

# **Previsão Numérica de Tempo e Clima**

**Paulo Yoshio Kubota**  
DIMNT  
CPTEC/INPE

# Objetivos



1. Introduzir: técnicas de modelagem numérica, modelos de PNT e Clima
2. Fundamentos: estrutura, dinâmica, física, diagnóstico
3. Experiência prática: em modelagem numérica e análise de dados
4. Disseminação: Compreensão e uso inteligente das saídas dos modelos de PNTC

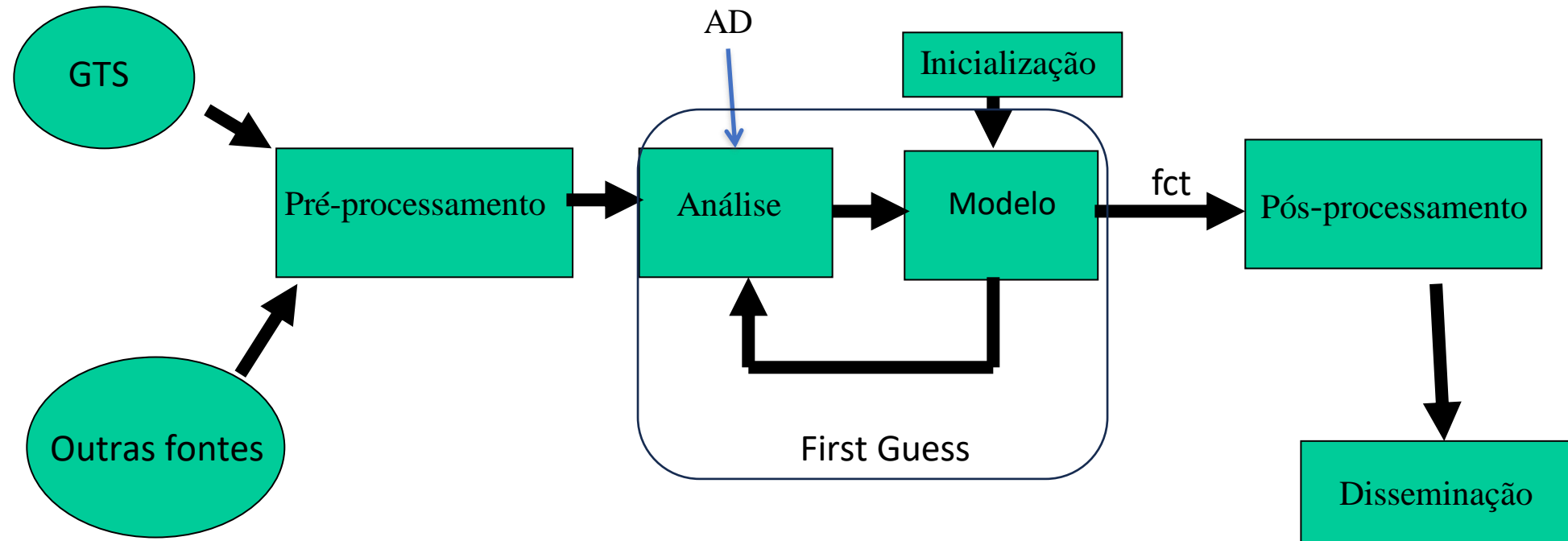
# Tópicos



- **Introdução:** histórico da PNT, processos e componentes
- **Fundamentos básicos dos modelos de PNT:** equações, análise de escala e filtragem, coordenadas verticais
- **Métodos numéricos:** diferenças finitas, Galerkin (espectrais e elementos finitos): espaço e tempo; análise de estabilidade numérica

# Processos e componentes

## Fluxograma de PNT



# Sistema de equações governantes da atmosfera

Equações do Momento:  $\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \text{termos de atrito}$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \text{termos de atrito}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \text{termos de atrito}$$

Equação da continuidade:  $\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \frac{\partial w}{\partial z} = 0$

Equação da energia termodinâmica:  $\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \text{forçantes diabáticos}$

Equação de estado:

6 equações, 6 incógnitas ( $u, v, w, p, T, \rho$ )

# Equações Governantes

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} - \omega \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial p} + f \mathbf{k} \times \mathbf{v} - \nabla \Phi + \mathbf{D}_M \quad \text{Equações do Momento:}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla T + \omega \left( \frac{\kappa T}{p} - \frac{\partial T}{\partial p} \right) + \frac{\tilde{Q}_{rad}}{c_p} + \frac{\tilde{Q}_{con}}{c_p} + D_H \quad \text{Equação da energia termodinâmica:}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla q - \omega \frac{\partial q}{\partial p} + E - C + D_q \quad \text{Equação da conservação de umidade:}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial p} = -\nabla \cdot \mathbf{v} \quad \text{Equação da continuidade:}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial p} = -\frac{RT}{p}, \quad \text{Equação de estado:}$$

# Métodos numéricos



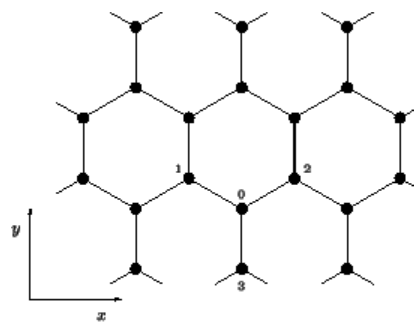
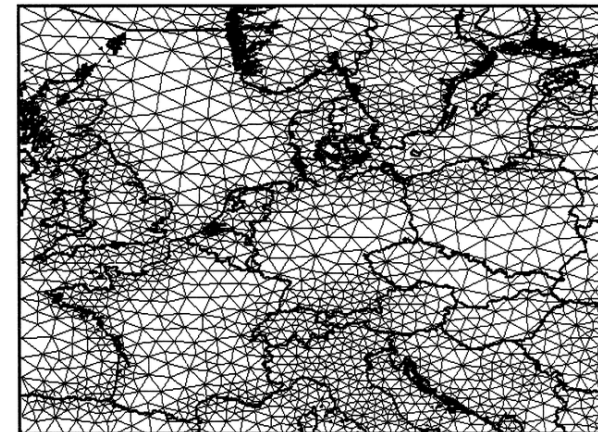
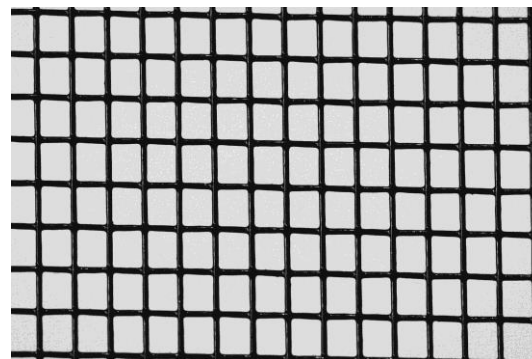
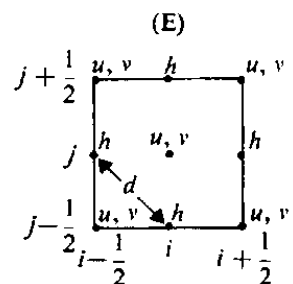
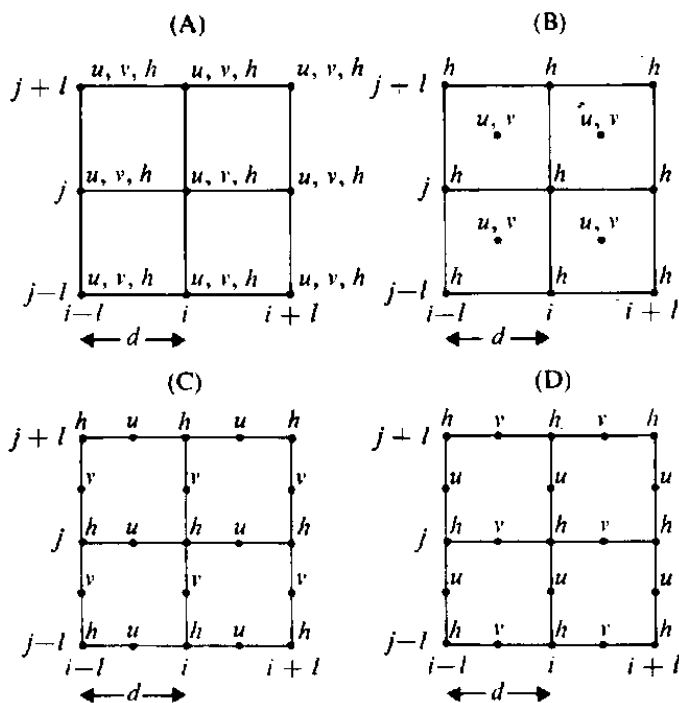
$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} F(u, M_{u,d})$$

$$\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\Delta t} = -\frac{M}{\rho} \frac{u_{j+1}^n - u_{j-1}^n}{2\Delta z}$$

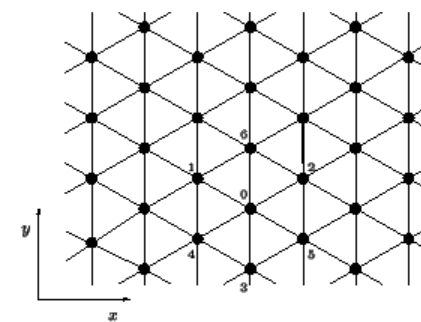
$$\Rightarrow \lambda = 1 - \frac{M\Delta t}{\rho\Delta z} \left( \frac{e^{ik\Delta z} - e^{-ik\Delta z}}{2} \right)$$

$$\Rightarrow |\lambda| = \sqrt{1 + \left( \frac{M\Delta t}{\rho\Delta z} \right)^2 \sin^2(k\Delta z)} \quad |\lambda| > 1$$

