ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL EM BACIAS HIDROGRÁFICAS NAS REGIÕES SUDESTE E CENTRO-OESTE DO BRASIL

Marcia dos Santos Seabra

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

_____

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

_____

Prof. Wallace Figueiredo Menezes, D.Sc.

_____

Profa. Ana Luiza Coelho Netto, Ph.D.

_____

Prof. Edilson Marton, D.Sc.

_____

Prof. Marcelo Gomes Miguez, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

NOVEMBRO DE 2004

SEABRA, MARCIA DOS SANTOS

Estudo sobre a Influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul em Bacias Hidrográficas nas Regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. [Rio de Janeiro] 2004.

XIV, 110p, 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia C ivil, 2004).

Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. ZCAS

2. Precipitação

3. Bacias hidrográficas

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

A meus pais,

Sergio Ribeiro Seabra e

Sueli dos Santos Seabra

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela força, principalmente nos momentos mais difíceis. Ele, que sempre colocou as pessoas certas ao meu lado.

A toda minha família, em especial aos meus pais e ao meu irmão, pela paciência e por sempre acreditarem em mim.

Aos meus orientadores Otto Corrêa Rotunno Filho e Wallace Figueiredo Menezes, pelos ensinamentos e dedicação, para que esse trabalho fosse concluído.

Ao CNPq, pelo apoio, por meio de bolsa, fundamental para a realização desta tese.

A Furnas Centrais Elétricas S.A, pelo fornecimento dos dados hidrometeorológicos, especialmente aos amigos que fiz na Divisão de Hidrologia da Operação, Ortiz Araújo, Nélia Almeida, Marcelo Carvalho, Emerson Cabral e Joelson Rangel. E minha amiga Daniele Ornelas, eu não esqueci de você! Só queria agradecer por toda a ajuda e sugestões nesta tese. Temos muito trabalho pela frente...

Ao professor Luiz Cláudio do departamento de Meteorologia da UFRJ pela dedicação e disposição em sempre ajudar aos alunos como coordenador do curso de pós-graduação de Ciências Atmosféricas em Engenharia.

A todos meus amigos, em especial a minhas amigas Anne, Chica, Dani (olha você aqui de novo), Mari e Paula, pelos momentos de alegria que sempre passamos juntos.

Não posso deixar de agradecer a uma pessoa muito especial, que surgiu na minha vida como quem não quer nada e com seu sorriso, amizade e companheirismo vem me conquistando a cada dia. Paixão, quer dizer Carlinhos, obrigada por tudo! Obrigada, por ficar tomando conta de mim, fazer pizzas, pelos incentivos, sugestões, enfim, obrigada simplesmente por estar ao meu lado.

A todos muito obrigado.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL EM BACIAS HIDROGRÁFICAS NAS REGIÕES SUDESTE E CENTRO-OESTE DO BRASIL

Marcia dos Santos Seabra
Novembro/2004

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho
Wallace Figueiredo Menezes
Programa: Engenharia Civil

Estudos sobre a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) têm se tornado cada vez mais freqüentes, devido ao impacto do fenômeno, especialmente na precipitação durante o verão na América do Sul. Este trabalho consiste na avaliação de episódios ZCAS e no estabelecimento de seus impactos em bacias hidrográficas localizadas nas regiões centro-oeste e sudeste do Brasil, orientadas ao longo do posicionamento médio da ZCAS, incluindo desde a Amazônia até o oceano Atlântico Sul.

Nesse contexto, a abordagem metodológica abrangeu a avaliação da importância do estudo da ZCAS nas bacias hidrográficas de interesse. Adicionalmente, destaca-se que foi realizada uma investigação dos episódios que ocorreram no mês de fevereiro de 2002.

Os resultados obtidos indicaram que a presença da ZCAS é um dos grandes responsáveis por episódios de precipitação intensa nas bacias estudadas, influenciando de maneira significativa os seus correspondentes regimes pluviométricos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY ABOUT THE INFLUENCE OF THE SOUTH ATLANTIC CONVERGENCE ZONE ON WATERSHEDS LOCATED AT THE BRAZILIAN SOUTH-EAST AND CENTRAL-WEST REGIONS

Marcia dos Santos Seabra

November/2004

Advisors: Otto Corrêa Rotunno Filho

Wallace Figueiredo Menezes

Departament: Civil Engineering

Studies about the South Atlantic Convergence Zone (SACZ) have become each time more frequent due to the impact of the phenomenon, specially on the precipitation during the South America summer. This work focus on identifying SACZ events and establishing their corresponding impacts on watersheds located at the Brazilian south-east and central-west regions oriented along the mean position of the SACZ, including from Amazon region up to South Atlantic Ocean.

Under this framework, the methodological approach included the evaluation of the importance of studying SACZ over the above mentioned watersheds. In addition, it should be emphasized that it was conducted an investigation about the events that occurred in February 2002.

The results indicated that the presence of SACZ is one of the main causes of extreme precipitation events over the studied watersheds, contributing significantly to the corresponding pluviometric measurements.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS iv

ÍNDICE vii

LISTA DE FIGURAS ix

LISTA DE ABREVIATURAS xiv

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 7

2.1 INTRODUÇÃO 7

2.2 DESENVOLVIMENTO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO 10

2.3 RESERVATÓRIOS E USINA HIDRELÉTRICA: DEFINIÇÃO E OPERAÇÃO 13

2.4 FENÔMENOS METEOROLÓGICOS 16

2.4.1 Tempestades Isoladas 16

2.4.2 Frentes Frias 18

2.4.3 Linhas de Instabilidade 20

2.4.4 Zona de Convergência do Atlântico Sul 21

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA 31

3.1 DADOS UTILIZADOS 33

3.1.1 Precipitação 33

3.1.2 Valores médios mensais de vazão natural 34

3.1.3 Valores diários de vazão natural 35

3.1.4 Imagens de satélite 35

CAPÍTULO 4 – ESTUDO DE CASO 36

4.1 AS BACIAS HIDROGRÁFICAS 36

4.2 A BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL 38

4.2.1 Ocupação e uso do solo 38

4.2.2 Cobertura Vegetal e uso atual do solo 38

4.2.3 Recursos Hídricos 41

4.3 A BACIA DO RIO GRANDE 44

4.3.1 Usos do solo *44*
4.3.2 Usos da água *44*
4.3.3 Gera ção de energia elétrica *45*
4.4 A BACIA DO RIO PARANAÍBA 46
4.4.1 Geração de energia elétrica *46*
4.5 A BACIA DO RIO TOCANT INS 48
4.5.1 Geração de energia elétrica *49*
4.6 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA DO M ÊS DE FEVEREIRO DE 2002 50
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES 57
5.1 VALORES MÉDIOS MENSAIS DE PRECIPITAÇÃO NAS BACIAS 57
5.2 VALORES MÉDIOS DE PRECIPITAÇÃO NO MÊS DE FEVEREIRO 60
5.3 IMPORTÂNCIA DA ZCAS NAS BACIAS DE ESTUD O 62
5.4 PRECIPITAÇÃO MÉDIA NAS BACIAS EM FEVEREIRO DE 2002 69
5.4.1 Bacia do Rio Paraíba do Sul *69*
5.4.2 Bacia do Rio Grande *75*
5.4.3 Bacia do Rio Paranaíba *80*
5.4.4 Bacia do Rio Tocantins *83*
5.5 PRECIPITAÇÃO X VAZÃO NATURAL – VALORES MÉDIOS MENSAIS 85
5.6 PRECIPITAÇÃO X VAZÃO NATURAL EM FEVEREIRO DE 2002 88
5.6.1 Precipitação x Vazão Natural da UHE de Funil *88*
5.6.2 Precipitação x Vazão Natural da UHE de Furnas *89*
5.6.3 Precipitação x Va zão Natural da UHE de Itumbiara *90*
5.6.4 Precipitação x Vazão Natural da UHE de Serra da Mesa *91*
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 95
CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 100
ANEXOS 107
APÊNDIC E A 108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Ciclo hidrológico.....2

Figura 2.1: Foto do rio Grande, no município de Passos (MG), no local escolhido para a construção da UHE de Furnas.....12

Figura 2.2: Modelo simplificado do ciclo de vida de uma célula simples. 18

Figura 2.3: Foto de um cumulunimbus.....18

Figura 2.4: Esquema da penetração de um sistema frontal no hemisfério sul.....19

Figura 2.5: Imagem do satélite GOES-12 às 1745Z do dia 11/06/2004.....20

Figura 2.6: Linhas de corrente em 200 hPa para os meses de dezembro a fevereiro.....21

Figura 2.7: Linhas de corrente em 850 hPa para os meses de dezembro a fevereiro.....22

Figura 2.8: Imagem do satélite GOES-8 do dia 06/01/1999 às 03Z no canal infravermelho.....23

Figura 2.9: Radiação de onda longa emitida (ROLE – W/m^2) média no período de 31/01/1988 a 02/02/1988.....24

Figura 4.1: Localização das bacias dos rios Paraíba do Sul (verde), Grande (roxo), Paranaíba (trecho Araguari em amarelo e trecho Corumbá em rosa) e Tocantins (azul). Os pontos em azul representam as UHE de Furnas. 37

Figura 4.2: Distribuição das classes de vegetação e uso do solo. 40

Figura 4.3: Usina Hidrelétrica de Funil 43

Figura 4.4: Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. 44

Figura 4.5: Usina Hidrelétrica de Furnas.....45

Figura 4.6: Bacia hidrográfica do rio Grande.....46

Figura 4.7: Usina Hidrelétrica de Itumbiara. 47

Figura 4.8: Bacia hidrográfica dos rios Paranaíba e Tocantins 48

Figura 4.9: Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa.....49

Figura 4.10: Imagem de satélite no canal infravermelho referente ao dia 08/02/02 às 00Z (a) e 09/02/02 às 18Z (b).....50

Figura 4.11: Seções estação versus tempo dos sistemas frontais que penetraram no Brasil em fevereiro de 2002. Os pontos indicam que a frente passou pela estação entre 09:00h (hora local) do dia anterior e 09:00h (hora local) do dia indicado. 52

