



SEMINÁRIO DE OTIMIZAÇÃO E ESTATÍSTICA  
APLICADOS AO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO



AVANÇOS NA MODELAGEM ESTOCÁSTICA DO  
DESPACHO HIDRO-TERMO-EÓLICO BRASILEIRO

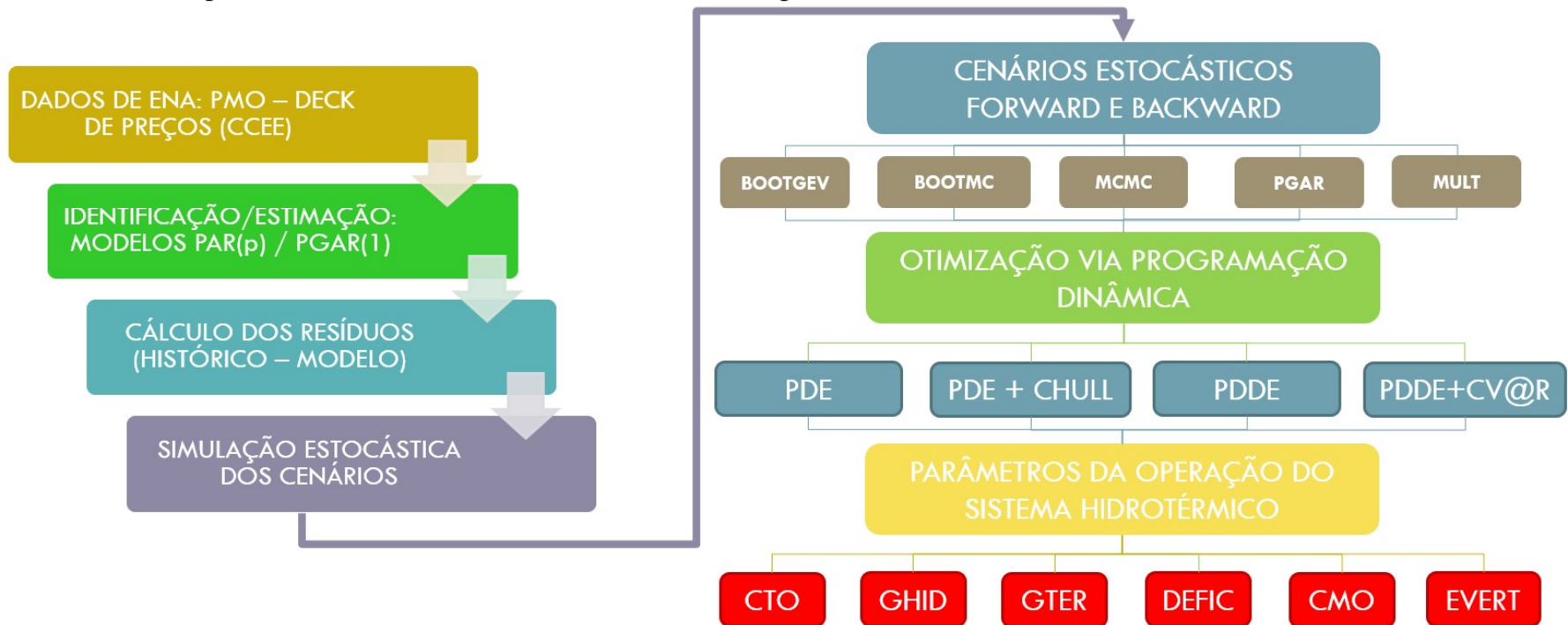
Rio de Janeiro, 18 de Janeiro de 2018

# MDDH: MODELO DE OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO HIDROTÉRMICO



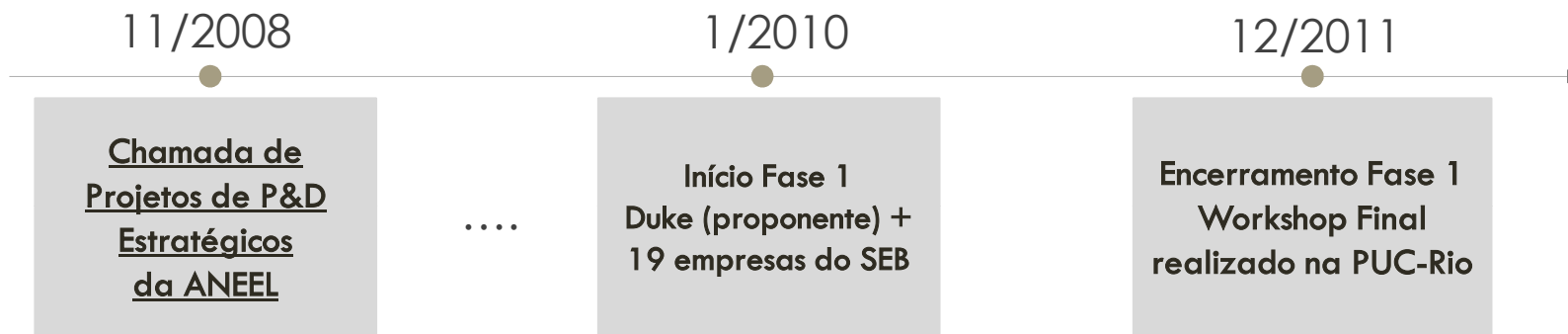
- P&D Estratégico proposto pela ANEEL com vistas à investigação do Modelo de Despacho Hidrotérmico empregado no planejamento da operação energética no Brasil.
- Características do projeto:
  - Participação de Diversas Empresas – APINE
  - Convênio PUC-Rio/UFJF
  - Projeto de alta prioridade técnica e econômica para o SEB

# MDDH: MODELO DE OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO HIDROTÉRMICO



# MDDH: MODELO DE OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO HIDROTÉRMICO

## Fase 1: MDDH – Modelo de Otimização do Despacho Hidrotérmico



Avaliação Final ANEEL

Critério	Pontuação	Conceito
Originalidade	4	Bom
Aplicabilidade	4	Bom
Relevância	4	Bom
Razoabilidade dos custos	4	Bom
<b>Nota e conceito finais</b>	<b>4</b>	<b>Bom</b>

# MDDH: MODELO DE OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO HIDROTÉRMICO

Fase Intermediária: *Modelo de Otimização do Despacho Hidrotérmico - Abordagem: PDE e PDDE (Sistemas Equivalentes) com a Consideração de Aversão ao Risco e Tratamento Estocástico da ENA*

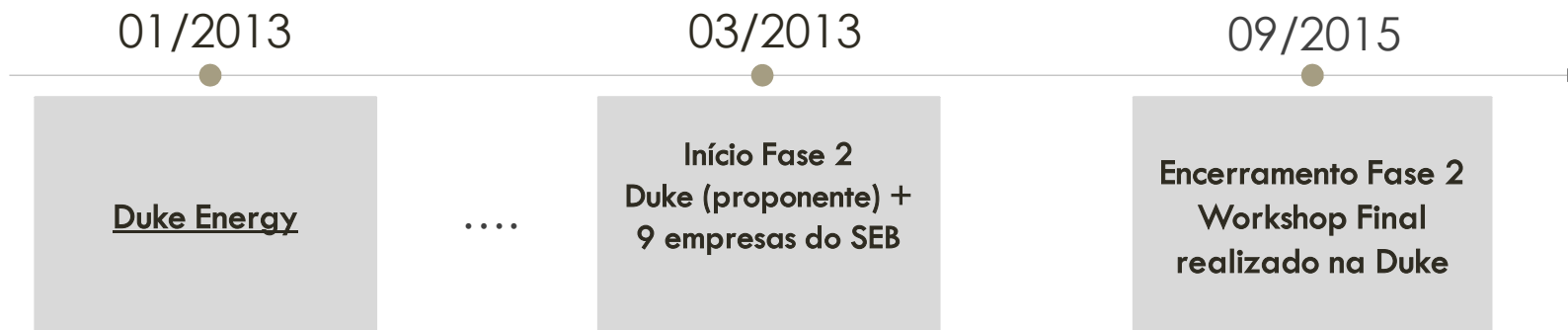


Avaliação Final ANEEL

Critério	Pontuação	Conceito
Originalidade	4	Bom
Aplicabilidade	4	Bom
Relevância	4	Bom
Razoabilidade dos custos	4	Bom
<b>Nota e conceito finais</b>	<b>4</b>	<b>Bom</b>

# MDDH: MODELO DE OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO HIDROTÉRMICO

Fase 2: Modelo de Otimização do Despacho Hidrotérmico - Abordagem: PDE e PDDE (Sistemas Equivalentes), Modelo de Rateio do Bloco Hidráulico via Programação Não Linear e Geração de Cenários Sintéticos de Vazões e Energias



# LIVRO PUBLICADO

## • Autores

- Reinaldo Castro Souza, PhD  
Depto Eng. Industrial, PUC-Rio
- André Luis Marques Marcato, DSc  
Depto Eng. Elétrica, UFJF
- Fernando Cyrino, DSc  
Depto Eng. Industrial, PUC-Rio
- Bruno Henriques Dias, DSc  
Depto Eng. Elétrica, UFJF
- Pedro Guilherme Costa Ferreira, DSc  
NMEC/ IBRE | FGV
- Rafael Bruno da Silva Brandi, MSc  
Depto Eng. Elétrica, UFJF
- Tales Pulinho Ramos, DSc  
Depto Eng. Elétrica, UFJF



# ROADSHOWS

Foram realizados oito *road shows* por todo o Brasil para divulgar o livro, com distribuição gratuita do mesmo.

- 2 na PUC-Rio
- 2 na UFABC
- 1 na UFPI
- 1 na FIRJAN
- 1 na UCS
- 1 na UNINOVE

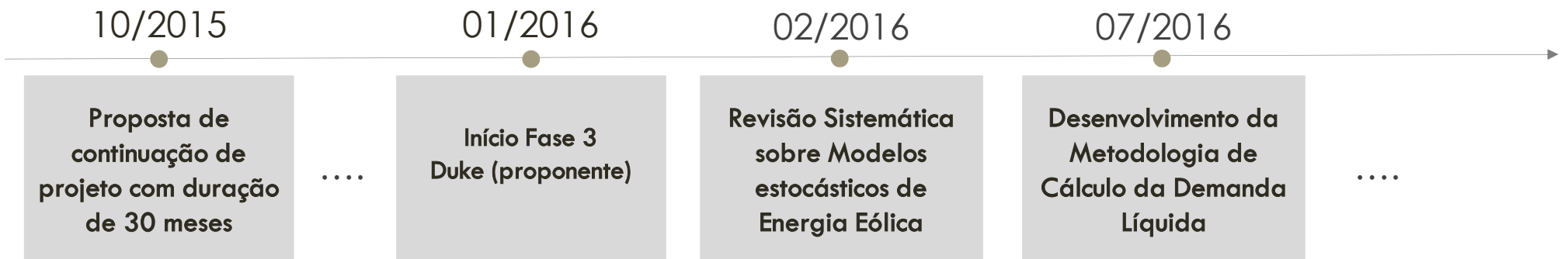
Mais de 500 profissionais do setor já participaram dos treinamentos!





# MDDH: MODELO DE OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO HIDROTÉRMICO

Fase 3: Modelo MDDH+ - Ferramentas Estocásticas Aplicadas às Fontes Alternativas, Modelagem do Comportamento da Demanda de Médio/Longo Prazo e Análise de Risco de Mercado



# DESPACHO HIDRO-TERMO-EÓLICO

- Na fase atual do projeto, a energia eólica é considerada no despacho através do cálculo da Demanda Líquida (DL) que utiliza o método analítico de Frequência e Duração (F&D) e as técnicas Cadeias de Markov e convolução discreta.
- Os resultados obtidos até o momento indicam que a metodologia proposta é capaz de reproduzir as variabilidades horária e mensal de dados oriundos da velocidade do vento, além de inserir a geração eólica de forma estocástica no despacho ao considerar probabilidades de ocorrência de cada estado.



# AGENDA PUC-RIO



- Yasmin Cyrillo, mestrado DEE
  - *Orientador:* Reinaldo Castro Souza
  - *Co-orientador:* Fernando Cyrino
  - *Dissertação:* Avaliação do modelo PVARm interconfigurações para geração de cenários no planejamento da operação de médio prazo
- Hugo Ribeiro Baldioti, doutorado DEE
  - *Orientador:* Reinaldo Castro Souza
  - *Tese:* Método MCMC aplicado à simulação de resíduos do modelo PAR(p)
- Ana Paula Delfino, mestrado DEE
  - *Orientador:* Fernando Cyrino
  - *Dissertação:* Previsão de vazões usando modelos híbridos e puros de machine learning
- Paula Maçaira, doutorado DEE
  - *Orientador:* Fernando Cyrino
  - *Tese:* Modelos de simulação estocástica de cenários de vazão com incorporação de variáveis climáticas



# MODELO DE GERAÇÃO DE AFLUÊNCIAS

- Um modelo para geração de afluições utilizado no algoritmo PDDE deve atender aos seguintes requisitos:
  - Ser linear;
  - Ter a componente aleatória independente;
- Além disso, é desejável que o modelo reproduza:
  - Média e Variância histórica;
  - Correlação temporal;
  - Correlação espacial entre os reservatórios.

## MODELO OFICIAL - PAR(p)

- Formulação do modelo de ordem  $p = (p_1, p_2, \dots, p_{12})$ :

$$\left( \frac{Z_t - \mu_m}{\sigma_m} \right) = \phi_1^m \left( \frac{Z_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}} \right) + \dots + \phi_{p_m}^m \left( \frac{Z_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}} \right) + a_t$$

- Inserção da correlação entre subsistemas através dos resíduos do modelo;
- Estima que os ruídos sigam uma distribuição lognormal de três parâmetros;



AVALIAÇÃO DO MODELO PVARM  
INTERCONFIGURAÇÕES PARA  
GERAÇÃO DE CENÁRIOS NO  
PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE  
MÉDIO PRAZO

Yasmin Cyrillo  
Reinaldo Castro Souza  
Fernando Cyrino

# OBJETIVOS



- Apresentar o modelo PVARm Interconfigurações aplicado à simulação de cenários de ENAs na Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE);
- Apresentar o Estudo de Caso para o subsistema Sudeste, com a validação do modelo;

PVAR<sub>m</sub>





# Periódico $VA$ Autorregressivo $R_m$

- Modelo periódico autorregressivo;



# PVetorialAR<sub>m</sub>

- Modelo periódico autorregressivo;
- Traz a relação entre as afluências dos subsistemas no modelo;





## PVAR<sub>multiplicativo</sub>

- Modelo periódico autorregressivo;
- Traz a relação entre as afluências dos subsistemas no modelo;
- Usa o erro multiplicativo e é estimado de forma a garantir que as afluências geradas serão sempre positivas;

Dissertação: CABRAL, Filipe. Uma Proposta De Um Modelo Periódico Multivariado Autorregressivo Multiplicativo Para Geração De Cenários De Afluência Aplicável Ao Modelo De Planejamento Do Setor Elétrico Brasileiro. 2016

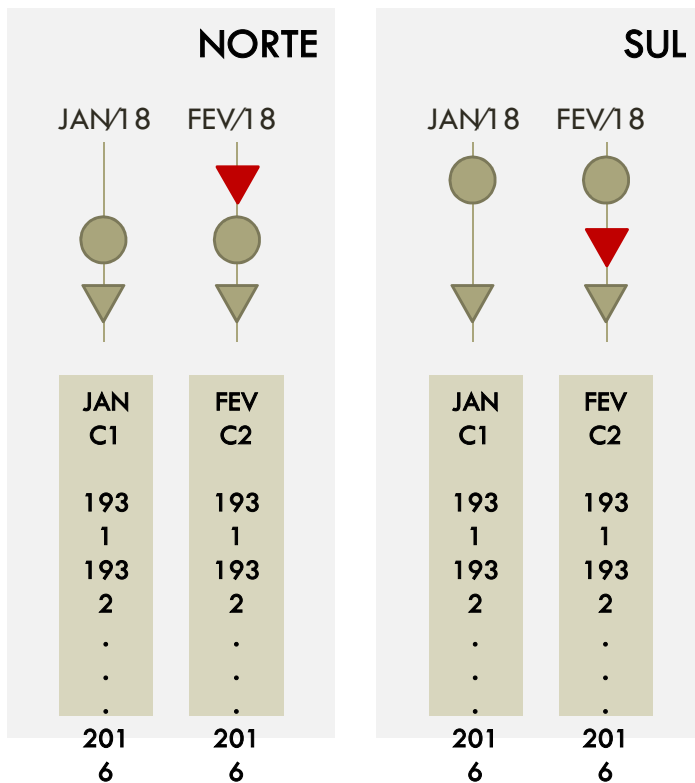
# PVAR<sub>m</sub> Interconfigurações

- Modelo periódico autorregressivo;
- Traz a relação entre as afluências dos subsistemas no modelo;
- Usa o erro multiplicativo e é estimado de forma a garantir que as afluências geradas serão sempre positivas;
- Utiliza o histórico dinâmico, seguindo o modelo interconfigurações.



# O MODELO INTERCONFIGURAÇÕES

A expansão do parque hidrelétrico englobada no modelo:



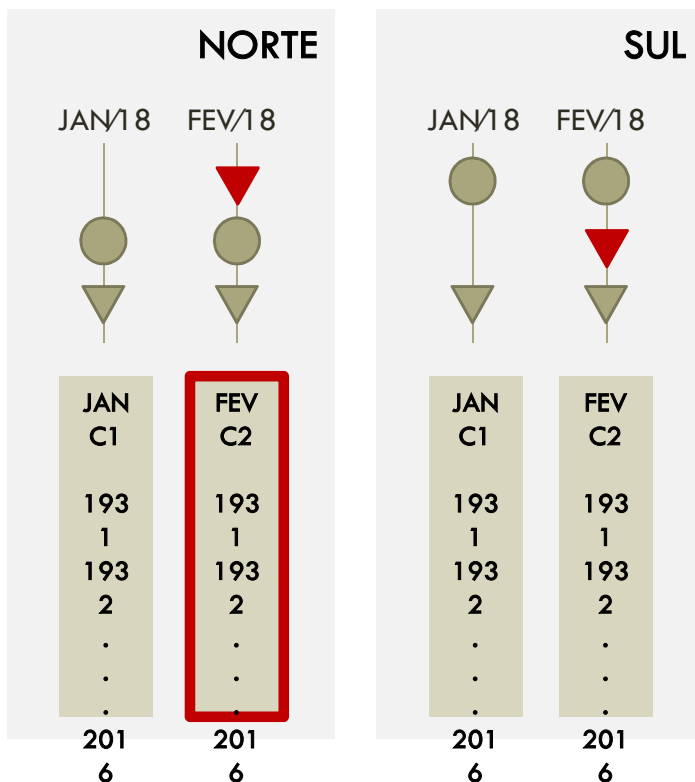
**MODELO FEV/18 - CONFIGURAÇÃO C2**

**PVARM(1):**

$$\begin{bmatrix} z_{2,C2}^N \\ z_{2,C2}^S \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} \zeta_{2,C2}^N \\ \zeta_{2,C2}^S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \emptyset_{11}^{C2,1} & \emptyset_{12}^{C2,1} \\ \emptyset_{21}^{C2,1} & \emptyset_{22}^{C2,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{1,C1}^N \\ z_{1,C1}^S \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} \eta_{2,C2}^N \\ \eta_{2,C2}^S \end{bmatrix}$$

# O MODELO INTERCONFIGURAÇÕES

A expansão do parque hidrelétrico englobada no modelo:

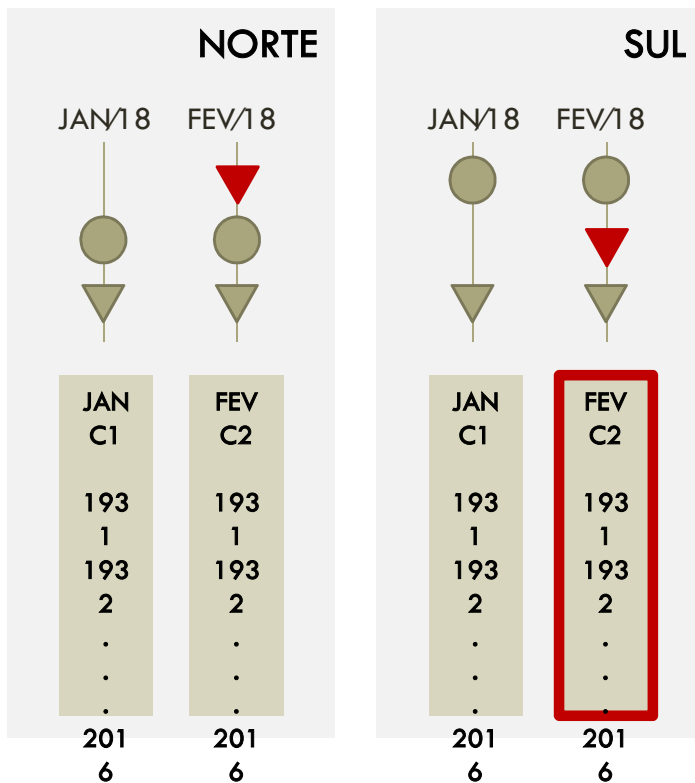


**MODELO FEV/18 - CONFIGURAÇÃO C2**  
**PVARM(1):**

$$\begin{bmatrix} z_{2,C2}^N \\ z_{2,C2}^S \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} \zeta_{2,C2}^N \\ \zeta_{2,C2}^S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \emptyset_{11}^{C2,1} & \emptyset_{12}^{C2,1} \\ \emptyset_{21}^{C2,1} & \emptyset_{22}^{C2,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{1,C1}^N \\ z_{1,C1}^S \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} \eta_{2,C2}^N \\ \eta_{2,C2}^S \end{bmatrix}$$

# O MODELO INTERCONFIGURAÇÕES

A expansão do parque hidrelétrico englobada no modelo:

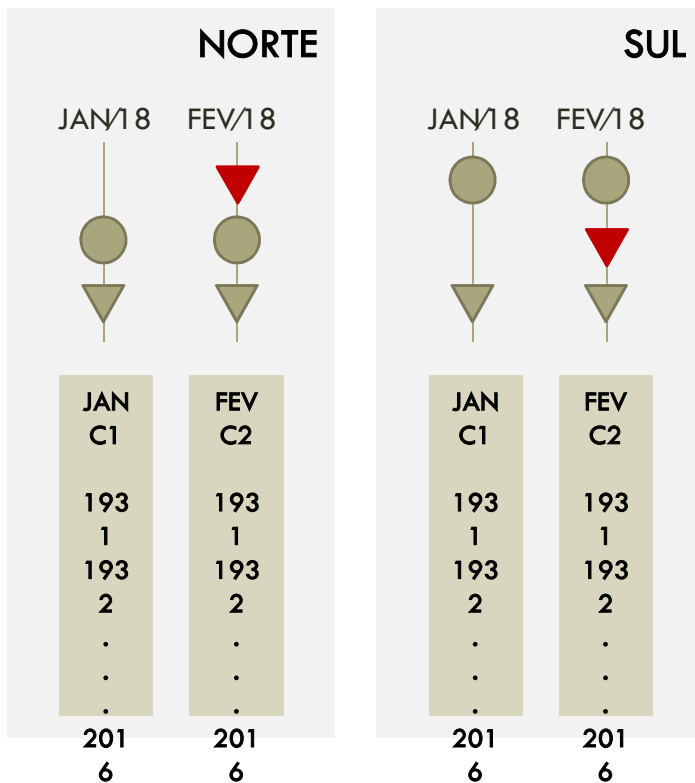


**MODELO FEV/18 - CONFIGURAÇÃO C2**  
PVARM(1):

$$\begin{bmatrix} z_{2,C2}^N \\ z_{2,C2}^S \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} \zeta_{2,C2}^N \\ \zeta_{2,C2}^S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \emptyset_{11}^{C2,1} & \emptyset_{12}^{C2,1} \\ \emptyset_{21}^{C2,1} & \emptyset_{22}^{C2,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{1,C1}^N \\ z_{1,C1}^S \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} \eta_{2,C2}^N \\ \eta_{2,C2}^S \end{bmatrix}$$

# O MODELO INTERCONFIGURAÇÕES

A expansão do parque hidrelétrico englobada no modelo:



**MODELO FEV/18 - CONFIGURAÇÃO C2**  
**PVARM(1):**

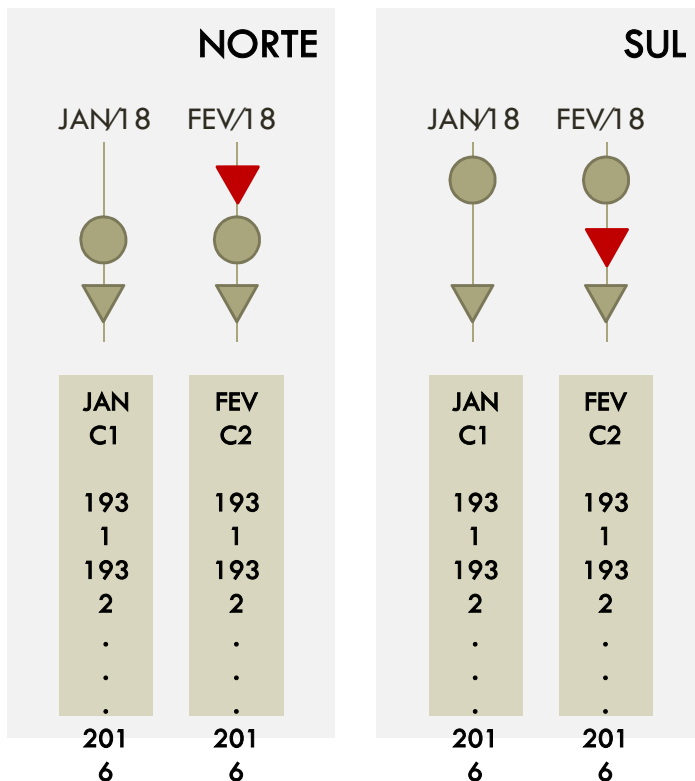
$$\begin{bmatrix} z_{2,C2}^N \\ z_{2,C2}^S \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} \zeta_{2,C2}^N \\ \zeta_{2,C2}^S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \emptyset_{11}^{C2,1} & \emptyset_{12}^{C2,1} \\ \emptyset_{21}^{C2,1} & \emptyset_{22}^{C2,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{1,C1}^N \\ z_{1,C1}^S \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} \eta_{2,C2}^N \\ \eta_{2,C2}^S \end{bmatrix}$$

**NÍVEL**



# O MODELO INTERCONFIGURAÇÕES

A expansão do parque hidrelétrico englobada no modelo:



