



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI
EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

RENATA KELEN CARDOSO CÂMARA

**PREVISÃO ESTOCÁSTICA DE NÍVEL
FLUVIOMÉTRICO PARA CIDADE DE
MARABÁ-PA: MÉTODO DE BOX & JENKINS**

Belém – Pará
2012

RENATA KELEN CARDOSO CÂMARA

PREVISÃO ESTOCÁSTICA DE NÍVEL FLUVIOMÉTRICO PARA CIDADE DE MARABÁ-PA: MÉTODO DE BOX-JENKINS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em convênio com o Museu Paraense Emílio Goeldi e a EMBRAPA Amazônia Oriental, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais. Área de concentração Física do Clima.

Orientador: Prof. Dr. Edson José Paulino da Rocha

Coorientador: Prof. Dr. Joaquim Carlos Barbosa Queiroz

Belém – Pará

2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

C172p Câmara, Renata Kelen Cardoso

Previsão estocástica de nível fluviométrico para cidade de Marabá-PA: método de Box-Jenkins / Renata Kelen Cardoso Câmara; Orientador: Edson José Paulino da Rocha; Coorientador: Joaquim Carlos Barbosa. Queiroz - 2012.

119fl.: il.

Dissertação (mestrado em ciências ambientais) – Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e EMBRAPA, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2012.

1. Hidrologia. 2. Modelagem hidrológica. 3. Enchente. 3. Marabá (PA). I. Rocha, Edson José Paulino da, *orient.* II. Queiroz, Joaquim Carlos Barbosa, *coorient.* III. Universidade Federal do Pará IV. Título.

CDD 22º ed.: 551.48098115

RENATA KELEN CARDOSO CÂMARA

PREVISÃO ESTOCÁSTICA DE NÍVEL FLUVIOMÉTRICO PARA CIDADE DE MARABÁ-PA: MÉTODO DE BOX-JENKINS

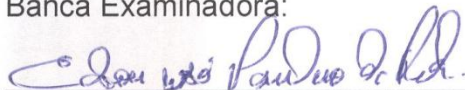
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em convênio com o Museu Paraense Emílio Goeldi e a EMBRAPA Amazônia Oriental, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais. Área de concentração Física do Clima.

Data da aprovação: 30/04/2012

Conceito: BOM

Banca Examinadora:

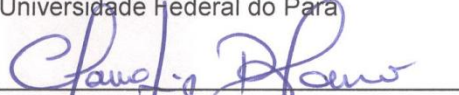
Banca Examinadora:



Orientador

Edson José Paulino da Rocha

Universidade Federal do Pará



Cláudio José Cavalcante Blanco

Universidade Federal do Pará



Alan Cavalcanti da Cunha

Universidade Federal do Amapá



Everaldo Barreiros de Souza

Universidade Federal do Pará

*À minha mãe, **Maria Inêz**, pela
dedicação, amor e confiança que
sempre depositou em mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me guiar durante esse longo caminho;

À minha mãe, em especial, pelo apoio e incentivos em todos os momentos da minha vida e aos meus irmãos;

Ao professor e orientador Edson José Paulino da Rocha;

Ao professor Dr. João Marcelo Brazão Protázio pela contribuição com essa dissertação através das explicações sobre a modelagem ARIMA e conceitos estatísticos;

Ao professor Dimitri Nechet por partilhar seu conhecimento e apoio nos altos e baixos dessa caminhada;

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Joaquim Carlos Barbosa Queiroz;

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi e Embrapa Amazônia Oriental, que com os seus conhecimentos contribuíram para o meu crescimento profissional;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq - Brasil pela bolsa concedida.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pelo fornecimento de dados de precipitação.

Ao Laboratório de Análises de Imagens do Trópico Úmido (LAIT), na pessoa de Paulo José de Oliveira Alves e Wilson da Rocha Nascimento Júnior, pelo suporte na geração dos mapas, como uso software ArcGis 10.0, utilizados na pesquisa.

Aos membros da minha banca pelas correções e contribuições.

Aos os meus colegas do curso de mestrado, que tive o prazer de conhecer e conviver ao longo desse tempo em especial, a Marcela Pompeu, Josinete Monteles, Carla Costa e Sirlene Castro.

À minha amiga Venize Teixeira que mesmo distante contribuiu com essa pesquisa.

À Ionara Siqueira, Vânia Franco, Josiane Santos, Wanda Ribeiro e Camila da Silva pelas vivências e muitas ajudas no cotidiano.

Ao Antônio Sousa por toda a paciência, compreensão e ajuda nos momentos necessários.

E a todos que contribuíram direta e indiretamente com esta jornada de mestrado.

*“Só tem o direito de criticar aquele
que pretende ajudar.”*

Abraham Lincoln

*“Se a ciência é filha da observação e
da experiência, estes são, em
verdade, os processos pelos quais
principalmente deve ser ensinada.”*

Theodomiro Carneiro Santiago

RESUMO

O Município de Marabá- PA, situado na região Amazônica, sudeste do Estado do Pará, sofre anualmente com eventos de enchentes, ocasionados pelo aumento periódico do rio Tocantins e pela situação de vulnerabilidade da população que reside em áreas de risco. A defesa civil estadual e municipal anualmente planeja e prepara equipes para ações de defesa no município. Nesta fase o monitoramento e previsão de eventos de enchentes são importantes. Portanto, com o objetivo de diminuir erros nas previsões hidrológicas para o Município de Marabá, desenvolveu-se um modelo estocástico para previsão de nível do rio Tocantins, baseado na metodologia de Box e Jenkins. Utilizou os dados de níveis diários observados nas estações hidrológicas de Marabá e Carolina e Conceição do Araguaia da Agência Nacional de Águas (ANA), do período de 01/12/ 2008 a 31/03/2011. Efetuou-se o ajustamento de três modelos (M_t , N_t e Y_t), através de diferentes aplicativos estatísticos: o SAS e o Gretl, usando diferentes interpretações do comportamento das séries para gerar as equações dos modelos. A principal diferença entre os aplicativos é que no SAS usa o modelo de função de transferência na modelagem. Realizou-se uma classificação da variabilidade do nível do rio, através da técnica dos Quantis para o período de 1972 a 2011, examinando-se apenas as categorizações de níveis ACIMA e MUITO ACIMA do normal. Para análise de impactos socioeconômicos foram usados os dados das ações da Defesa Civil Estado do Pará nas cheias de 2009 e 2011. Os resultados mostraram que o número de eventos de cheias com níveis MUITO ACIMA do normal, geralmente, podem estar associados a eventos de La Niña. Outro resultado importante: os modelos gerados simularam muito bem o nível do rio para o período de sete dias (01/04/2011 a 07/04/2011). O modelo multivariado N_t (com pequenos erros) representou o comportamento da série original, subestimando os valores reais nos dias 3, 4 e 5 de abril de 2011, com erro máximo de 0,28 no dia 4. O modelo univariado (Y_t) teve bons resultados nas simulações com erros absolutos em torno de 0,12 m. O modelo com menor erro absoluto (0,08m) para o mesmo período foi o modelo M_t , desenvolvido pelo aplicativo SAS, que interpreta a série original como sendo não linear e não estacionária. A análise quantitativa dos impactos fluviométricos, ocorridos nas enchentes de 2009 e 2011 na cidade de Marabá, revelou em média que mais de 4 mil famílias sofrem com estes eventos, implicado em gastos financeiros elevados. Logo, conclui-se que os modelos de previsão de níveis são importantes ferramentas que a Defesa Civil, utiliza no planejamento e preparo de ações preventivas para o município de Marabá.

Palavras-chave: Hidrologia. Modelagem hidrológica. Enchente. ARIMA. Marabá (PA).

ABSTRACT

Marabá-PA city, located in the Amazon region, Southeast of Pará State, suffer annually with flood events, caused by periodic increase of Tocantins River and vulnerability of the population living in risk areas. State and municipal civil defense plans and annually prepare teams for actions to defend the city. At this stage the monitoring and prediction of flood events are important. Therefore, in order to reduce errors in hydrological forecasts for Marabá city, developed a stochastic model to predict the level of Tocantins River, based on the methodology of Box and Jenkins. Used data from daily levels observed in the hydrological stations of National Water Agency (ANA) at Marabá, Carolina and Conceição do Araguaia, from 01/12/2008 to 31/03/2011. We conducted the adjustment of three models (M_t , N_t and Y_t), using different statistical applications: SAS and Gretl, using different interpretations of the behavior of the series to generate models equations. The main difference between the applications is that the SAS uses the model of transfer function modeling. There was a sort of variable water level, through the technique of quantiles for the period 1972 to 2011, examining only levels categorizations and MUCH ABOVE ABOVE normal. For analysis of socioeconomic impacts were used the data of the shares of Civil Defense State of Pará in the floods of 2009 and 2011. The results showed that the number of events filled with much higher levels than normal, generally, may be associated with La Niña events. Another important result: generated models represented well the level of the river for seven days (from 04/01/2011 to 04/07/2011). The multivariate model N_t (with small errors) represented the behavior of original series, underestimating the real values on days 3, 4 and 5 April 2011, with a maximum error of 0.28 on day 4. The univariate model (Y_t) had good results in simulations with absolute errors of around 0.12 m. The model with the lowest absolute error (0.08 m) for the same period was the model M_t , application developed by SAS, who plays the original series as nonlinear and non stationary. Quantitative analysis of the impacts fluvimetric, floods occurred in 2009 and 2011 at Marabá city, revealed that on average more than 4000 families suffer from these events, implicated in high financial costs. Therefore, concludes that the levels forecast models are important tools that the Civil Defense, uses in the planning and preparation of preventive actions for the city of Marabá.

Key words: Hydrology. Hydrology Modeling. Flood. ARIMA. Maraba (PA)

.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Perfil esquemático do processo de enchente e inundação.....	28
Figura 2 – Limites da RHTA e os Estados que a compõem.....	39
Figura 3 – Área de estudo, sub-bacia limitada por Carolina, Conceição do Araguaia e Marabá.	44
Figura 4 – Vista aérea de Marabá – confluência dos rios Itacaiunas e Tocantins.....	46
Figura 5 – Aspectos de cheias na Marabá antiga em 1926.....	47
Figura 6 – Aspectos da cheia de Marabá em 1980.....	48
Figura 7 – Níveis máximos mensais em Marabá (Série: 1972 – 2011).....	49
Figura 8 – Simulação da área de inundação em Marabá, observando as enchentes que os níveis do rio alcançam 8,12 (a), 10,12 (b), 12,12(c) e 16,12 (d) metros.	50
Figura 9 – Estágio de construção do modelo.....	53
Figura 10 – Sistema dinâmico da função de transferência.....	55
Figura 11 – Esquematização das categorias usando a técnica dos percentis aplicado aos dados de Níveis.....	65
Figura 12 – Níveis diários do rio Tocantins em Marabá no período da enchente do ano de 2009.	67
Figura 13 – Situações das inundações no ano de 2009.	67
Figura 14 – Níveis diários do rio Tocantins em Marabá no período da enchente do ano de 2011.....	68
Figura 15 – Situações da enchente do ano de 2011.....	69
Figura 16 – Precipitação Total Anual em Marabá (1973 – 2011).	72
Figura 17 – Anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) em °C, para o trimestre FMA de 1979, desvios em relação ao período de 1954 – 2011.....	73
Figura 18 – Precipitação Pluviométrica Média Mensal de Marabá (1973 – 2011).....	74
Figura 19 – Média dos Níveis Máximos Mensais de Marabá (1972 – 2011).	75
Figura 20 – Níveis Máximos Médios Anuais Normalizados de Marabá (1972 – 2011).....	76
Figura 21 – Comportamento do Nível do rio, em três municípios da sub-bacia de estudo.....	77
Figura 22 – Primeira Diferença aplicada à série de Carolina, no período de 01/12/2008 a 31/03/2011.....	78
Figura 23 – Primeira Diferença aplicada à série de Conceição do Araguaia, no período de 01/12/ 2008 a 31/03/2011.....	79

Figura 24 – Primeira Diferença aplicada à série de Marabá, no período de 01/12/2008 a 31/03/2011	79
Figura 25 – Correlogramas da FAC e da FACP das séries (a) Carolina e (b) Carolina-D1	80
Figura 26 – Correlogramas da FAC e da FACP das séries (a) Conceição do Araguaia e (b) Conceição do Araguaia-D1	81
Figura 27 – Correlogramas da FAC e da FACP das séries (a) Marabá e (b) Marabá-D1	81
Figura 28 – Correlograma cruzado Marabá vs Carolina, os limites (linhas tracejadas) são de 2 erros-padrão	85
Figura 29 – Correlograma cruzado Marabá vs Conceição do Araguaia, os limites (linhas tracejadas) são de 2 erros-padrão	86
Figura 30 – Modelo Observado e ajustado para Marabá	89
Figura 31 – Previsão de sete dias para Marabá	90
Figura 32 – Gráficos com as análises da série efetiva e ajustada, obtidas do modelo Y_t	92
Figura 33 – Previsão de sete dias para Marabá (Y_t)	93
Figura 34 – Correlograma Cruzado Marabá vs Carolina (Conceição do Araguaia)	94
Figura 35 – Gráficos com as análises da série efetiva e ajustada, obtidas do modelo N_t	96
Figura 36 – Previsão de sete dias para Marabá (N_t)	97
Figura 37 – Marabá Observado comparado com os modelos previstos.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intensidade das Chuvas.....	22
Tabela 2 – Características morfométricas de bacias hidrográficas.....	24
Tabela 3 – Principais impactos da urbanização sobre uma bacia hidrográfica	25
Tabela 4 – Classificações das inundações	27
Tabela 5 – Classificação dos Modelos.	35
Tabela 6 – Distribuição em Áreas das Unidades de Federação Incidentes na RHTA.....	40
Tabela 7 – Subdivisões Hidrográficas da RHTA.	41
Tabela 8 – Caracterização dos tipos de solos que ocorrem na sub-bacia.	45
Tabela 9 – Número de pessoas atingidas em relação ao nível alcançado das enchentes	49
Tabela 10 – Dados das estações fluviométricas da sub-bacia RHTA.	51
Tabela 11 – Tipos de testes estatísticos	61
Tabela 12 – Métricas para análises de erros na Previsão	63
Tabela 13 – Estatísticas básicas da SE nos anos 2009 e 2011	69
Tabela 14 – Ocorrência das categorias de níveis agrupadas por décadas.	70
Tabela 15 – Ocorrências dos eventos de El Niño e La Niña.	71
Tabela 16 – Os valores e intervalos mensais da categorização do nível (m).	71
Tabela 17 – Resultados das análises e dos parâmetros obtidos para modelo Zt (MA (4))......	82
Tabela 18 – Resultados das análises e dos parâmetros obtidos para modelo Ft (ARMA (2)) ..	83
Tabela 19 – Resultados das análises e dos parâmetros obtidos para modelo Xt (AR (4)).	83
Tabela 20 – Análise dos Resíduos para o modelo Zt.	84
Tabela 21 – Análise dos Resíduos para o modelo Ft.	84
Tabela 22 – Análise dos Resíduos para o modelo Xt.	84
Tabela 23 – Análise das correlações cruzadas entre Marabá e Carolina.....	85
Tabela 24 – Análise das correlações cruzadas entre Marabá e Conceição do Araguaia	86
Tabela 25 – Estimativas e estatísticas dos parâmetros obtidos para modelo Mt.....	87
Tabela 26 – Análise dos Resíduos para o modelo Mt	88
Tabela 27 – Correlações cruzadas entre os resíduos e a série Carolina	88
Tabela 28 – Correlações cruzadas entre os resíduos e a série Conceição do Araguaia.....	89
Tabela 29 – Resultados das análises e dos parâmetros obtidos para modelo univariado autorregressivo de terceira ordem (AR (3)) para Marabá	92
Tabela 30 – Erros da estimação	93
Tabela 31 – Resultados das análises e dos parâmetros obtidos para modelo multivariado Nt	95

Tabela 32 – Erros da estimação	96
Tabela 33 – Previsão de níveis em Marabá para 7 dias	98
Tabela 34 – Principais Diferenças entre os Aplicativos estatísticos	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIC	– Akaike Information Criterion (Critério de Informação de Akaike)
ANA	– Agência Nacional de águas
ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
AR	– AutoRegressive (Autoregressivo)
ARIMA	– Auto Regressive Integrated Moving Average (Auto Regressivo Integrado de Médias Móveis)
AST	– Análise de Séries Temporais
BIC	– Baysean Information Criterion (Critério de Informação Bayesiano de Schwarz)
BJ	– Box & Jenkins
DA	– Dipolo do Atlântico
DNAEE	– Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica
ENSO	– El Niño/Oscilação Sul
FGV	– Fundação Getúlio Vargas
GRET	– Regression, Econometrics and Time-series Library
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
HQC	– Hannan & Quinn Criterion (Critério de Informação de Hannan e Quinn)
INMET	– Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LI	– Linha de Instabilidade
MA	– Moving Average (Médias Móveis)
MAPE	– Mean Absolute Percentile Error (Erro Percentual Médio Absoluto)
ME	– Mean Error (Erro Médio)
MMA	– Ministério do Meio Ambiente
MLE	– Maximum Likelihood Estimate (Método da Máxima Verossimilhança)
MSE	– Mean Square Error (Erro Quadrático Médio)
MVE	– Máxima Verossimilhança Exata
NOAA	– National Oceanic and Atmospheric Administration (Administração Oceânica e Atmosférica Nacional)
PDUM	– Plano de Desenvolvimento Urbano de Marabá
OAT	– Oceano Atlântico Tropical
OPE	– Oceano Pacífico Equatorial
RHTA	– Região Hidrográfica Tocantins-Araguaia
SAS	– Sistema de Análises Estatísticas (Statistical Analysis System)
SE	– Standard Error (Erro Padrão)
TSM	– Temperatura da Superfície do mar
UN-ISDR	– Nações Unidas-Estratégia Internacional para Redução de Desastres (United Nations International Strategy for Disaster Reduction)
Z	– Standard score (Estatística Z)
ZCIT	– Zona de Convergência Intertropical
ZCAS	– Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMA DA PESQUISA	19
1.2 HIPÓTESE	19
1.3 OBJETIVOS	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 BACIAS E SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS	23
2.2 DESASTRES NATURAIS	25
2.2.1 Enchentes e Inundações	26
2.3 FORÇANTES METEOROLÓGICAS	29
2.4 MODELAGEM ESTATÍSTICA DE PREVISÃO	33
2.4.1 Modelagem ARIMA	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	39
3.1.1 Área de Aplicação do Modelo	43
3.1.2 O Município de Marabá-PA	45
3.2 BASE DE DADOS	51
3.2 METODOLOGIA	52
3.2.1 Modelagem ARIMA	52
3.2.1.1 Função de Tranfêrencia	54
3.2.1.2 Função de Correlação Cruzada	56
3.2.1.3 Etapas do ciclo iterativo	57
3.2.2 Descrição do método dos Quantis	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1 IMPACTOS DO NÍVEL FLUVIOMÉTRICO EM MARABÁ: CASO 2009 E 2011	66
4.2 VARIABILIDADE DO NÍVEL DO RIO TOCANTINS	69
4.3 MODELAGEM ESTATÍSTICA	77
4.3.1 Modelo ARIMA – SAS	78
4.3.2 Modelo ARIMA –Gretl	90
4.3.3 Comparações dos Modelos	97
4.3.4 Limitações dos Modelos	98
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	99
REFERÊNCIAS	101

ANEXOS	113
ANEXO A– Classificação dos Modelos Hidrológicos	114
ANEXO B– Resultados dos correlogramas das FAC e FACP da série Marabá.....	115
ANEXO C– Resultados da FCC da série Marabá, com Carolina e Conceição do Araguaia.	116
ANEXO D– Níveis Máximos atingidos pelas cheias no rio Tocantins, em Marabá (1972 a 2011).....	117
ANEXO E– Topografia da cidade de Marabá.	118
ANEXO F– Delimitação dos bairros e folhas, segundo a PMM.	119

1 INTRODUÇÃO

Na Amazônia, a maioria das cidades localizadas às margens de rios sofre com os eventos extremos de enchentes e secas. Os impactos se mostraram crescentes com a acentuação das degradações e desequilíbrios ambientais, ocasionados pelas intervenções humanas, que afetam os elementos do cenário natural, o que torna a rede fluvial um importante recurso, que juntamente com sua bacia de captação, deve ser preservada (CUNHA; GUERRA, 1999). Por outro lado, observa-se a crescente ocupação desordenada de áreas de risco de inundações, associadas à falta de planejamento dos gestores da região. Neste contexto, a bacia hidrográfica apresenta-se como um excelente laboratório para o estudo de problemas socioambientais, visando prevenir desastres e conseqüentemente, minimizar os problemas sociais causados pelas enchentes e inundações.

Estudos na área da hidrologia mostraram que se podem evitar grandes desastres naturais através de previsões hidrológicas, sendo que as primeiras experiências de previsão estão relacionadas com a busca do homem em prever a ocorrência de enchentes (RODDA, J.C.; RODDA, H.J.E., 2000). Um dos grandes desafios enfrentados atualmente pela comunidade científica é aperfeiçoar modelos de previsão, com o objetivo de alertar a sociedade sobre a ocorrência futura de um evento. Portanto, buscar a prevenção de impactos gerados pela ação inevitável e implacável de alguns fenômenos naturais (enchentes, estiagem e outros), é importante para amenizar os danos e prejuízos de uma sociedade.

Na hidrologia, discute-se e aprimora-se em cada instante o conhecimento sobre os diferentes fenômenos naturais que constituem o ciclo hidrológico para aperfeiçoar modelos. Sendo a região Amazônica a maior rede de drenagem do mundo, o estudo é de fundamental importância para lidar com os extremos hidrológicos que ocorrem na região. Em vista disso, a modelagem é utilizada como ferramenta para conhecer, simular e prever cenários associados a esses eventos extremos (MORAES, 2003).

Segundo Tucci (2002) a modelagem é uma ferramenta desenvolvida para entender, representar e prever o comportamento do ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e pelos processos envolvidos, sendo que o modelo por si só não é um objetivo, mas uma ferramenta para alcançá-lo. Este é usado para antecipar os eventos críticos, com a possibilidade, por exemplo, avaliar os impactos da urbanização de uma bacia para que se possam efetivar as medidas preventivas necessárias. Tucci (1998) afirma que os modelos podem ser classificados em diferentes aspectos: 1) a existência ou não de relações espaciais – concentrado ou distribuído;

2) o tipo de variáveis utilizadas na modelagem – estocástico ou determinístico; 3) o tipo de relações entre essas variáveis – conceitual ou empírico; e, 4) a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos).

Na modelagem hidrológica utiliza mais 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 afluições. Nos modelos físicos, as previsões são obtidas a partir de dados de precipitações observadas ou previstas, enquanto que nos modelos estocásticos estas são obtidas tendo como base as últimas 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).

Os extremos hidrológicos na Bacia Amazônica são afetados por variações climáticas globais, portanto o regime hidrológico do rio não é resultado apenas do regime de precipitação que ocorre na bacia, mas também é influenciado por sistemas remotos que modulam regionalmente a precipitação na Amazônia, (CCST; INPE; MOHC, 2011).

A relação das vazões nos rios da Amazônia são influenciadas pelos sistemas meteorológicos como a ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), que são modulados por mecanismos associados às anomalias de TSM nos oceanos Pacífico e Atlântico, como o Gradiente Inter-Hemisférico ou Dipolo do Atlântico (DA) e o ENSO – El Niño/Oscilação Sul é bastante evidente (CARVALHO et al, 2002; CARVALHO; LIEBMANN, 2004; MARENGO et al., 1998; MONTROY, 1997; SANTOS, 2008; SOUZA et al., 2000).

Souza, et al (op.cit), apresentam-se resultados observacionais sobre as influências dos modos de variabilidade dos oceanos sobre as precipitações na Amazônia e indicaram que durante o evento La Niña (Pacífico frio) e a fase negativa de Dipolo (Atlântico Tropical Sul - quente e Norte - frio) a precipitação fica acima da normal, no verão e outono austral da Amazônia e Nordeste Brasileiro (NEB), confirmando a influência destes nos índices pluviométricos acima da média, na vazão (níveis) da bacia hidrográfica.

Na literatura, diversos trabalhos estudaram o comportamento extremo das chuvas nos trópicos e subtropicais sul-americanos (QUADRO, 1994; ROCHA, 2001; SOUZA et al., 2005), contudo uma análise desta variável associada à variabilidade em bacias hidrográficas é fundamental como suporte aos modelos hidrológicos que utilizam a precipitação como uma variável de entrada.

De acordo com o banco de dados global do Emergency Database (EM-DAT) (2012), nos últimos 112 anos (1900 – 2012), o Brasil registrou 112 casos de desastres naturais, causados por enchentes e inundações. Quando as inundações e enchentes atingem um sistema social, causam sérios danos e prejuízos que excedem a capacidade da comunidade ou da sociedade atingida em conviver com o impacto, sendo assim, caracterizado como um desastre natural (MARCELINO, 2008; TOBIN; MONTZ, 1997). No município de Marabá destacam-se as enchentes 1978, 1979, 1980, 1990, 2009 e 2011 (MMA; SPRH; ANA, 2012).

Segundo United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UN-ISDR) (2009), as inundações e enchentes são problemas geoambientais derivados de fenômenos ou perigos naturais de caráter hidrometeorológico, ou seja, aqueles de natureza atmosférica, hidrológica ou oceanográfica. Sabe-se hoje que as inundações estão relacionadas com a quantidade e intensidade da precipitação (SOUZA, 1998). Esses tipos de desastres são, praticamente, impossíveis de serem erradicados, devido sua origem natural. Contudo, podem ser desenvolvidos métodos de prevenção e monitoramento de tais eventos, visando a diminuição de seus efeitos, por exemplo: a diminuição de pessoas afetadas por estes desastres. Com base nisso, a previsão com o uso de modelos hidrológicos, em órgãos de Defesa Civil é importante para a redução de danos e minimização de prejuízos a população atingida.

Atualmente, para essa região é utilizado o modelo empírico e estocástico, que é caracterizado por ser um modelo de regressão linear simples, baseado em series temporais univariadas, na qual a variável histórica utilizada é a vazão (nível). Contudo, apresenta erros aleatórios na análise de previsão hidrológica que são provenientes de variáveis não consideradas, cita-se como exemplo, a precipitação na bacia intermediária (SANTOS, 2008).

Assim, no âmbito de impactos causados pela variabilidade dos regimes hidrológicos das principais bacias localizadas na Amazônia, essa pesquisa soma com outras, com o escopo de melhorar e aprofundar o conhecimento científico e entendimento dos processos hidrológicos da bacia do rio Tocantins. Além de desenvolver modelos mais acurados, para serem utilizados como ferramenta que norteiam as ações da Defesa Civil, especificamente na cidade de Marabá-PA. Para tanto, utilizou-se o modelo hidrológico empírico e estocástico, com base em dados diários de níveis e na metodologia de Box e Jenkins (BJ) ou ARIMA “Auto Regressive Integrated Moving Average”. Este método tem como vantagem em relação aos outros, usar o modelo de regressão linear, e ainda utilizar o modelo ARIMA para suavização de erros aleatórios.

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

O período chuvoso no município de Marabá-PA é destacado pela enchente do rio Tocantins, pois o mesmo quando ocorre o transbordamento, inunda o município causando sérios danos e prejuízos à população.

1.2 HIPÓTESE

- ✓ A metodologia estatística de BJ aplicada à previsão de nível em Marabá apresenta resultados mais precisos, podendo auxiliar no monitoramento do nível do rio;
- ✓ A metodologia estatística de BJ, usando o modelo função de transferência apresenta ínfimos erros à previsão de nível para Marabá.

1.3 OBJETIVOS

Objetiva-se, de forma geral, o desenvolver de um modelo hidrológico baseado no método de BJ para previsão do nível do rio Tocantins no município de Marabá-PA.

De forma mais específica, objetiva-se realizar:

- ✓ Comparar resultados dos modelos obtidos;
- ✓ Classificar e analisar eventos de cheias do rio Tocantins em Marabá;
- ✓ Identificar e quantificar os impactos socioeconômicos causados pelas enchentes na cidade de Marabá, no período chuvoso de 2009 e 2011.

Estruturou-se esta dissertação com os itens de: **Introdução:** onde se justifica a necessidade de utilização de modelos hidrológicos de previsões de níveis para alertar enchentes; **Fundamentação teórica:** faz-se uma descrição de alguns conceitos referentes à hidrologia, definições de variáveis e descrição dos modelos hidrológicos e outros; **Materiais e Métodos:** é caracterizada a área de estudo, como a localização, características físicas e climáticas e também são apresentados os dados e metodologias utilizadas, destacando-se a metodologia ARIMA usando o programa Gretl (Regression, Econometrics and Time-series Library) e o SAS (Statistical Analysis System), para a construção dos modelos univariados e multivariados. O método dos Quantis para categorização dos Eventos extremos de níveis registrados em Marabá. **Resultados e discussões:** são feitas as análises e discussões dos resultados obtidos. Observa-se a análise das precipitações e níveis relacionados com as ocorrências de El niño e La niña. Define-se o modelo hidrológico usado para previsões de níveis do rio Tocantins em Marabá-PA e discutem-se os impactos socioeconômicos das cheias ocorridas nos anos de 2009 e 2011 e por fim as **Conclusões e sugestões** de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Chow (1959), usando a definição proposta pelo *US Federal Council for Sciences and Technology*, conceitua-se hidrologia como sendo a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas, e sua relação com o meio ambiente, incluindo formas de vida relacionadas com toda a água da Terra. A unidade geográfica que receberá ênfase é a bacia hidrográfica, tomando-se por base que as alterações que ocorrem nesta área afetam não só a vida da comunidade que ali reside, mas também uma complexa rede ambiental. Portanto, o desequilíbrio provocado pelos eventos hidrológicos extremos, como as enchentes, que podem ser agravadas por ações antrópicas, como o desmatamento, a impermeabilização do solo urbano, possibilitando, a alteração do ciclo hidrológico.

O ciclo hidrológico pode ser dividido em etapas, devido às transformações de estado da água e sua distribuição na Terra. As etapas podem ser classificadas em: precipitação, interceptação, infiltração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo, transpiração e evaporação Tucci (1998). Segundo Villela e Mattos (1975), o ciclo hidrológico em uma bacia pode ser representado, em unidades de altura (mm ou polegadas) pela equação do balanço hídrico (eq.(1)).

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

Onde:

P = precipitação, R = escoamento superficial, G = escoamento subterrâneo o de base, E = evaporação, T = transpiração e ΔS = armazenamento.

A compreensão do ciclo hidrológico (SILVEIRA, 1997) é de fundamental importância para o entendimento dos efeitos causados pela modificação das características naturais da bacia hidrográfica, provocadas pela urbanização. A água diferencia-se dos demais recursos naturais pela notável propriedade de renovar-se continuamente, graças ao ciclo hidrológico. Embora o movimento cíclico da água não tenha princípio nem fim, para a meteorologia considera-se seu início para efeito de estudo descritivo pela precipitação. O estudo do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica é explicado seguindo os processos hidrológicos. Estes possuem duas direções predominantes de fluxo: vertical e horizontal. O vertical é representado pelos processos de precipitação e evapotranspiração e o horizontal, pelo escoamento na direção dos gradientes da superfície (escoamento superficial e rios) e do subsolo (escoamento subterrâneo), (TUCCI; CLARKE, 1997).

A distribuição espacial e temporal da água se dá através de interação de fenômenos variados, envolvendo componentes e processos específicos relacionados com a hidrosfera, atmosfera, biosfera e litosfera. As movimentações hidrológicas através destas camadas resultam em ocorrências de água nas três diferentes fases, presentes no ar, oceanos, rios, lagos, seres vivos, solos e rochas (COELHO NETTO; AVELAR, 2007). Em escala global, esta movimentação representa as trocas que ocorrem entre a terra, o oceano e a atmosfera.

A compreensão sistêmica das Bacias Hidrográficas, funcionalidade, organização interna, modificações antrópicas e naturais, pressupõe o conhecimento de variáveis que atuam em seus sistemas. Na Meteorologia e na Hidrologia a variável com grande importância para o estudo climático e para entendimento do comportamento das bacias hidrográficas é a precipitação. Logo, existe a necessidade de um estudo rítmico do elemento climático (precipitação), na escala local e regional e sua interação com as variações hidrológicas (nível e vazão).

A precipitação é entendida em Meteorologia e Hidrologia como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. Chuva, granizo, saraiva, e neve são formas diferentes de precipitação. Entretanto o que diferencia uma da outra é o estado em que a água se encontra (BERTONI, TUCCI 2001). No caso dessa pesquisa a precipitação a ser estudada é na forma líquida, a chuva, também conhecida como precipitação pluviométrica. Varejão (2006) conceitua-se, a chuva, como sendo a precipitação de gotas de água superior a 0,5 cm. Segundo Bertoni e Tucci (op.cit), a disponibilidade de precipitação numa bacia durante o ano é o fator determinante para quantificar, entre outros, o quanto esta influencia nos níveis fluviométricos dos corpos d'água de uma determinada bacia hidrográfica, seja pelo modo mais rápido (escoamento superficial) ou pelo modo mais lento (escoamento subterrâneo).

As características principais da precipitação são o seu total, duração e distribuição temporal e espacial. O total precipitado não tem significado se não estiver ligado à duração (BERTONI; TUCCI, 2002). Logo, é possível classificar a precipitação pluviométrica quanto à intensidade, como sendo, fraca, moderada ou forte. No entanto, não há uma classificação internacional destas designações, mas será utilizada a classificação da Tabela 1.

Tabela 1 – Intensidade das Chuvas

PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA	
<i>Classificação</i>	<i>Intervalo (mm/h)</i>
Chuva muito fraca	0,1– 5,0
Chuva fraca	5,0– 10
Chuva moderadamente fraca	10 – 15
Chuva moderada	15 – 20
Chuva moderada forte	20 – 25
Chuva forte	25 – 30
Chuva muito forte	30 – 50
Chuva extrema	> 50

Fonte: Adaptada de ASSIS et al.(1996).

Normalmente se considera como precipitação intensa aquela formada por um conjunto de chuvas originadas de uma mesma perturbação meteorológica, cuja intensidade ultrapasse certo valor em milímetro (mm) esperado, num dado intervalo de tempo. Geralmente a variação dessa perturbação ocorre desde alguns minutos até algumas dezenas de horas, e a área atingida pela mesma pode variar desde alguns poucos quilômetros até milhares de quilômetros quadrados (GARCEZ, 1974).

Segundo Garcez e Alvarez (2002), pode se conceituar chuva intensa como uma forte precipitação contínua com duração de poucas horas, no máximo 2, em geral. Sendo os intervalos curtos, de 5 minutos até 1 hora os que devem ter um estudo mais detalhado com relação a intensidade da precipitação. Durante as chuvas intensas, na área da bacia hidrográfica, a maior parte da vazão que passa por um rio é a água da própria chuva que não consegue penetrar no solo, devido este estar saturado. Logo, a chuva escoar imediatamente, atingindo os cursos d'água e aumentando a vazão. É desta forma que são formados os picos de vazão e as cheias ou enchentes (VELHAS,1991).

A partir disso, é possível observar que a influência da precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas depende diretamente da sua intensidade e duração. Dependendo da localidade e da quantidade de precipitação em cada sub-bacia. Consequentemente influenciará determinado rio, e este terá um aumento significativo do seu nível hidrológico; sendo que, se este acréscimo for superior a níveis hidrológicos de outros rios ou afluentes desta mesma bacia na planície de inundação, resultará em grandes enchentes ou cheias que causam grandes prejuízos, pois com o transbordamento dos rios ocorrem inundações de residências, ruas, estradas, escolas, podendo destruir plantações, edifícios, pontes, interrompendo o tráfego em geral, etc. (CASTRO, 2003; MARCELINO, 2008, TOMINAGA 2009).

2.1 BACIAS E SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

Antes de definir esse conceito, é necessário saber a definição de Rio. De acordo com Teixeira (2000), trata-se de uma corrente natural de água doce, com canais definidos e fluxo permanente ou sazonal para o mar, oceano, lago ou até para outro rio. Já, afluente é chamado de rio menor, que despeja água em um rio (curso d'água) principal.

Os conceitos de bacia e sub-bacia relacionam-se a ordens hierárquicas dentro de uma determinada malha hídrica (FERNANDES; SILVA, 1994). Borsato e Martoni (2004) definem bacia hidrográfica como uma área limitada por um divisor de água topográfico, que a separa das bacias adjacentes, servindo de captação natural da água da precipitação através de superfícies vertentes, por meio de uma rede de drenagem, formada por cursos d'água conectados, onde converge para a seção de exutório, seu único ponto de saída. A bacia hidrográfica é também denominada de bacia de captação quando atua como coletora das águas pluviais, ou bacia de drenagem quando atua como uma área que está sendo drenada pelos cursos d'água (SILVA, 1995).

As bacias podem ser compostas por sub-bacias, que são áreas de drenagem dos tributários do curso d'água principal. Para definir sua área os autores se apropriam de diferentes unidades de medidas. Para Faustino (1996), as sub-bacias possuem áreas maiores que 100 km² e menores que 700 km², já para Rocha (1997, apud MARTINS et al., 2005), são áreas entre 20.000 e 30.000 (200 km² a 300 km²).

As bacias constituem uma unidade geomorfológica (forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo, etc.) e características de tipos de cobertura vegetal fundamental, que opera como um sistema aberto, aonde os impulsos das chuvas acionam os processos hidrológicos e erosivos que regulam as transformações morfológicas e a evolução interna da bacia (CHORLEY, 1962; TEODORO et al, 2007, apud LIMA, 1976). Assim, as características físicas e bióticas de uma bacia possuem significativa relevância nos processos do ciclo hidrológico.

As classes de informações morfológicas determinam diferenças essenciais entre distintas paisagens, como relatam estudos clássicos desenvolvidos por Christofolletti (1969), França (1968), Horton (1945), Strahler (1957), entre outros. Segundo Tonello (2005), as características morfométricas podem ser divididas em: características geométricas, características do relevo e características da rede de drenagem (Tabela 2).

Tabela 2 – Características morfométricas de bacias hidrográficas

CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS	TIPO DE ANÁLISES
Características Geométricas	Área total; Perímetro total; Coeficiente de compacidade (Kc); Fator forma (F); Índice de circularidade (IC); Padrão de drenagem.
Características do relevo	Orientação; Declividade mínima; Declividade média; Declividade máxima; Altitude mínima; Altitude média; Altitude máxima; Declividade média do curso d'água principal.
Características da Rede de Drenagem	Comprimento do curso d'água principal; Comprimento total dos cursos d'água; Densidade de drenagem (Dd); Ordem dos Cursos d'água.

Fonte: Adaptada de Tonello (2005).