Figura 4.12: Imagem de satélite no canal infravermelho referente ao dia 05/02/02 às 0645Z (a) e 21/02/02 às 1445Z (b) 53

Figura 4.13: Imagem de satélite média para os períodos de 04 a 07/02/02 (a) e de 16 a 24/02/02 (b). 53

Figura 4.14: Linha de corrente e velocidade vertical em 500 hPa: (a) média de 04/02/2002 a 07/02/2002; (b) média de 16/02/2002 a 24/02/2002 54

Figura 4.15: Linha de corrente e divergência do vento em 200 hPa: (a) média de 04/02/2002 a 07/02/2002; (b) média de 16/02/2002 a 24/02/2002 55

Figura 4.16: Campo de precipitação total entre os dias (a) 04 e 07/02/2002 e (b) 16 a 24/02/2002 56

Figura 5.1: Precipitação média mensal na bacia do rio Paraíba do Sul 58

Figura 5.2: Precipitação média mensal na bacia do rio Grande 58

Figura 5.3: Precipitação média mensal na bacia do rio Paranaíba. 59

Figura 5.4: Precipitação média mensal na bacia do rio Tocantins 59

Figura 5.5: Precipitação média na bacia do rio Paraíba do Sul nos meses de fevereiro. A linha vermelha indica o valor médio mensal no período 60

Figura 56: Precipitação média na bacia do rio Grande nos meses de fevereiro. A linha vermelha indica o valor médio mensal no período. 61

Figura 5.7: Precipitação média na bacia do rio Paranaíba nos meses de fevereiro. A linha vermelha indica o valor médio mensal no período. 61

Figura 5.8: Precipitação média na bacia do rio Tocantins nos meses de fevereiro. A linha vermelha indica o valor médio mensal no período 62

Figura 5.9: Precipitação média mensal (linha azul) para o período de 1985 a 2003 e valores médios mensais de longo curso de precipitação (linha vermelha) para a bacia do rio Paraíba do Sul. Os círculos verdes indicam episódios de ZCAS 64

Figura 5.10: Precipitação média mensal (linha azul) para o período de 1985 a 2003 e valores médios mensais de longo curso de precipitação (linha vermelha) para a bacia do rio Grande. Os círculos verdes indicam episódios de ZCAS 65

Figura 5.11: Precipitação média mensal (linha azul) para o período de 1985 a 2003 e valores médios mensais de longo curso de precipitação (linha vermelha) para a bacia do rio Paranaíba. Os círculos verdes indicam episódios de ZCAS 67

Figura 5.12: Precipitação média mensal (linha azul) para o período de 1985 a 2003 e valores médios mensais de longo curso de precipitação (linha vermelha) para a bacia do rio Tocantins. Os círculos verdes indicam episódios de ZCAS 68

Figura 5.13: Precipitação acumulada em 24 horas média na bacia do rio Paraíba do Sul para o mês de fevereiro 2002 70

Figura 5.14: Mapa de chuva (em mm) na bacia do rio Paraíba do Sul no dia 24 de fevereiro de 2002 70

Figura 5.15: Mapa de chuva (em mm) na bacia do rio Paraíba do Sul no dia 10 de fevereiro de 2002 71

Figura 5.16: Mapas de chuva (em mm) na bacia do rio Paraíba do Sul referentes aos dias 16/02/02 (a), 17/02/02 (b), 18/02/02 (c), 19/02/02 (d), 20/02/02 (e), 21/02/02 (f), 22/02/02 (g) e 23/02/02 (h). 72

Figura 5.17: Mapa de chuva (em mm) na bacia do rio Paraíba do Sul no dia 03 de fevereiro de 2002 74

Figura 5.18: Precipitação acumulada em 24 horas média na bacia do rio Grande para o mês de fevereiro de 2002 75

Figura 5.19: Mapa de chuva (em mm) na bacia do rio Grande referente aos dias 21/02/02 (a) e 24/02/02 (b). 76

Figura 5.20: Mapas de chuva (em mm) na bacia do rio Grande referentes aos dias 16/02/02 (a), 17/02/02 (b), 18/02/02 (c), 19/02/02 (d), 20/02/02 (e), 22/02/02 (f) e 23/02/02 (g). 77

Figura 5.21: Mapa de chuva (em mm) na bacia do rio Grande referente aos dias 08/02/02 (a) e 10/02/02 (b). 79

Figura 5.22: Precipitação acumulada em 24 horas média na bacia do rio Paranaíba para o mês de fevereiro de 2002. 80

Figura 5.23: Mapa de chuva (em mm) nas bacias dos rios Paranaíba e Tocantins referente aos dias 08/02/02 (a) e 09/02/02 (b). 81

Figura 5.24: Mapa de chuva (em mm) nas bacias dos rios Paranaíba e Tocantins referente aos dias 18/02/02 (a), 19/02/02 (b) e 20/02/02 (c) 82

Figura 5.25: Precipitação acumulada em 24 horas média na bacia do rio Tocantins para o mês de fevereiro de 2002. 83

Figura 5.26: Mapas de chuva (em mm) nas bacias dos rios Paranaíba e Tocantins referentes ao dia 04/02/02 (a) e 05/02/02 (b) 84

Figura 5.27: Precipitação média mensal na bacia do rio Paraíba do Sul (barras azuis) e vazão natural média mensal na UHE de Funil (linha vermelha) 86

Figura 5.28: Precipitação média mensal na bacia do rio Grande (barras azuis) e vazão natural média mensal na UHE de Furnas (linha vermelha) 86

Figura 5.29: Precipitação média mensal na bacia do rio Paranaíba (barras azuis) e vazão natural média mensal na UHE de Itumbiara (linha vermelha) 87

Figura 5.30: Precipitação média mensal na bacia do rio Tocantins (barras azuis) e vazão natural média mensal na UHE de Serra da Mesa (linha vermelha) 87

Figura 5.31: Precipitação média diária no trecho a montante da bacia do rio Paraíba do Sul (barras azuis) e vazão natural diária na UHE de Funil (linha vermelha) no mês de fevereiro de 2002 89

Figura 5.32: Precipitação média diária no trecho a montante da bacia do rio Grande (barras azuis) e vazão natural diária na UHE de Furnas (linha vermelha) no mês de fevereiro de 2002 90

Figura 5.33: Precipitação média diária na bacia do rio Paranaíba (barras azuis) e vazão natural diária na UHE de Itumbiara (linha vermelha) no mês de fevereiro de 2002 91

Figura 5.34: Precipitação média diária na bacia do rio Tocantins (barras azuis) e vazão natural diária na UHE de Serra da Mesa (linha vermelha) no mês de fevereiro de 2002.....92

LISTA DE ABREVIATURAS

AMFORP	*American and Foreign Power Company*
ANA	Agência Nacional de Águas
AB	Alta da Bolívia
AS	América do Sul
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
CEIVAP	Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
CESP	Companhia Elétrica de São Paulo
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
EN	El-niño
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas S.A.
GOES	*Geostationary Operational Environmental Satellites*
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LA	La-niña
LI	Linha de Instabilidade
LIGHT	LIGHT Serviços de Eletricidade S.A.
MME	Ministério de Minas e Energia
NEB	Nordeste Brasileiro
NCEP	*National Centers for Environmental Prediction*
OMJ	Oscilação de Madden e Julian
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
ROLE	Radiação de Onda Longa Emitida

SIMEGO	Secretaria do Estado de Goiás de Ciência e Tecnologia
SF	Sistema Frontal
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UHE	Usina Hidrelétrica
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIS	Zona de Convergência do Índico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCPS	Zona de Convergência do Pacífico Sul
ZCST	Zona de Convergência Subtropical

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Essencial à vida, a água constitui elemento necessário para quase todas as atividades humanas, sendo, ainda, componente da paisagem e do meio ambiente. Trata-se de um bem precioso, de valor inestimável, que deve ser, a qualquer custo, conservado e protegido. A água tem usos múltiplos no cotidiano humano como a geração de energia elétrica, o abastecimento doméstico e industrial, a irrigação, navegação, recreação, entre outros.

Os recursos hídricos estão intimamente relacionados com a história da civilização, já que a ocupação das cidades ocorreu principalmente ao longo de rios, devido à necessidade do uso da água para consumo humano, navegação e irrigação. As mais antigas civilizações da história surgiram entre 4.000 a.C. e 2.000 a.C. com a característica comum de se estabelecerem estrategicamente próximas a mananciais hídricos e, por isso, despertavam as cobiças de outros povos, que culminavam em disputas armadas pelo domínio desses territórios e de suas riquezas. Os primeiros registros hidrológicos de níveis de enchente, por exemplo, são de 3500 a.C. no Egito, no rio Nilo (BISWAS, 1970).

No caso do Brasil, o marco histórico deu-se com a chegada dos portugueses em 1500. Na carta escrita por Pero Vaz de Caminha, endereçada a D. Manuel, rei de Portugal, descrevia-se, com imenso fascínio, as riquezas naturais existentes no Brasil, sobretudo, as águas (CORTESÃO, 1968).

A antiga idéia de abundância dos recursos hídricos passada entre as gerações está sendo reestruturada a fim de inibir o desperdício e a destruição dos mananciais. O volume de água no planeta é da ordem de 1,386 milhões de km^3, mas a disponibilidade hídrica é muito pequena. De toda a quantidade de água do planeta, cerca de 97% está concentrada nos oceanos e mares (água salgada) e apenas 3% de água doce. Desse último percentual, 70% está sob a forma de gelo e neve, e 29% encontra-se abaixo da superfície terrestre, formando as águas subterrâneas. Somente uma fração muito pequena, cerca de 1%, está disponível ao homem e aos outros organismos, nos lagos e rios, ou como umidade presente no solo, na atmosfera e como componente dos mais diversos organismos para atender as demandas sociais e econômicas da humanidade nos diferentes usos (RIVIÈRE, 1989 *apud* LIBOS, 2002).