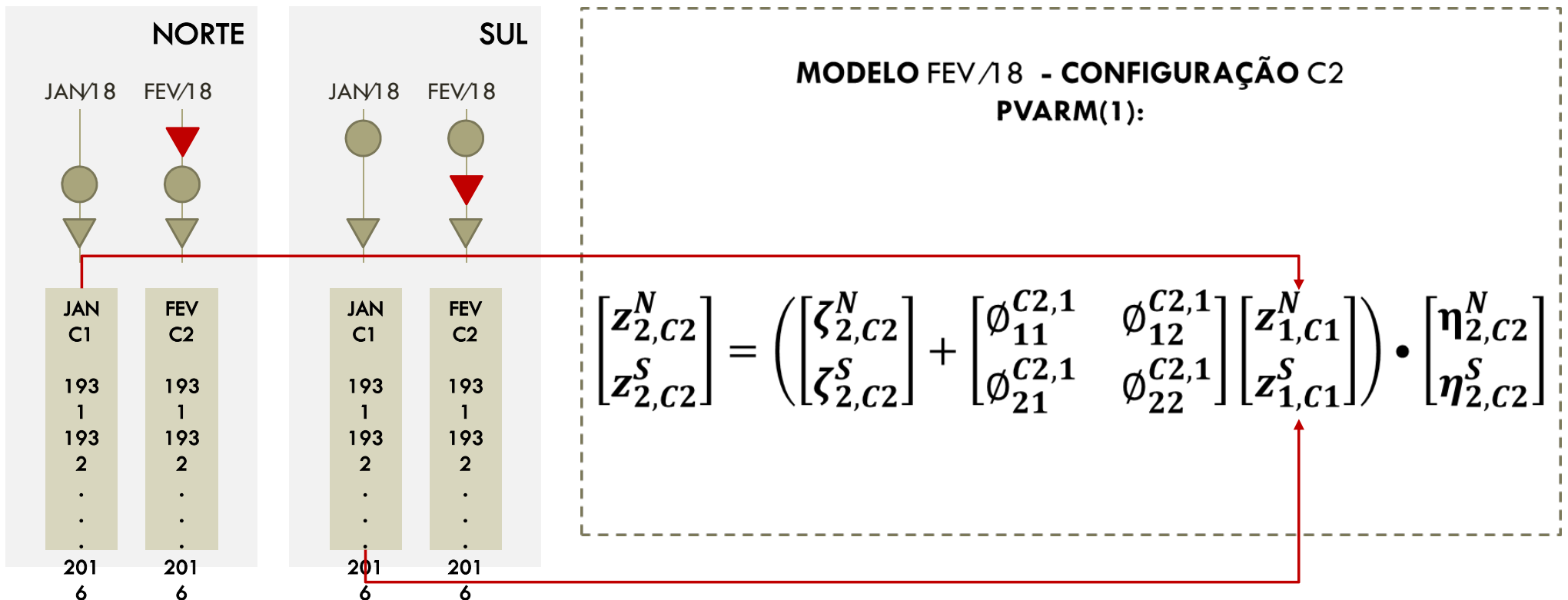
**MODELO FEV/18 - CONFIGURAÇÃO C2**  
**PVARM(1):**

$$\begin{bmatrix} z_{2,C2}^N \\ z_{2,C2}^S \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} \zeta_{2,C2}^N \\ \zeta_{2,C2}^S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_{11}^{C2,1} & \phi_{12}^{C2,1} \\ \phi_{21}^{C2,1} & \phi_{22}^{C2,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{1,C1}^N \\ z_{1,C1}^S \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} \eta_{2,C2}^N \\ \eta_{2,C2}^S \end{bmatrix}$$

**MATRIZ DE**  
**COEFICIENTES**

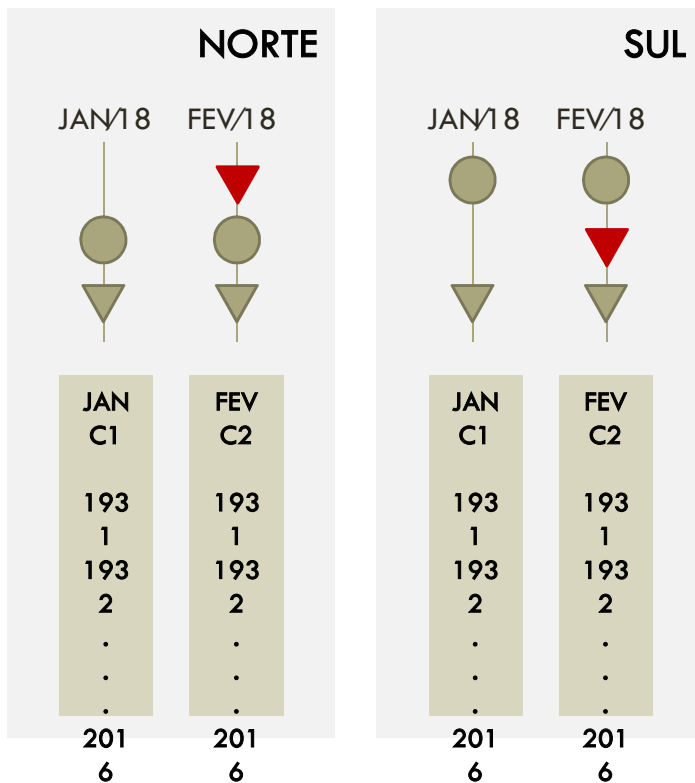
# O MODELO INTERCONFIGURAÇÕES

A expansão do parque hidrelétrico englobada no modelo:



# O MODELO INTERCONFIGURAÇÕES

A expansão do parque hidrelétrico englobada no modelo:



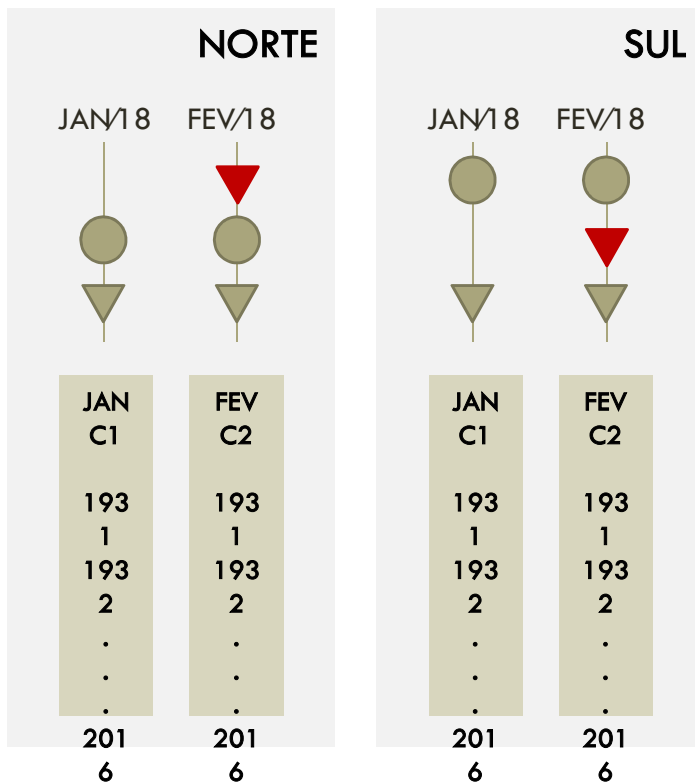
**MODELO FEV/18 - CONFIGURAÇÃO C2**  
**PVARM(1):**

$$\begin{bmatrix} z_{2,C2}^N \\ z_{2,C2}^S \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} \zeta_{2,C2}^N \\ \zeta_{2,C2}^S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \emptyset_{11}^{C2,1} & \emptyset_{12}^{C2,1} \\ \emptyset_{21}^{C2,1} & \emptyset_{22}^{C2,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{1,C1}^N \\ z_{1,C1}^S \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} \eta_{2,C2}^N \\ \eta_{2,C2}^S \end{bmatrix}$$

**ERRO**  
**MULTIPLICATIVO**

# FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A expansão do parque hidrelétrico englobada no modelo



Modelo PVARm, de ordem  $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_S)$ :

$$\mathbf{z}_{t,c} = \left( \boldsymbol{\zeta}_{s,c} + \sum_{v=1}^{p_s} [\Phi_{s,v,c}] \mathbf{z}_{t-v,c-v} \right) \bullet \boldsymbol{\eta}_{t,c}$$

$\boldsymbol{\eta}_{t,c}$ : erro multiplicativo i.i.d, com:

$$E[\boldsymbol{\eta}_t] = \mathbf{1};$$

$$VAR[\boldsymbol{\eta}_t] = \boldsymbol{\Sigma}_t.$$

# OBTENÇÃO DO MODELO



## OBTENÇÃO DO MODELO

- Cada período de planejamento é associado ao histórico com sua configuração;
- O conjunto de dados para todos os períodos forma o histórico dinâmico.

Montagem do  
histórico

# OBTENÇÃO DO MODELO

## Estimação dos parâmetros

- Como a afluência pode assumir qualquer valor positivo, é condição necessária e suficiente que os coeficientes no modelo sejam positivos.
- Uso do método dos mínimos quadrados com restrição de não negatividade nos coeficientes.

# OBTENÇÃO DO MODELO

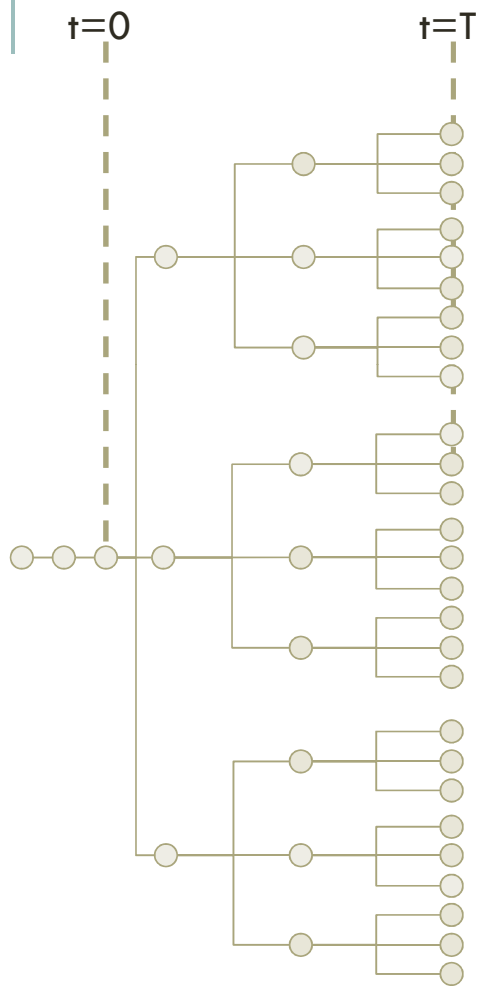


- Avaliação do modelo PVARm de ordem 1;
- Critério de menor erro de ajuste, limitado a ordem 6.

Identificação  
do modelo

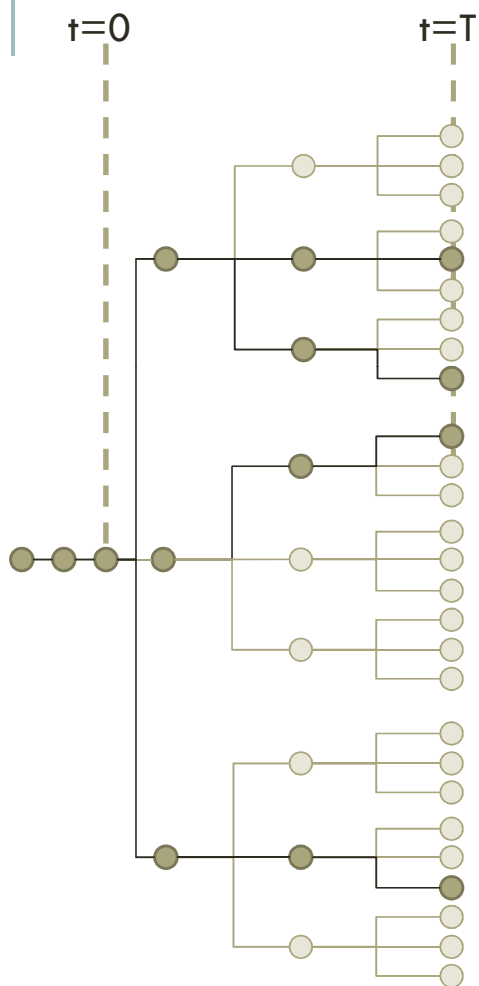


# GERAÇÃO DE CENÁRIOS: REPRESENTAÇÃO DA INCERTEZA NA PDDE



A política de operação é calculada de forma iterativa, através de uma fase *forward* e uma fase *backward*.

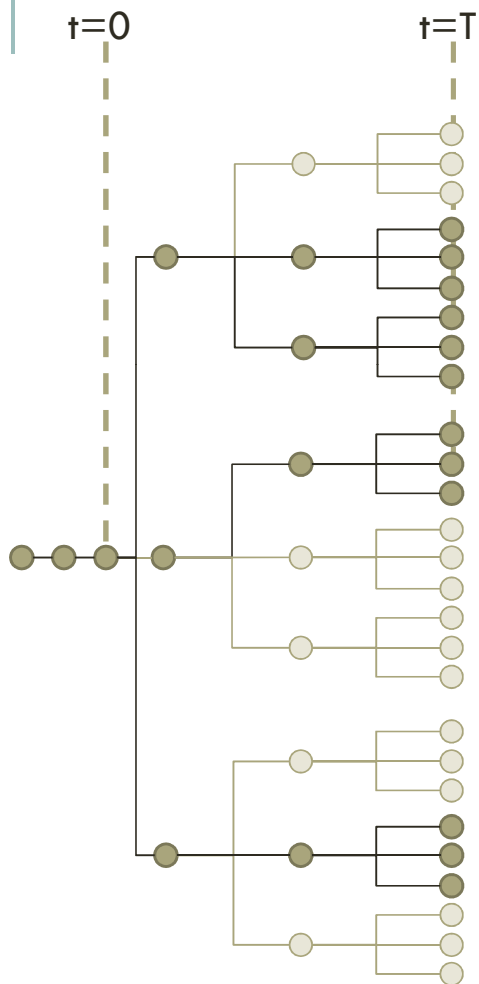
# GERAÇÃO DE CENÁRIOS: REPRESENTAÇÃO DA INCERTEZA NA PDDE



A política de operação é calculada de forma iterativa, através de uma fase *forward* e uma fase *backward*.

A fase de simulação *forward* sorteia cenários de uma árvore definida, para avaliar a política de operação definida....

# GERAÇÃO DE CENÁRIOS: REPRESENTAÇÃO DA INCERTEZA NA PDDE



A política de operação é calculada de forma iterativa, através de uma fase forward e uma fase backward.

A fase de simulação forward sorteia cenários de uma árvore definida, para avaliar a política de operação definida....

... enquanto a fase de *backward* varre todas as aberturas da árvore de cenários, para o passado definido pelo cenário *forward*.

# GERAÇÃO DE CENÁRIOS FORWARD E BACKWARD



- Geração de cenários via bootstrap:



A partir de uma população de resíduos....

# GERAÇÃO DE CENÁRIOS FORWARD E BACKWARD

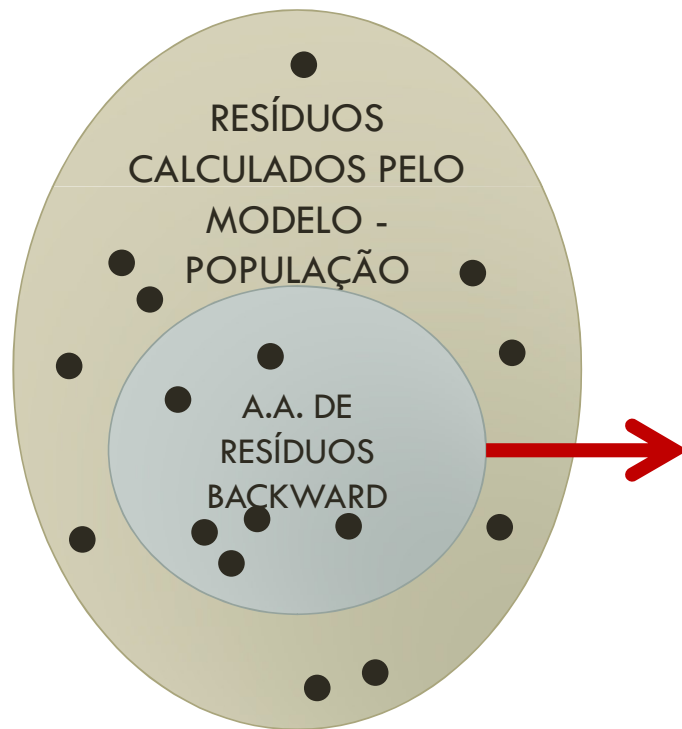
- Geração de cenários via bootstrap:



.... Realiza – se um sorteio aleatório para obtenção da amostra de ruídos utilizados nos cenários *backward*, no processo de otimização.

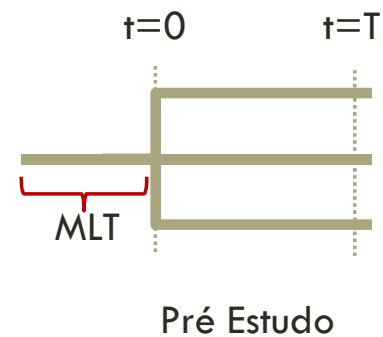
# GERAÇÃO DE CENÁRIOS FORWARD E BACKWARD

- Geração de cenários via bootstrap:



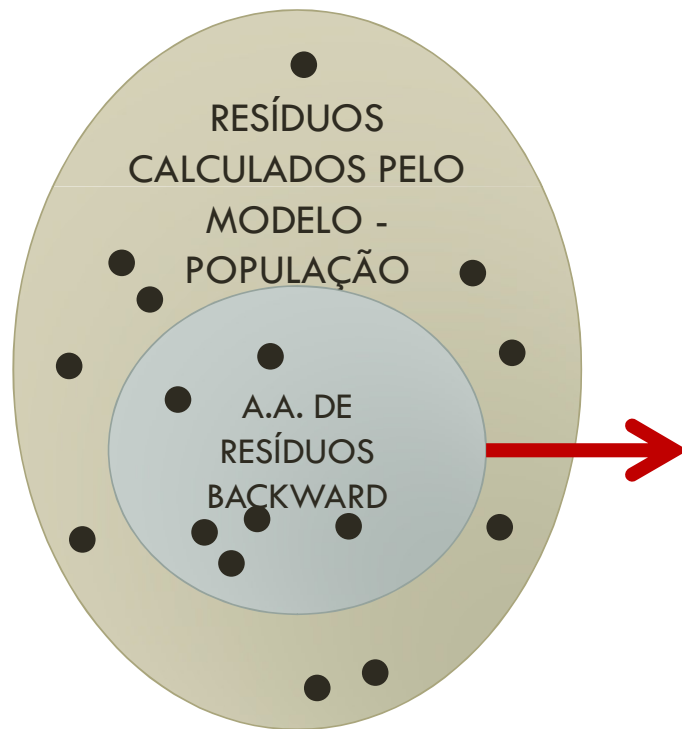
... a partir da amostra de ruídos da *backward*, sorteiam-se os ruídos utilizados na geração de cenários *forward*...

Inicialmente gera-se cenários do pré-estudo...



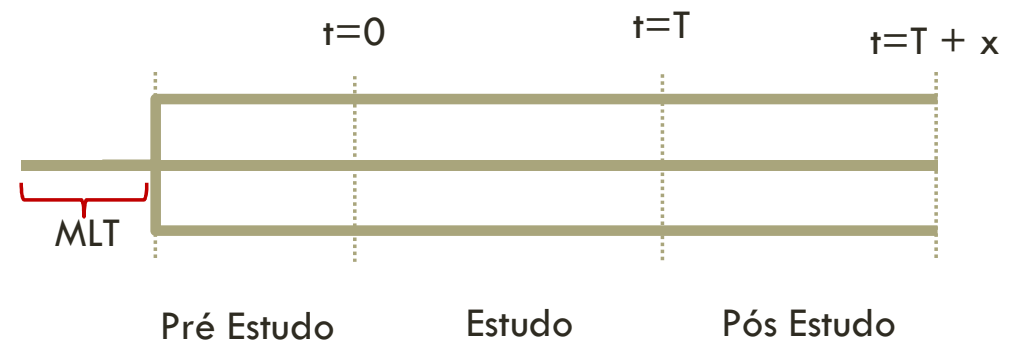
# GERAÇÃO DE CENÁRIOS FORWARD E BACKWARD

- Geração de cenários via bootstrap:



... a partir da amostra de ruídos da *backward*, sorteiam-se os ruídos utilizados na geração de cenários *forward*...

Inicialmente gera-se cenários do pré-estudo...



# CRITÉRIOS DE ADEQUAÇÃO DO MODELO

- Uso de testes não paramétricos por ausência de premissas acerca da normalidade dos dados;
- Teste de igualdade de distribuições – Kolmogorov - Smirnov;
- Teste de dispersão – Ansari & Bradley;
- Teste de sequências;







# ESTUDO DE CASO

---

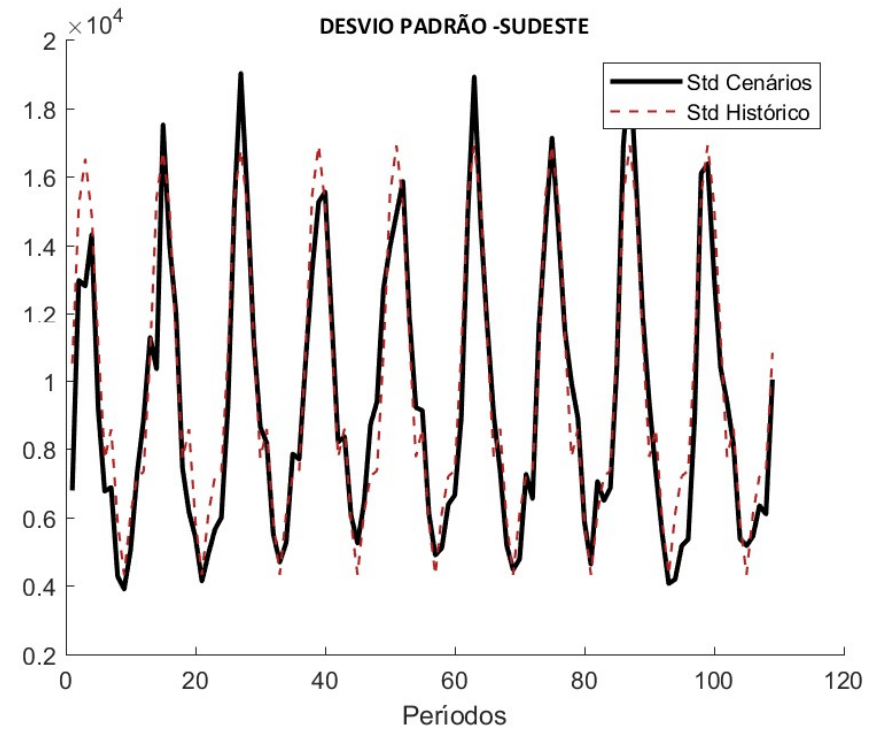
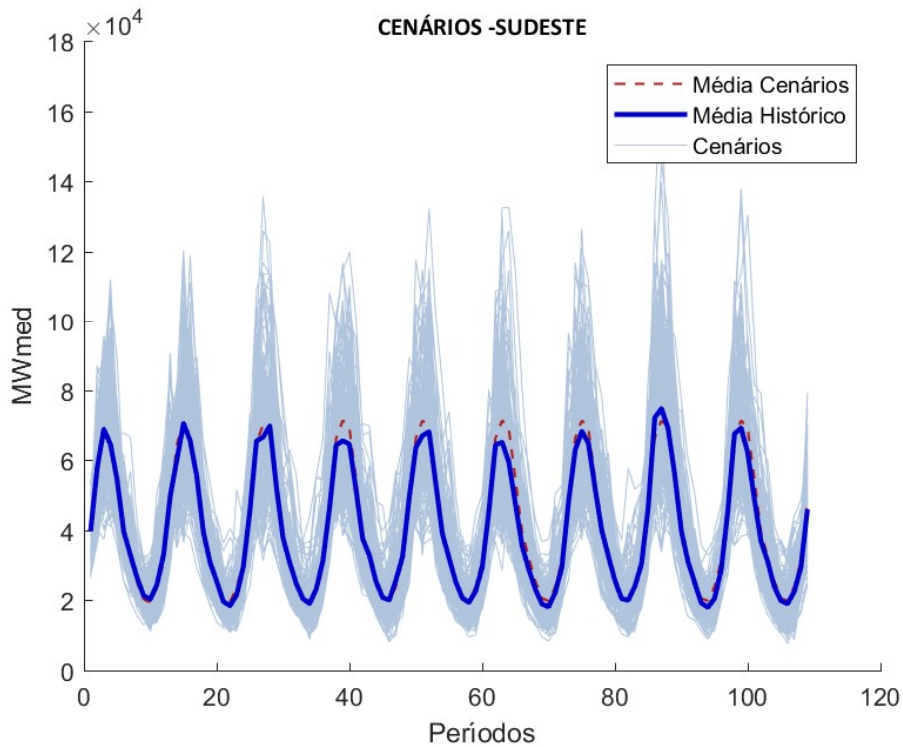
Estatísticas Mensais e Anuais e Testes de Adequação para o subsistema SE

# DADOS DE ENTRADA



- Histórico de ENAS, para todas as configurações, de 1931 a 2013;
- Subsistemas N, NE, S e SE;
- 20 aberturas;
- 200 cenários forward;

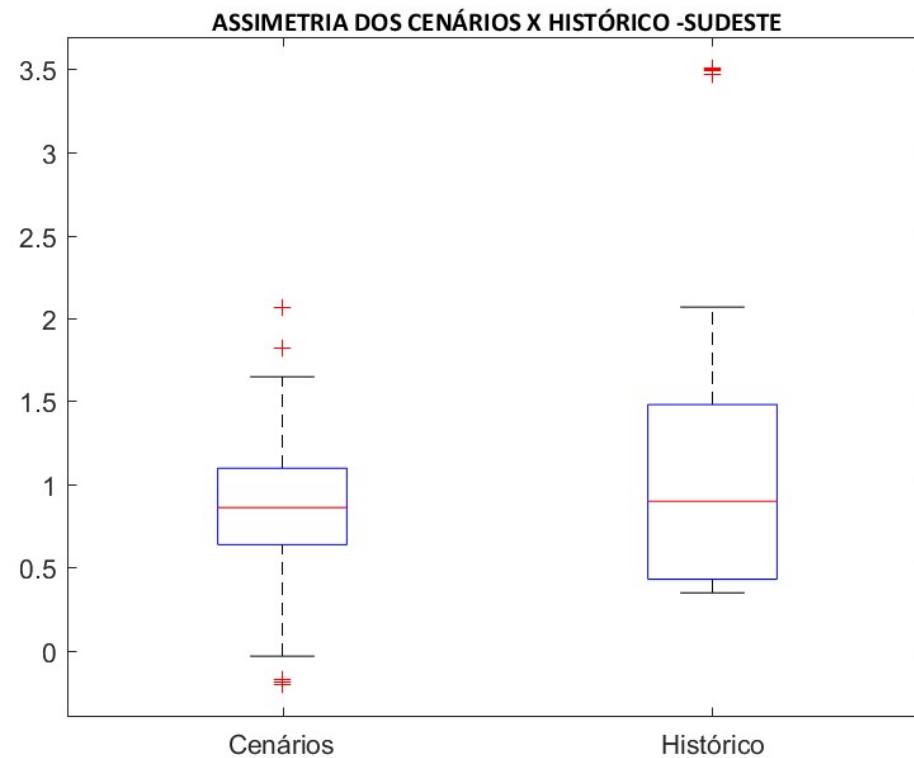
# CENÁRIOS FORWARD



No Sudeste, 76% dos cenários gerados foram aprovados no teste de igualdade de distribuições ...

... enquanto 92% dos cenários gerados foram aprovados no teste de dispersão...