Tucci, (1998) relata que o transporte de água (ciclo hidrológico) dentro de uma bacia hidrográfica é bastante complexo, sendo controlado por diversas variáveis. A relação ao fenômeno é composta por quatro mecanismos principais, são: precipitação, evapotranspiração, infiltração e escoamento (superficial e subterrâneo). Sabendo que a variação do nível (vazão) de um rio depende das características climatológicas e físicas da bacia hidrográfica. O estudo das bacias hidrográficas é relevante na modelagem hidrológica, pois devido à interferência antrópica, altera o balanço hídrico e o ciclo hidrológico natural, interferindo nos volumes de água infiltrada, escoada superficialmente ou evaporada. Em muitos casos, ocorre significativo decréscimo da infiltração e aumento da evaporação e do escoamento superficial.

Além disso, o escoamento superficial passa a ser mais frequente com o aumento da precipitação, influenciando na formação dos processos hidrológicos como as enchentes, inundações, alagamentos e as próprias enxurradas. As características morfométricas da bacia também são relevantes se referentes ao estudo dos impactos na mesma, pois interferem na variação do nível ou de vazão de um rio (NUNES, 2011; TUCCI, op.cit). Nesse sentido, é igualmente relevante demonstrar de forma sintética os principais impactos gerados num processo de urbanização sobre uma bacia hidrográfica observados na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais impactos da urbanização sobre uma bacia hidrográfica

AÇÕES ANTRÓPICAS	IMPACTOS NA BACIA CLASSIFICAÇÃO
Impermeabilização do solo	Aumento da vazão de cheia; Acelera o tempo dos picos das cheias; Inibe a recarga natural dos aquíferos; Aumento dos eventos de alagamento.
Redes de Drenagem	Maiores picos a jusante
Lixo	Degradação da qualidade d'água e do solo; Entupimento de bueiros e galerias; Assoreamento de canais e rios; Moléstias de veiculação hídrica.
Redes de Esgoto Deficientes	Degradação da qualidade d'água; Moléstias de Veiculação Hídrica.
Desmatamento e desenvolvimento desordenado	Maiores picos e volumes; Mais erosão; Assoreamento em canais, galerias e rios.
Ocupação das Várzeas (áreas sujeitas naturalmente a inundações e intensificadas pela ação antrópica)	Maiores Picos de cheias; Maiores prejuízos e custos de utilidade pública; Maiores efeitos das moléstias de veiculação hídrica;
Crescimento Populacional e aumento do consumo	Diminuição da disponibilidade hídrica para Abastecimento humano; Maiores investimentos em infra-estrutura.

Fonte: Adaptada de Porto et al.(1993)

Nesse contexto, nota-se que o estudo da bacia hidrográfica é indispensável para o conhecimento das interferências naturais e antrópicas do ciclo hidrológico.

2.2 DESASTRES NATURAIS

Enchentes, estiagem, furacões, movimento de massa, terremotos etc, são fenômenos naturais severos, observados com frequência na natureza e fortemente influenciados pelas características regionais, tais como, rocha, solo, topografia, vegetação, condições meteorológicas. Quando estes fenômenos intensos ocorrem em locais que os seres humanos vivem, provocam danos (materiais e humanos) e prejuízos (socioeconômicos) são considerados como desastres naturais (CASTRO, 2003; TOMINAGA 2009).

A conceituação adotada pela UN-ISDR (2009) considera desastre como uma grave perturbação do funcionamento de uma comunidade ou de uma sociedade, envolvendo perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais de grande extensão, cujos impactos excedem a capacidade da comunidade ou sociedade afetada de arcar com seus próprios recursos.

No Glossário da Defesa Civil Nacional, desastre é tratado como sendo “resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema (vulnerável), causando danos humanos, materiais e/ou ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais. A intensidade de um desastre depende da interação entre a magnitude do evento adverso e o grau de vulnerabilidade do sistema receptor afetado” (CASTRO, 1998).

Os desastres naturais podem ser conceituados, de forma simplificada, como o resultado do impacto de um fenômeno natural extremo ou intenso sobre um sistema social, causando sérios danos e prejuízos que excede a capacidade dos afetados em conviver com o impacto (TOBIN; MONTZ, 1997; UNDP 2004).

Portanto, desastres naturais são aqueles causados por fenômenos e desequilíbrios da natureza, que atuam independentemente da ação humana. Em geral, considera-se como desastre natural todo aquele que tem como gênese um fenômeno natural de grande intensidade, agravado ou não pela atividade humana. Exemplo: chuvas intensas provocando inundação, erosão e deslizamentos; ventos fortes formando vendavais, tornados e furacões; etc. As intervenções antrópicas, quando mal planejadas, poderão intensificar e/ou agravar um desastre natural. Mas esses são fatores que indicam o estado da vulnerabilidade local e não podem ser confundidos com a gênese de um desastre (ALCÁNTARA-AYALA, 2002; CASTRO, 1999; KOBIYAMA et al. 2006; MARCELINO, 2008).

2.2.1 Enchentes e Inundações

As inundações vêm aumentando continuamente em todos os países da Terra. A cada ano surgem com ímpeto redobrado, acarretando a destruição de cidades e vilas, perdas agrícolas, doenças e mortes. A maioria das cidades brasileiras está próxima aos vales e margem dos rios. Essa população urbana que ocupa as proximidades dos rios sofre com os processos de enchentes e inundações, que segundo UN-ISDR (2002) são problemas geoambientais derivados de fenômenos naturais de caráter hidrometeorológico ou hidrológicos, que ocorrem com periodicidade nos cursos d'água, frequentemente deflagrados por chuvas intensas, rápidas ou de longa duração.

A Defesa Civil classifica as inundações em função da magnitude e do padrão evolutivo, conforme a Tabela 4, (CASTRO, 2003). Apesar desta diferenciação, a maior parte das situações de emergência ou estado de calamidade pública é causada pelas inundações graduais (enchentes) e bruscas (enxurradas).

Tabela 4– Classificações das inundações

INUNDAÇÕES	
<i>Magnitude</i>	<i>Evolução</i>
Inundações excepcionais	Enchentes ou Inundações graduais
Inundações de grande magnitude	Enxurradas ou Inundações bruscas
Inundações normais ou regulares	Alagamentos
Inundações de pequena magnitude	Inundações litorâneas

Fonte: Adaptado de CASTRO (2003).

A inundação, popularmente tratada como enchente é o aumento do nível dos rios além da sua vazão normal, ocorrendo o transbordamento de suas águas sobre as áreas próximas a ele. Estas áreas planas próximas aos rios sobre as quais as águas extravasam são chamadas de planícies de inundação. Quando não ocorre o transbordamento, apesar do rio ficar praticamente cheio, tem-se uma enchente e não uma inundação. Por esta razão, no mundo científico, os termos “inundação” e “enchente” devem ser usados com diferenciação. E nessa pesquisa os termos também serão considerados com significados diferentes.

A palavra “inundação” deriva do verbo inundar, que tem como significado “ação ou efeito de inundar; transbordamento da água, cobrindo certa extensão do terreno” (FERREIRA, 1986). Segundo o manual de desastres (CASTRO, op.cit), o fenômeno natural inundação é um transbordamento de água proveniente de rios, lagos e açudes, atingindo a planície de inundação ou área de várzea. Já a palavra “enchente” procede do latim “plenus” que significa “cheio”, e segundo Ferreira (op.cit), sua definição é “ocupar o vão, a capacidade ou a superfície de; tornar cheio ou repleto”. De acordo com o Ministério Cidades/IPT (2007), o fenômeno natural enchentes ou inundações graduais é definido pela elevação temporária do nível d’água ao longo de um canal de drenagem, devido ao aumento da vazão ou descarga, atingindo a cota máxima do canal, porém, sem extravasar.

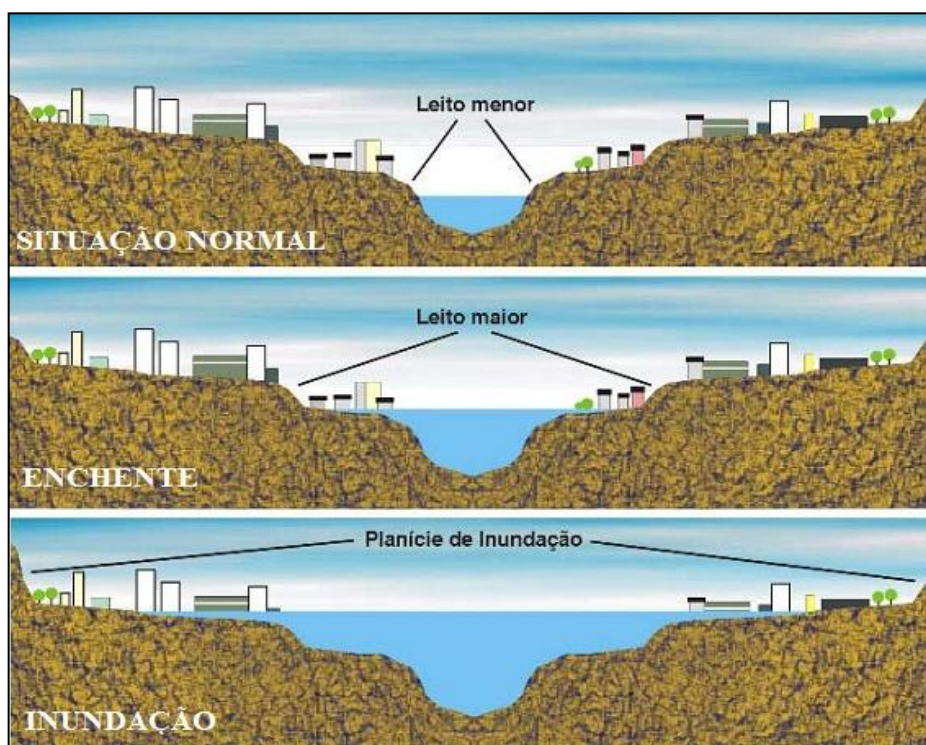
As inundações ocorrem, principalmente, pelo processo natural do ciclo hidrológico, e sabendo que as Bacias hidrográficas possuem, geralmente, os rios com dois leitos, o leito menor onde a água escoar na maioria do tempo e o leito maior que é inundado com uma periodicidade que varia entre 1,5 a 2 anos. Logo, isso significa dizer que o leito maior dos rios é considerado área de risco, onde justamente os impactos ocorrem com mais frequência, afetando significativamente a população que ocupa esse leito.

A Figura 1 ilustra a diferença entre uma situação normal do volume de água no canal de um curso d’água, mostrando os dois leitos do rio (menor e maior) e os eventos de enchente e inundação. Na situação normal, sem chuvas intensas (período menos chuvoso), as planícies

e fundos de vales estreitos apresentam lento escoamento superficial das águas das chuvas, não passando a cota normal do rio. E em situação de enchentes (período chuvoso), as precipitações são mais intensas. Decorrente disso, o nível do rio eleva-se devido o aumento da vazão chegando a sua cota máxima. Já o fenômeno de inundação inicia-se quando o nível do rio passa da sua cota máxima, inicializando o processo de transbordamento das águas, e atingindo a planície de inundação normal. Essa área é periodicamente atingida pelo transbordamento dos cursos d'água, constituindo, portanto, uma área inadequada à ocupação. No entanto, é geralmente povoada por ribeirinhos que no período menos chuvoso ocupam essas áreas e constroem pequenas vilas e/ou comunidades, chegando a se tornar grandes cidades com o decorrer do tempo (SANTOS, 2010; SARLAS, 2010; TOMINAGA, 2009).

Os problemas resultantes da inundação dependem do grau de ocupação da várzea pela população e da frequência com a qual ocorrem as inundações. Segundo Genz (1994), no Brasil, as classes mais abastadas tendem a habitar os locais seguros, ao contrário das classes menos favorecidas, que ocupam as áreas de alto risco (áreas de várzea), provocando problemas sociais que se repetem por oportunas enchentes. A magnitude e a frequência destas e das inundações, ocorrem em função da intensidade e da distribuição de chuvas (intensas e rápidas ou intensas de longa duração), da taxa de infiltração de água no solo, do grau de saturação e das características morfométricas e morfológicas da bacia de drenagem.

Figura 1 – Perfil esquemático do processo de enchente e inundação



Fonte: Adaptada, Defesa Civil TO (2011)

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (2007), os desastres naturais referentes às enchentes e inundações estão associados a eventos extremos de chuvas, devido à intensificação de fenômenos meteorológicos, tais como: ZCIT, ZCAS, LI (Linhas de Instabilidades), AB (Alta da Bolívia) e aglomerados convectivos. Estes podem atuar em conjunto com mecanismos climáticos de grande escala oceano-atmosfera, como os fenômenos ENOS e Padrão Dipolo, intensificando ainda mais os eventos extremos. Esses fenômenos ocorrem naturalmente, mas devido às alterações antrópicas ao meio ambiente, como por exemplo, a impermeabilização do solo e as retificações dos cursos d'água decorrente das intervenções urbanas, esses tipos de fenômenos são intensificados, causando danos e prejuízos à população.

2.3 FORÇANTES METEOROLÓGICAS

A variabilidade espacial e temporal da precipitação, nas principais bacias da região Amazônica, durante o período chuvoso é diretamente influenciada por sistemas meteorológicos precipitantes que, por sua vez, são modulados por mecanismos oceano-atmosféricos de grande escala (MARENGO et al., 1998; MONTROY, 1997; SOUZA et al., 2000). De acordo com a literatura, vários sistemas meteorológicos são observados na região tropical, contribuindo para alterações no clima e no tempo dessa região, dentre eles, destacam-se aqueles que interferem diretamente nas condições de tempo sobre a Amazônia, cuja ação conjunta ou não com outros eventos produz precipitação significativa, são: os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs), os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) ou Ondas de Leste, a LI, ZCAS e a ZCIT. Este possui uma influência primordial para o clima de várias regiões nos trópicos, onde a estação chuvosa depende fortemente da posição da ZCIT, este sendo modulado pelas condições da TSM do Oceano Atlântico Tropical (OAT) (ESPINOZA, 1996; KODAMA, 1992, 1993; MARTON, 2000; NOBRE, 1988; RAMIREZ et al., 1999).

Segundo Souza (1997) os mecanismos climáticos de grande escala que intensificam a precipitação no leste da Amazônia são o ciclo do El Niño/Oscilação Sul (ENOS) que atua sobre o Oceano Pacífico Equatorial (OPE) e o padrão do Gradiente Inter-Hemisférico ou Dipolo do Atlântico (DA) que atua na bacia intertropical do OAT.

Nos trabalhos de Buchmann et al. (1986c, 1989, 1990, 1995a e b) estudou as anomalias de temperaturas nos oceanos Pacífico e Atlântico e as suas influências no clima da América do Sul, enfatizando a Amazônia e o Nordeste brasileiro. Abrangendo às variações no regime de precipitação, associado às situações de anomalias de secas e inundações nestas

regiões. Dentre os vários estudos precedentes, destacam-se os principais mecanismos climáticos de grande escala que modulam os sistemas precipitantes descritos a seguir:

a) El Niño/Oscilação Sul (ENOS)

O ENOS é um fenômeno de escala global relacionado a um forte acoplamento oceano-atmosfera, caracterizado por um aquecimento anormal das águas superficiais do OPE, causando variabilidade no tempo e no clima global em escalas interanuais, interagindo com os padrões de vento em nível mundial. Ou seja, a Circulação Geral da Atmosfera (CGA), sendo que esta quando alterada, afeta os regimes de chuva, em diversas regiões do globo, principalmente, nas regiões tropicais (DE SOUZA, ALVEZ, NOBRE, 1998; SOUZA, 1997; TRENBERTH, 1997). Esta interação entre o oceano e a atmosfera é uma das principais fontes de variabilidade do clima no planeta.

Segundo Cane (1992), o ciclo do ENOS consiste de duas componentes, uma oceânica e outra atmosférica. A componente oceânica é representada pelo El-Niño (La Niña) que é o aquecimento (resfriamento) anômalo das águas superficiais do OPE junto à costa oeste da América do Sul, monitoradas com base na TSM. A componente atmosférica (Oscilação Sul-OS) refere-se à flutuação inversa no campo de pressão entre as regiões da Alta Subtropical do Pacífico Sudeste (Central-Sul), na ilha do Tahiti (Polinésia Francesa) e a Baixa Pressão da Indonésia e Darwin, no norte da Austrália.

A medida da OS é dada pelo Índice de Oscilação Sul (IOS), estando relacionada com as mudanças na circulação atmosférica nos baixos níveis, que se caracteriza como uma "gangorra barométrica", sendo esta definida pela diferença normalizada no campo das pressões ao nível médio do mar (PNMM) entre as estações de Tahiti (17°S, 150°W) e Darwin (12°S, 130°E). Segundo Philander (1990) e Walker e Bliss (1932,1937), o IOS tem índices positivos ou negativos, obtidos através da eq. (1), que se refere à diferença de pressão entre essas duas localidades. O IOS é positivo (negativo) quando a PNMM é mais alta (baixa) em Tahiti do que em Darwin, de acordo com a média climatológica.

$$IOS = \Delta p_{TAHITI} - \Delta p_{DARWIN} \quad (1)$$

O acoplamento entre as condições oceânicas e atmosféricas em anos normais é observado sobre o oceano Pacífico que se caracteriza por movimentos ascendentes na parte central e oeste desse oceano e por movimentos descendentes no oeste da América do Sul. Nesta situação denomina-se que o fenômeno ENOS está neutro e a TSM se encontra dentro dos padrões normais.

Quando ocorre desvio da condição normal de temperatura do OPE, o fenômeno ENOS se apresenta em duas fases extremas, tendo como característica uma fase quente e outra fria, chamadas também de fase positiva e negativa, respectivamente. A fase positiva do ENOS é denominada El Niño (desfavorável às chuvas) e caracteriza-se pela manifestação de anomalias positivas de TSM e simultaneamente com a diminuição da pressão atmosférica no Pacífico Centro-Leste, ou seja, IOS negativo. Nesse evento ocorre diminuição da intensidade dos ventos alísios, chegam até a mudar de direção ficando de oeste para leste, a Célula de Walker fica bipartida, ocorrendo um deslocamento na região com maior formação de nuvens. As águas quentes em toda a extensão do OPE atinge o litoral peruano (região com forte gradiente de temperatura, separando águas mais quentes acima e mais frias abaixo dessa região) (FONTANA; BERLATO, 1996; GRIMM; ZARATINI; MARENGO, 1998).

A fase negativa, chamada de La Niña (favorável às chuvas) caracteriza-se pela intensificação da condição normal, dada pela manifestação de anomalias de TSM negativas sobre o Pacífico Centro-Leste e IOS positivo, ou seja, quando ocorre o aumento na pressão atmosférica na região leste do Pacífico. Os episódios de La Niña têm como características opostas ao fenômeno El Niño, sendo que ocorre o resfriamento das águas na costa Oeste da América do sul, costa do Peru e Equador, devido à intensificação dos alísios do leste do Pacífico, durante esse episódio as TSM no Pacífico leste diminuem em torno de 2° a 3° C da média climatológica.(FONTANA; BERLATO, op.cit; GRIMM; ZARATINI; MARENGO, op.cit; VAREJÃO, 2006).

Em geral, episódios La Niña têm frequência de 2 a 7 anos, mas ocorrem com menor frequência comparada ao El Niño. A duração média dos episódios La Niña é de aproximadamente 9 a 12 meses e pode durar até 2 anos, aproximadamente. Os registros históricos relatam que um episódio La Niña começa a desenvolver-se em certo ano, atinge sua intensidade máxima no final daquele ano, vindo a dissipar-se em meados do ano seguinte. Também, os valores das anomalias de TSM em anos de La Niña têm desvios menores que em anos de El Niño, raramente ultrapassando 2 °C abaixo da média. Os impactos do La Niña não são tão evidentes quanto os do El Niño e dependem da região e da intensidade do fenômeno(RASMUSSEN; ARKIN, 1985; INPE/CPTEC, 2007; GU; PHILANDER, 1995; TRENBERTH, 1997).

No Brasil os principais efeitos relacionados ao episódio El Niño são, em geral, a diminuição das chuvas no leste da Amazônia e Nordeste Brasileiro (NEB), devido ao deslocamento do ramo ascendente da célula de Walker, que se posiciona sobre o Pacífico, logo predomina o ramo descendente desta circulação sobre o NEB e a região Amazônica,

causando severas secas. No sul do Brasil o El Niño está relacionado a altas taxas de precipitação (FONTANA; BERLATO, 1996). 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 NEB, e secas severas no sul do país (UVO et al, 1998). Pesquisas realizadas por Marengo et al. (2004), observando 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”.

b) Gradiente Inter-Hemisférico ou Dipolo do Atlântico (DA)

O DA também é um fenômeno oceano-atmosférico de grande escala, que atua sobre a bacia intertropical do OAT, inibindo ou aumentando a formação de nuvens, ou seja, diminuindo ou aumentando os índices pluviométricos no Leste da Amazônia/Litoral Norte Brasileiro (DE SOUZA; ALVES; NOBRE, 1998; NOBRE, 1993; NOBRE; SHUKLA, 1996;). Esse mecanismo, atualmente denominado de Gradiente de anomalias de TSM no Atlântico intertropical, ocorre durante o outono austral e caracteriza-se pela presença simultânea de anomalias de TSM em duas bacias oceânicas, a Bacia Norte (BN), formada pelo setor oceânico entre 5° N e 28° N, e a Bacia Sul (BS) no setor entre 5° N e 20° S (SERVAIN, 1991).

Este fenômeno possui duas fases distintas, sendo uma positiva/negativa (dipolo positivo ou fase quente) e a outra negativa/positiva (dipolo negativo ou fase fria). Na primeira fase, caracterizada como quente, a TSM do OAT norte apresenta anomalias positivas e a TSM do OAT sul apresenta anomalias negativas. Na outra fase, caracterizada como fria, a TSM do OAT norte apresenta anomalias negativas e a TSM do OAT sul apresenta anomalias positivas. Logo, o DA depende diretamente dos valores de TSM no OAT. Em geral, dipolo negativo (positivo) de TSM no Atlântico tropical está relacionado com anos de excesso (déficit) de chuva na Amazônia e NEB (NOBRE; SHUKLA, 1996; SOUZA; NOBRE, 1998).

As fases do DA “modulam” o posicionamento da banda de nebulosidade e precipitação associada à ZCIT, devido ao padrão inverso de anomalias de TSM, que consequentemente, gera um gradiente térmico meridional e inter-hemisférico nos baixos níveis do OAT, que, agindo em conjunto com os padrões anômalos de PNMM e vento horizontal, desempenham influências diretas na manutenção, posicionamento e intensidade da ZCIT (NOBRE, 1993; WAGNER, 1996). Logo, o eixo principal da ZCIT tende a posicionar-se, preferencialmente, sobre a região onde está direcionado o gradiente térmico (SOUSA, 2010). A ZCIT constitui o principal fenômeno indutor de chuvas no leste da Amazônia e NEB, quando migra em direção ao Hemisfério Sul (HS) no final do verão e outono austral (HASTENRAL; GREISCHAR, 1993).

A maior influência do DA se dá no trimestre março, abril e maio quando a TSM explica em torno de 60% a variabilidade de chuva no setor norte e nordeste do Brasil (MOURA; SHUKLA, 1981). Segundo Nobre e Shukla (1996) a variabilidade pluviométrica interanual observada sobre o Leste da Amazônia e NEB está associada não somente a um deslocamento meridional anômalo da ZCIT, mas também ao tempo de permanência dela em latitudes ao sul do equador. Anos chuvoso sobre Leste da Amazônia e NEB são caracterizados pela permanência da ZCIT ao sul de sua posição climatológica até abril, enquanto, em anos de seca a ZCT se desloca para o norte a partir de março (COELHO; GAN; CONFORTE, 2004). Portanto, o DA é extremamente importante, na determinação da qualidade das chuvas na região do NEB e Leste da Amazônia, como um todo (RAO et al., 1993).

É evidente na literatura que os estudos climáticos realizados nas últimas décadas mostraram com clareza o efeito combinado (ou seja, a manifestação simultânea) de ambos os mecanismos climáticos presentes no Pacífico (ENOS) e Atlântico (DA) interferem diretamente na distribuição da pluviometria regional sobre a Amazônia, ou seja, no aumento ou diminuição das anomalias dos índices de precipitação (ANDREOLI; KAYANO, 2007; FERREIRA, 2008).

2.4 MODELAGEM ESTATÍSTICA DE PREVISÃO

A modelagem é uma ferramenta que, frequentemente, representa fisicamente ou matematicamente a realidade, a mesma é constituída de um conjunto de equações, que de forma simplifica da reproduz o comportamento de um sistema físico, através de séries temporais, com o objetivo de prever a resposta do sistema dada a uma entrada e o seu estado inicial. Utiliza-se uma linguagem ou forma de fácil acesso, objetivando entendê-lo e buscar respostas para diferentes entradas ou cenários ainda não observados (TUCCI, 1998).

Atualmente, desenvolvem-se modelos de previsões hidrometeorológicas, que se constituem em ferramentas importantes nos Centros de Previsão de Tempo. Segundo Barbancho (1970), previsão é uma manifestação relativa a sucessos desconhecidos em um futuro determinado. Além disso, ela não constitui um fim em si, mas um meio de fornecer informações e subsídios para uma consequente tomada de decisão, visando atingir determinados objetivos (MORETTIN; TOLOI, 1987).

Para DeLurgio (1998) acrescentaram que quase todas as previsões são baseadas na aceitação de que o passado repetir-se-á. Portanto, a previsão seria uma estimativa probabilística, a descrição de um valor futuro ou até mesmo uma condição. Em resumo, a previsão é um processo através do qual o comportamento futuro de um sistema, seja dinâmico ou estático, é estimado. Tal estimativa, frequentemente, é baseada no entendimento e caracterização do comportamento do sistema ao longo do tempo (CASTILHO, MELIN, 2002).

No desenvolvimento de modelos de previsão, a análise de séries temporais (AST) tem como objetivo descrever e analisar os comportamentos passados da série, visando à compreensão do comportamento e a consequente previsão de movimentos futuros (FONSECA; MARTINS; TOLEDO, 1985). A AST tem sido de grande importância em diversas áreas do conhecimento como, por exemplo, economia, ciências sociais, meteorologia, hidrologia, medicina, entre outras.

A série temporal pode ser discreta ou contínua, univariada ou multivariada e o tempo pode ser unidimensional ou multidimensional. Morettin e Toloi (2006) descreveram a série temporal como sendo um conjunto de observações ordenadas no tempo. Seja Y a variável observada e t a variável tempo. Uma série temporal é definida pelos valores $Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_n$, nos tempos $t_1, t_2, t_3 \dots t_n$, onde n é o número de observações seriais da variável. Assim Y é uma função de t , simboliza da pela eq. (2).

$$Y_n = f(t_n) \quad (2)$$

De acordo com Morettin e Toloi (op.cit), quando se analisa uma série temporal os objetivos são básicos como modelar fenômenos naturais, obtenção de conclusões em termos estatísticos, e por fim avaliar se o modelo é adequado à previsão. Quando se inicia uma pesquisa na área da modelagem, é necessários classificar os modelos estáticos a serem usados, tais modelos são classificados de acordo com o número de séries temporais e número de parâmetros envolvidos na modelagem. Essas classificações são observadas na Tabela 5, seguindo os critérios adotados por Makridakis et al, 1998, Morettin e Toloi, op.cit.

Tabela 5 – Classificação dos Modelos.

Quanto ao número de séries temporais	<i>Modelos Univariados</i>	É quando o grupo de dados que inclui todos os métodos que se baseiam em uma única série histórica, ou seja, a série temporal é explicada (prevista) apenas por seus valores passados.
	<i>Modelos Multivariados ou Causais</i>	É quando grupo de dados que modela simultaneamente duas ou mais séries temporais permitindo, assim, relações de interdependência e causalidade, mas sem qualquer exigência com relação à direção da causalidade entre elas. A série temporal é explicada (prevista) pelos seus valores passados e também pelos valores passados de outras variáveis.
Quanto ao número de parâmetros	<i>Modelos paramétricos</i>	São os que possuem um número de parâmetros finito. Os modelos mais comumente usados são os modelos de Erro (ou Regressão), modelos autoregressivos (AR) e de Médias Móveis (MA), ARMA e modelos não lineares.
	<i>Modelos não paramétricos</i>	São os que possuem um número infinito de parâmetros. Podem ser exemplificados pela função de autocovariância (ou autocorrelação) e modelos de redes neurais.

Fonte: Adaptada de Makridakis et al,1998, Morettin e Toloi, 2006.

Nas últimas décadas, com o avanço na área da modelagem hidrológica, surgiram vários modelos, sendo que os referentes às bacias foram desenvolvidos em dois sentidos, os modelos para grandes bacias, que tratam de forma empírica a distribuição dos parâmetros em áreas de grande extensão; e os modelos de pequenas bacias, que buscam representar com precisão, e de forma distribuída, os processos hidrológicos. As classificações são baseadas no tipo de variável, na relação entre as mesmas, à forma de representar os dados, existência ou não de relações espaciais e a existência de dependência temporal. Tais classificações dos modelos são descritos no anexo A, seguindo os critérios abordados por Wood & O'Connell (1985), Maidment (1993), e Tucci (1998).

A estrutura do modelo hidrológico é determinada a partir do objetivo que se pretende alcançar. Um modelo para estimativas e controle de enchentes é diferente de um modelo para avaliar o transporte de sedimentos em rios. Assim, cada modelo tem seus próprios componentes e servem para determinado tipo de problema. Com isso, não há um modelo hidrológico único e abrangente que possa ter os melhores resultados em todas as situações. Portanto, há apenas um modelo hidrológico que melhor descreve cada fenômeno considerando cada finalidade, sendo esta realidade comum para maioria dos modelos de um modo geral, visto que estes são simplificações da realidade.

Tucci (2005) afirmou que os modelos empíricos geralmente mostram resultados muito bons em rios de grande porte quando a contribuição da bacia incremental é insignificante, principalmente quando o escoamento é lento. Para Tucci e Collischonn (2007) os modelos empíricos poderão ser adaptados para incluir como variável explicativa a precipitação. Neste caso as previsões de vazão para antecedências maiores podem ser tão boas quanto às obtidas por modelos conceituais.

Seguindo os argumentos impostos para modelos hidrológicos, à pesquisa de SANTOS, (2008), desenvolveu um modelo hidrometeorológico para a Bacia do rio Tocantins (TO), com a finalidade de prever enchentes (dezembro a maio) e estiagens (junho a novembro) para Marabá-PA. Para tal, é usado um modelo estatístico empírico e estocástico. Baseado no método de regressão linear múltipla utilizou-se séries temporais fluviométricas (vazão) e pluviométricas (chuva), como ferramenta principal do modelo. O modelo realizou previsão com antecedência de 2 e 4 (3 e 5) dias para enchente (estiagem).

A pesquisa de Zamanillo (1988 apud ANDREOLLI, 2003) obteve previsões significativas usando o modelo hidrodinâmico adaptado para previsão em tempo real. O referido autor utilizou o modelo para prever níveis no Rio Jacuí (Rio Grande do Sul) na extensão de 362 km (extensão navegável do rio), obtendo resultados satisfatórios para previsão em até 7 dias no período de estiagem. Essas previsões ficaram limitadas ao horizonte de 3 dias, quando ocorrem eventos de chuva nas bacias intermediárias o que de certa forma mostra a importância da incorporação da chuva na previsão.

Portanto estudar modelos de séries temporais significa obter meios capazes de inferir nas características de seu processo gerador, bem como elaborar modelos capazes de descrever as situações particulares que ocorrem na realidade (FISCHER; MARENGO; NOBRE, 1996). Logo, seguindo os critérios descritos acima, referentes à identificação, classificação, e tipos modelos de séries temporais. Essa pesquisa considera somente a AST no domínio do tempo, usando modelos paramétricos que utilizam as funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP) das séries, como análises principais, para obtenção dos modelos de previsão univariados e multivariados.

2.4.1 Modelagem ARIMA

Os modelos ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) foram propostos no decorrer da década de 1960, pelos professores George Edward. Pelham Box e Gwilym M. Jenkins. A partir de 1970 foi publicado na literatura o livro *Time Series Analysis, Forecasting and Control* (Análise de Séries Temporais: Previsão e Controle) (MORETTIN; TOLOI, 2006).

A metodologia ARIMA (p,d,q) trata-se da junção de dois modelos: um Autorregressivo (AR) e outro de Médias Móveis (MA), e a parte de integração (d) é usada para tornara série estacionária, sendo que esse processo não altera o resultado da previsão.

Morettine e Tolo (2006) mostraram que a estratégia para construção do modelo ARIMA é baseada em um ciclo iterativo, no qual a escolha da estrutura do modelo é realizada através das análises dos próprios dados. Esse ciclo consiste em quatro fases: identificação, estimação, teste de diagnóstico ou validação e aplicação ou previsão. E caso o modelo não seja adequado, o ciclo é repetido, voltando-se à fase de identificação. Segundo os autores anteriores, a fase crítica desse ciclo iterativo é a identificação, pois é possível que vários pesquisadores identifiquem modelos diferentes para a mesma série temporal, e ainda salientem que as vantagens desses modelos seja obedecer ao princípio da parcimônia. Isto é, conter um número reduzido de parâmetros; obtêm-se previsões precisas, comparando-as com os demais métodos de previsão, tais como os métodos citados por Wheelwright e Makridakis (1998), que possibilitam o emprego de regressão simples, regressão múltipla, suavização exponencial e decomposição de séries temporais.

A metodologia BJ é realizada em softwares ou aplicativos estatísticos, como o MinTab, SAS, Gretl e outros, devido as inúmeras equações complexas usadas para as análises, estimação e previsão dos modelos. E os aplicativos estatísticos utilizados nessa pesquisa são o Gretl e o SAS, usando os modelos univariados (ARIMA) e multivariados (ARIMA e Função de Transferência).

Souza (1989) afirma que os modelos multivariados (ARIMA e Função de Transferência) são modelos capazes de realizar várias previsões ao mesmo tempo, as séries de interesse são explicadas em função não apenas do comportamento da própria série, mas também de outras séries, permitindo, desta forma, obter relações de interdependência e causalidade. Esses modelos apresentam uma estrutura capaz de estimar a curto, médios e longos prazos diversas séries simultaneamente.

A metodologia de BJ já foi realizada para previsões hidrológicas e tiveram resultados satisfatórios para previsão de vazão (QUEIROGA, 2003). Este modelo foi testado para previsões de vazões previstas com 3, 5 e 7 dias de antecedência em dez eventos ocorridos nos períodos chuvosos de 95-96 e 97-98 (cinco em cada período). O referido autor observou que a assimilação dos erros é mais efetiva quando aplicada na atualização das vazões previstas com menor antecedência, ou seja, a atualização das vazões previstas com 3 dias apresentou resultados melhores do que aquelas previstas com 7 dias.

O método ARIMA também foi utilizado por Lucas (2007) para simular a vazão mensal da bacia hidrográfica do Xingu no estado do Pará. O modelo capturou a dinâmica das séries temporais, apresentando resultados satisfatórios na simulação da vazão mensal nas estações da bacia. Porém, o modelo deve ser aplicado com cautela no período chuvoso, quando ocorrem os eventos extremos de precipitação e consequentemente vazões de pico.

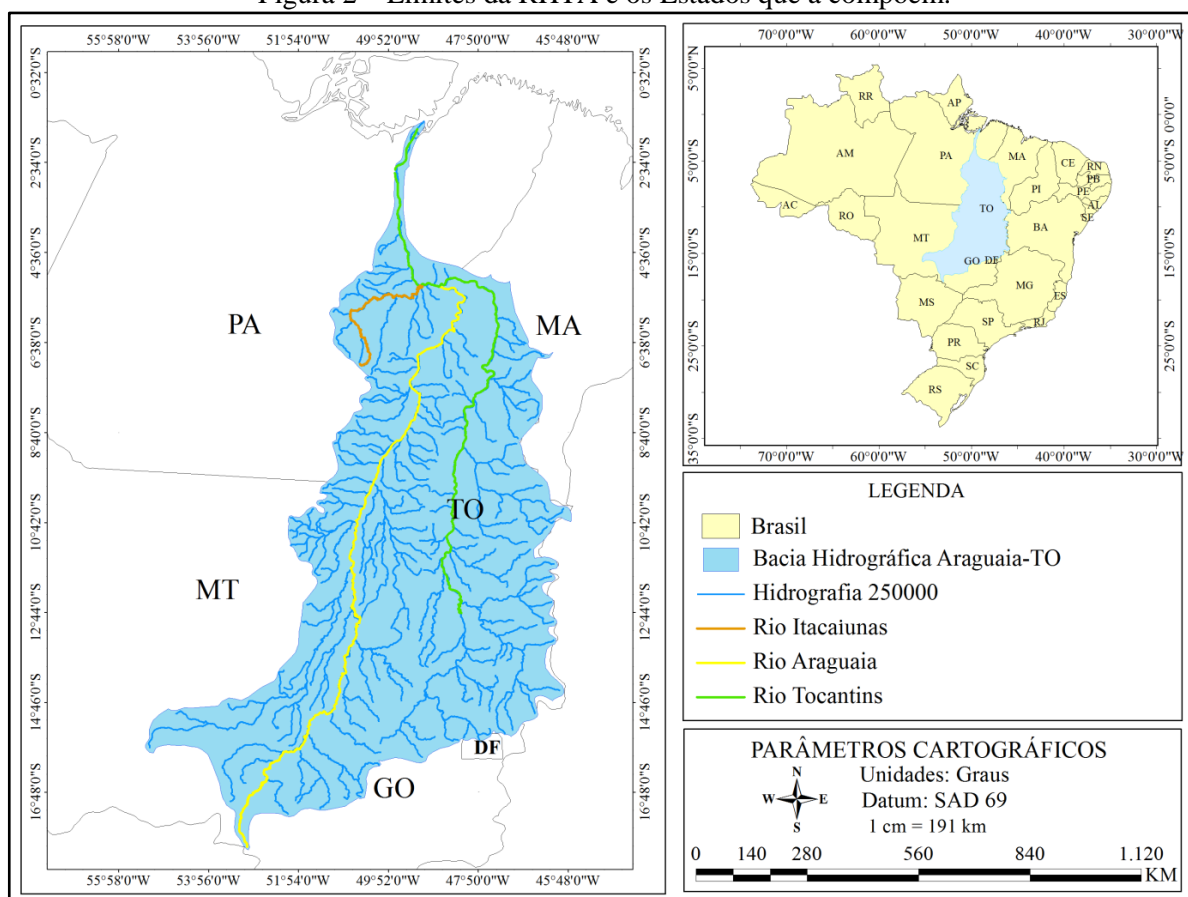
Também usando a mesma metodologia, Batista (2009) desenvolveu um modelo para prever vazão média mensal do Rio Grande (posto fluviométrico de Madre de Deus de Minas-MG), cujos resultados revelaram que a metodologia de BJ fornece informações importantes do padrão comportamental de série analisada. Portanto, observando as pesquisas realizadas e utilizando à metodologia de BJ, pode-se costatar que a mesma consegue simular o comportamento do nível (vazão) dos rios para uma previsão de curto prazo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Região Hidrográfica Tocantins-Araguaia (RHTA) apresenta importância no contexto Nacional, pois, além de suas características ambientais, é uma região de expansão da fronteira agrícola, principalmente com relação ao cultivo de grãos e pelo grande potencial hidroenergético. A Região (Figura 2) está totalmente inserida no território brasileiro e possui uma área com cerca de 920.000 km² (aproximadamente 11% do território nacional), abrange os Estados de Goiás, Tocantins, Pará, Maranhão, Mato Grosso e Distrito Federal. Grande parte situa-se na região Centro-Oeste, desde as nascentes dos rios Araguaia (linha amarela) e Tocantins (linha verde) até sua confluência, e daí, para jusante, adentra a Região Norte até a sua foz (MMA; SPRH; ANA, 2006b). Na Tabela 6 é apresentada com mais detalhes a distribuição em área das Unidades incidentes na Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia, conforme o Plano Estratégico (MMA; SPRH; ANA, 2006).

