

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**APLICAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS DETERMINÍSTICO E  
ESTOCÁSTICO MENSAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO XINGU - PARÁ**

**EDMUNDO WALLACE MONTEIRO LUCAS**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**Junho de 2007**

EDMUNDO WALLACE MONTEIRO LUCAS

APLICAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS DETERMINÍSTICO E  
ESTOCÁSTICO MENSAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO XINGU - PARÁ

Dissertação apresentada ao programa de  
Pós-graduação em Meteorologia da  
Universidade Federal de Campina Grande,  
em cumprimento às exigências para  
obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Subárea: Hidrometeorologia

**Orientador:** Prof. Dr. Francisco de Assis Salviano de Sousa

**CAMPINA GRANDE - PB**

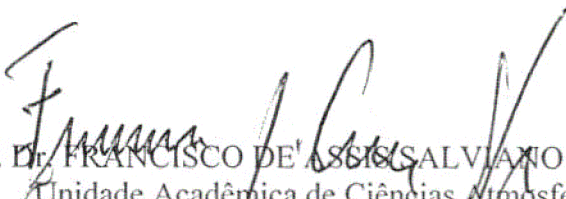
**Junho de 2007**

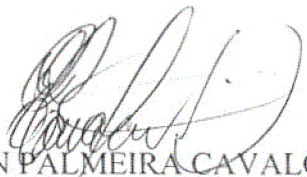
EDMUNDO WALLACE MONTEIRO LUCAS

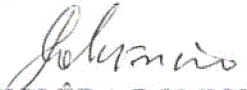
APLICAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS DETERMINÍSTICO E ESTOCÁSTICO  
MENSAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO XINGU-PARÁ

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/06/2007

BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO DE SOUSA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dra. JOSICLÊDA DOMICIANO GALVÊNCIO  
Departamento de Ciências Geográficas  
Universidade Federal de Pernambuco

**DEDICATÓRIA**

A meus pais João Batista Lucas e  
Eliana Silva Monteiro, meus  
irmãos e sobrinhos,  
DEDICO.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, sabedoria e seu infinito amor.

Ao Dr. Francisco de Assis Salviano de Sousa, pela orientação e confiança depositada que possibilitou a conclusão do presente trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida para custeio dos estudos.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia, pelo fornecimento de dados, cooperação e apoio para realização deste trabalho.

A Agência Nacional de Águas (ANA), pelo fornecimento de dados.

A secretária do Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Divanete Cruz, pela atenção e assistência prestada durante o curso.

Aos colegas do Programa de Pós-graduação em Meteorologia, em especial a Genival da Silva, Ronaldo Menezes, David Nogueira, Maryfrance Diniz, Kleber Ataíde pela amizade e contribuição na realização deste trabalho.

Aos colegas de trabalho, que tanto torceram por mim, em especial ao grande amigo, Fabrício Daniel, presente em várias etapas do desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XII</b>
<b>LISTA DE ANEXOS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XIV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
2.1 Fundamentação Teórica .....	4
2.1.1 Ciclo Hidrológico .....	4
2.1.2 Bacia Hidrográfica .....	10
2.1.3 Resposta Hidrológica .....	11
2.1.4 Modelos Hidrológicos .....	12
2.1.5 Testes do modelo e otimização de parâmetros .....	15
2.1.6 El Nino-Oscilação Sul (ENOS) .....	17
2.2 Revisão Bibliográfica .....	24
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>30</b>
3.1 Local de estudo e características gerais da bacia hidrográfica do Xingu .....	30
3.2 Dados Utilizados .....	33
3.3 Modelo hidrológico mensal determinístico de dois parâmetros .....	36
3.3.1 Evapotranspiração real mensal do modelo .....	36
3.3.2 Cálculo da vazão mensal .....	37

3.3.3	Métodos numéricos do modelo .....	38
3.3.4	Determinação da quantidade de água no solo inicial .....	38
3.3.5	Otimização dos parâmetros .....	39
3.4	Modelos estocásticos ARIMA .....	40
3.5	Calibração e verificação dos modelos .....	45
3.6	Influência dos fenômenos ENOS na vazão observada .....	46
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>48</b>
4.1	Resultados dos modelos hidrológicos .....	48
4.1.1	Modelos determinísticos de dois parâmetros .....	49
4.1.2	Modelo estocástico ARIMA .....	53
4.1.3	Comparação dos modelos .....	55
4.2	Influência dos fenômenos ENOS na resposta hidrológica .....	77
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>80</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>82</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>89</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Quantidade anual de água estocada nos oceanos, continentes e atmosfera, e troca entre diferentes reservatórios por meio da evaporação (E), precipitação (P) e runoff ( $R_o$ ). Fonte: Peixoto e Oort (1992) .....	7
Figura 2.	Ciclo hidrológico no meio natural. Fonte: Tucci (1998) .....	8
Figura 3.	Ciclo hidrológico em ambientes urbanos. Fonte: Tucci (1998) .....	8
Figura 4.	Esquema de balanço Hídrico. Fonte: Vilela (1975) .....	10
Figura 5.	Possível metodologia para seleção de modelos chuva-vazão. Fonte: Perrin et al. 2002 .....	13
Figura 6.	Fases no processo de um modelo estocástico do tipo ARIMA. Fonte: Lopes e Gonçalves 2003 .....	14
Figura 7.	Circulação observada no Oceano Pacífico Equatorial em anos sem a presença do El Niño ou La Niña, ou seja, anos normais. Fonte: INPE/CPTEC (2007) .....	19
Figura 8.	Padrão de circulação observada em anos de El Niño na região equatorial do Oceano Pacífico. Fonte: INPE/CPTEC (2007) .....	20
Figura 9.	Padrão de circulação observada em anos de La Niña na região equatorial do Oceano Pacífico. Fonte: INPE/CPTEC (2007) .....	21
Figura 10.	Localização Geográfica da Bacia Hidrográfica do Xingu/PA .....	31
Figura 11.	Localização das estações fluviométricas na bacia hidrográfica do Xingu/PA .....	35
Figura 12.	Correlação entre a evapotranspiração real mensal estimada com dados do tanque classe A e com valores de evapotranspiração potencial, em Altamira no período de 2001 a 2005 .....	50



- Figura 13. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Aldeia Baú ..... 59
- Figura 14. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Aldeia Baú. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal ..... 60
- Figura 15. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Altamira ..... 61
- Figura 16. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Altamira. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal ..... 62
- Figura 17. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Arapari ..... 63
- Figura 18. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Arapari. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal ..... 64
- Figura 19. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Belo Horizonte ..... 65
- Figura 20. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Belo Horizonte. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal ..... 66

- Figura 21. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Boa Esperança ..... 67
- Figura 22. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Boa Esperança. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal ..... 68
- Figura 23. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Cajueiro ..... 69
- Figura 24. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Cajueiro. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal ..... 70
- Figura 25. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Pedra do Ó ..... 71
- Figura 26. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Pedra do Ó. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal ..... 72
- Figura 27. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em São Felix do Xingu ..... 73
- Figura 28. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em São Felix do Xingu. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal ..... 74

- Figura 29. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Uruara ..... 75
- Figura 30. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em para Uruara. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal ..... 76
- Figura 31. Defasagem entre precipitação mensal (mm) e vazão mensal ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) no período de 2001 a 2005, em Altamira ..... 77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Anos de eventos de El Niño e La Niña Fonte: INPE/CPTEC (2007) .....	22
Tabela 2. Dados das estações fluviométricas da bacia hidrográfica do Xingu .....	33
Tabela 3. Dados das estações Pluviométricas da bacia hidrográfica do Xingu .....	34
Tabela 4. Dados médios anuais, vazão (Q), precipitação (P) e evapotranspiração potencial (ETP) observados no âmbito da bacia hidrográfica do Xingu e os resultados da calibração do modelo determinístico .....	52
Tabela 5. Valores de $\lambda$ e ordens dos termos para o modelo estocástico ARIMA .....	53
Tabela 6. Parâmetros do modelo estocástico ARIMA .....	54
Tabela 7. Resultados dos critérios de Nash-Sutcliffe, na avaliação de desempenho dos modelos .....	58
Tabela 8. Resposta Hidrológica anual das estações selecionadas na Bacia Hidrográfica do Xingu e intensidade dos eventos ENOS: Fraco (*), Moderado (**) e Forte (***) .....	78

## LISTA DE ANEXOS

Figura A1. Série de vazão mensal ( $m^3/s$ ) e correlogramas ACF e PACF de Arapari .....	90
Figura A2. Série de vazão mensal ( $m^3/s$ ) diferenciada e correlograma ACF de Arapari .....	91
Figura A3. Análise dos resíduos da série de vazão mensal de Arapari .....	92
Figura A4. Função distribuição de probabilidade Normal dos resíduos da série de vazões mensais em Arapari .....	93
Figura A5. Série de vazão mensal ( $m^3/s$ ) e correlogramas ACF e PACF de Cajueiro .....	94
Figura A6. Série de vazão mensal ( $m^3/s$ ) diferenciada e correlograma ACF de Cajueiro .....	95
Figura A7. Análise dos resíduos da série de vazão mensal de Cajueiro .....	96
Figura A8. Função distribuição de probabilidade Normal dos resíduos da série de vazões mensais em Cajueiro .....	97

## RESUMO

A modelagem hidrológica é uma importante ferramenta no planejamento e gerenciamento de programas de recursos hídricos de bacias hidrográficas. Em geral a previsão hidrológica pode ser feita por meio de dois tipos de modelos: modelos determinísticos e modelos estocásticos. Neste trabalho, foi aplicado um modelo hidrológico determinístico mensal de dois parâmetros desenvolvido por Xinog e Guo (1999) e um modelo estocástico, denominado ARIMA “*Auto Regressive Integrated Moving Average*”, cuja metodologia foi desenvolvida por Box e Jenkins (1976), para simular a vazão mensal da bacia hidrográfica do Xingu no estado do Pará, que ocupa uma área de aproximadamente 314.427 km<sup>2</sup>, correspondente a 25,1% da área do estado. O objetivo principal deste trabalho foi simular a vazão mensal através dos modelos e comparar os seus resultados; e especificamente analisar se há influencia do fenômeno ENSO - El Nino/Oscilação Sul, na vazão observada da bacia através da resposta hidrológica anual analisada para cada estação localizada na bacia. O modelo hidrológico determinístico aplicado possui uma estrutura simples e apresentou bons resultados, porém mostrou-se muito sensível a eventos extremos de precipitação. O modelo estocástico ARIMA, conseguiu capturar a dinâmica das séries temporais, apresentando resultados muito satisfatórios na simulação da vazão mensal nas estações da bacia. Ambos os modelos devem ser aplicados com cautela no período chuvoso, onde ocorrem os eventos extremos de precipitação e conseqüentemente vazões de pico. Foi também verificado que em anos de La Nina (El Nino) a resposta hidrológica anual das estações da bacia apresentou com maior freqüência valores menores (maiores) que a média climatológica observada.

**Palavras-chave:** Bacia Hidrográfica do Xingu/PA, Modelos hidrológicos, Vazão.

## ABSTRACT

The hydrological modeling is an important tool in the water resources programs planning and management of river basins. In general the hydrologic forecast can be made by means of two types of models: deterministic models and stochastic models. In this work, it was applied a monthly deterministic hydrologic model of two parameters developed by Xiong and Guo (1999) and a stochastic model, denominated ARIMA “*Auto Regressive Integrated Moving Average*”, whose methodology was developed by Box and Jenkins (1976), to simulate the monthly runoff of the river basin of the Xingu in Pará state, who occupies an area approximately of 314,427 km<sup>2</sup>, corresponding to 25.1% of the state area. The main objective of this work was to simulate the monthly runoff through the models and to compare its results; and to analyze specifically the influence of phenomenon ENSO - El Nino / South Oscillation, in the observed runoff of the basin through of the analyzed annual hydrological response for each station located in the basin. The hydrologic model deterministic applied possess a simple structure and presented good results, however it revealed very sensible the extreme precipitation events. The stochastic model ARIMA, it efficient to capture the dynamic of the temporal series, presenting very satisfactory results in the simulation of the monthly runoff in the basin stations. Both models should be applied with caution in the rainy period, where extreme precipitation events occur and consequently peak runoff. It also was verified that years of La Nina (El Nino) the annual hydrological response of the basin stations presented with larger frequency values lesser (larger) that the observed climatological average.

**Keywords:** River basin of the Xingu/PA, Hydrological Modeling, Runoff.

## **1. INTRODUÇÃO**

Atualmente o desequilíbrio crescente entre suprimento e demanda de água deu lugar a grande atenção das autoridades pertinentes e ao público em geral. Nesse sentido, planejamento, programas de recursos hídricos, previsão e distribuição do ciclo da água são tópicos importantes. Para previsão da distribuição dos recursos hídricos sob diferentes condições, costuma-se empregar modelos de balanço hídrico mensal para a conversão de chuva em vazão. Geralmente, o modelo de balanço hídrico mensal é aplicado em três campos: informações preliminares para construção de reservatórios de água; estudo de impactos de mudanças climáticas em bacias hidrográficas e avaliação sazonal de suprimento e demanda de água para irrigação. Os modelos de balanço hídrico com base mensal são também usados para simular e prever vazões mensais em bacias hidrográficas. A vantagem dessa escala temporal é que a formulação do modelo é mais simples e o número de parâmetros é menor do que em modelos hidrológicos em base diária.



Em geral, a previsão hidrológica pode ser feita principalmente através de dois tipos de modelos: os modelos determinísticos chuva-vazão e os modelos estocásticos. Os primeiros procuram representar os processos físicos de transformação de chuva em vazão, enquanto que os modelos estocásticos baseiam-se na análise da estrutura de dependência temporal das séries de aflúncias. As previsões, nos modelos físicos, são obtidas a partir de dados de precipitações observadas ou previstas, enquanto que nos modelos estocásticos as previsões são obtidas tendo como base as últimas aflúncias (vazões) observadas. As previsões de vazões para o planejamento de médio e curto prazo tendem a ser feitas através de modelos estocásticos. Já as previsões para curtíssimo prazo, podem ser realizadas através de modelos físicos determinísticos (Carvalho, 2001).

Dos afluentes da Bacia Amazônica, que é a maior bacia hidrográfica do mundo, com uma drenagem de 5,8 milhões de km<sup>2</sup>, sendo 3,9 milhões no Brasil, destaca-se a bacia Hidrográfica do Xingu, tanto pelas suas dimensões, com aproximadamente 531.250 km<sup>2</sup> de área, o que representa 9,2% da Bacia Amazônica, situando-se entre as maiores da Amazônia brasileira, como em termos da vazão média anual, de 9.700 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, o que é superior a maioria das grandes bacias não amazônicas.

A rede hidrometeorológica instalada na bacia Amazônica viabiliza o levantamento de informações necessárias aos estudos e projetos que demandam o conhecimento das disponibilidades hídricas e potenciais hidráulicos da mesma, assim como para o cálculo das séries de vazões naturais médias mensais nos locais de aproveitamentos, visando, dentre outras coisas, o planejamento energético e simulações relativas aos sistemas elétricos, podendo citar o estudo da implantação da hidrelétrica de Belo Monte. Essa região

destaca-se pelo alto potencial hidrelétrico devido seu grande volume de água e relevo acidentado, propiciando condições ideais para geração de energia (Melo, 2004).

A Bacia Amazônica é afetada por variações climáticas globais. Desse modo, a previsão de acontecimentos hidrológicos extremos é de suma importância para o conhecimento hidrológico mais detalhado de suas bacias e sub-bacias hidrográficas e como consequência para o desenvolvimento regional. A relação das vazões nos rios da Amazônia e a influência do fenômeno ENSO - El Niño/Oscilação Sul é bastante evidente. Geralmente, ocorrem valores acima da média durante os episódios de La Niña, com chuvas abundantes no norte e leste da Amazônia. Já em anos de El Niño ocorrem valores de vazões abaixo da média histórica, quando a chuva diminui consideravelmente em toda a Amazônia. Na literatura especializada há estudos que descrevem detalhadamente os impactos que essas oscilações climáticas causam no Brasil e no mundo.

O objetivo deste trabalho é simular a vazão mensal na bacia hidrográfica do Xingu, Estado do Pará, utilizando dois modelos hidrológicos com base mensal: um determinístico chuva-vazão de dois parâmetros e outro estocástico, denominado ARIMA “*Auto Regressive Integrated Moving Average*” e analisar se há influência do fenômeno ENSO - El Niño/Oscilação Sul na vazão mensal observada da bacia, através da reposta hidrológica de cada estação estudada.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 - Fundamentação teórica**

#### **2.1.1 - Ciclo hidrológico**

Os processos físicos que controlam a distribuição e o movimento da água na superfície terrestre são melhores compreendidos quando descritos como parte integrante e inseparável do ciclo hidrológico. O ciclo hidrológico pode ser dividido em etapas: precipitação, interceptação, infiltração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo, transpiração e evaporação. Tucci (1998) descreveu cada uma dessas etapas.

A precipitação é a etapa inicial do ciclo hidrológico que ocorre quando o vapor d'água presente na atmosfera se condensa em microgotículas formando nuvens, até que as gotas tenham tamanho e peso suficientes para precipitar sob a forma de chuva, neve ou granizo. A precipitação pode ocorrer diretamente sobre um corpo d'água, ou deslocar-se sobre o solo, a partir do ponto de impacto, até um curso d'água, ou infiltrar.

Também, parte da precipitação sofre interceptação antes de atingir o solo, ficando retida na vegetação até ser evaporada ou alcançar o solo, quando a precipitação exceder a capacidade de retenção da vegetação ou pela ação dos ventos.

A água retida em depressões do solo tende a infiltrar. A infiltração ocorre enquanto a intensidade da precipitação não exceder a capacidade de infiltração do solo, ou seja, enquanto a superfície do solo não estiver saturada. A partir do momento em que foram excedidas a capacidade de retenção da vegetação e do solo e a superfície já estiver saturada, passa a haver escoamento superficial (runoff). A água, impulsionada pela gravidade para cotas mais baixas, forma pequenos filetes que tendem a se unir e formar cursos d'água, que continuam fluindo até encontrar riachos que formarão rios de porte cada vez maior, até atingir um oceano ou um lago.

O escoamento subterrâneo acontece quando a porção de precipitação infiltrada percola até os aquíferos subterrâneos (zona de saturação), escoando de forma bastante lenta. Quando o escoamento da água infiltrada ocorre na zona de aeração do solo (camada insaturada) até surgir como escoamento superficial é chamado de escoamento de base. É esse escoamento que mantém a vazão de base dos rios em períodos de estiagem.

Parte da água armazenada no solo será consumida pela vegetação voltando, em seguida, à atmosfera através das folhas das plantas, em um processo chamado transpiração. O fenômeno de evaporação se inicia antes mesmo da chuva atingir o solo e após a ocorrência da precipitação. A evaporação ainda ocorre diretamente do solo desprovido de vegetação. Nos rios, lagos, mares, oceanos, e outros corpos d'água a evaporação potencial

devolve a água à atmosfera completando o ciclo hidrológico, estando outra vez disponível para ser precipitada.

Segundo Peixoto e Oort (1992) a distribuição de água em varias fases no globo dá-se por três reservatórios principais: oceanos, continentes e atmosfera. Essa distribuição anual é mostrada na Figura 1. Cerca de 97% do volume total de água da hidrosfera está contido nos oceanos, 2,4% nos continentes e 0,001% na atmosfera. Sobre os continentes a água é distribuída em reservatórios secundários: regiões glaciais, água subterrânea, lagos, rios e na biosfera. A água evapora dos oceanos e continentes (evapora e evapotranspira) para a atmosfera, sendo transportada na fase condensada em nuvens ou na fase de vapor d'água, voltando a precipitar sobre continentes e oceanos, infiltrando no solo ou escoando sobre a superfície para rios e lagos, refazendo seu trajeto de volta aos oceanos. Dada à dimensão dos oceanos, o volume de água evaporada e precipitada é muito maior do que nos continentes.

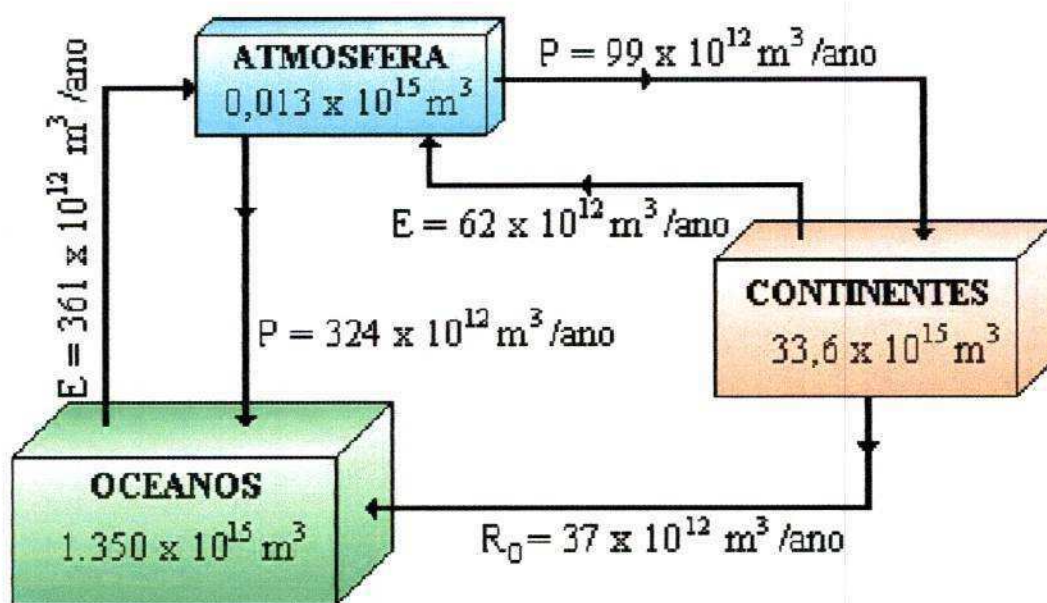


Figura 1. Quantidade anual de água estocada nos oceanos, continentes e atmosfera, e troca entre diferentes reservatórios por meio da evaporação (E), precipitação (P) e runoff (R<sub>o</sub>). Fonte: Peixoto e Oort (1992)

A prova que o ciclo hidrológico no meio-ambiente natural não é estático é que a própria paisagem está sempre em constante transformação. Exemplo disso são as precipitações intensas que causam erosão da superfície do solo, o escoamento de ondas de cheia, que pode mudar a configuração de leitos de rios, deslocando de bancos de areia, tornando móvel o leito de rios e provocando erosão das margens. Por outro lado, em períodos muito secos, o perímetro de áreas desérticas pode crescer. Em resumo, mesmo em ambientes naturais, a falta de precipitação, a precipitação e o escoamento superficial causam alterações significativas em bacias hidrográficas. As Figuras 2 e 3 exibem representações esquemáticas do ciclo hidrológico no meio-ambiente natural e urbanizado respectivamente.

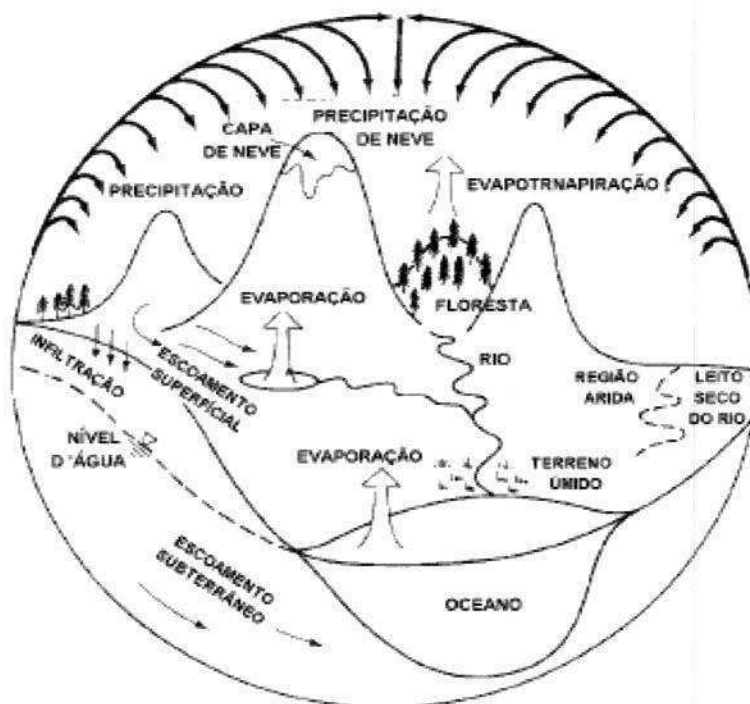


Figura 2. Ciclo hidrológico no meio natural. Fonte: Tucci (1998)



Figura 3. Ciclo hidrológico em ambientes urbanos. Fonte: Tucci (1998)

Com o crescimento da população mundial, as alterações ao meio ambiente se tornaram mais importantes, causando maiores mudanças às características do escoamento nas bacias hidrográficas. A retirada da vegetação natural para o desenvolvimento da agricultura aumenta a superfície de solo exposto, com óbvia diminuição da vegetação natural. Esta perda de vegetação diminui o potencial de infiltração de água no solo, aumenta o escoamento superficial e resulta em grandes perdas de solo. Nos últimos dois séculos, o crescimento das cidades tem modificado drasticamente a paisagem nos arredores destes centros urbanos. A urbanização tem interferido significativamente nos processos envolvidos no ciclo hidrológico. Superfícies impermeáveis, tais como telhados e ruas pavimentadas, reduzem o potencial de infiltração e conseqüentemente a recarga dos aquíferos subterrâneos, e aumentam o volume do escoamento superficial. Estas superfícies ainda apresentam uma rugosidade menor, aumentando a velocidade do escoamento superficial e a erosão. Estas alterações do ciclo hidrológico têm agravado as enchentes e aumentado a sua freqüência, trazendo transtornos e prejuízos às populações urbanas (Tucci, 1998).

O ciclo hidrológico em uma bacia pode ser representado, em unidades de altura (mm ou polegadas) pela equação do balanço hídrico (Equação 1):

$$P - R - G - E - T = \Delta S \quad (1)$$

Em que, P é a precipitação, R é o escoamento superficial, G é o escoamento subterrâneo ou de base, E é a evaporação, T é a transpiração e S é o armazenamento.



Uma representação do ciclo hidrológico pode ser aplicada a qualquer tamanho de bacia hidrográfica (Figura 4), como base para o desenvolvimento de um modelo matemático, matemático-estatístico, físico-matemático etc. que represente o escoamento superficial dessa bacia. A principal dificuldade neste tipo de modelagem é que alguns dos termos da equação podem ser desconhecidos.

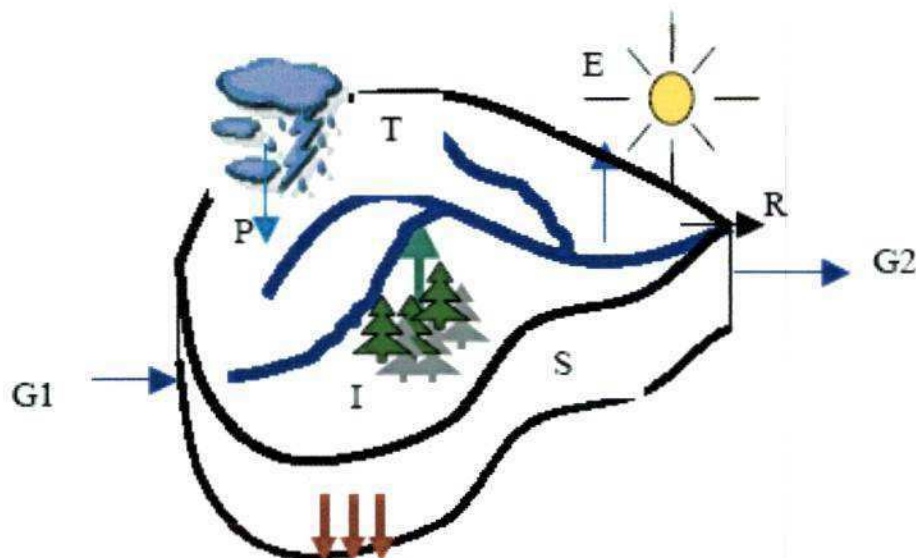


Figura 4. Esquema de balanço Hídrico. Fonte: Vilela e Mattos (1975)

### 2.1.2 - Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica apresenta a rede natural para a geração de fluxo nos rios. Visão moderna de recursos hídricos considera a Bacia hidrográfica como unidade natural para o gerenciamento de água e estudos científicos. (Jones, 1999). As bacias hidrográficas são separadas de outras bacias por barreiras topográficas chamadas vertentes. A vertente representa todos os canais tributários que fluem para o mesmo local ao longo da corrente. Topografia, tipo de solo, geologia, clima e cobertura vegetal são fatores que influenciam a natureza do padrão dos canais de drenagem. A topografia forma o perímetro divisor da

bacia e, na maioria das vezes, formando um limite impermeável. Seus limites superiores são os divisores de águas (partes mais altas da bacia – divisor topográfico) e seu limite inferior é a saída da bacia (confluência).

