

ANÁLISE E PREVISÕES DE AFLUÊNCIAS AO RESERVATÓRIO SOBRADINHO UTILIZANDO UM MODELO PERIÓDICO AUTOREGRESSIVO EXÓGENO (PARX)

Carlos Henrique Ribeiro Lima¹ & Upmanu Lall²

RESUMO --- Neste artigo é apresentado um modelo periódico autoregressivo exógeno (PARX) para previsões de afluições ao reservatório Sobradinho, localizado na Bacia do São Francisco. A informação climática é incluída no modelo através do uso da temperatura da superfície do mar (TSM) em regiões específicas dos Oceanos Atlântico e Pacífico como variáveis explanatórias. O campo de vento zonal é também considerado neste modelo. A performance do modelo é comparada à performance de um modelo autoregressivo (AR) e de um periódico autoregressivo (PAR). São observadas correlações significantes no oceano Pacífico tanto na estação chuvosa como na estação seca. Observou-se também um leve correlação positiva entre o El Niño e as afluições. Correlações significativas aparecem no Oceano Atlântico próximo à costa brasileira. A inclusão de índices climáticos no modelo PARX levou a uma melhora significativa na previsão de afluições com até quatro meses de antecedência.

ABSTRACT --- This paper presents the application of a periodic autoregressive exogenous model (PARX) for forecasting inflows into the Sobradinho reservoir, located in the São Francisco basin. The climate information is included in the model through the use of sea surface temperature (SST) in specific regions of the Pacific and Atlantic Oceans as explanatory variables. The zonal wind is also considered in the model. The performance of the model is compared with the performance of an autoregressive (AR) and a periodic autoregressive (PEAR) models. It was found significant correlations in the South Pacific for both rainy and dry seasons. The effect of El Niño on the inflow was found to be slightly positive. The significant correlations in the Atlantic Ocean appear along the Brazilian coast. The inclusion of climate indexes in the PARX model has led to a significant improvement of the inflow forecasts until four-month lead time.

Palavras-chave: previsão de afluição, indicador climático, modelo auto-regressivo.

1) Estudante de Doutorado. Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia University, New York – NY, EUA. e-mail: chr2107@columbia.edu.

2) Professor. Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia University, New York – NY, EUA. e-mail: ula2@columbia.edu

1 – INTRODUÇÃO

Grande parte do Nordeste brasileiro é caracterizada por uma alta variabilidade climática, o que significa, por exemplo, que um ano pode ser bastante seco enquanto o ano seguinte pode ser bastante chuvoso, causando problemas como enchentes. Com o objetivo de reduzir tais problemas, muitos reservatórios de água foram contruídos ao longo dos últimos 70 anos para os mais diversos usos, especialmente abastecimento humano, dessedentação animal, geração de energia hidroelétrica, irrigação, dentre outros. Dessa forma, previsões de precipitações e do volume de água afluente aos mesmos com certa antecedência é de suma importância para a implementação de uma política racional de gerenciamento dos recursos hídricos e para o desenvolvimento econômico da região.

Os modelos de previsão de precipitação e vazão atualmente em uso são classificados basicamente em modelos dinâmicos e estatísticos. No primeiro tipo, são utilizados modelos de circulação global (GCM's) do oceano e da atmosfera e, através do procedimento conhecido como *downscaling*, emprega-se modelos climáticos regionais ou modelos estatísticos, para determinar a precipitação numa dada área. Em seguida, utiliza-se um modelo hidrológico para transformar a chuva prevista em deflúvio, podendo-se assim determinar, por exemplo, as afluências a reservatórios de interesse. Algumas pesquisas e aplicações de modelos globais e regionais na previsão de precipitações no nordeste brasileiro vêm sendo verificadas, entretanto, muitas vezes o horizonte de previsão é de poucos meses de antecedência, além dos modelos apresentarem significativas deficiências em determinadas regiões do nordeste, como o Vale do São Francisco. A incorporação de modelos hidrológicos nessas previsões e a consequente previsão de afluências aos reservatórios nordestinos tem sido fruto de diversos estudos (por exemplo Tucci *et al.*, 2005).

Uma alternativa aos modelos dinâmicos é o desenvolvimento direto de modelos estatísticos/empíricos na previsão de ofertas e demandas de água, assim como na geração de cenários sintéticos. Os modelos estatísticos tradicionais de previsão de afluência normalmente são desenvolvidos a partir de uma regressão linear entre a variável resposta, no caso as afluências, e as variáveis independentes ou preditores. Nos modelos autorregressivos clássicos, como ARMA e PAR, os valores das afluências em períodos anteriores ao da previsão são tomados como variáveis independentes (Yevjevich e Lane,

1997; Maceira *et al.*, 2005; Tefaye *et al.*, 2006). O uso de preditores climáticos como variáveis independentes em modelos estatísticos e a incorporação desses preditores no gerenciamento dos recursos hídricos só foram possíveis a partir dos avanços no entendimento de como sistemas climáticos correlacionam-se com precipitações e vazões em regiões distintas daquelas onde ocorrem tais fenômenos climáticos (Uvo e Graham, 1998; Kelman *et al.*, 2000; Souza Filho e Lall, 2003; Grantz *et al.*, 2005).

Este trabalho tem como objetivo apresentar um modelo estatístico de previsão de afluências, denominado periódico auto-regressivo exógeno (PARX), onde são incorporados diversos preditores climáticos. Esse modelo considera a variabilidade intra-anual das vazões assim como os fatores climáticos que contribuem para essa variabilidade. A aplicação desse tipo de modelo ainda é pouco vista na literatura científica. A série temporal de afluências ao reservatório Sobradinho, localizado na Bacia do rio São Francisco, foi escolhida para avaliar o modelo PARX. Esse reservatório de usos múltiplos está localizado no sul da região Nordeste e tem um papel fundamental no armazenamento plurianual de águas, no controle de cheias, na agricultura da região, na geração hidroelétrica e no controle de vazões para a cascata de reservatórios à jusante.

3 – CARACTERÍSTICAS REGIONAIS

O reservatório Sobradinho está localizado na bacia do São Francisco, sendo o mais importante reservatório da região Nordeste para fins de irrigação, consumo de água e geração hidroelétrica. A Figura 1 mostra a localização da Bacia do São Francisco e do reservatório Sobradinho, que está localizado no baixo São Francisco e possui uma área de drenagem de cerca de 498425 km². Á montante está localizado o reservatório Três Marias, importante regulador das afluências ao Sobradinho. A área incremental de drenagem entre Três Marias e Sobradinho é de aproximadamente 447865 km². O máximo volume de armazenamento do Sobradinho é de 28669 hm³, o que leva a uma capacidade máxima de geração elétrica de 1050 MW. A água liberada por Sobradinho é reaproveitada em mais sete usinas hidroelétricas, que tem uma pequena capacidade de armazenamento de água mas aumentam a máxima capacidade de geração de energia para cerca de 9800 MW. Devido a sua localização equatorial, o reservatório de Sobradinho apresenta uma alta taxa de evaporação, que pode atingir 480 m³/s durante o dia (Acioli,

2005). Seu uso também inclui controle de cheias, o que reforça a necessidade de uma ótima política operacional.

A série mensal de afluições ao reservatório Sobradinho, correspondente ao período 1931-2001, é disponibilizada pelo operador nacional do sistema (ONS), responsável pela política operacional dos sistema hidroelétrico interconectado. A série de afluições médias anuais à Sobradinho é mostrada na Figura 2. A variabilidade inter-annual pode ser vista na Figura 3. A estação chuvosa inicia-se aproximadamente em novembro e termina em abril. Os meses remanescentes representam a estação seca. As maiores afluições são observadas em janeiro e março, sendo este o mês que apresenta a mais alta variabilidade. Observe também a distribuição caudal dos meses chuvosos e a diferença na variabilidade mensal ao longo do ano.

Para avaliar a influência intra-annual da precipitação nas afluições à Sobradinho, é realizada uma análise da precipitação média sobre a área incremental entre Três Marias e Sobradinho. Os dados de precipitação foram fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA). As Figuras 4 e 5 mostram a precipitação média anual e a variabilidade intra-annual, respectivamente. Os períodos secos e chuvosos compreendem os mesmos meses observados na série de afluições (Figuras 2 e 3).

Na Tabela 1 são mostradas as estatísticas básicas da série temporal de afluições e de precipitação média para o período 1931-2001. Antes do ajuste de qualquer modelo estatístico, é necessário a realização de testes nas séries temporais para verificar tendências monotônicas e cíclicas e estacionariedade da série. Esse procedimento é útil para associar tendências na série de afluições devido a fatores climáticos e/ou antropogênicos. Os testes de Mann-Kendall e Sen-slopes (McCuen, 2002) foram realizados para testar a hipótese de presença de tendências monotônicas. Ambos testes rejeitaram essa hipótese ao nível de significância de 5%. O teste Noether (McCuen, 2002) é um procedimento não-paramétrico para detectar periodicidades em séries temporais. Ambas séries apresentam periodicidade ao nível de confiança de 95%. Essa tendência cíclica, evidente nas Figuras 3 e 5, representa a sazonalidade anual das vazões e chuvas da região. Finalmente o teste de Augmented Dickey-Fuller (Elliott *et al.*, 1996) para raiz unitária indicou que ambas as séries são estacionárias.