# ASSIMETRIA DOS CENÁRIOS

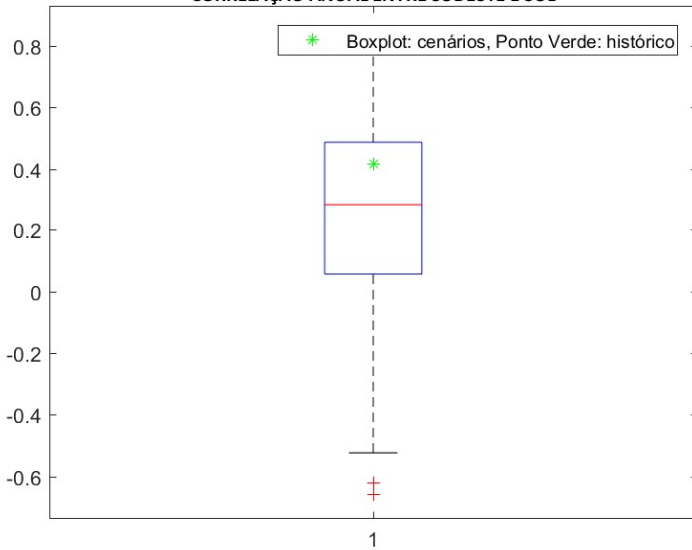


Nota-se, através dos gráficos apresentados, que os cenários gerados possuem assimetria com média próxima à do histórico, mas este apresenta maior dispersão....

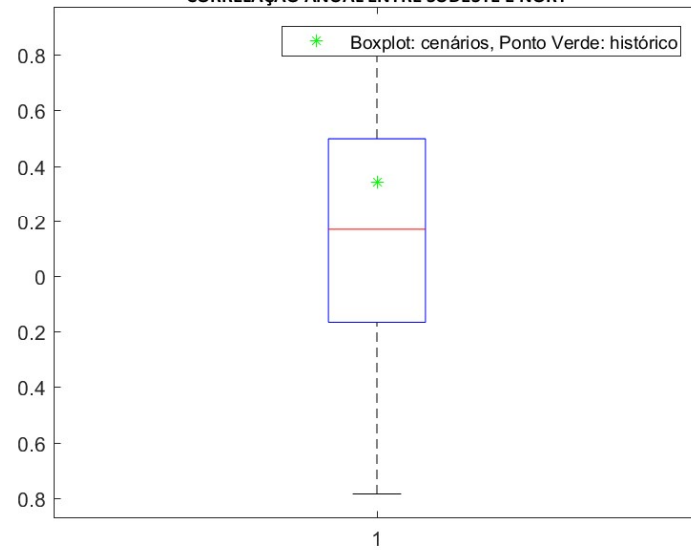
# CORRELAÇÃO ANUAL ENTRE SUBSISTEMAS



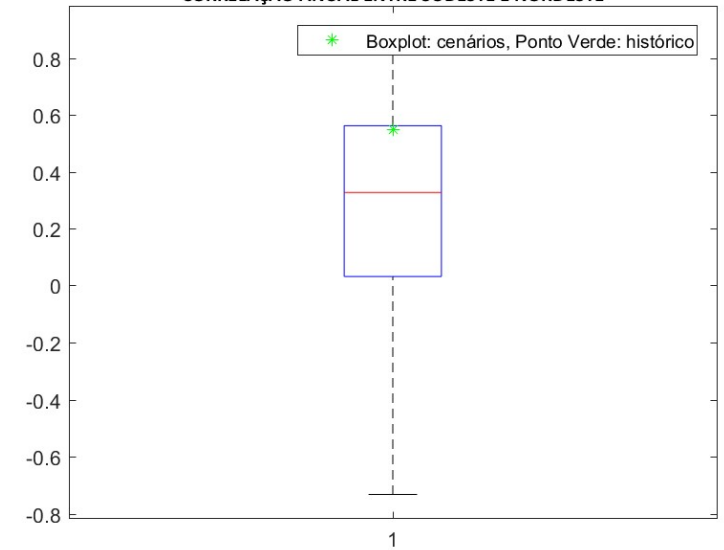
CORRELAÇÃO ANUAL ENTRE SUDESTE E SUL



CORRELAÇÃO ANUAL ENTRE SUDESTE E NORT

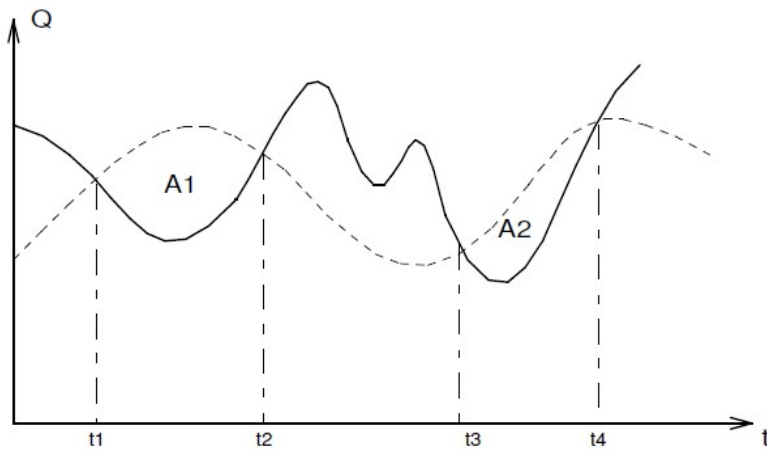


CORRELAÇÃO ANUAL ENTRE SUDESTE E NORDESTE



A correlação entre os subsistemas está entre os quartis centrais em todas as combinações...

# TESTES DE SEQUÊNCIAS



FONTE: 2009, Débora Dias Penna

*SOMA DA SEQUÊNCIA:*

$$S = \sum_{i=t_1}^{t_2} (Z_i - \hat{\mu}_i)$$

*INTENSIDADE DA SEQUÊNCIA:*

$$I = \frac{\sum_{i=t_1}^{t_2} (Z_i - \hat{\mu}_i)}{t_2 - t_1}$$

## SEQUÊNCIA NEGATIVA

### PORCENTAGEM DOS CENÁRIOS

SOMA	INTENSIDADE
86%	85%

## SEQUÊNCIA POSITIVA

### PORCENTAGEM DOS CENÁRIOS APROVADOS

SOMA	INTENSIDADE
92%	91%

# TRABALHOS FUTUROS

Além das propostas inseridas na proposição do modelo, há espaço para:

- Inserção no algoritmo de otimização MDDH;
- Geração de cenários hidrológicos correlacionados aos cenários eólicos.



Obrigada pela atenção!

[yasmin@ele.puc-rio.br](mailto:yasmin@ele.puc-rio.br)



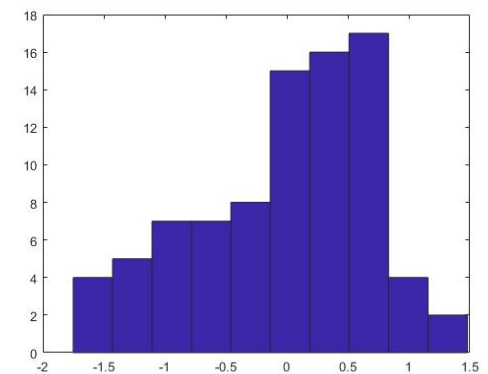
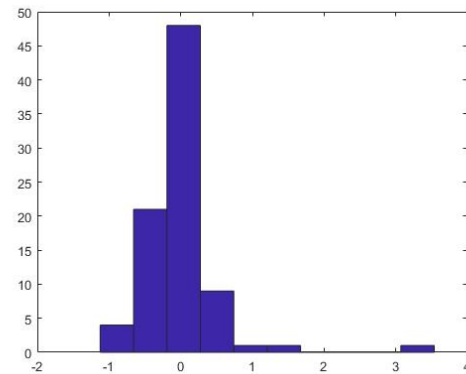
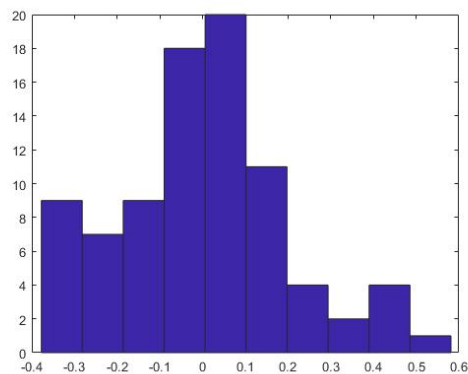
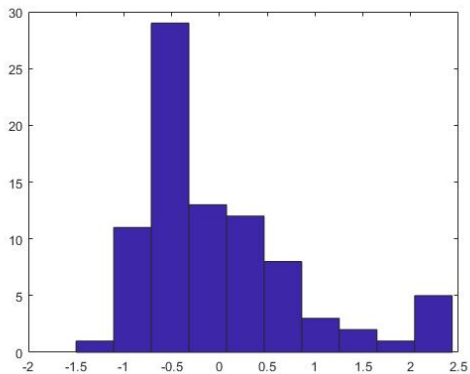


# MÉTODO MCMC APLICADO À SIMULAÇÃO DE RESÍDUOS DO MODELO PAR(P)

Hugo Ribeiro Baldioti  
Reinaldo Castro Souza

# MOTIVAÇÃO

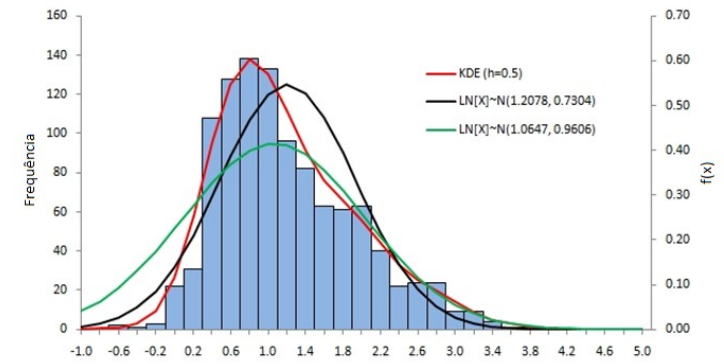
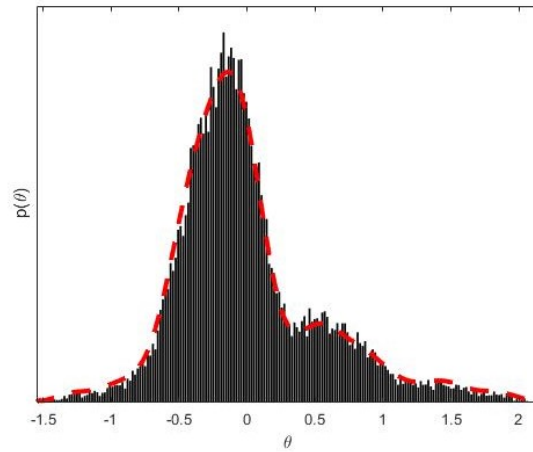
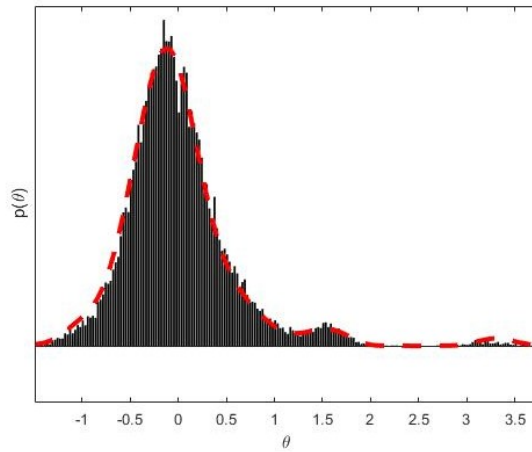
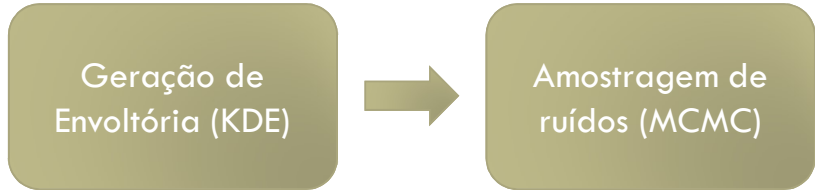
- Expansão da abordagem Bootstrap para simulação de resíduos
- Modelo PAR(p) utiliza muitas considerações, descaracterizando os dados
- Por exemplo: aproximação dos resíduos por uma Lognormal
  - Incapacidade de reprodução de comportamentos extremos



# OBJETIVO

- Apresentar uma abordagem não-paramétrica para simulação dos resíduos
  - Respeitando os comportamentos limite e assimetrias dos dados
- Geração de uma envoltória nos resíduos
  - KDE (Kernel Density Estimation)
- Amostragem da densidade calculada
  - MCMC (Markov Chain Monte Carlo)

# OBJETIVO



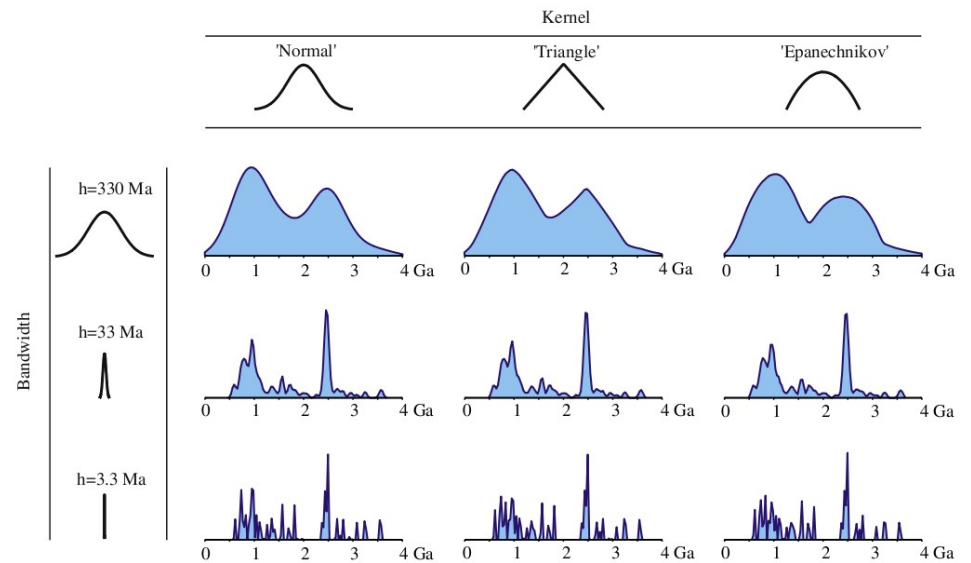
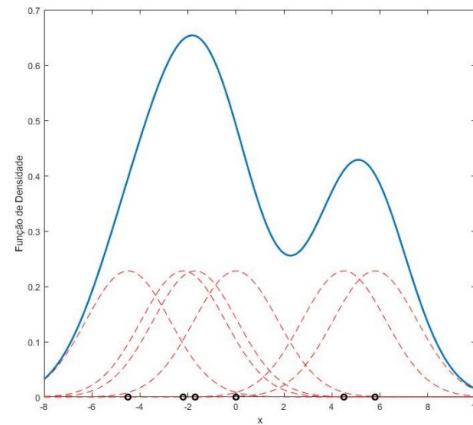
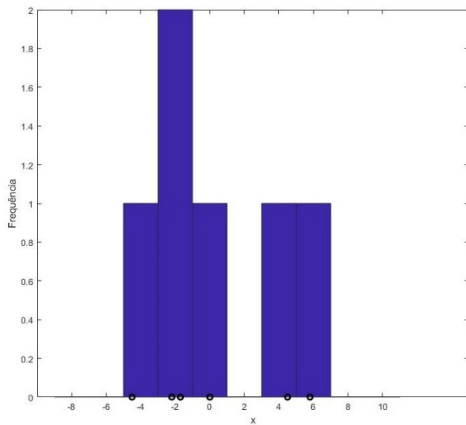
# METODOLOGIA

1. Calculam-se os resíduos a partir do modelo PAR(p) ajustado
2. Descreve-se as envoltórias dos resíduos a partir do KDE
3. Utiliza-se o Kernel calculado como distribuição limite de uma cadeia de Markov
4. As amostras dos resíduos são geradas utilizando o método Monte Carlo
5. A partir das amostras é possível simular cenários de ENAs

# METODOLOGIA

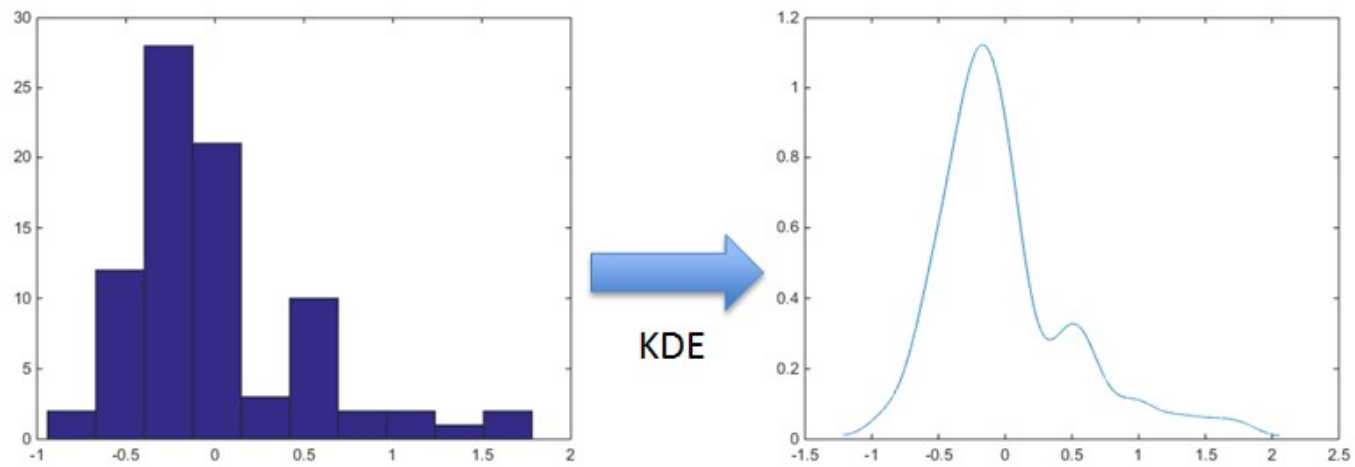
- Geração da envoltória nos resíduos a partir da técnica KDE
  - Seja  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  uma amostra i.i.d. gerada por alguma distribuição com uma densidade desconhecida  $f$
  - O objetivo é estimar o formato da função  $f$

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - x_i) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$



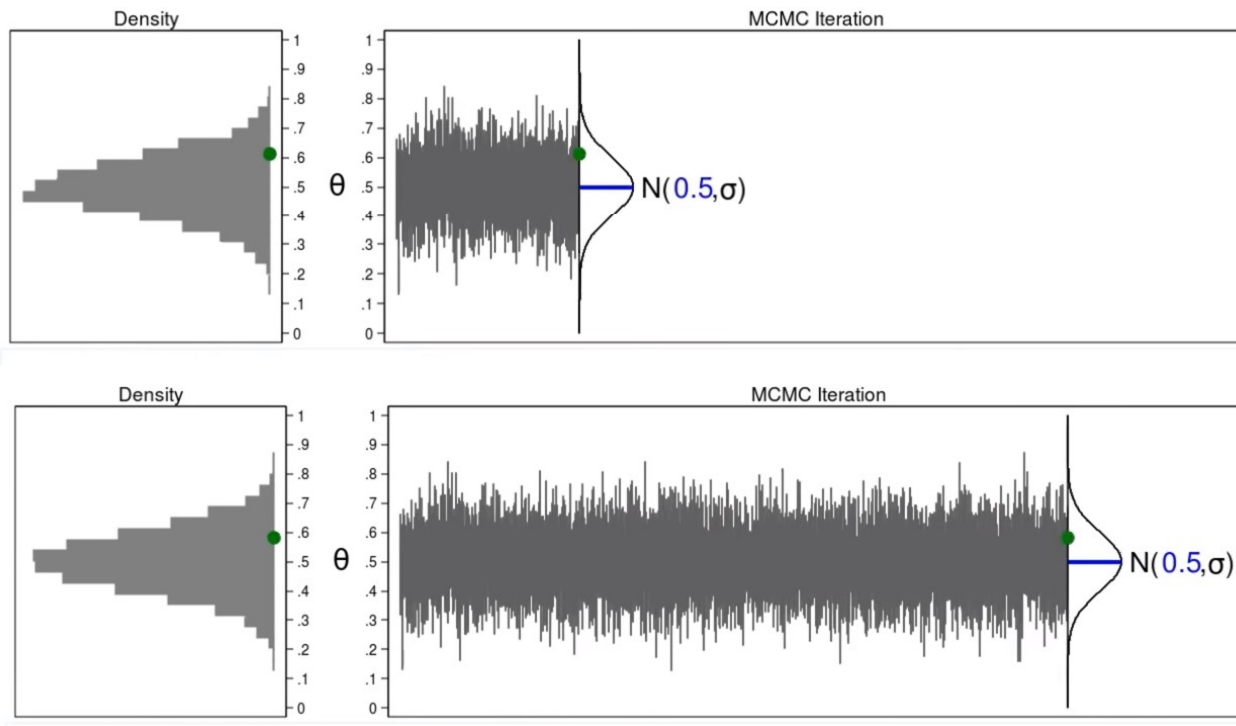
# METODOLOGIA

- Exemplo do KDE aplicado a uma amostra de resíduos de ENA



# METODOLOGIA

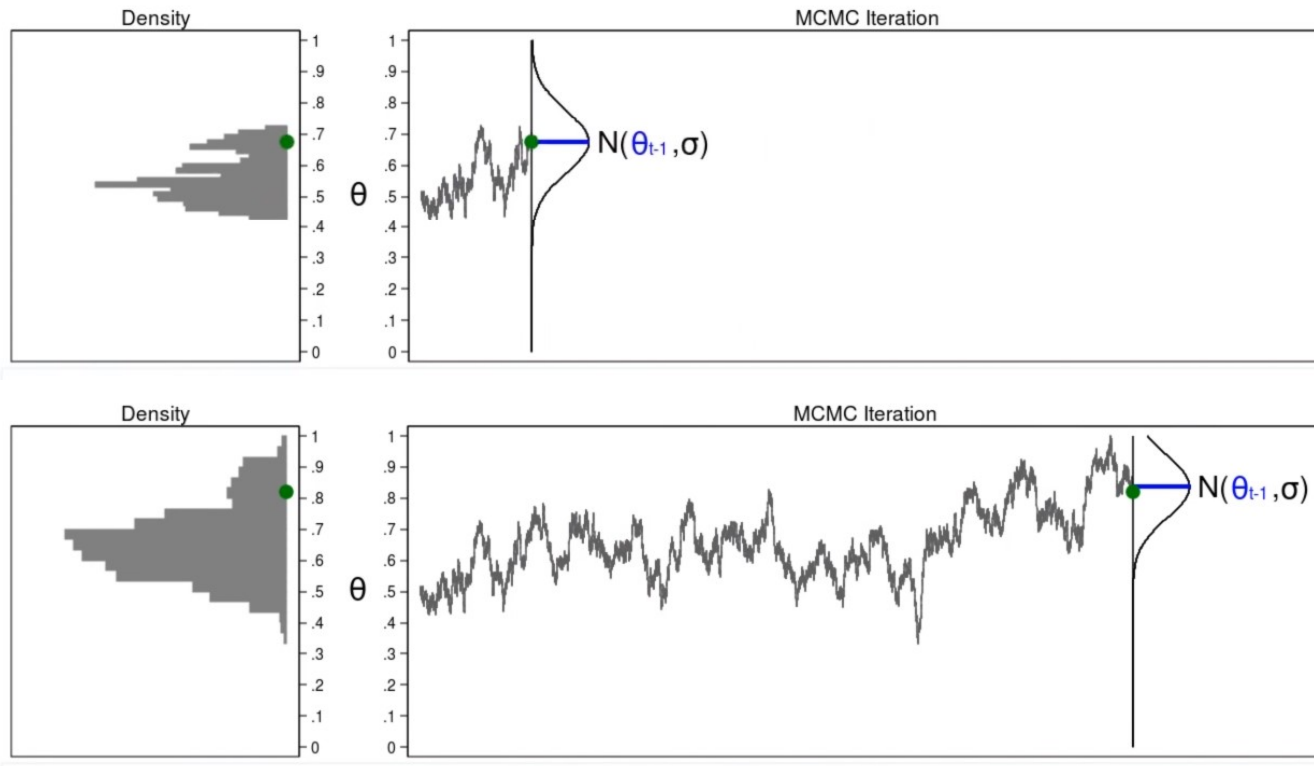
- Monte Carlo





# METODOLOGIA

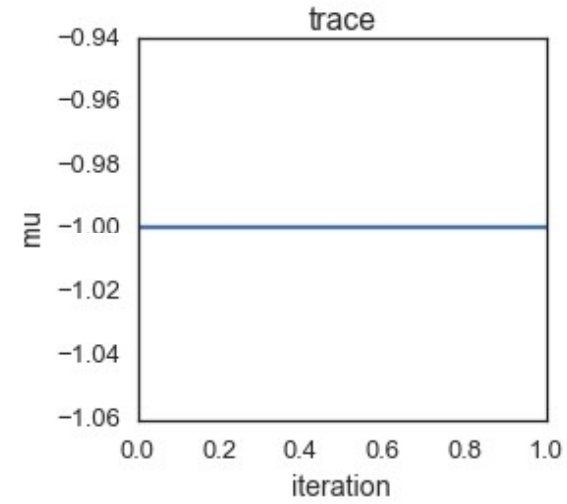
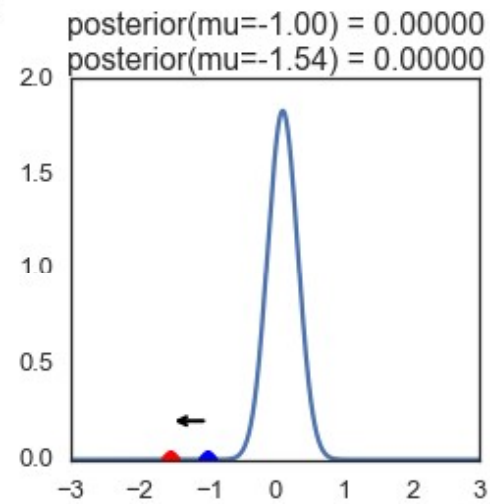
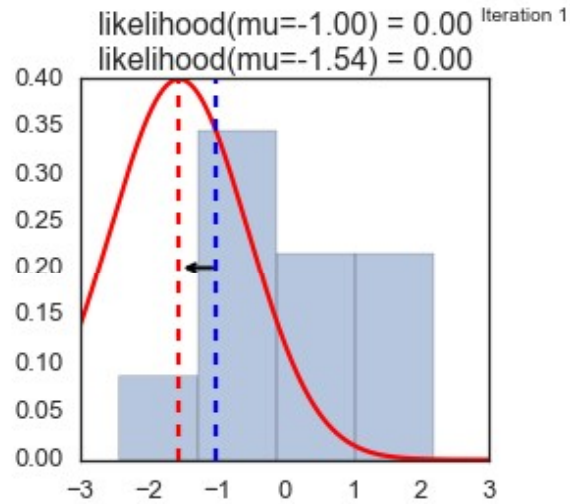
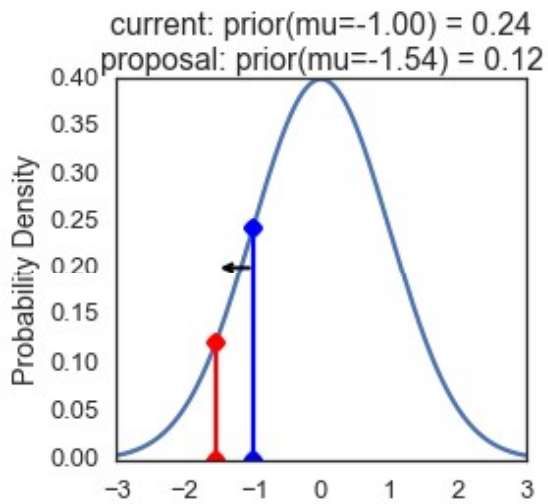
- Markov Chain