### 2.1.3 - Resposta Hidrológica

A resposta hidrológica é a forma pela qual uma bacia responde com escoamento à precipitação que cai no solo, sendo definida como a razão entre o runoff e a precipitação. Ela representa a produção de água de uma bacia em função da precipitação. A resposta hidrológica da bacia depende de certa forma, de suas características morfológicas (área, forma, topografia, geologia, solo, cobertura vegetal entre outros).

Calcular a quantidade de água que uma bacia produzirá, em forma de vazão, a partir de diferentes tipos de precipitação vem sendo tratada por hidrologistas como forma de prever e prevenir acidentes ao homem. Um dos modelos chuva-vazão mais antigos é descrito em Chow (1964) É um modelo antigo, mas eficiente para certas condições de contorno. Esse modelo vem sendo utilizado nos Estados Unidos e na Inglaterra desde o século XVIII até hoje. Trata-se do modelo denominado Fórmula Racional (Equação 2):

$$Q = C \times P \times A \quad (2)$$

Em que Q é o pico de vazão em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , C é o coeficiente de runoff (adimensional), P é a taxa da precipitação em  $\text{mm h}^{-1}$  e A é a área da bacia hidrográfica estudada em  $\text{m}^2$ . Sendo C a resposta hidrológica da bacia, é importante conhecer como a bacia responde à entrada de água, nas diversas formas de precipitação. Nem toda precipitação que cai numa bacia se

transforma em deflúvio diretamente. Parte dela flui como escoamento direto, parte permanece armazenada na bacia por algum tempo, compondo o aquífero, e parte evapora do solo para a atmosfera.

#### 2.1.4 - Modelos hidrológicos

Um modelo hidrológico permite equacionar os processos, representar, entender e simular o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica (Tucci, 1998). Modelos hidrológicos podem ser classificados por diferentes aspectos tais como: tipos de variáveis utilizadas no modelo (estocástico ou determinístico), tipo de relação entre essas variáveis (empírico ou conceitual), a forma de representar os dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estatísticos ou dinâmicos).

Um dos primeiros trabalhos a discutir sobre a estrutura de modelos hidrológicos chuva-vazão e sua perspectiva para o futuro foi feito por Todini (1988). Esse autor faz um histórico dos modelos desenvolvidos até então, na oportunidade verificou que os modelos apresentavam muitos parâmetros, geralmente incorporavam muitos erros nos resultados e na descrição de cada um dos processos envolvidos em toda extensão da bacia. Na Figura 5 é apresentado um esquema geral desenvolvido por Perrin et al. (2002) para uma possível metodologia na seleção de um modelo hidrológico, especialmente o modelo chuva-vazão.

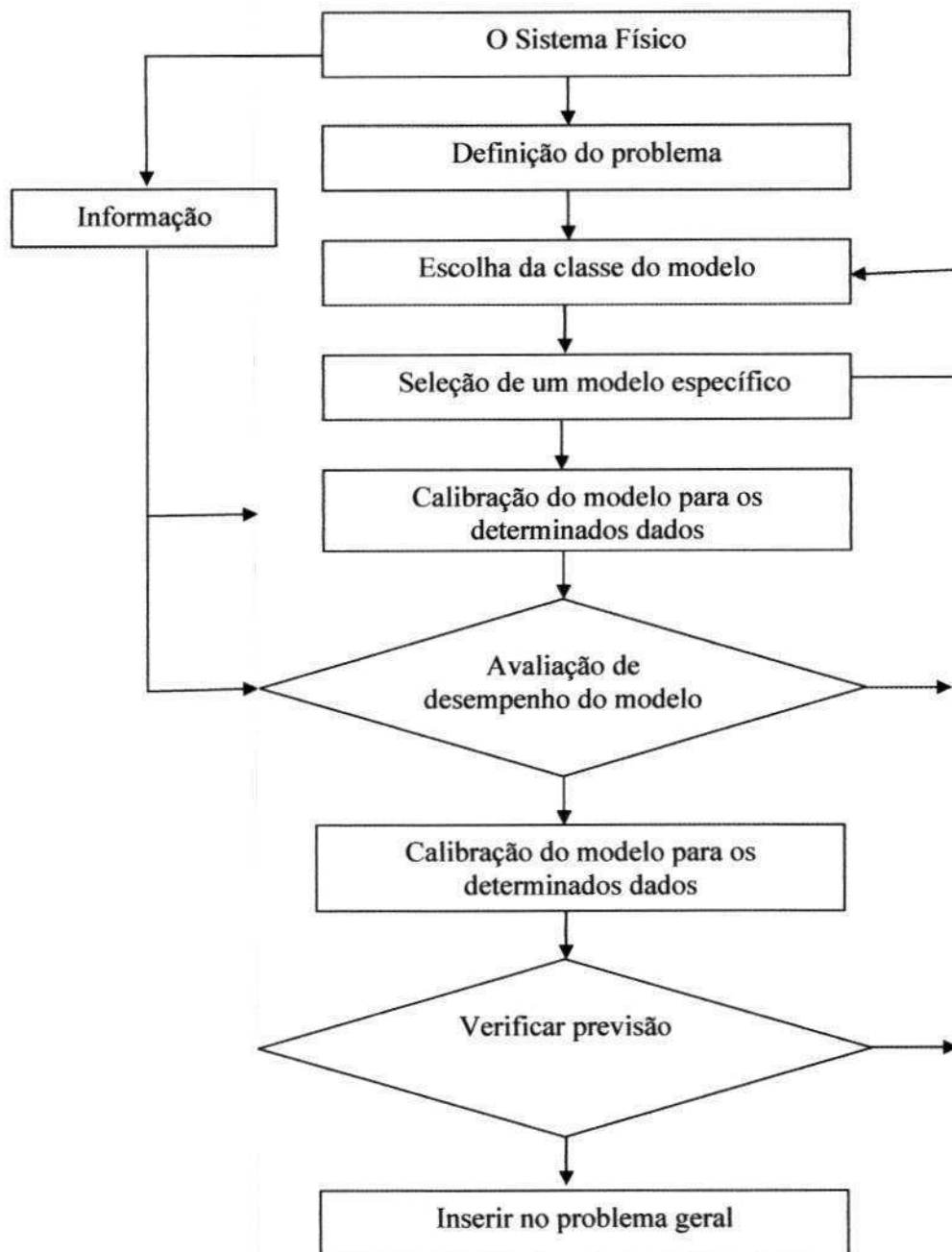


Figura 5. Possível metodologia para seleção de modelos chuva-vazão. Fonte: Perrin *et al.*

Previsão de vazões utilizando modelos estocásticos consiste em determinar a evolução das vazões, em períodos não observados, por meio de uma série temporal de observações existente, de preferência com período relativamente longo. Um modelo muito aplicado atualmente para realizar essa tarefa é o modelo estocástico do tipo ARIMA “*Auto Regressive Integrated Moving Average*”, cuja sistematização é conhecida pela metodologia de Box e Jenkins (1976). Segundo Lopes e Gonçalves (2003), a modelagem de uma série temporal para uma determinada variável engloba as seguintes fases no processo de previsão, mostrado na Figura 6.



Figura 6. Fases no processo de um modelo estocástico do tipo ARIMA. Fonte: Lopes e Gonçalves, 2003

### 2.1.5 - Teste do modelo e otimização de parâmetros

Para desenvolver um modelo hidrológico completo, muitos dados de diferentes bacias são necessários para testar o desempenho desse modelo. Os testes normalmente incluem dois passos: calibração e validação. Deste modo, a série total de dados é dividida em duas partes: o período de calibração e o período de validação. Calibração se refere ao processo de usar a primeira parte da série de dados para encontrar os melhores valores dos parâmetros desconhecidos do modelo através de otimização. Validação refere-se ao processo de usar a segunda parte da série de dados para justificar a persistência do desempenho do modelo que opera com os valores dos parâmetros obtidos no período de calibração. Só quando o desempenho do modelo é satisfatório, em ambas os passos, calibração e validação, é que o modelo pode ser usado com certa confiabilidade na prática (Xiong e Guo, 1999).

Muitos testes foram desenvolvidos para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos, um dos trabalhos pioneiros foi desenvolvido por Nash e Sutcliffe (1970). Nesse trabalho os autores apresentaram critérios para justificar o desempenho do modelo. Para os autores, embora a simplificação da operação da bacia hidrográfica seja necessária, principalmente em termos de variabilidade espacial, o modelo deve refletir a base física, considerando que uma ou mais funções do modelo pode ser isolada e parâmetros relevantes otimizados. Deste modo, o modelo poderá ser mais eficiente do que se fosse otimizado como um todo. Para os autores a otimização necessita de um índice de concordância ou discordância entre o valor observado e calculado. A análise de regressão sugere o critério da soma dos quadrados dada por:

$$F^2 = \sum (q' - q)^2 \quad (3)$$

$$F_0^2 = \sum (q - \bar{q})^2 \quad (4)$$

Em que  $q$  é o valor observado,  $q'$  é o valor simulado,  $\bar{q}$  é o valor médio observado,  $F^2$  a variância residual, e  $F_0^2$  a variância inicial.

Como uma proporção dessa variância inicial, pode-se definir a eficiência do modelo através de  $R^2$  pela seguinte formula:

$$R^2 = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2} \quad (5)$$

Para medir a eficiência de partes do modelo, tem-se a seguinte formula;

$$r^2 = \frac{F_1^2 - F_2^2}{F_1^2} = \frac{R_2^2 - R_1^2}{1 - R_1^2} \quad (6)$$

Em que os índices 1 e 2 representam a inserção da parte do modelo a ser considerada.

Nash e Sutcliffe (1970) propuseram um procedimento para uma modificação progressiva em modelos, como descrita a seguir:

- (1) Assumir um modelo simples, mas que possa ser detalhado posteriormente;

- (2) Otimizar os parâmetros e analisar sua estabilidade;
- (3) Medir a eficiência de  $R^2$ ;
- (3) Modificar o modelo se possível com a introdução de uma nova parte, repetir o passo (2) e (3), medir  $r^2$  e decidir a aceitação ou rejeição da modificação;
- (5) Escolher a próxima modificação;
- (6) Pode ser necessário comparar dois ou mais modelos de complexidade similar, visto que, nem todos os modelos podem ser arranjados em ordem crescente de complexidade. Esse procedimento pode ser feito pela comparação de  $R^2$ .

#### 2.1.6 - El Niño/Oscilação Sul (ENOS)

Fenômeno representado pela interação oceano - atmosfera, onde o aquecimento das águas da bacia do Pacífico equatorial interage com as circulações atmosféricas, alterando os padrões desta circulação a nível global (Trenberth, 1997).

O ENOS ou El Niño Oscilação Sul representa de forma mais genérica um fenômeno de interação atmosfera - oceano, associado às alterações dos padrões normais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e dos ventos alísios na região do Pacífico Equatorial, entre a Costa Peruana e Pacífico oeste próximo à Austrália. Além de índices baseados nos valores da temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico equatorial, o fenômeno ENOS pode ser também quantificado pelo Índice de Oscilação Sul (IOS). Este índice representa a diferença entre a pressão ao nível do mar entre o Pacífico Central



(Taiti) e o Pacífico do Oeste (Darwin/Austrália). Esse índice está relacionado com as mudanças na circulação atmosférica nos níveis baixos, consequência do aquecimento/resfriamento das águas superficiais na região. Valores negativos e positivos da IOS são indicadores da ocorrência do El Niño e La Niña respectivamente (INPE/CPTEC, 2007).

A Figura 7 apresenta as condições atmosféricas e oceânicas sobre o oceano Pacífico em condições normais sem a presença dos fenômenos El Niño ou La Niña. Nessas condições as águas estão relativamente mais aquecidas no Pacífico equatorial oeste, próximo à costa Australiana e região da Indonésia, e relativamente mais fria junto à costa oeste da América do sul. Nessas circunstâncias observa-se uma célula de circulação com movimentos ascendentes no Pacífico Central/Ocidental e movimentos descendentes no oeste da América do Sul (setas pretas); com ventos de leste para oeste próximo à superfície “ventos alísios” (setas brancas), e de oeste para leste em altos níveis, esse circulação e denominada Célula de Walker.

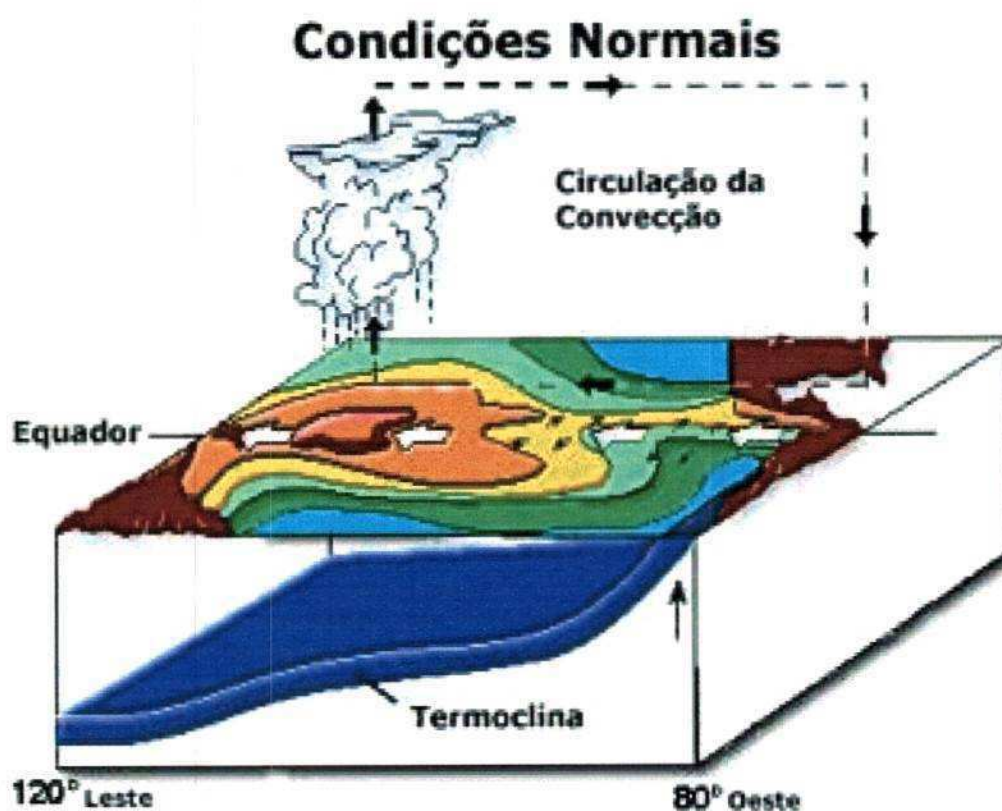


Figura 7. Circulação observada no Oceano Pacífico Equatorial em anos sem a presença do El Niño ou La Niña, ou seja, anos normais. Fonte: INPE/CPTEC (2007)

Em condições do fenômeno El Niño (Figura 8) a intensidade dos ventos alísios diminuem, chegam até a mudar de direção ficando de oeste para leste (setas brancas), a Célula de Walker fica bipartida (setas pretas), ocorrendo um deslocamento na região com maior formação de nuvens. Pode ser observado que as águas quentes em toda a extensão do Pacífico equatorial atinge o litoral peruano e torna a termoclina (região com forte gradiente de temperatura, separando águas mais quentes acima e mais frias abaixo dessa região) mais profunda devido, principalmente, o enfraquecimento dos ventos alísios.

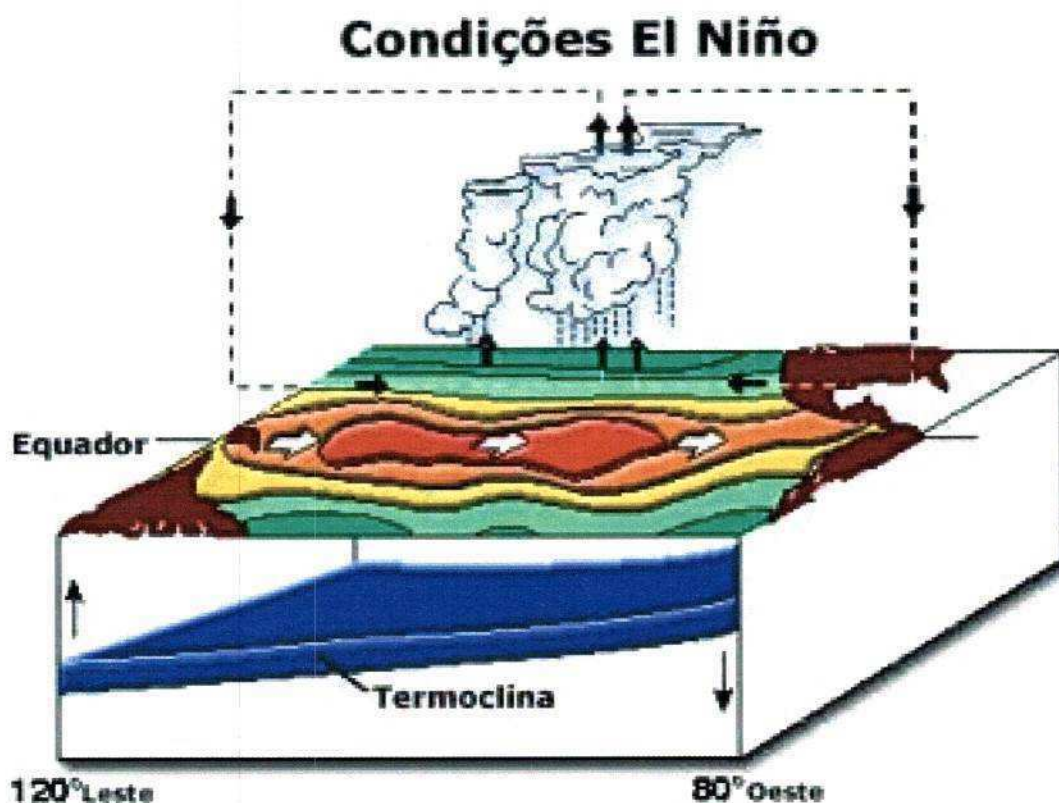


Figura 8. Padrão de circulação observada em anos de El Niño na região equatorial do Oceano Pacífico. Fonte: INPE/CPTEC (2007)

Trenberth (1997), identificou as áreas do Niño 3 e 3.4 como sendo áreas que fornecem com mais certeza a intensidade dos episódios ENOS, e sua fase de maturação ocorre entre os meses de novembro a janeiro, sugerindo que, para caracterização de um evento El Niño a área 3 (4°N - 4°S e 90°W - 150°W); em seis meses consecutivos as anomalias de TSM deverão apresentar, ao menos cinco meses com anomalias maiores que 0,5° C. O fenômeno La Niña refere-se a fase fria ou episódio frio do oceano Pacífico (Figura 9), com características opostas ao fenômeno El Niño, ocorrendo resfriamento das águas na costa Oeste da América do sul, costa do Peru e Equador, devido a intensificação dos alísios do leste do Pacífico, durante esse episódio as temperaturas do mar a superfície no Pacífico leste diminuem em torno de 2° a 3° C da média climatológica.

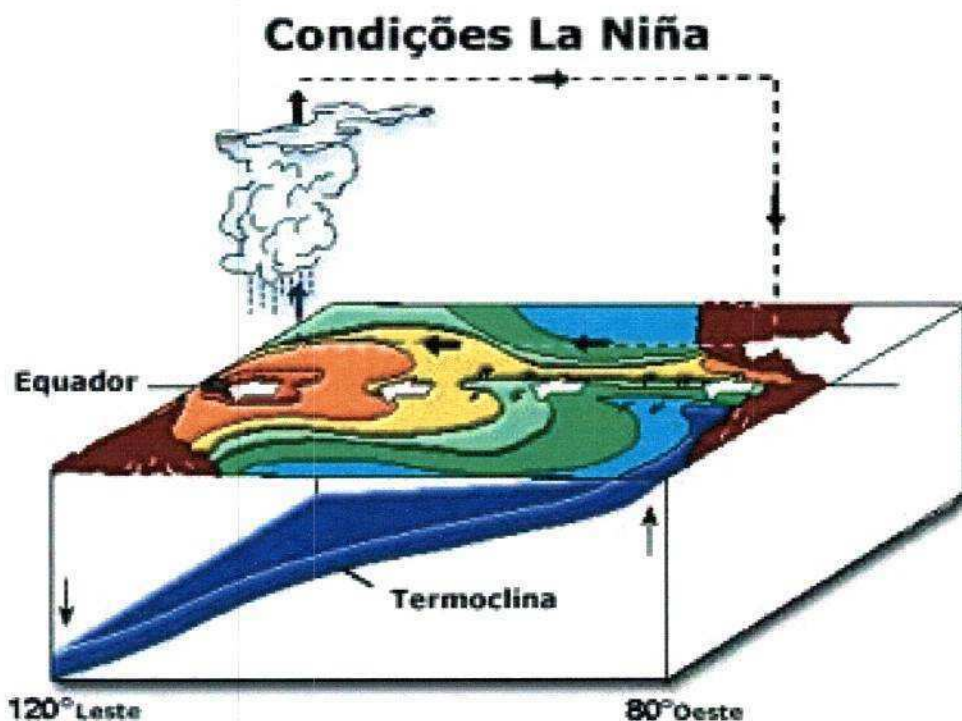


Figura 9. Padrão de circulação observada em anos de La Niña na região equatorial do Oceano Pacífico. Fonte: INPE/CPTEC (2007)

Existe uma grande variedade de condições para eventos de El Niño e La Niña, na maioria os eventos são classificados como forte, moderados ou fracos. Vários centros no Brasil e no mundo monitoram a evolução desses fenômenos, com o objetivo de evitar ou minimizar os prejuízos causados pelos fenômenos naturais. Na Tabela 1, é apresentado um histórico dos fenômenos El Niño e La Niña, com suas respectivas intensidades.

Tabela 1. Anos de eventos de El Niño e La Niña. Fonte: INPE/CPTEC (2007)

<i>El Niño</i>	<i>La Niña</i>
1877 - 1878***	1886 ***
1888 - 1889**	1903 - 1904***
1896 - 1897***	1906 - 1908***
1899***	1909 - 1910***
1902 - 1903***	1916 - 1918***
1905 - 1906***	1924 - 1925**
1911 - 1912***	1928 - 1929*
1913 - 1914**	1938 - 1939***
1918 - 1919***	1949 - 1951 ***
1923**	1954 - 1956***
1925 - 1926***	1964 - 1965**
1932**	1970 - 1971**
1939 - 1941***	1973 - 1976***
1946 - 1947**	1983 - 1984*
1951*	1984 - 1985*
1953*	1988 - 1989***
1957 - 1959***	1995 - 1996*
1963*	1998 - 2001**
1965 - 1966**	-
1968 - 1970**	-
1972 - 1973***	-
1976 - 1977*	-
1977 - 1978*	-
1979 - 1980*	-
1982 - 1983***	-
1986 - 1988**	-
1990 - 1993***	-
1994 - 1995**	-
1997 - 1998***	-
<b>Forte*** Moderada** Fraco*</b>	

No Brasil os principais efeitos relacionados ao episódio El Niño são: diminuição das chuvas no leste da Amazônia e nordeste do Brasil, causando severas secas no nordeste brasileiro e altas taxas de precipitação no Sul e sudeste do Brasil. Com relação ao fenômeno La Niña este causa em geral chuvas abundantes no norte e leste da Amazônia e no Nordeste, podendo ocorrer chuvas acima da média na região do semi-árido do nordeste brasileiro, e secas severas no sul do país.

Marengo *et al.* (2004), pesquisando a influência do ENOS na Amazônia, constatou que, na porção norte da bacia predominam condições mais secas durante eventos de El Niño e nas regiões sul e centro da Amazônia prevalecem condições mais úmidas. Zeng (1999), estudando a influencia de um evento ENOS sobre o runoff na bacia Amazônica, mostra que a mesma pode ocorre até sete meses após o início do evento, ocorrendo dentro do ano hidrológico em estudo ou no ano seguinte.

Segundo Bezerra (2006), *“Os fenômenos El Niño e La Niña são oscilações normais, previsíveis das temperaturas da superfície do mar, nas quais o homem não pode impedir. São fenômenos naturais, variações normais de sistema climático, que sempre estiveram presentes milhares de anos e continuarão existindo”*.

## 2.2 - Revisão bibliográfica

Andreassin *et al.* (2004) discutiram problemas relacionados aos modelos hidrológicos chuva-vazão, destacando três pontos principais: estimativa da evapotranspiração (ETP) na escala da bacia, indisponibilidade de dados e por último que muitos modeladores acreditam que os modelos chuva-vazão são insensíveis com imperfeições na estimativa da evapotranspiração. Os autores fizeram um estudo da sensibilidade do modelo para valores estimados de ETP, regionalizando a ETP numa região montanhosa da França em 62 bacias. Nessa região a ETP varia rapidamente com a altitude, latitude e longitude. Os modelos utilizados foram uma versão modificada do TOPMODEL "*Topographic Model*" (modelo de 8 parâmetros) e o GR4J "*Génie Rural à 4 paramètres Journalier*" (modelo com 4 parâmetros). Ambos os modelos apresentaram comportamento similar, mostrando-se insensíveis aos diferentes dados de evapotranspiração. Os autores concluíram que os valores de evapotranspiração não são muito sensíveis para a simulação de vazões dos modelos, principalmente quando os modelos são parcimoniosos. Os dados de chuva e de vazão podem trazer alguns problemas quando o modelo é utilizado.

Araújo (2005) aplicou o modelo conceitual GRJ4, desenvolvido por pesquisadores do CEMAGREF – Unidade de Pesquisa Hidrológica e Qualidade de Água na França para estimar a vazão diária, nas bacias hidrográficas de Caraúbas e Rio do Peixe, localizados no Cariri e sertão da Paraíba, destacando que o modelo apresenta resultados satisfatórios quando aplicado a regiões de clima semi-árido, como as do Cariri paraibano e ressalta que os resultados poderiam ter sido melhores, quanto a qualidade de dados de precipitação, evapotranspiração e vazão.

Carrielo (2004) analisando a variabilidade espaço-temporal da resposta hidrológica, para o período de 1970 a 2000, em oito grandes bacias hidrográficas brasileiras, destaca a influência do fenômeno ENOS na resposta hidrológica dessas bacias. Ele observou que na Amazônia central os anos com resposta hidrológica mais elevada que a climatologia foi: 1976-77; 1977-78; 1982-83; 1987-88; 1991-92 (anos de El Niño); 1978-79; 1981-82; 1996-97 (neutros); 1984-85 (La Niña); e os anos com respostas hidrológicas mais baixas foram: 1972-73 (El Niño); 1970-71; 1971-72; 1973-74; 1974-75; 1975-76; 1995-96 (La Niña) e 1998-99 (neutro). O autor observou ainda que na Bacia Amazônica, em períodos de El Niño, as sub-bacias do centro sul apresentam tendência a anomalias positivas, enquanto as sub-bacias do norte tendem a apresentar anomalias negativas de resposta hidrológica.

