

Previsão Numérica de Tempo e Clima

**Predictability and
Ensemble Forecasting**

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Basicamente, a previsão numérica do tempo usa métodos numéricos para aproximar um conjunto de equações parcialmente diferenciais, que governam os sistemas climáticos, em pontos de grade discretos em um domínio finito para prever os sistemas e processos climáticos para um determinado momento no futuro.

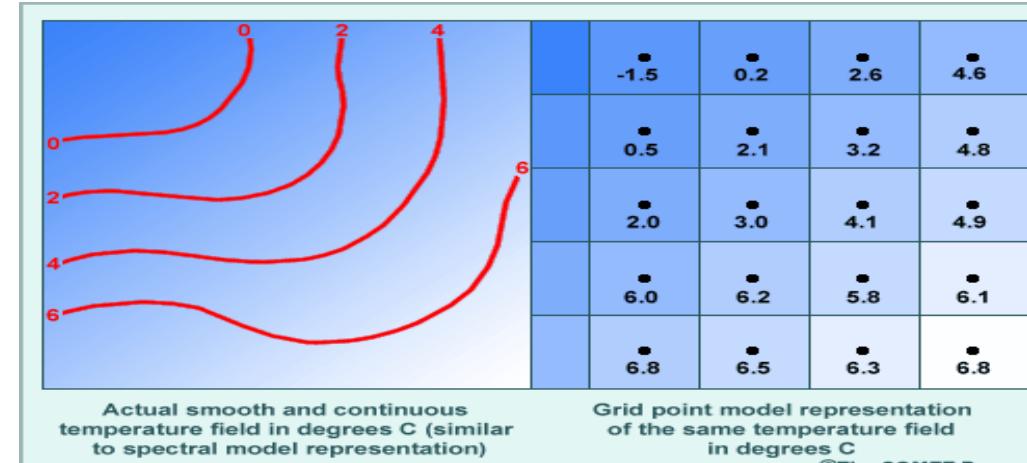
$$\frac{\partial(\bar{u})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{u})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{u})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{u})}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\bar{P})}{\partial x} - 2\Omega\eta_3(\bar{v}) - \nu \frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial z^2} = -\frac{\partial(\bar{u}'\bar{u}')}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{v}'\bar{u}')}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}'\bar{u}')}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\bar{v})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{v})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{v})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{v})}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\bar{P})}{\partial y} + 2\Omega\eta_3(\bar{v}) - \nu \frac{\partial^2(\bar{v})}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{v})}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial z^2} = -\frac{\partial(\bar{u}'\bar{v}')}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{v}'\bar{v}')}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}'\bar{v}')}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\bar{w})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{w})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{w})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{w})}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\bar{P})}{\partial z} + g \frac{\bar{p}}{\rho_0} - \nu \frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial z^2} = -\frac{\partial(\bar{u}'\bar{w}')}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{v}'\bar{w}')}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}'\bar{w}')}{\partial z}$$

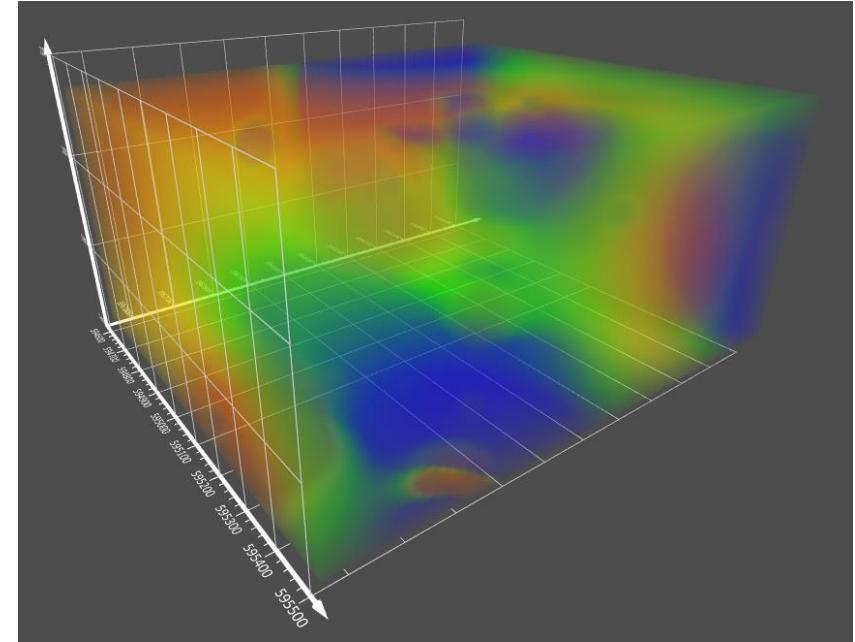
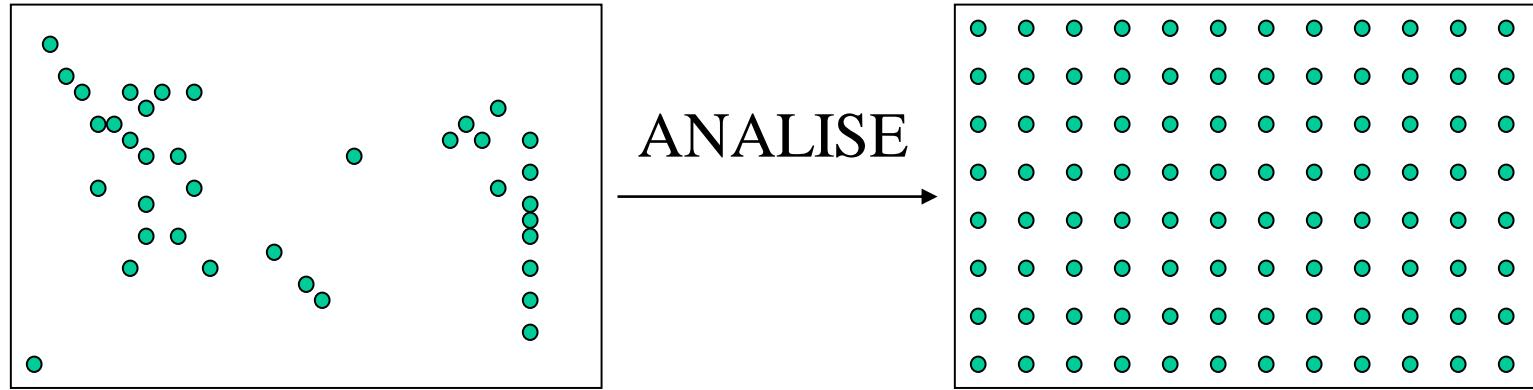
$$\frac{\partial(\bar{T})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{T})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{T})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{T})}{\partial z} - S_p \bar{\omega} = -\frac{\partial(u'\bar{T}')}{\partial x} - \frac{\partial(v'\bar{T}')}{\partial y} - \frac{\partial(w'\bar{T}')}{\partial z} + \bar{J} + \bar{C}_p$$

$$\frac{\partial(\bar{q})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{q})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{q})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{q})}{\partial z} = -\frac{\partial(u'\bar{q}')}{\partial x} - \frac{\partial(u'\bar{q}')}{\partial y} - \frac{\partial(w'\bar{q}')}{\partial z} + \bar{S}$$



Previsão Numérica de Tempo e Clima

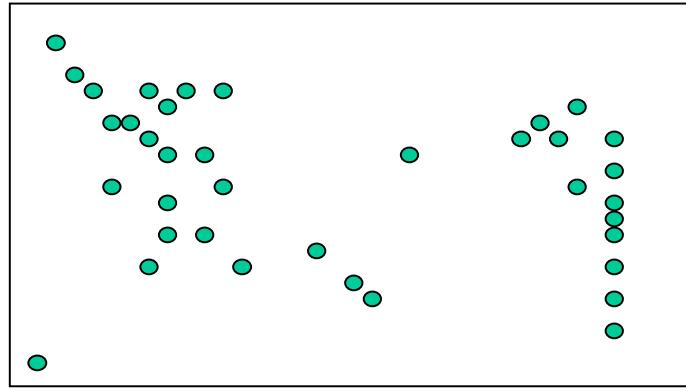
Para integrar numericamente essas equações diferenciais parciais com o tempo, é necessário iniciar a integração em um determinado momento para o domínio finito.



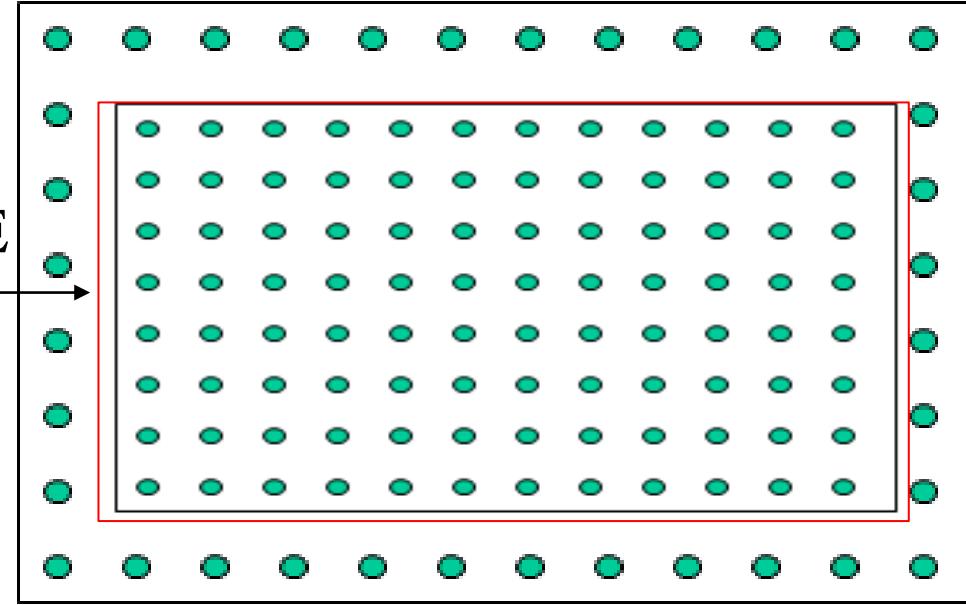
Como mencionado anteriormente, matematicamente isso corresponde a resolver **um problema de valor inicial e valor de contorno**.

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Assim, em um **modelo numérico de previsão do tempo**, as **variáveis meteorológicas precisam ser especificadas**:



ANALISE

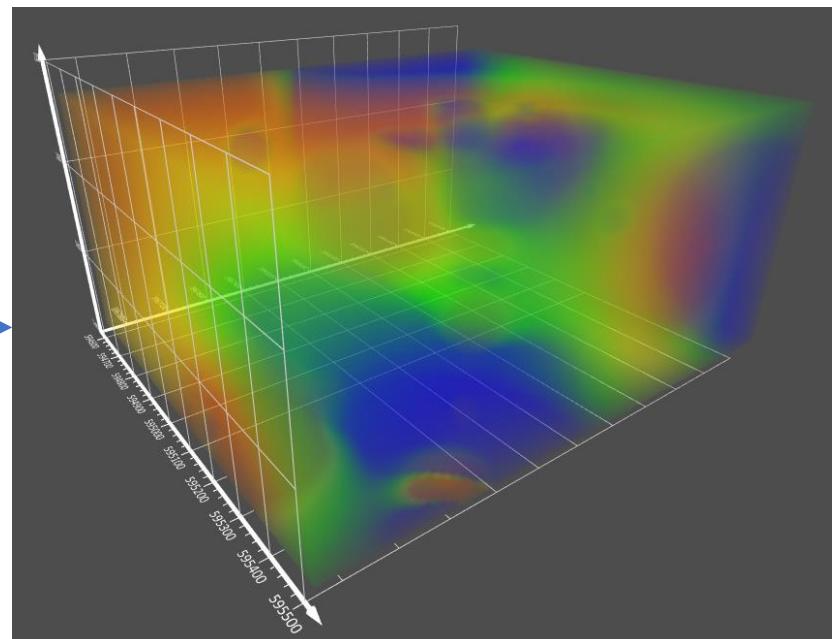
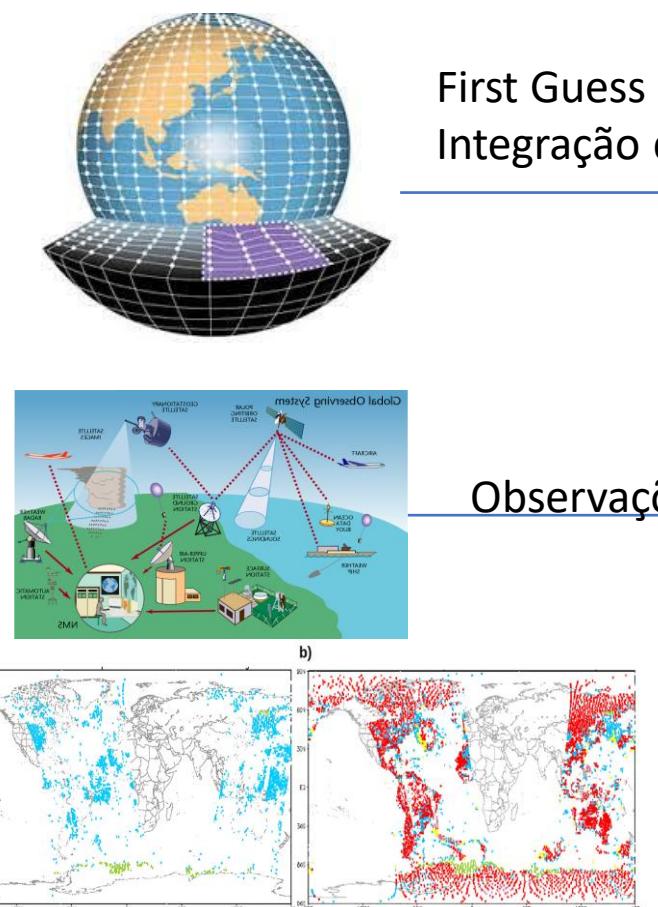


no tempo inicial, ou seja, as condições iniciais, e nos contorno do domínio, ou seja, as condições de contorno.

A precisão de um modelo numérico de previsão do tempo depende, portanto, da precisão das condições iniciais e das condições de contorno.

Previsão Numérica de Tempo e Clima

O maior problema que enfrentamos na previsão numérica do tempo hoje é a falta de condições iniciais suficientes e precisas, bem como condições de contorno mais precisas e suficientes e formas apropriadas de implementá-las nos limites laterais de um domínio finito de interesse.

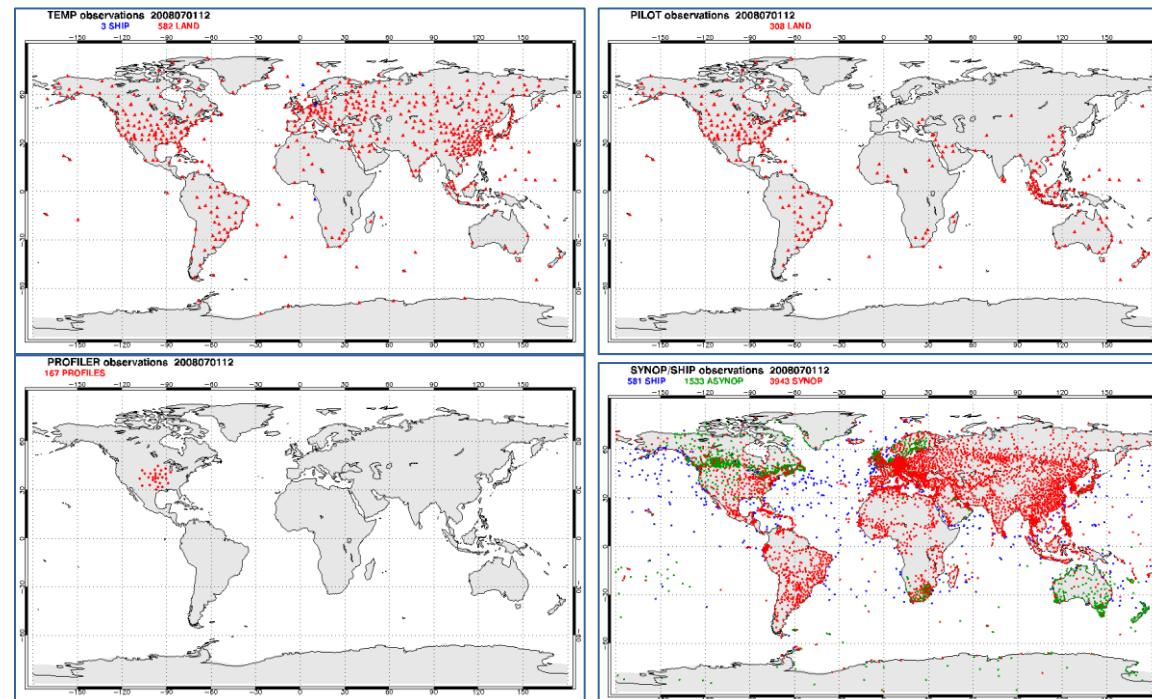


Previsão Numérica de Tempo e Clima

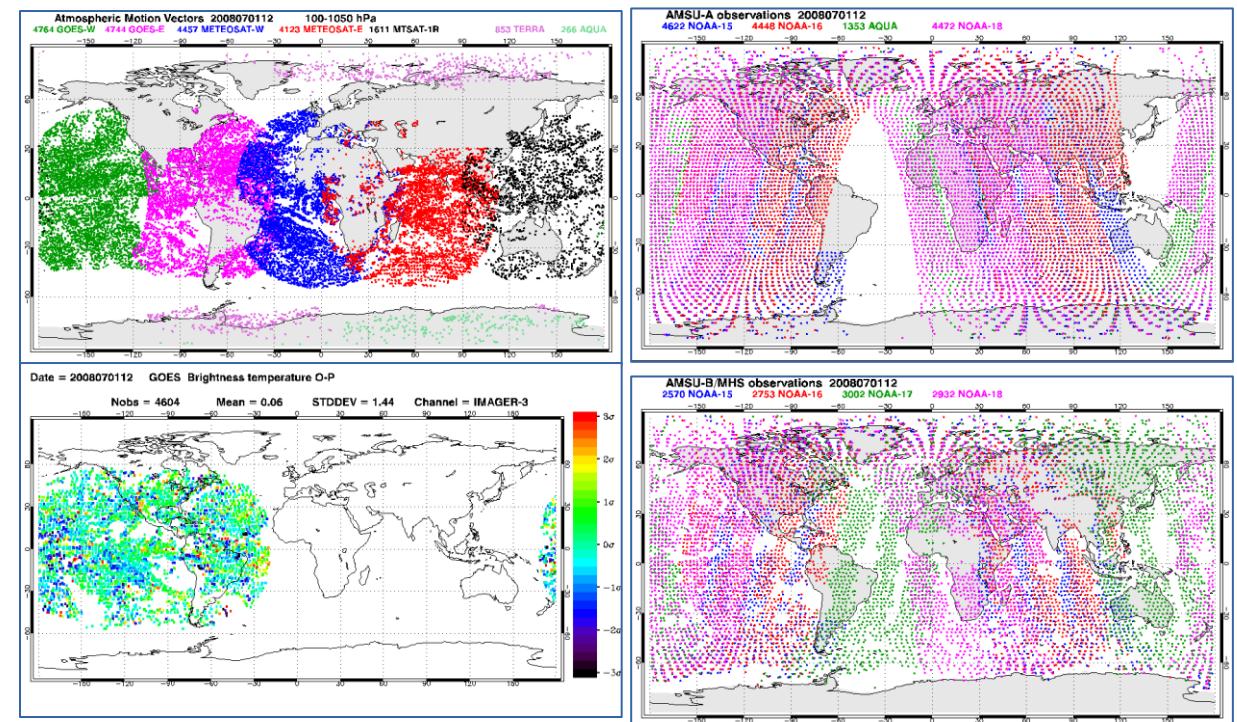
Um exemplo é que **não temos dados observados suficientes no ar superior, sobre o oceano e regiões polares.**

Alguns **dados não convencionais**, como aqueles recuperados de **observações de radar e satélite**, são usados para ajudar a fornecer os dados em regiões sem informações de dados.