Figura 2 – Limites da RHTA e os Estados que a compõem.



Segundo a Resolução n° 32 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, a RHTA, inclui ainda as bacias dos rios Pará e Guamá, que são adjacentes (ANA; SPRH; ANA, 2006).

Apesar da Bacia do Tocantins desaguar na foz do Amazonas, considera-se nessa pesquisa como parte integrante da Região Amazônica, mas não da bacia amazônica (IBG, 1977).

Tabela 6 – Distribuição em Áreas das Unidades de Federação Incidentes na RHTA

Unidade da Federação (UF)	Área da UF na RHTA *		Área da RHTA na UF (%)
	Km ²	%	
Pará	278.973	30,3	22,3
Tocantins	277.621	30,2	100,0
Goiás	196.297	21,2	57,7
Mato Grosso	135.302	14,7	15,0
Maranhão	30.757	3,3	9,3
Distrito Federal	772	0,1	13,3
Total	918.822	100,0	-

*RHTA – Região Hidrográfica Tocantins e Araguaia.

Fonte: (MMA; SPRH; ANA, 2006).

O rio Tocantins é do tipo canalizado, com estreita planície de inundação. Forma-se pelos rios Almas e Maranhão, cujas cabeceiras localizam-se no Planalto Central, Estado de Goiás, a cerca de 1.000 m de altitude, possui uma extensão total aproximada de 1.960 km até a sua foz na Baía de Marajó (MMA, 2006). Destaca-se na margem direita do rio Tocantins, os rios Bagagem, Tocantinzinho, Paranã, dos Sonos, Manoel Alves Grande e Farinha, e na margem esquerda o rio Santa Teresa e Itacaiunas. Possui uma área de drenagem de 306.310 km², antes da confluência com o rio Araguaia e 691.370 km² na foz, incluída a área de drenagem do rio Araguaia (MMA; SPRH; ANA, 2006).

O rio Araguaia é o principal tributário, possuindo uma extensão de aproximadamente 2.600 km de extensão. Nasce nos contrafortes da Serra do Caiapó, nas proximidades da cidade do Alto Taquari, em cuja vertente oposta encontra-se o Parque Nacional das Emas. Seu curso desenvolve-se ao norte, praticamente paralelo ao eixo do rio Tocantins. Possui uma área de drenagem de 385.060 km². O rio Araguaia forma a extensa ilha do Bananal, com 80 km de largura e 350 de comprimento, alagadiça em sua maior parte, representando a maior ilha fluvial do mundo. O principal afluente do rio Araguaia pela margem esquerda é o rio das Mortes. Pela margem direita, merece destaque o braço formador da ilha do Bananal, também conhecido por rio Javaés (MMA; SPRH; ANA, 2012).

A RHTA é a segunda maior região brasileira em termos de disponibilidade hídrica, apresentando 13.624 m³/s de vazão média, equivalente a 9,6 % do total do País e uma vazão específica média de 14,84 L/s.km². A RHTA está subdividida em 3 sub-regiões no nível 1 – SUB1 (Araguaia, Alto e Baixo Tocantins) e em 18 sub-regiões no nível 2 – SUB2, de acordo

com a Resolução CNRH n° 32, de 15 de outubro de 2003. A região possui uma vazão média de 11.800 m³/s, fornecendo uma vazão específica média de 15,6 L/s.km². A Tabela 7 mostra as sub-regiões hidrográficas do Tocantins-Araguaia e suas respectivas vazões. As sub-regiões do nível 2 – SUB 2 foram denominadas de acordo com suas peculiaridades regionais para facilitar sua identificação.

Tabela 7 – Subdivisões Hidrográficas da RHTA.

Subdivisão Hidrográfica SUB1	Códigos		Subdivisão Hidrográfica SUB2	Denominação da Subdivisão Hidrográfica	Área (Km²)	Qm (m³/s)	Q95 (m³/s)
	SUB1	SUB2					
Sub1- Araguaia	691	6911	Sub2- Araguaia 01	Alto Araguaia	133.26	1907,4	206,8
	681	6811	Sub2- Araguaia 02	Rio das Mortes	61.32	887,7	95,2
	671	6715	Sub2- Araguaia 03	Médio Araguaia	89.90	1286,4	139,5
	671	6713	Sub2- Araguaia 04	Cantão do Araguaia	64.23	918,96	99,6
	671	6711	Sub2- Araguaia 05	Baixo Araguaia	36.10	516,55	212,4
Total - Araguaia					384.82	5.507	753
Sub1- Alto Tocantins	661	6617	Sub2- Tocantins 01	Alto Tocantins	50,92	782,03	163,6
	661	6616	Sub2- Tocantins 02	Santa Tereza	14.68	182,16	38,1
	661	6615	Sub2- Tocantins 03	Paraná-Tocantins	83.06	1033,8	216,1
	661	6614	Sub2- Tocantins 04	Rio Manuel Alves	14.83	199,30	35,9
	661	6613	Sub2- Tocantins 05	Lajeado	26.03	349,81	63,0
	661	6612	Sub2- Tocantins 06	Rio do Sono	45.55	777,53	181,4
	661	6611	Sub2- Tocantins 07	Estreito do Araguaia	70.44	1202,4	280,6
Total – Alto Tocantins					305.51	4.527	979
Sub1- Baixo Tocantins	651	6513	Sub2- Tocantins 08	Tucuruí	68.28	972,19	183,1
	651	6511	Sub2- Tocantins 09	Baixo Tocantins	5.98	85,39	16,1
	621	6211	Sub2- Guamá	Guamá	49.64	817,09	136
	611	6411	Sub2- Pará – Tocantins	Pará – Tocantins	62.88	1036,4	370,1
	631	6311	Sub2- Acará	Acará	29,96	494,40	46,5
	611	6111	Sub2- Foz Tocantins	Foz Tocantins	11.20	184,59	65,9
Total-Baixo Tocantins					227.94	3.59	818

Qm = Vazão média de longo período; Q95 = Vazão com permanência de 95%.

Fonte: Adaptada de MMA; SPRH; ANA (2006).

Na RHTA foram identificados 6 macro unidades de solos: Planícies, Depressões, Tabuleiros, Patamares, Chapadas e Planaltos. Os solos de maior evidência na região são

Latossolos Vermelho-Amarelo e Vermelho, com texturas variáveis de média a argilosa, associados comumente a Solos Concrecionais, Neossolos Quartzarênicos, Solos Podzólicos Vermelho-Amarelo e eventualmente, há outros solos. Segundo (MMA; SPRH; ANA), (2003b), o solo possui baixa fertilidade natural e boas características físicas, geralmente em relevo plano a suavemente ondulado. Também é observada na Região a presença do bioma Floresta Amazônica ao norte e nordeste, apresentando características de zona de transição para o bioma Cerrado, que domina grande parte dessa região hidrográfica.

A região hidrográfica apresentou um crescimento populacional de 131mil para 228mil habitantes entre 2000 e 2010, sendo considerada a maior taxa de crescimento do país segundo o IBGE (2010). A região possui 72% de áreas urbanas, cuja densidade demográfica é de 8,1 hab/km², bem inferior à do país (19,8 hab/Km). A maior parte da população concentra-se nas unidades hidrográficas do Tocantins e litoral do Pará, com 411 municípios inseridos, total ou parcialmente, no seu território.

O clima da RHTA é tropical, com temperatura média anual de 26°C, apresentando-se dois períodos climáticos bem definidos: o chuvoso (outubro a abril), quando ocorre, aproximadamente, mais de 90% da precipitação, com existência de alguns dias secos entre janeiro e fevereiro, formando o chamado veranico; e o seco (maio a setembro), com baixa umidade relativa (MMA; SPRH; ANA, 2006). Segundo dados da (MMA, SPRH, ANA, 2006a, b), a precipitação média na RHTA é da ordem de 1.869 mm/ano, com máxima chegando a 2.565 mm/ano no litoral do Pará, enquanto a evapotranspiração real média é de 1.371 mm/ano e o coeficiente médio de escoamento superficial é de aproximadamente 0,30.

O regime hidrológico da RHTA apresenta uma marcante sazonalidade, porém, os rios Tocantins e Araguaia possuem comportamentos distintos. No rio Tocantins, a época de cheia estende-se de outubro a abril, com pico em fevereiro, no curso superior, e em março, nos cursos médio e inferior. No Araguaia, as cheias são mais pronunciadas e ocorrem com um mês de defasagem em relação ao Tocantins, devido a enorme planície de inundação que ocorre entre o Araguaia e o rio das Mortes, na região da planície do Bananal. O período de estiagem é bem definido, com vazões mínimas em junho e julho (MMA; SPRH; ANA, 2006).

O regime pluviométrico é caracterizado pela ocorrência do aumento das precipitações com a diminuição da latitude (sentido sul-norte). A zona de menor precipitação ocorre na faixa oeste do município do Paranã (GO), na divisa com a região Nordeste, com valores médios de 1 mm/mês entre junho e agosto. Em grande parte da bacia, o período seco reduz-se a três meses do ano (junho, julho e agosto) e próximo à foz atinge entre cinco e seis meses (SUDAM/PHCA, 1984). A distribuição e o total das precipitações ocorrem, pelo fato, quase

que exclusivamente, aos sistemas de circulação atmosférica, o que torna o efeito da topografia pouco significativo (FGV; MMA, 1998).

Embora as médias e as máximas mensais de temperatura sejam elevadas, a posição continental da área faz com que estas temperaturas no período noturno, sejam bem mais baixas que as diurnas. Os mínimos térmicos são originados pelas frentes frias oriundas do sul do continente, alcançando, com excepcionalidade, valores abaixo de 5°C na parte sul da região e da ordem de 10°C na parte norte (FGV; MMA, op.cit). Os principais fatores de influência na distribuição espacial das temperaturas médias são a latitude, variando de 2°S a 18°S, e a altitude, variando desde cotas próximas a 1.000 m, nas nascentes, ao sul, até cerca de 70 m, na confluência dos rios Tocantins e Araguaia, até atingir o nível do mar na foz do Rio Tocantins (FGV; MMA, op.cit).

O regime de ventos é caracterizado por predominância de calmaria durante grande parte do ano e, conseqüentemente, pela ausência de ventos fortes, o que é explicado pela homogeneidade climática associada à geomorfologia, e a cobertura vegetal. O que é bem ilustrado pela velocidade média dos ventos encontrada no PRODIAT (MI e OEA, 1985), em torno de 1,30 m/s, com ausência de ciclones intensos. Há também grande regularidade na distribuição das pressões em função da altitude, merecendo mencionar a dispersão anual em torno de 5 milibares (mb) ao longo da região (FGV; MMA, op.cit).

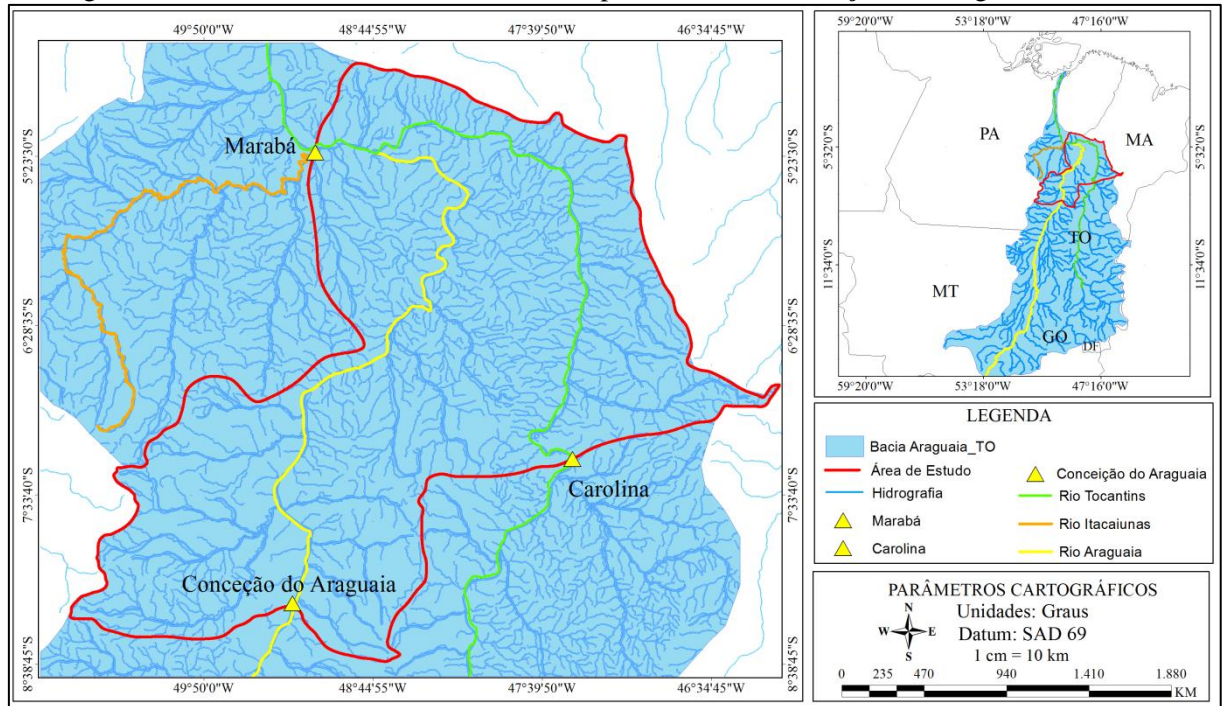
3.1.1 Área de Aplicação do Modelo

Para o desenvolvimento dos modelos hidrológicos, delimitou-se uma sub-bacia limitada a montante pelas estações fluviométricas nos municípios de Carolina (rio Tocantins) e Conceição do Araguaia (Rio Araguaia) e a jusante pela estação fluviométrica, localizada no município de Marabá (rio Tocantins), entre as latitudes 04° 47' 00" e 08° 38' 45" Sul e longitudes 46° 08' 05" e 50° 52' 00" oeste. Os critérios de escolha do limite da sub-bacia devem-se, pelo fato, de existir uma maior disponibilidade de dados fluviométricos em ambos os postos. A Figura 3 mostra esta sub-bacia (linha vermelha), na qual, a mesma possui uma área de aproximadamente 97.609 km², abrangendo partes dos estados do Tocantins, Pará e Maranhão.

Foram destacados na área de estudo os aspectos pedológicos, pois os conhecimentos do solo, tais como profundidade, textura, drenagem, etc, são importantes na compreensão do escoamento resultante da precipitação, e o conhecimento do intervalo de tempo na alteração do nível do rio. Segundo Tucci (2005) após o início da chuva, existe um intervalo de tempo em que o nível do rio começa a subir, este tempo retardado de resposta deve-se as perdas

iniciais por interceptação vegetal e depressões do solo, além do próprio retardo de resposta da bacia devido ao tempo de deslocamento de água na mesma.

Figura 3 – Área de estudo, sub-bacia limitada por Carolina, Conceição do Araguaia e Marabá.



Na sub-bacia, predominam solos desenvolvidos, como os Argissolos, Latossolos, Nitossolos e Neossolos Quartzênicos. Apesar de terem diferentes características morfológicas (textura, estrutura, diferenciação entre os horizontes, fertilidade, etc), estes solos têm a característica comum, de ser profundos, desenvolverem-se em relevos pouco ou medianamente dissecados e apresentarem drenagem boa a muito boa. Em regiões com baixa declividade há ocorrência também de solos mal drenados dos tipos Vertissolo e Plintossolo. Portanto as características como textura argilosa, baixa profundidade, favoráveis ao escoamento superficial, são balanceadas pela suave ondulação que propicia a infiltração e consequentemente o escoamento sub-superficial. Nas áreas de maior declividade há ocorrência de Cambissolos e Neossolos Litólicos, que se trata de solos pouco profundos e mal desenvolvidos. Nas áreas de planícies encontram-se Gleissolos e Neossolos Flúvicos, que são solos mal drenados periodicamente alagados (SIVAM/IBGE, 2004). A Caracterização básica dos tipos de solo é mostrada na Tabela 8.

Tabela 8 – Caracterização dos tipos de solos que ocorrem na sub-bacia.

CLASSIFICAÇÃO	PROFUNDIDADE	TEXTURA	DRENAGEM	RELEVO
Argissolos (Podzólico)	Profundo	Argilosa a média	Boa	Suave ondulado e ondulado
Latossolos	Muito Profundo	Média a argilosa	Boa a muito boa	Plano, suave ondulado e ondulado
Neossolos Quartzênicos	Muito Profundo	Arenosa	Fortemente drenado	Plano e suave ondulado
Cambissolo	Pouco profundo	Argilosa a média	Bem drenado /mal drenado	Forte ondulado
Solos Litólicos	Raso	Franco argilosa a argilosa	Mal drenado	Escarpado
Vertissolo	Medianamente profundo	Argilosa	Mal drenado	Suave ondulado a plano
Plintossolo	Pouco profundo	Argilosa	Mal drenado	Suave ondulado a plano
Gleissolo	Pouco profundo	Argilosa	Mal drenado	Plano
Solo Aluvial	Medianamente profundo	Indiscriminada	Muito mal a mal drenado	Plano

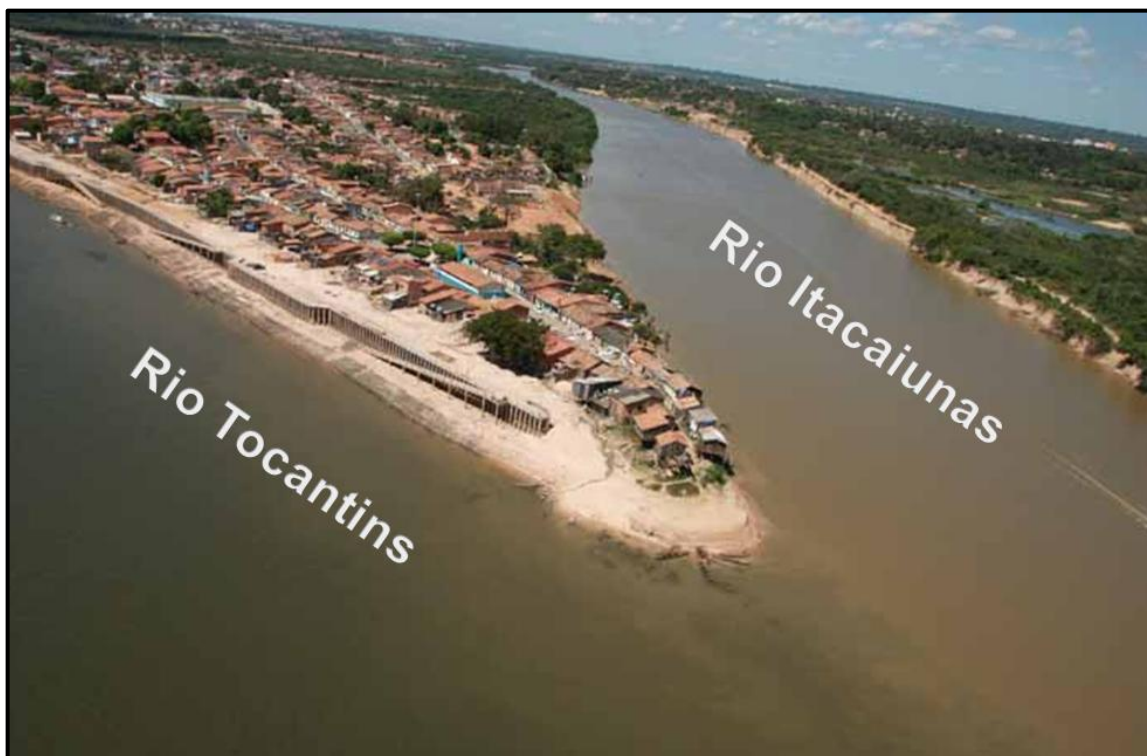
Fonte: SIVAM/IBGE, 2004.

3.1.2 O Município de Marabá-PA

O estudo da modelagem nessa pesquisa foi desenvolvido para o Município de Marabá-PA (05° 21' 54"Latitude Sul e 49° 42' 30" Longitude Oeste). O município está situado na região Amazônica, no sudeste do Estado do Pará, na confluência do rio Tocantins com o rio Itacaiunas, conforme indica a Figura 4. Tem seus limites formados ao Norte pelos Municípios de Itupiranga, Rondon do Pará, Nova Ipixuna e Novo Repartimento; Ao Leste pelos Municípios de Bom Jesus do Tocantins, São João do Araguaia, São Domingos do Araguaia e São Geraldo do Araguaia; Ao Sul pelos Municípios de Curionópolis, Parauapebas, Eldorado do Carajás, Parauapebas e São Félix do Xingu, e à Oeste pelo Município de São Félix do Xingu.

O município de Marabá compreende uma área de 15.092,268 km², sendo que em 18,35% desta encontram-se áreas de conservação florestal com jurisdição federal. Possui atualmente 233.462 de habitante, divididos em 118.148 homens e 115.314 mulheres, é a nona cidade mais populosa da Amazônia. (IBGE, 2010). A cidade desenvolveu-se a partir do Distrito Marabá Pioneira e formada basicamente por 5 núcleos urbanos: Marabá Pioneira, Cidade Nova, São Felix, Morada Nova e Nova Marabá, sendo interligados por rodovias e separados por rios ou áreas alagáveis.

Figura 4 – Vista aérea de Marabá – confluência dos rios Itacaiunas e Tocantins



Fonte: Adaptada, <http://www.maraba.pa.gov.br/galeria.htm> (2011).

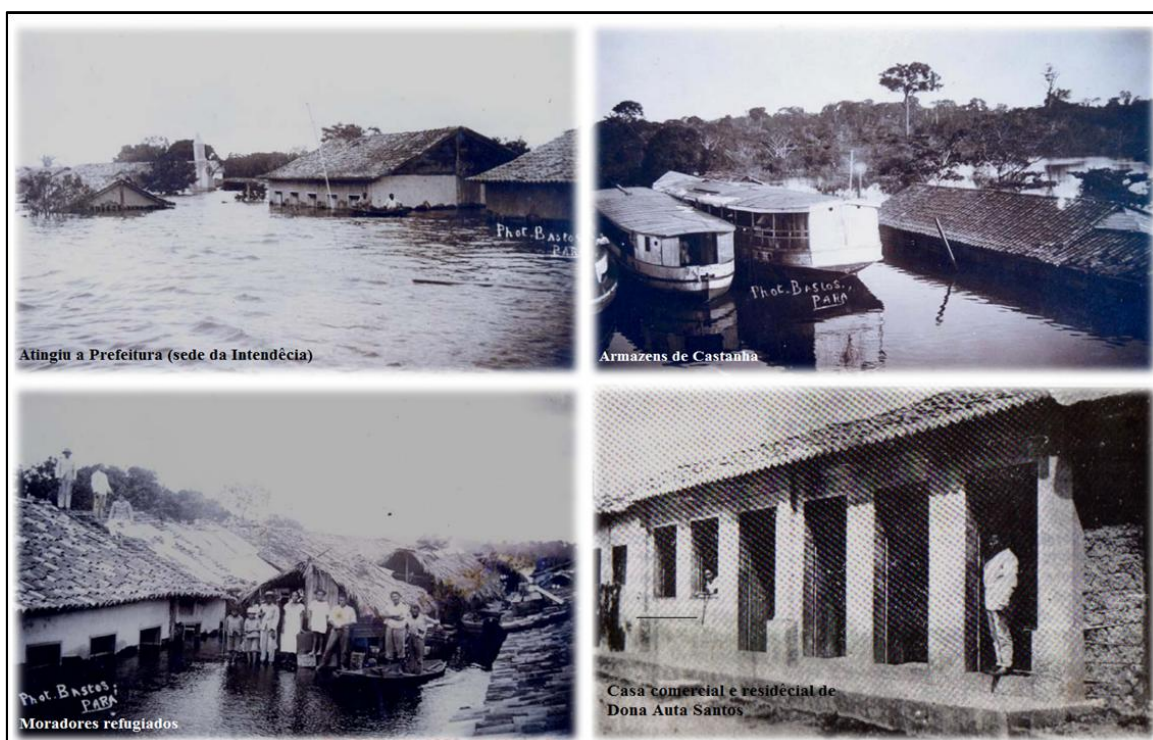
O Distrito de Marabá Pioneira, também conhecida como Cabelo seco, é a região onde todos os anos centenas de pessoas são desalojadas de suas casas pela elevação da cota dos rios. Devido a esses acontecimentos fez-se surgir o núcleo Nova Marabá a partir de um projeto do Governo Federal que decidiu transferir a população da Marabá Pioneira, local que sofre com a ocorrência das enchentes, para um novo local, através do PDUM – Plano de Desenvolvimento Urbano de Marabá (PNUAH; PNUMA; MMA, 2006).

O município de Marabá “sofre” com a grande pressão demográfica, sendo que a evolução do número de habitante acelerou a partir da década de 80 que, de acordo com o (PNUAH, PNUMA, MMA) (op.cit), devido as grandes mineradoras (crescimento industrial), atividades pecuárias e madeireiras, entre outras, vem ocasionando o aumento do fluxo migratório. Este fato resulta em diversos problemas ambientais, causados pelo mau uso e ocupação do solo, e o crescimento demográfico desordenado.

A explosão demográfica na cidade de Marabá teve como consequência a periferização e a ocupação irregular de áreas de várzea. Os rios em períodos de cheia inundam partes da cidade, e deixam desabrigadas inúmeras pessoas. Sua expansão urbana e rural se define pelos grandes acidentes geográficos presentes em todo o território do município. A área urbana do município corresponde somente por cerca de 6,9% da área total do mesmo ou 1.041,365 km². Historicamente, o município é impactado, anualmente, pelas cheias dos rios Itacaiunas e

Tocantins. As enchentes assumem proporções bem maiores que no passado, em se tratando do número de pessoas atingidas, principalmente a partir da década de 80. Registros mostram que a enchente de 1926 causou sérios danos à cidade, que permaneceu imersa por mais de 30 dias (Figura 5). E devido às periódicas enchentes do rio Tocantins, 13 de abril de 1931, o Decreto nº 287, muda para Lago Vermelho a sede do município de Marabá, em decorrência da impossibilidade da permanência da sede da Prefeitura, no lugar onde se encontrava.

Figura 5 – Aspectos de cheias na Marabá antiga em 1926.



Fonte: Almeida (2008)

Segundo Gomes (2007), apesar da enchente de 1926 ter atingido toda a população, a cheia de 1980 foi muito mais danosa, além disso, recobriu toda região. O efeito do impacto foi considerado maior devido à presença da população, pois o volume de mercadorias e os investimentos atingidos pelas águas eram consideravelmente superiores. Na Figura 6, observam-se os aspectos da enchente de 1980, na qual a inundação atingira a Câmara e o Mercado Municipal, o Cais da Orla e segundo o mesmo autor, o nível do rio atingiu à altura do teto do pavimento inferior do Palacete Augusto Dias, atualmente sede da Câmara Municipal de Vereadores.

Figura 6 – Aspectos da cheia de Marabá em 1980

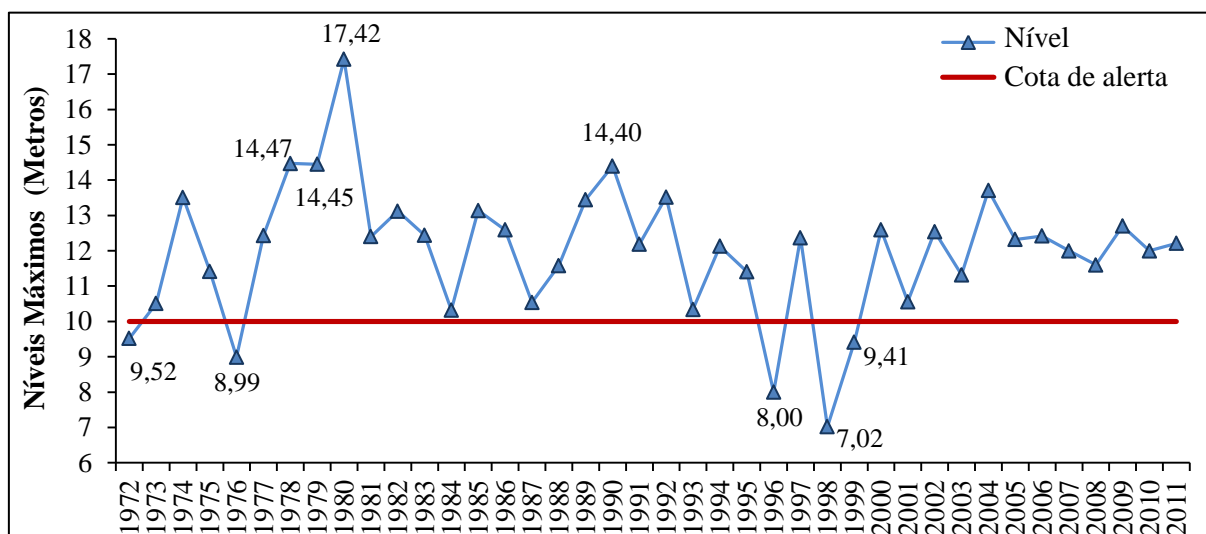


Fonte: Almeida (2008)

Os registros de nível do rio Tocantins em Marabá teve início no ano de 1972, pelo Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica (DNAEE), onde o Anexo D, e a Figura 7 mostram o registro dos últimos 40 anos no nível máximo mensal de Marabá. A Figura 7 mostra que desde o início das observações até a atualidade em apenas 5 eventos de cheia o nível de alerta definida pela Defesa Civil, de 10 metros, não foi ultrapassada nos anos 1972, 1976, 1996, 1998 e 1999, com os respectivos níveis (em metros) de 9,52, 8,99, 8,00, 7,02 e 9,41. Destaque-se o menor nível observado de 7,02 m, em 1998.

Nos anos de grandes cheias, as maiores, que ultrapassaram 14 m, foram em 1978, 1979, 1980 e 1990, com respectivos níveis de 14,47, 14, 45, 17,42 e 14,40. O maior nível já registrado foi no ano de 1980, com a cota de 17,42 m, e o segundo maior nível ocorreu no ano de 1990, registrando 14,40 m, uma diferença de aproximadamente 3 metros. Observa-se, também, na mesma Figura que a amplitude dos níveis máximos está diminuindo desde o ano de 2004, variando em média de um ano para outro de 0,67 cm.

Figura 7 – Níveis máximos mensais em Marabá (Série: 1972 – 2011).



De acordo com a Defesa Civil é possível definir o número de moradores atingidos pelas enchentes de acordo com o nível de alerta (Tabela 9), logo, tem-se que observar a topografia de Marabá (Anexo E) para verificar os locais ou áreas mais baixas e altas. Através da delimitação dos bairros e folhas (Anexo F) organizados pela PMM, e através dos bairros e folhas, nota-se que os pontos mais elevados situam-se na Cidade Nova, às proximidades do aeroporto, com 134,5m. Já na Nova Marabá, às proximidades da interseção da rodovia Transamazônica com a rodovia PA-150, com 119,1m e na Marabá Pioneira, nas proximidades da interseção da Av. Antônio Maia e Getúlio Vargas com 84,90m de altitude (PNUAH; PNUMA; MMA, 2006). Quanto aos pontos urbanizados de menor altitude, situam-se na Cidade Nova, no Bairro da Independência, Liberdade e Bairro do Novo Planalto; na Nova Marabá, nas folhas 131, 14 e 33 e na Marabá Pioneira, no bairro do Cabelo Seco, Santa Rita e Santa Rosa. Nem todos os indivíduos atingidos aceitam a transferência oferecida pela PMM, preferindo ficarem em casas de parentes ou elas mesmas construindo os seus abrigos nas áreas mais altas.

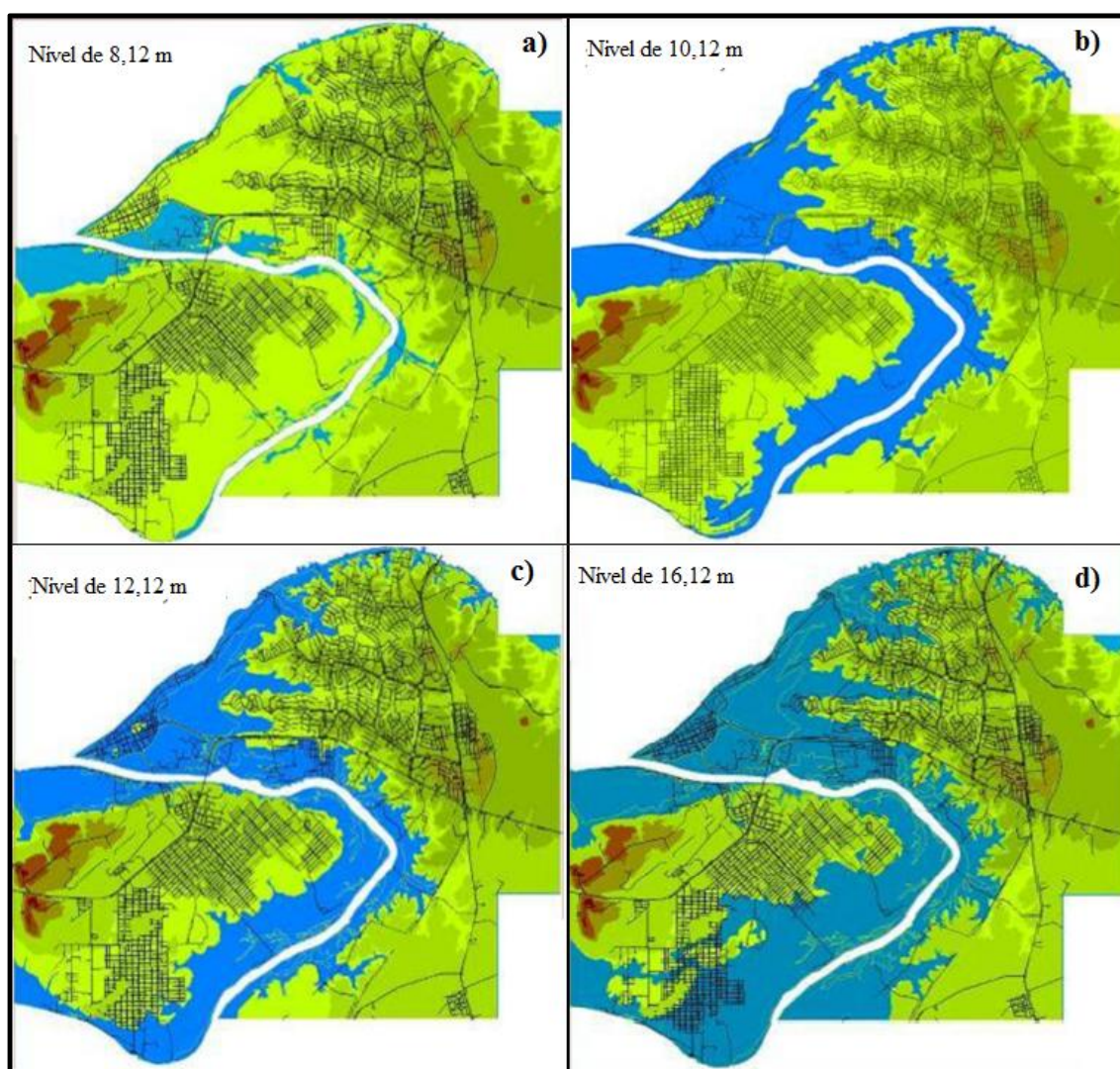
Tabela 9 – Número de pessoas atingidas em relação ao nível alcançado das enchentes

Nível alcançado (M)	Pessoas atingidas
10,88	920
11,20	2.000
11,88	5.990
11,99	7.500
12,34	11.316
12,40	16,175

Fonte :Adaptado de PNUAH; PNUMA;MMA. (2006, 2010)

Segundo o (PNUAH, PNUM; MMA) (2006) é possível simular a porcentagem de dois núcleos atingidos pelas enchentes dos rios Tocantins e Itacaiunas, observados nas Figuras 8(a), (b), (c) e (d), que constituem simulações de enchentes que alcançam os níveis de 8,12, 10,12, 12,12 e 16,12 metros, feitas usando como referências às enchentes de menor nível, de nível médio e de maior nível alcançados entre 1976 e 2004.

Figura 8 – Simulação da área de inundação em Marabá, observando as enchentes que os níveis do rio alcançam 8,12 (a), 10,12 (b), 12,12(c) e 16,12 (d) metros.



Fonte: Adaptado de PNUAH; PNUMA; MMA. (2006, 2010)

Os núcleos atingindo podem são detalhados segundo o (PNUAH; PNUMA; MMA) (2006):

a) Na Figura 8 (a), se a enchente alcançar o nível 8,12 m, cerca de 7% da área total dos três núcleos é atingido pela enchente, correspondendo a 23,36% da Marabá Pioneira, 5,77% da Nova Marabá e 3,49% da Cidade Nova;

b) Na Figura 8 (b), com o nível 10,12m, ou seja, passando o nível de alerta, já ocorre alagamentos em grandes áreas urbanizadas como nos bairros do Cabelo Seco, Santa Rita e Santa Rosa, na Marabá Pioneira e na Folha 33, na Nova Marabá;

c) Na Figura 8 (c), com nível 12,12m, o percentual do total dos três núcleos, aumenta para 35,75%, correspondendo a 91,12% da Marabá Pioneira, 20,80% da Nova Marabá e 33,7% da Cidade Nova;

d) E na Figura 8 (d), com o nível de 16,12m, o percentual do total dos três núcleos atingidos é mais que 50%, sendo 100% da Marabá Pioneira, 31,13% da Nova Marabá e 54,45% da Cidade Nova.

3.2 BASE DE DADOS

A base de dados utilizada nesta pesquisa está disponível para “download” no “site” www.ana.gov.br, o qual contém o banco de dados Hidrológicos da Agência Nacional de Água (ANA). Essa base de dados consiste na série histórica de níveis médios diários dos rios Tocantins e Araguaia, cujos dados são coletados nos postos fluviométricos de 3 estações hidrológicas, localizadas nos municípios de Carolina, no estado do Maranhão, Conceição do Araguaia e Marabá, no estado do Pará.

