \quad & 0 = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \\ \text{continuity:} \quad & \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \\ \text{energy:} \quad & \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left( \mathcal{A} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mathcal{A} \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa_E \frac{\partial \rho}{\partial z} \right),\end{aligned}$$

Estas ecuaciones se denominan **ecuaciones primitivas** pero ya se han hecho algunas suposiciones sobre el comportamiento de la atmósfera. Entre ellas: 1) aproximación de Boussinesq, 2) aproximación hidrostática, 3) geoide esférico, 4) viscosidad turbulenta como forma de representar el efecto de la pequeña escala sobre la grilla, 5) aproximación de atmósfera somera pues se despreciaron los términos de Coriolis que consideran la componente horizontal de  $\Omega$  así como términos métricos y sustitución de  $r$  por  $a$  (radio terrestre).



# 1922 – Primer pronóstico numérico del tiempo (Richardson)

“The scheme is complicated because the atmosphere is complicated.”

**Predicción (tardía): 145 mb**

**Realidad: 3mb**

Hoy sabemos qué “estaba mal” pero la respuesta no es trivial en problemas en que no tenemos experiencia.

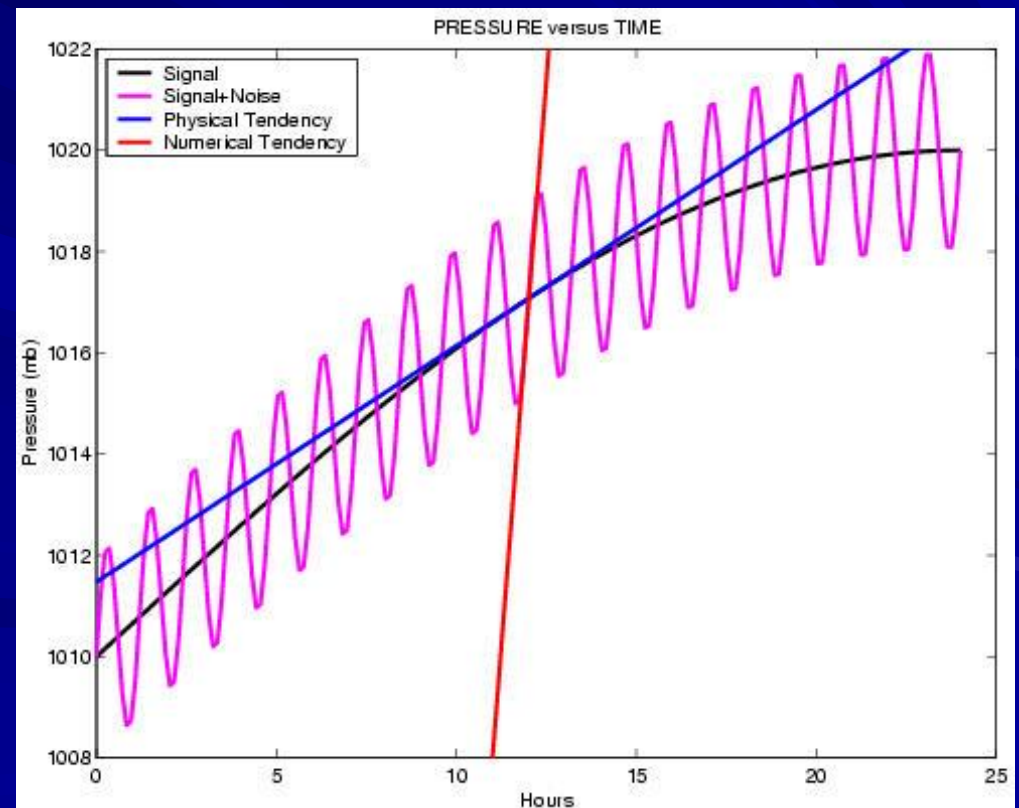


# 1922 – Primer pronóstico numérico del tiempo (Richardson)

“The scheme is complicated because the atmosphere is complicated.”

## Realidad: 3mb

- El error fue de carácter teórico, las ecuaciones que usó no son apropiadas para integrar con un paso temporal de 6 hs.



A myriad **computers** are at work upon the weather of the part of the map where each sits, but each **computer** attends only to one equation or part of an equation.

.....

The work of each region is coordinated by an official of higher rank.

## The Forecast Factory



From the floor of the pit a tall pillar rises to half the height of the hall.  
It carries a large pulpit on its top.  
In this sits the **man in charge of the whole theatre**;

.....

One of his duties is to maintain a uniform speed of progress in all parts of the globe.