# Os tipo de Grades



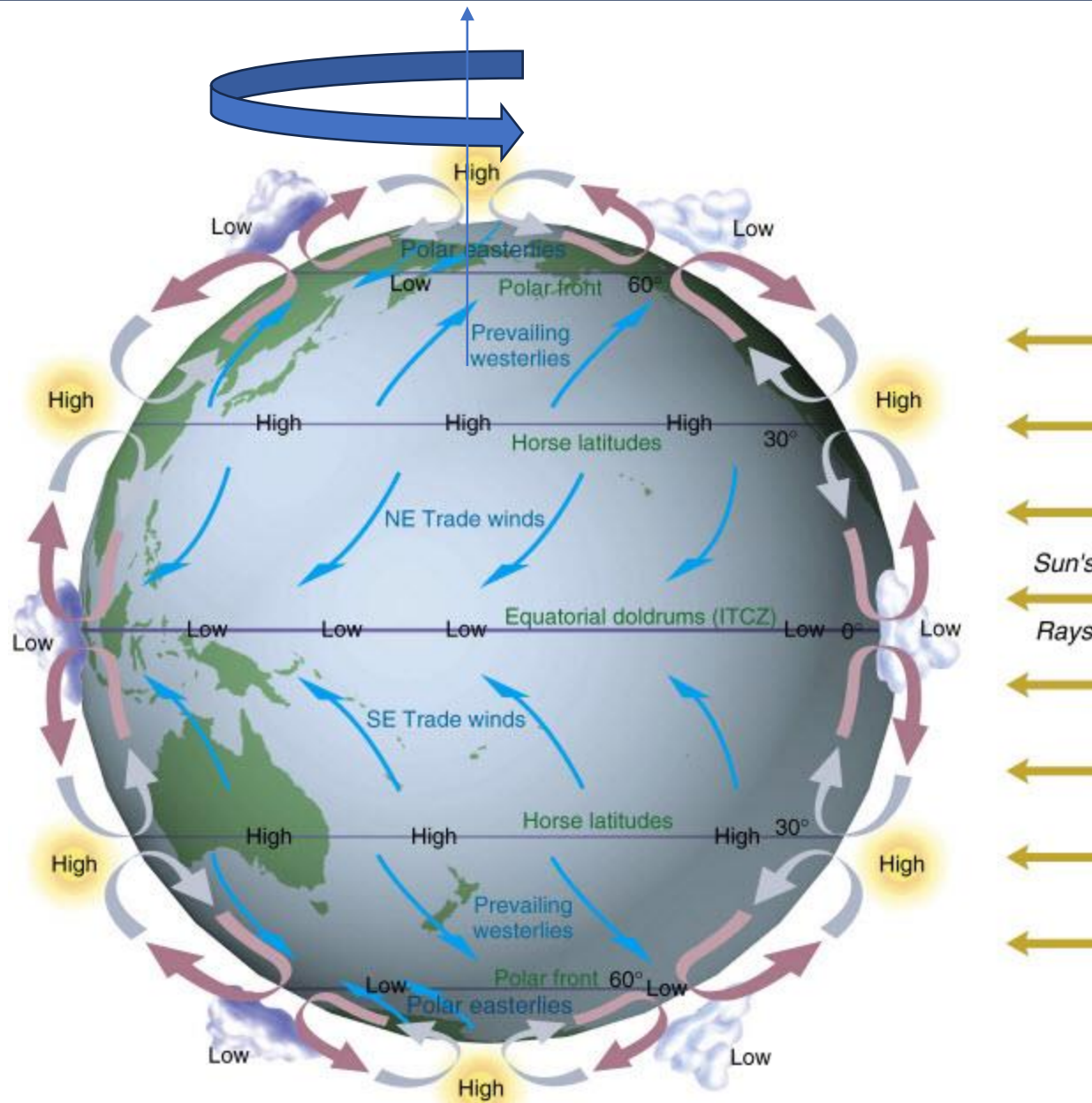
(a)



(b)

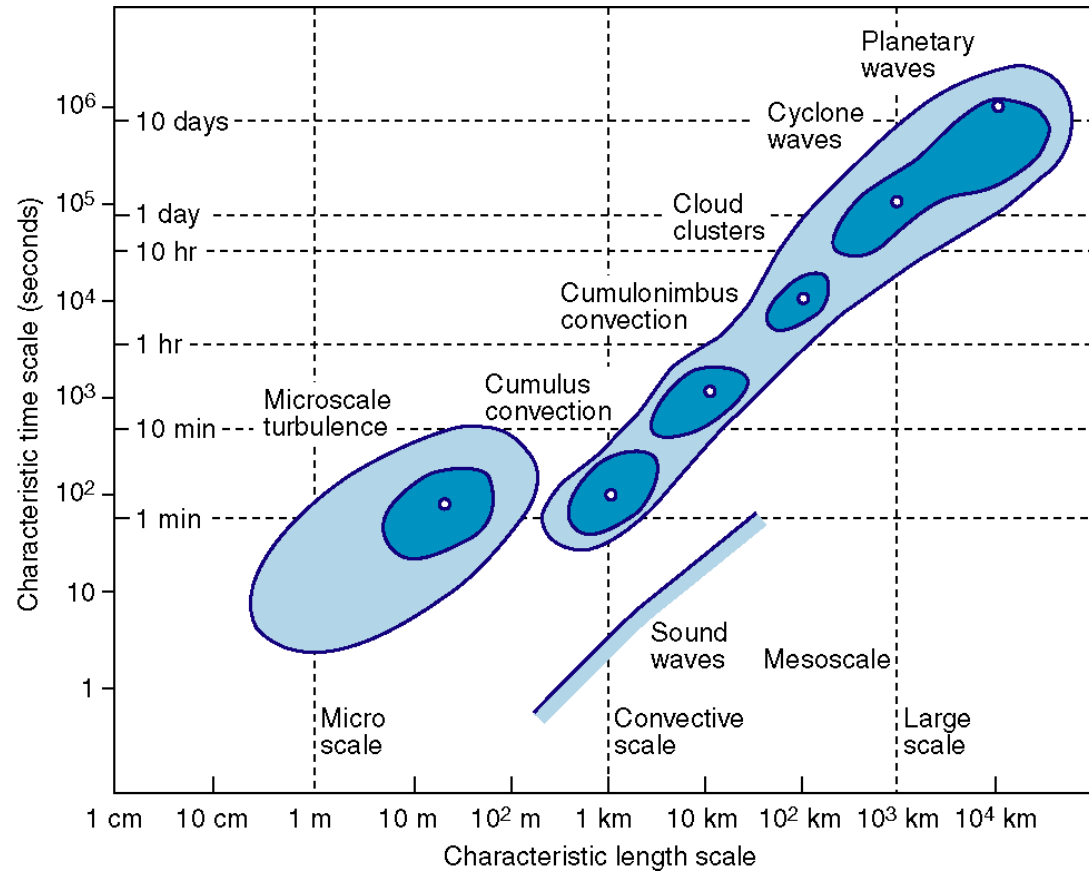


# Escalas: temporais e espaciais

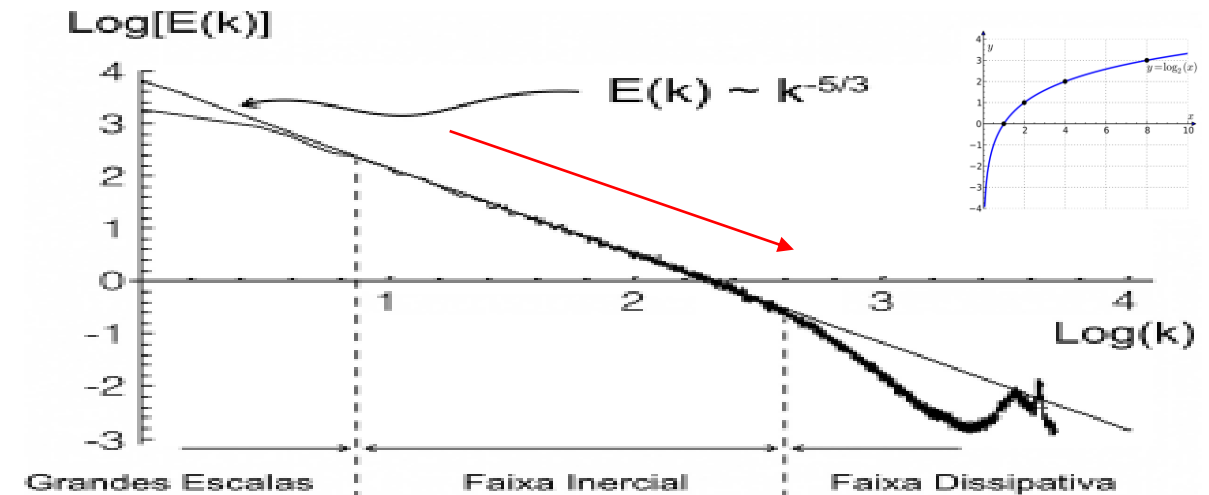


**As maiores fontes de Energia e Momentum**

# Escalas: temporais e espaciais



## Qual a importância das escalas?



**Figura 12:** Espectro de energia, em escala dilog (unidades arbitrárias de energia  $E(k)$  e número de onda  $k$ ) obtido a partir de séries temporais (disponíveis na base de dados em turbulência da Universidade Johns Hopkins [129]) para um escoamento em túnel de vento com número de Reynolds  $Re = 3 \times 10^4$ .