A água encontra-se em movimento permanente, passando por suas diferentes fases, constituindo o ciclo hidrológico (Figura 1.1). Como se trata de um ciclo fechado, pode-se considerar como ponto inicial a precipitação. Parte da precipitação não atinge o solo, seja devido a evaporação durante a própria queda, seja porque parte fica retida pela vegetação, chamada de intercepção.

Do volume que atinge o solo, parte nele se infiltra, parte escoa sobre a superfície e parte evapora, seja diretamente ou através das plantas, no fenômeno conhecido como transpiração.

A infiltração é o processo de penetração da água no solo. Quando a intensidade da precipitação exc ede a capacidade de infiltração do solo, a água escoa superficialmente. Inicialmente, são preenchidas as depressões do terreno e, em seguida, inicia-se o escoamento propriamente dito. Nesse processo, pode ocorrer infiltração ou evaporação, conforme as características do terreno e da umidade do ambiente. A água retida nas depressões pode ainda infiltrar ou evaporar.

A água em estado líquido pode retornar ao estado gasoso pela evaporação. É por esse processo que se mantém o equilíbrio do ciclo hidrológico.

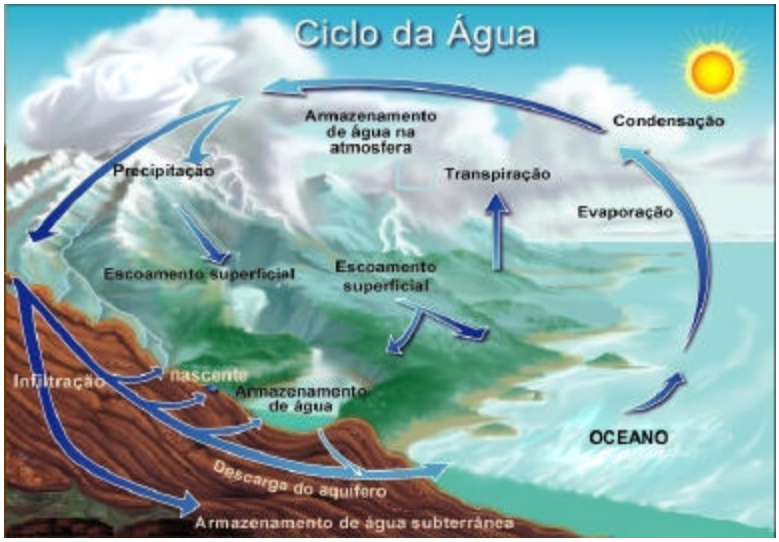


Figura 1.1: Ciclo hidrológico (Fonte: Adaptado de EVANS, 2003).

O Brasil tem uma posição privilegiada perante a maioria dos países quanto ao seu volume de recursos hídricos. Porém, mais de 73% da água doce disponível encontra-se na bacia Amazônica, que é habitada por menos de 5% da população. Portanto, apenas 27% dos recursos hídricos brasileiros estão disponíveis para 95% da população (SETTI *et al*., 2001).

O crescimento populacional aliado à intensificação das atividades de caráter poluidor tem, em todo mundo, mostrado a ocorrência de problemas relacionados à falta desse recurso, em condições adequadas de quantidade ou de qualidade, para o atendimento das necessidades mais elementares das populações.

A utilização da água pode ter caráter consuntivo, ocorrendo quando a água é captada do seu curso natural e somente parte dela retorna ao curso normal do rio (abastecimento doméstico e industrial, irrigação), ou não consuntivo, onde toda a água captada retorna ao curso de água de origem, como no caso de geração de energia elétrica (SETTI *et al*., 2001).

A natureza finita da fonte renovável recurso hídrico contém um aspecto crítico, que deve ser analisado sob a ótica do crescimento populacional. Entre 1940 e 1990, a população mundial mais que duplicou, passando de 2,3 para 5,3 bilhões de habitantes, com o respectivo consumo de água aumentando de 1.000 km^3 para 4.000 km^3. Portanto, nesse período, ocorreu a quadruplicação do consumo total de água por ano. A constatação prática dessas duas tendências, neste fim de século, devido às características finitas do recurso, pressupõe uma remota probabilidade de que nova quadruplicação ocorra no consumo. Segundo algumas estimativas, o limite superior de água utilizável no globo para consumo situa-se entre 9.000 km^3 e 14.000 km^3. Dentro desta perspectiva, o aumento da população implicará o uso dessa reserva, para o consumo e para a melhoria da qualidade de vida proveniente do uso de energia elétrica (SILVEIRA *et al*., 1999).

Diante de toda a discussão supracitada, pode-se observar a importância da água na vida humana. Neste sentido, nota-se a importância do estudo conjunto da Meteorologia com a Hidrologia, principalmente através de estudos baseados nas causas e efeitos da precipitação.

A precipitação é uma das variáveis meteorológicas mais importantes para os estudos climáticos de qualquer região. Tal importância deve-se às conseqüências que o

excesso de precipitação pode ocasionar, principalmente em eventos de chuvas intensas (DAVIS, 2000), e também em eventos de secas.

Os eventos de precipitação intensa que ocorrem principalmente durante o verão nas regiões sudeste e centro-oeste do Brasil estão freqüentemente associados a sérios transtornos à população, como deslizamentos de encostas e enchentes. Pode-se citar, como exemplos, o evento que ocorreu em fevereiro de 1988, onde a precipitação intensa e prolongada provocou deslizamentos de encostas, causando um grande número de vítimas na cidade do Rio de Janeiro (SILVA DIAS *et al.*, 1988), e o evento de janeiro de 2000, quando do dia 01 ao dia 08 em Campos do Jordão (SP) foram registrados 439 mm, em Itajubá (MG), 374 mm e em Resende (RJ), 287 mm (CLIMANÁLISE, 2000).

A ocorrência de eventos extremos pode ainda ocasionar a incidência de descargas atmosféricas no sistema de distribuição de energia elétrica ou na sua vizinhança, e, conseqüentemente, causar danos materiais em equipamentos e interrupções de energia aos consumidores (LIMA, 2004).

Esses eventos de precipitação intensa podem consistir, na verdade, em diferentes fenômenos meteorológicos, com características espacial e temporal distintas. Entre esses fenômenos, destacam-se as tempestades isoladas, as linhas de instabilidade, os complexos convectivos de mesoescala, as frentes frias e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

A ZCAS é um dos mais importantes fenômenos na escala intrasazonal que ocorre durante o verão na América Sul, com episódios de estiagem prolongada e enchentes que atingem diversas regiões do país. Esse fenômeno é caracterizado por uma banda de nebulosidade quase estacionária, por períodos que variam de 4 a 20 dias, orientada na direção NW/SE, estendendo-se desde a Amazônia até o oceano Atlântico Sul, associada a uma zona de convergência de umidade que se prolonga até a média troposfera (CARVALHO *et al.*, 2004; SEABRA, 2002; ROBERTSON e MECHOSO, 2000; FIGUEROA, 1997; SILVA DIAS, 1995; MARTON, 1994 e 2000, CASARIN e KOUSKY, 1986). Por ser tratar de um fenômeno que causa precipitação intensa e com duração de alguns dias, o estudo e entendimento dos mecanismos que formam a ZCAS vêm se tornando cada vez mais importantes.

Vários estudos estão sendo desenvolvidos quanto aos mecanismos de origem da ZCAS, e de sua influência em outros fenômenos meteorológicos. Porém, são poucos os

trabalhos publicados sobre a influência da precipitação, decorrente desse fenômeno, em bacias hidrográficas, incluindo áreas urbanas. Um trabalho publicado por ROBERTSON e MECHOSO (2000) mostra a influência da ZCAS na vazão dos rios Paraná, Paraguai, Uruguai e Negro, localizados na região sul do Brasil. Os autores concluem que, em episódios da ZCAS, a vazão dos rios Paraná e Paraguai aumenta, enquanto a dos rios Uruguai e Negro diminui.

O posicionamento geográfico de 4 importantes bacias hidrográficas do Brasil, especialmente no setor elétrico brasileiro, se dispõe de forma com que essas tenham uma orientação NW/SE, orientadas ao longo do posicionamento médio da ZCAS. O fato desse sistema meteorológico possuir orientação semelhante a localização das bacias e ter sua posição climatológica também localizada de forma que as atinja com freqüência, motivou a autora a desenvolver este trabalho, onde é verificada a influência da ZCAS nas bacias de interesse. Mais especificamente, as bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande, Paranaíba e Tocantins, localizadas nas regiões sudeste e centro-oeste do Brasil, são bacias de atuação e interesse de FURNAS Centrais Elétricas S.A, onde esta possui algumas usinas hidrelétricas (UHE), como a UHE de Funil, localizada na bacia do rio Paraíba do Sul.

Assim, destaca-se que o objetivo geral desta tese é analisar os eventos ZCAS que ocorreram em fevereiro de 2002, observando e avaliando suas influências nas bacias hidrográficas dos rios Paraíba do Sul, Grande, Paranaíba e Tocantins. Cabe ressaltar que as bacias escolhidas para a análise são de especial interesse para o setor elétrico brasileiro. Mais ainda, é dedicado um olhar especial para a bacia do rio Paraíba do Sul devido a importância da bacia no contexto nacional, já que drena uma das mais regiões mais desenvolvidas do país. Nota-se que a escolha de fevereiro de 2002 ocorreu em função da ocorrência de dois eventos no período e pela disponibilidade de obtenção conjunta de imagens de satélite e dados hidrometeorológicos.

No Capítulo 2, será apresentada uma breve introdução sobre modelagem hidrológica, com destaque para a importância da precipitação como dado de entrada e incertezas associadas a problemas como a distribuição espacial da precipitação. Em seguida, resgata-se a importância da água, especialmente no seu uso para geração de energia elétrica, uma vez que a presente dissertação, conforme enfatizado anteriormente, optou por analisar bacias hidrográficas de interesse do setor elétrico. Além disso, serão apresentados os fundamentos de alguns dos principais fenômenos

meteorológicos causadores de precipitação intensa que atuam nas regiões sudeste e centro-oeste do Brasil.

No Capítulo 3, será apresentada a metodologia utilizada para a realização da presente tese, incluindo a motivação pela escolha das bacias hidrográficas estudadas.