Figura 1 – Localização da Bacia do São Francisco, do Reservatório Sobradinho (triângulo) e dos Reservatórios à Jusante (círculos)

Tabela 1 – Estatísticas da Série Temporal de Afluências e Precipitação

Série	Anual	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
Afluência	2719 m ³ /s	802 m ³ /s	0.30
Chuva	541 mm	165 mm	0.31

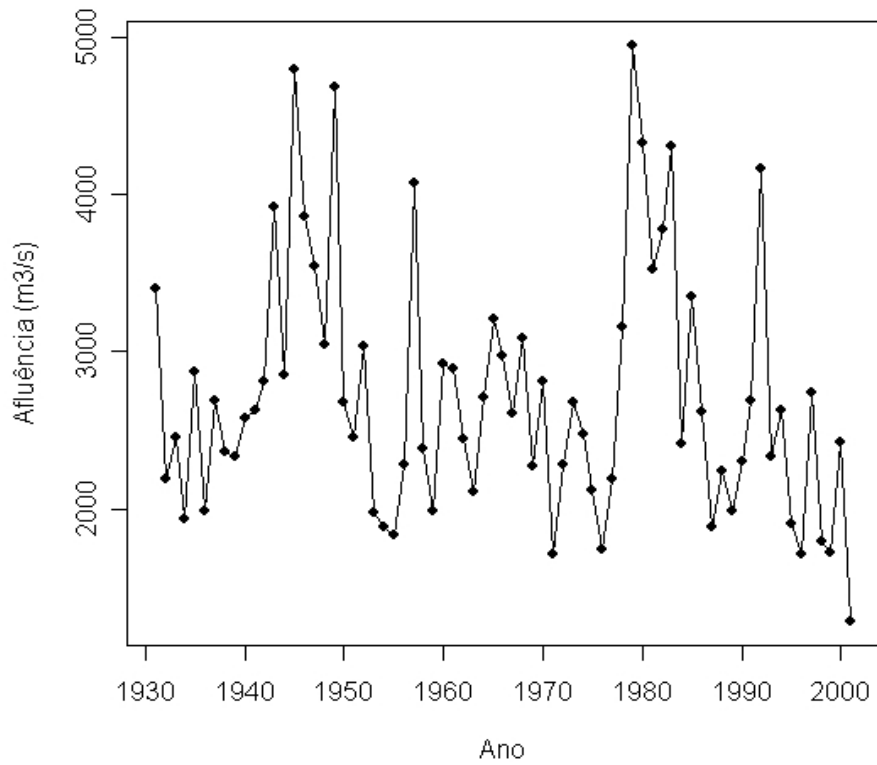


Figura 2 – Afluência Anual Média ao Reservatório Sobradinho

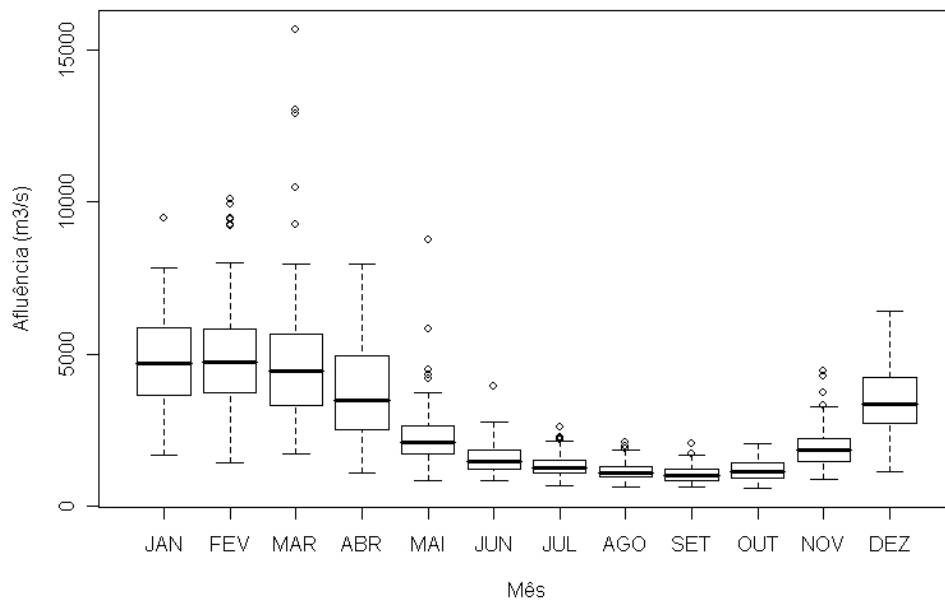


Figura 3 – Afluência Mensal ao Reservatório Sobradinho

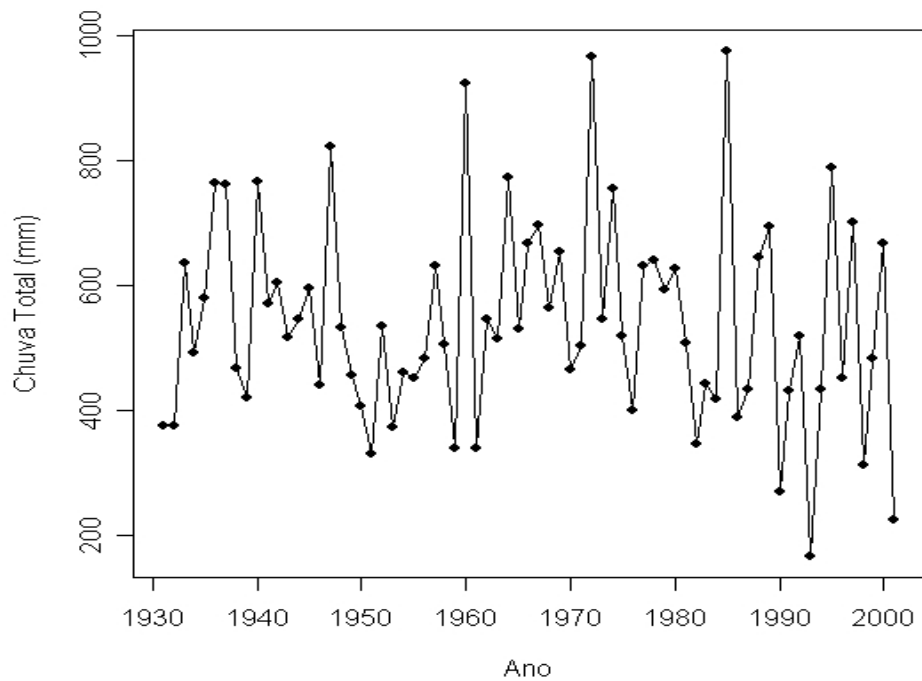


Figura 4 – Chuva Anual sobre a Área Incremental entre os Reservatórios de Sobradinho e Três Marias

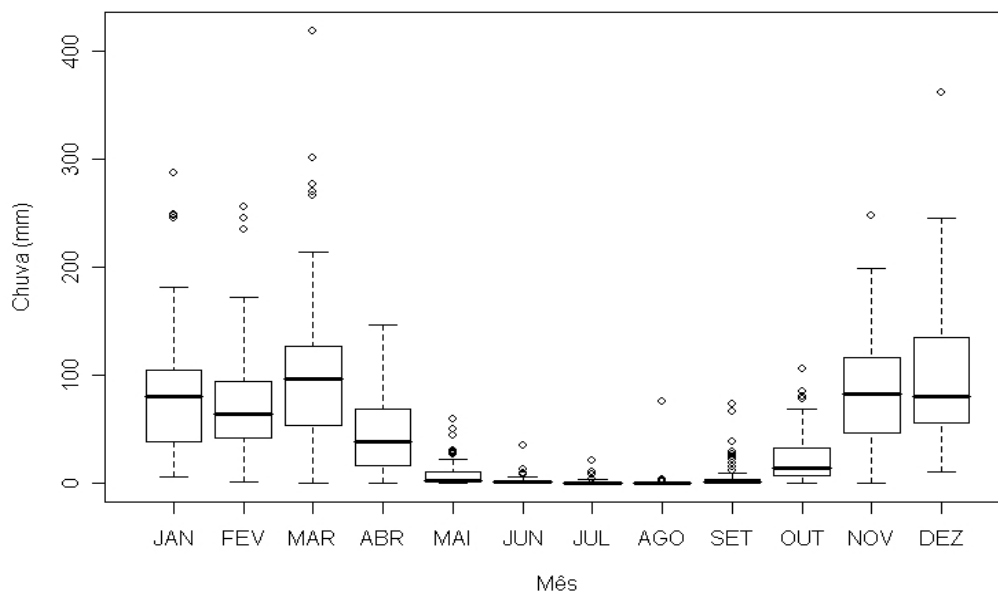


Figura 5 - Chuva Mensal sobre a Área Incremental entre os Reservatórios de Sobradinho e Três Marias

4 – INFLUÊNCIAS CLIMÁTICAS E FONTE DE DADOS

O reservatório de Sobradinho está localizado na parte sul da região Nordeste, caracterizada por alta variabilidade climática e bastante vulnerável a secas. Entretanto, uma parte significativa das afluições é originada no alto São Francisco, localizado na região Sudeste do país e com características climáticas diferentes da região Nordeste.