Convencionais



Não convencionais

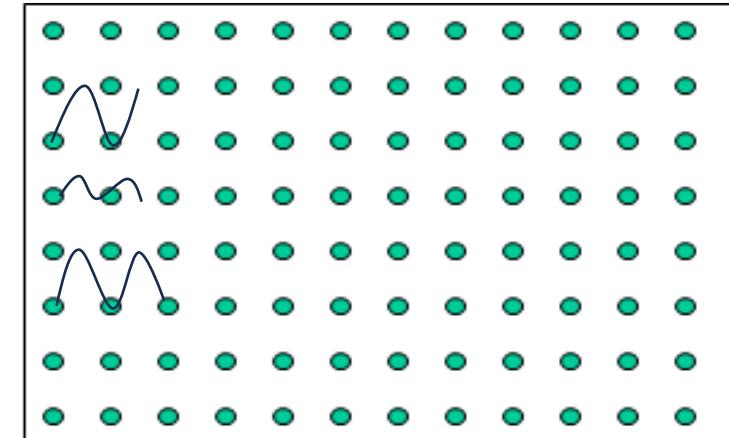
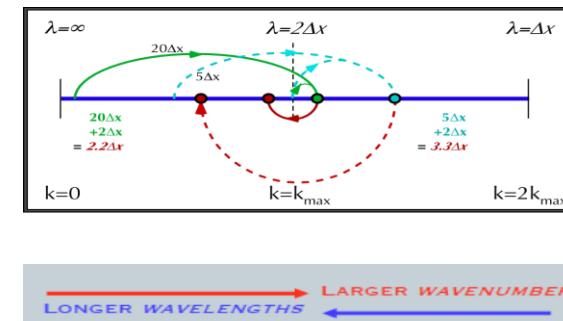
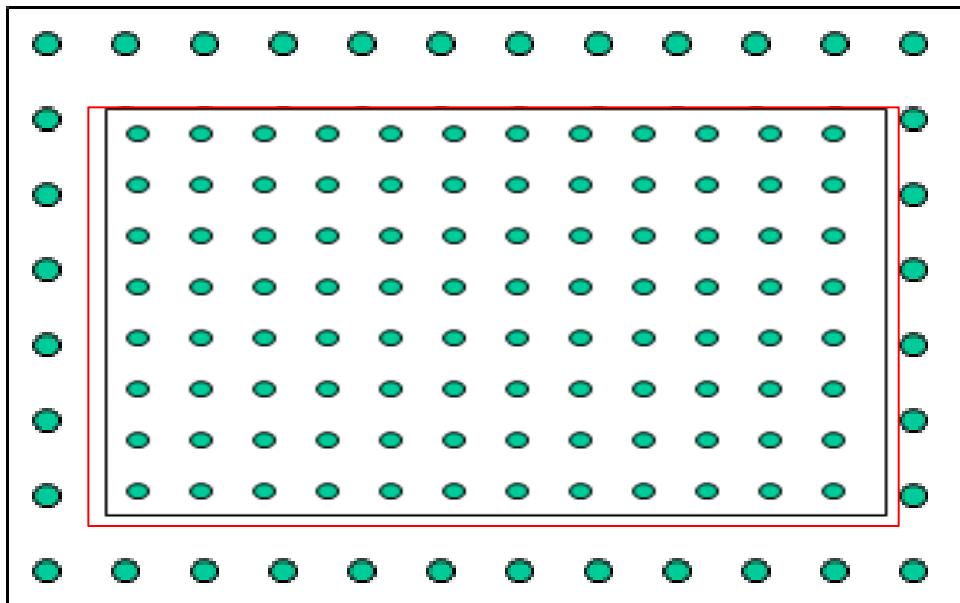


Previsão Numérica de Tempo e Clima

Melhorar os modelos numéricos globais de previsão meteorológica, é importante para melhorar a precisão do modelo numérico regional de previsão meteorológica, uma vez que os primeiros são **frequentemente usados para fornecer as condições iniciais e de contorno para o último**.



regional



Previsão Numérica de Tempo e Clima

A **imprecisão da previsão numérica do tempo** também pode vir da **aproximação numérica das equações diferenciais parciais** que governam os movimentos atmosféricos nos pontos discretos de um domínio de modelo e da **representação dos fenômenos e processos climáticos** ocorridos nos pontos da grade de um modelo numérico, ou seja, **a parametrização de fenômenos e processos climáticos em escala subgrid**.

$$\frac{\partial(\bar{u})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{u})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{u})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{u})}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\bar{P})}{\partial x} - 2\Omega\eta_3(\bar{v}) - \nu \frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial z^2} = -\frac{\partial(\bar{u}'\bar{u}')}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{v}'\bar{u}')}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}'\bar{u}')}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\bar{v})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{v})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{v})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{v})}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\bar{P})}{\partial y} + 2\Omega\eta_3(\bar{v}) - \nu \frac{\partial^2(\bar{v})}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{v})}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial z^2} = -\frac{\partial(\bar{u}'\bar{v}')}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{v}'\bar{v}')}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}'\bar{v}')}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\bar{w})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{w})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{w})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{w})}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\bar{P})}{\partial z} + g \frac{\bar{p}}{\rho_0} - \nu \frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial z^2} = -\frac{\partial(\bar{u}'\bar{w}')}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{v}'\bar{w}')}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}'\bar{w}')}{\partial z}$$

Estado médio da atmosfera

Parametrizações físicas

$$\frac{\partial(\bar{T})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{T})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{T})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{T})}{\partial z} - S_p \bar{\omega} = -\frac{\partial(u'\bar{T}')}{\partial x} - \frac{\partial(v'\bar{T}')}{\partial y} - \frac{\partial(w'\bar{T}')}{\partial z} + \frac{\bar{J}}{C_p}$$

$$\frac{\partial(\bar{q})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{q})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{q})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{q})}{\partial z} = -\frac{\partial(u'\bar{q}')}{\partial x} - \frac{\partial(v'\bar{q}')}{\partial y} - \frac{\partial(w'\bar{q}')}{\partial z} + \bar{S}$$

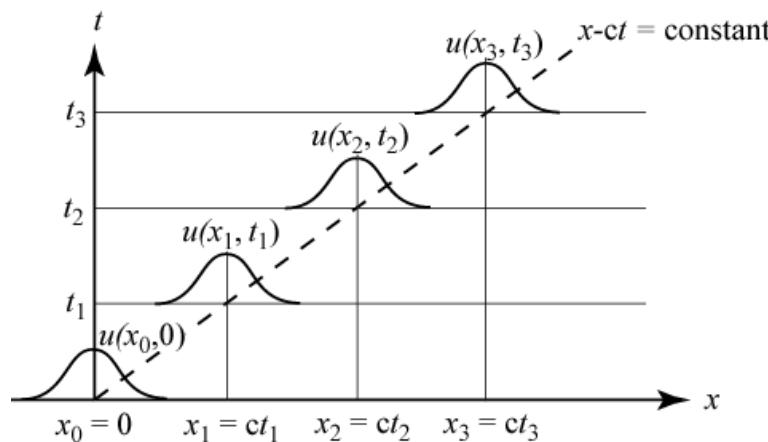
Previsão Numérica de Tempo e Clima

A precisão de um **método numérico pode ser melhorada**

(1) adotando uma **aproximação de ordem superior** das equações diferenciais parciais usadas nos modelos numéricos de previsão do tempo.

$$f(x - \Delta x) = f(x) - f'(x) \frac{\Delta x^1}{1!} + f''(x) \frac{\Delta x^2}{2!} - f'''(x) \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots$$

(2) usando métodos de **aproximação mais precisos, mas estáveis.**



Isso requer um **aumento do poder de computação**, bem como uma **melhor compreensão dos métodos de aproximação numérica.**

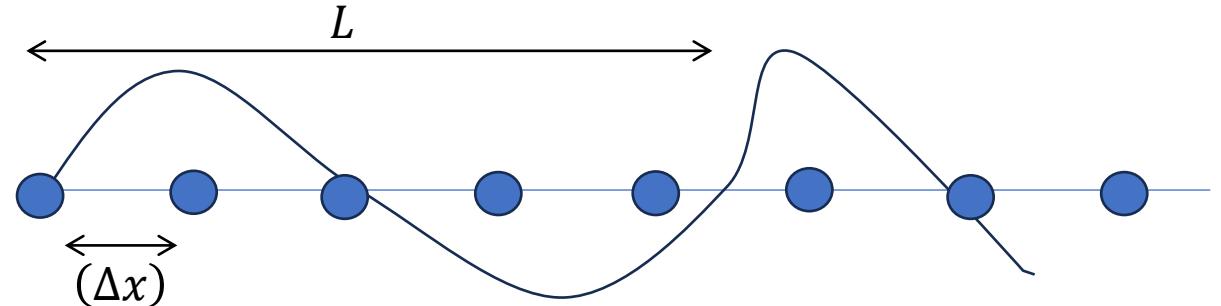
Previsão Numérica de Tempo e Clima

A precisão das parametrizações em escala de subgrid pode ser melhorada por

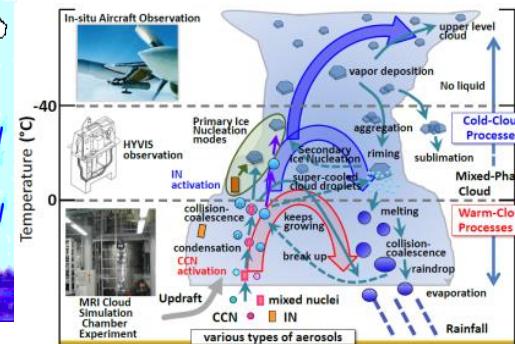
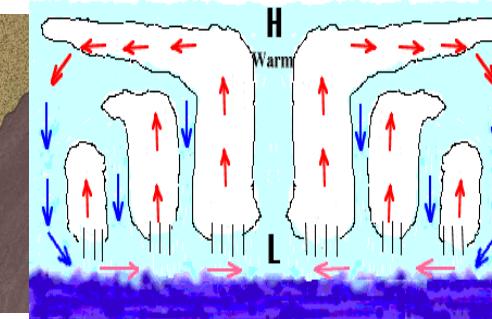
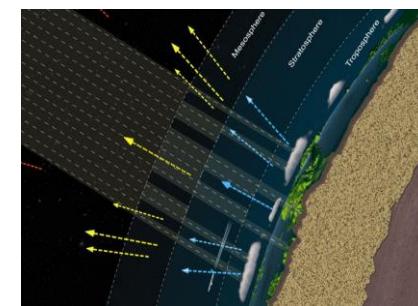
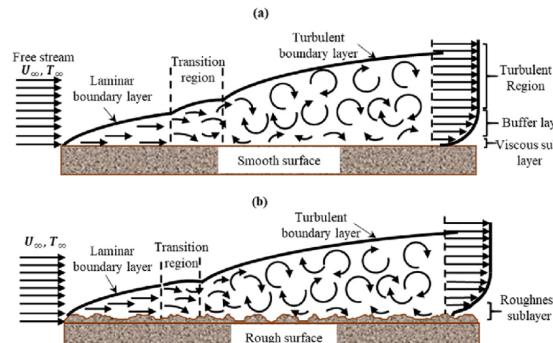
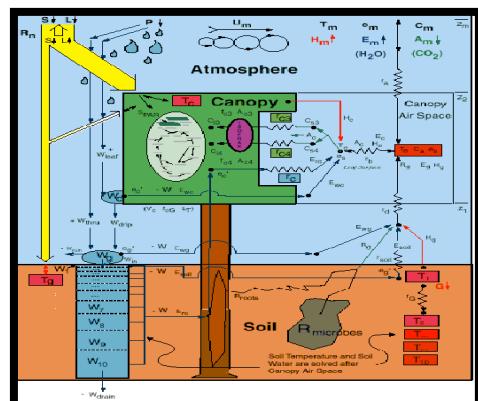
(1) reduzir o intervalo de grade de um modelo numérico de previsão do tempo,

$$\frac{fD'(x)}{f'(x)} \Rightarrow 1, \quad \text{com} \quad \frac{2\pi(\Delta x)}{L} \Rightarrow 0$$

$$2\pi(\Delta x) \ll L$$

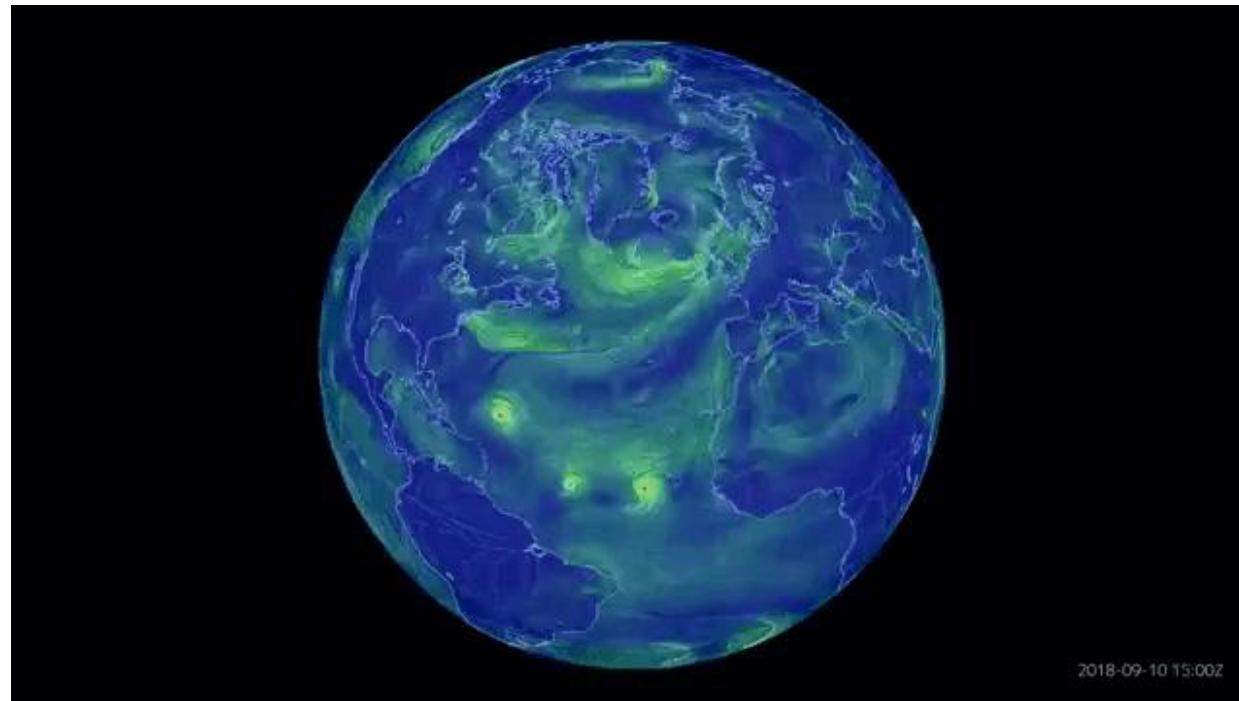


(1) uma melhor compreensão dos fenômenos e processos climáticos.,



Previsão Numérica de Tempo e Clima

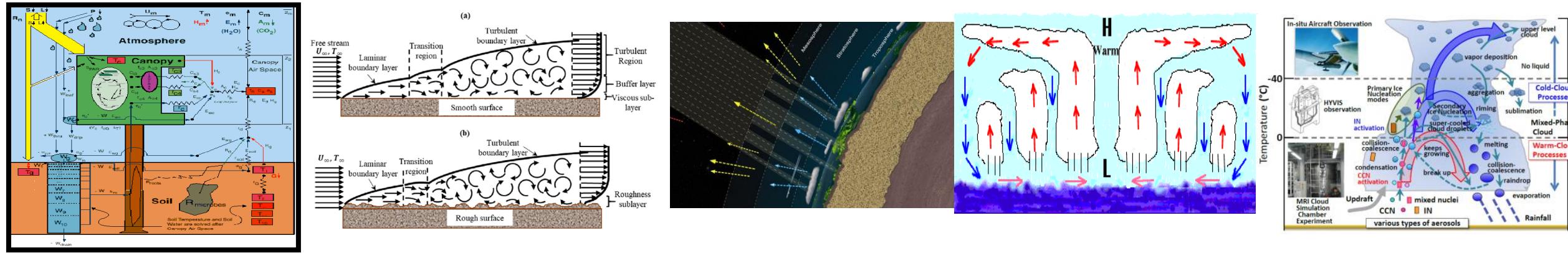
Outro desafio da previsão numérica do tempo é se os sistemas meteorológicos são previsíveis ou não.



Se forem intrinsecamente imprevisíveis, então as melhorias nas precisões das condições iniciais e de contorno, métodos numéricos e parametrizações em escala de subgrado de um modelo de previsão numérica do tempo terão suas limitações.

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Na realidade, os sistemas climáticos são considerados de previsibilidade limitada.



Assim, deixa-nos algum espaço para fazer melhorias na precisão dos modelos numéricos de previsão do tempo.

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

Em 1919, Bjerknes afirmou que

“Se as condições iniciais da atmosfera fossem conhecidas com precisão suficiente, e se as equações pelas quais os movimentos da atmosfera e as mudanças físicas que ocorrem nela também fossem conhecidas com precisão suficiente;

Então o estado da atmosfera poderia ser determinado completamente por algum matemático em qualquer momento subsequente.” (Citado em Schumann 1950)

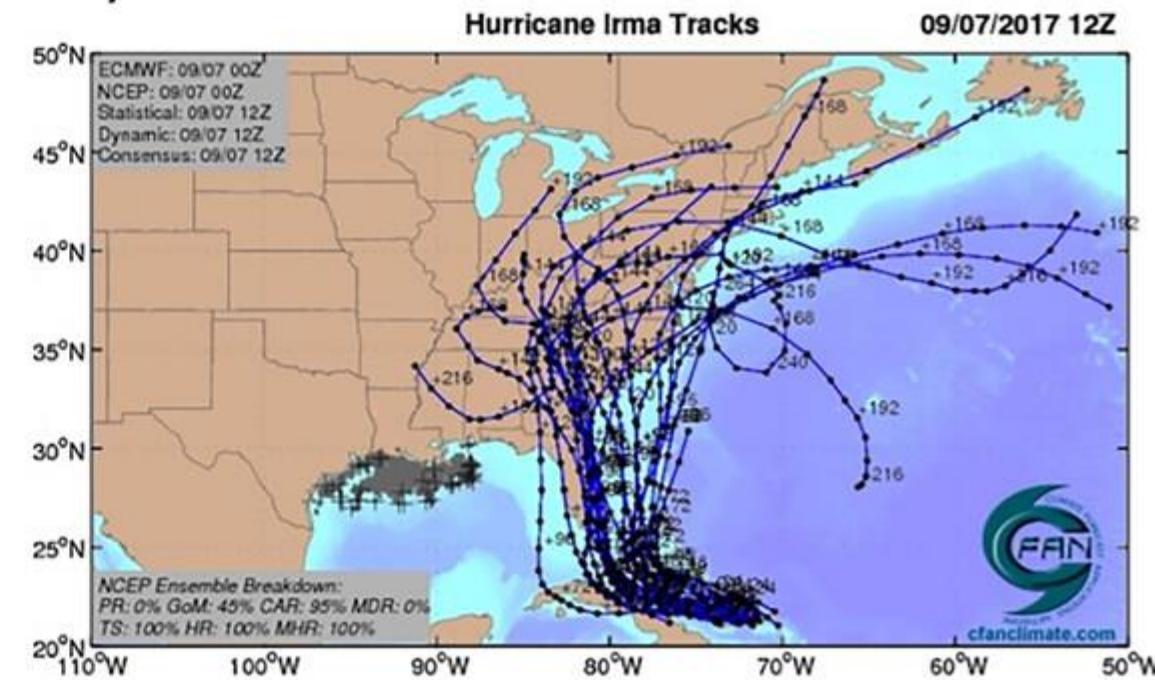
Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

No início da década de 1950, alguns meteorologistas começaram a aplicar métodos estatísticos à previsão do tempo para lidar com as incertezas encontradas na previsão (Gleeson 1961). a)



b)



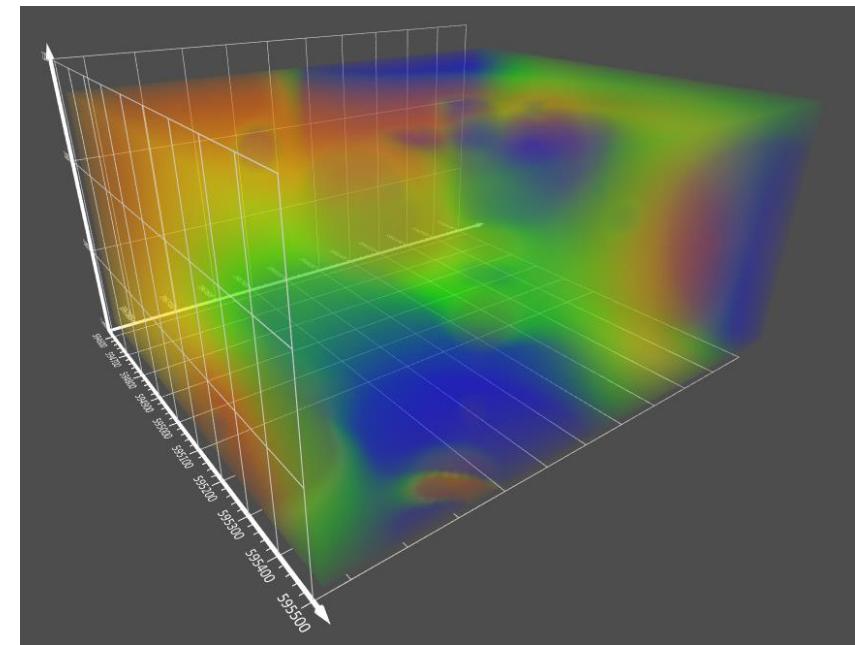
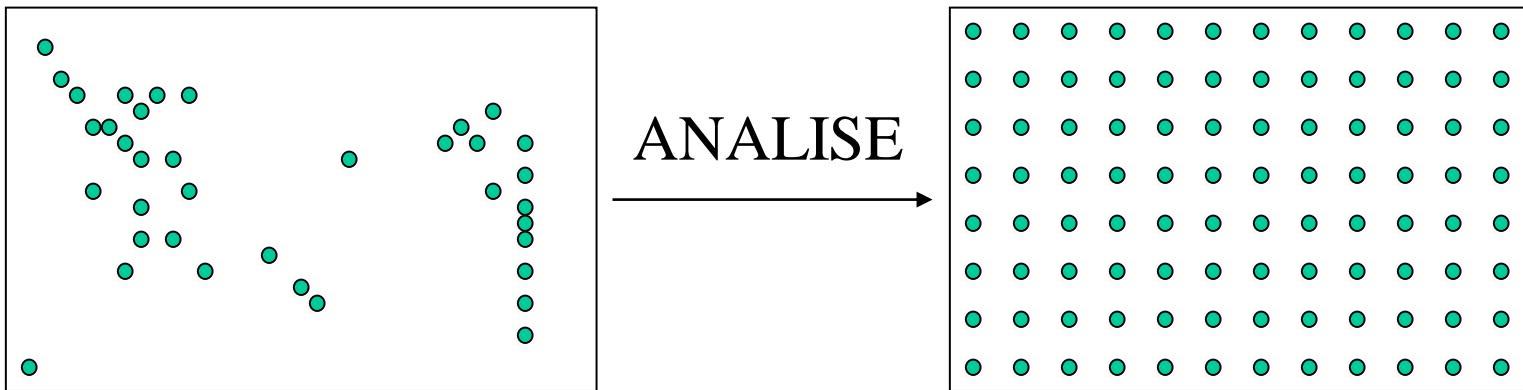
Fonte: Jessica K. Witt

O problema de previsão do tempo tem sido visto como probabilidades em evolução.

