



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

DANIEL MENINÉA SANTOS

**ANÁLISE E MODELAGEM HIDROMETEOROLÓGICA NA
BACIA DO RIO TOCANTINS EM MARABÁ - PA**

**BELÉM-PA
2008**

DANIEL MENINÉA SANTOS

**ANÁLISE E MODELAGEM HIDROMETEOROLÓGICA NA
BACIA DO RIO TOCANTINS EM MARABÁ - PA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi, Embrapa Amazônia Oriental, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Física do Clima.

Orientador: Prof. Dr. Edson José Paulino da Rocha.

Co-Orientador: Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza

**BELÉM
2008**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

Santos, Daniel Meninea

S237a Análise e modelagem hidrometeorológica na bacia do rio
Tocantins em Marabá - Pa. / Daniel Meninea Santos. - 2008
118 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de
Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

Orientador, Edson José Paulino da Rocha

Co-orientador, Everaldo Barreiro de Souza

1. Modelagem hidrológica. 2. Dinâmica da atmosfera. 3.
Enchente. 4. Marabá (PA). I. Universidade Federal do Pará II.
Rocha, Edson José Paulino da, Orient. III. Souza, Everaldo Barreiro
de, Co-orientador. IV. Título.

CDD 20º ed. 551.48098115:

DANIEL MENINÉA SANTOS

**ANÁLISE E MODELAGEM HIDROMETEOROLÓGICA NA
BACIA DO RIO TOCANTINS EM MARABÁ - PA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará; Museu Paraense Emílio Goeldi, Embrapa Amazônia Oriental, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Data da aprovação:

Conceito:

Banca Examinadora:

Prof. Edson José Paulino da Rocha - Orientador
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará

Prof. Renato Ramos da Silva - Membro
Doutor em Ciências Ambientais
Universidade Federal do Pará

Prof. João Batista Miranda Ribeiro - Membro
Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental
Universidade Federal do Pará

Prof. Eliene Lopes de Souza - Membro
Doutora em Geologia e Geoquímica
Universidade Federal do Pará

Para ***Maria Isabel Meninéa Santos,***
Sarah Lorena de Lima Pinheiro Santos e
Odivaldo da Silva Santos

Razões desse feito.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela sua fidelidade em suas promessas para comigo e por ser meu maior guia durante esse longo caminho;

À minha mãe Maria Isabel pelas suas incansáveis orações;

À minha esposa Sarah Lorena pela compreensão e incentivo na minha busca por um futuro melhor.

Ao meu pai Odivaldo Santos, a todos os meus irmãos, sobrinhos e cunhado;

Ao professor e amigo Edson José Paulino da Rocha, por partilhar seu conhecimento, ter confiança na minha pequena capacidade científica, pela paciência em orientar-me e pelo grande incentivo a prosseguir na pesquisa científica. Valeu Prof. !!!;

Ao amigo Pedro Rolim pelos valiosos conhecimentos hidrológicos partilhados e apoio nos altos e baixos dessa caminhada. Valeu Rolim !!!;

Ao meu co-orientador Everaldo Barreiros de Souza pelos importantes conhecimentos científicos partilhados;

Aos amigos Márcio Nirlando e Douglas Ferreira que sempre me apoiaram desde o início de minha vida acadêmica;

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e todos os professores que dividiram seus conhecimentos comigo, contribuindo grandemente para a minha formação;

Ao Sistema de Proteção da Amazônia (CTO BE) que me acolheu por todo o período de pesquisa do mestrado, em especial aos amigos Juliana de Paula e Tarcísio Schnaider pela grande ajuda na confecção dos Mapas e discussões hidrológicas.

À Rosa Helena Jacob pelo exemplo de perseverança e incentivo profissional. Valeu Rosa!!!;

À Agência de Desenvolvimento da Amazônia (ADA) pela bolsa concedida através do Projeto “Monitoramento e Modelagem do Rio Tocantins” no período de março de 2006 a janeiro de 2007;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq - Brasil pela bolsa concedida no período de julho de 2007 a fevereiro de 2008;

E a todos que contribuíram direta e indiretamente na realização deste Projeto.

RESUMO

Esta pesquisa objetivou desenvolver um modelo estatístico de previsão de vazão para Marabá-PA, bem como avaliar a estrutura dinâmica atmosférica associada aos extremos do regime hidrológico da bacia do rio Tocantins. O modelo hidrológico de regressão linear múltipla utilizou as séries de observações fluviométricas e pluviométricas obtidas no banco de dados da ANA. Os testes de validação do modelo estatístico com coeficiente de Nash acima de 0,9 e erro padrão de 1,5 % e 5% nos períodos de cheia e estiagem, respectivamente, permitem que as previsões de vazão em Marabá possam ser geradas com antecedência de 2 a 4 (3 a 5) dias para o período da cheia (estiagem). Através da técnica de composições considerando todos os anos com registro de vazão acima/muito acima e abaixo/muito abaixo do normal, obtidos pela metodologia dos percentis, investigaram-se as características regionais da precipitação e a estrutura dinâmica atmosférica em cada mês (Novembro a Abril). As composições dos anos com vazão acima/muito acima mostraram que a precipitação sobre a bacia foi acima do normal em todos os meses, sendo que os padrões de grande escala indicaram a configuração associada ao fenômeno La Niña no Pacífico e condições de resfriamento no Atlântico Sul; intensificação tanto do ramo ascendente zonal da célula de Walker como do ramo ascendente meridional da célula de Hadley; intensificação da Alta da Bolívia posicionada mais a leste e anomalias negativas de ROL associadas à atuação conjunta da ZCAS e ZCIT. Inversamente, as composições dos anos com vazão abaixo/muito abaixo evidenciaram a predominância de precipitação abaixo do normal em toda bacia hidrográfica, a qual se associou com as condições de aquecimento (El Niño) sobre o Pacífico, Atlântico sul aquecido, célula de Walker e Hadley com enfraquecimento dos movimentos ascendentes, posicionamento da Alta da Bolívia mais a oeste com anomalias positivas de ROL indicando inibição da atividade convectiva tropical. Adicionalmente, uma análise quantitativa dos impactos sócio-econômicos sobre os principais núcleos da cidade de Marabá revelou que aproximadamente 10 mil pessoas (5% da população) são atingidas pela cheia do rio Tocantins com custos nas operações de enchente acima de R\$ 500.000,00, considerando o caso de 2005.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Dinâmica da atmosfera. Enchente. Marabá-PA.

ABSTRACT

The objectives of the present work is to develop a statistical model to predict discharge or flow in Marabá-PA, as well assess the atmospheric dynamic structure associated with the extreme hydrological regime observed in the Tocantins river basin. The hydrological model based on multiple linear regressions uses time series derived from fluviometric and pluviometric stations which are obtained from ANA database. Validation tests of the statistical model with Nash coefficient above 0.9 and standard error of 1.5% and 5% during flood and drought periods, respectively, allow generating predictions of discharge with antecedence of 2 to 4 days (3 to 5 days) for the flood (drought) period. Through composites technique considering all years with record of above/very above discharge and below/very below discharge in Marabá, obtained from percentiles method, it was investigated the precipitation characteristics in basin scale and the dynamic aspects observed in each month (November to April). The composites of years with above/very above discharge showed that the rainfall on the basin was above normal in all months, and the large-scale patterns indicated a configuration associated with La Niña phenomenon over Pacific and cooling conditions over South Atlantic; intensification of both zonal/meridional ascending branch of the Walker/Hadley cell; intensification of the Bolivian High anomalously placed eastward and negative ROL anomalies associated with the joint occurrence of ZCAS and ZCIT. Conversely, the composites of years with below/very below discharge showed a predominance of precipitation below normal throughout basin, which was associated with the conditions of warming (El Niño) over Pacific, and also warm TSM anomalous over South Atlantic, cell of Walker and Hadley with weak upward movement, the positioning of the High Bolivia westward with positive ROL anomalies indicating inhibition of tropical convective activity. Additionally, a quantitative analysis of the socio-economic impacts in the main centers of Marabá revealed that approximately 10 thousand (5% of the population) people are affected by Tocantins river floods with costs in the flooding operations above R\$ 500.000,00, considering the 2005 case.

Key-words: Hydrological modelling. Dynamics of the atmosphere. Floods. Marabá-PA

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Limites da Bacia Hidrográfica, os estados componentes e principais cidades. (Fonte: ANA, 2006)	22
Figura 2. Sub-Bacia Marabá, Conceição do Araguaia e Carolina.....	23
Figura 3. Fotografia de uma área representativa de relevo mais dissecado encontrado nas Chapadas e Planos do Rio Farinha	26
Figura 4. (a): fotografia de uma área de pastagem, próximo ao município de Conceição do Araguaia; (b): Fotografia de uma floresta Ombrófila aberta; (c): Fotografia de uma vegetação secundária com palmeiras; (d): Fotografia de vegetação de cerrado.....	27
Figura 5. Cidade de Marabá. (Fonte: Google Maps).....	29
Figura 6. Localização das estações pluviométricas e fluviométricas	31
Figura 7. Hidrograma simulado/observado no período de previsão contínua – Machadinho. (Fonte: Andreolli, 2003)	35
Figura 8. Hidrograma simulado/observado no período de previsão contínua – Passo Caru. (Fonte: Andreolli, 2003)	36
Figura 9. Hidrograma de vazão diária calculada e observada do rio Miranda em Miranda, de dezembro de 1995 a agosto de 1998. (Fonte: Allasia et al., 2004).....	36
Figura 10. Resultados da validação para o período de maio de 2000 a março de 2001. (Fonte: Guilhon, 2002).....	37
Figura 11. Hidrograma observado/previsto para o período de outubro de 1996 a outubro de 1997 na bacia do rio Doce. (Fonte: Castilho e Oliveira, 2001).....	37
Figura 12. Esboço de deslocamento em canal aberto de um ponto à outro	48
Figura 13. Discretização espacial da sub-bacia estudada	41

Figura 14. Vazão máxima mensal e limites da categoria normal do rio Tocantins em Marabá. (Série: 1978-2006).....	48
Figura 15. Vazão máxima em m ³ /s da categoria normal do rio Tocantins em Marabá.....	49
Figura 16. Precipitação média para os limites superior (cli max) e inferior (cli min) da categoria normal para os meses selecionados	51
Figura 17. Média mensal de ROL em W/m ²	53
Figura 18. Movimento vertical (Omega) em hPa.s-1, corte meridional em 48w. Destaque para o trecho sobre a bacia.....	54
Figura 19. Linhas de corrente em 200 hPa.....	54
Figura 20. Vento em 850 hPa.....	55
Figura 21. Composição das anomalias de precipitação categorizada sobre a bacia do rio Tocantins para os anos com vazão acima/muito acima do normal. As figuras do painel inferior representam a média dos meses selecionados na tabela 4 (lag 0), enquanto que as do painel superior correspondem aos meses anteriores (lag -1).....	58
Figura 22. Composição das anomalias de precipitação categorizada sobre a bacia do rio Tocantins para os anos com vazão abaixo/muito abaixo do normal. As figuras do painel inferior representam a média dos meses selecionados na tabela 4 (lag 0), enquanto que as do painel superior correspondem aos meses anteriores (lag -1)	60
Figura 23. Composição mensal das anomalias de TSM (°C) para todos os anos com vazão nas categorias acima e muito acima, durante os meses de novembro a abril (lag 0). As regiões cinzas indicam anomalias com significância estatística de 95%.....	62
Figura 24. Composições mensais do movimento vertical, corte zonal associado à célula de Walker, para os anos com vazão na categoria acima e muito acima, durante os meses de Novembro a Abril (lag 0). Os contornos sombreados coloridos indicam as anomalias de omega.....	63
Figura 25. Composições mensais do movimento vertical, corte meridional associado à célula de Hadley ao longo de 48°W, para os anos com vazão na categoria acima e muito acima,	

durante os meses de Novembro a Abril (lag 0). Os contornos sombreados coloridos indicam as anomalias de omega.....	65
Figura 26. Composições do (a) campo mensal do vento em 200 hPa e (b) campo mensal do vento em 850 hPa (vetores preto) e suas respectivas anomalias (vetores vermelho) para os anos com vazão nas categorias acima e muito acima.....	67
Figura 27. Composições mensais das anomalias de ROL durante os meses de dezembro a abril para anos com vazão nas categorias acima e muito acima. Áreas cinza indicam anomalias com significância estatística de 95%.....	68
Figura 28. Composição mensal das anomalias de TSM (°C) para todos os anos com vazão nas categorias abaixo/muito abaixo, durante os meses de novembro a abril (lag 0). As regiões cinzas indicam anomalias com significância estatística de 95%.....	70
Figura 29. Composições mensais do movimento vertical, corte zonal associado à célula de Walker, para os anos com vazão na categoria abaixo/muito abaixo, durante os meses de Novembro a Abril (lag 0). Os contornos sombreados coloridos indicam as anomalias de omega.....	71
Figura 30. Composições mensais do movimento vertical, corte meridional associado à célula de Hadley ao longo de 48°W, para os anos com vazão na categoria abaixo/muito abaixo, durante os meses de Novembro a Abril (lag 0). Os contornos sombreados coloridos indicam as anomalias de omega.....	72
Figura 31. Composições do (a) campo mensal do vento em 200 hPa e (b) campo mensal do vento em 850 hPa (vetores preto) e suas respectivas anomalias (vetores vermelho) para os anos com vazão nas categorias abaixo/muito abaixo	74
Figura 32. Composições mensais das anomalias de ROL durante os meses de dezembro a abril para anos com vazão nas categorias abaixo/muito abaixo. Áreas cinza indicam anomalias com significância estatística de 95%.....	75
Figura 33. Polígono de Thiessen para as sub-bacias 01, 02, 03 e 04	76
Figura 34. Relação cota × velocidade no rio Araguaia em Xambioá.....	79

Figura 35. Relação cota $\times$ velocidade no rio Tocantins em Descarreto	80
Figura 36. Hidrograma simulado_ModC1/observado no período de enchente nos anos de 2004 a 2006 em Marabá	81
Figura 37. Hidrograma simulado_ModC2/observado no período de enchente nos anos de 2004 a 2006 em Marabá	82
Figura 38. Hidrograma simulado_ModE1/observado no período de estiagem nos anos de 2004 e 2005 em Marabá	82
Figura 39. Hidrograma simulado_ModE2/observado no período de estiagem nos anos de 2004 e 2005 em Marabá	83
Figura 40. Hidrograma simulado_ModC1.E1/observado no período de janeiro de 2004 a maio de 2006 em Marabá	83
Figura 41. Hidrograma simulado_ModC2.E2/observado no período de janeiro de 2004 a maio de 2006 em Marabá	84
Figura 42. Erro relativo do ModC1 para o período de enchente de 2004 a 2006	85
Figura 43. Erro relativo do ModC2 para o período de enchente de 2004 a 2006	85
Figura 44. Erro relativo do ModE1 para o período de estiagem dos anos de 2004 e 2005	86
Figura 45. Erro relativo do ModE2 para o período de estiagem dos anos de 2004 e 2005	86
Figura 46. Período de observação de níveis e vazão no ano de 2005 em Marabá	88
Figura 47. Hidrograma observado/preenchido da vazão no ano de 2005 em Marabá	88
Figura 48. Cotas máximas mensais em Marabá (Série: 1972 – 2007)	91
Figura 49. Aspectos de cheias na Marabá antiga em 1970. (Fonte: Vivercidades)	92
Figura 50. Níveis diários do rio Tocantins em Marabá no período da cheia do ano de 2005..	93

Figura 51. As fotografias (a) e (b) mostram os abrigos construído no núcleo Marabá Pioneira em 2005. (Fonte: PNUAH; PNUMA; MMA, 2006)	94
Figura 52. As fotografias a, b, c e d mostram as famílias retirando seus móveis e transferindo-se para os abrigos construídos na parte alta dos núcleos. (Fonte: CEDEC/PA)	95
Figura 53. Distribuição de Cesta Básica para as famílias atingidas pela cheia mostrada nas fotografias (a) e (b)	95
Figura 54. As fotografias (a), (b), (c) e (d) mostram as áreas em situação de emergência segundo o decreto 323/2005. (Fonte: CEDEC/PA)	96
Figura 55. Níveis diários do rio Tocantins em Marabá no período da cheia do ano de 2006..	97
Figura 56. As fotografias (a) e (b) mostram em vista aérea a amplitude da enchente nos bairros que integram a Marabá Pioneira; (c) e (d) mostram as famílias desabrigadas. (Fonte: (a) e (b) – jornal local; (c) e (d) – CEDEC/PA)	98
Figura 57. Níveis diários do rio Tocantins em Marabá no período da cheia do ano de 2007..	99
Figura 58. Notícia da enchente do rio Tocantins em Marabá/2007. (Fonte: O LIBERAL) .	100
Figura 59. Notícia mostra os abrigos construídos na Marabá Pioneira. (Fonte: O LIBERAL)	101
Figura 60. As fotografias (a), (b), (c) e (d) mostram a amplitude da cheia no ano de 2007. (Fonte: http://www.maraba.pa.gov.br/defesa_12.htm ; acesso em 20/11/2007).....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização dos tipos de solos que ocorrem na sub-bacia	24
Tabela 2. Valores e intervalos mensais da categorização de vazão (m^3/s)	49
Tabela 3. Anos com vazão acima e muito acima para os meses estudados.....	55
Tabela 4. Anos com vazão abaixo e muito abaixo para os meses estudados.....	56
Tabela 5. Descrição da área de influência de cada estação pluviométrica	77
Tabela 6. Resultados das correlações (r) para determinação do tempo de percurso de vazão e precipitação para o período de enchente (dezembro a maio).....	78
Tabela 7. Resultados das correlações (r) para determinação do tempo de percurso de vazão e precipitação para o período de estiagem (junho a novembro)	78
Tabela 8. Tempo de deslocamento das variáveis de entrada até Marabá	79
Tabela 9. Resultado do coeficiente de correlação dos modelos desenvolvidos	80
Tabela 10. Resultados do Coeficiente de Nash e Erro Padrão	89
Tabela 11. Relação dos abrigos provisórios construídos nos núcleos atingidos pela cheia	94
Tabela 12. Relação dos abrigos provisórios construídos durante a cheia de 2007	99

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	20
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	21
3.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA.....	21
3.2	ASPECTOS PEDOLÓGICOS.....	23
3.3	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	24
3.4	USO DO SOLO	26
3.5	O MUNICÍPIO DE MARABÁ-PA	27
4	DADOS E MÉTODOS	30
4.1	BASE DE DADOS	30
4.2	MÉTODO DOS QUANTIS.....	31
4.3	COMPOSIÇÕES.....	32
4.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	33
4.4.1	Modelagem Empírica e Conceitual	33
4.4.2	Descrição do Modelo	38
4.4.2.1	Discretização Espacial.....	40
4.4.3	Estatística de Avaliação do Modelo	44
4.5	PREENCHIMENTO DE FALHAS NOS DADOS	45
5	RESULTADOS	47
5.1	ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS	47
5.1.1	Vazão do Rio Tocantins em Marabá-PA	47
5.1.2	Precipitação Média na Sub-bacia do rio Tocantins	50
5.1.3	Padrões Atmosféricos da Circulação Geral	52
5.2	COMPOSIÇÃO DOS EVENTOS EXTREMOS DE VAZÃO	55
5.2.1	Precipitação na Bacia	56
5.2.2	Estrutura Dinâmica	60
5.3	MODELO HIDROLÓGICO	76
5.3.1	Precipitação Média nas Sub-bacias	76
5.3.2	Calibração e Validação dos Modelos de Enchente e Estiagem	77
5.3.3	Avaliação do Desempenho dos Modelos	84
5.3.4	Limitações do Modelo	89

6	IMPACTO SOCIOECONÔMICO EM MARABÁ	91
6.1	ESTUDO DE CASO: CHEIA DE 2005.....	92
6.2	ESTUDO DE CASO: CHEIA DE 2006.....	96
6.3	ESTUDO DE CASO: CHEIA DE 2007.....	98
7	CONCLUSÃO	102
	REFERÊNCIAS	105
	ANEXO 1.....	111
	ANEXO 2.....	112
	ANEXO 3.....	113
	ANEXO 4.....	114
	ANEXO 5.....	115
	ANEXO 6.....	116
	ANEXO 7.....	118

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios enfrentados atualmente pela sociedade e pelo Estado brasileiro é prever e, conseqüentemente, articular alternativas de monitoramento dos impactos gerados pela ação inevitável e implacável de alguns fenômenos naturais. Na região amazônica, preparar a população para enfrentar extremos hidrológicos é um dos objetivos de vários estudos de caráter científico.

Desde a primeira metade do século XIX, têm-se feito estudos hidrológicos nas bacias da região Amazônica para se tentar compreender, quantitativa e qualitativamente, os processos envolvidos no ciclo hidrológico da bacia. Mais recentemente, projetos como o PHICAB (Programa Climatológico e Hidrológico de la Cuenca Amazónica de Bolivia), HiBAm (Hidrologia e Geoquímica da Bacia Amazônica), ABRACOS (Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study), ARME (Amazon Region Micrometeorological Experiment) e LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia) têm investido em pesquisas e experimentos de campo que visam alcançar esse objetivo (NETO, 2006).

O regime de precipitação modula a variação das vazões nas bacias hidrográficas, portanto, a busca pelo entendimento do comportamento dinâmico dos meios por onde a água é transportada em suas diversas fases, é primordial para obter uma resposta para as questões hidrológicas na escala hidrográfica. No contexto Amazônico existem pesquisas que obtiveram resultados satisfatórios a respeito do comportamento médio da precipitação, principal entrada de água no sistema hidrológico, na escala mensal e intra-sazonal (FISCH et al., 1996; ROCHA, 2001; SOUZA, 2003). Esses estudos são fundamentais para a compreensão dos aspectos dinâmicos e variabilidade dos eventos de cheia e estiagem das bacias Amazônica e do Tocantins. Entretanto, eventos extremos causados por anomalias na Circulação Geral da Atmosfera e conseqüentemente nos sistemas precipitantes provocam variabilidade na precipitação assim como nas vazões, alertando os ramos das pesquisas para encontrar formas de monitorar e até mesmo de prever tais comportamentos anômalos.

Pesquisas (MARENGO, 1995; MONTROY, 1997; MARENGO et al., 1998; SOUZA et al., 2000) demonstraram que os modos de variabilidade da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos Oceanos Pacífico e Atlântico exercem influências diretas na variabilidade da precipitação nas principais bacias da região amazônica. Segundo Rocha (2001) anomalias de TSM no Pacífico Tropical, associadas ao fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), causam impactos de grande escala nas chuvas da Amazônia. Os resultados de

SOUZA et al. (2005) mostram o gradiente da TSM entre o Atlântico Norte e Sul associado a extremos de precipitação no norte e leste da Amazônia, estendendo-se este padrão de anomalias até o norte do Nordeste.

MUZA e CARVALHO (2006) afirmam que a variabilidade climática sobre o centro-sul da Amazônia é influenciada tanto por aspectos tropicais quanto subtropicais, destacando que o máximo de precipitação no verão austral nessa região está relacionado à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). MARENGO et al. (2001) e SOUZA et al. (2005) afirmam que o máximo durante o outono austral nas regiões norte e nordeste da Amazônia está associado à migração para sul do equador da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Durante o verão austral, a ZCAS é uma característica marcante da precipitação sobre a América do Sul e é definida como uma região de alta variabilidade convectiva posicionada a leste da Cordilheira dos Andes com orientação noroeste-sudeste, estendida desde o sul e leste da Amazônia até o Atlântico Sul (ZHOU; LAU 1998; LIEBMANN et al., 1999; CARVALHO et al., 2004). NOGUÉS-PAEGLE e MO (1997) e CARVALHO et al. (2004) mostram que a ZCAS tem papel fundamental na precipitação da América do Sul durante os meses de primavera e verão e que é diretamente modulada pela TSM do Atlântico Sul. Segundo WALISER e GAUTIER (1993) a ZCIT constitui o ramo ascendente da célula de Hadley com uma característica faixa de nebulosidade convectiva ao longo da região equatorial.

Diversos trabalhos estudaram o comportamento extremo das chuvas nos trópicos e subtrópicos sul-americanos (QUADRO, 1994; ROCHA, 2001; SOUZA et al., 2005), contudo uma análise desta variável associada à variabilidade hidrológica em bacias hidrográficas é fundamental como um suporte aos modelos hidrológicos que utilizam a precipitação como uma variável de entrada ou assim como aos centros de previsões de níveis e vazões que baseiam-se nesta variável para uma correção subjetiva aos modelos utilizados.

Os modelos hidrológicos podem ser considerados como uma ferramenta desenvolvida para representar o comportamento da bacia hidrográfica, prever condições futuras e/ou simular situações hipotéticas no intuito de avaliar impactos de alterações. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física das bacias e dos processos envolvidos, o que muito tem contribuído para o desenvolvimento de um grande número de modelos (OLIVEIRA, 2003). Os modelos se diferenciam entre si em função dos objetivos a serem alcançados, dos dados que utilizam e das prioridades que são estabelecidas na representação dos processos físicos. Dentre outras características, os modelos podem ser baseados em processos, ou seja, procuram descrever todos os processos que envolvem

determinado fenômeno, ou podem ser empíricos os quais utilizam relações baseadas em observações. Além disso, os modelos que não levam em consideração os conceitos de probabilidades são classificados como determinístico, quando as variáveis envolvidas possuem um comportamento aleatório são chamados de estocásticos (TUCCI, 2005).

Levando em consideração a disponibilidade de dados, incertezas hidrológicas, representatividade, entre outros, os modelos podem ser desenvolvidos para previsões ou apenas para simulações. Em se tratando de previsão de vazão num sistema hídrico ela pode ser de curto prazo, de poucas horas até alguns dias de antecedência e de longo prazo até nove meses (GEORGAKAKOS; KRYSZTOFOWICZ, 2001). O presente trabalho aborda o desenvolvimento de um modelo a curto prazo que, segundo TUCCI (2005), geralmente são utilizados para gerenciamento de cheias, assim como: navegação, onde a carga transportada depende do calado e do nível do rio; atendimento da irrigação e abastecimento; usos múltiplos como energia e planejamento e controle de inundações.

Problemas com cheias e estiagens na Amazônia são de ocorrência anual. Cidades como Rio Branco, Porto Velho, Manaus, Óbidos, Santarém, Altamira, Marabá, entre outras, historicamente são impactadas pelo aumento do nível dos rios de suas respectivas bacias. A situação agrava-se à medida que há um crescimento populacional desordenado, aumentando-se a vulnerabilidade da população situada nas áreas de alagamento que repercute diretamente no número de pessoas atingidas pelas enchentes. Por outro lado, os rios sendo um dos principais meios de transporte dos Amazonídeos, uma vez que atingem níveis muito baixos passam a limitar o transporte fluvial, a pesca, a produção florestal, causando um forte impacto social e econômico.

As questões expostas acima levaram ao desenvolvimento e execução de projetos que contemplassem a mitigação desses impactos. No início da década de 1980 o Projeto de Hidrologia e Climatologia da Amazônia (PHCA) executado em parceria pela Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM), Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e Organização Meteorológica Mundial (OMM) desenvolveu modelos estatísticos de previsão em curto prazo (1, 4 e 7 dias) de níveis e vazão para diversas bacias dentro da região Amazônica, usando como dados de entrada nível ou vazão (SUDAM; PNUD; OMM, 1980). Mais recentemente uma parceria da Universidade Federal do Pará (UFPA), Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) e Agência de Desenvolvimento da Amazônia (ADA) executou até janeiro de 2007 o projeto “Monitoramento e Modelagem Hidrológica dos Rios Tocantins/Araguaia”, com objetivo

principal de subsidiar os órgãos tomadores de decisões através de boletins diários de previsão de níveis para Marabá.

Assim, no âmbito de impactos causados pela variabilidade dos regimes hidrológicos das principais bacias localizadas na Amazônia, essa pesquisa se junta a 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, localizada às margens do rio Tocantins, no leste da Amazônia.

2 OBJETIVOS

Esta pesquisa objetivou desenvolver um modelo estatístico de previsão de vazão do rio Tocantins em Marabá-PA, como uma ferramenta de apoio nas operações de enchente naquela região, bem como caracterizar os aspectos climatológicos regionais da precipitação na escala da bacia hidrográfica, além de estabelecer a estrutura dinâmica dos padrões oceano-atmosfera de grande escala associada aos extremos do regime hidrológico do rio Tocantins.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Especificamente esta pesquisa buscou:

- A caracterização físico-ambiental da região estudada;
- Analisar e consistir os dados fluviométricos e pluviométricos da bacia hidrográfica do rio Tocantins;
- Desenvolver um modelo estatístico de previsão inserindo a contribuição da precipitação efetiva da sub-bacia;
- Analisar os aspectos climatológicos regionais da precipitação na escala da bacia hidrográfica;
- Investigar os mecanismos dinâmicos de grande escala associados aos eventos extremos do regime hidrológico (vazão) observados em Marabá;
- Mostrar e quantificar os impactos socioeconômicos causados pela cheia na orla da cidade de Marabá.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA

A Bacia Hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia está totalmente inserida no território brasileiro, possui uma área com cerca de 921 mil km² (11% do território nacional) e abrange os estados do Pará (30,3% da região hidrográfica), Tocantins (30,2%), Goiás (21,3%), Mato Grosso (14,7%), Maranhão (3,3%) e o Distrito Federal (0,1%). Como mostra a figura 1, grande parte situa-se na região Centro-Oeste, desde as nascentes dos rios Araguaia e Tocantins até a sua confluência, e daí, para jusante, entrando na Região Norte, até a sua foz. Cabe destacar que a região hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia, de acordo com a Resolução nº 32 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, inclui ainda as bacias dos rios Pará e Guamá, que são adjacentes (ANA, 2006).

O rio Tocantins tem sua origem no Planalto de Goiás, a cerca de 1.000 m de altitude, pela confluência dos rios das Almas e Maranhão. Entre seus principais afluentes, destacam-se, na margem direita, os rios Bagagem, Tocantinzinho, Paranã, dos Sonos, Manoel Alves Grande e Farinha, e na margem esquerda, o rio Santa Teresa. Seu principal tributário, entretanto, é o rio Araguaia (2.600 km de extensão). Após a confluência com o rio Araguaia, destaca-se o rio Itacaúnas, pela margem esquerda. A extensão total do rio Tocantins é de 1.960 km, sendo sua foz na Baía de Marajó, onde também deságuam os rios Pará e Guamá (MMA, 2006).

O clima da região hidrográfica do Tocantins-Araguaia é tropical, com temperatura média anual de 26°C, e dois períodos climáticos bem definidos: o chuvoso, de outubro a abril, com aproximadamente 90% da precipitação, e o seco, de maio a setembro, com baixa umidade relativa do ar (ANA, 2006).

“O regime pluviométrico é caracterizado pela ocorrência de aumento das precipitações com a diminuição da latitude (sentido sul-norte). A zona de menor precipitação ocorre na faixa a oeste do município de Paranã (GO), na divisa com a região Nordeste, com valores médios de 1 mm/mês entre junho e agosto” (FGV; MMA; ANEEL, 1998 *apud* MMA, 2006, p. 9). 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).

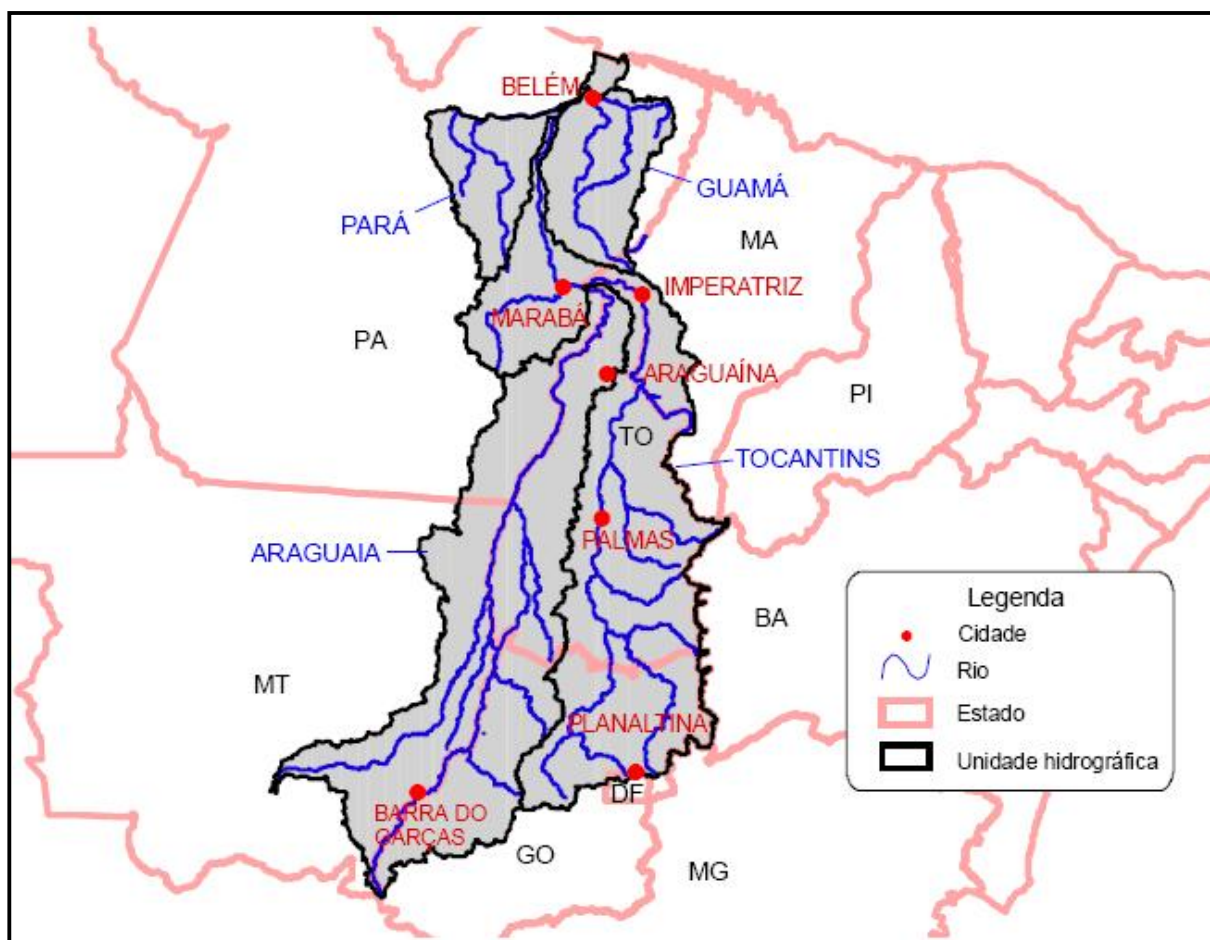


Figura 1. Limites da Bacia Hidrográfica, os estados componentes e principais cidades. (Fonte: ANA, 2006).

A área utilizada na modelagem está localizada entre as latitudes $04^{\circ} 30' 00''$ e $09^{\circ} 00' 00''$ Sul e longitudes $46^{\circ} 00' 00''$ e $51^{\circ} 00' 00''$ oeste, compreende a área de captação de água com pontos mais a montante nas estações fluviométricas de Carolina (Rio Tocantins - MA) e Conceição do Araguaia (Rio Araguaia - PA) e ponto mais a jusante na estação fluviométrica de Marabá (Rio Tocantins PA) como mostra a figura 2, essa área de captação será tratada neste trabalho como *sub-bacia*.

A escolha por Carolina e Conceição do Araguaia como limites da sub-bacia a montante, deve-se a maior disponibilidade de dados fluviométricos em ambos os postos, a possibilidade de uma previsão com significativa antecipação e por ser um trecho sem obstruções por obras hidráulicas tanto no rio Araguaia como no rio Tocantins. Então, a sub-bacia possui uma área de aproximadamente 97.609 km^2 , abrangendo os estados do Tocantins, Pará e Maranhão. Seguindo o curso do rio Araguaia de Conceição do Araguaia até a confluência com o rio Tocantins as principais contribuições hidrológicas são dos rios Pau D'Arco e Maria na margem esquerda, Muricizal, Corda e Lontra na margem direita. Já no rio Tocantins destacam-se os rios Farinha, Lajeado e Jacundá na margem direita.

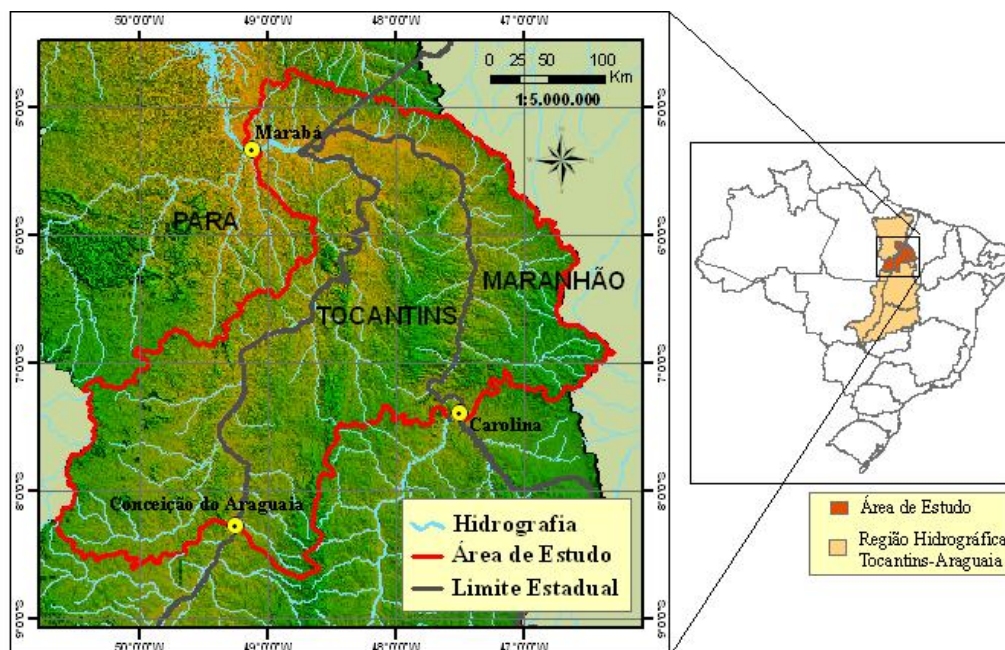


Figura 2. Sub-Bacia Marabá, Conceição do Araguaia e Carolina.

3.2 ASPECTOS PEDOLÓGICOS

O conhecimento do solo, tais como profundidade, textura, drenagem, etc, é importante na compreensão do escoamento resultante da precipitação. Para 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.

Em relação aos aspectos pedológicos da sub-bacia, predominam na área solos bem 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 serem 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 tratam-se de solos pouco profundos e mal desenvolvidos. Nas áreas de planícies

encontram-se Gleissolos e Neossolos Flúvicos, que são solos mal drenados periodicamente alagados. A Caracterização básica é mostrada na tabela 1.

Ao longo do rio Araguaia no trecho entre Conceição do Araguaia (8,3°S) e Xambioá (6,5°S), há predominância de solo Podzólico (Argissolos) e mínima ocorrência de Plintossolo, Cambissolo e Latossolo, ou seja, grande parte dessa área possui solos favoráveis a infiltração indicando a possibilidade de um *lag* maior entre a precipitação e a vazão. Já no trecho entre 7,5°S (Carolina) e 6°S (Descarreto) ao longo do rio Tocantins, há uma maior variedade de solos, entre eles estão Neossolos Quartzênicos, Latossolos, Cambissolos, Plintossolos, Nitossolos e Vertissolo. Nas áreas entre 6°S até Marabá os solos são do tipo Argissolos, Latossolos, Neossolos Quartzênicos, Plintossolo e cambissolo. O mapeamento das classes de solos pode ser observado no anexo 1.

Tabela 1. 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 e Plano
Gleissolo	Pouco profundo	Argilosa	Mal drenado	Plano
Solo Aluvial	Medianamente profundo	Indiscriminada	Muito mal a mal drenado	Plano

Fonte: SIVAM/IBGE, 2004.

3.3 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

A abordagem do aspecto geomorfológico procura enfatizar as feições mais relevantes que influenciam na distribuição dos recursos hídricos superficiais. Em grande parte da área de estudo predominam as depressões, cuja formação, caracterizada por prolongados processos de erosão, deu origem a declividades muito baixas, na faixa de 0 a 6% e cotas altimétricas abaixo de 300 metros. Nas áreas de menor declividade encontram-se ainda as planícies, que são superfícies muito planas formadas por processo de sedimentação recente de

rios, mares ou lagos. Na área de estudo as planícies são pouco expressivas e ocorrem em regiões adjacentes aos rios de maior porte.

As áreas mais dissecadas são relacionadas aos planaltos, que são superfícies irregulares com altitudes acima dos 300 metros formados por processos de erosão sobre rochas cristalinas, metamórficas ou sedimentares. Na área de estudo os planaltos são encontrados também em forma de serras, patamares e chapadas. As maiores declividades e altimetrias ocorrem nas seguintes unidades geomorfológicas:

- Serra de São Félix e Planaltos Residuais do Sul do Pará – na porção oeste da bacia;
- Serras das Andorinhas, Patamares do Araguaia e Planalto do Interflúvio Tocantins Araguaia – na região central da bacia;
- Chapadas e Planos do Rio Farinha (figura 3) e Patamar de Porto Franco/Fortaleza dos Nogueiras – nas áreas de interflúvio entre as Bacias Hidrográficas Tocantins/Araguaia e Tocantins/Região hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental.

Grande parte das áreas no curso do rio Araguaia (próximo a Conceição do Araguaia) são de depressões e baixa declividade, essas características são favoráveis ao escoamento subterrâneo (infiltração) e retardam a resposta da precipitação na vazão. Por outro lado, as regiões em torno do município de Carolina possuem uma maior declividade, onde estão localizados o Patamar de Porto Franco e as Chapadas do Rio Farinha, tornando a área com rápida resposta hidrológica na vazão. As áreas mais baixas estão próximas a Marabá, onde encontram-se o Patamar Dissecado Capim-Moju, Depressão do Baixo Araguaia e a Depressão de Imperatriz. Estes dados podem ser observados nos mapas encontrados nos anexos 2, 3 e 4.



Figura 3. Fotografia de uma área representativa de relevo mais dissecado encontrado nas Chapadas e Planos do Rio Farinha.

3.4 USO DO SOLO

O uso e a ocupação do solo, tanto no meio rural quanto no meio urbano, constituem-se um fator importante nos processos hídricos, logo, é importante o conhecimento básico dos processos de escoamento e infiltração nos diversos tipos de cobertura do solo para uma melhor interpretação nos resultados dos parâmetros do modelo (LEAL, 2001).

Segundo a Comissão para Coordenação do SIVAM/IBGE (anexo 5) predominam na área, especialmente na porção oeste, áreas antropizadas com pastagens (figura 4.a) e agricultura cíclica. Nesta porção mais desmatada havia ocorrência de grandes extensões de mata primária, restando apenas pequenos polígonos preservados, como a Terra Indígena Mãe Maria a nordeste de Marabá.