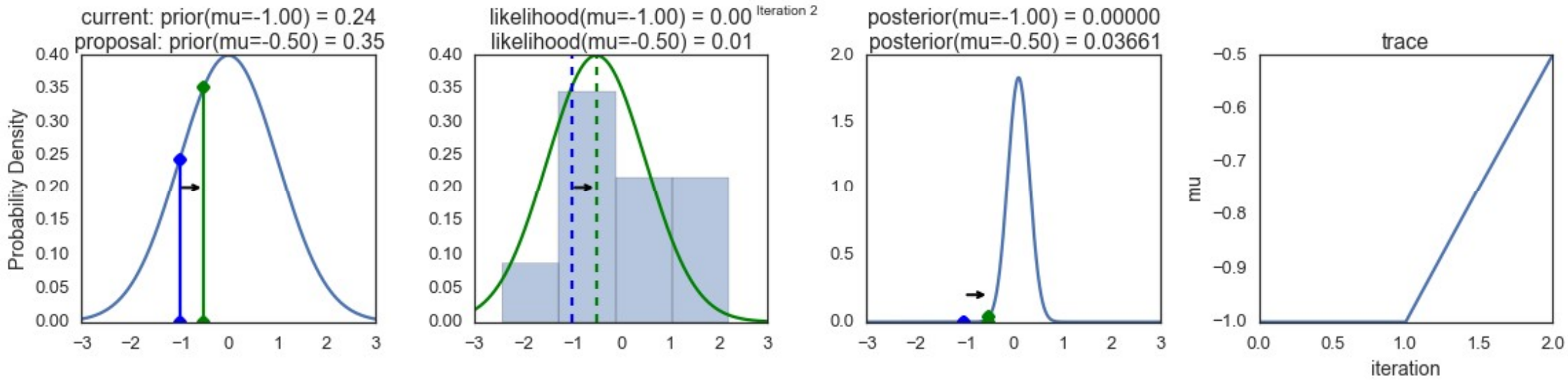
# METODOLOGIA

- MCMC
  - Realiza uma simulação de Monte Carlo utilizando cadeias de Markov
  - Permite gerar amostras de uma distribuição ao embuti-la como distribuição limite da cadeia de Markov
  - Basicamente é utilizado quando a densidade é muito complicada para se amostrar e/ou é definida com um número muito alto de dimensões
- O MCMC gera uma amostra aleatória a partir da avaliação das regiões com alta densidade de probabilidade

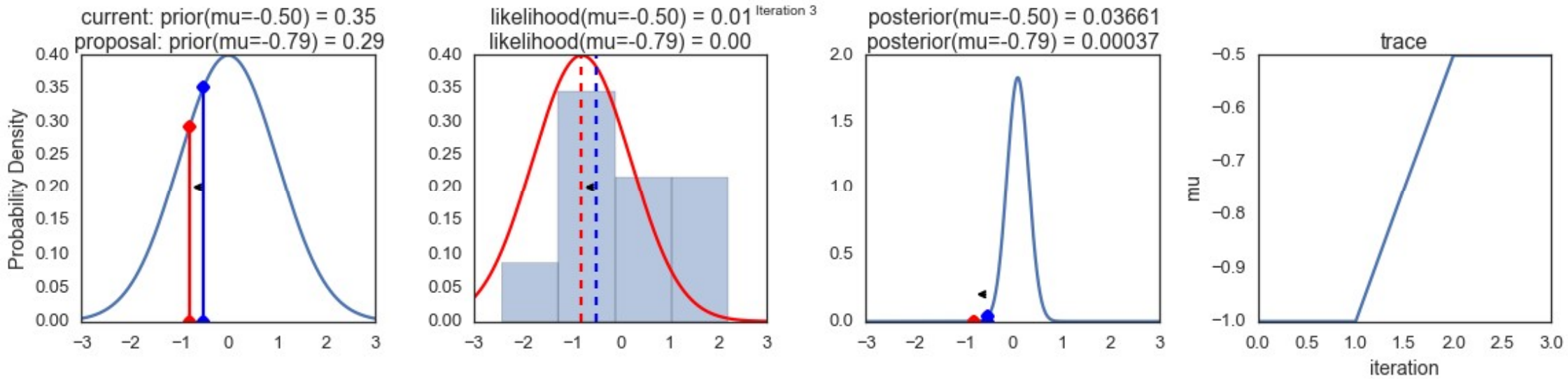
# MCMC



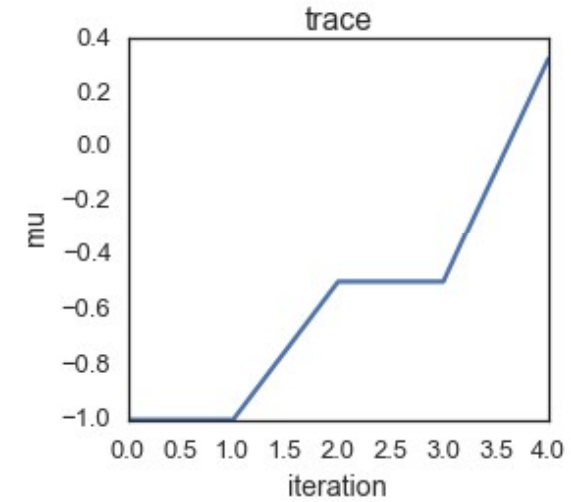
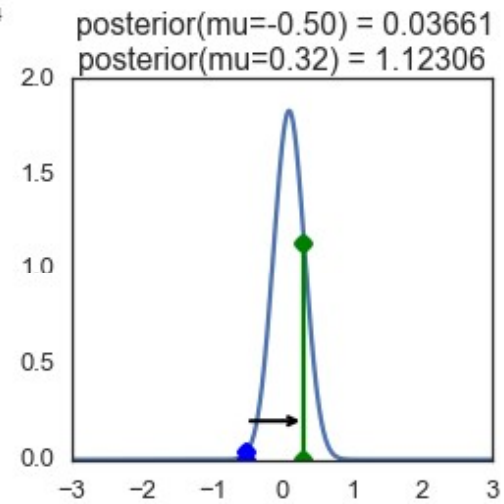
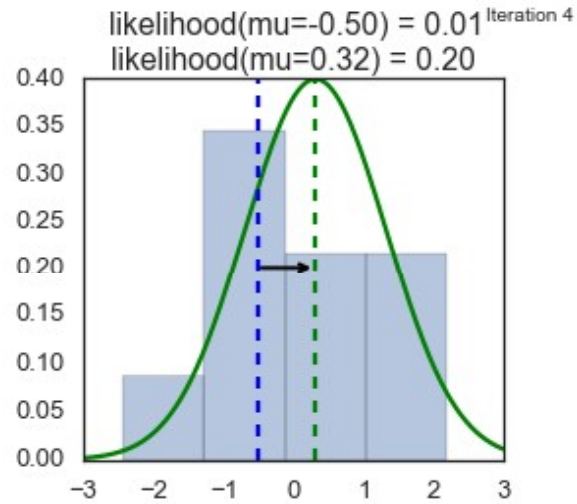
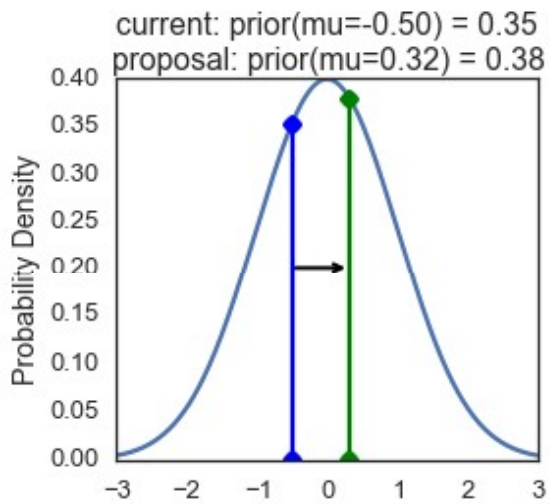
# MCMC



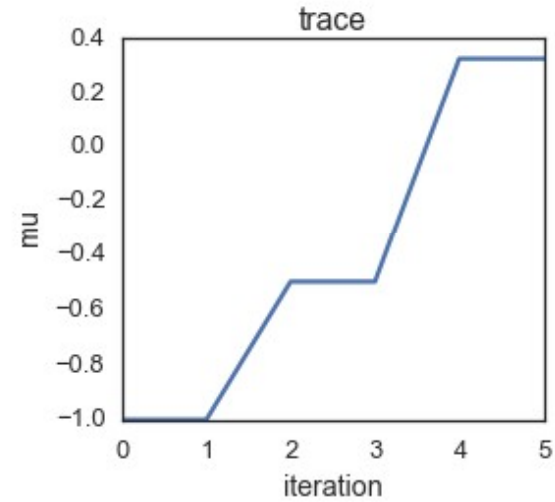
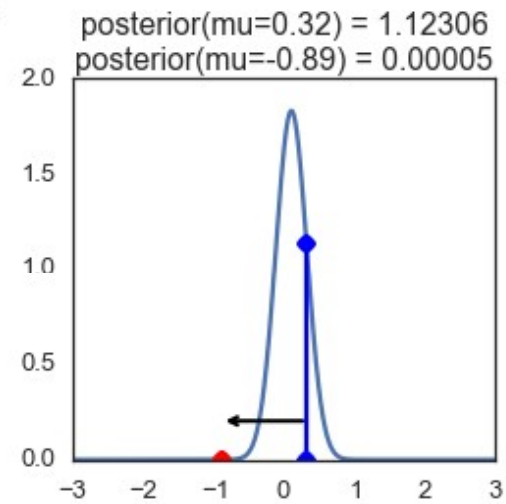
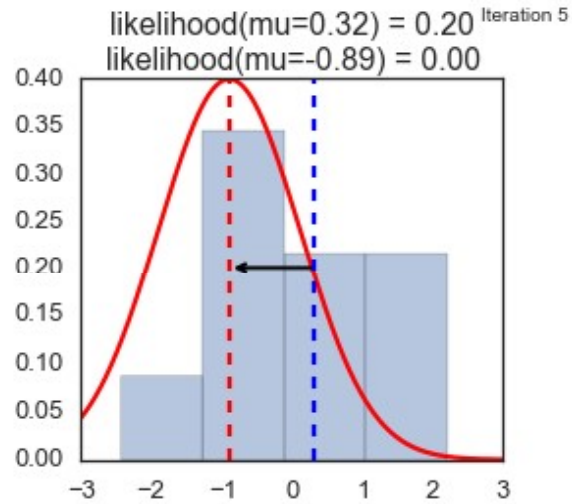
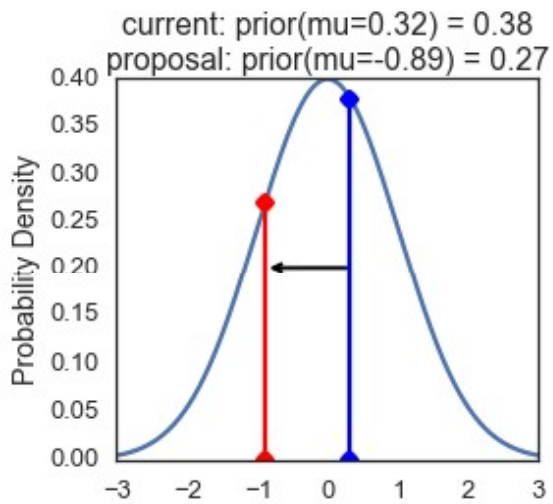
# MCMC



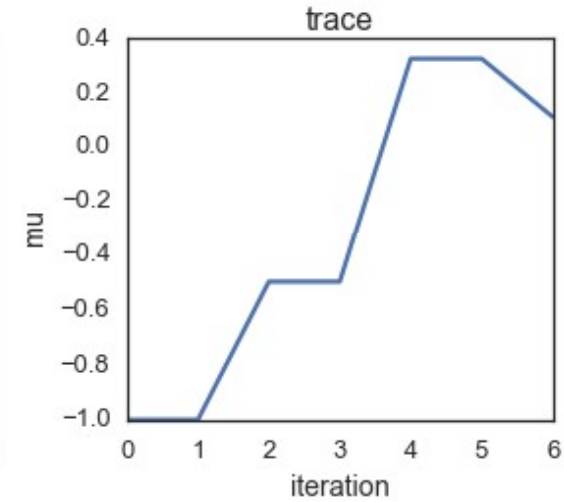
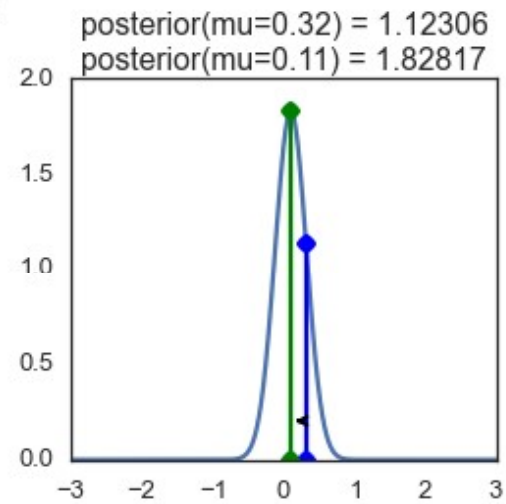
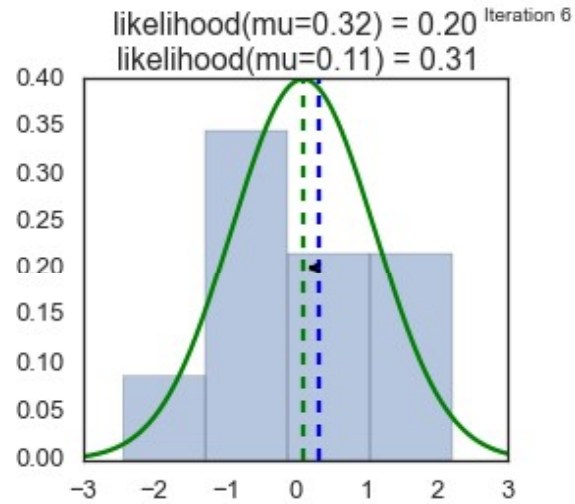
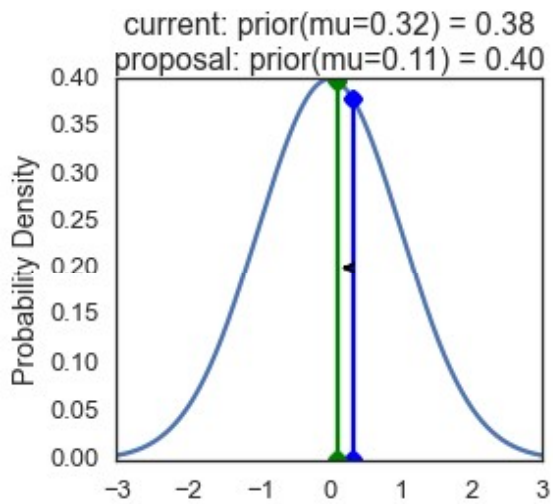
# MCMC



# MCMC

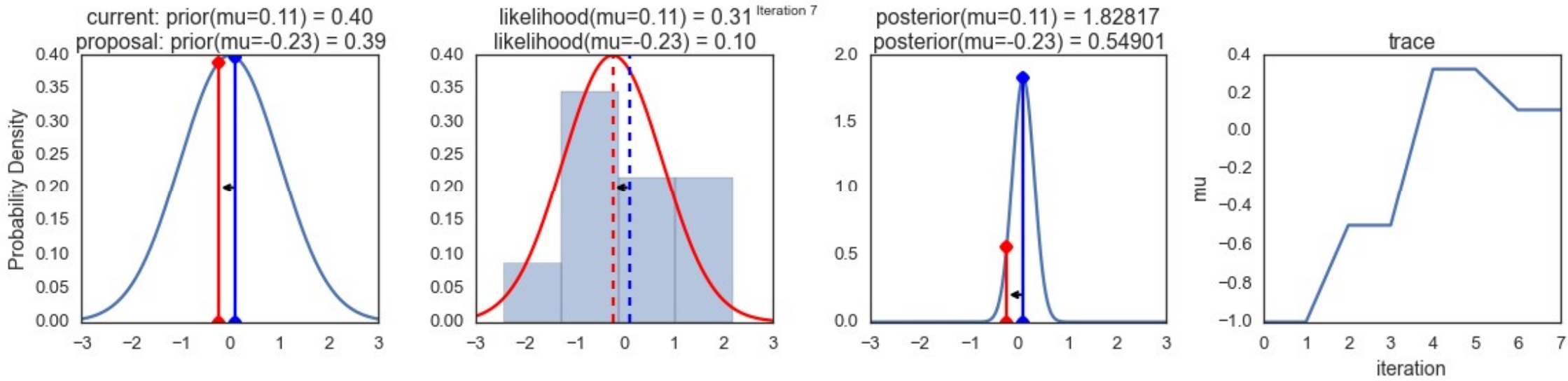


# MCMC

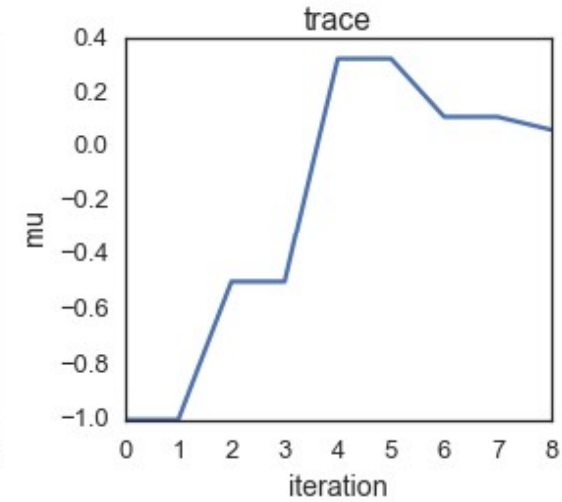
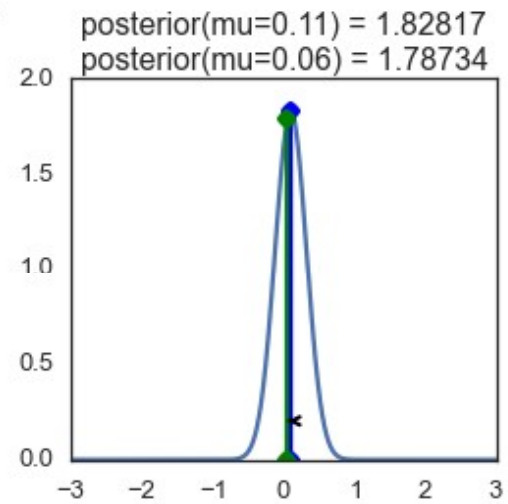
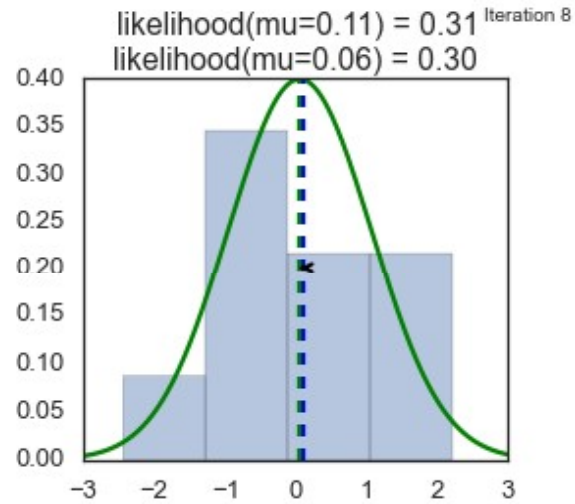
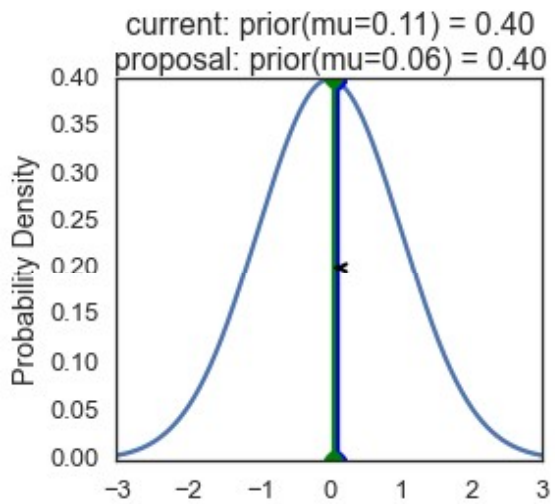




# MCMC



# MCMC



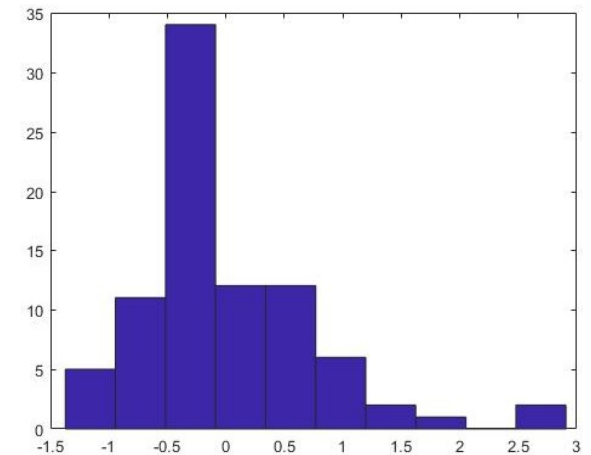
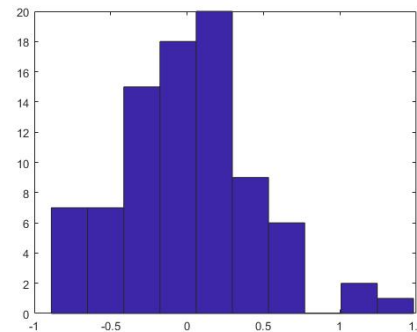
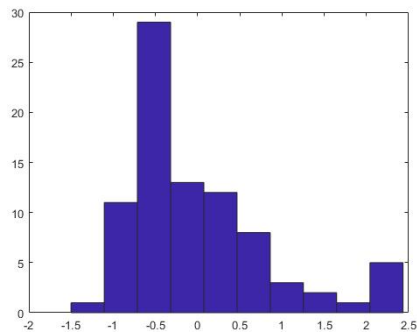
# RESULTADOS

- Modelo PAR(p) simplificado:

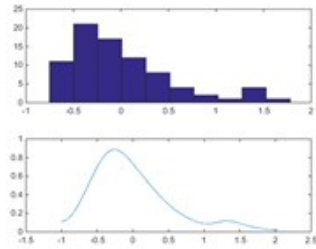
$$\left(\frac{Z_t - \mu_m}{\sigma_m}\right) = \phi_1^m \left(\frac{Z_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}}\right) + \dots + \phi_{p_m}^m \left(\frac{Z_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}}\right) + a_t$$

- Resíduos do modelo:

$$a_t = \left(\frac{Z_t - \mu_m}{\sigma_m}\right) - \left[\phi_1^m \left(\frac{Z_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}}\right) + \dots + \phi_{p_m}^m \left(\frac{Z_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}}\right)\right]$$



# RESULTADOS

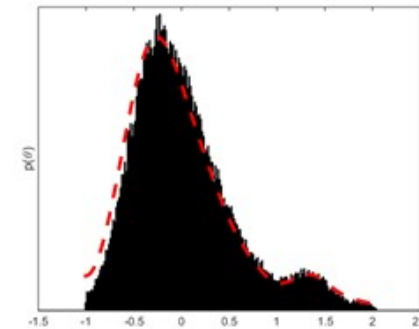
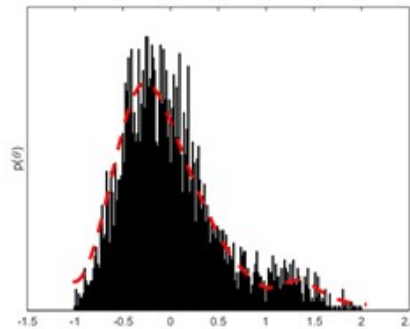
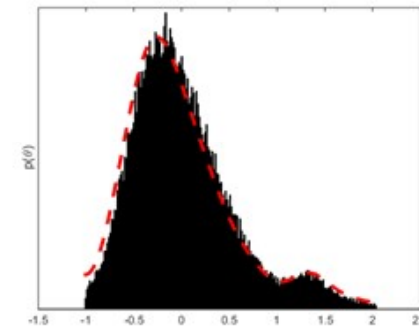
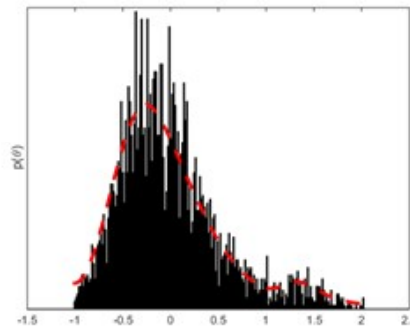