A influência climática de eventos remotos na precipitação sobre o Nordeste e o uso de indicadores climáticos em modelos de previsão está bem documentada na literatura (Moura e Shukla, 1981; Hastenrath, 1990; Uvo *et al*, 1998; Folland *et al*, 2001; dentre outros). A principal influência está relacionada à temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico Tropical Norte e Sul e no Tropical Pacífico, sendo este último mais associado com eventos El Niño e La Niña. Um gradiente negativo de TSM entre o Atlântico Norte e Sul (sul mais quente que o norte) está positivamente correlacionado com a quantidade de chuva. Já na parte leste, Rao *et al* (1993) sugerem a influência de ventos de sudeste ao longo da costa Brasileira e anomalias de TSM no Atlântico sudeste. A estação chuvosa na parte sul do Nordeste e na região sudeste é fortemente influenciada por frentes frias provenientes do sul (Kousky, 1979; Uvo *et al*, 1998).

O alto São Francisco está localizado numa região de transição, onde eventos de El Niño levam a condições secas ao norte e condições úmidas ao sul (Coelho *et al*, 2002; Grimm, 2004). Essas condições sugerem que a influência remota de fatores climáticos na afluição a Sobradinho não é completamente determinada por meio de uma análise da precipitação sobre a bacia. Como vazões agem como um integrador espaço-tempo da chuva, uma análise direta entre a série temporal de vazões e indicadores climáticos pode ser a melhor forma de quantificar influências climáticas remotas.

Neste trabalho considera-se a temperatura da superfície do mar (TSM) e o vento zonal como variáveis explanatórias da variabilidade das vazões de Sobradinho. Os dados de TSM são disponibilizados pelo *National Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA) (<http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/Timeseries/timeseries1.pl>). Os dados de vento são fornecidos pelo *International Research Institute for Climate Prediction* (IRI) (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/outline.html>). A série temporal corresponde ao período de 1948 a 2004.

As áreas geográficas de maior correlação entre a variável climática e as afluições são identificadas e obtém-se um indicador climático a partir da média espacial da variável climática nessa dada área. Na próxima seção são mostradas as localizações geográficas dos indicadores climáticos. Foram analisadas (não mostrado aqui) outras fontes de informação climática, como pressão ao nível do mar, vento meridional e altura geopotencial, mas as correlações com as afluições a Sobradinho foram bastante pequenas, o que não justifica a inclusão no modelo de previsão.

5- MODELO ESTATÍSTICO DE PREVISÃO DE AFLUÊNCIAS

Propõe-se aqui o uso de modelos lineares para previsão de afluições ao reservatório Sobradinho. Quatro modelos são calibrados e comparados:

Modelo 1 - Periódico auto-regressivo exógeno (PARX):

$$y_{t+i,j} \sim N(b_{0,j,i} + b_{1,j,i}y_t + a_{1,j,i}x_{1,t} + a_{2,j,i}x_{2,t} + a_{3,j,i}x_{3,t} + a_{4,j,i}x_{4,t}, \sigma_{j,i}) \quad (1)$$

onde,

$j = 1, \dots, 12 =$ meses;

$i =$ antecedência da previsão em meses = $1, \dots, 6$;

$y =$ Variável resposta = Afluência;

$x_i =$ i -ésima variável exógena = i -ésimo indicador climático;

$b_{m,j,i} =$ m -ésimo coeficiente periódico auto-regressivo para o mês j e antecedência i ;

$a_{m,j,i} =$ m -ésimo coeficiente exógeno para o mês j e antecedência i .

Modelo 2 - Periódico auto-regressivo exógeno – Gama (PARX-G)

$$y_{t+i,j} \sim \text{Gamma}(\alpha_{j,i}, \beta_{j,i}) \quad (2)$$

$$\mu(y_{t+i,j}) = \log(b_{0,j,i} + b_{1,j,i}y_t + a_{1,j,i}x_{1,t} + a_{2,j,i}x_{2,t} + a_{3,j,i}x_{3,t} + a_{4,j,i}x_{4,t})$$

onde todos os coeficientes já foram definidos anteriormente.

Modelo 3 - Periódico auto-regressivo (PAR)

$$y_{t+i,j} \sim N(b_{0,j,i} + b_{1,j,i}y_t, \sigma_{j,i}) \quad (3)$$

Modelo 4 – Auto-regressivo (AR)

$$y_{t+i} \sim N(b_{0,i} + b_{1,i}y_t, \sigma_i) \quad (4)$$

O modelo (1) sugere que parte da variabilidade das afluições é explicada por uma componente endógena, que está relacionada a persistência das vazões, sendo esta determinada de acordo com as características da bacia de armazenamento e do fluxo subterrâneo durante períodos de baixa vazão. A intensidade dessa persistência varia ao longo do ano, sendo maior durante os meses secos, onde a vazão é mantida pelo fluxo subterrâneo proveniente de aquíferos. A Figura 6 mostra a função de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial (PACF) (Brockwell e Davis, 2002) da série de afluições, realizada a fim de se decidir quantas componentes endógenas devem ser mantidas no modelo. A periodicidade de 12 meses é observada em ambos os gráficos. As funções ACF e PACF apresentam correlações significativas até antecedência de dois e três meses, respectivamente.

As Figuras 7 e 8 mostram a ACF e PACF da série parcial de afluições, onde a série temporal de cada mês é analisada separadamente. A ACF apresenta correlações significativas até antecedência de cinco meses para os períodos 6, 7, 8, 9 e 10, que correspondem a estação seca. As correlações significantes nos meses restantes aparecem até antecedência de 3 meses. A PACF apresenta valores significantes somente para antecedência de 1 mês. Esses resultados sugerem que um modelo auto-regressivo de primeira ordem é apropriado para os meses chuvosos, enquanto de ordem 5 ou menores são mais apropriados para o período seco. Uma seleção baseada no critério BIC (Brockwell e Davis, 2002) foi também realizada e os modelos obtidos foram de primeira ordem para o período úmido e de ordem 5-7 para os meses secos. Do ponto de vista físico, é pouco provável que a vazão de um dado mês seco está altamente correlacionada com a vazão de cinco meses atrás. Neste caso, é mais sensata a adição de uma componente de média móvel (MA) ao modelo de previsão. Porém isto está fora do escopo deste trabalho, e o modelo é restrito a apenas uma componente periódica.

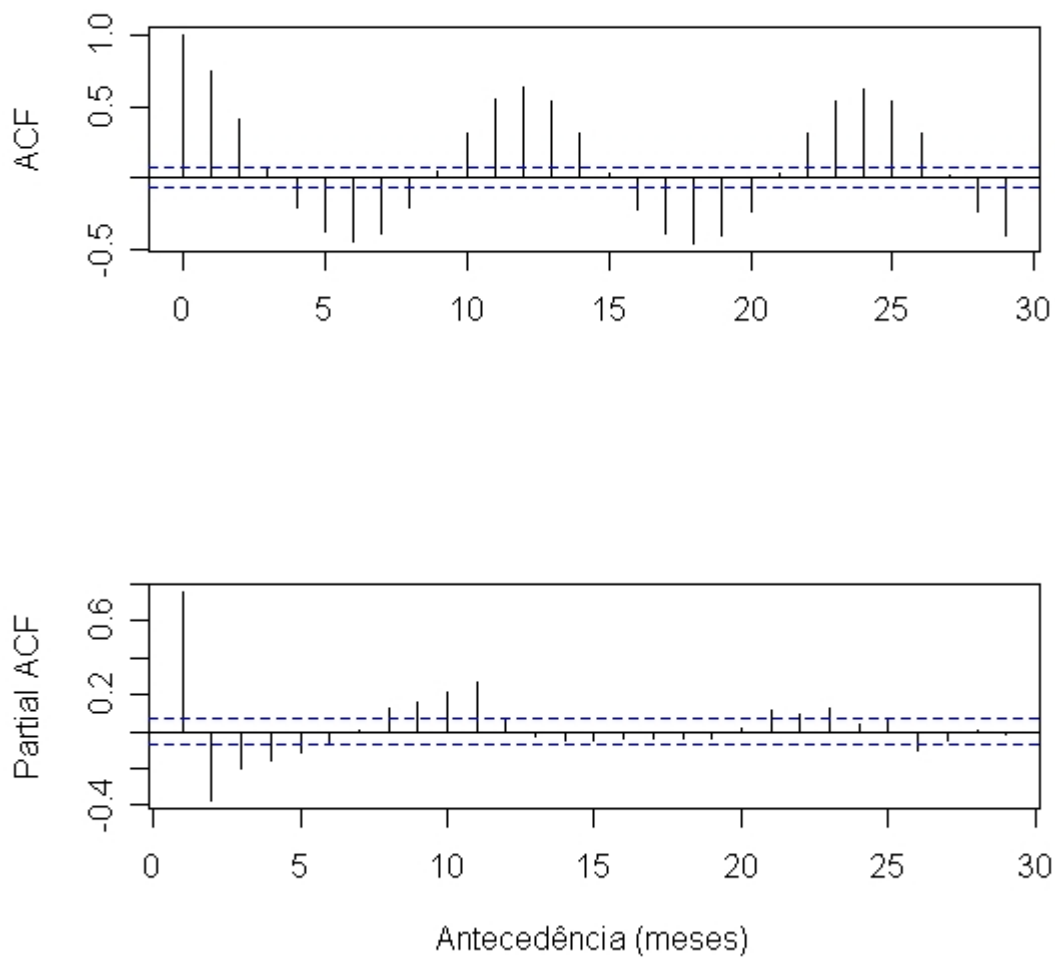


Figura 6 – Funções de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial (PACF) para a série de afluência ao Reservatório Sobradinho. Valores abaixo ou acima do intervalo de linha azul tracejada estão dentro do intervalo de confiança de 95%