Há ocorrência expressiva de floresta ombrófila aberta (figura 4.b) e vegetação secundária com palmáceas na parte central da área de estudo (figura 4.c). Na região sudeste há predominância de cerrados (figura 4.d) ou savanas (segundo classificação do IBGE). Ao sul da sub-bacia há também a ocorrência deste tipo de vegetação em uma área expressiva que encontra-se preservada em meio a regiões de grande antropização.

É provável que as áreas desmatadas (pastagens e culturas) com solo exposto registrem um maior escoamento superficial em relação às áreas com mata primária e cerrados onde há maior interceptação e infiltração.

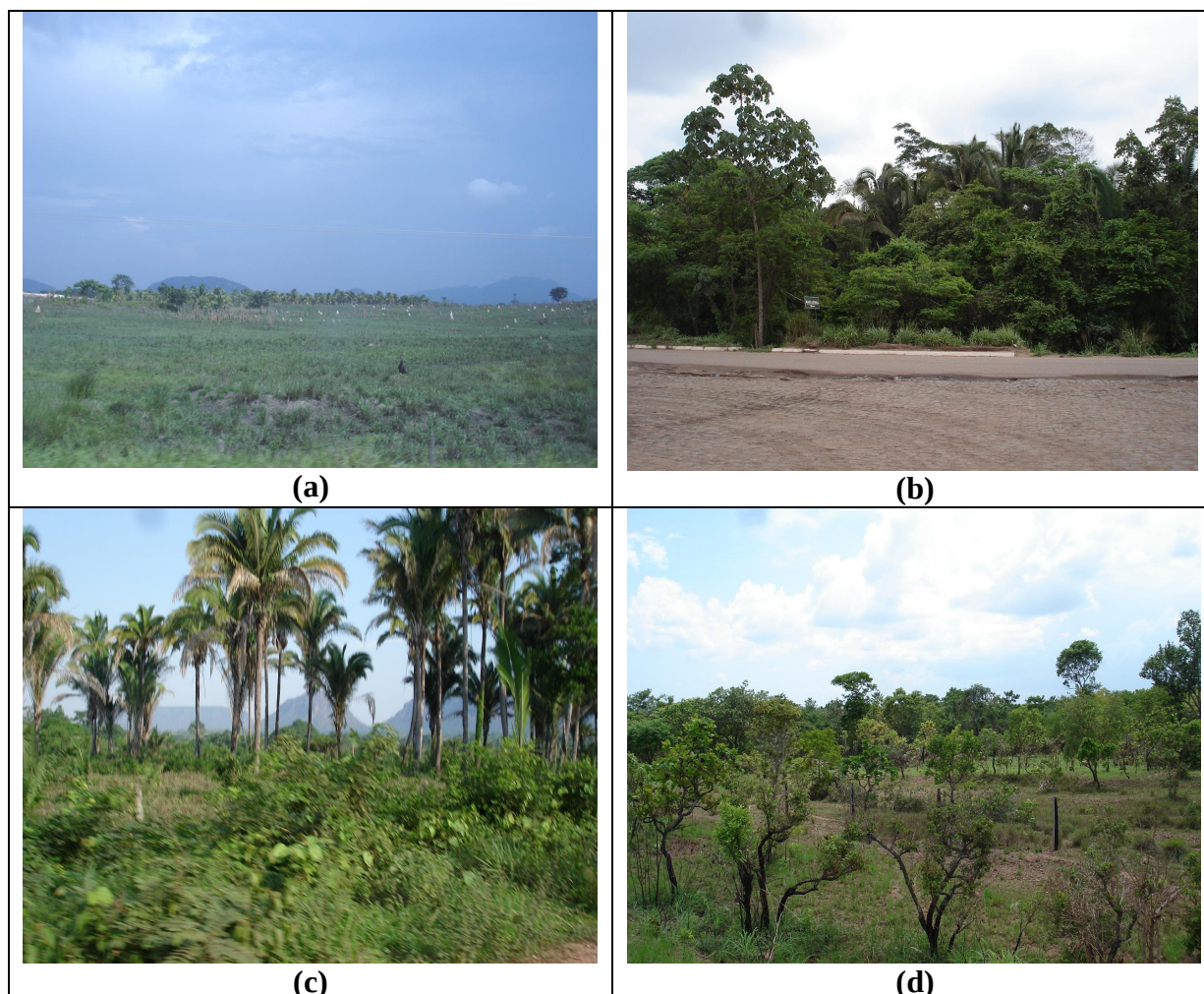


Figura 4. (a): fotografia de uma área de pastagem, próximo ao município de Conceição do Araguaia; (b): Fotografia de uma floresta Ombrófila aberta; (c): Fotografia de uma vegetação secundária com palmeiras; (d): Fotografia de vegetação de cerrado.

3.5 O MUNICÍPIO DE MARABÁ-PA

O modelo desenvolvido nessa pesquisa foi para o posto do município de Marabá, que está situado no sudeste do estado do Pará, à margem esquerda do rio Tocantins. Este município compreende uma área de 15.157,90 km², sendo que em 18,35% desta, encontram-se áreas de conservação florestal com jurisdição federal. Com uma população de 200.871 pessoas, segundo o IBGE em outubro de 2007, a sede de Marabá está dividida em 5 núcleos:

Marabá Pioneira, Cidade Nova, Nova Marabá, São Felix e Morada Nova, separados por rios ou áreas alagáveis, conforme indica a figura 5.

Até a década de 1960 existiam apenas os núcleos Marabá Pioneira e São Felix, porém em 1971 a ineficiência do Projeto de Colonização da Amazônia implantado pelo Governo Federal por meio do Instituto de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) resultou em colonos que venderam suas terras ao longo das rodovias na região sudeste do Pará e foram procurar moradias na cidade de Marabá, essa pressão populacional somada a acessibilidade a novas terras proporcionada pela Rodovia Transamazônica culminou, em 1971, no desenvolvimento dos núcleos Cidade Nova, Morada Nova e Nova Marabá, este último surgiu dentro de um projeto do Governo Federal que decidiu transferir a população da Marabá Pioneira, em decorrência das enchentes, para esse novo local, através do PDUM – Plano de Desenvolvimento Urbano de Marabá (PNUAH; PNUMA; MMA, 2006).

Na cidade de Marabá a grande pressão demográfica e econômica resulta em diversos problemas ambientais, devido ao rompimento do equilíbrio natural como consequência, principalmente, do mau uso e ocupação do solo e do crescimento demográfico desordenado. De acordo com o PNUAH; PNUMA; MMA (2006) projetos de extração mineral, de indústrias de produção de ferro gusa, atividades pecuárias e madeireiras, entre outras atividades, além do seu potencial de degradação e poluição, vem causando através de um processo de imigração de outros estados um aumento populacional considerável. O uso e ocupação das áreas não estruturadas levam à poluição do solo, da água e do ar, sendo a poluição deste último agravada através de indústrias e da emissão de gases por veículos motorizados.

Essa pesquisa enfatizou o impacto causado pelas enchentes anuais que atinge a população de alguns núcleos, dentre eles principalmente Marabá Pioneira, que são ocupados por edificações habitacionais, comerciais e de serviços. As inundações são provocadas pela cheia do rio Tocantins e também do rio Itacaiunas, ocasionando doenças de veiculação hídrica, desalojamento da população, custos de acolhimento desta população e deterioração dos patrimônios públicos e privados. A ocupação de áreas vulneráveis a previsíveis enchentes anuais, como é o caso de grande parte da Marabá Pioneira, justifica-se pela dependência econômica a atividades para as quais o local apresenta grandes vantagens relacionadas ao modo de vida ribeirinha.



Figura 5. Cidade de Marabá. (Fonte: Google Maps)

4 DADOS E MÉTODOS

4.1 BASE DE DADOS

Esta pesquisa utilizou dados fluviométricos médios diários e precipitação total diária, os quais foram obtidos do Banco de Dados Hidrometeorológicos (Hidro) da Agência Nacional de Água (ANA). Os dados fluviométricos (tabela 2 e figura 6) são referentes às estações de Conceição do Araguaia, Xambioá, Araguaatins, Carolina, Descarreto e Marabá, localizadas nos rio Tocantins e no seu principal afluente o Araguaia. Os dados utilizados são referentes às estações localizadas na figura 6 e descritos no Anexo 6.

Para a análise dos padrões de sistemas meteorológicos de grande escala, utilizou dados de um período de 33 anos (1974-2006) da reanálise média-diária das componentes zonal (u) e meridional (v) do vetor vento, da velocidade vertical (ω) e pressão atmosférica ao nível médio do mar (PNM) produzidos pelo *National Centers for Environmental Predictions/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) (KALNAY et al., 2002). Estes dados estão disponíveis em 11 níveis troposféricos (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200 e 150 hPa). Os dados diários de Radiação de Onda Longa (ROL) derivam-se da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) que usam satélites meteorológicos de órbita polar como identificadores da convecção tropical (LIEBMANN; SMITH, 1996). Além desses, os dados mensais de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos Oceanos Pacífico e Atlântico obtidos do *Climate Prediction Center*/NCEP também são usados (REYNOLDS et al., 2002). As reanálises do NCEP/NCAR e os dados de ROL estão em uma grade global de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ de lat e lon, e a TSM em uma grade global de $1^\circ \times 1^\circ$.

A ROL medida por satélite pode ser usada como uma aproximação para a convecção profunda nos trópicos e nos subtropicais, uma vez que valores baixos de ROL sobre estas regiões geralmente indicam atividade convectiva profunda (Zhang, 1993). Neste trabalho anomalias negativas de ROL são associadas com a convecção profunda de grande escala, como em Chaves (2003).

Os impactos socioeconômicos causados pelas cheias na orla da cidade de Marabá serão mostrados e quantificados com base nas informações da Coordenadoria Regional de Defesa Civil da Amazônia Legal (CORDEC-AML), da Coordenadoria Estadual de Defesa Civil – CEDEC/PA e do Relatório de Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental-Marabá de 2006 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).

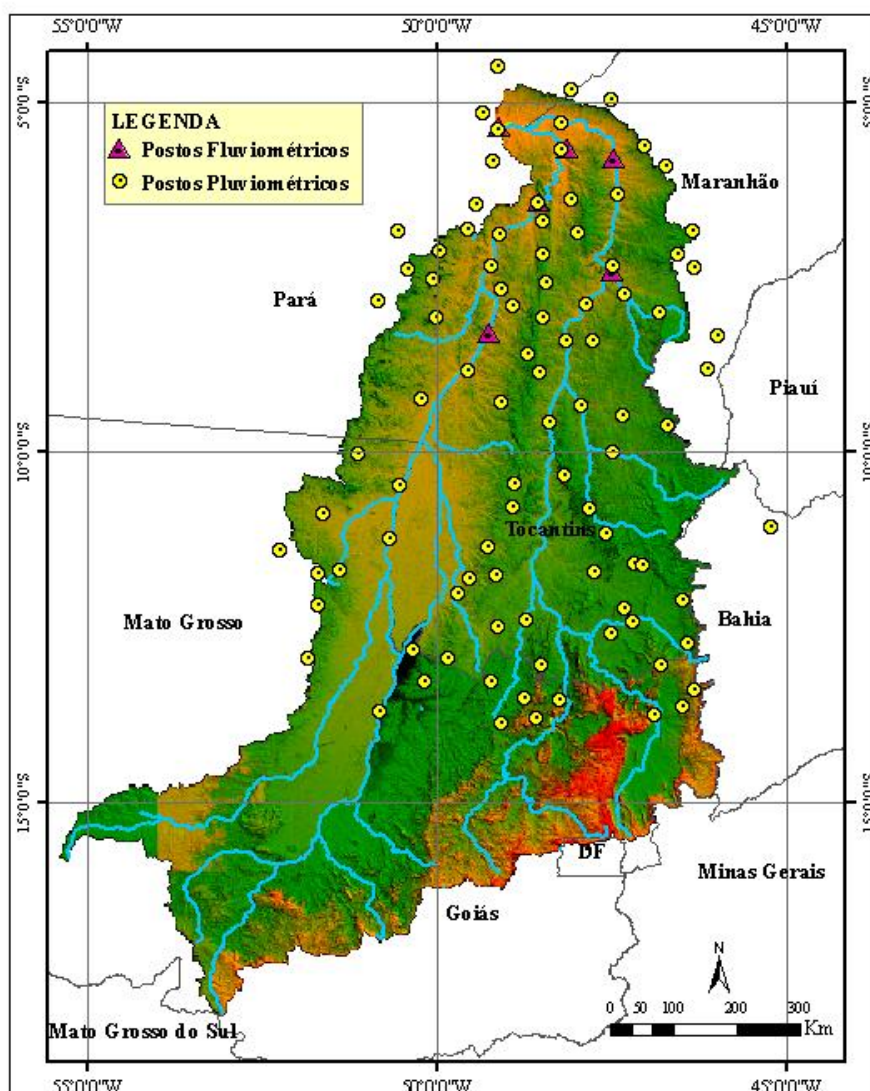


Figura 6. Localização das estações pluviométricas e fluviométricas.

A distribuição espacial da precipitação será feita utilizando-se o programa Interpola (SOUZA et al, 2004) que baseia-se no método do inverso da distância ao quadrado (“Funções de Green”) para fazer interpolações de dados esparsos para uma grade regular ou não regular dentro de um mesmo domínio. A interpolação será feita para uma grade com resolução de 20 km.

4.2 MÉTODO DOS QUANTIS

A metodologia estatística de análise dos dados mensais utilizada neste trabalho é a Técnica dos Quantis. Essa técnica é adequada tanto para dados de chuva quanto para vazão,

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). Basicamente, a formulação desta técnica é a seguinte (conforme XAVIER; XAVIER, 1999; XAVIER et al., 2002):

Seja uma série temporal ($X_1, X_2, \dots, X_n$) contendo dados mensais de vazão ou precipitação com n sendo o tamanho da amostra, ou seja, $n = 264$, considerando cada mês entre os anos de 1985 a 2006. 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 sendo, considerando que $Q(p)$ são as ordens quantílicas $p=0,15; 0,35; 0,65$; 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 vazão, temos as seguintes categorias de percentis:

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	$X_i \geq Q(0,85)$

4.3 COMPOSIÇÕES

A técnica de composições é conhecidamente eficiente em identificar os padrões médios e características principais associadas a um determinado fenômeno climático ou outro evento que ocorre com certa periodicidade, trata-se de uma média aritmética de todos os eventos extremos da série. A eficácia dessa ferramenta depende muito dos critérios de seleção do fenômeno ou evento a ser analisado, os quais devem ser bem fundamentados. Neste caso aplicou-se teste de hipótese para aceitar/eliminar as anomalias estatisticamente significantes, segundo o teste- t de Student com 95% nível de confiança (SOUZA et al., 2005).

Neste trabalho utiliza-se da referida técnica de composições para definir a estrutura dinâmica média dos anos com vazão nas categorias Acima/Muito Acima e Abaixo/Muito Abaixo. Foram feitas composições mensais para as variáveis TSM, ROL, PNM e vento assim como das precipitações mensais na bacia estudada para os meses de enchente definidos pela climatologia da vazão. O tempo de resposta da vazão à precipitação poder ser significativo quando se trata de grandes bacias, portanto analisou-se a precipitação também para o mês anterior ao mês de vazão extrema para os respectivos anos de composição. Então, os anos selecionados para as composições mensais foram baseados nos resultados da categorização da série de vazão e quando o extremo de vazão persistiu por no mínimo dois meses consecutivos.

4.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A seguir uma breve discussão do uso da modelagem empírica e conceitual nas principais bacias da América do Sul, alguns resultados e a descrição do modelo desenvolvido nesta pesquisa.

4.4.1 Modelagem Empírica e Conceitual

Dentro da aplicação de modelos hidrológicos uma das principais questões está na escolha do modelo a ser utilizado. Segundo Tucci (2005) os principais aspectos a serem considerados são: objetivos do estudo, as características da bacia e do rio, disponibilidade dos dados e familiaridade com o modelo.

Desenvolver um modelo de previsão de vazão para Marabá-PA que possui uma área de drenagem de 690.920 km², com vazões da ordem de 10⁴ m³/s pode ser alcançado utilizando-se diversos tipos de modelos, porém os modelos que utilizam relações estatísticas baseadas em observações têm apresentado bons resultados em grandes bacias como observado em Castilho e Oliveira (2001), Guilhon (2002) e Medeiros et al. (2007), além de sua simples metodologia o mínimo número de variáveis utilizadas e os resultados satisfatórios são atrativos para desenvolver projetos em um curto espaço de tempo.

Na previsão de enchente a curto prazo as principais limitações são devidas aos dados de entrada do modelo. Se o modelo utilizado for baseado nos processos físicos certamente necessitará de uma gama maior de dados para gerar a vazão, sendo este um dos motivos pelo qual a grande parte dos modelos hidrológicos de grandes bacias sejam

desenvolvidos apenas para simulação ou previsão a longo prazo. Segundo Neto (2006) grande parte dos trabalhos de modelagem hidrológica já realizados na bacia Amazônica utilizam passo de tempo mensal ou superior.

Na prática, a escolha do modelo a ser utilizado para previsão também é dependente do menor erro apresentado nas validações e aplicações. Assim como os empíricos, os modelos conceituais também possuem grandes limitações, como:

- **Escala dos Processos:** a heterogeneidade espacial dos sistemas hídricos e a incerteza com a qual os parâmetros e processos são medidos em diferentes escalas; a dificuldade de representar os processos caracterizados e analisados na microescala para outras escalas da bacia hidrográfica e a falta de relação entre os parâmetros de modelos matemáticos com as diferentes configurações espaciais encontradas na natureza são fatores intervenientes na representação dos processos hidrológicos em diferentes escalas. Segundo Mendiondo e Tucci (1997), o problema da escala reside em conhecer como variáveis e parâmetros são representados em escalas diferentes e como estabelecer as funções de transferência entre essas escalas, pois, normalmente, a equação para representar um determinado fenômeno é levantada a partir de experimentos de campo em uma área limitada. Um exemplo conhecido é a equação de infiltração obtida por meio de experimentos de campo para uma área de poucos cm^2 , quando utilizada em uma área de muitos m^2 ou km^2 os parâmetros da equação devem ser modificados. Segundo Neto (2006) a estimativa dos parâmetros dos modelos carregam o maior grau de incerteza em uma simulação hidrológica.
- **Variáveis de Entrada:** dentre as variáveis de entrada que possuem maior importância destacam-se a precipitação, evapotranspiração e a vazão. Em uma região com baixa densidade de estações hidrometeorológicas, a base de dados também limitam uma melhor estimativa dos modelos, por exemplo, o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith empregado no modelo MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001) utiliza valores de umidade relativa do ar, pressão atmosférica, temperatura do ar, radiação líquida na superfície, insolação máxima, velocidade do vento, entre outros, os quais possuem um número bem menor de pontos de observação em relação a precipitação e vazão.
- **Escoamento Superficial:** segundo Collischonn e Tucci (2001) uma das chaves principais da representação de uma bacia em determinada escala está no cálculo do escoamento superficial. Ao utilizar o MGB-IPH, que possui a mesma formulação de escoamento superficial do modelo ARNO (TODINE, 1996), Neto

(2006) relata que o escoamento superficial é o componente mais importante e de difícil determinação em virtude dos inúmeros fatores intervenientes como tipo de solo da bacia, cobertura vegetal, estado de umidade do solo e topografia do terreno.

Certamente as limitações da modelagem empírica serão tratadas nos próximos capítulos com base nos resultados obtidos nessa pesquisa.

A seguir são apresentados alguns resultados de aplicações da modelagem conceitual e empírica para dar uma visão da situação atual da modelagem hidrológica.

» Andreolli (2003) aplicou o MGB-IPH para previsão a curto prazo no rio Uruguai. Observa-se na figura 7 bons resultados na seção de Machadinho com área de drenagem de 32.000 km², contudo o modelo teve dificuldades em algumas vazões de pico apresentado os maiores erros na previsão. Já na seção de Passo Caru (drenagem ~ 10.000 km²) observa-se pela figura 8 erros significativos na aplicação do modelo, porém, segundo Andreolli (2003), a aplicação em Passo Caru pode estar comprometida por possíveis erros na curva-chave da seção.

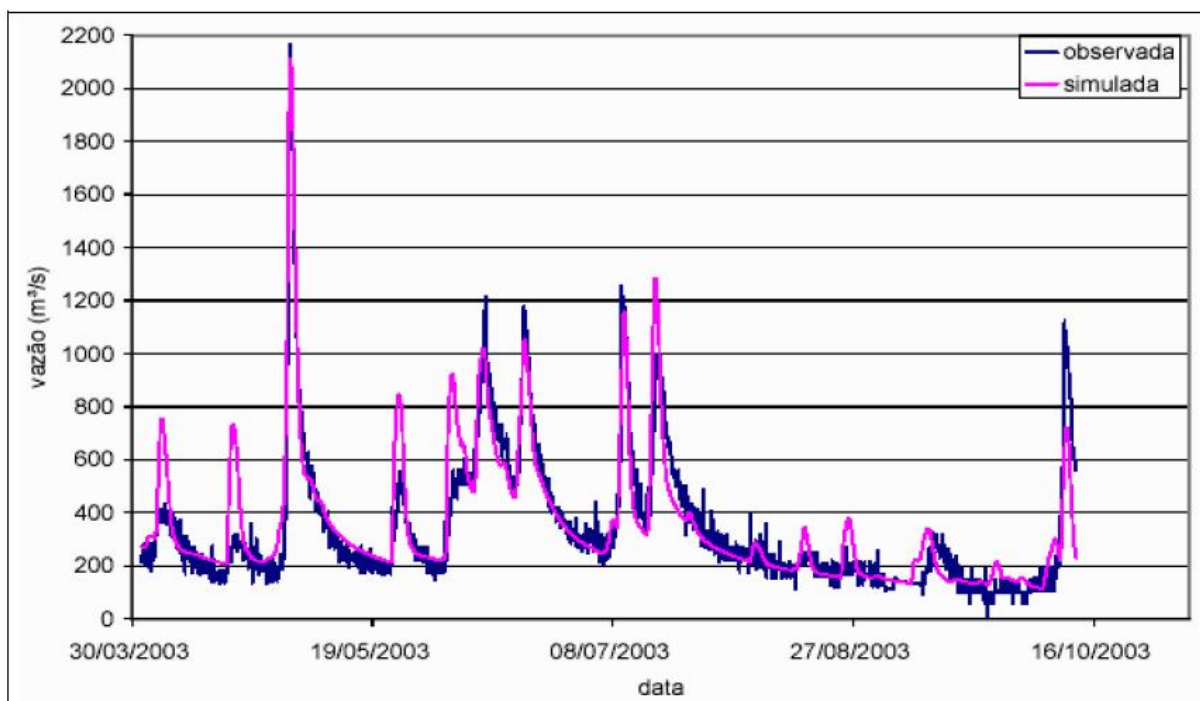


Figura 7. Hidrograma simulado/observado no período de previsão contínua – Machadinho. (Fonte: Andreolli, 2003).

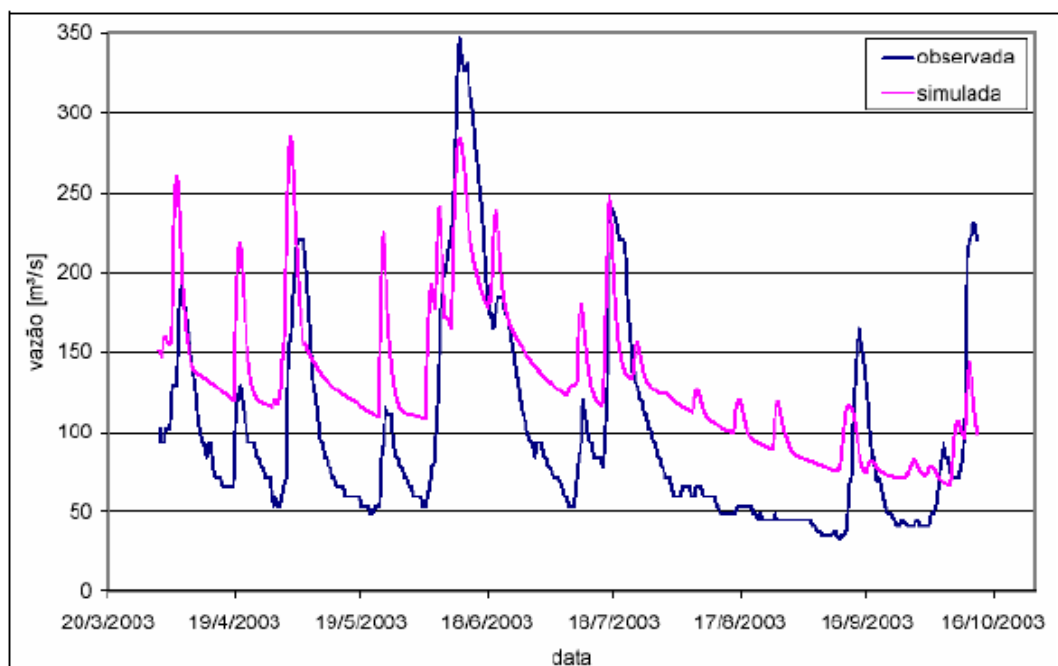


Figura 8. Hidrograma simulado/observado no período de previsão contínua – Passo Caru. (Fonte: Andreolli, 2003).

» Na aplicação do MGB-IPH por Allasia et al. (2004) na bacia do rio Paraguai observa-se pela figura 9 a previsão na seção Miranda do rio Miranda que alguns picos de vazão são superestimados e outros subestimado, tais erros foram atribuídos pelos autores à má qualidade nos dados de precipitação e baixa densidade dos postos pluviométricos na bacia.

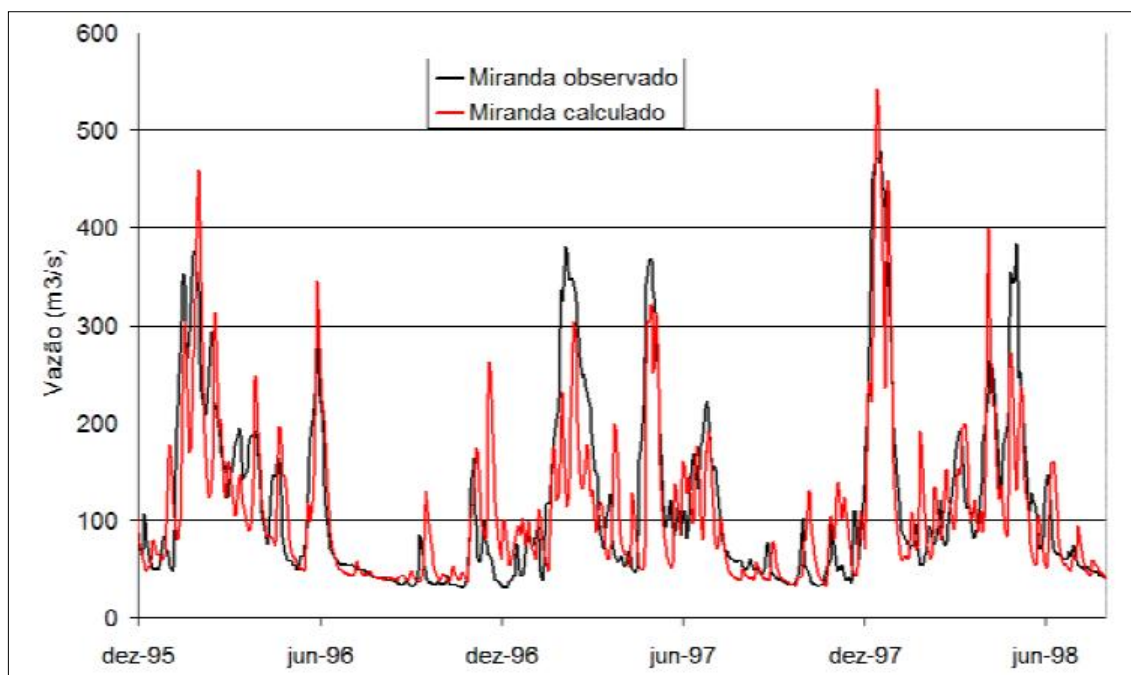


Figura 9. Hidrograma de vazão diária calculada e observada do rio Miranda em Miranda, de dezembro de 1995 a agosto de 1998. (Fonte: Allasia et al., 2004).

» Aplicação de modelagem estatística na bacia do rio Iguaçu em Foz do Areia por Guilhon (2002) que utilizou regressão linear para previsão semanal de vazão no período de abril de 2000 a março de 2001, apresentando um erro médio absoluto de 18%, conforme figura 10.

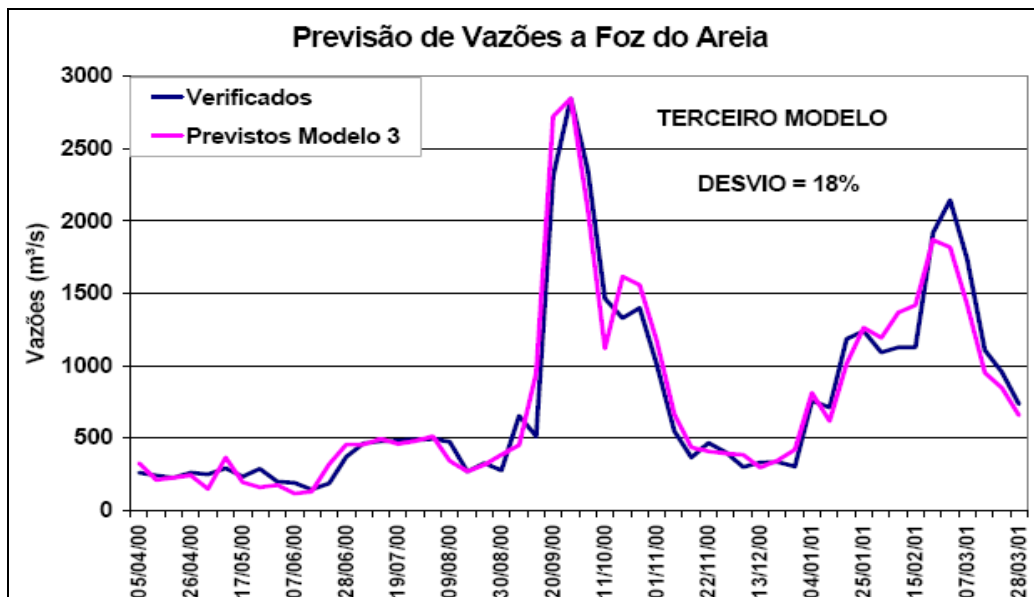


Figura 10. Resultados da validação para o período de maio de 2000 a março de 2001. (Fonte: Guilhon, 2002).

» Modelo empírico de previsão a curto prazo utilizando regressão linear aplicado por Castilho e Oliveira (2001) na bacia do Rio Doce em trecho com área de drenagem de 38.000 km² mostrou bons resultados como pode ser observado na figura 11 o gráfico da validação para o período de 1996 a 1997.

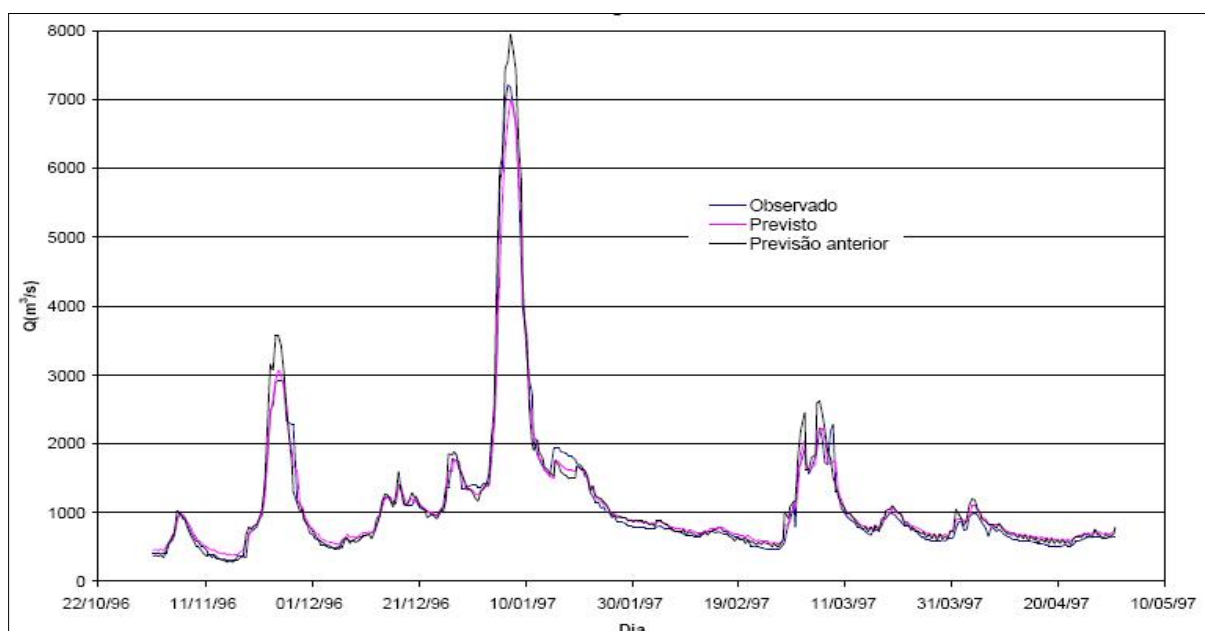


Figura 11. Hidrograma observado/previsto para o período de outubro de 1996 a outubro de 1997 na bacia do rio Doce. (Fonte: Castilho e Oliveira, 2001).

Segundo Tucci (2005) 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 podem ser adaptados para incluir como variável explicativa a precipitação. Neste caso as previsões de vazão para antecedências maiores podem ser tão boas quanto as obtidas por modelos conceituais.

4.4.2 Descrição do Modelo

O modelo hidrológico usado é empírico e estocástico, foi baseado no método de regressão linear múltipla, utilizando as séries de observações fluviométricas e pluviométricas para obter equações que possibilitem prognósticos confiáveis.

O desenvolvimento de modelos prognósticos mais simples, baseados em observações, que podem operar satisfatoriamente em grandes bacias, no qual está baseado o modelo de previsão para Marabá, fundamenta-se nas correlações lineares entre os níveis ou vazões do lugar do prognóstico (B) e de outro lugar localizado à montante do mesmo (A), conforme ilustra a figura 12.

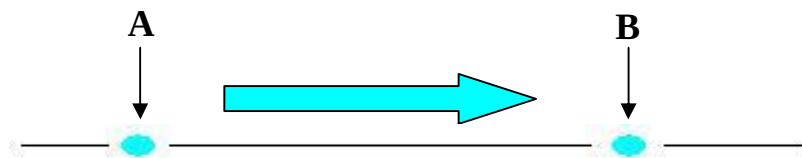


Figura 12. Esboço de deslocamento em canal aberto de um ponto a outro.

A relação neste caso é:

$$H_B(t) = a_0 + a_1 \cdot H_A(t - \Delta t) \quad (1)$$

Onde: $H_B(t)$ é o nível/vazão fluviométrico na estação B no tempo (t);

$H_A(t - \Delta t)$ é o nível/vazão fluviométrico na estação A (a montante de B) no tempo (t-Δt), sendo Δt o tempo necessário para que a água se movimente de A a B;

a_0 e a_1 são constantes a determinar utilizando-se do ajuste dos mínimos quadrados.

É importante saber que este método despreza os erros aleatórios provenientes de variáveis não consideradas na correlação e que podem ser ou não relevantes para explicar a variável independente, portanto tais variáveis passam a pertencer aos resíduos.

O ajuste dos mínimos quadrados minimiza os desvios entre a variável independente e as variáveis explicativas. Aplicando o método de regressão linear múltipla temos:

Considerando um posto qualquer como variável dependente e outros à montante como variáveis independentes, para os pontos $\{(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \mathbf{K}, n\}$, podemos aplicar a seguinte equação linear.

$$z = a + bx + cy \quad (2)$$

Onde: z é a variável dependente e x e y são os outros postos a montante (independentes).

Pelo método dos mínimos quadrados, os coeficientes de regressão a , b e c podem ser encontrados resolvendo as equações a seguir.

$$\left. \begin{aligned} \sum z_i &= a_n + b \sum x_i + c \sum y_i \\ \sum x_i z_i &= a \sum x_i + b \sum x_i^2 + c \sum x_i y_i \\ \sum y_i z_i &= a \sum y_i + b \sum x_i y_i + c \sum y_i^2 \end{aligned} \right\} \quad i = 1, 2, \mathbf{K}, n$$

$$c = \frac{A - B}{\left[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 \right] \left[n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 \right] - \left[n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i) \right]^2} \quad (3)$$

Onde:

$$A = \left[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 \right] \left[n \sum y_i z_i - (\sum y_i)(\sum z_i) \right]$$

$$B = \left[n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i) \right] \left[n \sum x_i z_i - (\sum x_i)(\sum z_i) \right]$$

$$b = \frac{\left[n \sum x_i z_i - (\sum x_i)(\sum z_i) \right] - c \left[n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i) \right]}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{n} \left[(\sum z_i) - (c \sum y_i) - (b \sum x_i) \right] \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{a \sum z_i + b \sum x_i z_i + c \sum y_i z_i - \frac{1}{n} (\sum z_i)^2}{(\sum z_i^2) - \frac{(\sum z_i)^2}{n}} \quad (6)$$

Onde R^2 é o coeficiente de determinação ou variância como é mais conhecido, calculado através da equação (6), o qual compara valores de z estimados e reais e seu valor varia entre 0 e 1. Se for igual a 1, existirá uma correlação perfeita na amostra – não haverá diferença entre os valores de z estimados e os valores reais; r , coeficiente de correlação, é a raiz quadrada da variância.

O cálculo dos coeficientes de regressão linear também pode ser feito utilizando a planilha eletrônica do MSOffice_Excel com a função PROJ.LIN, que calcula além dos coeficientes de regressão o de determinação.

O modelo de previsão de vazão desenvolvido para Marabá utilizou como variáveis explicativas dois postos fluviométricos a montante e a precipitação média da bacia intermediária.

4.4.2.1 Discretização Espacial

Em particular, o posto de Marabá recebe a contribuição significativa do rio Araguaia, de modo que a modelagem baseada no deslocamento de uma partícula de água de um ponto a outro torna-se não muito simples, pois Marabá recebe a onda de cheia combinada dos rios Tocantins e Araguaia. Por outro lado, a inclusão da precipitação como uma variável de entrada no modelo implica em diferentes respostas na vazão quando aumentamos a área da bacia onde é calculada a precipitação média. Com base nessas questões, os postos fluviométricos de Xambioá, Araguatins e Descarreto foram utilizados como pontos de controle para cada trecho dos rios até Marabá, para assim diminuir a área de cálculo da precipitação média, obtendo-se um melhor tempo de percurso da chuva até Marabá. A sub-bacia estudada conforme mostra a figura 2, passou a ser subdividida em mais 4 áreas (figura 13), a área 01 entre Conceição do Araguaia e Xambioá, sub-bacia 02 entre Xambioá e Araguatins, sub-bacia 03 entre Carolina e Descarreto e sub-bacia 04 entre Araguatins/Descarreto e Marabá. Portanto para esta pesquisa o tratamento da precipitação se deu conforme o fluxograma 1.

Assim, o tempo de percurso (Δt) da precipitação média de cada sub-bacia até o posto principal de previsão será definido como o tempo de influência no posto de controle

($P_{(t-\Delta t)}$) mais o tempo de percurso do posto de controle até o posto principal ($Q_{(t-\Delta t)}$). Esses cálculos também foram feitos através da correlação linear, na sequência (onde r é o coeficiente de correlação e P_A é a precipitação na área intermediária):

a) correlacionando de forma simples Carolina e Descarreto para definir o Δt ($r \sim 1$);

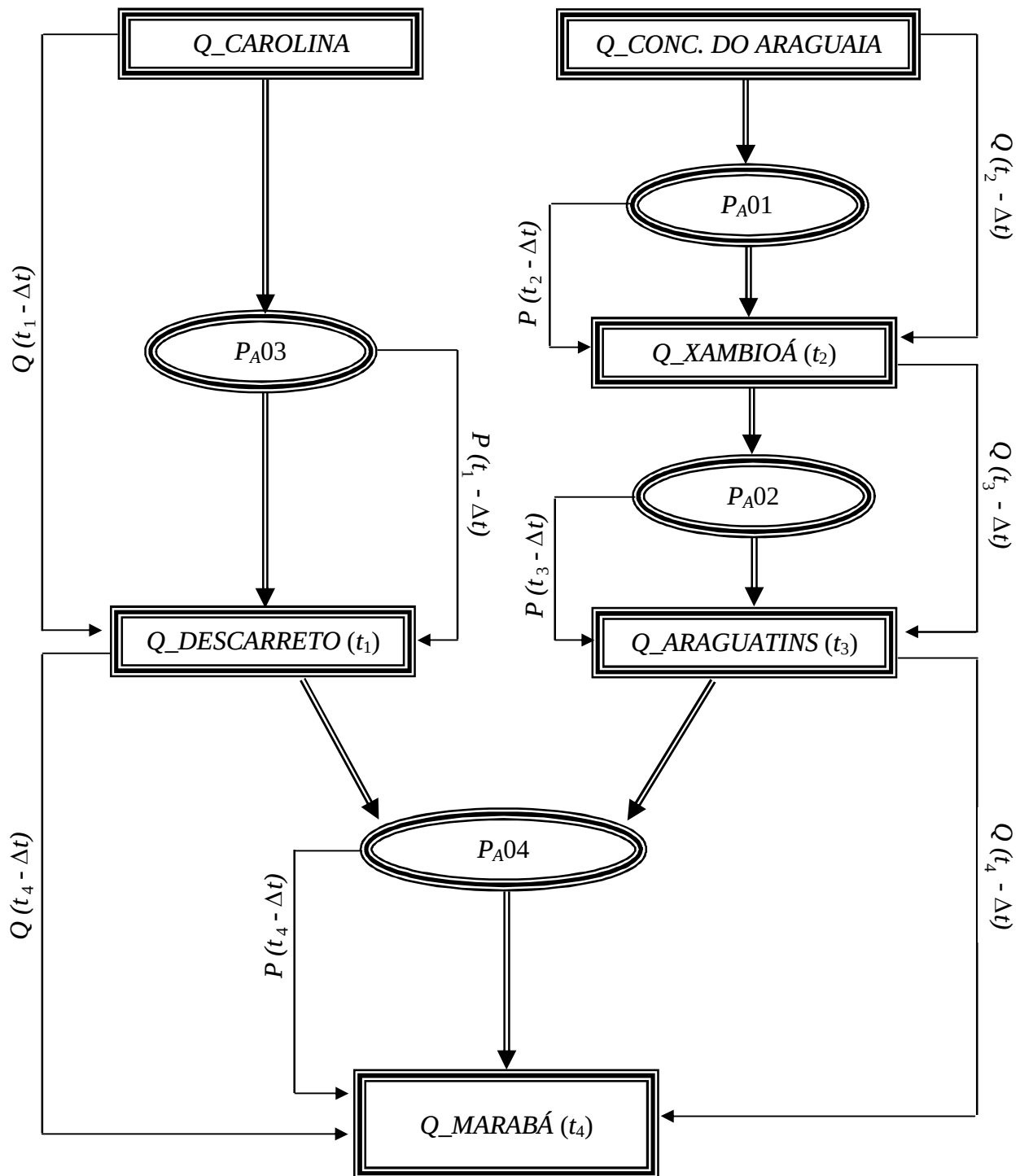
b) definido o Δt entre Carolina e Descarreto inseri-se a precipitação média da Área 03 na correlação que passa a ser múltipla com Carolina e a precipitação média como variáveis independentes e Descarreto como dependente, defasando-se agora somente a precipitação até chegar no coeficiente de correlação mais próximo de 1 ($r \sim 1$) definindo-se o Δt da precipitação até Descarreto;

c) para estabelecer o percurso da P_A 03 até Marabá correlaciona-se Descarreto e Marabá, após definir o Δt entre Descarreto e Marabá soma-se ao Δt encontrado entre a P_A e Descarreto. Esse procedimento é o mesmo para os outros trechos (Área 01, 02 e 04).