Cheng *et al.* (2002) observaram que em Taiwan o solo é permeável e os terrenos têm elevada declividade. Nessas condições, as altas taxas de precipitação geram importantes volumes de “runoff”. Isto se verifica porque, a capacidade de interceptação da copa e a quantidade requerida para recarregar o armazenamento de umidade na floresta são atingidas, principalmente quando a umidade antecedente é alta. Desse modo, as áreas florestadas comportam-se como se fossem áreas desflorestadas, pois grande quantidade de água atinge o solo já saturado. Assim, a vazão de pico ou pico de cheias são atenuadas. No estudo de Cheng *et al.* (2002), o papel da floresta em diminuir a geração de “runoff” é limitado por uma série de fatores, tais como solos rasos e permeáveis, elevada declividade e, principalmente, elevada precipitação, distribuída durante todo ano. Constatação também observada por McCulloch e Robinson (1993) quando ressaltaram que as florestas podem reduzir eventos pequenos de cheias, mas não eventos extremos de precipitação.



Chiew *et al.* (1993) descreveram a comparação de seis modelos chuva-vazão. Os modelos foram: Equação polinomial simples, equação de processo simples (tangente hiperbólica), análise de série temporal simples, modelo de série temporal complexo (IHACRES), modelo conceitual simples (SFB) e modelo conceitual complexo (MODHYDROLOG). Esses modelos foram aplicados em oito bacias hidrográficas na Austrália, com características físicas e climáticas diferentes, para simular fluxos diários, mensais e anuais. As equações simples (polinomial, tanh e Tsykin) foram mais fáceis de aplicar, e requerem menos experiência em hidrologia do que os outros três modelos, que exigem do modelador mais conhecimentos dos processos chuva-vazão. O modelo conceitual complexo apresentou estimativas de fluxos diários melhores para bacias de clima úmido, quando comparadas com as estimativas de outros modelos. Modelos conceituais simples e modelos de série temporais forneceram estimativas satisfatórias de fluxos mensais e anuais em bacias de clima úmido. Por ser mais fáceis de serem aplicados do que os modelos complexos, os métodos simples podem ser usados para estimar a produção mensal e anual de água em bacias hidrográficas de clima úmido.

Galvencio *et al.* (2002), simularam a vazão mensal na bacia hidrográfica do alto São Francisco, por meio de dois modelos estocásticos: auto regressivo (AR) e médias móveis (MA) de ordem 1, no período de 1978 a 1983. Os autores observaram que o modelo MA não representou bem os valores extremos para algumas estações, já o modelo AR representou bem os valores extremos e as vazões mensais; porém não gerou de forma adequada os valores intermediários de vazões. Em ambos os modelos a persistência da série histórica foi preservada.

Mendes *et al.* (2004) aplicaram duas técnicas estatísticas para simular “runoff” em diferentes escalas temporais na Bacia do Rio Xallas no noroeste da Espanha. Para simulação de “runoff” em escala mensal usou a modelagem de Box e Jenkins (1976) por meio de quatro modelos estocásticos do tipo ARIMA e em escala diária usou o modelo de Box e Jenkins e Rede Neurais Artificiais. Eles verificaram que os modelos lineares Box e Jenkins são métodos apropriados para estudar o comportamento de variáveis hidrológicas com grandes séries observadas, tais como chuva ou vazões mensais. Porém não se obtêm bons resultados quando se tem séries curtas de dados. Os modelos de Redes Neurais são capazes de modelar a complexa relação envolvida no processo chuva-vazão, embora não sejam satisfatórios para detectar picos de vazões, mas seus resultados são muito promissores, principalmente porque refletem possíveis mudanças no ambiente da bacia.

Mine (1984) ressalta que modelos estocásticos do tipo ARIMA têm apresentado resultados satisfatórios em bacias de grandes dimensões, com baixa declividade, e com baixa variabilidade temporal do hidrograma de cheia. Esses modelos apresentam a vantagem de utilizar apenas informações do próprio local de interesse, por outro lado informações apenas do próprio local tende à respostas defasadas nas elevações dos hidrogramas.

Mine e Tucci (1999) utilizaram a combinação de um modelo empírico de concepção estocástica, para prever vazões diretamente afluente a um lago, denominado modelo estocástica ARIMA e um modelo determinístico chuva-vazão, denominado IPH-II, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para a previsão de vazões afluentes a estação Usina Foz de Areia, no rio Iguaçu/PR. Segundo os autores os resultados podem ser considerados bons, mas destacam

alguns resultados insatisfatórios, e seguida concluem que os resultados poderiam ter sido melhores, caso a modelagem determinística tivesse sido aplicada a toda a bacia hidrográfica a montante da secção da barragem.

Niel *et al.* (2003) aplicaram o modelo concentrado GR2M em bacias da África Oeste e Central, para simular a descarga mensal usando estimativas da precipitação média da bacia. Eles perceberam que os parâmetros permaneceram estáveis mesmo diante de grandes mudanças climáticas. Para os autores a superioridade prática dos modelos distribuídos e semi-distribuídos, que levam em conta a variabilidade espacial e temporal da série, sobre os modelos concentrados, para a simulação de vazões não foi claramente evidenciada.

Perrin *et al.* (2003), discutem a melhoria na aplicação de modelos hidrológicos, e destaca dois problemas iniciais: estrutura do modelo e o conjunto de funções matemáticas aplicadas, para eles ambos devem representar o comportamento da bacia e o nível de complexidade na estrutura do modelo para garantir o melhor resultado. Perin *et al.* (2001), define muito bem a estrutura dos modelos (robustez, versatilidade e etc.) e afirmam que a qualidade da metodologia dos modelos chuva - vazão está ligada essencialmente a sua estrutura.

Rochelle *et al.* (1988) em seus estudos em bacias hidrográficas situadas no Nordeste dos Estados Unidos concluíram que não há correlação entre “runoff” anual e a área da bacia, tanto para períodos curtos quanto para períodos longos (acima de 30 anos de dados). As áreas das bacias variaram de 17.278,00 a 5,18 km<sup>2</sup> para o período de trinta anos de dados e de 17.278 a 0,52 km<sup>2</sup> para períodos mais curtos.

Vandewiele *et al.* (1994) aplicaram quatro tipos de modelos com diferentes dados de entrada: precipitação e evapotranspiração potencial (ETP); precipitação, temperatura e umidade relativa do ar; precipitação e temperatura e apenas precipitação, em 91 bacias, sendo 85 na Bélgica e 6 na China, de portes pequeno e médio (até 5000 km<sup>2</sup>), todas de clima úmido. O autor demonstra que esses modelos são de ótima qualidade, especialmente para explicar a sazonalidade do “runoff”. Segundo o autor, as vantagens dos modelos é que eles são parcimoniosos com respeito ao número dos parâmetros usados. A conclusão mais importante é que a ETP, a temperatura do ar e a umidade relativa do ar não são realmente necessárias para estimar o “runoff”, quando se fizer uso desses modelos, desde que mais parâmetros sejam usados e a parametrização seja eficiente. Essa conclusão é particularmente importante para regiões em que os dados não estão disponíveis. Por outro lado, (Vandewiele *et al.* 1991) destacaram que os modelos que usam dados de ETP como umas de suas entradas, são mais apropriados para estudos de regionalização geográfica, ou seja, quando os valores dos parâmetros do modelo dependem das características físicas das bacias.

Xiong e Guo (1999) desenvolveram um modelo mensal de dois parâmetros para simular vazões em 70 sub-bacias no sul da China e compararam seus resultados com os resultados de um modelo de quatro parâmetros de Guo (1992, 1995) aplicado em oito dessas 70 sub-bacias. Os autores obtiveram bons resultados segundo os termos do critério de eficiência de Nash-Sutcliff e concluíram que o modelo de dois parâmetros, apesar de apresentar uma estrutura mais simples, simula muito bem as vazões mensais e pode ser aplicado a programas de planejamento de recursos hídricos e estudos de impactos climáticos em regiões úmidas e semi-úmidas.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 - Local de estudo e características gerais da bacia hidrográfica do Xingu**

A bacia hidrográfica do Xingu, Figura 10, possui área de 531.250 km<sup>2</sup>, sendo que 216.823 km<sup>2</sup> (40,8%) pertencem ao estado do Mato Grosso, onde está localizada a nascente do rio principal, o Xingu, na serra do Roncador. A área restante 59,2% pertence ao estado do Pará, que ocupa uma área de aproximadamente 314.427 km<sup>2</sup>, correspondente a 25,1% da área do estado. Na bacia do Xingu estão localizados os municípios de Altamira, São Félix do Xingu, Senador José Porfírio, Vitória do Xingu, Brasil Novo, parte de Medicilândia, Placas e a parte oeste do município de Anapú. A rede de drenagem é quase paralela entre a maioria dos afluentes e corre no sentido da declividade geral da bacia. Os principais cursos d'água formadores dessa bacia, no Pará são os rios Xingu, Irirí, Curuá, Fresco, Bacajá, Caeté, Ximxim e Chiche.

O baixo Xingu é o trecho compreendido entre Belo Monte e sua foz, na margem direita do rio Amazonas. Sua declividade é baixa, provavelmente semelhante à do rio Amazonas. É um trecho fracamente navegável. O rio apresenta-se muito largo,

quase em forma de estuário, estreitando-se somente na sua foz, onde tem cerca de 7 km de largura. A influência da maré se faz sentir em praticamente todo o trecho (Melo, 2004).

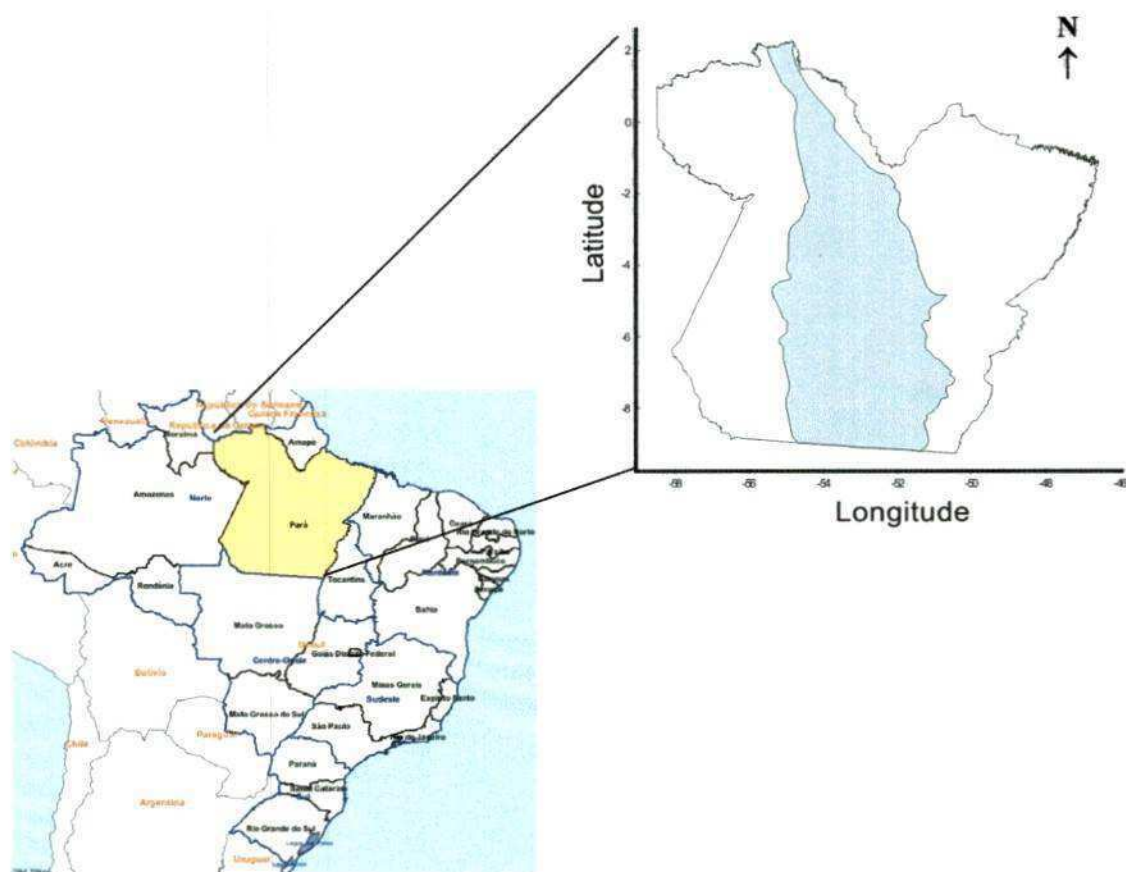


Figura 10. Localização Geográfica da Bacia Hidrográfica do Xingu/PA

O tipo climático da parte norte da bacia apresenta temperatura média mínima mensal superior a 18°C e amplitude térmica inferior a 5°C entre as médias do mês mais quente e do mês menos quente. A temperatura do ar é sempre elevada, com média térmica anual de 26°C e valores médios para a temperatura máxima de 31°C e para a mínima de 26,5°C. A umidade relativa do ar apresenta valores acima de 80% em quase todos os meses do ano (SECTAM, 2006).

Lucas *et al.* (2006) ao estudarem a regionalização e distribuição espacial e temporal da precipitação na bacia hidrográfica do Xingu verificaram que a precipitação varia de 1500 a 2500 mm ano<sup>-1</sup>, aproximadamente, sendo que nas partes norte e sudoeste da bacia, ocorrem as maiores magnitudes de chuvas, principalmente causadas pela atuação dos sistemas atmosféricos conhecidos como Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) respectivamente. A bacia em estudo apresenta três estações de chuvas distintas e bem definidas. A estação chuvosa, de dezembro a maio, a estação seca, de junho a setembro e uma de transição seca-chuva, em outubro e novembro.

Segundo estudos elaborados pela Eletronorte entre 1975 e 1980, a bacia hidrográfica do Xingu, tem um potencial hidrelétrico de 22 mil megawatts, um dos maiores do país. A Volta Grande do Xingu, uma queda d'água de 96 metros de altura, onde o rio quadruplica de largura e forma diversas cachoeiras e ilhas, concentra-se boa parte do potencial hidrelétrico do rio, tendo sido por isso o local escolhido para a construção da Usina Hidrelétrica de Belo Monte (Bermann, 2006).

Altamira, Anapú, Brasil Novo, Gurupá, Medicilândia, Pacajá, Placas, Porto de Moz, Senador José Porfírio, Uruará e Vitória do Xingu foram os municípios definidos pela Eletronorte como a área de abrangência de Belo Monte, locais que contam com Floresta de Terra Firme e Floresta de Várzea. Cerca de 250 mil pessoas vivem na região, que tem como elementos integradores a Transamazônica. Altamira é o maior centro urbano local, com cerca de 65 mil habitantes. Cacau, café, maracujá, pimenta, castanha, arroz e feijão estão entre os principais produtos agrícolas locais. Existem também algumas fazendas de gado, diversas populações ribeirinhas e comunidades indígenas que se sustentam,

basicamente, da pesca. Além da agropecuária e da pesca, a extração de madeira também é uma fonte de renda local. A extração predatória de madeira ocorre principalmente nos municípios de Altamira, Brasil Novo, Uruará e Senador José Porfírio (IBGE, 2006).

### 3.2 - Dados Utilizados

Para elaboração deste trabalho foram selecionadas nove estações com dados mensais de chuvas e vazões disponíveis, localizadas na bacia hidrográfica do Xingu (Figura 10) a partir de levantamentos do Inventário das Estações Fluviométricas e Pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA). Os dados consistidos de vazões e chuvas de cada estação estão disponíveis na página eletrônica da ANA (ANA, 2006), bem como informações sobre a área drenada pela estação fluviométrica, longitude, latitude, tipo de estação, conforme as Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Dados das estações fluviométricas da bacia hidrográfica do Xingu

Código	Nome	Latitude	Longitude	Área (Km <sup>2</sup> )	Período
18640000	ALDEIA BAU	-07°20'46''	-054°49'25''	5600	10/1981 à 12/1994
18850000	ALTAMIRA	-03°12'44''	-052°12'38''	446203	01/1975 à 12/2005
18200000	ARAPARI	-01°46'44''	-054°23'50''	17072	06/1972 à 12/2005
18520000	BELO HORIZONTE	-05°24'29''	-052°54'07''	277265	05/1976 à 12/1997
18500000	BOA ESPERANÇA	-06°43'09''	-051°46'58''	42275	09/1976 à 12/2002
18650000	CAJUEIRO	-05°39'14''	-054°31'16''	34693	01/1976 à 12/2002
18700000	PEDRA DO Ó	-04°32'30''	-054°00'03''	123827	09/1976 à 12/1992
18510000	SAO FELIX DO XINGU	-06°36'00''	-052°03'00''	250269	07/1975 à 12/1996
18250000	URUARA	-03°40'38''	-053°33'15''	2628	01/1978 à 12/2005



Tabela 3. Dados das estações Pluviométricas da bacia hidrográfica do Xingu

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
754000	ALDEIA DO BAU	-07°20'00"	-054°50'00"
352000	ALTAMIRA	-03°12'30"	-052°12'27"
154000	ARAPARI	-01°46'44"	-054°23'50"
552000	BELO HORIZONTE	-05°24'29"	-052°54'07"
651001	BOA ESPERANCA	-06°43'00"	-051°47'00"
554000	CAJUEIRO	-05°39'01"	-054°31'16"
454000	PRAIA (PEDRA DO Ó)	-04°48'46"	-054°40'06"
651000	SÃO FELIX DO XINGU	-06°36'00"	-052°03'00"
353000	URUARA	-03°40'38"	-053°33'15"

Os dados de temperaturas do ar médias mensais, para a estimativa da evapotranspiração potencial mensal, foram obtidos a partir de um conjunto de reanálises do *National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR), em grades de 2,5° x 2,5°, para o período de 1975 a 2005. Esses dados foram extraídos de arquivos binários utilizando aplicativo GRADS (Grid Analysis and Display System). Os dados gerados por este centro são oriundos essencialmente de análises e previsão. As análises são geradas a partir de assimilação de todas as variáveis observadas por sistemas convencionais e não convencionais (bóias, satélites, aviões, etc). Os dados são interpolados e ajustados de acordo com a físico-dinâmica do modelo utilizado, na qual as análises constituem-se em dados os mais próximos possíveis da realidade. Uma discussão e avaliação da qualidade desses dados foi feita por Kalnay et al. (1996) e por Kistler et al. (2001).

Os dados de vazões observadas nas estações fluviométricas apresentadas serão divididos em dois períodos para o desenvolvimento dos modelos propostos: um período com cerca de 80% dos dados iniciais no tamanho da série histórica, para ajuste, calibração, otimização dos parâmetros e simulação. O outro período, cerca de 20% dos dados finais da série será para o processo de verificação do desempenho do modelo.

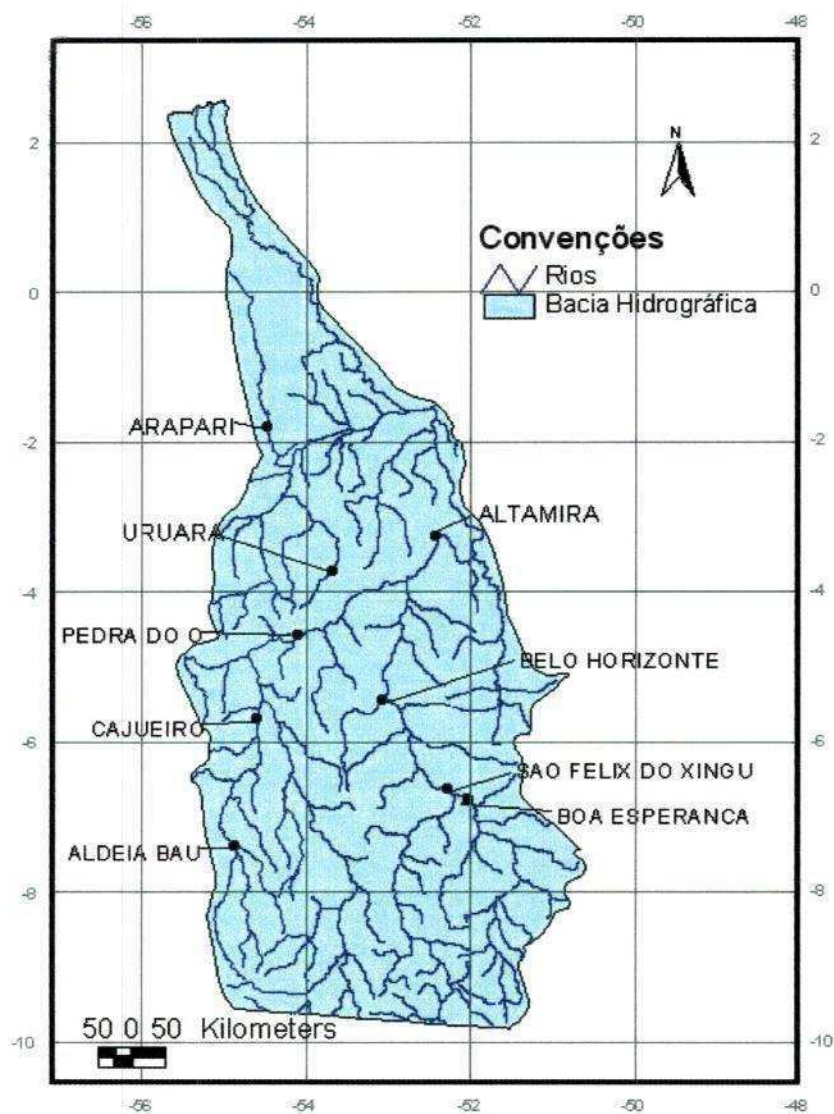


Figura 11. Localização das estações fluviométricas na bacia hidrográfica do Xingu/PA.

### 3.3 - Modelo hidrológico mensal determinístico de dois parâmetros

Neste trabalho foi utilizado o modelo hidrológico mensal determinístico de dois parâmetros desenvolvido por Xiong e Guo (1999) para simular as vazões mensais da bacia hidrográfica do Xingu. O uso desse modelo requer a estimativa da evapotranspiração mensal real da bacia hidrográfica.

#### 3.3.1 - Evapotranspiração real mensal do modelo

Há várias fórmulas usadas para estimar a evapotranspiração real. O modelo desenvolvido por Xiong e Guo (1999) sugere a equação de Ol'dekop (1911, citado por Brutsaert, 1992) para estimar a evapotranspiração real da bacia (Equação 7).

$$E(t) = EP(t) \times \tanh[P(t)/EP(t)] \quad (7)$$

Em que  $E(t)$  representa a evapotranspiração real,  $EP(t)$  a evaporação do tanque classe A,  $P(t)$  a precipitação e  $\tanh$  a função tangente hiperbólica.

Depois de muitos experimentos numéricos os autores do modelo mensal de dois parâmetros sugerem que equação acima seja multiplicada por um novo coeficiente “c” para estimar a evapotranspiração real mensal (Equação 8). Esse novo coeficiente  $c$  é o primeiro parâmetro do modelo.

$$E(t) = c \times EP(t) \times \tanh[P(t)/EP(t)] \quad (8)$$

Neste trabalho, com a ausência dos dados de evaporação do tanque na região da bacia hidrográfica do Xingu, a evaporação real mensal foi calculada com os dados de evapotranspiração potencial estimado pela equação de Thornthwaite e Mather (1955). Embora esta equação seja bastante utilizada, seu uso foi muito criticado por sua natureza empírica e deve ser utilizada segundo os autores para regiões onde a água disponível suficiente para manter a transpiração ativa.

### 3.3.2 - Calculo da vazão mensal

A vazão mensal  $Q$  é relacionado com a quantidade de água no solo  $S$ . Neste trabalho, a vazão  $Q$  também é assumida como uma função tangente hiperbólica da quantidade de água no solo  $S$  o qual é determinado pela Equação 9:

$$Q(t) = S(t) \times \tanh [S(t) / SC ] \quad (9)$$

Em que,  $Q(t)$  é a vazão mensal,  $S(t)$  quantidade de água no solo e  $SC$  é o segundo parâmetro utilizado no modelo, no qual é expresso em milímetros e representa a capacidade de campo da bacia. Segundo os autores do modelo este parâmetro está associado às características físicas e localização da bacia. Em regiões úmidas, com elevada precipitação os autores encontraram valores em torno de 1500 mm. Os parâmetros  $c$  e  $SC$  iniciais do modelo para as estações estudadas foram obtidos por otimização no período de calibração.

### 3.3.3 - Métodos numéricos do modelo

Dada à série de precipitação mensal  $P(t)$  e evapotranspiração real mensal  $E(t)$ , obtida pela Equação 8, a quantidade da água restante no solo será  $[S(t-1) + P(t) - E(t)]$ , com  $S(t-1)$  que é a quantidade de água no fim do mês  $(t-1)$  éximo e no começo do mês  $t$ -ésimo. A Equação (10) é usada então para calcular a vazão mensal  $Q(t)$   $t$ -ésimo como:

$$Q(t) = [S(t-1) + P(t) - E(t)] \times \tanh\left\{\frac{[S(t-1) + P(t) - E(t)]}{SC}\right\} \quad (10)$$

Finalmente, o índice de água no fim do  $t$ -ésimo mês, isto é  $S(t)$ , é calculado de acordo com a lei de conservação da água (Equação 11).

$$S(t) = S(t-1) + P(t) - E(t) - Q(t) \quad (11)$$

### 3.3.4 - Determinação da quantidade de água no solo inicial

A precisão do valor inicial da quantidade de água no solo  $S(0)$  normalmente tem pouco efeito no desempenho do modelo, especialmente quando são usadas séries de dados não muito longas e modelo em base mensal.

O valor de  $S(0)$  é assumido como segue, considerando que um ano seja um período razoável para o ciclo de algumas variáveis hidrológicas, o valor de  $S(0)$  não deve ser muito diferente, por exemplo, entre dezembro de um ano e dezembro do ano seguinte, ou seja,  $S(12)$  e  $S(24)$  e assim por diante. As equações 12 e 13 resumem os valores para  $S(0)$ .

Conseqüentemente, é razoável escolher  $S(0)$  como um valor médio da quantidade de água no solo  $S$ , considerando todos os meses do ano.

$$S(0) \approx \sum_{j=i}^m S(j \times 12) / m \quad (12)$$

$$m = N_C / 12 \quad (13)$$

Em que  $S(0)$  é a quantidade de água inicial no solo,  $m$  é o numero de anos da série de dados do período de calibração, e  $N_c$  é o período de calibração em meses. Preliminarmente, o modelo proposto sugere que a quantidade inicial de água no solo  $S(0)$  seja um valor entre 150 e 200 mm.

### 3.3.5 - Otimização dos parâmetros

A otimização dos parâmetros do modelo foi feita através dos critérios de Nash-Sutcliffe (1970) descritos a seguir. Os valores otimizados dos parâmetros  $c$  e  $SC$  foram efetuados em duas etapas: primeiro otimizou-se os valores de  $c$  e  $SC$  de acordo com o primeiro critério de Nash-Sutcliffe ( $C1_{NS}$ ), para obter bons resultados de volumes máximos derivados de vazões simuladas. Segundo foi otimizado o parâmetro  $SC$  de acordo com o segundo critério de Nash-Sutcliffe ( $C2_{NS}$ ), com o valor fixo de  $c$ , obtido no primeiro passo. Esse segundo passo da otimização pode ajudar na redução do efeito da inter-relação entre os dois valores dos parâmetros do modelo. Tendo em vista que o modelo hidrológico determinístico escolhido é extremamente parcimonioso, pois utiliza apenas dois parâmetros nas suas equações, foi possível aplicar ao modelo uma ferramenta do Excel, denominada

“Solver”, que utiliza o método conjugado ou método de Newton para calibrar os parâmetros  $c$  e  $SC$ .

### 3.4 - Modelos estocásticos ARIMA

Neste trabalho será também utilizado um modelo estocástico ARIMA “*Auto Regressive Integrated Moving Average*”, cuja metodologia foi desenvolvida por Box e Jenkins (1976), para simular a vazão mensal da bacia hidrográfica do Xingu.

Para aplicação dos modelos ARIMA, é preciso inicialmente a compreensão de alguns conceitos estatísticos, destacando a análise de séries temporais, função de autocorrelação (ACF) e função de autocorrelação parcial (PACF), descritas abaixo.