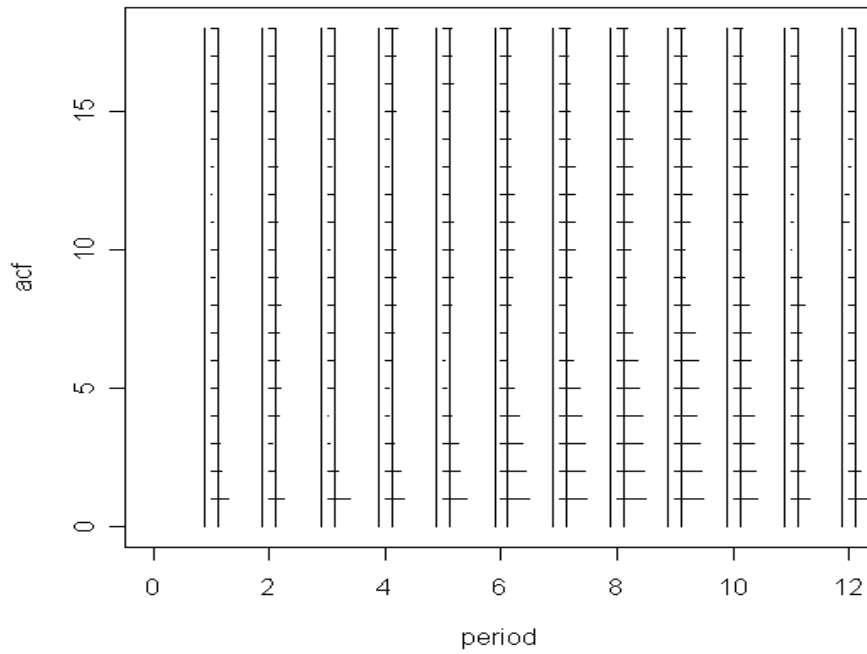


Figura 7 - Função de autocorrelação (ACF) periódica para a série de afluência ao Reservatório Sobradinho

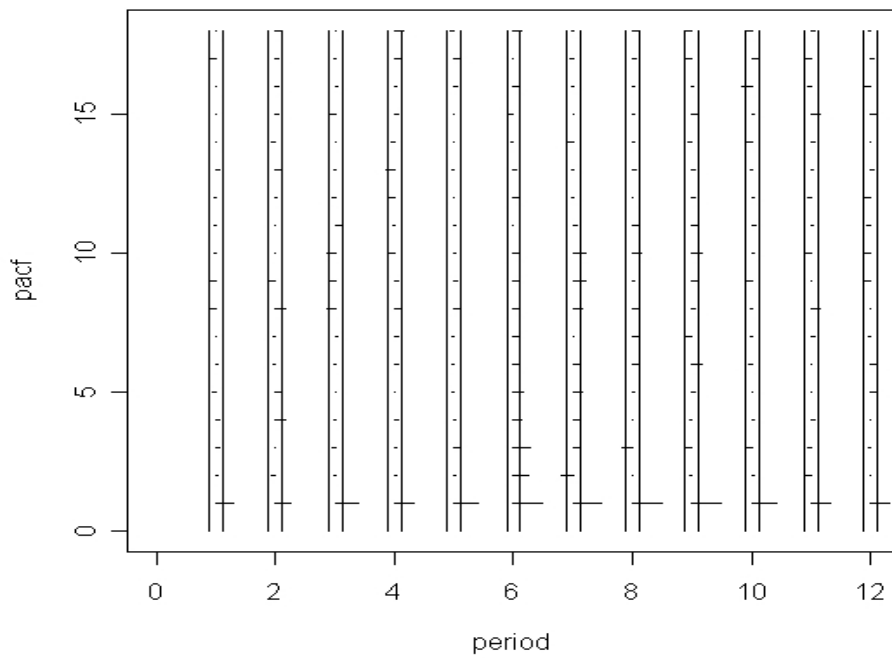


Figura 8 – Função de autocorrelação parcial (PACF) periódica para a série de afluência ao Reservatório Sobradinho

Uma outra parte da variabilidade das vazões é também explicada por variáveis exógenas, que podem influenciar diretamente, como é o caso da chuva, ou indiretamente, como ocorre com os ventos, que podem aumentar o transporte de vapor d'água para a região e conseqüentemente o aumento da quantidade de chuvas.

Na Figura 9 é mostrada a função de correlação cruzada (CCF) entre a afluência a Sobradinho e a precipitação média sobre a área incremental da Bacia. A curva apresenta correlações significantes até antecedência de três meses. A flutuação anual pode também ser observada.

A Tabela 2 apresenta o coeficiente de correlação entre a vazão atual e a vazão do mês anterior, assim como da vazão atual com a precipitação atual e do mês anterior. A correlação é realizada nos dados brutos e também após a remoção da sazonalidade anual por meio do método STL (Cleveland *et al*, 1990). Os resultados sugerem que a variabilidade da vazão é explicada em maior parte pela vazão anterior e então pela chuva anterior. A chuva presente não apresenta uma alta correlação com a vazão, o que indica um alto tempo de concentração da bacia. Após remoção da sazonalidade, todas as correlações praticamente desaparecem, o que sugere que grande parte das correlações é devido a periodicidade anual de ambas as séries.

Entretanto, ambas as análises são baseadas na série temporal completa e não consideram a variabilidade intra-anual da vazão e da chuva, o que pode levar a conclusões errôneas. A Tabela 3 apresenta o coeficiente de correlação entre as citadas variáveis numa base mensal. A chuva do mês anterior está correlacionada significativamente com a presente vazão somente para o período entre Novembro e Abril, que é a estação chuvosa. Essas correlações indicam que indicadores climáticos são mais úteis para o período úmido. Da mesma forma, a inclusão de variáveis endógenas no modelo de previsão é mais significativa para o período seco.

Tabela 2 – Coeficiente de Correlação com a Afluência Presente

Afluência Anterior	Chuva Presente	Chuva Anterior
0.76 ^a	0.42 ^a	0.63 ^a
0.02 ^b	0.01 ^b	-0.08 ^b

^a considerando periodicidade anual
^b após remoção da periodicidade anual

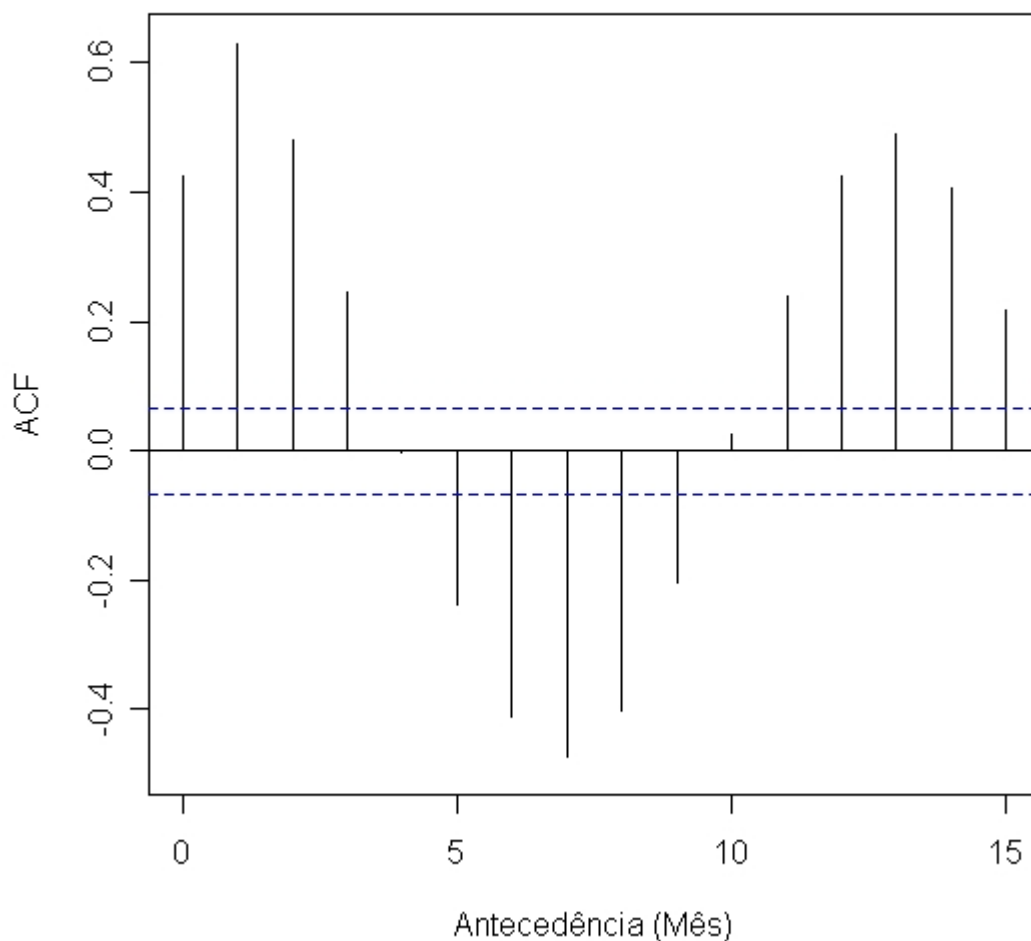


Figura 9 – Correlação Cruzada entre as Séries de Precipitação e Afluência ao Reservatório Sobradinho

