

# Previsão numérica de vento ajustada por redes neurais artificiais: Experimentos para o Nordeste do Brasil

**André Rodrigues Gonçalves**

Tecnologista

Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia



# LABREN

## Onde estamos dentro do INPE?



**Centro de Ciência do Sistema Terrestre**  
(São José dos Campos - SP)



**Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos**  
(Cachoeira Paulista - SP)

# LABREN : quem somos?

O Laboratório de Estudos de Modelagem de Recursos Renováveis de Energia (LABREN) realiza atividades de pesquisa e ensino de **meteorologia aplicada ao setor de energia** e sobre os impactos das energias no sistema climático, através de atividades de modelagem computacional e de dados observacionais

**Efetivo:** 13 pessoas (4 permanentes + 9 bolsistas/alunos)

## Linhas de pesquisa

- Clima e variabilidade do recurso solar e eólico
- Previsão de curto prazo de geração solar e eólica
- Energia e mudanças ambientais globais
- Observação, caracterização e modelagem dos recursos solar e eólico



[labren.ccst.inpe.br](http://labren.ccst.inpe.br)





# Rede SONDA

## Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

Implementação de infra-estrutura física e de recursos humanos destinada a levantar e melhorar a base de dados dos recursos de energia solar e eólica no Brasil

Dados voltados para quantificação dos recursos solar e eólico no território brasileiro, aplicados na validação de modelos, estudos de perfis de vento, dentre outros





# Rede SONDA



## Estações próprias

Estação	Tipo	UF	Altitude (m)
Belo Jardim	A	PE	718
Brasília	SA	DF	1023
Cachoeira Paulista	S	SP	574
Caicó	S	RN	176
Campo Grande	S	MS	677
Cuiabá	S	MT	185
Ourinhos	SA	SP	446
Palmas	S	TO	216
Petrolina	SA	PE	387
Rolim de Moura	S	RO	252
São Luiz	S	MA	40
São João do Cariri	A	PB	486
São Martinho da Serra	SA	RS	489
Triunfo	A	PE	1123

## Estações parceiras

Estação	Tipo	UF	Altitude (m)
Chapecó	S	SC	700
Curitiba	S	PR	891
Florianópolis	S	SC	31
Joinville	S	SC	48
Natal	S	RN	58
Sombrio	S	SC	15

Totalizando 20 estações de coleta







# Estações anemométricas



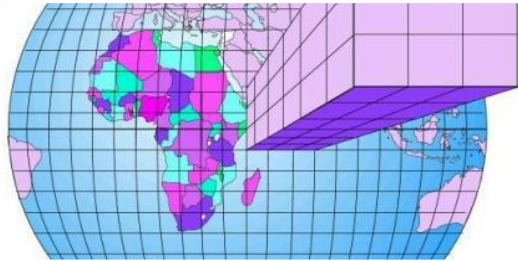
# Objetivos

**Apresentar metodologia para o refinamento da previsão de vento de modelos de PNT utilizando redes neurais artificiais**

- Quais dados de entrada utilizar?
- Que tratamento aplicar nos dados?
- Como configurar a rede neural?
- Testes de sensibilidade
- Ganhos em relação a previsão bruta

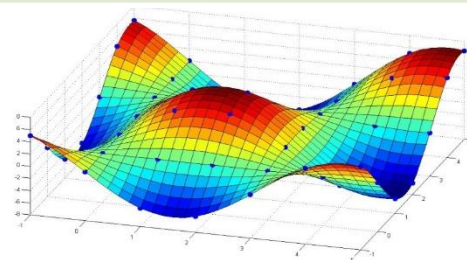


# Possíveis abordagens



## Modelagem física

- Generalista
- Dispensa medições
- Maior custo computacional
- Processos menos complexos

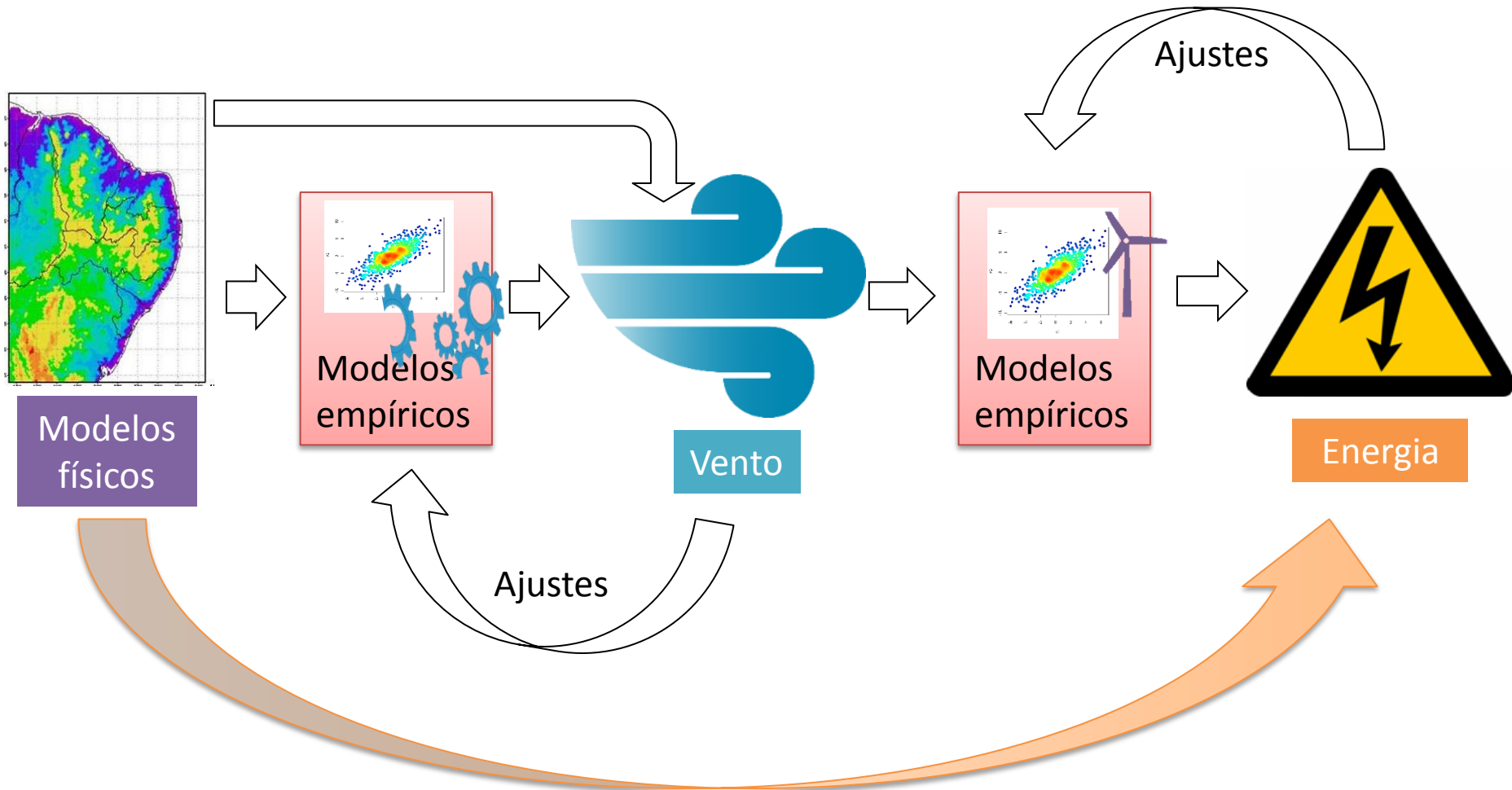


## Modelagem estatística

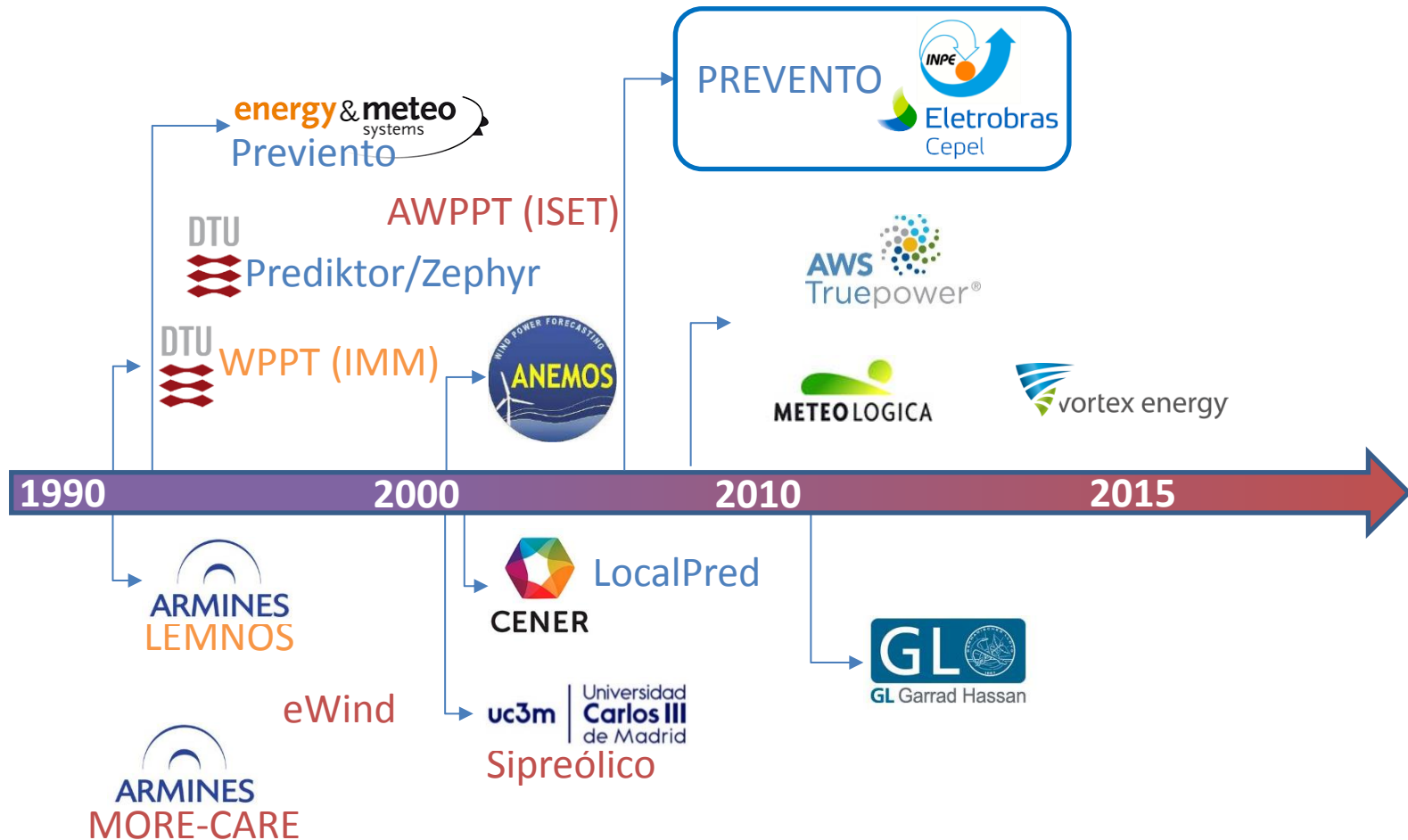
- Pouco generalista
- Necessita medições
- Menor custo computacional
- Processos mais complexos
- Perda de consistência física