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

Percebeu-se que, mesmo com técnicas de modelagem aprimoradas, a previsão do tempo tem suas próprias limitações herdadas devido às inevitáveis deficiências e erros do modelo nas condições iniciais ou ao problema de previsibilidade (erros numéricos).



Em seu trabalho pioneiro de sistema dinâmico, Lorenz (1963) descobriu alguns aspectos fundamentais da previsibilidade atmosférica.

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

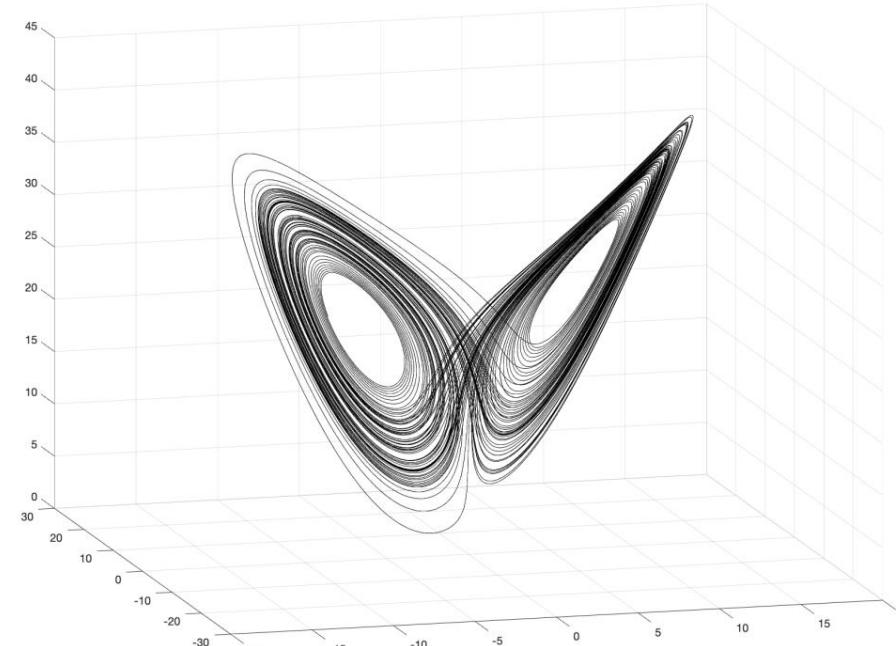
O **efeito borboleta** é um dos princípios mais conhecidos da **teoria do caos**.

. Pode uma borboleta batendo suas asas em **Cachoeira Paulista** pode enviar **um furacão para Brasília?**

A origem do efeito borboleta é (não surpreendentemente) pela imagem de um conjunto de trajetórias semelhantes a borboletas que foi gerado, em uma das **primeiras simulações de computador da teoria do caos**, por Edward Lorenz.

Lorenz Equations

$$\begin{aligned} \text{Stream Function} & \quad \dot{x} = p(y - x) && \text{Prandtl Number} \\ \text{Change in Temperature} & \quad \dot{y} = -xz - y + rx && \text{Rayleigh Number} \\ \text{Deviation in Linear Temperature} & \quad \dot{z} = xy - bz && \text{Nonlinear Terms} \end{aligned}$$

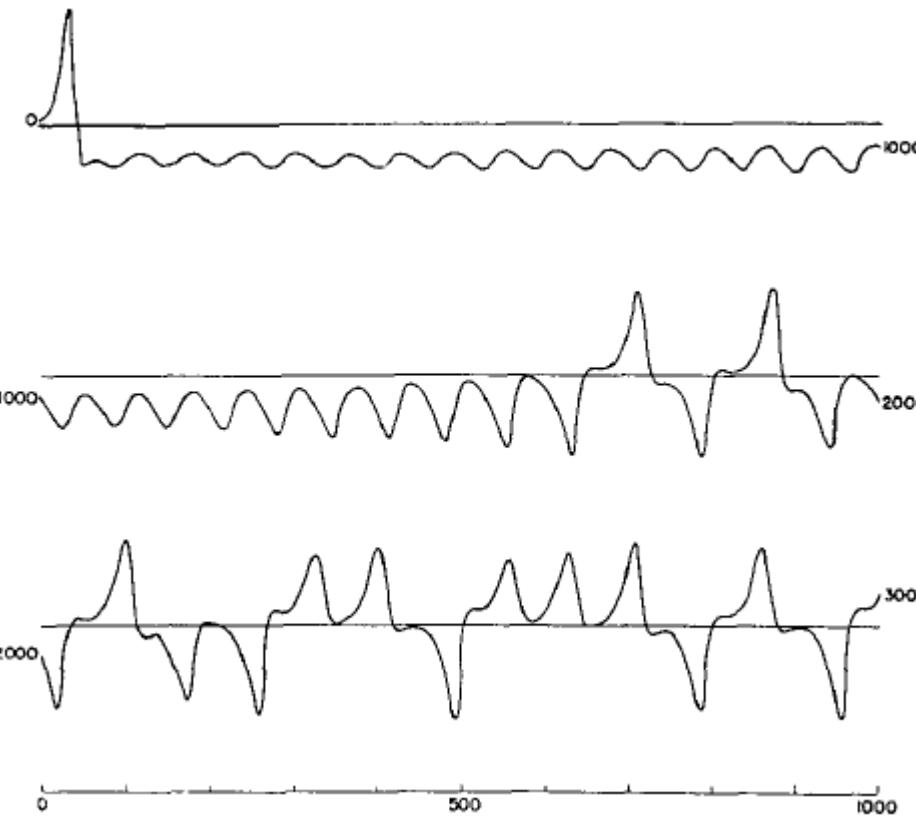


Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

Ele demonstrou que a atmosfera, como **qualquer sistema dinâmico com instabilidades**, tem um **limite de tempo herdado de previsibilidade**.

Com base nas equações convectivas de Saltzman (1962), Lorenz descobriu que **duas soluções completamente diferentes foram previstas pelo mesmo modelo com condições iniciais ligeiramente diferentes.**



Solução numérica da equação de convecção. Gráfico de Y como uma função do tempo:

a)para a primeira solução com primeiras 1000 interações (Curva superior)

b)para a segunda solução com primeiras 1000 interações (Curva do meio)

c)para a terceira solução com primeiras 1000 interações (Curva do abaixo)

(From Lorenz JAS 1963)

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

Lorenz Equations

Stream Function

$$\dot{x} = p(y - x)$$

Prandtl Number

Change in Temperature

$$\dot{y} = -xz - y + rx$$

Rayleigh Number

Deviation in Linear Temperature

$$\dot{z} = xy - bz$$

Nonlinear Terms

O que Lorenz descobriu, que a solução determinística para suas 12 equações era exponencialmente sensível às condições iniciais (conhecidas hoje como SIC).

Deterministic Nonperiodic Flow¹

EDWARD N. LORENZ

Massachusetts Institute of Technology

(Manuscript received 18 November 1962, in revised form 7 January 1963)

ABSTRACT

Finite systems of deterministic ordinary nonlinear differential equations may be designed to represent forced dissipative hydrodynamic flow. Solutions of these equations can be identified with trajectories in phase space. For those systems with bounded solutions, it is found that nonperiodic solutions are ordinarily unstable with respect to small modifications, so that slightly differing initial states can evolve into considerably different states. Systems with bounded solutions are shown to possess bounded numerical solutions.

A simple system representing cellular convection is solved numerically. All of the solutions are found to be unstable, and almost all of them are nonperiodic.

The feasibility of very-long-range weather prediction is examined in the light of these results.

The stability of a solution $X(\tau), Y(\tau), Z(\tau)$ may be formally investigated by considering the behavior of small superposed perturbations $x_0(\tau), y_0(\tau), z_0(\tau)$. Such perturbations are temporarily governed by the linearized equations

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \\ \dot{z}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ (\tau-Z) & -1 & -X \\ Y & X & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Since the coefficients in (29) vary with time, unless the basic state X, Y, Z is a steady-state solution of (25)–(27), a general solution of (29) is not feasible. However, the variation of the volume V_0 of a small region in phase space, as each point in the region is displaced in accordance with (25)–(27), is determined by the diagonal sum of the matrix of coefficients; specifically

$$\dot{V}_0 = -(\sigma+b+1)V_0. \quad (30)$$

This is perhaps most readily seen by visualizing the motion in phase space as the flow of a fluid, whose divergence is

$$\frac{\partial X}{\partial X} + \frac{\partial Y}{\partial Y} + \frac{\partial Z}{\partial Z} = -(\sigma+b+1). \quad (31)$$

Hence each small volume shrinks to zero as $\tau \rightarrow \infty$, at a rate independent of X, Y , and Z . This does not imply that each small volume shrinks to a point; it may simply become flattened into a surface. It follows that the volume of the region initially enclosed by the surface S shrinks to zero at this same rate, so that all trajectories ultimately become confined to a specific subspace having zero volume. This subspace contains all those trajectories which lie entirely within R , and so contains all central trajectories.

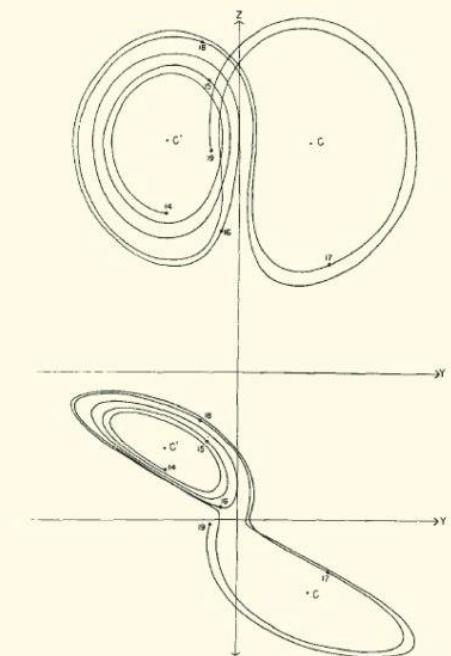


FIG. 2. Numerical solution of the convection equations. Projections on the X - Y -plane and the Y - Z -plane in phase space of the segment of the trajectory extending from iteration 1400 to iteration 1900. Numerals "14," "15," etc., denote positions at iterations 1400, 1500, etc. States of steady convection are denoted by C and C' .

Previsão Numérica de Tempo e Clima

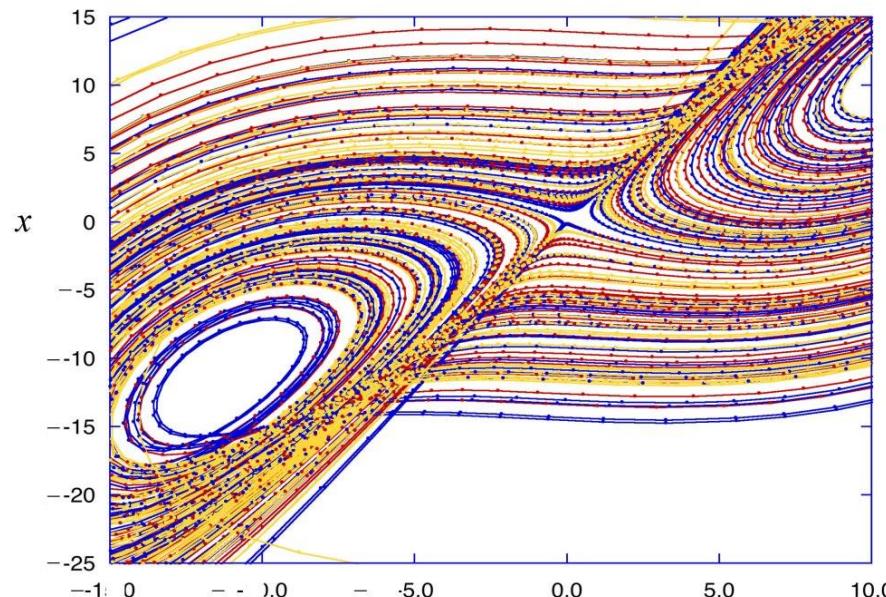
Problema de previsibilidade

Lorenz Equations

$$\begin{aligned}\dot{x} &= p(y - x) && \text{Prandtl Number} \\ \dot{y} &= -xz - y + rx && \text{Rayleigh Number} \\ \dot{z} &= xy - bz && \text{Nonlinear Terms}\end{aligned}$$

Stream Function
Change in Temperature
Deviation in Linear Temperature

Solução Numérica para a equação de convecção. Projeções no plano X-Y. No seguimento do espaço de fase da trajetória estendendo da interação 1400 para a interação de 1900. Numeral 14 e 15 etc. definem a posição na interação 1400, 1500 etc. O estado da convecção estável são definidos como C e C'

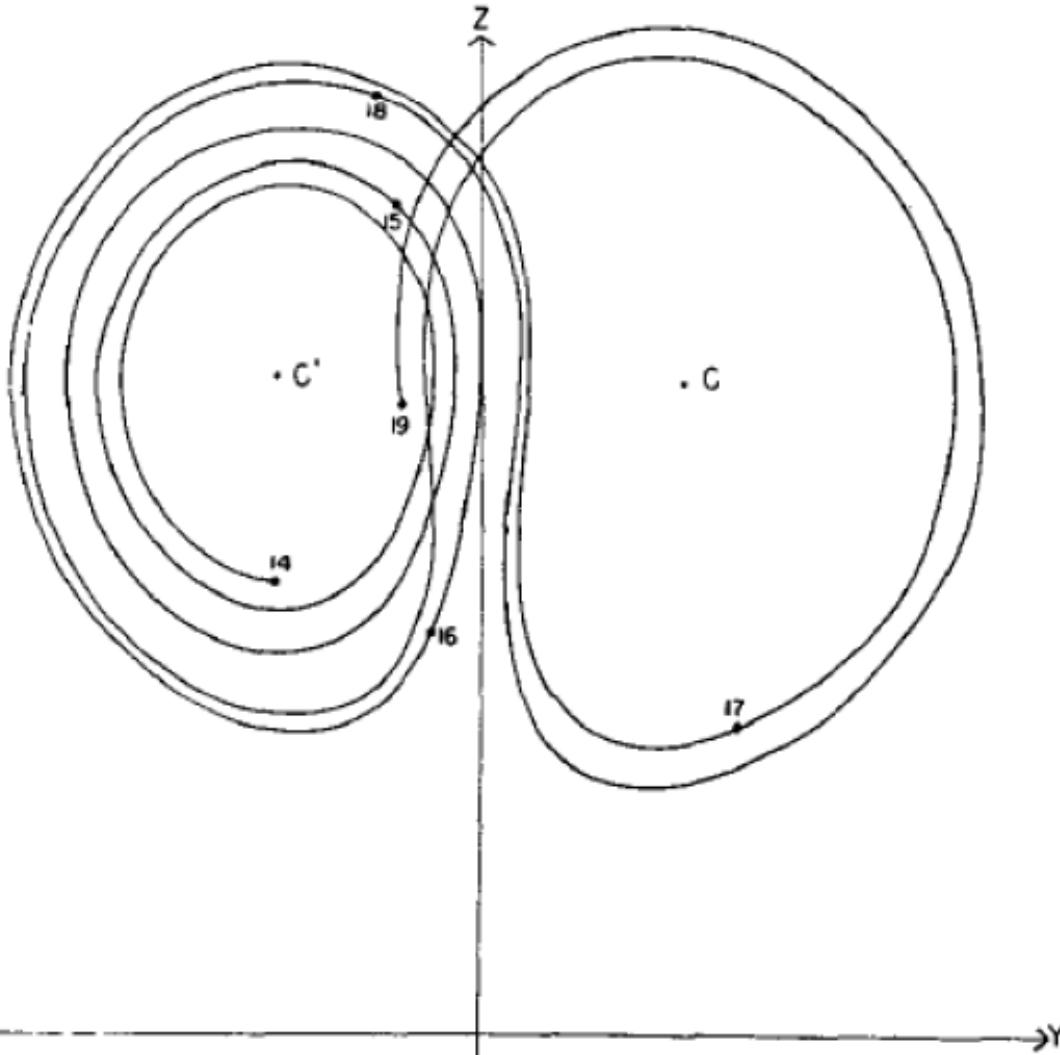


A razão pela qual é chamado de atrator estranho é **porque todas as condições iniciais relaxam no atrator estranho**, mas **cada trajetória no atrator estranho se separa exponencialmente das trajetórias vizinhas**, exibindo a clássica propriedade SIC (sensibilidade às condições iniciais) do caos.

Portanto, na figura está uma coleção elegante de trajetórias que certamente não são apenas ruídos aleatórios, mas ainda é impossível uma previsão detalhada. O caos determinístico tem estrutura significativa e gera belos padrões, sem “aleatoriedade” real.

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade



Solução Numérica para a equação de convecção. Projeções no plano Y-Z. No seguimento do espaço de fase da trajetória estendendo da interação 1400 para a interação de 1900. Numeral 14 e 15 etc. definem a posição na interação 1400, 1500 etc. O estado da convecção estável são definidos como C e C'

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

Mais tarde, ele descobriu que os erros de diferentes escalas espaciais crescem em taxas diferentes (Lorenz 1969a). Em média, o crescimento de erro mais rápido ocorre em pequenas escalas.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad - \text{ or } - \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} \right) = 0$$



O problema das diferenças finitas está na multiplicação.*

instabilidade não linear

Seja $u(x) = \sin(kx)$; então

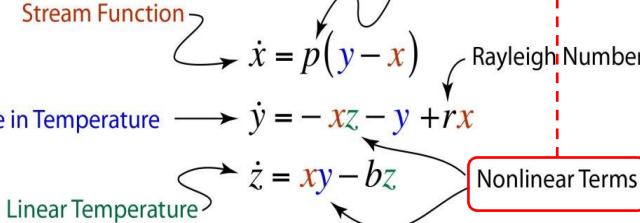
$$u = \sin kx \Rightarrow \frac{\partial u^2}{\partial x} = k \sin^2 kx$$

Que número de onda efetivo k que estamos trabalhando agora?