**Lewis Richardson**

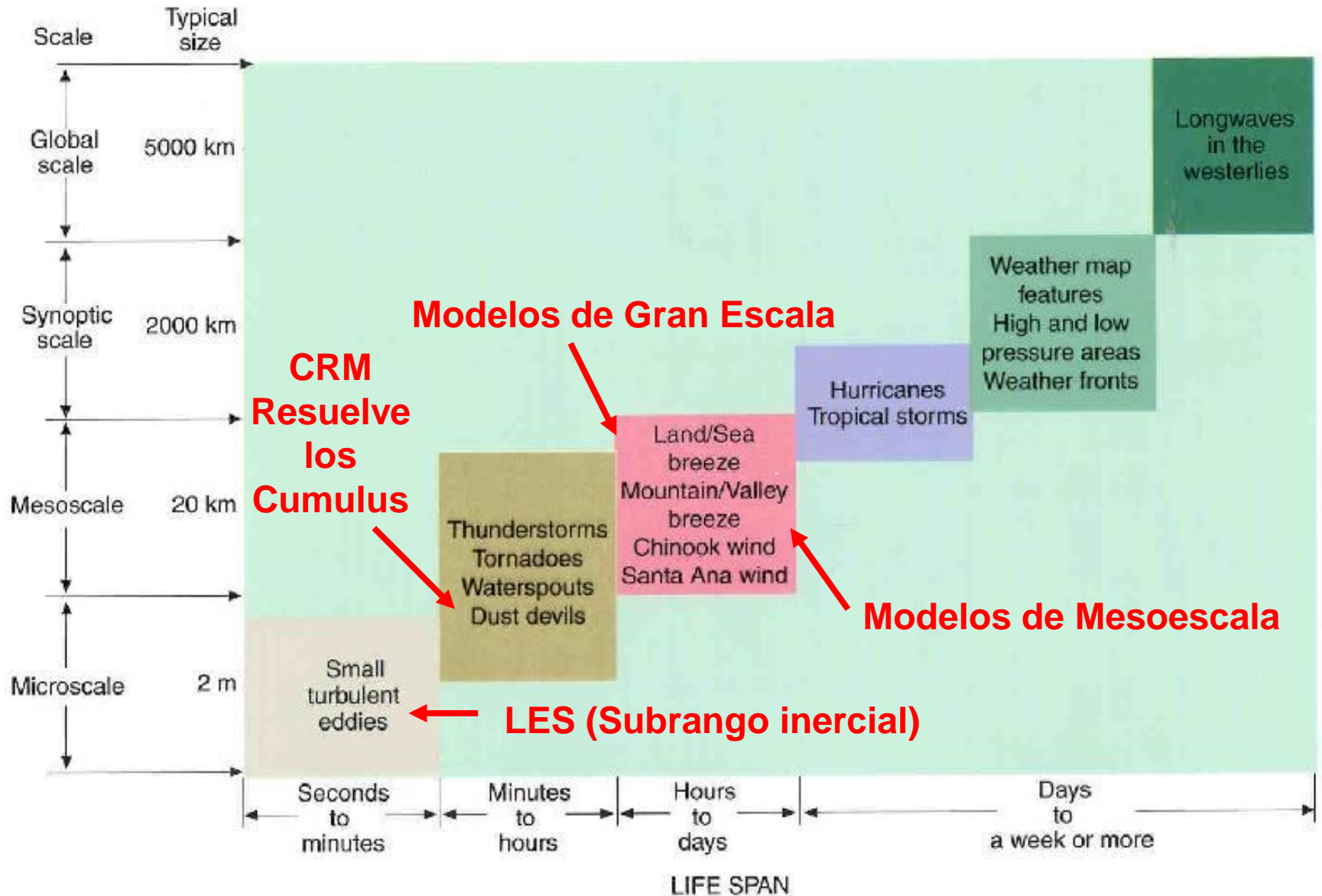


“La extrema generalidad con que las ecuaciones de movimiento son válidas para todo el espectro de movimientos posibles –desde las ondas acústicas hasta las ondas ciclónicas– constituye un serio defecto de las ecuaciones desde el punto de vista meteorológico.”

Jule Charney (1948)

# Jerarquía de modelos

Scales of atmospheric motion with the phenomena's average size and life span



# “Filtrado” de las ecuaciones

$$\frac{du}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega.v.\sin\phi$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega.u.\sin\phi$$

“Ecuaciones Primitivas”

o

Aproximación  
Cuasigeostrófica

Aproximación  
Hidrostática

$$\leftarrow \frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \vec{v} = 0$$



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

Aproximación  
Anelástica

$$p = \rho.R.T$$

$$c_P \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = 0$$



La ecuación de vorticidad Q-G es

$$\frac{\partial \zeta_g}{\partial t} + \vec{V}_g \bullet \nabla \zeta_g + \beta v_g = -f \nabla \bullet \vec{V}$$