Tamanho do passo = 1

Tamanho do passo = 0.5

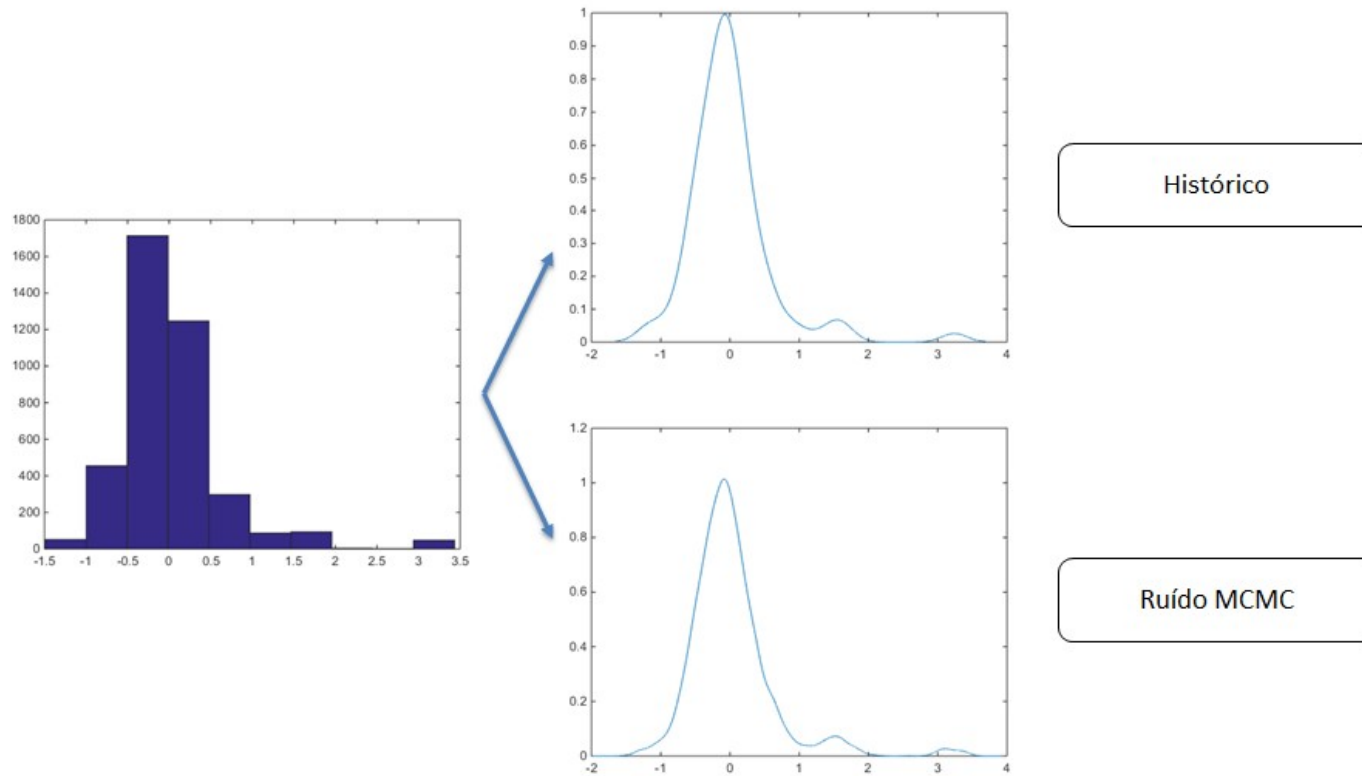
Total de Amostras =  
4000

Total de Amostras =  
100000



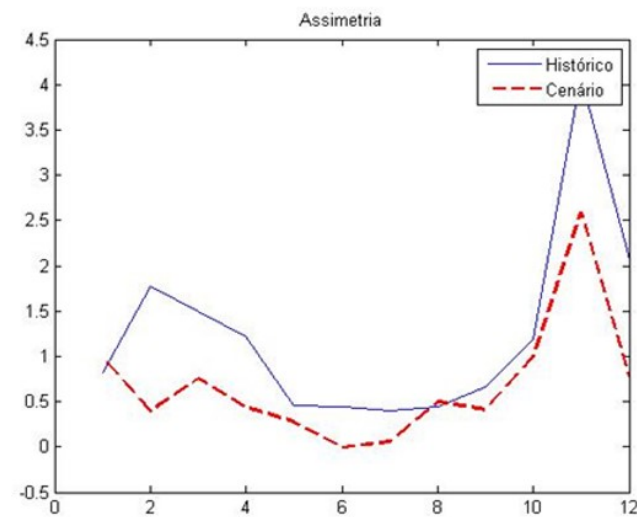
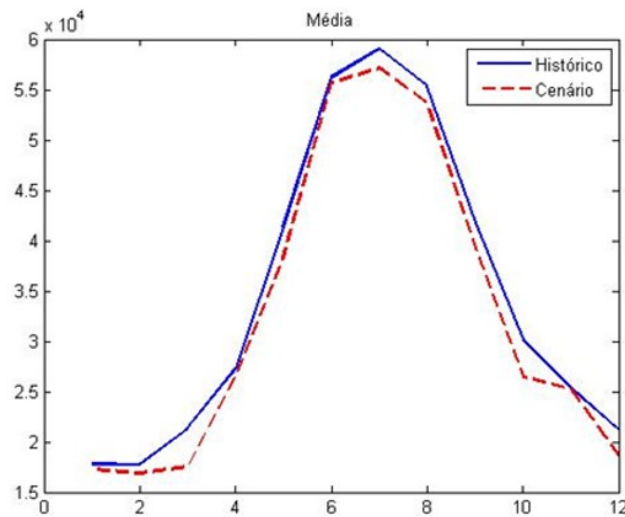
# RESULTADOS

- Verificam-se as amostras em relação aos dados originais utilizando KDE



# RESULTADOS

- Aplicou-se o modelo proposto no pré-estudo para o PMO de agosto de 2016 referente ao subsistema Sudeste, com os seguintes parâmetros:
  - 2000 cenários gerados
  - Passo de 0,5
  - Tamanho da amostra 100.000

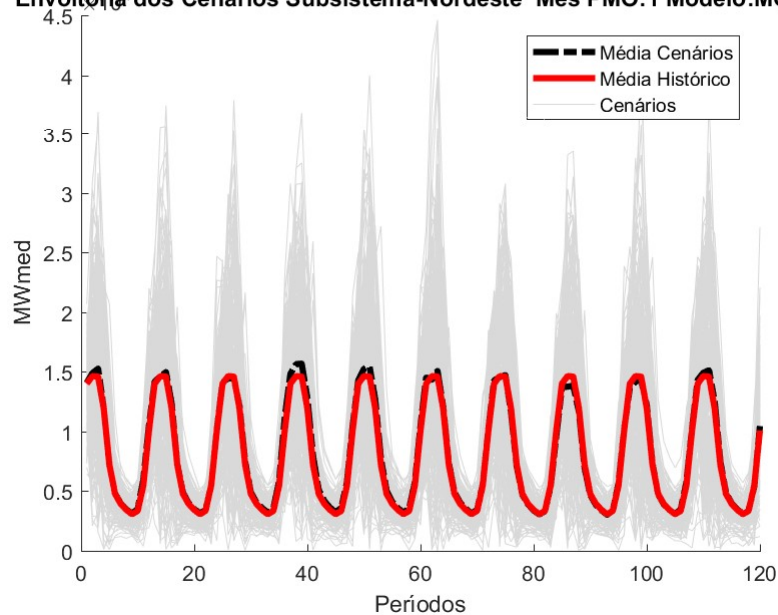


# RESULTADOS

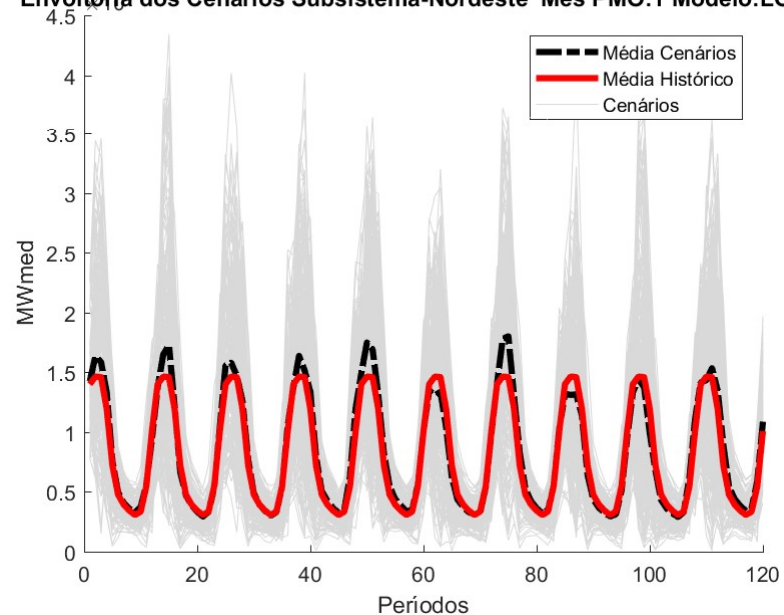
- A partir da validação do modelo no contexto do pré-estudo, aplica-se o mesmo no planejamento de médio prazo, com horizonte de 10 anos, ou seja, 120 períodos.



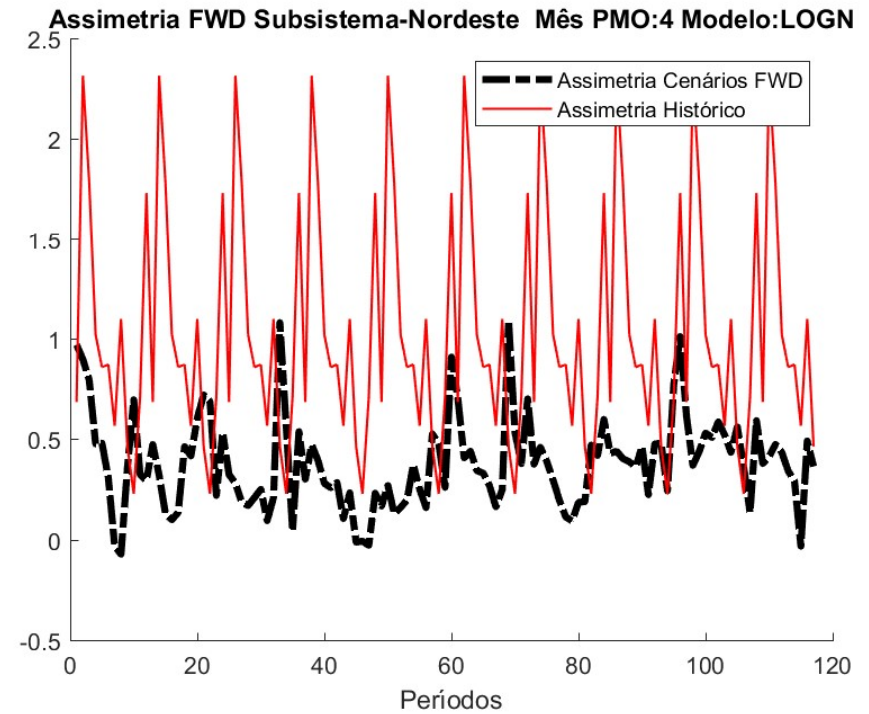
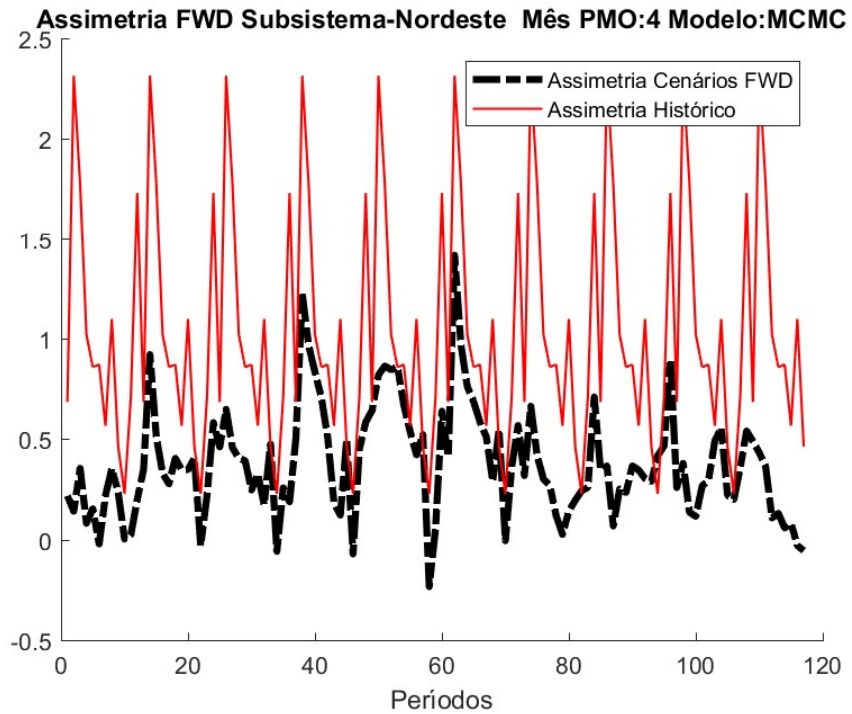
Envoltória dos Cenários Subsistema-Nordeste Mês PMO:1 Modelo:MCMC



Envoltória dos Cenários Subsistema-Nordeste Mês PMO:1 Modelo:LOGN

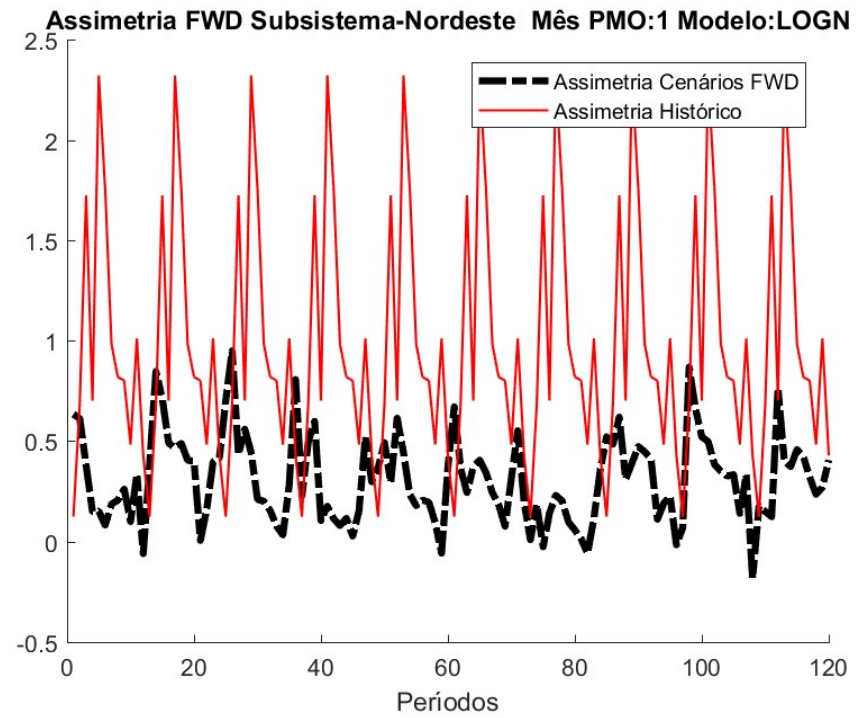
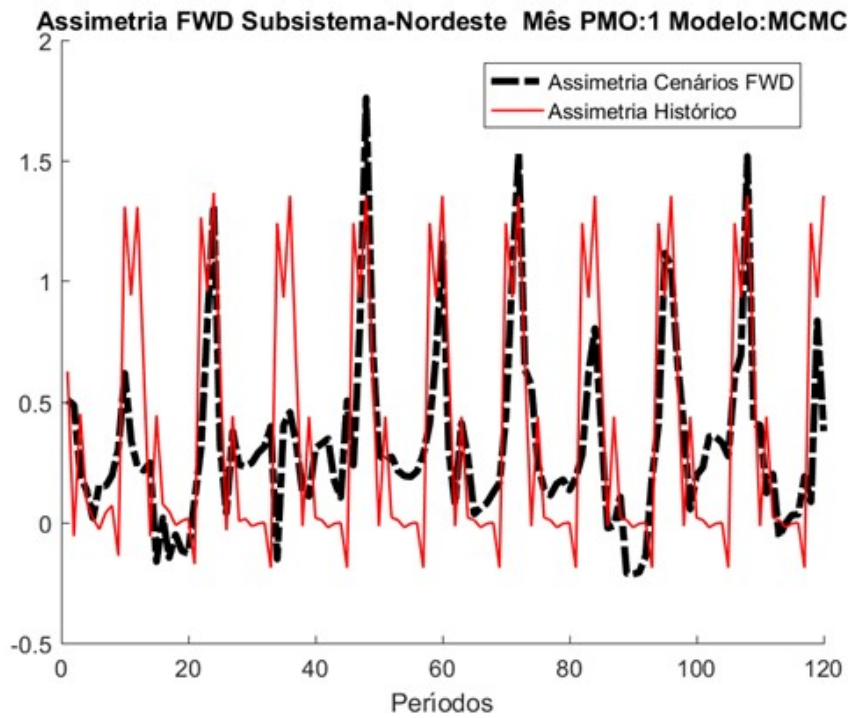


# RESULTADOS





# RESULTADOS



# CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

- Foi apresentado uma metodologia não-paramétrica para simulação de resíduos
- As amostras geradas se comportam como esperado, os resultados são condizentes com a envoltória original, reproduzindo comportamentos limites e assimetrias
- Os cenários de ENA gerados apresentam uma pequena melhora na reprodução das assimetrias
- Trabalhos Futuros
  - Avaliação do impacto dos cenários gerados no contexto da otimização
  - Aplicar o MCMC na geração direta de cenários de ENA, levando em consideração comportamentos extremos e mudanças de configuração
  - Ajustar de um modelo Markoviano nas séries de ENA para geração de cenários

# Obrigado pela atenção!

[baldioti@ele.puc-rio.br](mailto:baldioti@ele.puc-rio.br)



# PREVISÃO DE VAZÕES USANDO MODELOS HÍBRIDOS E PUROS DE MACHINE LEARNING

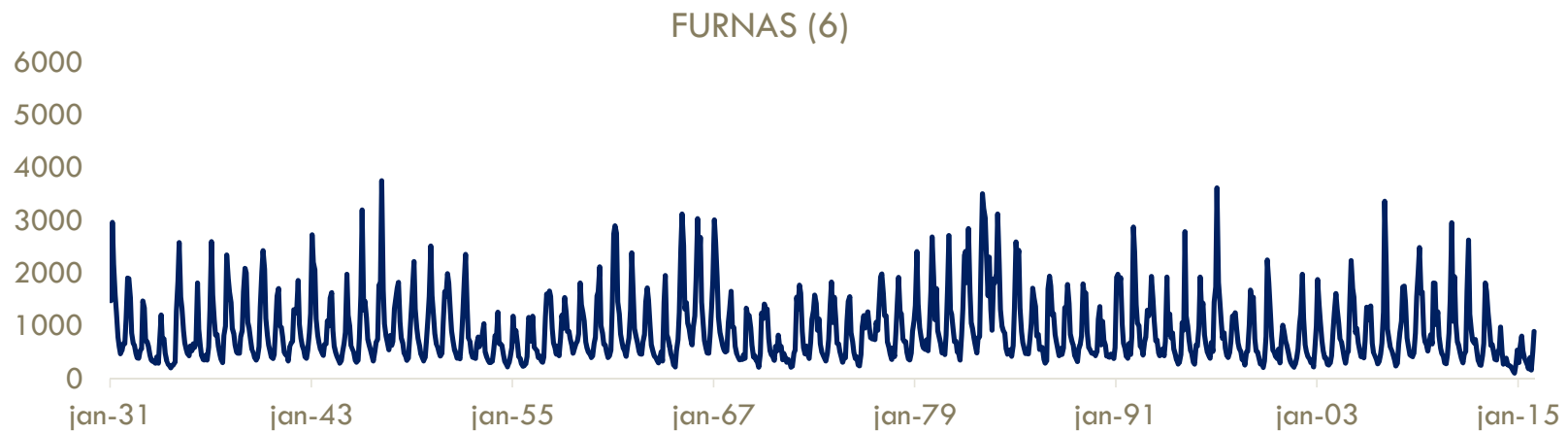
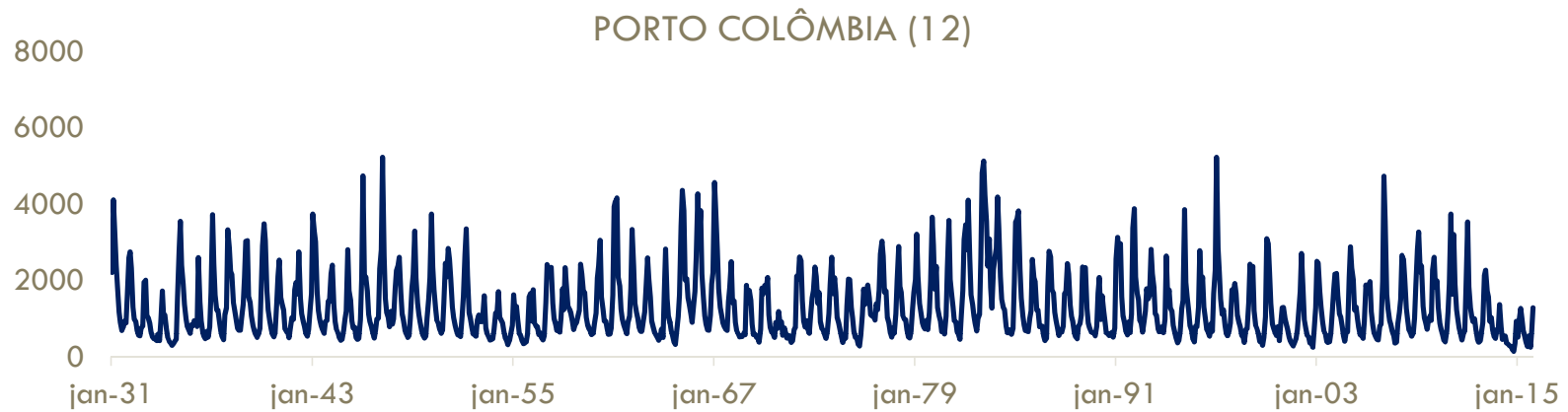
Ana Paula Delfino  
Fernando Cyrino

# A QUESTÃO DA ESTACIONARIEDADE

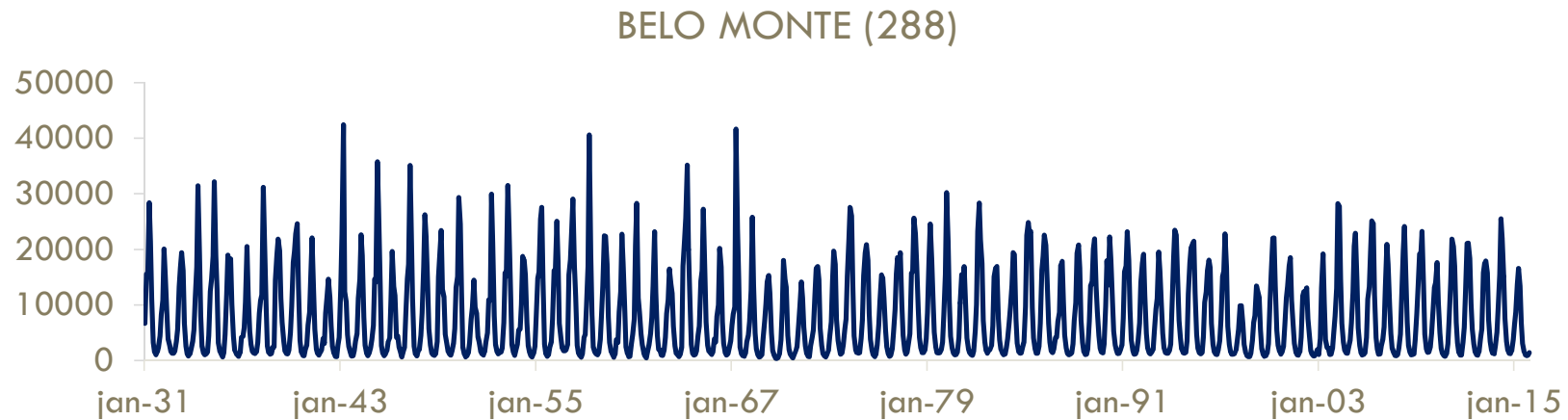
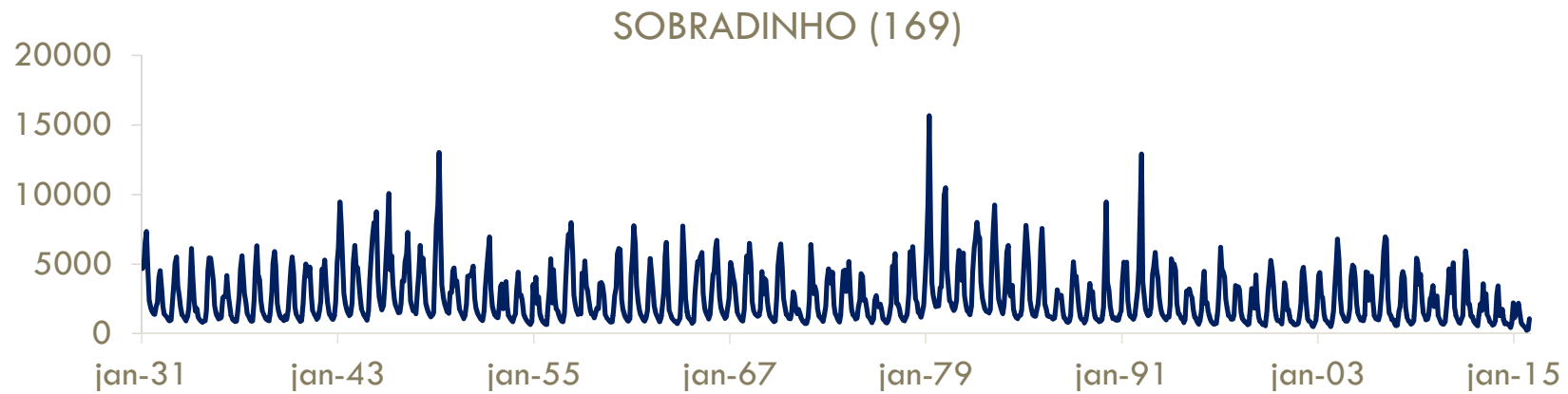


- Modelos Box-Jenkins – Premissa: estacionariedade de segunda ordem
- Teste de Mann-Kendall (Avalia mudanças graduais de tendência):
  - A maioria das séries históricas de vazão brasileiras são NÃO estacionárias !!!

# A QUESTÃO DA ESTACIONARIEDADE



# A QUESTÃO DA ESTACIONARIEDADE



# CONTEXTUALIZAÇÃO



Theor Appl Climatol (2017) 128:875–903  
DOI 10.1007/s00704-016-1735-8


2017

ORIGINAL PAPER

**Application of soft computing based hybrid models in hydrological variables modeling: a comprehensive review**

Farzad Fahimi<sup>1</sup> · Zaher Mundher Yaseen<sup>1</sup> · Ahmed El-shafie<sup>2</sup>

Crescente uso de modelos de Inteligência Artificial em hidrologia!