Lorenz Equations

$$\begin{aligned} \text{Stream Function} \quad & \dot{x} = p(y - x) \\ \text{Change in Temperature} \quad & \dot{y} = -xz - y + rx \\ \text{Deviation in Linear Temperature} \quad & \dot{z} = xy - bz \end{aligned}$$

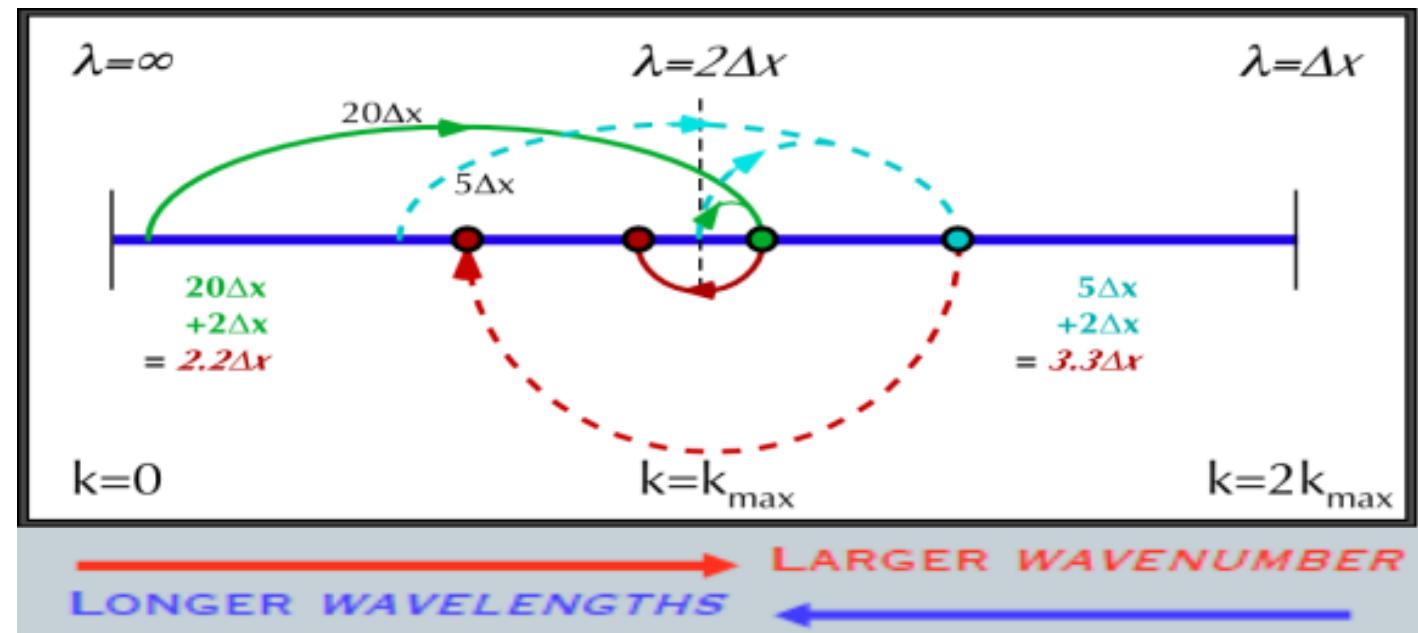
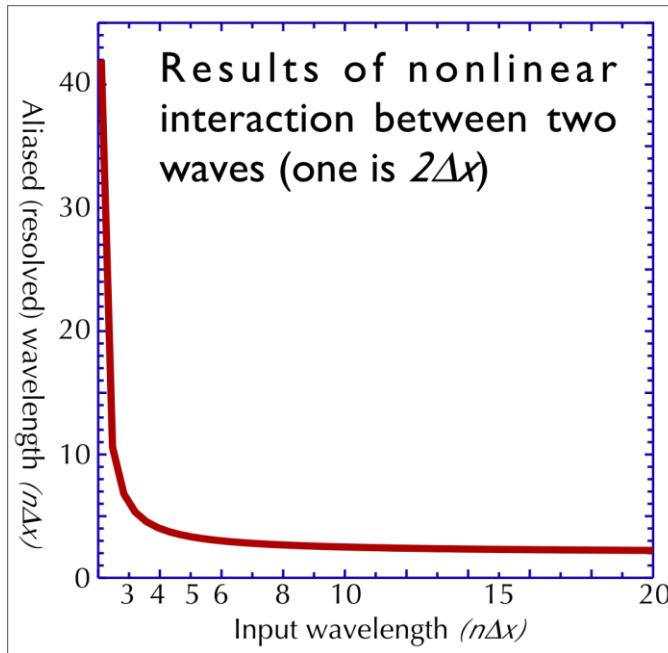
Nonlinear Terms



Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

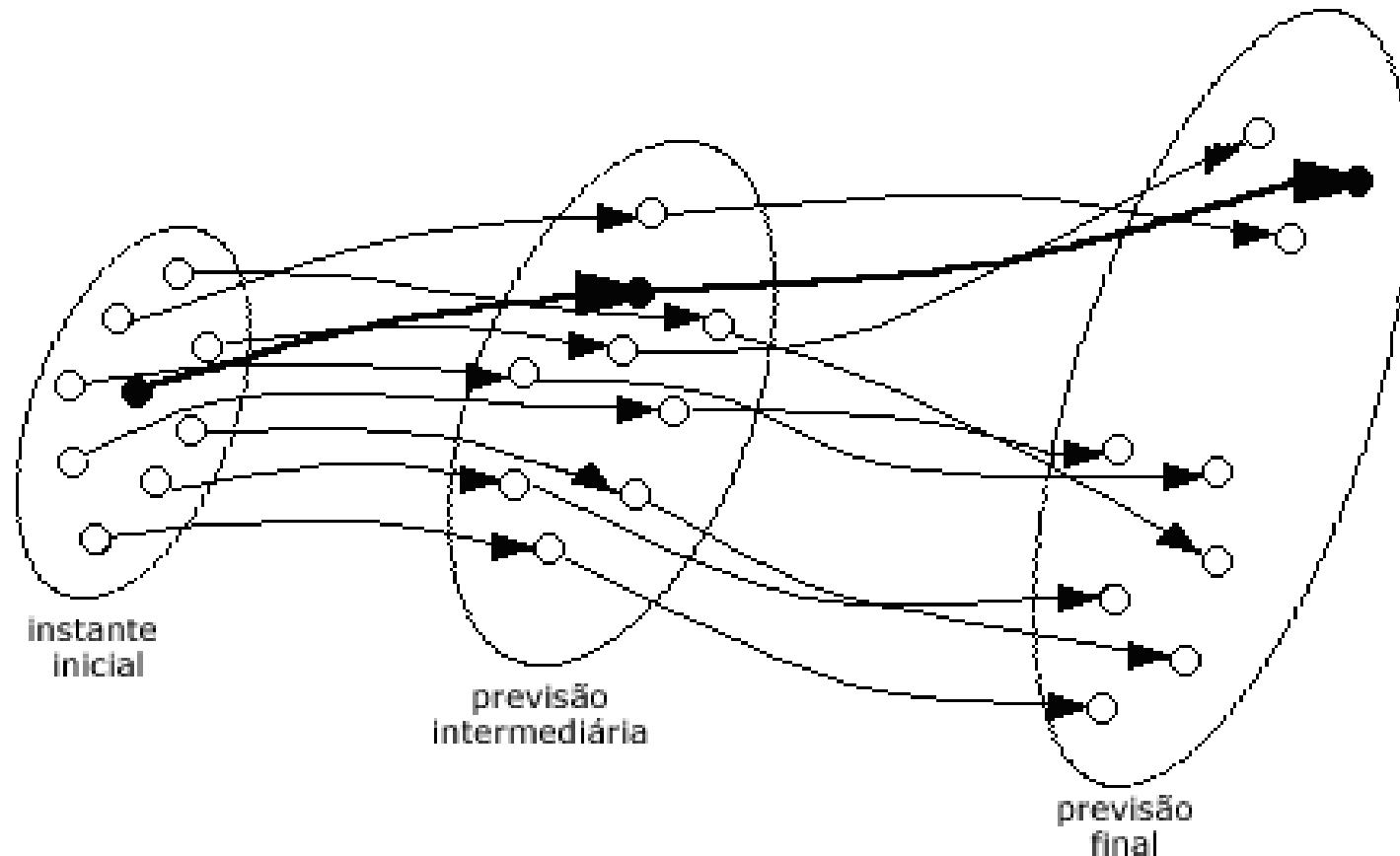
Mais tarde, ele descobriu que os erros de diferentes escalas espaciais crescem em taxas diferentes (Lorenz 1969a). Em média, o crescimento de erro mais rápido ocorre em pequenas escalas.



Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

Em um experimento inicial de previsibilidade com um modelo de circulação geral, Charney et al. (1966) descobriram que o tempo de duplicação da raiz quadrada erro médio (rms) da temperatura é de cerca de 5 dias.



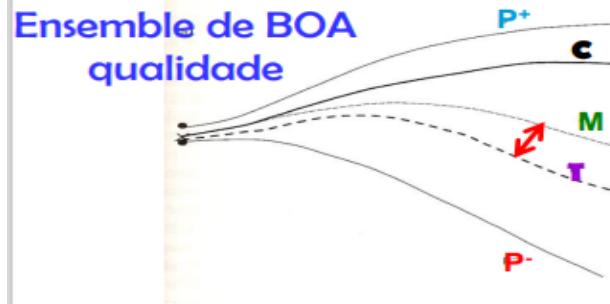
Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

A duplicação da raiz quadrada erro médio (rms). Isso leva a uma estimativa de 3 semanas como o limite final para a previsibilidade atmosférica e encorajou o planejamento e a execução do Programa Global de Pesquisa Atmosférica (GARP) e do Primeiro Experimento Global GARP (FGGE) (Anthes 1986).

Métodos:

- 1 - Diferentes perturbações nas condições iniciais;
 - 2 - Diferentes perturbações em parâmetros do modelo;
 - 3 - Multi-model ensemble;
 - 4 - Diferentes condições de contorno lateral (RCMs)
- O conjunto de integrações fornece um conjunto de cenários possíveis da previsão.
 - A média do **conjunto** de simulações tende a ser **melhor** que uma previsão individual.

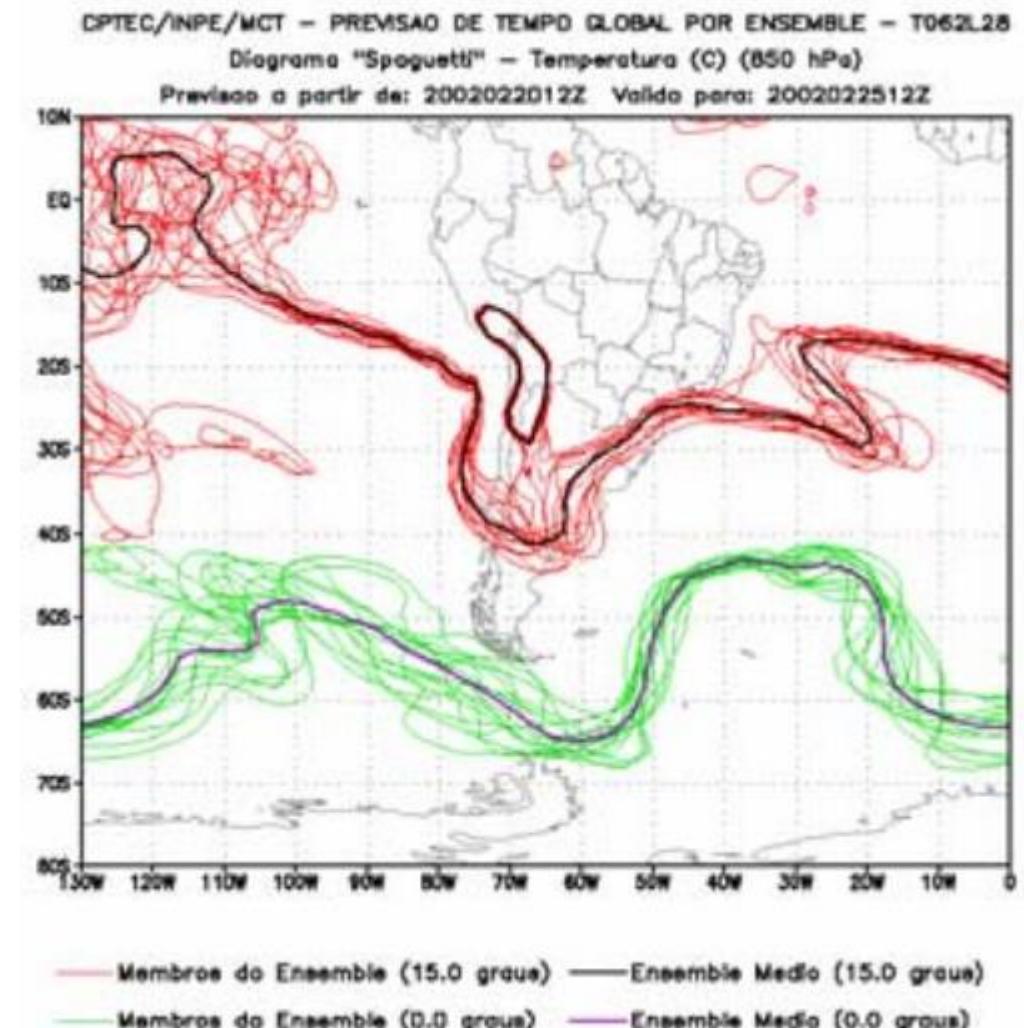
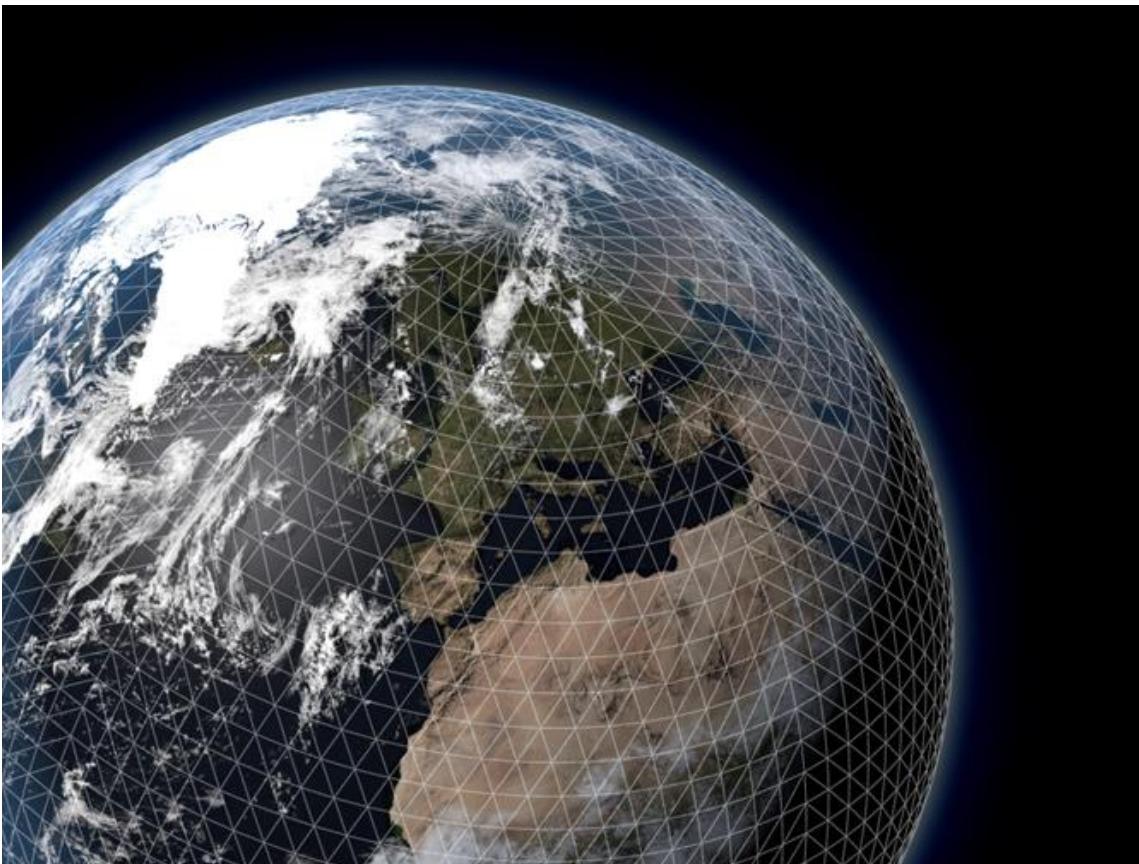


P⁺ - pert. positiva
P⁻ - pert. negativa
C - previsão controle
M - ensemble médio
T - estado real da atmosfera

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

Lorenz (1969a) **calculou que o limite médio para a previsibilidade atmosférica em escalas planetárias é da ordem de 10 dias.**



Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

Usando o modelo operacional do European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF), Lorenz (1984) estimou limites superiores e inferiores para a previsibilidade de 500 mb de altura.

Correlação de anomalias do dados observado e do dado modelado

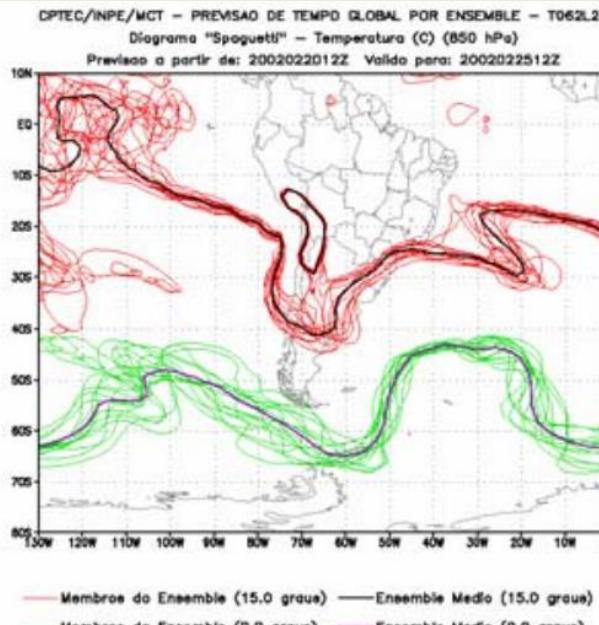


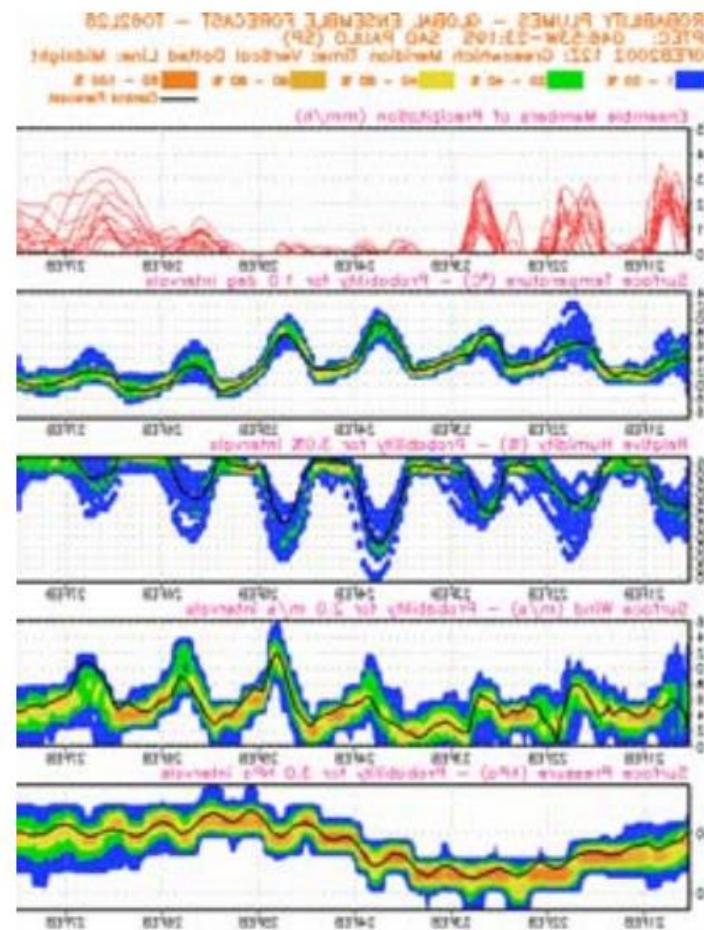
Figura 12.8: Previsibilidade climática para a América do Sul.

Estudos de previsibilidade de movimentos em grande escala indicam que a previsibilidade varia com a escala horizontal, as estações, a latitude e o padrão sinótico.