As variáveis de entrada do modelo são as vazões de Carolina e Conceição do Araguaia, e as precipitações das Áreas 01, 02, 03 e 04. Assim, também será definido o tempo de percurso entre os respectivos postos de vazão e Marabá através da correlação simples buscando o melhor coeficiente de correlação ($r \sim 1$).



Figura 13. Discretização espacial da sub-bacia estudada.



Fluxograma 1. Representação esquemática do modelo. Onde: Q é vazão, P_A é a precipitação média na Área e $\Delta t = 0, 1, 2, \dots, n$ (dias).

A cheia e a estiagem serão tratadas separadamente; portanto, será desenvolvido um modelo para o período de dezembro a maio e outro para o período de junho a novembro, no intuito de obter melhores resultados no cálculo do tempo de percurso entre um ponto e outro. A resposta da precipitação média na vazão é mais dinâmica na enchente e mais lenta na

estiagem associada ao fato de nos meses chuvosos o solo por estar mais saturado potencializa o escoamento superficial implicando em uma maior e mais rápida contribuição na vazão. Collischonn (2001) diz que à medida que uma maior porcentagem da área atinge a saturação, maior será a geração de escoamento superficial.

A calibração foi feita utilizando-se o período de janeiro de 1999 a dezembro de 2003 e a validação para o período de janeiro de 2004 a maio de 2006. Os períodos de calibração e validação foram em função da maior disponibilidade de dados pluviométricos.

A precipitação média em cada sub-bacia foi calculada pelo método de Thiessen o qual considera a distribuição espacial desuniforme dos postos, mas não leva em conta o relevo da bacia. A metodologia consiste no seguinte: a) ligar os postos por trechos retilíneos; b) traçar linhas perpendiculares aos trechos retilíneos passando pelo meio da linha que liga os dois postos; c) prolongar as linhas perpendiculares até encontrar outra. O denominado polígono de Thiessen é formado pela interseção das linhas, correspondendo à área de influência de cada posto. A precipitação média na sub-bacia é calculada por:

$$P_m = \frac{1}{A} \cdot \sum_{i=1}^n A_i \cdot P_i \quad (7)$$

Onde: A_i = área de influência do posto i ; P_i = precipitação registrada no i ésimo posto; n = é o total de estações pluviométricas e A = área total da bacia.

O método fornece bons resultados em terrenos levemente acidentados, quando a localização e exposição dos pluviômetros são semelhantes e as distâncias entre eles não são muito grandes. Esperam-se resultados satisfatórios com este método em função de declividades muito baixas encontradas na área de estudo, conforme observado no anexo 4.

Levando em consideração a baixa densidade pluviométrica da área modelada, a precipitação média de cada sub-bacia obtida em mm/dia é 100% convertida para vazão (m^3/s) levando-se em consideração a área da sub-bacia e fazendo-se as devidas conversões das unidades, logo desconsiderou-se os efeitos de infiltração, interceptação, entre outros. Então a relação fica:

$$Q_M(t) = a_0 + a_1 \cdot Q_{C,A}(t - \Delta t_{C,A \rightarrow M}) + a_2 \cdot Q_C(t - \Delta t_{C \rightarrow M}) + a_3 \cdot Q_{P_A01}(t - \Delta t_{A01 \rightarrow M}) + \\ a_4 \cdot Q_{P_A02}(t - \Delta t_{A02 \rightarrow M}) + a_5 \cdot Q_{P_A03}(t - \Delta t_{A03 \rightarrow M}) + a_6 \cdot Q_{P_A04}(t - \Delta t_{A04 \rightarrow M}) \quad (8)$$

Onde: $Q_M(t)$ é a vazão em Marabá no tempo (t) ;

$Q_{C.A}(t - \Delta t_{C.A \rightarrow M})$ é a vazão em Conceição do Araguaia no tempo $t - \Delta t_{C.A \rightarrow M}$, sendo $\Delta t_{C.A \rightarrow M}$ o tempo necessário para que a água se movimente de Conceição do Araguaia a Marabá;

$Q_C(t - \Delta t_{C \rightarrow M})$ é a vazão em Carolina no tempo $t - \Delta t_{C \rightarrow M}$, sendo $\Delta t_{C \rightarrow M}$ o tempo necessário para que a água se movimente de Carolina a Marabá;

$Q_{P.A01}(t - \Delta t_{A01 \rightarrow M})$ é a vazão proveniente da precipitação média da Área 01 do tempo $t - \Delta t_{A01 \rightarrow M}$, sendo $\Delta t_{A01 \rightarrow M}$ o tempo necessário para que a água escoe da Área 01 até o canal em Marabá;

$Q_{P.A02}(t - \Delta t_{A02 \rightarrow M})$ é a vazão proveniente da precipitação média da Área 02 do tempo $t - \Delta t_{A02 \rightarrow M}$, sendo $\Delta t_{A02 \rightarrow M}$ o tempo necessário para que a água escoe da Área 02 até o canal em Marabá;

$Q_{P.A03}(t - \Delta t_{A03 \rightarrow M})$ é a vazão proveniente da precipitação média da Área 03 do tempo $t - \Delta t_{A03 \rightarrow M}$, sendo $\Delta t_{A03 \rightarrow M}$ o tempo necessário para que a água escoe da Área 03 até o canal em Marabá;

$Q_{P.A04}(t - \Delta t_{A04 \rightarrow M})$ é a vazão proveniente da precipitação média da Área 04 do tempo $t - \Delta t_{A04 \rightarrow M}$, sendo $\Delta t_{A04 \rightarrow M}$ o tempo necessário para que a água escoe da Área 04 até o canal em Marabá;

As constantes $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ e a_6 são determinadas utilizando-se do ajuste dos mínimos quadrados.

4.4.3 Estatística de Avaliação do Modelo

Para avaliar o desempenho do modelo, serão aplicados testes estatísticos, tais como: erro relativo de previsão, coeficiente de Nash e o erro padrão descritos respectivamente a seguir pelas equações (9), (10) e (11).

$$E_R = \left(\frac{Q_{cal} - Q_{obs}}{Q_{cal}} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (10)$$

$$EP = \sqrt{\frac{1}{n(n-2)} \left[n \sum Q_{cal}^2 - (\sum Q_{cal})^2 - \frac{[n \sum Q_{obs} \cdot Q_{cal} - (\sum Q_{obs})(\sum Q_{cal})]^2}{n \sum Q_{obs}^2 - (\sum Q_{obs})^2} \right]} \quad (11)$$

Onde: Q_{obs} é a vazão observada; Q_{cal} é a vazão calculada; $\overline{Q_{obs}}$ é a vazão média observada; n é o número de dados.

O coeficiente de eficiência introduzido por Nash e Sutcliffe - NS (1970) é a proporção com que o modelo explica a variância das vazões observadas. O coeficiente de NS, tem um valor máximo igual a 1, que corresponde a um ajuste perfeito entre vazões calculadas e observadas. O valor de NS é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de NS supera 0,70, e é considerado aceitável se o valor de NS ficar entre 0,36 e 0,70 (GOTSCHALK E MOTOVILOV, 2000). O erro padrão é uma medida da quantidade do erro da previsão, nesse caso em relação ao máximo valor ocorrido no período.

4.5 PREENCHIMENTO DE FALHAS NOS DADOS

Para as estações de vazão que apresentaram ausência de dados em determinados trechos do período, o preenchimento adotou a metodologia descrita pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE, 1980). Para preencher falhas na estação X , utilizará os postos Y e Z (no mesmo rio e próximos a X) como apoio. Logo, a vazão da estação X do dia i do mês j ($X_{D(i,j)}$), é determinada através da equação.

$$X_{D(i,j)} = \left[\frac{(R_{XY})^2}{SOMY} \cdot Y_{D(iDEF,j)} + \frac{(R_{XZ})^2}{SOMZ} \cdot Z_{D(iDE,j)} \right] \cdot \frac{SOMX}{(R_{XY})^2 \cdot (R_{XZ})^2} \quad (12)$$

Onde: R_{XY} é o coeficiente de correlação entre os postos X e Y ; R_{XZ} é o coeficiente de correlação entre os postos X e Z ; $SOMX$ é a média dos valores mensais registrados em X ; $SOMY$ é a média dos valores mensais registrados em Y ; $SOMZ$ é a média dos valores mensais registrados em Z ; Y_D é o dado diário do posto Y ; Z_D é o dado diário do posto Z ; $iDEF$

é igual a $i + i_{DEFY}$, onde i_{DEFY} é a defasagem entre X e Y ; i_{DE} é igual a $i + i_{DEFZ}$, onde i_{DEFZ} é a defasagem entre X e Z .

No caso da precipitação o preenchimento adotará o Método da Ponderação Regional, de acordo com Bertoni e Tucci (2001), que é sintetizada na equação (13) abaixo.

$$Y = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{X_1}{X_{m1}} + \frac{X_2}{X_{m2}} + \frac{X_3}{X_{m3}} \right) \cdot Y_m \quad (13)$$

Onde: Y é a precipitação do posto a ser estimado; X_1, X_2, X_3 são as precipitações correspondentes ao dia (mês ou ano) que se deseja preencher, observadas em três estações vizinhas; X_{m1}, X_{m2}, X_{m3} são as precipitações médias nas três estações vizinhas; Y_m é a precipitação média do posto a ser estimado.

5 RESULTADOS

Os resultados foram divididos em:

i) Aspectos climatológicos (média para o período base de 1985-2006), que mostra os resultados mensais da vazão, precipitação, valores e intervalos da categorização e padrões atmosféricos;

ii) Composições dos Eventos Extremos de vazão registrada em Marabá, os quais foram selecionados objetivamente pelo método dos percentis. Nestas composições investigam-se os aspectos regionais da precipitação na escala da bacia hidrográfica, bem como a estrutura dinâmica associada aos padrões oceano-atmosfera através dos campos e anomalias mensais de TSM, vento, ROL e circulação troposférica. A análise desses resultados foi focada para as regiões da bacia do rio Tocantins a montante de Marabá, que compreende a região entre 45° e 55°W e 5° e 20°S;

iii) Modelo hidrológico, que mostra os resultados das calibrações e validações dos modelos desenvolvidos para os períodos de enchente e estiagem, a análise de seus respectivos desempenhos assim como suas limitações;

iv) Impactos socioeconômicos da cheia em Marabá, mencionando alguns aspectos da evolução desse processo, o detalhamento das operações realizadas nos atendimentos das comunidades locais impactadas, assim como os custos envolvidos nos estudos de casos das cheias de 2005, 2006 e 2007.

5.1 ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS

5.1.1 Vazão do Rio Tocantins em Marabá-PA

A série de vazão do rio Tocantins utilizada nessa pesquisa é mostrada na figura 14 juntamente com o limite superior e inferior da categoria normal obtida pelo método dos percentis. Ao longo da série de vazão estudada no período de 1978 a 2006 (28 anos) destacam-se claramente as cheias de 1978, 79, 80, 90 e 2004, assim como as estiagens de 1987, 93, 96, 98 e 99. Os extremos observados na série mostram a necessidade de se quantificar o nível de gravidade e ocorrência de um determinado evento por faixas ou categorias de ordem quantílicas, e assim estabelecer limites para um monitoramento adequado das cheias e estiagens.

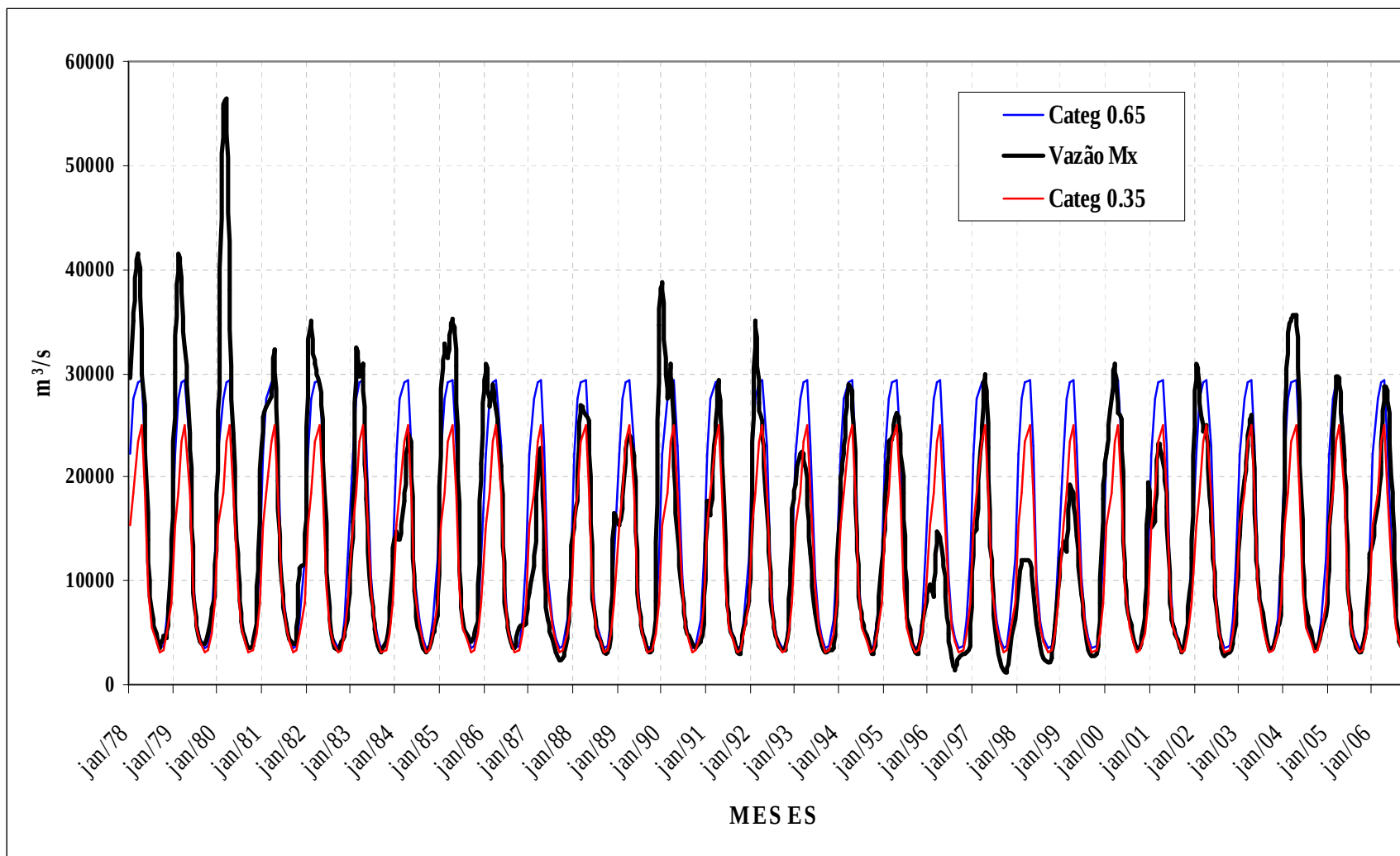


Figura 14. Vazão máxima mensal e limites da categoria normal do rio Tocantins em Marabá. (Série: 1978-2006).

A seleção dos anos para analisar a estrutura dinâmica através das composições foi baseada nos resultados dos limites das categorias resultantes da aplicação da técnica dos percentis na série de vazão. O resultado dos percentis é mostrado na tabela 2, na qual observa-se pela categoria muito acima que os maiores eventos de cheia registram vazões acima de 30.000 m³/s e ocorrem nos meses de verão e início do outono, enquanto que vazões abaixo de 13.000 m³/s estão na categoria muito abaixo. A categoria normal também é mostrada na figura 15 e indica dois períodos com diferentes amplitudes de valores, um período de enchente com grandes amplitudes e um período de vazante com pequenas amplitudes. O período de maior amplitude na vazão corresponde ao período chuvoso na região da bacia que tem início no final da primavera (novembro) e se estende até o início do outono (abril). Portanto os meses de enchente, compreendidos entre novembro e abril, foram selecionados para alcançar os objetivos propostos neste trabalho.

Tabela 2. Valores e intervalos mensais da categorização de vazão (m³/s).

MESES	CATEGORIAS				
	Muito Abaixo	Abaixo	Normal	Acima	Muito Acima
Janeiro	≤ 13934	13935 a 15289	15290 a 22318	22319 a 29957	≥ 29958
Fevereiro	≤ 14085	14086 a 18406	18407 a 27639	27640 a 34644	≥ 34645
Março	≤ 21568	21569 a 23436	23437 a 29132	29133 a 31302	≥ 31303
Abril	≤ 21801	21802 a 24892	24893 a 29286	29287 a 31975	≥ 31976
Mai	≤ 14302	14303 a 18473	18474 a 22924	22925 a 24800	≥ 24801
Junho	≤ 8692	8693 a 9332	9333 a 10460	10461 a 13546	≥ 13547
Julho	≤ 4865	4866 a 5497	5498 a 6160	6161 a 6831	≥ 6832
Agosto	≤ 3324	3325 a 4087	4088 a 4454	4455 a 4665	≥ 4666
Setembro	≤ 2716	2717 a 3174	3175 a 3460	3461 a 3597	≥ 3598
Outubro	≤ 2999	3000 a 3266	3267 a 3672	3673 a 4591	≥ 4592
Novembro	≤ 4157	4158 a 4999	5000 a 6216	6217 a 6984	≥ 6985
Dezembro	≤ 6724	6725 a 7943	7944 a 12227	12228 a 17538	≥ 17539

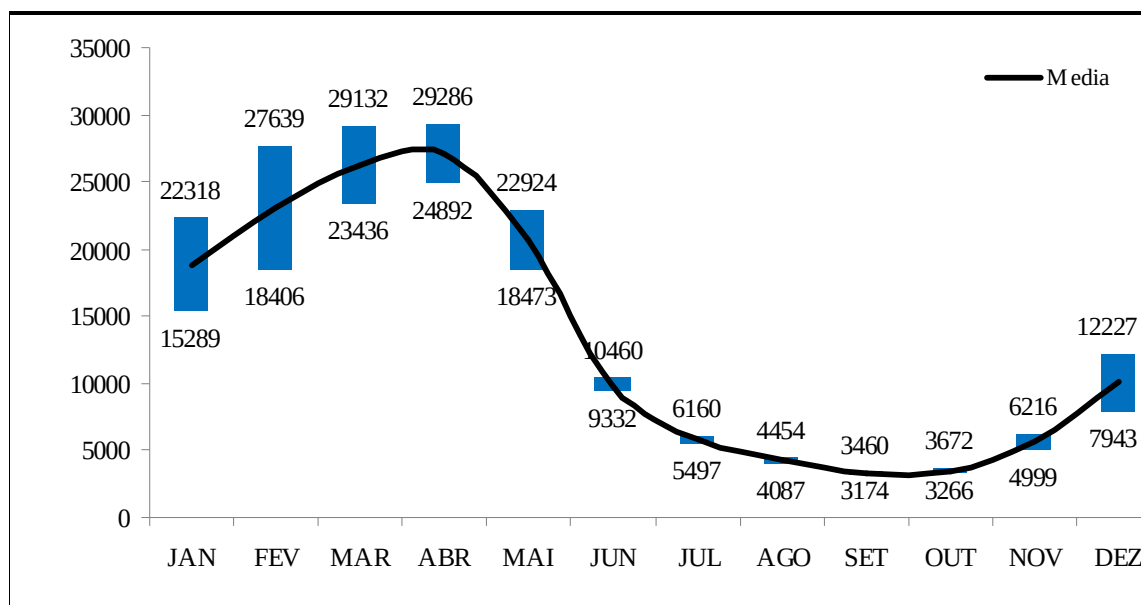


Figura 15. Vazão máxima em m³/s da categoria normal do rio Tocantins em Marabá.

5.1.2 Precipitação Média na Sub-bacia do rio Tocantins

A figura 16 mostra o comportamento médio da precipitação em grande parte da bacia do Tocantins nos meses selecionados, utilizando os limites da categoria normal, no qual observa-se que a estação chuvosa inicia-se em novembro pela parte sul da bacia, com valores entre 150 e 200 mm com um aumento no sentido sul-norte nos meses de dezembro e janeiro (indicado na figura pelas setas). Nota-se que a propagação se intensifica no mês de janeiro com precipitações acima de 350 mm. Segundo Quadro (1994) em média a ZCAS estaciona mais ao norte do continente nos meses de dezembro e janeiro, fato este que possivelmente favorece este comportamento na bacia. Ainda na figura 16, nos meses de Fevereiro, Março e Abril as regiões de máximas chuvas concentram-se mais na parte norte da bacia (indicado na figura), próximo a Marabá, com março sendo o mês de maior precipitação apresentando uma longa faixa de precipitações com valores entre 250 e 400 mm. Nobre e Shukla (1996), Souza et al. (2000) e Rocha (2001) mostram que as regiões de maiores precipitações na Amazônia nos meses de março e abril são moduladas pela ZCIT, já que a ZCAS com o passar do tempo (fevereiro e março) ancora mais para o sul do continente como mostrado por Quadro (1994). Entretanto, Souza e Ambrizzi (2006) mostraram que a interação entre ZCIT e ZCAS resulta em altos índices pluviométricos na Amazônia nos meses de fevereiro e março, sendo indícios de que as máximas precipitações observadas em grande parte da bacia do Tocantins nos meses de fevereiro, março e abril estão associados a atuação conjunta da ZCIT e ZCAS.

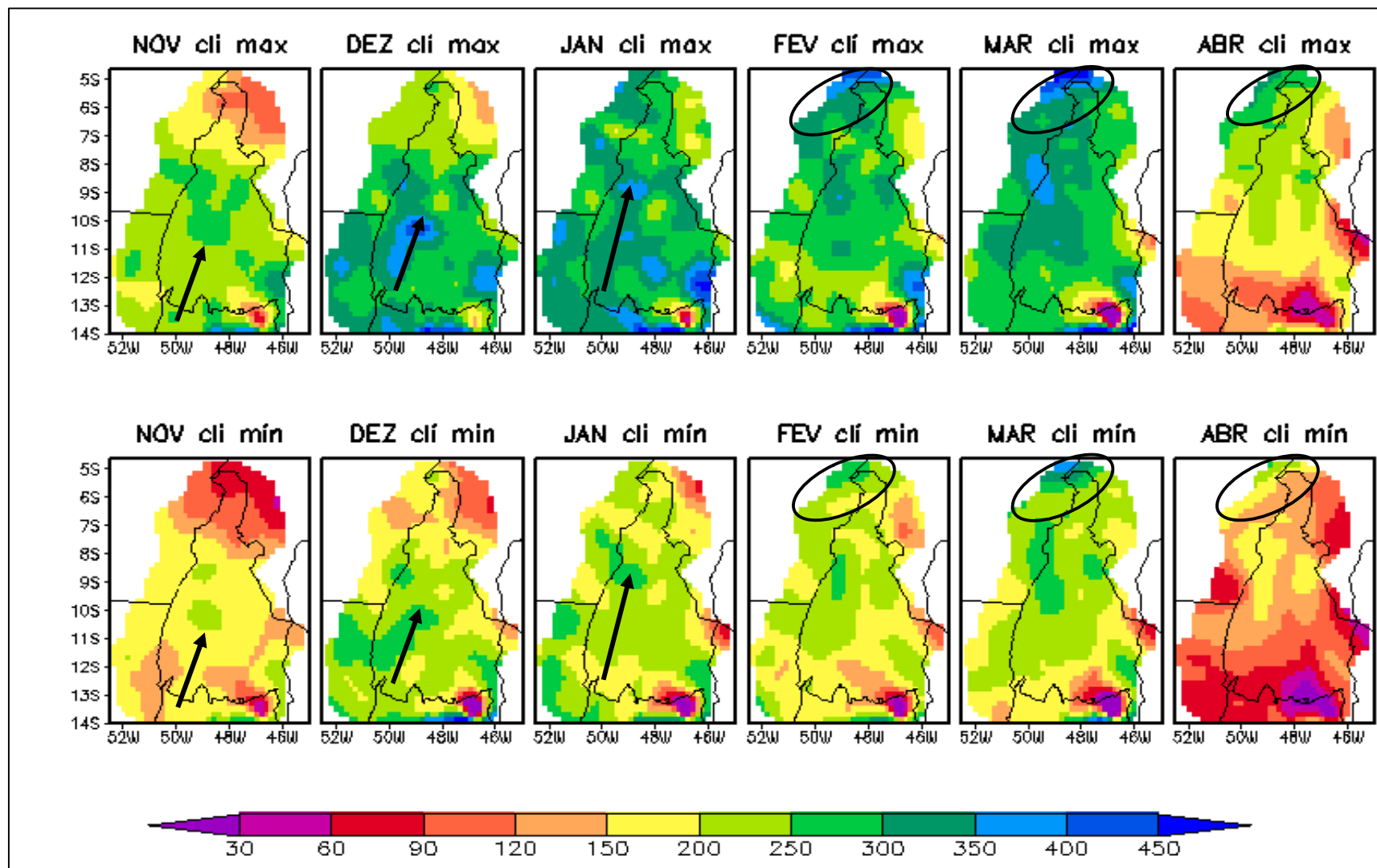


Figura 16. Precipitação média para os limites superior (cli max) e inferior (cli min) da categoria normal para os meses selecionados.

5.1.3 Padrões Atmosféricos da Circulação Geral

Os sistemas de grande escala associados ao comportamento da precipitação, conforme a figura 16, são identificados como padrões atmosféricos climatológicos. Neste item procura-se identificar tais padrões através da análise climatológica de ROL, movimentos troposféricos verticais e campo de vento nos altos e baixos níveis da atmosfera.

A média de ROL para os meses estudados (figura 17) confirma a associação da ZCAS com a precipitação intensa nos meses de novembro, dezembro e janeiro, assim como a associação da ZCIT com a precipitação nos meses de fevereiro, março e abril. Observa-se que os valores de ROL abaixo de 240 W/m^2 indicam as regiões com atividade convectiva e são mais intensas em grande parte do continente sul-americano em relação às regiões oceânicas. Nos meses de novembro, dezembro e janeiro a região com convecção associada à ZCIT está posicionada mais ao norte do equador enquanto que nesses meses a convecção associada a ZCAS estende-se do noroeste do estado do Amazonas ao Atlântico Subtropical, próximo à costa do sudeste do Brasil; já nos meses de fevereiro, março e abril a ZCIT atinge a sua posição sul climatológica (5°S) e provoca os altos índices pluviométricos no norte da bacia do Tocantins (próximo a Marabá). Nos meses de fevereiro e março os baixos valores de ROL sobre os Estados de Goiás, Distrito Federal e Minas Gerais mostram uma possível atuação da ZCAS; essa mínima ocorrência de ZCAS no início do outono do HS é relatada por Souza e Ambrizzi (2006), porém esse comportamento não é observado no mês de abril, logo, o resultado de ROL também indica que a vazão máxima ocorrida no fim de março e início de abril no rio Tocantins está associada a essa interação.

O movimento vertical no sentido meridional (célula de Hadley), conforme observado na figura 18, mostra o ramo ascendente (sinal negativo de omega) da célula de Hadley estabelecido entre 25°S e 5°N ; portanto na região da bacia (destaque) o movimento vertical é favorável à formação de nuvem e, conseqüentemente, à ocorrência de precipitação que gera o aumento da vazão do rio Tocantins, em Marabá. No mês de abril, na baixa troposfera há um sinal de movimento descendente na parte sul da bacia; este comportamento desfavorável à formação de nuvem é um dos fatores que provocam a diminuição da precipitação neste trecho da bacia, conforme figura 16, e, conseqüentemente, o início da diminuição da vazão.

A circulação em altos níveis (figura 19) mostra um centro anticiclônico no oeste da América do Sul também conhecido como Alta da Bolívia (AB) assim como um cavado corrente abaixo, sobre a região nordeste do Brasil; esse comportamento é observado nos

meses de verão. Nos meses de dezembro e janeiro a AB mostra-se mais intensa e em janeiro e fevereiro o cavado associado à AB tende a uma circulação ciclônica (Vórtice Ciclônico - VC). Esse é um padrão de circulação característico dos meses de verão do Hemisfério Sul, os quais são importantes contribuintes para o estabelecimento da ZCAS e, conseqüentemente, favoráveis ao aumento da precipitação na cabeceira da bacia do rio Tocantins, região norte de Goiás, nordeste do Mato Grosso e sul do Tocantins, provocando o aumento da vazão na bacia.

Na baixa troposfera (figura 20) observa-se a entrada de umidade trazida pelos ventos alísios do Oceano Atlântico Tropical para a Amazônia e nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro há um giro desse vento para sudeste no leste da Cordilheira dos Andes, contribuindo para a convergência de umidade na região da ZCAS; esse comportamento do vento em baixos níveis é conhecido como Jato de baixos Níveis (JBN) (MARENGO et al, 2004) e é uma característica da circulação de mesoescala na América do Sul. Ressalta-se também a borda oeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul, aproximadamente em 30°S e 30°W, que contribui para a convergência do ar tropical (JBN) com o extratropical gerando uma região de instabilidade entre as duas massas, constituindo mais um fator favorável à ZCAS.

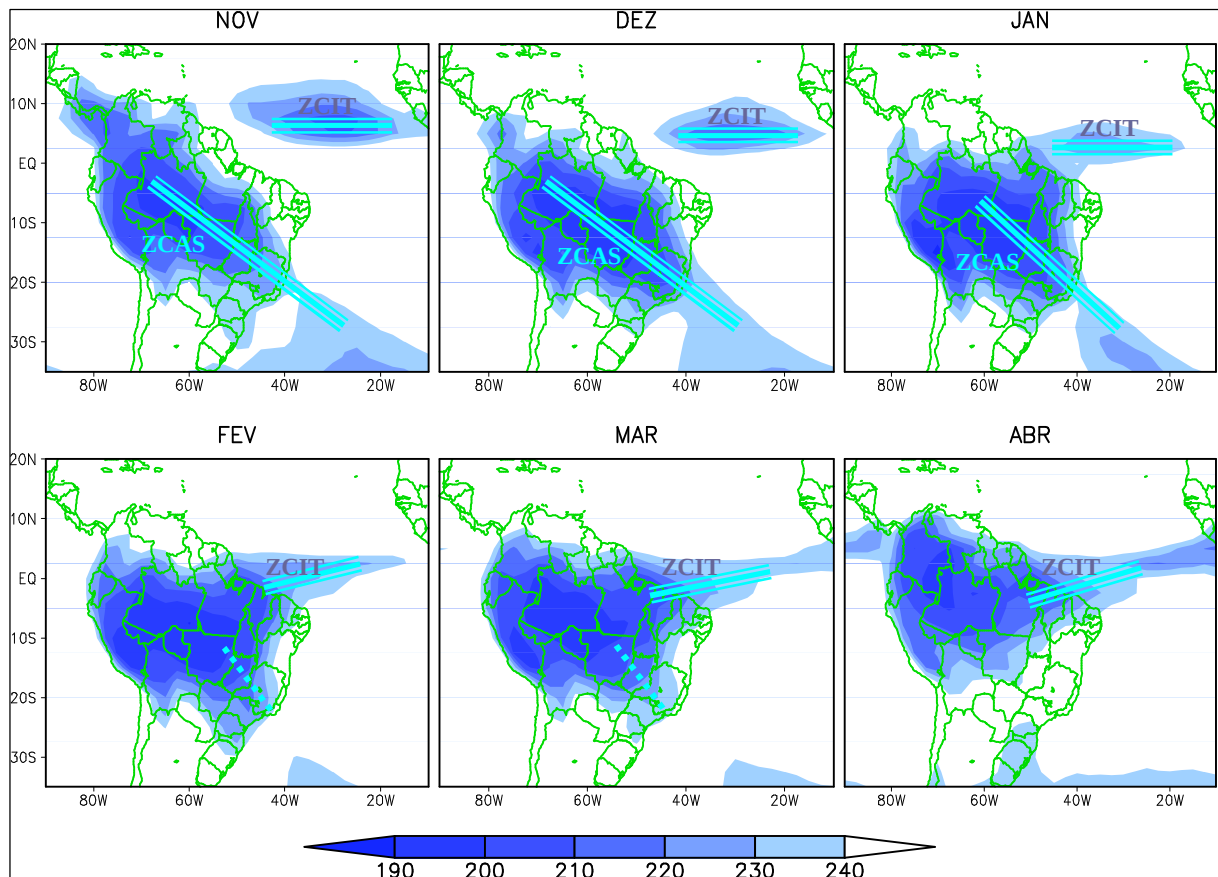


Figura 17. Média mensal de ROL em W/m^2 .

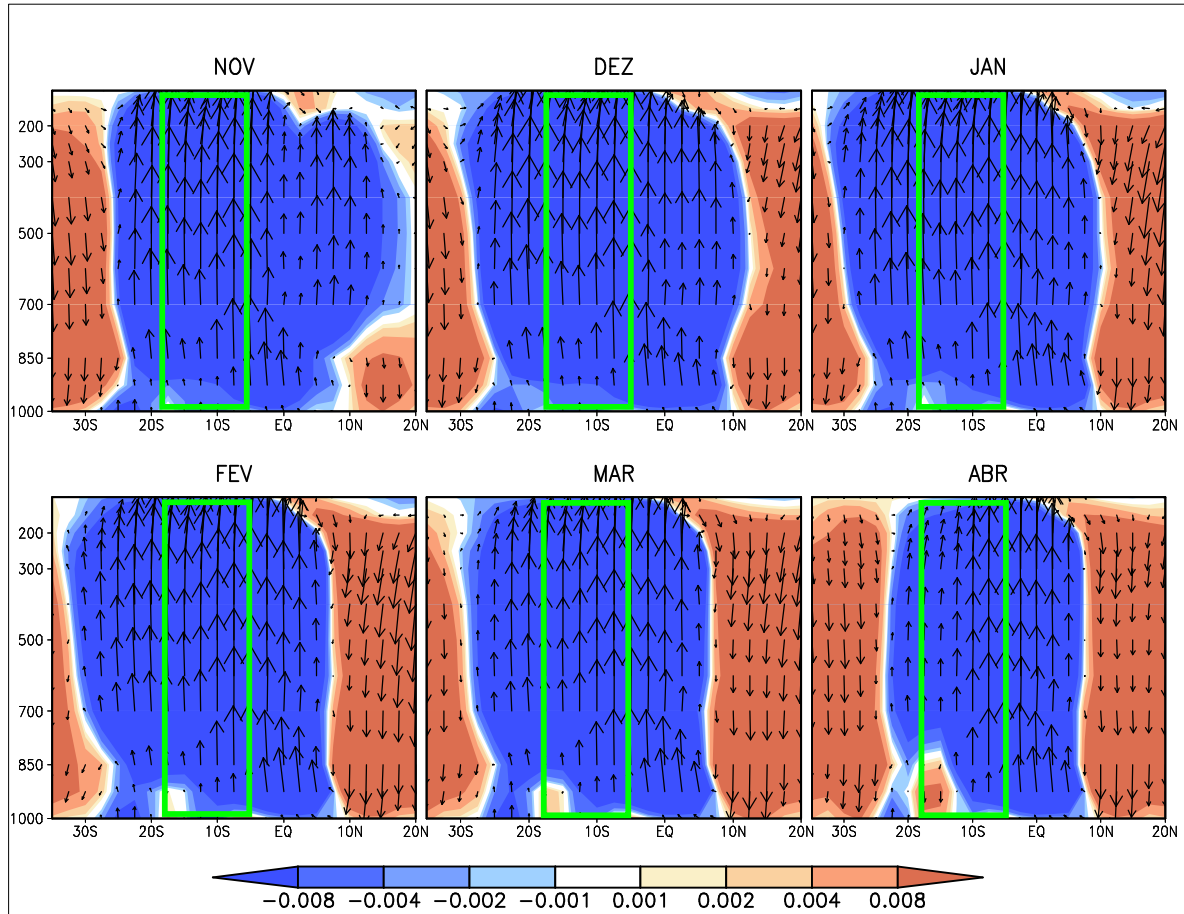


Figura 18. Movimento vertical (Ω) em hPa.s^{-1} , corte meridional em 48W. Destaque para o trecho sobre a bacia.

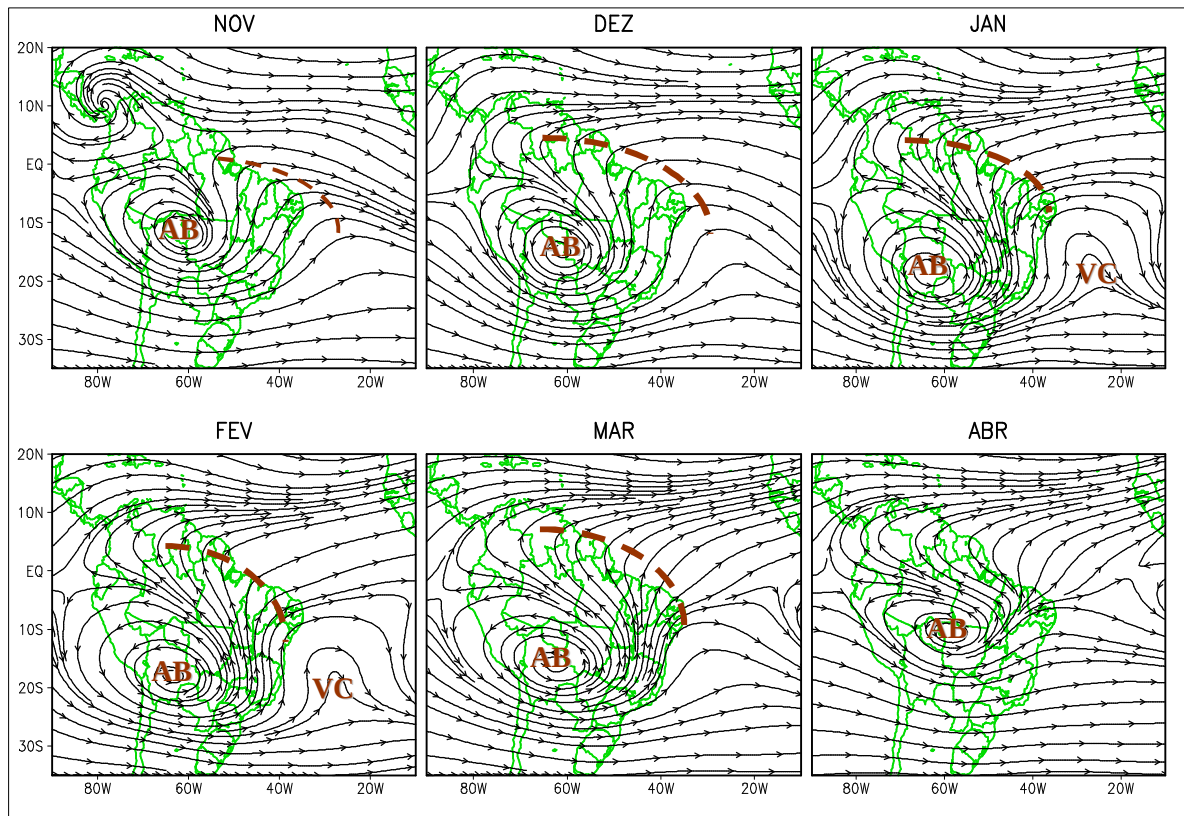


Figura 19. Linhas de corrente em 200 hPa.

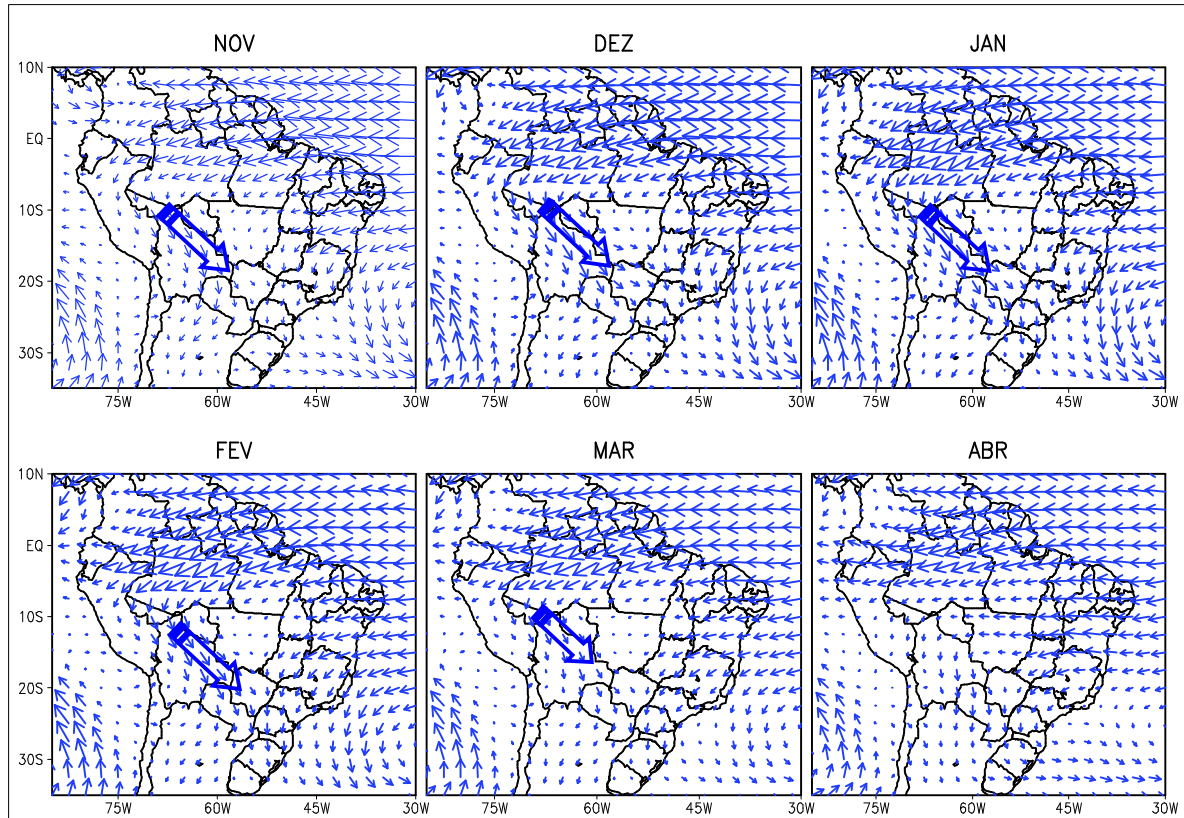


Figura 20. Vento em 850 hPa.