2013

Contents lists available at [ScienceDirect](#)


**Journal of Hydrology**

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)

Review Paper

**Applications of hybrid wavelet–Artificial Intelligence models in hydrology: A review**

Vahid Nourani<sup>a,\*</sup>, Aida Hosseini Baghanam<sup>a</sup>, Jan Adamowski<sup>b</sup>, Ozgur Kisi<sup>c</sup>



2015

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

**Journal of Hydrology**

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)

Review Paper

**Artificial intelligence based models for stream-flow forecasting: 2000–2015**

Zaher Mundher Yaseen<sup>a,\*</sup>, Ahmed El-shafie<sup>a,b</sup>, Othman Jaafar<sup>a</sup>, Haitham Abdulmohsin Afan<sup>a</sup>, Khamis Naba Sayl<sup>a</sup>



# CONTEXTUALIZAÇÃO



Contents lists available at [ScienceDirect](#)


 **Journal of Hydrology** 2015

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)

Are hybrid models integrated with data preprocessing techniques suitable for monthly streamflow forecasting? Some experiment evidences

Xiaoli Zhang, Yong Peng<sup>\*</sup>, Chi Zhang, Bende Wang

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

 **Journal of Hydrology** 2017

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)

Research papers

**The incorrect usage of singular spectral analysis and discrete wavelet transform in hybrid models to predict hydrological time series**

Kongchang Du<sup>a,b</sup>, Ying Zhao<sup>a,\*</sup>, Jiaqiang Lei<sup>a</sup>

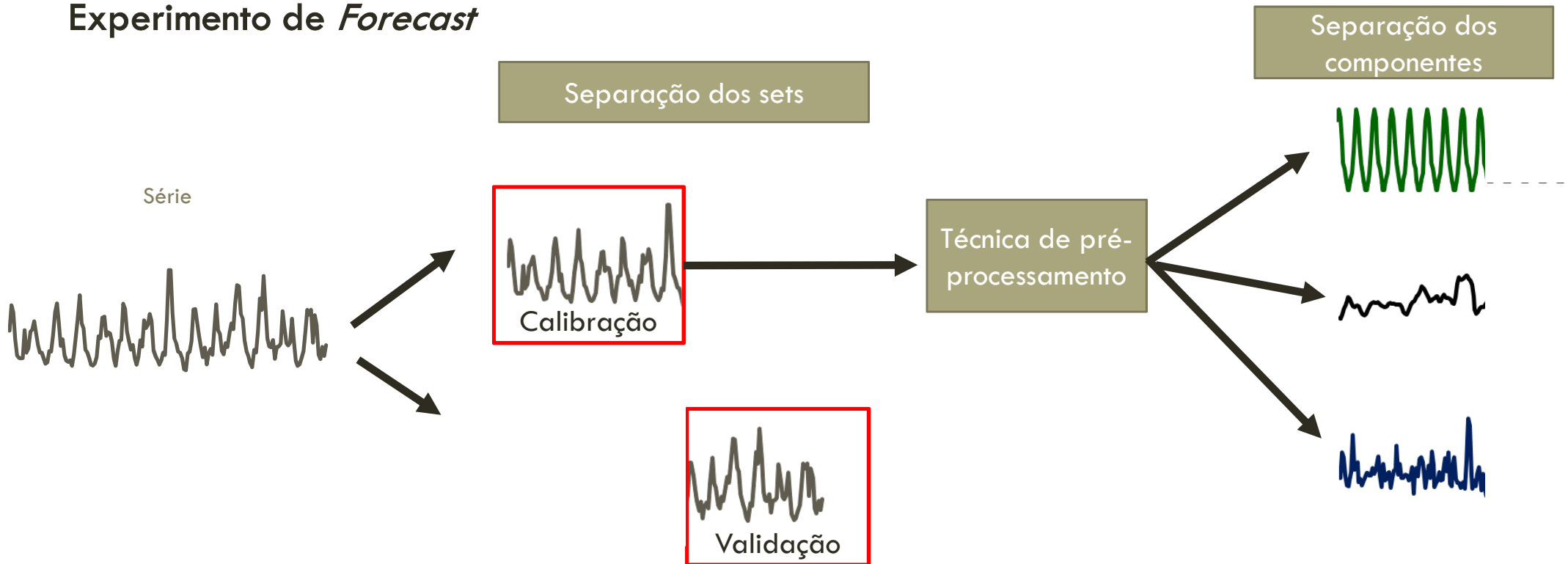
# CONTEXTUALIZAÇÃO



- Modelos híbridos X Modelos Puros: Falta de consenso na literatura
- Modelos híbridos com técnicas de pré-processamento de dados: Informação futura
- Experimento de Hindcast (“Inner”) X Experimento de Forecast (“Outer”)

# CONTEXTUALIZAÇÃO

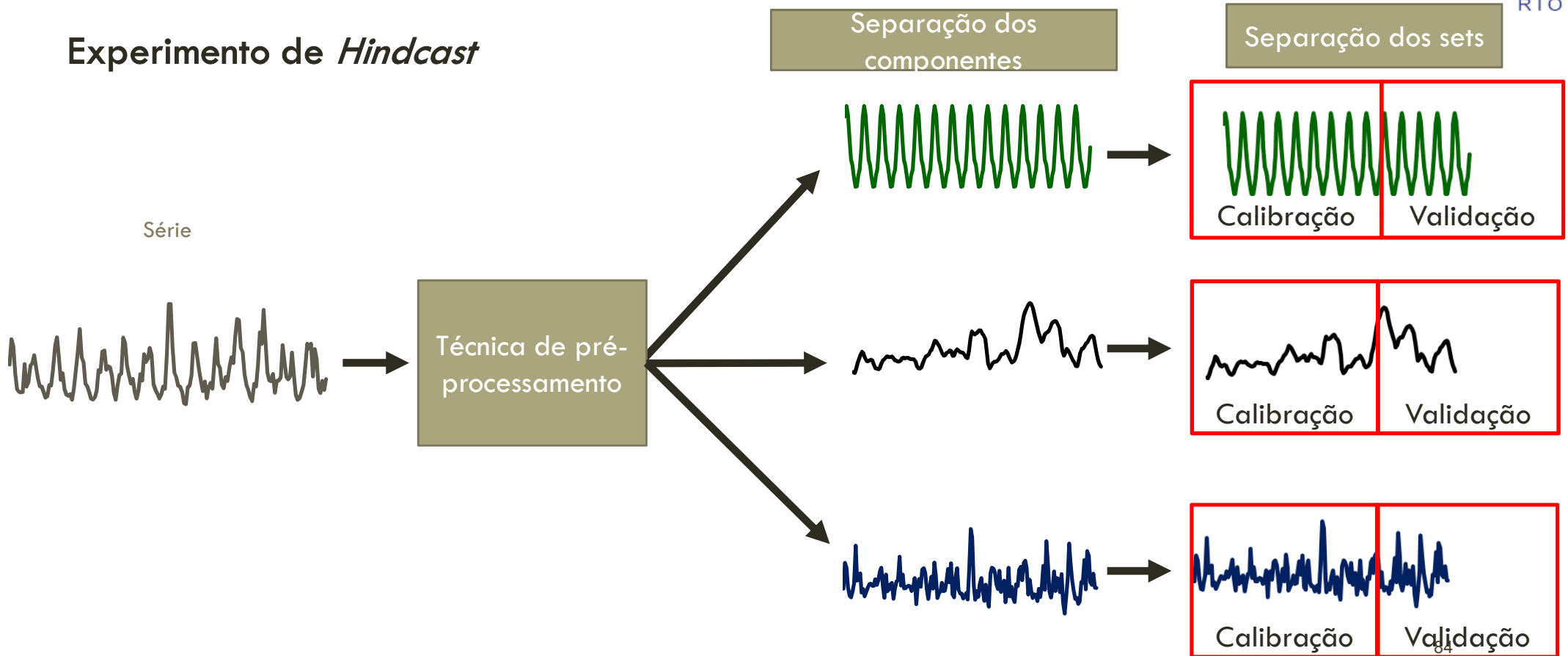
## Experimento de *Forecast*



# CONTEXTUALIZAÇÃO



## Experimento de *Hindcast*



## OBJETIVO

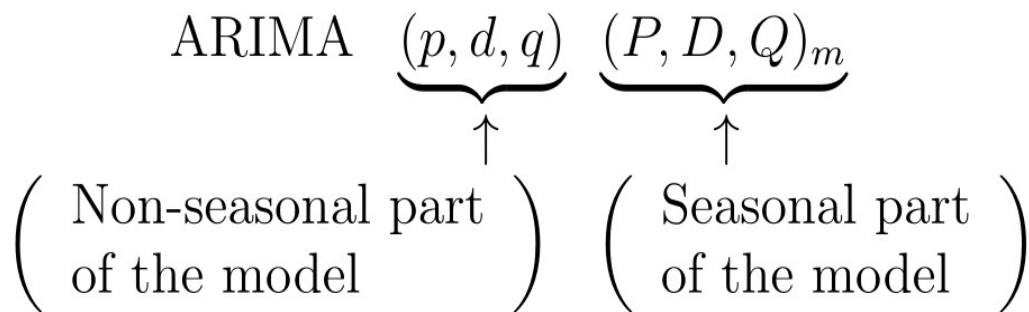


Comparar a performance dos modelos puros e híbridos para as séries de vazões Sobradinho e Belo Monte.

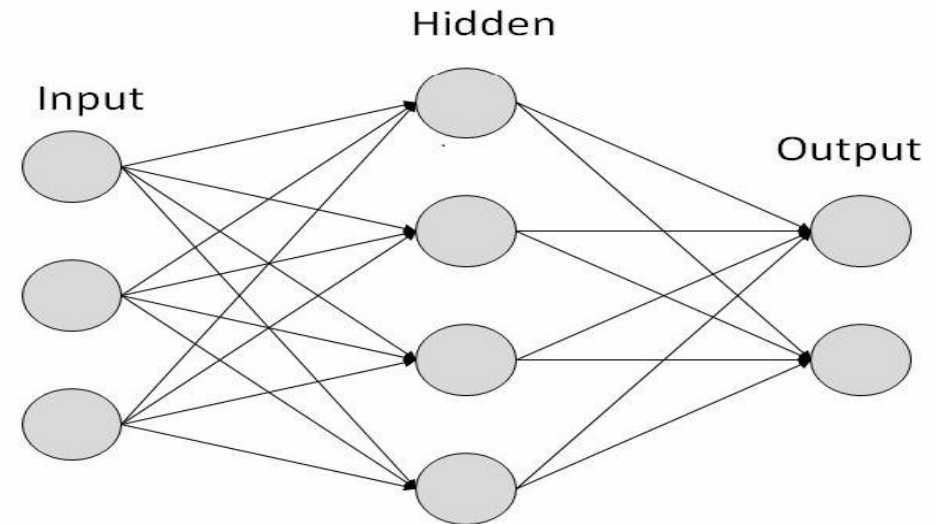
# METODOLOGIA

## 1. Técnicas de modelagem:

### Autorregressivo Integrado de Médias Móveis



### Redes Neurais Artificiais (RNA)



# METODOLOGIA

## 2. Técnicas de pré-processamento de dados:

- **Singular Spectrum Analysis (SSA):**

$$Z_t \approx R_1 + \dots + R_m$$

- **Seasonal and Trend decomposition based on Loess (STL):**

$$Z_t = T_t + S_t + R_t$$

# METODOLOGIA

## 3. Experimento

Modelos Puros

ARIMA

RNA

Modelos Híbridos

SSA-ARIMA

SSA-RNA

STL-ARIMA

STL-RNA





# PRÓXIMOS PASSOS



1. Implementação dos modelos
2. Análise de Resultados

Obrigada pela atenção!

[apsd2505@gmail.com.br](mailto:apsd2505@gmail.com.br)

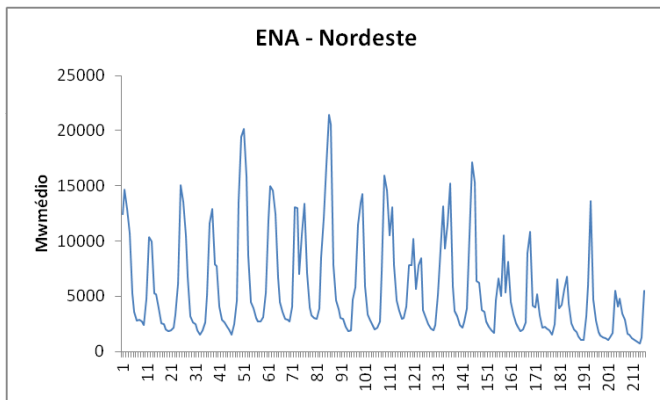


# MODELOS DE SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DE CENÁRIOS DE VAZÃO COM INCORPORAÇÃO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

Paula Maçaira  
Fernando Cyrino

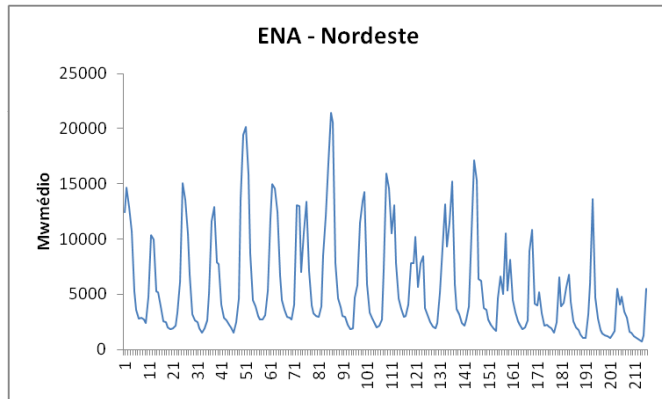
# MOTIVAÇÃO

- Relembrando...

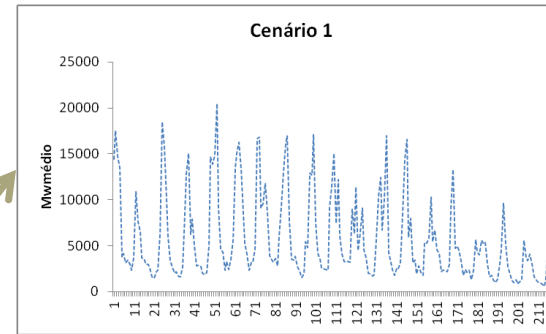


# MOTIVAÇÃO

- Relembrando...

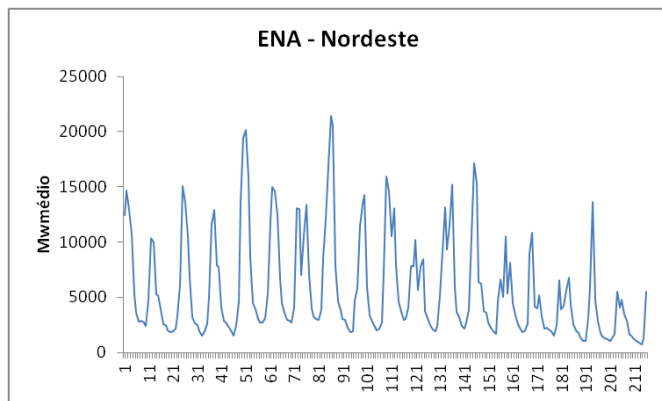


PAR(p)

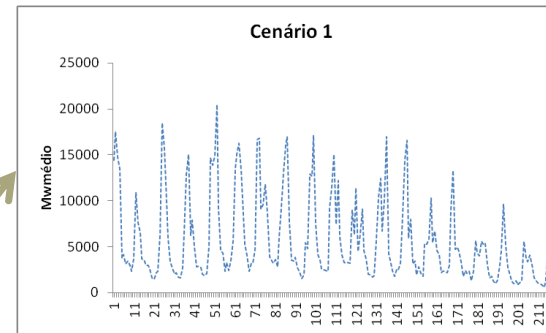


# MOTIVAÇÃO

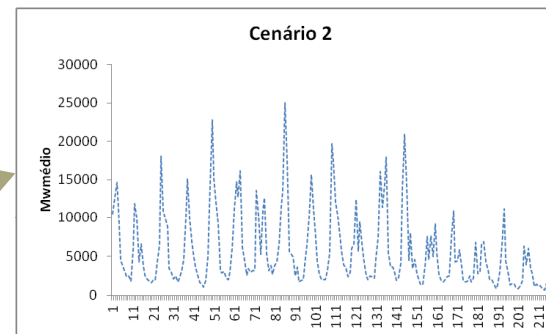
- Relembrando...



PAR(p)

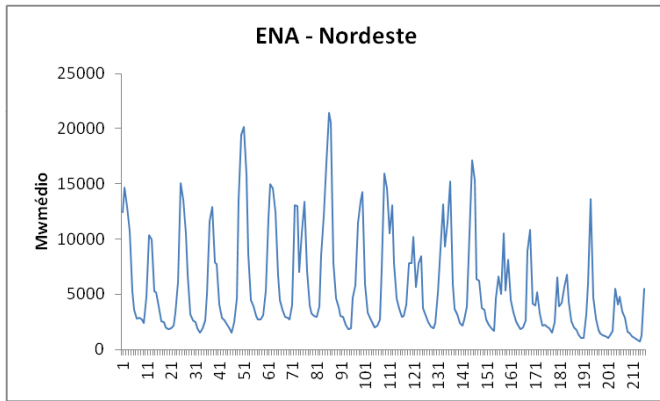


PAR(p)

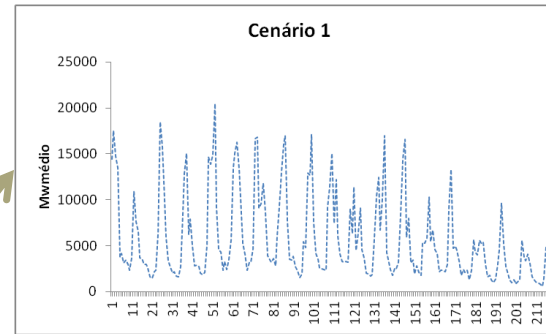


# MOTIVAÇÃO

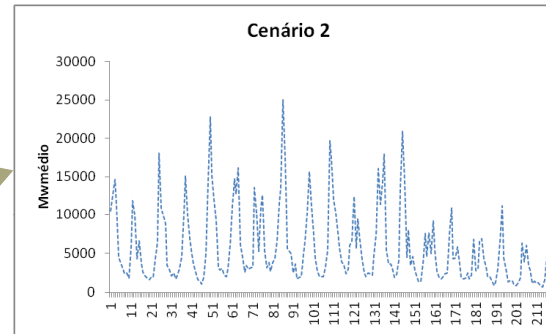
- Relembrando...



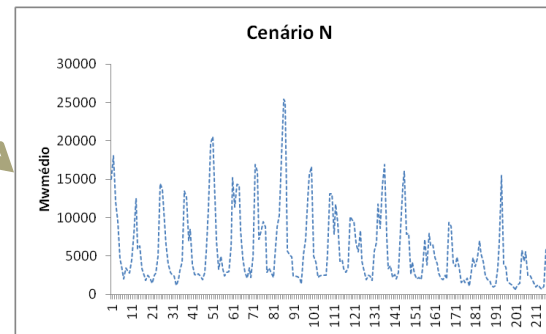
PAR(p)



PAR(p)



PAR(p)



•  
•  
•

# MOTIVAÇÃO



Mas será que nenhum fator externo influencia as séries hidrológicas (e de energia)?



# MOTIVAÇÃO



ELSEVIER

Journal of Hydrology 200 (1997) 24–39

Journal  
of  
**Hydrology**

## ENSO and the natural variability in the flow of tropical rivers

Kishan N. Amarasekera, Robert F. Lee, Earle R. Williams, Elfatih A.B. Eltahir\*

Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 14 (2000) 123–138 © Springer-Verlag 2000

## El Niño influence on streamflow forecasting

J. Kelman, A. de M. Vieira, J. E. Rodriguez-Amaya

GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES, VOL. 16, NO. 4, 1132, doi:10.1029/2002GB001872, 2002

## El Niño–Southern oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia

Jonathan A. Foley, Aurélie Botta, and Michael T. Coe

Center for Sustainability and the Global Environment (SAGE), Gaylord Nelson Institute for Environmental Studies, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, USA

Marcos Heil Costa

Department of Agricultural and Environmental Engineering, Federal University of Viçosa, Viçosa, Brazil

Advances in Geosciences, 6, 189–193, 2006  
SRef-ID: 1680-7359/adgeo/2006-6-189  
European Geosciences Union  
© 2006 Author(s). This work is licensed  
under a Creative Commons License.



Advances in  
Geosciences

## The relationship between ENSO and Paraná River flow

A. O. Cardoso and P. L. Silva Dias

Journal of Hydrology 380 (2010) 438–449



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hydrology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)



## Climate informed monthly streamflow forecasts for the Brazilian hydropower network using a periodic ridge regression model

Carlos H.R. Lima\*, Upmanu Lall

Journal of Hydrology 519 (2014) 1130–1140



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hydrology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)



## Forecasts of seasonal streamflow in West-Central Florida using multiple climate predictors

Susan L. Risko, Christopher J. Martinez\*



# MOTIVAÇÃO



Alguns autores também identificaram que um pré-processamento também é benéfico para a modelagem das séries hidrológicas

# MOTIVAÇÃO

HYDROLOGICAL PROCESSES  
*Hydrol. Process.* **22**, 4877–4891 (2008)  
Published online 10 September 2008 in Wiley InterScience  
(www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/hyp.7107

## River flow forecasting using wavelet and cross-wavelet transform models

Jan F. Adamowski\*



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Physics and Chemistry of the Earth 31 (2006) 1172–1179

PHYSICS  
and CHEMISTRY  
of the EARTH

[www.elsevier.com/locate/pce](http://www.elsevier.com/locate/pce)

### Singular spectrum analysis and forecasting of hydrological time series

C.A.F. Marques \*, J.A. Ferreira, A. Rocha, J.M. Castanheira,  
P. Melo-Gonçalves, N. Vaz, J.M. Dias



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Journal of Hydrology 324 (2006) 383–399

Journal  
of  
Hydrology

[www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)

### Forecasting daily streamflow using hybrid ANN models

Wen Wang <sup>a,b,\*</sup>, Pieter H.A.J.M. Van Gelder <sup>b</sup>, J.K. Vrijling <sup>b</sup>, Jun Ma <sup>c</sup>

WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 45, W08432, doi:10.1029/2007WR006737, 2009

### Predicting monthly streamflow using data-driven models coupled with data-preprocessing techniques

C. L. Wu,<sup>1</sup> K. W. Chau,<sup>1</sup> and Y. S. Li<sup>1</sup>

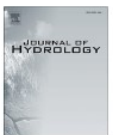
Journal of Hydrology 530 (2015) 137–152



Contents lists available at [ScienceDirect](http://ScienceDirect)

Journal of Hydrology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)



Are hybrid models integrated with data preprocessing techniques suitable for monthly streamflow forecasting? Some experiment evidences

Xiaoli Zhang, Yong Peng\*, Chi Zhang, Bende Wang



# OBJETIVO



Propor uma nova abordagem metodológica para a geração de séries sintéticas que seja capaz de capturar as características particulares das séries de vazão e também incorporar variáveis climáticas

# METODOLOGIA



Métodos de Séries Temporais

- PAR(p)
- PARX
- GAM

Métodos de Decomposição

- SSA
- MSSA

Modelos Híbridos

- SSA+PAR(p)
- MSSA+PAR(p)
- SSA+PARX
- SSA+GAM

# METODOLOGIA

- PAR(p) → já foi apresentado anteriormente



# METODOLOGIA

- PAR(p) → já foi apresentado anteriormente
- PAR with one exogenous variable (PARX)

$$\left( \frac{z_{(t,m)} - \mu_m}{\sigma_m} \right) = \sum_{i=1}^{p_m} \varphi_i^{(m)} \left( \frac{z_{(t,m-i)} - \mu_{m-i}}{\sigma_{m-i}} \right) + \sum_{j=1}^{v_m} \theta_j^{(m)} x_{(t,m-j)} + a_{t,m}$$

# METODOLOGIA

- PAR(p) → já foi apresentado anteriormente
- PAR with one exogenous variable (PARX)

$$\left( \frac{z_{(t,m)} - \mu_m}{\sigma_m} \right) = \sum_{i=1}^{p_m} \varphi_i^{(m)} \left( \frac{z_{(t,m-i)} - \mu_{m-i}}{\sigma_{m-i}} \right) + \sum_{j=1}^{v_m} \theta_j^{(m)} x_{(t,m-j)} + a_{t,m}$$



# METODOLOGIA

- PAR(p) → já foi apresentado anteriormente
- PAR with one exogenous variable (PARX)

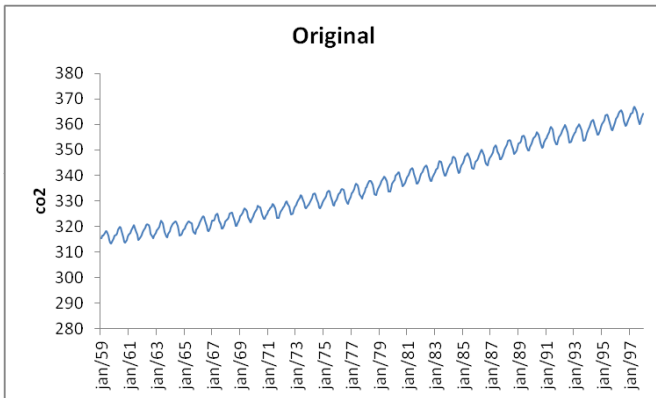
$$\left( \frac{z_{(t,m)} - \mu_m}{\sigma_m} \right) = \sum_{i=1}^{p_m} \varphi_i^{(m)} \left( \frac{z_{(t,m-i)} - \mu_{m-i}}{\sigma_{m-i}} \right) + \sum_{j=1}^{v_m} \theta_j^{(m)} x_{(t,m-j)} + a_{t,m}$$

- Generalized Additive Model (GAM)

$$g[E(Y|X_1, \dots, X_p)] = \alpha + f_1(X_1) + \dots + f_p(X_p)$$

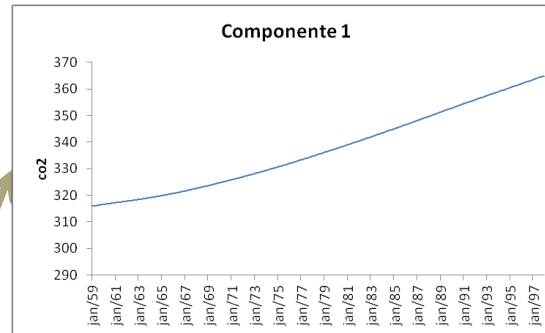
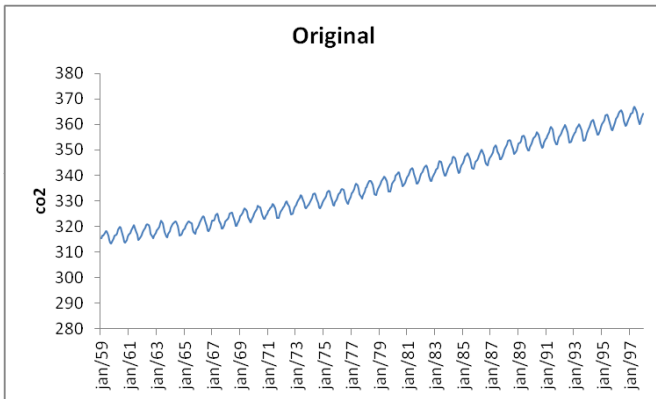
# METODOLOGIA

- Singular Spectrum Analysis (SSA)



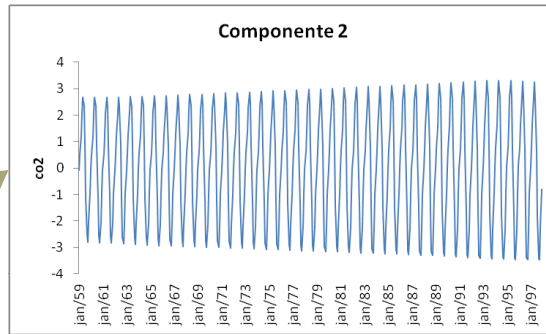
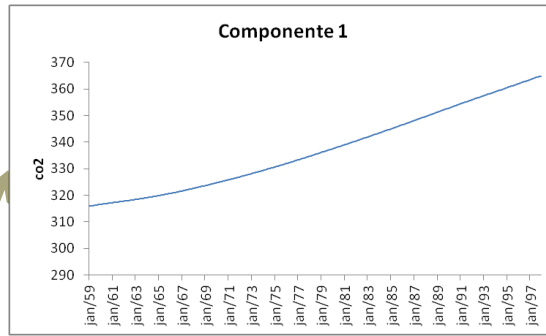
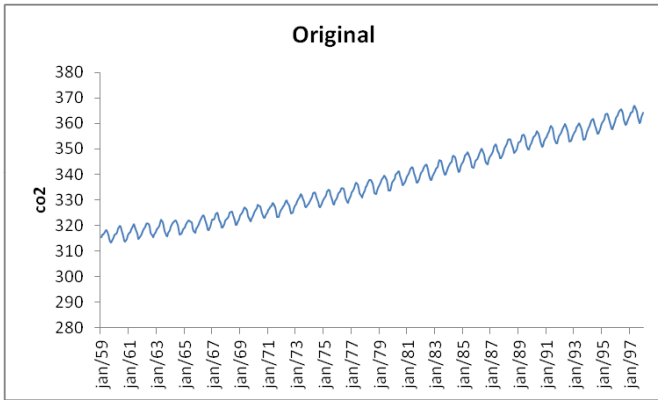
# METODOLOGIA

- Singular Spectrum Analysis (SSA)