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

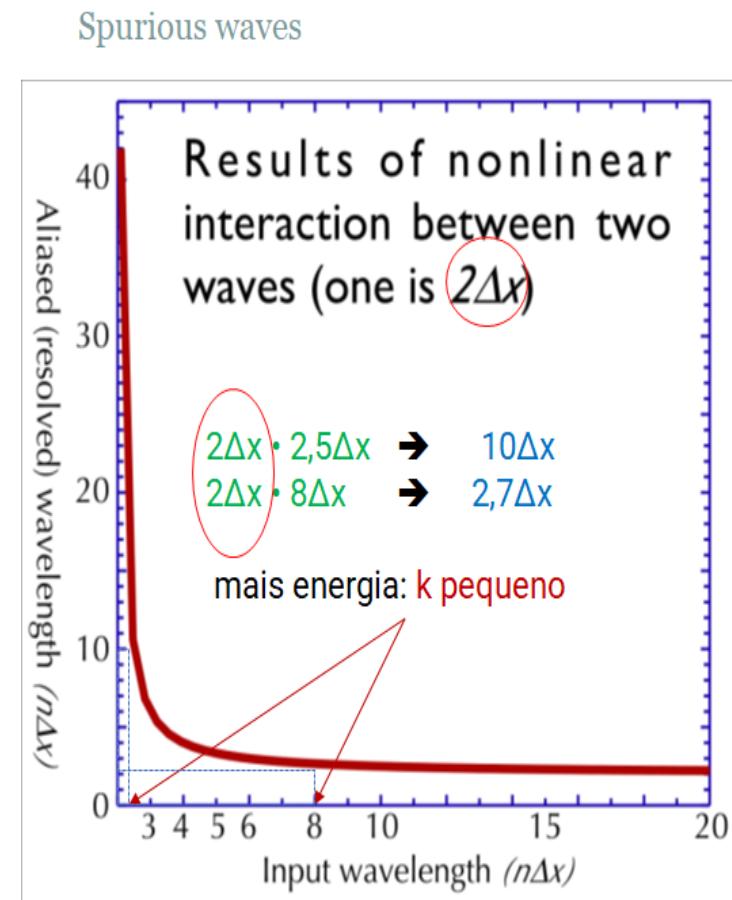
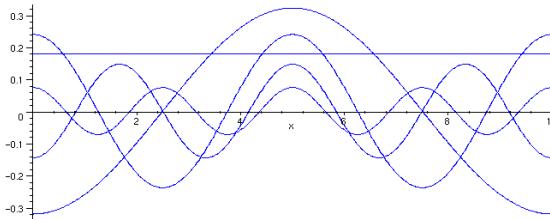
Em média, as diferenças nas condições iniciais dos modelos numéricos globais de previsão do tempo aumentam em cerca de 2 a 5 dias o limite de previsibilidade, levando a estimativas dos limites da previsibilidade atmosférica de cerca de 2 semanas.



Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

Esse crescimento de diferenças ou erros iniciais é consequência da transferência não linear de energia entre diferentes escalas de movimento e da presença de instabilidades atmosféricas.

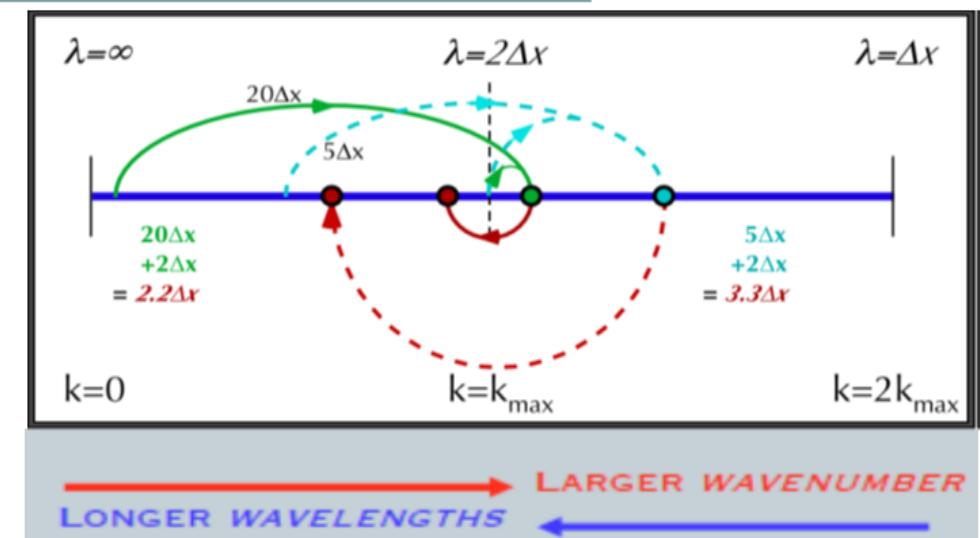


Input wave	Input k / kmax	+ 2 Δx = k / kmax	aliased k / kmax	= final N Δx
2.1 Δx	0.95	1.95	0.05	42 Δx
5.0 Δx	0.40	1.40	0.60	3.3 Δx
10 Δx	0.20	1.20	0.80	2.5 Δx
20 Δx	0.10	1.10	0.90	2.2 Δx

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \text{or} \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + u(x, t) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = 0$$

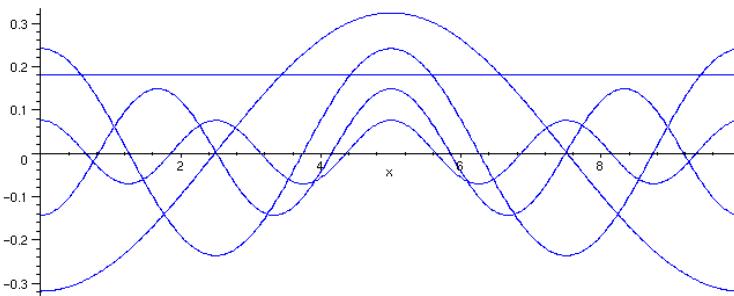
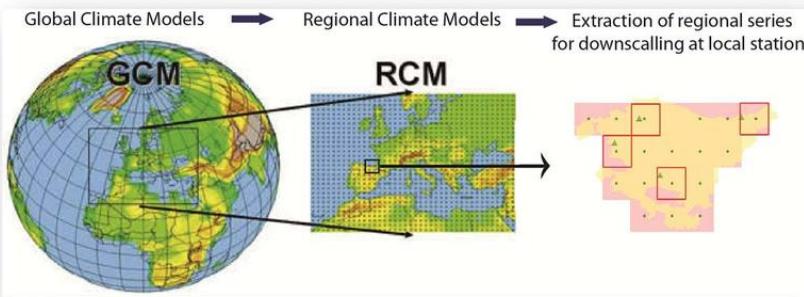
$$u(x, t) = \sin(kx - vt)$$



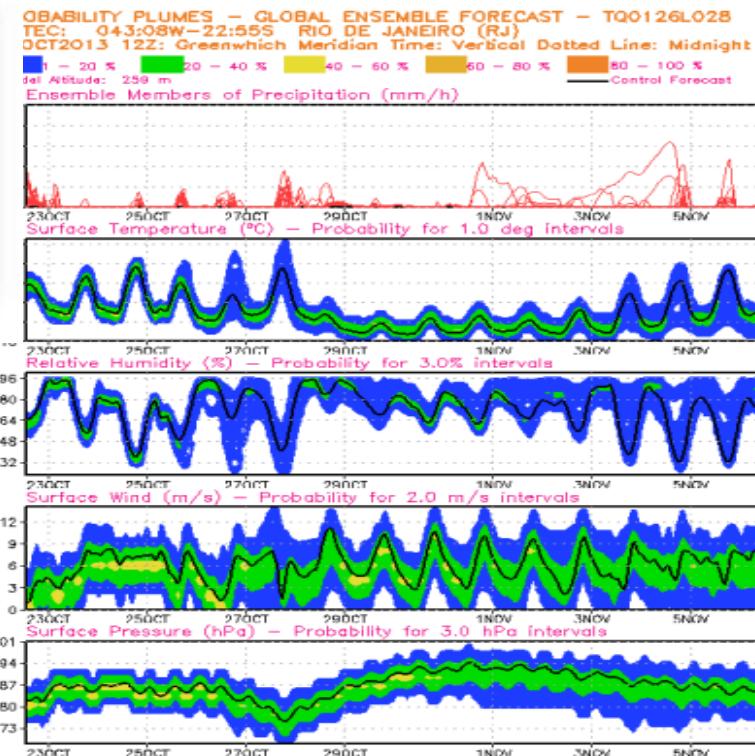
Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

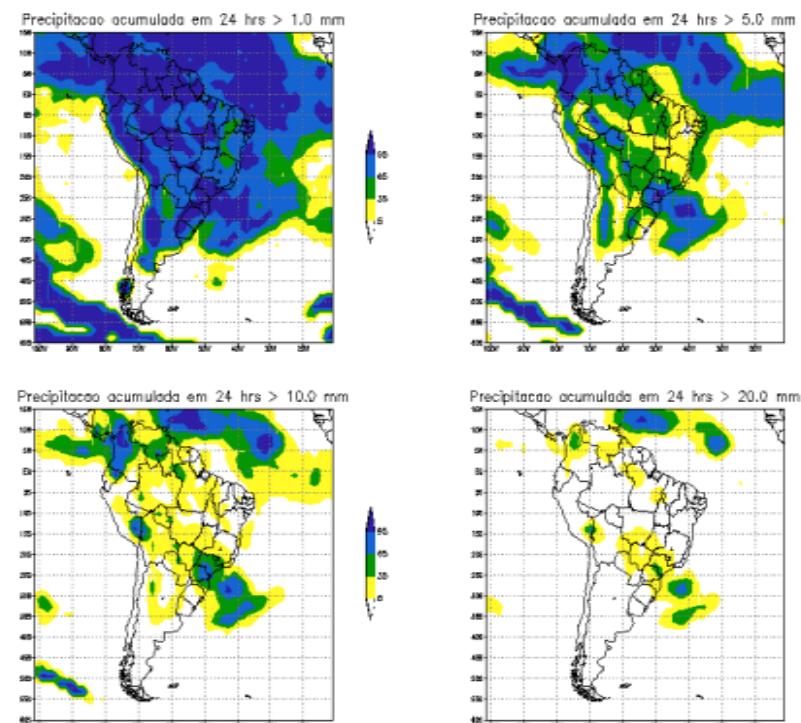
Um estudo de previsibilidade de mesoescala de Anthes (1986) indicou que, pelo menos em alguns casos, **pequenos erros ou diferenças nas condições iniciais não crescem muito ao longo de um período de 72 horas quando as condições de contorno lateral de grande escala são fornecidas**.



15 membros gerados a partir de perturbação na condição inicial



CPTEC/INPE/MCT – PREVISÃO DE TEMPO GLOBAL POR ENSEMBLE – T062L28
Previsão de Probabilidades (%) – A partir de: 2001121312Z Valido para: 2001121412Z



Previsão Numérica de Tempo e Clima

Problema de previsibilidade

1. Eses resultados podem implicar que melhores previsões meteorológicas em **escala meso- α** ou **escala regional** são possíveis no período de 72 horas

2. Mas deve levar em consideração os seguintes fatores:
 - a. As **condições de grande escala** sejam bem previstas e que
 - b. As **forças de superfície** e as **parametrizações físicas realistas** sejam incluídas nos **modelos de alta resolução**.

Esforços consideráveis são necessários para verificar esses resultados em estudos futuros, especialmente considerando que a resolução do modelo numérico de previsão do tempo está ficando cada vez menor, e os dados das mesonetworks locais foram integrados em uma estrutura de grade de resolução muito alta (por exemplo, Sistema de Previsão e Análise de Área Local - LAPS, consulte Albers et al. 1996)

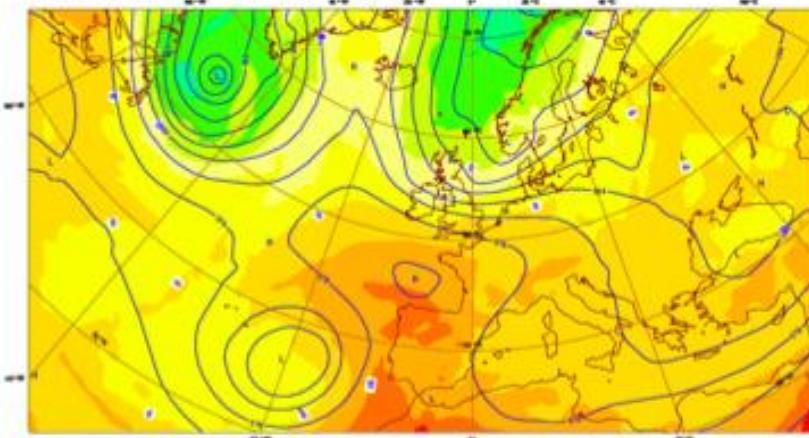
Previsão Numérica de Tempo e Clima

- **Limitações intrínsecas da previsibilidade**

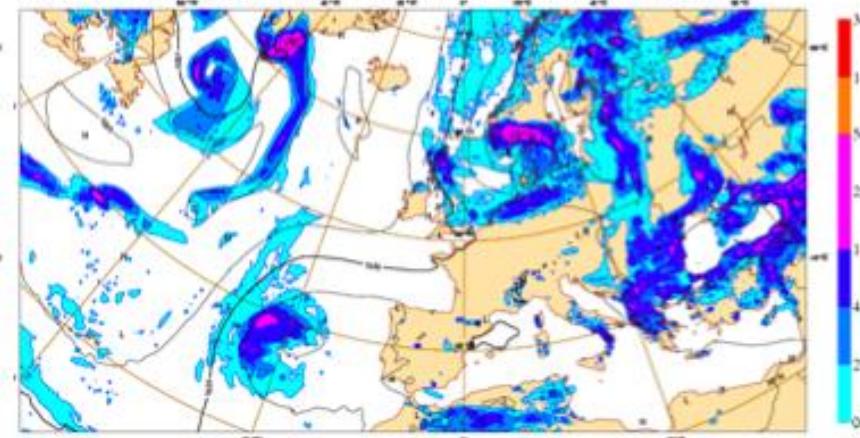
Previsão Numérica de Tempo e Clima

Previsão determinística

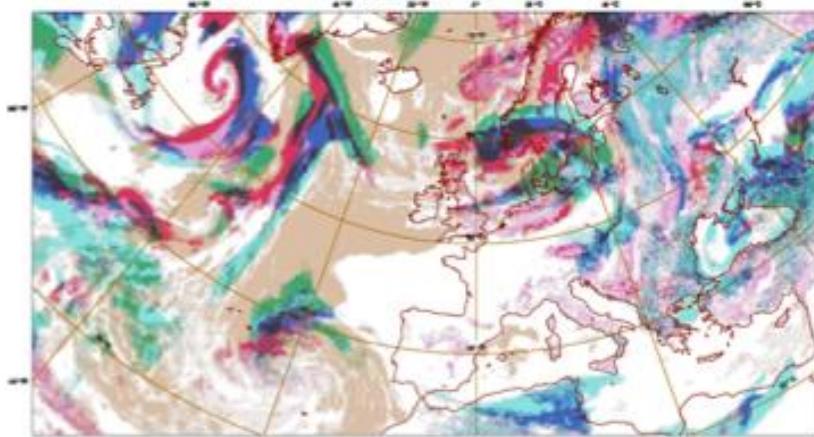
Tuesday 18 May 2010 00UTC ©ECMWF Forecast t+132 VT: Sunday 23 May 2010 12UTC
850 hPa Temperature / 500 hPa Geopotential



Tuesday 18 May 2010 00UTC ©ECMWF Forecast t+132 VT: Sunday 23 May 2010 12UTC
Surface: Mean sea level pressure / 12hr Accumulated precipitation (VT-6h/VT+6h)



Tuesday 18 May 2010 00UTC ©ECMWF Forecast t+132 VT: Sunday 23 May 2010 12UTC
Low, L+M, Medium, M+H, High, H+L, H+M+L clouds



**Sujeito a erros
Na Condição inicial, contorno,
Erros numéricos, parametrizações
físicas, etc**

(132 h forecast, ECMWF)

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Validação

Método de avaliação básico

RMSE (root mean squared error)

$$RMSE_{fc} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\phi_{fc} - \phi_{obs})^2}$$

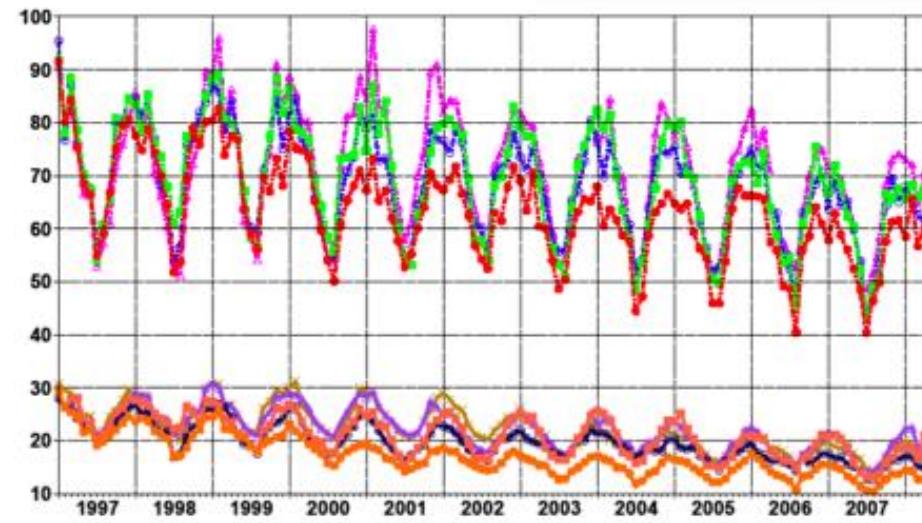
ϕ_{fc}
 ϕ_{obs}

$$SS = \left(1 - \frac{RMSE_{fc}}{RMSE_{per}} \right)$$

Previsão Numérica de Tempo e Clima

15

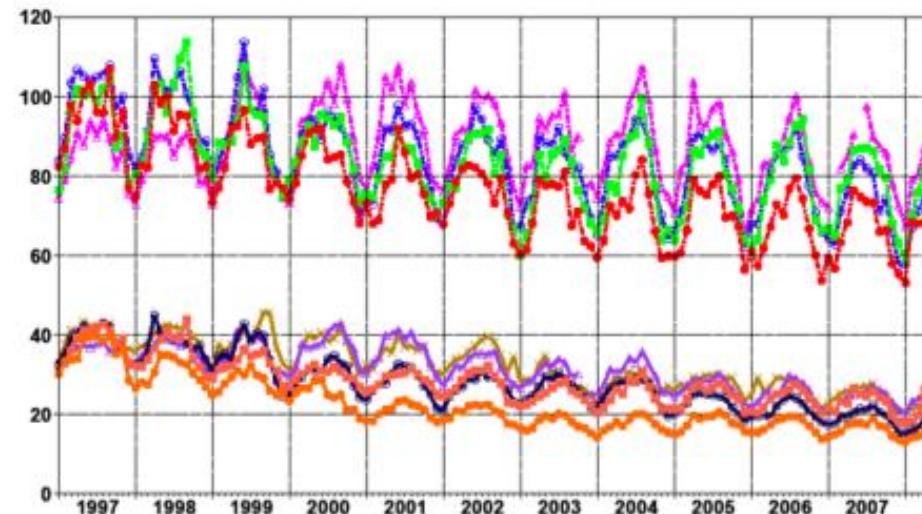
144 hr



48 hr

144 hr

48 hr



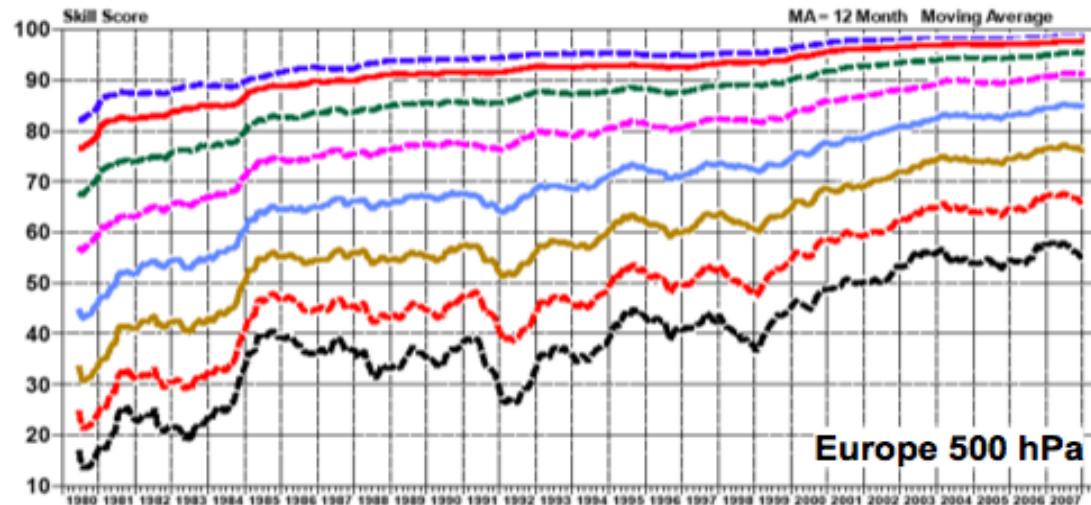
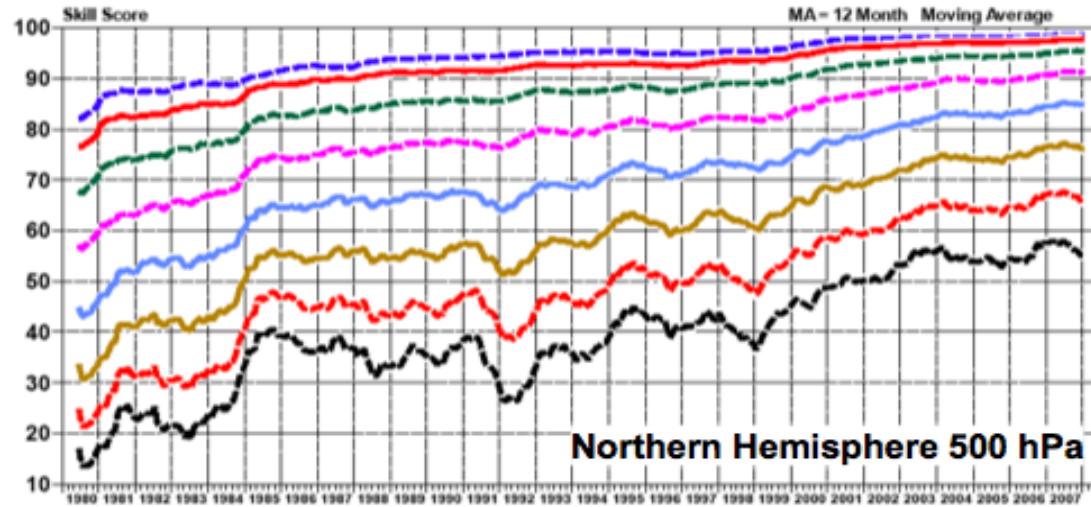
Inclusão de dados de satélites
na assimilação de dados