# Previsão de Vento vs. Energia



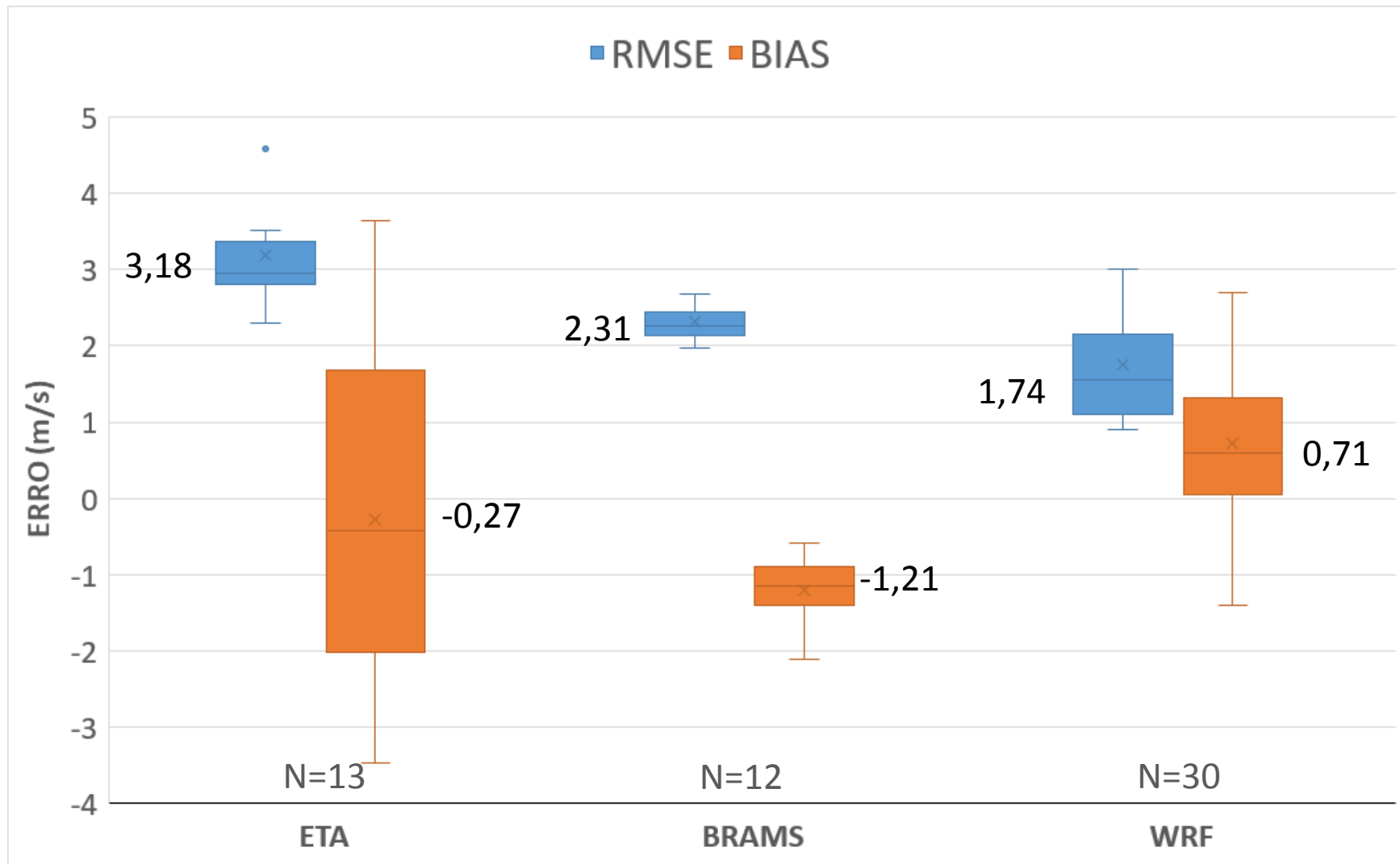
# Histórico



# A Previsão Numérica de Vento

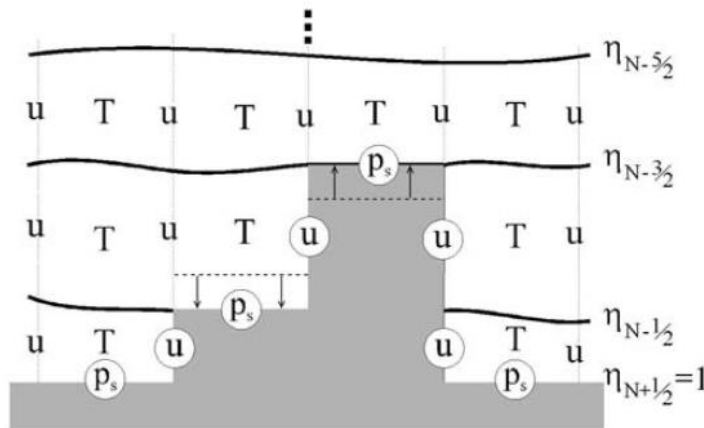
- Modelos de mesoescala utilizados no LABREN
  - **ETA** (operacional CPTEC)
    - Testes de sensibilidade (Lyra 2007, Pinto 2017)
    - Ajuste por redes neurais (Gonçalves, 2011)
  - **BRAMS** (operacional CPTEC)
    - Testes de sensibilidade (Pinto, 2010)
    - Mapeamento (Cepel, 2017)
  - **WRF** (pesquisa)
    - Testes de sensibilidade (Pinto, 2017)

# A Previsão Numérica de Vento



# A Previsão Numérica de Vento

- A CLS no modelo Eta
  - Comprimento de Rugosidade de Momentum e Calor
  - Funções de Estabilidade de Paulson (1970)
  - Coeficientes definidos por Sun & Mahrt (1995)
  - Comprimento de Obhukhov (L)



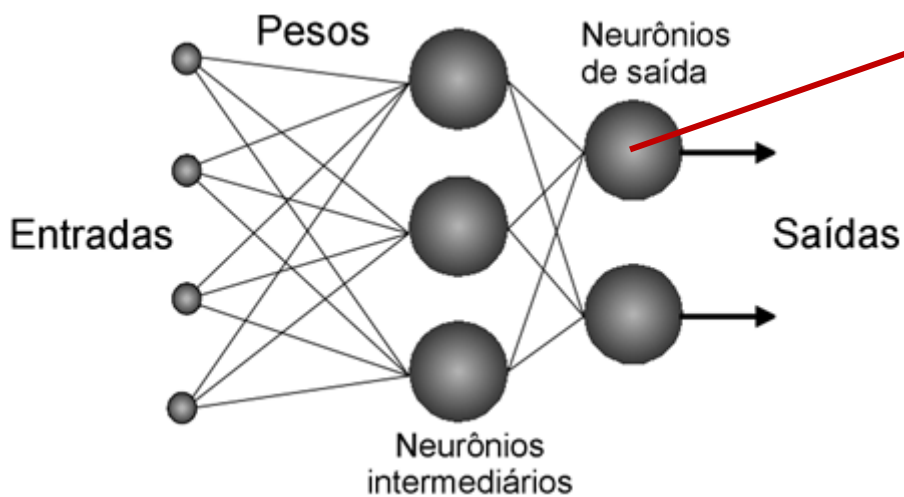
Adaptado de Ničković et al. (1998)

$$\eta = \left( \frac{p - p_T}{p_{sfc} - p_T} \right) \cdot \left( \frac{p_{ref}(z_{sfc}) - p_T}{p_{ref}(0) - p_T} \right)$$

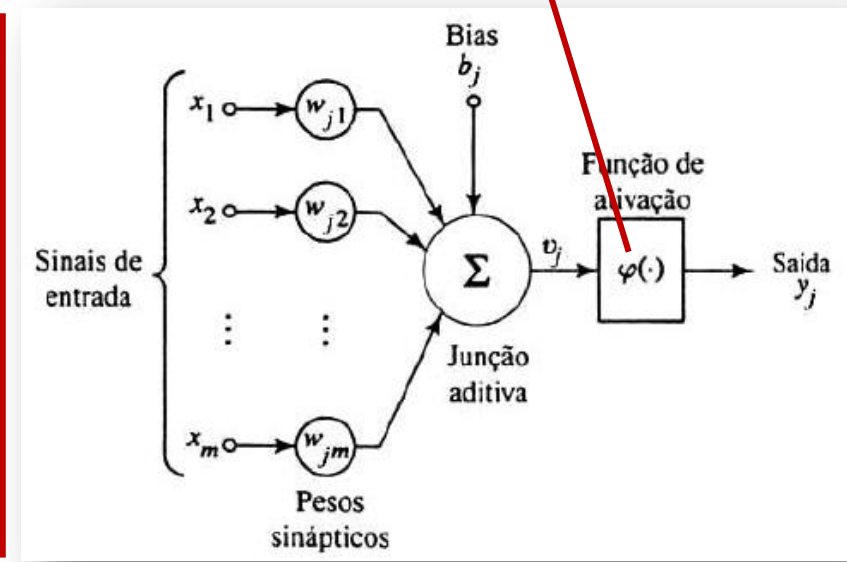
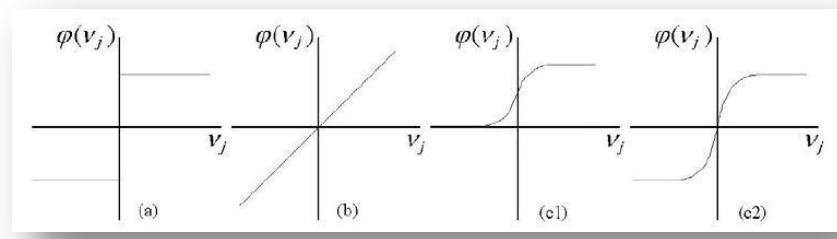


# Redes Neurais Artificiais

- Principais Desafios
  - Definição preditores
  - Pré-processamento dos dados
  - Topologia
  - Algoritmos de Treinamento



Topologia de uma rede neural



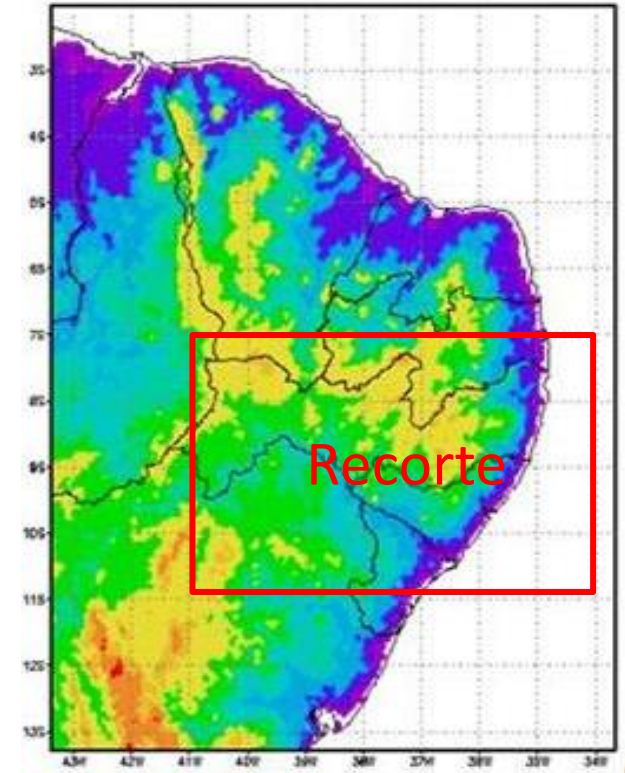
Modelo de perceptron  
Fonte: Adaptado de Haykin (2001)