5.2 COMPOSIÇÃO DOS EVENTOS EXTREMOS DE VAZÃO

Com base nos limiares mostrados na tabela 2 e na metodologia descrita no capítulo 4.3, definiu-se os anos para as composições representativas dos cenários com vazão na categoria acima/muito acima do normal e vazão abaixo/muito abaixo do normal, como pode-se observar nas tabelas 3 e 4. Portanto, as composições analisadas representam a média de todos os anos listados nas tabelas 3 e 4, as quais são investigadas separadamente para cada mês (novembro a abril) do período de cheia do rio Tocantins.

Tabela 3. Anos com vazão acima e muito acima para os meses estudados.

Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril
1985	1985	1985	1985	1985	1985
1989	1989	1986	1990	1990	2004
1992	1992	1990	2002	2000	2005
1999	1999	2002	2004	2004	
2000	2000	2004		2005	
2001	2001				

Tabela 4. Anos com vazão abaixo e muito abaixo para os meses estudados.

Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril
1990	1986	1987	1987	1987	1987
1996	1990	1996	1989	1989	1989
1997	1995	1997	1996	1993	1993
2002	1996	1998	1997	1996	1996
	1997	1999	1998	1998	1998
	2002	2001	1999	1999	1999
	2004	2003	2001	2001	2001
		2005	2006	2006	
		2006			

5.2.1 Precipitação na Bacia

Os eventos selecionados nas tabelas 4 e 5, ou seja, extremos da vazão do rio Tocantins em Marabá, estão diretamente ligados ao comportamento da precipitação na bacia a montante de Marabá; portanto, as primeiras análises das composições mostram as categorias de precipitação que resultaram nas vazões extremas.

⇒ Eventos de Vazão na Categoria Acima e Muito Acima.

A figura 21 mostra as composições mensais das anomalias da precipitação categorizada sobre a bacia do rio Tocantins, sendo que foi analisada a média da chuva nos meses selecionados na tabela 4, com defasagem (lag) 0, plotadas no painel inferior da figura 21 e também a média da chuva, nos correspondentes meses anteriores (lag -1), plotadas no painel superior da figura 21. Em geral, observa-se que em grande parte da bacia a precipitação ficou dentro da categoria acima ou muito acima do normal, sendo este comportamento da precipitação fundamental para o registro acima do normal da vazão em Marabá.

No mês de novembro observou-se uma extensa faixa de precipitação na categoria acima, abrangendo a região entre o sul do estado do Tocantins até regiões próximas ao município de Conceição do Araguaia (7°S), destacando-se um pequeno núcleo da categoria muito acima na fronteira do sudoeste do Tocantins como o nordeste do Mato Grosso. A composição do mês anterior (OUT a) mostra que as precipitações intensas na cabeceira da bacia iniciaram ainda no mês de outubro com chuvas na categoria acima na região sul e sudeste do Tocantins e na parte central estendendo-se ao sudeste do Pará.

A composição do mês de dezembro mostrou que a vazão acima do normal em Marabá foi proporcionada por chuvas na categoria acima e muito acima registrada por toda a parte da bacia estudada. Os maiores índices pluviométricos classificados na categoria muito

acima foram observados principalmente nas regiões centro-leste e leste do Estado do Tocantins, outros pontos muito acima são observados no norte e sul do estado. Os altos índices pluviométricos ocorreram desde o mês anterior (NOV a) onde, com exceção das regiões próximas a Marabá, a bacia registrou chuvas na categoria acima. Portanto, o comportamento da precipitação acima do normal persistente por 2 meses consecutivos provocou vazões acima de 12.300 m³/s do rio Tocantins no mês de dezembro, em Marabá.

A composição do mês de janeiro mostra grande parte da bacia com precipitações na categoria acima, assim como a precipitação no mês anterior (DEZ a), onde observa-se algumas áreas com chuva na categoria muito acima (destaque na figura).

O mês de fevereiro mostrou-se acima do normal nas regiões próximas a Marabá e nas periferias da bacia; em grande parte da região central do estado do Tocantins a precipitação comportou-se dentro do normal. Porém, observando o mês anterior (JAN a) percebe-se que a precipitação foi mais intensa em relação ao mês de fevereiro, o qual registrou vazão acima do normal. Portanto, a chuva acima do normal durante os dois meses consecutivos provocou os altos valores de vazão em Marabá.

Nos meses de março e abril as composições resultaram em precipitações com maior variabilidade espacial, observando-se chuvas indo da categoria muito acima até a categoria abaixo do normal, o mês de março registrou as menores precipitações seguido do mês de abril. Porém ao analisar o comportamento dos meses anteriores ao selecionados (FEV a e MAR a) percebe-se que a precipitação teve um comportamento favorável a altos valores de vazões, com algumas regiões (destaque na figura) com chuvas na categoria muito acima. Logo, esse comportamento favoreceu a vazão acima do normal nos meses de março e abril.

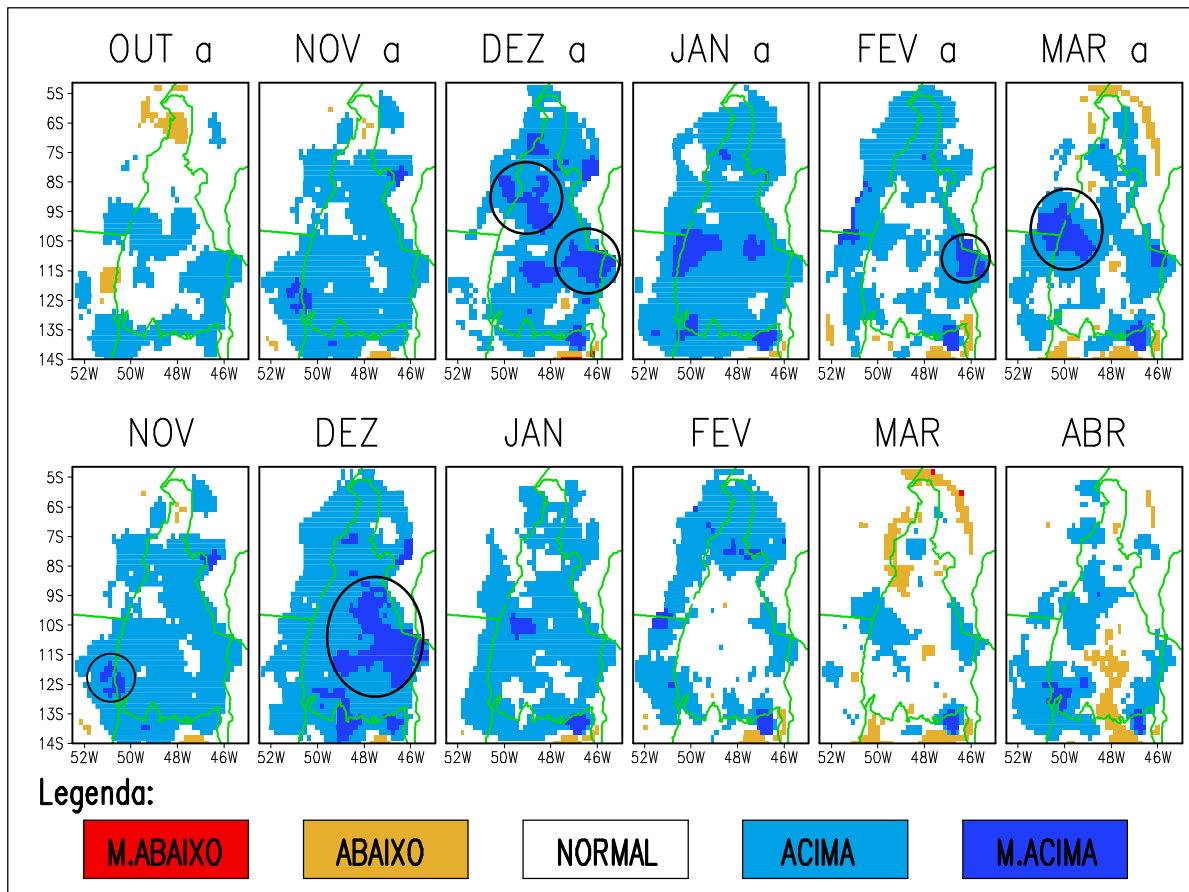


Figura 21. Composição das anomalias de precipitação categorizada sobre a bacia do rio Tocantins para os anos com vazão acima/muito acima do normal. As figuras do painel inferior representam a média dos meses selecionados na tabela 4 (lag 0), enquanto que as do painel superior correspondem aos meses anteriores (lag -1).

⇒ Eventos de Vazão na Categoria Abaixo e Muito Abaixo.

No resultado das composições mensais das anomalias de precipitação categorizada (figura 22) para os anos mostrados na tabela 5 durante os meses com lag 0 e lag -1, observa-se que em grande parte da bacia a precipitação ficou dentro da categoria normal ou abaixo, sendo este comportamento da precipitação fundamental para o registro abaixo do normal da vazão em Marabá.

No mês de novembro as composições resultaram em uma extensa faixa de precipitação na categoria abaixo, abrangendo a região entre o sudeste do estado do Tocantins, passando pelo centro-leste até o oeste na fronteira com o sudeste do Pará; nas regiões próximas ao município de Conceição do Araguaia (7,5°S), destaca-se um pequeno núcleo da

categoria muito abaixo no sudoeste do Tocantins. A composição do mês anterior (OUT a) mostrou maior variabilidade com precipitações indo da categoria abaixo até a categoria acima.

A composição do mês de dezembro mostrou que a vazão abaixo do normal em Marabá foi proporcionada por chuvas na categoria abaixo principalmente no lado oeste da bacia, outros pontos isolados da categoria normal foram observados no sul, sudeste e leste; nas demais áreas a precipitação teve um comportamento dentro da categoria normal. Os baixos índices pluviométricos ocorreram desde o mês anterior (NOV a) principalmente no sul do Tocantins e nas regiões próximas a Conceição do Araguaia e Carolina (7,5°S). Portanto, o comportamento normal e abaixo do normal da precipitação, persistente por 2 meses consecutivos, provocou vazões abaixo de 7.900 m³/s no rio Tocantins no mês de dezembro.

A composição do mês de janeiro e do mês anterior (DEZ a) mostra grande parte da bacia com precipitações na categoria normal e algumas regiões na categoria abaixo. Este comportamento foi suficiente para ocorrência de vazões abaixo do normal.

O mês de fevereiro mostrou-se abaixo do normal nas regiões que vão do norte do Tocantins ao centro-sul do estado; o lado oeste da bacia também registrou precipitações dentro da categoria abaixo. Observa-se pela figura 22 que as regiões sudoeste e sudeste do Tocantins registram precipitações abaixo do normal desde o mês anterior (JAN a), contribuindo também para os baixos valores de vazão em Marabá no mês de fevereiro.

O mês de março mostrou grande parte da bacia com precipitações dentro do normal, chegando a ser observado precipitações acima do normal em algumas regiões, porém, a composição do mês anterior (FEV a) mostra um comportamento abaixo do normal em diversas regiões na bacia (destaque na figura) o qual foi primordial para o resultado de vazão abaixo do normal em Marabá no mês de março, apesar de ser um mês com chuvas dentro do normal.

A composição do mês de abril mostrou precipitações nas regiões sul, sudoeste, sudeste e oeste na categoria abaixo. O mês anterior (MAR a) comportou-se com maior variabilidade espacial da precipitação em relação ao mês de abril, porém em grande parte da bacia a chuva esteve dentro da categoria normal.

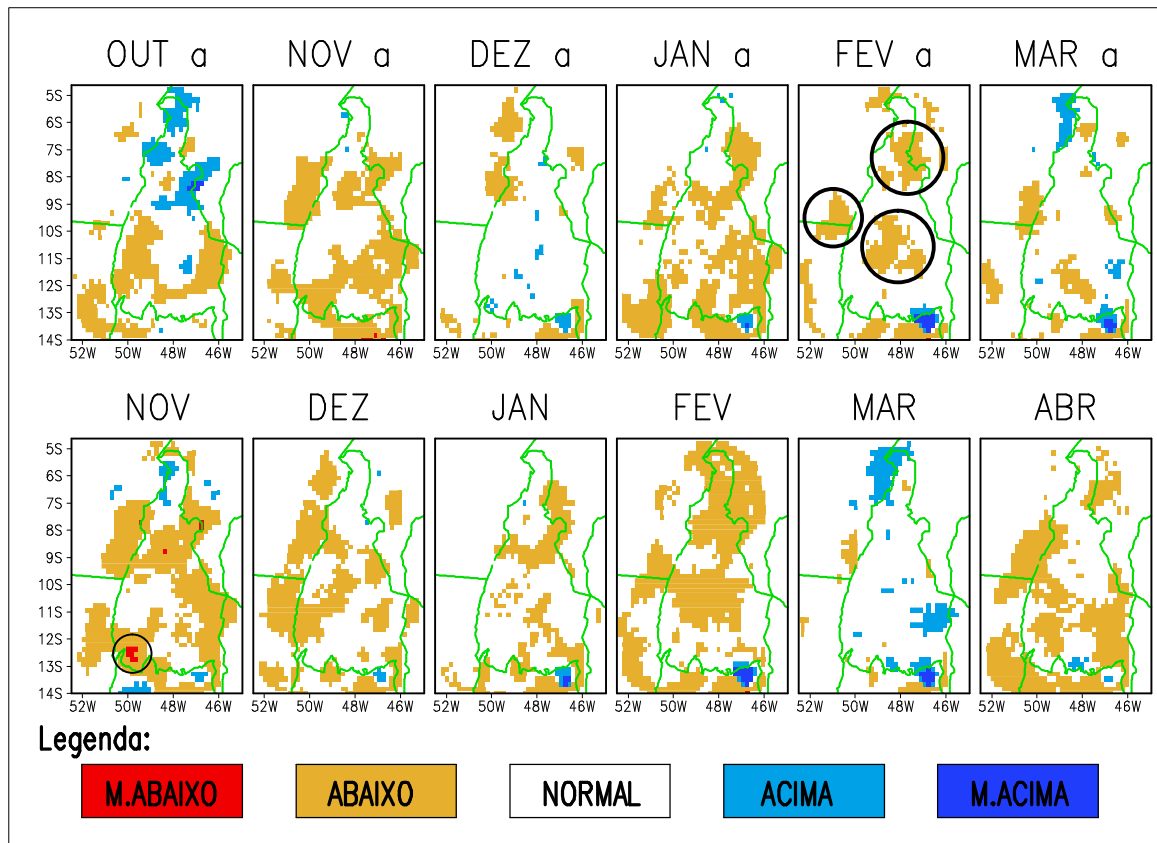


Figura 22. Composição das anomalias de precipitação categorizada sobre a bacia do rio Tocantins para os anos com vazão abaixo/muito abaixo do normal. As figuras do painel inferior representam a média dos meses selecionados na tabela 4 (lag 0), enquanto que as do painel superior correspondem aos meses anteriores (lag -1).

5.2.2 Estrutura Dinâmica

Neste item são mostradas as composições mensais das variáveis oceânicas-atmosféricas para gerar um diagnóstico sobre a estrutura dinâmica da atmosfera e entender o comportamento dinâmico favorável aos extremos de vazão associados à ocorrência de precipitação anormalmente abundante na bacia do rio Tocantins, como mostrado no item 5.2.1. As análises foram feitas com ênfase nas regiões que apresentaram anomalias com significância estatística de 95% de nível de confiança segundo o test- t .

⇒ Eventos da Categoria Acima e Muito Acima.

Na figura 23 observa-se que a composição de TSM mostra o Pacífico Tropical com uma grande área de anomalias negativas principalmente nos meses de novembro, dezembro e janeiro, com uma área anômala bem reduzida nos meses de fevereiro e março,

mostrando que o fenômeno La Niña tem uma importante contribuição para o aumento da precipitação na bacia do Tocantins, através da alteração do ramo ascendente da célula de Walker sobre as regiões da Amazônia oriental, como pode ser observado na figura 24. Por outro lado, a TSM do Atlântico Sul, nas regiões entre 20° e 30° S, mostrou um comportamento típico que é observado durante a ocorrência de ZCAS, ou seja, águas mais frias que foram observadas principalmente nos meses de novembro, dezembro, fevereiro e março. Segundo Robertson e Mechoso (2000), a intensificação da ZCAS em escala interanual coincide com anomalias negativas de TSM ao norte de 40°S e sugerem que a nebulosidade associada a este sistema faria com que menor intensidade de radiação de onda curta incidisse sobre o oceano, intensificando as anomalias negativas de TSM. E para Carvalho et al. (2004) e Ferreira et al. (2004) existe uma maior frequência de precipitação extrema sobre a parte continental da ZCAS associada a períodos neutros e de La Niña quando comparado à ZCAS oceânica. Outros trabalhos (CHAVES; NOBRE, 2004 e CHAVES; SATYAMURTY, 2006) mostram que durante o episódio de ZCAS as águas superficiais na região deste sistema são mais frias. As águas mais aquecidas do Atlântico equatorial nos meses de fevereiro e março estão associadas à ocorrência da ZCIT durante esses meses. As anomalias do mês de abril são pouco significativas, conforme observado na figura 23.

Na composição dos movimentos verticais no sentido zonal (figura 24, célula de Walker), com vetores mostrando a circulação resultante da composição e as áreas coloridas as respectivas anomalias de omega, observa-se que a corrente ascendente nas regiões próximas a Marabá (destaque na figura) durante o mês de novembro são menos intensas (sinal positivo) a partir do nível de 850 hPa até o topo da troposfera, enquanto que próximo a superfície as anomalias negativas indicam movimentos ascendentes mais intensos que a média. Um comportamento inverso ao mês de novembro é observado no mês de janeiro; no mês de dezembro as anomalias mostram uma alternância ao longo da troposfera com sinais negativo e positivo da superfície ao topo, respectivamente (figura 24). Nos meses de fevereiro, março e abril (figura 24) as anomalias negativas indicam movimentos ascendentes mais intensos da superfície até os níveis próximos de 500 hPa, na região próxima a Marabá (destaque na figura). Essas alterações nos ramos ascendentes e descendentes da célula de Walker estão associadas, principalmente, aos padrões anômalos de TSM observados sobre o Oceano Pacífico (La Niña).

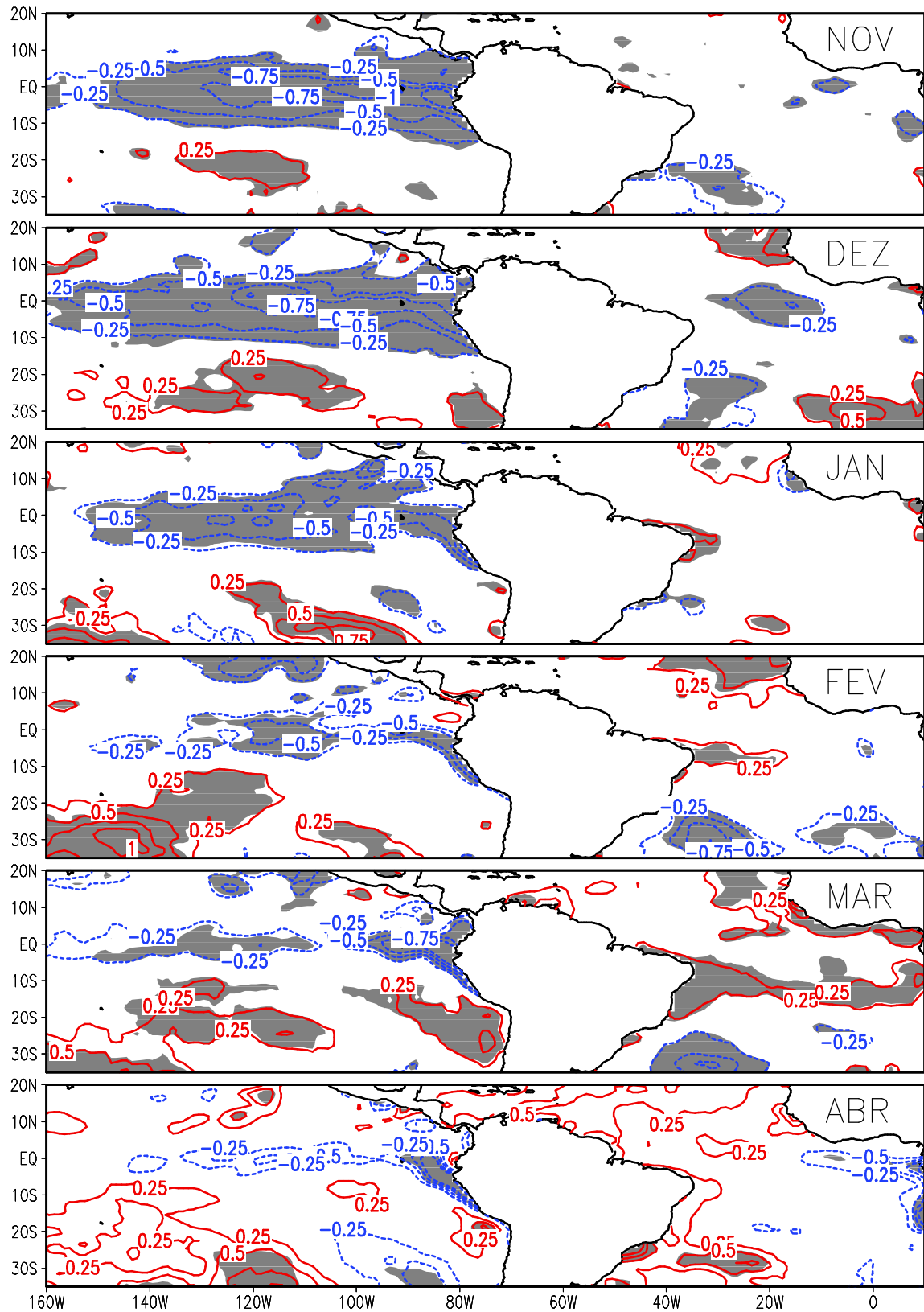


Figura 23. Composição mensal das anomalias de TSM ($^{\circ}\text{C}$) para todos os anos com vazão nas categorias acima e muito acima, durante os meses de novembro a abril (lag 0). As regiões cinzas indicam anomalias com significância estatística de 95%.

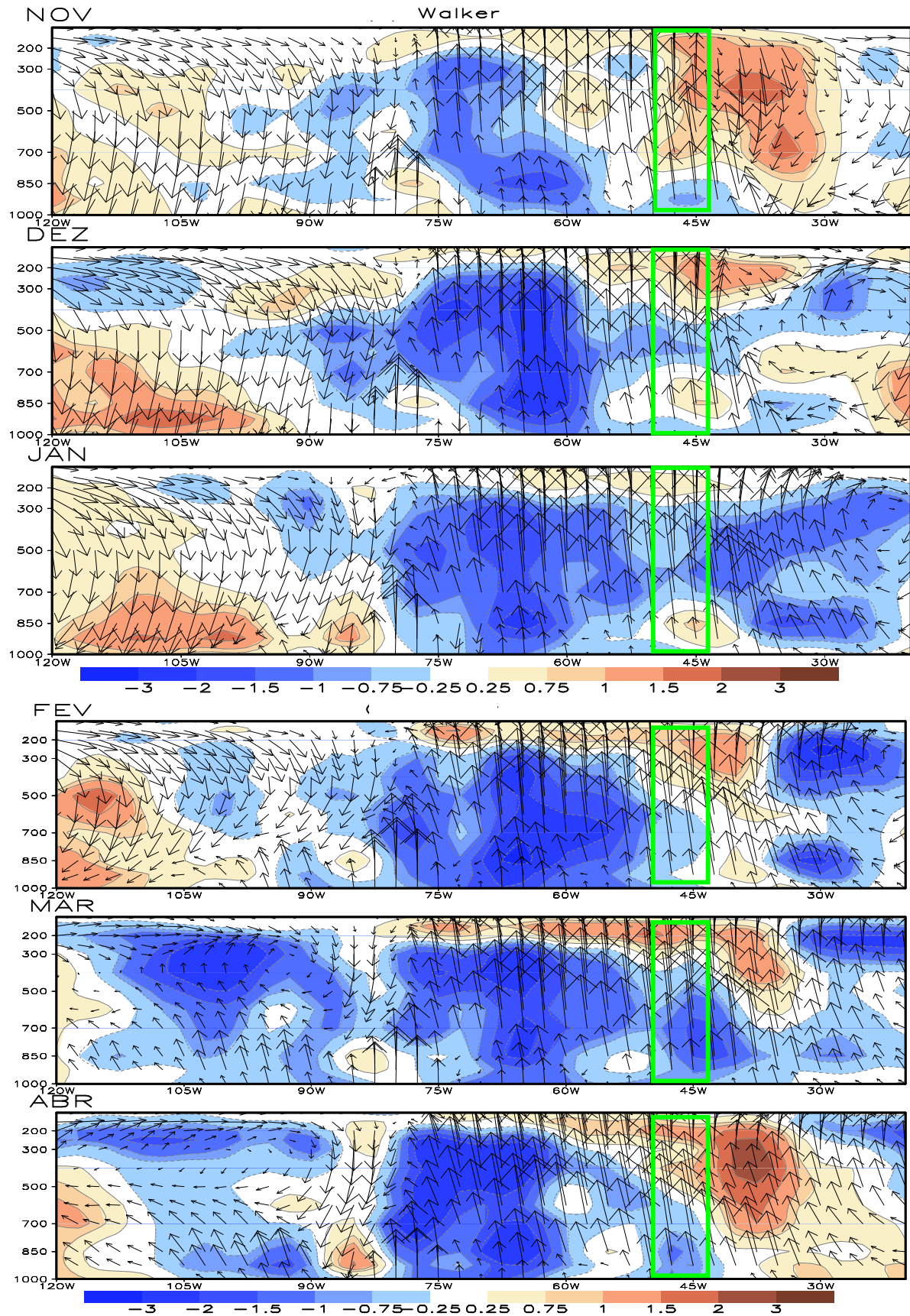
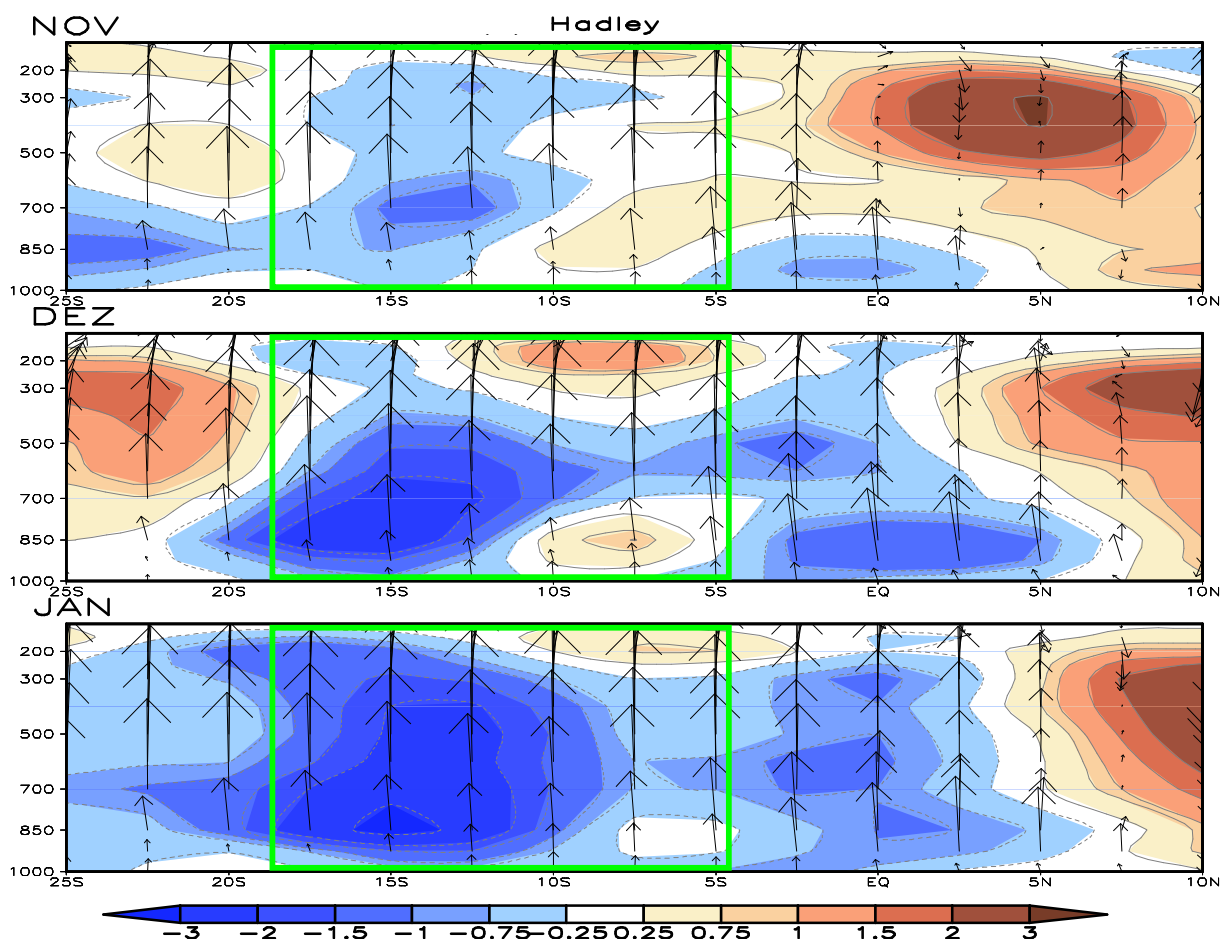


Figura 24. Composições mensais do movimento vertical, corte zonal associado à célula de Walker, para os anos com vazão na categoria acima e muito acima, durante os meses de Novembro a Abril (lag 0). Os contornos sombreados coloridos indicam as anomalias de omega.

A figura 25 mostra o movimento vertical no sentido meridional (associado a célula de Hadley) ao longo de 48°W . As anomalias negativas/positivas indicam que os movimentos ascendentes/descendentes foram mais intensos que a média na região da bacia (destaque na figura). Observa-se que nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro os movimentos ascendentes são mais intensos (anomalia negativa) em torno de 15°S , região da cabeceira da bacia do rio Tocantins, esse comportamento é favorável ao desenvolvimento de nuvens, precipitação e conseqüentemente ao aumento da vazão. No mês de março a intensificação do movimento ascendente em torno de 15°S é limitada até a média troposfera e no mês de abril esse comportamento não é mais observado. Nas regiões próximas a Marabá (5°S) o sinal anômalo é favorável à precipitação a partir do mês de dezembro e mais intenso nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril.



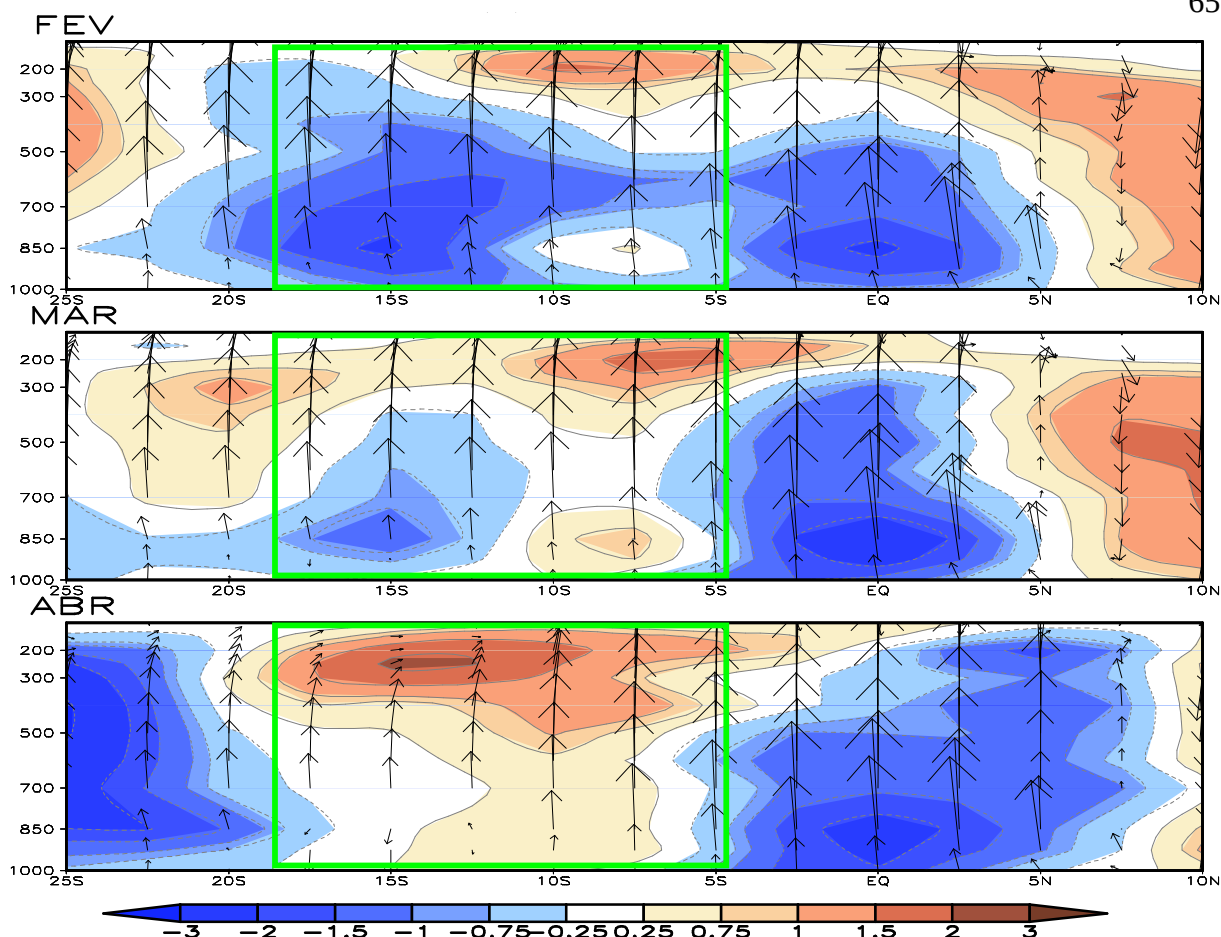


Figura 25. Composições mensais do movimento vertical, corte meridional associado à célula de Hadley ao longo de 48°W, para os anos com vazão na categoria acima e muito acima, durante os meses de novembro a abril (lag 0). Os contornos sombreados coloridos indicam as anomalias de omega.

Os resultados da composição de ventos em baixos e altos níveis, mostrados na figura 26, são coerentes com os padrões atmosféricos favoráveis aos sistemas precipitantes nas regiões de influência da vazão em Marabá. Na alta troposfera é observado uma intensificação da Alta da Bolívia e uma ondulação menos intensa do cavado sobre o continente nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. Nos meses de março e abril o cavado passa a ter posição ao norte do equador e sobre o litoral do nordeste do Brasil configura-se uma região de difluência dos ventos, a qual associa-se a manifestação intensa da ZCIT nesses meses. Deve-se ressaltar que, principalmente nos meses de novembro, dezembro e março a Alta da Bolívia posiciona-se a leste de sua posição média. Quadro (1994) mostra que as variações na localização do centro da Alta da Bolívia e do vórtice (ou cavado) sobre a Região Nordeste podem influenciar no posicionamento da ZCAS. Experimentos com o *MCGA CPTEC/COLA* feitos por Chaves (2003) mostram que a intensificação da ZCAS sobre latitudes mais ao norte da sua posição climatológica ocorre quando a Alta da Bolívia apresenta-se intensificada e a leste de sua posição climatológica e o Cavado do Nordeste está

deslocado para latitudes mais ao norte. Portanto, o comportamento na alta troposfera é consistente com os altos índices pluviométricos observados na composição da precipitação dos anos com vazão categorizada como acima e muito acima do normal (figura 21).

No nível de 850 hPa (figura 26) as regiões preenchidas na cor cinza representam as anomalias com significância estatística de 95%, os vetores em preto são resultantes da composição média do campo mensal e os vetores vermelhos representam as anomalias. Os resultados mostram que o jato canalizado pelos Andes (JBN) passa a ter um sentido NW-SE mais acentuado para leste (anomalias) intensificando a entrada do ar úmido vindo da Amazônia nas regiões centro-oeste e sudoeste do Brasil; esse comportamento é mais intenso nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, quando observa-se uma região de convergência do lado leste do jato, com a borda noroeste da Alta semi-permanente do Atlântico Sul em torno de 20°S. Segundo Kodama (1993) a ZCAS está associada à intensa fonte de calor diabático e umidade da Amazônia e se forma quando o escoamento de ar quente e úmido, em baixos níveis, flui em direção às latitudes subtropicais ao longo da periferia oeste da Alta do Atlântico Sul e quando a corrente de jato encontra-se em latitudes subtropicais (30°S - 35°S). Chaves e Cavalcanti (2001) mostram que o posicionamento da ZCAS para o norte da sua posição climatológica está associado, entre outros fatores, à mudança no padrão de escoamento em baixos níveis, envolvendo o transporte de umidade da Amazônia para o sul do nordeste brasileiro.

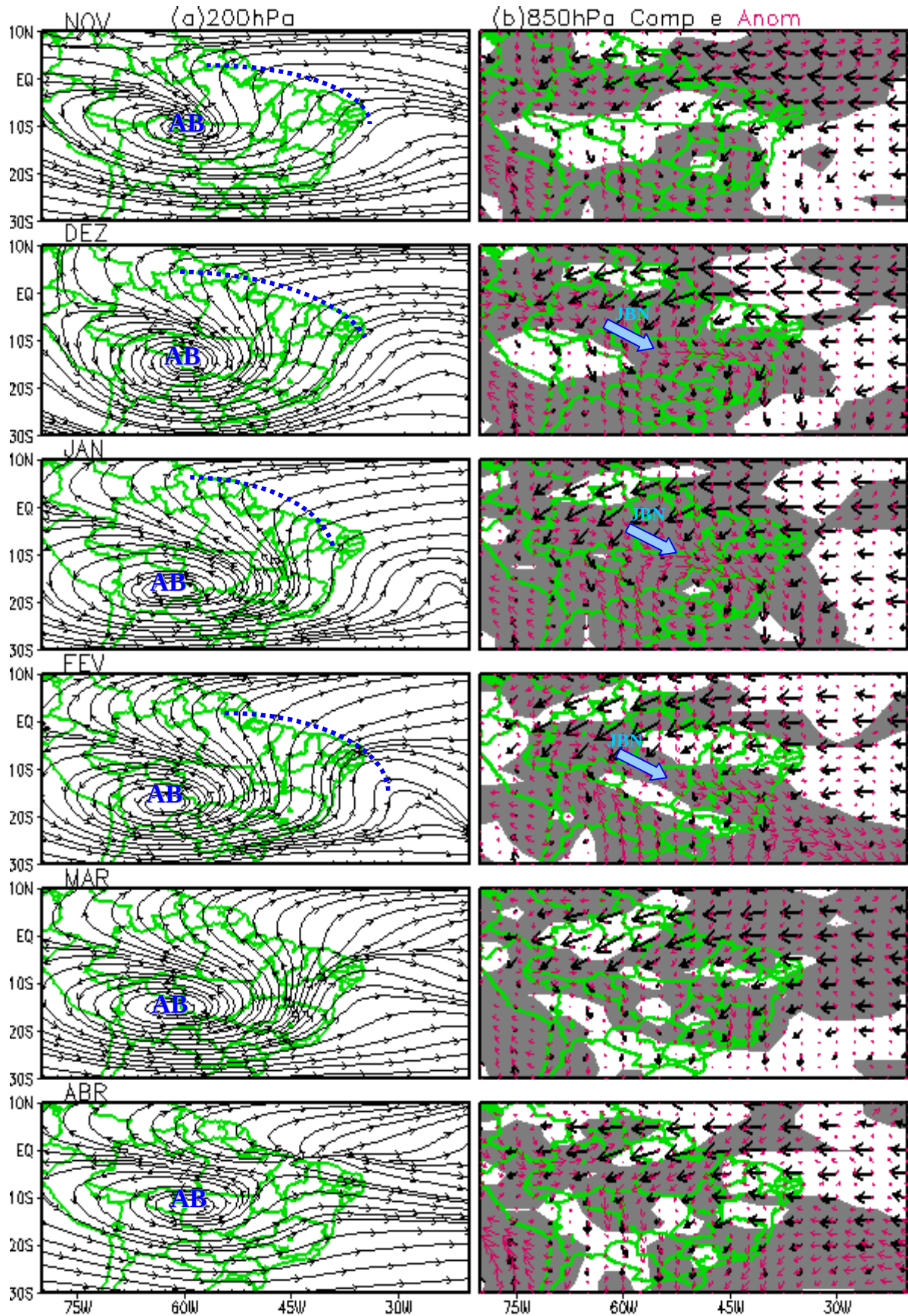


Figura 26. Composições do (a) campo mensal do vento em 200 hPa e (b) campo mensal do vento em 850 hPa (vetores preto) e suas respectivas anomalias (vetores vermelho) para os anos com vazão nas categorias acima e muito acima.

As composições para as anomalias de ROL são mostradas na figura 27. Nos meses de novembro e dezembro, observam-se anomalias negativas de ROL estatisticamente significantes associadas à convecção profunda típica da atuação da ZCAS com orientação NW-SE sobre o centro-sul da Amazônia, sudeste do Brasil e Oceano Atlântico Sul. A ZCAS induziu formação de forte convecção em novembro nas regiões da cabeceira do rio Tocantins e no mês de dezembro esse padrão anômalo se estendeu por toda a bacia, favorecendo as maiores precipitações observadas nos meses de novembro e dezembro (figura 21) e, conseqüentemente, o aumento da vazão em Marabá. Em janeiro, as anomalias negativas de ROL com significância estatística encontram-se sobre o nordeste brasileiro. Em fevereiro e março as regiões significativamente favoráveis à convecção encontram-se nas latitudes mais baixas, numa área com inclinação sobre o Oceano Atlântico equatorial e nordeste da Amazônia, estendendo-se para as regiões próximas a Marabá (5°S). Essas anomalias de ROL indicam a atuação típica da banda de nebulosidade convectiva associada à ZCIT. Em abril as anomalias sobre a bacia não possuem significância.