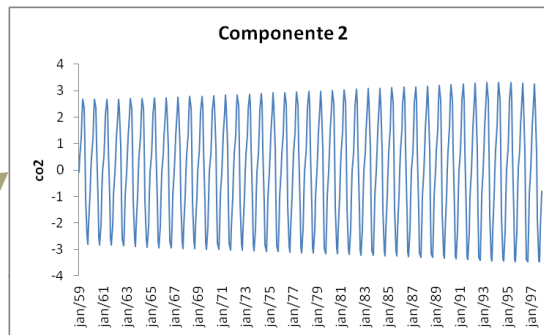
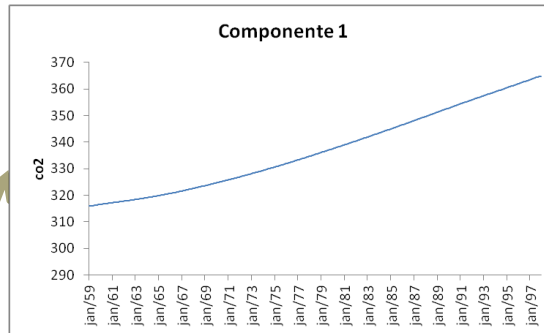
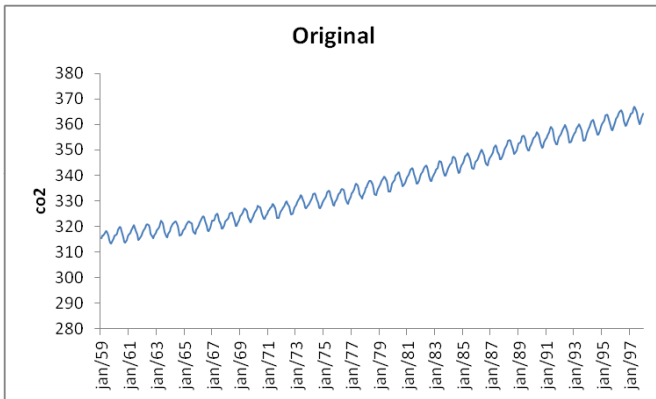
# METODOLOGIA

- Singular Spectrum Analysis (SSA)

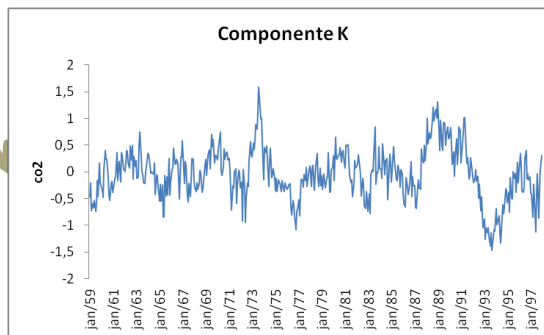


# METODOLOGIA

- Singular Spectrum Analysis (SSA)

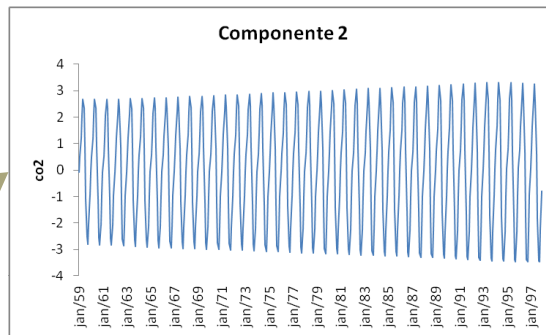
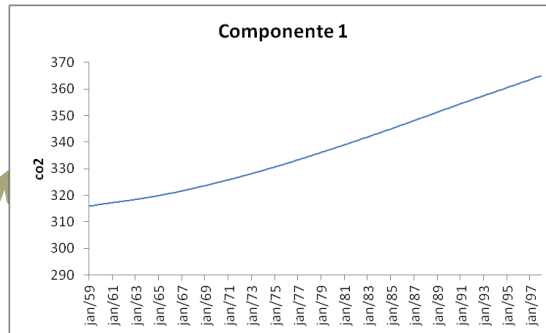
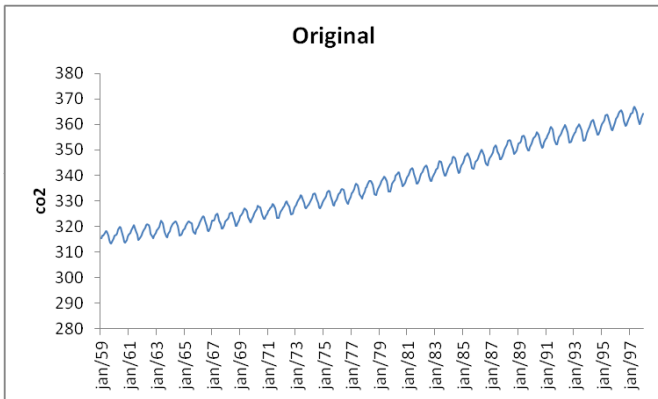


•  
•  
•

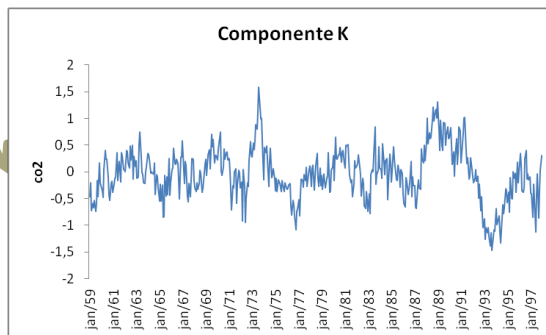


# METODOLOGIA

- Singular Spectrum Analysis (SSA)

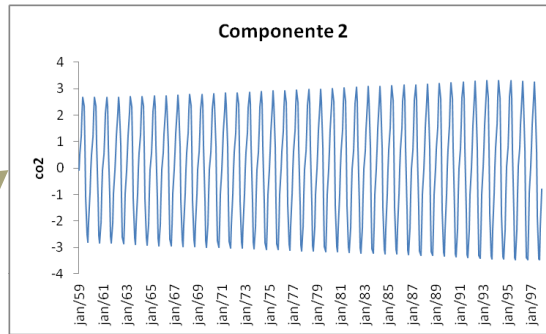
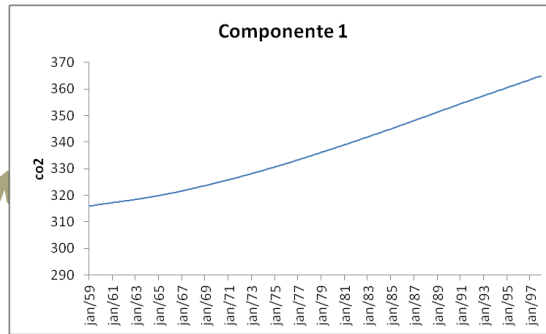
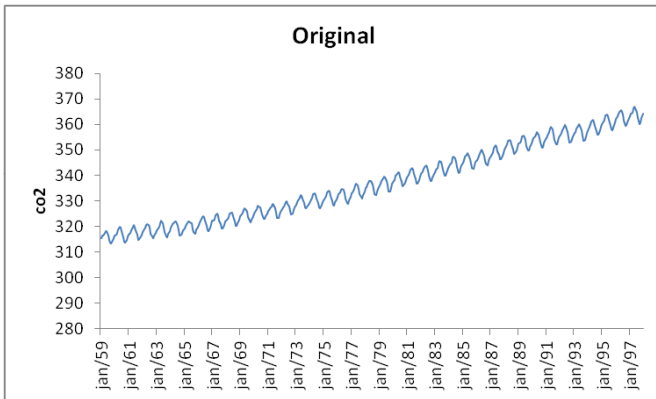


•  
•  
•

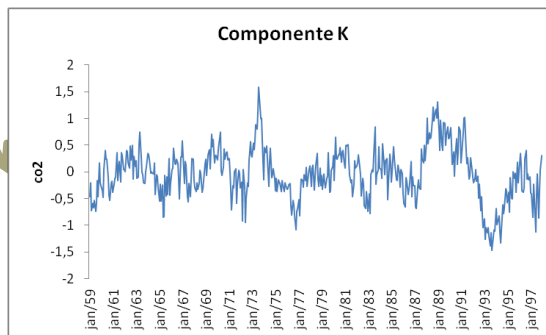


# METODOLOGIA

- Singular Spectrum Analysis (SSA)

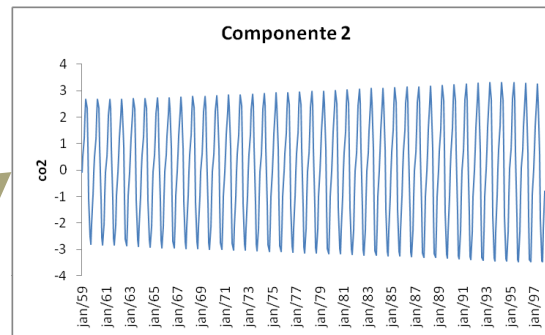
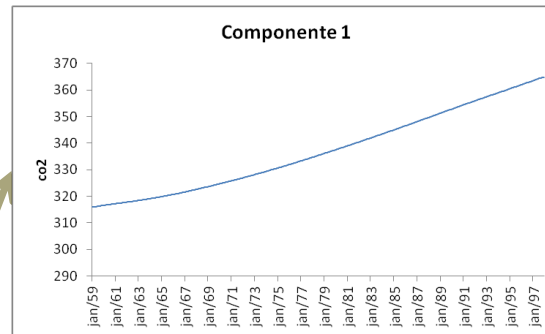
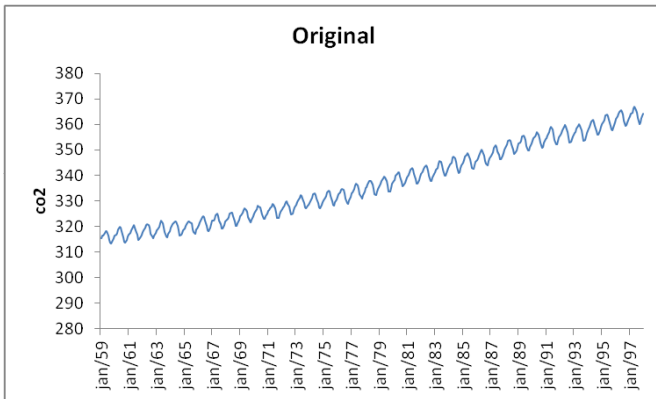


•  
•  
•

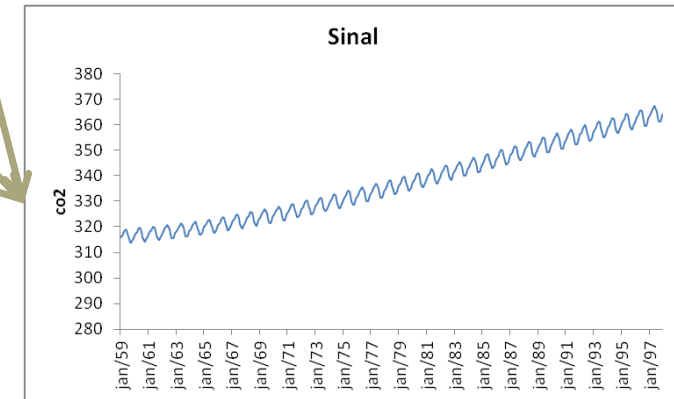
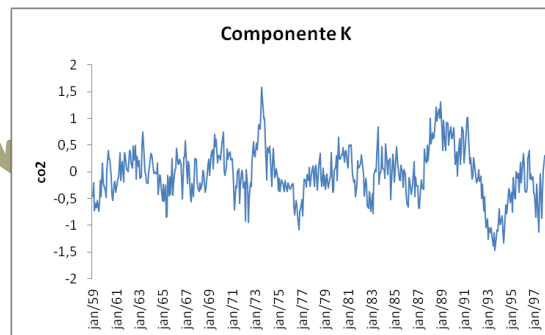


# METODOLOGIA

- Singular Spectrum Analysis (SSA)



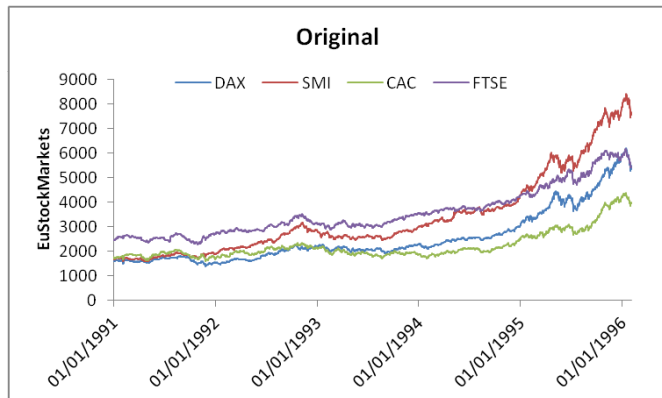
•  
•  
•





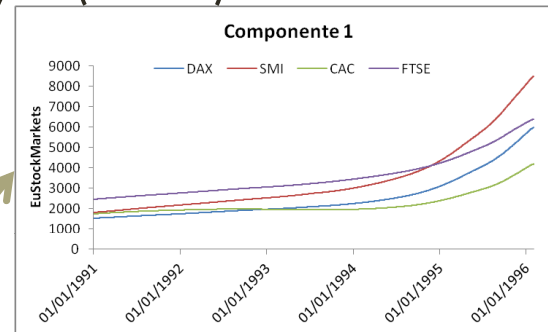
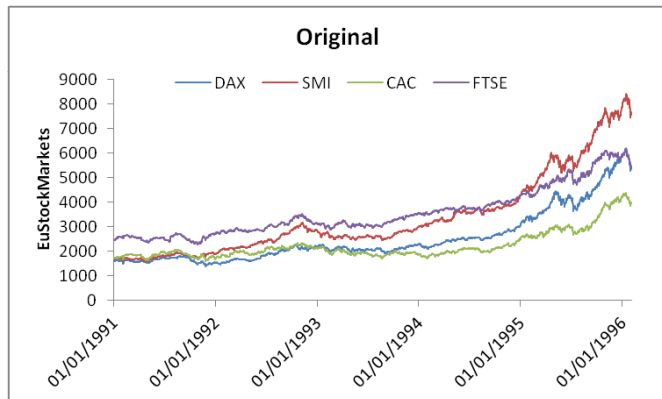
# METODOLOGIA

- Multichannel-Singular Spectrum Analysis (MSSA)



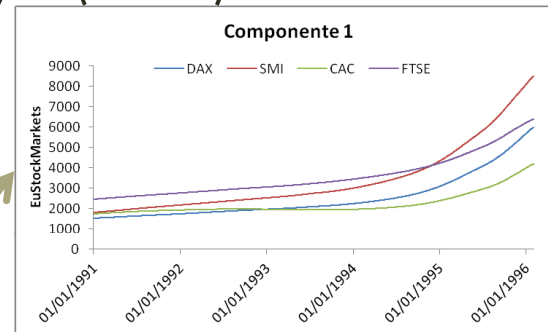
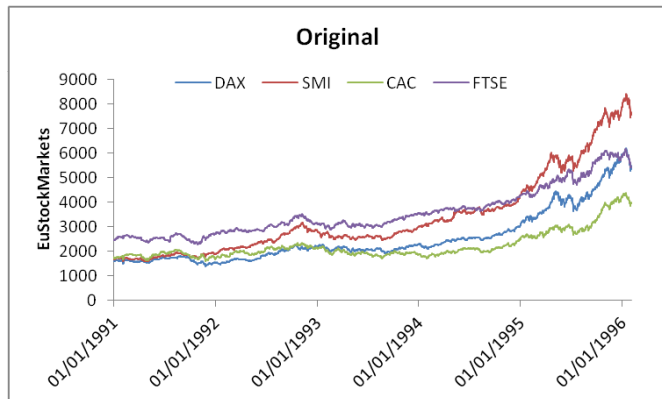
# METODOLOGIA

- Multichannel-Singular Spectrum Analysis (MSSA)

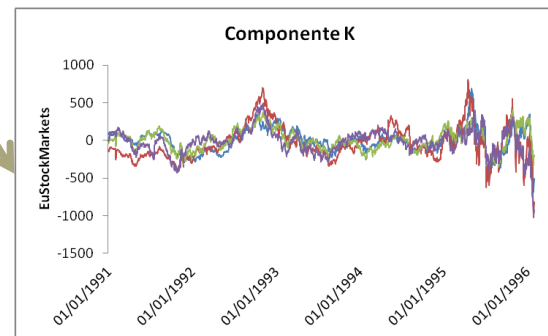


# METODOLOGIA

- Multichannel-Singular Spectrum Analysis (MSSA)



•  
•  
•



# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

- A ENA é uma transformação de água em energia e depende da configuração do sistema;

## Problema

- Pode ocultar correlações existentes com as variáveis climáticas

## Solução

- Utilizar as séries de vazão natural

# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

## Bacias Hidrográficas

Amazonas	
Atlântico NE Ocidental	
Atlântico NE Oriental	
Parnaíba	
Tocantins-Araguaia	
São Francisco	
Atlântico Leste	
Atlântico Sudeste	
Atlântico Sul	
Paraguai	
Paraná	
Uruguai	

Código de cores das usinas



- 12 grandes bacias
- 163 geradores
  - 70 com reservatório
  - 89 a fio d'água
  - 4 com bombeamento
- 5 geradores entrarão em operação até 2021
- Total de 103 MW de capacidade de geração
- Bacia do Paraná → 42 MW (41%)

# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

Número	Bacia	Capacidade Instalada [MW]	% do Total
1	Paranaíba	8.34	8.07%
2	Grande	6.52	6.30%
3	Tietê	5.88	5.69%
4	Paraná	14.00	13.54%
5	Paranapanema	4.22	4.08%
6	Iguaçu	4.35	4.21%
7	Paraguai	0.66	0.64%
8	Uruguai	5.75	5.56%
9	Atlântico Sul	1.51	1.47%
10	Atlântico Sudeste	3.79	3.67%
11	Atlântico Leste	1.08	1.05%
12	São Francisco	10.56	10.21%
13	Parnaíba	0.24	0.23%
14	Tocantins-Araguaia	12.83	12.41%
15	Amazonas	23.64	22.87%
Total		103.36	100%

- Bacia do Paraná foi separada em outras seis bacias:

- Paranaíba
- Grande
- Tietê
- Paraná
- Paranapanema
- Iguaçu

# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

- Após pesquisa na literatura...

## Variáveis Climáticas

Precipitação

El Niño Southern Oscillation (ENSO)

SOI

Equatorial  
SOI

Niño 1+2

Niño 3

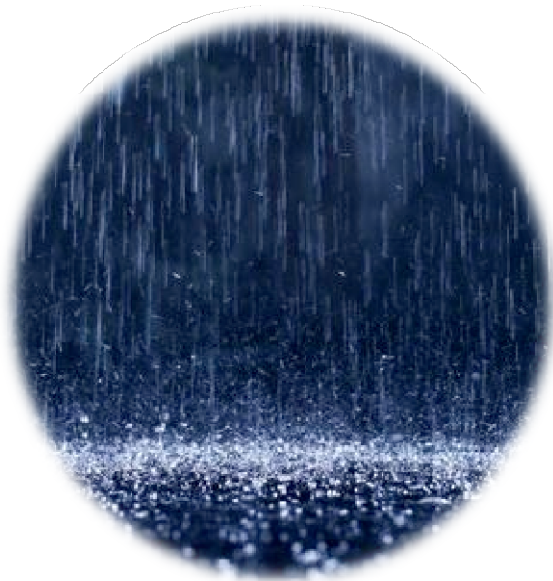
Niño 4

Niño 3.4

ONI

# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

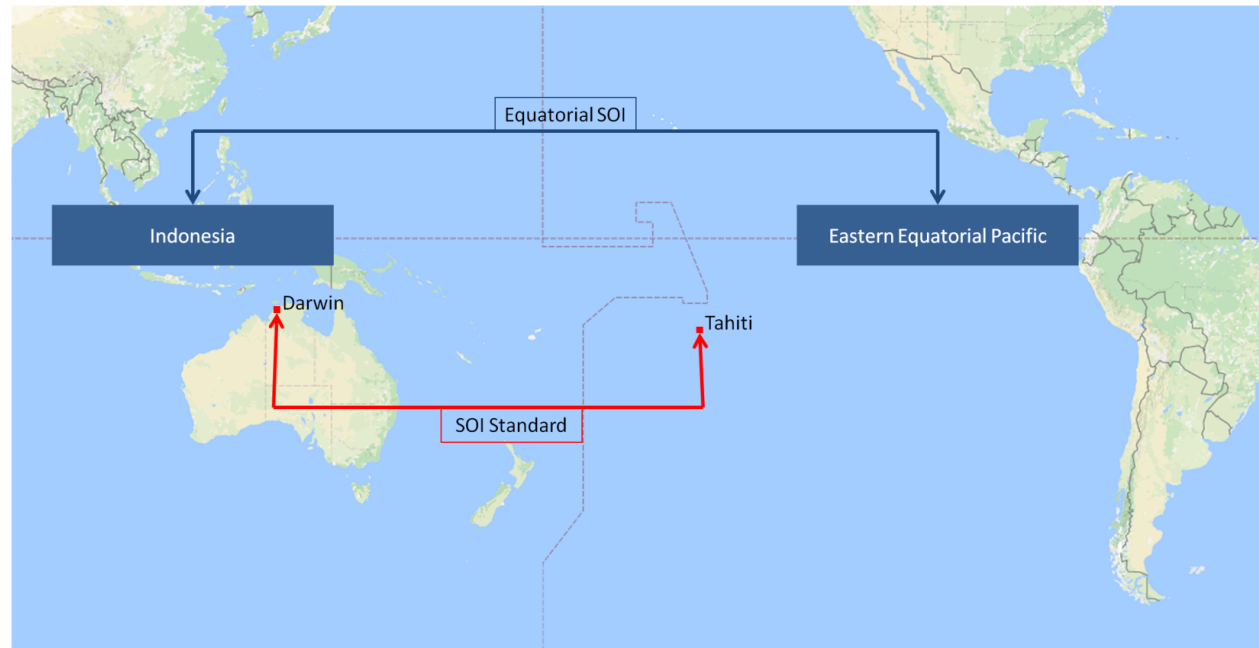
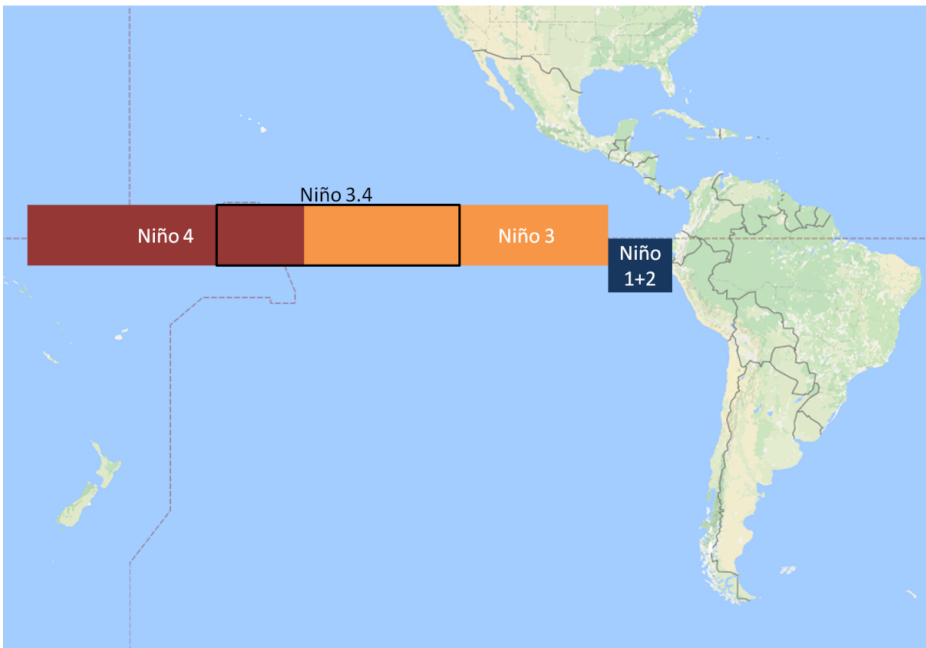
- Precipitação → taxa de precipitação total média na área de cada bacia
  - Referência: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), NASA





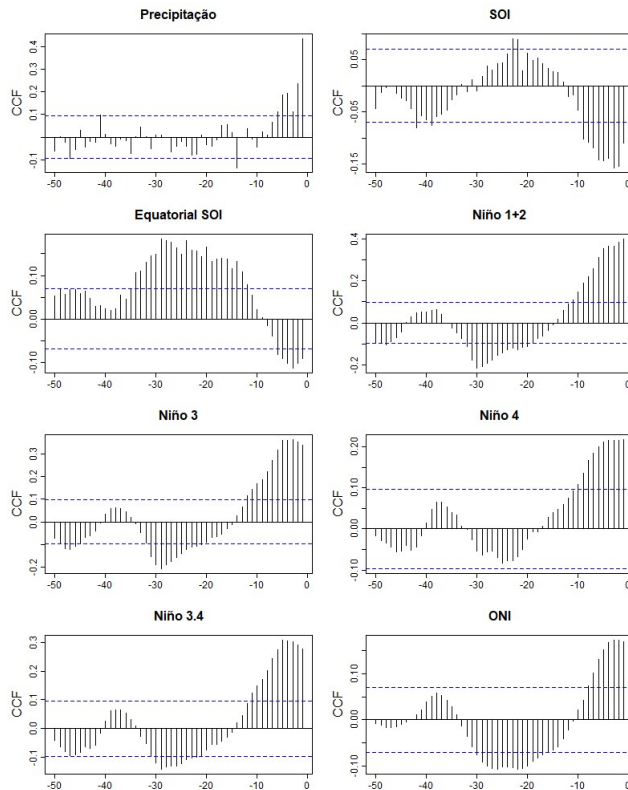
# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

- El Niño Southern Oscillation (ENSO)



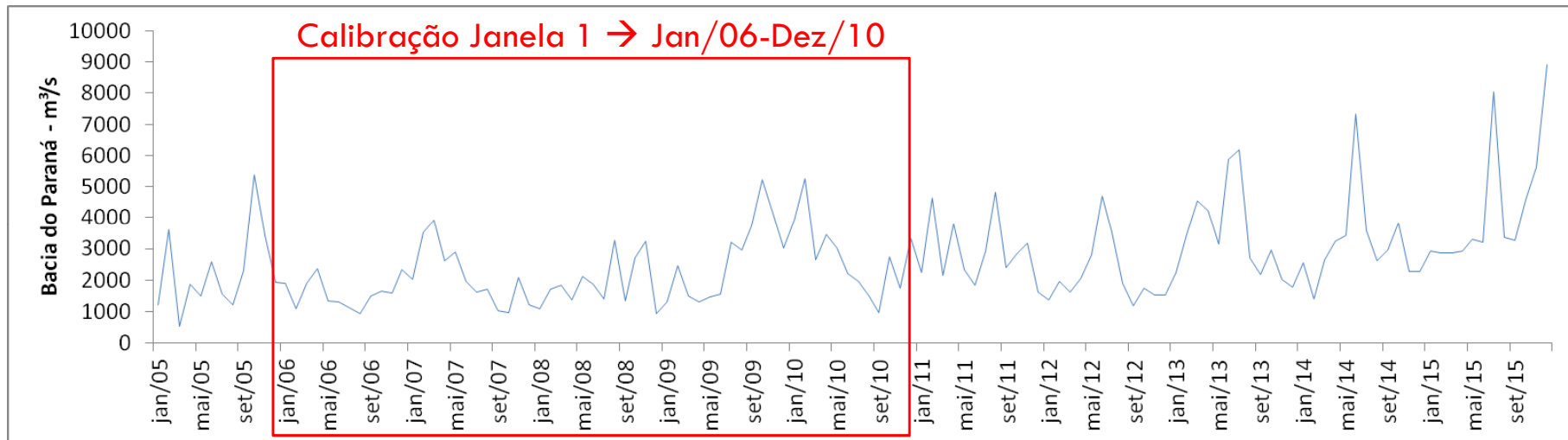
# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

- Análise das correlações cruzadas entre as vazões mensais de cada bacia e cada variável climática...