# Dados de entrada do modelo

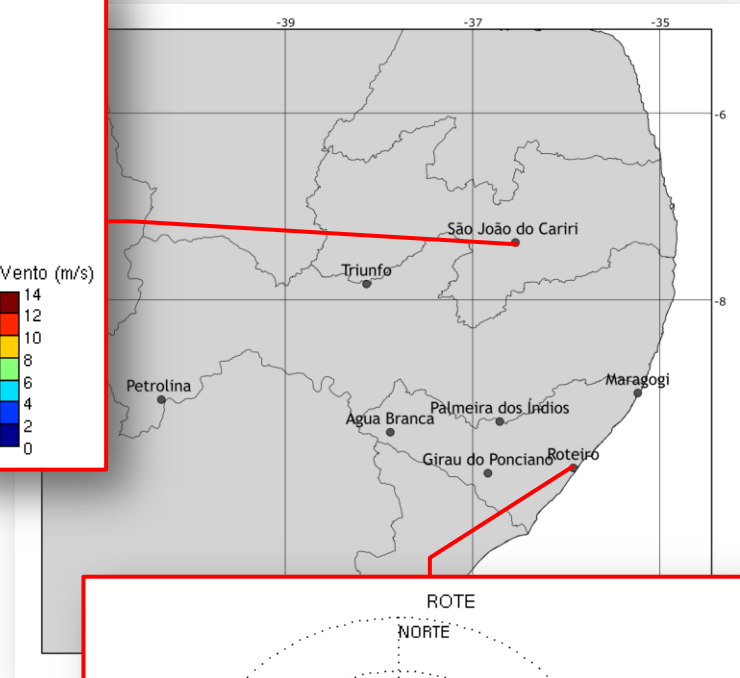
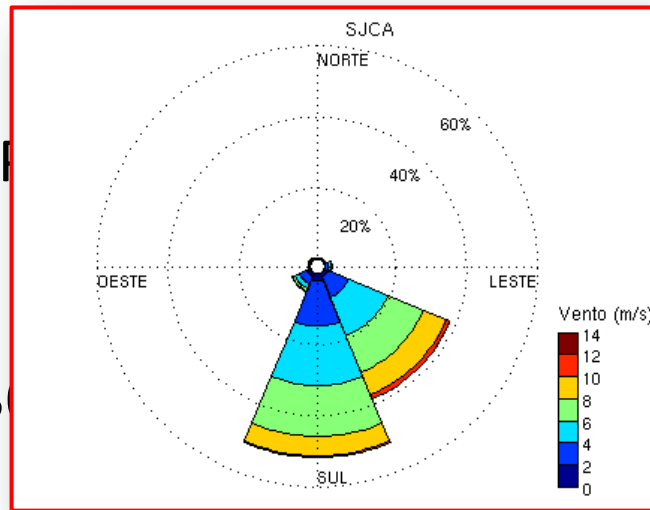
## Do Modelo Eta

- PREVENTO - Projeto CPTEC / CEPEL
- Maio/2005 e Abril/2008
- Previsão: +72 horas

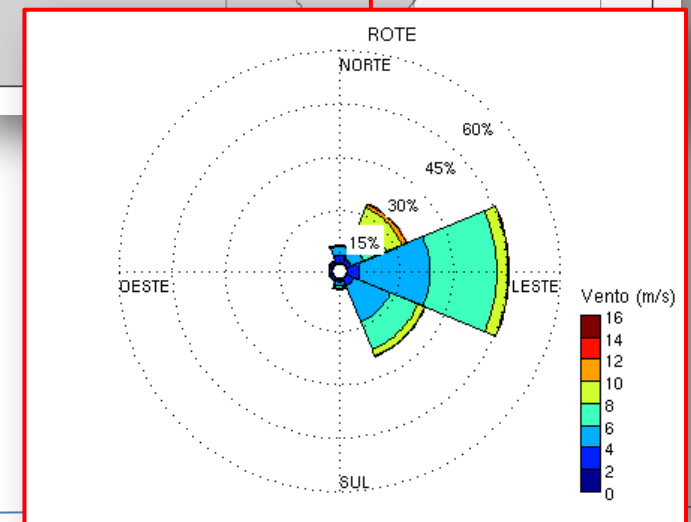


# Dados observados de vento

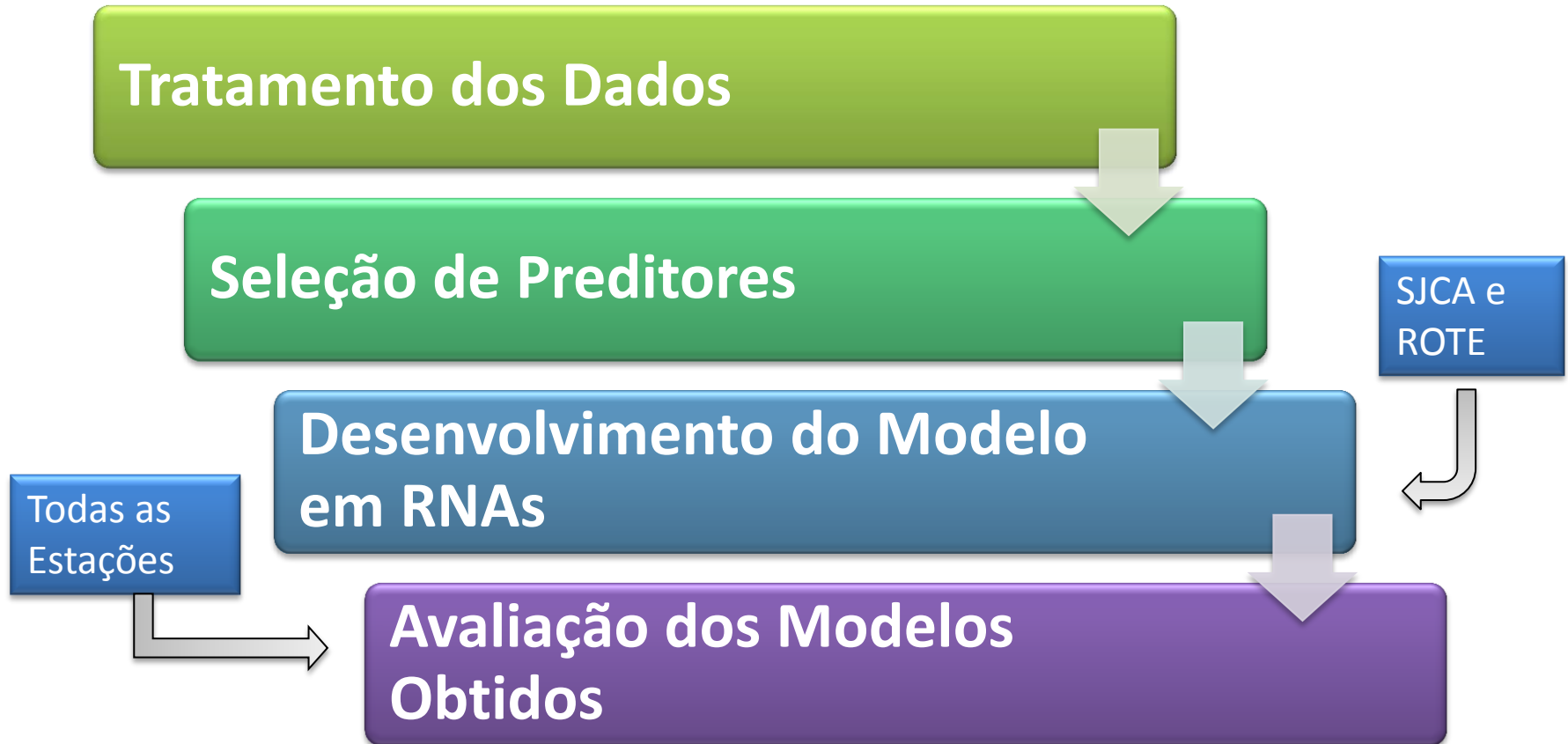
- 8 estações
  - 3 SONDA – I
  - 5 Alagoas – GIRP, AGUB
  - 10 min => 3



Nro	ESTAÇÃO	SIGLA	NÍVEIS DE MEDIÇÃO
1	Petrolina - PE	PETR	10/25/50 m
2	São João do Cariri - PB	SJCA	25/50 m
3	Triunfo - PE	TRFO	25/50 m
4	Roteiro - AL	ROTE	30/50 m
5	Maragogi - AL	MAGI	30/50 m
6	Girau do Ponciano - AL	GIRP	30/50 m
7	Agua Branca - AL	AGUB	30/50 m
8	Palmeira dos Índios- AL	PALM	30/70/100 m



# Etapas da modelagem por RNAs



# Tratamento dos Dados

- i. Eliminar valores espúrios
- ii. Adicionar variáveis (Ex: tendências)
- iii. Converter preditores em anomalias
- iv. Normalizar ou escalonar as variáveis