la cual se puede escribir, usando la ecuación de continuidad, como

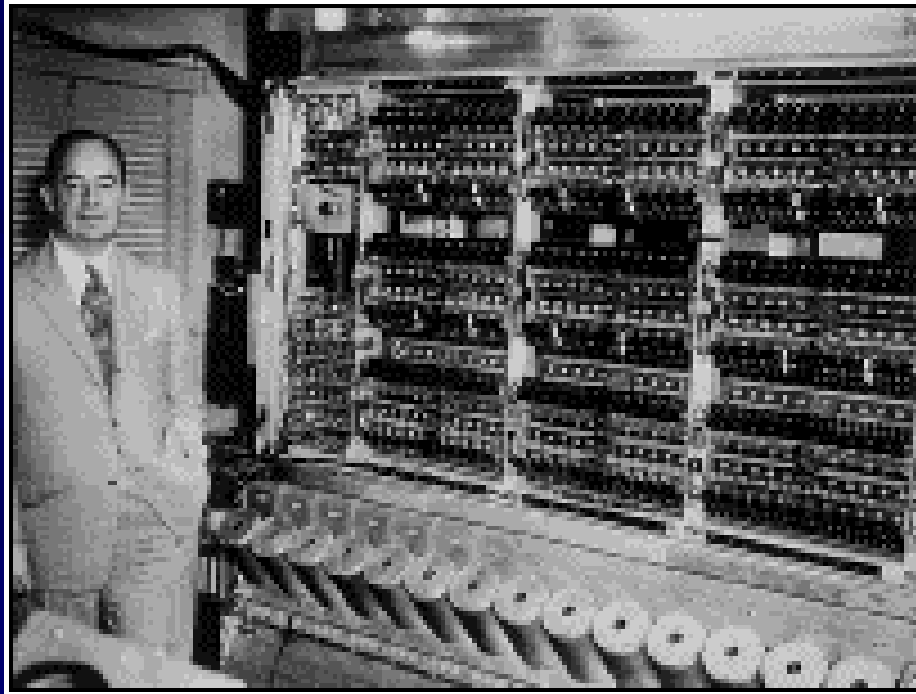
$$\frac{\partial \zeta_g}{\partial t} + \vec{V}_g \bullet \nabla \zeta_g + \beta v_g = f \frac{\partial \omega}{\partial p}$$

De la última ecuación se observa que en una atmósfera cuasi-geostrófica hay solamente dos posibilidades de cambiar la vorticidad relativa de una parcela de fluido: 1) advección de vorticidad planetaria (relativa y planetaria), 2) divergencia.

# 1946 – ENIAC

## *Electronic Numerical Integration and Calculation*

Institute of Advance Studies – Princeton



Charney, Fjörtoft and von Neumann (1950):

**Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 2, 237-254**

“Von Neumann y Charney están engañando al público pretendiendo que la atmósfera se puede predecir como un sistema determinístico.”

**Norbert Weiner**

# Predicción Numérica del Tiempo

- **1950** (von Neumann, Charney, Fjordoft)
  - Pronosticaron geopotencial en 500mb a 24hs con éxito
  - Modelo adiabático cuasi-geostrófico, equivalente barotrópico
  - 270 puntos, 700km de grilla
- **1954** Suecia (Rossby): Primer NWP operativo
- **1955** JNWPU: Joint NWP Unit, EE.UU.
- **1960s-70s**: Estándar en todos los servicios meteorológicos
- Simulaciones más largas eran aún inestables (?)

# Modelos Numéricos de la Atmósfera

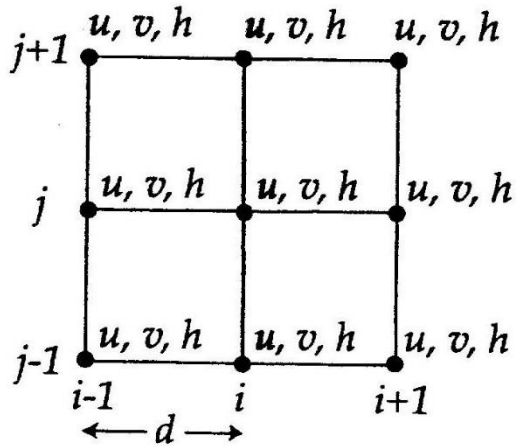
## ■ Ecuaciones discretas

- Promedios de Reynolds y discretización
- “Parametrización” de procesos de subgrilla

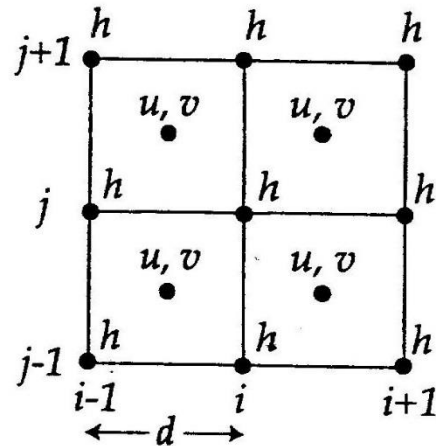
# Grilla y discretización

Ec. en Derivadas Parciales (EDP) -> Ec. Diferencias Finitas (EDF)

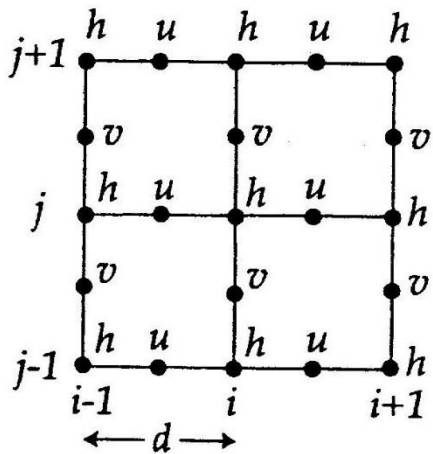
(A)