Séries temporais referem-se a conjuntos de observações de uma dada variável ordenada no tempo, podendo ser descrita por características básicas como tendência e sazonalidade, apresentado uma dependência serial entre as variáveis. As observações de uma série temporal  $Z_t$ , em que  $t = 1, 2, 3, \dots, n$ , podem ser decomposta da seguinte forma:

$$Z_t = T_t + S_t + a_t \quad (14)$$

Em que,  $T_t$  e  $S_t$  representam tendência e sazonalidade da série, respectivamente, e  $a_t$  é uma variável aleatória de média zero e variância constante.

A função de autocorrelação (ACF) mede o grau de dependência entre os valores de uma série temporal em diferentes períodos. Os valores dos coeficientes de autocorrelação medem ainda a memória do processo estocástico, ou seja, mede o quanto um valor

observado no tempo  $t$  é influenciado pelo valor observado no tempo  $t-k$ . A função de autocorrelação ( $\rho_k$ ) de uma série estacionária é definida como:

$$\rho_k = \frac{\sum_{t=k+1}^T (y_t - \bar{\mu}_z)(y_{t+k} - \bar{\mu}_z)}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{\mu})^2} \quad (15)$$

Em que  $t$  é o tempo inicial,  $T$  o tempo final,  $k$  é um incremento no tempo,  $Y_t$  a vazão no tempo  $t$  e  $\bar{\mu}$  a média da série.

A função de autocorrelação parcial (PACF) pode ser definida como a seqüência de correlações de uma série temporal ( $Z_t$  e  $Z_{t-1}$ ), ( $Z_t$  e  $Z_{t-2}$ ), ( $Z_t$  e  $Z_{t-3}$ ) e assim por diante, com os efeitos de defasagens anteriores sobre  $Z_t$  constantes. A função de autocorrelação parcial ( $\phi_{kk}$ ) é aplicada aos resíduos da série, definida como:

$$\phi_{kk} = \frac{\sum_{t=k+1}^T E[(y_t - \bar{\mu}_z)(y_{t+k} - \bar{\mu}_z)]}{\sum_{t=1}^T E(y_t - \bar{\mu})^2} \quad (16)$$

O modelo estocástico de série temporal ARIMA é uma generalização dos modelos: autoregressivo (AR) e médias-móveis (MA), definidos como segue:

$$Z_t = \phi_1 z_{t-1} + \dots + \phi_p z_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (17)$$

Ou, ainda:



$$(1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p) z_t = (1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q) \varepsilon_t \quad (18)$$

Em que B é o operador de defasagem ( $Bz_t = z_{t-1}$ ),  $\phi$  e  $\theta$  são os parâmetros do modelo e  $\varepsilon_t$  o termo do erro (resíduos). O termo  $\phi$  representa a parte autoregressiva do modelo e o termo  $\theta$  a parte médias móveis. Como as séries temporais apresentam componentes sazonais e não sazonais o modelo ARIMA pode ser escrito da seguinte forma:

$$(1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p)(1 - \Phi_1 B^S - \dots - \Phi_{PS} B^{PS}) z_t = (1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q)(1 - \Theta_1 B^S - \dots - \Theta_{QS} B^{QS}) \varepsilon_t \quad (19)$$

Em que,  $\Phi$  e  $\Theta$  são parâmetros do modelo sazonal.

Diante de uma série temporal sazonal não-estacionária, para que um modelo ARIMA seja empregado é necessário remover a sazonalidade da série e transformá-la em uma série estacionaria efetuando uma diferenciação sazonal. Contudo, às vezes, faz-se necessário, para aplicação do modelo, mais de uma diferenciação na série, a fim de atender os requisitos do modelo. Portanto, toma-se uma diferenciação na parte simples e na parte sazonal. Como as séries temporais apresentam componentes sazonais e não sazonais o modelo ARIMA pode ser escrito da seguinte forma:

$$\phi(B)\Phi(B^S)(1-B)^d(1-B)^D z_t = \theta(B)\Theta(B^S)\varepsilon_t \quad (20)$$

Em que,  $\phi(B) = (1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p)$ ;  $\Phi(B^S) = (1 - \Phi_1 B^S - \dots - \Phi_{PS} B^{PS})$ ;  $\theta(B) = (1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q)$ ;  $\Theta(B^S) = (1 - \Theta_1 B^S - \dots - \Theta_{QS} B^{QS})$ .

As diferenciações simples e sazonais podem ser realizadas conforme as equações abaixo:

$$\Delta^d z = z_t - z_{t-1} \text{ (diferença simples)} \quad (21)$$

$$\Delta^D z = z_t - z_{t-s} \text{ (diferença sazonal)} \quad (22)$$

Para aplicação de modelos dos tipos AR e MA à uma série temporal, deve-se atender o requisito de estacionariedade nessa série, ou seja, média, variância e autocorrelação constantes. Essa estacionariedade da série pode ser analisada através dos gráficos de autocorrelograma ACF e PACF. Os modelos supracitados incluem os termos de defasagem autoregressiva AR(p) e de médias móveis MA(q). Dada a necessidade de tomar diferenças na série, o modelo é dito autoregressivo integrado de médias móveis – ARIMA (p, d, q). Para uma série temporal que apresenta sazonalidade o modelo ARIMA é do tipo (p, d, q) (P, D, Q) para as partes simples e sazonais, respectivamente.

Uma metodologia empregada para atender os requisitos para aplicação do modelo estocástico ARIMA, é transformar a série de dados em uma distribuição normal. Este processo pode ser obtido através da transformação Box-Cox, (Box e Cox, 1964). A transformação de Box-Cox é definida como:

$$T(X) = (X^\lambda - 1) / \lambda \quad (23)$$

Em que, X é a variável a ser transformada e  $\lambda$  é o parâmetro transformador.

O modelo original de Box e Jenkins envolve três estágios iterativos para seleção do modelo: (i) identificação do modelo; (ii) estimação do modelo e (iii) verificação de diagnósticos. A fase de identificação do modelo é a mais delicada do processo. Nessa fase se faz uma análise inicial da série e uma análise das funções de autocorrelação ACF e autocorrelação parcial PACF para identificar a ordem dos termos (p, d, q) e (P, D, Q). Outro ponto que deve ser analisado nessa etapa é a quantidade de parâmetros, pois quanto mais parâmetros utilizados no modelo mais erros poderão ser incorporados no processo. Com base no Princípio da Parcimônia, deve-se tentar ajustar a parte autoregressiva (AR) e das médias móveis (MA) do modelo, com o menor número de ordens possível, portanto, deve-se evitar ajustar mais que duas ordens em ambas as partes do modelo.

Feita a análise da série e identificado o tipo de modelo ARIMA a ser usado, o próximo passo é a fase de estimativa dos parâmetros. Na modelagem ARIMA essa estimativa é feita por meio da função de máxima verossimilhança. A última fase é a da verificação do diagnóstico, que é feita através do termo do erro (resíduo), que deve constituir um processo de ruído branco, ou seja, apresentar uma distribuição normal com média zero e variância constante e sem correlação serial entre eles. Neste trabalho foi aplicado o teste de Ljung e Box (1978) nos resíduos para verificar se são aleatórios ao nível de confiança de 95 %. Teste é definido como:

$$P_{LB} = n(n+2) \sum_{j=1}^h \frac{r^2(j)}{n-j} \quad (24)$$

Em que, n é o tamanho da amostra, r (j) é a autocorrelação no lag j e j o lag a ser testado.

A análise dos resíduos é importante para verificar se o modelo consegue capturar a dinâmica da série temporal em estudo. Feito os três processos com sucesso a previsão pode ser feita, caso contrário deve-se começar o ciclo novamente.

### 3.5 - Calibração e verificação dos modelos

Para calibração e verificação dos modelos aplicados neste trabalho foram utilizados três critérios para mensurar o desempenho do modelo. O primeiro critério utilizado foi o critério de eficiência de Nash-Sutcliffe (1970) que é definido pelas Equações de 25 a 28, calculado em função do erro quadrático do volume de vazão observado e simulado pelos modelos aplicados.

$$CI_{NS} = \frac{F_o - F}{F_o} \times 100\% \quad (25)$$

$$F_o = \sum_i (Q_i - \bar{Q}_c)^2 \quad (26)$$

$$F = \sum_i (Q_i - \hat{Q}_i)^2 \quad (27)$$

$$\bar{Q}_c = \left( \sum_{i=1}^{N_c} Q_i \right) / N_c \quad (28)$$

Em que  $Q_i$  é a vazão observada,  $\hat{Q}_i$  é a vazão simulada e  $\bar{Q}$  é a vazão média da série observada. O valor esperado de  $C1_{NS}$  no modelo é sempre próximo de 100%, para uma boa simulação da série de vazão observada.

O segundo critério é a estimativa do erro relativo entre as séries de vazões observadas e simuladas. O valor de  $C2_{NS}$  é esperado ser próximo de zero para uma boa simulação das vazões observadas. Esse critério é definido pela equação 29.

$$C2_{NS} = \frac{\sum (Q_i - \hat{Q}_i)}{\sum Q_i} \times 100\% \quad (29)$$

O terceiro critério ( $C3_{NS}$ ) é aplicado para estimar o erro relativo entre a vazão máxima mensal observada e a vazão máxima mensal simulada, sendo definido pela Equação 30.

$$C3_{NS} = \frac{(Q_m - \hat{Q}_m)}{Q_m} \times 100\% \quad (30)$$

Em que  $Q_m$  e  $\hat{Q}_m$  representam as vazões máximas mensais observadas e simuladas, respectivamente.

### 3.6 - Influências do fenômeno ENOS na vazão observada

Com base nos dados de vazões, precipitações e área de drenagem de cada estação fluviométrica estimou-se a resposta hidrológica anual em cada uma das estações. Aqui o objetivo é o de analisar a influencia dos fenômenos ENOS nas vazões observadas na bacia

hidrográfica do Xingu por meio da resposta hidrológica de cada estação. A resposta hidrológica pode ser definida de acordo com as equações 31 e 32.

$$RH = \frac{R}{P} \quad (31)$$

$$R = \frac{Q}{A} \quad (32)$$

Em que, RH é a resposta hidrológica (adimensional), R é o runoff e P é a precipitação, ambos em mm.

A influência do fenômeno ENOS na vazão nas estações da bacia hidrográfica do Xingu será observada pelos padrões de resposta hidrológica durante o período estudado, verificando onde ocorre resposta hidrológica acima (abaixo) da média observada, ou seja, anomalias positivas (negativas) de resposta hidrológica para as estações em estudo.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os resultados neste trabalho serão divididos em 2 seções: Primeiro serão apresentados os resultados do modelo hidrológico determinístico de dois parâmetros desenvolvido por Xiong e Guo (1999) e do modelo estocástico ARIMA, e em seguida a influência dos fenômenos ENOS na vazão mensal observada, utilizando a equação da resposta hidrológica para as localidades em estudo no âmbito da bacia hidrográfica do Xingu.

### **4.1 - Resultados dos modelos hidrológicos**

Serão apresentadas a seguir as características dos parâmetros dos modelos e os resultados da aplicação do critério de Nash Sutcliffe para as vazões simuladas pelo modelo determinístico no período de calibração. Também, será apresentada a comparação entre os resultados obtidos pelos modelos determinístico e estocástico e seus respectivos testes de desempenho no período de verificação.

#### 4.1.1 - Modelo determinístico de dois parâmetros

O modelo hidrológico determinístico mensal de dois parâmetros foi aplicado para simular as vazões mensais das estações da bacia hidrográfica do Xingu, para o período de calibração e verificação, utilizando dados mensais observados de precipitação e evapotranspiração potencial e valores médios mensais dessas séries. Para fins de apresentação dos resultados, os modelos foram denominados de modelo determinístico\* e modelo determinístico\*\*, respectivamente. Na metodologia sugerida os parâmetros  $c$  e  $SC$  foram calibrados de acordo com os critérios  $C1_{NS}$  e  $C2_{NS}$  de Nash-Sutcliffe (1970). Os resultados estão descritos na Tabela 4, bem como informações do período de calibração, valor inicial da quantidade de água no solo  $S(0)$ , dados médios anuais de vazão ( $Q$ ), precipitação ( $P$ ) e evapotranspiração potencial (ETP).

Foram estimados dados de evapotranspiração real do modelo, de acordo com a equação 7, com dados de evaporação do tanque classe A e com dados de evapotranspiração potencial (ETP) estimado pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), para estação representativa de Altamira, onde havia dados disponíveis do tanque de 2001 a 2005, no qual apresentou boa correlação entre as estimativas (Figura 12). Com base neste resultado, foi utilizado valores de ETP, para estimar a evapotranspiração real mensal “ $E(t)$ ” do modelo determinístico, em todas as estações estudadas.



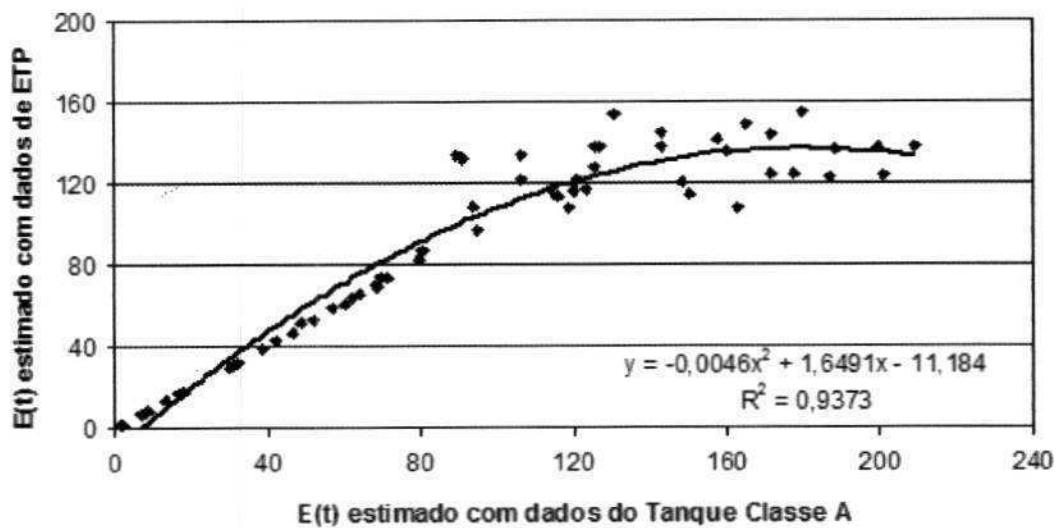


Figura 12. Correlação entre a evapotranspiração real mensal estimada com dados do tanque classe A e com valores de evapotranspiração potencial, em Altamira no período de 2001 a 2005

Pode ser visto na Tabela 4 que, na calibração do modelo, o parâmetro  $c$  foi maior que um para todas as estações, ou seja, o modelo determinístico tende a subestimar a evapotranspiração real, exceto para Aldeia Baú, com  $c = 0,75$ . O parâmetro  $SC$  variou entre 1600 mm e 2100 mm e a quantidade de água inicial no solo  $S(0)$ , variou de 150 a 175, conforme recomendado pelos autores do modelo. Nos resultados do modelo determinístico\*, os valores de  $C1_{NS}$ , variam entre 26,58% e 71,21%, para Aldeia Baú e Cajueiro respectivamente. Destacam-se aqui as estações de Boa Esperança, Cajueiro e Uruara que apresentam valores de  $C1_{NS}$  superiores a 50%. Nas outras estações, os valores de  $C1_{NS}$  ficaram abaixo de 50%, com valores elevados de  $C2_{NS}$ , 31,66% e -23,99 nas estações de Aldeia Baú e Arapari, respectivamente.

Nos resultados do modelo determinístico\*\*, em todas as estações estudadas, os valores de  $C1_{NS}$  ficaram mais próximos do valor ideal, comparados aos do modelo determinístico\*, exceto para Uruara, com valores de  $C1_{NS}$  de 59,42% para o modelo

determinístico\* e 48,31% para o determinístico\*\*. Aldeia Baú e Arapari, não apresentaram melhorias importantes para o valor de  $C1_{NS}$ , quando se utilizou os dados médios das séries. O valor de  $C2_{NS} = 29,80\%$  permaneceu alto para Aldeia Baú. Na estação Pedra do Ô, apesar de o valor de  $C1_{NS}$  ter melhorado consideravelmente, passando de 31,11% para 78,56% no modelo determinístico\*\*, o erro relativo  $C2_{NS}$  apresentou valor alto, 25,11%.

De modo geral, o uso de valores médios das séries de precipitação e evapotranspiração potencial nas equações do modelo hidrológico durante o período de calibração ensejaram melhorias importantes nos valores dos critérios  $C1_{NS}$  e  $C2_{NS}$  de Nash-Sutcliffe para localidades estudadas na bacia hidrográfica do Xingu. Durante o período de calibração do modelo hidrológico determinístico, verificou-se que pequenas variações nos valores do parâmetro SC não provocam grande influência nos resultados dos critérios  $C1_{NS}$  e  $C2_{NS}$  de Nash-Sutcliffe, isto se justifica principalmente devido a magnitude do valor do parâmetro. O mesmo não foi verificado com relação ao parâmetro c do modelo.

Tabela 4. Dados médios anuais, vazão (Q), precipitação (P) e evapotranspiração potencial (ETP) observados no âmbito da bacia hidrográfica do Xingu e os resultados da calibração do modelo determinístico

	Q (m <sup>3</sup> /s)	P (mm)	ETP (mm)	Calibração (Anos)	c	SC	S(0)	Determinístico*				Determinístico**	
								C1 <sub>NS</sub> (%)	C2 <sub>NS</sub> (%)	C1 <sub>NS</sub> (%)	C2 <sub>NS</sub> (%)	C1 <sub>NS</sub> (%)	C2 <sub>NS</sub> (%)
Aldeia Baú	459	2616	1450	1981 - 1992	0,75	1600	150	26,58	31,66	47,02	29,80		
Altamira	7912	2005	1655	1975 - 2000	1,383	1800	150	40,71	-1,23	72,90	4,09		
Arapari	120	1684	1350	1972 - 1999	1,536	2000	150	43,04	-23,93	44,40	-0,01		
Belo Horizonte	5273	1837	1412	1976 - 1974	1,249	2100	175	40,17	-12,82	83,55	-0,18		
Boa Esperança	866	1968	1467	1976 - 1998	1,259	2000	175	55,51	-6,75	73,48	0,001		
Cajueiro	825	1934	1391	1976 - 1998	1,143	1800	150	71,21	-7,19	78,51	-0,08		
Pedra do Ô	2762	1872	1403	1976 - 1990	1,173	1700	175	31,11	-14,76	78,56	25,11		
São Felix do Xingu	4675	1982	1407	1975 - 1992	1,357	1700	175	33,74	-9,72	86,35	0,20		
Uruara	34	1721	1375	1978 - 2001	1,324	2000	150	59,42	-0,40	48,31	0,01		

\*Calibração do modelo determinístico com dados observados, \*\* Calibração do modelo determinístico com dados médios das séries de P e

ETP

## 4.1.2 - Modelo Estocástico ARIMA

Os passos seguidos na aplicação do modelo estocástico ARIMA foram: 1) análise visual da série, 2) análise das funções ACF e PACF para identificação das ordens dos termos do modelo, e 3) análise dos resíduos, ilustrados no Anexo A, para todas as estações em estudo. Os valores de  $\lambda$  da Equação 19 e as ordens dos termos (p, d, q) (P, D, Q), para as partes simples e sazonais do modelo ARIMA, para os postos em estudo estão expostos na Tabela 5.

Tabela 5. Valores de  $\lambda$  e ordens dos termos para o modelo estocástico ARIMA

	$\lambda$	(p, d, q)	(P, D, Q)
Aldeia Baú	0,0401	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Altamira	0,0199	(2, 2, 2)	(1, 1, 1)
Arapari	0,1523	(2, 2, 2)	(1, 1, 1)
Belo Horizonte	-0,0689	(2, 2, 2)	(1, 1, 1)
Boa Esperança	0,2060	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Cajueiro	0,1227	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Pedra do Ô	0,1194	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
São Felix do Xingu	-0,0336	(2, 2, 2)	(1, 1, 1)
Uruara	0,1554	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)

Após a análise das funções ACF e PACF, para cada uma das estações em estudos, pode ser visto na Tabela 5 que não foram necessário mais do que duas diferenças nos termos AR e MA, para a parte simples do modelo, e apenas uma diferença para a parte sazonal, em todas as estações. Nesse sentido, a modelagem atende o princípio da parcimônia na aplicação do modelo estocástico ARIMA.

A Tabela 6 exibe os parâmetros do modelo autoregressivo (AR) e de média moveis (MA) de ordem um e dois para as partes simples e autoregressivo (SAR) e de médias moveis (SMA) de ordens um, para a parte sazonal da modelagem na bacia em estudo.

Tabela 6. Parâmetros do modelo estocástico ARIMA

	AR1	AR2	MA1	MA2	SAR	SMA
Aldeia Baú	0,3888	-	-0,8166	-	0,0115	-0,9550
Altamira	0,6036	-0,2045	-1,7554	0,7555	0,0026	-0,9474
Arapari	0,7432	0,1102	-1,9539	0,9544	0,006	-0,9484
Belo Horizonte	0,6672	-0,1987	-1,8714	0,8715	0,0260	-0,9268
Boa Esperança	0,6112	-	-1,0000	-	0,1260	-0,9999
Cajueiro	0,7159	-	-1,0000	-	-0,0388	-0,9179
Pedra do Ó	0,7290	-	-0,9654	-	-0,1321	-1,0000
São Felix do Xingu	0,6652	-0,1759	-1,8776	0,8776	0,0365	-0,474
Uruara	0,8282	-	-1,0000	-	-0,0210	-1,0000

As estações de Altamira, Arapari, Belo Horizonte e São Felix do Xingu, apresentaram dependência na série temporal de ordem dois para o termo autoregressivo simples do modelo, ou seja, a vazão simulada pelo modelo, responde melhor à vazão com dois meses de defasagem, já nas estações de Aldeia Baú, Boa Esperança, Cajueiro, Pedra do Ó e Uruara, a vazão simulada responde melhor à vazão do mês anterior (um mês de defasagem), visto que apresentou dependência de ordem um no termo autoregressivo simples do modelo. Na parte sazonal do modelo, todas as estações apresentaram dependência de ordem um no termo autoregressivo sazonal. O teste de Ljung-Box foi efetuado para todas as localidades estudadas. Como resultado, verificou-se que todos os resíduos das séries do modelo ARIMA são aleatórios ao nível de significância de 5%.

#### 4.1.3 - Comparação dos modelos

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados das aplicações dos modelos hidrológicos: determinístico de dois parâmetros e estocástico ARIMA, para simulação de vazões mensais nas estações estudadas. Vale salientar que no período de verificação do modelo foi usado 20% da série de dados. A Tabela 7 exibe os valores dos critérios de eficiência de Nash-Sutcliffe, escolhido para avaliar o desempenho dos modelos. Os hidrogramas e hietogramas de cada estação; os diagramas de dispersão entre as vazões observadas e simuladas pelos modelos são apresentados nas Figuras de 13 a 30.

O modelo determinístico\*\* utilizando valores médios de precipitação e evapotranspiração potencial da série de cada estação apresentou os melhores resultados para os critérios de Nash-Sutcliffe, no período de verificação do modelo, quando comparado com os resultados do modelo determinístico\*, exceto para a estação de Aldeia Baú (Tabela 7). Nessa estação, o modelo determinístico\*\* subestimou consideravelmente as vazões simuladas no período chuvoso, conforme mostra as Figuras 13 e 14.

As estações de Altamira, Arapari, Boa Esperança, Cajueiro e São Felix do Xingu, apresentaram resultados satisfatórios para as simulações das vazões mensais com os modelos determinístico e estocástico (Figuras 15, 17, 21, 23 e 27). Pode ser visto nas Figuras 16, 18, 22, 24 e 28 que, de um modo geral, nessas estações, as retas de regressão linear, para os três modelos aplicados, se aproximaram do ajuste ideal. Os valores dos coeficientes de determinação são melhores para o modelo estocástico ARIMA em todas as estações supracitadas. Nas estações estudadas o modelo determinístico\*, superestimou as

vazões mensais apenas nos meses em que ocorreram eventos extremos de precipitação (Figuras 15, 17, 21, 23 e 27).

Na estação de Belo Horizonte, os resultados de  $C1_{NS}$ ,  $C2_{NS}$  e  $C3_{NS}$ , foram considerados insatisfatórios, para o modelo determinístico usando a série de dados observados de precipitação e evapotranspiração potencial (Tabela 7). De acordo com a Figura 20, o modelo determinístico\* superestimou as vazões, mas o modelo determinístico\*\* apresentou melhorias consideráveis. O melhor ajuste na reta de regressão linear verificou-se para o modelo estocástico ARIMA. O modelo determinístico\* subestima as vazões de janeiro a abril no primeiro ano de simulação, superestima nos meses de abril e maio do segundo ano de simulação e no último ano de simulação superestima as vazões nos meses de janeiro a março (Figura 19).

Os resultados obtidos pelos critérios de Nash-Sutcliffe, para avaliação do desempenho do modelo no período de verificação, foram considerados muito satisfatórios para a estação de Pedra do Ó, nos três modelos avaliados. A Figura 26 mostra que as retas de regressão linear se aproximaram do ajuste ideal nos três modelos, sobreestimando um pouco os resultados apenas no modelo determinístico\*. Analisando os resultados das aplicações dos modelos para Pedra do Ó, (Figura 25), pode ser notado que as vazões simuladas se aproximaram bastante das observadas. O modelo determinístico\* superestima a vazão no mês de março no primeiro ano de verificação e subestima os meses de março e abril do ano seguinte.

Na estação de Uruara, conforme visto na Tabela 7, os resultados dos critérios de Nash-Sutcliffe, para avaliação do desempenho do modelo no período de verificação, não

foram satisfatórios para o modelo determinístico\* e determinístico\*\*. De modo geral, os modelos acima subestimaram as vazões mensais, de acordo com os gráficos de dispersão e reta de regressão linear, mostrados na Figura 30. Apenas os resultados obtidos pelo modelo estocástico ARIMA foram mais satisfatórios.

De modo geral, o modelo estocástico ARIMA foi o que melhor simulou as vazões mensais observadas em todas as estações da bacia hidrográfica do Xingu. Também foi o modelo que apresentou os melhores resultados para os critérios de Nash-Sutcliffe, para avaliar o desempenho dos modelos no período de verificação; destacando-se as estações de Altamira, Belo Horizonte, Cajueiro, Pedra do Ô e São Felix do Xingu, conforme a Tabela 7.

Um fato importante a ser observado neste estudo é que, para meses com eventos extremos de precipitação, em todas as estações da bacia hidrográfica do Xingu, o modelo determinístico superestima os valores das vazões quando usa dados observados de precipitação, e de evapotranspiração potencial. Já quando se usa dados médios das séries no modelo determinístico, os resultados da simulação das vazões mensais tendem para subestimativa. Em geral, todos os modelos estudados simularam muito bem as vazões mensais observadas em todas as estações da bacia durante o período seco.

O modelo determinístico de dois parâmetros desenvolvido por Xiong e Guo (1999) é bastante sensível a mudanças bruscas da precipitação. Valores extremos de precipitação influenciam fortemente o armazenamento de água no solo do modelo, afetando conseqüentemente os resultados da simulação das vazões mensais para as estações da bacia hidrográfica estudada.