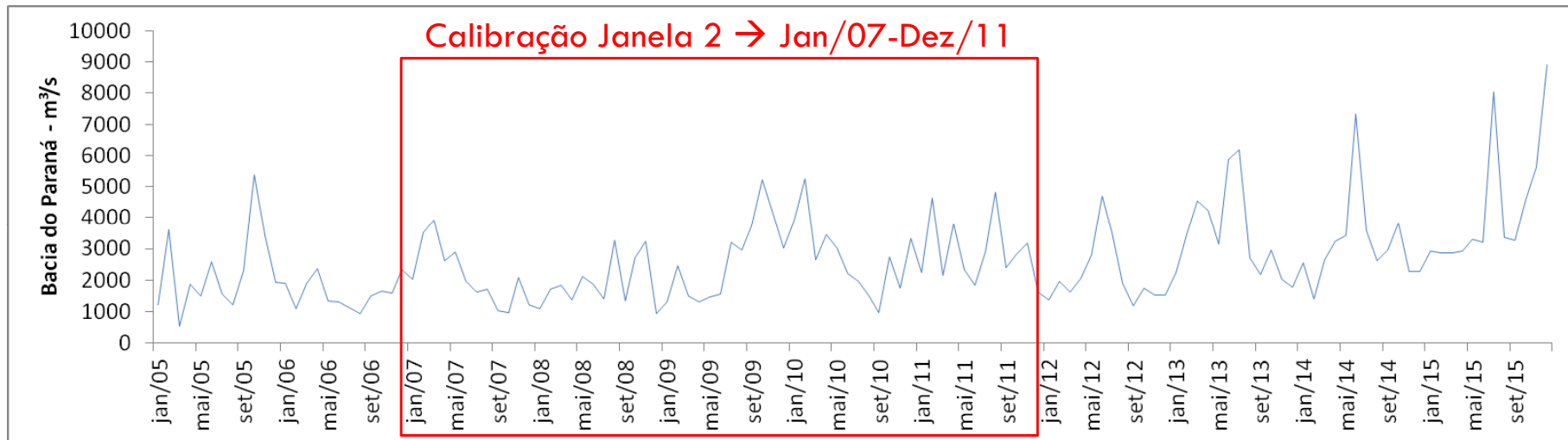
Bacia	Variável Climática							
	Prec.	SOI	Eq. SOI	Niño 1+2	Niño 3	Niño 4	Niño 3.4	ONI
Paranaíba	X	X	X					X
Grande	X	X						
Tietê	X		X					
Paraná	X	X	X	X	X	X	X	X
Parapanema	X	X	X	X	X		X	X
Iguaçu	X	X	X	X	X	X	X	X
Paraguai	X	X	X					
Uruguai	X	X	X	X	X	X	X	X
Atlântico Sul	X	X	X	X	X	X	X	X
Atlântico Sudeste	X	X	X					
Atlântico Leste	X	X	X					X
São Francisco	X	X	X		X	X	X	X
Parnaíba	X		X	X	X	X	X	
Tocantins-Araguaia	X							
Amazonas	X							

# RESULTADOS ALCANÇADOS



- Treinamento Janela 1 → Jan/31-Dez/2005
- Utilizada somente para otimizao dos parâmetros no SSA e MSSA;

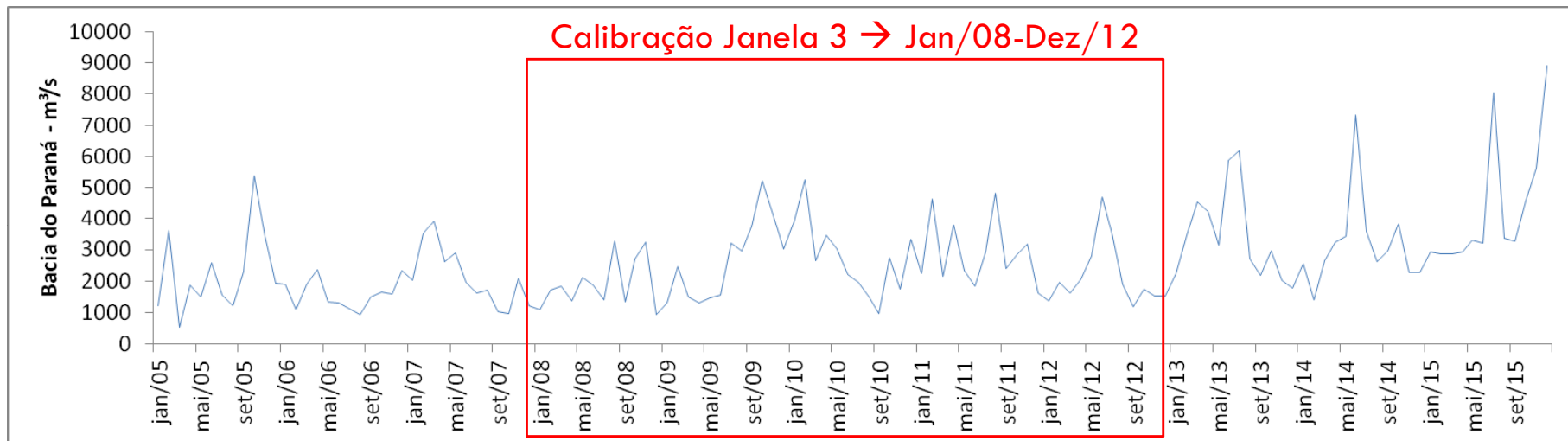
# RESULTADOS ALCANÇADOS



- Treinamento Janela 2 → Jan/31-Dez/2006
- Janelas 2 a 6 utilizadas para o cálculo das métricas de erro MSRE, MARE e NSC.

$$MSRE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{f_t - y_t}{y_t} \right)^2 \quad MARE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{f_t - y_t}{y_t} \right| \quad NSC = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (f_t - y_t)^2}{\sum_{t=1}^T (f_t - \bar{y})^2}$$

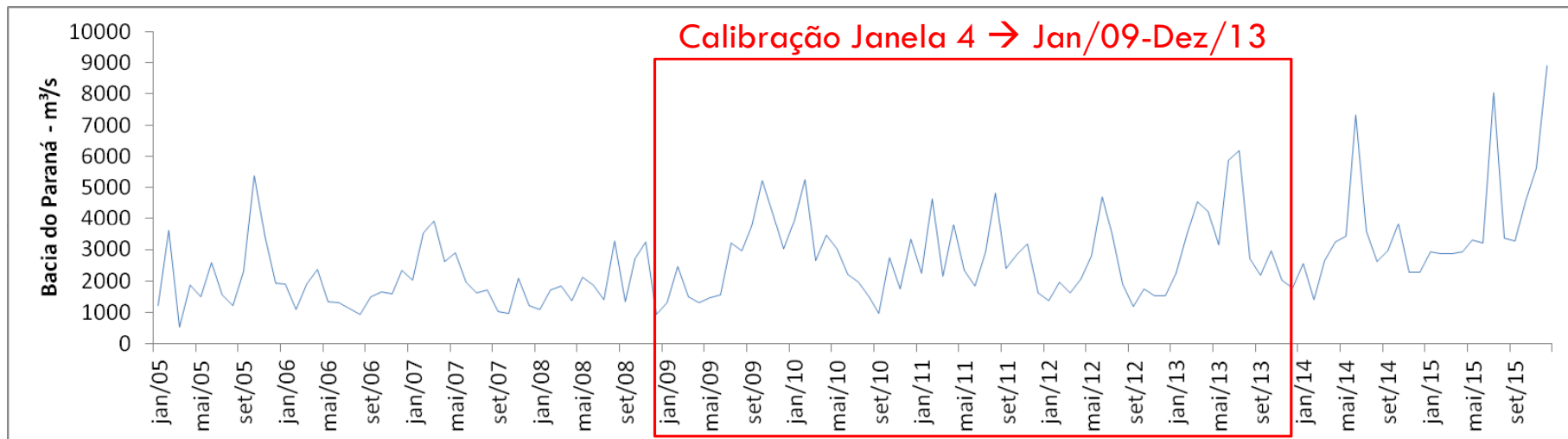
# RESULTADOS ALCANÇADOS



- Treinamento Janela 3 → Jan/31-Dez/2007
- Janelas 2 a 6 utilizadas para o cálculo das métricas de erro MSRE, MARE e NSC.

$$MSRE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{f_t - y_t}{y_t} \right)^2 \quad MARE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{f_t - y_t}{y_t} \right| \quad NSC = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (f_t - y_t)^2}{\sum_{t=1}^T (f_t - \bar{y})^2}$$

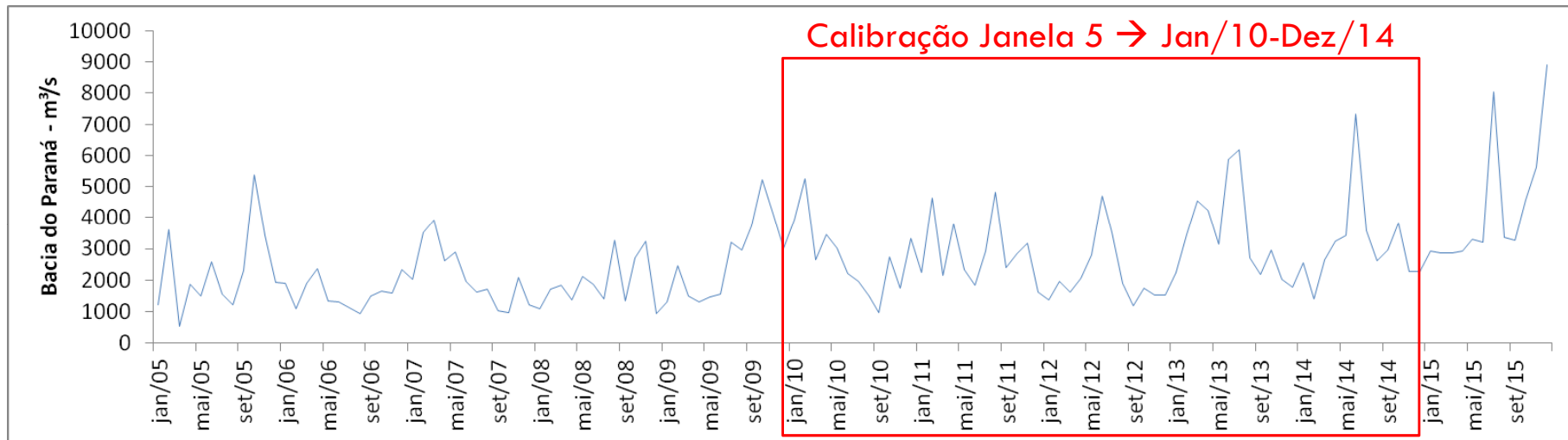
# RESULTADOS ALCANÇADOS



- Treinamento Janela 4 → Jan/31-Dez/2008
- Janelas 2 a 6 utilizadas para o cálculo das métricas de erro MSRE, MARE e NSC.

$$MSRE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{f_t - y_t}{y_t} \right)^2 \quad MARE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{f_t - y_t}{y_t} \right| \quad NSC = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (f_t - y_t)^2}{\sum_{t=1}^T (f_t - \bar{y})^2}$$

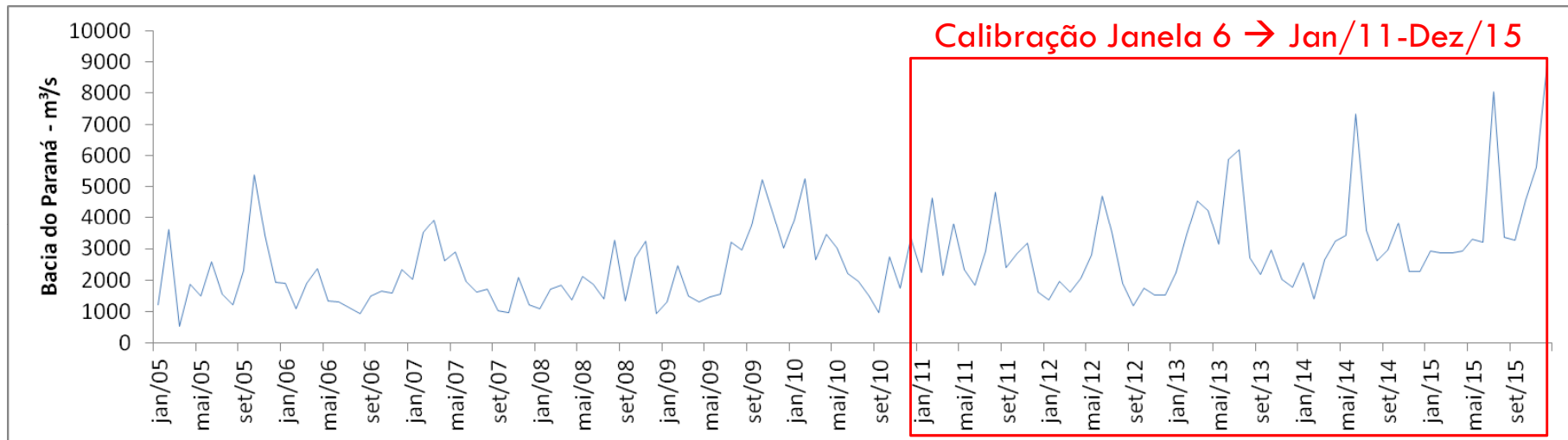
# RESULTADOS ALCANÇADOS



- Treinamento Janela 5 → Jan/31-Dez/2009
- Janelas 2 a 6 utilizadas para o cálculo das métricas de erro MSRE, MARE e NSC.

$$MSRE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{f_t - y_t}{y_t} \right)^2 \quad MARE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{f_t - y_t}{y_t} \right| \quad NSC = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (f_t - y_t)^2}{\sum_{t=1}^T (f_t - \bar{y})^2}$$

# RESULTADOS ALCANÇADOS



- Treinamento Janela 6 → Jan/31-Dez/2010
- Janelas 2 a 6 utilizadas para o cálculo das métricas de erro MSRE, MARE e NSC.

$$MSRE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{f_t - y_t}{y_t} \right)^2 \quad MARE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{f_t - y_t}{y_t} \right| \quad NSC = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (f_t - y_t)^2}{\sum_{t=1}^T (f_t - \bar{y})^2}$$



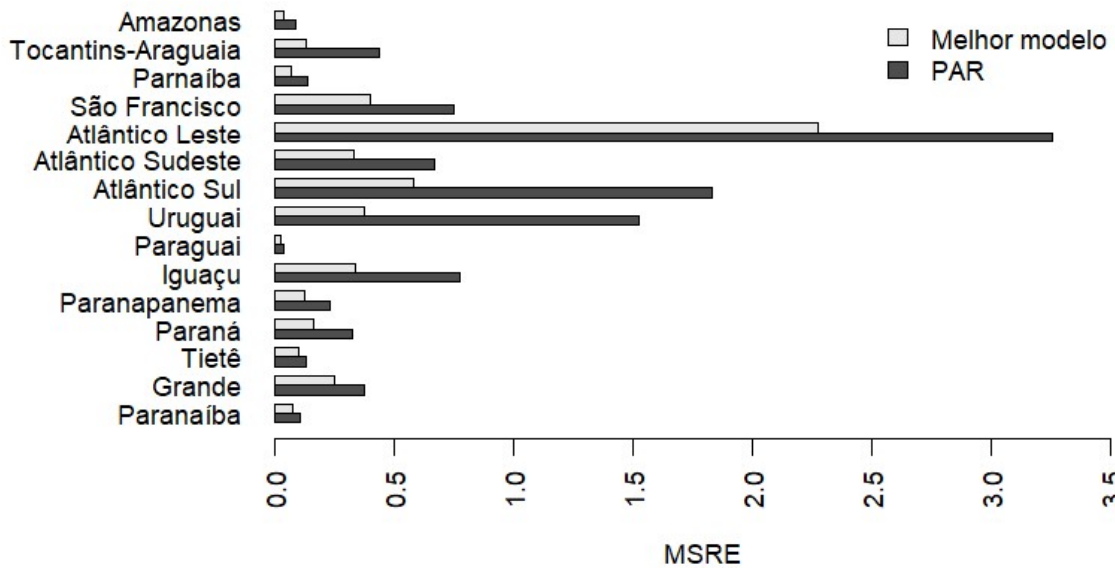
# RESULTADOS ALCANÇADOS

- Vários modelos foram testados...

Modelo	PAR	PARX	SSA	MSSA	Precipitação	ENSO
1	X					
2	X		X			
3	X			X		
4	X			X	X	
5 a 11	X			X		X
12 a 18	X			X	X	X
19		X			X	
20 a 26		X				X
27		X	X		X	
28 a 34		X	X			X

# RESULTADOS ALCANÇADOS

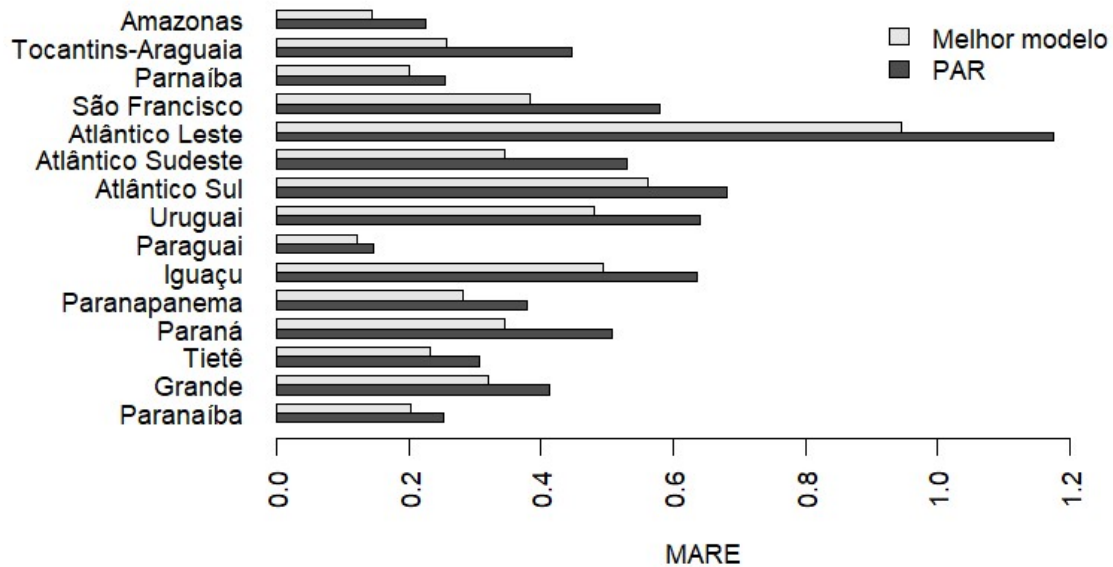
- Segundo o critério MSRE...



Bacia	Melhor modelo	Melhoria	Modelo
Paranaíba	Modelo 2	0,03	SSA+PAR
Grande	Modelo 4	0,12	MSSA+PAR+Prec.
Tietê	Modelo 21	0,03	PARX+Eq.SOI
Paraná	Modelo 34	0,16	SSA+PARX+ONI
Paranapanema	Modelo 20	0,11	PARX+SOI
Iguaçu	Modelo 9	0,44	MSSA+PAR+Niño4
Paraguai	Modelo 3	0,01	MSSA+PAR
Uruguai	Modelo 3	1,15	MSSA+PAR
Atlântico Sul	Modelo 3	1,25	MSSA+PAR
Atlântico Sudeste	Modelo 28	0,34	SSA+PARX+SOI
Atlântico Leste	Modelo 3	0,98	MSSA+PAR
São Francisco	Modelo 4	0,35	MSSA+PAR+Prec.
Parnaíba	Modelo 21	0,07	PARX+Eq.SOI
Tocantins-Araguaia	Modelo 2	0,31	SSA+PAR
Amazonas	Modelo 19	0,05	PARX+Prec.

# RESULTADOS ALCANÇADOS

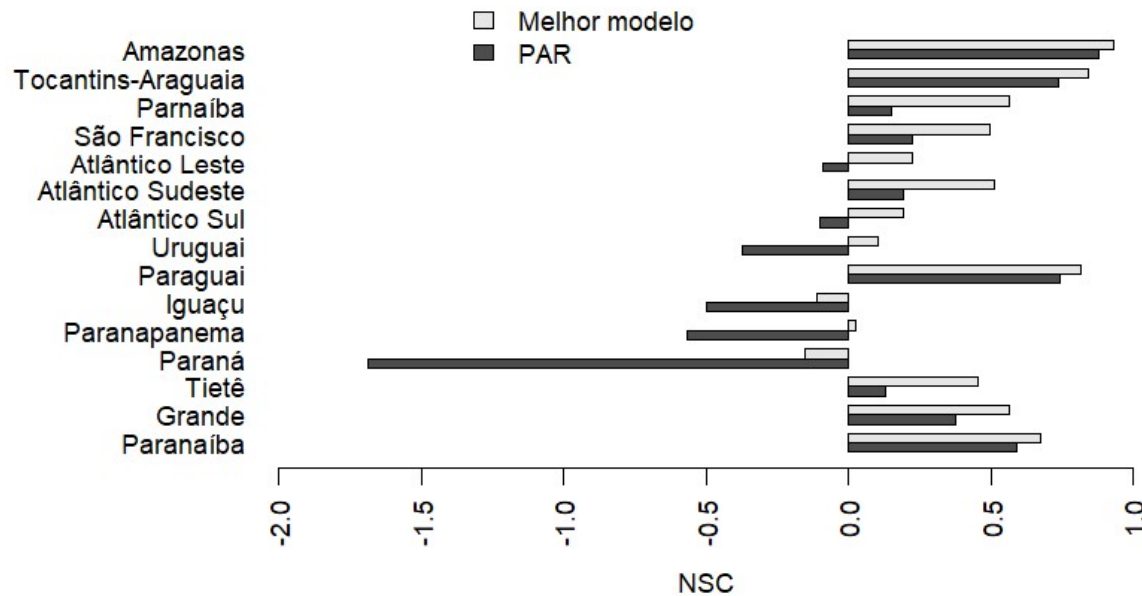
- Segundo o critério MARE...



Bacia	Melhor modelo	Melhoria	Modelo
Paranaíba	Modelo 7	0,05	MSSA+PAR+Niño 1+2
Grande	Modelo 3	0,09	MSSA+PAR
Tietê	Modelo 19	0,08	PARX+Prec.
Paraná	Modelo 34	0,16	SSA+PARX+ONI
Paranapanema	Modelo 20	0,10	PARX+SOI
Iguaçu	Modelo 9	0,14	MSSA+PAR+Niño4
Paraguai	Modelo 28	0,03	SSA+PARX+SOI
Uruguai	Modelo 3	0,16	MSSA+PAR
Atlântico Sul	Modelo 21	0,12	PARX+Eq.SOI
Atlântico Sudeste	Modelo 28	0,19	SSA+PARX+SOI
Atlântico Leste	Modelo 3	0,23	MSSA+PAR
São Francisco	Modelo 4	0,20	MSSA+PAR+Prec.
Parnaíba	Modelo 21	0,05	PARX+Eq.SOI
Tocantins-Araguaia	Modelo 2	0,19	SSA+PAR
Amazonas	Modelo 19	0,08	PARX+Prec.

# RESULTADOS ALCANÇADOS

- Segundo o critério NSC...



Bacia	Melhor modelo	Melhoria	Modelo
Paranaíba	Modelo 3	0,08	MSSA+PAR
Grande	Modelo 31	0,19	SSA+PARX+Niño3
Tietê	Modelo 19	0,33	PARX+Prec.
Paraná	Modelo 30	1,53	SSA+PARX+Niño1+2
Parapanema	Modelo 32	0,59	SSA+PARX+Niño4
Iguaçu	Modelo 26	0,39	PARX+ONI
Paraguaçu	Modelo 20	0,07	PARX+SOI
Uruguai	Modelo 19	0,47	PARX+Prec.
Atlântico Sul	Modelo 26	0,30	PARX+ONI
Atlântico Sudeste	Modelo 26	0,32	PARX+ONI
Atlântico Leste	Modelo 3	0,31	MSSA+PAR
São Francisco	Modelo 9	0,27	MSSA+PAR+Niño4
Parnaíba	Modelo 3	0,41	MSSA+PAR
Tocantins-Araguaia	Modelo 3	0,10	MSSA+PAR
Amazonas	Modelo 4	0,05	MSSA+PAR+Prec.

# RESULTADOS ALCANÇADOS

Resumindo...

- 1º lugar → Modelo 3 (MSSA+PAR)
- 2º lugar → Modelo 19 (PARX+Prec.)
- 3º lugar → Modelo 4 (MSSA+PAR+Prec.)  
→ Modelo 21 (PARX+Eq.SOI)



# CONCLUSÕES PRELIMINARES

- Todos os modelos testados obtiveram melhor desempenho do que o PAR(p);
- Os modelos que obtiveram os melhores resultados incluem variável climática e/ou pré-processamento dos dados;
- Para as bacias do Iguaçu e do Paraná, o modelo que utiliza a média como previsão ainda é o mais eficiente;

## Conclusão

- Os modelos aplicados mostraram-se eficientes para os objetivos propostos, porém ainda há espaço para melhoria.

# PERSPECTIVAS DE PESQUISA

Para alcançar essas melhorias pretende-se...

- Aplica o GAM de forma periódica, similar ao PARX
- Estimar de forma ótima os parâmetros do SSA quando o PARX é utilizado

## Objetivo final

- Gerar cenários de vazão com os melhores modelos encontrados para cada bacia
- Avaliar o desempenho dos cenários no MDDH

# PUBLICAÇÕES



Pesquisa Operacional (2017) 37(1): 107-128  
© 2017 Brazilian Operations Research Society  
Printed version ISSN 0101-7438 / Online version ISSN 1678-5142  
www.scielo.br/pope  
doi: 10.1590/0101-7438.2017.037.01.0107

## **INTRODUCING A CAUSAL PAR( $p$ ) MODEL TO EVALUATE THE INFLUENCE OF CLIMATE VARIABLES IN RESERVOIR INFLOWS: A BRAZILIAN CASE**

Paula Medina Maçaira<sup>1\*</sup>, Fernando Luiz Cyrino Oliveira<sup>1</sup>,  
Pedro Guilherme Costa Ferreira<sup>2</sup>, Fernanda Villa Nova de Almeida<sup>1</sup>  
and Reinaldo Castro Souza<sup>3</sup>

Received June 10, 2016 / Accepted March 16, 2017



# WORKING PAPERS

- Título

- Time Series Analysis with Explanatory Variables: a Systematic Literature Review

- Periódico

- Environmental Modelling & Software (Elsevier)

- Fase

- R1

- Título

- Comparative Causality Analyses between Natural Inflow and Climate Variables in Brazil

- Periódico

- A decidit

- Fase

- Em redação

Obrigada pela atenção!

[paulamacaira@aluno.puc-rio.br](mailto:paulamacaira@aluno.puc-rio.br)

Obrigado pela  
atenção!