Tabela 3 – Coeficiente Mensal de Correlação com a Afluência Presente

Mês	Afluência Anterior	Chuva Presente	Chuva Anterior
1	0.56	-0.16	0.35
2	0.51	0.13	0.46
3	0.75	-0.07	0.20
4	0.65	0.09	0.38
5	0.82	0.04	0.17
6	0.94	-0.02	0.03
7	0.97	-0.04	-0.05
8	0.98	-0.07	-0.04
9	0.94	-0.11	-0.09
10	0.81	0.26	0.08
11	0.66	0.26	0.24
12	0.62	0.06	0.25

5.1 – Temperatura da superfície do mar (TSM)

Foram analisados mapas de correlação entre TSM e a afluência à Sobradinho para se identificar as regiões de altas correlações. O tempo de atraso variou de um a cinco meses. Para todos esses tempos as maiores correlações estão localizadas no Pacífico Tropical. Como a TSM do Oceano Pacífico apresenta alta correlação espacial, uma seleção de várias áreas para extrair os indicadores climáticos poderia levar a um grande número de preditores e fortes colinearidades no modelo de previsão, e conseqüentemente a resultados insatisfatórios. Para evitar isso, apenas três indicadores de TSM foram selecionados. Os retângulos da Figura 10 mostram a localização dos indicadores de TSM, que são calculados a partir da média da TSM em cada retângulo. As coordenadas geográficas são apresentadas na Tabela 4.

5.2 – Vento zonal e meridional

A Figure 11 mostra o padrão de vento para anos de alta vazão no mês de março, definidos quando a vazão excede o percentil de 66% dos dados históricos. De modo similar, os anos secos são definidos quando a vazão é menor que o percentil de 33%. Uma sutil diferença entre os padrões pode ser observada na latitude de 30° S e longitude de 300°E e na circulação sobre a Bacia do São Francisco. Esse efeito aparece como correlações significantes no mapa de correlação entre a vazão do mês de março e o vento zonal (não mostrado aqui). A localização do indicador climático extraído do campo de vento zonal é mostrada na Figura 10.

A descrição das potenciais variáveis explanatórias a serem incorporadas no modelo PARX é mostrada na Tabela 4. Observe que não é incluído nenhum preditor baseado na precipitação, pois análises iniciais mostraram que a adição de um componente de chuva não melhora a performance do modelo.

Tabela 4 – Variável Resposta (y) e Variáveis Explanatórias Selecionadas (x)

Variável	Tipo	Localização	Lat.	Long.
y	Afluência	----	---	---
x ₀	Afluência Anterior	---	---	---
x ₁	Vento Zonal	Oceano	20S	310
		Atlantico	10S	325
x ₂	TSM	NINO3	5S	210
			5N	270
x ₃	TSM	Oceano Pacifico	30S	170
			10S	230
x ₄	TSM	Oceano Atlantico	25S	320
			10S	340

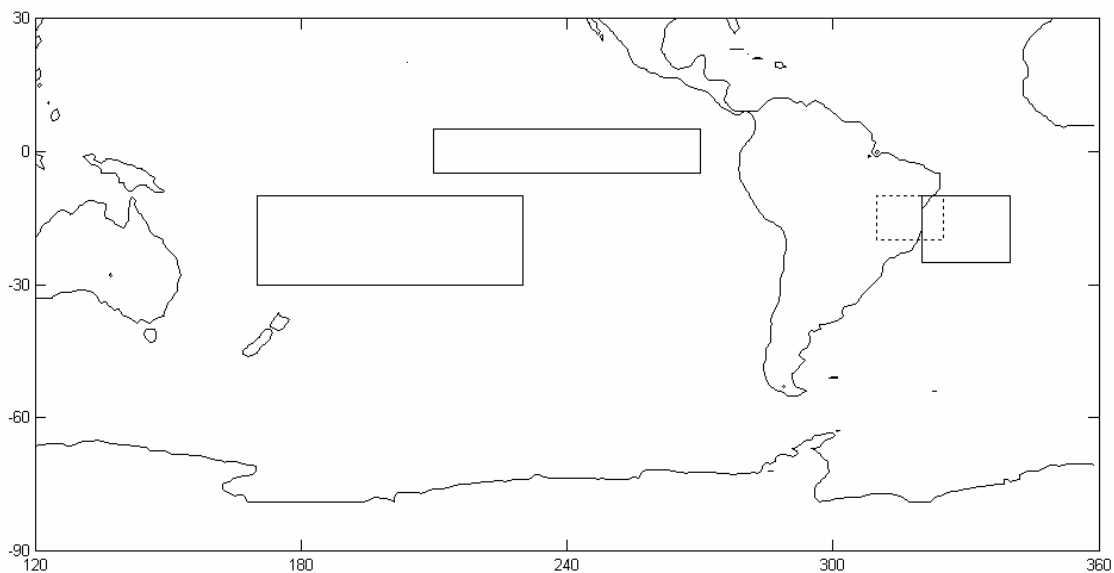


Figura 10 – Localização Geográfica dos indicadores climáticos baseados na TSM (retângulos sólidos) e no vento zonal (retângulo tracejado)

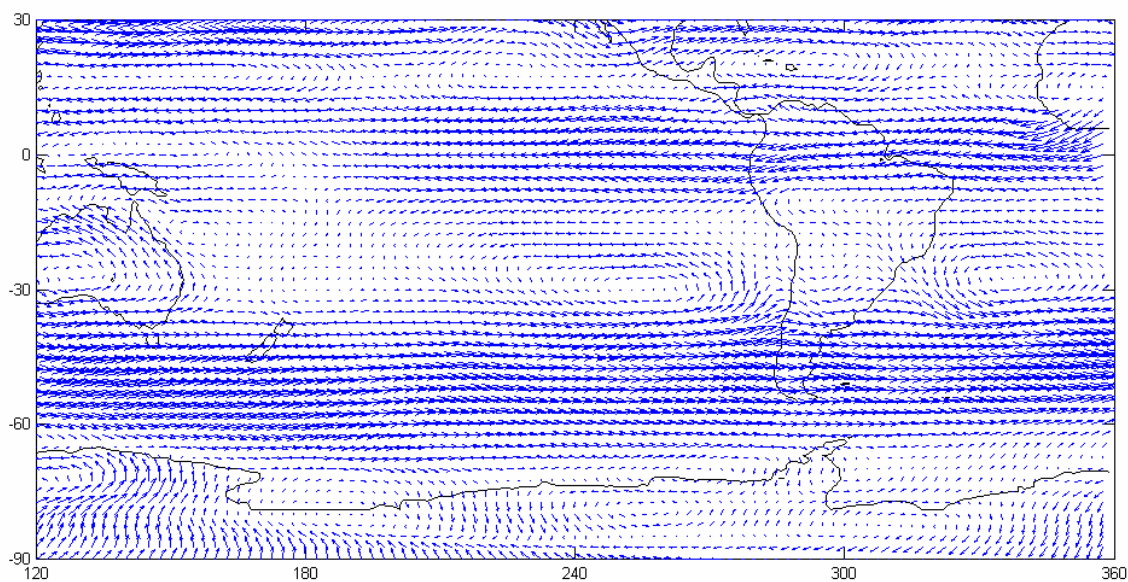


Figura 11 – Padrões de vento durante o mês de Fevereiro para anos **chuvosos** na Bacia do São Francisco