Os dados de precipitação pluviométrica mensal de 39 anos (1973-2011) do Município de Marabá foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do posto pluviométrico de Marabá. A Figura 3 ilustra a localização das estações fluviométricas (triângulos amarelos) e a Tabela 10 mostra as principais informações sobre os postos fluviométricos de Carolina, Conceição do Araguaia e Marabá.

Para o desenvolvimento dos modelos de séries temporais foi utilizado à série de níveis médios diários de 858 observações entre 01 dezembro de 2008 e 07 de Abril de 2011, sendo que 07 observações, de 01 a 07 de abril a 2011, foram utilizadas para comparar com as previsões obtidas pelos modelos. Foram realizadas análises e previsões utilizando o modelo ARIMA e Função de Transferência de BJ, usando os aplicativos estatísticos Gretl e SAS.

Tabela 10 – Dados das estações fluviométricas da sub-bacia RHTA.

Código	Nome	Tipo	Operadora	Localização Geográfica	
				Latitude (°)	Longitude (°)
82562	Marabá	Pluviométrica	INMET	-5,636448	-49,101608
29050000	Marabá	Fluviométrica	Eletronorte	-5,3386111	-49,124444
23300000	Carolina	Fluviométrica	CPRM	-7,3341667	-47,481389
27500000	Conceição do Araguaia	Fluviométrica	CPRM	-8,1027778	-49,259444

Para caracterizar os níveis do rio Tocantins nos meses do período chuvoso, cujos níveis categorizados ACIMA e MUITO ACIMA do normal, foi utilizada a técnica dos Quantis ao longo de 4 décadas (1972-2011). Os impactos socioeconômicos causados pelas enchentes da cidade de Marabá nos anos de 2009 e 2011 foram mostrados e quantificados, com base nas informações da Defesa Civil de Marabá e do Relatório de Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental-Marabá de 2006 e 2010 realizado em parceria pelo Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos (PNUAH), Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e Ministério do Meio Ambiente (MMA).

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Modelagem ARIMA

Para aplicação da metodologia de BJ, tem-se a necessidade primeiramente, de analisar três hipóteses, a fim de obter melhores resultados. A primeira é relativa ao tamanho inicial da amostra, que deve ser no mínimo, 50 observações (BOX; JENKINS, 1976). A segunda exige que a série seja estacionária, isto é, que a série varie em torno da média constante e com uma variância constante, e caso a série não seja estacionária, faz-se a diferenciação para torná-la estacionária. A terceira hipótese para os modelos ARIMA é de que a série seja homocedástica, isto é, tenha uma variância constante ao longo do tempo (PASSOS; RAMOS, ALMEIRA, 2003).

Foi utilizada a metodologia de BJ que segue o processo ARIMA (p, d, q) para gerar os modelos de previsão, sendo que a ordem p do modelo significa o número de termos autoregressivos usados. A ordem d , e a parte de integração, que significa o número de diferenciações aplicadas à série a fim de que ela se torne estacionária da qual esse processo não altera no resultado da previsão. A ordem q significa o número de termos de média móvel utilizado no modelo.

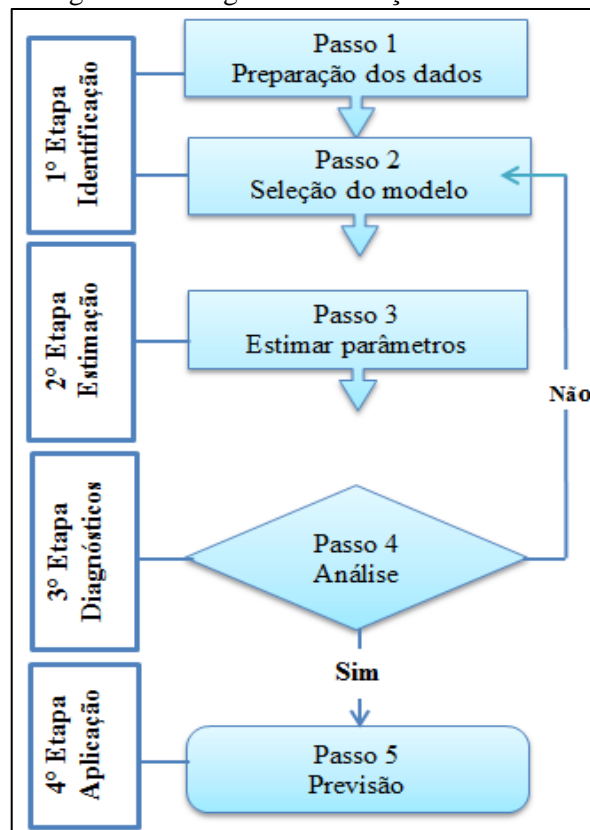
Foram construídos seis modelos estatísticos, sendo quatro univariados (Carolina (Z_t), Conceição do Araguaia (F_t) e Marabá (X_t e Y_t)) e dois multivariados, Marabá (M_t e N_t). Os modelos univariados usaram a própria série como variáveis explicativas, e os modelos multivariados usaram além de usar sua própria série, as séries de Carolina (Z_t), e Conceição do Araguaia (Y_t), como variáveis independentes.

Os modelos foram construídos usando dois aplicativos estatísticos. O SAS utiliza a função de transferência na sua metodologia, tendo como variáveis de entrada do modelo multivariado as equações dos modelos univariados de cada uma das séries temporais envolvidas. Já o Gretl usa como variáveis explicativas as próprias séries e não uma equação

de modelos univariados. Logo, devido a esses fatores cada modelo obtido é baseado em equações diferentes. Sendo que o objetivo final é comparar quais modelos foram mais precisos para fazer as previsões de níveis em Marabá.

As etapas da metodologia da construção dos modelos univariados e multivariados e os ajustes dos modelos de séries temporais, obtiveram os modelos de previsão de nível diário para Marabá-PA, foram descritos através do ciclo iterativo (Figura 9) que consiste de quatro fases: identificação, estimação, teste de diagnóstico ou validação e aplicação ou previsão (MAKRIDAKIS et al, 1998).

Figura 9 – Estágio de construção do modelo.



Fonte: Fluxograma do ciclo iterativo de Box & Jenkins, adaptado de Makridakis et al.(1998) e DeLurgio (1998).

Como já descrito anteriormente, as equações são diferentes, sendo que a equação geral utilizada no Gretl é representada pela eq. (3):

$$W_t = \gamma + \phi_1 W_{t-p} + \dots + \phi_2 W_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q}, \quad (3)$$

que é denominada *equação de diferença*, utilizada nas previsões, onde:

W_t - é a variável dependente (resposta) da série temporal;

γ - é o termo constante gerada pelo modelo estimado;

p – é a defasagem máxima de W_t presente na equação;

q – é a defasagem máxima de a_t presente na equação;

a_t – é o erro aleatório, como o nome sugere, é produto das variações nas medições que não seguem uma tendência fixa, mas que podem ser analisadas estatisticamente pelo cálculo de sua dispersão.

ϕ_1 e ϕ_p – são parâmetro que ajustam valores passados de W_t ;

θ_1 e θ_q – é o parâmetro representa a serie em função dos perturbações passados.

As equações utilizadas no programa SAS, descritas no sub-item a seguir. Será realizada uma breve descrição da metodologia multivariada usando a função de transferência. Este procedimento serve para melhor entendimento da previsão do modelo multivariado proposto por BJ. Também é descrita a função de correlação cruzada utilizada para análises da escolha dos parâmetros do modelo multivariado. Fora detalhada a modelagem ARIMA baseado no ciclo iterativo.

3.2.1.1 Função de Transferência

O modelo ARIMA é adequado para séries multivariadas, utiliza a função de transferência que funciona como vínculo (filtro linear) entre as variáveis explicativas e variáveis respostas. O uso da função de transferência (também conhecida como modelo de função de transferência) serve para encontrar a combinação linear entre duas ou mais séries, utilizando a análise do comportamento das correlações cruzadas entre as variáveis de entrada e saída. Usando um modelo estocástico com o menor erro médio quadrático.

Os Modelos de funções de transferências são algumas vezes referidos como modelos de regressão dinâmicos. Consideram que X_t e Y_t são séries adequadamente transformadas de modo que ambas sejam estacionárias. Em um sistema linear de entrada e saída simples, as séries de entrada X_t e saída Y_t são relacionadas através de um filtro linear, mostrado na eq.(4).

$$Y_t = v(B) + X_t + N_t, \quad (4)$$

onde $v(B) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} v_j B^j$. É referido como o filtro da função de transferência geral, por Box e Jenkins (1976) e N_t é a série de ruído do sistema que é independente da série de entrada X_t .

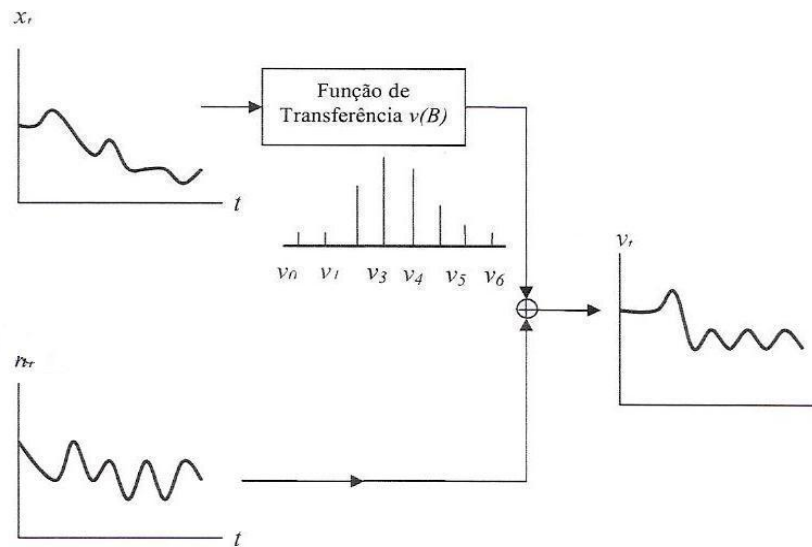
Os coeficientes no modelo da função de transferência (eq. (4)) são frequentemente chamados de pesos da resposta impulso. O modelo de função de transferência é considerado estável se a sequência desses pesos da resposta impulso for finita (absolutamente somável),

i.e., $\sum |v_i| < \infty$. Portanto, em um sistema estável uma entrada limitada sempre produz uma saída limitada. Sendo expresso na eq. (5).

$$Y_t = v_0 + v_1 X_{t-1} + v_2 X_{t-2} + \dots + N_t, \quad (5)$$

O sistema da função de transferência é apresentado na Figura 10. E nessa pesquisa as variáveis explicativas usadas no modelo de transferência são as equações dos modelos univariados de Carolina, Conceição do Araguaia e Marabá.

Figura 10 – Sistema dinâmico da função de transferência



Fonte: Wei (1990).

O objetivo da modelagem de função de transferência é identificar e estimar a função de transferência $v(B)$ e o modelo de ruído para N_t com base na informação disponível das séries de entrada X_t e da série de saída Y_t . A maior dificuldade é que a informação sobre X_t e Y_t é finita e a função de transferência na eq. (5) contém um número infinito de coeficientes. Para aliviar essa dificuldade a função de transferência $v(B)$ é representada na seguinte forma racional:

$$v(B) = \frac{w_s(B)B^b}{\delta_r(B)}. \quad (6)$$

Onde, $w_s(B) = w_0 - w_1 B - \dots - w_s B^s$, $\delta_r(B) = 1 - \delta_1 B - \dots - \delta_r B^r$, e b é um parâmetro de defasagem que representa o atraso do tempo presente que decorre antes que o impulso da variável de entrada produza um efeito sobre a variável de saída. Para um sistema estável é considerado que as raízes de $\delta_r(B) = 0$ estão fora do círculo unitário (Morettin e

Toloi, 1987). Encontrados $w_s(B)$, $\delta_r(B)$ e b os pesos v_j da resposta impulso podem ser obtidos igualando-se os coeficientes de B_j em ambos os lados, observado na equação (7).

$$\delta_r(B)v(B) = w_s(B)B^b, \quad (7)$$

ou

$$[1 - \delta_1 B - \dots - \delta_r B^r][v_0 + v_1 B + v_2 B^2 + \dots] = [w_0 - w_1 B - \dots - w_s B^s]B^b \quad (8)$$

Portanto, temos que:

- | | |
|---|----------------------------------|
| a. $v_j = 0$ | $j < b$ |
| b. $v_j = \delta_1 v_{j-1} + \delta_2 v_{j-2} + \delta_r v_{j-r} + w_0$ | $j = b$ |
| c. $v_j = \delta_1 v_{j-1} + \delta_2 v_{j-2} + \delta_r v_{j-r} + w_{j-b}$ | $j = b + 1, b + 2, \dots, b + s$ |
| d. $v_j = \delta_1 v_{j-1} + \delta_2 v_{j-2} + \delta_r v_{j-r}$ | $j > b + s$ |

3.2.1.2 Função de Correlação Cruzada

A Função de correlação cruzada é uma medida útil de direção e intensidade entre duas variáveis aleatórias. Considere dois processos estocásticos X_t e Y_t para $t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Dizemos que X_t e Y_t são estacionários conjuntamente se ambos são processos univariados estacionários e a correlação cruzada entre X_t e Y_t , Covariância (X_t, Y_t) , é uma função somente da diferença de tempo $(s - t)$. Em tais casos, a função de covariância cruzada entre X_t e Y_t é (WEI, 1989):

$$\gamma_{xy}(k) = E[(X_t - \mu_x)(Y_t - \mu_y)], \quad (9)$$

Onde E representa a esperança matemática (média).

Para $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, sob padronização, temos a seguinte função de correlação cruzada:

$$\rho_{xy}(k) = \frac{\gamma_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (10)$$

Para $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, onde σ_x e σ_y são os desvios-padrão de X_t e Y_t , respectivamente. É importante notar que a função de covariância cruzada $\gamma_{xy}(k)$ e as funções de correlação cruzada $\rho_{xy}(k)$ são generalizações das funções de autocovariância e autocorrelação porque $\gamma_{xx}(k) = \gamma_x(k)$ e $\rho_{xx}(k) = \rho_x(k)$. Contudo, ao contrário da função de autocorrelação $\rho_x(k)$, que é simétrica em relação à origem, i.e., $\rho_x(k) = \rho_x(-k)$, a função de correlação cruzada não é simétrica, ou seja, $\rho_{xy}(k) \neq \rho_{xy}(-k)$. Em vez disso, temos:

$$\gamma_{xy}(k) = E(X_t - \mu_x)(Y_{t-k} - \mu_y) = E(Y_{t-k} - \mu_y)(X_t - \mu_x) = \delta_{yx}(-k) \quad (11)$$

que implica em:

$$\rho_{xy}(k) \neq \rho_{xy}(-k) \quad (12)$$

Deste modo, a função de correlação cruzada, FCC, mede não somente a intensidade de uma associação, mas também sua direção. Para ver a figura inteira da relação entre as séries X_t e Y_t é importante examinar a FCC, $\rho_{xy}(k)$, para ambos os atrasos positivos e negativos, $k > 0$ e $k < 0$, e o gráfico da FCC é conhecido como correlograma cruzado.

3.2.1.3 Etapas do ciclo iterativo

A metodologia de BJ foi descrita de acordo com o ciclo iterativo (Figura 9). Sendo a 1ª etapa, chamada de identificação, que se verifica a condição de estacionaridade da série, esta característica é preponderante para que se possa modelar o modelo ARIMA. Nessa etapa, também, identifica a estrutura do modelo, isto é, as ordens de p (parte autoregressiva), d (quantidade de diferenciação) e q (parte dos termos de erros defasados – média móvel) que caracterize a estrutura do modelo ARIMA, para a série temporal em estudo (BARROS, 2011). Segundo Morettin e Tolo (2006) essa etapa é a mais crítica do ciclo iterativo do método de BJ, pois a identificação do modelo é baseada, principalmente, com base nas autocorrelações e autocorrelações parciais. Geralmente, essa técnica é muito eficiente, mas, é importante salientar que pode ser identificado mais de um modelo para mesma série. Essa etapa é dividida nos seguintes passos:

Passo 1: Preparação dos dados – Verifica-se a necessidade de uma transformação na série original, através da análise gráfica da série original em função do tempo. Faria et al (2008) afirma que através da análise gráfica pode-se identificar as características relevantes para o estudo da série em questão. O objetivo da análise gráfica de tempo é verificar, nos modelos não sazonais, a presença de tendência ou alteração na variância, o que revelaria se a série é ou não estacionária. Ou seja, se a série não for estacionária ou possuir alguma tendência linear, é feita a diferenciação para estabilizar a série. Sendo estacionária, não há necessidade realizar tal procedimento, como no caso os modelos sazonais.

Existem basicamente dois motivos para se transformar os dados originais de uma série temporal: estabilizar a variância e tornar o efeito sazonal aditivo. Outra razão, segundo Morettin e Tolo (op.cit.), é obter uma série mais próxima possível de uma distribuição simétrica aproximadamente normal, ou seja, $\mu=0$ (média igual a 0) e $\sigma^2=1$ (variância igual a 1). Os procedimentos de transformação mais elementar é estabelecer diferenças sucessivas da

série original, até conseguir a desejada estacionaridade ,segundo o mesmo autor, a primeira diferença de $Z(t)$ é definida pela eq. (13).

$$\Delta Z_{(t)} = Z_{(t)} - Z_{(t-1)}, \quad (13)$$

a segunda diferença, pela eq. (14)

$$\Delta^2 Z_{(t)} = \Delta[\Delta Z_{(t)}] = \Delta[\Delta Z_{(t)} - Z_{(t-1)}], \quad (14)$$

de forma geral, a n -ésima diferença de $Z(t)$, expressa pela eq (15)

$$\Delta^n Z_{(t)} = \Delta[\Delta^{n-1} Z_{(t)}] \quad (15)$$

A confirmação da estacionaridade da série é realizada através do gráfico da FAC e de seu intervalo de confiança. Se a FAC apresenta um decréscimo acentuado nos seus primeiros valores, significa que a série é estacionária e $d=0$. Se o decréscimo for suave até atingir zero, significa que não é estacionária e terá o valor de d determinado pelo número de diferenciação.

A cada diferenciação realiza-se e novo teste de estacionaridade. Se após algumas sucessivas diferenciações não se tornar estacionária, a série não será homogênea e os modelos ARIMA não serão aplicáveis. Caso a avaliação visual da FAC não seja conclusiva, pode-se proceder a testes específicos de raízes unitárias; um dos mais utilizados é o de Dickey-Fuller, também conhecido como teste t .

Nessa pesquisa as séries temporais utilizadas com o aplicativo SAS foram consideradas não estacionárias, as usadas no Gret foram consideradas sazonais. A descrição dos próximos passos e etapas são os mesmos nos dois aplicativos estatísticos, sendo que as séries usadas no modelo função de transferência realizou-se apenas uma diferença.

Passo 2: Seleção do modelo – Analisam-se as funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP), através dos gráficos das respectivas funções, chamados de correlogramas. Através destes é possível identificar qual a ordem dos modelos é mais adequada. As correlações significativas de FAC indicam a ordem do modelo de médias móveis (valor de q). Os números de valores da FAC que estiverem acima do seu intervalo de confiança representam o valor máximo que q poderá atingir. As correlações significativas da FACP determinam a ordem da parte autoregressiva (valor de p), e o número de valores da FACP que estiverem acima do intervalo de confiança será considerado o valor máximo que p poderá atingir. A FAC e FACP são facilmente obtidas por comandos dos *softwares* especializados em séries temporais, como o GRETL, SAS, SHAZAM, EVIEWS e MINITAB.

A FAC mede o grau de correlação de uma variável, em um dado instante, consigo mesma em um instante de tempo posterior. Ou seja, correlações entre observações defasadas chamadas de *lag*'s. O termo *lag* é a diferença entre uma observação e um valor prévio desta. A FAC permite que se analise o grau de irregularidade de um sinal. O padrão da autocorrelação para o *lag* 1, 2,..., *k*, pode ser definida como a razão entre a autocovariância e a variância para um conjunto de dados, conforme mostra a eq. (16).

$$\phi = \frac{\sum_{t=0}^{n-k-1} (X_t - \bar{X})(X_{t+k} - \bar{X})}{\sum_{t=0}^{n-1} (X_t - \bar{X})^2}, \quad (16)$$

Onde:

ϕ é o coeficiente de autocorrelação;

n representa o comprimento da série temporal (ST);

t é o tempo inicial;

X é o valor esperado das observações calculado para a variação temporal (atraso) *k*.

O coeficiente de autocorrelação (ϕ) da ST varia entre -1 e 1. Quando ϕ assume o valor 1, diz-se que as duas variáveis medidas possuem uma autocorrelação positiva absoluta, caso contrário ($\phi = -1$), diz-se que a autocorrelação é negativa absoluta. Quando ϕ assume valor zero, não existe autocorrelação entre as variáveis, ou seja, autocorrelação nula (MORETTIN; TOLOI, 2006).

E \bar{X} representa a média aritmética da série (eq. (17)), definido como um valor típico ou representativo dos dados. Isto é, através da média aritmética pode-se apresentar o valor do ponto em torno do qual os dados se distribuem.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{n-1} X_t \quad (17)$$

A FACP é um instrumento bastante útil durante a etapa de identificação do modelo a ser ajustado aos dados observados, aplicada aos resíduos da série. A FACP representa a correlação entre Y_t e Y_{t-k} como uma função da defasagem *k*, filtrado o efeito de todas as outras defasagens sobre Y_t e Y_{t-k} . Define-se a FACP como a sequência de correlações entre $(X_t$ e X_{t-1}), $(X_t$ e X_{t-2}), $(X_t$ e X_{t-3}), e assim por diante, desde que os efeitos de defasagens anteriores sobre X_t permaneçam constantes. A FACP é calculada como o valor do coeficiente θ_{kk} na eq. (18).

$$X_t = \theta_{k1}X_{t-1} + \theta_{k2}X_{t-2} + \theta_{k3}X_{t-3} + \cdots + \theta_{kk}X_{t-k} + e_t \quad (18)$$

Também pode ser representada, conforme a eq. (19):

$$\theta_{kk} = \frac{\sum_{t=n}^{t=k+1} E[(X_t - \bar{X})(X_{t+k} - \bar{X})]}{\sum_T^{t=1} E(X_t - \bar{X})^2} \quad (19)$$

Na FAC e FACP são realizados dois testes nos resultados para verificar o grau de significância dos resultados obtidos. A estatística é realizada por meio do *p-valor* de cada valor T. A estatística Q, trata-se da comparação da estatística do teste com o valor crítico (Vc) correspondente em uma distribuição X^2 , quando Q for maior que o Vc, significa que os dados são significativos. E por meio do *p-valor* de cada valor T, verifica-se o grau de confiança dos resultados obtidos no correlograma da FAC e FACP. Também é realizada a fase de estimação dos parâmetros do modelo ARIMA. O valor de T fornece a taxa estimada do erro padrão para cada parâmetro. O *p-valor* é calculado usando um teste T, encontrado numa tabela de normalidade. O *p-valor*, de cada parâmetro, é obtido encontrando a probabilidade do erro padrão de cada parâmetro ser maior que T e menor que menos T. O teste é considerado significativo se o *p-valor* é menor que 0,05, e caso contrário, essa afirmação não é válida.

Na 2ª etapa, chamada de Estimação é determina do os valores dos parâmetros do modelo ARIMA, obtidos através correlogramas da FAC e FACP. Estimando-se os *p* parâmetros ϕ , (parâmetros autoregressivos) e os *q* parâmetros θ (parâmetros média móvel) do modelo escolhido;

Passo 3: a estimação é o passo, no qual, todas as estatísticas dos coeficientes são geradas. A estimação dos parâmetros pode ser obtido usando vários métodos como: Mínimos Quadrados, Mínimos Quadrados Generalizados ou Máxima Verossimilhança. Sendo que nessa pesquisa foram utilizadas a Máxima Verossimilhança Exata e a Condicionada, que estima os valores do parâmetro com relação aos dados observados, os quais são mais verossímeis e maximizam a função verossimilhança $L(\theta, y)$, onde y é fixo e θ é a variável. O problema consiste em obter o vetor $\hat{\theta}$ que maximiza esta função. O estimador de máxima verossimilhança $\hat{\theta}$ é o vetor que faz $L(\hat{\theta}, y) > L(\bar{\theta}, y)$, onde $\bar{\theta}$ é qualquer outro estimador de θ .

As séries de testes estatísticos (Tabela 11) realizados nos modelos obtidos são: a) Erro Padrão (SE – Standard Error) realizado para cada parâmetro; b) Estatística Z ou Z score (Standard score), c) Critério de Informação de Akaike (AIC – Akaike Information Criterion)

d) Critério de Informação Bayesiano de Schwarz (BIC – Baysean Information Criterion) e f) Critério de Informação de Hannan e Quinn (HQC – Hannan& Quinn Criterion).

Tabela 11 – Tipos de testes estatísticos

TESTES ESTATÍSTICOS	
SE	Avalia a precisão do cálculo da média da série. E o valor desta estatística deve ser pequeno, próximo à zero.
	$S_e = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, onde: σ = desvio padrão da distribuição e n = número da amostra.
Z	É uma medida estatística para determinar a validade dos resultados obtidos. Baseia-se na curva normal, e mede quanto um determinado resultado (valor) afasta-se da média em unidades de desvio padrão.
	$Z = \frac{X - \bar{X}}{\sigma}$, onde: X = valor qualquer da variável aleatória, \bar{X} = Valor média da distribuição e σ = desvio padrão da distribuição.
AIC	É um critério e um guia para seleção do número de termos de uma equação. Ele está baseado na soma do quadrado dos resíduos, mas coloca penalidade sobre coeficientes excedentes (AKAIKE, 1974). O melhor modelo é aquele possuir o menor valor para os AIC será o de melhor ajuste.
	$AIC = -2 \cdot \ln(L) + 2k$, onde L = função de verossimilhança n = número de resíduos que podem ser computados para a série de dados temporais e k = número de parâmetros livres.
BIC	É um critério alternativo ao AIC, que reduz ao máximo o fator de verossimilhança, porque o número de parâmetros é igual ao número de parâmetros do modelo de interesse (SCHWARZ, 1978). O melhor modelo é aquele com menor valor para BIC.
	$BIC = -2 \cdot \ln(L) + \ln(n) \cdot k$, onde L = função de verossimilhança n = número de resíduos que podem ser computados para a série de dados temporais, k = número de parâmetros livres e \ln = logaritmo de base neperiana.
HQC	É um critério para a seleção do modelo. É uma alternativa para critério de informação de Akaike (AIC) e critério de informação Bayesiano (BIC).
	$HQC = -2 \cdot \ln(L) + (\ln(\ln(n))) \cdot 2k$, onde L = função de verossimilhança n = número de resíduos que podem ser computados para a série de dados temporais, k = número de parâmetros livres e \ln = logaritmo de base neperiana (HANNA; QUINN, 1979; QUINN, 1980).

A 3ª etapa, chamada Diagnóstico, segundo Vasconcellos e Alves (2000), essa etapa consiste em verificar se o modelo estimado é adequado. Em caso positivo, pode-se adotá-lo para previsão. Em caso negativo, outra especificação deve ser escolhida para modelar a série, o que implica em refazer as etapas de identificação e estimação.

Passo 4: o diagnóstico – utilizando os coeficientes e as estatísticas geradas no passo anterior. É analisada a validade do modelo, e até mesmo, a possibilidade de melhoria deste. Para isso, foram agrupadas as formas de verificação utilizada nessa pesquisa: análise residual e analisar os resultados obtidos através das equações dos erros de previsão obtidos.

a) Deve-se calcular a FAC e FACP dos resíduos ($\text{Resíduo} = \text{Observação} - \text{Valor ajustado}$) estimados e determinar se eles satisfazem na teoria a condição de ruído branco (é aquele cujos erros são estatisticamente independentes, ou seja, não são autocorrelacionados) (GRANGER; NEWBOLD, 1986). Ou seja, os termos dos erros aleatórios ε_t no processo efetivo terem distribuição normal e serem independentes, apresentando média zero e variância constante. Para isso, os resíduos quase não devem ter correlação serial, pois toda a dinâmica dos dados já foi capturada pelo modelo (CRIBARI-NETO, 2000). Logo, os resultados dos valores das autocorrelações residuais devem estar contidos no intervalo de confiança assintótico de 95% que é (CRIBARI-NETO, op.cit.).

Porém, na prática, segundo Lutkepohl (2005), se o objetivo do modelo é realizar previsões e com bons resultados, a condição de ruído branco pode não ser de importância principal.

b) Devem-se analisar os erros de previsão, ou seja, realizar a comparação dos valores previstos com os valores observados da série, o que caracteriza a acurácia ou a capacidade preditiva do mecanismo utilizado. Existem vários métodos e os utilizados nessa pesquisa foram obtidos através das seguintes métricas: Erro Padrão dos Resíduos (RSE), Erro Médio (ME), Erro Médio Absoluto (MAE), Erro Quadrático Médio (MSE), Erro Médio Percentual (MPE), Erro Médio Percentual Absoluto (MAPE) e Coeficiente U de Theil. Observados na Tabela 12.

Os diagnósticos focalizam em analisar os resíduos do modelo, no qual se pergunta: - Os resíduos resultaram em “ruído branco”? Ou seja, o modelo foi tão bem ajustado que somente restou à aleatoriedade dos dados que não podem ser explicados matematicamente? Caso os diagnósticos realizados no modelo não sejam adequados, deve-se voltar ao **Passo 2**(de identificação).

Tabela 12 – Métricas para análises de erros na Previsão

MEDIDAS DOS ERROS DE PREVISÃO		
RSE	É dado pela raiz quadrada da variância estimada dos resíduos e indica o grau de dispersão dos erros de previsão dentro da amostra.	
	$RSE = \frac{\sqrt{\sum (e_t)^2}}{n - 2}$	Onde $e_t (A_t - F_t)$ é o erro (resíduos), A_t é o valor observado, F_t é o valor estimado, e n é o número de observações comparadas.
MAE	É determinado pelo somatório dos erros, tendo em conta que o resultado deverá ser positivo, sempre em módulo, e divide-se pelo número de erros usados para obter a soma.	
	$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n e_t $	Onde $ $ Significa: usar o valor absoluto, ignorando a direcção do desvio.
ME	$ME = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n (e_t)$	É a média dos erros de previsão
MSE	$MSE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n (e_t)^2$	É determinado pelo somatório dos erros, penalizando os erros grandes elevando-os ao quadrado e dividido pelo número de erros usados no cálculo.
MPE	$MPE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n \left(\frac{e_t}{A_t} \right)$	Leva em consideração o erro relativo de cada previsão em relação aos valores observados da série. Se os erros positivos forem compensados pelos erros negativos, o resultado deve ser aproximadamente nulo.
MAPE	$MAPE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n \left \frac{e_t}{A_t} \right $	Leva em consideração o valor erro médio percentual para cada ponto previsto e depois dividido novamente pelo número observações de toda a série
Coefficiente U de Theil	Analisar a qualidade de uma previsão através dos seguintes valores do coeficiente U de Theil. Quanto menor do que 1 for o resultado, indica uma boa previsão, e quanto mais próximo de zero for o mesmo, melhor será o resultado da previsão.	
	$U = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{\sum_{t=1}^n (A_t - F_{t-1})^2}$	<ul style="list-style-type: none"> - Quando $U \leq 1$, o erro do modelo é menor que o erro na previsão; - Quando $U \geq 1$, o erro do modelo é maior do que o erro na previsão;

Por último a 4ª etapa, de aplicação, onde são realizadas previsões, usando o modelo resultante depois das análises do **passo 4**. Essa etapa é realizada para todos os modelos gerados, baseados nas equações gerais, com os parâmetros já estimados para cada modelo.

Passo 5: a previsão univariada – tem como o objetivo principal da metodologia realizar previsões para os modelos univariados de Marabá (X_t e Y_t), em instantes de tempo posteriores a n , sendo que foram gerados modelos univariados para série de Carolina (Z_t) e Conceição do Araguaia (F_t), com objetivo de usar tais modelos como variáveis explicativas no modelo multivariado de função de transferência.

Passo 6: a previsão multivariada – com o objetivo principal realizar previsões de nível para Marabá usando séries multivariadas, onde foi feita previsão usando dois modelos multivariados. O modelo Marabá (M_t) possuindo os modelos univariados (X_t, F_t e Z_t) comovariáveis explicativas, e o modelo Marabá (N_t) usando as séries de Carolina e Conceição do Araguaia como variáveis explicativas, todos em instantes de tempo posteriores a n .

3.2.2 Descrição do método dos Quantis

Essa técnica é adequada tanto para dados de chuva quanto para vazão ou nível, por permitir quantificar o nível de gravidade e ocorrência de um determinado evento por faixas ou categorias de ordem quantílicas, comportando faixas de transição, de uma ordem à outra, adequadas ao evento estudado (XAVIER; XAVIER, 1999). No trabalho de PINKAYAN (1966.), os quantis são categorizados da seguinte forma:

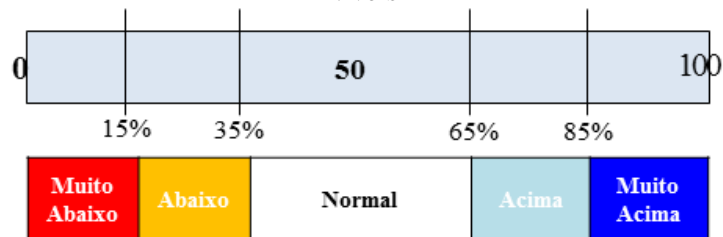
Seja uma série temporal (X_1, X_2, \dots, X_n) contendo dados mensais de nível ou precipitação com n sendo o tamanho da amostra. Nessa pesquisa $n = 480$, considerando cada mês entre os anos de 1972 a 2011. Com base nesta série contínua, calculam-se os quantis ou percentis $Q(0,15)$, $Q(0,35)$, $Q(0,65)$ e $Q(0,85)$ cuja finalidade é permitir a delimitação das faixas ou categorias dos dados observados. Assim, considerando que $Q(p)$ são as ordens quantílicas $p=0,15; 0,35; 0,65; \text{ e } 0,85$, logo um determinado dado de chuva do mês i passa a ser considerado na categoria:

MUITO SECO	Quando	$X_i \leq Q(0,15)$
SECO	Quando	$Q(0,15) < X_i \leq Q(0,35)$
NORMAL	Quando	$Q(0,35) < X_i < Q(0,65)$
CHUVOSO	Quando	$Q(0,65) \leq X_i < Q(0,85)$
MUITO CHUVOSO	Quando	$X_i \geq Q(0,85)$

Aplicando os procedimentos acima na série de nível (vazão), temos as seguintes categorias de percentis observados abaixo. A Figura 11 permite a visualização de cada uma das cinco categorias de níveis.

MUITO ABAIXO	quando	$X_i \leq Q(0,15)$
ABAIXO	quando	$Q(0,15) < X_i \leq Q(0,35)$
NORMAL	quando	$Q(0,35) < X_i < Q(0,65)$
ACIMA	quando	$Q(0,65) \leq X_i < Q(0,85)$
MUITO ACIMA	quando	$X_i \geq Q(0,85)$

Figura 11 – Esquematisação das categorias usando a técnica dos percentis aplicado aos dados de Níveis



Nessa pesquisa o método dos Quantis foi aplicado apenas nos meses do período chuvoso (Dezembro a Maio). O objetivo é permitir delimitar os anos em Marabá, que tiveram os níveis do rio Tocantins ACIMA e MUITO ACIMA do normal.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram divididos em 3 seções. Primeiro, foram descritos os impactos do nível fluviométrico em Marabá nos anos de 2009 e 2011, referentes às enchentes, foi mencionando alguns aspectos da evolução desse processo e os custos com cestas básicas. Na segunda seção foi realizada a categorização dos Eventos Extremos de níveis registrados em Marabá, os quais foram selecionados objetivamente pelo método dos percentis, com a finalidade de categorizar os períodos com níveis ACIMA e MUITO ACIMA do normal. Também se realizou análises dos dados de precipitação e níveis nos últimos 40 anos e relacionados com eventos de El niño e La niña. Por fim, apresentaram-se os resultados do modelo estocástico ARIMA univariados e multivariados, e a análise de seus respectivos desempenhos para a previsão.

4.1 IMPACTOS DO NÍVEL FLUVIOMÉTRICO EM MARABÁ: CASO 2009 E 2011

Foram abordados os danos socioeconômicos causados pelas enchentes de 2009 e 2011 no município de Marabá, com o objetivo de comparar e quantificar a diferença do número de pessoas atingidas e o custo com cestas básicas quando ocorrem diferentes níveis anuais do rio Tocantins. Um dos principais núcleos atingidos é o de Marabá Pioneira, que é ocupado por edificações habitacionais, comerciais e de serviços.

Na enchente de 2009, ilustrada na Figura 12, o nível de alerta foi ultrapassado no dia 14 de abril. O nível continuou subindo até o dia 9 de maio atingindo seu máximo de 12,70m, permanecendo acima do nível de alerta até o dia 29 de maio, assim registrando nesse ano, 46 dias com enchentes com o nível diário acima de 10m. O Decreto nº 1.654, de 12 de maio de 2009, homologa o decreto nº 126/2009 editado pelo Prefeito Municipal de Marabá, declara “situação de emergência” nas áreas daquele município, atingidas pelas enchentes dos rios Tocantins e Itacaiúnas. Ressaltando-se que o município só declara situação de emergência quando o nível atinge 12 metros, no caso desse ano esse nível foi atingido no dia 4 de maio.

A Figura 13 mostra a amplitude das inundações em Marabá no ano de 2009, que atingiu varias residências, estabelecimentos, comerciais, prédios públicos, da zona urbana de três núcleos. Estes foram: Nova Marabá: Folhas: 14, 25 e 33; Cidade Nova: Bairros: Independência, e Bela Vista (invasão); Marabá Pioneira: Bairros: Santa Rosa, Francisco Coelho Santa Rita Vila do Rato; Av. Pará, Marabá, Silvino Santis. Ruas: Benjamin Constant, Magalhães Barata, Barão do Rio Branco, Moises Junho, Samuel Monção, São Pedro, Alquindar; e Travessas: Antônio Pimentel, Coqueiro, Nossa Senhora das Graças, Mestre Olívio, São João, Augusto Dias, Da Geleira; e o Bairro de São Felix Pioneira e Geladinho.

Figura 12 – Níveis diários do rio Tocantins em Marabá no período da enchente do ano de 2009.