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

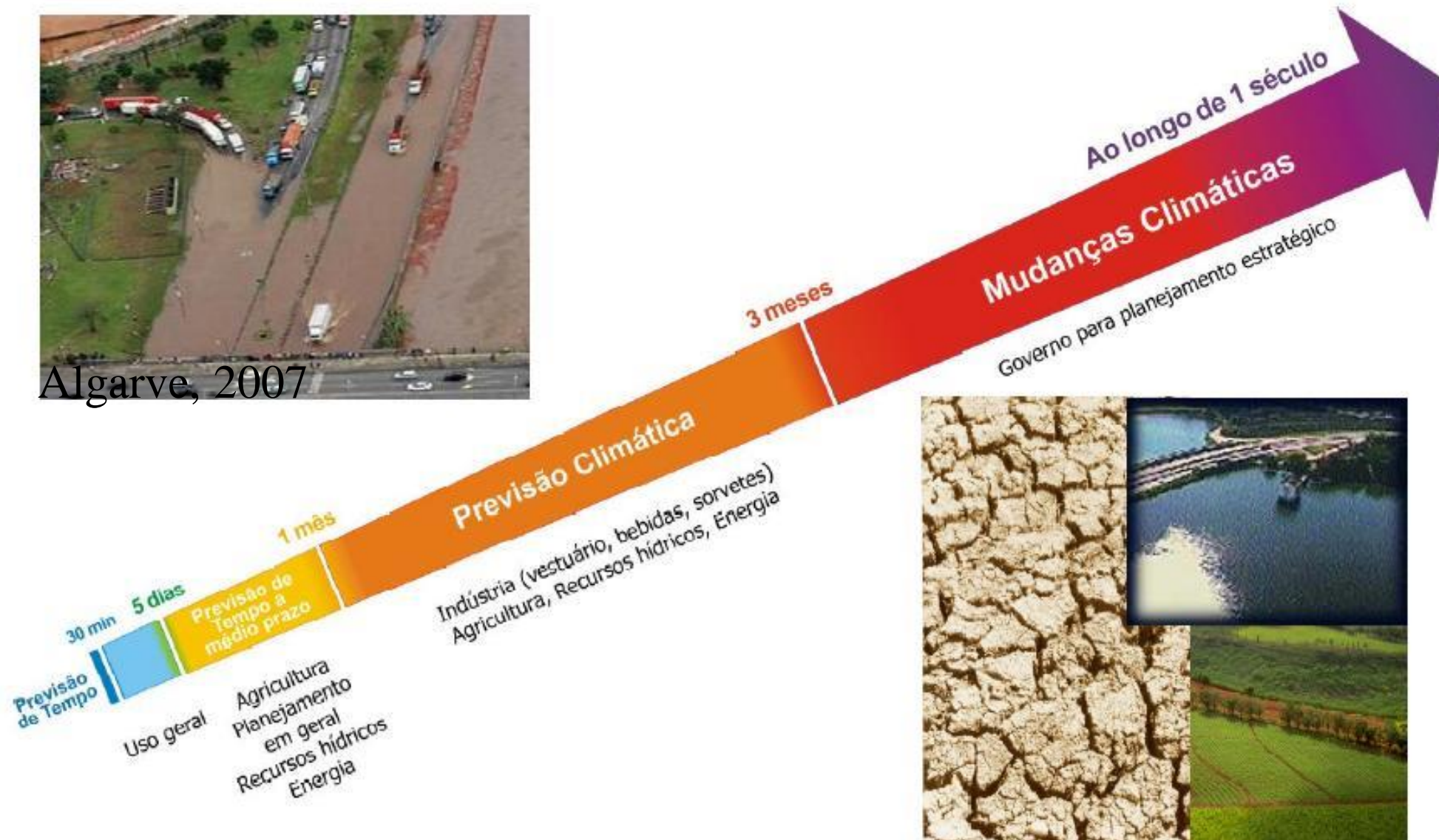
268

269

270

271

# Quais os impactos das Escalas





# Utilidade da PNT

Algarve, 2007

## OUTROS USUÁRIOS DA NOSSA PREVISÃO DE TEMPO E CLIMA

### Petrobrás



The screenshot shows the Petrobrás weather page with the CPTec logo. It features a map of Brazil with a highlighted region, a table of weather data for different locations, and a section for climate information.

### Rodovia (Nova Dutra)



The screenshot shows the Rodovia (Nova Dutra) weather page. It includes a map of the road network, a table of weather data for various points along the route, and a section for climate information.

### Portal do Tempo usado em vários link de internet



The screenshot shows the Portal do Tempo website. It features a map of Brazil, a table of weather data for different locations, and a section for climate information.

### Cargill (agrícola)



The screenshot shows the Cargill weather page. It includes a table of weather data for different locations, a section for climate information, and a section for agricultural information.

### Cooperativa de agricultores



The screenshot shows the Cooperativa de agricultores weather page. It features a map of Brazil, a table of weather data for different locations, and a section for climate information.

### Agro (Estadão)



The screenshot shows the Agro (Estadão) weather page. It includes a map of Brazil, a table of weather data for different locations, and a section for climate information.

# Utilidade da PNT

Algarve, 2007



## OUTROS USUÁRIOS DA NOSSA PREVISÃO DE TEMPO E CLIMA

Previsão feita para canal da DIRECTV



 [www.cptec.inpe.br](http://www.cptec.inpe.br)

### TV DIÁRIO DE MOGI DAS CRUZES - SP



### TV Vanguarda e Tv Setorial



### TV Globo



### Tv Cultura

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Previsão de Tempo

#### Choveu ou não o verão de Fátima?

Os dados de longo prazo indicam que o verão de Fátima é o mais chuvoso do ano. No entanto, a previsão para o verão de Fátima é de 100 mm de chuva, o que é considerado baixo para o verão de Fátima.

#### Temperatura Média Mensal

Os dados de longo prazo indicam que a temperatura média mensal de Fátima é de 24°C. No entanto, a previsão para o verão de Fátima é de 28°C, o que é considerado alto para o verão de Fátima.

#### Temperatura Máxima Mensal

Os dados de longo prazo indicam que a temperatura máxima mensal de Fátima é de 34°C. No entanto, a previsão para o verão de Fátima é de 38°C, o que é considerado muito alto para o verão de Fátima.

#### Temperatura Mínima Mensal

Os dados de longo prazo indicam que a temperatura mínima mensal de Fátima é de 18°C. No entanto, a previsão para o verão de Fátima é de 22°C, o que é considerado baixo para o verão de Fátima.

#### Temperatura Média Diária

Os dados de longo prazo indicam que a temperatura média diária de Fátima é de 24°C. No entanto, a previsão para o verão de Fátima é de 28°C, o que é considerado alto para o verão de Fátima.

#### Temperatura Máxima Diária

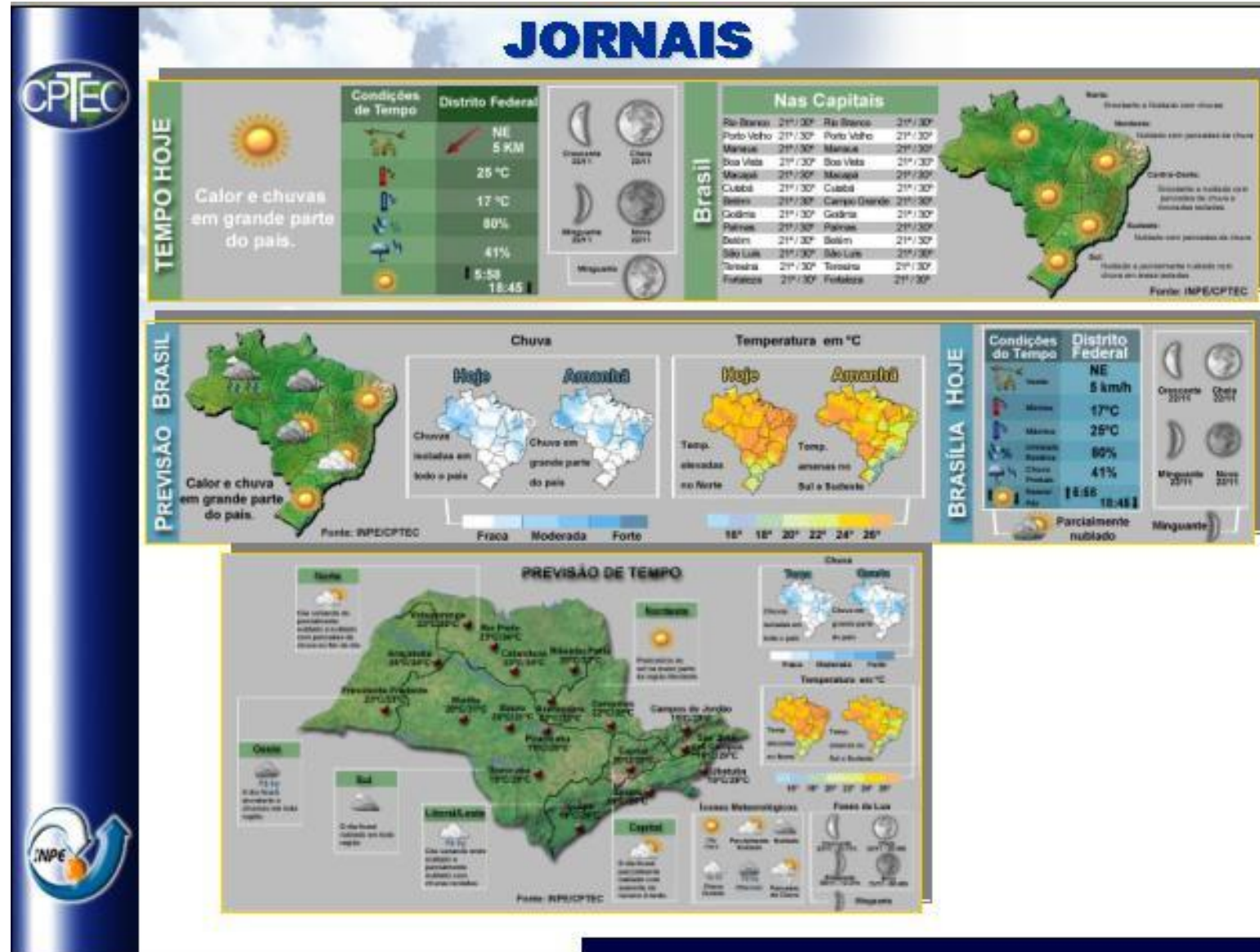
Os dados de longo prazo indicam que a temperatura máxima diária de Fátima é de 34°C. No entanto, a previsão para o verão de Fátima é de 38°C, o que é considerado muito alto para o verão de Fátima.

#### Temperatura Mínima Diária

Os dados de longo prazo indicam que a temperatura mínima diária de Fátima é de 18°C. No entanto, a previsão para o verão de Fátima é de 22°C, o que é considerado baixo para o verão de Fátima.