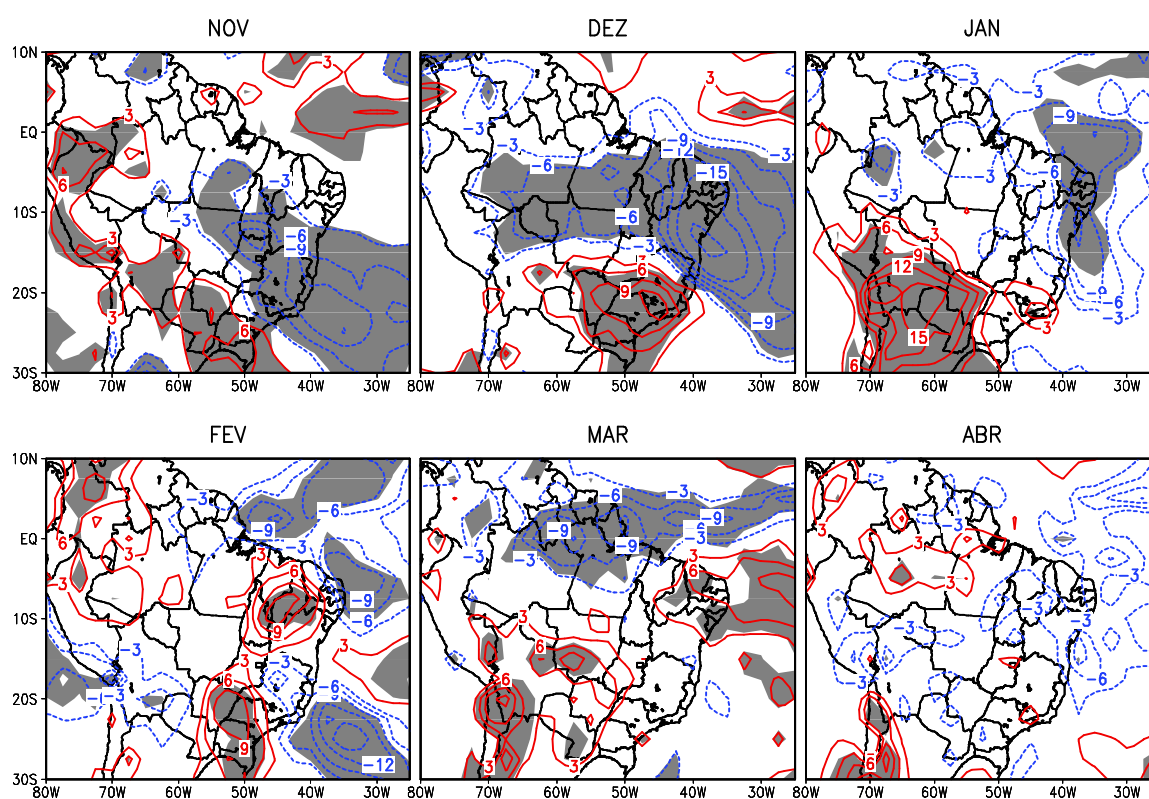


Figura 27. Composições mensais das anomalias de ROL durante os meses de dezembro a abril para anos com vazão nas categorias acima e muito acima. Áreas cinza indicam anomalias com significância estatística de 95%.

⇒ Eventos da Categoria Abaixo e Muito Abaixo.

A composição de TSM para os anos abaixo e muito abaixo (figura 28) mostra valores positivos de anomalias associados às águas mais aquecidas que o normal sobre o Pacífico equatorial e também sobre o Atlântico sub-tropical. Observa-se o Pacífico Tropical com uma grande área zonal contendo anomalias positivas de TSM principalmente nos meses de novembro, dezembro, março e abril, a qual indica a configuração típica do fenômeno El Niño. Em janeiro, as anomalias de TSM encontram-se relativamente neutras e em fevereiro o aquecimento anômalo do El Niño é restrito à bacia leste do Pacífico. Portanto, em geral verifica-se que o fenômeno El Niño tem uma importante contribuição para a diminuição da precipitação na bacia do Tocantins e, conseqüentemente, na diminuição da vazão em Marabá.

Estudos como os de Ropelewski e Halpert (1987), Kiladis e Diaz (1989), Fisch et al. (1998), Rocha (2001), entre outros, mostram que o El Niño influencia negativamente a precipitação na parte leste da Amazônia, devido ao deslocamento zonal do ramo descendente da célula de Walker sobre a região, causando assim a inibição da formação de nuvens convectivas e o déficit na precipitação. Souza (2003) mostra esses mesmos resultados para a Amazônia Oriental. Por outro lado, a TSM do Atlântico Sul, nas regiões entre 20° e 30° S, apresentou grandes áreas com anomalias positivas em todos os meses estudados, com destaque para os meses de janeiro, fevereiro, março e abril quando observou-se águas anormalmente quentes ao longo da costa leste da América do Sul desde o equador até as latitudes médias. Portanto observou-se no Atlântico Sul um cenário desfavorável à precipitação associada à ZCAS na região da bacia, conforme os resultados de Robertson e Mechoso (2000) e Carvalho et al. (2004).

Na composição dos movimentos verticais no sentido zonal associado à célula de Walker (figura 29), com vetores mostrando a circulação resultante da composição e as áreas coloridas as respectivas anomalias de omega, observa-se que as anomalias positivas indicam inibição dos movimentos ascendentes nas regiões próximas a Marabá (destaque na figura), principalmente nos meses de novembro e dezembro. Em janeiro, as anomalias positivas são menos intensas e concentradas mais na alta troposfera (figura 29). Nos meses de fevereiro, março e abril (figura 29), as anomalias negativas em baixos níveis indicam movimentos ascendentes mais intensos próximo a Marabá (destaque na figura), com fevereiro apresentando a alta troposfera favorável à subsidência. As anomalias favoráveis à convecção nos meses de março e abril estão associadas ao comportamento acima do normal e normal da precipitação nas regiões próximas a Marabá, conforme observado na figura 21.

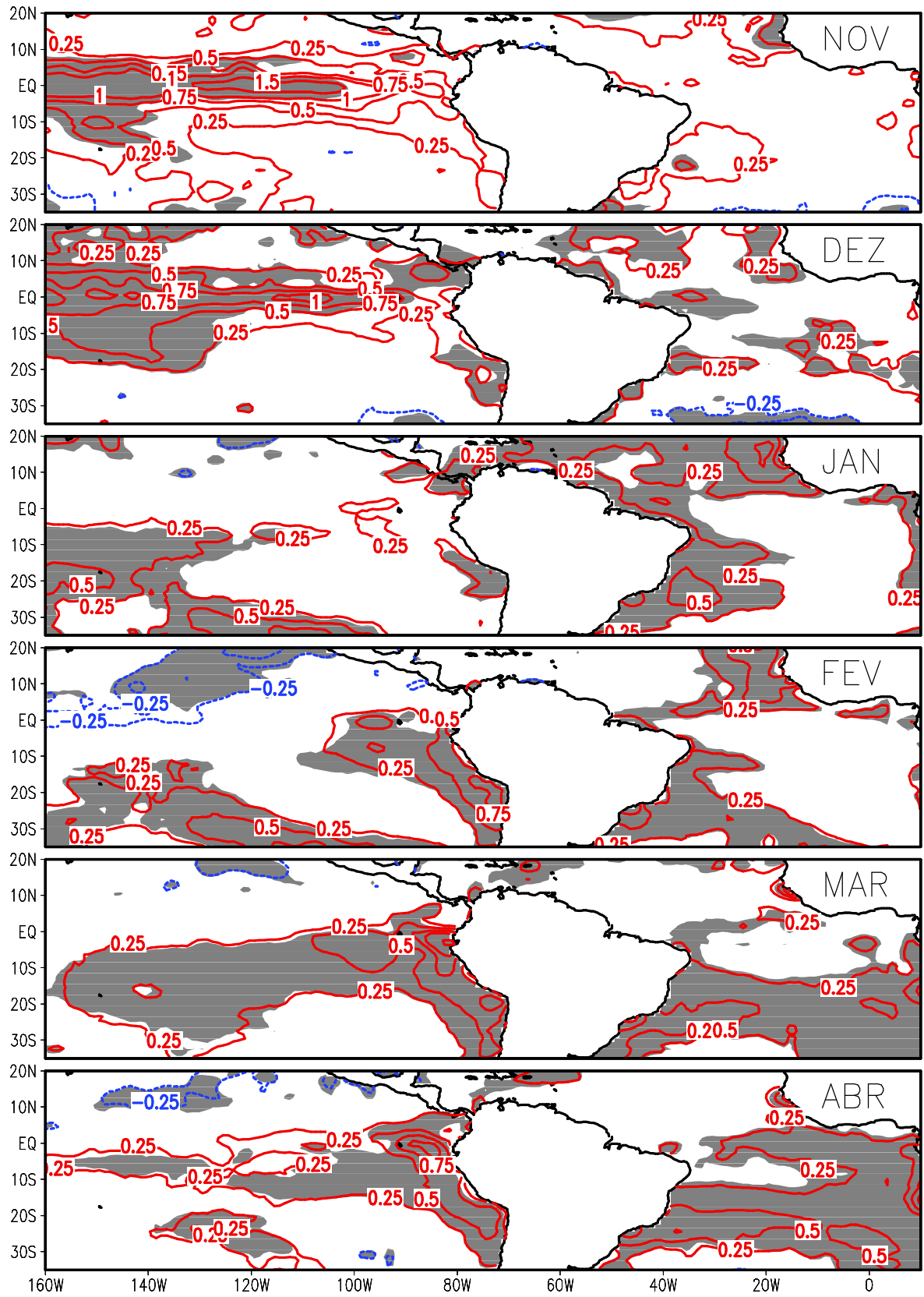


Figura 28. Composição mensal das anomalias de TSM ($^{\circ}\text{C}$) para todos os anos com vazão nas categorias abaixo/muito abaixo, durante os meses de novembro a abril (lag 0). As regiões cinza indicam anomalias com significância estatística de 95%.

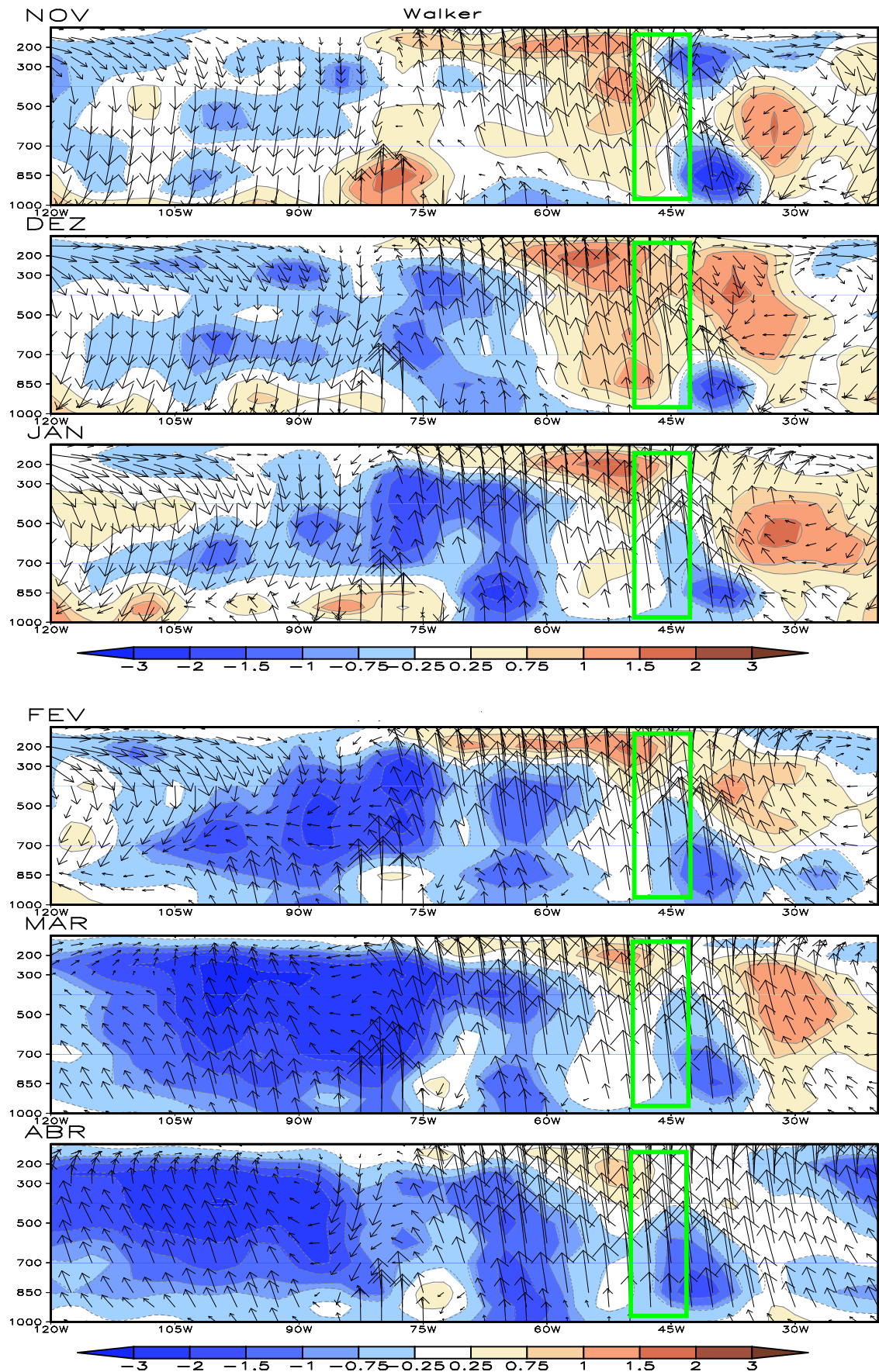
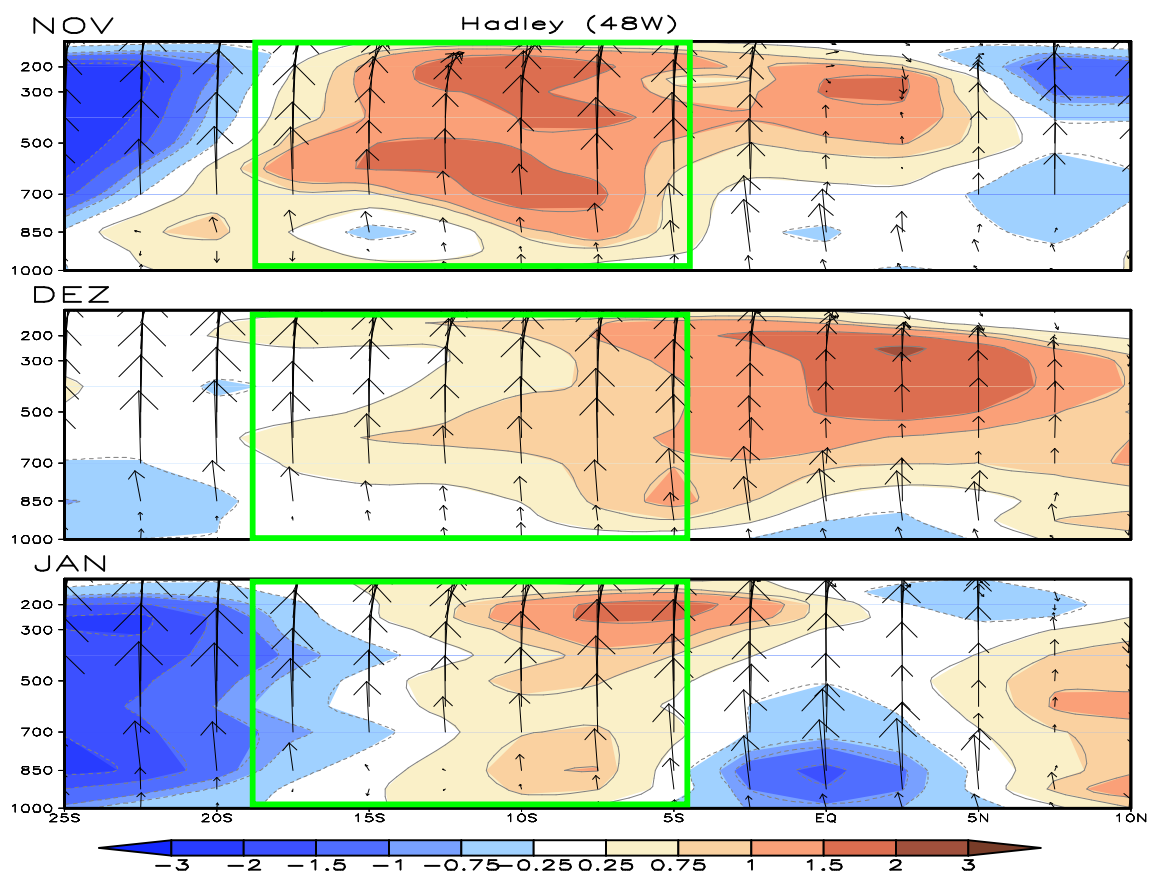


Figura 29. Composições mensais do movimento vertical, corte zonal associado à célula de Walker, para os anos com vazão na categoria abaixo/muito abaixo, durante os meses de novembro a abril (lag 0). Os contornos sombreados coloridos indicam as anomalias de omega.

A figura 30 mostra o movimento vertical no sentido meridional associado à célula de Hadley ao longo de 48°W . As anomalias negativas/positivas indicam que os movimentos ascendentes/descendentes foram mais intensos que a média na região da bacia (destaque na figura). Observa-se que nos meses de novembro, dezembro e fevereiro os movimentos ascendentes são inibidos (anomalias positivas) em grande parte da bacia e ao longo da troposfera, desfavorecendo a formação de nebulosidade e precipitação resultando, conseqüentemente, nos baixos valores de vazão observados em Marabá. No mês de janeiro, o padrão que foi observado em novembro, dezembro e fevereiro é reduzido às latitudes entre 5°S e 14°S , enquanto que nos meses de março e abril observa-se uma maior variabilidade de anomalias ao longo da troposfera, mas com predomínio de anomalias positivas (inibição de nuvens). Portanto, esses resultados são coerentes com os baixos valores de precipitação, conforme a figura 22, e, conseqüentemente, decisivos nos baixos valores de vazão do rio Tocantins, em Marabá.



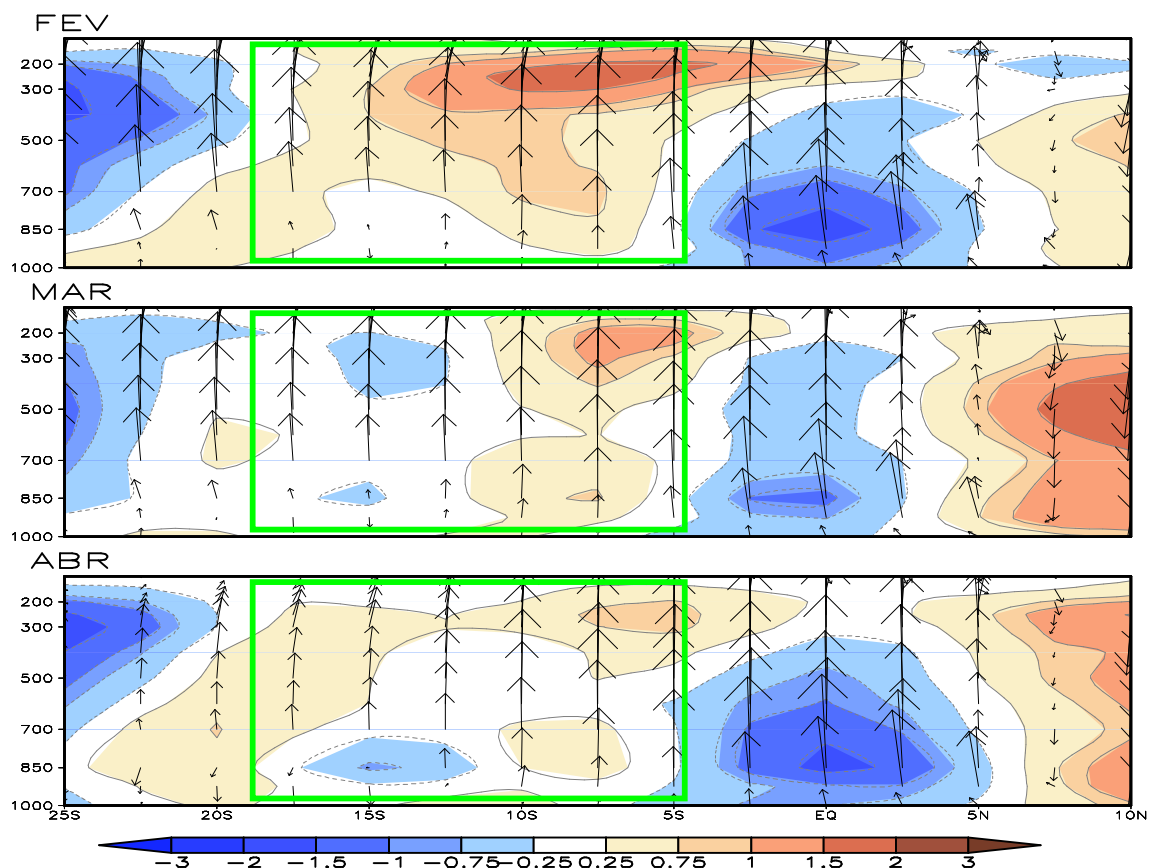


Figura 30. Composições mensais do movimento vertical, corte meridional associado à célula de Hadley ao longo de 48°W, para os anos com vazão na categoria abaixo/muito abaixo, durante os meses de novembro a abril (lag 0). Os contornos sombreados coloridos indicam as anomalias de omega.

Os resultados da composição de ventos em altos níveis, mostrados na figura 31, são próximos aos observados no comportamento climatológico (figura 19), porém com o centro da AB mais a oeste de sua posição média e os Vórtices Ciclônicos (VC) observados nos meses de janeiro e fevereiro mais a leste (sobre o oceano Atlântico). Observa-se também que o cavado associado à AB está mais abaixo de sua posição média e a região de difluência observada no mês de abril, associada à ZCIT, está mais ao norte de sua posição climatológica. Ainda na figura 31, no nível de 850 hPa, as regiões preenchidas na cor cinza representam as anomalias com significância estatística de 95%, os vetores em preto representam o campo mensal e os vetores vermelhos representam as respectivas anomalias mensais da composição. Os resultados mostram que o jato canalizado pelos Andes (JBN), observado no padrão climatológico (figura 20), é desconfigurado conforme anomalias do vento observadas na região amazônica que passam a ser de leste, portanto desfavorável à entrada de umidade vinda do Atlântico tropical e posterior canalização para regiões da ZCAS. Portanto a composição dos ventos em baixos níveis é desfavorável à configuração dos sistemas precipitantes sobre a

região da bacia do Tocantins e são consistentes com os baixos índices pluviométricos observados na figura 22.

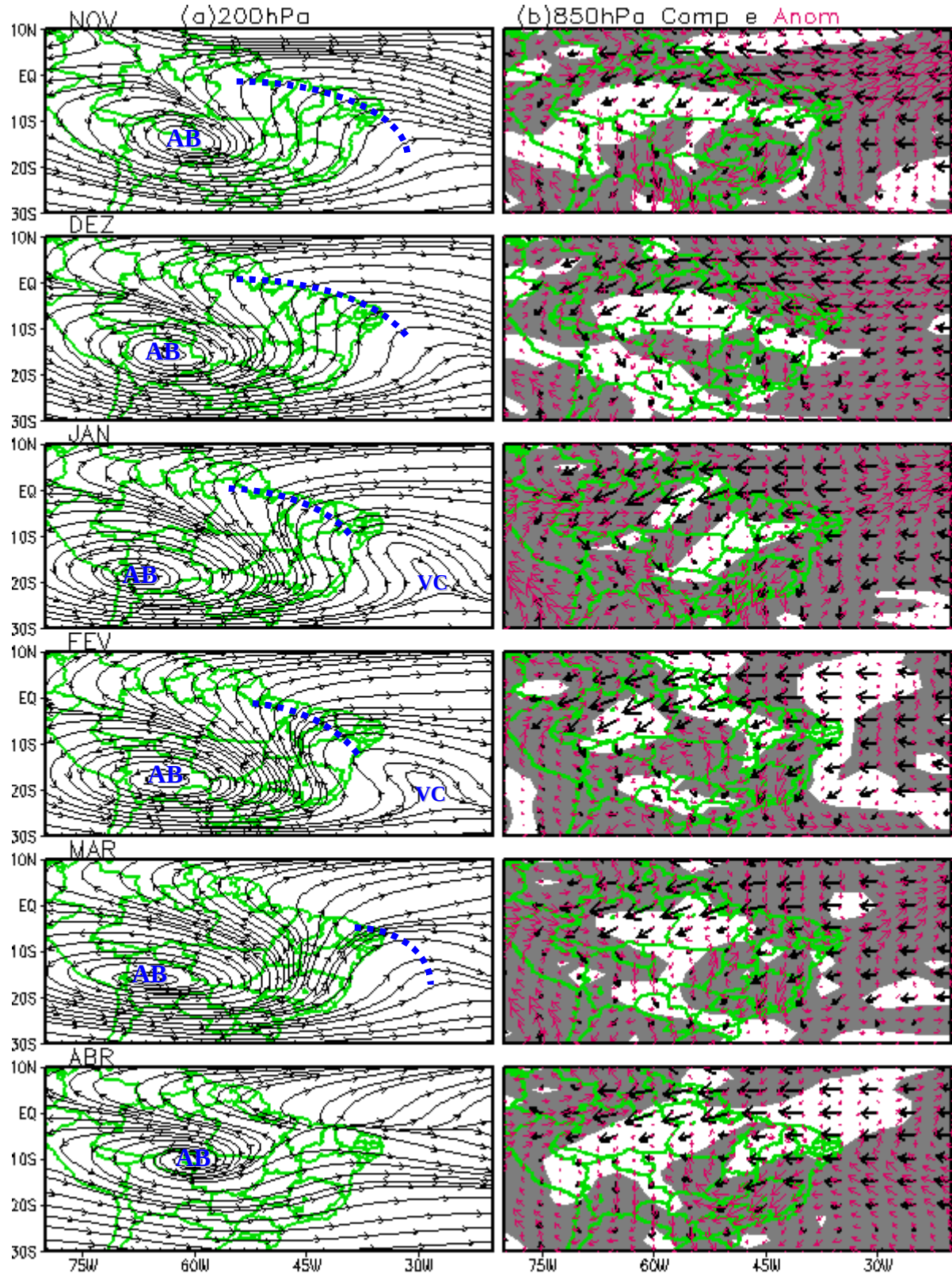


Figura 31. Composições do (a) campo mensal do vento em 200 hPa e (b) campo mensal do vento em 850 hPa (vetores preto) e suas respectivas anomalias (vetores vermelho) para os anos com vazão nas categorias abaixo/muito abaixo.

As composições mensais para as anomalias de ROL são mostradas na figura 32. Observa-se a predominância de anomalias positivas de ROL estatisticamente significativas, associadas às regiões com inibição da atividade convectiva, sobre grande parte do Brasil tropical, sendo que nos meses de novembro, dezembro e fevereiro as anomalias positivas de ROL ocorrem em toda a área da bacia do Tocantins a montante de Marabá (5°S); nos meses de janeiro e abril o comportamento desfavorável à atividade convectiva é observado no centro e sul do Estado do Tocantins, norte de Goiás e leste do Mato Grosso, ou seja, sobre as regiões de cabeceira da bacia hidrográfica e que são decisivas no comportamento da vazão em Marabá. No mês de março a anomalia negativa de ROL sobre o Pará está associada a precipitações acima do normal nessa região, conforme observado na figura 22. Portanto, o comportamento de ROL desfavorável à precipitação e consequentemente a vazão, é consistente ao observado na figura 22.

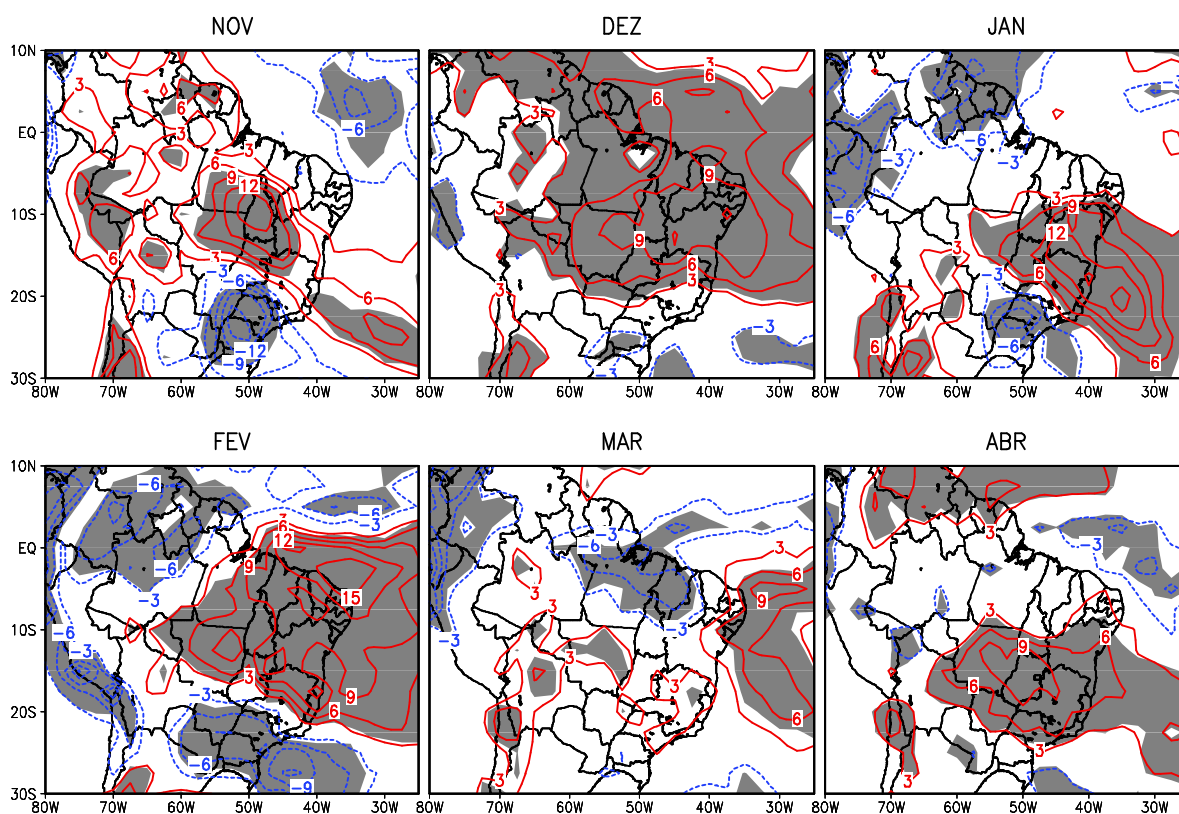


Figura 32. Composições mensais das anomalias de ROL durante os meses de dezembro a abril para anos com vazão nas categorias abaixo/muito abaixo. Áreas cinza indicam anomalias com significância estatística de 95%.

5.3 MODELO HIDROLÓGICO

5.3.1 Precipitação Média nas Sub-bacias

O resultado do polígono de Thiessen para cada área é mostrado na figura 33, onde as Áreas 01, 02, 03 e 04 possuem áreas de 45.235, 11.566, 22.822 e 17.992 km² respectivamente, totalizando uma área de aproximadamente 97.615 km².

A descrição com a relação dos postos pluviométricos e suas respectivas áreas de influência está na tabela 5. Destaca-se a estação de Tocantinópolis (cód 647000) na Área 3 com a maior área de influência, 8636 km², a menor influência é de 52,5 km² encontrada também na Área 3 pela estação de Palmeirante (cód 747009).

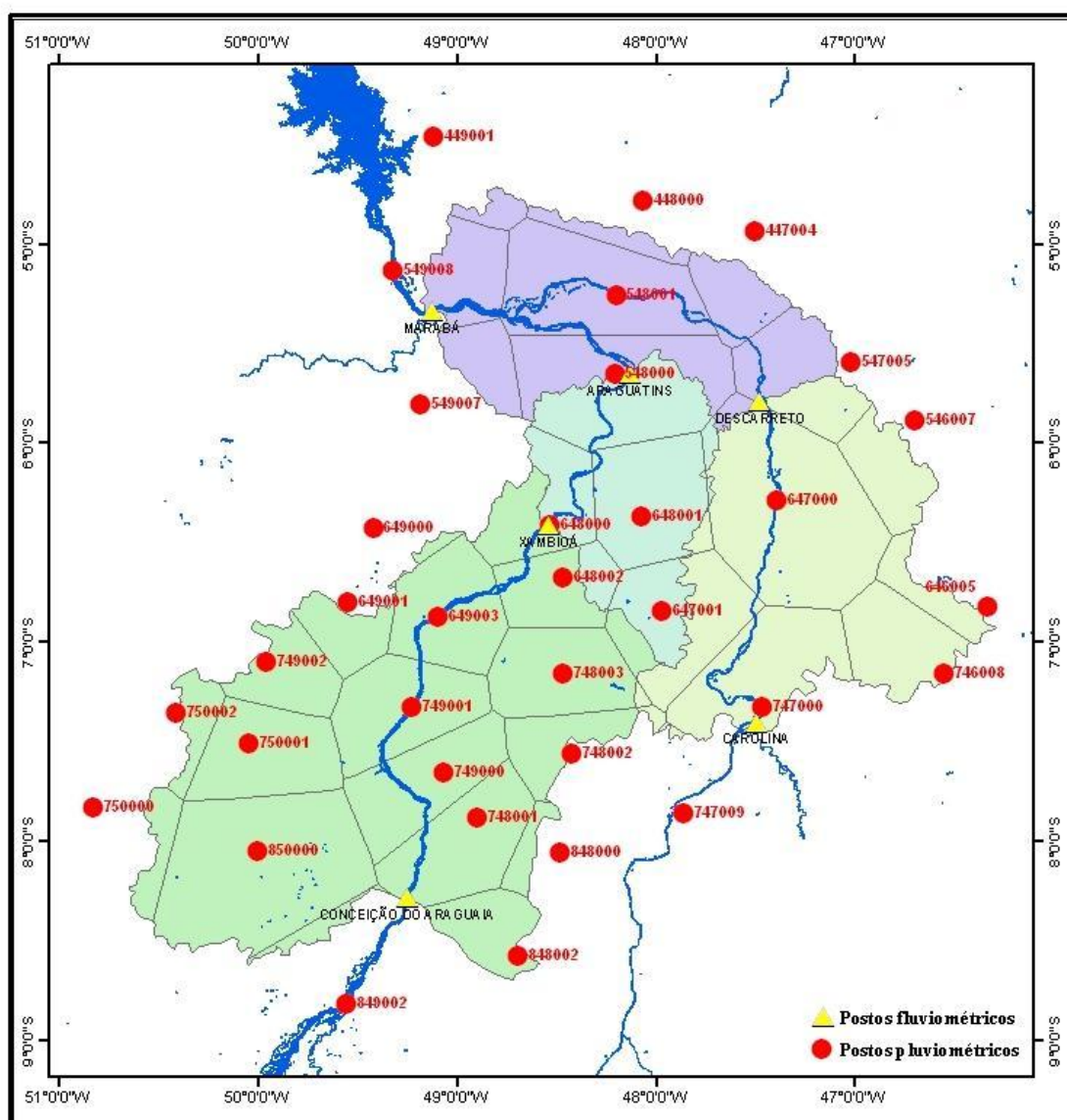


Figura 33. Polígono de Thiessen para as sub-bacias 01, 02, 03 e 04.

Tabela 5. Descrição da área de influência de cada estação pluviométrica

Área	Estações		Área de Influência (km²)
	Código	Nome	
Área 04	447004	Açailândia	1697,8
Área 04	448000	Rondon do Pará	757,7
Área 04	449001	Nova Jacundá	533,3
Área 03	546007	Sítio Novo	2073,4
Área 03 e 04	547005	Buritirama	3364,2
Área 02 e 04	548000	Araguatins	6636,5
Área 04	548001	São Sebastião do TO	5639,8
Área 04	549007	Km 60_PA 150	1513,4
Área 04	549008	Itupiranga	2242,2
Área 03	646005	Fazenda São Vicente	1212,6
Área 03	647000	Tocantinópolis	8636,0
Área 01, 02 e 03	647001	Wanderlândia	4731,6
Área 01 e 02	648000	Xambioá	3216,0
Área 02 e 03	648001	Ananás	4174,9
Área 01 e 02	648002	Piraque	2597,9
Área 01	649000	Fazenda Surubim	183,8
Área 01	649001	Fazenda Santa Elisa	1504,5
Área 01	649003	Porto Lemos	3611,6
Área 03	746008	Morro Vermelho	2939,9
Área 03	747000	Carolina	4245,8
Área 03	747009	Palmeirante	52,5
Área 01	748001	Colônia	3867,3
Área 01 e 03	748002	Fazenda Primavera	1929,6
Área 01 e 03	748003	Muricilândia	3602,6
Área 01	749000	Arapoema	3631,4
Área 01	749001	Boa Vista do Araguaia	3858,6
Área 01	749002	Xinguara	2133,6
Área 01	750000	Fazenda Cumaru do NO	937,8
Área 01	750001	Posto da Serra	3666,0
Área 01	750002	Bannach	996,2
Área 01	848000	Colinas do Tocantins	611,3
Área 01	848002	Itaporã do Tocantins	1983,9
Área 01	849002	Araguacema	509,8
Área 01	850000	Redenção	8321,3

5.3.2 Calibração e Validação dos Modelos de Enchente e Estiagem.

Os resultados das correlações para definição do tempo de percurso (Δt) foram resumidos nas tabelas 7 e 8, onde é mostrado o Δt em dias e o respectivo coeficiente de correlação (r).

Percebeu-se pelas tabelas 7 e 8 que todas as correlações são melhores quando é inserida a precipitação média da sub-bacia intermediária entre um ponto e outro de vazão, destacam-se no período de enchente e estiagem a correlação entre Xambioá/Precipitação da sub-bacia 02 e Araguatins com valores de 0,99747 e 0,99715, respectivamente.

Na tabela 6 observa-se que o maior tempo de resposta da precipitação média é observado na Área 01 (rio Araguaia) com um Δt 6 dias, entre Conceição do Araguaia e Xambioá, a resposta mais rápida é 1 dia, observada na Área 03 (rio Tocantins). Na estiagem (tabela 7) esses valores aumentam para 7 e 2 dias respectivamente.

Os tempos de percursos até Marabá, para os períodos de enchente e estiagem, são observados na tabela 8. Assim, para o período de enchente definiu-se um modelo com previsão de 2 dias de antecedência e outro com previsão de 4 dias de antecedência com e sem a precipitação da Área 04 (próxima a Marabá), respectivamente; e para o período de estiagem desenvolveu-se um modelo com previsão de 3 dias de antecedência e outro com 5 dias com e sem a precipitação da Área 04, respectivamente.

Tabela 6. Resultados das correlações (r) para determinação do tempo de percurso de vazão e precipitação para o período de enchente (dezembro a maio).

ENCHENTE			
Variáveis	Δt Q (Dia)	Δt P (Dia)	r
Conc. Araguaia $\rightarrow$ Xambioá	4	-	0,98008
Conc. Araguaia/ P_{A01} $\rightarrow$ Xambioá	4	6	0,98210
Xambioá $\rightarrow$ Marabá	3	-	0,95450
Xambioá $\rightarrow$ Araguatins	1	-	0,99733
Xambioá/ P_{A02} $\rightarrow$ Araguatins	1	2	0,99747
Araguatins $\rightarrow$ Marabá	2	-	0,96405
Carolina $\rightarrow$ Descarreto	1	-	0,99659
Carolina/ P_{A03} $\rightarrow$ Descarreto	1	1	0,99687
Descarreto $\rightarrow$ Marabá	4	-	0,82335
Araguatins/Descarreto/ P_{A04} $\rightarrow$ Marabá	2/4	2	0,99578
Conc. Araguaia $\rightarrow$ Marabá	7	-	0,89288
Carolina $\rightarrow$ Marabá	5	-	0,82771

Tabela 7. Resultados das correlações (r) para determinação do tempo de percurso de vazão e precipitação para o período de estiagem (junho a novembro).

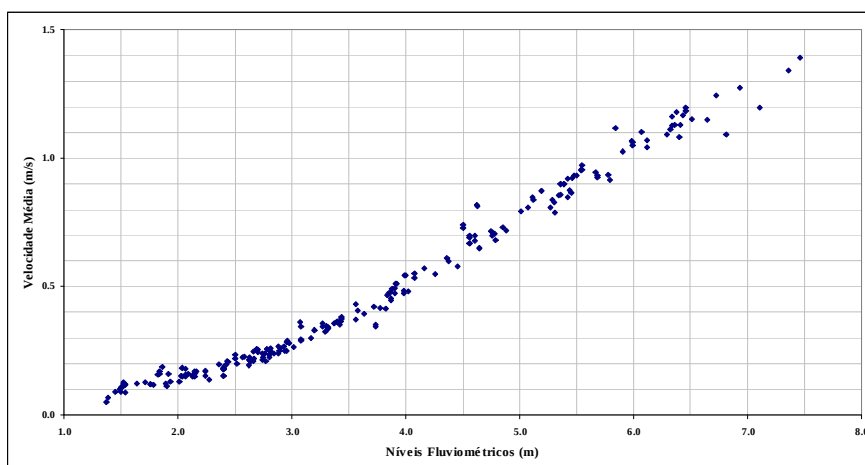
ESTIAGEM			
Variáveis	Δt Q (Dia)	Δt P (Dia)	r
Conc. Araguaia $\rightarrow$ Xambioá	5	-	0,98384
Conc. Araguaia/ P_{A01} $\rightarrow$ Xambioá	5	7	0,98683
Xambioá $\rightarrow$ Marabá	5	-	0,95388
Xambioá $\rightarrow$ Araguatins	2	-	0,99714
Xambioá/ P_{A02} $\rightarrow$ Araguatins	2	2	0,99715
Araguatins $\rightarrow$ Marabá	3	-	0,95999
Carolina $\rightarrow$ Descarreto	2	-	0,99014
Carolina/ P_{A03} $\rightarrow$ Descarreto	2	2	0,99076
Descarreto $\rightarrow$ Marabá	5	-	0,73586
Araguatins/Descarreto/ P_{A04} $\rightarrow$ Marabá	3/5	3	0,96064
Conc. Araguaia $\rightarrow$ Marabá	10	-	0,95199
Carolina $\rightarrow$ Marabá	7	-	0,72310

Tabela 8 – Tempo de deslocamento das variáveis de entrada até Marabá.

Enchente		Estiagem	
Variáveis	$\Delta t(\text{Dia})$	Variáveis	$\Delta t(\text{Dia})$
Conc. Araguaia → Marabá	7	Conc. Araguaia → Marabá	10
Carolina → Marabá	5	Carolina → Marabá	7
$P_{A01} \rightarrow \text{Marabá}$	9	$P_{A01} \rightarrow \text{Marabá}$	12
$P_{A02} \rightarrow \text{Marabá}$	4	$P_{A02} \rightarrow \text{Marabá}$	5
$P_{A03} \rightarrow \text{Marabá}$	5	$P_{A03} \rightarrow \text{Marabá}$	7
$P_{A04} \rightarrow \text{Marabá}$	2	$P_{A04} \rightarrow \text{Marabá}$	3

Observa-se a diferença no tempo de percurso da onda entre os períodos de enchente e estiagem, sendo que o tempo de percurso é menor na enchente e maior na estiagem. Essa diferença está relacionada diretamente à variação da velocidade da água ao longo do ano; como exemplo as figuras 34 e 35 mostram os gráficos de cota $\times$ velocidade dos postos de Xambioá (rio Araguaia) e Descarreto (rio Tocantins), respectivamente. Pelas figuras 34 e 35 percebe-se que a relação é mais dispersa no período de cheia quando o rio atinge as máximas cotas e velocidade, esse fato pode estar associado à imprecisão na definição da área da seção quando o rio transborda para as margens, resultando no cálculo de valores de velocidades diferentes para uma mesma cota.