$$\phi_{gh} = \phi(t) - \phi(t - 1)$$

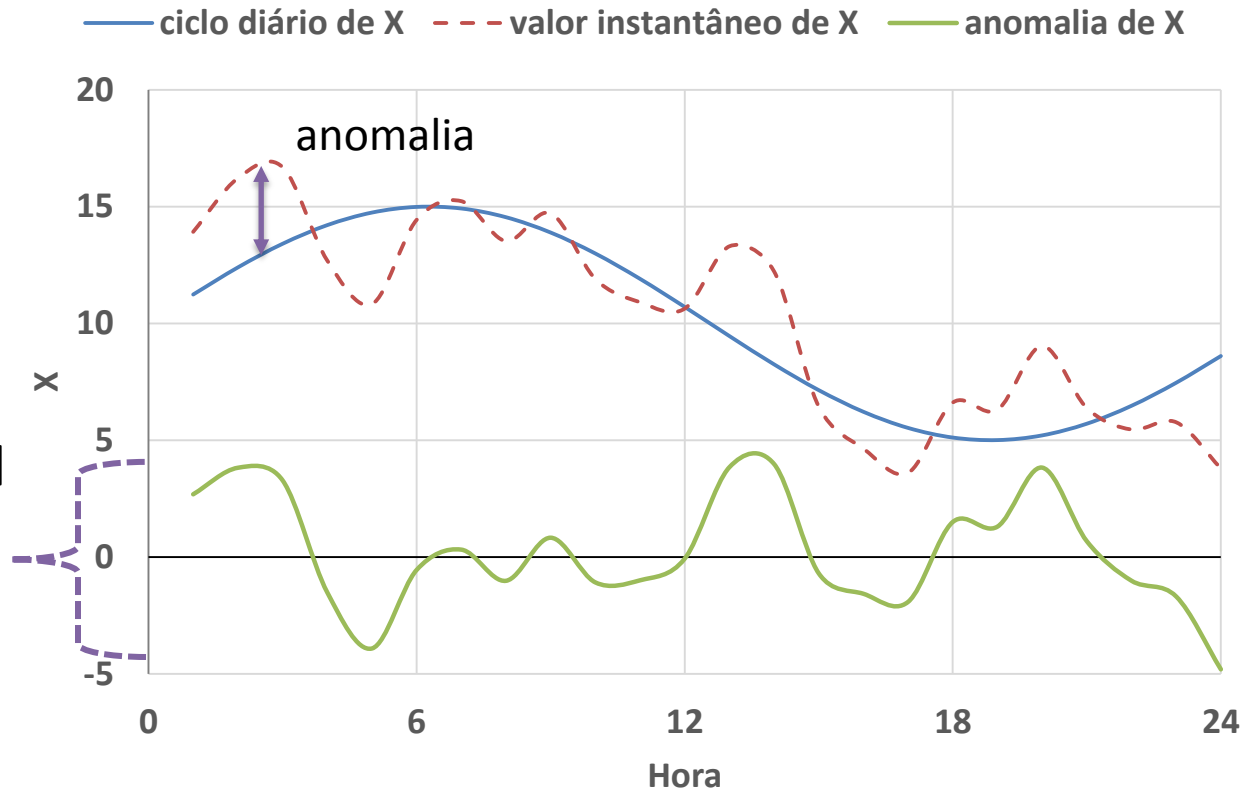
$$\phi_{gd} = \phi(t) - \phi(t - 24)$$





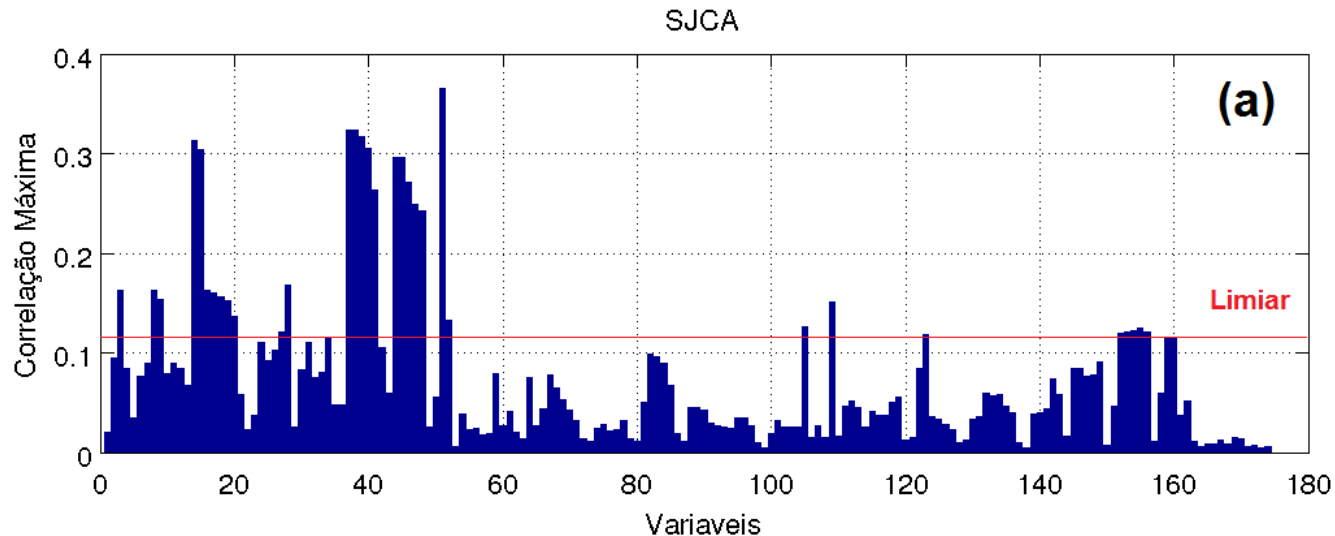
# Por quê anomalias?

- Para prever a climatologia basta a persistência



# Seleção de preditores

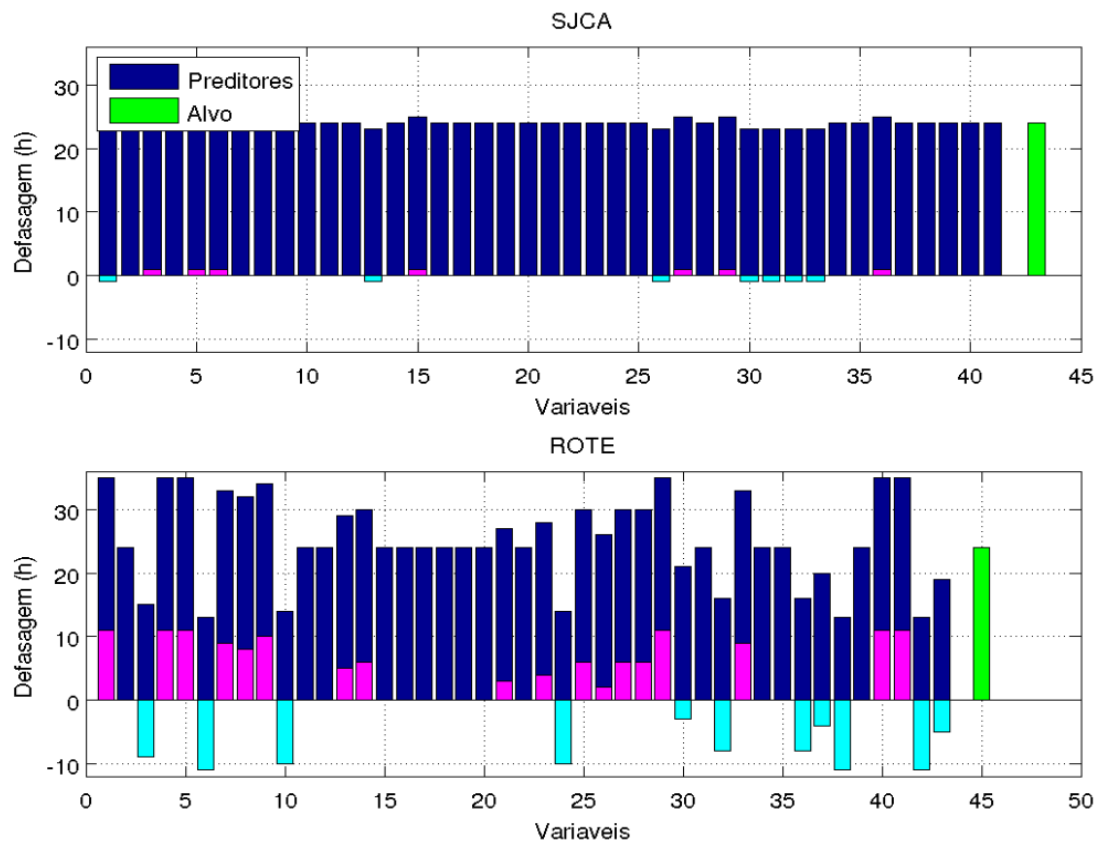
- Eliminar preditores redundantes (reg. stepwise)



Número Preditores	Lim_1	Lim_2	Lim_3	Lim_4	Lim_5	Lim_6	Lim_7	Lim_8
SJCA - Inicial	144	124	103	82	66	52	42	37
Após REGP	54	49	37	35	28	25	22	17
ROTE - Inicial	151	145	120	86	63	47	38	32
Após REGP	56	47	34	28	26	25	21	18

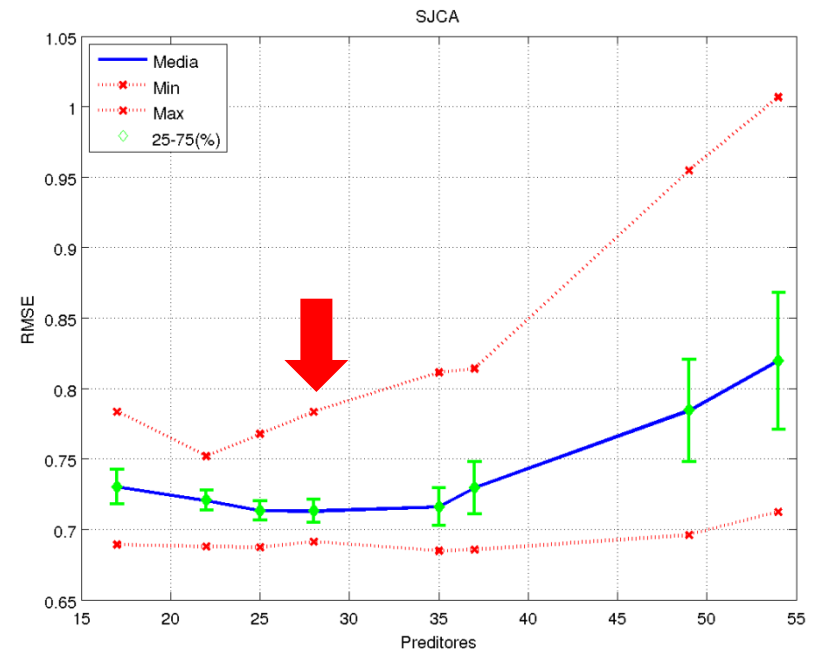
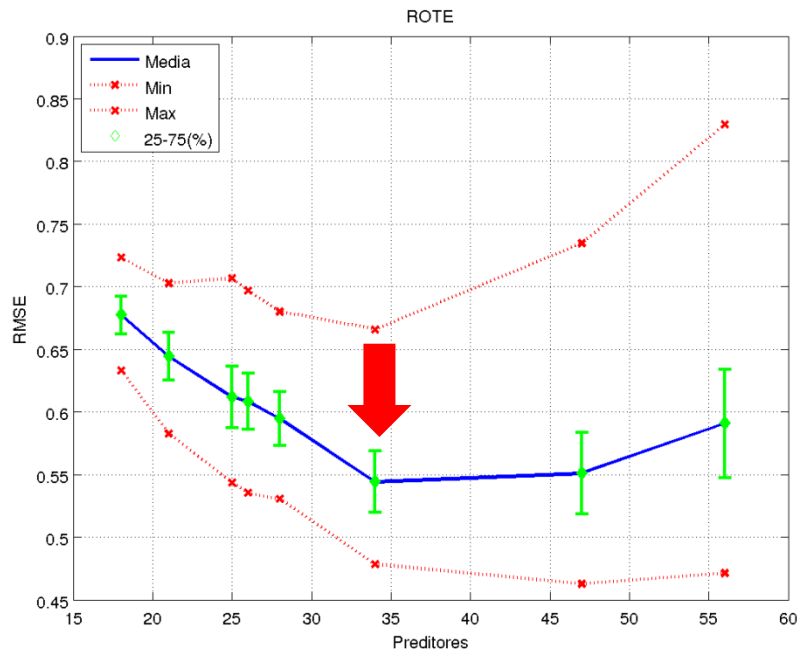
# Seleção de preditores