Tabela 7. Resultados dos critérios de Nash-Sutcliffe, na avaliação de desempenho dos modelos

	DETERMINÍSTICO*			DETERMINÍSTICO**			ARIMA		
	C1 <sub>NS</sub> (%)	C2 <sub>NS</sub> (%)	C3 <sub>NS</sub> (%)	C1 <sub>NS</sub> (%)	C2 <sub>NS</sub> (%)	C3 <sub>NS</sub> (%)	C1 <sub>NS</sub> (%)	C2 <sub>NS</sub> (%)	C3 <sub>NS</sub> (%)
Aldeia Baú	69,54	-12,40	7,57	55,55	33,99	51,52	78,73	-12,52	-3,40
Altamira	50,72	-18,94	-7,25	73,19	-10,62	18,33	90,52	3,00	-7,23
Arapari	60,66	-17,60	-10,84	78,01	15,57	36,18	83,56	-0,44	-10,03
Belo Horizonte	23,37	-12,51	-89,63	81,98	-1,28	-9,06	95,01	1,78	3,92
Boa Esperança	61,03	-30,03	-15,60	67,22	11,73	36,00	87,73	1,64	11,95
Cajueiro	60,69	-27,03	-25,14	77,57	-18,50	9,06	93,73	3,23	13,34
Pedra do Ô	79,49	1,96	-23,25	86,27	-10,75	1,62	95,64	5,94	-3,93
São Felix do Xingu	58,14	-7,03	-45,42	88,23	0,54	1,56	94,90	0,16	1,83
Uruara	46,45	18,64	21,30	53,61	22,07	35,63	86,49	8,05	-4,18

\*Verificação do modelo determinístico com dados observados, \*\* Verificação do modelo determinístico com dados médios das séries de P e ETP

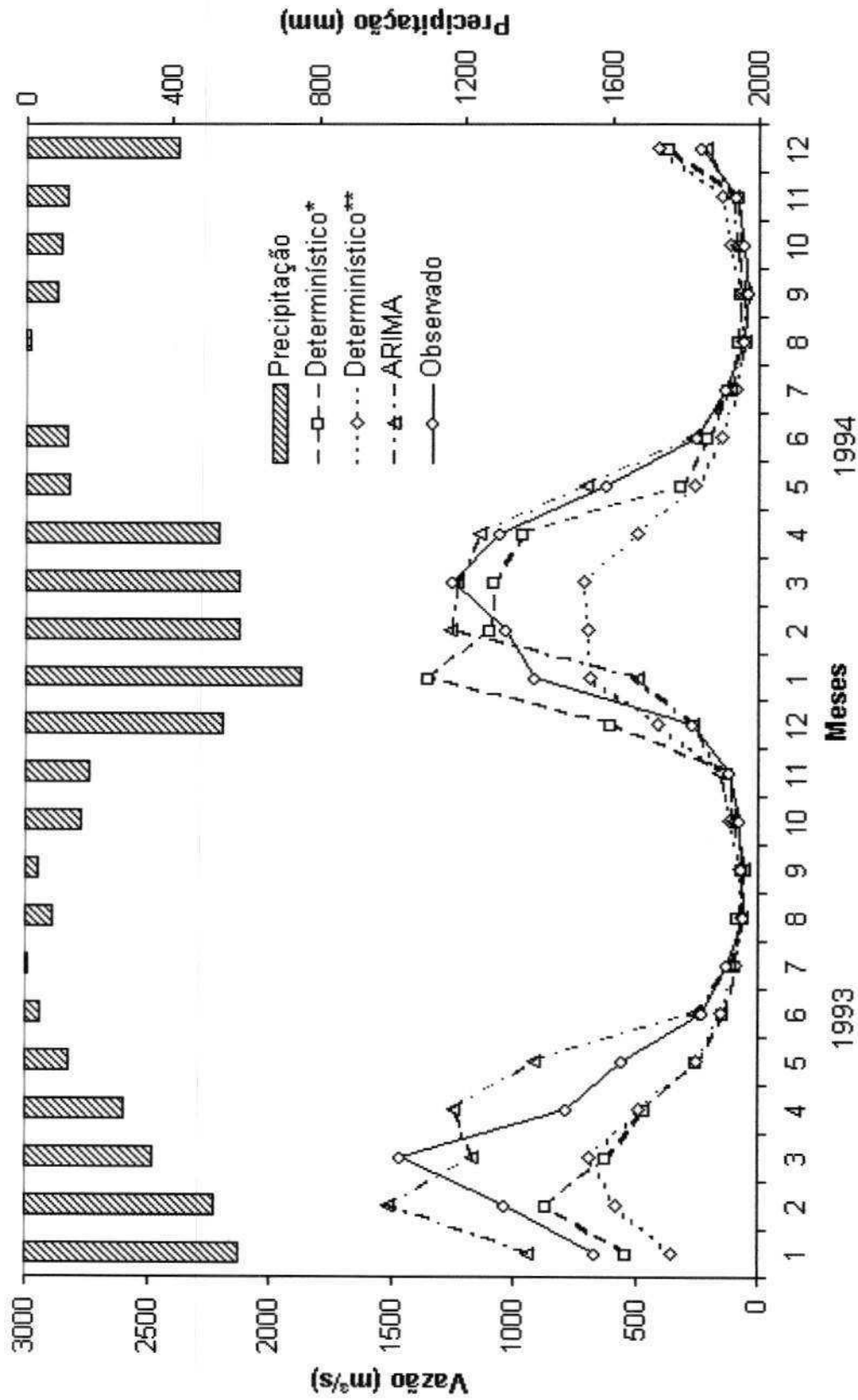


Figura 13. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Aldeia Baú

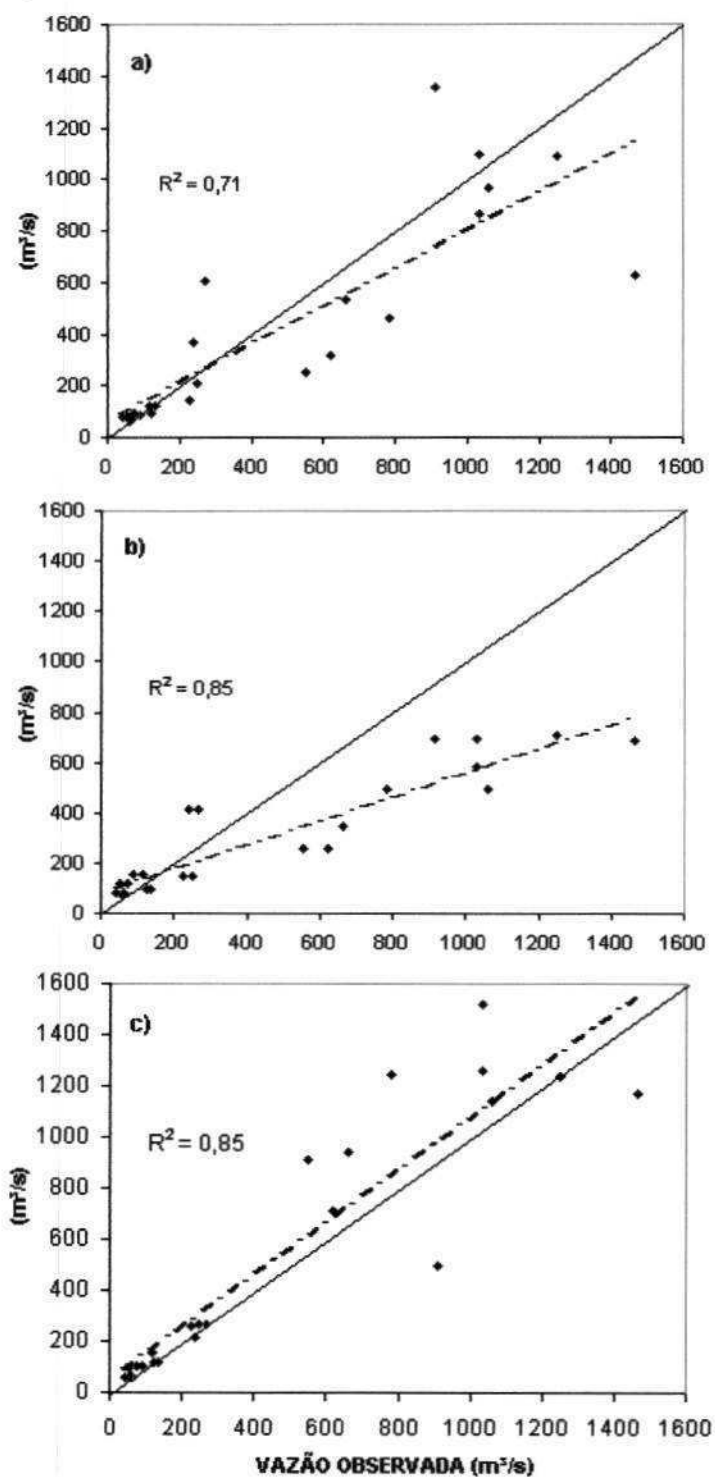


Figura 14. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Aldeia Baú. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal

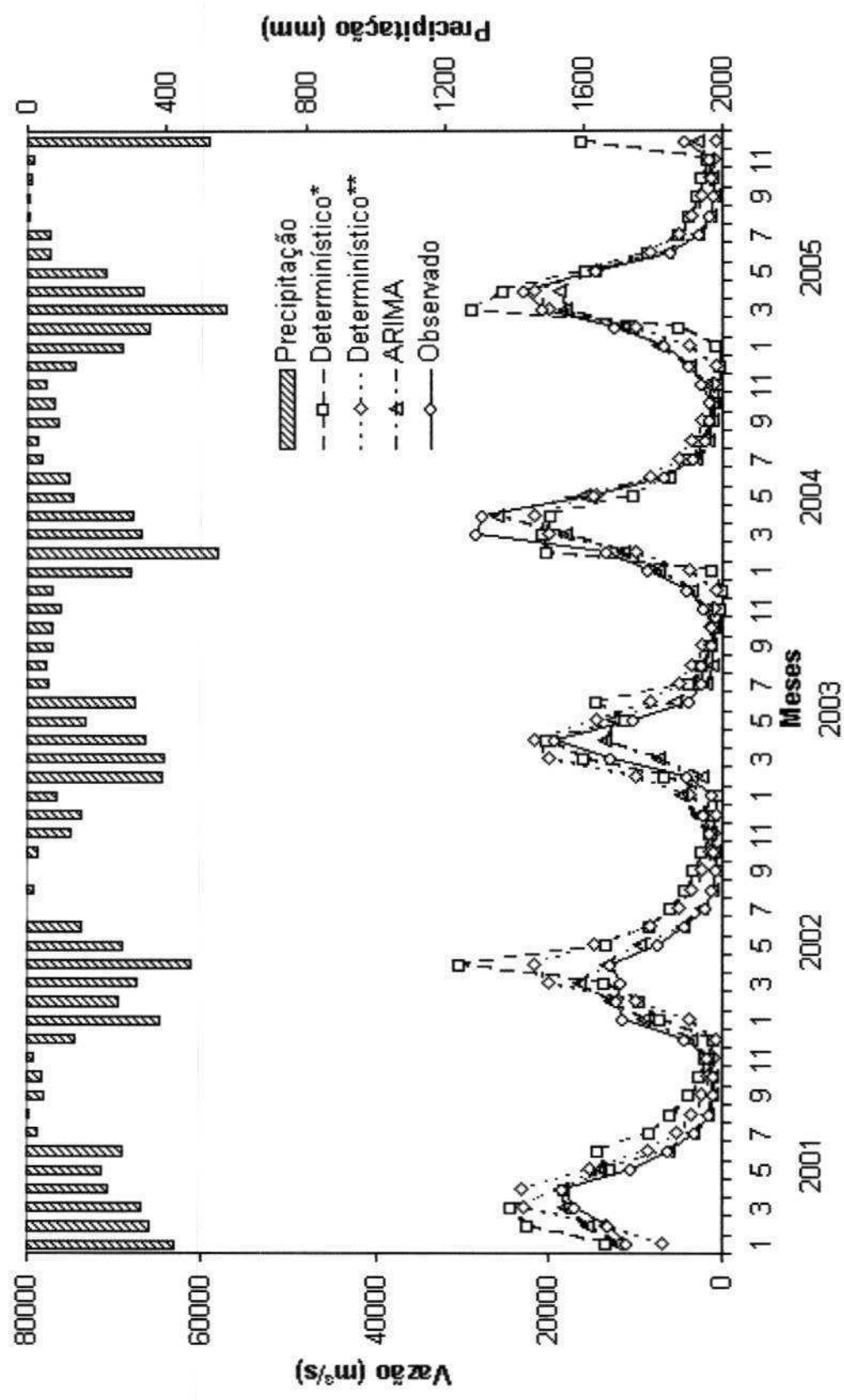


Figura 15. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Altamira

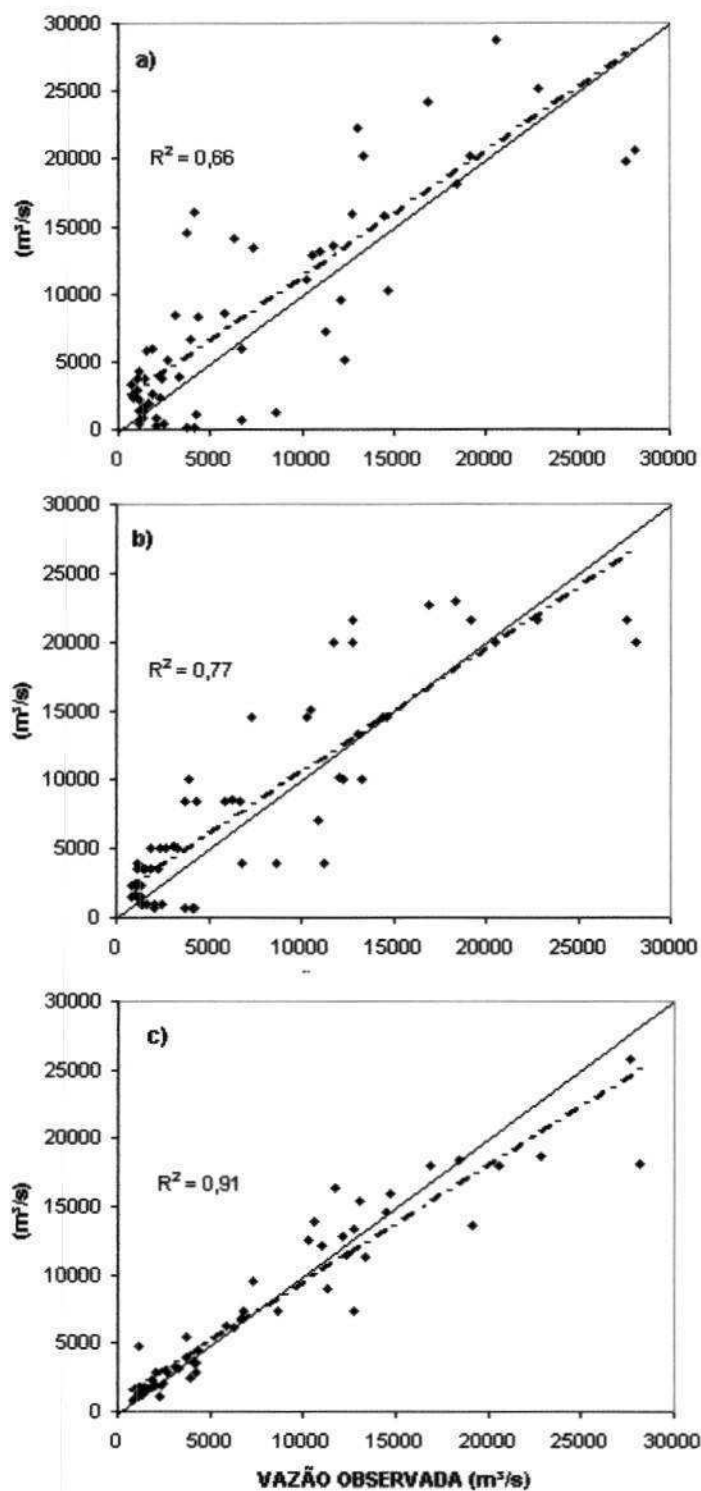


Figura 16. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Altamira. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal

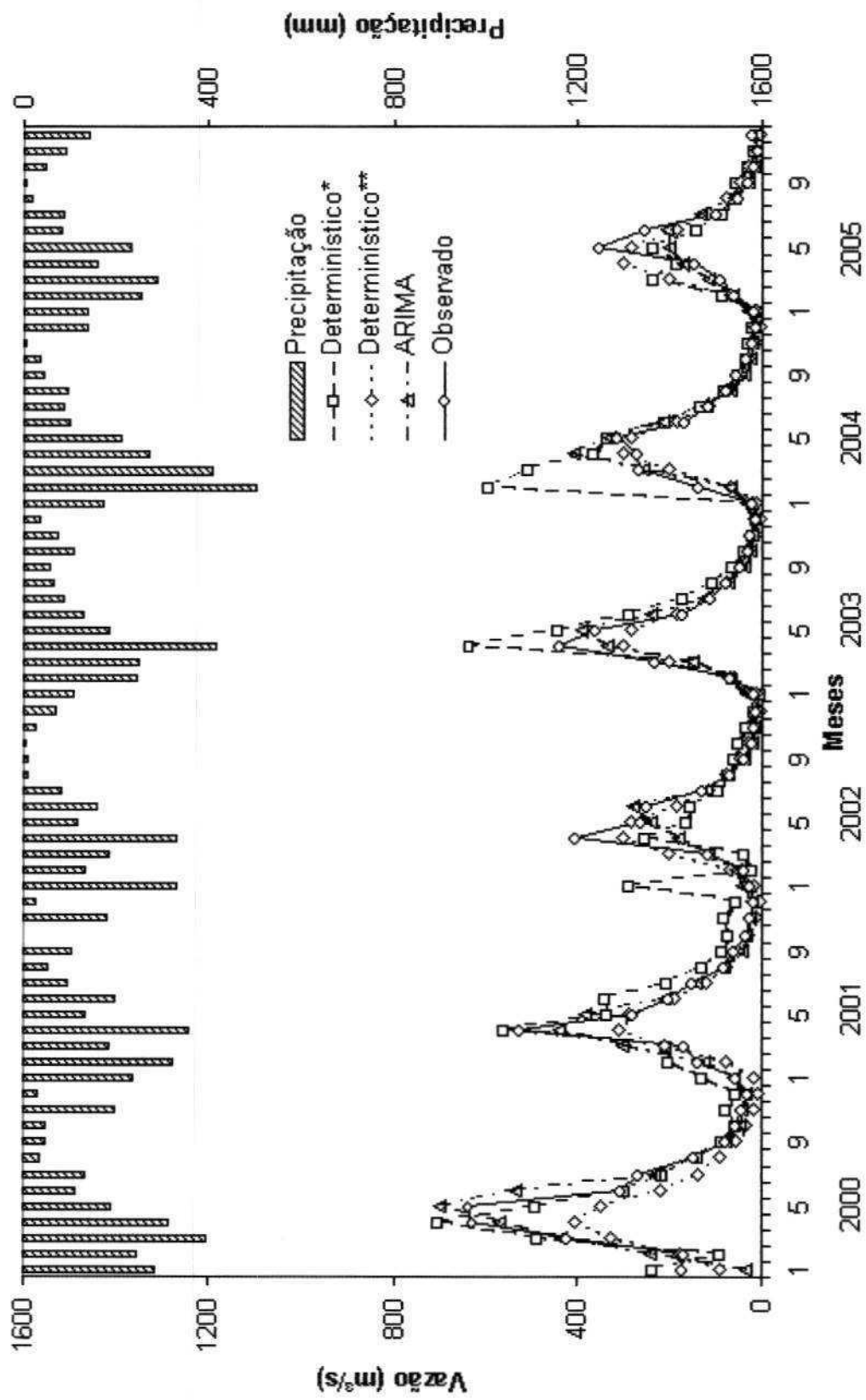


Figura 17. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Arapari

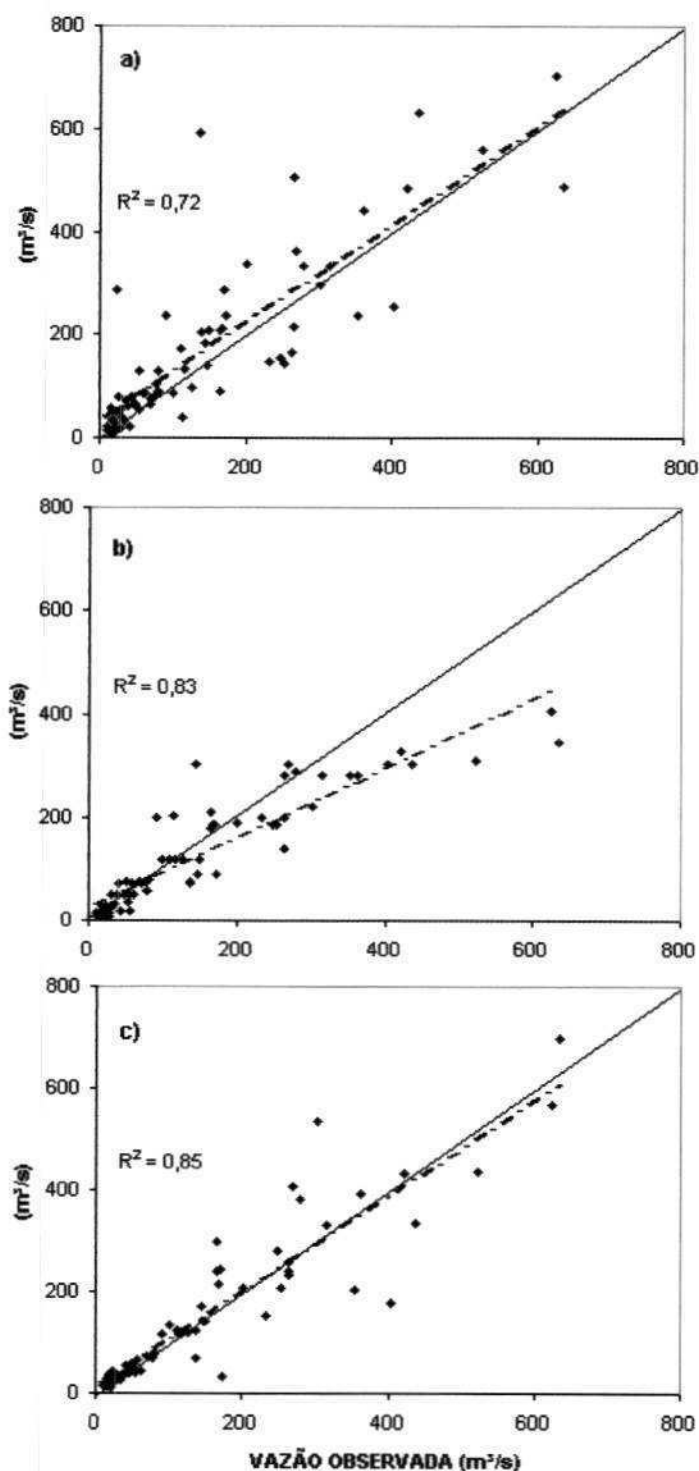


Figura 18. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Arapari. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal

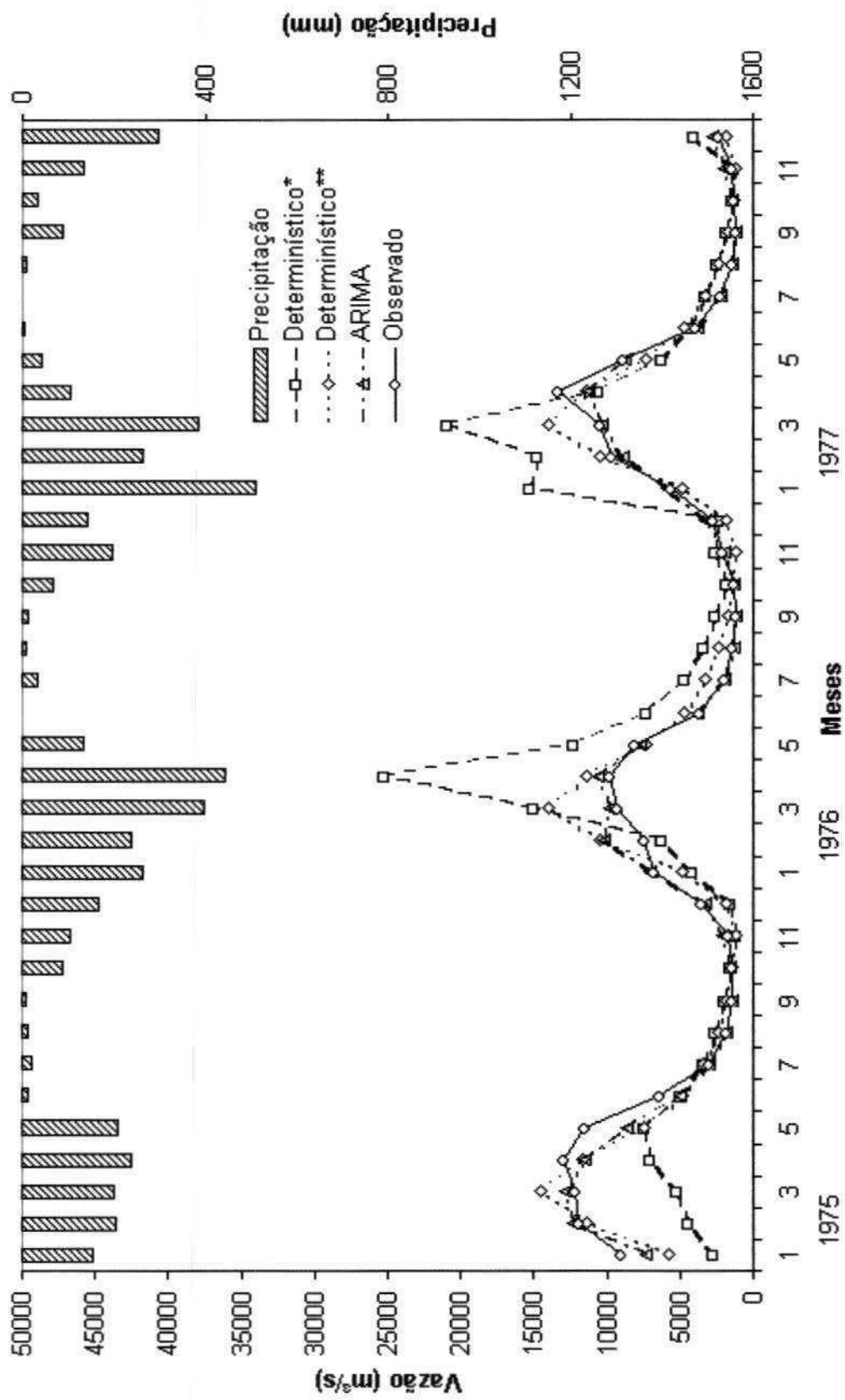


Figura 19. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Belo Horizonte



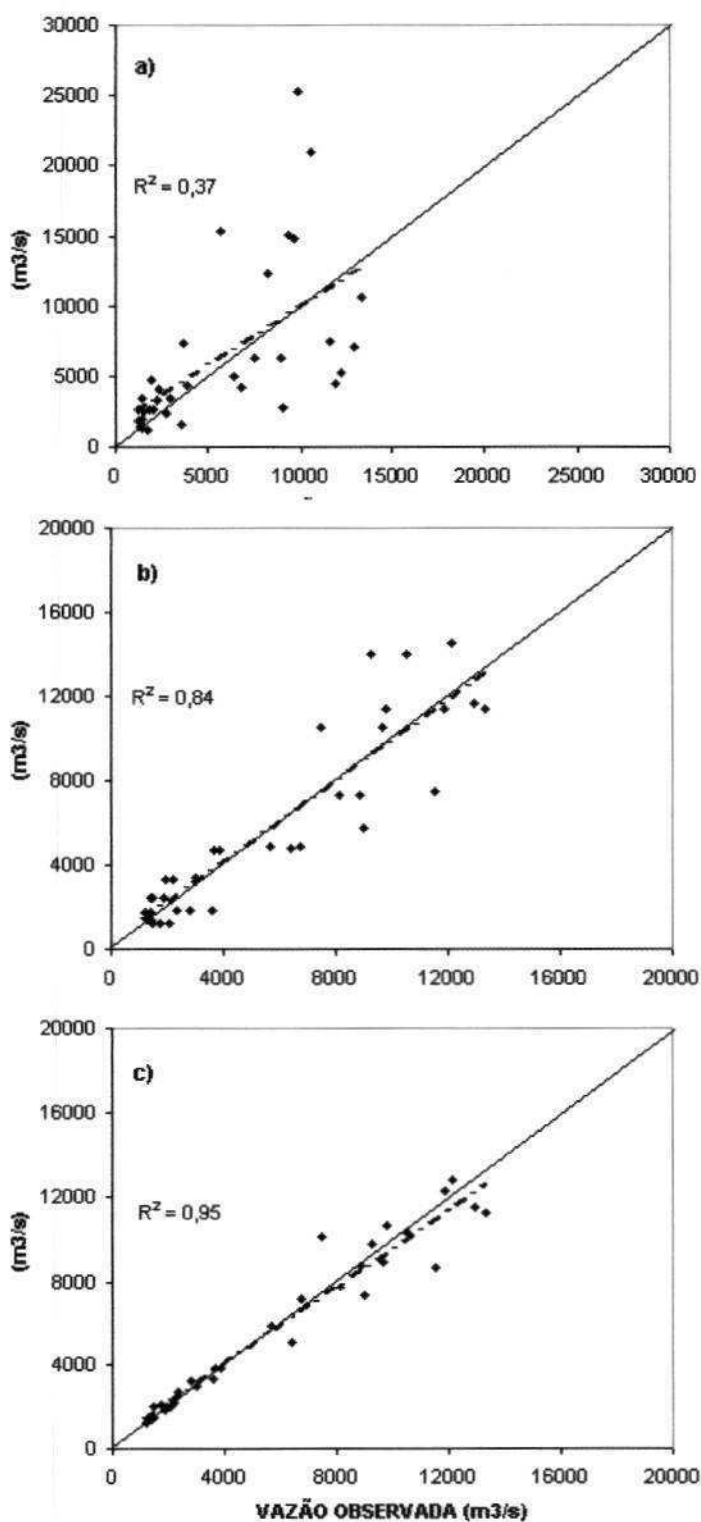


Figura 20. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Belo Horizonte. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal