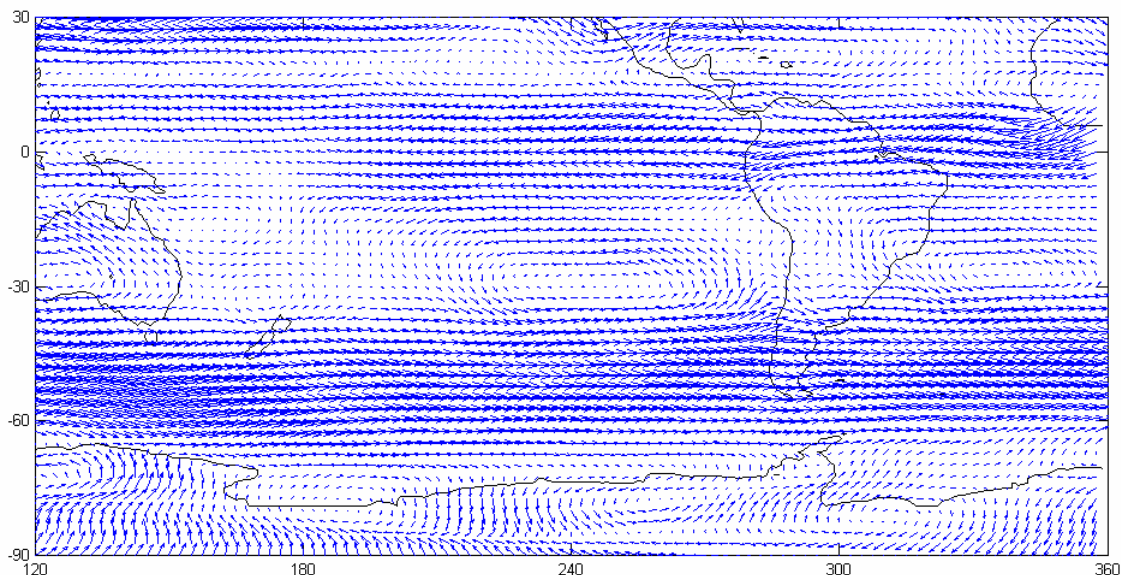


Figura 12 - Padrões de vento durante o mês de Fevereiro para anos **secos** na Bacia do São Francisco

6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para verificar a acurácia do modelo de previsão, dividiu-se o período de dados disponíveis em um período de calibração e outro de validação. Os coeficientes do modelo são estimados usando os dados correspondentes ao período 1950-1979 e previsões são realizadas para o ano de 1980. Então os parâmetros são recalculados para o período 1950-1980 e realizam-se previsões para 1981. Esse procedimento é repetido até a realização de previsões para 2001. Essa metodologia é usualmente mais eficiente e realística do que o uso de um período fixo de calibração e um fixo de validação do modelo. O período total de previsões vai de 1980 a 2001. O percentual de anos secos, normais e chuvosos para esse período, definidos de acordo com o percentil de 33% e 66% da afluência mensal, é mostrada na Figura 15. Observe que o período de validação é bastante representativo de anos normais, secos e chuvosos.

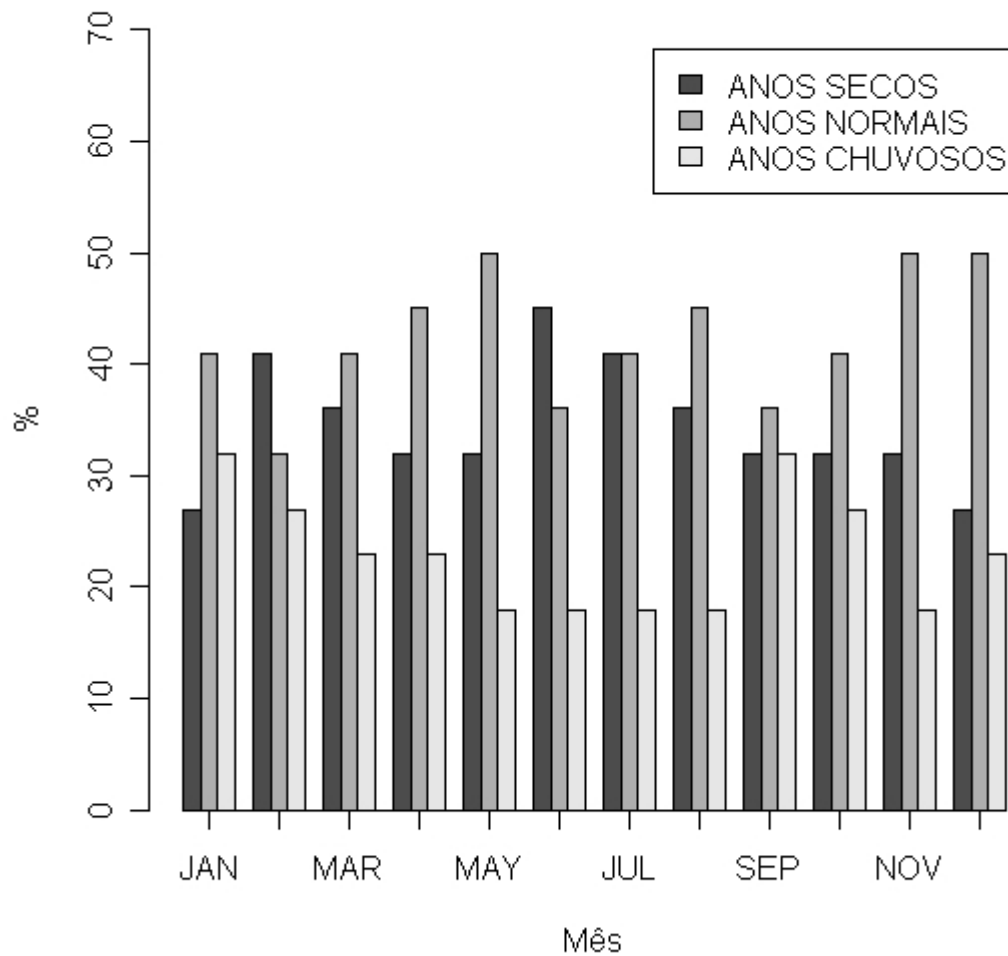


Figura 15 – Características do período escolhido para avaliação das previsões

A performance dos modelos de previsão é verificada a partir do uso de quatro critérios:

1. Inspeção visual, comparando previsões com valores observados;
2. Coeficiente de determinação R^2 , baseado na climatologia mensal:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{O}_i - O_i)^2} \quad (5)$$

3. Erro absoluto médio:

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |F_i - O_i| \quad (6)$$

4. Bias:

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_i - O_i}{O_i}. \quad (7)$$

onde n é número total de meses, F_i é a previsão para o mês i , O_i é o valor observado para o mês i e \bar{O}_i é a **média histórica do mês i** .

As previsões para $i = 1$ (um mês de antecedência) são mostradas na Figura 16. Todos os modelos tendem a reproduzir os valores observados. Entretanto, os modelos PARX e PARX-G apresentam a melhor performance em prever valores altos de vazão. A Figura 17 mostra os resultados para $i = 2$. O modelo AR tem a pior performance dentre os modelos analisados. Todos os outros modelos mostram boa performance em prever valores altos e baixos de vazões. Na Figura 18 podem ser observadas as previsões para $i = 3$ utilizando o modelo PARX e considerando o intervalo de confiança de 95%. A tendência geral dos valores observados é bem capturada por esse modelo.

O coeficiente de determinação R^2 para diferentes tempos de antecedência é mostrado na Figura 19. Um valor de $R^2 = 1$ significa que a previsão é perfeita. Valores negativos indicam que a performance do modelo é inferior a performance do modelo de previsão mais simples, que considera somente o valor médio mensal de afluência. O melhor resultado para todos os modelos é obtido para $i = 1$. O valor de R^2 do modelo PARX para $i = 1$ é de cerca de 0.61, o que significa que 61% da variabilidade das afluências é explicada pelas previsões. Esse modelo apresenta a melhor performance até $i = 4$, quando o modelo PAR torna-se superior. Todos os valores para ambos os modelos são maiores que zero. Para previsões com 3 meses de antecedência obteve-se $R^2 = 11\%$ com o modelo PARX. Exceto para $i = 1$, o modelo AR tem uma performance pobre para todos os outros tempos de antecedência. É importante resaltar que os resultados de R^2 obtidos aqui consideram na equação (5) a afluência média mensal dos valores

observados, ao invés da média total das vazões, que levaria valores muito mais superiores de R^2 . Resultados para cada mês de previsão (não mostrado aqui) indicaram que as melhores performances são obtidas para o período seco, chegando a valores de $R^2 = 60\%$ para antecedência de 5 meses.

A Figura 20 mostra o erro absoluto médio para todos os modelos e para o modelo climatológico (linha sólida), que considera apenas a vazão média mensal como previsão. Exceto pelo modelo AR, todos os outros modelos apresentam performance melhor que o modelo climatológico. O modelo PARX tem a melhor performance até $i = 4$, quando os resultados de PAR, PARX e PARX-G são bastante similares.

Os valores de BIAS são mostrados na Figura 21. Os resultados são bastante similares aos obtidos para o erro absoluto médio. O PARX tem a melhor performance dentre os modelos testados. Os resultados do modelo AR são bastante pobres. Adicionalmente, todos os modelos mostram um BIAS negativo, o que indica a tendência dos modelos de previsão em subestimar os valores observados.