Algarve, 2007



# Principal Ferramenta par a PNTC



- **Modelos:** Tipos de modelos, resolução e condições de fronteira
- **Física e parametrizações dos modelos:** camada limite, fluxos de superfície (interface), física úmida (convecção, microfísica), radiação
- **Modelos global e regional do CPTEC:** atmosféricos/acoplados

# Componentes do Modelo



- **parametrização física:** *“procedimento matemático que descreve os efeitos estatísticos de processos de sub-grade sobre o fluxo médio em função de parâmetros de grande escala”,*
- **dinâmica:** *calcula dos outros termos das equações de Navier-Stokes*



# Métodos de Avaliação do Modelos

---

- **Geral:**

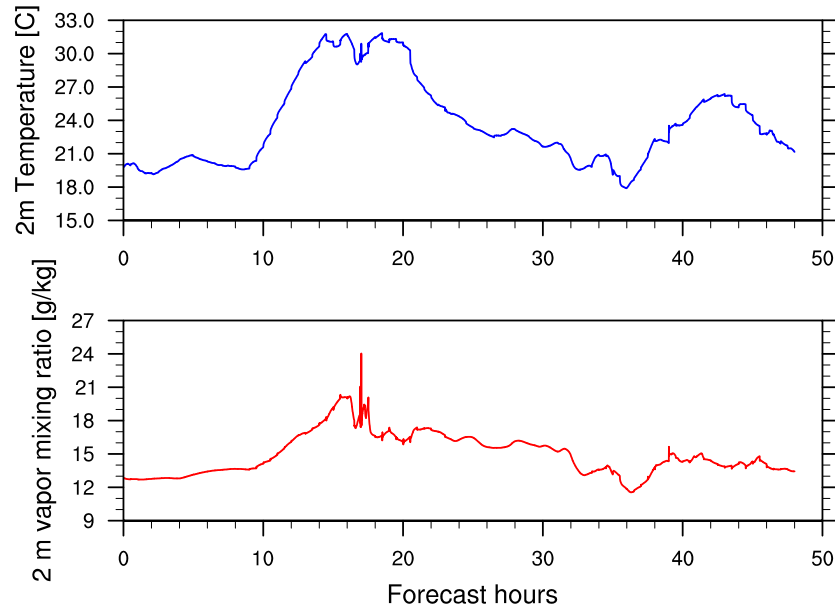
- **RMSE**
- **BIAS (VIES)**
- **Variância**

- **Precipitação**

- **Hit hate,**
- **Threat score,**
- **FAR,**
- **POD,**
- **BIAS,**
- **IS,**
- **IR**

# Diagnósticos

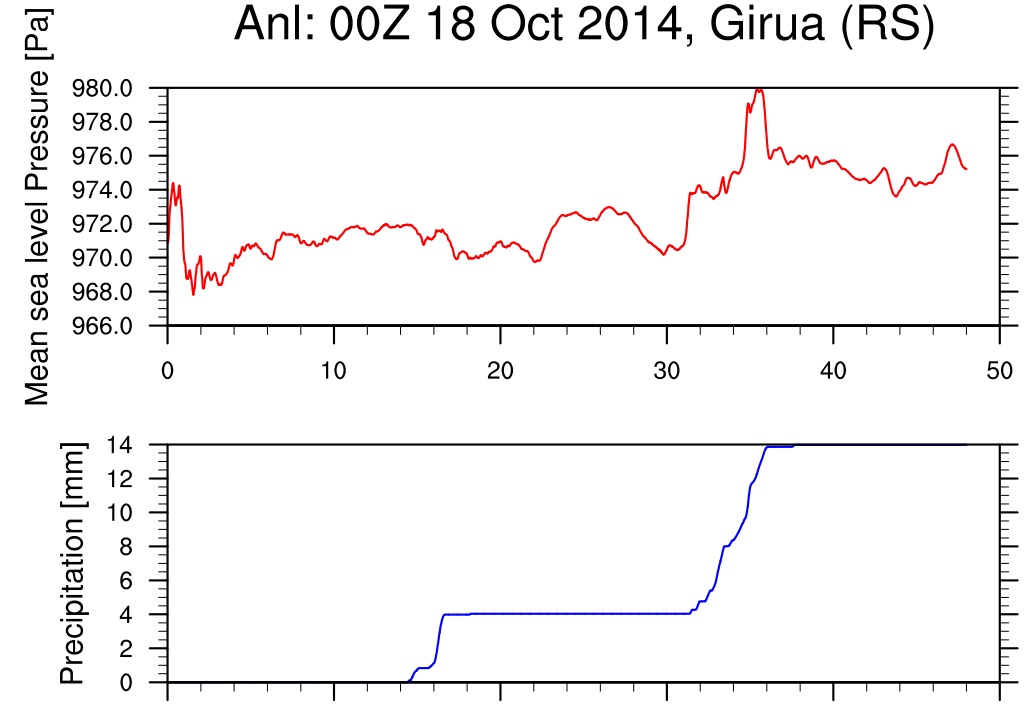
Anl: 00Z 18 Oct 2014, Girua (RS)



Series Temporais por localidade

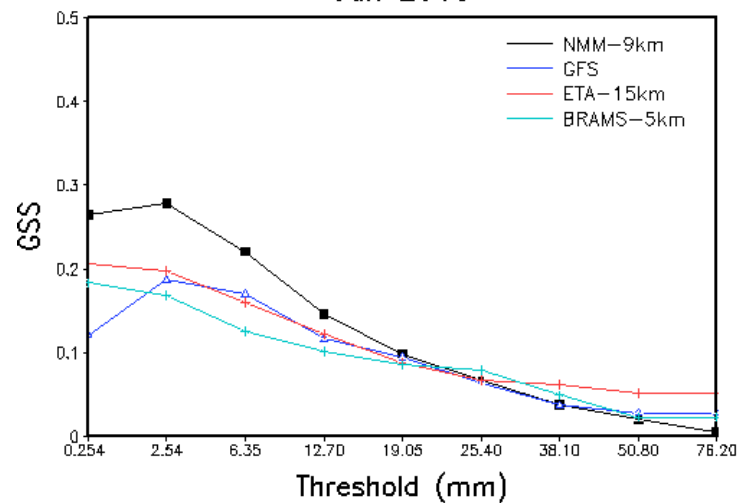
## WRF vs OBS

Anl: 00Z 18 Oct 2014, Girua (RS)

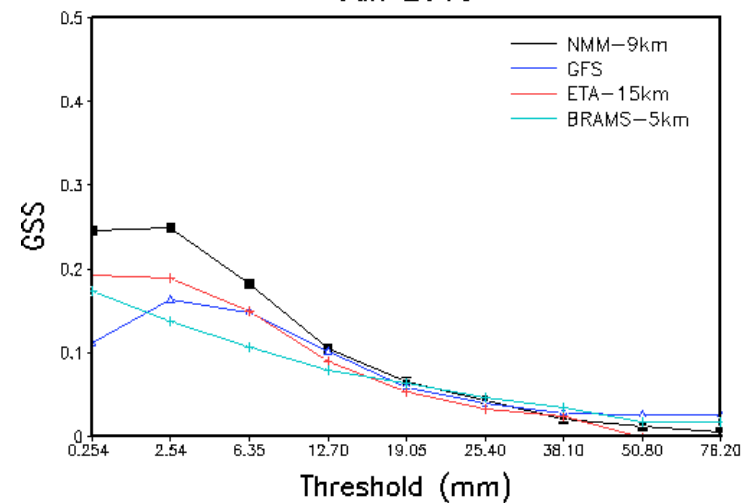


# Avaliação

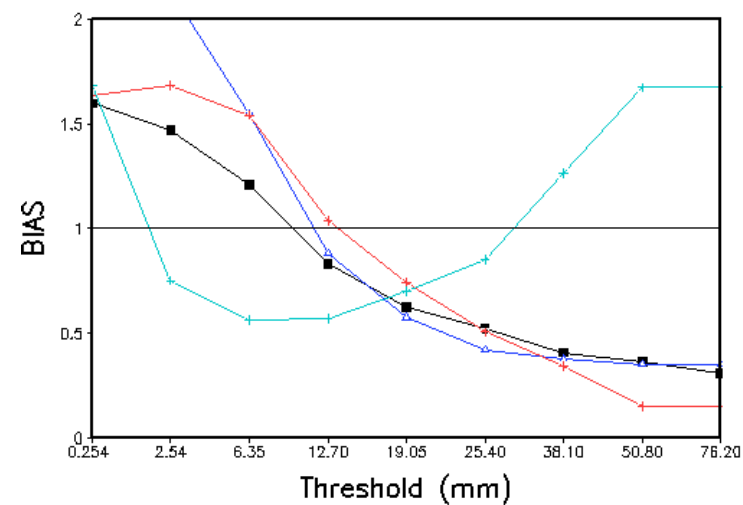
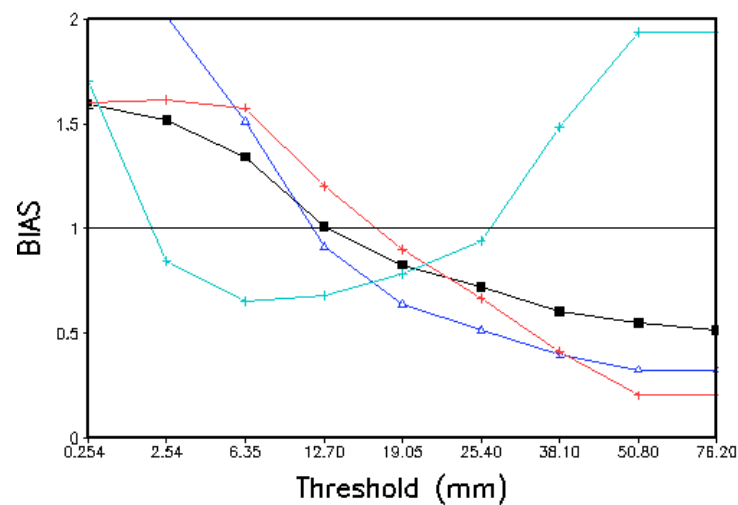
Precipitation 12–36 hrs South America domain  
Jan 2015