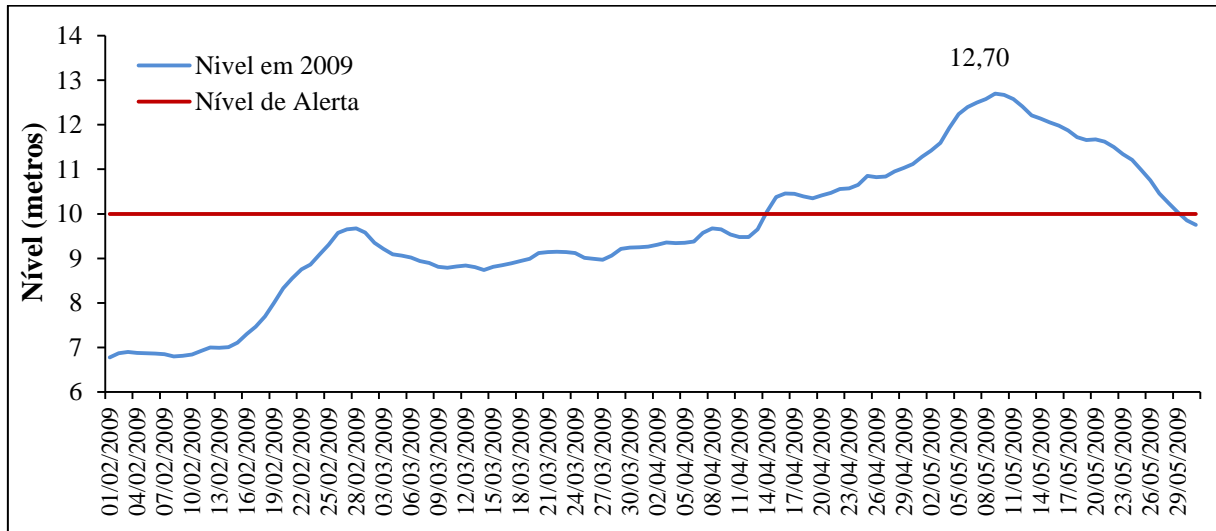
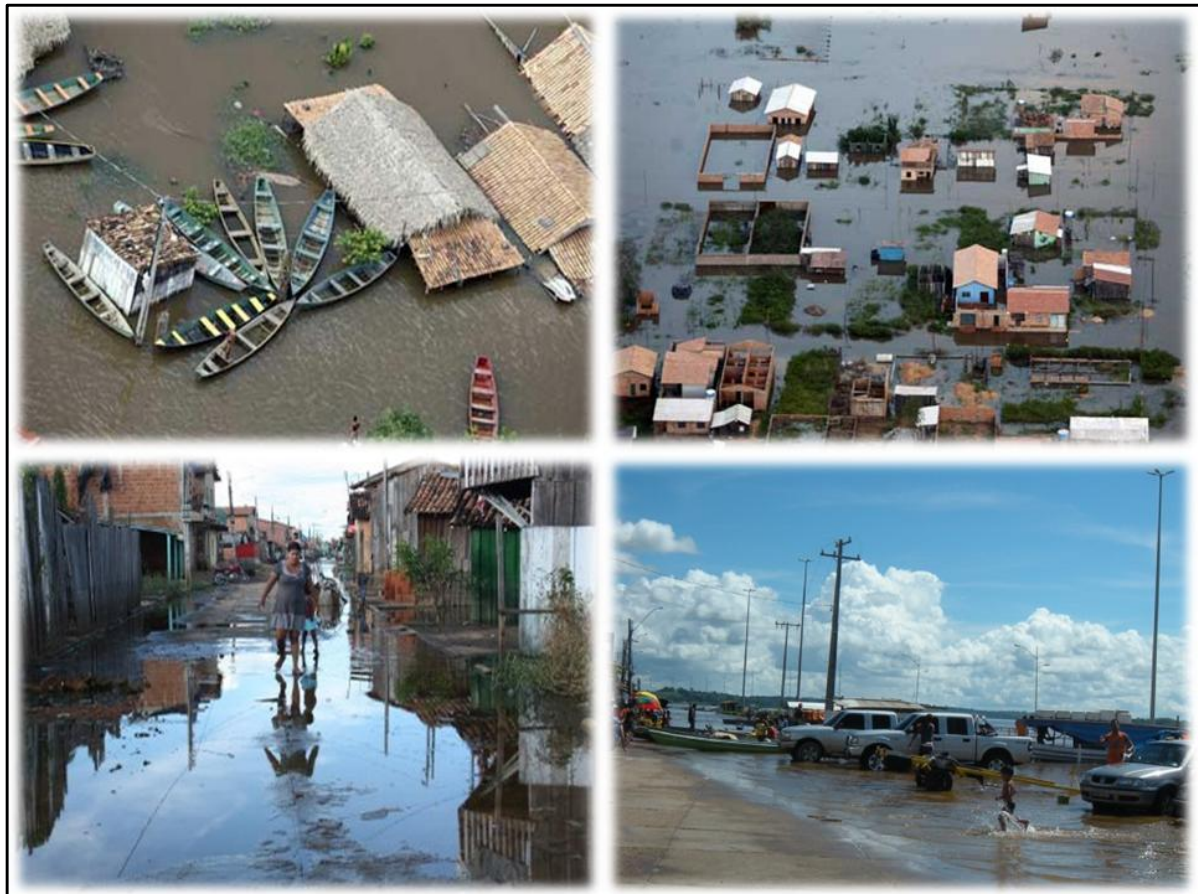


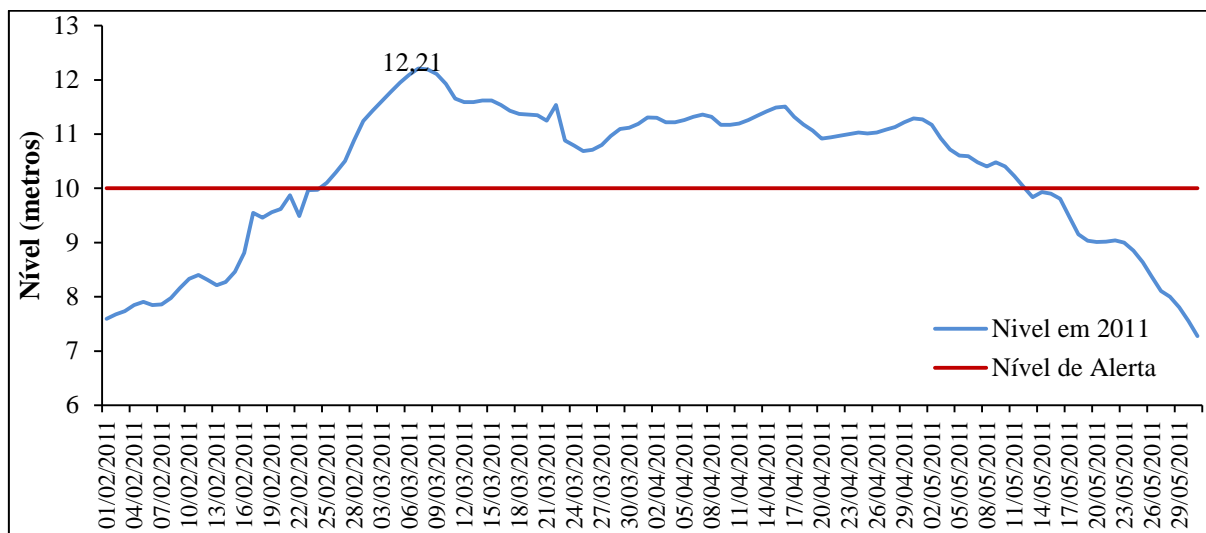
Figura 13– Situações das inundações no ano de 2009.



Fonte: <http://www.maraba.pa.gov.br/> (2011).

Na enchente de 2011, ilustrada na Figura 14, observa-se que o nível de alerta foi ultrapassado no dia 25 de fevereiro. O nível do rio continuou subindo até o dia 07 de março atingindo o seu máximo de 12,21m, permanecendo acima do nível de alerta até o dia 12 de maio, registrando-se nesse ano 77 dias com enchentes com o nível do rio, acima de 10m. E comparando-se com o ano de 2009 ficou 31 dias a mais com o rio acima do nível de alerta.

Figura 14– Níveis diários do rio Tocantins em Marabá no período da enchente do ano de 2011



Nesse ano o Prefeito Municipal de Marabá declarou “situação de emergência”, quando o nível do rio atingiu 11,74 metros. A Figura 15 mostra a amplitude das inundações em Marabá no ano de 2011. As áreas mais afetadas pelas enchentes dos rios Tocantins e Itacaiunas, foi quando o nível do rio atingiu 12 metros, pois aquelas são as mais baixas do núcleo de Marabá Pioneira, Nova Marabá e folha 33, assim como os bairros de São Félix Pioneiro, Santa Rita, Santa Rosa; e as travessas São João e São Pedro e Rua Paráeira.

Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) o acumulado da chuva durante o período chuvoso no ano 2009 foi de 1899,0mm e no ano de 2011, de 1831,70mm, ou seja, precipitou mais no período chuvoso de 2009 do que em 2011.

Na Tabela 13, nota-se que o número de famílias atingidas no ano de 2009 foi bem maior, com uma diferença de 2.040 famílias a mais, consequentemente os gastos com cestas básicas também foram superiores em 2009, do que no ano de 2011, com diferença de aproximadamente R\$186.000,00 de reais. Essas diferenças podem ser explicadas, pelo fato de que o nível máximo atingindo pelo rio, no ano de 2009 ter ultrapassado em 0,49 centímetros o máximo registrado no ano de 2011, inundando mais áreas na cidade e afetando um número maior de famílias.

Figura 15 – Situações da enchente do ano de 2011



Fonte: <http://www.maraba.pa.gov.br/> (2011).

Tabela 13 – Estatísticas básicas das cheias dos anos 2009 e 2011

Desalojados	Desabrigados	Famílias atingidas	Cestas Básicas	Gasto com CB R\$
2009				
3.010	3.332	6.342	1.600	327392,00
2011				
947	2.814	4.298	600	141396,00

Fonte: CEDEC/PA (2011).

É importante destacar, que o monitoramento da variabilidade do nível do rio Tocantins é de grande relevância pra os órgãos de Defesa Civil, principalmente a Defesa Civil Regional de Marabá a qual utiliza 100% do seu quadro efetivo no período de alerta, nas ações de atendimento aos atingidos pelas cheias dos rios Tocantins e Itacaiunas.

4.2 VARIABILIDADE DO NÍVEL DO RIO TOCANTINS

A Tabela 14 mostra a ocorrência das categorias de níveis agrupadas por décadas e por meses considerados chuvosos, nota-se que durante as quatro décadas observadas, houve mais

meses com níveis categoriza dos “acima do normal”, do que “muito acima”. É perceptível que o somatório das quatro décadas com nível acima do normal, nos meses de fevereiro e março totalizou sete casos, e nos meses restantes, oito casos. Também é observado que na primeira década (1972 a 1981) os meses de fevereiro e março apresentaram apenas um e nenhum evento acima do normal, respectivamente, enquanto na segunda década analisada, de 1982 a 1991 esses meses tiveram a maior ocorrência de eventos acima, três em cada um.

Observou-se, situação inversa na ocorrência de eventos acima do normal, entre as duas primeiras décadas (1972-1991). Ou seja, notando-se que nos meses de dezembro, janeiro e maio, da primeira década, registraram apenas três eventos em cada mês. Nos mesmos meses da segunda década, registraram apenas um evento em cada mês. Percebeu-se, também, que na primeira década no mês de março não houve nenhum registro de nível acima do normal. Na segunda década o mês de março registrou quatro eventos de níveis acima do normal.

Nas duas últimas décadas (1992-2001 e 2002-2011) foram analisados os níveis acima do normal, notou-se que uma variação mínima entre os meses do período chuvoso dessas décadas. Sugerindo assim, uma maior variabilidade dos níveis do rio nas duas primeiras décadas em relação às duas últimas.

Tabela 14 – Ocorrência das categorias de níveis agrupadas por décadas.

PERÍODO (Década)	Nº DE MESES DO PERÍODO CHUVOSO											
	ACIMA ($0,65 \leq X_i < 0,85$)						MUITO ACIMA ($\geq 0,85$)					
	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI
1972 - 1981	3	3	1	0	2	4	1	2	3	4	3	1
1982 - 1991	1	1	3	3	2	1	3	3	1	0	1	1
1992 - 2001	2	2	1	2	2	2	2	1	1	1	0	0
2002- 2011	2	2	2	2	2	1	1	0	1	1	2	3
TOTAL	8	8	7	7	8	8	7	6	6	6	6	5

Analisando as categorias muito acima do normal, nota-se que o trimestre de FEV-MAR-ABR da primeira década (1972-1981), do bimestre de DEZ-JAN da segunda década (1982-1991) e no mês de maio da quarta década (2002-2011), foram registrados os meses com maiores casos muito acima do normal com eventos iguais a três e quatro. O mês de dezembro registrou mais níveis muito acima do normal, na segunda e terceira décadas (1982-2001), podendo estar associados com o número de ocorrência dos eventos de La Niña. Conforme mostrado na Tabela 15, que mostra os anos de ocorrência e intensidade dos eventos de ENOS.

Observa-se que nos anos de 1983, 1984, 1985, 1988, 1989, 1995, 1996, 1998, e 2001, houve ocorrência de eventos de La Niña fraco, moderado e forte.

Na categoria muita acima do normal, no mês de maio, na última década (2002-2011) registrou três eventos de níveis muito acima do normal, podendo estar associado com o número de ocorrência dos eventos de La Niña (Tabela 15), o qual se observa que nos anos de 2007, 2008, 2010 e 2011, houve ocorrência de eventos de La Niña forte. Nota-se também que as duas últimas décadas (1992-2011) houve um decréscimo, nos registros dos níveis nas duas categorias, acima e muito acima.

Tabela 15 – Ocorrências dos eventos de El Niño e La Niña.

Ocorrência de EL NIÑO		Ocorrência de LA NIÑA	
1965 – 1966 **	1968 – 1970 **	1964 – 1965 **	1970 – 1971 **
1972 – 1973 ***	1976 – 1977 *	1973 – 1976 ***	1983 – 1984 *
1977 – 1978 *	1979 – 1980 *	1984 – 1985 *	1988 – 1989 ***
1982 – 1983 ***	1986 – 1988 **	1995 – 1996 *	1998 – 2001 **
1990 – 1993 ***	1994 - 1995**	2007 – 2008 ***	2010 – 2011 ***
1997 – 1998 ***	2002 - 2003**		
2004 – 2005 *	2006 - 2007*		
2009 – 2010 *	-		
Legenda: ***Forte **Moderada *Fraco ***Forte **Moderada *Fraco			

Fonte: Adaptado de CPTEC (2012).

Realizada a categorização por década, também foram mostrados os valores e intervalos mensais da categorização do nível (metros), para os meses do período chuvoso, e os resultados estão na Tabela 16. Nesta, observa-se pela categoria muito acima que os maiores eventos de cheia registram níveis acima de 12 metros e ocorrem no trimestre de fevereiro, março e abril. E os níveis de categoria acima, foram registrados em todo o período chuvoso, confirmando que as enchentes, nesse período, praticamente chegam à cota de alerta de 10 metros.

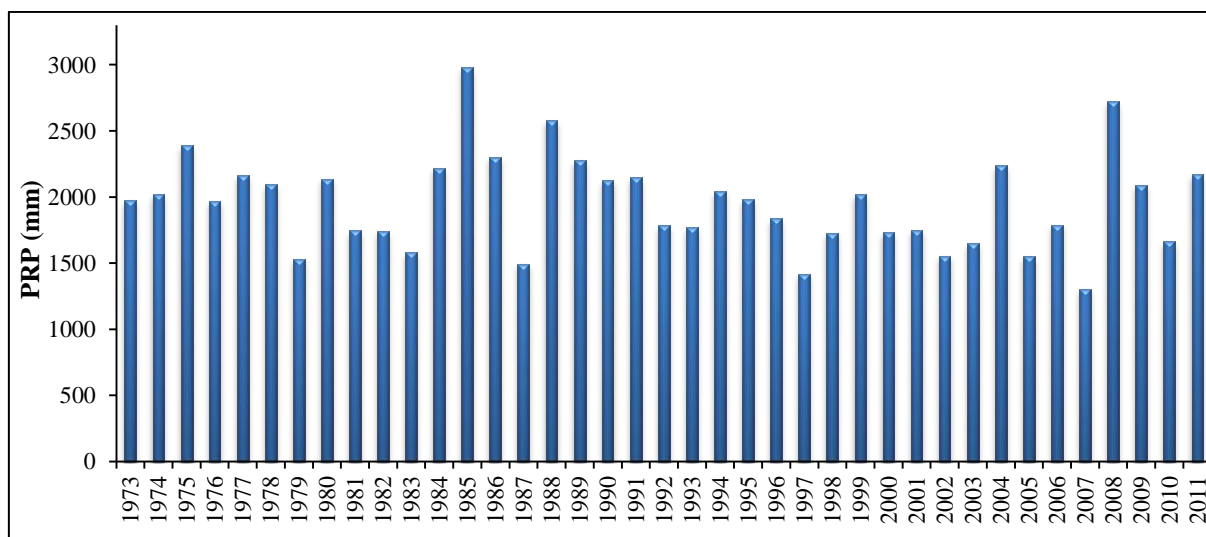
Tabela 16 – Os valores e intervalos mensais da categorização do nível (m).

CATEGORIAS 1972 – 2011		
MÊS	ACIMA ($0,65 \leq X_i < 0,85$)	MUITA ACIMA ($\geq 0,85$)
Dezembro	6,72 a 11,11	$\geq 11,12$
Janeiro	9,26 a 12,53	$\geq 12,54$
Fevereiro	11,12 a 12,64	$\geq 12,65$
Março	11,79 a 12,64	$\geq 12,65$
Abril	11,61 a 12,40	$\geq 12,41$
Maio	10,26 a 11,21	$\geq 11,22$

A Figura 16 é representativa dos totais anuais de precipitação pluviométrica em Marabá, Para o período compreendido entre 1973 e 2011, o valor médio dos totais anuais na série é de aproximadamente 1957,0mm. Entretanto, essa distribuição anual é irregular, com valores máximos de 2982,1 mm em 1985 e valores mínimos de 1304,7 mm em 2007. Ou seja, uma amplitude de 1677,4 mm entre os valores máximos e mínimos. Estes resultados sugerem que existe a influência de mecanismos climáticos de grande escala como as fases do ENOS no oceano Pacífico (El Niño e La Niña) e o modo de anomalias nas Temperaturas da Superfície do Mar - TSM na bacia tropical do oceano Atlântico (Gradiente Interhemisférico do Atlântico).

Note que os valores também apresentam grandes variações, significativas, em anos subsequentes, como os anos de 1987 e 1988 ou 2007 e 2008, com variações acima de 1000 mm de um ano para o outro. É importante frisar que nesses anos citados acima, ocorreram mudanças nas fases do ENOS. Os maiores totais anuais foram registrados nos anos de 1975, 1985, 1988 e 2008, com 2388,4 mm, 2982 mm, 2580 mm e 2724 mm, e respectivamente. Nota-se que todos esses anos foram de ocorrência de eventos climáticos de La Niña (fase negativa do ENOS), conforme mostra a Tabela 15.

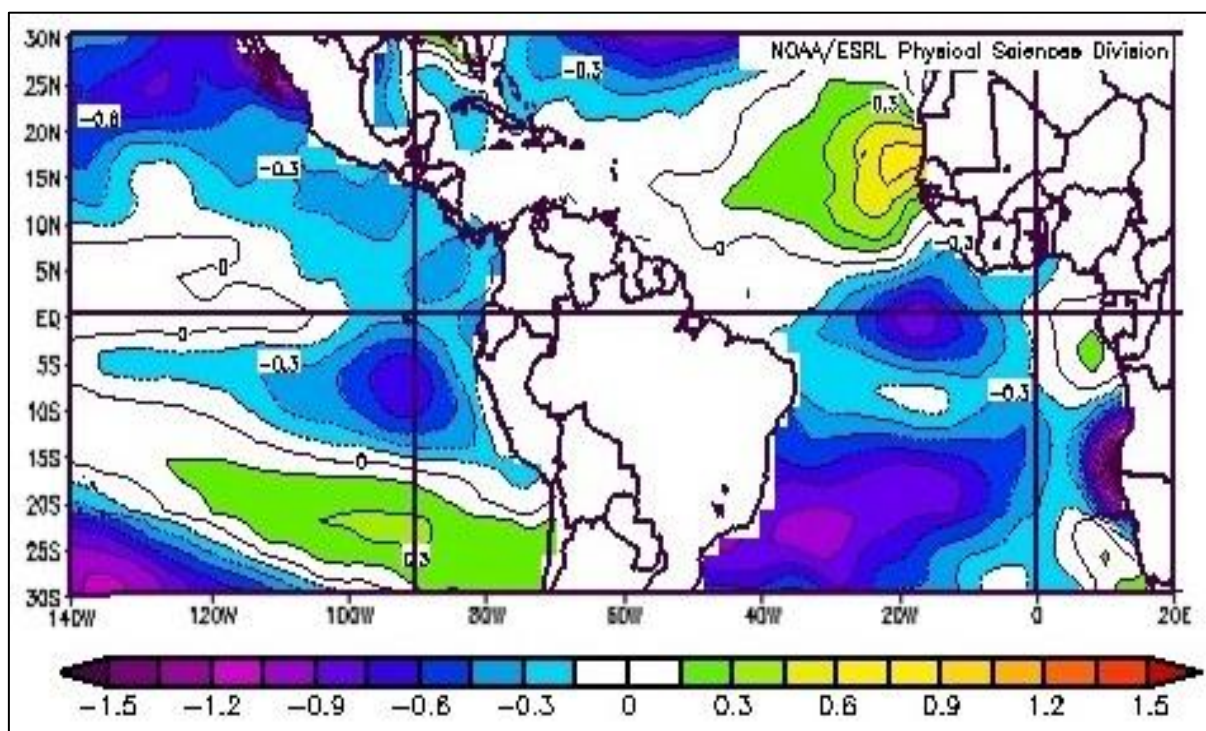
Figura 16 – Precipitação Total Anual em Marabá (1973 – 2011).



Os quatro primeiros anos foram de ocorrência de fenômeno climático El Niño (fase positiva do ENOS), já o último ano, 1979 provavelmente ainda sofria influências do evento ocorrido entre 1977 e 1978 (1978 apresentou águas levemente mais aquecidas que o normal nas regiões dos Niños durante a maioria dos meses do ano), além de que o trimestre fevereiro-março-abril de 1979 estava sobre influência do padrão do gradiente inter-hemisférico, com

anomalias positivas de TSM na bacia do Atlântico norte e anomalias negativas de TSM na bacia do Atlântico sul, conforme Figura 17, o que certamente contribuiu para a redução das chuvas na região de estudo devido a inibição da atuação da ZCIT, pois a principal característica deste sistema é se posicionar sobre as áreas oceânicas com anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) positivas e anomalias de Pressão ao Nível do Mar (PNM) negativas (HASTENRATH, 1991).

Figura 17 – Anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) em °C, para o trimestre FMA de 1979, desvios em relação ao período de 1954 – 2011.

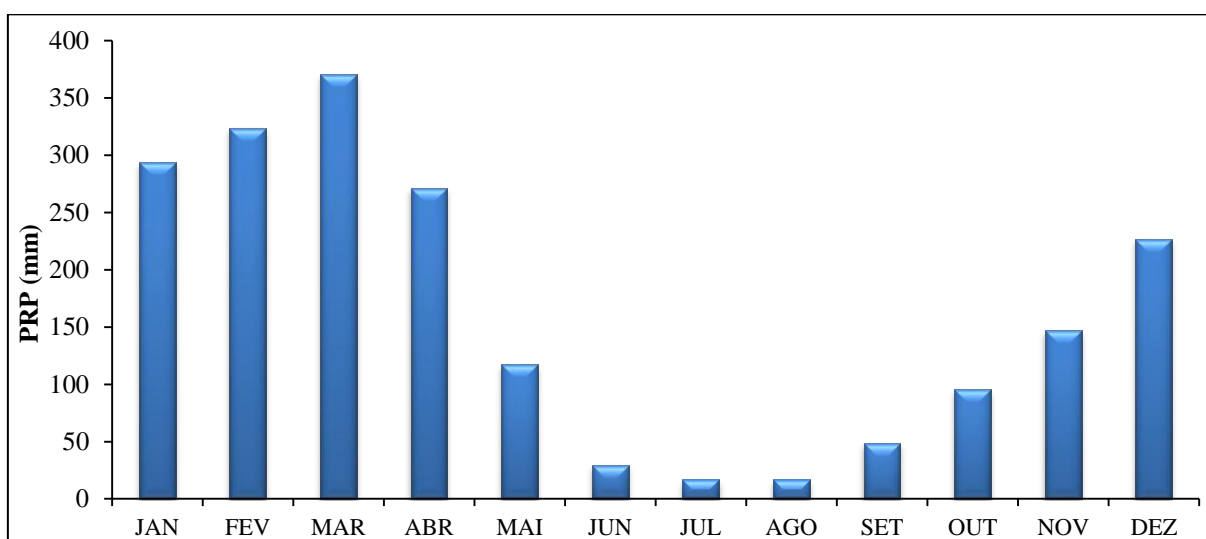


A Figura 18 mostra os valores médios mensais de precipitação em Marabá, para o período de 1972 a 2011, o comportamento das chuvas na região mostra um período chuvoso bem definido, entre os meses de novembro a abril, com acumulados mensais de precipitação acima de 150 mm, em média, e um período seco de junho a setembro.

O aumento significativo das chuvas no trimestre NOV-DEZ-JAN, certamente esta associado à aproximação de sistemas frontais, oriundos de latitudes mais altas no hemisfério sul, que interagem com a convecção na região Amazônica desenvolvendo e organizando Sistemas Convectivos de Mesoescala, assim como os eventos de ZCAS que favorecem as chuvas entre as estações de primavera e verão na América do Sul (NOGUÉS-PAEGLE; MO, 1997; CARVALHO et al., 2004).

O período com os maiores volumes mensais de precipitação na região de Marabá ocorre nos meses de janeiro, fevereiro e março, com totais mensais de chuva, em média, acima de 300 mm. Só neste trimestre ocorre mais de 50% do total anual médio de precipitação registrado na estação. Nos meses de janeiro as chuvas ainda estão diretamente relacionadas à penetração dos sistemas frontais e a atuação da ZCAS, que está em sua posição mais ao norte (Quadro, 1994). Nos meses de fevereiro e março, em anos com padrões de grande escala favoráveis, pode ocorrer à atuação conjunta de sistemas como a ZCIT e ZCAS que são responsáveis por grandes totais pluviométricos nesse período (SOUZA; AMBRIZZI, 2006). A ZCIT possui um deslocamento latitudinal no decorrer do ano, e durante os meses de março e abril atinge sua posição climatológica mais ao sul equador, e latitudes mais ao norte nos meses entre as estações de verão e outono boreal (UVO, 1989), logo se justifica o máximo de precipitação nos meses de março.

Figura 18 – Precipitação Pluviométrica Média Mensal de Marabá (1973 – 2011).



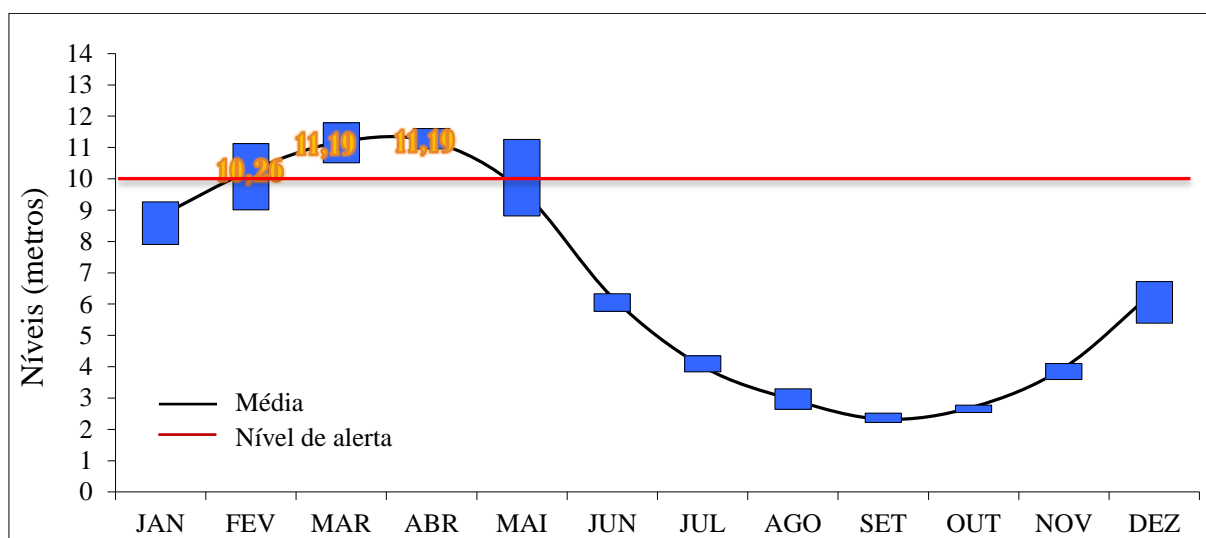
Já o trimestre mais seco, de junho a agosto esta fortemente ligada a circulação de grande escala, onde nesse período predomina sobre a região central do Brasil e sul da Amazônia a subsidência associada ao ramo descendente da célula de Hadley. Vale ressaltar que em grande escala o ramo ascendente da célula de Hadley é o ramo ascendente da ZCIT que nesse período esta em sua posição extrema no hemisfério norte. Assim, os movimentos descendentes reduzem as taxas de umidade relativa do ar, inibindo a formação de nuvens e consequentemente a ocorrência de precipitação.

A Figura 19 mostra os valores médios dos níveis máximos mensais registrados da altura do nível do rio em Marabá para a série entre 1972 e 2011. É possível observar que em

média o trimestre FEV-MAR-ABR apresenta valores de 10,26 m, 11,19 m, 11,19 m respectivamente, ou seja, normalmente nesse período o nível do rio ultrapassa a cota de alerta para a região que é de 10 m. Os mínimos níveis registrados, em média, ocorrem nos meses de agosto, setembro e outubro com valores de nível médio abaixo de 3,0 m de altura.

Analizando a relação entre o trimestre mais chuvoso (JFM) e o trimestre com as maiores alturas do nível do rio (FMA) em Marabá percebe-se uma diferença na escala temporal entre os meses mais chuvosos registradas em Marabá e os níveis máximos do rio no mesmo ponto. Provavelmente, isso ocorre devido a maior contribuição para a elevação do nível do rio ser as chuvas que ocorrem próximas a sua nascente ou cabeceira, e como as chuvas na região Amazônica iniciam nas latitudes mais altas, aumentando no sentido de sul para norte (normais climatológicas do Brasil 1961-1990). Essa diferença provavelmente é devido ao tempo de deslocamento da chamada “onda de cheia”, logo as chuvas que ocorrem nas cabeceiras dos rios Tocantins e Araguaia, principalmente, são as responsáveis pelo aumento do nível do rio em Marabá, já as chuvas locais atuam como fator secundário.

Figura 19 – Média dos Níveis Máximos Mensais de Marabá (1972 – 2011).

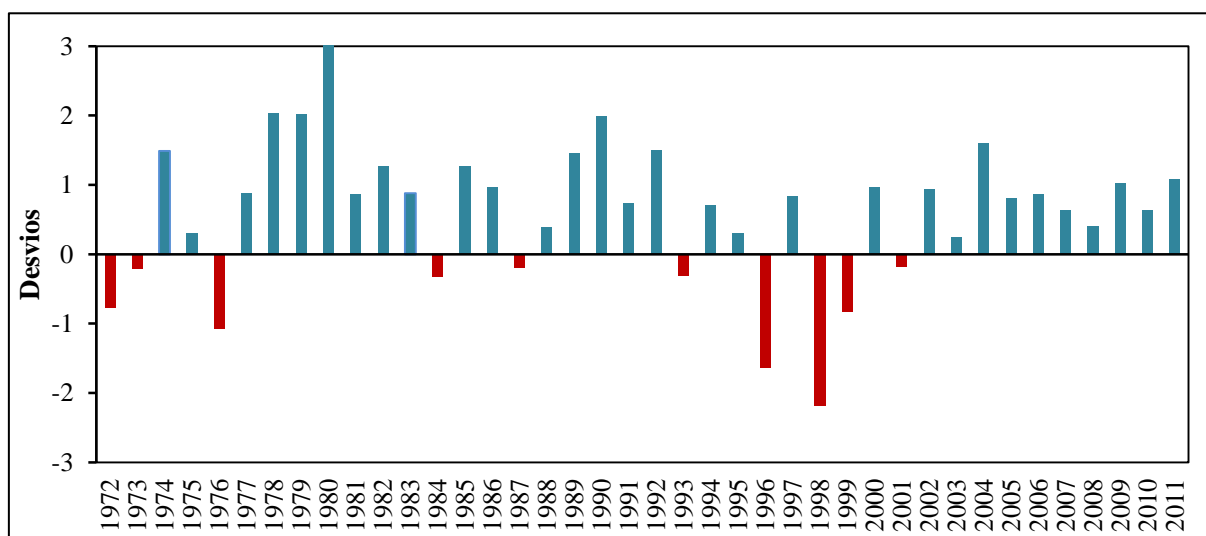


A partir da seleção do trimestre com registros das maiores alturas de nível do rio em Marabá, (Figura 19), fez-se a normalização dos níveis máximos anuais, mostrado na Figura 20. Novamente observa-se que não há uma relação consistente entre as chuvas em Marabá e as anomalias no nível do rio registrados na mesma cidade, haja vista, que os maiores desvios negativos ocorreram nos anos de 1976, 1996, 1998 e 1999, todos com registros de chuvas dentro do normal na região de Marabá, conforme Figura 13. Nestes anos o período chuvoso estava sendo influenciado pelo fenômeno La Niña, exceto o ano de 1998 que estava sobre influência do El Niño.

Os maiores desvios positivos de anomalia de nível do rio ocorreram nos anos de 1974, 1978, 1979, 1980, 1989, 1990, 1992 e 2004. Nesta situação todos os anos citados, com exceção de 1979 e 1992, apresentaram totais anuais de chuva em Marabá dentro ou acima da média. Os anos de 1974 e 1989 estavam sobre a influência do fenômeno La Niña bem caracterizado na bacia do Pacífico tropical. Os anos de 1978 e 1992, por outro, lado estavam com configurações de El Niño na mesma região, e os anos de 1979, 1980, 1990 e 2004, estavam com leves desvios positivos de TSM na região equatorial do Pacífico.

Nota-se que os anos com desvios negativos (positivos) de níveis máximos do rio em Marabá muitas vezes não estão associados com os fenômenos El Niño (La Niña), mostrando que provavelmente o período chuvoso na região de estudo esta fortemente ligado, principalmente, as configurações oceânicas impostas pelo oceano Atlântico, que por sua vez influencia diretamente no posicionamento e intensidade da banda de nebulosidade associada a ZCIT.

Figura 20 – Níveis Máximos Médios Anuais Normalizados de Marabá (1972 – 2011).

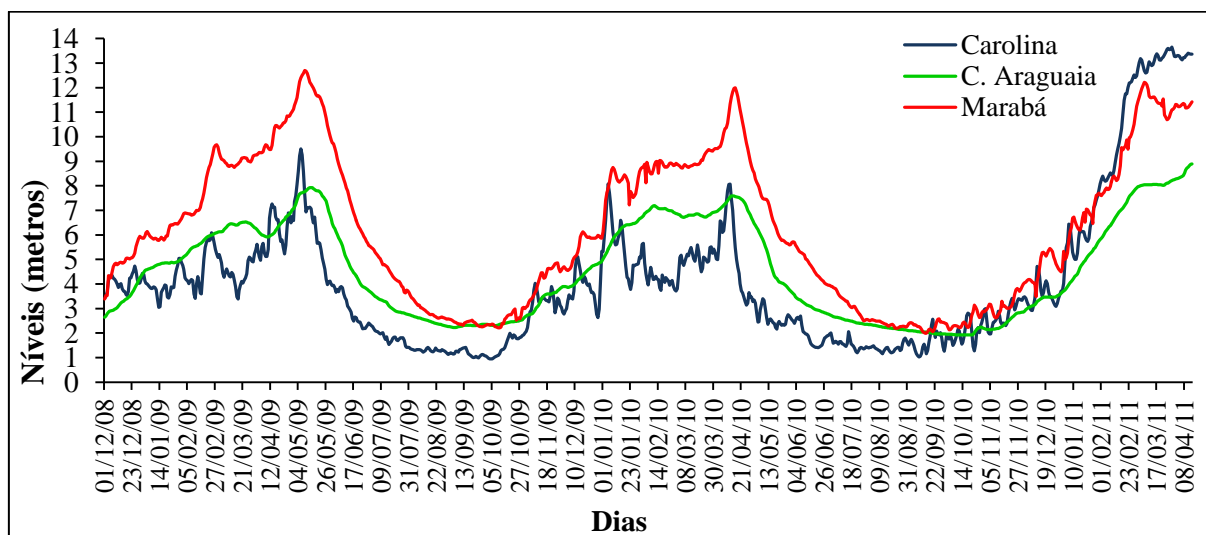


É importante lembrar que os efeitos do fenômeno ENOS, em suas fases distintas (El Niño e La Niña), impõem características diferentes nas diversas regiões do Brasil e como o nível do rio em Marabá é dependente das chuvas ocorridas na área entre as regiões dos Estados do Tocantins e Goiás (sudeste da Amazônia e nordeste da região central do Brasil). É preciso levar em consideração as diferentes respostas ao ENOS nessas regiões em relação à região de Marabá.

4.3 MODELAGEM ESTATÍSTICA

Para a construção do modelo estatístico, é analisada a representação gráfica do comportamento dos dados, ilustrada na Figura 21, que mostra o comportamento diário do nível dos rios Araguaia e Tocantins, no período de 01/12/2008 até 07/04/2011. Nota-se, nessa figura, que o nível do rio Tocantins em Carolina (linha azul), e o nível do rio Araguaia em Conceição do Araguaia (linha verde) segue o mesmo padrão de regime fluviométrico, do rio de Marabá (linha vermelha), com valores máximos no trimestre de março, abril e maio, valores mínimos no trimestre de agosto, setembro e outubro. Entretanto, em Conceição do Araguaia, o comportamento é mais suavizado.

Figura 21– Comportamento do Nível do rio, em três municípios da sub-bacia de estudo.



Seguindo o processo de desenvolvimento do modelo, foi selecionado o período de 01/12/2008 a 31/03/2011 (851 dias). Utilizou-se a previsão para 7 dias (1 a 7 de abril de 2011). E seguindo a metodologia de BJ, descrito através do ciclo iterativo (Figura 9), foram desenvolvidos quatro modelos, sendo dois univariados e dois multivariados, desenvolvidos com ferramentas diferentes (Gretl e SAS) e usando duas análises estatísticas diferentes para aplicação do Modelo ARIMA. No Gretl fora aplicada a metodologia de BJ descrita por Morettin e Tolo (2006) e no SAS além do uso da mesma, também foi utilizada na aplicação do modelo multivariado a função de transferência, descrita por Box, Jenkins, e Reinsel (1994). E o passo a passo do desenvolvimento dos modelos está descritos nos próximos subtópicos.