- Testar correlações para diferentes defasagens



# Seleção de preditores

- Testes KS para diferentes Conjuntos Preditores

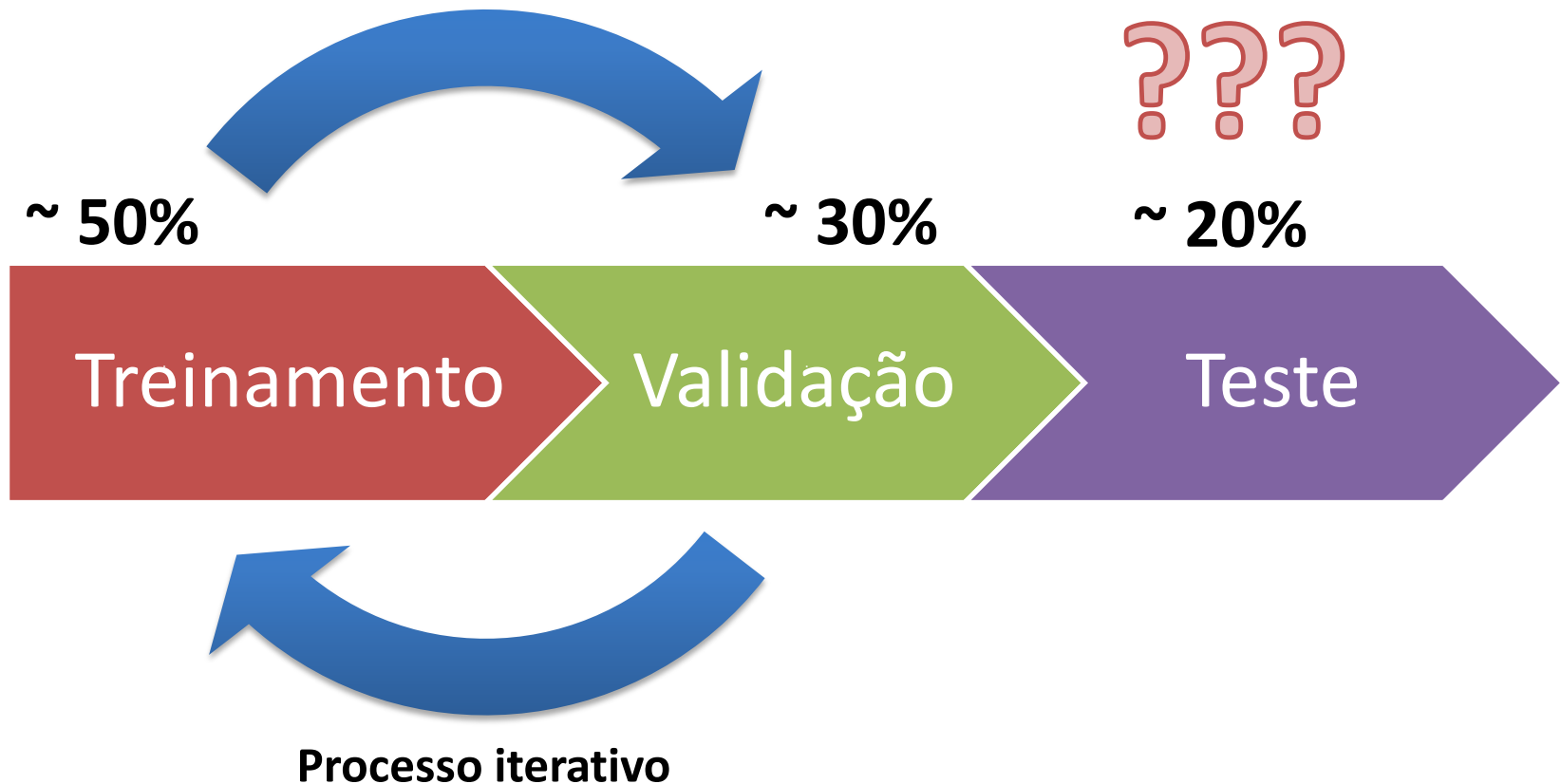


Ctrl	1/2	2/3	3/4	4/5	5/6	6/7	7/8
KS	1	1	1	1	1	0	0

Ctrl	1/2	2/3	3/4	4/5	5/6	6/7	7/8
KS	1	1	1	1	0	0	0

# Treinamento

A divisão do conjunto de dados é fundamental



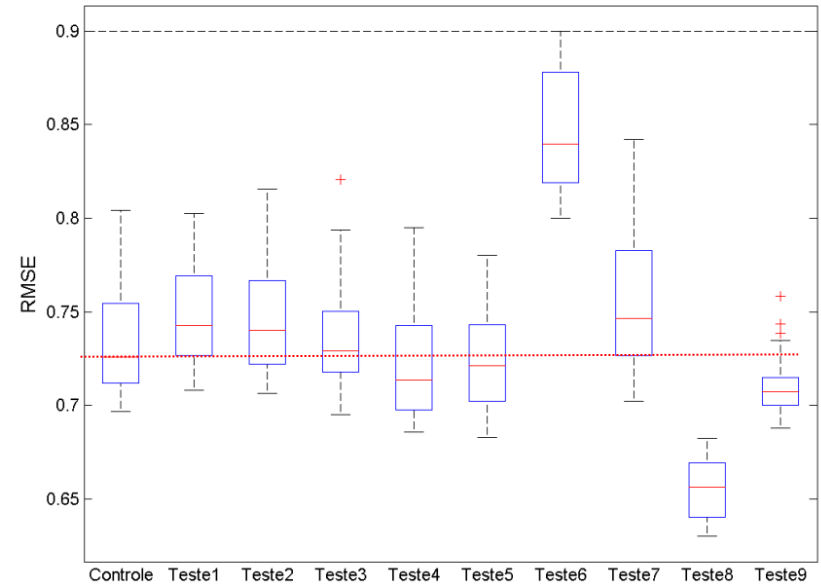
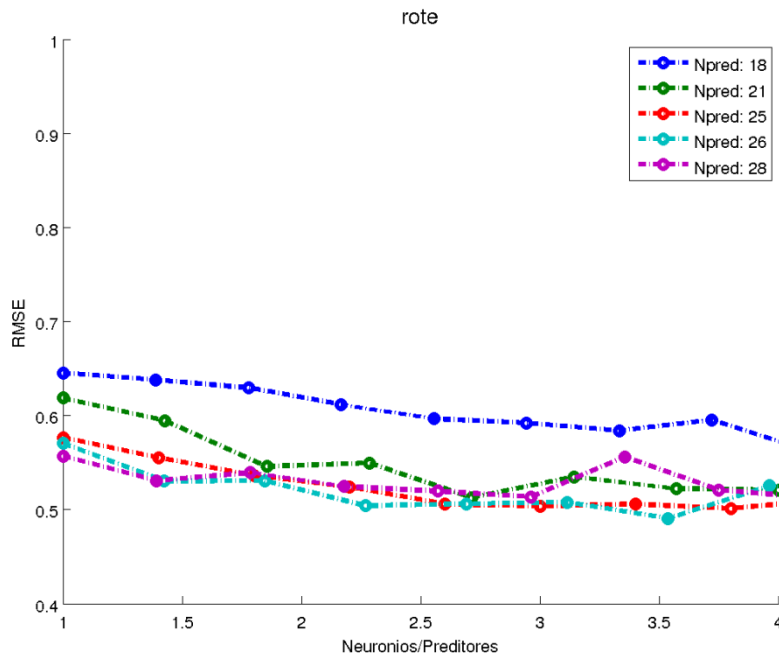


# Topologia da rede neural



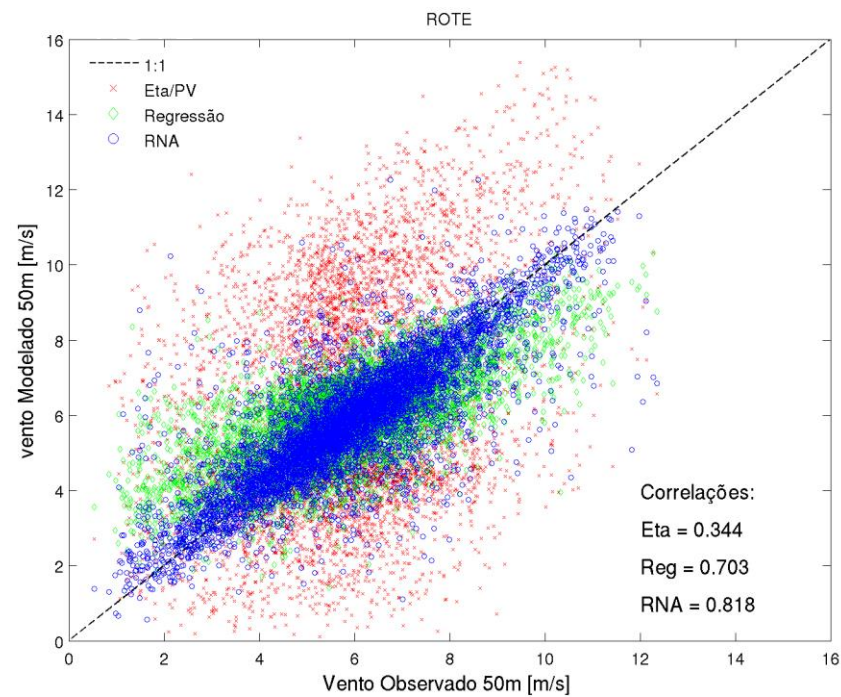
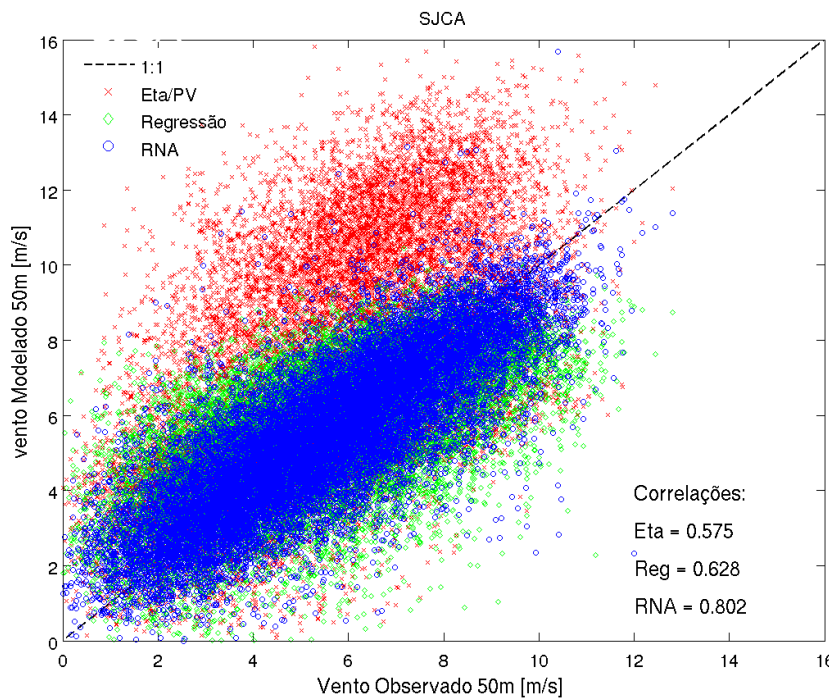
# Neurônios Ocultos e Testes Sensibilidade

- Testar camada oculta: 1 a 4 x Nro. Preditores
- Testes sensibilidade: 100 treinamentos