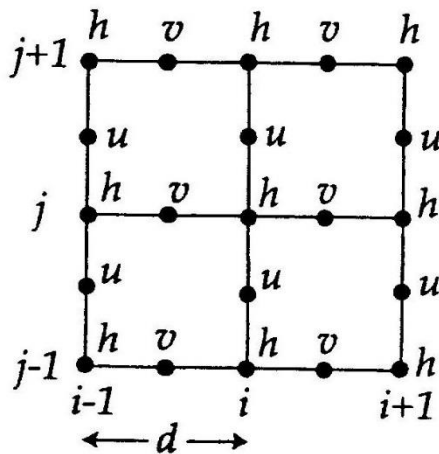
(B)



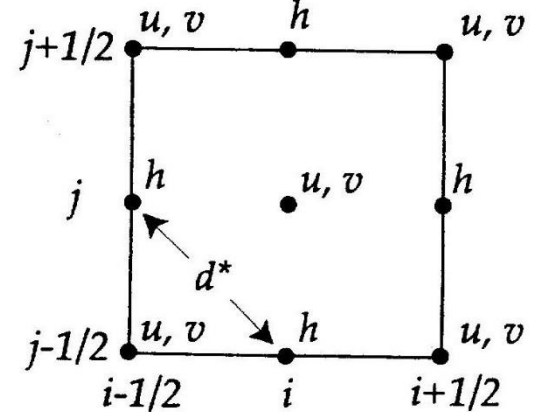
(C)



(D)



(E)



# Promedios de Reynolds

Viento zonal

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{\vec{v}} \cdot \nabla \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + 2\Omega \cdot \bar{\vec{v}} \cdot \sin \phi - \overline{\nabla \cdot (u' \vec{v}')}$$

$$\theta = T \left( \frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p}$$

Temperatura  
Potencial

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{\vec{v}} \cdot \nabla \bar{\theta} = \frac{\bar{Q}}{c_p} \left( \frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p} - \overline{\nabla \cdot (\theta' \vec{v}')}$$

Vapor de agua

$$\frac{\partial \bar{q}_v}{\partial t} + \bar{\vec{v}} \cdot \nabla \bar{q}_v = \bar{S}_q - \overline{\nabla \cdot (q'_v \vec{v}')}$$

# Efecto de movimientos de subgrilla

Viento zonal

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{\vec{v}} \cdot \nabla \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + 2\Omega \bar{v} \sin \phi - \overline{\nabla \cdot (u' \vec{v}')}$$

$$\theta = T \left( \frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p}$$

Temperatura  
Potencial

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{\vec{v}} \cdot \nabla \bar{\theta} = \frac{\bar{Q}}{c_p} \left( \frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p} - \overline{\nabla \cdot (\theta' \vec{v}')}$$

Vapor de agua

$$\frac{\partial \bar{q}_v}{\partial t} + \bar{\vec{v}} \cdot \nabla \bar{q}_v = \bar{S}_q - \overline{\nabla \cdot (q'_v \vec{v}')}$$



# Parametrizaciones

“En un modelo de atmósfera, se presupone que solo las propiedades estadísticas de los movimientos de escala más pequeña influyen las grandes escalas, y que en cada instante dichas propiedades estadísticas están determinadas por la gran escala ...

En consecuencia, un sistema constituido solo por las escalas grandes es considerado determinístico.”