Precipitation 36–60 hrs South America domain  
Jan 2015

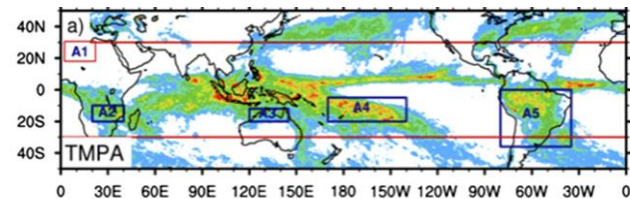
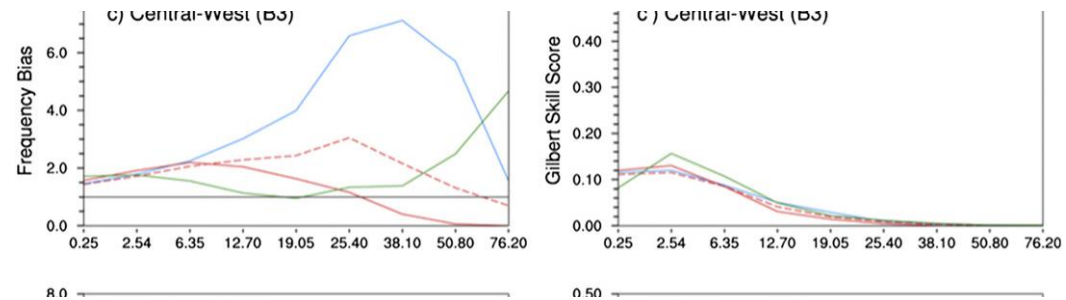
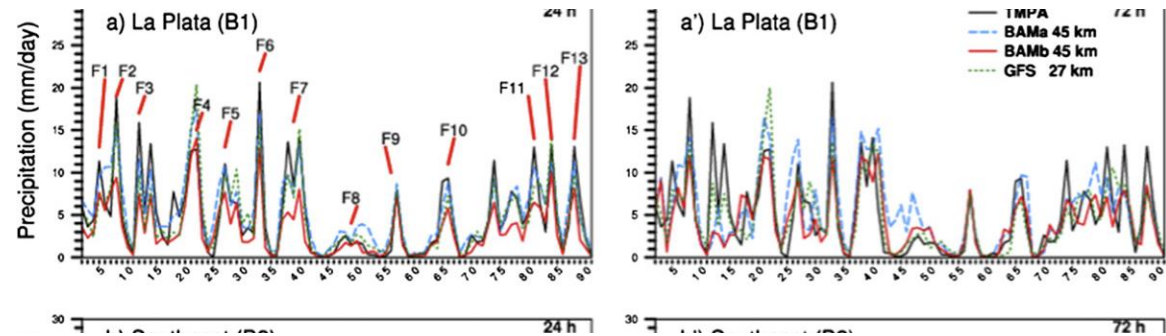
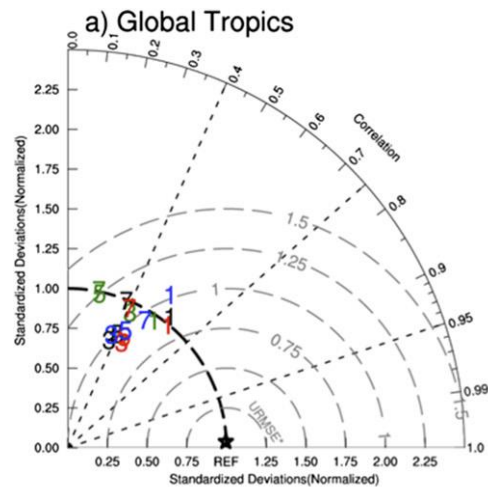
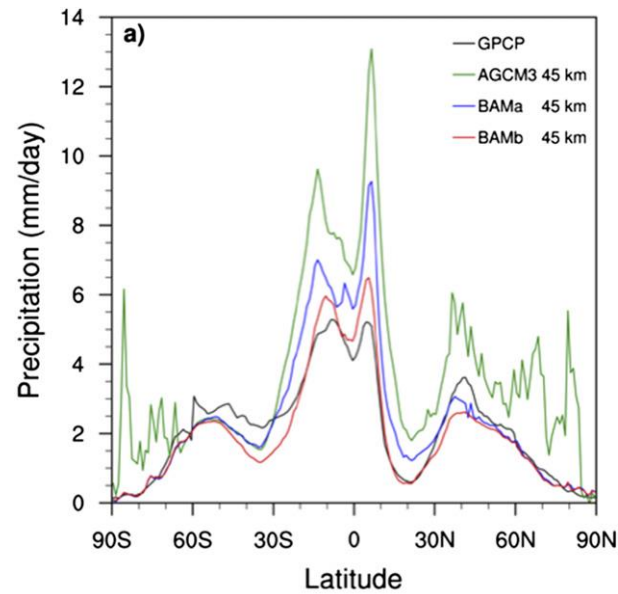


Global Skill Score

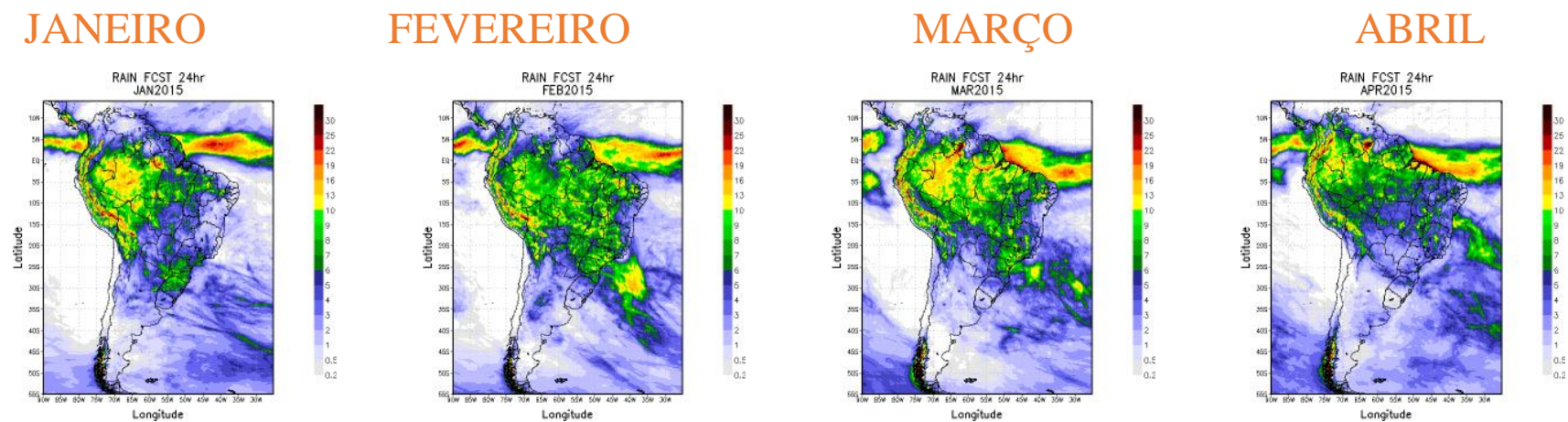


# Avaliação

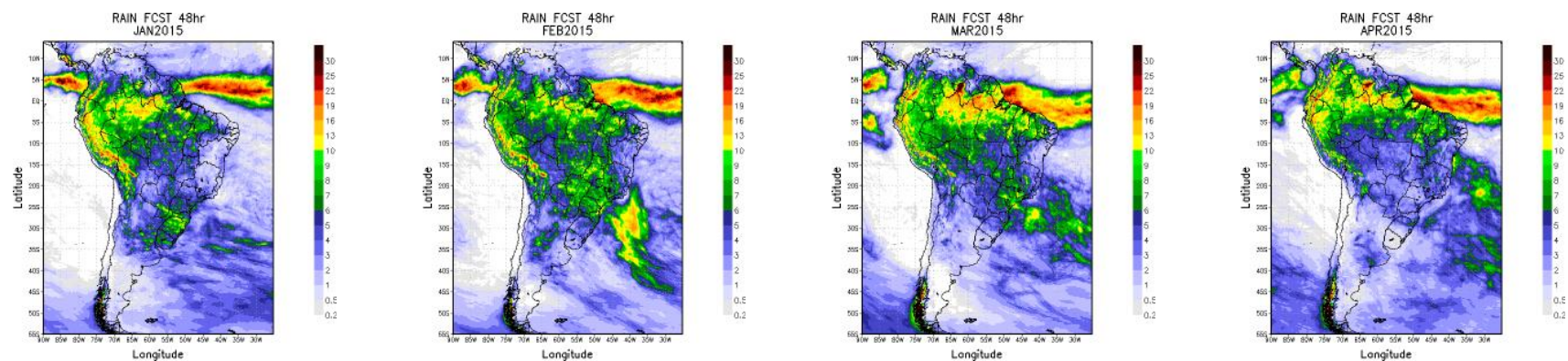
Figuroa et al. 2016 (BAM)