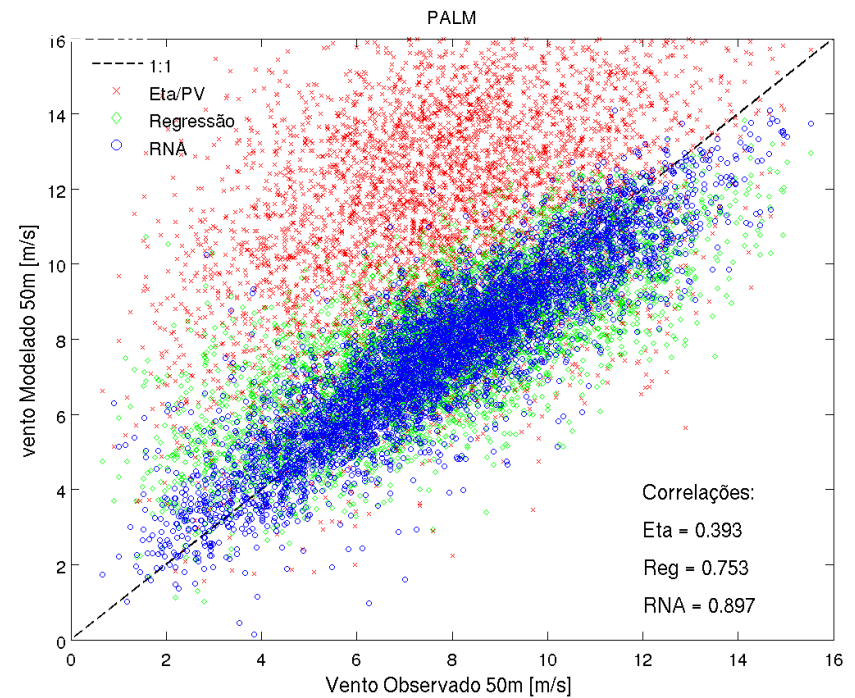
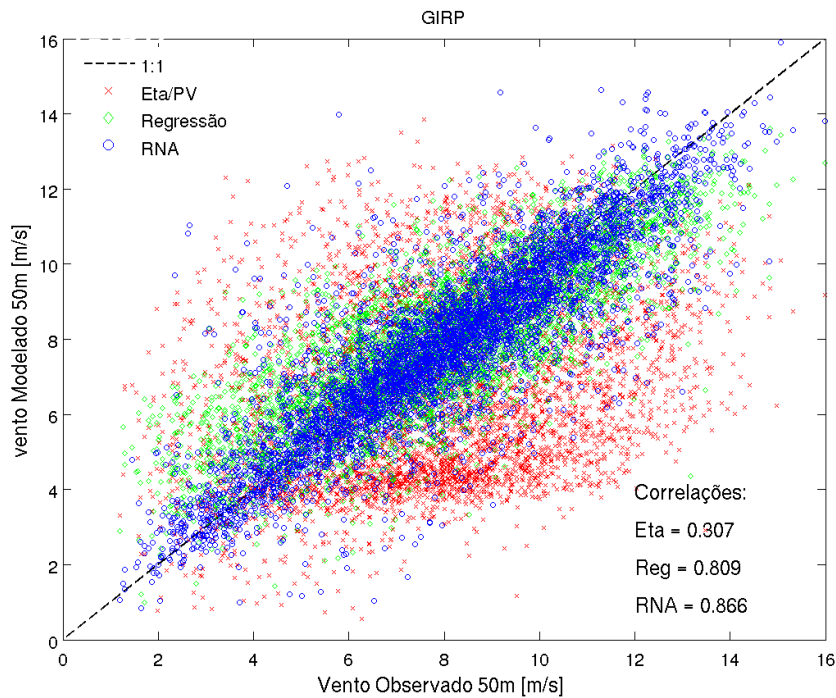
KS	0	0	0	1	1	0	0	1	1
----	---	---	---	---	---	---	---	---	---

# Resultados: Dispersões



(b)

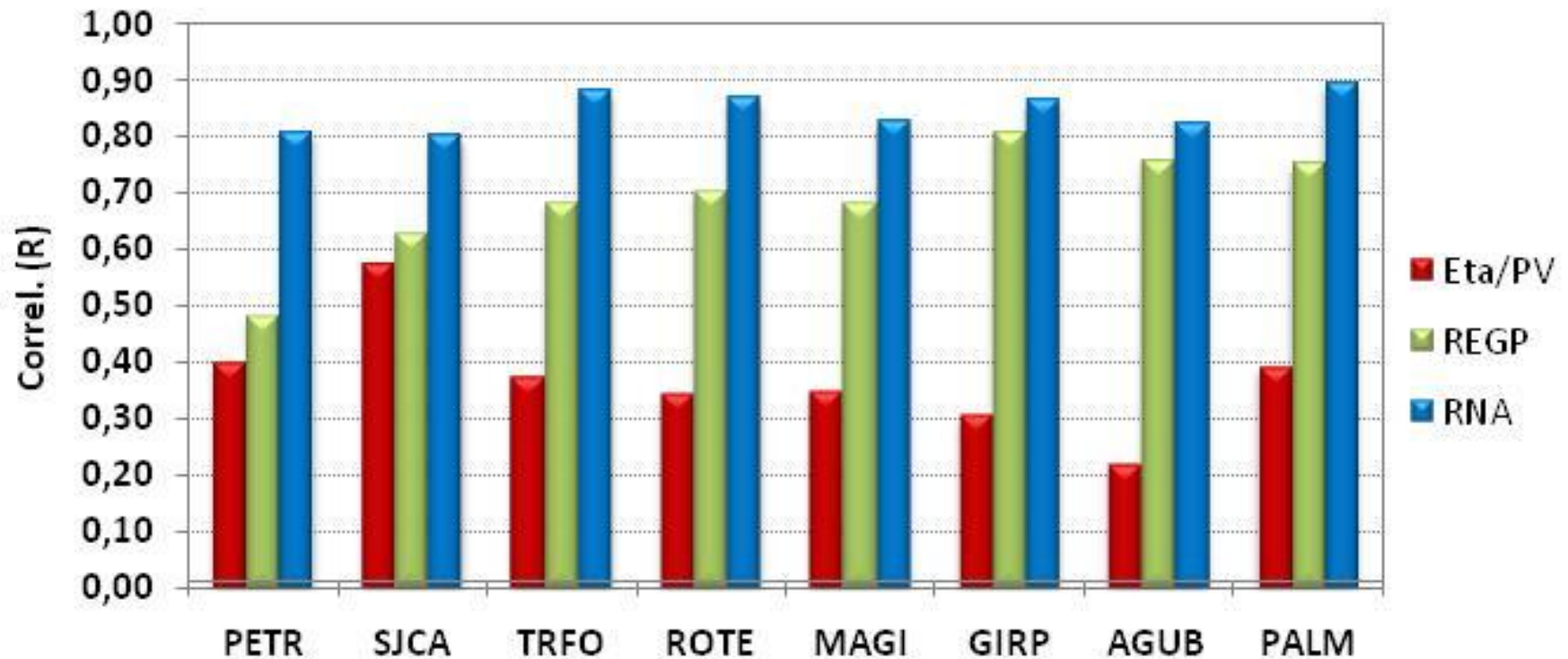
# Resultados: Dispersões



(f)