(ECMWF 2008, TM578)

Anos

Previsão Numérica de Tempo e Clima

16



Anos

Skill Scores 1980-2008

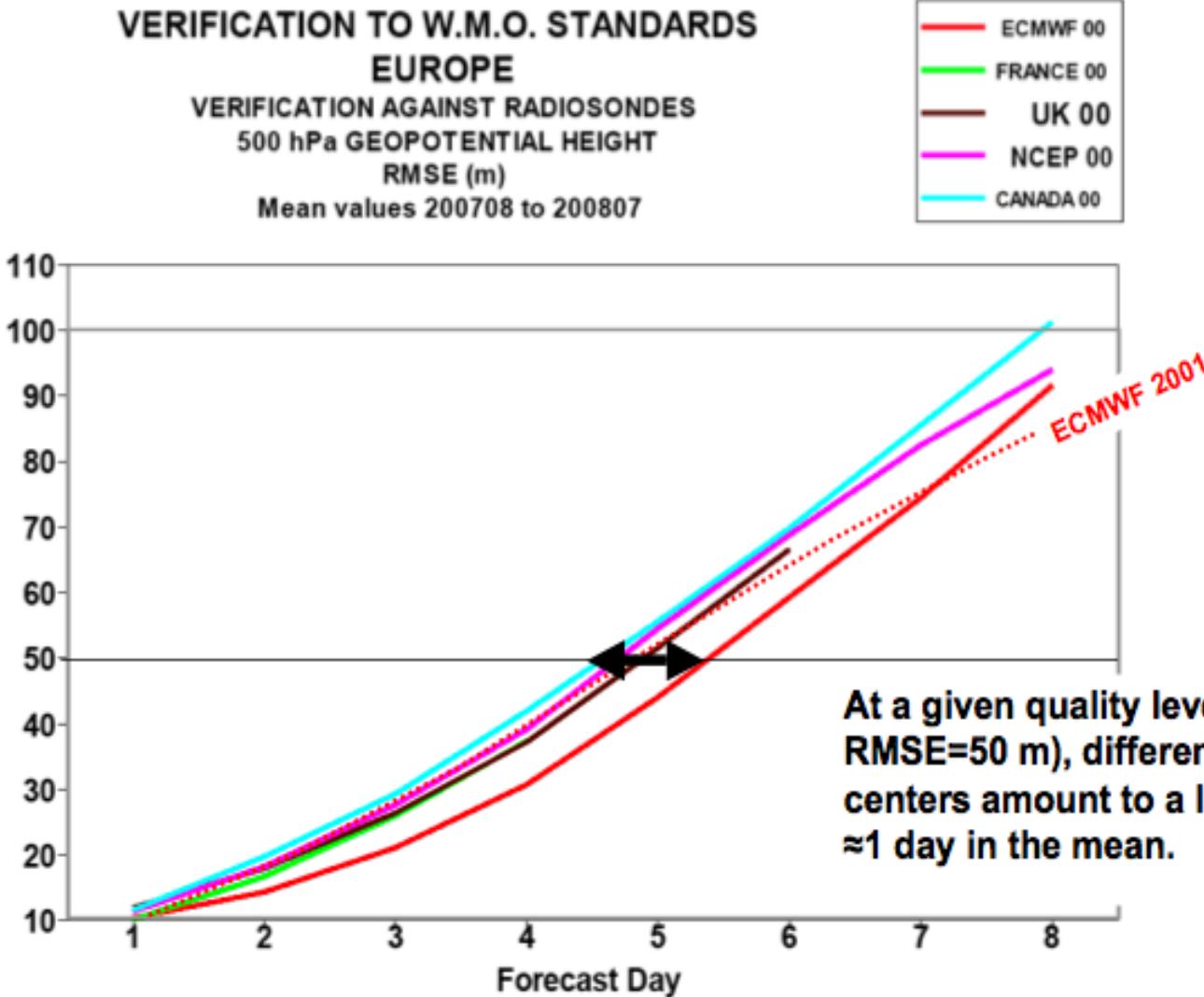
- T+ 24 MA
- T+ 48 MA
- - T+ 72 MA
- - T+ 96 MA
- T+120 MA
- T+144 MA
- - T+168 MA
- T+192 MA

Inclusão de dados de satélites na assimilação de dados

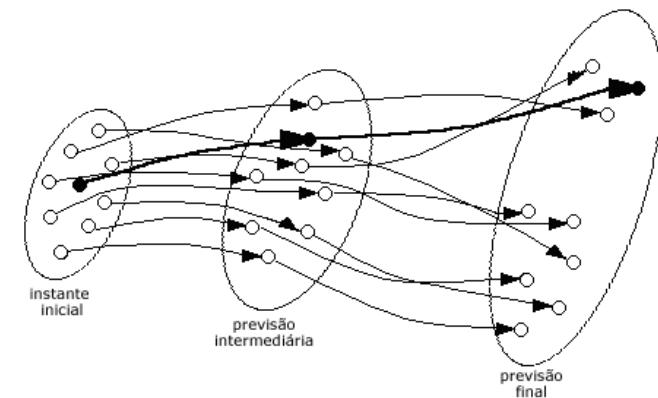
A melhora do Skill Scores vem da melhoria do modelo e das condições iniciais

(ECMWF 2008, TM578)

Previsão Numérica de Tempo e Clima

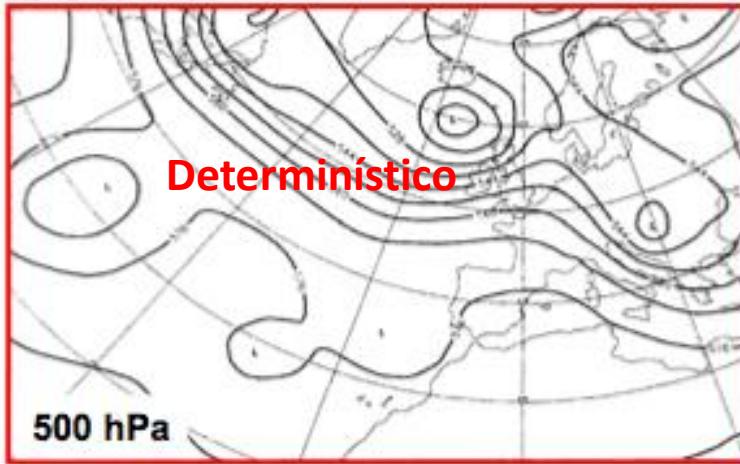


Diferentes modelos resulta em diferentes previsões



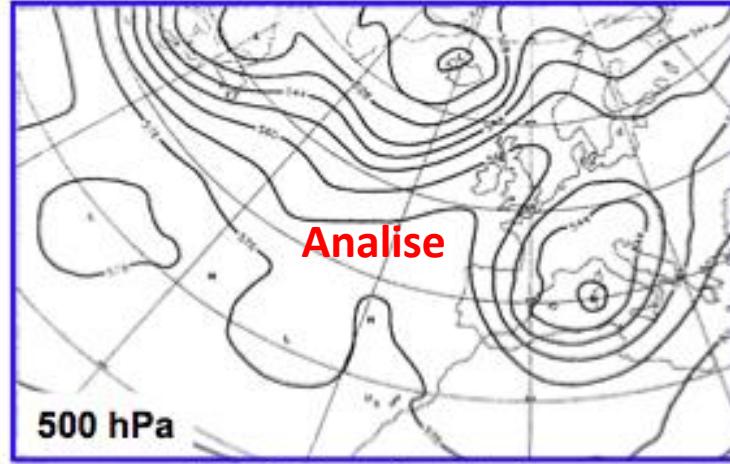
Previsão Numérica de Tempo e Clima

Wednesday 6 April 1994 12z ECMWF Forecast t+120 VT: Monday 11 April 1994 12z
500 hPa HEIGHT OPER



Operational 120 h forecast

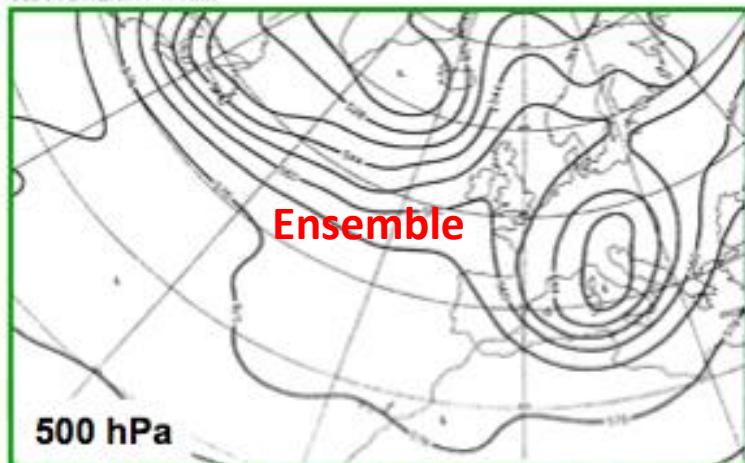
ECMWF Analysis VT: Monday 11 April 1994 12z
500 hPa HEIGHT OPER



Verifying Analysis

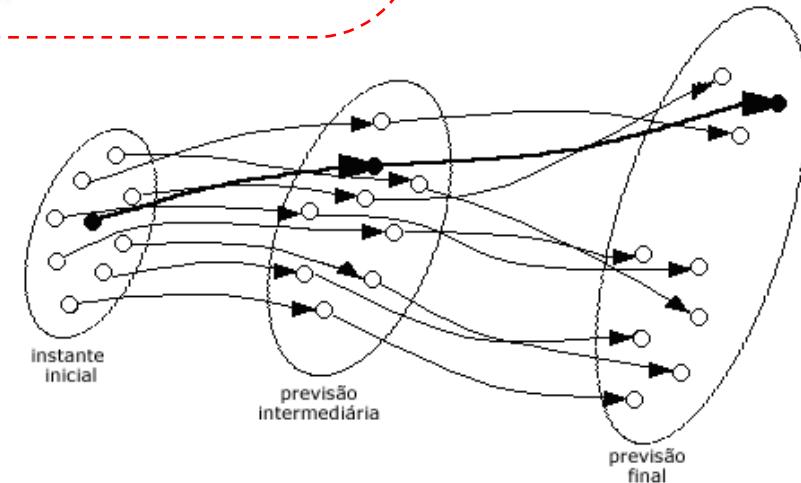
500 hPa

Wednesday 6 April 1994 12z ECMWF Forecast t+120 VT: Monday 11 April 1994 12z
500 hPa HEIGHT MVMK



500 hPa

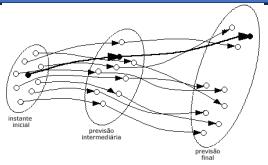
Forecast from slightly different initial conditions



(ECMWF 1994)

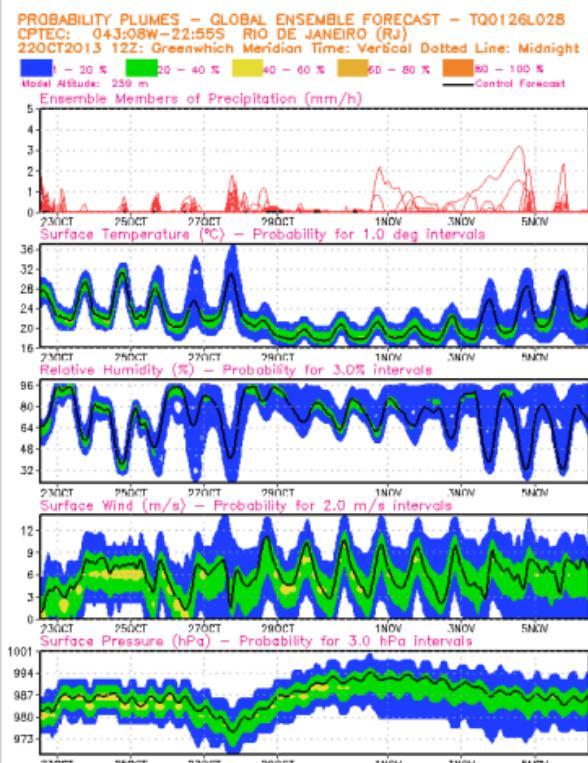
Previsão Numérica de Tempo e Clima

Previsão do Conjunto (Ensemble Forecast)

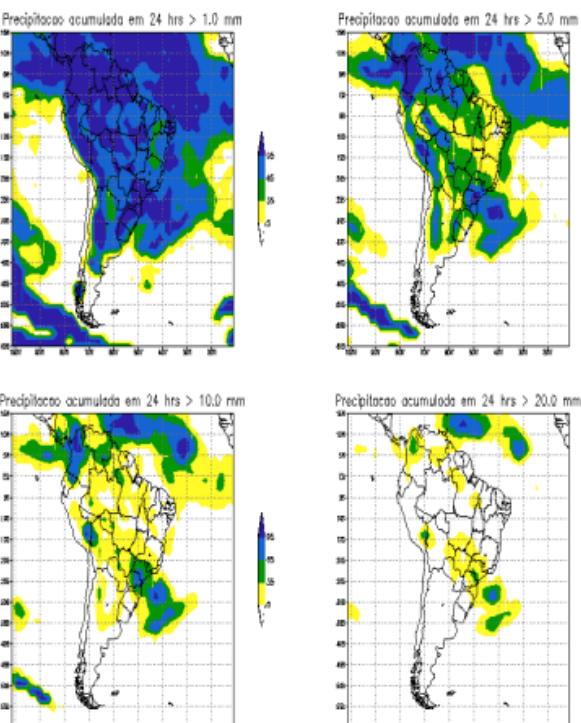


Uma previsão de conjunto é uma coleção de duas ou mais previsões que se verificam ao mesmo tempo, que partem de diferentes condições iniciais e/ou são baseadas em diferentes procedimentos de previsão (parametrizações físicas).

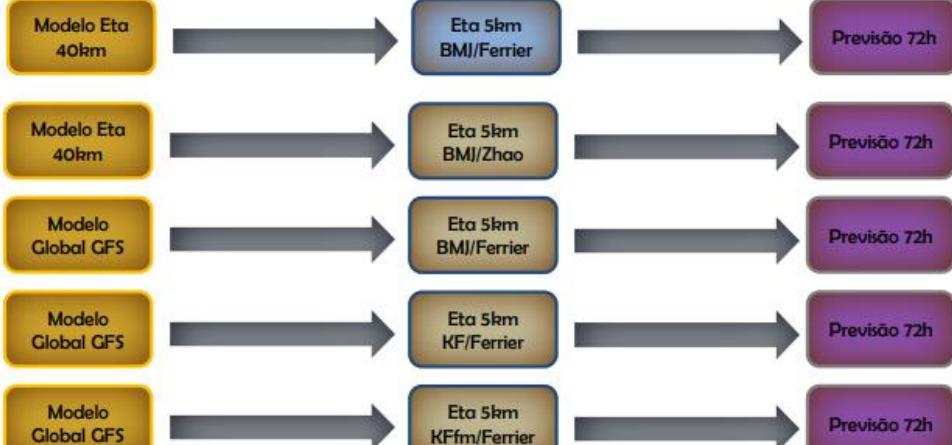
15 membros gerados a partir de perturbação na condição inicial



CPTEC/INPE/MCT – PREVISÃO DE TEMPO GLOBAL POR ENSEMBLE – T062L28
Previsão de Probabilidades (%) – A partir de: 200121312Z Valido para: 200121412Z



Condição Inicial e de contorno lateral para rodar o modelo Eta



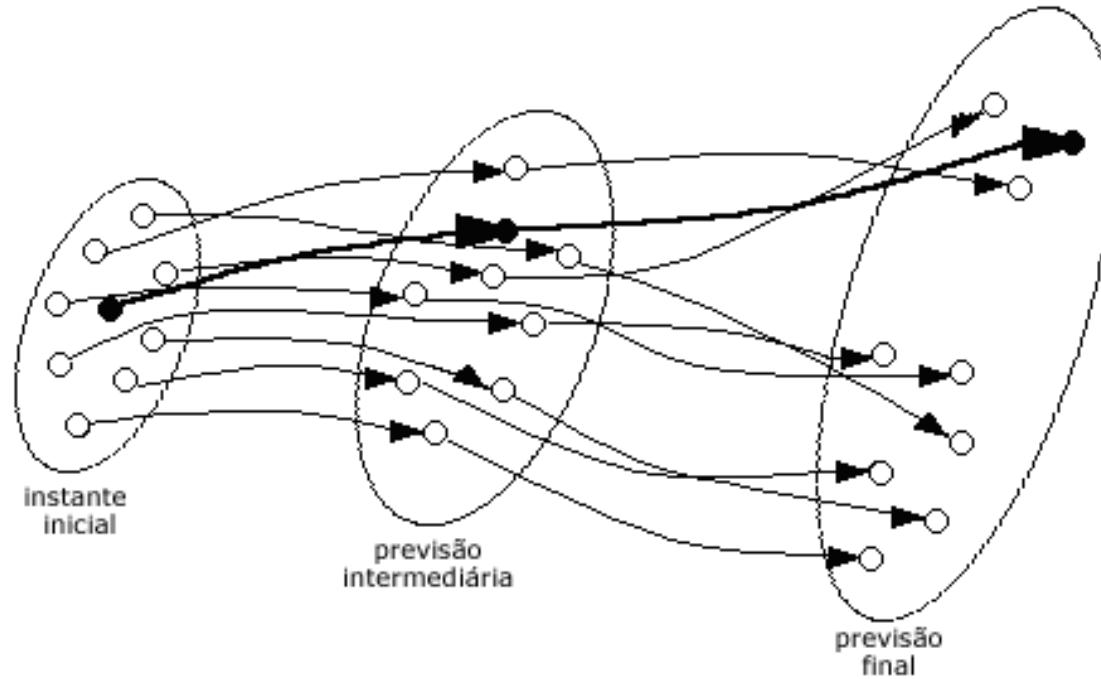
Previsão por Conjunto
Modelo Eta 5km 50 níveis

Operacional no CPTEC:
Modelo Eta: resolução 5 km / 50 níveis
2 vezes ao dia (00 e 12 UTC)
Prazo de integração 72 horas
5 membros

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Previsão do Conjunto (Ensemble Forecast)

Todas as várias previsões representam possibilidades, dadas as incertezas associadas à previsão.