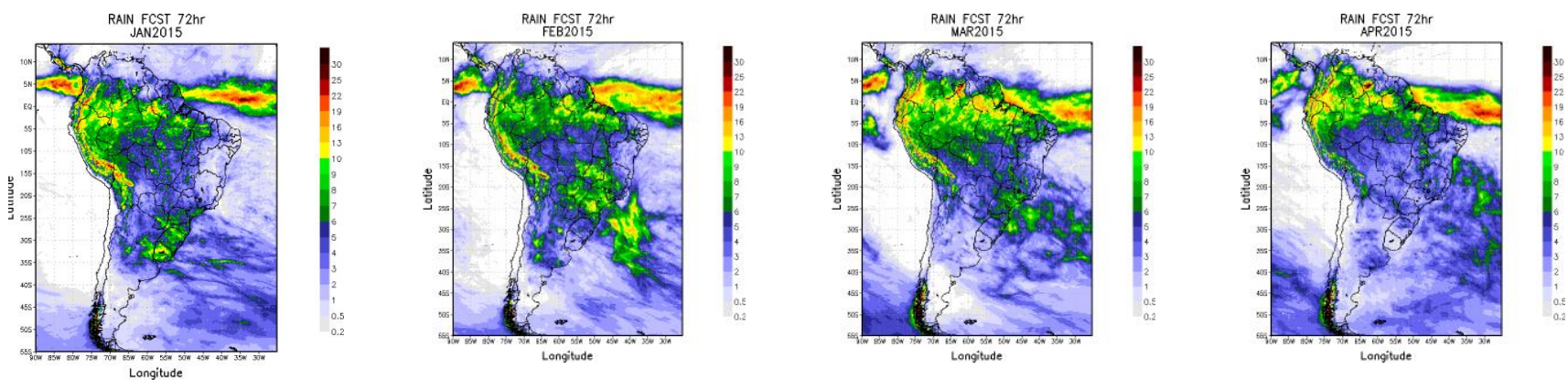
24 hr



48 hr

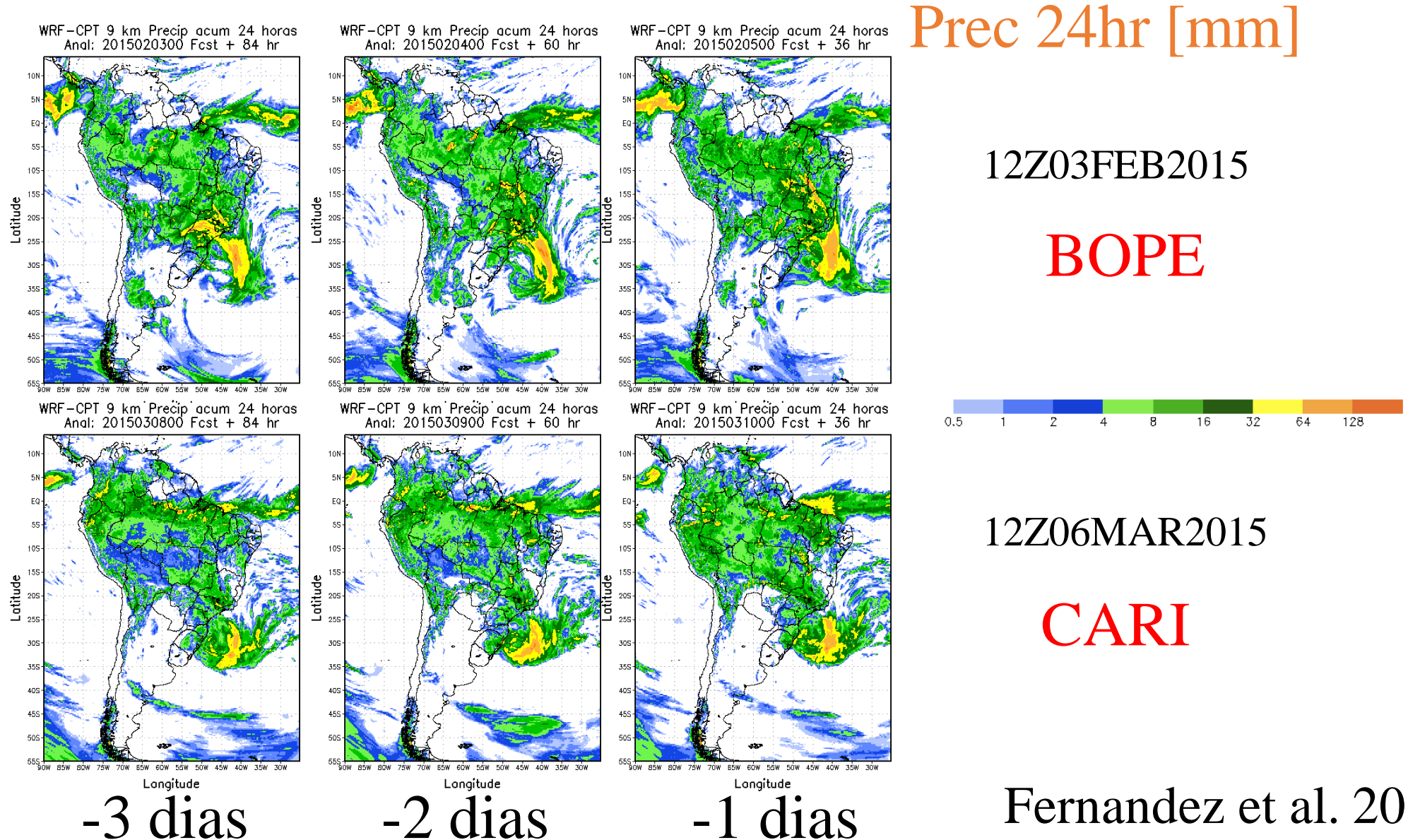


72 hr



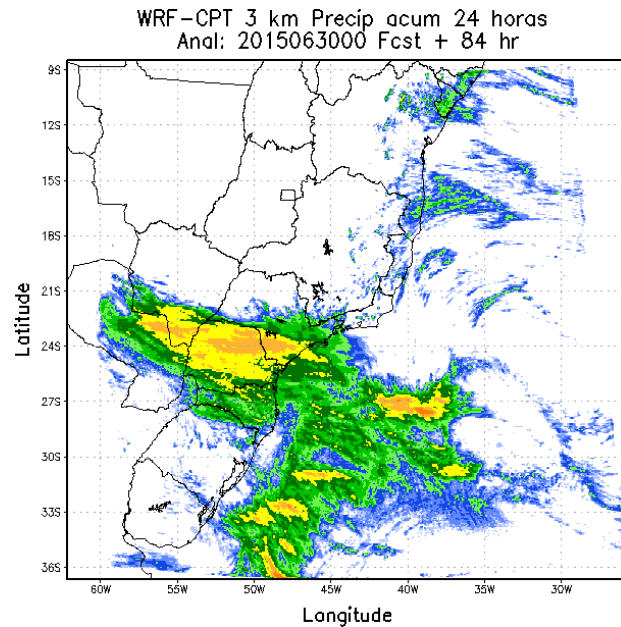


# América do Sul – 9 km Ciclones extra-tropicais

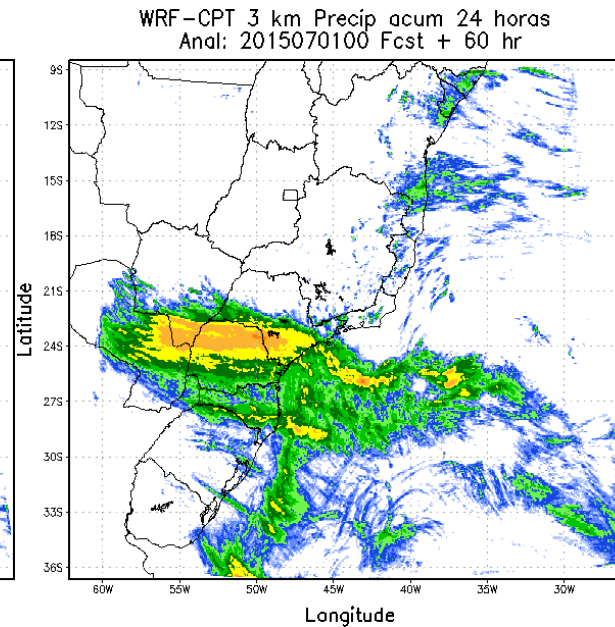


# Eventos extremos Parana Julho 2015

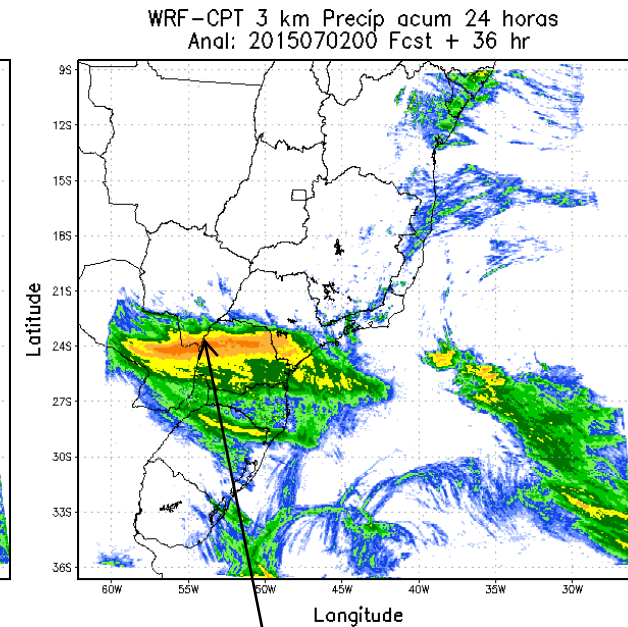
-3 dias



-2 dias



-1 dia



12Z03JUL15

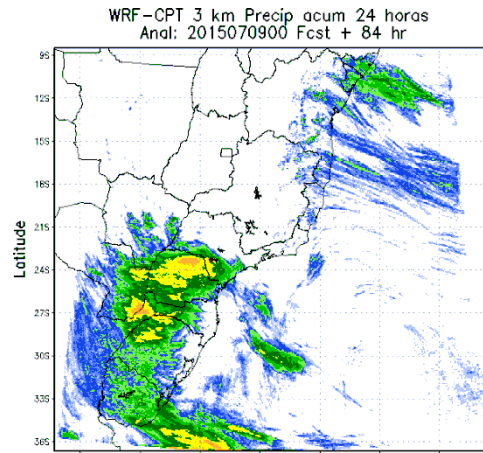


Prec 24hr [mm]

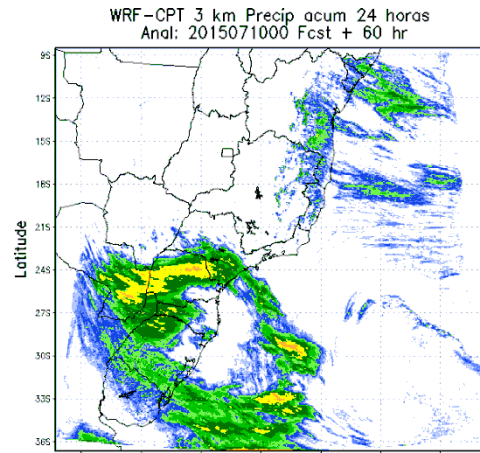
Fernandez et al. 2015

# WRF-CPT 03km

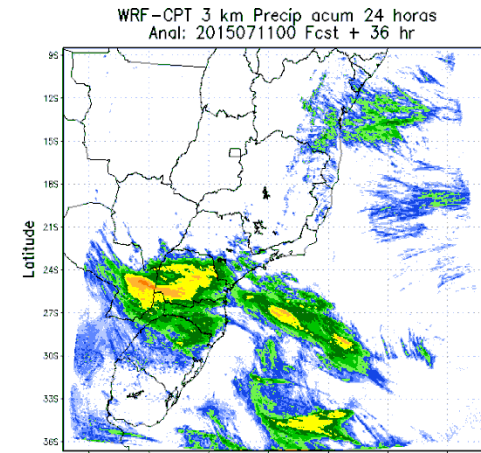
-3 dias



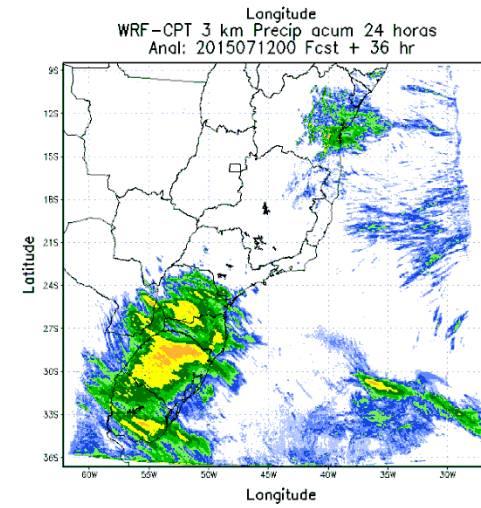
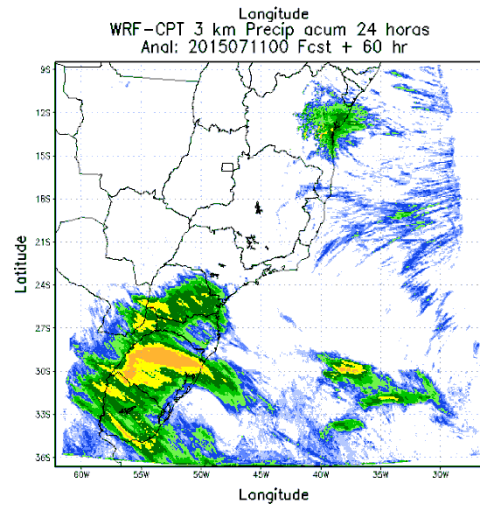
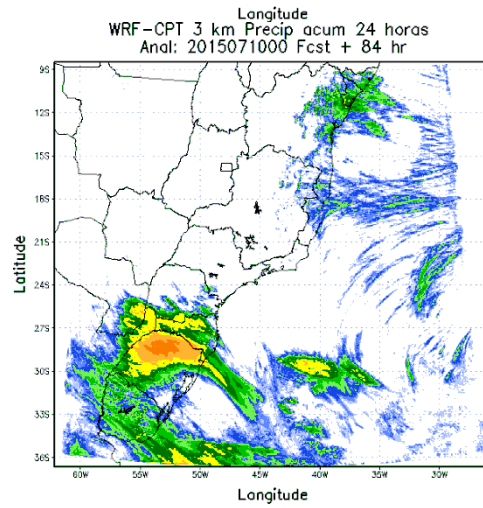
-2 dias