As bacias hidrográficas de estudo são descritas no Capítulo 4, com ênfase na bacia do rio Paraíba do Sul. Nesse capítulo, também são analisados os eventos ZCAS escolhidos para estudo.

No Capítulo 5, serão apresentados os resultados obtidos em cada etapa da metodologia. Serão mostrados resultados sobre a importância do estudo da ZCAS nas bacias hidrográficas de estudo, juntamente com os resultados para o evento ocorrido em fevereiro de 2002.

As conclusões e recomendações para trabalhos futuros farão parte do Capítulo 6.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO

A água constitui elemento necessário à vida e pode ser considerada como uma das mais importantes substâncias do sistema terra-atmosfera e, devido ao crescimento populacional e industrial, o uso racional desse recurso natural vem se tornado cada vez mais importante. Neste sentido, é necessária uma busca permanente de um equilíbrio, por parte de toda a sociedade, entre desenvolvimento e meio ambiente. A ocupação desordenada em bacias hidrográficas, principalmente em regiões metropolitanas, por exemplo, acarreta várias mudanças no meio ambiente, ocasionando o agravamento de enchentes nessas áreas.

O desenvolvimento da pesquisa hidrológica ocorreu, entre outros, devido a necessidade do conhecimento de séries de vazão para diferentes aplicações, tais como, a execução de projetos de controle de inundações e a exploração do potencial hidroelétrico de países como o Brasil e os Estados Unidos. Os modelos hidrológicos também podem ser empregados em estudos de planejamento urbano e regional para avaliação de impactos ambientais e hídricos, estimulando o desenvolvimento de planos alternativos de uso dos solos mais eficientes. Com a necessidade de se responder questões mais complexas, a busca por uma representação dos processos físicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica foi estimulada.

Os modelos hidrológicos têm sido utilizados, desde o início do século XX, a partir do conceito da hidrógrafa unitária, que pressupõe um processo linear na transformação de chuva e vazão. Somente por volta de 1960, com o desenvolvimento do modelo Stanford (CRAWFORD e LINSLEY, 1966), os modelos passaram a ser construídos com bases conceituais abrangendo a não linearidade dos processos físicos envolvidos na transformação chuva-vazão. A representação dos processos físicos passou a ser feita através de um conjunto de reservatórios, cada qual descrevendo uma fase da parcela terrestre do ciclo hidrológico.

Nas três décadas seguintes, foram iniciadas pesquisas por: i) procedimentos automáticos de calibração dos modelos hidrológicos; ii) melhora na qualidade dos dados

de entrada, especialmente da precipitação e seu efeito na calibração e resposta dos modelos; iii) uma integração entre modelos atmosféricos e modelos hidrológicos, associados a esquemas de transferência solo-vegetação-atmosfera (EAGLESON, 1986 e O'CONNELL e TODINI, 1996). Os modelos hidrológicos podem atuar como importantes condições de contorno para modelos atmosféricos globais e regionais.

Os processos físicos que ocorrem na natureza são bastante complexos, e os modelos têm a função de procurar melhor representá-los, de maneira que o comportamento estimado se aproxime, o máximo possível, da realidade. Apesar dos processos físicos variarem com o tempo e com o espaço, os modelos hidrológicos têm tratado esses processos de forma simplificada devido à falta de informação e à dificuldade de manipulação de grande quantidade de dados. Para modelar sistemas complexos como uma bacia hidrográfica, com todos os seus processos físicos, químicos e biológicos, que governam a disponibilidade da água em quantidade e qualidade e as interações que ocorrem entre os compartimentos terrestres e aquáticos, são necessárias simplificações dos processos físicos espaciais e temporais envolvidos.

Nesse contexto, destacam-se os modelos hidrológicos determinísticos ou conceituais, que procuram representar os fenômenos físicos em uma bacia hidrográfica, com o objetivo de melhor entender o ciclo hidrológico. Assim, a partir de dados de entrada como volume precipitado e evaporado, condições iniciais de umidade do solo, cobertura vegetal, entre outros, podem ser geradas séries de vazões e simulados efeitos como os causados por inundações e mudanças na cobertura do solo, por exemplo. Tais modelos são usualmente denominados modelos do tipo chuva-vazão.

Esses modelos pode ser classificados pela forma com que tratam a variabilidade espacial dos processos; se esta é explicitamente considerada, o modelo é dito distribuído; caso contrário, se os processos são considerados de forma concentrada, diz-se que o modelo é concentrado.

Segundo OLIVEIRA (2003), os modelos distribuídos não garantem necessariamente melhores resultados do que modelos concentrados, mas agregados a modelos digitais de terreno e ao geoprocessamento, têm buscado melhorar a representatividade espacial e temporal do comportamento das diferentes partes de uma bacia.

O trabalho de LIBOS (2002), por exemplo, utilizou técnicas de modelagem hidrológica distribuída, baseada em geoprocessamento através de sistema de informações geográficas (SIG), avaliando a distribuição espacial dos poluentes nitrogênio e fósforo na bacia do rio Cuiabá, localizada no estado do Mato Grosso, com o objetivo de analisar os impactos decorrentes das cargas de nutrientes não pontuais provocadas pelas atividades agrícolas na bacia.

Note-se que uma das principais limitações desses modelos hidrológicos diz respeito à ausência de conhecimento sobre a variabilidade espacial da precipitação, fato que se traduz em um aumento da incerteza associada às previsões de vazões pelos modelos.

Nessa linha, BARBOSA (2000) analisou as variações espaciais da precipitação, investigando as estruturas de correlação espacial de precipitação de postos pluviométricos, de natureza pontual e quantitativa, e das medições feitas por radar meteorológico, de natureza espacial e qualitativa. Nesse trabalho, a autora explorou o uso do método geoestatístico de krigagem bayesiana aplicado aos dados de chuva da bacia do alto Tiête. LOU (2004) estendeu essa análise empregando o método de krigagem indicatriz ou indicadores seqüenciais.

Por outro lado, XAVIER (2002), utilizando o modelo Topmodel, mostrou a importância de se considerar a análise de incerteza como parte do processo de modelagem hidrológica, avaliando o processo de geração de campos de precipitação. Os resultados por ele obtidos demonstraram a importância de se investir na melhor representação da precipitação nos modelos hidrológicos. Além disso, a incerteza das simulações apresentou significativo aumento devido à redução da informação utilizada inicialmente para a derivação de campos de precipitação.

Uma maneira de tentar diminuir as incertezas associadas às previsões de modelos hidrológicos é a consideração da evolução temporal da precipitação e da ocorrência de chuvas localizadas sobre a bacia.

Aqui, novamente, destaca-se a importância de estudos comuns entre a Meteorologia e a Hidrologia. Espera-se que o presente trabalho, que abordará a influência de um fenômeno meteorológico que causa precipitação durante alguns dias seguidos em algumas bacias hidrográficas, possa, em um futuro próximo, permitir uma

maior integração entre as duas áreas, inclusive a integração entre modelos atmosféricos e hidrológicos.

2.2 DESENVOLVIMENTO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

Além do consumo humano e animal, entre os diversos usos múltiplos da água no Brasil, destaca-se o seu aproveitamento na geração de energia elétrica. O setor elétrico brasileiro, em razão do grande potencial hidráulico disponível, tem sua base de geração elétrica no aproveitamento deste potencial. Atualmente, aproximadamente 90% da energia elétrica consumida no Brasil provêm de fontes hidráulicas e o seu papel de destaque deverá se manter ao longo das próximas três ou quatro décadas (SETTI *et al.*, 2001).

O desenvolvimento deste aproveitamento, em sua maior parte, ocorreu nas últimas quatro décadas, período no qual o setor elétrico, sob liderança do Estado, se organizou tanto em termos operativos, quanto nas atividades inerentes ao planejamento da expansão do sistema.

Segundo OLIVEIRA (2003), os primeiros registros da história do setor hidrelétrico no Brasil datam do século XIX, no final do período imperial, ocasião em que as exportações de café e borracha aumentaram, acarretando uma necessidade de modernização da infra-estrutura do país. Esta modernização dos serviços de infra-estrutura envolveu também serviços públicos como: linhas urbanas de bonde, água e esgoto, iluminação pública, além da produção e distribuição de energia elétrica.

Em setembro de 1889, dois meses antes da proclamação da república, foi inaugurada a usina hidrelétrica de Marmelo-0 no rio Paraibuna, pertencente à bacia do rio Paraíba do Sul, com 250kW de potência. Foi a primeira usina destinada para serviço de utilidade pública, fornecendo eletricidade para a cidade de Juiz de Fora, em Minas Gerais (ROCHA, 1999 *apud* OLIVEIRA, 2003).

O excedente da energia gerada pelas usinas hidrelétricas era aproveitado em pequenas redes de distribuição implantadas por seus proprietários. Essas pequenas redes foram se expandindo pelas regiões vizinhas, chegando a motivar o aumento de potência de muitas usinas.

A evolução do parque gerador instalado sempre esteve intimamente atrelada aos ciclos de desenvolvimento nacional. Os períodos de maior crescimento econômico

implicavam um aumento da demanda de energia e, conseqüentemente, a ampliação da potência instalada. Igualmente, as épocas recessivas afetaram diretamente o ritmo de implantação de novos empreendimentos.

Em síntese, entre 1880 e 1900, o aparecimento de pequenas usinas geradoras deu-se basicamente pela necessidade de fornecimento de energia elétrica para serviços públicos de iluminação e para atividades econômicas como mineração, beneficiamento de produtos agrícolas, fábricas de tecidos e serrarias. Nesse mesmo período, a potência instalada aumentou consideravelmente, com o afluxo de recursos financeiros e tecnológicos do exterior para o setor elétrico. Predominando o investimento hidrelétrico, multiplicaram-se as companhias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica nas pequenas localidades. As duas primeiras companhias de eletricidade sob controle de capital estrangeiro, que tiveram importância na evolução do serviço elétrico, foram a Light e a AMFORP, instaladas nos dois centros onde nasceu a indústria nacional, São Paulo e Rio de Janeiro (SILVEIRA *et al.*, 1999).