4.3.1 Modelo ARIMA – SAS

O modelo multivariado de função de transferência foi realizado em duas etapas. A 1ª etapa é a construção dos modelos univariados para Carolina, Conceição do Araguaia e Marabá, os quais foram usados como variáveis explicativas na 2ª etapa, que se trata da modelagem multivariada.

1ª Etapa – Construção dos Modelos Univariados

Para identificar os modelos apropriados, inicialmente foi analisado o gráfico em função do tempo da série de níveis diários de Carolina, Conceição do Araguaia e Marabá, mostrados na Figura 21. Neste caso, observa-se a presença de tendência linear, no comportamento das séries de níveis de Carolina, Conceição do Araguaia e Marabá. Logo, visto na teoria da modelagem, para o ajuste dos modelos de funções de transferência, exige-se que as séries sejam estacionárias. Logo, foram realizadas diferenciações nas mesmas para eliminar a componente de tendência.

Sendo realizada apenas a Primeira Diferença ($d = 1$) nas séries de Carolina, Conceição do Araguaia e Marabá, que agora se definem como Carolina-D1, Conceição do Araguaia-D1 e série Marabá-D1, é possível observar nas Figuras 22, 23 e 24 que as séries se tornaram estacionárias, estando prontas para continuar o processo de identificação dos modelos com o uso da FAC e FACP. Com essas funções, é possível confirmar se apenas com uma diferença foi possível manter as séries originais estacionárias, caso contrário será necessário realizar uma segunda diferenciação nos dados.

Figura 22 – Primeira Diferença aplicada à série de Carolina, no período de 01/12/ 2008 a 31/03/ 2011

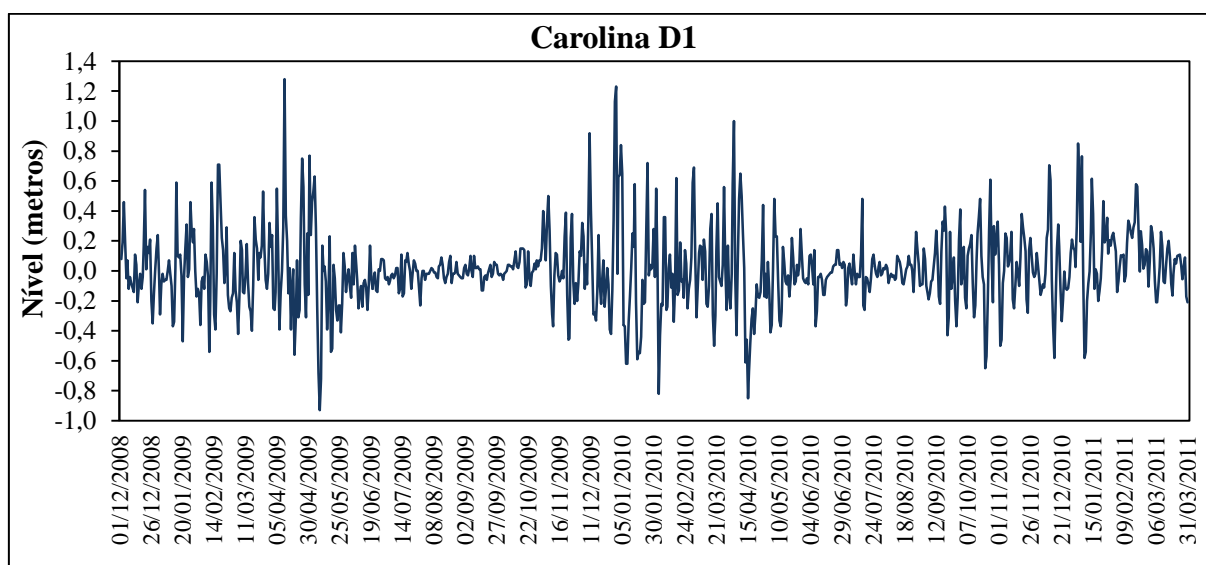


Figura 23 – Primeira Diferença aplicada à série de Conceição do Araguaia, no período de 01/12/ 2008 a 31/03/ 2011

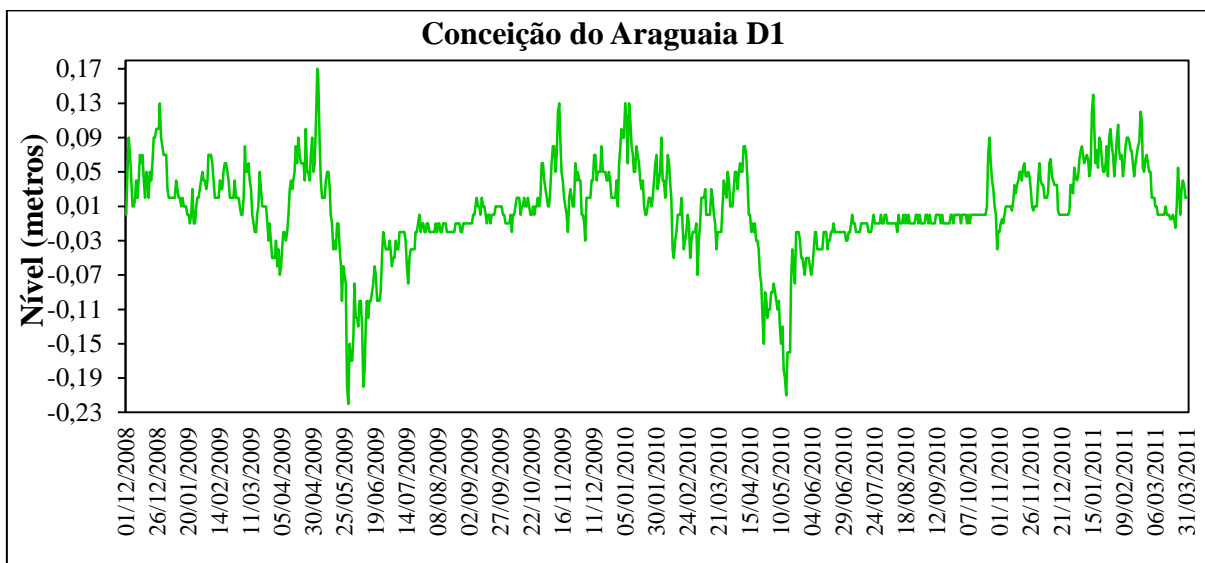
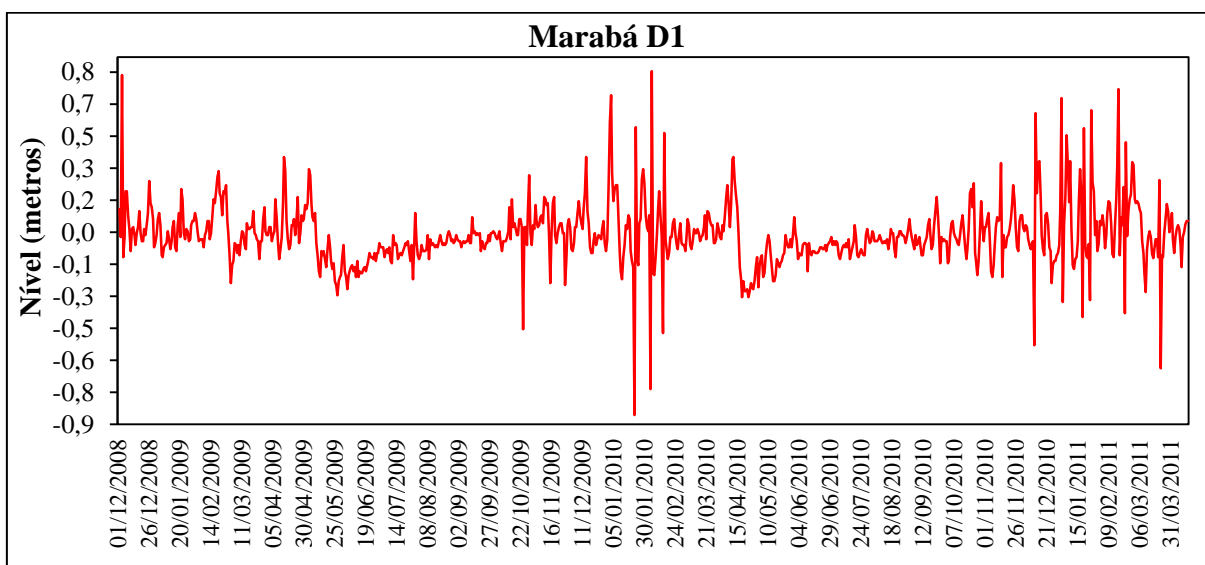


Figura 24 – Primeira Diferença aplicada à série de Marabá, no período de 01/12/ 2008 a 31/03/ 2011



A análise do correlograma da FAC e a FACP das séries originais e diferenciadas, foi realizada para 24 defasagens. E seguindo o critério de tendência linear, observa-se nas Figuras 25(a), 26(a), e 27(a), que as autocorrelações da FAC realizadas nas séries originais, apresentam um comportamento indicativo (lento decaimento) de não estacionaridade, confirmando a necessidade de diferenciação. E para confirmar se as séries se tornaram estacionárias apenas com uma diferença, são observadas as Figuras 25(b), 26(b), e 27(b), das séries diferenciadas, e observou que aplicando uma diferença nas séries, as mesmas se tornaram estacionárias.

Analisando o correlograma da FAC e FACP da série de Carolina-D1, observa-se a indicação de um modelo de médias móveis (MA). E usando os lags (1, 3, 4, 9, 16, 23 e 24) significativos da FAC foram analisados para obter a ordem do modelo de MA, mais adequado. Já no correlograma da FAC e FACP da série de Conceição do Araguaia-D1, foi identificado o modelo autorregressivo de médias móveis, ou seja, um ARMA. E usando as análises dos lags significativos (1 a 24) da FAC e os lags (1, 3, 4, 7 e 14) da FACP, obtendo a ordem do modelo ARMA, mais adequados.

Observando o correlograma da FAC e FACP da série de Marabá-D1, é possível identificar um modelo autorregressivo (AR). E usando as análises dos lags (1, 3, 4, 9, 16, 23 e 24) significativos da FACP foi obtida a ordem do modelo AR mais adequados.

Figura 25 – Correlogramas da FAC e da FACP das séries(a) Carolina e (b) Carolina-D1

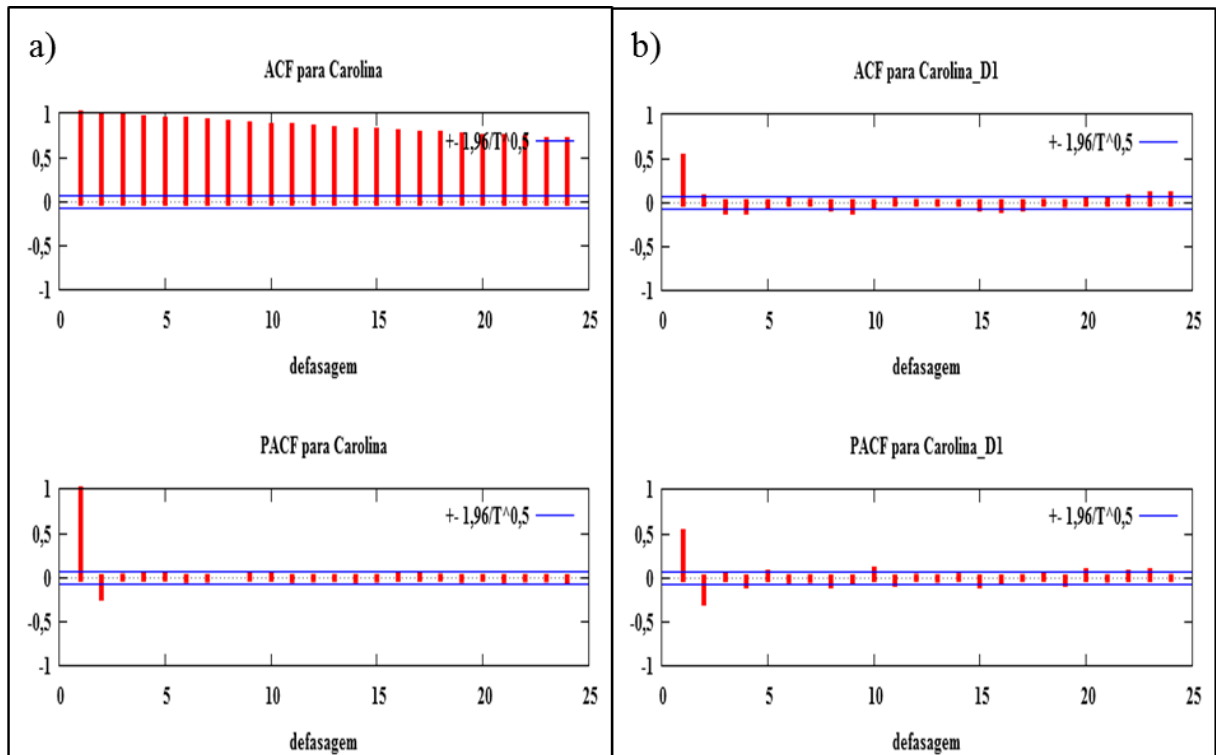


Figura 26 – Correlogramas da FAC e da FACP das séries (a) Conceição do Araguaia e (b) Conceição do Araguaia-D1

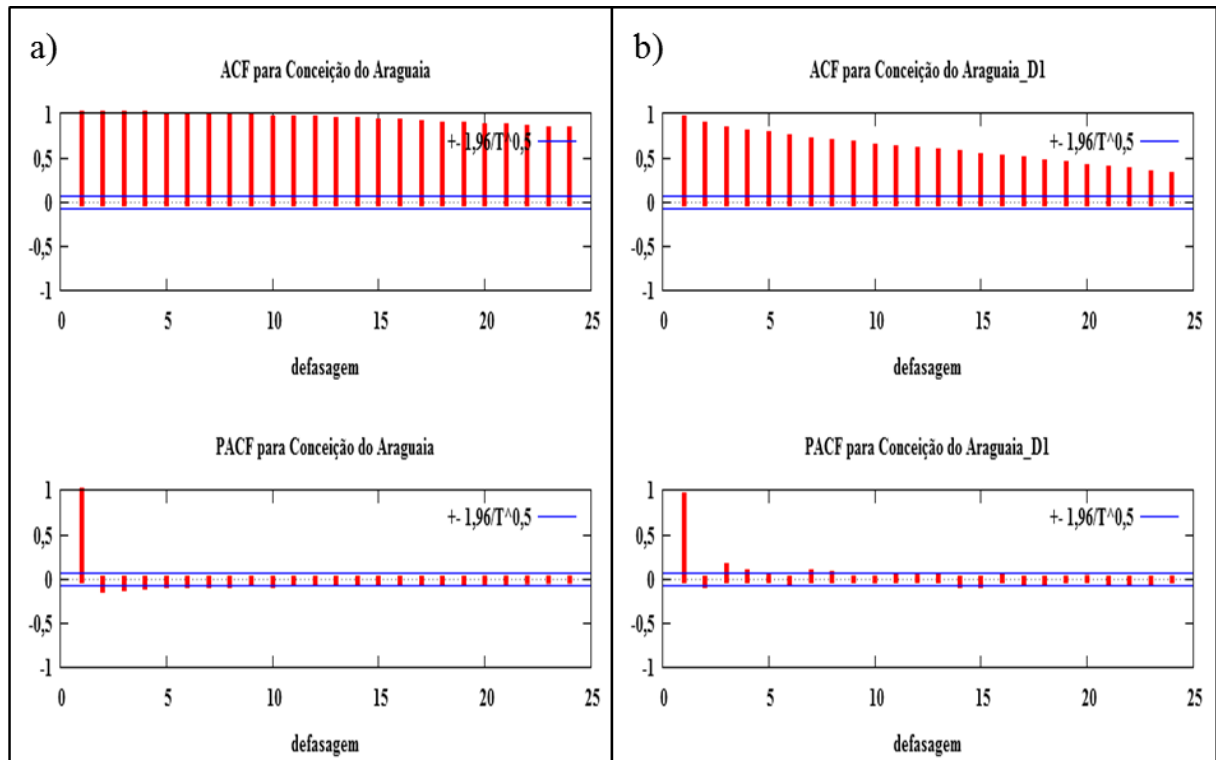
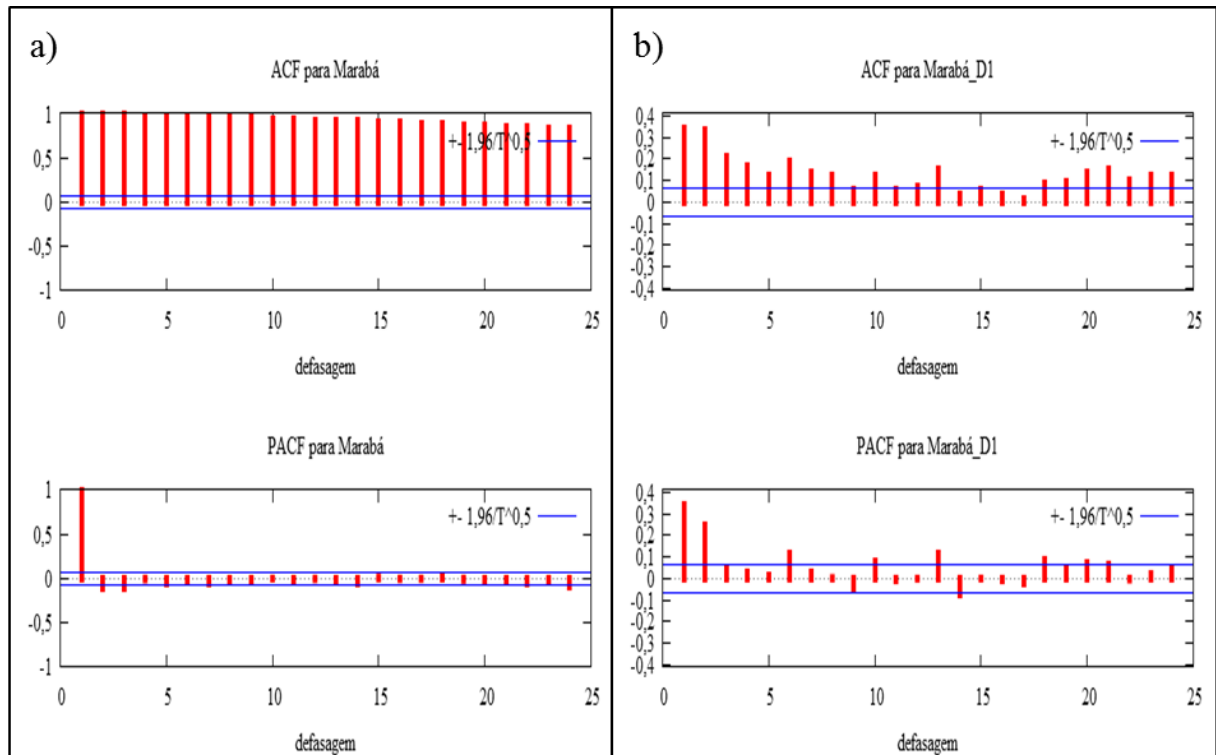


Figura 27 – Correlogramas da FAC e da FACP das séries (a)Marabá e (b) Marabá-D1



Logo, diante das informações anteriores foram identificados e testados diversos modelos para todas as séries analisadas. E usando o aplicativo SAS foi escolhido para Carolina (Z_t) o modelo de médias móveis de quarta ordem (MA (4)), para Conceição do Araguaia (F_t) o escolhido foi um ARMA de segunda ordem (ARMA (2)) e identificado o modelo autorregressivo de quarta ordem (AR (4)) para Marabá (X_t). Os modelos identificados estão representados nas eq.(20), (21) e (22), respectivamente.

$$Z_t = \delta + (1 + \theta B + \theta B^2 + \theta B^4 + \theta B^9) a_t \quad (20)$$

$$(1 + \theta B^2) F_t = \delta + (1 + \phi B) a_t \quad (21)$$

$$(1 + \phi B + \phi B^2 + \phi B^6 + \phi B^{13}) X_t = \delta + a_t \quad (22)$$

Onde:

B – é o operador diferença, $B^k Z_t = Z_{t-k}$;

δ – é a média aritmética da série;

a_t – são os erros aleatórios

ϕ_n e θ_n – são parâmetros que ajustam valores passados.

Identificados os modelos para Carolina (MA (4)), Conceição do Araguaia (ARMA (2)) e Marabá (AR (2)), segue para estimação dos parâmetros ϕ e θ , usando a máxima verossimilhança. Nas Tabelas 17, 18 e 19 são apresentadas às estatísticas (erro-padrão e estatística t (z)) dos modelos univariados ajustados.

Na Tabela 17 observou-se que os parâmetros estimados de ϕ_1 e ϕ_2 foram significativos a um nível abaixo de 0,001. Os parâmetros estimados de ϕ_4 e ϕ_9 foram significativos, não ultrapassando o nível mínimo estabelecido de 0,05. Nota-se, também, que os SE foram todos significativos não ultrapassando 0,1.

Tabela 17 – Resultados das análises e dos parâmetros obtidos para modelo Z_t (MA (4)).

ESTIMATIVAS DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA					
Lag	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão (SE)	Valor de t (z)	P-valor> t
0	MU	0,01148	0,01178	0,97	0,3298
ϕ_1	MA 1,1	-0,66746	0,03391	-19,68	<0,0001
ϕ_2	MA 1,2	-0,13400	0,03489	-3,84	0,0001
ϕ_4	MA 1,3	0,06668	0,02840	2,35	0,0189
ϕ_9	MA 1,4	0,09848	0,02733	3,60	0,0003

Na Tabela 18, observou-se que todas as estimativas foram significativas a um nível abaixo de 0,001e os SE foram todos significativos não ultrapassando 0,1.

Tabela 18 – Resultados das análises e dos parâmetros obtidos para modelo F_t (ARMA (2))

ESTIMATIVAS DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA					
Lag	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão (SE)	Valor de t (z)	P-valor> t
0	Média	0,00793	0,01066	0,74	0,4571
θ_2	MA 1,1	0,16395	0,03599	4,56	<0,0001
ϕ_1	AR 1,1	0,95127	0,01113	85,46	<0,0001

Na Tabela 19, observou-se que os parâmetros estimados de ϕ_1 e ϕ_2 foram significativos a um nível abaixo de 0,001. Os parâmetros estimados de ϕ_6 e ϕ_{13} foram significativos, não ultrapassando o nível máximo estabelecido de 0,05. Notou-se que os SE foram todos significativos não ultrapassando 0,01.

Tabela 19 – Resultados das análises e dos parâmetros obtidos para modelo X_t (AR (4)).

ESTIMATIVAS DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA					
Lag	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão (SE)	Valor de t (z)	P-valor> t
0	Média	0,01051	0,01488	0,71	0,4802
ϕ_1	MA 1,1	0,23931	0,03289	7,28	<0,0001
ϕ_2	AR 1,1	0,22891	0,03308	6,92	<0,0001
ϕ_6	AR 1,1	0,10619	0,03168	3,35	<0,0008
ϕ_{13}	AR 1,1	0,11015	0,03170	3,47	<0,0005

Estimados os parâmetros dos modelos univariados, reescrevendo as eq.(20), (21) e (22) e substituindo os coeficientes pelos valores dos parâmetros obtidos, temos:

$$Z_t = 0,011612 + (1 + 0,66B + 0,134B^2 - 0,666B^4 - 0,098B^9)a_t \quad (23)$$

$$(1 - 0,163B^2)F_t = 0,006612 + (1 - 0,951B)a_t \quad (24)$$

$$(1 - 0,01B - 0,239B^2 - 0,106B^6 - 0,110B^{13})X_t = 0,009176 + a_t \quad (25)$$

Após se estimar os parâmetros dos modelos ajustados, segue-se para a etapa das análises residuais, na qual se verifica os modelos estimados são adequados para serem utilizados no processo de modelagem multivariada. As análises dos resíduos de Carolina, Conceição do Araguaia e Marabá são mostradas nas respectivas Tabelas 20, 21 e 22.

Observando os resíduos dos modelos, nas Tabelas 20, 21 e 22, verifica-se que todos os modelos tiveram um bom ajuste, uma vez que os resíduos podem ser considerados como ruído branco (média zero e variância constante).

Tabela 20 – Análise dos Resíduos para o modelo Z_t .

AUTOCORRELAÇÕES DOS RESÍDUOS									
Até o atraso	Qui-quadrado	DF	Pr>Qui-quadrado	Autocorrelações					
6	3.68	2	0,1586	0,005	-0,014	-0,027	-0,027	-0,039	0,033
12	4.94	8	0,7639	- 0,003	0,000	-0,021	-0,019	0,025	-0,004
18	12.49	14	0,5674	-0,022	0,031	-0,022	-0,053	-0,036	0,051
24	22.41	20	0,3187	-0,045	0,027	0,033	-0,014	0,080	0,030

Tabela 21 – Análise dos Resíduos para o modelo F_t .

AUTOCORRELAÇÕES DOS RESÍDUOS									
Até o atraso	Qui-quadrado	DF	Pr>Qui-quadrado	Autocorrelações					
6	7,35	4	0,1183	0,003	0,001	-0,060	0,000	0,047	-0,053
12	10,79	10	-0,054	0,018	0,000	0,025	0,001	-0,000	-0,010
18	21,29	16	0,079	0,079	0,068	-0,023	0,013	0,015	0,015
24	23,95	22	-0,017	-0,017	0,024	0,003	0,013	-0,019	-0,040

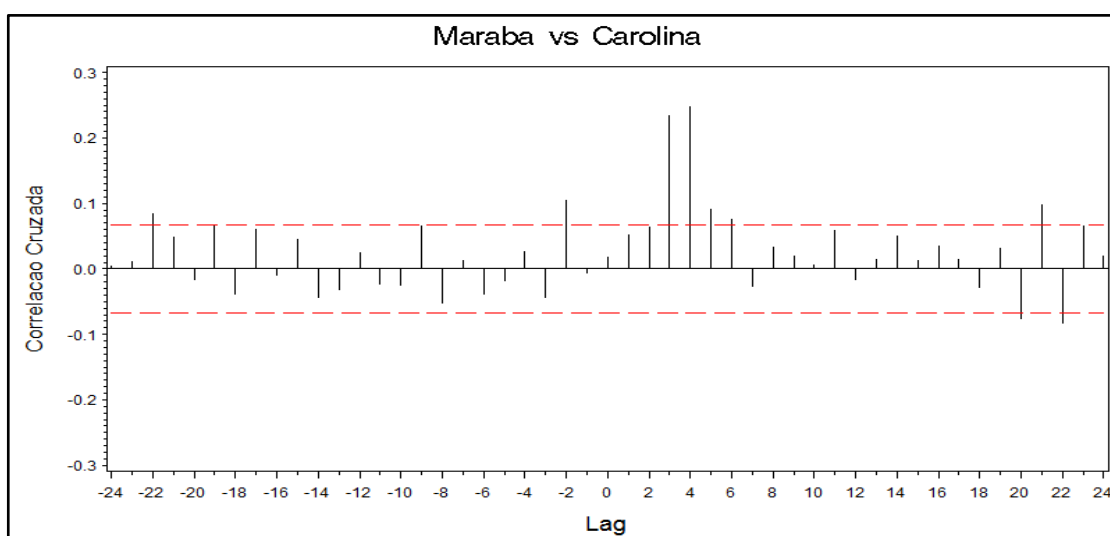
Tabela 22 – Análise dos Resíduos para o modelo X_t .

AUTOCORRELAÇÕES DOS RESÍDUOS									
Até o atraso	Qui-quadrado	DF	Pr>Qui-quadrado	Autocorrelações					
6	1,37	2	0,1183	0,504	0,003	0,033	0,006	-0,020	-0,007
12	8,70	8	-0,054	0,368	0,011	-0,052	0,060	-0,038	-0,025
18	21,98	14	0,079	0,079	0,013	-0,030	-0,033	-0,080	0,023
24	32,05	20	-0,017	0,043	-0,003	0,075	0,005	0,033	0,037

2º Etapa – Construção dos Modelos Multivariados

Finalizando a 1º etapa, segue-se para o próximo passo que é a identificação do modelo multivariado. Primeiramente são verificadas as correlações entre as variáveis dependentes e independentes através da FCC. Foram feitos dois correlogramas cruzados da FCC para 24 defasagens, sendo que a Figura 28 representa o correlograma cruzado de Marabá versus Carolina e a Figura 29 representa o correlograma cruzado de Marabá versus Conceição do Araguaia. Os resultados obtidos dessas correlações estão na sTabelas 23 e 24.

Figura 28 – Correlograma cruzado Marabá vs Carolina, os limites (linhas tracejadas) são 2 erros-padrão.



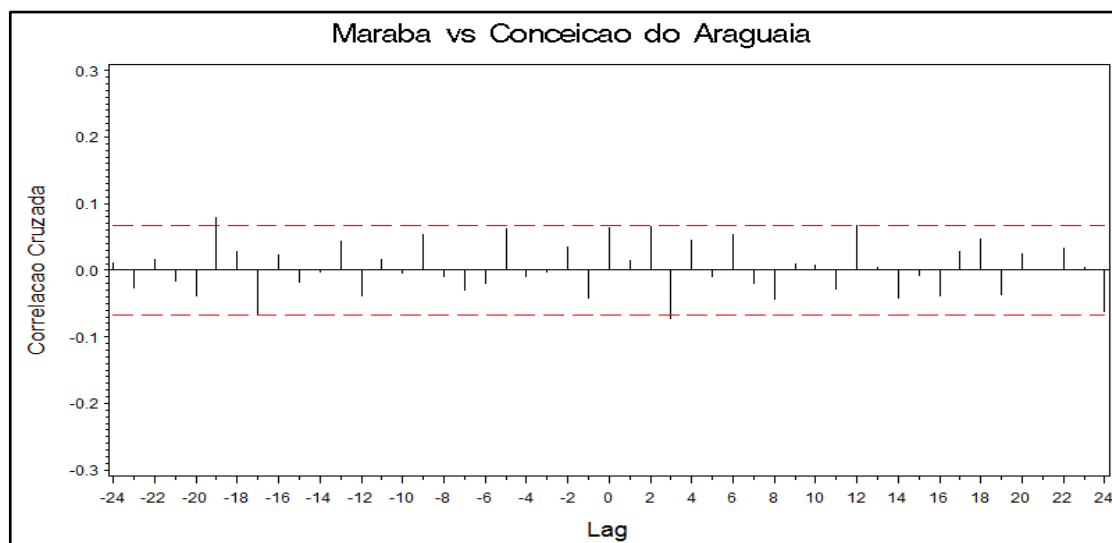
Os resultados obtidos para as correlações cruzadas entre Marabá e Carolina (Tabela 23), apresentam as seguintes características:

- i) Correlações significativas em atrasos negativos (– 2 e – 22), indício de que as séries podem estar defasadas entre si.
- ii) Correlações significativas nos atrasos 3, 4, 5, 6, 20, 21 e 22.

Tabela 23 – Análise das correlações cruzadas entre Marabá e Carolina

CORRELAÇÕES CRUZADAS									
Até o atraso	Qui-quadrado	DF	Pr>Qui-quadrado	Autocorrelações					
5	111,52	6	<0,0001	0,017	0,051	0,063	0,234	0,247	0,092
11	121,32	12	<0,0001	0,076	-0,027	0,034	0,020	0,007	0,059
17	125,17	18	<0,0001	-0,016	0,014	0,049	0,012	0,035	0,015
23	149,25	24	<0,0001	-0,028	0,031	-0,075	0,098	-0,083	0,065

Figura 29 – Correlograma cruzado Marabá vs Conceição do Araguaia, os limites (linhas tracejadas) são 2 erros-padrão



Os resultados obtidos para as correlações cruzadas entre Marabá e Conceição do Araguaia (Tabela 24), apresentam as seguintes características:

- i) Correlações significativas em atrasos negativos somente no lag – 19
- ii) Correlações significativas somente no atraso 3.

Tabela 24 – Análise das correlações cruzadas entre Marabá e Conceição do Araguaia

CORRELAÇÕES CRUZADAS									
Até o atraso	Qui-quadrado	DF	Pr>Qui-quadrado	Autocorrelações					
5	13,61	6	0,0343	0,064	0,015	0,066	-0,072	0,045	-0,010
11	18,76	12	0,0944	0,053	-0,020	-0,043	0,010	0,008	-0,029
17	25,99	18	0,0999	0,066	0,004	-0,041	-0,007	-0,039	0,029
23	30,34	24	0,1736	0,046	-0,036	0,024	0,000	0,032	0,005

Com base nas informações foi aplicado o modelo de função de transferência usando os modelos univariados obtidos (Z_t , F_t e X_t), como variáveis explicativas, e obteve-se o modelo multivariado ajustado, mostrado na eq.(26). Observa-se nessa equação que o tempo de resposta do movimento da água (onda) de Carolina (Z_t) até Marabá (M_t) é de $t - 4$ (atraso). Já o tempo de resposta do movimento da água (onda) de Conceição do Araguaia (F_t) até Marabá (M_t) é de $t - 3$ (atraso). Ou seja, pode-se afirmar que a diferença da resposta do movimento d'água, de Carolina e Conceição do Araguaia, até Marabá é de um dia.

$$\Delta M_t = \mu + (w_{01})\Delta Z_{t-4} + (w_{02} + w_2 B^2)\Delta F_{t-3} + \frac{a_t}{(1-\phi B^2)} \quad (26)$$

Onde:

Δ e B – são os operadores, Δ é o operador diferença, $\Delta Z_t = Z_t - Z_{t-1}$

B é o operador atraso, $BZ_t = Z_{t-1}$

a_t – é o erro aleatório;

M_t – é a variável resposta (nível em Marabá);

μ – representa uma constante gerada pelo modelo estimado;

w_{01}, w_{02}, w_2 e ϕ – são parâmetros que ajustam valores passados de M_t ;

Z_t – é a variável explicativa (Nível em Carolina);

F_t – é a variável explicativa (Nível em Conceição do Araguaia);

Na Tabela 25 são apresentadas as estimativas e respectivas estatísticas para o modelo (M_t). Observa-se que todas as estimativas podem ser consideradas estatisticamente significativas para vários níveis descritivos, todos menores do que 10%. O nível do rio Tocantins em Carolina apresentou uma defasagem de atraso 4, ou seja, o efeito dessa variável sobre o nível do rio Tocantins em Marabá leva um determinado tempo para ser observado. E no nível do rio Araguaia, nota-se uma defasagem de atraso 3, ou seja, o tempo para fazer efeito no nível do rio em Marabá é menor.

Tabela 25 – Estimativas e estatísticas dos parâmetros obtidos para modelo M_t

ESTIMATIVAS DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA							
Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão (SE)	Valor de t (z)	P-valor > t	Atraso	Variável	Shift
AR 1,1	0,13582	0,03549	3,83	0,0001	2	Marabá	0
NUM 1	0,24189	0,01701	14,22	<0,0001	0	Carolina	4
NUM 2	0,48213	0,16164	2,98	0,0029	0	C Araguaia	3
NUM 1,1	-0,46096	0,15973	-2,98	0,0039	2	C Araguaia	3

Estimados os parâmetros do modelo multivariado, reescreve-se a eq.(26) e substituindo os coeficientes pelos valores dos parâmetros obtidos, temos:

$$\Delta M_t = 0,01 + (0,242)\Delta Z_{t-4} + (0,482 - 0,461B^2)\Delta F_{t-3} + \frac{a_t}{(1-0,136 B^2)} \quad (27)$$

Após de estimados, os parâmetros dos modelos ajustados seguem para a etapa das análises residuais, para verificar se o modelo estimado é adequado para realizar previsões. As análises dos resíduos são mostradas na Tabela 26. Observando a análise residual nessa tabela, percebe-se que o modelo teve um bom ajuste aos dados. E a grande quantidade de registros (N=865) influencia os intervalos de confiança, tornando-os mais estreitos. Analisando as autocorrelações residuais, notou-se que os atrasos são baixos, podendo indicar a presença de ruído branco.

Tabela 26 – Análise dos Resíduos para o modelo M_t

AUTOCORRELAÇÕES DOS RESÍDUOS									
Até o atraso	Qui-quadrado	DF	Pr>Qui-quadrado	Autocorreções					
6	6,47	5	0,2633	0,018	0,002	0,039	-0,019	-0,070	0,023
12	16,46	11	0,1249	0,019	-0,000	-0,080	0,033	-0,052	-0,033
18	44,98	17	0,0002	0,080	-0,056	-0,018	-0,082	-0,111	0,065
24	51,91	23	0,0005	0,007	0,040	0,064	-0,041	-0,012	0,020

A avaliação do ajuste da função de transferência foi observada usando as correlações cruzadas entre os resíduos e as variáveis de entrada. As Tabelas 27 e 28 mostram essas correlações para as duas variáveis de entrada. Observou-se que para as séries de Carolina e Conceição do Araguaia, essas correlações cruzadas são estatisticamente não significativas, embora tenham alguns atrasos apresentando correlações um pouco maiores do que os outros atrasos, porém não passado de zero. Percebe-se que os valores foram, em geral, baixos. Deste modo, é aceitável considerar que as correlações cruzadas das duas variáveis de entrada com os resíduos do modelo não foram significativas, indicando que o modelo de função de transferência fornece um ajuste razoável aos dados.