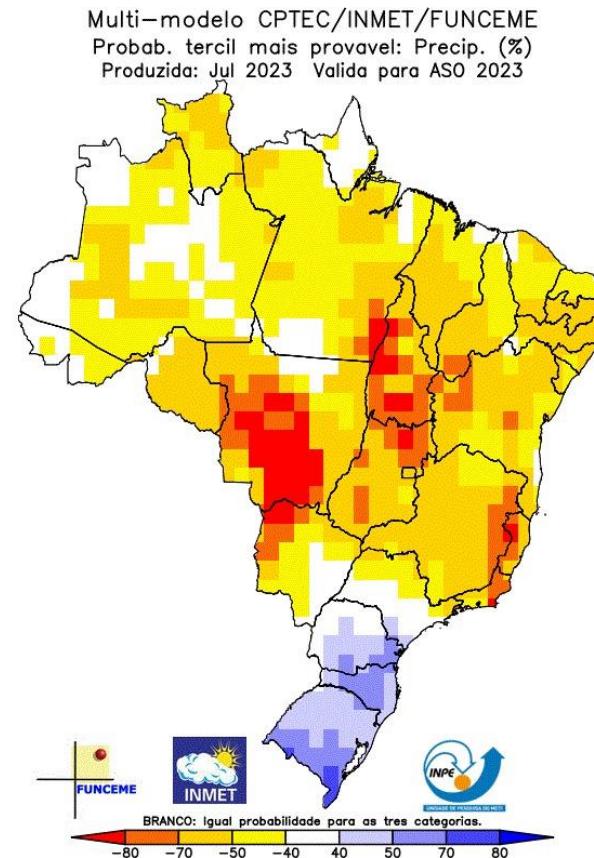
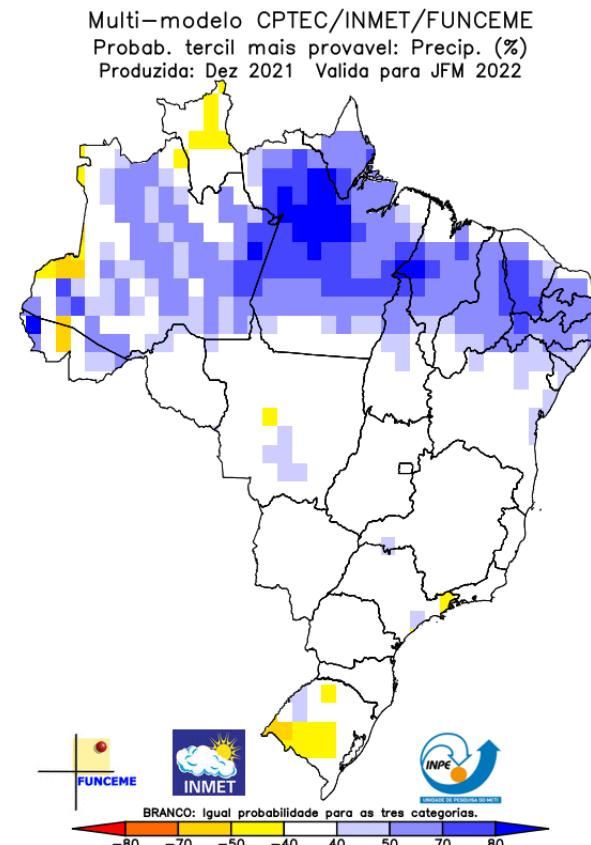
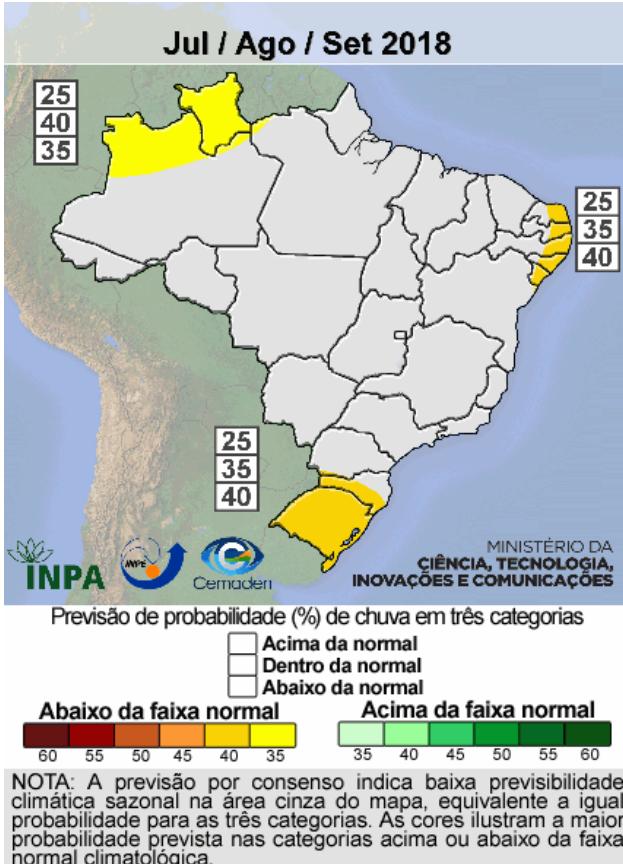
A partir dessas possibilidades, pode-se estimar probabilidades de vários eventos, bem como uma previsão média ou de consenso.

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Previsão do Conjunto (Ensemble Forecast)

A partir dessas possibilidades, pode-se estimar probabilidades de vários eventos, bem como uma previsão média ou de consenso.

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - INPE



Previsão Numérica de Tempo e Clima

Previsão do Conjunto (Ensemble Forecast)

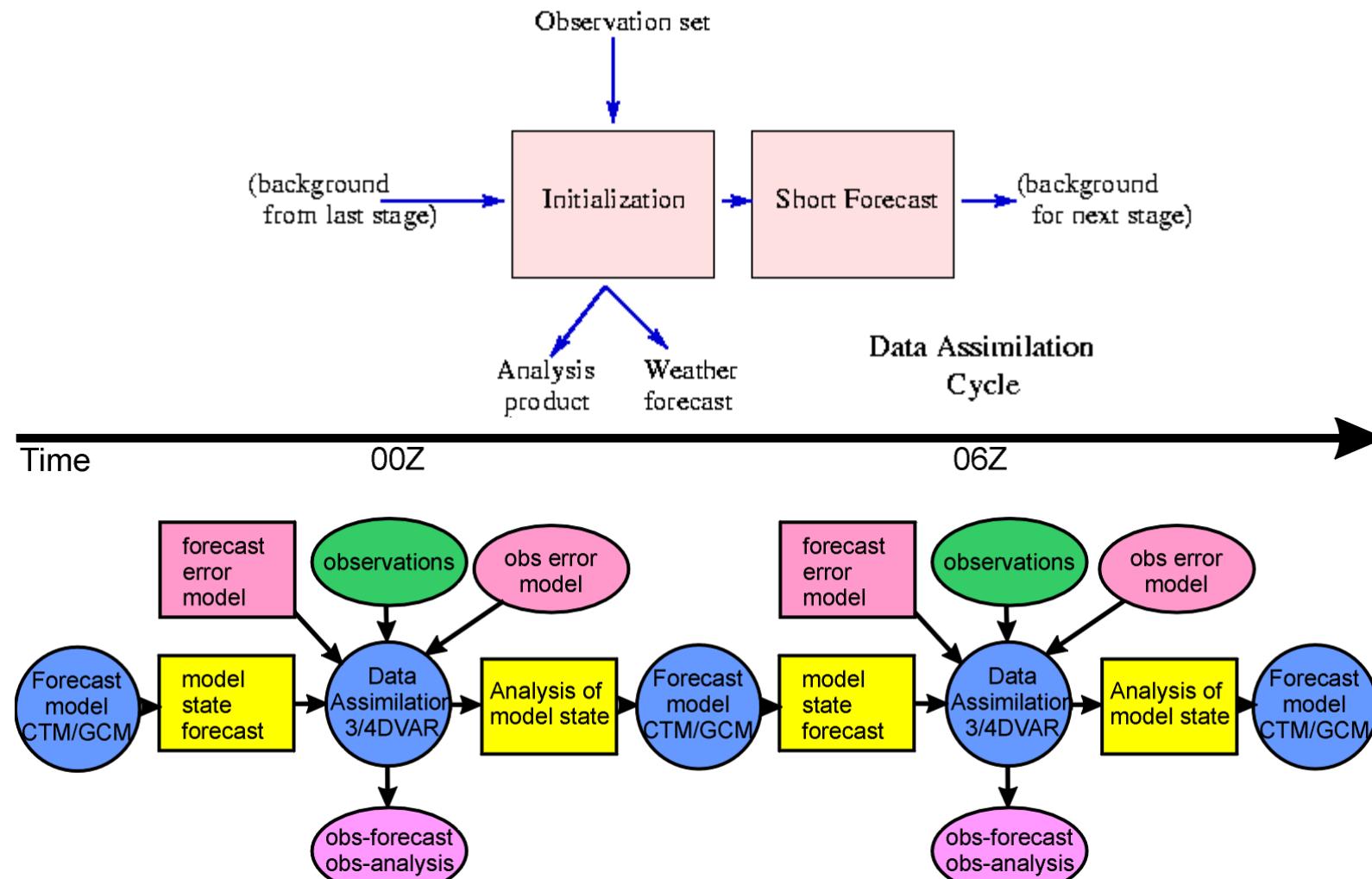
Um conjunto de previsões pode ser usado para (Sivillo et al. 1997):

- (a) Composto em uma única previsão por meio de uma média ponderada,**
- (b) Sugira possibilidades cujas probabilidades podem ser estimadas (por exemplo, probabilidade de precipitação (PoP); como fazer PoP?),**
- (c) Estimar a confiabilidade da previsão composta, e**
- (d) Sugerir onde observações especiais adicionais podem ser direcionadas para melhorar a precisão da previsão.**

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Previsão do Conjunto (Ensemble Forecast)

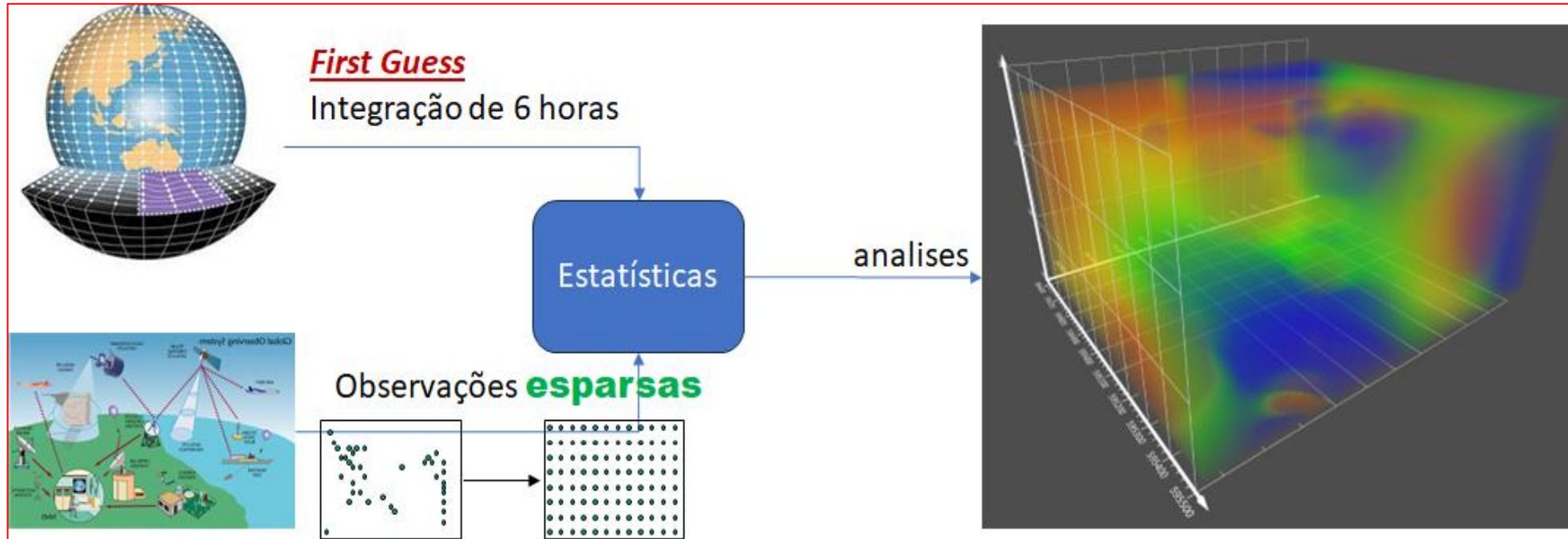
A previsão de conjunto atual no **NCEP** e no **ECMWF** é focada nas **consequências dos erros de valor inicial**.



Previsão Numérica de Tempo e Clima

Previsão do Conjunto (Ensemble Forecast)

Ambos os centros estão gerando um **conjunto de previsões iniciando um modelo de previsão a partir de uma variedade de condições iniciais (diferentes dados analyses).**



Previsão Numérica de Tempo e Clima

Perturbações na condição inicial das variáveis prognósticas média na célula da malha

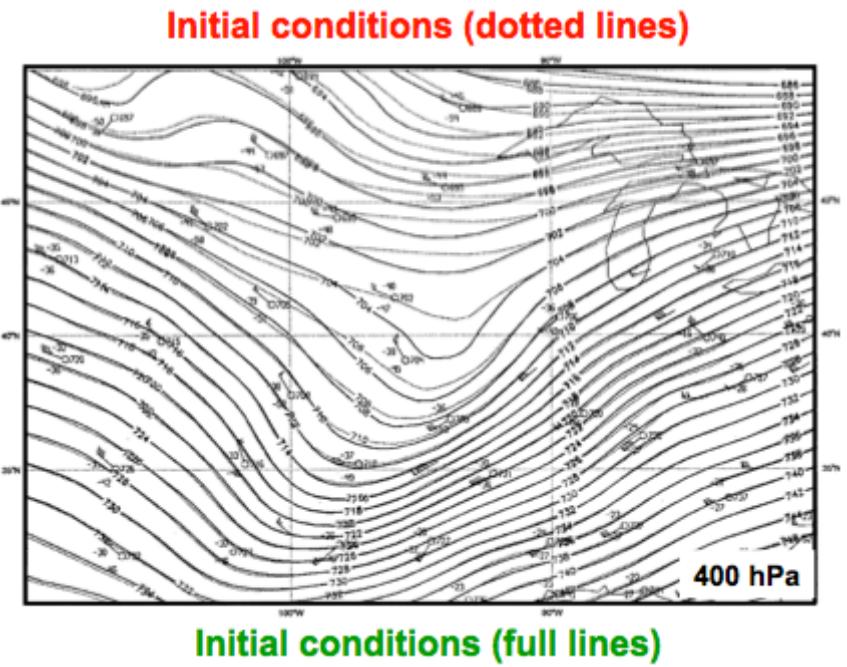
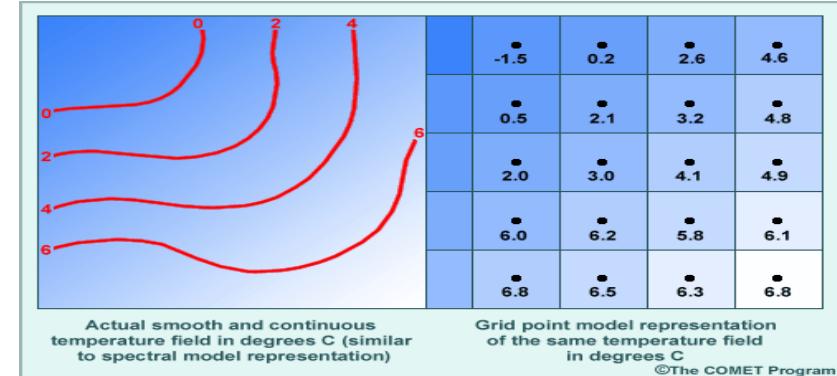
$$\frac{\partial(\bar{u})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{u})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{u})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{u})}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\bar{P})}{\partial x} - 2\Omega\eta_3(\bar{v}) - \nu \frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial z^2} = -\frac{\partial(\bar{u}'\bar{u}')}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{v}'\bar{u}')}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}'\bar{u}')}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\bar{v})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{v})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{v})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{v})}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\bar{P})}{\partial y} + 2\Omega\eta_3(\bar{v}) - \nu \frac{\partial^2(\bar{v})}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{v})}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{v})}{\partial z^2} = -\frac{\partial(\bar{u}'\bar{v}')}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{v}'\bar{v}')}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}'\bar{v}')}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\bar{w})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{w})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{w})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{w})}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(\bar{P})}{\partial z} + g \frac{\bar{p}}{\rho_0} - \nu \frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial z^2} = -\frac{\partial(\bar{u}'\bar{w}')}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{v}'\bar{w}')}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}'\bar{w}')}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\bar{T})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{T})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{T})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{T})}{\partial z} - S_p \bar{\omega} = -\frac{\partial(\bar{u}'T')}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{v}'T')}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}'T')}{\partial z} + \frac{\bar{J}}{C_p}$$

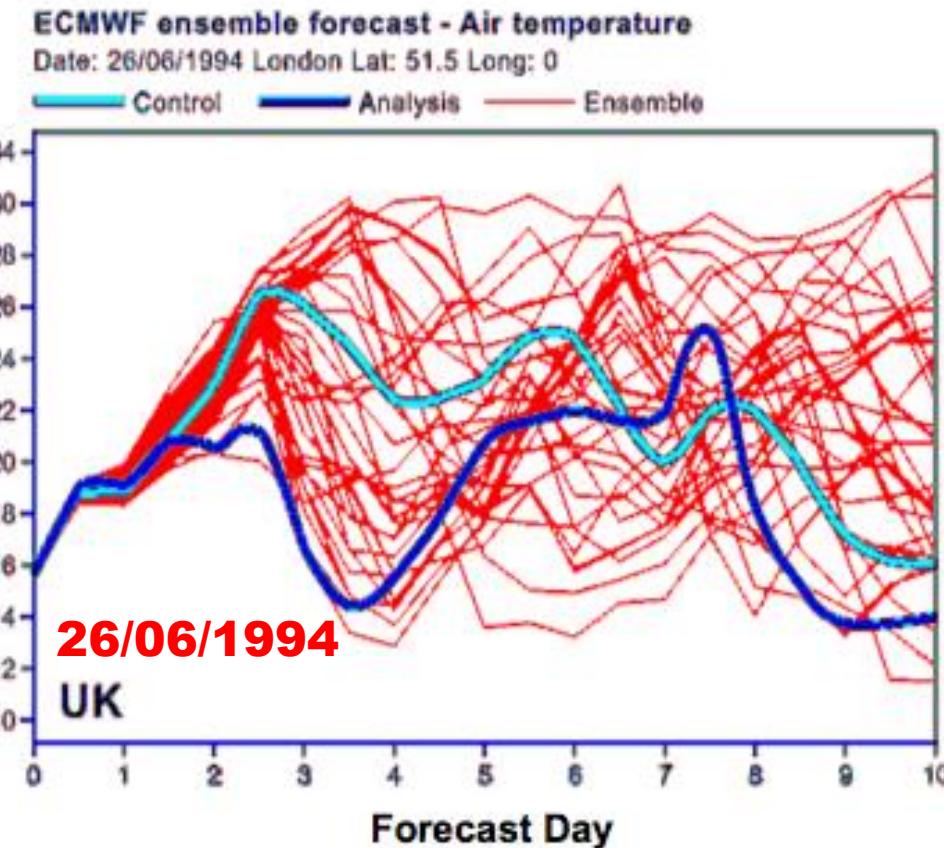
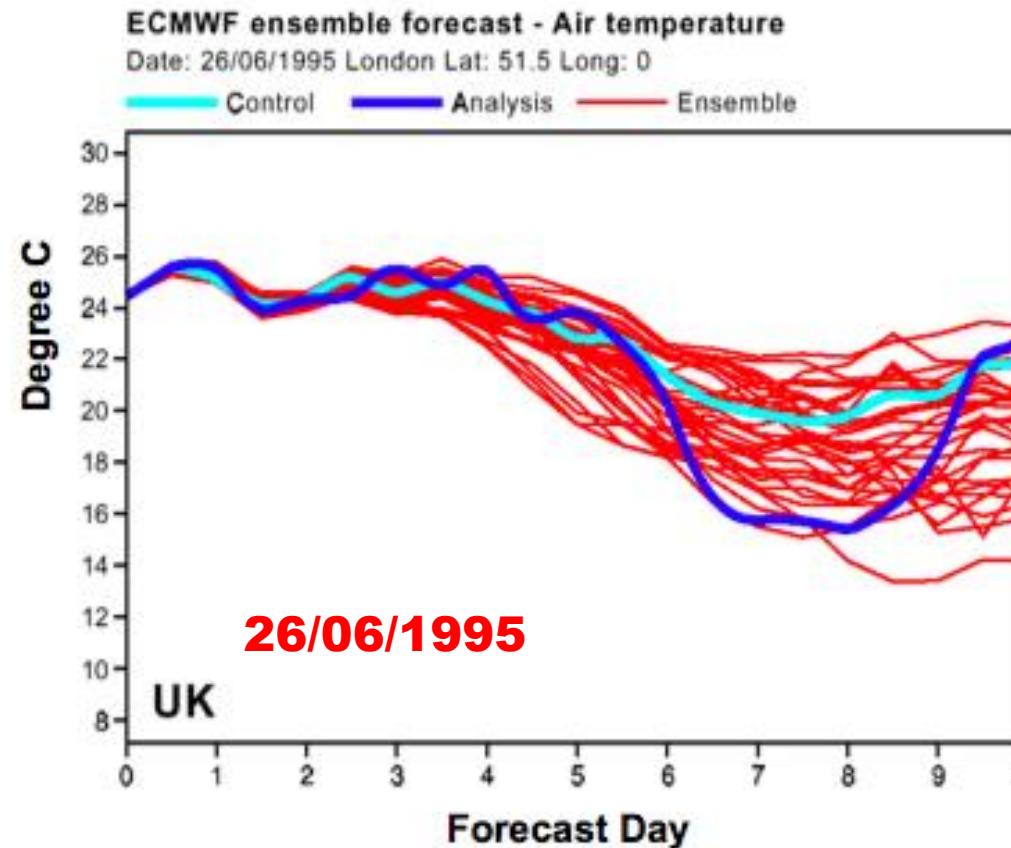
$$\frac{\partial(\bar{q})}{\partial t} + (\bar{u}) \frac{\partial(\bar{q})}{\partial x} + (\bar{v}) \frac{\partial(\bar{q})}{\partial y} + (\bar{w}) \frac{\partial(\bar{q})}{\partial z} = -\frac{\partial(\bar{u}'q')}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{u}'q')}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}'q')}{\partial z} + \bar{S}$$