A revolução de 30 e a chegada de Getúlio Vargas ao Governo Federal inaugurou uma nova etapa na história do Brasil. No plano econômico, a marca foi a substituição do modelo agroexportador por um modelo de desenvolvimento baseado na industrialização e, no âmbito político, na reestruturação da República, com a transformação das relações entre os poderes federal e estadual e a expansão da intervenção do Estado nas esferas econômica e social. Nesse ambiente, consolidou-se o Código de Águas de 1934, em que os temas predominantes eram aproveitamento hidrelétrico e utilização múltipla dos recursos hídricos. Segundo OLIVEIRA (2003), o Código de Águas foi a primeira norma federal que disciplinou essa matéria, dividindo as águas em públicas, comuns e particulares, atribuindo as primeiras à União, aos estados e também aos municípios, conforme sua situação. Disciplinou, também, o aproveitamento em linhas gerais.

Em 1957, foi criada a Central Hidrelétrica de Furnas - FURNAS, empresa que marcou este período. Criada pelo governo federal com participação acionária dos estados de São Paulo e Minas Gerais e das concessionárias privadas LIGHT e AMFORP, para implantação do que seria, na época, o maior aproveitamento hidrelétrico com capacidade de 1200 MW e localizada estrategicamente entre os grandes centros de carga do país, Rio de Janeiro, São Paulo e Belo Horizonte.

A primeira usina hidrelétrica (UHE) de Furnas recebeu o nome da empresa, UHE de Furnas, e foi construída no município de Passos (MG) no rio Grande (Figura 2.1).

Figura 2.1: Foto do rio Grande, no município de Passos (MG), no local escolhido para a construção da UHE de Furnas (Fonte: FURNAS, 2004).

A intervenção estatal foi consolidada com a criação, em 1960, do Ministério de Minas e Energia (MME) e, em 1962, das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS). Nesse período, observou-se uma acentuada expansão do potencial instalado no país, visivelmente no parque hidrelétrico brasileiro, que de 4125 MW em 1962 chegou a 56000 MW no final de 1998.

No entanto, apesar de existirem muitas leis e órgãos sobre a água, eles não foram capazes de incorporar meios de combater o desperdício, a escassez e a poluição das águas, bem como solucionar conflitos de uso e promover os meios de uma gestão descentralizada e participativa. Foi exatamente para preencher essa lacuna que foi elaborada a lei nº 9.433 em 08 de janeiro de 1997, conhecida como a Lei das Águas, que tem a função de definir o rumo da gestão dos recursos hídricos no Brasil (SETTI *et al*., 2001). Ela também introduziu importantes alterações de ordem conceitual, onde a água passa a ser reconhecida como um bem vulnerável e de valor econômico (BRASIL, 1997). Toda essa mudança busca assegurar à atual e as futuras gerações a necessária disponibilidade de água em padrões de qualidade e quantidade adequados aos respectivos usos. Em 17 de julho de 2000, a lei 9.984 cria a Agência Nacional de Águas (ANA), responsável pela implementação e aplicação da lei 9.433 de 1997.

Pode-se notar que o setor de recursos hídricos no Brasil está ganhando importância e interesse por parte da sociedade. Segundo SETTI *et al.* (2001), este é um grande passo que o país está dando para que futuramente tenha-se um modelo sustentável de desenvolvimento no que diz respeito ao aproveitamento desse recurso natural de suma importância, água.

2.3 RESERVATÓRIOS E USINA HIDRELÉTRICA: DEFINIÇÃO E OPERAÇÃO

Uma usina hidrelétrica pode ser definida como um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a geração de energia elétrica, através de aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio (FURNAS, 2004).

O potencial hidráulico é proporcionado pela vazão hidráulica e pela concentração dos desníveis existentes ao longo do curso de um rio. Isto pode se dar de forma natural, quando o desnível está concentrado numa cachoeira; através de uma barragem, quando pequenos desníveis são concentrados na altura da barragem e através de desvio do rio de seu leito natural.

A geração de energia elétrica no Brasil depende basicamente das vazões que naturalmente transitam nos sistemas de canais fluviais das bacias onde se encontram instalados aproveitamentos hidrelétricos. O processo natural de vazões fluviais tem como característica principal a sua inconstância, dependente da ocorrência de precipitações (OLIVEIRA, 2003).

Ainda segundo OLIVEIRA (2003), tendo em vista a irregularidade das vazões fluviais e a necessidade de manter a continuidade do fornecimento de energia elétrica, o sistema brasileiro de geração de energia elétrica conta com uma série de reservatórios de acumulação cuja função é essencialmente armazenar água nos períodos de maiores afluências naturais de vazões e fornecer água nos períodos mais secos. A capacidade de armazenamento hoje disponível permite, não só a regularização intra-anual do sistema, como também fornece proteção contra ocorrência de seqüências de anos considerados secos.

A maior vantagem das usinas hidrelétricas é a transformação limpa do recurso energético natural. Não há resíduos poluentes e há baixo custo da geração de energia, já que a água do rio está inserida à usina (FURNAS, 2004).

A operação de reservatórios consiste de ações planejadas com antecedência e executadas em tempo real, com o objetivo de gerenciar a água armazenada em reservatórios, considerando as vazões afluentes previstas, as vazões defluentes programadas turbinada e vertida, a disponibilidade de armazenamento nos reservatórios, a capacidade de descarga dos vertedouros e as restrições fixas e temporárias à utilização plena das estruturas hidráulicas dos reservatórios. Essa operação é coordenada pelo

Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), executada pelos agentes de geração responsáveis pela operação das usinas hidrelétricas e realizada em um sistema de reservatórios, de acordo com instruções de operação específicas, baseadas nos estudos de planejamento previstos nos procedimentos de rede (ONS, 2003).

Cada reservatório dispõe de um manual de operação próprio, explicitando as regras e metodologias do agente responsável pelo aproveitamento e contemplando as condições de operação normal e não-normal, sejam elas referentes a manter vazões especificadas em pontos a jusante ou mantendo o nível do reservatório (montante) dentro de determinados limites. Normalmente, o reservatório opera dentro do chamado volume de regularização, que está entre os níveis mínimo normal e máximo normal. Porém, quando o reservatório, diante de uma cheia afluente, atinge um nível acima do máximo normal, as descargas são liberadas tentando trazer o nível de volta ao máximo normal, condicionando-se a nunca exceder as restrições. No início do período chuvoso, impõe-se ao reservatório um nível que atenda ao volume de espera calculado a cada ano (OLIVEIRA, 2003).

A regularização, além do efeito para a geração de energia elétrica, beneficia outros usos da água a jusante através do controle de cheias e do aumento da vazão mínima nos períodos de estiagem. Porém, as várias restrições de jusante, principalmente em relação a cheias, foram aumentando, em parte, devido a não existência durante muito tempo de um órgão articulador da gestão de recursos hídricos com as autoridades competentes no controle do uso do solo nas margens do rio e, também, devido ao aumento da população urbana que foi sendo verificado nas cidades brasileiras. Após o início da operação de um reservatório, as cheias que normalmente ocorriam, anualmente, deixam de ocorrer nesta freqüência normal. O reservatório faz seu papel regularizador do regime do rio. A falsa idéia de segurança leva à construção de benfeitorias nas calhas anteriormente sujeitas a enchentes anuais. Em áreas urbanas, na maioria das vezes, o que se observa é as calhas dos rios em processo de acelerada urbanização. O setor elétrico foi assimilando, ao longo de anos, essas restrições com a alocação de maiores volumes de espera em seus reservatórios de modo a atenuar a defluência de cheias, mas, mesmo com este cuidado, há sempre um risco de que as restrições possam ser quebradas.

No ano de 1977, por exemplo, enchentes ocorridas na bacia do rio Grande ocasionaram o rompimento das barragens de Euclides da Cunha e Armando Salles

Oliveira, pertencentes à antiga Companhia Elétrica de São Paulo – CESP. A partir desse momento, além dos estudos hidrológicos, para a área de programação da operação do setor elétrico passarem a ter um maior reconhecimento, a CESP iniciou a implantação de uma rede telemétrica em sua área de atuação e também do primeiro serviço de meteorologia voltado para a quantificação de chuva futura em uma empresa de geração hidrelétrica (OLIVEIRA, 2003).

A previsão meteorológica vem sendo utilizada de forma crescente como apoio à decisão em diferentes setores da sociedade, no Brasil e no mundo. Com 95% de sua produção elétrica de origem hidráulica, o Brasil depende, para um planejamento mais efetivo da operação integrada de seu parque hidrelétrico interligado, de previsões de precipitação, temperatura, umidade, nebulosidade, além das previsões de afluência que há muito já vêm sendo praticadas com o desenvolvimento e a utilização de modelos hidrológicos (ONS, 2000).

No planejamento, programação, coordenação e controle da operação das usinas hidrelétricas, as previsões meteorológica e climática constituem-se como ferramentas importantes para as atividades de previsão de carga, previsão de afluências, manutenção de equipamentos e despacho da operação. Essas informações contribuem como um incremento na qualidade das tomadas de decisão na complexa cadeia de decisões do setor elétrico (ONS, 2000).

No caso específico de Furnas Centrais Elétricas S.A., o setor de Meteorologia foi criado no ano de 1994, com a finalidade de fornecer previsões do tempo de curto prazo (até 24 horas), dados de precipitação ocorrida e prevista para serem utilizados nos modelos hidrológicos e perspectivas de evolução do tempo para 48 horas, dando apoio às diversas atividades da empresa. Hoje, o setor de Meteorologia fornece previsão quantitativa de precipitação para sete dias como dado de entrada para simulação hidrológica, além de perspectivas de evolução do tempo para até 5 dias. Para elaborar essas previsões, a equipe de meteorologistas baseia-se em resultados de modelos numéricos de tempo, nos dados meteorológicos observados da rede nacional e da sua rede telemétrica, em imagens de satélite, imagens de radares meteorológicos e de descargas atmosféricas. Segundo OLIVEIRA (2003), na maioria dos eventos de cheias, após a estruturação das áreas de hidrometeorologia das empresas de energia hidrelétrica, obteve-se sucesso no apoio à operação hidráulica das usinas no decorrer destes eventos,

demonstrando que os sistemas de previsão hidrometeorológicos contribuem para a segurança na tomada de decisões operativas.