Tabela 27 – Correlações cruzadas entre os resíduos e a série Carolina

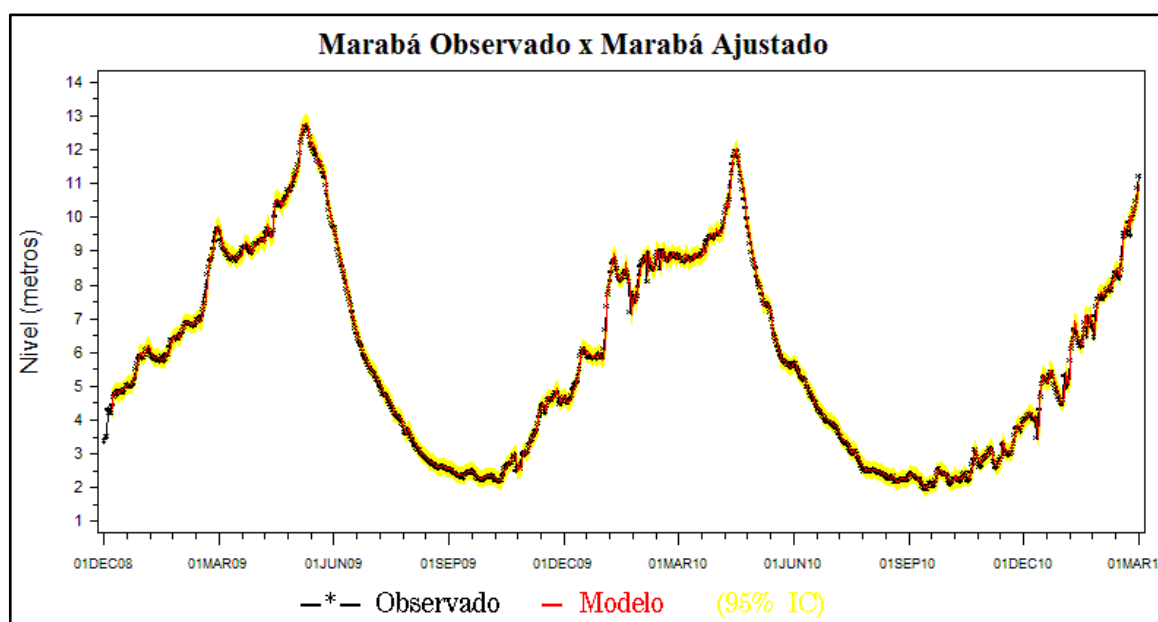
Correlações cruzadas entre os resíduos e a série de Carolina									
Até o atraso	Qui-quadrado	DF	Pr>Qui-quadrado	Correlações Cruzadas					
5	111,52	6	<0,0001	0,017	0,051	0,063	0,234	0,247	0,092
11	121,32	12	<0,0001	0,076	-0,027	0,034	0,020	0,007	0,059
17	125,17	18	<0,0001	-0,016	0,014	0,049	0,012	0,035	0,015
23	149,25	24	<0,0001	-0,028	0,031	-0,075	0,098	-0,083	0,065

Tabela 28 – Correlações cruzadas entre os resíduos e a série Conceição do Araguaia

Correlações cruzadas entre os resíduos e a série de Conceição do Araguaia									
Até o atraso	Qui-quadrado	DF	Pr>Qui-quadrado	Correlações Cruzadas					
5	13,61	6	0,0343	0,064	0,015	0,066	-0,072	0,045	-0,010
11	18,76	12	0,0944	0,053	-0,020	-0,043	0,010	0,008	-0,029
17	25,99	18	0,0999	0,066	0,004	-0,041	-0,007	-0,039	0,029
23	30,34	24	0,1736	0,046	-0,036	0,024	0,000	0,032	0,005

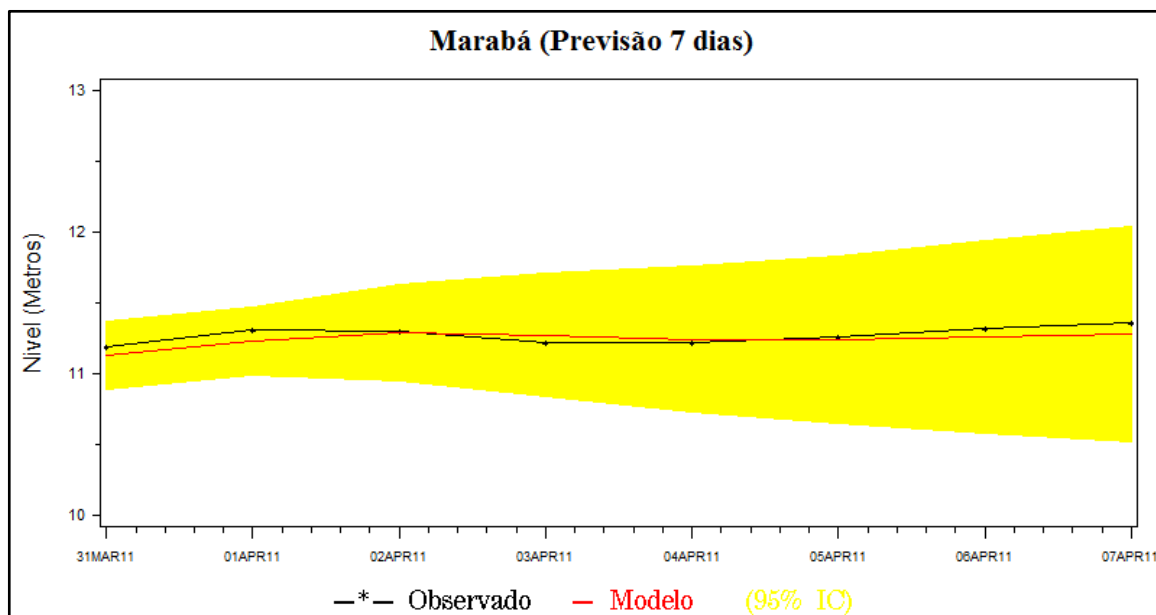
A Figura 30 mostra o modelo ajustado para um intervalo de confiança de 95% (faixa amarela) juntamente com os dados observados de Marabá, observando-se, assim, que o modelo ajustado representou bem o modelo previsto.

Figura 30 – Modelo Observado e ajustado para Marabá



A Figura 31 mostra a previsão para sete dias (1 a 7 de abril de 2011), mostrando que o modelo representou bem o comportamento da série, não ultrapassado seus valores do intervalo de confiança (faixa amarela). Logo, conclui-se que o modelo multivariado, usando a função de transferência pode ser considerado adequado para previsão do Nível do rio Tocantins em Marabá-PA.

Figura 31 – Previsão de sete dias para Marabá



4.3.2 Modelo ARIMA –Gretl

O modelo multivariado ARIMA também foi realizado em duas etapas, onde a 1ª etapa é a construção do modelo univariado para Marabá, utilizando a própria série como variável explicativa do modelo. E a 2ª etapa, trata-se da modelagem multivariada, que além da própria série, usou as séries originais de Carolina e Conceição do Araguaia.

1º Etapa – Construção do Modelo Univariado

Os critérios de identificação considerados nos modelos univariado e multivariado, utilizados no Gretl, foram que as séries possuem comportamentos sazonais, logo não precisam realizar a diferença entre as mesmas, podendo continuar o processo de identificação do modelo, através da FAC e FACP (Figura 25(a), 26(a) e 27(a)) com base nos dados originais.

Observando o comportamento da FAC E FACP, nota-se que o coeficiente de autocorrelação da ST assume valores positivos, indicando que as variáveis medidas possuem uma autocorrelação positiva. Identificou-se um modelo AR, usando os lags (1, 2,3,5,6,22) da FACP que são considerados significativos por ultrapassarem o intervalo de confiança, para obter a ordem do modelo autorregressivo.

No Anexo B encontra-se o detalhamento dos resultados estatísticos obtidos pelas FAC e FACP, realizados no programa Gretl, onde os resultados da Estatística Q afirmam que os dados são significativos, pois seus valores são maiores que o valor crítico. E se observou que os resultados de *P-valor* são nulos (zero), podendo-se afirmar que os coeficientes são correlacionados, ou seja, 100% de significância.

Diante dessas informações, usando as defasagens significativas, dos diversos modelos obtidos e aplicação dos vários testes, foram identificados vários modelos potenciais, sendo que o modelo que foi utilizado é o modelo autorregressivo de terceira ordem (AR (3)) para Marabá (Y_t). Usou-se o termo de ordem ϕ_{22} , contendo as informações da sazonalidade, e o modelo é representado pela eq. (28). Nessa equação, nota-se que o tempo de resposta que melhor representou o nível do rio foi os atrasos $t - 2$, $t - 3$ e $t - 22$, da própria série.

$$Y_{t+1} = \gamma + \phi_2 Y_{t-2} + \phi_3 Y_{t-3} + \phi_{22} Y_{t-22} + a_t. \quad (28)$$

Onde:

Y_{t+1} – é a variável resposta (nível em Marabá);

γ – é a constante gerada pelo modelo;

a_t – são os erros aleatórios

ϕ_n e θ_n – são os parâmetros que ajustam valores passados.

Identificado o modelo para Marabá (AR (3)) foi estimado os parâmetros ϕ através da máxima verossimilhança. Na Tabela 29, mostram-se os testes estatísticos realizados na constante e nos parâmetros obtidos, rescrevendo o modelo linear dado pela eq. (28) e substituindo os coeficientes pelos valores dos parâmetros obtidos, temos:

$$Y_{t+1} = 1,22Y_{t-2} - 0,21Y_{t-3} - 0,015Y_{t-22} + a_t. \quad (29)$$

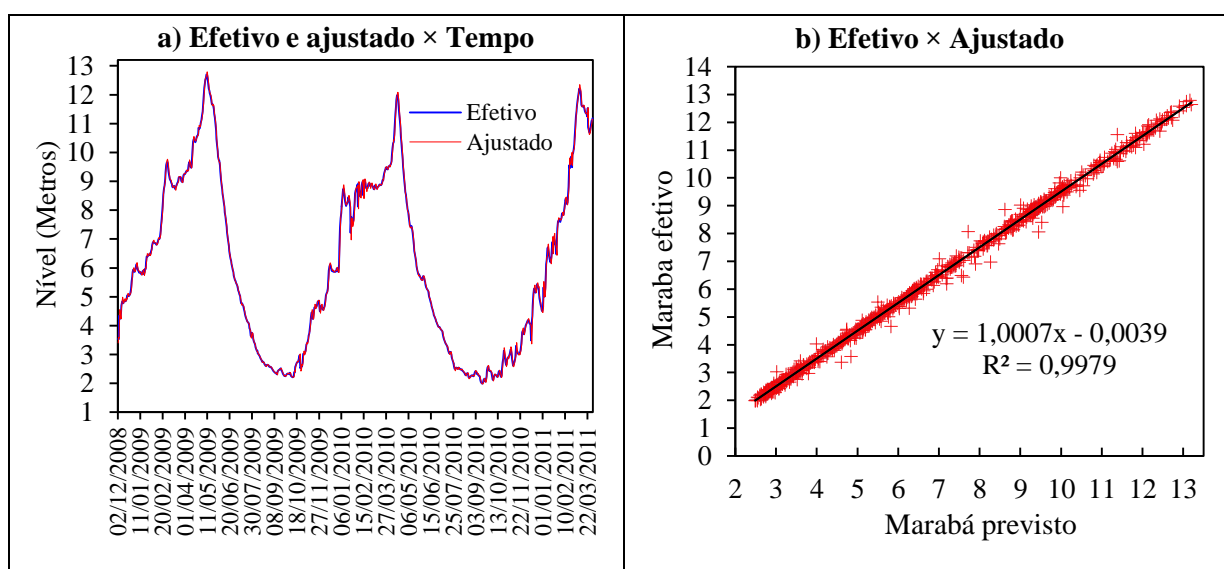
Os resultados dos testes estatísticos (Tabela 29) mostram as análises de SE que foram realizados para a constante e cada parâmetro, observando que os valores obtidos pelo SE são menores que um (1) indicando que os erros gerados não são significativos. Mostram também a estatística Z, que valida os resultados dos parâmetros, conforme confirma os resultados de *p-valor* sendo menores que 0,05. Os resultados dos testes de AIC (-929,6972), BIC (-905,9652) e HQC (-920,6071), confirmam que o modelo obtido tem um bom ajuste, com valores bem inferiores aos vários modelos testados.

Tabela 29 – Resultados das análises e dos parâmetros obtidos para modelo univariado autorregressivo de terceira ordem (AR (3)) para Marabá.

ESTIMATIVAS DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA				
	Coefficiente	Erro Padrão	z	p-valor
<i>Constante</i>	6,13716	1,23866	4,9547	<0,00001
ϕ_2	1,22446	0,0200609	61,0369	<0,00001
ϕ_3	-0,212729	0,0215701	-9,8622	<0,00001
ϕ_{22}	-0,0152933	0,00385251	-3,9697	0,00007
Média var. dependente	6,100000	D.P. var. dependente	3,001980	
Log da verossimilhança	469,8486	Critério de Akaike	-929,6972	
Critério de Schwarz	-905,9652	Critério Hannan-Quinn	-920,6071	

As análises residuais servem para verificar se o modelo estimado é adequado para fazer previsões de níveis diários para Marabá-PA. A Figura 32 mostra os gráficos com as análises da série efetiva e ajustada, obtidas do modelo Y_t usando a série temporal de Nível (metros) do rio Tocantins para Marabá-PA. Na Figura 32 (a) representa-se a série temporal efetiva e ajustada em relação ao tempo. Verificou-se que o modelo ajustado representa perfeitamente os níveis do rio Tocantins para o município de Marabá-PA. Na Figura 32 (b), mostra-se a relação de Marabá efetivo versus Marabá Ajustado. Assim, confirmou-se que o modelo ajustado teve uma representação significativa, com baixa dispersão e a maioria dos pontos ficou próxima à reta de regressão.

Figura 32 – Gráficos com as análises da série efetiva e ajustada, obtidas do modelo Y_t



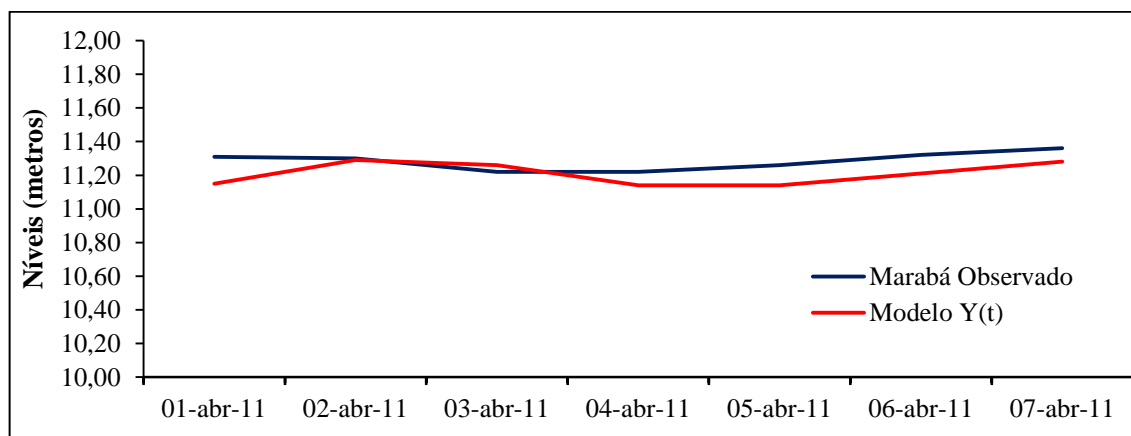
A Tabela 30 mostra os resultados dos testes estatísticos dos erros de previsão, observou-se que os valores baixos de SER, ME e MAE indicaram que o modelo realiza boas previsões. Percebeu-se também, que os valores obtidos de MPE e MAPE são satisfatórios. Logo, foi possível afirmar que o modelo produz previsões de precisão elevada, uma vez que MPE e MAPE obtiveram valores inferiores a 10%. E o coeficiente de U Theil indica que o erro do modelo é menor que o erro da previsão, já que seu resultado foi menor que 1.

Tabela 30 – Erros da estimação

ANÁLISES DOS ERROS			
SER = 0,13859	ME = -0,0002	MSE = 0,028079	U de Theil = 0,9305
MAE = 0,08469	MPE = -0,1461	MAPE = 1,6043	

Analizados os erros e o ajuste do modelo fora observado que o mesmo teve um bom ajuste, efetivando as previsões. A Figura 33 mostra a previsão para sete dias (1 a 7 de abril de 2011), no qual notou-se que o modelo representou bem o comportamento da série, não ultrapassado seus valores do intervalo de confiança. Logo, concluiu-se que o modelo univariado pode ser considerado adequado para fazer previsão do Nível do rio Tocantins em Marabá-PA.

Figura 33 – Previsão de sete dias para Marabá (Yt)

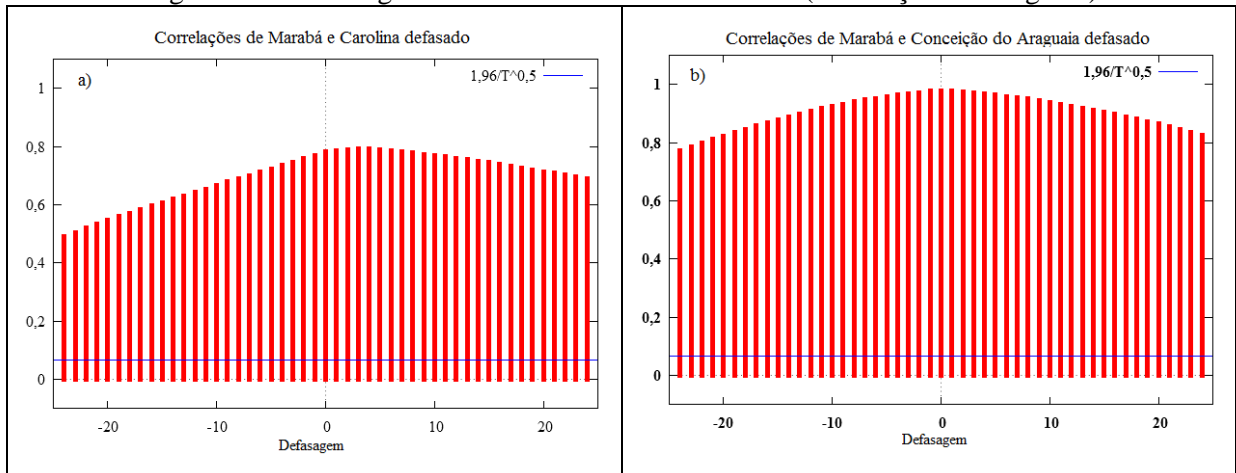


2º Etapa – Construção dos Modelos Multivariados

Para a formulação do modelo multivariado são verificadas as correlações entre as variáveis dependentes e independentes através da FCC, usando as séries originais. Foram elaborados dois correlogramas cruzados da FCC para 24 defasagens, sendo que a Figura 34 representa o correlograma cruzado de Marabá versus Carolina (a) e o correlograma cruzado de Marabá versus Conceição do Araguaia (b). As colunas vermelhas são os valores das defasagens com lag no intervalo de -24 a 24. Observou-se que Conceição do Araguaia tem

suas defasagens com correlações acima de 0,77, atingindo seu valor máximo igual a 0,97. Enquanto que os maiores valores de Carolina alcança seu valor máximo igual a 0,79. Logo, afirma-se que Conceição do Araguaia tem seus valores mais correlacionados com Marabá, comparado com Carolina. Os resultados obtidos dessas correlações estão no Anexo C.

Figura 34 – Correlograma Cruzado Marabá vs Carolina (Conceição do Araguaia)



Diante dessas informações foram identificados diversos modelos, no qual o escolhido para fazer a previsão foi o autorregressivo de terceira ordem (AR (3)), representado na eq. (30). Notam-se nessa equação que o tempo de resposta da série autoregressiva, foi os atrasos $t - 3$, $t - 5$ e $t - 8$. Observou-se, também que o tempo de resposta do movimento da água (onda) de Carolina (Z_t) até Marabá (M_t) é de $t - 6$ (atraso). Já o tempo de resposta do movimento da água (onda) de Conceição do Araguaia (F_t) até Marabá (M_t) varia de $t - 6$ a $t - 8$ (atraso). Confirmando que o uso de dois valores de defasagem de Conceição do Araguaia, foi devido à mesma ter obtido melhores valores correlacionados com Marabá.

$$N_{t+1} = \gamma + \phi_3 N_{t-3} + \phi_5 N_{t-5} + \phi_8 N_{t-8} + \alpha_6 Z_{t-6} + \beta_6 F_{t-6} + \beta_7 F_{t-7} + a_t \quad (30)$$

Onde:

N_{t+1} – é a variável resposta (nível em Marabá);

γ – representa uma constante gerada pelo modelo estimado;

ϕ_3, ϕ_5 e ϕ_8 – são os parâmetros que ajustam valores passados de N_t ;

α_6 – representa uma constante gerada pela variável independente (Carolina);

β_6 e β_7 – representam uma constante gerada pela variável independente (Conceição do Araguaia);

Z_t – é a variável independente (Nível em Carolina)

F_t – é a variável independente (Nível em Conceição do Araguaia);

Na Tabela 31 observou-se que os parâmetros estimados de ϕ_2, ϕ_3 , e β_7 foram significativos a um nível abaixo de 0,001, e o parâmetro estimado para Carolina (α) como uma significância de 10%, e seus valores não ultrapassando o nível máximo estabelecido de 0,05. Observam-se os SE foram todos significativos não ultrapassando 0,1. Os resultados dos testes de AIC (-1075,066), BIC (-1038,322) e HQC (-1060,890), confirmam que o modelo obtido tem um bom ajuste, com valores inferiores aos vários modelos testados.

Tabela 31 – Resultados das análises e dos parâmetros obtidos para modelo multivariado N_t

ESTIMATIVAS DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA				
	Coefficiente	Erro Padrão	z	p-valor
γ	0,8101	0,0220814	51,4960	<0,00001
ϕ_3	1,2240	0,0359929	34,0045	<0,00001
ϕ_5	-0,2330	0,0385532	-5,7824	<0,00001
ϕ_8	-0,1570	0,0398651	-3,9326	0,00008
γ_6	-0,0325	0,0191981	-1,6198	0,01926
β_6	0,2340	0,0191935	-1,1075	0,02680
β_7	-0,0420	0,281463	-7,0029	<0,00001
Média Var. dependente	6,10000	D.P. Var. dependente		3,001980
Log da verossimilhança	545,533	Critério de Akaike		-1075,066
Critério de Schwarz	-1038,322	Critério Hannan-Quinn		-1060,890

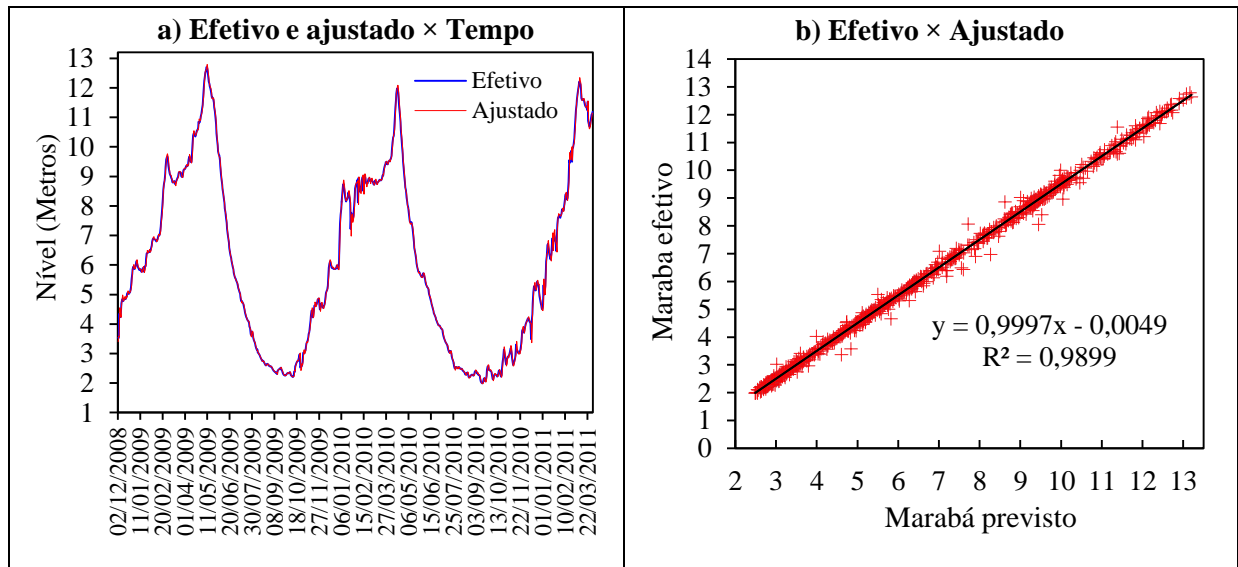
Rescrevendo o modelo estacionário, dado pela eq. (30) e substituindo os coeficientes pelos valores dos parâmetros obtidos, temos:

$$N_{t+1} = 0,81 + 1,224N_{t-3} - 0,233N_{t-5} - 0,157N_{t-8} - 0,0325Z_{t-6} + 0,234F_{t-6} - 0,042F_{t-7} + a_t \quad (31)$$

O diagnóstico é feito através da análise do modelo ajustado, observado e dos resíduos (erros) análises. Na Figura 36 e na Tabela 32, na qual se verificaram os resultados das análises obtidas do modelo ajustado e dos resíduos.

A Figura 35 mostra os gráficos com as análises da série efetiva e ajustada, obtidas do modelo N_t usando à série temporal de Nível (metros) do rio Tocantins para Marabá-PA. No gráfico (a) é representada a série temporal efetiva e ajustada em relação ao tempo. Verificou-se que o modelo ajustado representa “perfeitamente” os níveis do rio Tocantins para o município de Marabá-PA. E no gráfico (b), que mostra a relação de Marabá efetivo, versus Marabá Ajustado, onde se confirma que o modelo ajustado teve uma representação significativa, com baixa dispersão e a maioria dos pontos ficou próxima à reta de regressão.

Figura 35 – Gráficos com as análises da série efetiva e ajustada, obtidas do modelo N_t .



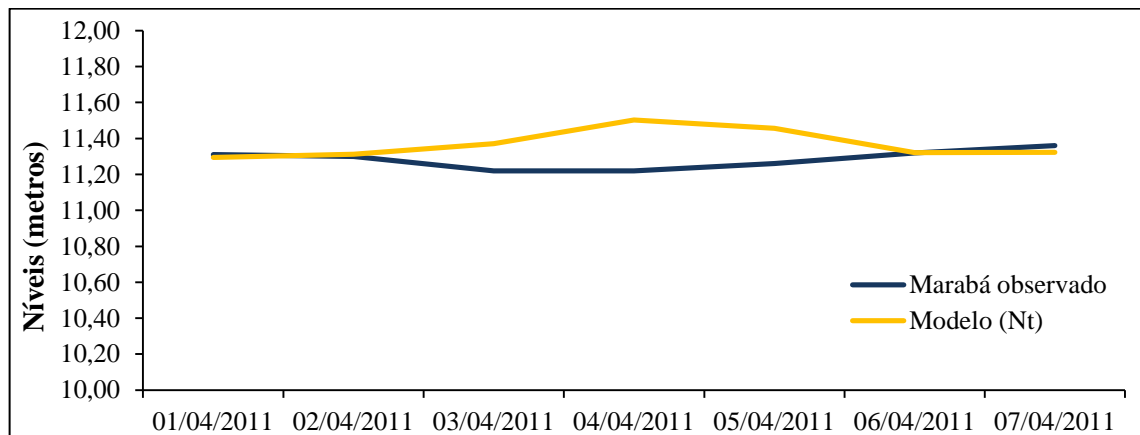
A Tabela32 mostraos resultados dos testes estatísticos dos erros de previsão. Observou-seque os valores de SER, ME e MAE são baixos, indicando que o modelo realizou boas previsões. Percebeu-se também, que os valores obtidos de MPE e MAPE são satisfatórios, afirmando-se que o modelo produziu previsões de precisão elevada, uma vez que MPE e MAPE obtiveram valores inferiores a 10%. E o coeficiente de U Theil indica que o erro do modelo é menor que o erro da previsão, já que seu resultado foi menor que 1.

Tabela 32– Erros da estimação

ANÁLISES DOS ERROS			
SER = 0,13267	ME = -0,0002	MSE = 0,017642	U de Theil = 0,9000
MAE = 0,08027	MPE = -0,1795	MAPE = 1,5175	

A Figura 36mostra as previsões para sete dias (1 a 7 de abril de 2011), Notou-se que o modelo multivariado conseguiu obter boas previsões e subestimou os valores de níveis acima do real, nos dias 3, 4 e 5 de abril de 2011. Logo, concluiu-se que o modelo N_t é indicado para o uso da previsão de níveis do rio Tocantins em Marabá-PA, apesar de possui erros absolutos até 0,28 cm em alguns dias.

Figura 36– Previsão de sete dias para Marabá (Nt)



4.3.3 Comparações dos Modelos

A comparação dos modelos foi realizada da seguinte forma: a comparação dos três modelos univariados e multivariados, obtidos com o uso dos programas SAS e Gretl. A Figura 37 mostra os modelos multivariados (M_t e N_t) e univariado (Y_t), é possível observar que todos os modelos representaram o comportamento do nível nos sete dias. Notam-se na Tabela 33 que o modelo M_t teve menores erros do que o modelo Y_t , não ultrapassando de 0,1. Observasse também que o erro máximo obtido pelos modelos M_t , N_t e Y_t , foi de 0,08, -0,28 e 0,12, respectivamente.

Na Tabela 34 foram relatadas as principais diferenças entre o uso da modelagem ARIMA multivariada, baseada na metodologia de BJ, utilizada nessa pesquisa, usando diferentes interpretações e diferentes programas estatísticos para uso da modelagem. Mas os dois sendo usados com mesmos objetivos, de realizar previsões. Observasse que a principal diferença é que as séries do modelo M_t são diferenciadas e as dos modelos N_t e Y_t , não.

Figura 37 – Marabá Observado comparado com os modelos previstos.

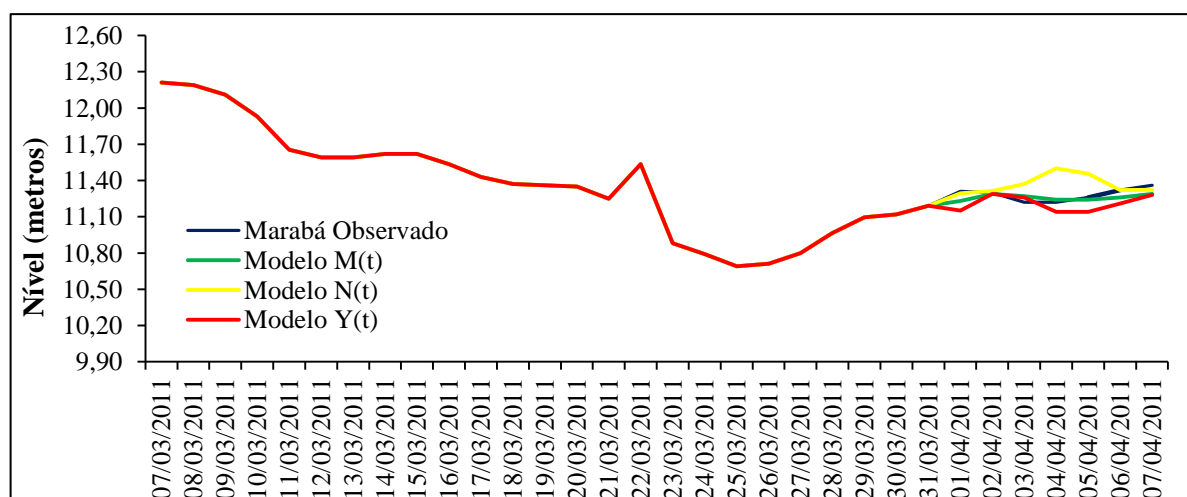


Tabela 33 – Previsão de níveis em Marabá para 7 dias

DIAS	Marabá Observado	Modelo M(t)	Erro	Modelo N(t)	Erro	Modelo Y(t)	Erro
01/04/2011	11,31	11,23	0,08	11,30	0,01	11,15	-0,16
02/04/2011	11,30	11,29	0,01	11,31	-0,01	11,29	-0,01
03/04/2011	11,22	11,27	-0,05	11,37	-0,15	11,26	0,04
04/04/2011	11,22	11,24	-0,02	11,50	-0,28	11,14	-0,08
05/04/2011	11,26	11,24	0,02	11,46	-0,20	11,14	-0,12
06/04/2011	11,32	11,26	0,06	11,32	0,00	11,21	-0,11
07/04/2011	11,36	11,29	0,07	11,32	0,04	11,28	-0,08

Tabela 34 – Principais Diferenças entre os Aplicativos estatísticos

DIFERENÇAS DE INTERPRETAÇÕES	
ARIMA SAS	ARIMA Gretl
Variáveis com 1 diferença	Variáveis originais
Variáveis explicativas usada no modelo M_t foram os modelos univariados	Variáveis explicativas usada no modelo N_t foram as séries originais
Equação do modelo usa a média da série diferenciada	Equação do modelo usa uma constante gerada, baseada nas séries originais.
Não sazonal	Presença de sazonalidade

4.3.4 Limitações dos Modelos

A principal limitação do modelo é a ausência de equações físicas que descrevam os processos não-lineares do ciclo hidrológico. O modelo é específico para previsão de níveis em Marabá. Logo, é limitado para um único município, mas isso não quer dizer que o modelo ARIMA não pode ser aplicado em outras regiões, bastando apenas obter as séries temporais necessárias para aplicar a metodologia de BJ, na região desejada. Outra limitação é que o modelo é específico para previsões de níveis diários do rio Tocantins em Marabá, sem interferência antrópica na região, caso ocorra alteração no cenário natural, a previsão não terá o mesmo resultado devido às informações que as geraram, terem sido alteradas.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A análise quantitativa dos impactos socioeconômicos, ocorridos nas enchentes de 2009 e 2011 na cidade de Marabá, revela que cerca de 4 mil famílias sofrem com estes eventos, implicado em gastos financeiros elevados. Os modelos hidrológicos para previsão de níveis nos anos de eventos extremos são importantes ferramentas que a Defesa Civil vem utilizando para o planejamento e preparo de ações nos locais atingidos e também poderá ser utilizada para o planejamento urbano das cidades através da definição das áreas de risco que não podem ser alocadas para a construção de residências.

Os eventos hidrológicos extremos de níveis foram categorizados pelo uso de Quantis na série de níveis de Marabá considerando as ordens quantílicas de ACIMA ($0,65 \leq X_i < 0,85$) e MUITO ACIMA ($\geq 0,85$). Verificou-se que na categoria ACIMA os meses dezembro, janeiro, abril e maio foram os que tiveram maiores número de registros e os de fevereiro e março tiveram menos registros. Os eventos de cheias com níveis MUITO ACIMA do normal geralmente estão associados a eventos de La Niña, indicando a importância do monitoramento do Pacífico para a previsão destes extremos de enchentes.

O modelo hidrológico desenvolvido usando a metodologia de BJ simula o regime hidrológico do Tocantins com pequenos erros absolutos e fornece boas previsões do nível do rio em Marabá-PA para até sete dias de antecedência com erro absoluto máximo de 0,12 m. Portanto as previsões indicam seu uso como ferramenta de auxílio na previsão de riscos enchentes por parte da Defesa Civil, no sentido de minimizar os impactos ambientais e nas atividades econômicas e sociais do Município. O modelo que teve menor erro absoluto (0,08m) para previsões de níveis foi o modelo M_t , desenvolvimento com o aplicativo SAS, que interpreta a série como sendo não linear e não estacionária.

Através dos modelos univariados foi construído o modelo multivariado para Marabá, com a identificação do modelo através da FCC e as avaliações dos ajustes da função de transferência observada pelas correlações cruzadas entre os resíduos e as variáveis de entrada, as quais mostraram estatísticas não significativas. Porém a variável Carolina apresentou um pouco mais correlações significativas do que Conceição do Araguaia. Mesmo com esses fatores pode-se identificar um modelo que fornecesse um bom ajuste aos dados, mostrando um modelo multivariado de nível para Marabá em função da própria série, do nível Carolina e Conceição do Araguaia, e o modelo identificado, apresentou pequenos erros absolutos o nível. A previsão realizada pelo modelo univariado Y_t de terceira ordem (AR (3)), identificou AIC igual -929,6972 e os lags significativos 1, 3 e 22, representou muito bem o comportamento do

nível do rio em Marabá. Nas análises residuais o modelo mostrou um bom ajuste com ME igual a -0,0002.

O modelo multivariado N_t , autorregressivo de terceira ordem (AR (3)), teve AIC igual -1075,066 e os *lags* significativos 3,5 e 8. Nas análises residuais o modelo mostrou um bom ajuste com ME igual a -0,0002 e RSE igual 0,13267. O modelo identificado mostrar um bom ajuste e erros baixos, representando o comportamento do rio para Marabá nos dias 1, 2 6 7 de abril de 2011, e superestimando os valores nos 3, 4 e 5, tendo o erro absoluto máximo no dia 4 de abril de 2011, com valor igual a 0,28.

Foi realizada a comparação entre os três modelos identificados, M_t , N_t e Y_t , observou-se que os modelos M_t e Y_t , representaram melhor o nível do rio Tocantins em Marabá. O modelo multivariado Y_t , também representou o nível do rio, porém a previsão teve valores, superestimados, em três dias (3, 4 e 5 de abril de 2011). Analisando os três modelos, observou-se que o modelo M_t feito com o método de função de transferência teve melhores resultados comparando com os modelos N_t e Y_t .

Sugestão para trabalhos futuros: Estender este estudo as demais bacias hidrográfica que sofrem com as enchentes no Estado do Pará.

REFERÊNCIAS

- AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control.**, Boston, v.19, n.6, p.716-723, Dec. 1974.
- ALCÁNTARA-AYALA. I. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. **Geomorphology**, v. 47, p. 107–124. 2002.
- ALMEIDA, J. J. **A cidade de Marabá sob o impacto dos projetos governamentais**. 2008. 273f. Dissertação (mestrado em História Econômica) - Departamento de História da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- ANDREOLLI, I. **Previsão de vazão em tempo real no Rio Uruguai com base na previsão meteorológica**. 2003. 182f. Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – IPH/UFRGS, Rio Grande do Sul, 2003.
- ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. **A importância relativa do Atlântico Tropical Sul e Pacífico leste na variabilidade de precipitação do Nordeste do Brasil**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.22, n.1, p.63-74. 2007.
- ASSIS, F.N. de; ARRUDA, H.V. de; PEREIRA, A.R. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas: Ed. Universitária /UFPEL, 1996. 161p.
- BARBANCHO, Alfonso G. **Fundamentos e possibilidades da econometria**. Rio de Janeiro: Editora Forum, 1970.193 p.
- BARROS, M. **Séries temporais e modelagem estatística**. Disponível em: <<http://www.mbarros.com>>. Acesso em Novembro de 2011.
- BATISTA, A. L. F. **Modelos de séries temporais e redes neurais artificiais na previsão de Vazão**. 2009. 89f. Dissertação (mestrado em engenharia de sistemas)- Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia, Minas Gerais, 2009.
- BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In. TUCCI, C.E.M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ºed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2001. p. 177-242.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. in: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3ºed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2002. cap. 5, p. 177-23.
- BEZERRA, A. C. N. **Aspectos da circulação atmosférica de grande escala sobre o norte e nordeste do Brasil, relacionados com a temperatura da superfície do mar**. 2006. 107f. Dissertação (mestrado em meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, 2006.
- BORSATO, FH; MARTONI, A.M. Estudos da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no município de Maringá, Estado do Paraná. **ActaScientiarum, Human and Social Sciences**.Maringá, v.26, n.2, p 273-285. 2004.

BOX, G.; JENKINS, G. **Time series analysis: forecasting and control**. Holden Day: San Francisco, CA, USA, 1976. 575p.

BOX, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C. (1994). **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, Nova Jersey, 3a edição. 367-384.

BUCHMANN, J.; BUJA, L.E.; PAEGLE, J.; ZHANG, C.D.; BAUMHEFNER, D.P. FGGE forecast experiments for Amazon Basin rainfall. **Monthly Weather Review**, n.114, p. 1625-1641. 1986c.

BUCHMANN, J.; PAEGLE, J.; BUJA, L.E.; DICKINSON, R.E. Further FGGE forecasts experiments for Amazon Basin rainfall. **Monthly Weather Review**, n.117, p. 1092-1102. 1989.