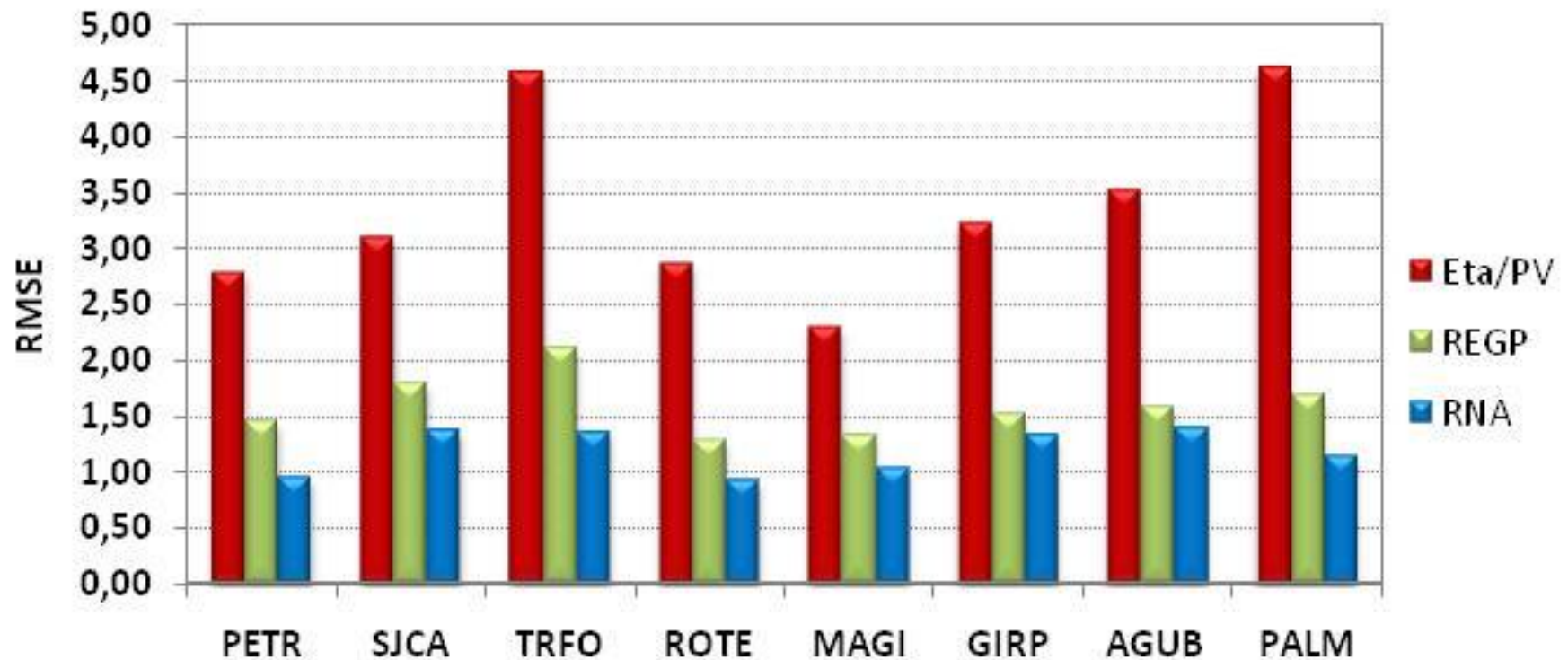
# Resultados - Correlações

- Correlações



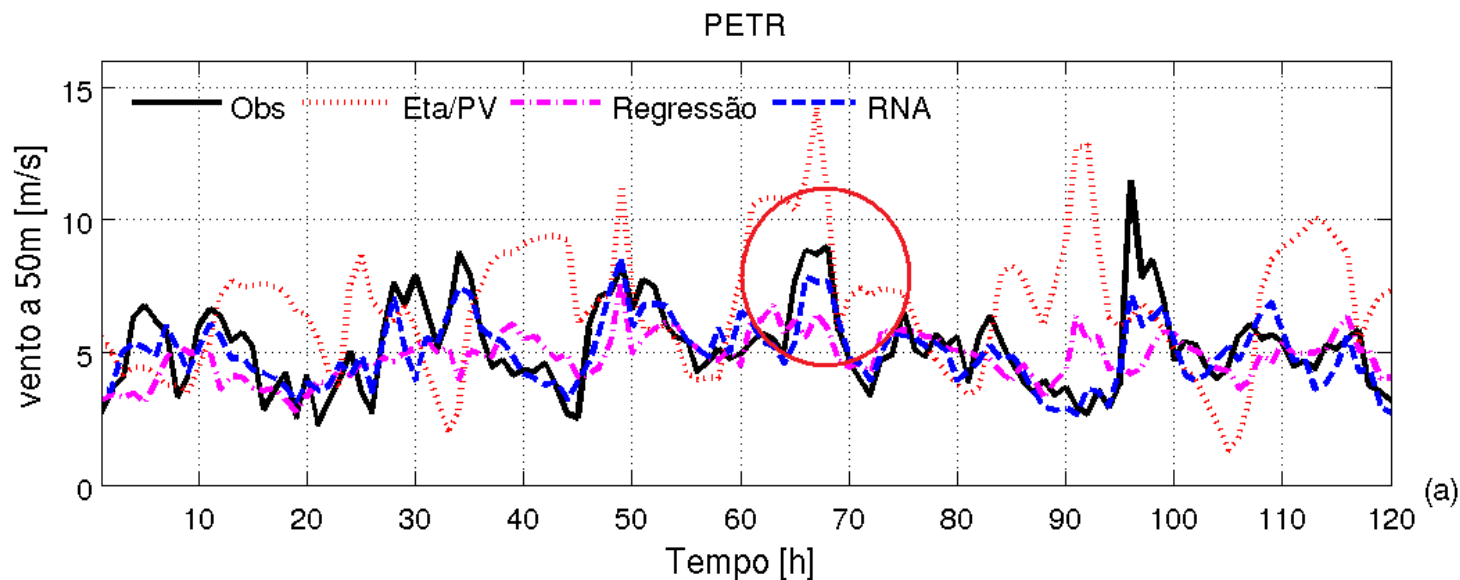
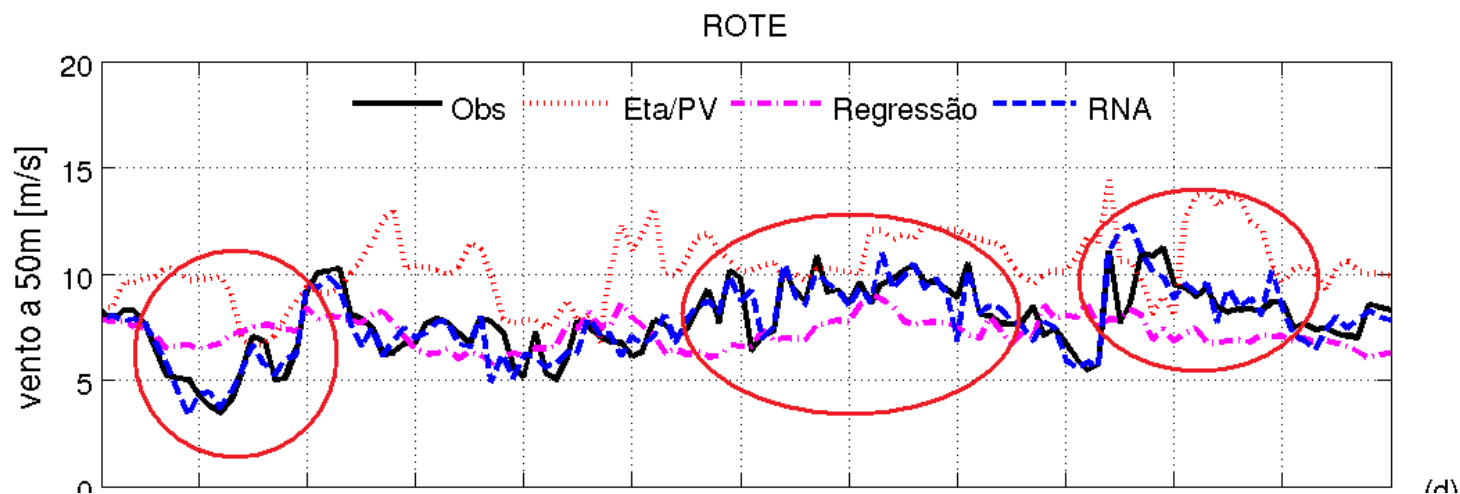
# Resultados - RMSE

- RMSE





# Resultados - Séries



# O modelo em RNA fornece alguma informação sobre os processos físicos representados?

- Preditores variados entre -10% e +10%
- Sensibilidade ( - / + / defasagem)

## SJCA

- umidade em altos níveis 200 hPa (-14,9% / +11,6% / +1 h) **Convecção profunda?**
- temperatura a 2 m (-6,5% / +6,0% / -1h) **Circulação Térmica?**
- vento meridional 10 m (6,7% / -6,9% / 0) **Cisalhamento do Vento ?**
- vento meridional 925 hPa (-4,0% / +4,0% / 0)

## ROTE

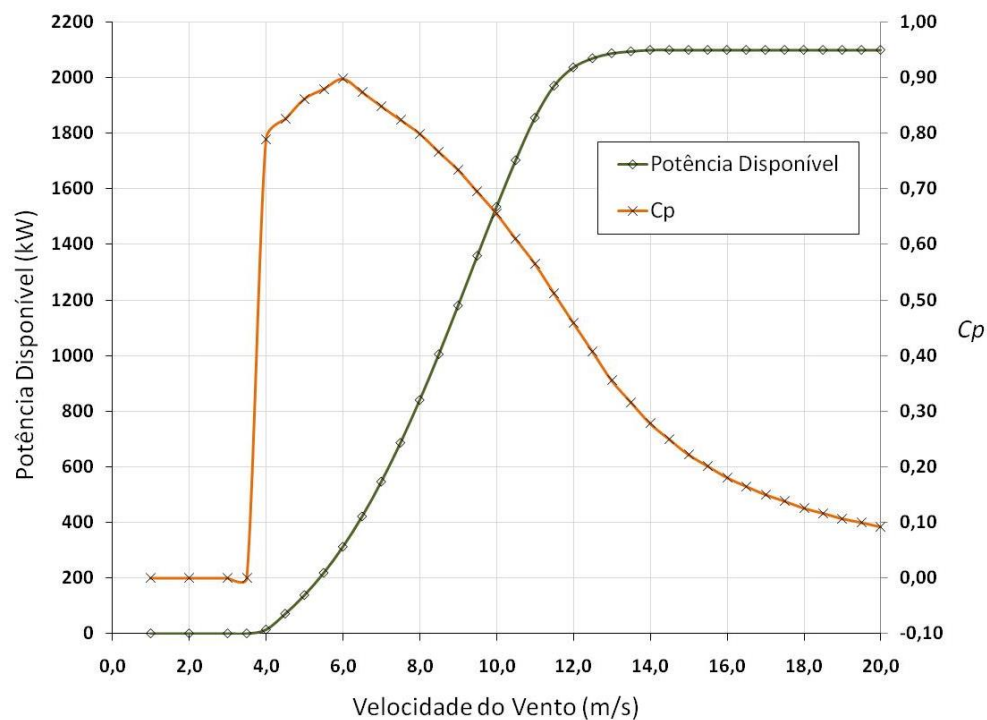
- cobertura de nuvens (-44,9% / 41,3% / +9 h) **VCANs, DOLs?**
- altura geopotencial na camada em 200 hPa e o vento (26,0% / -26,6% / 0 h) **ZCIT?**