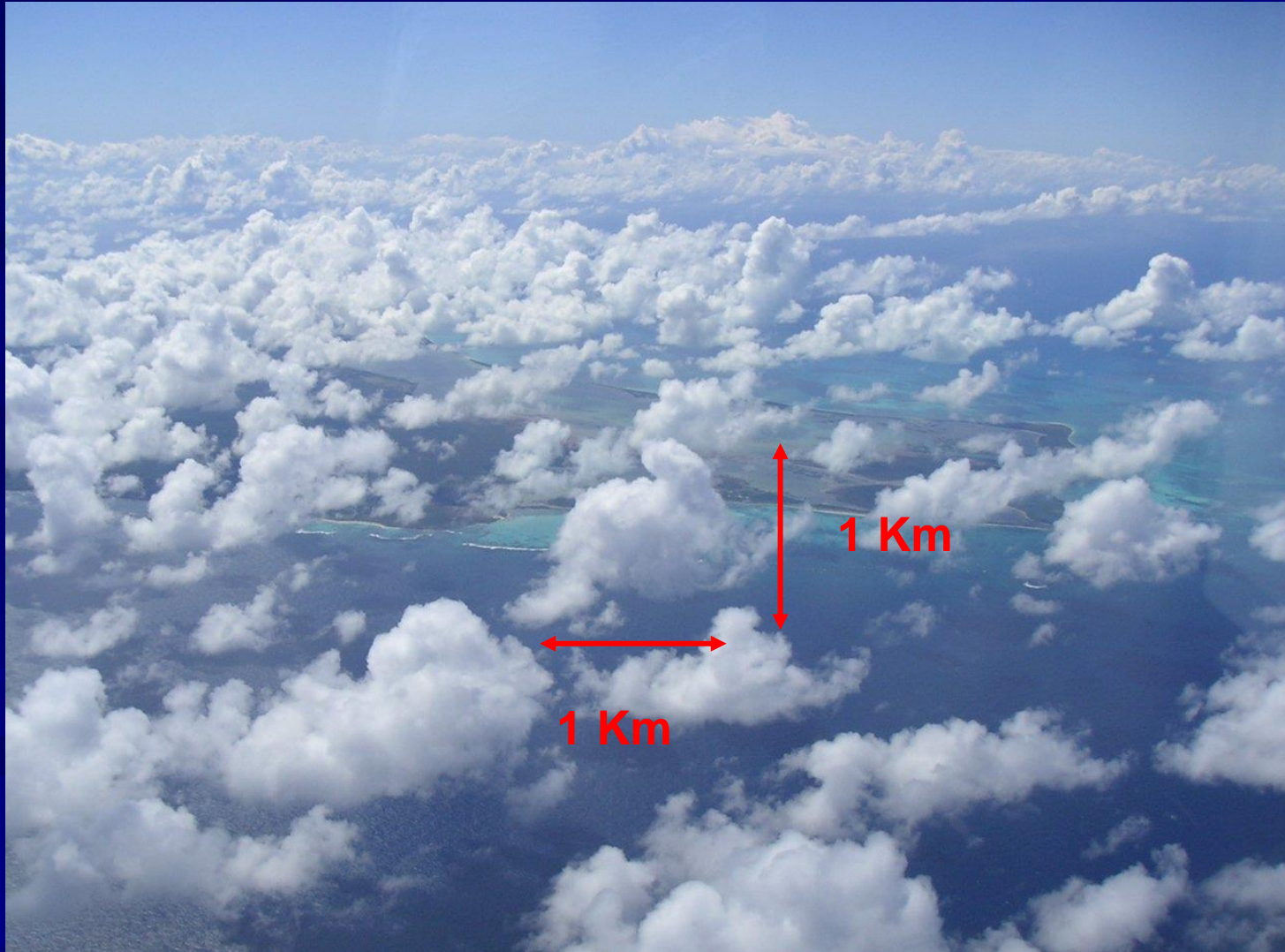
Ed Lorenz (1969)