BUCHMANN, J.; PAEGLE, J.; BUJA, L.E.; DICKINSON, R.E. The effect of tropical Atlantic heating anomalies upon GCM rain forecasts over Americas. **Journal of Climate**, n.3, p. 189-208. 1990.

BUCHMANN, J.; PAEGLE, J.; BUJA, L.E. ; DICKINSON, R.E. Further experiments on the effect of tropical Atlantic heating anomalies upon GCM rain forecasts over the Americas. **Journal of Climate**, n.8, p. 1235-1244. 1995a.

BUCHMANN, J.; PAEGLE, J.N.; BUJA, L.E.; PAEGLE, J. The dynamical basis of regional vertical motion fields surrounding localized tropical heating. **Journal of Climate**, n.8, p. 1217-1234. 1995b.

CANE, M.A. Tropical Pacific ENSO modes: ENSO as a mode of coupled system. In: TRENBERTH, K. E. (ed.). **Climate system modelling**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 583-614.

CARVALHO, A. R. L. **Previsão de afluições diárias para horizontes de 1 a 7 dias através de uma abordagem estocástica**. 2001. 89f. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; SILVA DIAS, M. A. F. Intraseasonal large-scale circulations and mesoscale convective activity in Tropical South America during the TRMM LBA campaign. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n.8042, 20p. 2002.

CARVALHO, L.M.V.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: intensity, form, persistence, relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **J. Climate**, n. 17, p. 88-108 2004.

CASTILHO, O.; MELIN, P. Hybrid intelligent systems for time series prediction using neural networks, fuzzy logic, and fractal theory. **IEEE-Transaction on Automatic Control**, n. 6, p. 1395-1408. 2002.

CASTRO, A. L. C. **Glossário de defesa civil, estudos de riscos e medicina de desastres**. Brasília, DF: Secretaria da Nacional da Defesa Civil. 1998. 283p Disponível em: <www.defesacivil.gov.br/.../glossario.asp>. Acesso em: junho de 2011.

CASTRO, A. L. C. **Manual de planejamento em defesa civil**. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional; Departamento de Defesa Civil. 1999. v.1, 133 p.

CASTRO, A.L.C. **Manual de desastres**. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional; Secretaria Nacional de Defesa Civil, 2003. v.1. 174p.

CENTRO DE CIÊNCIA DO SISTEMA TERRESTRE (CCST). INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) DO BRASIL E O MET OFFICE HADLEY CENTRE (MOHC) DO REINO UNIDO. **Riscos das mudanças climáticas no Brasil**. Projeto colaborativo realizado pelo CCST, INPE, MOHC. Análise conjunta Brasil-reino unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia. 2011. 56p.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC). **El Niño e La Niña**. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acessado em março de 2012.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Rev. Geomorfológica**, Campinas, v.18, n.9, p.35-64. 1969.

CHORLEY, R.J. **Geomorphology and general systems theory**. United States Geological: Survey Professional Paper, 500-B, 10 p. 1962.

CHOW, V.T. **Open Channel Hydraulics**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1959. 680p.

COELHO, M. DE S.; GAN, M. A.; CONFORTE, J. C. Estudo da variabilidade da posição e da nebulosidade associada à ZCIT do Atlântico, durante a estação chuvosa de 1998 e 1999 no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.1, 23-34, 2004.

COELHO NETTO, A. L.; AVELAR, A. S. Uso do solo e a dinâmica hidrológica. In: **Vulnerabilidade Ambiental – Desastres naturais ou fenômenos induzidos?** SANTOS, R. F. (org). Brasília: MMA/ Secretária de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano, 2007.

CRIBARI-NETO, F. **Método de previsão de arrecadação tributária**. MIMEO, 2000.

CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. (org.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

DEFESA CIVIL DO ESTADO DE TOCANTINS. **Enchente e inundação**. Disponível em: <<http://defesacivil.to.gov.br/enchente/>>. Acesso em Setembro de 2011.

DEFESA CIVIL DO ESTADO DO PARÁ. **Enchente Marabá**. Disponível em: <www.bombeiros.pa.gov.br/cedec/>. Acesso em Setembro de 2011.

DELURGIO, S. A. **Forecasting principles and applications**. 1st Ed. Singapore: McGraw-Hill, [1998]. 802p.

DE SOUZA, E.B.; ALVES, J.M.B.; NOBRE, P. Anomalias de precipitação nos setores norte e leste do Nordeste Brasileiro em associação aos eventos do Padrão de Dipolo observados sobre o Atlântico Tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia - RBMET**, v. 13, n. 2, p. 45-56. 1998.

EM-DAT EMERGENCY DATABASE. OFDA/CRED. **The Office of US foreign disaster assistance** – Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. Disponível em: <[http://www.emdat.be/ Database](http://www.emdat.be/Database)>. Acesso em Março de 2012.

ESPINOZA, E.S.: **Distúrbios nos ventos de leste no Atlântico Tropical**. 1996. 123f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional Pesquisas Espaciais, SP, São José dos Campos, 1996.

FAUSTINO, J. **Planificación y gestión de manejo de cuencas**. Turrialba: CATIE, 1996. 90p.

FARIA, E.L.; ALBUQUERQUE, M.P.; ALFONSO, J.L.G.;ALBUQUERQUE, M.P.; CAVALCANTI, J.T.P. Previsão de séries temporais utilizando modelos estatísticos. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. **Nota Técnica**, n. 03, 16p. 2008. Disponível em: http://cbpf.index.cbpf.br/publication_pdfs/nt00308.2009_01_16_13_12_34.pdf .Acessado em janeiro 2011.

FERNANDES, M.R. e SILVA, J. C. **Programa estadual de manejo de sub-bacias hidrográficas**: fundamentos e estratégias. Belo Horizonte: EMATERMG, 1994. 24p.

FERREIRA, A. B. de H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. 2. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986. 1838 p.

FERREIRA, D. B. DA S. **Eventos extremos na zona de convergência intertropical sobre o Atlântico durante o período chuvoso da Amazônia Oriental**. 2008. 65f. Dissertação (mestrado em ciências ambientais). Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi, Embrapa, Centro de Geociências, Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2008.

FISCH, G., MARENGO, J. A., NOBRE, C. A. Clima da Amazônia. **Rev. Climanálise Especial**.Edição Comemorativa de 10 anos, p.24-41. 1996.

FONTANA, D. C., BERLATO, M. A. Relação entre El Niño Oscilação Sul (ENOS), precipitação e rendimento de milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesq. Agrop. Gaúcha**, n.2, p.39 - 36.1996.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A.; TOLEDO, G. S. **Estatística aplicada**. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 1985. 459 p.

FRANÇA, G.V. de. **Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba**. 1968. 151p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Secretária de Recursos Hídricos, MMA, Brasília, 1998.

GARCEZ, L. N. **Elementos de engenharia hidráulica e sanitária**. 2ª ed. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda., 1974. 205p.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A.**Hidrologia**. 2º ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002. 291p.

GENZ, F. **Parâmetros para previsão e controle de cheias urbanas**. 1994. 162f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

GOMES, F. R. R. **Cartografia linguística e educação na Amazônia**: um estudo semântico-lexical da fala na/da Microrregião Marabá/Pará. 2007. 287f. Dissertação (mestrado em educação). Universidade Federal do Pará, Centro de Ciências Sociais e Educação, Pós-Graduação em Educação Belém, 2007.

GRANGER, C.W.J.; NEWBOLD, P. **Forecasting economic times series**. New York: Academic Press, 1986.

GRIMM, A. M.; ZARATINI, P.; MARENGO, J. A. Sinais de El Niño na precipitação da Amazônia. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 1998, Brasília-DF. **Anais**. São José dos Campos: INPE, Out. 1998.[CD ROM] 5p. Disponível em: <http://mtc-m15.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004/06.14.13.58/doc/Grimm_Sinais%20de%20El%20Nino.pdf> Acesso em Março de 2011.

GU, D.; PHILANDER, S.G.H. Secular Changes of Annual and Interannual Variability in the Tropics during the Past Century. **Journal of Climate**, 8, 4: 864-876, April. 1995.

HANNA, E. J.; QUINN, B. G. The determination of the order of an autoregression. **Journal of the Royal Statistical Society**, B41, p. 190-195. 1979.

HASTENRATH, S., GREISCHAR, L. Circulation mechanisms related to Northeast Brazil rainfall anomalies. **J. Geophys. Res.**, v.98, n.d3, p. 5093-102. 1993.

HASTENRATH, S. **Climate Dynamics of tropics**. Kluwer, Dordrecht. 488p. 1991.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basin: Hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol. Soc America Bulletin**, v.3, n.56, 1945.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA (IBGE). **Geografia do Brasil**. Vol. 1: região norte. Rio de Janeiro: SERGRAF-IBGE, 1977. Cap. 1, 466 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo 2010**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/censo2010/primeiros_dados_divulgados/index.php?uf=15>. Acesso em 20 de janeiro 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos**. (2007). Disponível em: <<http://www.inpe.br/crs/geodesastres/conteudo/publicacoes/conceitosbasicos.pdf>>. Acessado em: março 2011.

LUCAS, E. W. M. S. **Aplicação de modelos hidrológicos determinístico e estocástico mensais na bacia hidrográfica do Xingu – Pará**. 2007. 112f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

LUTKEPOHL, H. **New Introduction to Multiple Time Series Analysis**, Berlin: Springer, p.764, 2005.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLER, G. S. F.; RUDORFF, F.M. 2006. **Prevenção de Desastres Naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Ed. Organic Trading. 109p. Disponível em:<<http://www.labhidro.ufsc.br/publicacoes.htm>>. Acesso março de 2010.

KODAMA, Y. M.: **Large-Scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal, the SPCZ, and the SACZ)** Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones. J.Met.Soc.of Japan, 70(4), 813-836, 1992.

KODAMA, Y. M.: **Large-Scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal, the SPCZ, and the SACZ)** Part II: Conditions of the Circulations for Generating the STCZs. J. Met.Soc. Of Japan, 71(5),581-610, 1993.

MAIDMENT, D.R. **Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill, Estados Unidos, 1993.

MAKRIDAKIS, S; WHEELWRIGHT, S.C.; HYNDMAN, R. J. **Forecasting: methods and applications**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.

MARCELINO, E. V. 2008. **Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos**. Caderno Didático nº 1. INPE/CRS, Santa Maria, 2008. 20p.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP-NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. **Journal of Climate**. v. 17, p. 2261-2280, 2004.

MARENGO, J.A.; TOMASELLA, J.; UVO, C. Trends in Streamflow and Rainfall in Tropical South America: Amazon, Eastern Brazil, and Northwestern Peru. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 1775-1783, 1998.

MARTINS, F.B. et al. **Zoneamento Ambiental da sub – bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria (RS)**. Estudo de caso. Cerne, Lavras, v.11, n.3, p.315-322, jul./set. 2005.

MARTON, E. **Oscilações Intrazonais Associadas à Zona de Convergência do Atlântico Sul no Sudeste Brasileiro**. 2000. 203f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo-USP, Instituto Astronômico e Geofísico-IAG, São Paulo, 2000.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p.

MINISTÉRIO DO INTERIOR (MI). Organização dos Estados Americanos (OEA). **Projeto de Desenvolvimento Integrado da Bacia Araguaia-Tocantins** -PRODIAT, 1985.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Secretaria de Recursos Hídricos. Programa de Estruturação Institucional para a Consolidação da Política Nacional de Recursos Hídricos - Bra/Oea/01/002 – **Caderno Regional da Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia**. Brasília – DF, 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPRH). Agência Nacional de Águas (ANA). **Plano Nacional de Recursos Hídricos** - Caderno Regional da Região Hidrográfica Paraguai. Brasília: MMA, 2006a.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPRH). Agência Nacional de Águas (ANA). **Plano Nacional de Recursos Hídricos - Caderno Regional da Região Hidrográfica Tocantins-Araguaia**. Brasília: MMA, 2006b.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPRH). Agência Nacional de Águas (ANA). **Plano Nacional de Recursos Hídricos**: Documento Base de Referência – Minuta. Brasília-DF, 2003b.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. Agência Nacional de Águas (ANA). **A Região hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia**. Brasília – DF, 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPRH). Agência Nacional de Águas (ANA). **A Região hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia**. Disponível em <www.hidroweb.ana.gov.br>. Acesso em Janeiro de 2012.

MONTROY, D. L. Linear relation of Central and Eastern North American Precipitation to tropical Pacific sea surface temperature anomalies. **Journal of Climate**. v 10, p. 541-558, 1997.

MORAES, J. M. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.1, p.61-70, 2003.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. **Análise de Séries Temporais**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Previsão de Séries Temporais**. São Paulo: Editora Atual, 1987.

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation mode. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 38, n. 12 p.2653-2675. Dez. 1981.

NOBRE, C.A. Ainda sobre a Zona de Convergência do Atlântico Sul: A importância do Oceano Atlântico. **Climanálise**. v. 3, n.4, p. 30-33, 1988.

NOBRE, P. **On the genesis of anomalous SST and rainfall patterns over the tropical Atlantic Basin**. 1993. 151f. Doutorado (Meteorologia) - University of Maryland at College Park, Maryland, 1993.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of Sea Surface Temperature, Wind Stress, and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**. v. 9, p. 2464-2479. 1996.

NOGUÉS-PEAGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. **Monthly Weather Review**, v. 125, p. 279-291, 1997.

NUNES, R. T. S. **Métodos para inserção de técnicas em gestão de águas pluviais No processo de planejamento e desenho urbano: estudos de caso Em guarantã do norte, na região amazônica brasileira, e na região Metropolitana de Melbourne, Austrália.** 2011. 211f. Tese (doutorado em planejamento energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPE/COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

PASSOS, J. J.; RAMOS, E. M. L. S.; ALMEIDA, S. dos S. de. Utilização de Modelos ARIMA para Previsão da Arrecadação de ICMS do Estado do Pará. In: 37^a REUNIÃO REGIONAL DA ABE. Belém-PA. 9p. 2004. Disponível em: <<http://www.ufpa.br/abe/programacao/resumos/com-jairopasso2.pdf>> Acesso em Março de 2011.

PHILANDER, S. G. H. **El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation.** Academic Press, INC. San Diego, California, 293pp. 1990.

PINKAYAN, S. **Conditional probabilities of occurrence of wet and dry years over a large continental area.** Fort Collins: Colorado State University – Hydrology Papers, 1966.v. 12, 54 p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MARABÁ-PA. **Galeria de imagens.** Disponível em <<http://www.maraba.pa.gov.br/galeria.htm>>. Acesso março de 2011.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA OS ASSENTAMENTOS HUMANOS (PNUAH); PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA); MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Relatório de Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental-Marabá.** Projeto GEO Cidades. 2006.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA OS ASSENTAMENTOS HUMANOS (PNUAH); PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA); MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Relatório de Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental-Marabá.** Projeto GEO Cidades. 2010.

PORTO, R.; ZAHED F. K.; TUCCI, C.E.M. Drenagem urbana. In: **HIDROLOGIA, ciência e aplicação.** Rio Grande do Sul: Editora da UFRGS; ABRH, 1993.

QUADRO, M. F. L. **Estudo de episódios de zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul.** 1994. 123f. Dissertação (mestrado em meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Pós-Graduação em Meteorologia, São Paulo, 1994.

QUEIROGA, Y. G. de A. **Estudo e modelagem dos erros de simulação hidrológica e sua assimilação na previsão de vazões de curto prazo – o caso da Bacia do Rio Grande na UHE Camargos.** 2003. 380f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. 2003.

QUINN, B. G. Order determination for a multivariate autoregression. **Journal of the Royal Statistical Society**, B42, p. 182-185. 1980.

RAMIREZ, M.C.V.; KAYANO, M.T.; FERREIRA, N.J. Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinity of northeast Brazil during the 1980-1989 **Atmosfera**, n.12, p. 75-88. 1999.

RAO, V. B.; LIMA, M. C.; FRANCHITO, S. H. Seasonal and interannual variations of rainfall over eastern Northeast Brazil. **J. Clim.**, v.6, p. 1754-63. 1993.

RASMUSSEN, E.M; ARKIN, P.A. Variabilidade climática interanual associada ao El Niño Oscilação / Southern **Amsterdam: Elsevier Science Publishers BV**, capítulo 40, p. 697-725, 1985.

ROCHA, E. J. P. **Balanço de Umidade e Influências de Condições de Contorno Superficiais Sobre a Precipitação da Amazônia**. 2001. 210f. Tese (doutorado em meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, Pós-Graduação em Meteorologia, São Paulo, 2001.

RODDA, J.C.; RODDA, H.J.E. **Hydrological forecasting: dealing with natural disasters**. The Royal Society, London, 2000. p. 75-99. Disponível em <www.royalsoc.ac.uk> Acesso em Fevereiro de 2010.

SANTOS, D. M. **Análise e modelagem hidrometeorológica na Bacia do rio Tocantins em Marabá**. 2008. 119f. Dissertação (mestrado em ciências ambientais) - Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi, Embrapa, Centro de Geociências, Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2008.

SANTOS, F. A. A. **Alagamento e Inundação Urbana: modelo experimental de avaliação de risco**. 2010. 119f. Dissertação (mestrado em ciências ambientais) - Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi, Embrapa, Centro de Geociências, Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2010.

SARLAS, T. L. B. **Elaboração de manchas de Inundação para o município de Santa Rita do Sapucaí / MG, utilizando SIG**. 2010. 148f. Dissertação (mestrado em engenharia da energia) - Universidade Federal do Itajubá, Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Itajuba, 2010.

SCHWARZ, G. **Estimating the dimensional of a model**. **Annals of Statistics**, Hayward, v.6, n.2,p.461-464, Mar. 1978.

SERVAIN, J. Simple climatic indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications. **Journal Geophysical Research**, v.96, p.15137-15146, 1991.

SILVA, A.M. **Princípios básicos de hidrologia**. Lavras-MG: UFLA. Departamento de Engenharia, 1995.

SIVAM/IBGE. **Base cartográfica vetorial da Amazônia Legal**. Escala 1:250.000, Rio de Janeiro: CCSIVAM/IBGE, 2004.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e a Bacia Hidrográfica. In TUCCI, C. E. M. (org). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre. 2ª ed. Porto Alegre, RS: Editora da Universidade (UFRS)/Edusp; ABRH, 1997. p. 35-52.

SOUZA, E. B.; AMBRIZZI, T. Modulation of the intraseasonal rainfall over tropical Brazil by the Madden Julian oscillation. **International Journal of Climatology**, v. 26, p. 1759-1776, 2006.

SOUZA, E.B.; KAYANO, M.; TOTA, J.; PEZZI, L.; FISCH, G.; NOBRE, C. On The Influences of the El Niño, LA Niña and Atlantic Dipole Pattern on the Amazonia Rainfall During 1960-1998. **Acta Amazônica**, v.30, n. 2, p. 305 - 318. 2000.

SOUZA E. B.; NOBRE P. Uma revisão sobre o padrão de dipolo no Oceano Atlântico tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 13, n1, p. 31-44. 1998.

SOUZA, E. B. **Um estudo observacional sobre o padrão de dipolo de anomalias de TSM no Oceano Atlântico Tropical**. 1997 138f. Dissertação (mestrado em meteorologia) - Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 1997.

SOUZA, C. R. de G. Flooding in the São Sebastião region, Northern coast of São Paulo state, Brazil. **Anais Academia Brasileira Ciências**, Rio de Janeiro v.70, n. 2, p. 353-366. 1998.

SOUZA, R. C. Modelos estruturais para previsão de séries temporais: abordagens clássica e bayesiana. Rio de Janeiro, IMPA, 1989. 171p

STRAHLER AN. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Trans Am Geophys Union**, n.38, p.913–920. 1957.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA (SUDAM)/ PROJETO DE HIDROLOGIA E CLIMATOLOGIA DA AMAZÔNIA (PHCA). **Atlas Climatológico da Amazônia Brasileira**. Belém, 1984. (Publicação, 39).

TEIXEIRA, W. et al. org. **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 568p.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização Morfométricas para o entendimento da Dinâmica Ambiental local. **Revista Uniara**, n.20, 11p. 2007 apud LIMA, W.P. **Princípios de manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ. USP, 1976.

TRENBERTH, K.E.: The definition of El Niño. **Bull. Amer. Meteorologia Sociedade**, v. 78, n.12, p. 2771-2777. 1997.

TOBIN G. A.; MONTZ B. E. **Natural hazards: explanation and integration**. 1º ed. New York-NY: The Guilford Press, 1997. 388p.

TONELLO, K.C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas**. 2005. 69p. Tese (doutorado em ciências florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do (Orgs.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 197p. Disponível em: <<http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/DesastresNaturais.pdf>>. Acesso Março de 2010.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3 ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, 2002. 944p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, 1998. 669p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, 2005. 669 p.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. ABRH. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Rio Grande do Sul, v. 2, n. 7, p. 135-152, Jan./Jun. 1997.

TUCCI, C. E. M.; COLLISCHON, W. Previsão de vazão em curto prazo com base na precipitação: modelos conceituais. In: WORKSHOP – PREVISÃO DE VAZÃO, 1., 2007, Rio de Janeiro. **Anais** Rio de Janeiro: 2007. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/previsao_vazoes/artigos_sessao/AT_Sess%C3%A3o06.pdf>. Acesso em Novembro de 2011.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). **Reducing disaster risk: a challenge for development**. –. New York, USA: UNDP, 2004. Disponível em: <<http://www.undp.org/bcpr>>. Acesso em: Janeiro 2011.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION UN-ISDR Living with Risk. **A Global review of disaster reduction initiatives**. United Nations. Geneva, Suíça. 2002. Disponível em: <http://www.unisdr.org/eng/about_isdr/bd-lwr-2004-eng.htm> Acesso em: Janeiro de 2012.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UN-ISDR). **Terminology on disaster risk reduction**. 2009. Disponível em: <<http://www.unisdr.org>>. Acesso em agosto de 2011.

UVO, C. R. B. **A zona de convergência intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro**. 1989. 99f. Dissertação (mestrado em meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Pós-Graduação em meteorologia, São José dos Campos, 1989.

UVO, C. R. B.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E; KUSHNIR, Y. The Relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil monthly precipitation Accepted to **Journal Climate**, v.11, n.4, p.551-562.1998.

VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e climatologia**. Versão Digital 2. Recife: 2006. 449p. Disponível em: <http://www.agritempo.gov.br>. Acesso janeiro de 2010.

VASCONCELOS, M. A. S.; ALVES, D. C. O. **Manual de econometria**: nível intermediário. São Paulo: Atlas, 2000, 380p.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245p. 1975.

VELHAS, E. A bacia hidrográfica do Rio Leça - Estudo hidroclimatológico. **Revista da Faculdade de Letras – Geografia**, I série, v. 7, p. 139-251. 1991.

WAGNER, R. G. Decadal-scale trends in mechanisms controlling meridional sea surface temperature gradients in the tropical Atlantic. **Journal Geophysical Research**, v.10, n. C7, 1996.

WALKER, G. T.; BLISS E. W., World weather V. **Royal Meteorological Society** v.4, n.36, p.53-84, 1932.

WALKER, G. T.; BLISS, E. W. World weather VI. **Royal Meteorological Society**, v.4, n.39, p.119-139, 1937.

WEI, W. S. **Time series analysis**: univariate and mutivariate methods. Second edition, 2^a ed. 634 p. 1990.

WHEELWRIGHT, S.; MAKRIDAKIS, S. **Forecasting methods for management**. New York: J. Wiley, 1998. 392p.

WOOD, E. F; O'CONNELL, E. Real-time forecasting. In: ANDERSON, M. G; BURT, T. P. **Hydrological forecasting**, 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1985.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S. Caracterização de períodos secos ou excessivamente chuvosos no estado do Ceará através da técnica dos Quantis: 1964-1998. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.14, p. 63-78. 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.

ANEXOS

ANEXO A

Classificação dos Modelos Hidrológicos

CRITÉRIO	CLASSIFICAÇÃO	SUBCLASSE	CARACTERÍSTICA
Descrição dos Processos	<i>Determinístico</i>	Empírico	Não leva em conta a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo, utilizando observações e que não estão relacionadas com os fenômenos físicos.
		Conceitual (Semi-conceituais e Físicos)	Semi-Conceitual: não leva em conta a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo, procurando descrever todos os processos que envolvem um determinado fenômeno físico, mantendo um razoável empirismo.
			Físico: Também não levam em conta as chances de ocorrência, utilizando as principais equações diferenciais do sistema físico.
	<i>Não Determinístico</i>	Probabilístico	Considera a chance de ocorrência das variáveis e introduz o conceito de probabilidade em sua formulação, tendo a variável interveniente um comportamento puramente aleatório.
		Estocástico	Considera a chance de ocorrência das variáveis e introduz o conceito de probabilidade em sua formulação, mas além da componente aleatória tem outra que permite contemplar a sequência temporal ou sequência espacial dos valores da variável.
Variabilidade Espacial	Concentrado	Não leva em conta a variabilidade espacial, ou seja, quando os seus parâmetros e variáveis variam somente em função do tempo.	
	Distribuído	Quando as variáveis e parâmetros do modelo variam também segundo o espaço.	
Variabilidade Temporal	Contínuo	Quando os fenômenos são contínuos no tempo. Mesmo que um sistema se modifique continuamente, a simulação no modelo é feita em intervalos de tempos.	
	Discreto	Quando os fenômenos são representados em intervalos de tempo discreto.	
Dependência Temporal	Estático	Quando, para um conjunto de dados de entrada produz-se um resultado oriundo da solução das equações do modelo em um único passo.	
	Dinâmico	Quando utiliza o resultado de uma iteração como entrada para uma próxima iteração.	
Técnicas de Solução	Numérico	Problemas gerais, independentemente da complexidade geométrica, dos parâmetros físicos e das relações constitutivas.	
	Analítico	Problemas de geometria simples, parâmetros homogêneos e relações lineares.	

ANEXO B

Resultados dos correlogramas das FAC e FACP da série Marabá

MARABÁ				
Lag	FAC	FACP	Estat. Q	p-valor
1	0,9978 ***	0,9978 ***	366,3880	[0,000]
3	0,9909 ***	-0,1348 ***	1094,8938	[0,000]
4	0,9872 ***	0,0806	1456,5530	[0,000]
5	0,9830 ***	-0,1287 ***	1816,1137	[0,000]
6	0,9782 ***	-0,1054 ***	2173,1831	[0,000]
7	0,9731 ***	-0,0109	2527,4857	[0,000]
8	0,9676 ***	-0,0552	2878,7656	[0,000]
9	0,9616 ***	-0,0718	3226,7273	[0,000]
10	0,9553 ***	-0,0308	3571,1052	[0,000]
11	0,9486 ***	-0,0579	3911,5915	[0,000]
12	0,9416 ***	-0,0191	4248,0058	[0,000]
13	0,9342 ***	-0,0226	4580,1513	[0,000]
14	0,9265 ***	-0,0627	4907,7604	[0,000]
15	0,9184 ***	-0,0463	5230,5519	[0,000]
16	0,9099 ***	-0,0121	5548,3337	[0,000]
17	0,9013 ***	-0,0041	5861,0049	[0,000]
18	0,8924 ***	-0,0165	6168,4534	[0,000]
19	0,8832 ***	-0,0506	6470,4507	[0,000]
20	0,8736 ***	-0,0474	6766,7482	[0,000]
21	0,8635 ***	-0,0437	7057,1061	[0,000]
22	0,8531 ***	-0,0442*	7341,3206	[0,000]
23	0,8423 ***	-0,0427	7619,1892	[0,000]
24	0,8312 ***	0,0154	7890,5743	[0,000]
* Grau de significância				

ANEXO C

Resultados da FCC da série Marabá, com Carolina e Conceição do Araguaia.

Marabá VS Carolina				Marabá VS Carolina			
Lag	XFC	Lag	XFC	La	XFC	Lag	XFC
0	0,7808 ***			0	0,9787 ***		
1	0,7851 ***	-1	0,7694 ***	1	0,9766 ***	-1	0,9755 ***
2	0,7887 ***	-2	0,7578 ***	2	0,9739 ***	-2	0,9717 ***
3	0,7911 ***	-3	0,7457 ***	3	0,9706 ***	-3	0,9674 ***
4	0,7914 ***	-4	0,7340 ***	4	0,9672 ***	-4	0,9628 ***
5	0,7893 ***	-5	0,7225 ***	5	0,9633 ***	-5	0,9577 ***
6	0,7859 ***	-6	0,7112 ***	6	0,9589 ***	-6	0,9521 ***
7	0,7819 ***	-7	0,7002 ***	7	0,9541 ***	-7	0,9461 ***
8	0,7778 ***	-8	0,6892 ***	8	0,9490 ***	-8	0,9395 ***
9	0,7736 ***	-9	0,6782 ***	9	0,9436 ***	-9	0,9323 ***
10	0,7693 ***	-10	0,6661 ***	10	0,9379 ***	-10	0,9243 ***
11	0,7647 ***	-11	0,6543 ***	11	0,9318 ***	-11	0,9159 ***
12	0,7599 ***	-12	0,6425 ***	12	0,9253 ***	-12	0,9071 ***
13	0,7549 ***	-13	0,6306 ***	13	0,9186 ***	-13	0,8980 ***
14	0,7497 ***	-14	0,6191 ***	14	0,9115 ***	-14	0,8884 ***
15	0,7440 ***	-15	0,6075 ***	15	0,9041 ***	-15	0,8784 ***
16	0,7381 ***	-16	0,5957 ***	16	0,8964 ***	-16	0,8680 ***
17	0,7320 ***	-17	0,5835 ***	17	0,8886 ***	-17	0,8573 ***
18	0,7260 ***	-18	0,5710 ***	18	0,8804 ***	-18	0,8462 ***
19	0,7200 ***	-19	0,5584 ***	19	0,8720 ***	-19	0,8348 ***
20	0,7140 ***	-20	0,5456 ***	20	0,8634 ***	-20	0,8230 ***
21	0,7081 ***	-21	0,5327 ***	21	0,8544 ***	-21	0,8110 ***
22	0,7021 ***	-22	0,5190 ***	22	0,8453 ***	-22	0,7984 ***
23	0,6964 ***	-23	0,5044 ***	23	0,8358 ***	-23	0,7856 ***
24	0,6904 ***	-24	0,4895 ***	24	0,8262 ***	-24	0,7724 ***

* Grau de significância

ANEXO D

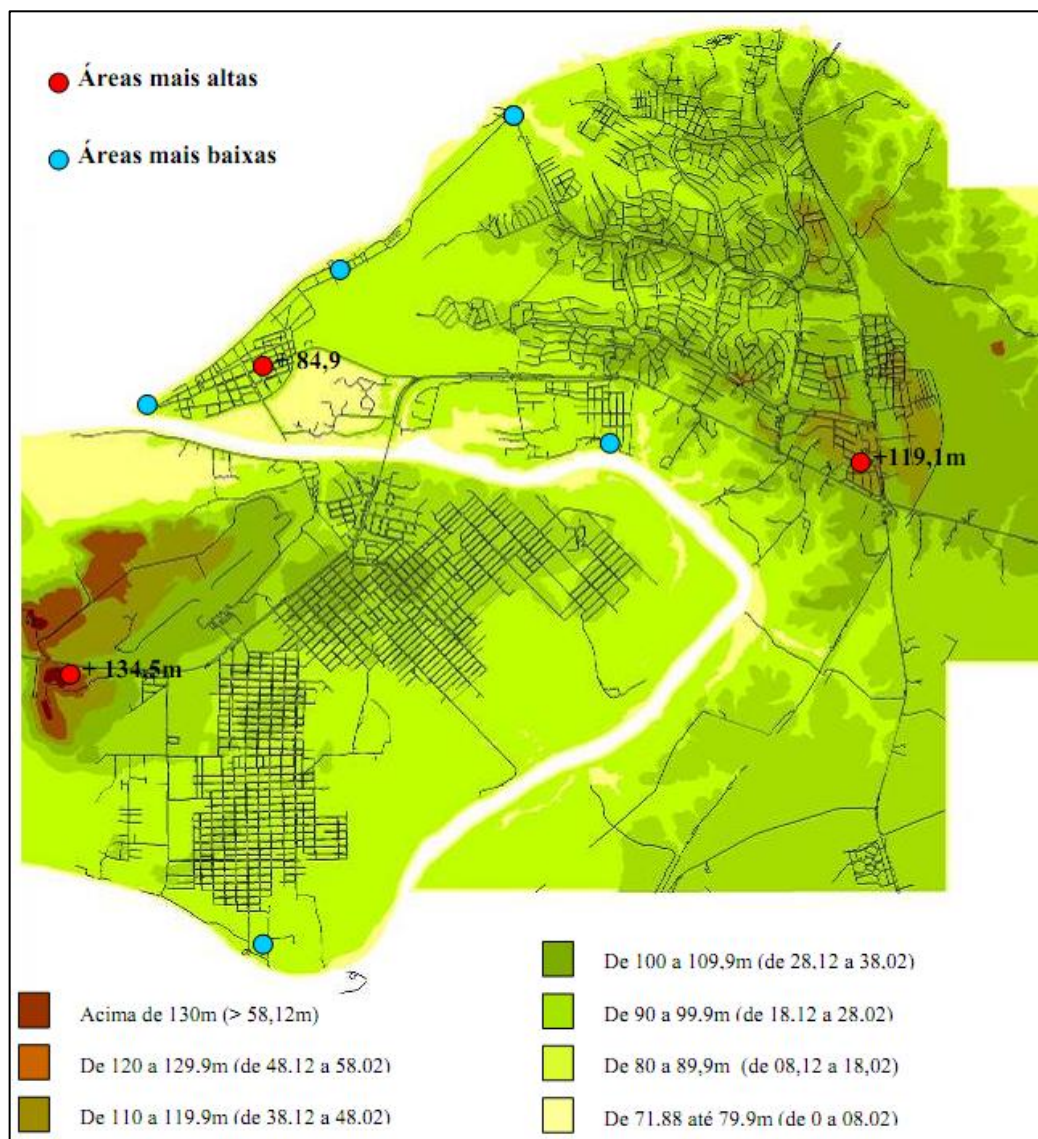
Níveis Máximos atingidos pelas cheias no rio Tocantins, em Marabá (1972 a 2011).

ANO	Nível(M)	ANO	Nível(M)
1972	9,52	1992	13,52
1973	10,51	1993	10,34
1974	13,51	1994	12,13
1975	11,42	1995	11,41
1976	8,99	1996	8,00
1977	12,43	1997	12,37
1978	14,47	1998	7,02
1979	14,45	1999	9,41
1980	17,42	2000	12,59
1981	12,40	2001	10,56
1982	13,12	2002	12,54
1983	12,44	2003	11,32
1984	10,32	2004	13,71
1985	13,14	2005	12,32
1986	12,59	2006	12,42
1987	10,54	2007	12,00
1988	11,58	2008	11,60
1989	13,45	2009	12,70
1990	14,40	2010	12,00
1991	12,19	2011	12,80

Fonte: MMA; SPRH; ANA (2012)

ANEXO E

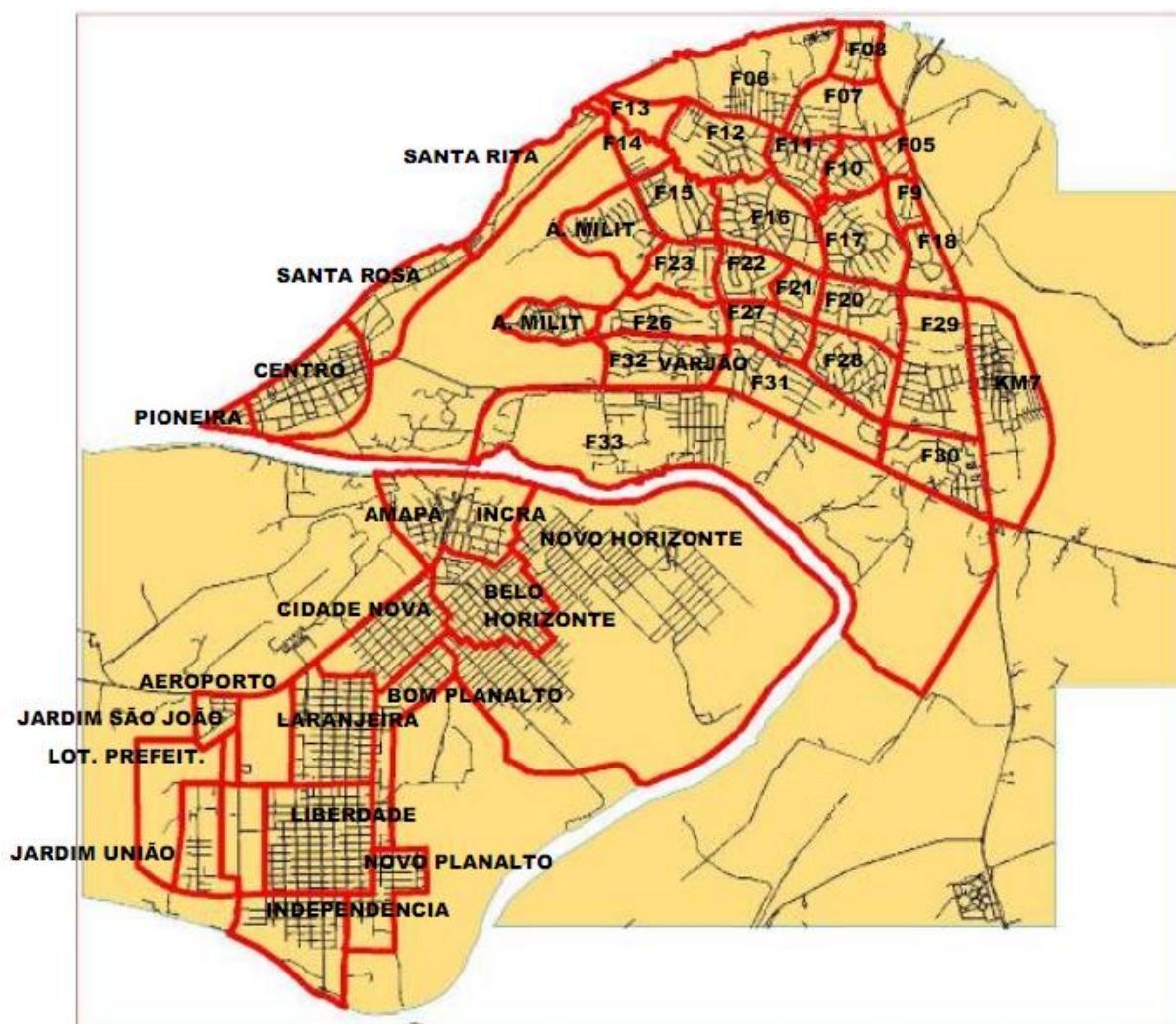
Topografia da cidade de Marabá.



Fonte: MMA; SPRH; ANA (2006).

ANEXO F

Delimitação dos bairros e folhas, segundo a PMM.



Fonte: MMA; SPRH; ANA (2006).