Caos e previsibilidade

- Previsibilidade depende da condição inicial
 - Com isto é possível uma razoável previsão?
- Previsão por conjunto (ensemble)
 - Realizar uma serie de previsões a partir de condições iniciais ligeiramente diferentes
 - As condições iniciais devem representar as incertezas devida as observações e analise

Previsão Numérica de Tempo e Clima



Que fatores levam a um sistema previsível e não previsível?

predictable

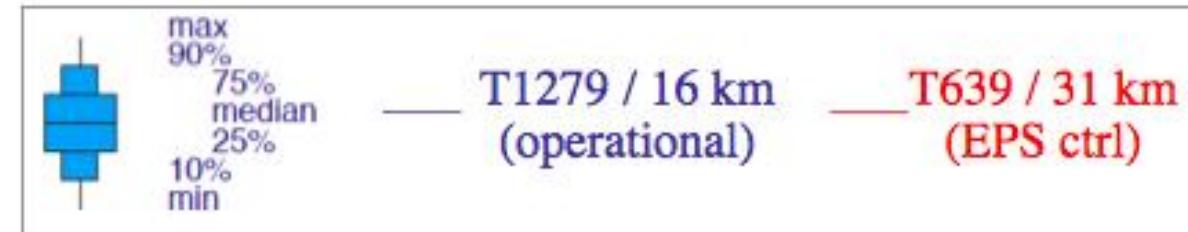
Schär, ETH Zürich

unpredictable

(Buizza et al. 2000)

Sistema caóticos muitas fontes erros que intensificam a instabilidade não linear

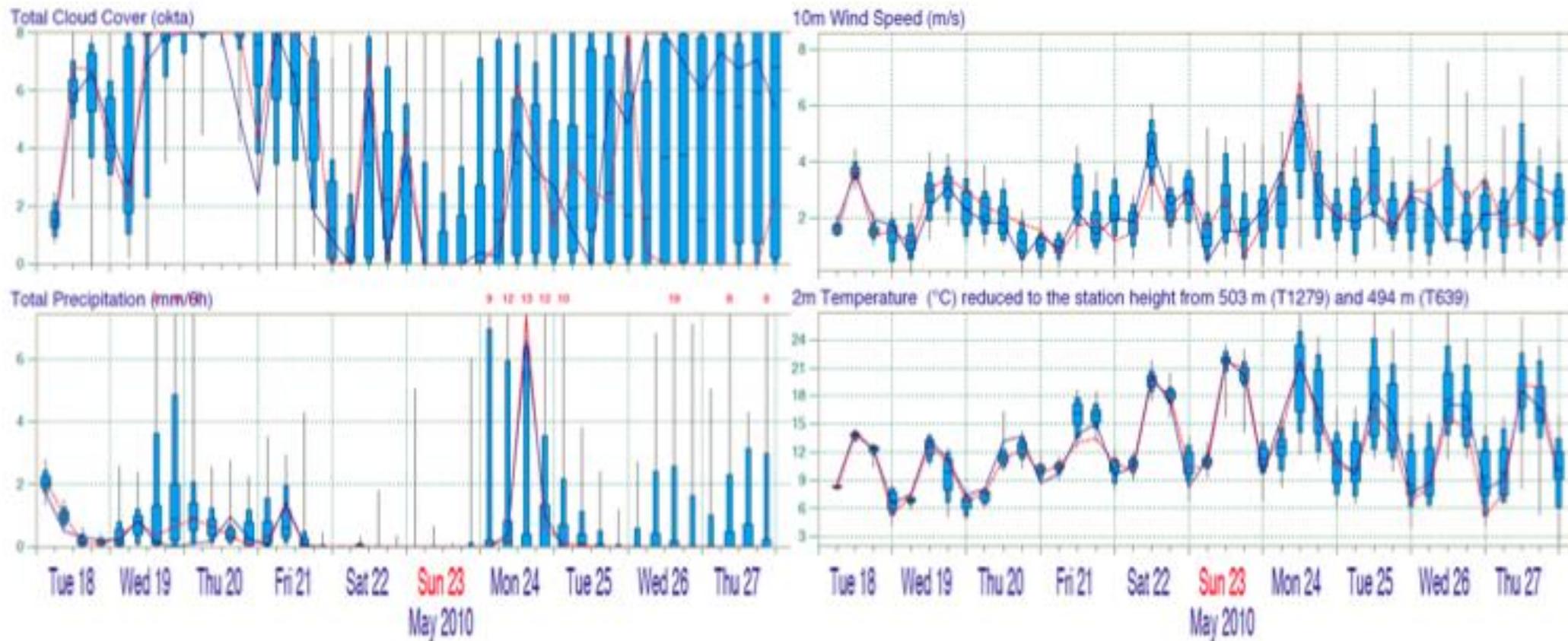
Previsão Numérica de Tempo e Clima



EPS Meteogram

Zurich 47.35°N 8.4°E (EPS land point) 439 m

Deterministic Forecast and EPS Distribution Tuesday 18 May 2010 00 UTC



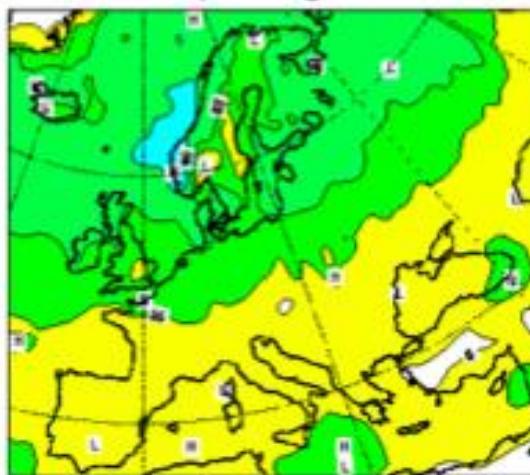
Previsão Numérica de Tempo e Clima

ECMWF FORECAST PROBABILITIES

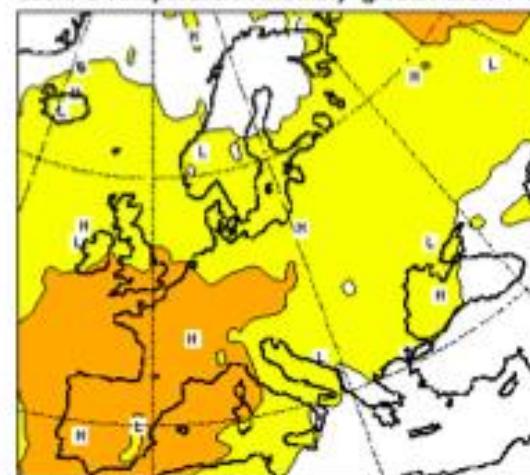
Tuesday 23 October 2001 12UTC ECMWF Forecast192 VT:Wednesday 31 October 2001 12UTC

Contours at 5%, 35%, 65%, 95%

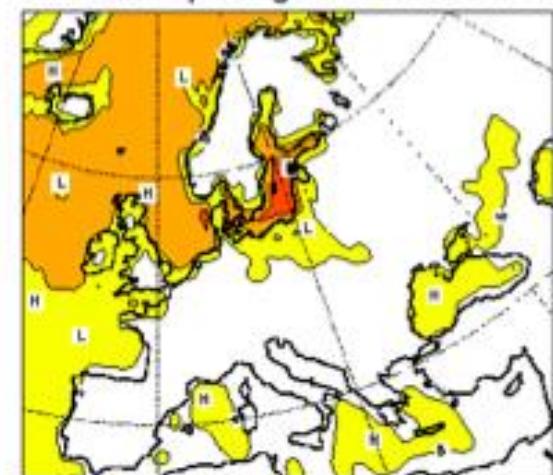
24hr Total Precipitation greater than 1 mm



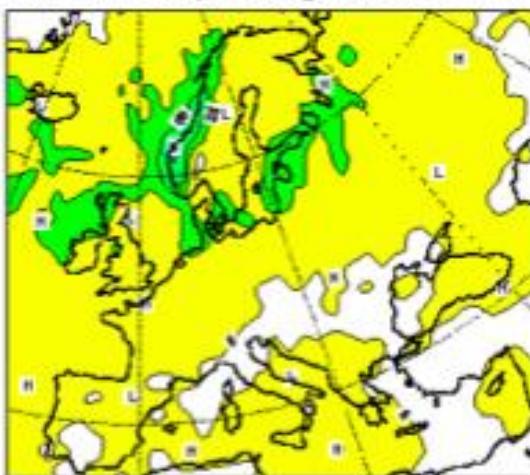
850hPa Temperature Anomaly greater than 4 K



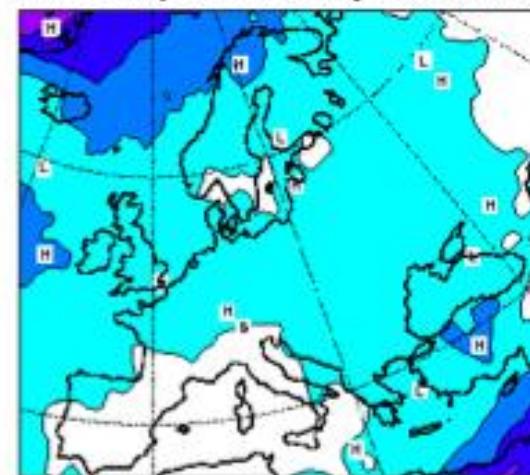
10m Wind Speed greater than 10 m/s



24hr Total Precipitation greater than 5 mm



850hPa Temperature Anomaly less than -4 K

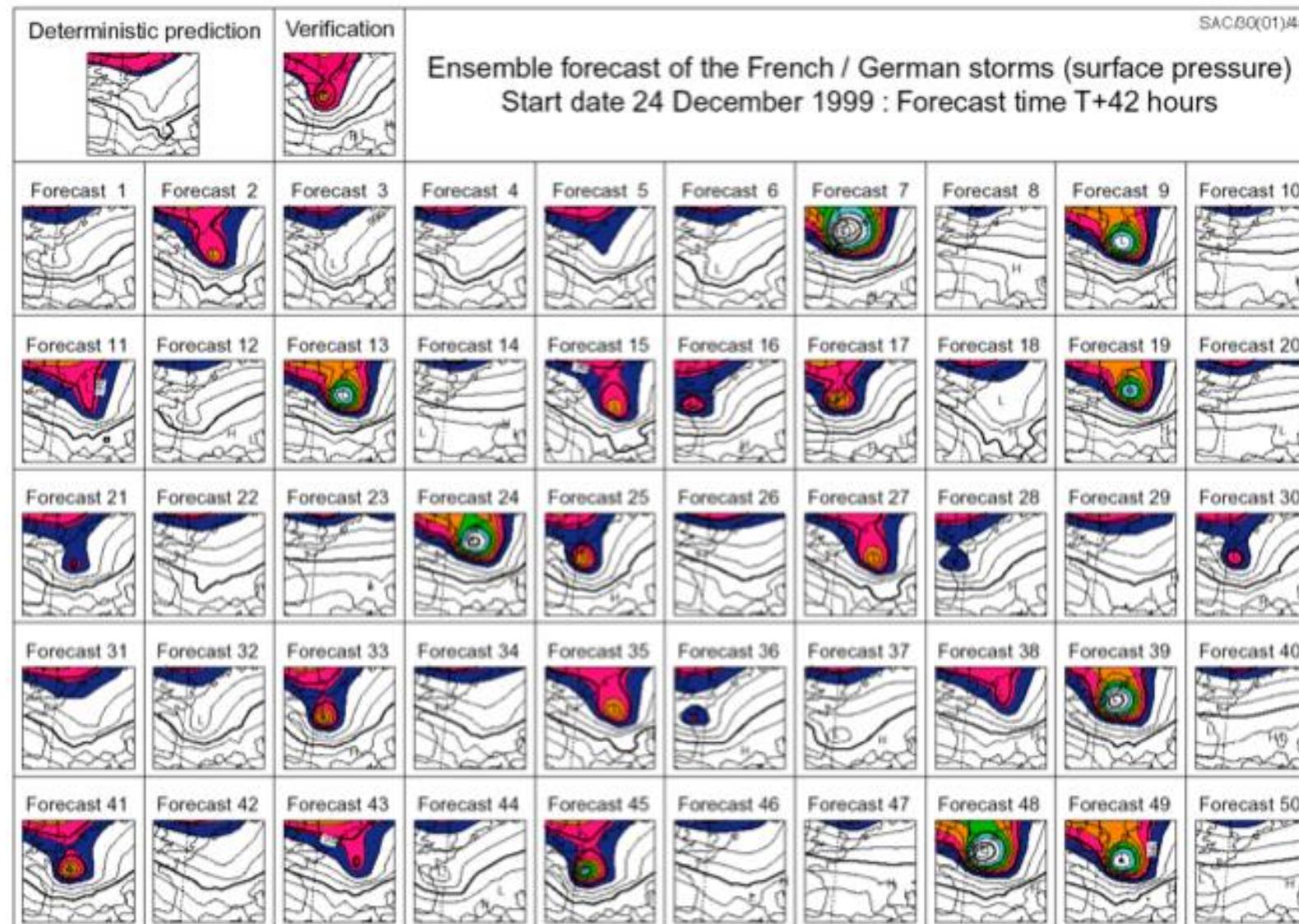


10m Wind Speed greater than 15 m/s



Previsão Numérica de Tempo e Clima

ECMWF ensemble forecast of 1999/12/24, 12 UTC



Sumário

- A atmosfera e oceanos são sistemas dinâmicos caóticos
- Caos implica limitações intrínsecas de previsibilidade
- As técnicas de previsão probabilística (conjunto) são superiores a determinística
- Amplo range de aplicações: eventos extremos, climáticas, hidrológicas, mudança climática, etc.

Previsão Numérica de Tempo e Clima



Previsão Numérica de Tempo e Clima

Previsão do Conjunto (Ensemble Forecast)

Krishnamurti et al. (2001) mostraram que em uma multianálise em tempo real, as previsões do superconjunto de multimodelo melhoraram significativamente as previsões de chuva.

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Previsão do Conjunto (Ensemble Forecast)

Conforme indicado na Fig. 13.17, durante o período de treinamento, os campos observados fornecem estatísticas que são passadas para a área à direita, onde $t > 0$.

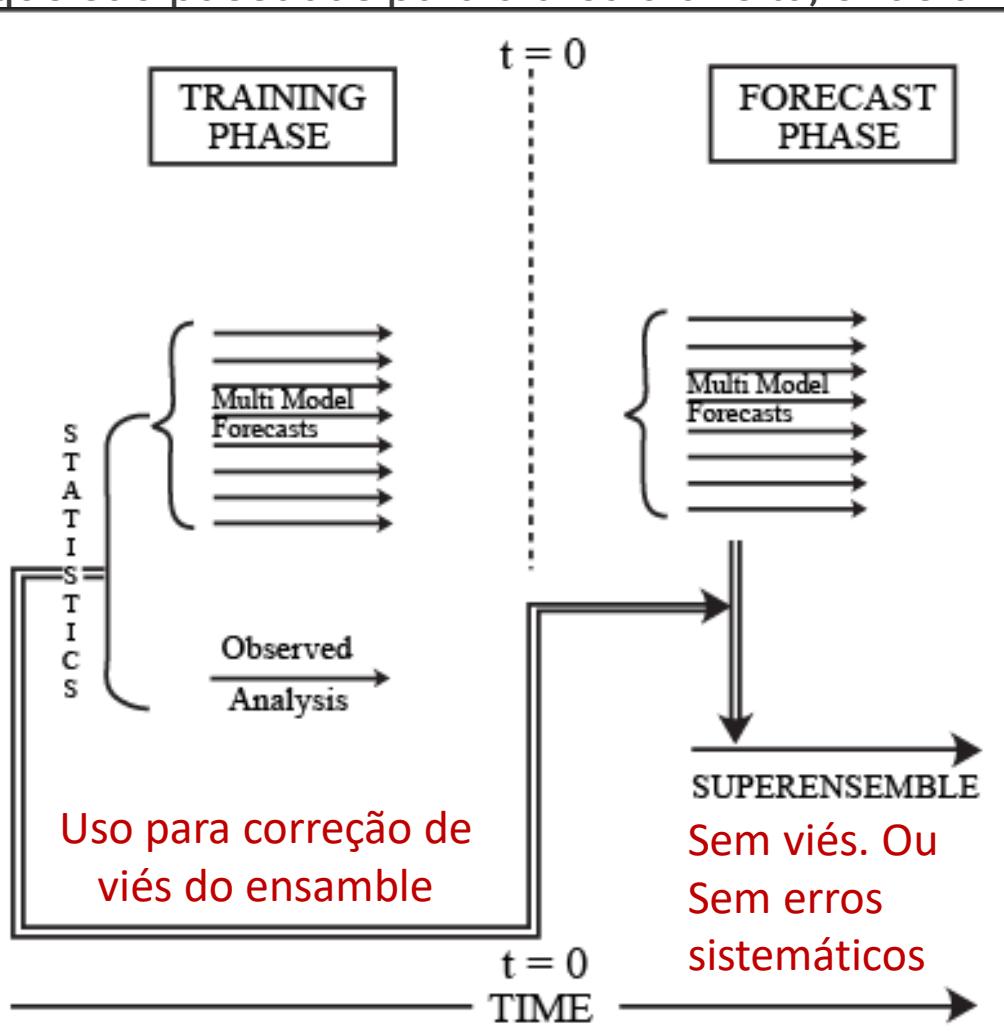


Fig. 13.17: Um fluxograma de previsão de superensemble multianálise-multimodelo.

A linha vertical no centro define o tempo inicial ($t = 0$), e a área à esquerda define o período de treinamento onde um grande número de experimentos de previsão é realizado pelo sistema multianálise-multimodelo.

Durante o período de treinamento, os campos observados fornecem estatísticas que são passadas para o período de previsão à direita, onde $t = 0$.

Aqui, as previsões multianálise-mulimodelo junto com as estatísticas fornecem as previsões do superensemble.
(Adaptado após Krishnamurti et al. 2001)

Previsão Numérica de Tempo e Clima

Previsão do Conjunto (Ensemble Forecast)

As previsões multianálise-multimodelo, juntamente com as estatísticas mencionadas acima, fornecem as previsões do superensemble.

O superconjunto tem uma habilidade maior em comparação com a média do conjunto porque o superconjunto é seletivo na atribuição de pesos e no histórico de desempenho dos modelos das estatísticas anteriores.