Contudo, fica claro que a relação é direta entre a cota e a velocidade, assim, na medida em que o nível do rio aumenta a velocidade aumenta provocando uma diminuição no tempo de percurso da partícula de água entre um ponto e outro, resultando em um Δt maior na estiagem e menor na enchente.

Figura 34. Relação cota $\times$ velocidade no rio Araguaia em Xambioá.

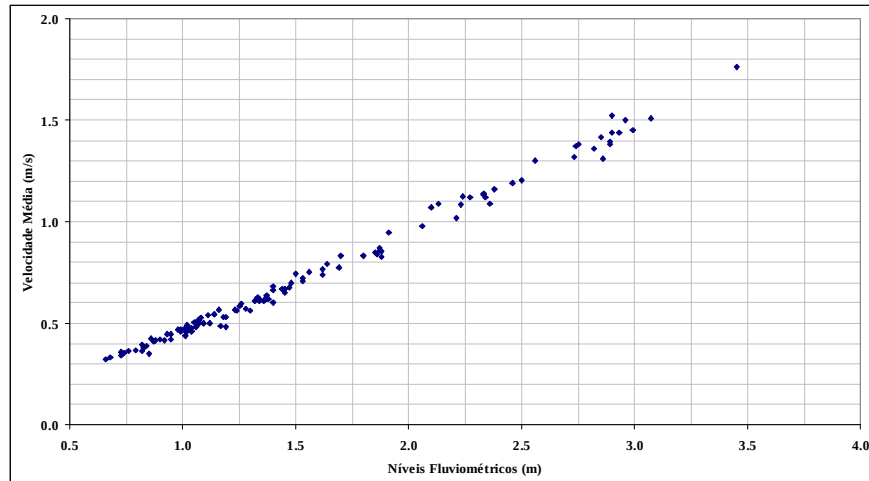


Figura 35. Relação cota $\times$ velocidade no rio Tocantins em Descarreto.

A tabela 9 apresenta um resumo dos resultados das correlações múltiplas para os modelos de enchente e estiagem com as respectivas defasagens citadas no parágrafo anterior.

Tabela 9. Resultado do coeficiente de correlação dos modelos desenvolvidos.

Modelo		r
Enchente com a P_A 04	Mod_C1	0,98377
Enchente sem a P_A 04	Mod_C2	0,98208
Estiagem com a P_A 04	Mod_E1	0,95696
Estiagem sem a P_A 04	Mod_E2	0,95655

As equações finais de previsão do Mod_C1 (14), Mod_C2 (15), Mod_E1 (16) e Mod_E2 (17) são:

$$Q_M(t+2) = -918,08 + 1,1255.Q_{C.A}(t-5) + 1,3304.Q_C(t-3) + 0,0254.Q_{P_SB01}(t-7) + 0,3814.Q_{P_SB02}(t-2) + 0,2032.Q_{P_SB03}(t-3) + 0,2418.Q_{P_SB04}(t) \quad (14)$$

$$Q_M(t+4) = -641,99 + 1,1181.Q_{C.A}(t-3) + 1,3478.Q_C(t-1) + 0,0236.Q_{P_SB01}(t-5) + 0,4269.Q_{P_SB02}(t) + 0,2235.Q_{P_SB03}(t-1) \quad (15)$$

$$Q_M(t+3) = 489,83 + 1,4812.Q_{C.A}(t-7) + 0,5557.Q_C(t-4) - 0,0009.Q_{P_SB01}(t-9) - 0,0402.Q_{P_SB02}(t-2) + 0,0171.Q_{P_SB03}(t-4) + 0,1044.Q_{P_SB04}(t) \quad (16)$$

$$Q_M(t+5) = 484,07 + 1,4718.Q_{C.A}(t-5) + 0,5759.Q_C(t-2) + 0,0012.Q_{P_SB01}(t-7) - 0,0205.Q_{P_SB02}(t) + 0,0332.Q_{P_SB03}(t-2) \quad (17)$$

Os hidrogramas das simulações para os modelos de enchente e estiagem em Marabá são mostrados nas figuras 36, 37, 38 e 39. Pela análise gráfica observou-se que os modelos simularam muito bem os respectivos períodos do ano hidrológico e de forma geral acompanhou regularmente a tendência de todo o período.

Observa-se na verificação do Mod_C1 (figura 36) que no período de cheia de 2004 ele acompanhou muito bem a subida da vazão durante os meses de fevereiro e março, superestimou o pico máximo ocorrido no fim de março e acompanhou regularmente a descida da vazão até o fim de maio. No ano de 2005 a verificação do modelo também foi satisfatória, porém em 2006 o modelo subestimou grande parte da enchente.

O Mod_C2 (figura 37), apesar de não utilizar a P_{A04} , ou seja, não levar em consideração a precipitação próxima a Marabá, simulou regularmente todos os três períodos de validação, o pico de 2004 foi superestimado assim como o de 2005, enquanto que em 2006 houve uma sub-estimativa.

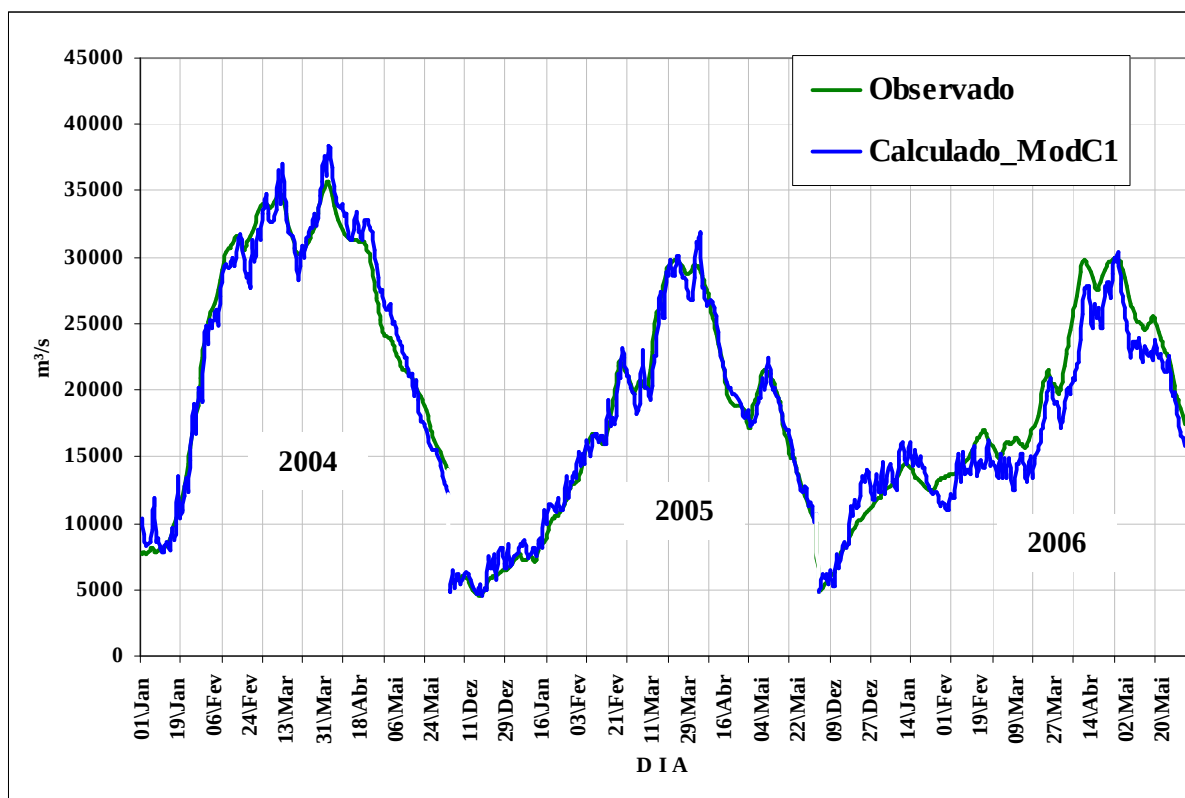


Figura 36. Hidrograma simulado_Mod_C1/observado no período de enchente nos anos de 2004 a 2006 em Marabá.

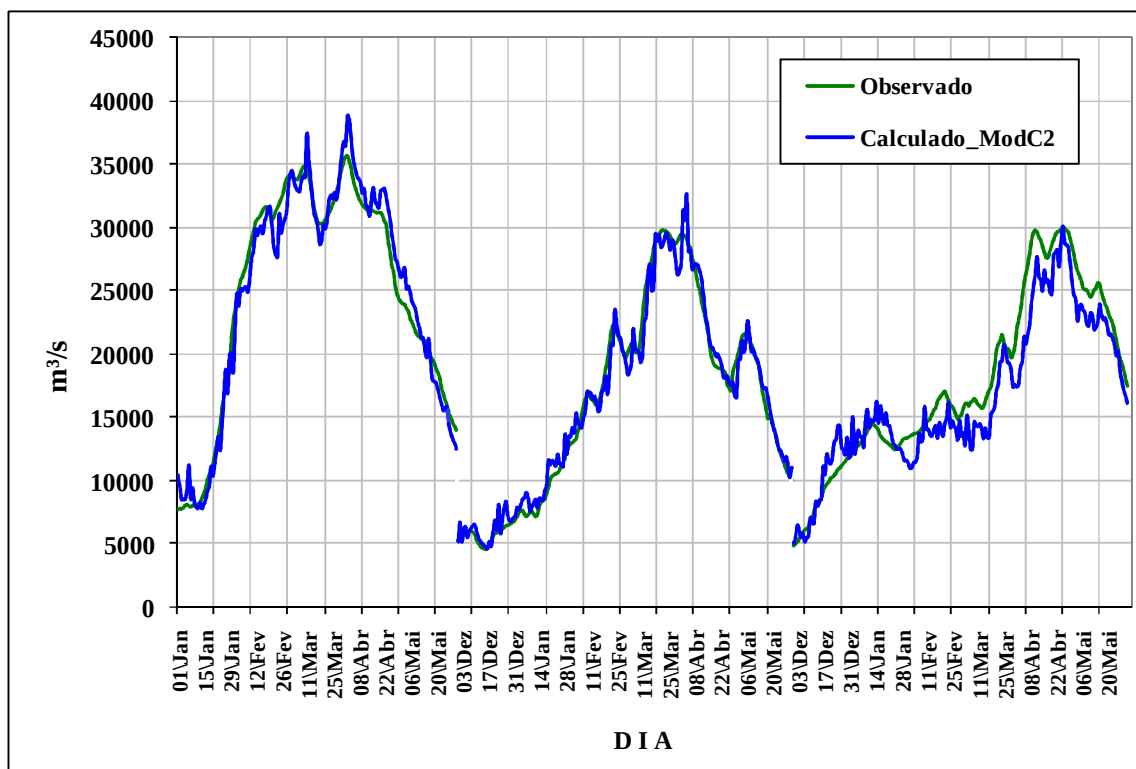


Figura 37. Hidrograma simulado_Mod_C2/observado no período de enchente nos anos de 2004 a 2006 em Marabá.

A validação do período de estiagem pelo Mod_E1 (figura 38) foi boa, principalmente no ano de 2004, porém na estiagem de 2005 o modelo superestimou grande parte do período. O Mod_E2 (figura 39) teve um desempenho semelhante ao ModE1 e continuou superestimando a estiagem de 2005.

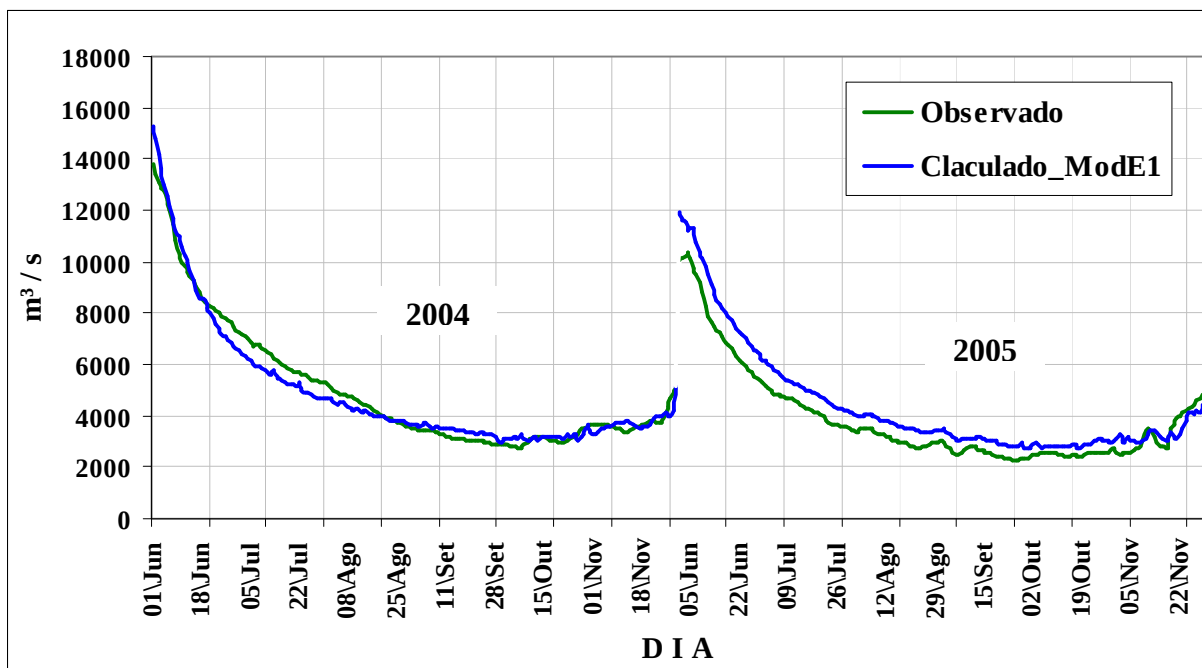


Figura 38. Hidrograma simulado_ModE1/observado no período de estiagem nos anos de 2004 e 2005 em Marabá.

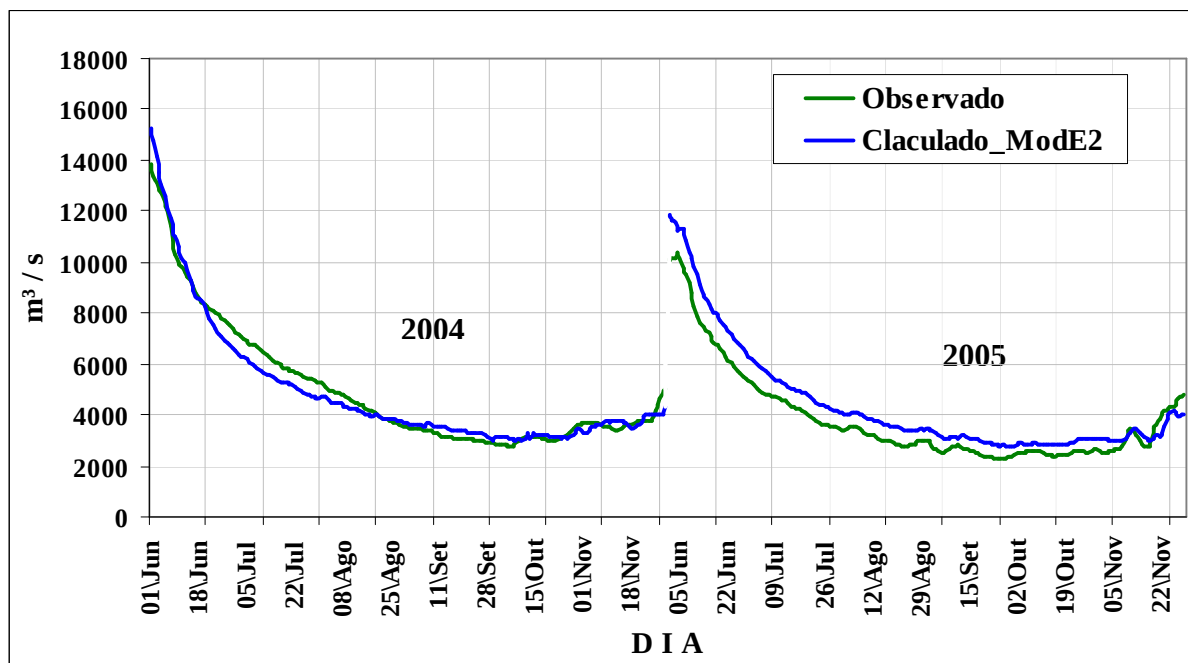


Figura 39. Hidrograma simulado_ModE2/observado no período de estiagem nos anos de 2004 e 2005 em Marabá.

As figuras 40 e 41 mostram uma junção das previsões do ModC1 com o ModE1 e do ModC2 com o ModE2, respectivamente. Os melhores ajustes são observados durante a subida da vazão (dezembro a janeiro) e na descida (abril a agosto), os modelos tiveram um comportamento com maiores erros na estiagem de 2005 e enchente de 2006; contudo observa-se que o ModC1/ModE1 e o ModC2/ModE2 possuem um desempenho muito semelhante na representação da vazão do rio Tocantins em Marabá.

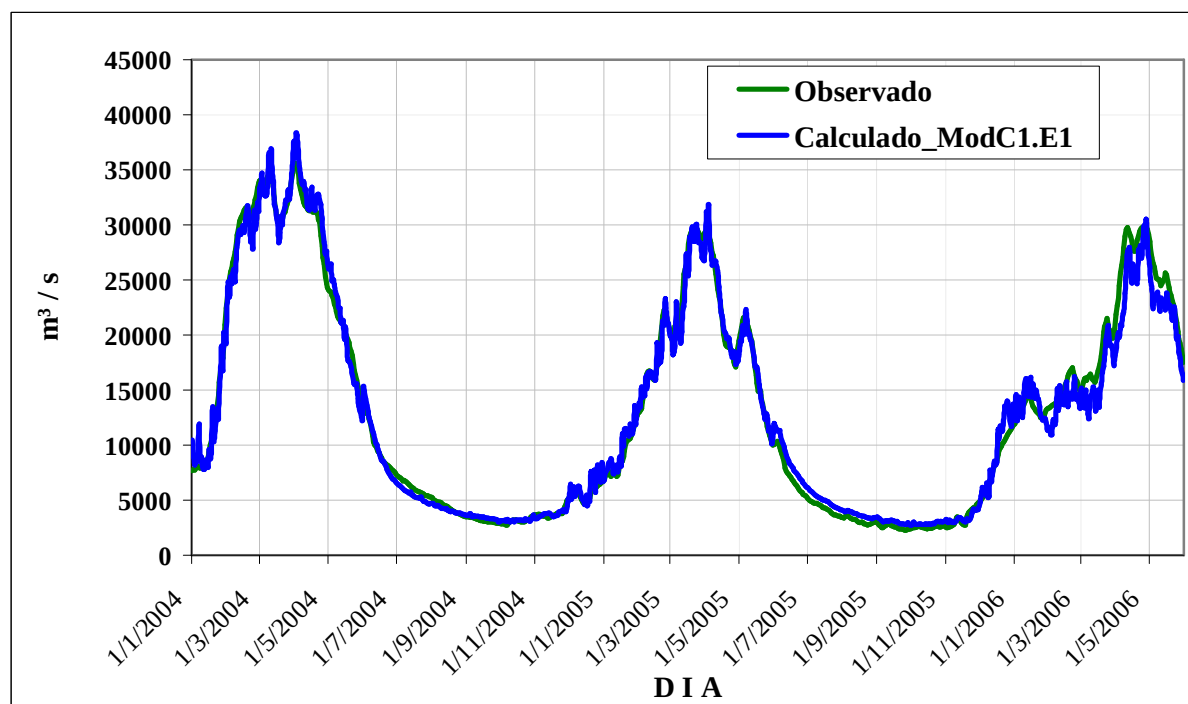


Figura 40. Hidrograma simulado_ModC1.E1/observado no período de janeiro de 2004 a maio de 2006 em Marabá.

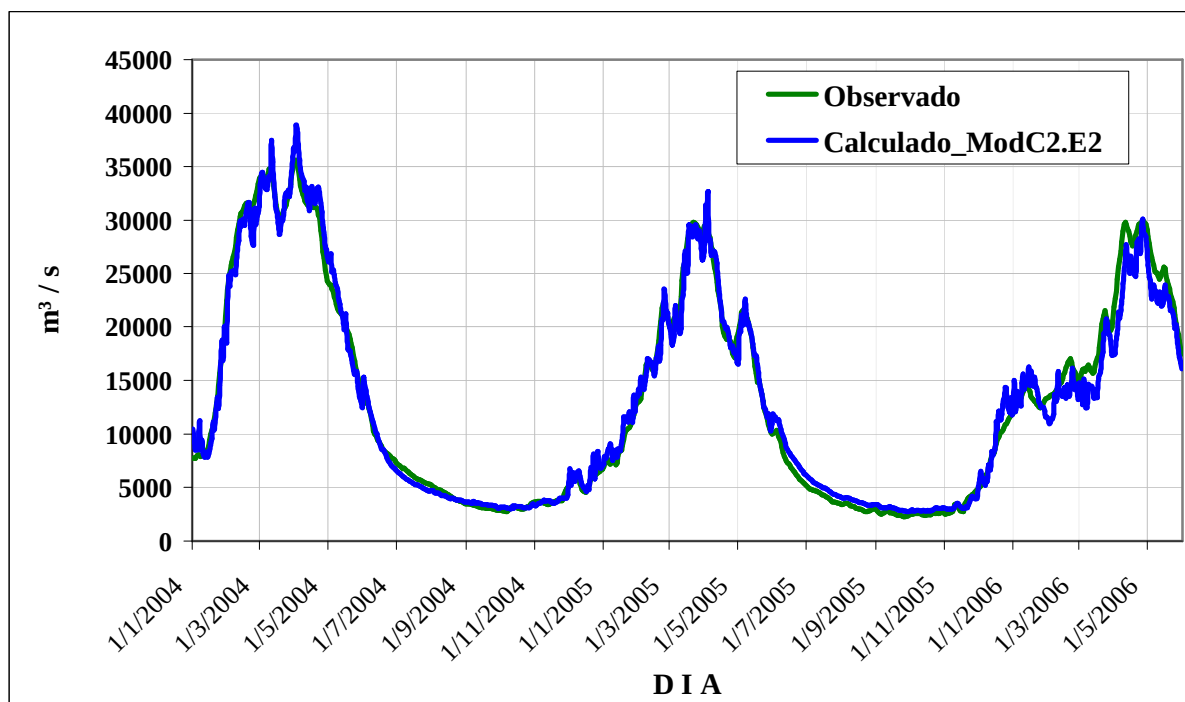


Figura 41. Hidrograma simulado_ModC2.E2/observado no período de janeiro de 2004 a maio de 2006 em Marabá.

5.3.3 Avaliação do Desempenho do Modelo

Os resultados dos testes estatísticos são mostrados a seguir, assim como uma breve análise dos valores obtidos. Os resultados dos cálculos do Erro Relativo para cada modelo são mostrados nas figuras 42 (ModC1), 43 (ModC2), 44 (ModE1) e 45 (ModE2).

Observa-se pela figura 42 que os maiores erros ocorreram no início da simulação (enchente de 2004) e nas simulações da enchente de 2006, com máximos erros em torno de 30% para mais e para menos, em média o ModC1 subestimou em 1,24 % os valores observados para o período em Marabá. A figura 43 mostra que os maiores erros do ModC2 também ocorreram no início da simulação (enchente de 2004) e nas simulações da enchente de 2006, com máximos erros em torno de 30% para mais e para menos, em média o ModC2 subestimou em 1,35% os valores observados para o período em Marabá. Os resultados das vazões subestimadas pelos modelos podem estar associados ao comportamento dos modelos durante a enchente de 2006, os quais subestimaram grande parte da vazão observada em Marabá influenciando diretamente no resultado final do desempenho destes.

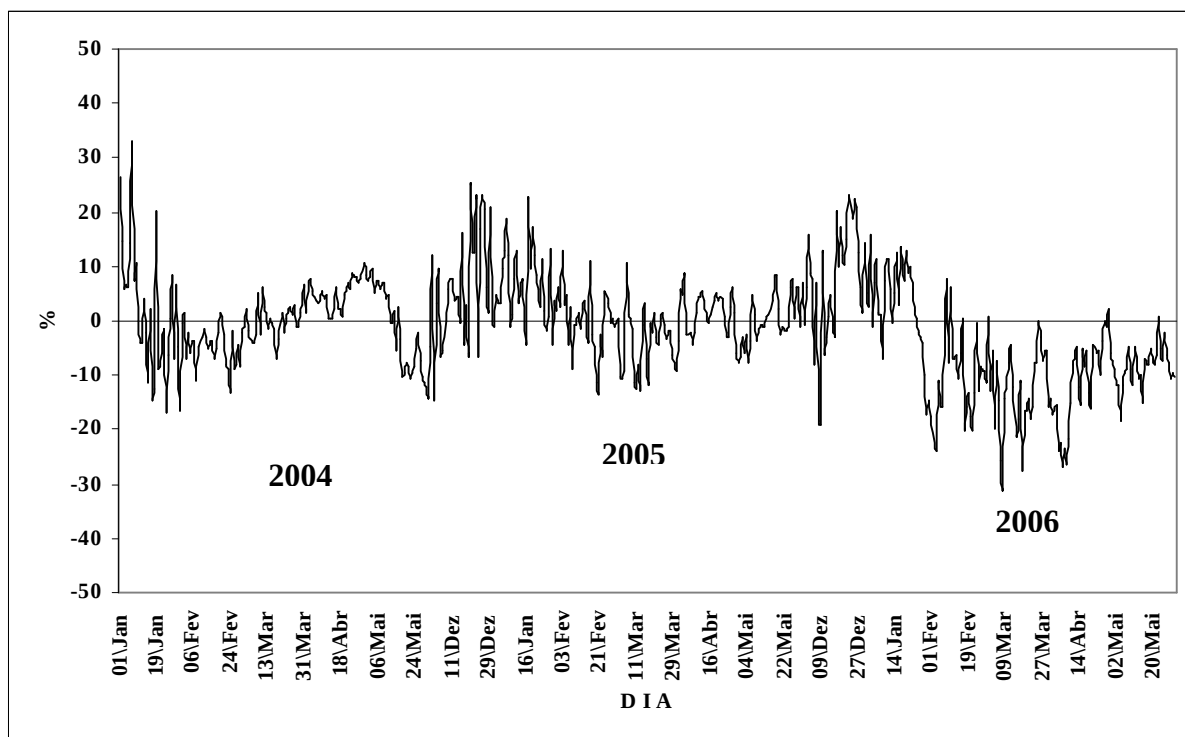


Figura 42. Erro relativo do ModC1 para o período de enchente de 2004 a 2006.

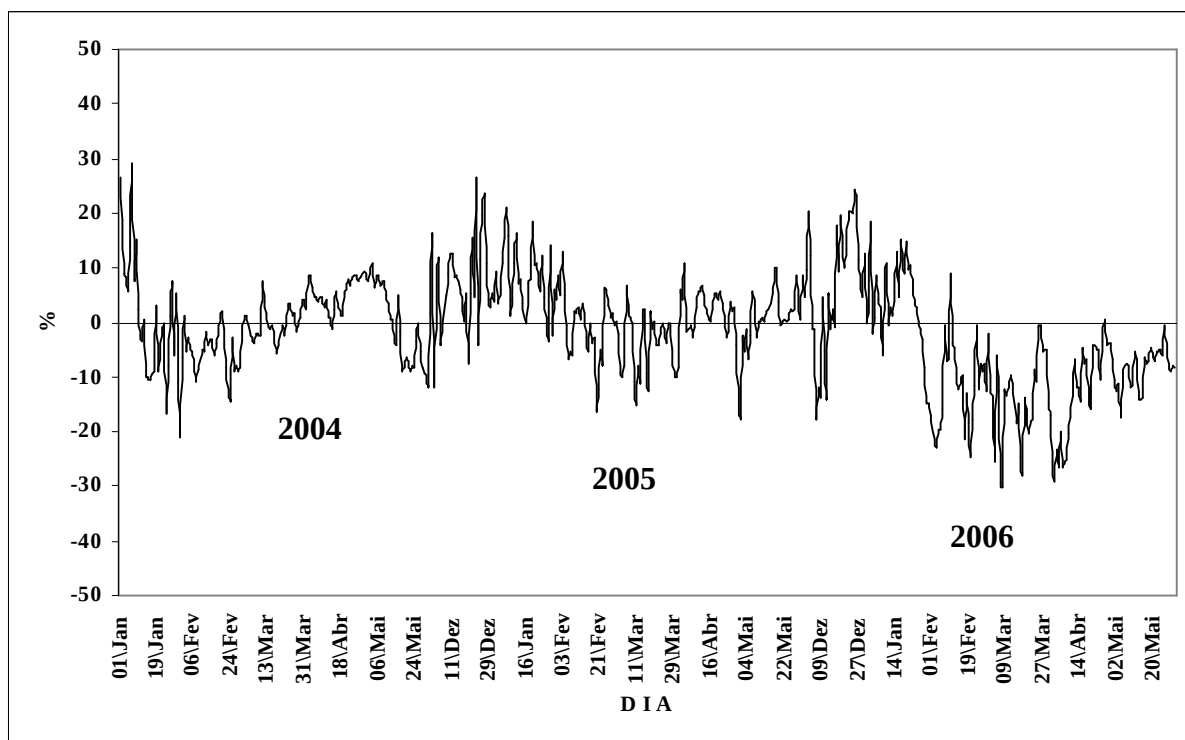


Figura 43. Erro relativo do ModC2 para o período de enchente de 2004 a 2006.

O erro relativo do ModE1 para a estiagem é mostrado na figura 44 onde observa-se erros máximos em torno de 23 % para mais e para menos, em média o ModE1 superestimou em 5,48 % os valores observados para o período em Marabá. A figura 45 mostra

o erro relativo do ModE2, com máximos valores em torno de $\pm 21\%$, em média o ModE2 superestimou em 5,46 % os valores observados para o período em Marabá. Esses resultados superestimados estão associados ao comportamento dos modelos na estiagem de 2005 os quais geraram vazões acima das observadas em grande parte do período.

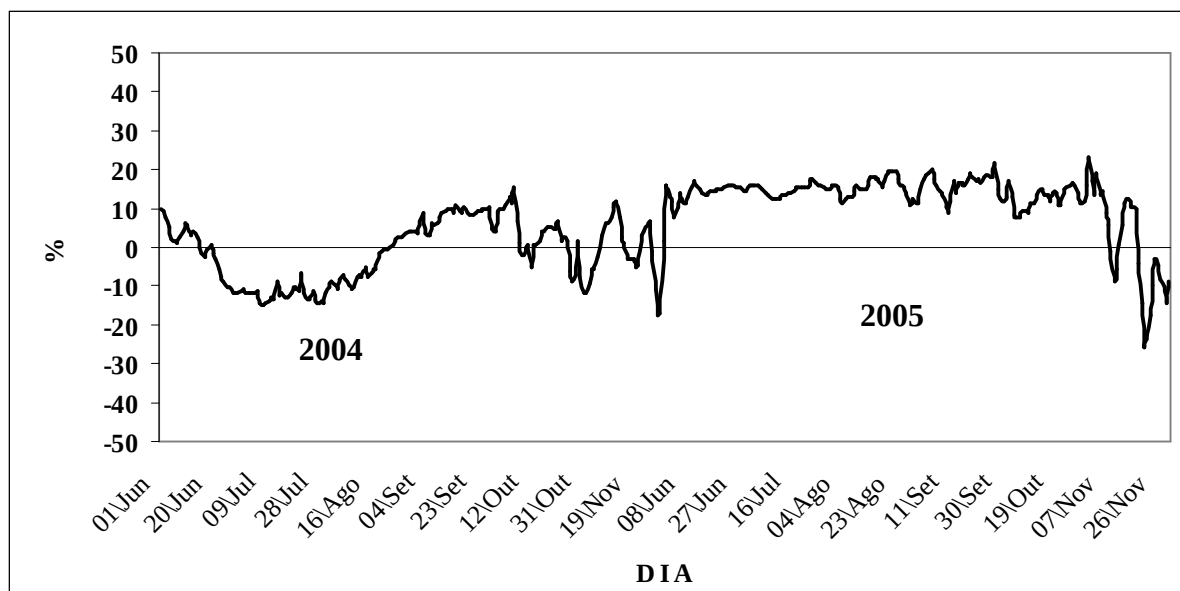


Figura 44. Erro relativo do ModE1 para o período de estiagem dos anos de 2004 e 2005.

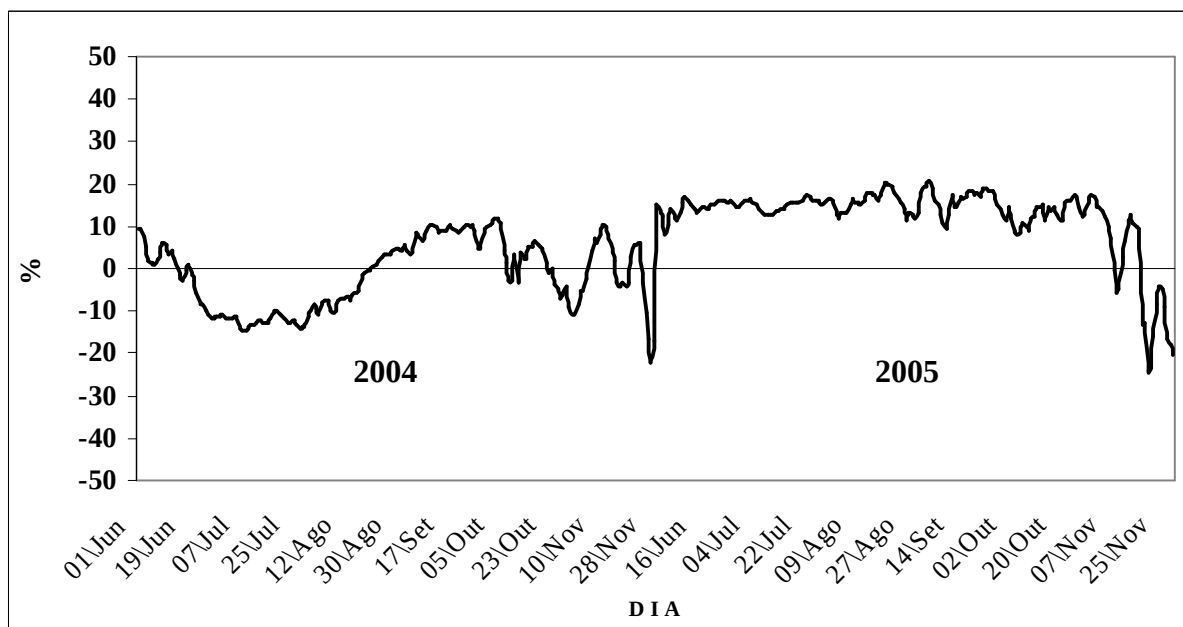


Figura 45. Erro relativo do ModE2 para o período de estiagem dos anos de 2004 e 2005.

Como já observado nas análises do erro relativo de cada modelo, houve uma subestimativa do ModC1 e ModC2 na enchente de 2006 e uma super-estimativa do ModE1 e ModE2 durante a simulação da estiagem do ano de 2005, refletindo diretamente na média do

erro relativo. É importante saber que na série diária de vazão em Marabá houve um longo período preenchido, compreendido entre junho e novembro de 2005, que provavelmente influenciou a simulação dos modelos de estiagem em 2005, assim como os de enchente em 2006.

O período com falhas na vazão e níveis no ano de 2005 é mostrado na figura 46, onde observa-se um comportamento improvável na retomada das observações no mês de novembro. As observações pararam no dia 26 de agosto com um nível de 503cm e foram retomadas no dia 05 de novembro com uma observação de 232cm. Essa diminuição de 271cm durante os 71 dias do período de estiagem sem observação é de ocorrência primária em toda a série de observação; a maior amplitude de diminuição de nível já observada nesse período é de 64cm no ano de 1994.

Com base no método descrito no capítulo 4.5, o preenchimento foi feito utilizando-se as observações dos postos de Descarreto e Araguatins, fazendo com que a sequência ficasse mais coerente com o padrão hidrológico da estação de Marabá na retomada das observações no mês de novembro. É possível que essa falha na série tenha sido em função de problemas na régua limnimétrica (queda de algum lance de régua) ou erro na leitura, e que a retomada das observações indica uma possível mudança no nível de referência do lance reparado (mudança de RN – referência de nível), porém esse tipo de conclusão só é possível ser feita com algumas ferramentas necessárias como: boletim de leituras diárias da régua, ficha de inspeção da régua, anotações do observador, relatório de manutenção, etc.

Como pode ser observado na figura 47, mesmo com todas as limitações de ferramentas o preenchimento foi feito. Contudo, essa falha na série de Marabá em 2005 pode comprometer as observações posteriores feitas com base no novo RN e consequentemente o modelo ao ser calibrado com o RN anterior apresentará maiores erros ao simular a série com o novo RN, isso é observado no período de enchente de 2006, onde os modelos apresentaram os maiores erros. Portanto os resultados da avaliação do desempenho dos modelos na simulação da estiagem de 2005 e da cheia de 2006, os quais apresentaram os maiores erros, estão diretamente associados à falta de observação do período de estiagem em 2005 comprometendo a verificação do período preenchido assim como o restante da simulação.

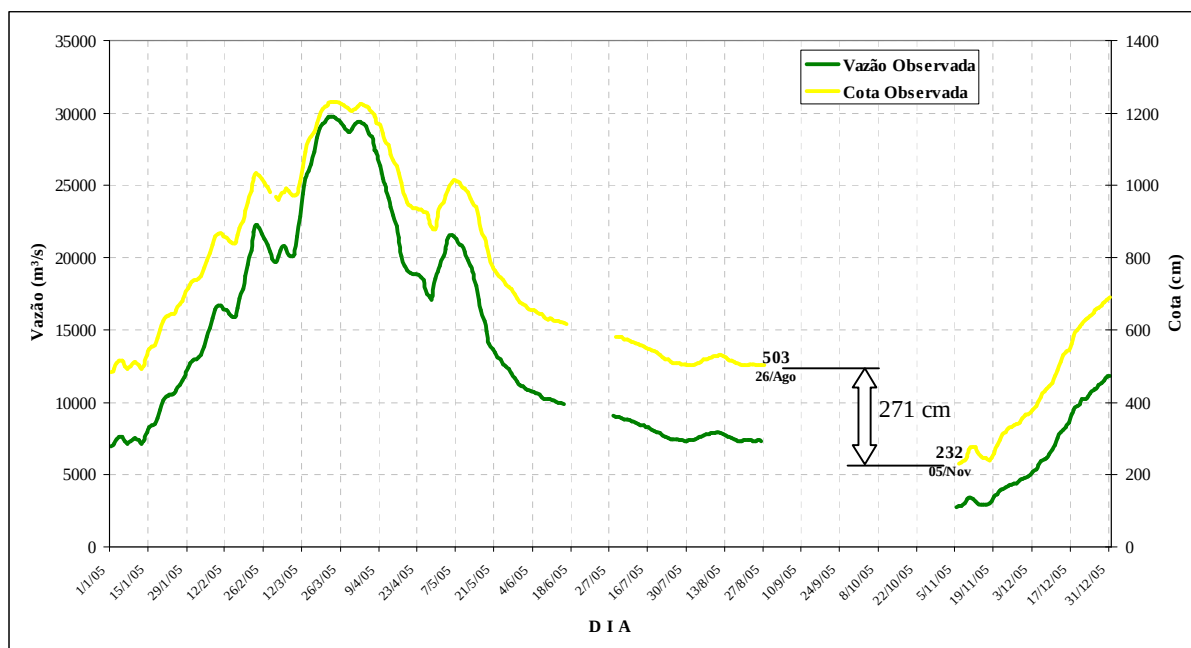


Figura 46. Período de observação de níveis e vazão no ano de 2005 em Marabá.

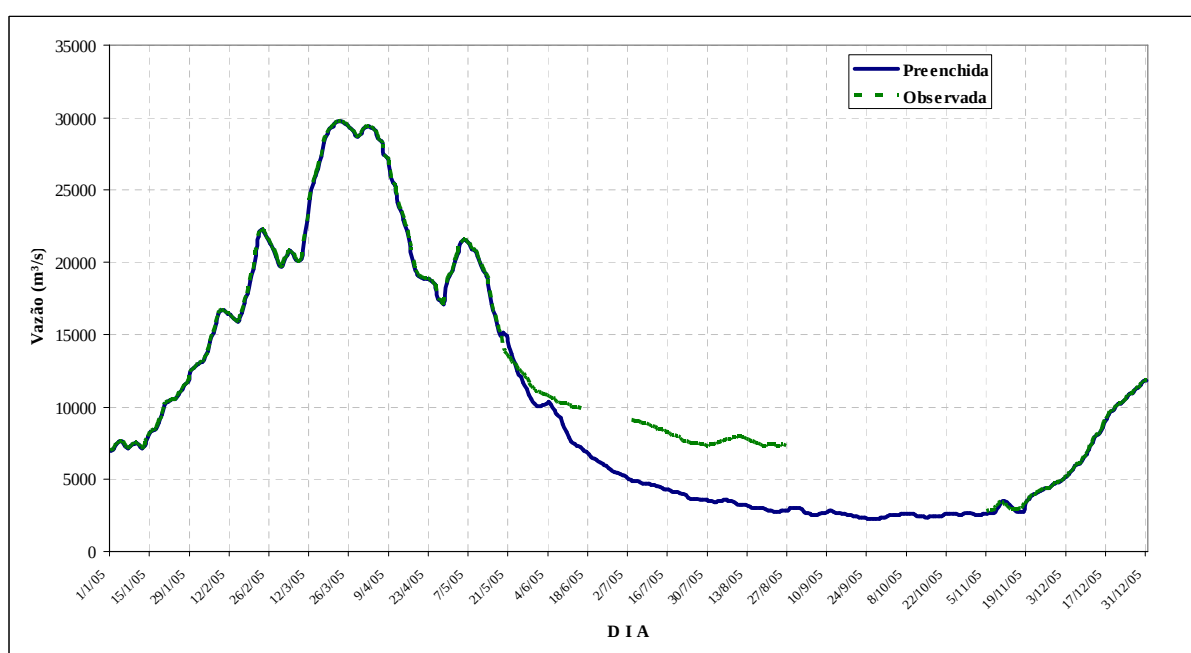


Figura 47. Hidrograma observado/preenchido da vazão no ano de 2005 em Marabá.

A tabela 10 mostra os resultados dos cálculos do coeficiente de Nash (NS) e o erro padrão (EP) e a respectiva porcentagem de EP em relação ao máximo valor observado no período para cada modelo desenvolvido. Os valores de NS acima de 0,9 significam que os modelos são muito bons e que a qualidade dos ajustes dos modelos com a P_{SB04} e sem a P_{SB04} são muito próximos, mas com um pequeno melhoramento para os modelos que utilizam a P_{SB04} . Os percentuais de EP mostram que os modelos de enchente apresentaram

erros em torno de 5% do valor máximo da vazão observada no período de validação e os de estiagem ficaram abaixo de 2%, esses resultados também confirmam o bom ajuste dos modelos.