-1 dia



12Z12JUL15



12Z13JUL15



[mm]  
Fernandez et al. 2015



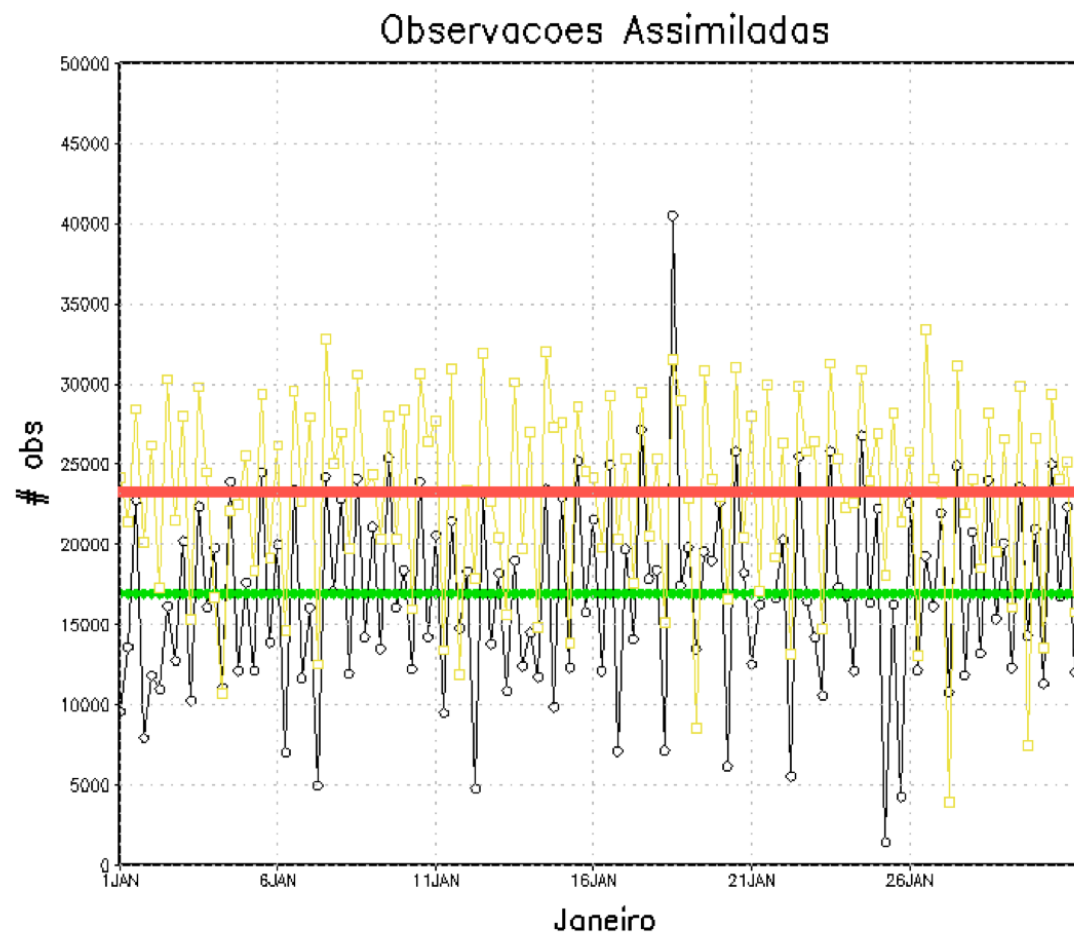
# Assimilação de dados



$$X_i^a = X_i^b + K [y - H X_i^b]$$

- Fontes e controle de qualidade, esquemas de análise objetiva.
- Introdução a métodos avançados de assimilação.
- Inicialização dinâmica e física

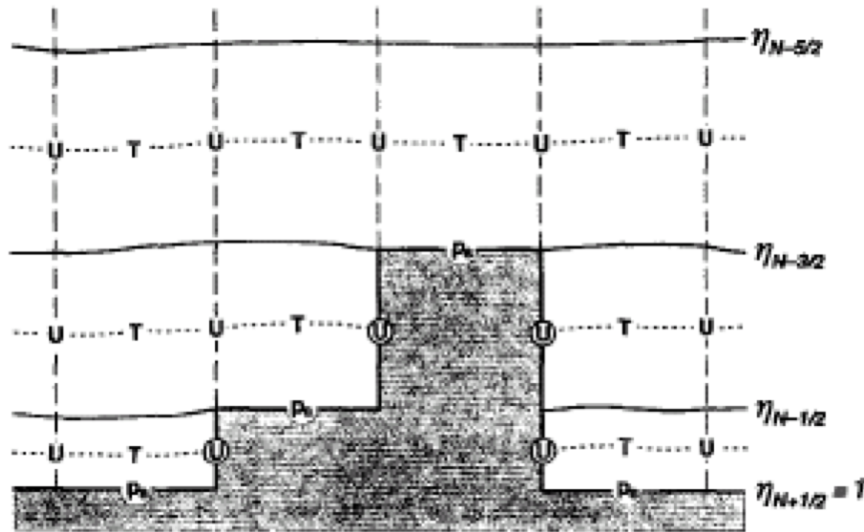
# Assimilação de dados



**Figura 1** Total de observações utilizadas por ciclo de assimilação durante janeiro de 2003 (linha preta) e 2004 (linha amarela) para a região sul-americana (área compreendida entre 100W e 10W e 60S e 20N). Frequência temporal de 6 horas.

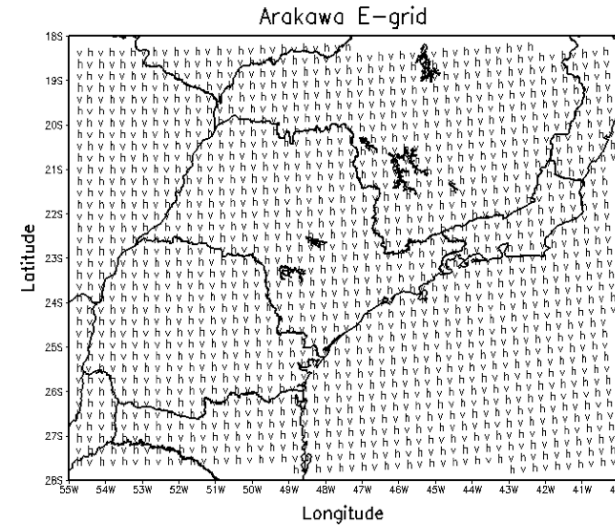
# Assimilação de dados

## Vertical Grid



a)

## Horizontal grid

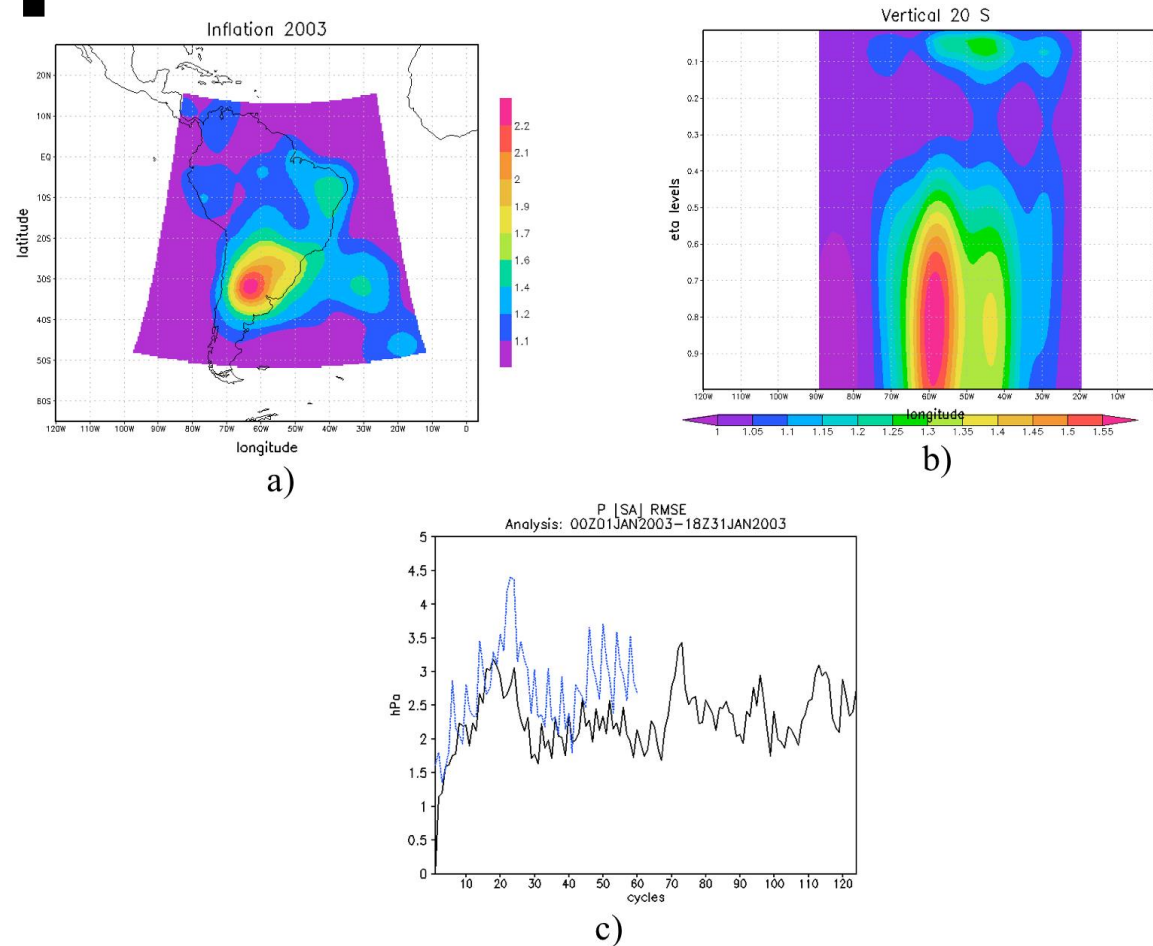


b)

**Figura 2** Disposição das variáveis no modelo ETA: a) vertical (Black, 1994) e b) horizontal (por exemplo, sobre o Sudeste do Brasil).