Em 2003, como resultado de um projeto de pesquisa e desenvolvimento em cooperação com o departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por meio do Laboratório de Prognósticos em Mesoescala (LPM/UFRJ), Furnas implantou um Sistema Integrado de Previsões Numéricas de Tempo para atender suas necessidades de planejamento e operação. O modelo MM5 foi implantado em um *cluster* de computadores, disponibilizando previsões para uma área que cobre as regiões sul e sudeste do Brasil e parte da região centro-oeste, com uma resolução de 27 km, e em especial para a bacia do rio Paraíba do Sul, onde uma grade de 9 km de resolução, aninhada a primeira, detalha o comportamento da atmosfera segundo as necessidades de operação da empresa (COELHO *et al.*, 2004).

Fica assim evidente que o conhecimento dos fenômenos meteorológicos que atuam nas áreas das UHE, especialmente do regime pluviométrico, possui extrema importância na operação das mesmas. A seguir, são descritos alguns dos fenômenos meteorológicos que causam precipitação intensa e atuam nas regiões sudeste e centro-oeste do Brasil, onde se localizam as bacias hidrográficas de estudo da presente dissertação.

2.4 FENÔMENOS METEOROLÓGICOS

Entre os principais sistemas meteorológicos que causam precipitação nas regiões sudeste e centro-oeste do Brasil, estão as tempestades isoladas, as frentes frias, as linhas de instabilidade e a ZCAS. Esses sistemas, na verdade, possuem escalas temporais, sazonais e horizontais diferentes e, por isso, podem causar mais ou menos precipitação em um mesmo intervalo de tempo. Os processos de formação e desenvolvimento de cada um dos sistemas supracitados são descritos, de forma simples, nos próximos itens desse trabalho.

2.4.1 Tempestades Isoladas

Ocorre principalmente no verão, devido ao aquecimento local, formando uma única nuvem, acompanhada em geral de trovões, descargas elétricas, granizo e ventos

fortes. A nuvem característica é a cumulunimbus (Cb), uma nuvem em forma de torre, que se expande lateralmente no topo, assumindo a configuração de uma bigorna. O grande desenvolvimento dos Cbs acha-se associado à presença de ar quente, úmido e instável. O desenvolvimento local está condicionado a um forte gradiente térmico vertical, como resultado do aquecimento diurno, que atinge maiores proporções no período da tarde. Essa nuvem tem tempo de vida entre 30 e 60 minutos e possui três estágios durante seu ciclo de vida, conforme ilustra a Figura 2.2: estágio cúmulus (formação), maturação e decaimento (ou dissipação) (AHRENS, 1993). Essas etapas do ciclo de vida são descritas a seguir:

1) formação - durante esta fase, existe somente correntes ascendentes no interior da nuvem, levando ar úmido da superfície para altos níveis; não existe tempo suficiente para ocorrer precipitação, e a corrente ascendente mantém as gotas de chuva e cristais de gelo suspensos dentro da nuvem; também não ocorrem relâmpagos ou trovoadas;

2) maturação - enquanto a nuvem se desenvolve, as gotas de chuva crescem e tornam-se mais pesadas, até o ponto em que o ar em ascensão, no interior da nuvem, não é mais capaz de mantê-la em suspensão, e elas começam a cair; a queda das gotas dentro da nuvem dá origem às correntes descendentes; durante esse estágio, a tempestade é mais intensa; a nuvem pode alcançar uma altura entre 12 km e 8 km de largura em sua base; nesta fase, já podem ocorrer relâmpagos e trovoadas, além de forte vento em superfície; a precipitação pode ser acompanhada por granizos;

3) dissipação - ocorre quando as correntes ascendentes enfraquecem e as descendestes predominam no interior da nuvem; ocorre precipitação fraca.

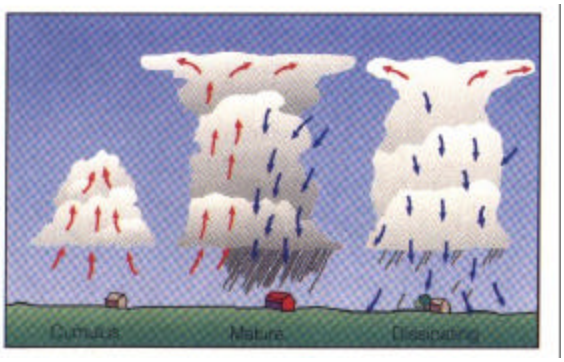


Figura 2.2: Modelo simplificado do ciclo de vida de uma célula simples (Fonte: AHRENS, 1993).

Como exemplo, na Figura 2.3 é apresentada a foto de um cumulunimbus.

Figura 2.3: Foto de um cumulunimbus (Fonte: DHN, 2004).

2.4.2 Frentes Frias

Os conceitos de massas de ar e frentes foram introduzidos na literatura e na previsão do tempo nas décadas de 20 e 30. Desde então, esses conceitos têm sido amplamente adotados e ainda figuram como base importante na análise do tempo.

Quando ocorre o encontro de duas massas de ar, de características diferentes, elas não se misturam imediatamente. A massa mais quente, menos densa, sobrepõe-se à massa menos quente, mais densa. A zona de transição entre essas duas massas de ar, que apresenta fortes gradientes de temperatura e umidade, é denominada zona frontal ou frente.

A frente é, portanto, uma zona de transição, que se comporta como uma linha de descontinuidade, com elevados gradientes de temperatura e umidade entre massas de ar, cujas características térmica e de quantidade de vapor d'água são diferentes (VIANELLO e ALVES, 2000).

Uma frente fria é definida como aquela ao longo da qual o ar frio está deslocando o ar quente. A Figura 2.4 apresenta os padrões de nuvens e precipitação típicas em uma vista lateral de uma frente fria. O ar frio e denso na frente força o levantamento do ar quente. Se o ar quente levantado é úmido e instável, ele condensa em uma série de nuvens cumulus e cumulunimbus (Cb). Ventos fortes nos níveis altos transportam os cristais de gelo formados perto dos topos das nuvens Cbs em nuvens cirrostratus (Cs) e cirrus (Ci). Essas nuvens geralmente aparecem na dianteira de uma frente fria.

Durante a aproximação de uma frente fria, ocorre sensível redução da pressão atmosférica e elevação da temperatura do ar. Após a passagem da mesma, a pressão atmosférica sobe rapidamente e a temperatura do ar sofre uma redução acentuada.

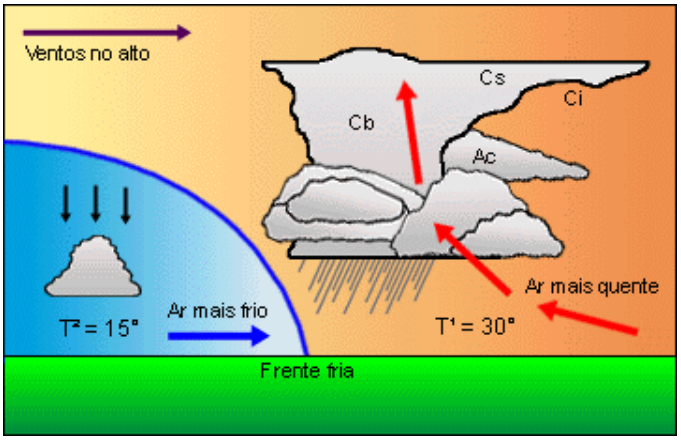


Figura 2.4: Esquema da penetração de um sistema frontal no hemisfério sul (Fonte: LAMMA, 2003).

Na Figura 2.5, é apresentada, de forma ilustrativa, uma imagem do satélite GOES-12 do dia 11 de junho de 2004, no horário das 1745Z, no canal infravermelho, com uma frente fria atuando nos estados de Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso do Sul e São Paulo.

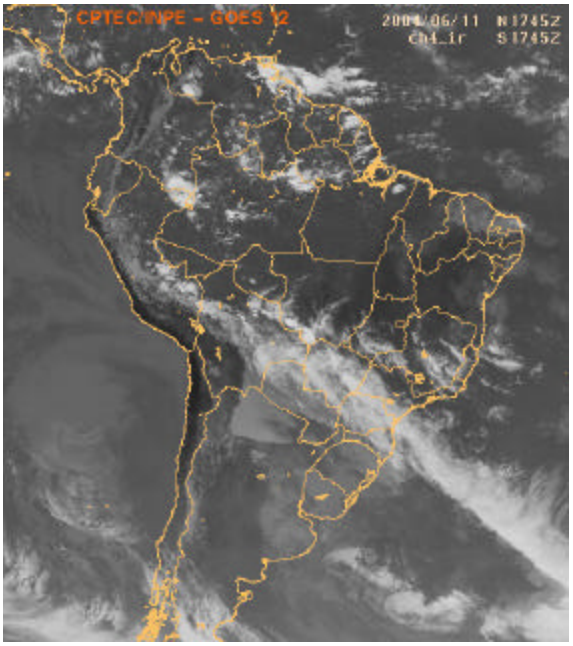


Figura 2.5: Imagem do satélite GOES-12 às 1745Z do dia 11/06/2004 (Fonte: CPTEC, 2004).

Existem dois tipos principais de frentes frias, as de deslocamento rápido e aquelas com deslocamento lento. O deslocamento rápido de uma frente fria pode, eventualmente, formar, em sua dianteira, cbs organizados em forma de linha, ocasionando trovoadas e pancadas de chuva. Este fenômeno é denominado *linha de instabilidade*.

2.4.3 Linhas de Instabilidade

As linhas de instabilidade (LIs) ocorrem em áreas tanto tropicais como extratropicais e em áreas continentais e oceânicas, causando, entre outros, altas taxas de precipitação (RAY, 1986). Segundo VIANELLO e ALVES (2000), as linhas de instabilidade desempenham importante papel no regime pluvial das regiões norte, centro-oeste e sudeste do Brasil.