Tabela 10. Resultados do Coeficiente de Nash e Erro Padrão.

Modelo	NS	EP	% Mx
ModC1	0,9659	1518	4,9
ModC2	0,9625	1586	5,1
ModE1	0,9343	536	1,7
ModE2	0,9328	543	1,8

5.3.4 Limitações do Modelo

Primeiramente deve-se ressaltar que, como dito anteriormente, o modelo utilizado nessa pesquisa é empírico (linear), ou seja, a sua formulação não utiliza equações físicas que descrevem os processos não-lineares do ciclo hidrológico; logo, o empirismo é a primeira limitação do modelo.

O modelo empírico utiliza uma série histórica de observações, que através da regressão linear e do método dos mínimos quadrados são ajustados os pontos gerando-se uma equação. Entende-se que os dados observados de nível e vazão dos postos utilizados nesse modelo são primordiais para obter o menor erro possível, nesse momento é importante esclarecer a importância da observação diária do nível do rio, o qual é utilizado para gerar a vazão diária através da curva-chave das estações fluviométricas. No desenvolvimento da modelagem para Marabá as limitações da validação dos modelos de enchente e estiagem ocorreram devido à falta de observação de níveis durante os meses de estiagem do ano de 2005.

Os modelos estatísticos baseados no deslocamento em canal aberto de um ponto a outro tem suas limitações aumentadas à medida que a distância entre esses pontos aumenta, isso deve-se ao fato do modelo de correlação de vazão não considerar a contribuição da região intervalar, e das diferenças do regime hidrológico de cada posto. O modelo que foi desenvolvido para Marabá buscou representar a contribuição da precipitação da sub-bacia intermediária para mitigar essa limitação, porém o mesmo tratou a precipitação buscando uma relação linear com a vazão, o que não ocorre devido à grande área de drenagem de cada posto fluviométrico utilizado (discretização espacial) e a resposta lenta na bacia.

A ausência de postos fluviométricos com medição de vazão ao longo do percurso de Carolina a Marabá e de Conceição do Araguaia a Marabá também é uma limitação. A principal implicação é na discretização espacial da sub-bacia estudada, forçando a tratar a precipitação média de uma área muito grande como uma única variável, além de limitar o cálculo do tempo de percurso da partícula d'água através da correlação dos postos fluviométricos separados por grandes distâncias.

A discretização temporal também conduz a imprecisões, principalmente no momento da definição do tempo de percurso de uma partícula de água de um ponto a outro, nesse caso a única possibilidade de passo no tempo foi de 24hs.

O modelo possui grandes limitações na sua aplicação em outras bacias, o método pode ser aplicado em qualquer bacia, mas as equações de previsão são distintas para cada bacia estudada. Por ser empírico, não pode ser utilizado para prever impactos na vazão de um cenário alterado de forma antrópica ou natural.

6 IMPACTO SOCIOECONÔMICO EM MARABÁ

O impacto da cheia do rio Tocantins em Marabá é observado anualmente nos meios de divulgação local, regional e nacional. Observa-se pela figura 48 que desde o início das observações do nível do rio Tocantins em Marabá até a atualidade em apenas 5 eventos de cheia a cota de alerta definida pela Defesa Civil, de 10 metros, não foi ultrapassada (1972, 1976, 1996, 1998 e 1999), com destaque para a menor cota observada, 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 o maior nível já registrado no ano de 1980, com a cota de 17,42 m.

Desde sua fundação em 1913, com 987 habitantes, Marabá é impactada pela enchente do rio Tocantins (figura 49), atualmente em proporções bem maiores em se tratando do número de pessoas atingidas, principalmente a partir da década de 80 quando, segundo PNUAH; PNUMA; MMA (2006) observou-se um crescimento populacional de 145 % em dez anos; o censo do IBGE de 2000 mostrou em Marabá uma taxa de crescimento de 31,2 % em 9 anos. Atualmente, dos mais de 200.000 habitantes, aproximadamente 5 % são atingidos anualmente pela cheia, levando ao envolvimento dos órgãos locais, regionais e federais para atender os desabrigados. Os núcleos mais comuns a serem atingidos pela cheia são Marabá Pioneira, Nova Marabá e Cidade Nova, os quais foram desenvolvidos nas áreas mais baixas da cidade, conforme é observado na topografia da cidade no Anexo 7, principalmente o núcleo de Marabá Pioneira que se desenvolveu na confluência dos rios Itacaiunas e Tocantins, passando a ser a área de maior risco de impacto.

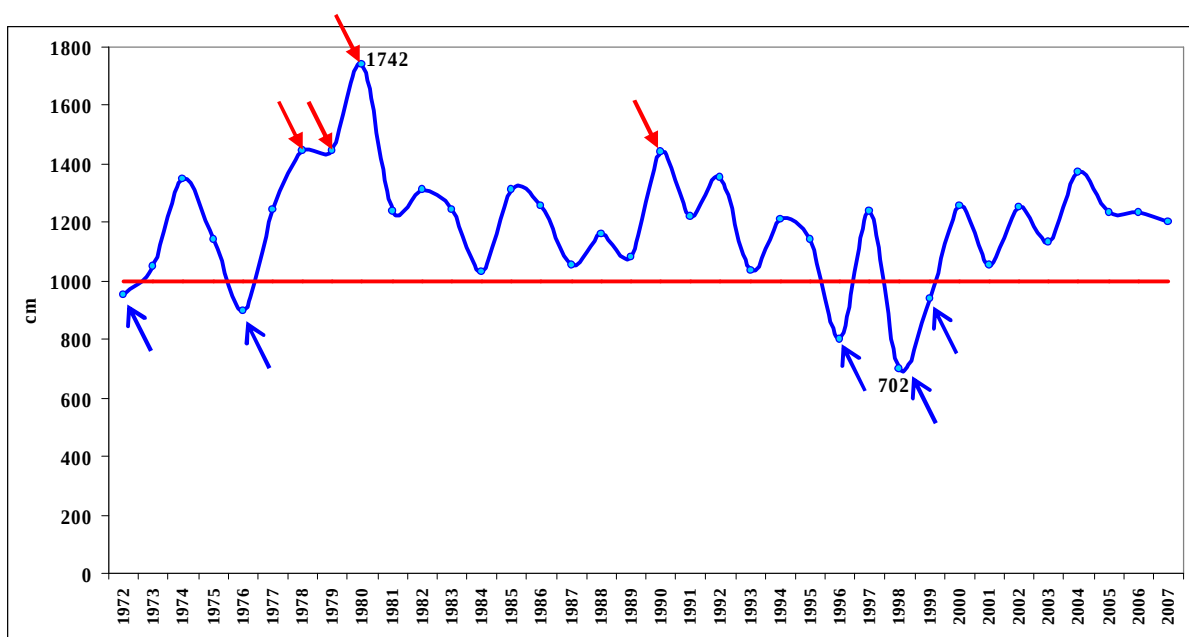


Figura 48. Cotas máximas mensais em Marabá (Série: 1972 – 2007).



Figura 49. Aspectos de cheias na Marabá antiga em 1970. (Fonte: Vivercidades).

Esse trabalho buscou informações detalhadas das últimas 3 cheias (2005, 2006 e 2007) que atingiram Marabá; os aspectos de cada episódio são mostrados nos estudos de caso a seguir.

6.1 ESTUDO DE CASO: CHEIA DE 2005

No ano de 2005 (figura 50) a cota de alerta foi ultrapassada no dia 22 de fevereiro, o nível continuou subindo até o dia 22 de março atingindo o nível máximo de 12,32m, permanecendo acima da cota de alerta até o dia 16 de abril. O Decreto nº 323, de 21 de março de 2005, editado pelo Prefeito Municipal de Marabá, declara “situação de emergência” nas áreas daquele município atingidas pela enchente dos rios Tocantins e Itacaiúnas e o Decreto nº 356 de 19 de abril de 2005 prorroga a situação de emergência. Os bairros atingidos foram: a) Marabá Pioneira - Francisco Coelho, Santa Rosa, Santa Rita, ruas Benjamin Constant, Magalhães Barata, Marechal Deodoro e Getúlio Vargas; b) Nova Marabá – Folha 25 e Folha 33; c) Cidade Nova – Independência, Novo Planalto e Amapá.

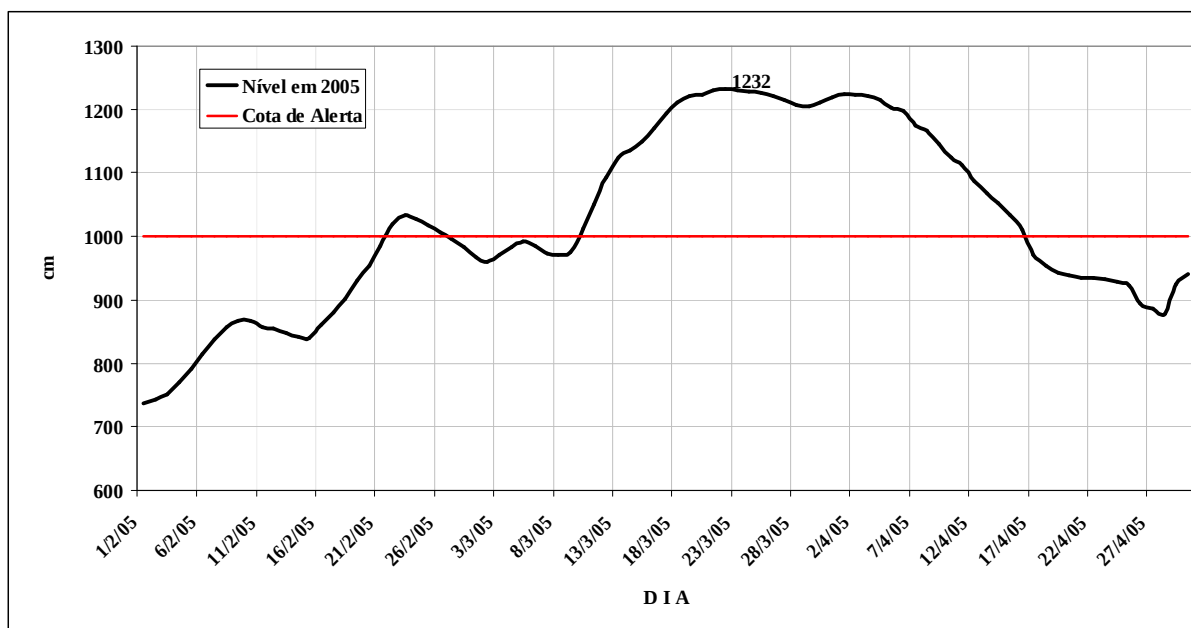


Figura 50. Níveis diários do rio Tocantins em Marabá no período da cheia do ano de 2005.

As ações da Defesa Civil municipal iniciaram-se no dia 24 de fevereiro com avaliações preliminares da situação atual e possíveis prevenções para a subida do nível do rio. Após o decreto de “situação de emergência” os órgãos envolvidos nas diversas operações eram: Coordenadoria Estadual de Defesa Civil (CEDEC/PA); Regional de Defesa Civil / Marabá; Coordenadoria Municipal de Defesa Civil / Marabá; Exército Brasileiro – 23ª Brigada de Infantaria de Selva; 4º Batalhão da Polícia Militar; Secretaria de Obras do Município; Departamento Municipal de Trânsito; Rede Celpa; SESP; COSANPA e Secretaria Municipal de Saúde.

Dentre as diversas providências adotadas pelos órgãos destacam-se:

- Desligamento da rede de energia elétrica nas áreas alagadas;
- Construção de abrigos (Tabela 11 e figura 51);
- Cadastramento e transporte das famílias para os abrigos (figura 52);
- Policiamento ostensivo nos abrigos;
- Desinfecção, limpeza e coleta de lixo nos abrigos;
- Instalação de fossas, energia, água e banheiros nos abrigos;
- Vacinação nos abrigos (hepatite, anti-tetânica, febre amarela e poliomielite);
- Inspeção e palestra nos abrigos por parte da Vigilância Sanitária;
- Sobrevôo com helicóptero cedido pelo Exército Brasileiro, para avaliar a extensão de toda a área atingida pela enchente no município de Marabá;

- Instalação de barracas da Defesa Civil nos principais abrigos para dar suporte durante a operação;
- Busca e resgate do cadáver vítima de asfixia por afogamento no rio Tocantins em frente à cidade de Marabá, o Sr. José Tavares Muniz Neto, 28 anos de idade, resgatado às 16h30 do dia 21 de março pelos Bombeiros do 5º GBM;
- Transporte escolar aos estudantes;
- Distribuição de Cestas Básicas (figura 53);
- Transporte das famílias dos abrigos para as suas residências;

O custo para a distribuição das 1.871 cestas básicas foi de aproximadamente R\$ 60.901,00.

Tabela 11. Relação dos abrigos provisórios construídos nos núcleos atingidos pela cheia.

Abrigos Provisórios	Nº Famílias	Abrigos Provisórios	Nº Famílias
Feirinha	143	Blosson Ville	05
Clube das Mães	63	Samuel Monção	06
Fl 33 – Posto Medalhão	75	Locavideo	10
C. S. – Posto de Saúde	03	Jardim União	16
C. S. – Praça Francisco Coelho	08	Arraial de Deus	31
C. S. – Casa J. Santos	03	Barracão do Plínio (C. V.)	04
C. S. – Assoc. dos Moradores	03	Barracão do Plínio (G. V.)	07
C. S. – Outros Locais	29	Barracão da Elza Miranda	04
Galpão Raimundo da Refr.	05	Barracão da Alzira Mutran	19
Amapá	20	Barracão da Nelza Santis	03
Fl 34 - CONAB	41	Barracão do Guido Mutran I	12
São Felix	08	Barracão do Guido Mutran II	04
Bacaba	07	Barracão do Guido Mutran III	05
Km 07	06	Maçonaria	05



Figura 51. As fotografias (a) e (b) mostram os abrigos construídos no núcleo Marabá Pioneira em 2005. (Fonte: PNUAH; PNUMA; MMA, 2006).



Figura 52. As fotografias a, b, c e d mostram as famílias retirando seus móveis e transferindo-se para os abrigos construídos na parte alta dos núcleos. (Fonte: CEDEC/PA).

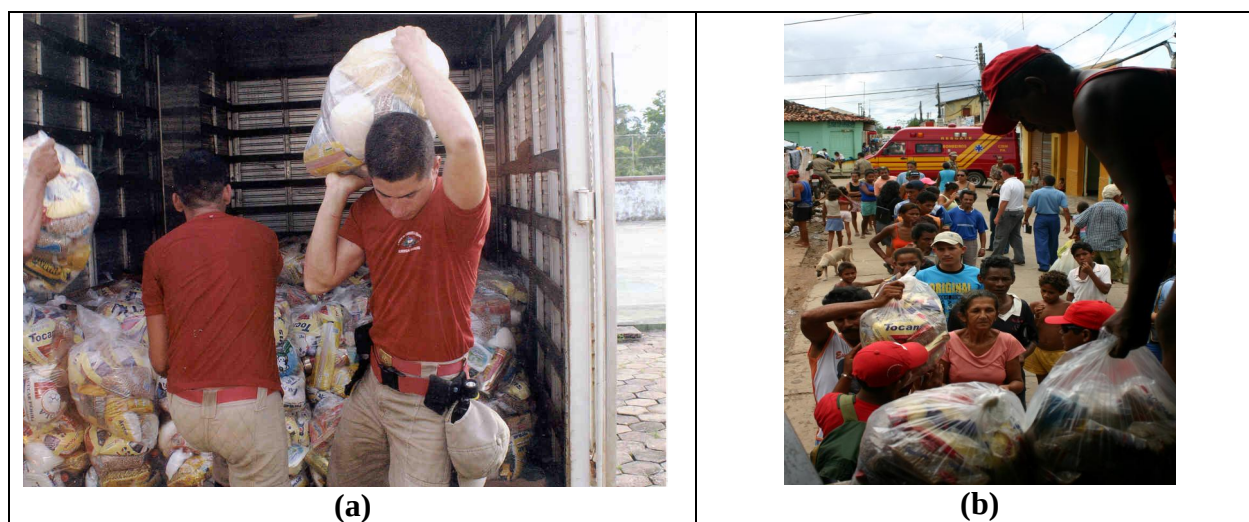


Figura 53. Distribuição de Cesta Básica para as famílias atingidas pela cheia mostrada nas fotografias (a) e (b).

Segundo a CEDEC/PA o número de famílias atingidas pela cheia de 2005 foi de aproximadamente 2.000, totalizando mais de 10.000 pessoas, dos quais 371 ficaram doentes e

2 morreram; os abrigos acolheram apenas 545 famílias. Além dos serviços essenciais danificados como abastecimento de água, abastecimento de energia, sistema de transporte e sistema de comunicação, a cheia provocou danos a 1.591 residências, 65 unidades comerciais, 20 km de pavimentação de vias e 6 edificações públicas.

Em 2005 o Governo Federal disponibilizou R\$500.000,00 para a recuperação das áreas afetadas pela enchente do rio Tocantins no município de Marabá-PA. A figura 54 mostra de forma mais ampla os núcleos atingidos pela cheia em 2005.

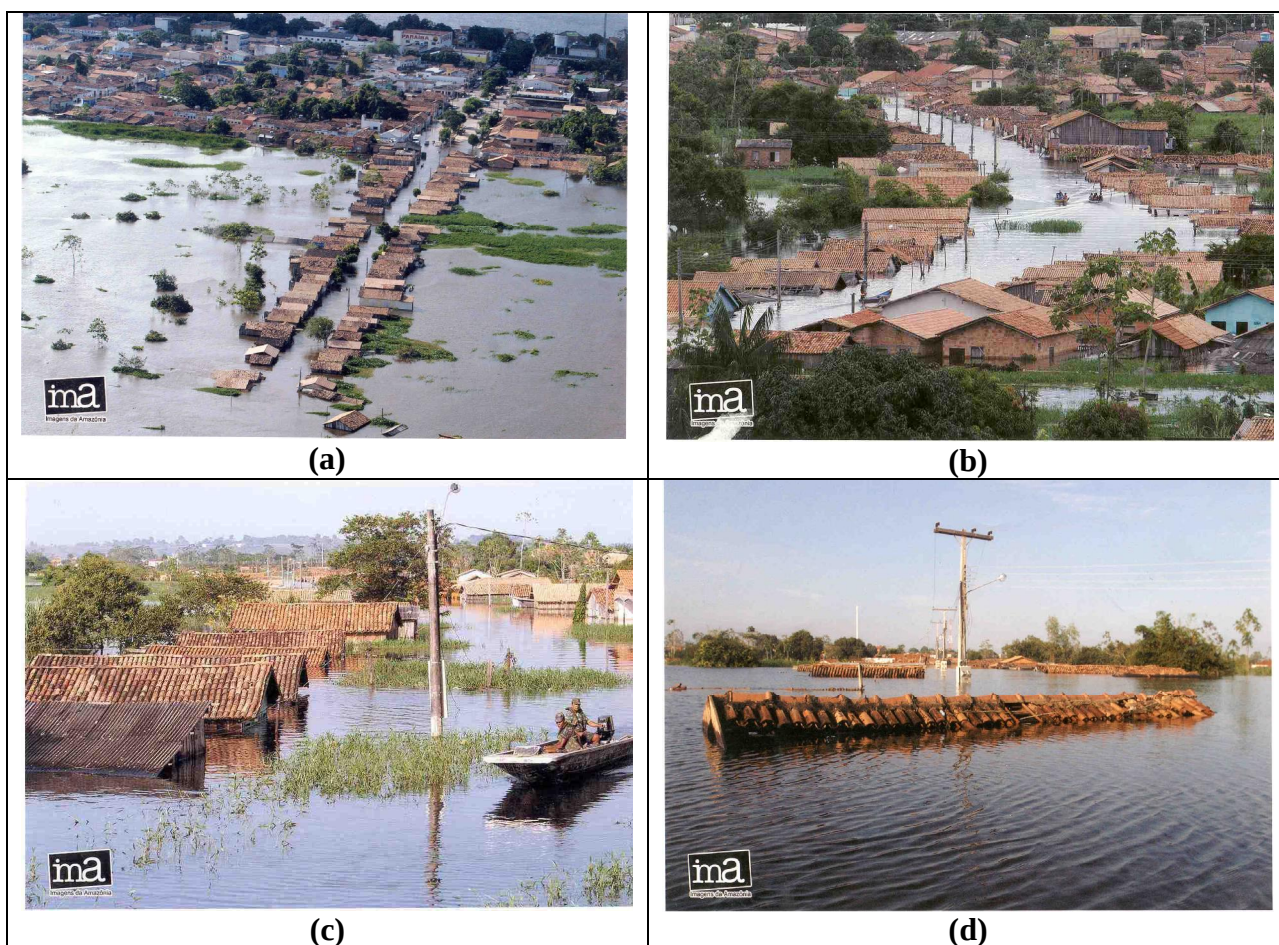


Figura 54. As fotografias (a), (b), (c) e (d) mostram as áreas em situação de emergência segundo o decreto 323/2005. (Fonte: CEDEC/PA).

6.2 ESTUDO DE CASO: CHEIA DE 2006

No ano de 2006 (figura 55) a cota de alerta foi atingida ainda em fevereiro, com uma seguida diminuição, mas logo o nível subiu atingindo seu primeiro máximo no dia 13 de março, com a cota de 12,36m; após uma diminuição houve um segundo pico de nível no

início do mês de abril, mantendo o nível do rio acima da cota de alerta até 27 de abril. Em 11 de abril de 2006 é decretado Situação de Emergência nos núcleos do município de Marabá-PA que foram atingidos pela cheia do rio Tocantins, o qual na mesma data atingiu a cota máxima de 12,36 m. Na Marabá Pioneira os bairros atingidos foram Francisco Coelho, Santa Rosa, Santa Rita, ruas Benjamin Constant, Magalhães Barata, Marechal Deodoro e Getúlio Vargas; na Nova Marabá foram as Folhas 14, 25 e 33 e na Cidade Nova os bairros Independência, Novo Planalto, Amapá e Bela Vista.

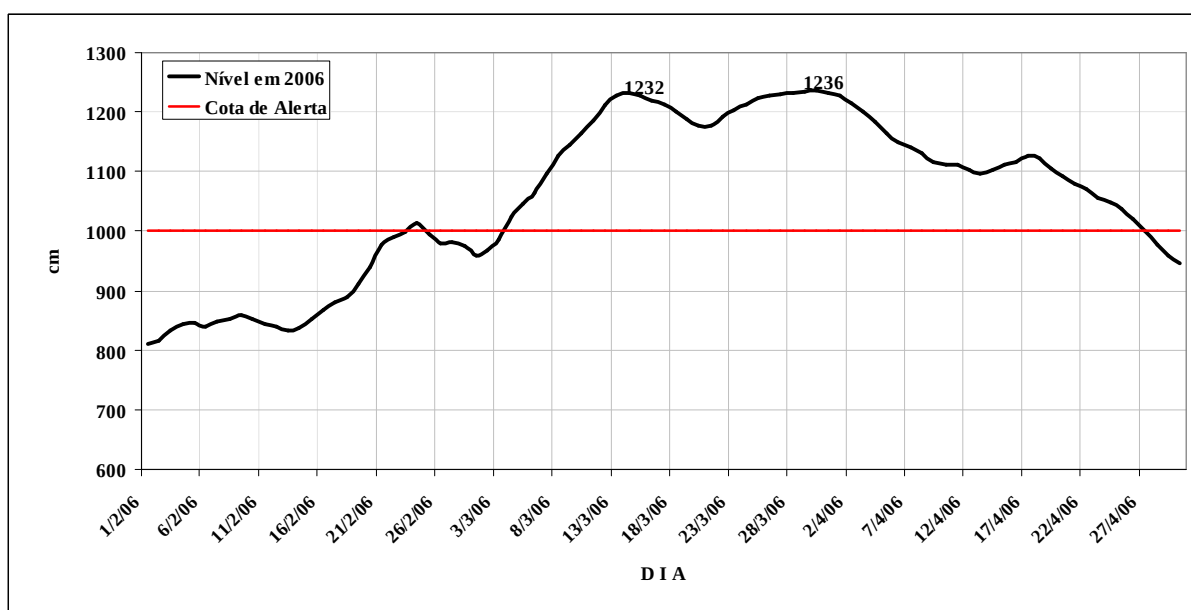


Figura 55. Níveis diários do rio Tocantins em Marabá no período da cheia do ano de 2006.

Observou-se que o pico da cheia ocorreu com uma defasagem de um mês em relação ao ano de 2005, porém com proporções semelhantes em função do mesmo nível máximo atingido em 2005. As ações da Defesa Civil e demais órgãos foram os mesmos executados em 2005 no intuito de atender o máximo de famílias desabrigadas que nesse ano chegou a 2.232, sendo aproximadamente 11.316 pessoas. No ano de 2006 os órgãos envolvidos na operação Enchente em Marabá além do Departamento Municipal de Trânsito tiveram o apoio da Policial Rodoviária Federal, assim como a visita do Governador do Estado Simão Jatene, no dia 12 de abril, que visitou com Lancha as áreas de risco, juntamente com o Coordenador Estadual de Defesa Civil Orlando Frade e comitiva.

Em 2006 foram distribuídas 1.331 cestas básicas atendendo a 1.331 famílias. O custo parcial das operações foi de R\$53.000 (custo das cestas básicas). As fotos da cheia de 2006 são mostradas na figura 57.



Figura 56. As fotografias (a) e (b) mostram em vista aérea a amplitude da enchente nos bairros que integram a Marabá Pioneira; (c) e (d) mostram as famílias desabrigadas. (Fonte: (a) e (b) – jornal local; (c) e (d) – CEDEC/PA).

6.3 ESTUDO DE CASO: CHEIA DE 2007

A cheia de 2007 (figura 58) foi de menores proporções em relação aos anos de 2005 e 2006; o pico ocorreu no último dia do mês de fevereiro, com a cota de 12,00 m, sendo decretado Situação de Emergência em 01 de março. Os bairros atingidos foram: a) Marabá Pioneira - Francisco Coelho, Santa Rosa, Santa Rita, ruas Benjamin Constant, Magalhães Barata, Marechal Deodoro e Getúlio Vargas; b) Nova Marabá – Folhas 14, 25 e 33; c) Cidade Nova – Independência, Novo Planalto e Bela Vista.

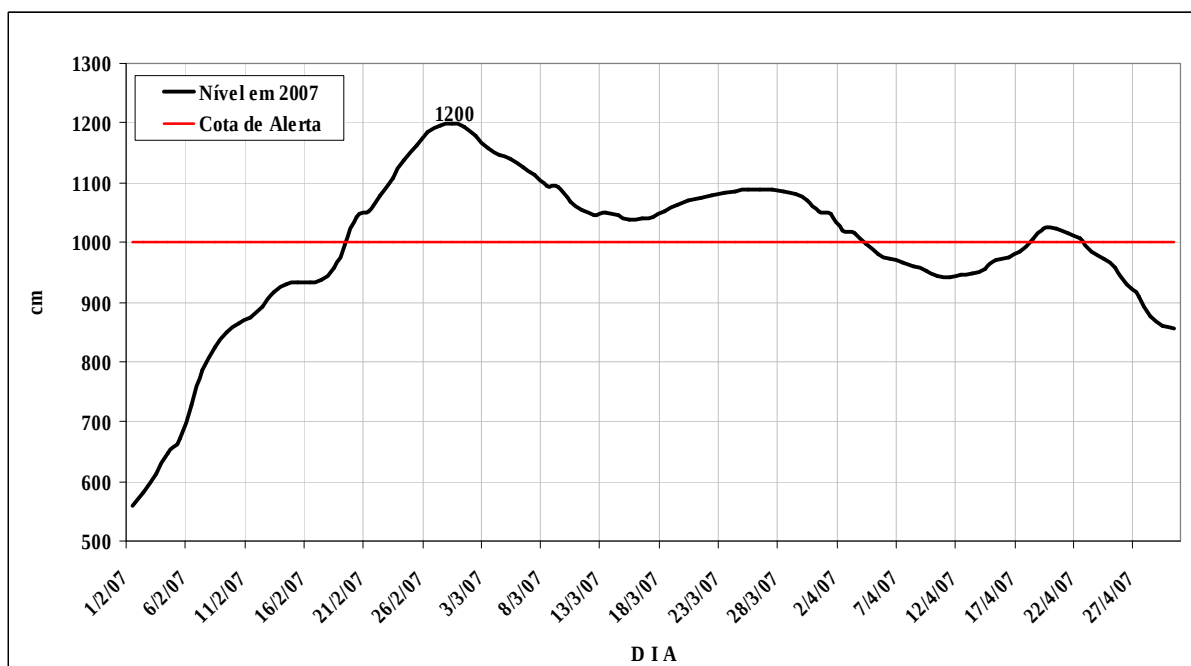


Figura 57. Níveis diários do rio Tocantins em Marabá no período da cheia do ano de 2007.

As ações em 2007 envolveram Defesa Civil municipal, regional e estadual, Bombeiros, Exército, Polícia Militar, secretarias municipais, rede Celpa, entre outros, que procuraram dar assistência para o maior número de desabrigados possível. Os abrigos construídos para acolher os atingidos pela cheia são mostrados na tabela 12.

Tabela 12. Relação dos abrigos provisórios construídos durante a cheia de 2007.

Abrigos Provisórios (Marabá Pioneira)	Nº Famílias	Abrigos Provisórios (Nova Marabá)	Nº Famílias	Abrigos Provisórios (Cidade Nova)	Nº Famílias
Feirinha	128	Folha 33	56	Abrigo do Tacho	11
Clube das Mães	75	Posto da Folha 33	18	Vavazão	38
Alzira Mutran	17	Assoc. dos Moradores (Fl33)	12		
Norberto de Melo	06	Mangueira (Folha 14)	38		
Ambrósio Franco	08	Folha 32	12		
R. Antônio Pimentel	05	Folha 29	07		
Bartolomeu Igreja	02	Arraial do Povo de Deus	42		
Casa do seu Braga	08				
Praça São Felix	14				
Praça Francisco Coelho	14				
GELOBOM	04				
Galpão do Franco	11				
Galpão LEOLAR	14				
PORTOBRÁS	54				
João Batista Bezerra	20				
Gosto Paraense	03				
Geleira	03				
Blosson vile	06				
Geleira do Lúcio	03				
Maçonaria	08				

Observa-se pela tabela 9 que o maior número de desabrigados estão no núcleo de Marabá Pioneira, que possui o maior número de bairros desenvolvidos em áreas alagáveis, conforme é mostrado no anexo 6. Portanto, em 2007 as principais avenidas da Marabá Pioneira também ficaram alagadas e os principais comércios da orla foram danificados assim como as residências de mais de 403 famílias.

O número total de famílias desabrigadas em 2007 foi de 1.021 totalizando aproximadamente 5.100 pessoas atingidas. A CEDEC/PA em 2007 registrou 741 alunos que pararam de freqüentar as escolas em função da enchente. O custo com distribuição de cestas básicas foi de R\$ 40.000,00.

Assim como nos outros anos o impacto da cheia em Marabá foi notícia nos principais jornais do estado, conforme figuras 59 e 60. Outras fotos da enchente podem ser observadas na figura 61.



Figura 58. Notícia da enchente do rio Tocantins em Marabá/2007. (Fonte: O LIBERAL).

Cheia desabriga famílias em Marabá

ENCHENTE
Tocantins já subiu mais de 10 metros e alagou dezenas de casas na cidade

NILSON SANTOS
Da Marabá

O nível do rio Tocantins amanheceu ontem na cota dos 10,68 metros e já começou a desabrigar famílias nos bairros Santa Rosa e Santa Rita, no Núcleo Pioneiro de Marabá, sudeste do Pará. São os primeiros a sentirem o impacto da subida das águas, cujo nível de alerta é de dez metros.

A Defesa Civil Municipal calcula que pelo menos 100 famílias já deixaram suas casas para procurar refúgio em residências de parentes ou amigos. Como a situação ainda não é considerada crítica e sempre há a esperança de que o nível do rio volte a baixar, a Defesa Civil ainda não está oficialmente trabalhando no problema, apenas "observando e esperando o momento de agir", disse a O LIBERAL em Marabá o coordenador municipal Francisco Ribeiro Alves, o "Bebe".

Ele ressaltou que a entidade nem mesmo começou a fazer o cadastramento das possíveis famílias que devem ser atingidas pelas águas e que, enquanto perdurar o período de enchente, devem receber auxílio da prefeitura e até mesmo do governo do Estado, caso a situação obrigue a decretação de estado de calamidade pública.

O coordenador da Defesa Civil adianta que provavelmente na tarde de hoje haverá reunião com todos os organismos que compõem a Defesa Civil, principalmente o Corpo de Bombeiros, para discutir as ações que devem ser desencadeadas a partir de agora, caso as águas continuem subindo. Na Nova Marabá e no Núcleo Cidade Nova o rio Itacatuas também evoluiu bastante e já está desabrigando na Folha 33 e nas adjacências do balneário "Vavazão".

Na noite de anteontem, um grupo de desabrigados invadiu o prédio da antiga Feira Municipal, na entrada da Marabá Pioneira, que está sendo transformada pela prefeitura em escola profissionalizante de Informática. Até o ano passado, por estar situada no bairro Santa Rosa, era para a "feirinha" que corriam as primeiras famílias que tinham suas casas invadidas. A área está toda murada e com portão de ferro, mas os cadeados foram arrebatados. Não há a informação se a prefeitura vai tomar alguma providência no sentido de retirar os invasores ou removê-los para outro local. Na tarde de ontem, a reportagem não localizou nenhum dos assessores do prefeito Sebastião Miranda para falar sobre o assunto.

Questionado sobre a situação o coordenador da Defesa Civil nada soube informar, ratificando que não sabe quantas pessoas estão no prédio da Feira Municipal. "Ainda não realizamos nenhum cadastramento", reforçou Bebe.

A antiga Feira Municipal desativada há alguns anos porque não atendia às necessidades da população da Marabá Pioneira, acabou se transformando num local totalmente insalubre, dada a falta de limpeza e conservação da área, trabalho que só vinha sendo realizado por ocasião das enchentes. Com o novo projeto que ainda está no início de execução, até os banheiros que existiam foram destruídos para dar lugar a outros, que ainda não foram construídos.

No local a reportagem conversou com a dona-de-casa Maria Luzinete Batista, 52 anos, mãe de seis filhos e que mora na rua São Pedro, do bairro Santa Rosa. Ela foi uma das pessoas que foi expulsa pelas águas na noite de anteontem. Segundo ela, o nível da água já estava "pela canela". Luzinete justificou que a decisão de invadir o prédio público se aconteceu porque o Tocantins começou a entrar nas casas e, segundo ela, não aparece ninguém da Defesa Civil para realizar o cadastramento das famílias que vivem na área de risco. Ela só reforçou o que Bebe já havia adiantado para a reportagem, que o cadastramento realmente ainda não tinha começado. Um número não oficial revela que cerca de 70 famílias haviam se mudado para a feirinha até a tarde de ontem.

Prédio da antiga Feira Municipal, na Marabá Pioneira, foi invadido por famílias cujas casas foram tomadas pela água

Desabrigados invadiram prédio em obras para ficar em segurança

Figura 59. Notícia mostra os abrigos construídos na Marabá Pioneira. (Fonte: O LIBERAL).

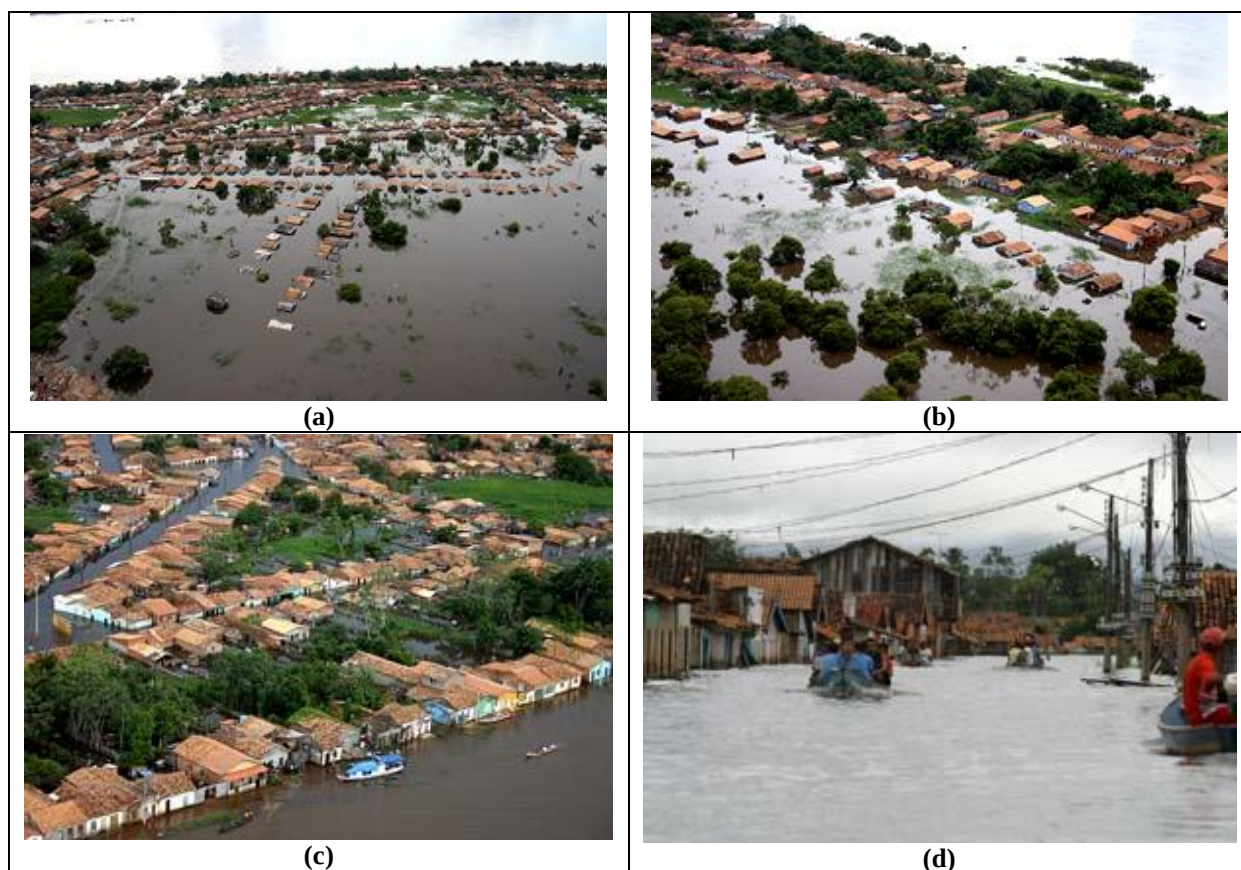


Figura 60. As fotografias (a), (b), (c) e (d) mostram a amplitude da cheia no ano de 2007. (Fonte: http://www.maraba.pa.gov.br/defesa_12.htm; acesso em 20/11/2007).

7 CONCLUSÃO

O foco deste trabalho é na bacia hidrográfica do rio Tocantins com uma abordagem que procura integrar as características do regime hidrológico com o estado da arte sobre o conhecimento científico da climatologia dinâmica tropical observada sobre a América do Sul. A bacia hidrográfica do Tocantins tem importância fundamental ao País, uma vez que ela exerce influências diretas em varias cidades localizadas nas regiões centro-oeste e norte do Brasil. Contudo, o problema a ser abordado no presente trabalho refere-se, basicamente, ao regime hidrometeorológico do rio Tocantins na região de Marabá no sudeste do Pará, onde historicamente há o problema sério de enchentes que impactam diretamente o meio ambiente, as atividades econômicas e a sociedade daquela região. Os estudos de caso das cheias registradas nos anos de 2005, 2006 e 2007, documentadas neste trabalho, revelaram que, em média, aproximadamente 10 mil pessoas (5% da população) são atingidas pela cheia do rio Tocantins em Marabá. Os principais núcleos atingidos são o de Marabá Pioneira e Nova Marabá, os quais somaram 588 famílias atingidas na cheia de 2007, considerada de menor impacto em relação aos anos de 2005 e 2006. Dentre os principais órgãos envolvidos nas diversas ações de atendimento aos atingidos, destaca-se a Defesa Civil Regional de Marabá a qual utiliza 100% do seu quadro efetivo no período de alerta. Os custos com a distribuição de cestas básicas estão em torno de R\$ 60.000,00, nesse valor não estão incluídos gastos com construção de abrigos, distribuição de remédios e com as recuperações das áreas afetadas pela enchente, este último demandou em torno de R\$ 500.000,00 do Governo Federal no ano de 2005.

O presente trabalho aborda de uma maneira ampla o problema de hidrologia em termos de um estudo diagnóstico (caracterização da precipitação na escala da bacia hidrográfica e a estrutura dinâmica associada a enchentes no rio Tocantins em Marabá) e prognóstico (desenvolvimento de um modelo de previsão de vazão considerando diferentemente as características dos períodos da enchente/cheia e estiagem/vazante do rio Tocantins em Marabá).

Os aspectos diagnósticos dos anos com vazão na categoria acima/muito acima do normal (novembro a abril) em Marabá mostraram que a precipitação na escala da bacia foi acima do normal em todos os meses, sendo coerente com o comportamento da vazão naquela região. Nesse cenário observou-se a TSM no Oceano Pacífico Tropical em condição do fenômeno La Niña, com um padrão de resfriamento mais intenso nos meses de novembro, dezembro e janeiro, enquanto que a TSM no Atlântico Sul, entre 20°S e 30°S mostrou-se

anomalamente fria, exceto nos meses de janeiro e abril; os movimentos verticais no sentido zonal associados à célula de Walker mostraram uma intensificação dos movimentos ascendentes na região próximo a Marabá (5°S) principalmente nos meses de janeiro, março e abril; a circulação troposférica associada à célula de Hadley mostrou correntes ascendentes mais intensas entre 10°S e 15°S, exceto no mês de abril, quando a convecção foi mais intensa em 5°S; na composição dos ventos em altos níveis observou-se uma intensificação da Alta da Bolívia com posicionamento mais a leste do normal, o cavado associado à AB ao norte do equador e a região de difluência nos meses de março e abril associada à atuação da ZCIT esteve mais adentro do continente; em baixos níveis o jato canalizado pelos Andes intensificou a entrada de umidade vinda da Amazônia nas regiões da bacia sendo um fator importante para manutenção da ZCAS e teve seu sentido NW-SE mais acentuado para leste passando a convergir com a borda noroeste da Alta semi-permanente do Atlântico Sul em torno de 20°S gerando uma região de instabilidade favorável a convecção nas regiões da cabeceira da bacia do rio Tocantins. Nos resultados da composição de ROL, observam-se anomalias negativas associadas à convecção profunda típica da atuação da ZCAS com orientação NW-SE sobre o centro-sul da Amazônia, sudeste do Brasil e Oceano Atlântico Sul nos meses de novembro e dezembro, enquanto que nos meses de fevereiro e março os baixos valores de ROL encontraram-se nas latitudes mais baixas, estendendo-se para as regiões próximas a Marabá (5°S), esse comportamento de ROL indicou a atuação típica da banda de nebulosidade convectiva associada a ZCIT.