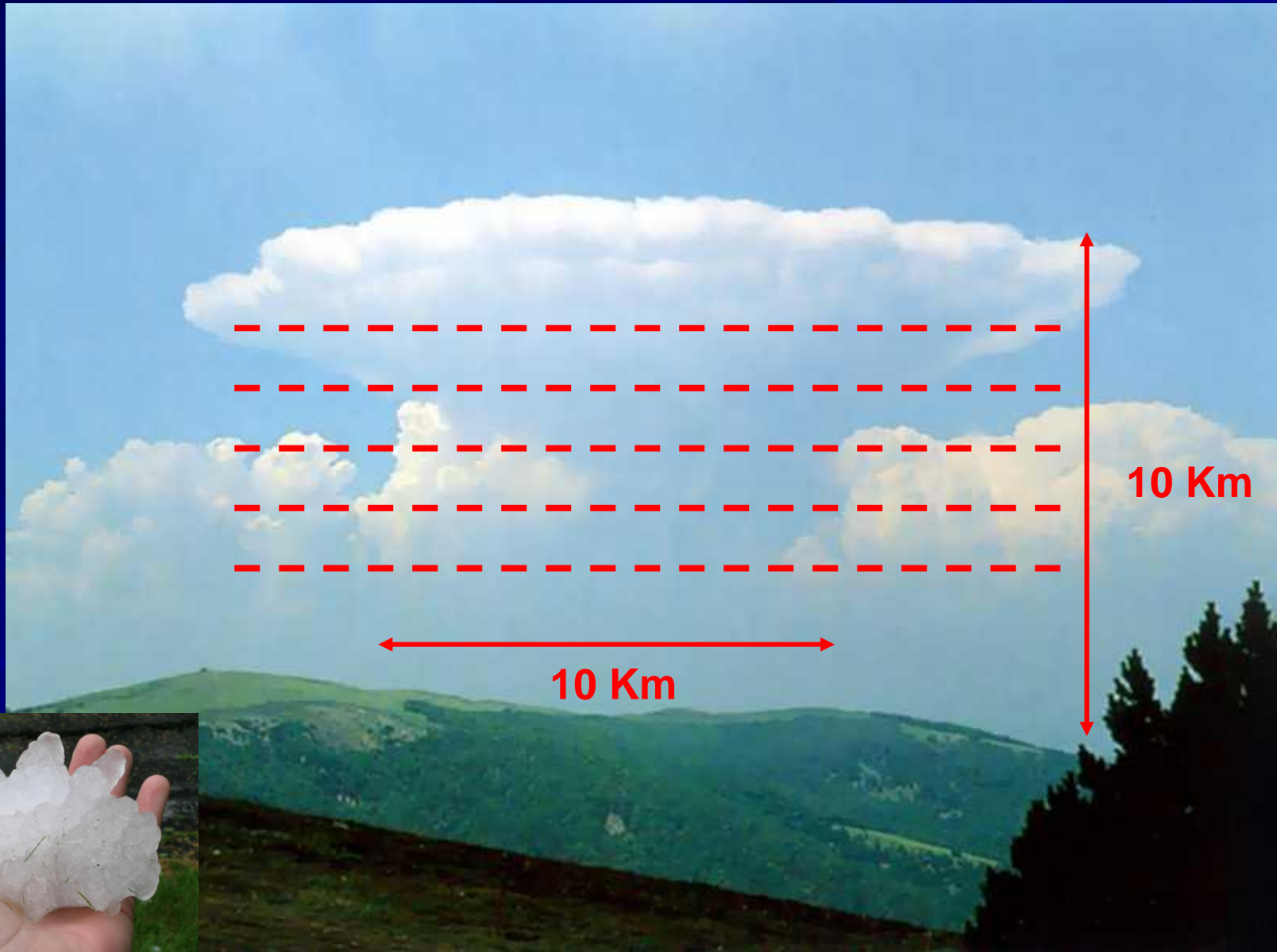
# Dust devils



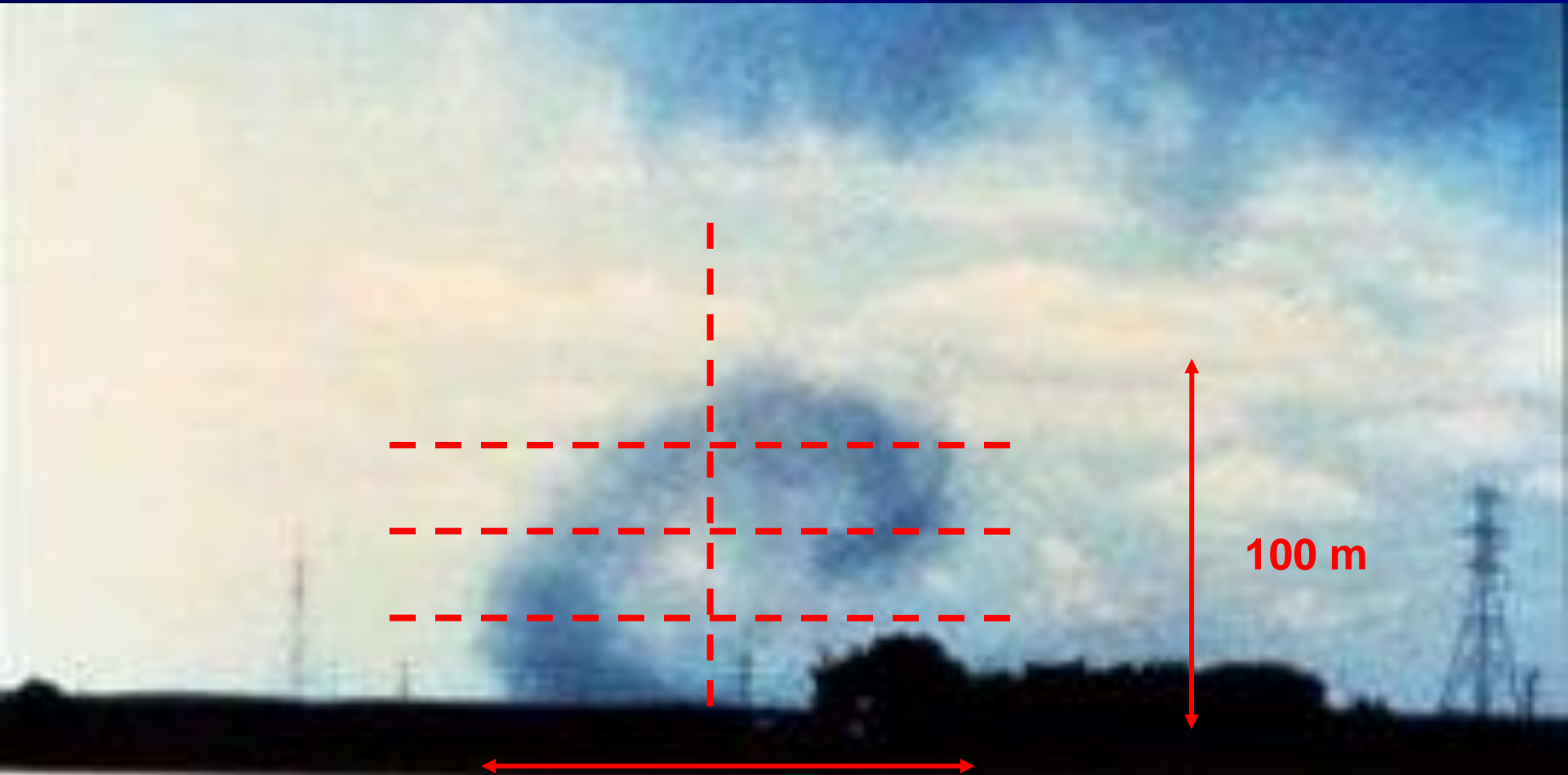
# Convección húmeda somera no precipitante