As LIs caracterizam-se pelo conjunto de nuvens do tipo cbs em forma de linha. As formas mais comuns de tempo severo são as ventanias próximas ao solo. Ocorrem ainda descargas elétricas e, em alguns casos, granizo.

As condições favoráveis em grande escala para a formação das LIs incluem ar quente e úmido em baixos níveis e ar relativamente mais frio acima. Em adição, uma

camada de ar seco em níveis médios exatamente acima da camada úmida em baixos níveis (RAY, 1986).

Uma vez formada, a linha de instabilidade promove seu próprio mecanismo de alimentação, formando novas nuvens e deslocando-se. O deslocamento geral das linhas de instabilidade no Brasil e, em especial, no estado do Rio de Janeiro é de oeste para leste, em geral à frente de uma onda frontal (VIANELLO e ALVES, 2000).

2.4.4 Zona de Convergência do Atlântico Sul

A circulação atmosférica durante o verão na América do Sul (AS) apresenta alguns sistemas bem definidos, em altos níveis, como o anticiclone centrado na Bolívia, conhecida como alta da Bolívia (AB), que é formada pelo aquecimento da superfície na região do Chaco, e um cavado próximo à costa do nordeste brasileiro (NEB), conforme ilustra a Figura 2.6. Em muitas ocasiões, a circulação associada a esse cavado torna-se um vórtice, com centro frio, que exerce grande influência na distribuição de chuva sob o NEB (FIGUEROA *et al.*, 1995).

Já em baixos níveis, a circulação atmosférica na América do Sul apresenta um escoamento de norte no centro do continente, que é importante para o transporte de umidade da região amazônica para o Brasil central e regiões sul e sudeste do país (Figura 2.7). Esse escoamento, como será visto no item 2.4.4.1, é um importante mecanismo de formação da ZCAS.

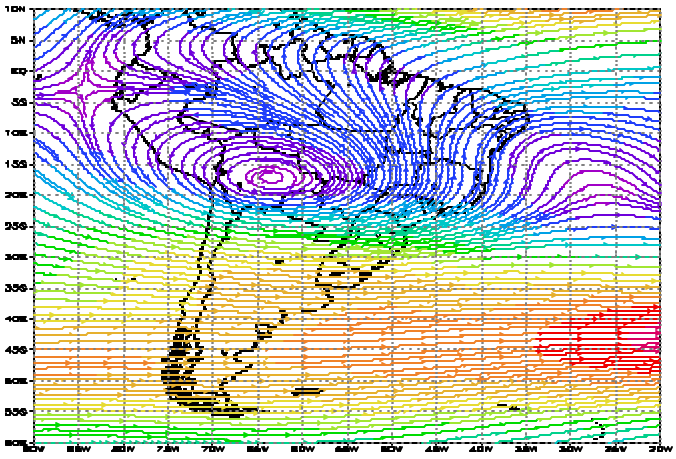


Figura 2.6: Linhas de corrente em 200 hPa para os meses de dezembro a fevereiro (Fonte: SEABRA, 2002).

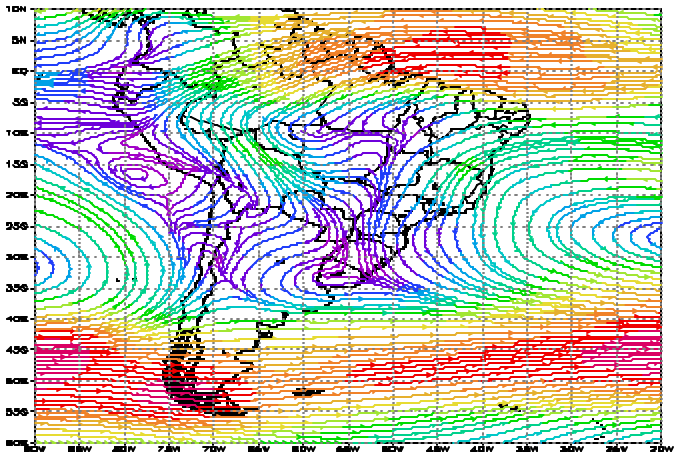


Figura 2.7: Linhas de corrente em 850 hPa para os meses de dezembro a fevereiro (Fonte: SEABRA, 2002).

Outra importante característica na circulação atmosférica na AS durante o verão é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Esse fenômeno é caracterizado por uma banda de nebulosidade quase estacionária, por períodos que variam de 4 a 20 dias, orientada na direção NW/SE, estendendo-se desde a Amazônia até o oceano Atlântico Sul, associada a uma zona de convergência de umidade que se prolonga até a média troposfera (CARVALHO *et al.*, 2004; SANCHES, 2002; SEABRA, 2002; ROBERTSON e MECHOSO, 2000; MARTON, 1994 e 2000; FIGUEROA, 1997; CASARIN e KOUSKY, 1986; SILVA DIAS, 1995). Devido a sua persistência, a ZCAS exerce um papel importante no regime de chuvas na região atuante, acarretando altos índices pluviométricos (SANCHES, 2002). Na imagem do satélite GOES-8 do dia 06 de janeiro de 1999 no horário das 03Z (Figura 2.8), canal infravermelho, é possível observar a configuração de uma ZCAS, que atuou nas regiões sudeste e centro-oeste no período de 06 a 18 de janeiro de 1999 (CLIMANÁLISE, 1999).

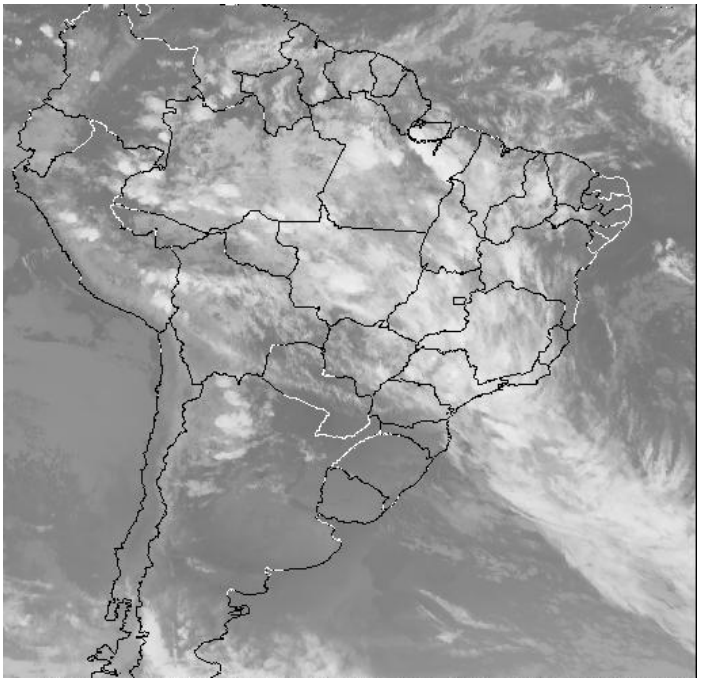


Figura 2.8: Imagem do satélite GOES-8 do dia 06/01/1999 às 03Z no canal infravermelho (Fonte: CPTEC, 2004).

A ZCAS é um dos mais importantes fenômenos na escala intrasazonal que ocorre durante o verão e, ocasionalmente na primavera, com episódios de estiagem prolongada e enchentes que atingem diversas regiões do país. CASARIN e KOUSKY (1986) mostraram que veranicos no extremo sul do Brasil estão relacionados com intensa atividade convectiva na região sudeste, onde se localiza a ZCAS.

Nos subtrópicos, durante o verão, existem três significativas zonas de precipitação: a Zona de Convergência do Índico Sul (ZCIS) sobre o oceano Índico, a Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) sobre a região central do Pacífico Sul e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre o Atlântico Sul. A Figura 2.9 representa uma média diária da anomalia de radiação de onda longa emitida (ROLE), no período de 31 de janeiro de 1988 a 02 de fevereiro de 1988. Nesta, pode-se observar a presença da ZCAS, da ZCPS e da ZCIS. KODAMA (1992) denominou estas zonas como Zonas de Convergência Subtropical (ZCSTs) e analisou as características e as condições que favorecem a sua formação. Apesar da grande diferença das condições topográficas ao redor das ZCSTs, KODAMA (1992), através de um estudo observacional, mostrou algumas características comuns entre as ZCSTs:

(i) são sistemas quase-estacionários;

(ii) estendem-se para leste, nos subtrópicos, a partir de regiões tropicais específicas de intensa atividade convectiva e estão associadas a uma alta pressão no lado leste;

(iii) formam-se ao longo de jatos subtropicais em altos níveis e a leste de cavados semi-estacionários;

(iv) são zonas de convergência em uma camada inferior úmida;

(v) estão localizadas na fronteira de massas de ar tropicais úmidas, em regiões de forte gradiente de umidade em baixos níveis.

Portanto, para o caso específico da ZCAS, a forte atividade convectiva e a alta pressão destacadas por KODAMA (1992) no item (ii) acima, referem-se a convecção na Amazônia e a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), respectivamente.

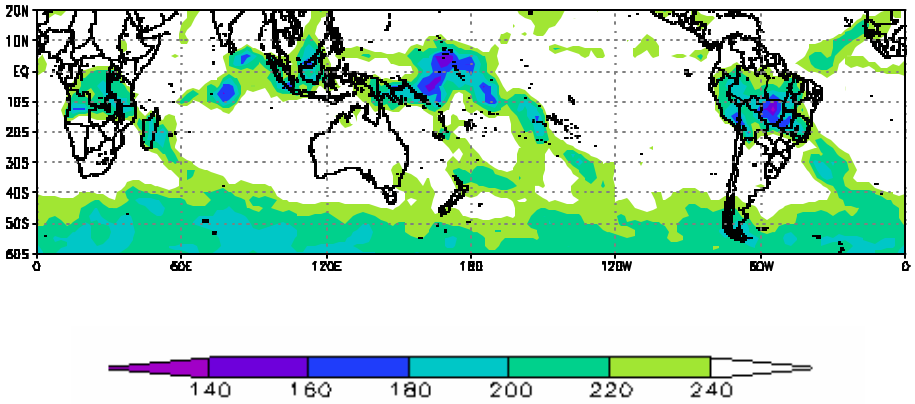


Figura 2.9: Radiação de onda longa emitida (ROLE – W/m^2) média no período de 31/01/1988 a 02/02/1988 (Fonte: SEABRA, 2002).