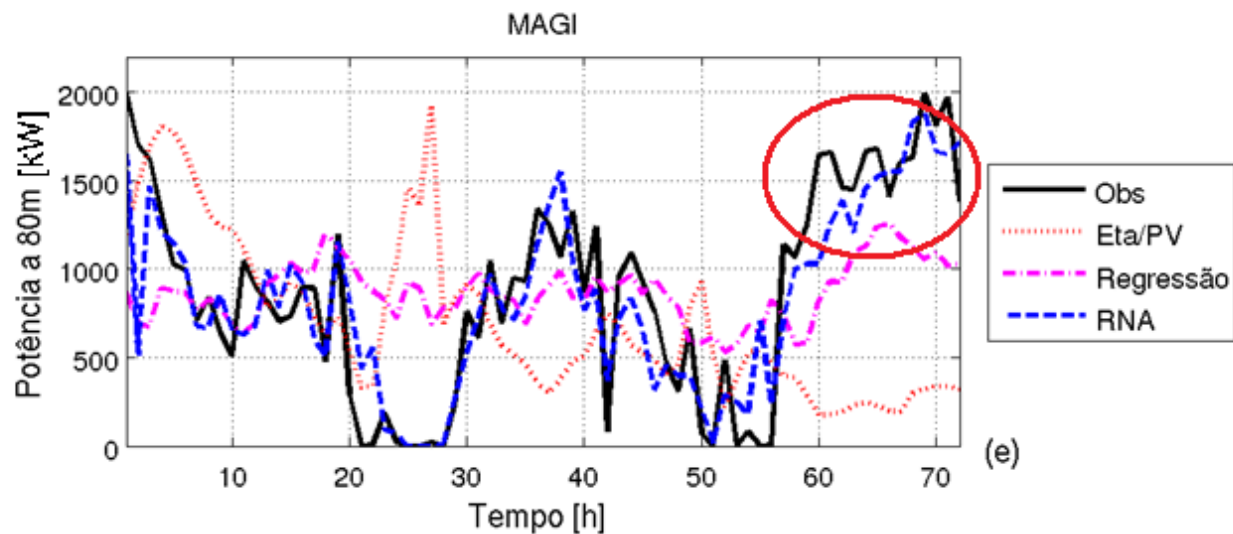
# Avaliação da Potência Eólica



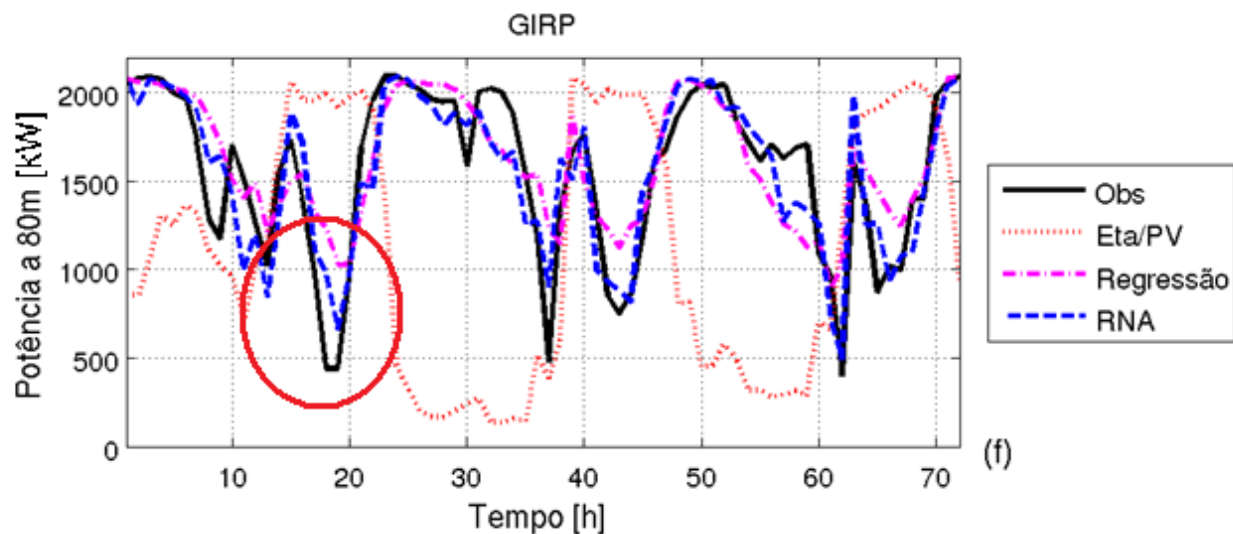
Aerogerador: 2,1 MW  
Altura Cubo: 80 m



# Avaliação da Potência Eólica



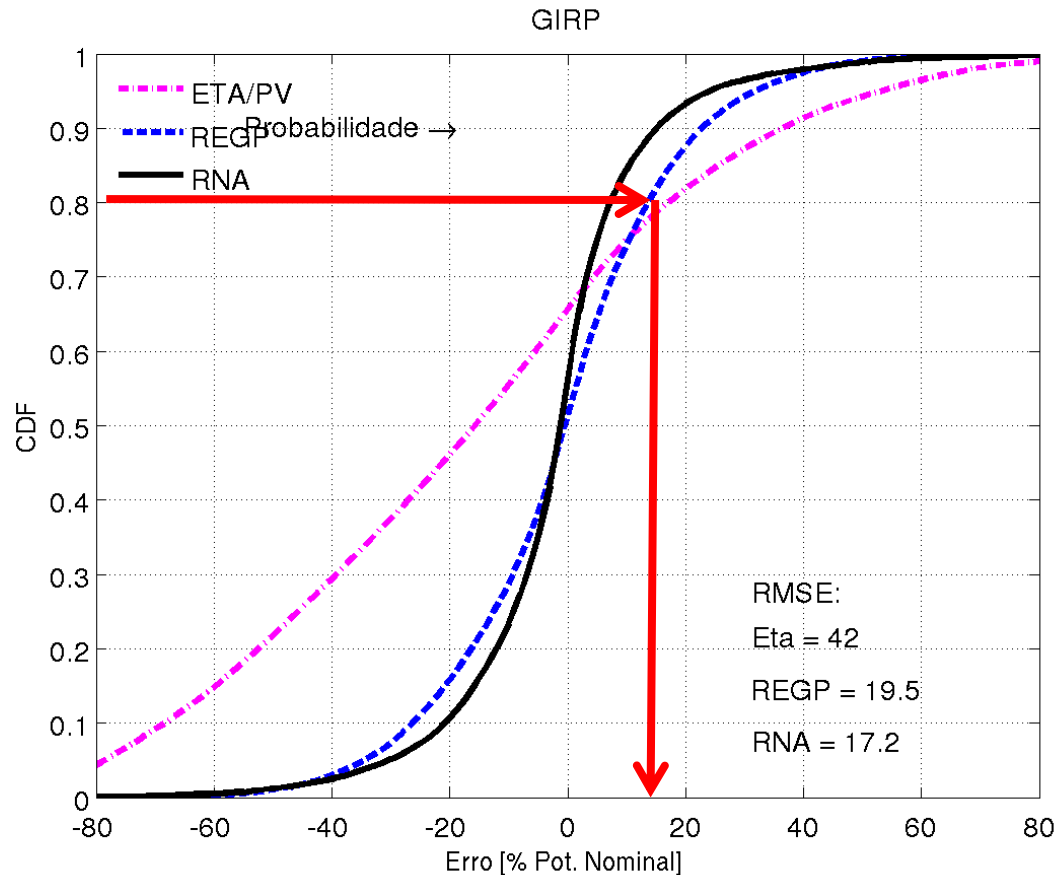
(e)



(f)

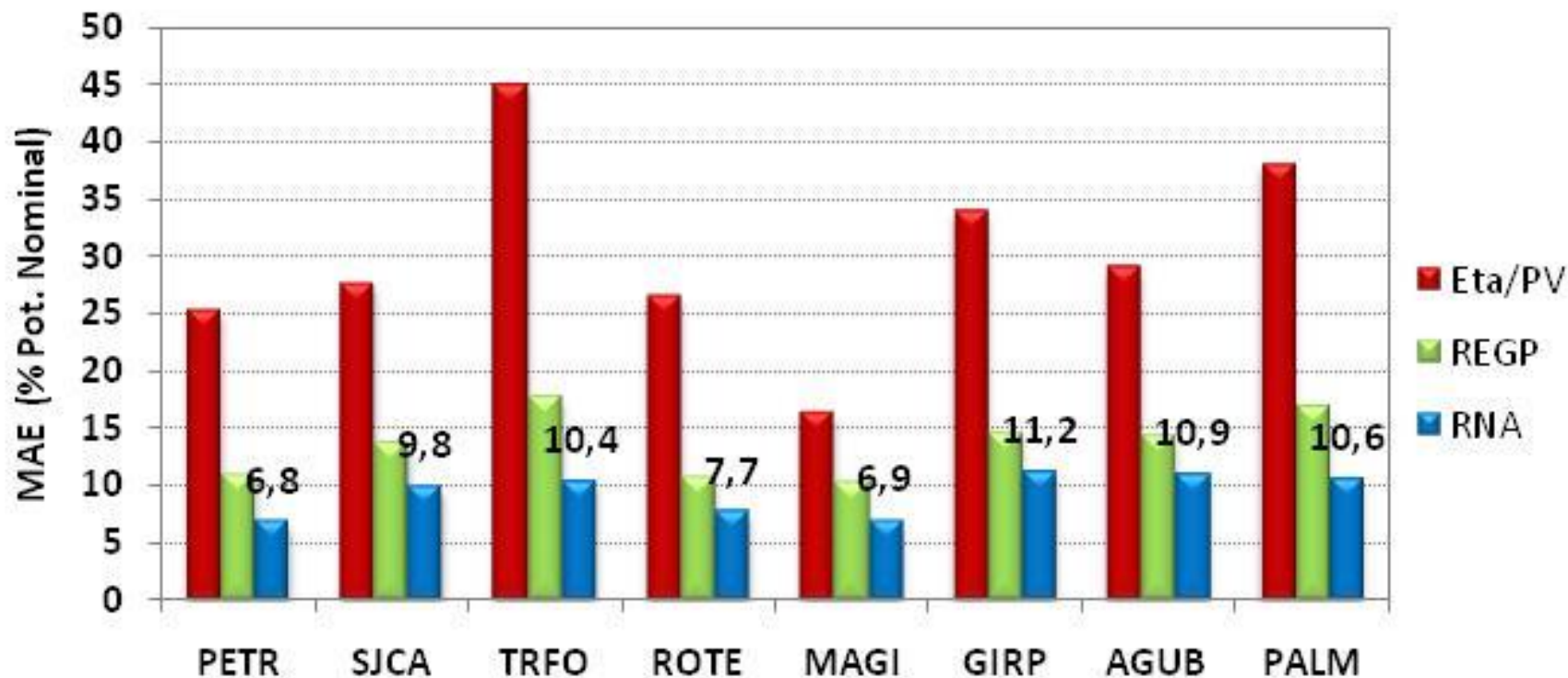
# Avaliação da Potência Eólica

- CDFs do erro => Cálculo das incertezas



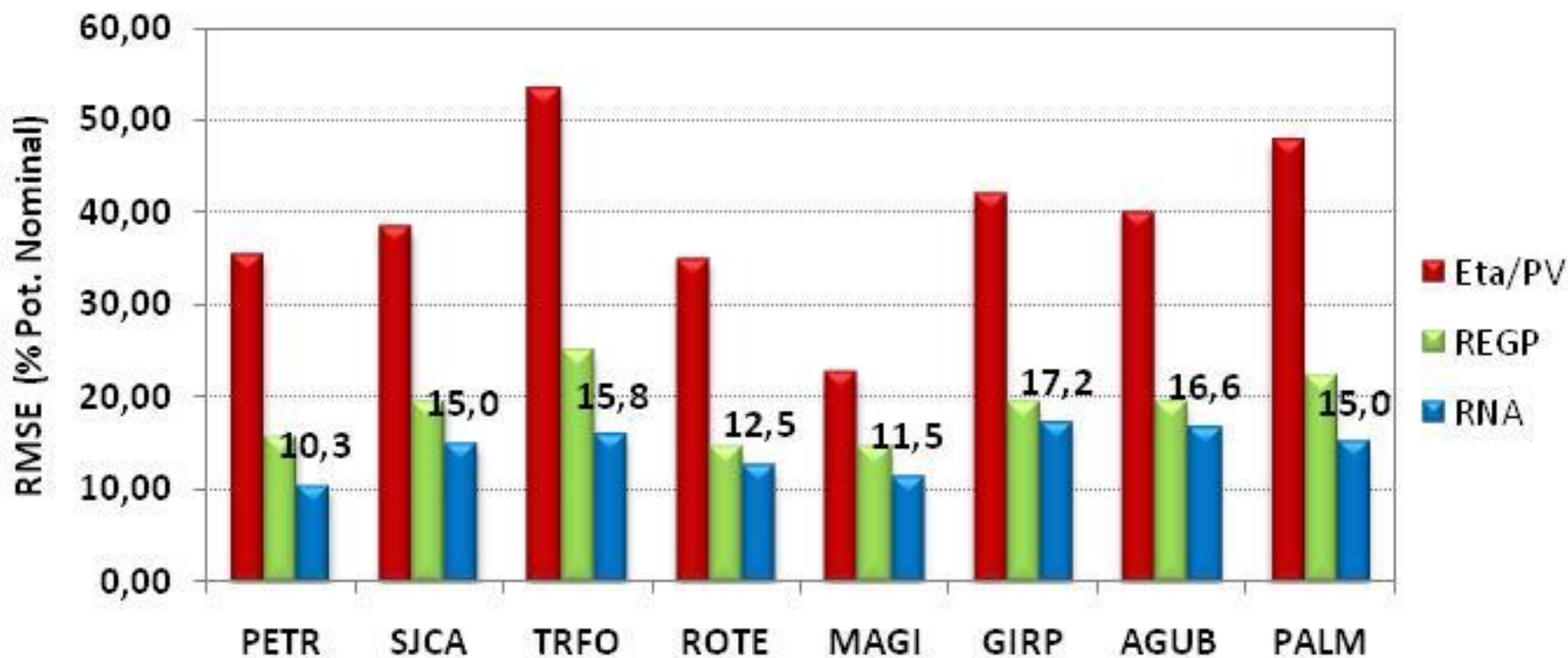
# Avaliação da Potência Eólica

- MAE Normalizado pela Potência Máxima



# Avaliação da Potência Eólica

- RMSE Normalizado pela Potência Máxima



# Considerações finais

- RNAs precisam ser configuradas e treinadas para cada local
- Correlações => ETA **0,6** | RNAs **0,7 a 0,9**
- RMSE => ETA de **2,30** | RNAs **0,95 e 1,39** m/s
- RMSE => **10,3% e 17,2%** da potência eólica nominal (Literatura acima de **11,1%**)



# OBRIGADO!

[labren@inpe.br](mailto:labren@inpe.br)

<http://www.labren.ccst.inpe.br>