# Convección húmeda profunda precipitante



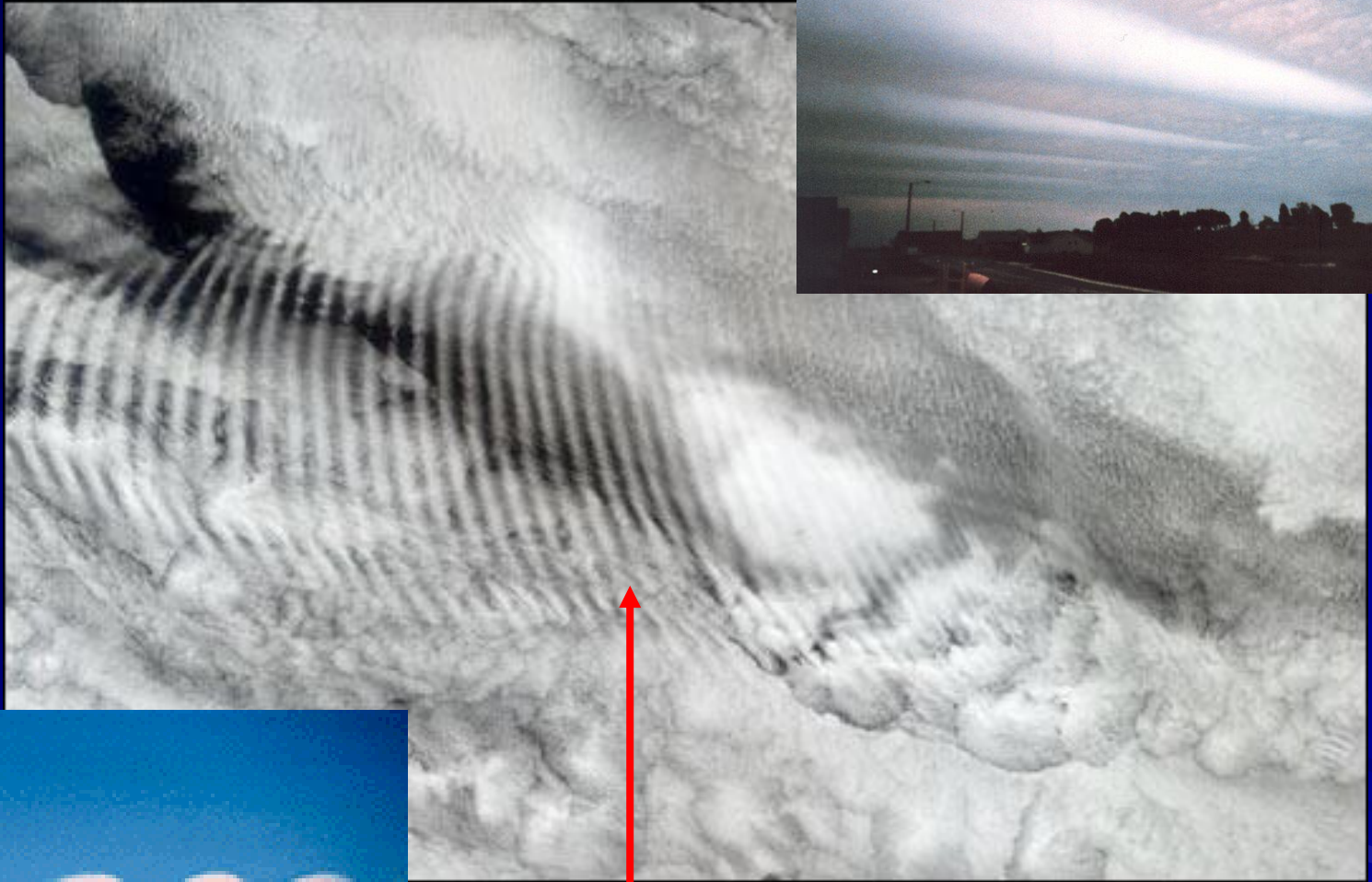
# Frente de ráfaga



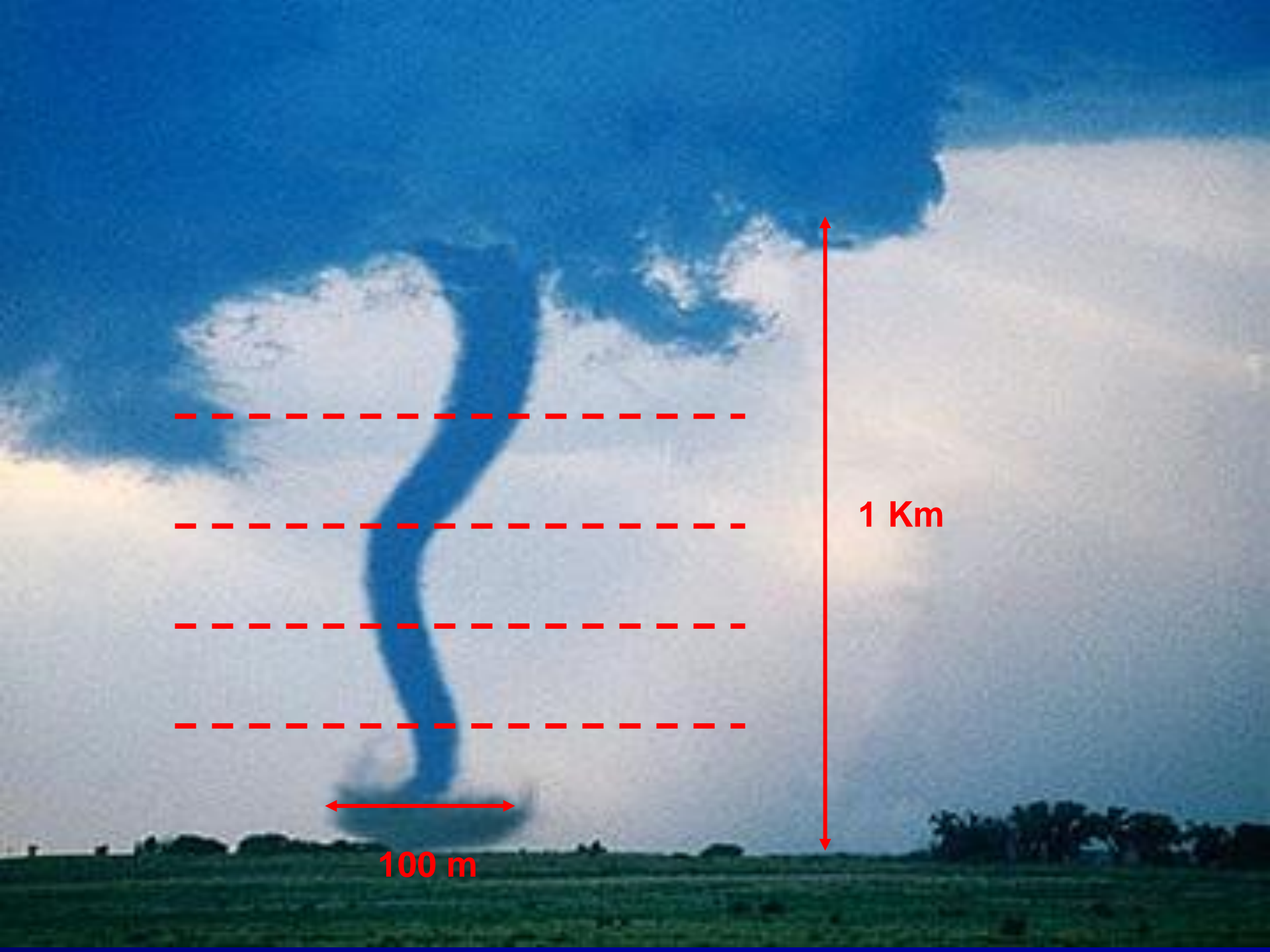
100 m

100 m

# Ondas de gravedad



10 Km



1 Km

100 m



1 Km

# Promedio de efectos no lineales

Viento zonal

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{\vec{v}} \cdot \nabla \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + 2\Omega \cdot \bar{\vec{v}} \cdot \sin \phi - \overline{\nabla \cdot (u' \vec{v}')}$$

$$\theta = T \left( \frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p}$$

Temperatura  
Potencial

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{\vec{v}} \cdot \nabla \bar{\theta} = \frac{\bar{Q}}{c_p} \left( \frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p} - \overline{\nabla \cdot (\theta' \vec{v}')}$$

Vapor de agua

$$\frac{\partial \bar{q}_v}{\partial t} + \bar{\vec{v}} \cdot \nabla \bar{q}_v = \bar{S}_q - \overline{\nabla \cdot (q'_v \vec{v}')}$$



# “Procesos Físicos”

- Absorción y reflexión de luz solar
- Transferencia por radiación de onda larga
- Cambios de fase del agua
- Microfísica de nubes
- Aerosoles, química, .....

# Modelos Numéricos de la Atmósfera

## ¿Qué son?

### ■ Clasificación de modelos

- Criterios de clasificación
- Configuraciones y Aplicaciones

# Cómo clasificar los modelos

- Sistema de ecuaciones continuas
- Discretización espacial y temporal
- Formulación de “procesos físicos”
- Formulación de procesos de sub-grilla

**Todo depende de la resolución espacial**

# Configuraciones y Aplicaciones

## ■ Dominio:

- Global
- Área limitada (condiciones de borde)

## ■ Modo:

- Predicción del Tiempo (determinística, ensamble)
- Predicción del Clima (acoplado - probabilística)
- Hindcast
- Re-análisis (asimilando observaciones)
- Test de hipótesis, análisis de mecanismos físicos
- .....