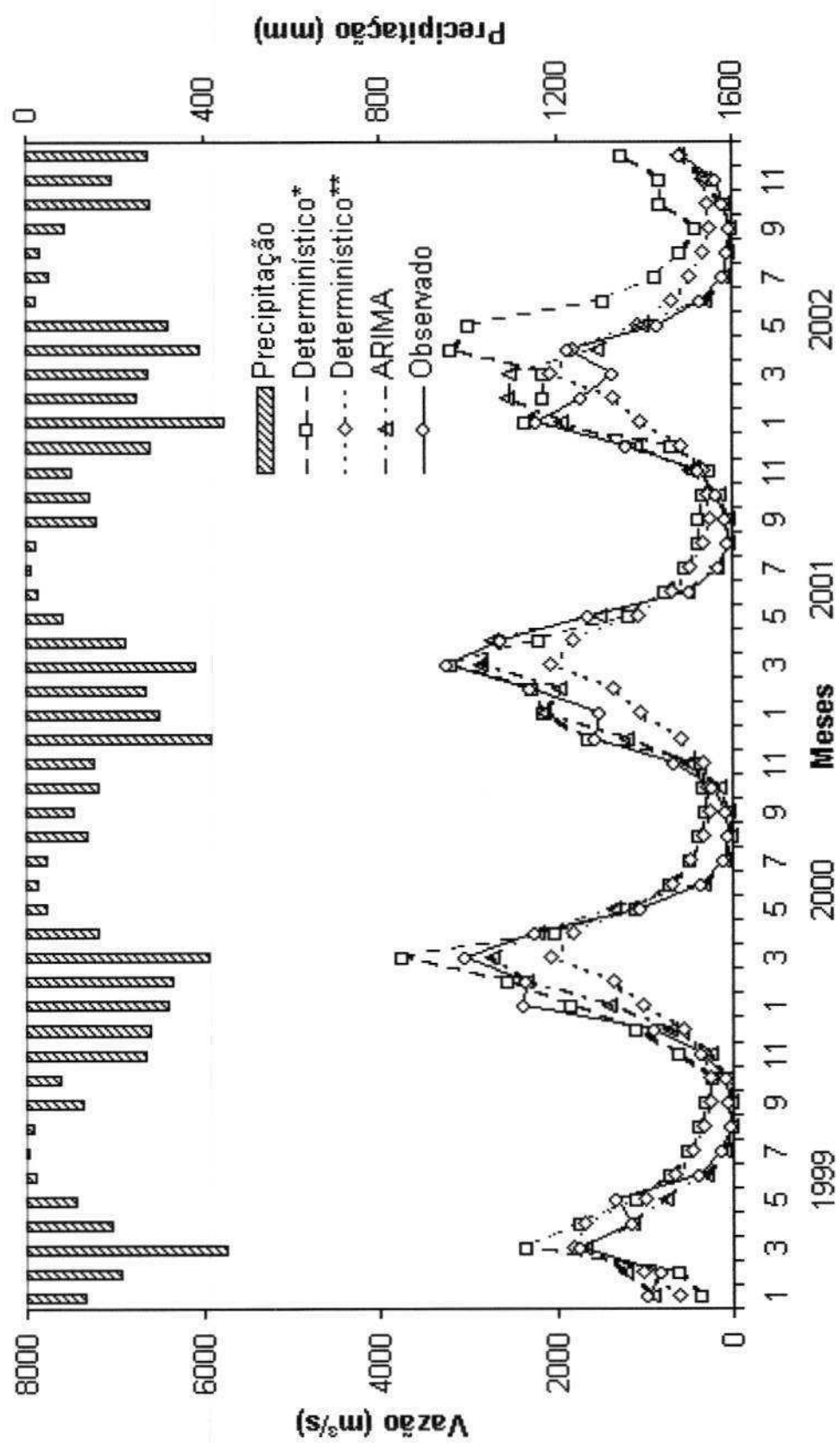


Figura 21. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Boa Esperança

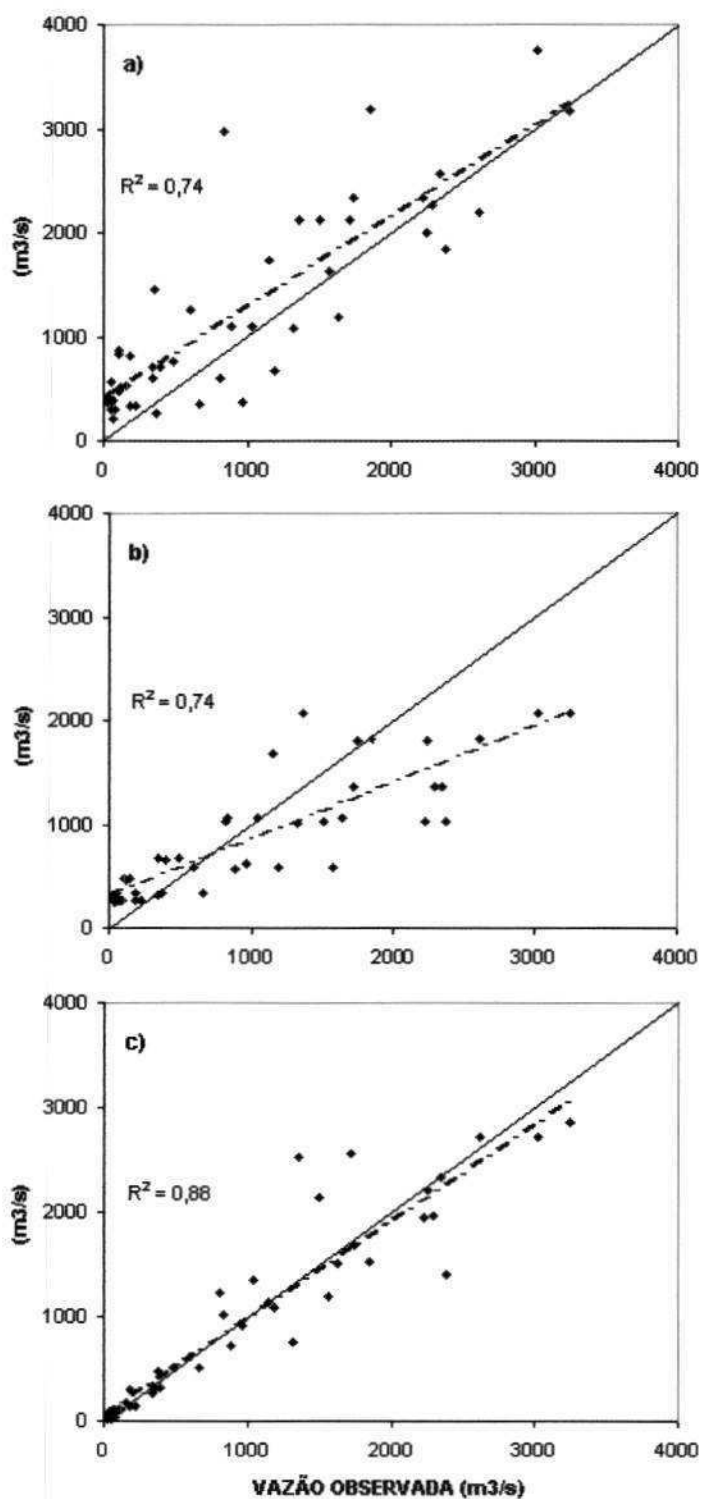


Figura 22. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Boa Esperança. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal

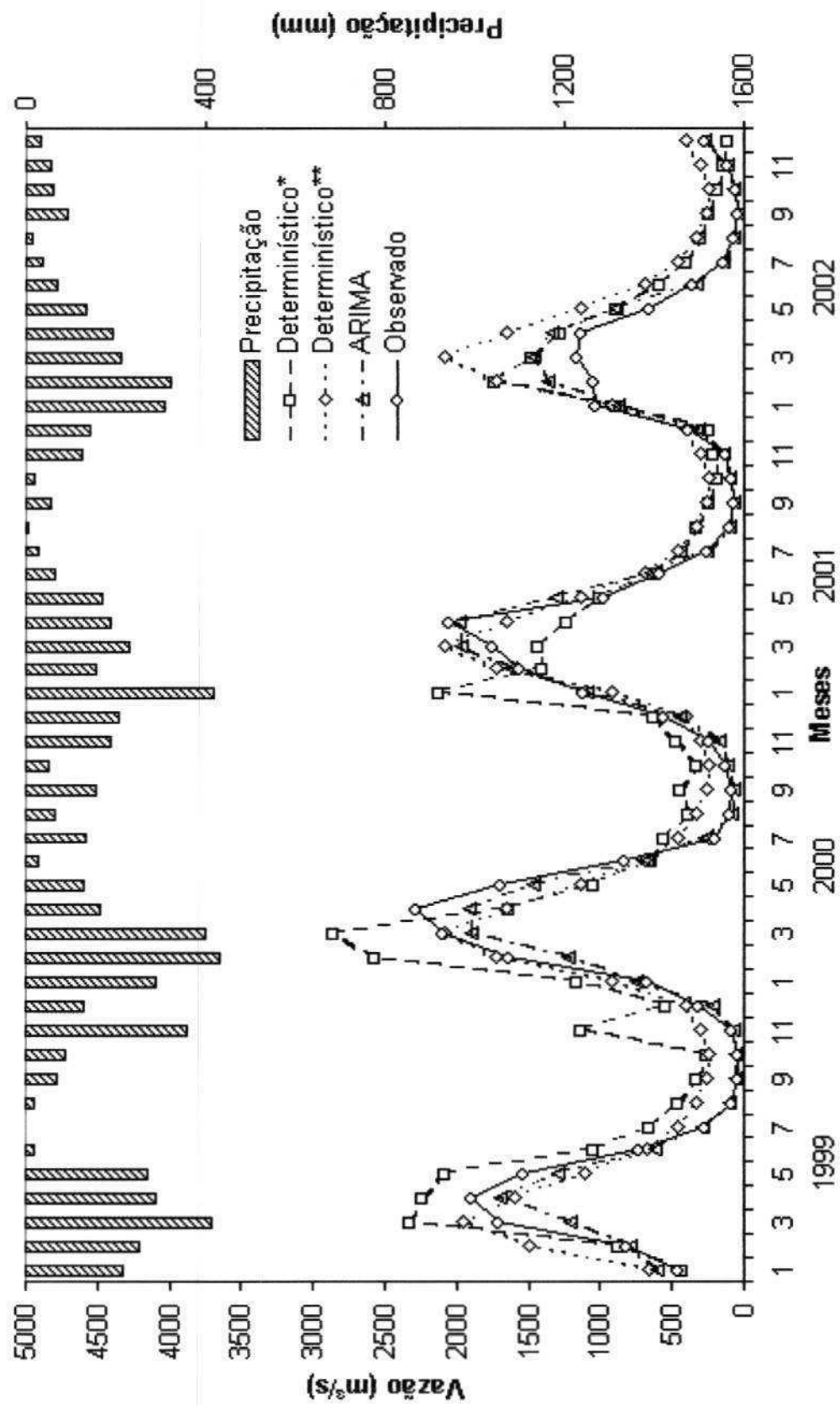


Figura 23. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Cajueiro

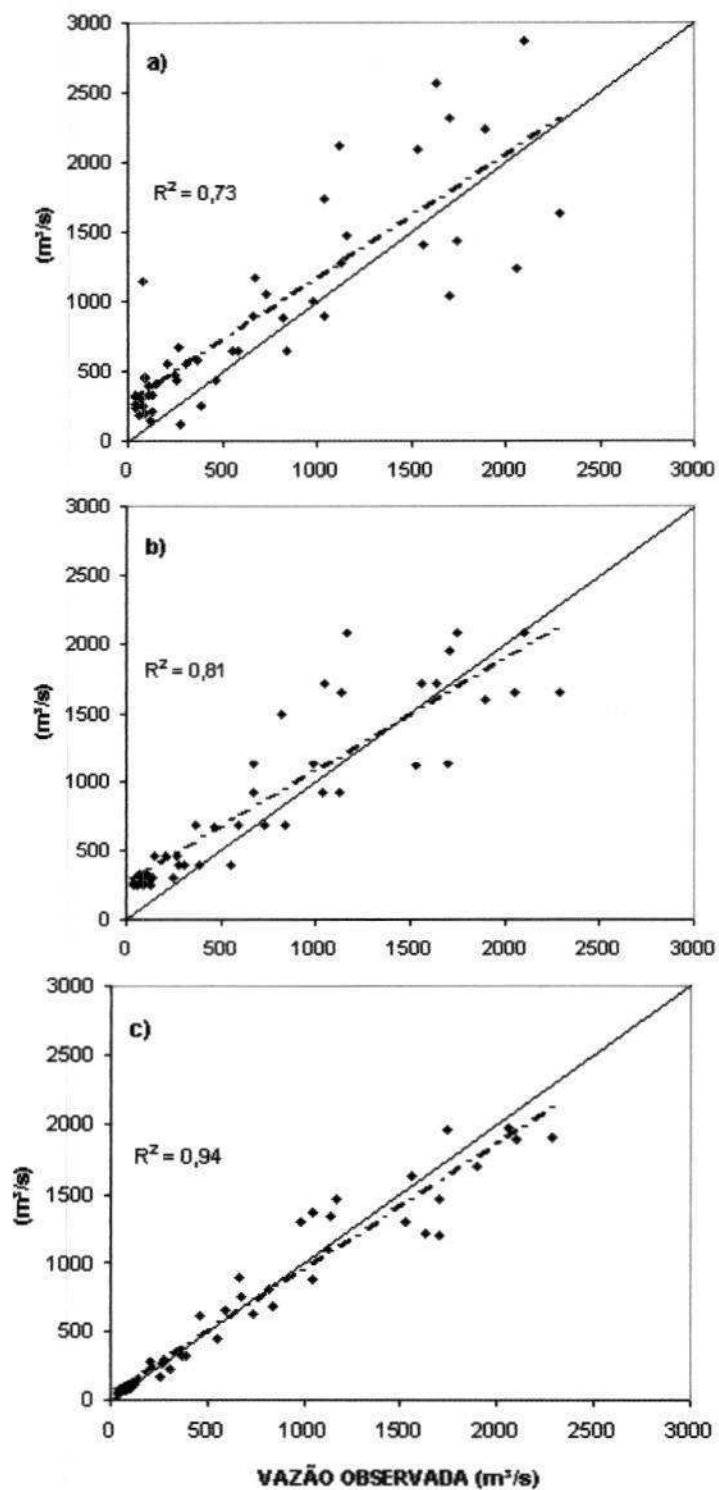


Figura 24. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Cajueiro. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal

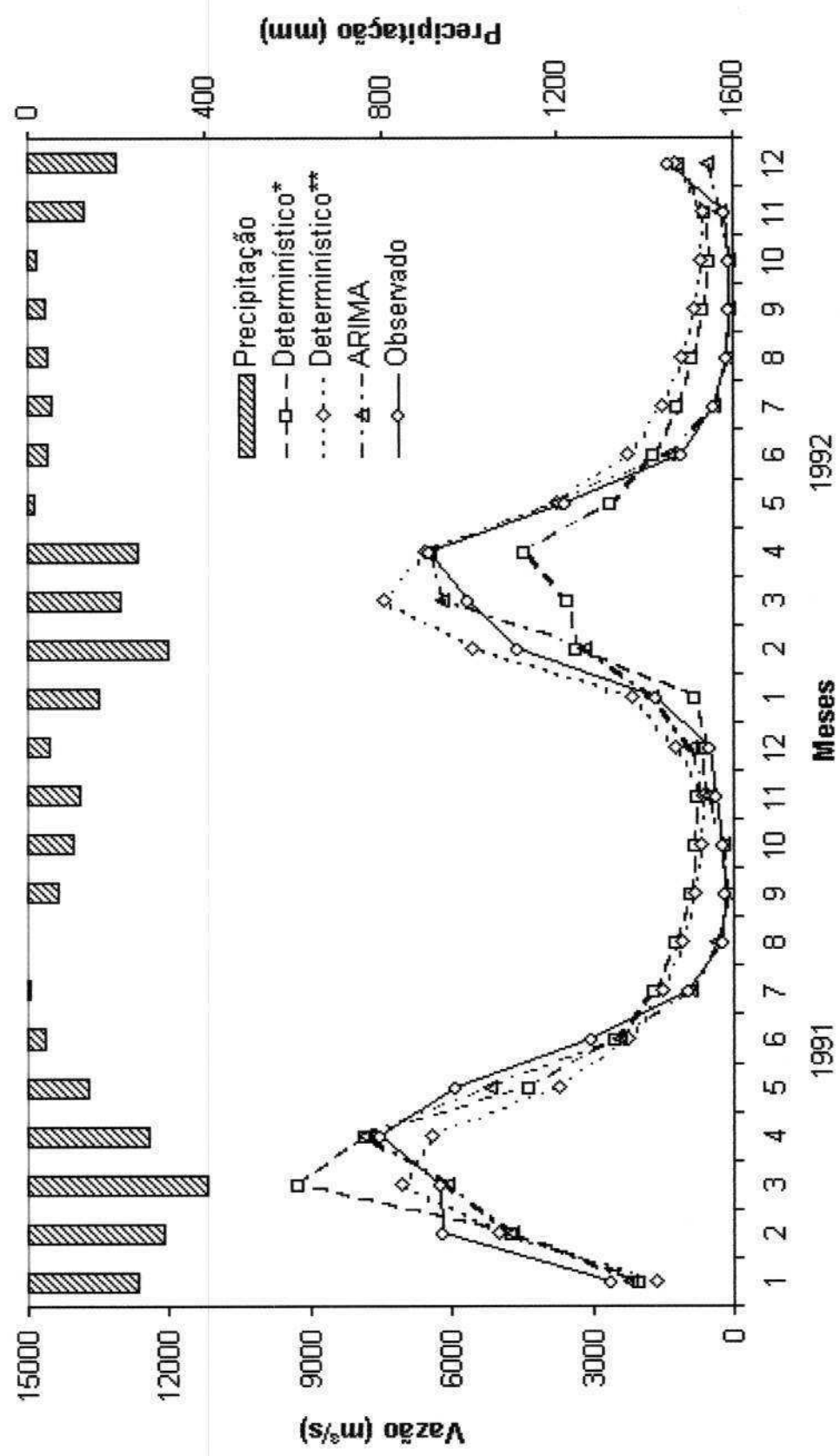


Figura 25. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Pedra do Ó

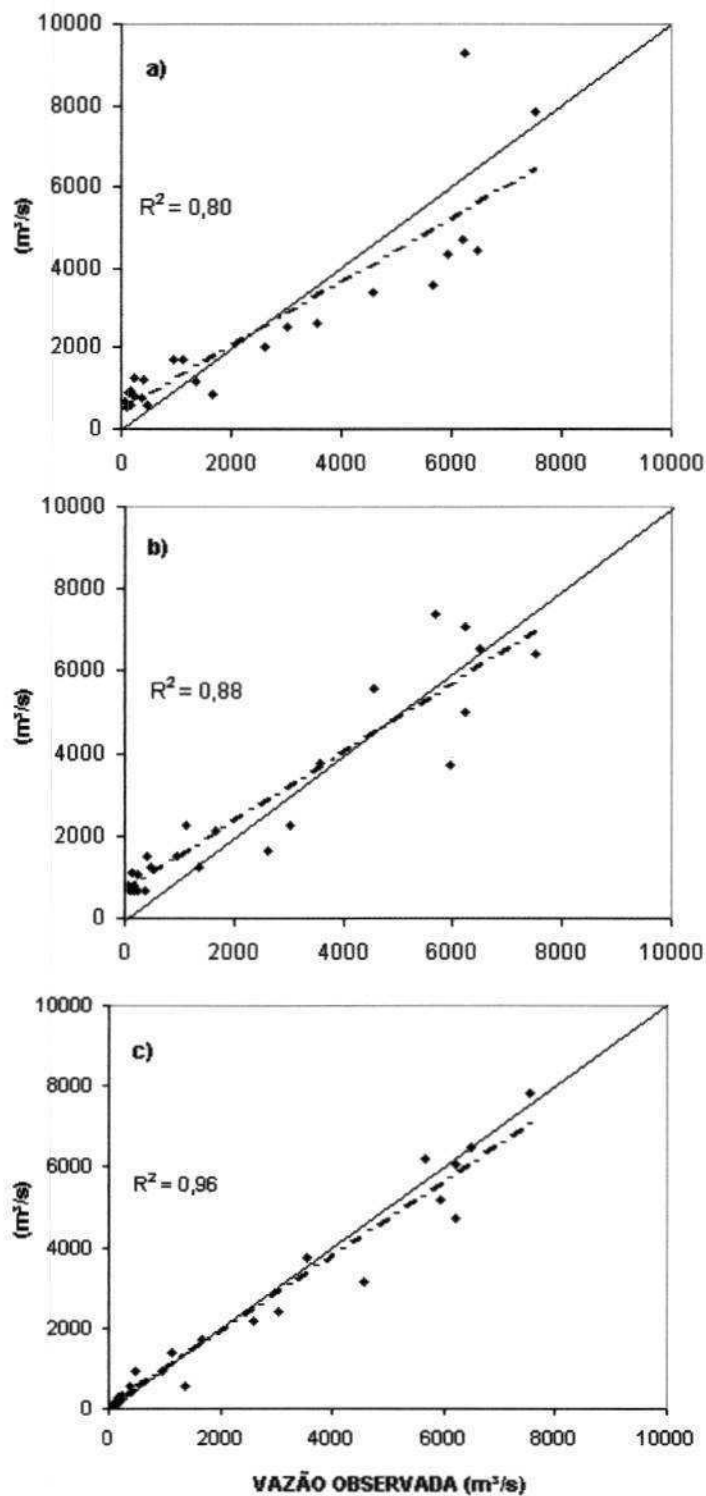


Figura 26. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em Pedra do Ó. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal

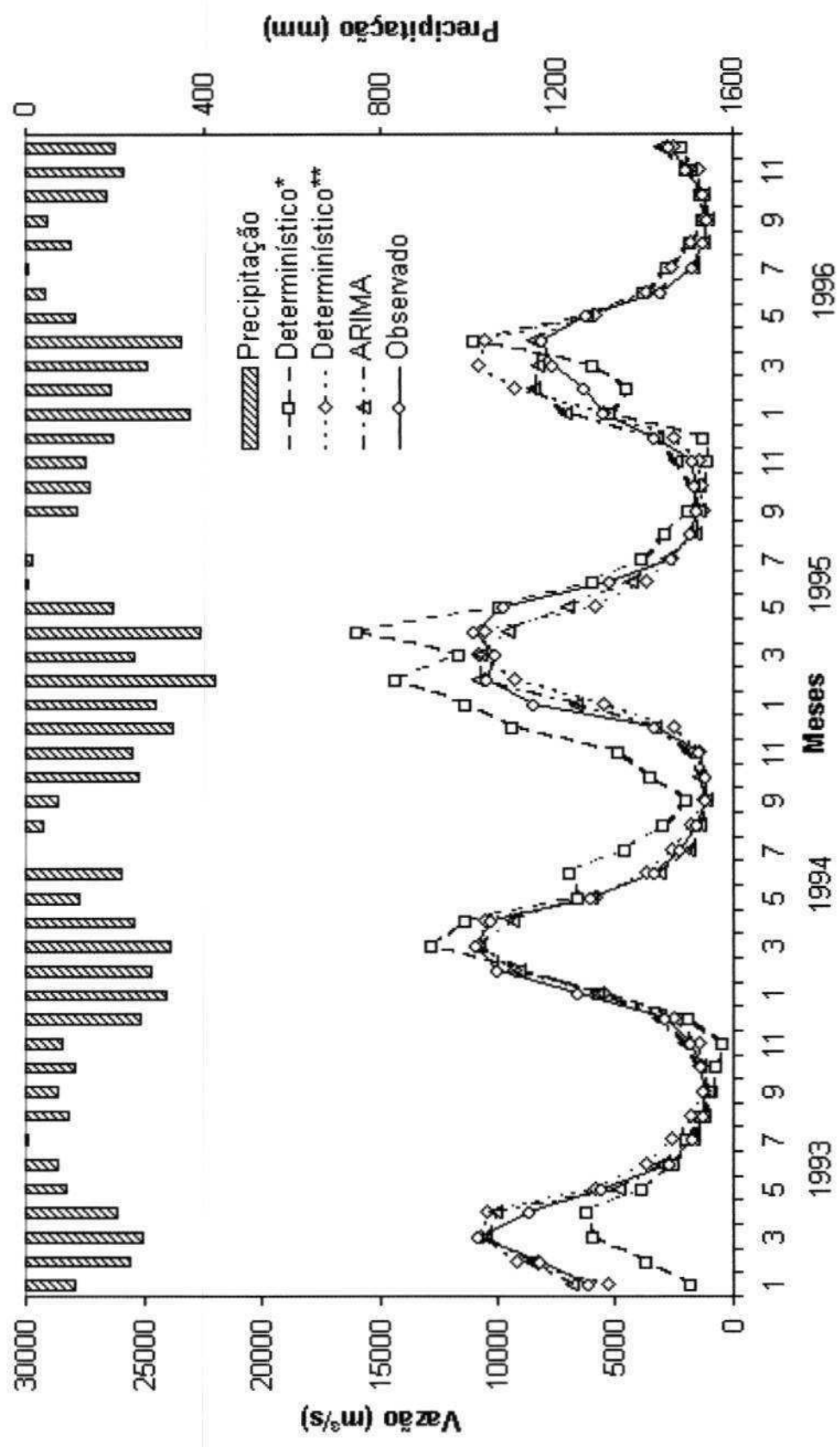


Figura 27. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em São Felix do Xingu