Na composição dos anos com vazão na categoria abaixo/muito abaixo em Marabá observou-se que a precipitação na bacia esteve abaixo do normal, a TSM no oceano Pacífico Tropical mostrou condições do fenômeno El Niño, com padrão mais intenso nos meses de novembro, dezembro, março e abril; no Atlântico Sul (entre 20°S e 30°S) a TSM mostrou-se anormalmente quente em todos os meses de composição; os movimentos verticais no sentido zonal associados à célula de Walker mostraram um enfraquecimento dos movimentos ascendentes na região próxima a Marabá (5°S) e a circulação troposférica associada à célula de Hadley mostrou inibição dos movimentos ascendentes entre 10°S e 15°S; na análise dos ventos em altos níveis observou-se uma intensificação do cavado do nordeste e um posicionamento da Alta da Bolívia mais a oeste de sua posição climatológica; em baixos níveis o jato canalizado pelos Andes foi desconfigurado conforme anomalias do vento sobre a região amazônica que foram de leste, portanto desfavorável a entrada de umidade vinda do Atlântico tropical e posterior canalização para regiões da ZCAS. O déficit pluviométrico observado nesse cenário esteve associado, entre outros fatores, as anomalias positivas de ROL

em grande parte do Brasil tropical principalmente sobre as regiões da cabeceira do rio Tocantins, indicando inibição de atividade convectiva nas respectivas regiões.

Os modelos desenvolvidos para prognósticos durante os períodos de cheia (dezembro a maio) e estiagem (junho a novembro) mostraram um bom ajuste conforme estatística de avaliação de desempenho: o coeficiente de Nash ficou acima de 0,9 para todos os modelos, o erro padrão para os modelos de cheia (estiagem) foi em torno de 5% (1,5%) em relação à máxima vazão observada no período de validação. A utilização da precipitação média da bacia contribui para uma melhor correlação entre as variáveis independentes e a vazão em Marabá, conseqüentemente uma melhor previsão. A discretização espacial levou ao desenvolvimento de dois modelos para cada período, modelos com e sem a precipitação da área próxima a Marabá (P_{A04}) resultando em um melhor desempenho dos modelos que utilizaram a P_{A04} , porém com uma menor antecedência na previsão. O período de cheia (estiagem) permitiu uma previsão com antecedência de 2 e 4 (3 e 5) dias, associado a maior (menor) velocidade da onda nesse período.

Dentre as dificuldades encontradas para o desenvolvimento da modelagem, destacam-se a baixa densidade de estações pluviométricas, principalmente na região leste da bacia, assim como os poucos postos com medição de vazão no trecho modelado. Dificuldades dessa natureza são comuns dentro da modelagem hidrológica e estão associadas ao alto custo de instalação e principalmente de operação de postos fluviométricos e pluviométricos.

Através desta pesquisa fica claro a necessidade de priorizar estudos que atendam à demanda da população que é impactada pela ação da natureza, nesse caso as enchentes. Observou-se que é possível dar informações futuras confiáveis através de uma melhor análise observacional; nesse contexto, a busca pelo entendimento do comportamento dinâmico atmosférico, das forçantes climáticas como as TSM do Pacífico a Atlântico são fundamentais para entender quais os cenários favoráveis à ocorrência de extremos de vazão do rio Tocantins em Marabá e, conseqüentemente, a significativos impactos a população local.

Dessa forma, as análises diagnósticas juntamente com os modelos prognósticos tornam-se suportes básicos para nortear as ações preventivas da cheia, assim como as ações durante e após a sua ocorrência. É válido ressaltar que o atual avanço do impacto antrópico sobre o meio ambiente tem alertado os cientistas para o desenvolvimento de modelos conceituais que possam prever esses impactos na hidrologia de bacia (cheias e estiagens). A bacia hidrográfica do rio Tocantins também sofre com a ação do homem e, conseqüentemente, demanda atualização de estudos dessa natureza.

REFERÊNCIAS

- ALLASIA, D. G.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; GERMANO, A.; COLLISCHONN, B.; FAILACHE, N. **Modelo Hidrológico da Bacia do Alto Paraguai**. In: III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste, ABRH, Goiânia (GO), 2004.
- ANA – Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. **A Região Hidrográfica dos Rios Tocantins e Araguaia**. Brasília – DF, 2006.
- ANDREOLLI, I. **Previsão de Vazão em Tempo Real no Rio Uruguai com Base na Previsão Meteorológica**. 2003. 182f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH, UFRGS, Rio Grande do Sul, 2003.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88-108, 2004.
- CASTILHO, A. S.; OLIVEIRA, L. M. **Previsão Hidrológica de Vazões para a Cidade de Governador Valadares Utilizando Modelo Linear de Propagação**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH: Aracaju, 2001.
- CHAVES, R. R. **Conexões entre a Temperatura da Superfície do Oceano Atlântico e a Convecção de Verão Sobre a América do Sul e Áreas Adjacentes**. 2003. 204p. Tese (Doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2003.
- CHAVES, R. R.; CAVALCANTI, I. F. A. Atmospheric circulation features associated with rainfall variability over southern Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 129, p. 2614-2626, 2001.
- CHAVES, R. R.; NOBRE, P. Interactions Between Sea Surface Temperature over the South Atlantic Ocean and the South Atlantic Convergence Zone. **Geophysical. Research Letters**, v. 31, L03204, 2004.
- CHAVES, R. R.; SATYAMURTY, P. Estudo das Condições Regionais Associadas a um Evento de Forte ZCAS em Janeiro de 2003. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 21, p. 134-140, 2006.
- COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. 270 f. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH, UFRGS, Rio Grande do Sul, 2001.
- DNAEE. PROGRAMA DE HOMOGENEIZAÇÃO DE DADOS (PROHD) – Chuvas e Vazão. **Divisão de Controle e Recursos Hídricos**, 1980.
- FERREIRA, N. J.; SANCHES, M.; SILVA DIAS, M. A. F. Composição da Zona de Convergência do Atlântico Sul em Períodos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 19, p. 89-98, 2004.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; Clima da Amazônia. **Revista Climanalise**, Edição Especial, 1996.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C.A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 28, p. 101-126, 1998.

GEORGAKOS, K. P.; KRZYSZTOFOWICZ, R. Probabilistic and Ensemble Forecasting. **Journal of Hydrology**, v. 249, p. 1. 2001.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. Macro-scale Hydrological Modelling – A Scandinavian Experience. In: Internation Symposium on: ‘Can Science and Society Save the Water Crisis in the 21st Century – reports From the World’, Anais... Tokyo: Japan Society of Hidrology and Water Resources, p. 38-45, 2000.

GUILHON, L. G. F. **Modelo Heurístico de Previsão de Vazões Naturais Médias Semanais Aplicado à Usina de Foz do Areia**. 2002. 95f. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro. UFRJ, 2002.

KALNAY E.; Co-authors. The NCEP/NCAR Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, p. 437–471, 1996.

KILADIS, G.; DIAZ, H. F. Global Climatic Anomalies Associated with Extremes in the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v. 2, p. 1069-1089, 1989.

KODAMA, Y. Large-scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones, (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and SACZ) Part II: Conditions of the Circulations for Generating the STCZs. **Journal Meteorological Society Japan**, v. 71, p. 581-610, 1993.

LEAL, L. A. **Estudo dos Efeitos e Alteração no Uso e Ocupação do Solo sobre as Séries Hidrológicas**. 2001. 153f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP. 2001.

LIEBMANN, B.; KILADIS, G. N.; MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; GLICK, J. D. Sub Monthly Convective Variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 12, p. 1877-1891, 1999.

LIEBMANN B.; SMITH C. A. Description of a Complete (interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, p. 1275–1277, 1996.

MARENGO, J. A. Variations and Change in South American Streamflow. **Climate Change**, v. 31, p. 99-117, 1995.

MARENGO J.A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY V. E.; FILIZOLA N. P.; WAINER, I. C. Onset and End of the Rainy Season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v. 14, p. 833-852, 2001.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, CELESTE.; 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.

MEDEIROS, A. D.; BENTO, V. G.; MONTEIRO, A. E. G. C.; PEREIRA, C. M.; ARAÚJO, L. M. N. **Previsão de Níveis no Pantanal**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, São Paulo, 2007.

MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. Escalas Hidrológicas I: Conceitos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, p. 21-44, 1997.

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.

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.

MUZA, M. N.; CARVALHO, L. M. V. Variabilidade Intrazonal e Interanual de Extremos na Precipitação Sobre o Centro-Sul da Amazônia Durante o Verão Austral. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v 21, p. 29-41, 2006.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. “River flow forecasting through conceptual models, part I – a discussion of principles”. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290, 1970.

NETO, A. R. **Simulação Hidrológica na Amazônia: Rio Madeira**. 2006. 178p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. Rio de Janeiro: UFRJ. 2006.

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

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

OLIVEIRA, L. C. K. **Papel do Monitoramento e da Previsão de Vazões no Gerenciamento de Bacias Hidrográficas**. 2003. 177f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. Rio de Janeiro: UFRJ. 2003.

PNUAH; PNUMA; MMA. **Relatório de Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental-Marabá**. Projeto GEO Cidades. 2006.

QUADRO, M. F. L. **Estudo de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) Sobre a América do Sul**. 1994. 123f. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São Paulo, 1994.

REYNOLDS, R. W.; RAYNER, N. A.; SMITH, T. M.; STOKES, D. C.; WANG, W. An Improved in situ and Satellite SST Analysis for Climate. **Journal of Climate**, v. 15, p. 1609–1624, 2002.

ROBERTSON, A. W.; MECHOSO, C. R. Interannual and Interdecadal Variability of the South Atlantic Convergence Zone. **Monthly Weather Review**, v. 128, p. 2947-2957, 2000.

ROCHA, E. J. P. **Balanço de Umidade e Influências de Condições de Contorno Superficiais Sobre a Precipitação da Amazônia**. 2001. 210p. Tese (Doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São Paulo, 2001.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, p. 1606-1626, 1987.

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

SOUSA, E. P. P. **Relações Entre as Anomalias de TSM do Atlântico e Pacífico e as Precipitações na Amazônia Oriental**. 2003. 78f. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos. 2003.

SOUZA, E. B.; AMBRIZZI, T. Modulation of the Intraseasonal Rainfall over Tropical Brazil by the Madden–Julian Oscillation. **International Journal of Climatology**. (in press), Published online in Wiley InterScience, 2006.

SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; AMBRIZZI, T. The Regional Precipitation Over the Eastern Amazon/Northeast Brazil Modulated by Tropical Pacific and Atlantic SST Anomalies on Weekly Timescale. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 19, p. 325-336, 2004.

SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; AMBRIZZI, T. Intraseasonal and Submonthly Variability over the Eastern Amazon and Northeast Brazil during the Autumn Rainy Season. **Theoretical And Applied Climatology**, v. 81, p. 177-191, 2005.

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

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

SUDAM; PNUD; OMM. Projeto de Hidrologia e Climatologia da Amazônia (PHCA). **Aplicação de Modelos Estatísticos na Bacia do Rio Tocantins**. Publicação N° 28, 1980.

TODINI, E. “The ARNO rainfall-runoff model”. **Journal of Hydrology**, v. 175, p. 339-382, 1996.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. ABRH, Porto Alegre, Editora da UFRGS, 678p., 2ª Edição, 2005.

TUCCI, C. E. M; CLARKE, R. T; DIAS, P. L. S.; COLLISCHONN, W. **Previsão de Vazão com Base na Previsão Climática**. Distrito Federal: Dupligráfica. Projeto BRA/00/029, capacitação do setor elétrico brasileiro em relação à mudança global do clima. Relatório de pesquisa. 2003.

TUCCI, C. E. M.; COLLISCHON, W. **Previsão de Vazão em Curto Prazo com Base na Precipitação: Modelos Conceituais**. In: I Workshop – Previsão de Vazão, ONS, 20 e 21 de setembro Rio de Janeiro, 2007 Disponível em: http://www.ons.org.br/download/previsao_vazoes/artigos_sessao/AT_Sess%C3%A3o06.pdf >. Acesso em 26 de novembro de 2007.

XAVIER, T. M. B. S. et al.. A Técnica dos Quantis e suas Aplicações em Meteorologia, Climatologia e Hidrologia, com Ênfase para as Regiões Brasileiras. Brasília: Thesaurus, 2002.

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.

ZHANG, C. Large-scale Variability of Atmosphere Deep Convection in Relation to Sea Surface Temperature in the Tropics. **Journal of Climate**, v. 6, p. 1898-1913, 1993.

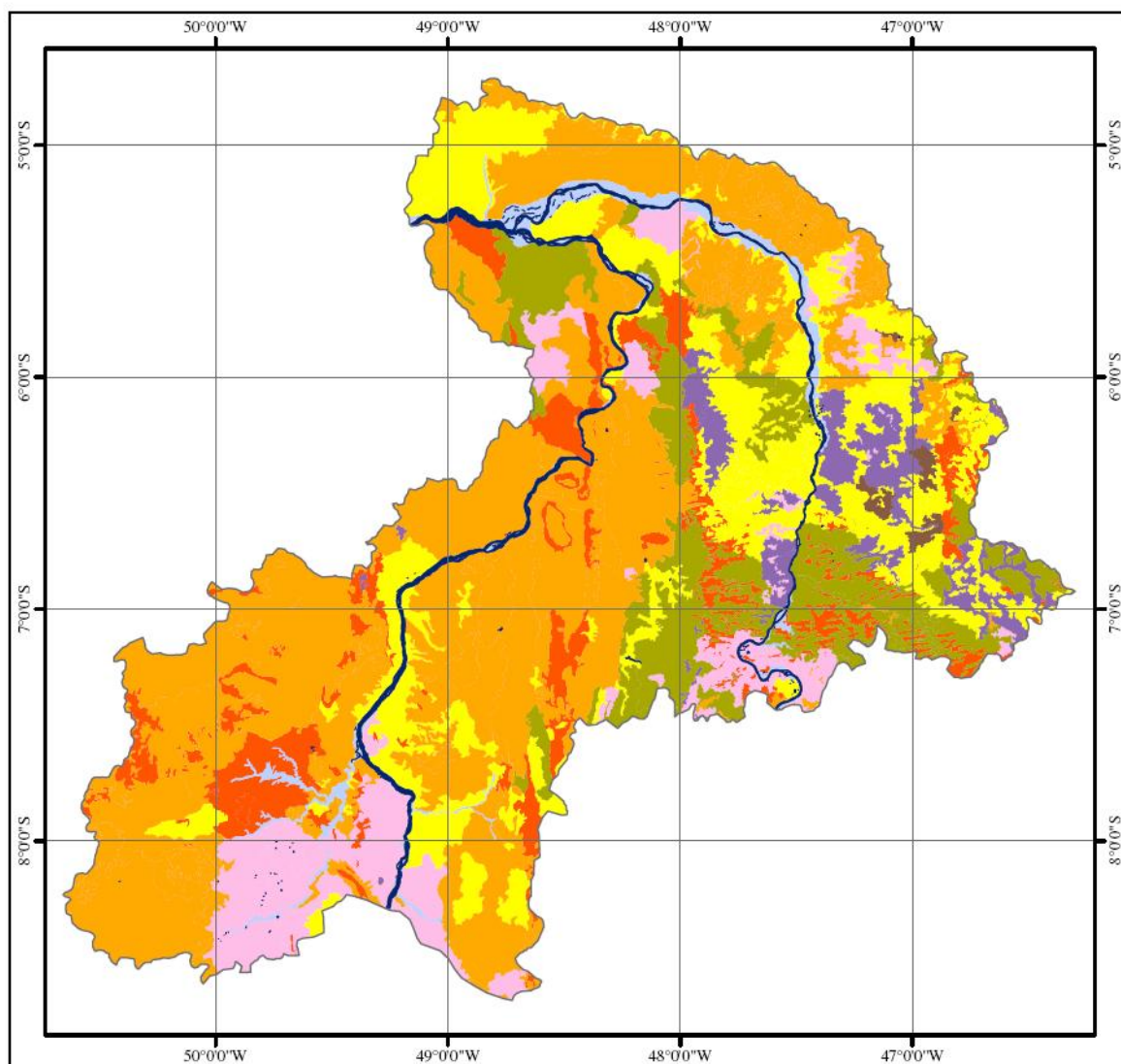
ZHOU, J.; LAU, K. M. Does a Monsoon Climate Exist over South America? **Journal of Climate**, v. 11, p. 1020-1040, 1998.

WALISER, D. E.; GAUTIER, C. “A Satellite-Derived Climatology of the ITCZ”. **Jornal of Climate**, v. 6, p. 2162-2174. 1993

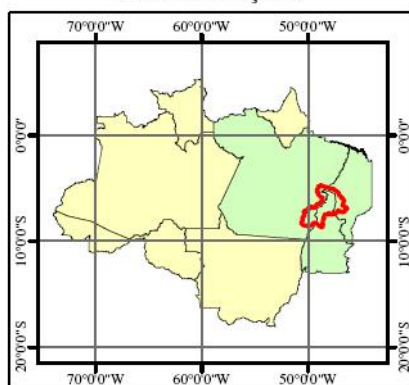
ANEXOS

ANEXO 1

MAPA PEDOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO



LOCALIZAÇÃO



FONTE: Comissão para Coordenação do SIVAM/IBGE.
Base Cartográfica Vetorial da Amazônia Legal. Escala
1:250.000 Rio de Janeiro: CCSIVAM/IBGE, 2004.

LEGENDA

- Hidrografia
- Limite da área de estudo
- Neossolo Quartzênico
- Cambissolo; Neossolo Litólico
- Gleissolo; Neossolo Flúvico
- Plintossolo
- Nitossolo Vermelho
- Vertissolo
- Argissolo Vermelho-Amarelo;
Argissolo Vermelho; Argissolo Amarelo
- Latossolo Vermelho-Amarelo;
Latossolo Amarelo; Latossolo Vermelho

CONVENÇÕES
CARTOGRÁFICAS

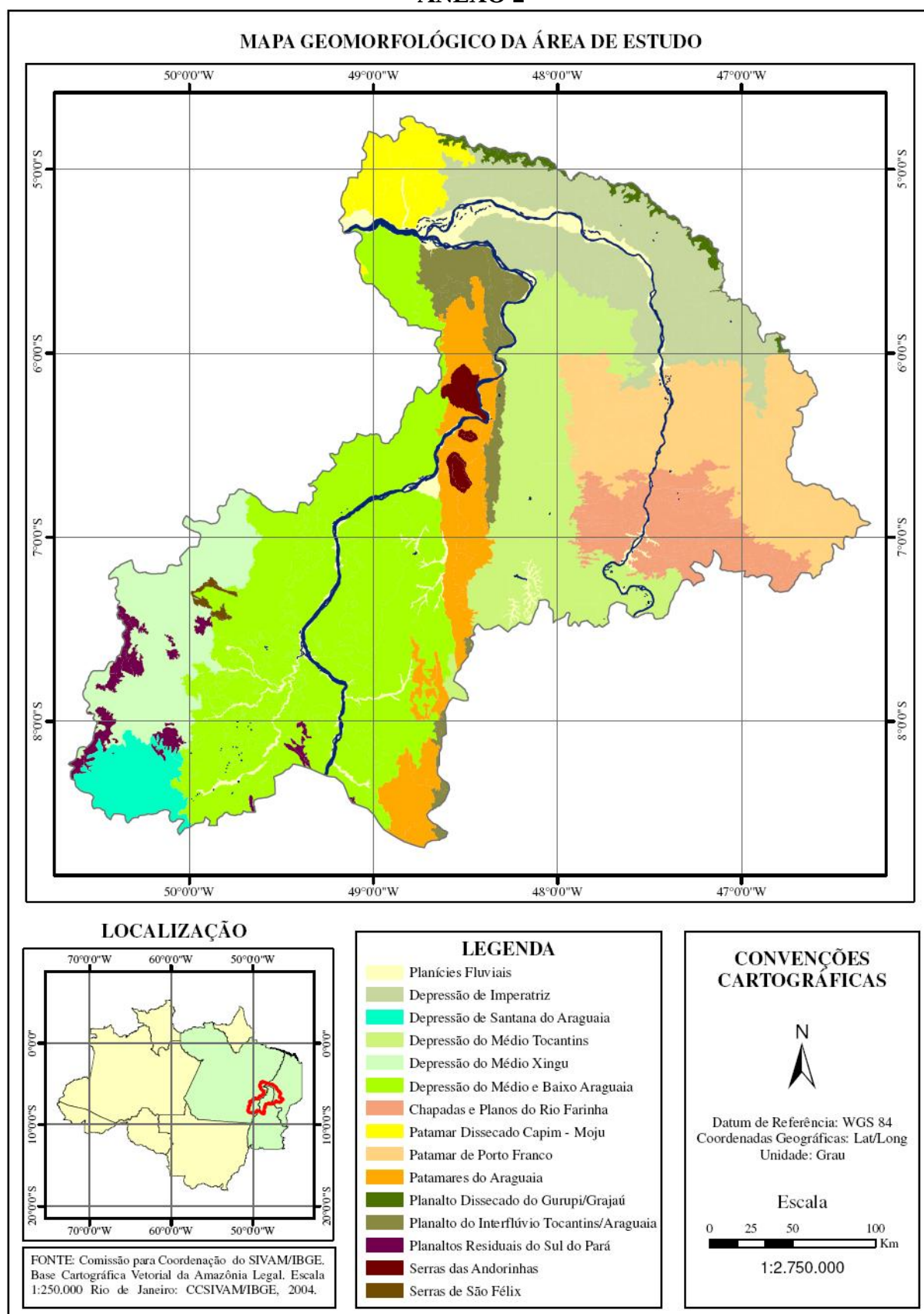
Datum de Referência: WGS 84
Coordenadas Geográficas: Lat/Long
Unidade: Grau

Escala

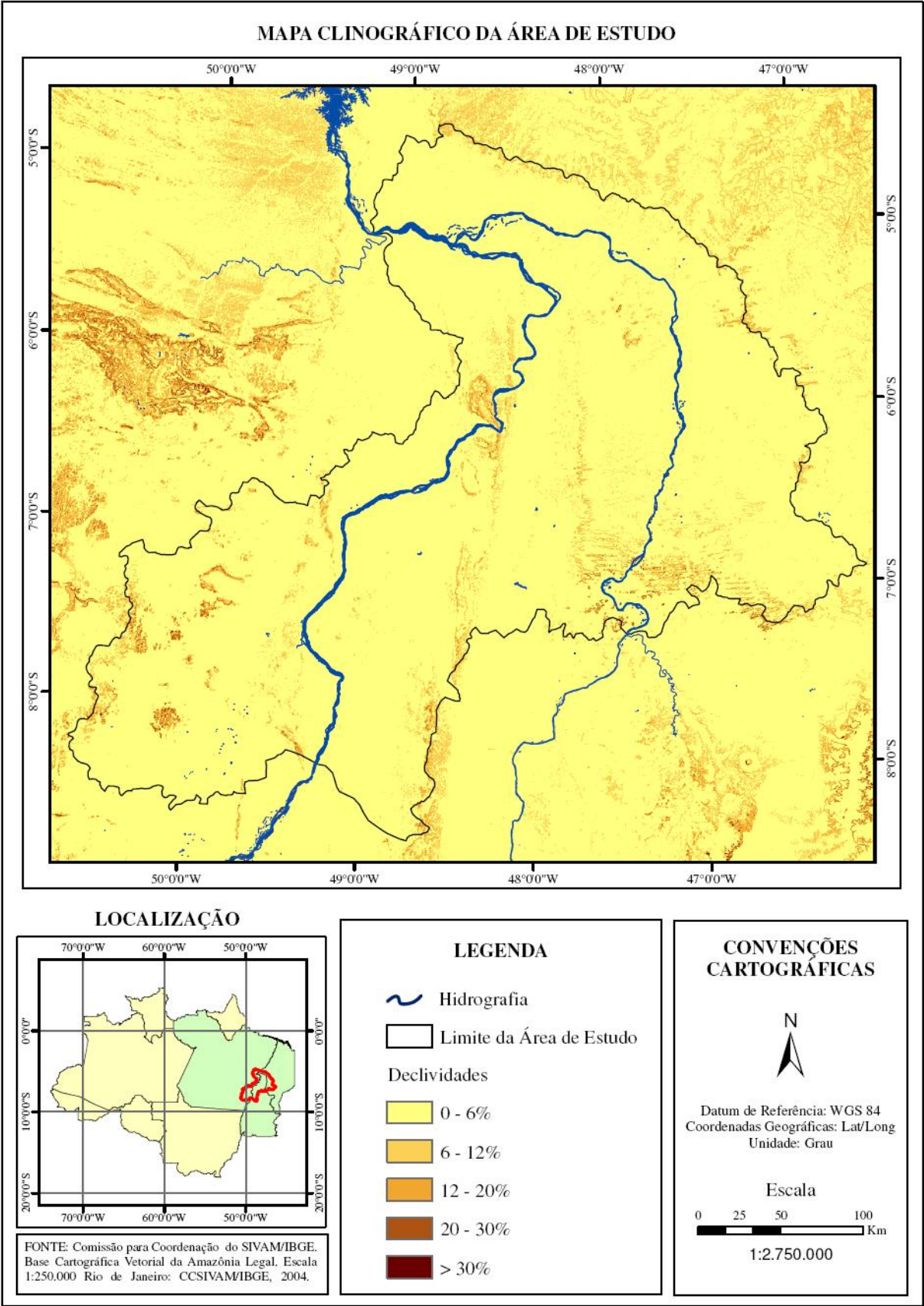


1:2.750.000

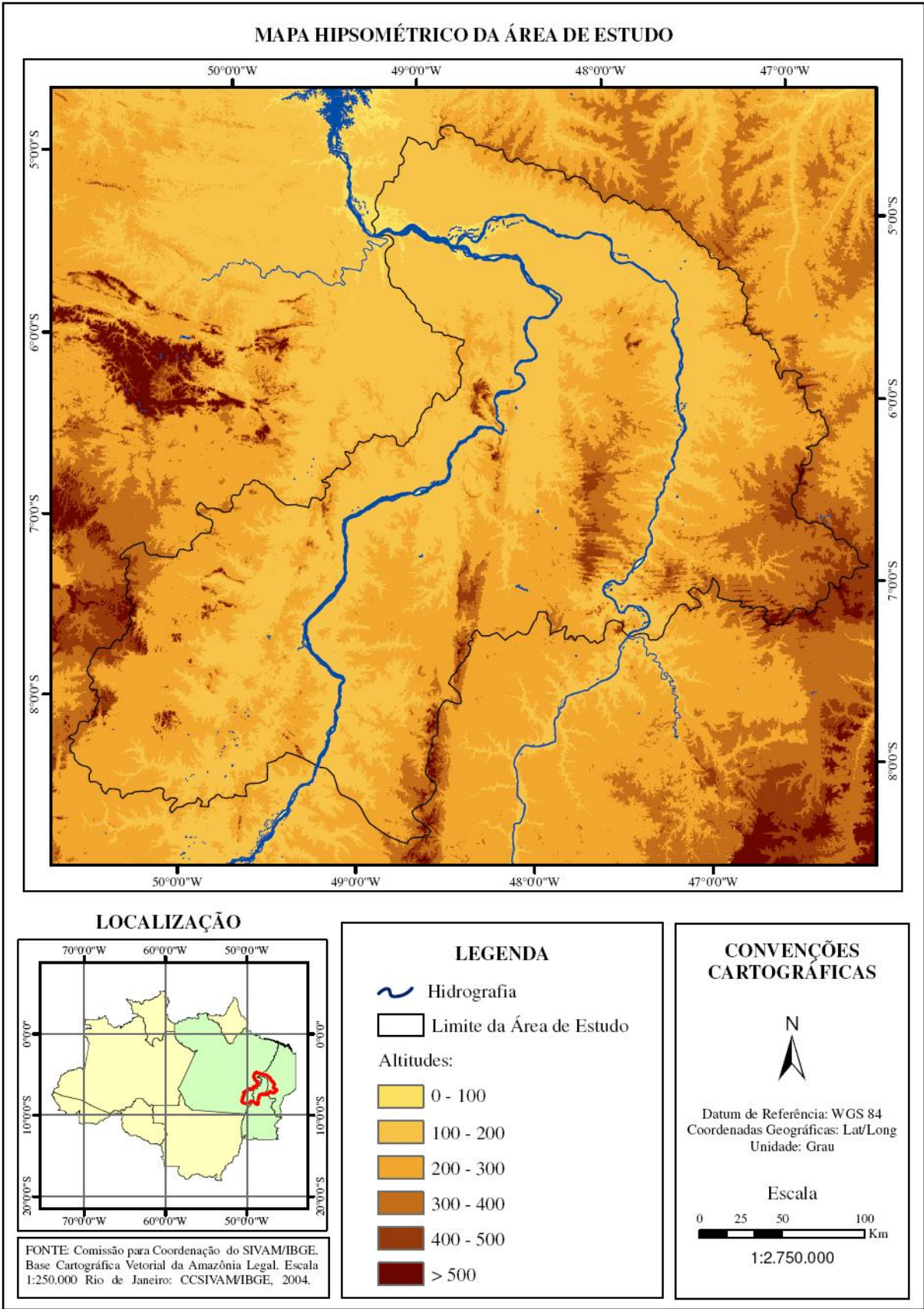
ANEXO 2



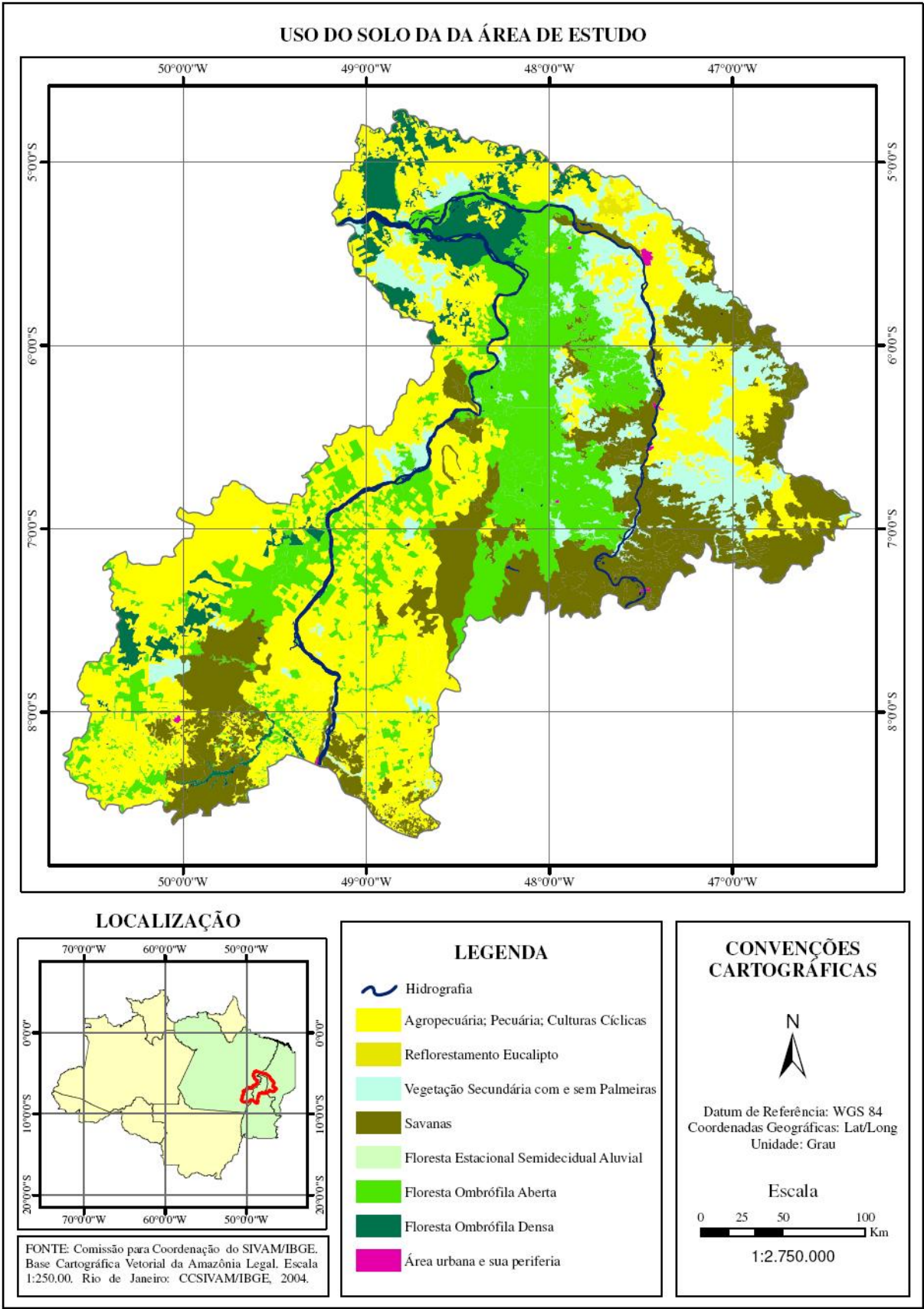
ANEXO 3



ANEXO 4



ANEXO 5



ANEXO 6

Descrição das estações pluviométricas e fluviométricas.

Código	Nome	Tipo	Operadora	Localização Geográfica	
				Latitude (°)	Longitude (°)
00447004	Açailândia	Pluviométrica	CPRM	-4,93472222	-47,50472222
00448000	Rondon do Pará	Pluviométrica	CPRM	-4,78222222	-48,06444444
00449001	Nova Jacunda	Pluviométrica	CPRM	-4,46305556	-49,11777778
00546007	Sítio Novo	Pluviométrica	CPRM	-5,88416667	-46,70194444
00547005	Buritirama	Pluviométrica	CPRM	-5,59444444	-47,01916667
00548000	Araguatins	Pluviométrica	CPRM	-5,64833333	-48,20777778
00548001	São Sebastião do TO	Pluviométrica	CPRM	-5,25833330	-48,20083333
00549002	Marabá	Pluviométrica	INMET	-5,36555555	-49,12500000
00549007	KM 60 / PA - 150	Pluviométrica	CPRM	-5,80305556	-49,18333333
00549008	Itupiranga	Pluviométrica	CPRM	-5,12888889	-49,32416667
00646005	Fazenda São Vicente	Pluviométrica	CPRM	-6,81833333	-46,33361111
00647000	Tocantinópolis	Pluviométrica	ANA	-6,28722222	-47,39194444
00647001	Wanderlândia	Pluviométrica	CPRM	-6,83888890	-47,97000000
00648000	Xambioá	Pluviométrica	CPRM	-6,41305560	-48,53555556
00648001	Ananás	Pluviométrica	CPRM	-6,36388889	-48,07138889
00648002	Piraque	Pluviométrica	CPRM	-6,67166670	-48,46972222
00649000	Fazenda Surubim	Pluviométrica	CPRM	-6,42777778	-49,41972222
00649001	Fazenda Santa Elisa	Pluviométrica	CPRM	-6,79472222	-49,54861111
00649002	Eldorado	Pluviométrica	CPRM	-6,10527778	-49,37750000
00649003	Porto Lemos	Pluviométrica	CPRM	-6,86750000	-49,09750000
00651002	Projeto Tucumã	Pluviométrica	Eletronorte	-6,81694444	-50,53777778
00746008	Morro Vermelho	Pluviométrica	CPRM	-7,15777778	-46,55444444
00746009	Recursos	Pluviométrica	CPRM	-7,33138889	-46,30750000
00747000	Carolina	Pluviométrica	CPRM	-7,32305560	-47,46444000
00747001	Goiatins	Pluviométrica	CPRM	-7,71138889	-47,31500000
00747009	Palmeirante	Pluviométrica	CPRM	-7,85972222	-47,86194444
00748001	Colônia	Pluviométrica	CPRM	-7,87777778	-48,89527778
00748002	Fazenda Primavera	Pluviométrica	CPRM	-7,55944444	-48,42083333
00748003	Muricilândia	Pluviométrica	CPRM	-7,15444444	-48,46972222
00749000	Arapoema	Pluviométrica	CPRM	-7,65500000	-49,06472222
00749001	Boa Vista do Araguaia	Pluviométrica	CPRM	-7,32305556	-49,22416667
00749002	Xinguara	Pluviométrica	CPRM	-7,09861111	-49,95972222
00750000	Fazenda Cumaru do Norte	Pluviométrica	Eletronorte	-7,82555556	-50,82833333
00750001	Posto da Serra	Pluviométrica	CPRM	-7,50611111	-50,04472222
00750002	Bannach	Pluviométrica	CPRM	-7,35111111	-50,40805556
00845003	Babilônia	Pluviométrica	CPRM	-8,31750000	-45,96777778
00846005	Boa Vista	Pluviométrica	CPRM	-8,79027778	-46,11805556
00847001	Itacaja	Pluviométrica	CPRM	-8,39166667	-47,76527778
00847002	Campos Lindos	Pluviométrica	CPRM	-7,97111111	-46,80638889
00848000	Colinas de Tocantins	Pluviométrica	CPRM	-8,05277780	-48,48166667
00848001	Guarai	Pluviométrica	CPRM	-8,83083333	-48,51694444
00848002	Itaporã do Tocantins	Pluviométrica	CPRM	-8,57305560	-48,69083300
00848003	Tupiratis	Pluviométrica	CPRM	-8,39805555	-48,13027778
00849002	Araguacema	Pluviométrica	CPRM	-8,81027778	-49,55611111
00850000	Redenção	Pluviométrica	CPRM	-8,04388889	-50,00305556
00946003	Lizarda	Pluviométrica	CPRM	-9,59194445	-46,68055556
00947001	Mansinha	Pluviométrica	CPRM	-9,45750000	-47,32694445
00948000	Miracema do TO	Pluviométrica	CPRM	-9,56416667	-48,38750000
00948001	Porto Real	Pluviométrica	CPRM	-9,30694445	-47,92916667
00949000	Abreulândia	Pluviométrica	CPRM	-9,62500000	-49,15500000
00949001	Dois Irmãos do TO	Pluviométrica	CPRM	-9,25722222	-49,06416667
00950000	Caseara	Pluviométrica	CPRM	-9,27083333	-49,95916667

Código	Nome	Tipo	Operadora	Localização Geográfica	
				Latitude (°)	Longitude (°)
00950001	Barreira do Campo	Pluviométrica	CPRM	-9,22750000	-50,21083333
00951000	Vila Rica	Pluviométrica	CPRM	-10,0166667	-51,11861111
01047000	Jatobá	Pluviométrica	CPRM	-9,99055555	-47,47861111
01047002	Porto Gilândia	Pluviométrica	CPRM	-10,7855556	-47,80000000
01047004	Ponte Alta do TO	Pluviométrica	CPRM	-10,7508333	-47,53611111
01048000	Fátima	Pluviométrica	CPRM	-10,7633333	-48,90277778
01048005	Taquarassu do Porto	Pluviométrica	CPRM	-10,3133333	-48,15944444
01049001	Pium	Pluviométrica	CPRM	-10,4408333	-48,89055556
01050000	Luciara	Pluviométrica	CPRM	-11,2183333	-50,66777778
01050002	Santa Terezinha	Pluviométrica	CPRM	-10,4611111	-50,51250000
01051001	Porto Alegre do Norte	Pluviométrica	CPRM	-10,8747222	-51,63055556
01145001	Formosa do Rio Preto	Pluviométrica	CPRM		
01147000	Almas	Pluviométrica	CPRM	-11,5786111	-47,17472222
01147001	Natividade	Pluviométrica	CPRM	-11,6969444	-47,72861111
01147002	Pindorama do TO	Pluviométrica	CPRM	-11,1405556	-47,57666667
01147003	Porto Alegre	Pluviométrica	CPRM	-11,6125000	-47,04500000
01149000	Duere	Pluviométrica	CPRM	-11,3500000	-49,26666667
01149001	Formoso do Araguaia	Pluviométrica	CPRM	-11,8016667	-49,52972222
01149002	Gurupi	Pluviométrica	CPRM	-11,7363889	-49,13638889
01151000	Bate Papo	Pluviométrica	CPRM	-11,6747222	-51,37638889
01152000	Sua Liquilândia	Pluviométrica	Eletronorte	-11,7219444	-51,69638889
01152001	Espigão	Pluviométrica	Eletronorte	-11,3900000	-52,23472222
01246000	Ponte Alta do Bom Jesus	Pluviométrica	CPRM	-12,0986111	-46,47861111
01246001	Aurora do Norte	Pluviométrica	CPRM	-12,7144444	-46,40861111
01247000	Conceição do Tocantins	Pluviométrica	CPRM	-12,2186111	-47,29666667
01247002	Rio da Palma	Pluviométrica	CPRM	-12,4200000	-47,19166667
01247005	Fazenda Santa Rita	Pluviométrica	CPRM	-12,5852778	-47,48666667
01248001	Colonha	Pluviométrica	CPRM	-12,3913889	-48,71138889
01248003	Palmeirópolis	Pluviométrica	CPRM	-13,0402778	-48,49166667
01249000	Alvorada	Pluviométrica	CPRM	-12,4808333	-49,12416667
01249001	Araguaçu	Pluviométrica	CPRM	-12,9288889	-49,82750000
01249002	Projeto Rio Formoso	Pluviométrica	CPRM	-12,0047222	-49,67972222
01250000	Fazenda Piratininga	Pluviométrica	CPRM	-12,8205556	-50,33611111
01251000	Alo Brasil	Pluviométrica	Eletronorte	-12,1641667	-51,69694444
01251001	Divinea	Pluviométrica	Eletronorte	-12,9397222	-51,82638889
01346000	São Domingos	Pluviométrica	CPRM	-13,3975000	-46,31583333
01346001	Nova Roma	Pluviométrica	CPRM	-13,7422222	-46,87750000
01346004	Campos Belos	Pluviométrica	CPRM	-13,0358333	-46,77694444
01346005	São Vicente	Pluviométrica	CPRM	-13,6336111	-46,46722222
01348000	Campinaçu	Pluviométrica	CPRM	-13,7900000	-48,56694444
01348001	Sama	Pluviométrica	CPRM	-13,5330556	-48,22694444
01348003	Trombas	Pluviométrica	CPRM	-13,5116667	-48,74500000
01349000	Estrela do Norte	Pluviométrica	CPRM	-13,8716667	-49,07138889
01349003	Entroncamento São Miguel	Pluviométrica	CPRM	-13,2688889	-49,20111111
01350000	Bandeirantes	Pluviométrica	CPRM	-13,6897222	-50,80000000
01350002	São Miguel do Araguaia	Pluviométrica	CPRM	-13,2738889	-50,16055556
01352002	Serra Dourada	Pluviométrica	Eletronorte	-13,7052778	-52,02666667
23300000	Carolina	Fluviométrica	CPRM	-7,33416667	-47,48138889
27500000	Conceição do Araguaia	Fluviométrica	ANA	-8,10277778	-49,25944444
29050000	Marabá	Fluviométrica	Eletronorte	-5,33861111	-49,12444444
23700000	Descarreto	Fluviométrica	CPRM	-5,78944444	-47,48194444
28300000	Xambioá	Fluviométrica	CPRM	-6,40972222	-48,54222222
28850000	Araguatins	Fluviométrica	CPRM	-5,65083333	-48,13250000

ANEXO 7

Topografia da Cidade de Marabá