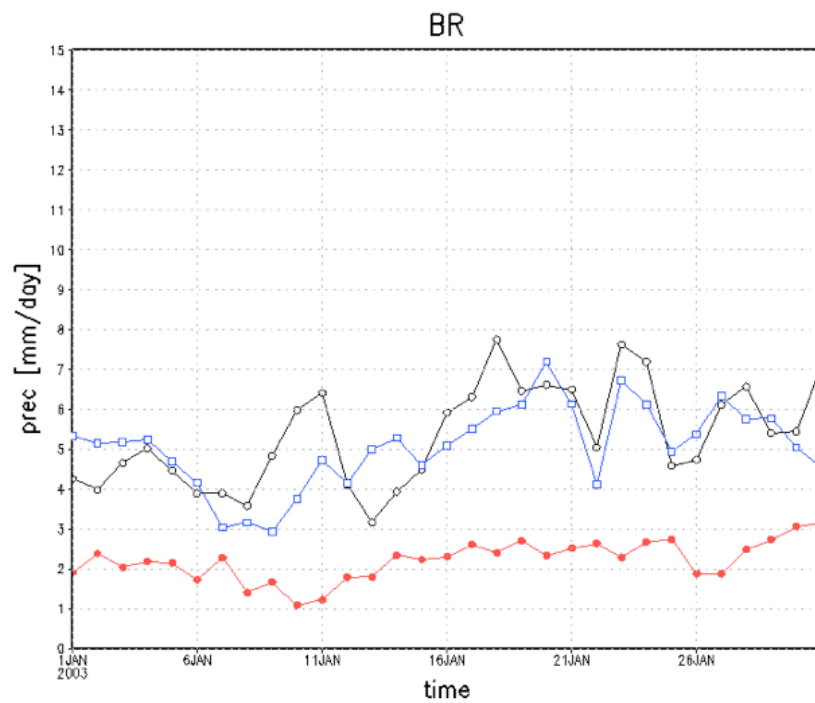
# Assimilação de dados

## Data Interpolation

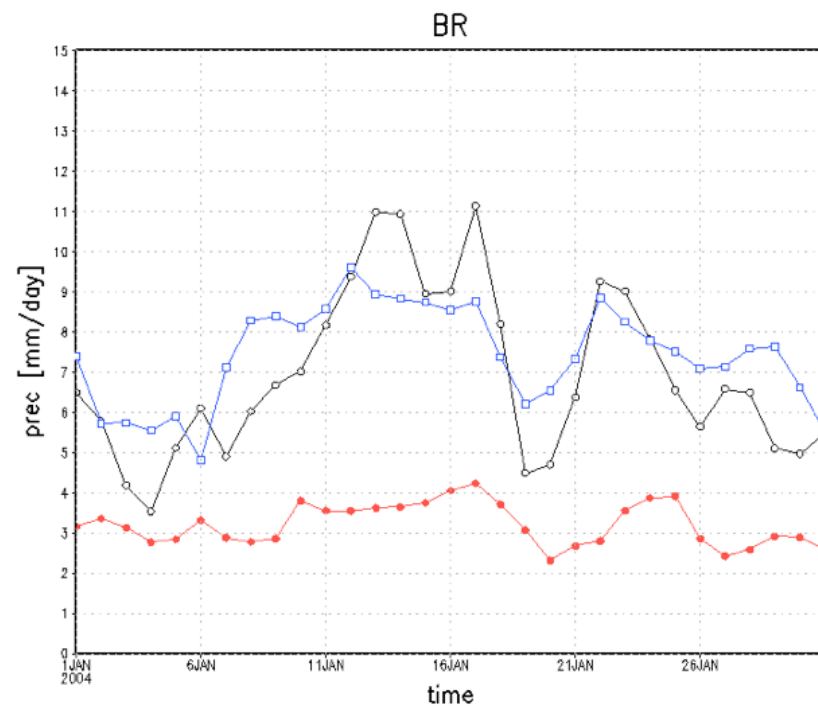


**Figura 11** Inflação adaptativa para o período de janeiro de 2003: a) horizontal e b) vertical. c) serie temporal do RMS da pressão a superfície para o mês de janeiro de 2003: Inflação fixa (linha azul) e adaptativa (linha continua).

# Tipo de Software de Assimilação de dados



a)



b)

**Figura 14:** Series temporais de precipitação acumulada diária para janeiro de a) 2003 e b) 2004. Linhas preta (obs), vermelha (RPSAS) e azul (RLETKF).

# Comportamento Caótico da Atmosfera

---

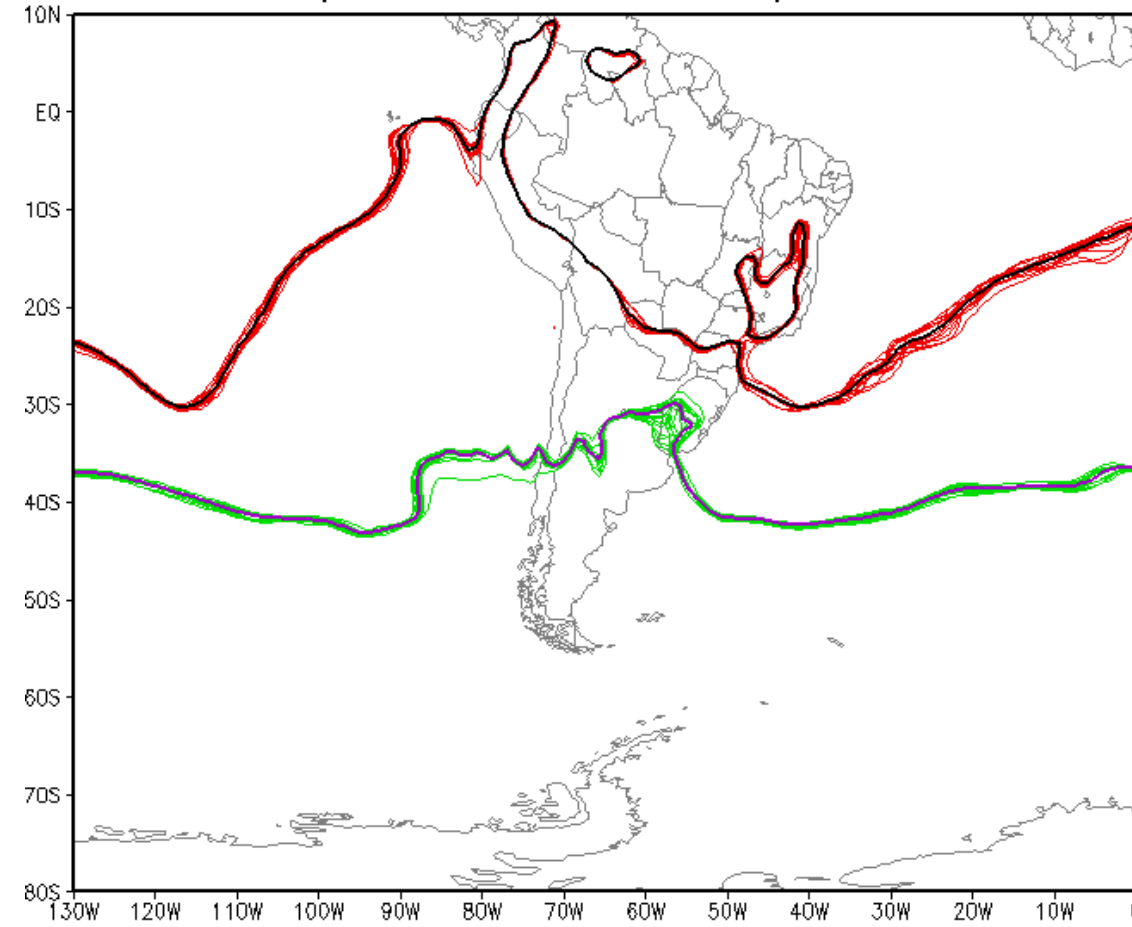
- Conceitos fundamentais de sistemas caóticos e previsibilidade atmosférica
- Previsão por conjuntos operacional e de pesquisa
- Previsão sazonal (climática)
- Projeções do clima futuro

# Ensemble

CPTEC/INPE/MCT - PREVISAO DE TEMPO GLOBAL POR ENSEMBLE - T126L28

Diagrama "Spagueti" - Temperatura (C) (1000 hPa)

Previsao a partir de: 2004082100Z Valido para: 2004082200Z

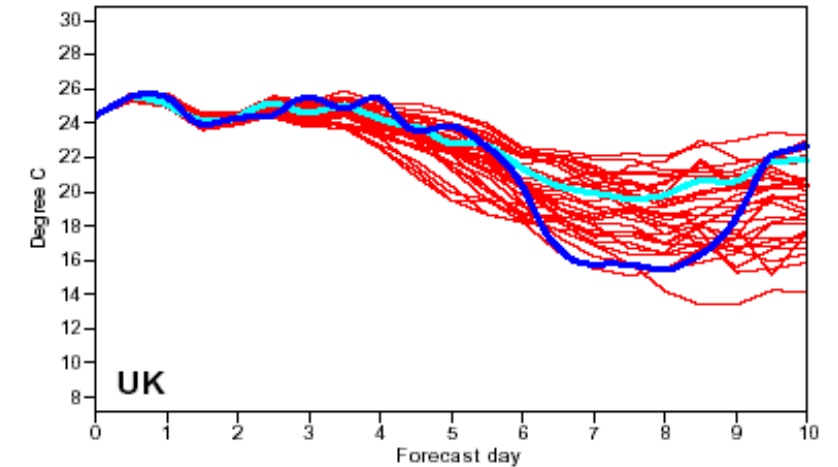


— Membros do Ensemble (20.0 graus) — Ensemble Médio (20.0 graus)  
— Membros do Ensemble (10.0 graus) — Ensemble Médio (10.0 graus)

ECMWF ensemble forecast - Air temperature

Date: 26/06/1995 London Lat: 51.5 Long: 0

— Control — Analysis — Ensemble



ECMWF ensemble forecast - Air temperature

Date: 26/06/1994 London Lat: 51.5 Long: 0

— Control — Analysis — Ensemble