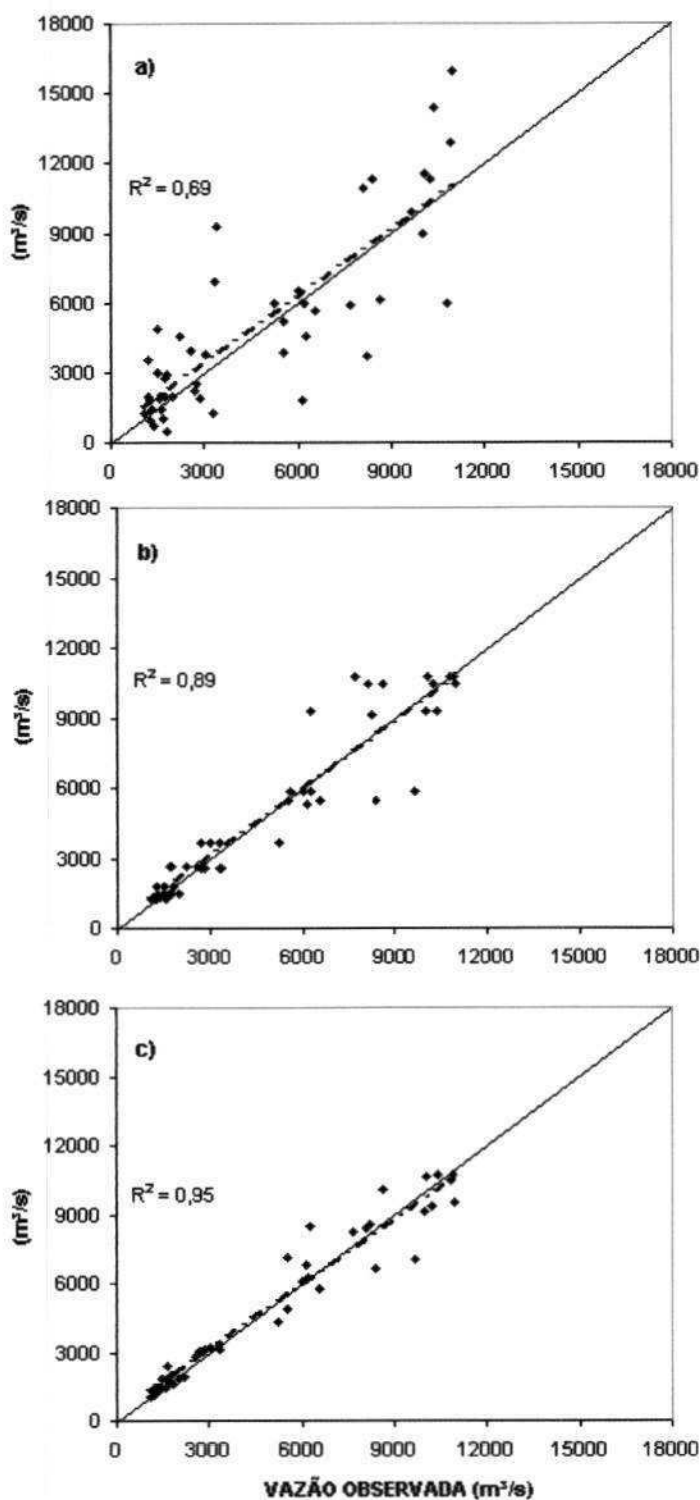


Figura 28. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em São Felix do Xingu. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal

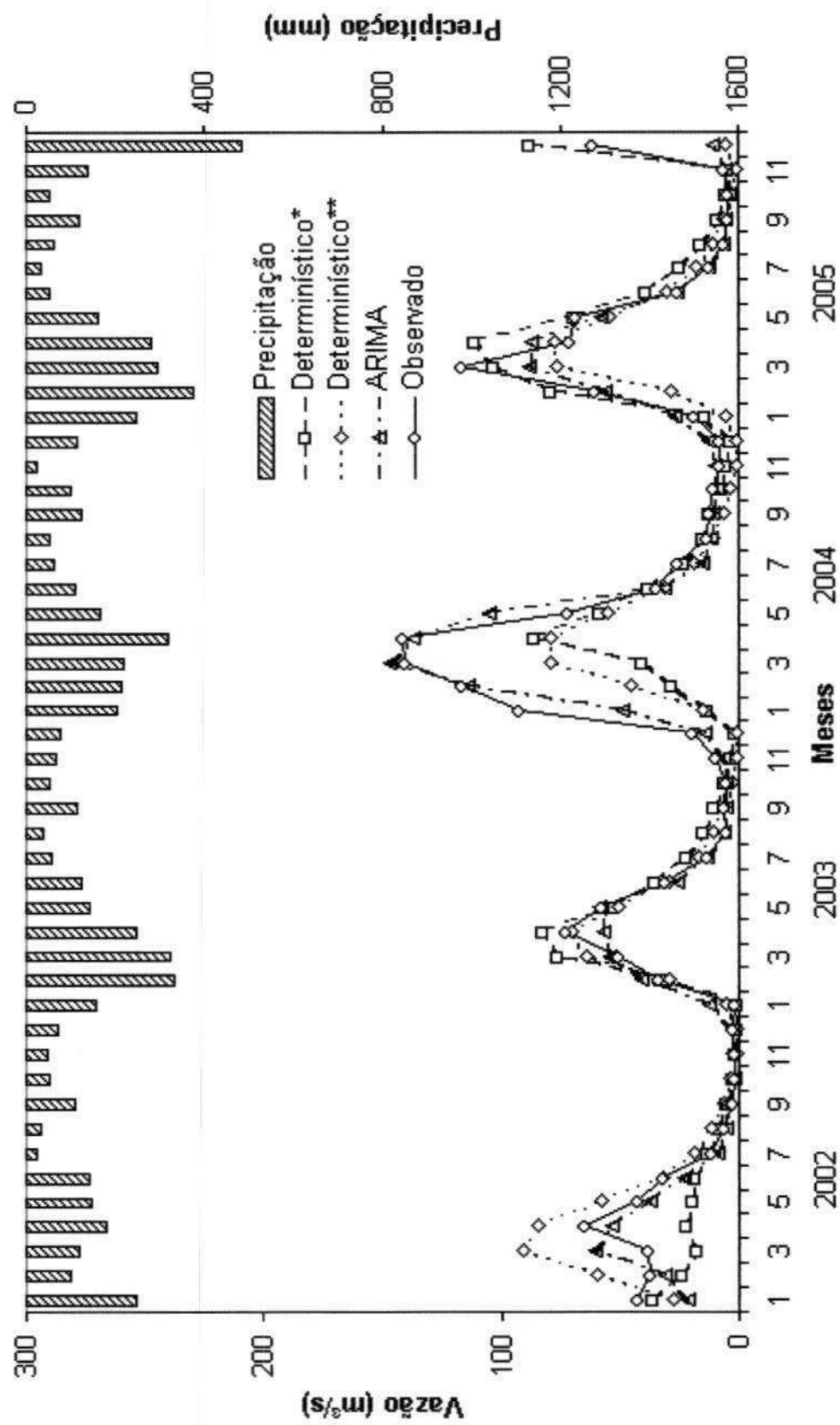


Figura 29. Hidrogramas das vazões observadas e simuladas pelos modelos (linhas) e hietograma (colunas) em Uruara

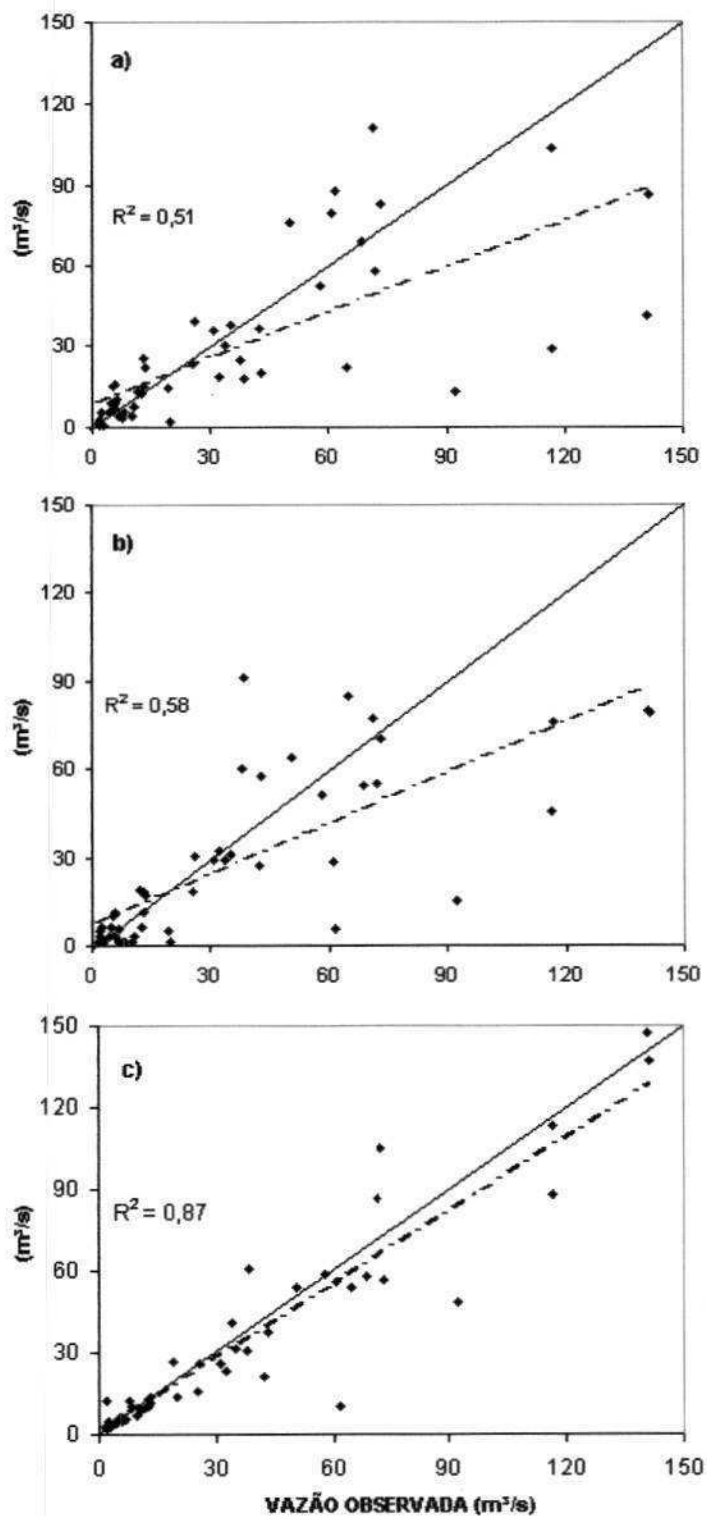


Figura 30. Diagrama de dispersão, coeficiente de determinação e reta de regressão linear para as vazões simuladas pelos modelos: a) determinístico\*, b) determinístico\*\* e c) ARIMA contra as vazões observadas em para Uruara. As linhas tracejadas se referem à regressão linear e a contínua ao ajuste ideal

#### 4.2 - Influências do Fenômeno ENOS na Resposta Hidrológica

A ocorrência do evento vazão de uma bacia hidrográfica depende fortemente da variabilidade espaço-temporal da precipitação e pode contribuir com o aumento ou diminuição de seus valores observados na exutória estudada. A forma pela qual a vazão responde a dado estímulo da precipitação na bacia é denominada de resposta hidrológica. Essa resposta representa a produção de água em determinada seção transversal do rio de uma bacia hidrográfica em função da precipitação. O evento ENOS exerce uma forte influência sobre o regime de precipitação na Bacia Amazônica, na porção norte da bacia predomina condições mais secas e nas porções sul e centro da Amazônia condições mais úmidas para anos de El Niño, já em anos de La Niña a precipitação tende a aumentar nas regiões norte e leste da Amazônia. Para o cálculo da resposta hidrológica, estabeleceu-se um atraso (*lag*) de um mês para a vazão, em relação à precipitação, visto que os picos de vazão ocorrem, em média, um mês depois dos maiores eventos de precipitação, como mostra a Figura 31, para o caso representativo de Altamira.

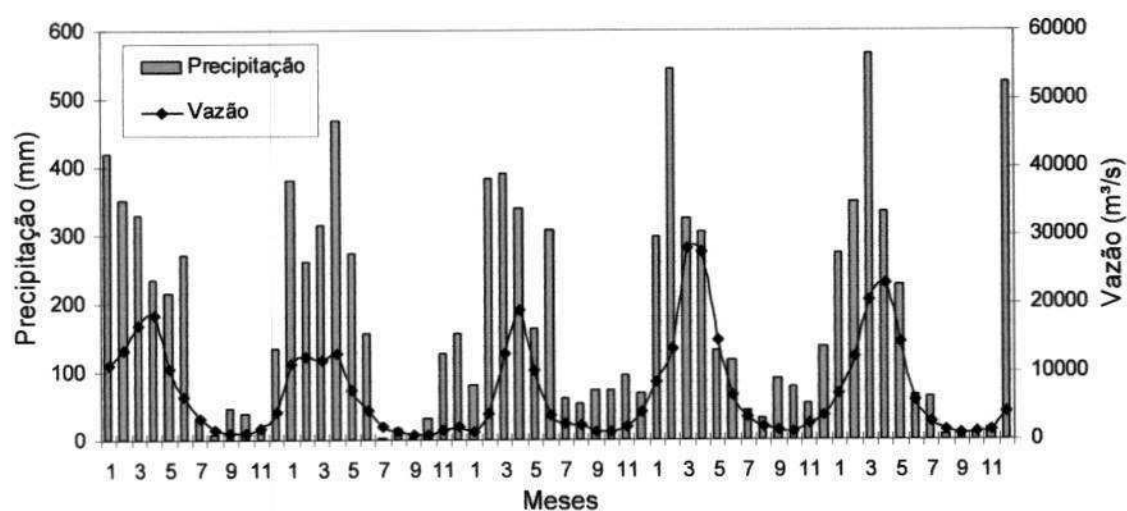


Figura 31. Defasagem entre precipitação mensal (mm) e vazão mensal ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) no período de 2001 a 2005, em Altamira

As respostas hidrológicas, para o período de 1975 a 2005, nas estações da bacia hidrográfica do Xingu são apresentadas na Tabela 8, bem como informações da média climatológica, variância e desvio padrão dos dados. Esses valores serviram de base para avaliar a influência dos fenômenos ENOS na variação anual e espacial das respostas hidrológicas da bacia hidrográfica.

Tabela 8. Resposta Hidrológica anual das estações selecionadas na Bacia Hidrográfica do Xingu e intensidade dos eventos ENOS: Fraco (\*), Moderado (\*\*) e Forte (\*\*\*)

Ano/Posto	Condição	Aldeia Baú	Altamira	Arapari	Belo Horiz.	Boa Esp.	Cajueiro	Pedra do Ô	São F. Xingu	Uruara
1973	La niña ***	-	-	0,11	-	-	-	-	-	-
1974	La niña ***	-	-	0,25	-	-	-	-	-	-
1975	La niña ***	-	0,21	0,22	-	-	-	-	-	-
1976	El niño*	-	0,29	0,31	-	-	0,44	-	0,45	-
1977	El niño*	-	0,38	0,17	0,32	0,28	0,57	0,58	0,33	-
1978	Normal	-	0,44	0,15	0,47	0,38	0,61	0,52	0,40	0,24
1979	El niño*	-	0,60	0,09	0,32	0,27	0,31	0,38	0,45	0,11
1980	Normal	-	0,56	0,15	0,45	0,20	0,42	0,39	0,54	0,08
1981	Normal	-	0,71	0,04	0,40	0,27	0,46	0,32	0,52	0,04
1982	El niño***	0,85	0,67	0,18	0,58	0,31	0,58	0,42	0,39	0,13
1983	La niña *	0,87	0,51	0,11	0,50	0,26	0,28	0,24	0,45	0,07
1984	La niña *	0,77	0,18	0,14	0,37	0,28	0,31	0,26	0,30	0,18
1985	Normal	0,80	0,36	0,22	0,32	0,44	0,53	0,34	0,44	0,36
1986	El niño**	0,78	0,40	0,20	0,41	0,34	0,42	0,37	0,36	0,32
1987	El niño**	0,53	0,31	0,08	0,33	0,26	0,26	0,18	0,30	0,20
1988	La niña ***	0,87	0,31	0,15	0,43	0,34	0,31	0,29	0,27	0,17
1989	Normal	0,82	0,25	0,23	0,25	0,31	0,38	0,37	0,38	0,14
1990	El niño***	0,88	0,34	0,15	0,29	0,35	0,25	0,38	0,37	0,23
1991	El niño***	0,80	0,31	0,24	0,54	0,27	0,48	0,41	0,38	0,31
1992	El niño***	0,90	0,36	0,07	0,65	0,33	0,37	0,37	0,48	0,27
1993	Normal	0,81	0,24	0,05	0,42	0,22	0,39	-	0,38	0,07
1994	El niño**	0,73	0,27	0,13	0,42	0,34	0,31	-	0,24	0,27
1995	La niña *	-	0,47	0,13	0,64	0,36	0,59	-	0,41	0,40
1996	Normal	-	0,25	0,18	0,45	0,39	0,36	-	0,31	0,21
1997	El niño***	-	0,38	0,14	0,51	0,39	0,48	-	-	0,10
1998	La niña **	-	0,22	0,06	-	0,23	0,22	-	-	0,16
1999	La niña **	-	0,25	0,15	-	0,29	0,30	-	-	0,22
2000	La niña **	-	0,26	0,21	-	0,34	0,36	-	-	0,41
2001	-	-	0,40	0,23	-	0,38	0,45	-	-	0,36
2002	-	-	0,34	0,28	-	0,20	0,25	-	-	0,24
2003	-	-	0,17	0,11	-	-	-	-	-	0,16
2004	-	-	0,31	0,16	-	-	-	-	-	0,39
2005	-	-	0,42	0,19	-	-	-	-	-	0,21
	Média	0,80	0,36	0,16	0,43	0,31	0,40	0,36	0,39	0,22
	Variância	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
	DP	0,09	0,14	0,07	0,11	0,06	0,11	0,10	0,08	0,11

Na Tabela 8 o comportamento dos padrões da resposta hidrológica anual para algumas estações se repete principalmente para anos de evento La Niña, com resposta mais baixas do que a climatológica histórica, destacando-se os anos de 1984\*, 1988\*\*\*, 1998\*\*,

1999\*\*, 2000\*\*, anos de evento La Niña, e 1983\*, 1995\*, anteriores a anos de eventos El Niño forte e moderado respectivamente. Algumas estações apresentaram resposta acima da média climatológica. Em anos de El Niño a variabilidade da resposta hidrológica, nos anos estudados, é maior e não apresenta um padrão definido, principalmente em anos de eventos El Niño fraco e moderado, algumas estações apresentam resposta hidrológica acima da média climatológica nos anos de 1976\*, 1977\*, 1979\* e 1990\*\*\*, destacando-se os anos de 1982\*\*\*, 1986\*\*, 1991\*\*\*, 1992\*\*\* e 1997\*\*\*, com resposta hidrológica positivas em todas as estações. Já os anos de 1987\*\* e 1994\*\*, anteriores a eventos de La Niña forte e fraco respectivamente, apresentaram resposta hidrológica negativa para quase todas as estações. A influência do fenômeno ENOS na resposta hidrológica depende bastante da intensidade desse fenômeno e da característica do ano anterior ao fenômeno, que poderá afetar ainda a resposta do ano seguinte. Esse fato condiciona também o padrão de resposta hidrológica para anos considerados normais.

De acordo com os resultados foi possível determinar a influência do fenômeno ENOS na resposta hidrológica, principalmente em anos de La Niña, na bacia hidrográfica do Xingu. Esses resultados reforçam afirmações anteriores de que a resposta hidrológica da bacia é muito influenciada pelo regime de precipitações associadas aos fenômenos ENOS. É importante considerar que outros fatores como topografia, geologia, tipo de solo e cobertura vegetal também afetam esses resultados.

## **5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Baseado na simulação das vazões mensais utilizando o modelo chuva-vazão determinístico de dois parâmetros e o modelo estocástico ARIMA e, no estudo da influencia dos fenômenos ENOS nas vazões observadas através das respostas hidrológicas nas estações da bacia hidrográfica do Xingu, pôde se obter as seguintes conclusões:

O modelo hidrológico determinístico mensal de dois parâmetros aplicado às vazões possui estrutura simples, com poucos parâmetros e pode ser facilmente utilizado no planejamento e/ou gerenciamento dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do Xingu. Esse modelo mostrou-se bastante eficiente na simulação das vazões mensais, porém sensível a eventos extremos de precipitação, afetando fortemente o armazenamento de água no solo. Esse fato pode ter sido um dos fatores responsáveis pelas superestimativas das vazões simuladas.

O modelo estocástico ARIMA apresentou melhores resultados na simulação das vazões mensais para todas as estações da bacia. O modelo ARIMA conseguiu capturar a

dinâmica da série temporal na simulação das vazões mensais em todas as estações da bacia em estudo.

Os modelos, estocástico e determinístico aplicados neste trabalho para simular vazões mensais no período seco, em todas as estações da bacia hidrográfica do Xingu, apresentaram resultados satisfatórios, porém devem ser aplicados com cautela no período chuvoso, visto que a maior parte dos eventos extremos de precipitação e conseqüentemente vazões de pico ocorrem nesse período.

Ficou demonstrado que os fenômenos ENOS, durante o período estudado, na sua fase fria, La Nina, pode influenciar a resposta hidrológica da bacia com maior freqüência; ao apresentar valores de vazões menores que a média histórica observada. Também ficou evidenciado que em alguns anos, o ENSO, na sua fase quente, El Nino; ocorreram valores positivos de vazões em relação à média histórica observada. Essa influência é condicionada pela intensidade do fenômeno e pelas características do ano anterior ao fenômeno.

Sugestões para trabalhos futuros:

- 1) Aplicar modelos chuva-vazão com base em técnicas de Redes Neurais Artificiais para simular vazões mensais na bacia aqui estudada e comparar seus resultados com os resultados obtidos neste trabalho.
- 2) Analisar as anomalias mensais das temperaturas da superfície do mar (TSM) do Pacífico e relacioná-las com as vazões mensais observadas na bacia hidrográfica do Xingu.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHEL, C. Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, v. 286, p. 19-35, 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Inventário das estações fluviométricas e pluviométricas. Disponível em: <[www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)>. Acesso em abril 2006.

ARAÚJO, Patrícia Cordeiro. Aplicação do modelo GR4J à bacia hidrográfica do rio Paraíba em Caraúbas. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

BERMANN, C., O Brasil não precisa de Belo Monte. *Amigos da Terra - Amazônia Brasileira*. Disponível em <[http://www.amazonia.org.br/opiniaio/artigo\\_detail.cfm?id=14820](http://www.amazonia.org.br/opiniaio/artigo_detail.cfm?id=14820)>, Acesso em maio 2006.

- BEZERRA, Ana Cleide Nascimento. Aspectos da circulação atmosférica de grande escala sobre o norte e nordeste do Brasil, relacionados com a temperatura da superfície do mar. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.
- BOX, G.E.P.; COX, D.R. An analysis transformation. *Journal of the Royal Statistics Society, Séries B*, v. 26, p. 211-252, 1964.
- BOX, G.E.P.; JENKINS, G.M. Time séries analysis: forecasting and control. Revised edition, Holden-Day, p.575. Inc. USA, 1976.
- BRUTSAERT, W., Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications. Cornell University Press, Ithaca, NY, 1992.
- CARRIELO, Felix. Estimativas da resposta hidrológica das sub-bacias brasileiras. Tese (Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.
- CARVALHO, Angela Regino Livino. Previsão de aflúências diárias para horizontes de 1 a 7 dias através de uma abordagem estocástica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- CHENG, J.D. LIN, L.L.; LU, H.S, Influences of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan, *Forest Ecology and Management*, v. 165, p. 11-28, 2002.
- CHIEW, F.H.S. et al., Comparison of six rainfall-runoff modeling approaches. *Journal of Hydrology*, v. 147, p. 1-36, 1993.

- CHOW, V.T. Runoff. In: Chow, V.T. Handbook of applied hydrology. New York: McGraw Hill May. Cap. 14, p. 141-149, 1964.
- GALVÍNCIO, J.D.; SOUZA, F.A.S. Uso de modelos auto-regressivo e médias-móveis para geração de vazões médias mensais na bacia hidrográfica do alto São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XII, 2002, Foz de Iguaçu/PR: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002.
- GUO, S., Impact of climatic change on hydrological balance and water resource systems in the Dongjiang Basin, China: Modeling and Management of Sustainable Basin-Scale Water Resource (Proceedings of a Boulder Symposium, July 1995 LAHS Publication no. 231, 1995).
- GUO, S. Monthly water balance models for climate change impact study. Proceedings of First National Post-doctoral Conference, National Defense Industry Press, Beijing p. 2034-2037, 1992.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS/ CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMATICOS (INPE/CPTEC). EL NIÑO E LA NIÑA. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/enos>>. Acesso em janeiro 2007.
- JONES, J.A.A. Global hydrology: processes resources and environmental management. England: Pearson, Cap. 2 - 4, p. 22-119, 1999.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIM, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J. MO, K.C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAN, A.; REYNOLDS, R.; JENNE, R.;

JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40 - year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 77, n. 3. p. 437-471, 1996.

KISTLER, R, ROBERT KISTLER, EUGENIA KALNAY, WILLIAM COLLINS, SURANJANA SAHA, GLENN WHITE, JOHN WOOLLEN, MUTHUVEL CHELLIAH, WESLEY EBISUZAKI, MASAO KANAMITSU, VERNON KOUSKY, HUUG VAN DEN DOOL, ROY JENNE AND MICHAEL FIORINO. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD Rom and Documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 82, n. 2, p. 247-268, Feb. 2001.

LJUNG, G. M., BOX, G. E. P. "On a measure of lack of fit in time series models." *Biometrika*, Vol. 65, p. 297-303, 1978.

LOPES, N. L.; GONÇALVES, E. Séries temporais: modelos lineares e não lineares. In: CONGRESSO ANUAL, XI, 2003, Faro: Sociedade Portuguesa de Estatística, 2003. v.1, p. 129-144.

LUCAS, E. W. M.; *et al.* Variação espacial e temporal da precipitação na bacia hidrográfica do Xingu, Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIII, 2006, Florianópolis/SC: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.

LUCAS, E. W. M.; *et al.* Regionalização da precipitação na bacia hidrográfica do Xingu, Pará, Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIII, 2006, Florianópolis/SC: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.

- MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; SAMPAIO, G. On the associations between hydrometeorological conditions in Amazonia and the extremes of the southern oscillation. Disponível em:<<http://www.unesco.org.uy/phi/libros/enso/marengo.pdf>> Acesso em março de 2004.
- MCCULLOCH, J.S.G.; ROBINSON, M. History of forest hydrology. *Journal of Hydrology*, 150, n.2-4, p.189-216, 1993.
- MELO, Alexander Passos. Aplicação de modelos estatísticos para previsão de níveis no rio Xingu em Altamira. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Meteorologia) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.
- MÉNDEZ, M.C.; MANTEIGA, W.G.; BANDE, J.F.; SÁNCHEZ, J.M.P.; CALDERÓN, R. L. Modelling of the monthly and daily behavior of the runoff of the Xallas river using Box – Jenkins and neural networks methods. *Journal of Hydrology*, v. 296, p. 38-58, 2004.
- MINE, Mirian Rita Moro. Modelos estocásticos lineares para previsão de cheias em tempo real. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.
- MINE, M.R.; TUCCI, C.E. Previsão em tempo real de vazões afluentes a reservatório de usinas hidrelétricas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol. 9, n. 2, p. 73-99, 1999.
- NASH, J.E.; SUTCLIFF, J. River flow forecasting through conceptual models, *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 282-290, 1970.

- NIEL, H.; PATUREL, J.; SERVAT, E., Study of parameter stability of a lumped hydrological model in a context of climate variability, *Journal of Hydrology*, v. 278, p. 213-230, 2003.
- PEIXOTO, J.P.; OORT, A.H., *Physics of climate*. New York: American Institute of physics, 1992. 250p.
- PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Improvement of a parsimonious model for Streamflow Simulation, *Journal of Hydrology*, v. 279, 275-289, 2003.
- PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. State-of-th-art for Precipitation-runoff Modeling, in state-of-the-art Report on QA guidelines, CEMARGREF, França, 2002.
- PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchments model structures on 429 catchments, *Journal of Hydrology*, v. 242, 275-301, 2001.
- ROCHELLE, B.P.; CHURCH, M. ROBBINS; GEBERT, W.A.; GRACZYK D.J.; KRUG W.R., Relationship between annual runoff and watershed area for the eastern United States, *Water Resources Bulletin*, v. 24, n. 1, p. 35-41, Feb. 1988.
- SECRETARIA EXECUTIVA DE CIÊNCIA E MEIO AMBIENTE DO PARÁ (SECTAM) - Núcleo de Hidrometeorologia. Região do Xingu. Disponível em: <[http://www.para30graus.pa.gov.br/rec\\_xingu.htm](http://www.para30graus.pa.gov.br/rec_xingu.htm)>, Acessado em maio de 2006.
- TRENBERTH, K.E. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.78, n12, p.2771-2777, 1997.