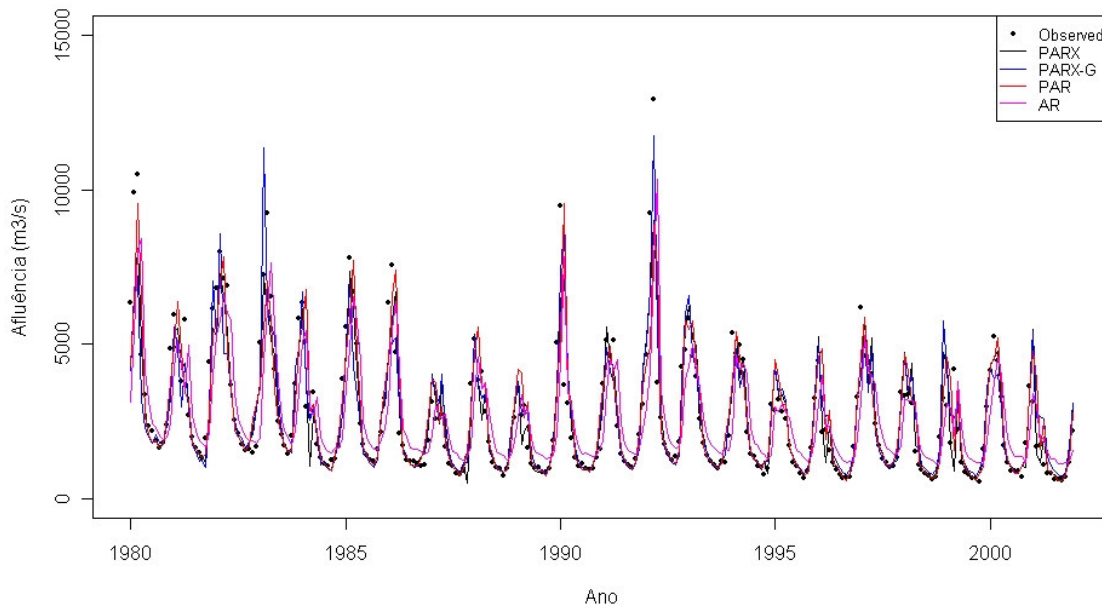


Figura 16 – Previsões com um mês de antecedência

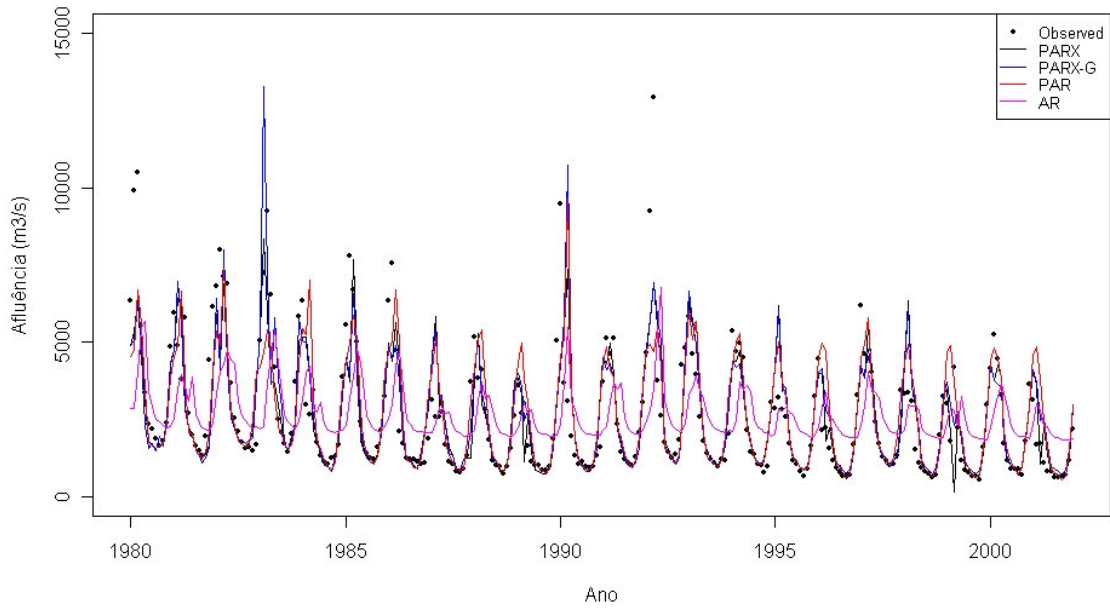


Figura 17 – Previsões com dois meses de antecedência

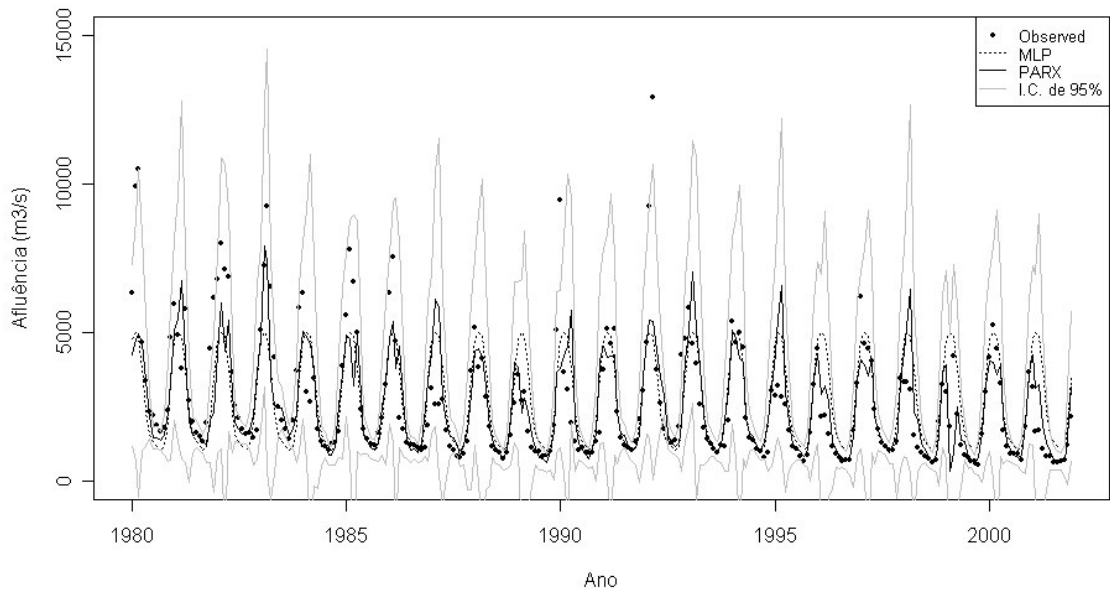


Figura 18 – Previsões com três meses de antecedência utilizando o modelo PARX

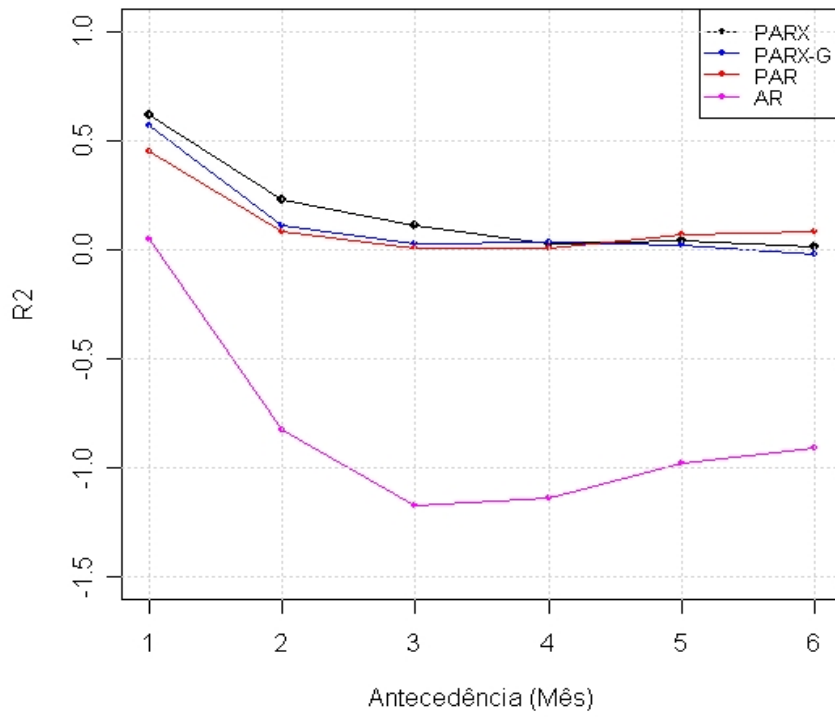


Figura 19 – Coeficiente de Determinação R^2

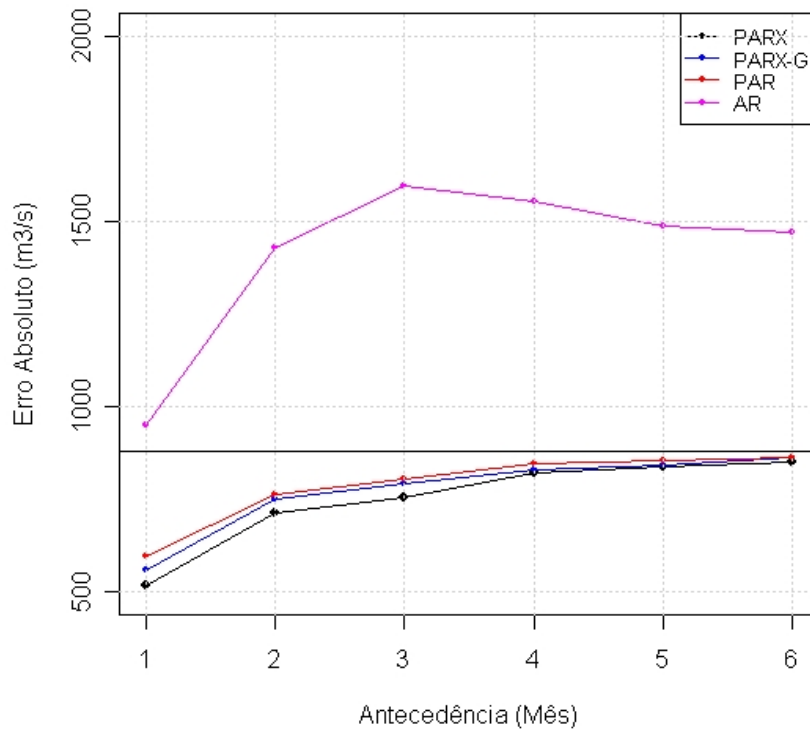


Figura 20 – Erro Absoluto Médio

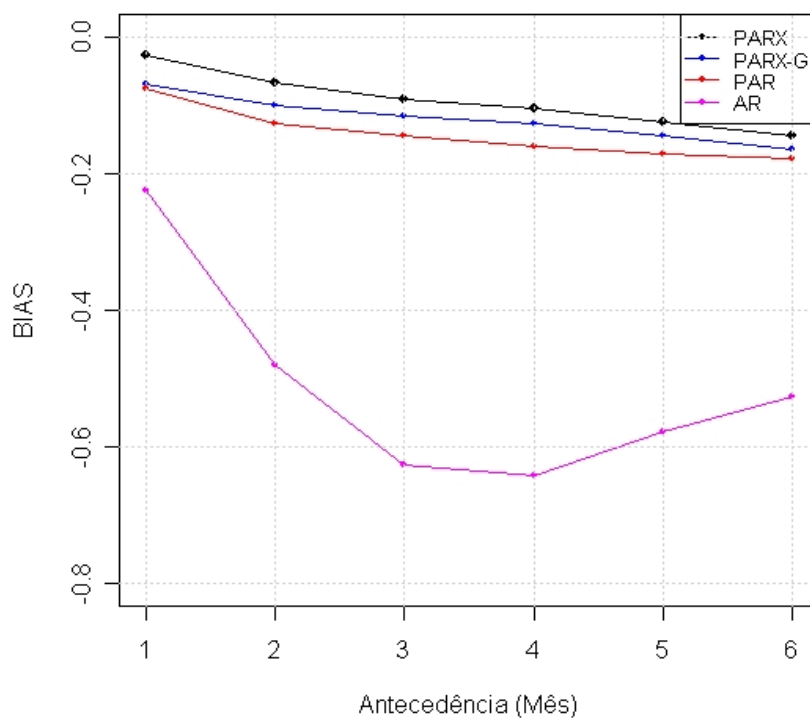


Figura 21 – BIAS

7 – CONCLUSÕES

Os testes de hipóteses de tendência monotômica indicaram que a série temporal de afluições ao reservatório Sobradinho não apresenta nenhuma tendência significativa ao longo dos anos. Isso não é tão comum em séries de vazão, que usualmente apresentam tendências devido a fatores climáticos e antropogênicos que ocorrem ao longo do tempo. Uma tendência cíclica foi detectada e associada a periodicidade anual da série. Esses resultados estão de acordo com a série de precipitações sobre a bacia de drenagem de Sobradinho, que não apresentou nenhuma tendência monotômica. A correlação entre chuva e vazão é forte no período chuvoso. Durante a estação seca a correlação torna-se fraca e as afluições apresentam uma forte persistência de curta duração.

A seleção dos indicadores climáticos foi baseada nos mapas de correlação e na literatura a respeito de influências remotas na precipitação do Nordeste. Como informação climática, tomou-se como variável explanatória para o modelo de previsão a TSM dos Oceanos Atlântico e Pacífico e o vento zonal sobre a América do Sul.

Os resultados obtidos utilizando um modelo periódico auto-regressivo exógeno (PARX e PARX-G) foram comparados com os resultados de um modelo periódico auto-regressivo (PAR) e auto-regressivo (AR), que não incluem nenhuma informação climática. O modelo PARX foi superior em todos os critérios de performance das previsões de afluições. Assim, os índices

climáticos utilizados no modelo aumentaram significativamente os resultados de previsões de afluência a Sobradinho, especialmente durante a estação chuvosa. A performance obtida motiva a aplicação do modelo em outros reservatórios hidroelétricos e a busca por outros indicadores climáticos, observando os possíveis efeitos de colinearidade.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a CAPES pela concessão de bolsa de Doutorado.

BIBLIOGRAFIA

- ACIOLI, G.C.L. (2005). “*Operação do Reservatório de Sobradinho durante o Racionamento Energético de 2001*”. Third Symposium of Specialists in Operation of Hydropower Plants. SP-06-ONS.
- BROCKWELL, P.J.; DAVIS, R. A. (2002). “*Introduction to Time Series and Forecasting*”. Springer. 434p.
- CLEVELAND, R. B.; CLEVELAND, W. S. ; MCRAE, J.E. ; TERPENNING, I. (1990). “*STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess*”, Journal of Official Statistics, Vol. 6, pp. 3–73.
- COELHO, C.A.S.; UVO, C.B. ; AMBRIZZI, T. (2002). “*Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods*”, Theor. Appl. Climatol., Vol. 71, 185-197.