- THORNTHWAITE C.W., MATHER J.R., The water budget and its use in irrigation. In *Water, The Yearbook of Agriculture*. US Department of Agriculture: Washington DC; 346-358, 1955.
- TODINI, E. Rainfall-runoff modeling: Past, present and future, *Journal of Hydrology* 100, 341-352, 1988.
- TUCCI, C.E.M., Modelos Determinísticos, In: Barth, F. T., Modelos para gerenciamento de recursos hídricos, 1º ed., Capítulo 3, Nobel/ABRH, São Paulo, SP, 1987.
- TUCCI, C.E.M., Modelos Hidrológicos, Editora Universitária UFRGS, Porto Alegre, 1998.
- VANDEWIELE, G. L., XU, C.Y., Parsimonious monthly rainfall-runoff models for humid basins with different input requirements. *Advances in Water Resources* 18, 39-48, (1994).
- VANDEWIELE, G.L.; XU, C.Y.; HUYBRECHTS, W. Regionalization of physically based water balance models in Belgium: Application to ungauged catchments. *Water Resources Management* 5, 199-208, 1991.
- VILLELA, S.; MATOS, A. *Hidrologia aplicada*, ed. McGraw-Hill, São Paulo, SP, 1975.
- XIONG, L., GUO, S., A two-parameter monthly water balance model and its application. *Journal of Hydrology*, 216, 111-123, 1999.
- ZENG, N.; Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. D8, p. 9097-9106, 1999.

# ANEXO A



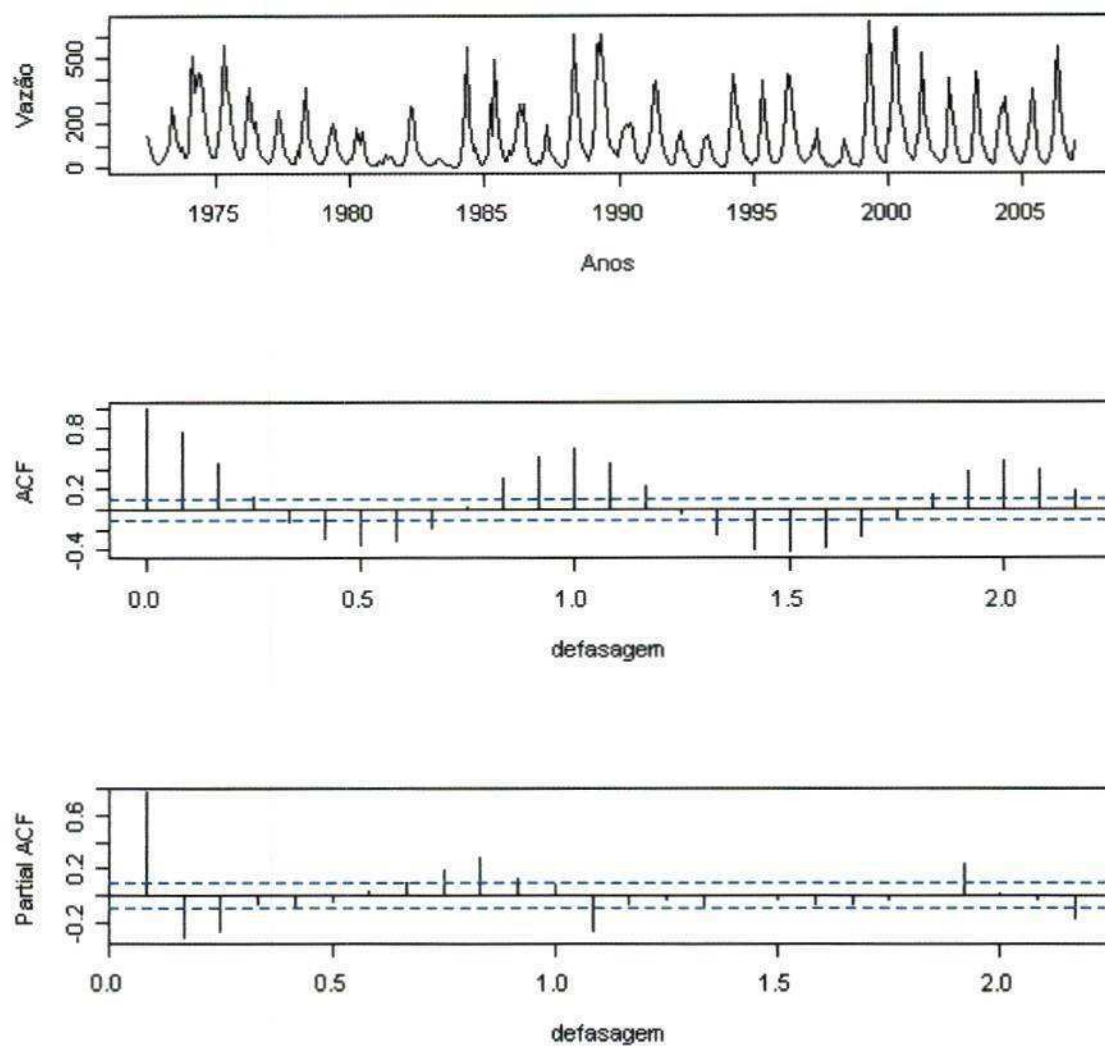


Figura A1. Série de vazões mensais ( $m^3/s$ ) e correlogramas da ACF e PACF em Arapari

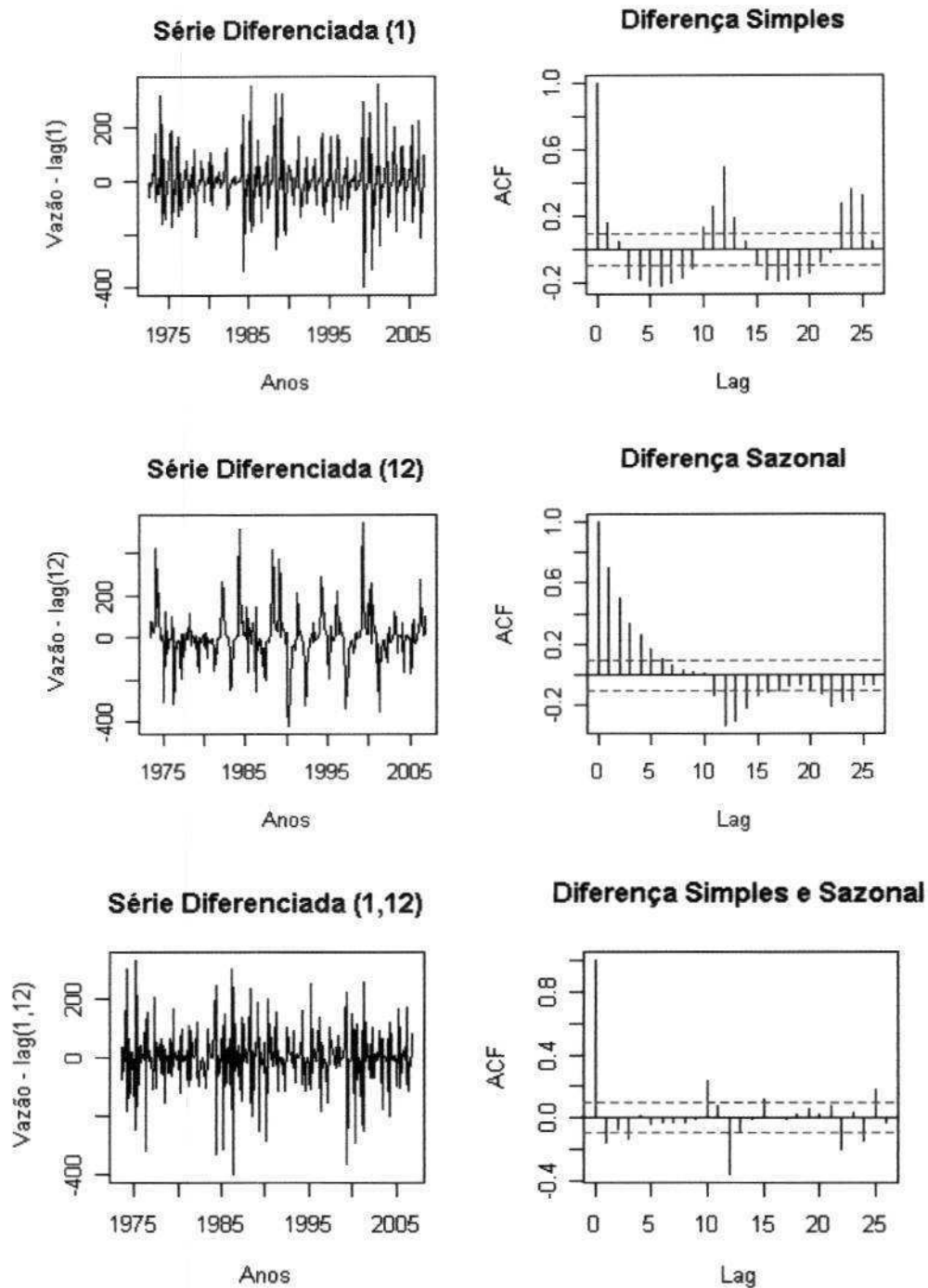


Figura A2. Série de vazões mensais ( $m^3/s$ ) diferenciada e correlograma da ACF em Arapari

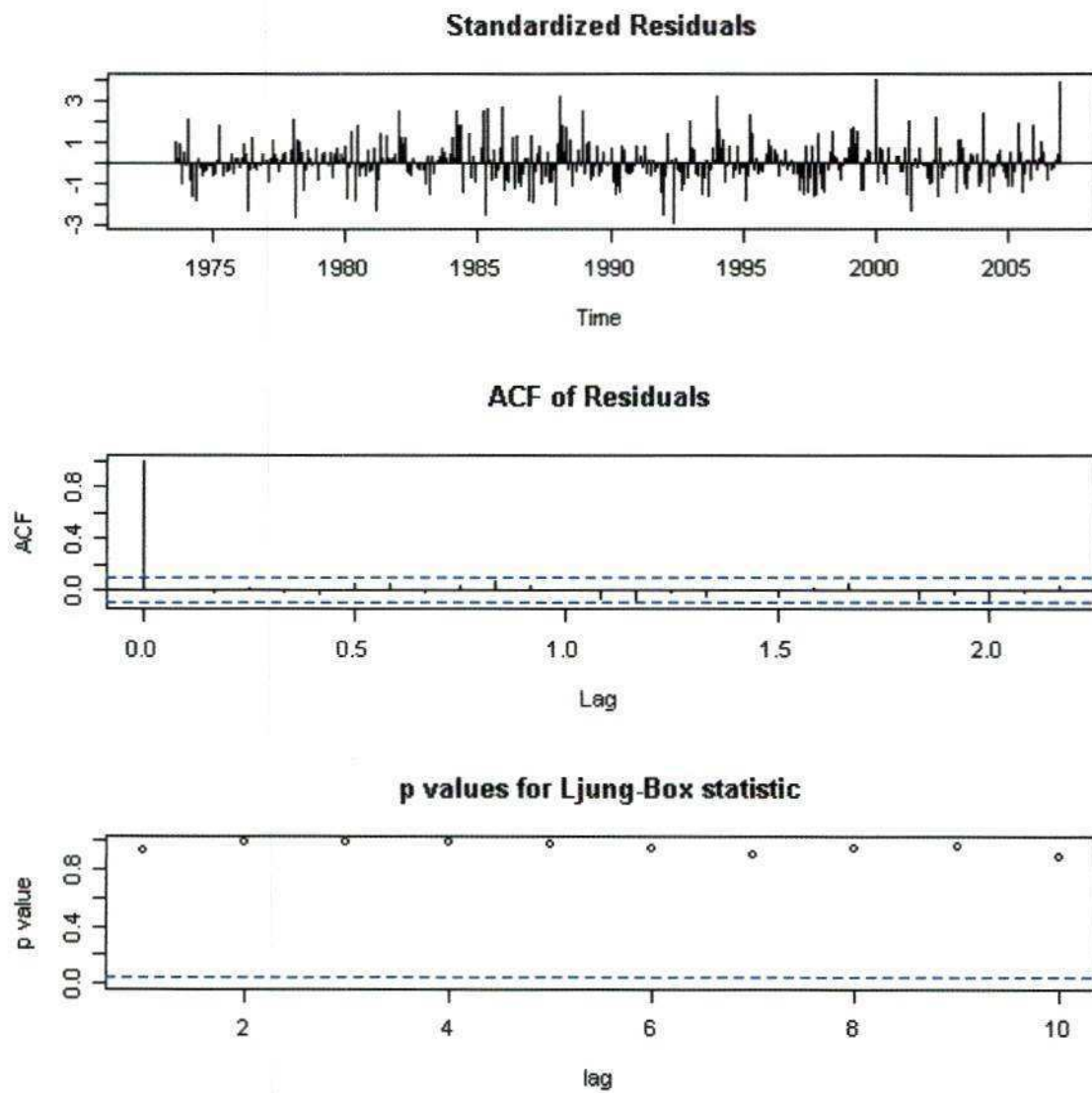


Figura A3. Análise dos resíduos da série de vazão mensal de Arapari

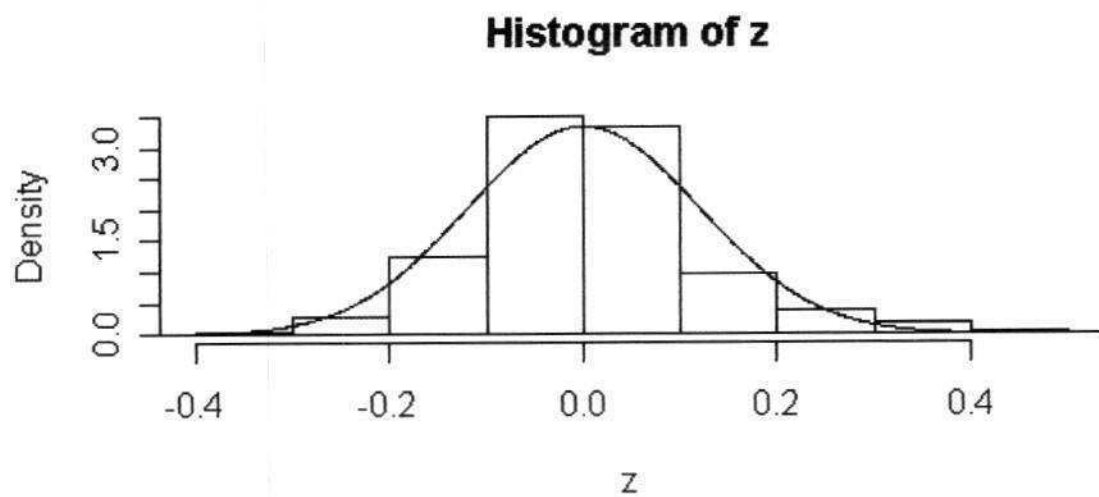


Figura A4. Função distribuição de probabilidade Normal dos resíduos da série de vazões mensais em Arapari

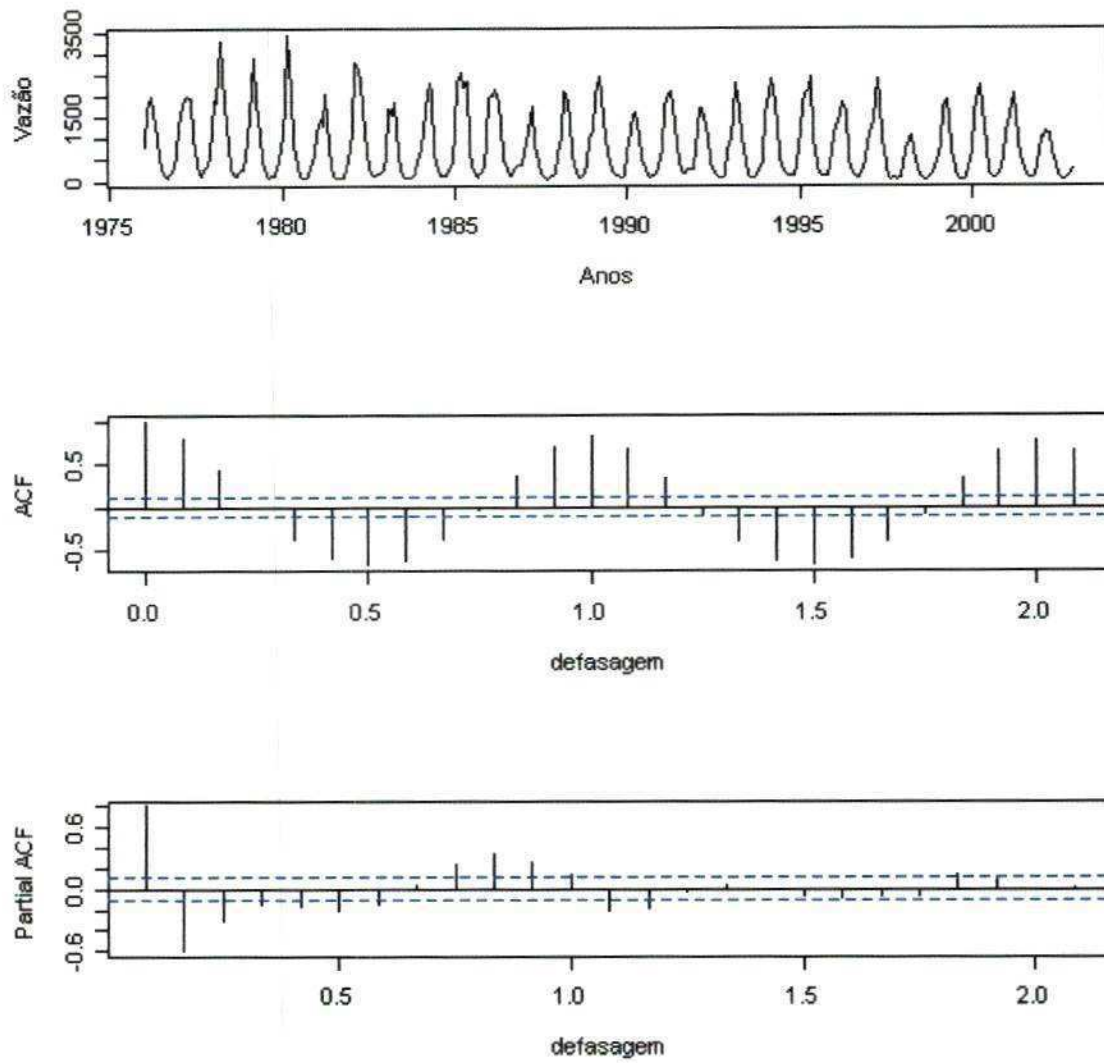


Figura A5. Série de vazões mensais ( $m^3/s$ ) e correlogramas da ACF e PACF de Cajueiro

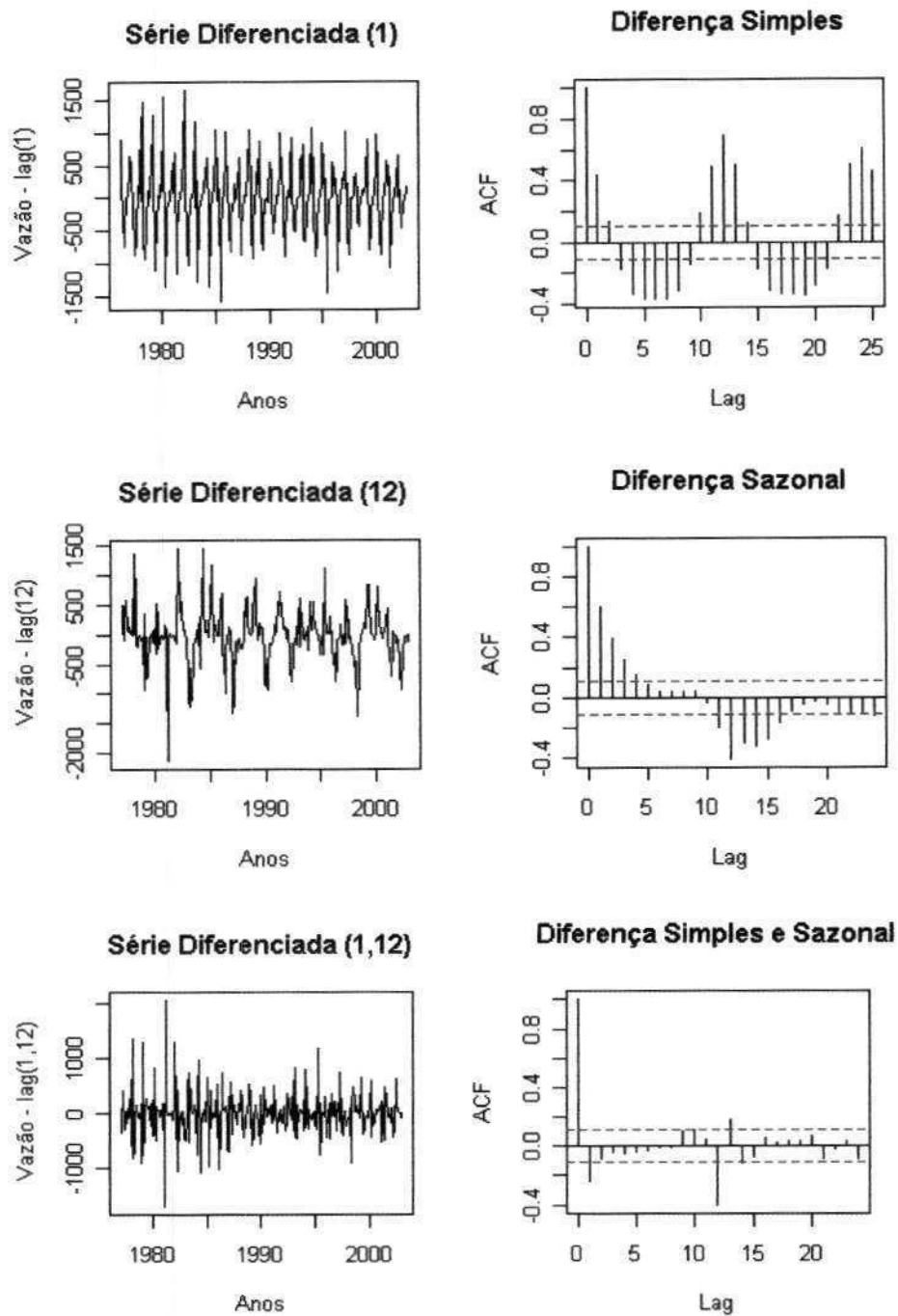


Figura A6. Série de vazões mensais ( $m^3/s$ ) diferenciada e correlograma da ACF em Cajueiro

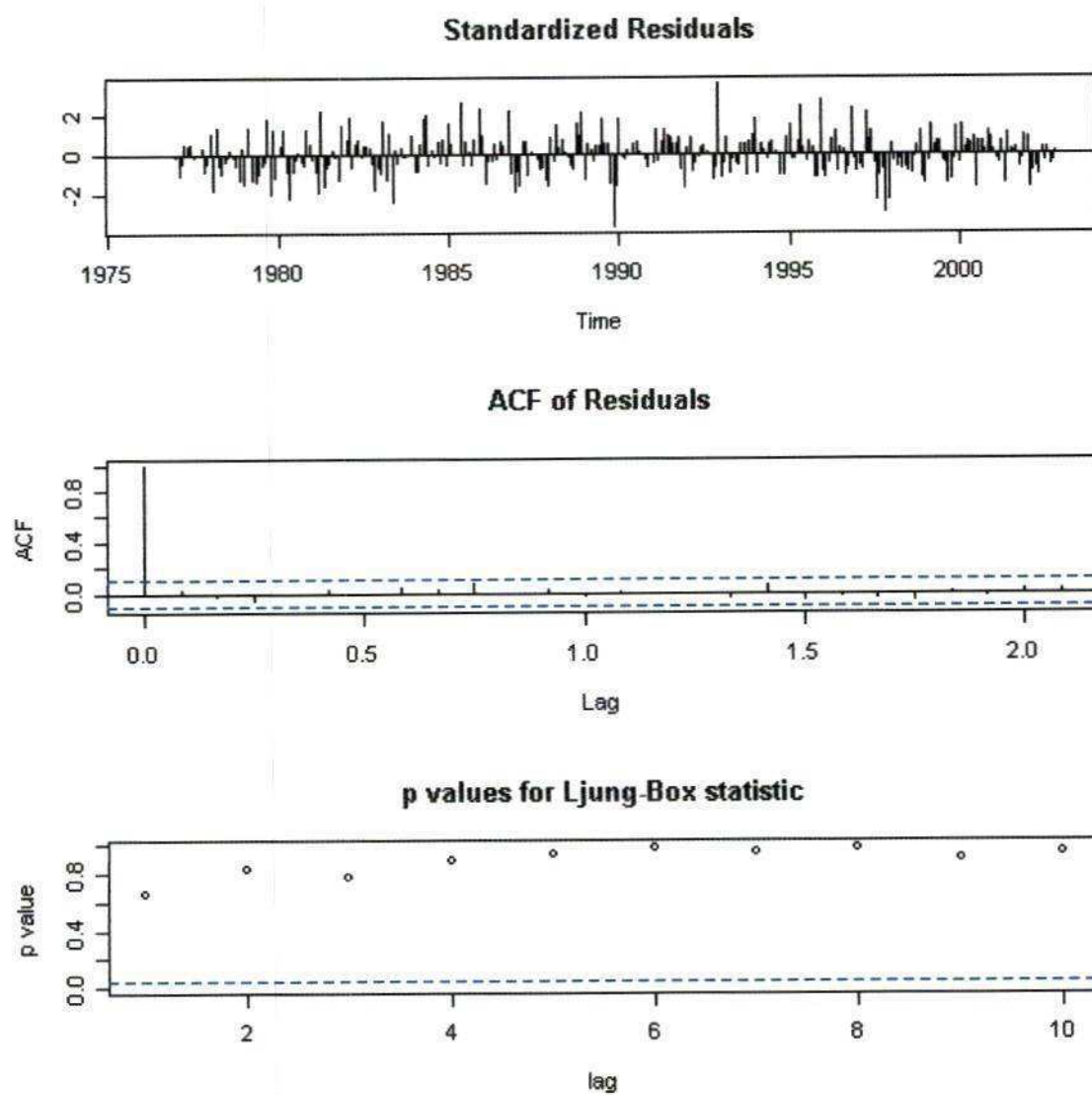


Figura A7. Análise dos resíduos da série de vazões mensais de Cajueiro

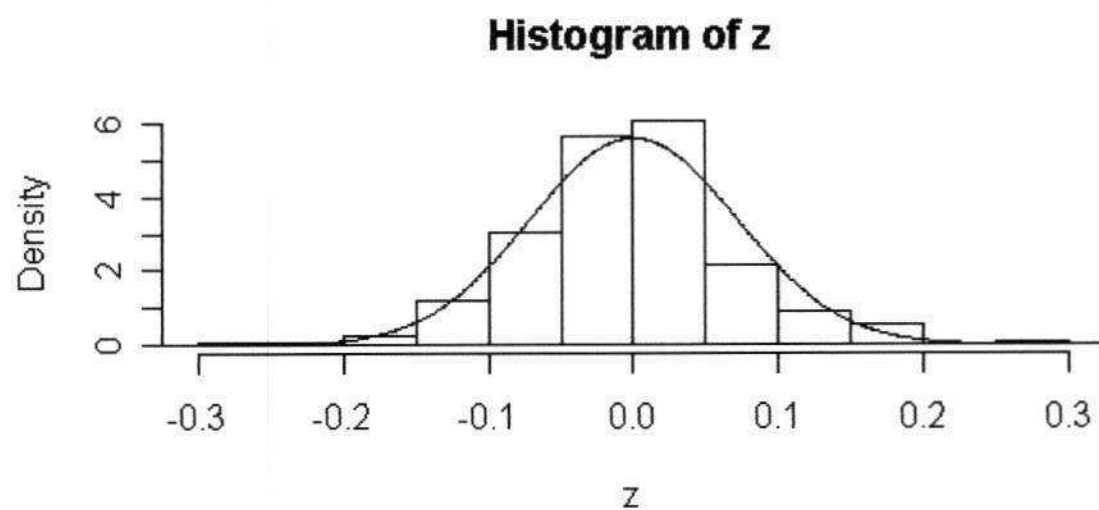


Figura A8. Função distribuição de probabilidade Normal dos resíduos da série de vazões mensais em Cajueiro