- ELLIOTT, G.; ROTHENBERG, T. J.; J.H. STOCK (1996). “*Efficient Tests for an Autoregressive Unit Root*”, *Econometrica*, Vol. 64, No. 4., pp. 813-836.
- FOLLAND, C .K.; COLMAN, A. W.; ROWELL, D. P.; DAVEY, M. K. (2001). “*Predictability of Northeast Brazil Rainfall and Real-Time Forecast Skill, 1987-98*”, J. of Climate, Vol. 14, pp. 1937-1958.
- GRANTZ, K.; RAJAGOPALAN, B.; CLARK, M.; ZAGONA, E. (2005). “*A technique for incorporating large scale climate information in basin-scale ensemble streamflow forecasts*”, Water Resources Research, Vol. 41, W10410.
- GRIMM, A.M. (2004). “*How do La Nina events disturb the summer monsoon system in Brazil?*”, Climate Dynamics, Vol. 22, 123-138.
- HASTENRATH, S. (1990). “*Prediction of Northeast Brazil Rainfall Anomalies*”, J. Climate, Vol. 3, 893-904.
- KELMAN, J.; VIEIRA, A. de M.; RODRIGUEZ-AMAYA, J.E. (2000). “*El Niño influence on streamflow forecasting*”, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol. 14, pp. 123-138.

- KOUSKY, V. E. (1979). "Frontal influences on northeast Brazil", *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 108, pp. 488-498.
- MACEIRA, M. E. P.; PENNA, D. D. J.; DAMÁZIO, J. M. (2005). "Geração de Cenários Sintéticos de Energia e Vazão para o Planejamento da Operação Energética", *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- McCUEN, R. H. (2002). "Modeling Hydrologic Change: Statistical Methods". CRC. 448 p.
- MOURA, A. D.; SHUKLA, J. (1981). "On the Dynamics of Droughts in Northeast Brazil: Observations, Theory and Numerical Experiments with a General Circulation Model", *J. of the Atmospheric Sciences*, Vol. 38, No. 12, pp. 2653-2675.
- RAO, V.B.; DE LIMA, M.C. ; FRANCHITO, S. H. (1993). "Seasonal and Interannual Variations of Rainfall over Eastern Northeast Brazil", *J. Climate*, Vol. 6, 1754-1763.
- SOUZA FILHO, F. A.; LALL, U. (2003). "Seasonal to interannual ensemble streamflow forecasts for Ceara, Brazil: Applications of a multivariate, semiparametric algorithm", *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 11, 1307.
- TESFAYE, Y. G.; MEERSCHAERT, M. M.; ANDERSON, P. L. (2006). "Identification of periodic autoregressive moving average models and their application to the modeling of river flows", *Water Resources Research*, Vol. 42, W01419.
- TUCCI, C. E. M.; DA SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W. (2005). "Previsão de Vazão de Longo Prazo na Bacia do Rio São Francisco III: Previsão da Vazão", submetido à *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. ABRH.
- UVO, C.B.; GRAHAM, N.E. (1998). "Seasonal runoff forecast for northern South America: A statistical model", *Water Resources Research*, Vol. 34(12), pp. 3515-3524.
- UVO, C. B.; REPELLI, C.A.; ZEBIAK, S.E. ; KUSHNIR, Y. (1998). "The Relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil Monthly Precipitation", *J. Climate*, **11**, 551-562.
- YEVJEVICH, V.; LANE, W. L. (1997). "Applied Modeling of Hydrologic Time Series". *Water Resources Pubns*, 484p.