Por outro lado, KODAMA (1993), estudando as condições de grande escala durante os períodos ativos e inativos das ZCST, estabeleceu que somente quando ambas as condições abaixo são satisfeitas, as ZCSTs aparecem. Se uma das condições não for satisfeita, as ZCSTs não se estabelecem, ou formam-se de maneira desorganizada. São elas:

(i) escoamento de ar úmido em baixos níveis em direção aos pólos, a oeste das altas subtropicais; no caso da ZCAS, esse escoamento é reforçado por um escoamento de noroeste vindo da região Amazônica;

(ii) presença de um jato subtropical (JST) em altos níveis, posicionado em latitudes subtropicais.

Mas, uma vez estabelecida a ZCAS, uma pergunta importante seria em qual região reside a subsidência associada à convecção do fenômeno. A partir de resultados de modelagem numérica, GANDU (1993) constatou que a subsidência associada à fonte de calor amazônica tende a promover subsidência de compensação principalmente a sudoeste da fonte. A região de subsidência, entretanto, também depende da estrutura vertical da forçante (MARTON, 1994). No caso de fontes de calor com máximo de aquecimento em altos níveis, a subsidência na alta e média troposfera ocorre principalmente no lado polar da fonte. Se o máximo do aquecimento ocorrer na baixa troposfera (aproximadamente 700 hPa), a subsidência de compensação na média troposfera associada a uma fonte de calor representativa da ZCAS ocorre no lado equatorial da fonte, ou seja, no nordeste brasileiro. Subsidência associada a ZCAS tende a ocorrer principalmente no lado polar. Somente quando a ZCAS atinge um estágio de dissipação, com fonte na média e baixa troposfera é que a subsidência no lado equatorial se intensifica.

A ZCAS sofre influências tanto locais quanto remotas, que são determinantes para a ocorrência do fenômeno e modulam o início, duração e localização da zona de convergência (SEABRA, 2002).

A seguir, são apresentados alguns aspectos que influenciam a ZCAS tanto localmente quanto remotamente. As influências locais são aquelas devido à circulação atmosférica local, no caso, a circulação atmosférica no continente sul-americano. Já as influências remotas são aquelas que ocorrem devido à propagação de ondas em todo o globo terrestre.

2.4.4.1 Influências Locais

Entre os mecanismos locais que freqüentemente são atribuídos à formação, manutenção e posicionamento da ZCAS, estão as condições de grande escala da

circulação atmosférica, a atividade convectiva na Amazônia, a presença da cordilheira dos Andes e uma possível influência da temperatura da superfície do mar no Atlântico. Esses mecanismos são discutidos resumidamente abaixo.

a) Condições de grande escala da circulação atmosférica: a circulação atmosférica no nível de 850 hPa, durante o verão na América do Sul, apresenta um escoamento de norte, que é importante para o transporte de umidade da região amazônica para o Brasil central e regiões sul e sudeste do país. Os ventos alísios no oceano Atlântico equatorial penetram na região amazônica e, então, giram anticiclonicamente a leste dos Andes, escoando na direção sul/sudeste e transportando umidade da região amazônica para latitudes mais ao sul (ver Figura 2.7).

b) Atividade convectiva na Amazônia: freqüentemente, observa-se que a convecção na Amazônia encontra-se bem organizada durante o verão (CASARIN e KOUSKY, 1986). De acordo com OLIVEIRA e NOBRE (1986), quando um sistema frontal (SF) desloca-se em direção a baixas latitudes, pode ocorrer uma interação com a convecção na Amazônia na forma de uma banda de nebulosidade convectiva de direção preferencial NW/SE sobre a Amazônia e parte central do Brasil. Esse tipo de interação pode, eventualmente, favorecer a formação da ZCAS.

c) Presença da cordilheira dos Andes: FIGUEROA *et al.* (1995) usaram um modelo com a coordenada vertical eta, incluindo o efeito da liberação de calor latente para simular características da circulação de escala regional sobre a América do Sul, com ênfase especial na formação da ZCAS. A função escolhida para representar a forçante do modelo é uma aproximação da liberação de calor latente na bacia amazônica, correspondendo a distribuição de chuva na região. O primeiro experimento foi realizado com a presença dos Andes, e o resultado foi a presença de uma zona de convergência na baixa troposfera com inclinação NW/SE, semelhante à orientação da ZCAS.

O segundo experimento foi realizado sem a presença dos Andes. Esse experimento reproduz a ZCAS, embora localizada fora de sua posição observada.

Portanto, FIGUEROA *et al.* (1995) concluíram que a ZCAS poderia existir independentemente dos Andes, mas não sem a convecção sobre a região amazônica. Aparentemente, os Andes intensificam o escoamento em baixos níveis, auxiliando a alimentação da convergência com o ar úmido da Amazônia. Para os autores, a geração da ZCAS se dá através de uma ação combinada da fonte de calor latente da Amazônia e da topografia da cordilheira dos Andes.

d) Influência da temperatura da superfície do mar (TSM): de acordo com NOBRE *et al.* (2002), é possível que anomalias de TSM do oceano Atlântico Sul modulem a convecção sobre o continente. ROBERTSON e MECHOSO (2000) sugerem que anomalias negativas de TSM sobre o Atlântico sudoeste podem aumentar a persistência das anomalias de radiação de onda longa emitida associadas à ZCAS, que, por sua vez, podem intensificar as anomalias de TSM. Desta forma, estabelecida a circulação da ZCAS, as áreas oceânicas adjacentes a esse sistema tenderiam a resfriar, intensificando a circulação sobre a AS. Porém, as anomalias positivas de TSM favorecem o aumento de evaporação, podendo favorecer a convecção da ZCAS através de maior disponibilidade de vapor d'água e instabilização das camadas inferiores da atmosfera (NOBRE *et al.*, 2002). NOBRE *et al.* (2002) realizaram simulações com o modelo de circulação geral da atmosfera do CPTEC, tentando compreender os efeitos de anomalias de TSM sobre o Atlântico sudoeste na posição e intensidade da ZCAS. Os autores concluíram que, ao menos para situações onde condições favoráveis à formação da ZCAS já estejam presentes nas condições iniciais do modelo, no curto intervalo de tempo de aproximadamente uma semana, os efeitos de anomalias positivas de TSM sobre o Atlântico SE favorecem o desenvolvimento de casos de ZCAS mais intensa do que a presença de águas mais frias sobre o Atlântico SE.

SILVA DIAS (1995) argumentou que, do ponto de vista oceânico, tem-se considerado a possível influência das configurações da TSM quanto ao posicionamento e intensidade da ZCAS. Esse argumento é baseado no

alinhamento da ZCAS com uma região de forte gradiente de TSM. Contudo, é também possível que as anomalias de TSM sejam uma resposta oceânica à anomalia de vento à superfície do oceano, decorrente da própria ZCAS.

2.4.4.2 Influências Remotas

Os estudos das influências remotas baseiam-se na interação entre ondas planetárias de diferentes escalas espaciais e temporais, que atuam no surgimento, intensificação e desintensificação da ZCAS (MARTON, 2000; GRIMM, 1992). Dentre essas influências, pode-se citar a Oscilação de Madden e Julian (OMJ) ou oscilação de 30-60 dias.

A OMJ é a mais importante oscilação atmosférica intrasazonal na região tropical. Trabalhos desenvolvidos mostram que a OMJ tem uma importante influência na ZCAS (GRIMM e SILVA DIAS, 1995; GRIMM, 1992).

A OMJ caracteriza-se por um deslocamento para leste de uma célula zonal de grande escala termicamente direta, onde o ar quente sobe e ar frio desce, a partir do oceano Pacífico tropical oeste e Índico leste, que causa variações na convecção tropical (KAYANO, 1996).

A ZCAS pode sofrer influência remota a partir da ZCPS. Segundo GRIMM (1992) e GRIMM e SILVA DIAS (1995), uma anomalia de convecção na ZCPS associada com uma das fases da OMJ pode influenciar na convecção sobre a ZCAS pela intensificação de um cavado em altos níveis sobre o sudeste da América do Sul.

CASARIN e KOUSKY (1986) mostraram uma possível conexão entre o posicionamento da ZCAS, da ZCPS e ocorrência de veranicos no Rio Grande do Sul. Essa conexão foi posteriormente estudada por SILVA DIAS *et al.* (1988) para o caso de fevereiro de 1988. Eles mostraram que, neste caso, assim como no episódio estudado por CASARIN e KOUSKY (1986), uma modificação da estrutura da ZCAS e quebra do veranico no sul do Brasil ocorreu cerca de 15 dias após alterações no posicionamento da ZCPS. SILVA DIAS *et al.* (1991) também obtiveram o mesmo resultado para o caso de março de 1991.

Grande parte dos trabalhos encontrados na literatura tem relacionado as variações na posição e intensidade da ZCAS com a oscilação de 30-60 dias na América do Sul

(CASARIN e KOUSKY 1986; GRIMM e SILVA DIAS, 1995). Porém, freqüências mais altas também são importantes. MARTON (2000), investigando a variabilidade intrasazonal da ZCAS, encontrou influências nas bandas 30-70, 20-30, 13-20, 07-13 e 02-07 dias. Neste trabalho, MARTON (2000) mostrou que a convecção ao longo da ZCAS na região SE do Brasil sofre significativa mudança intrasazonal com períodos típicos da ordem de 20–40 dias.

ROBERTSON e MECHOSO (2000) encontraram variações de escalas interanuais e interdecadais na circulação atmosférica nos subtrópicos da América do Sul, ou seja, na região da ZCAS.

Mais recentemente, SANCHES (2002) analisou os padrões atmosféricos dominantes em situações de ZCAS a partir de uma técnica de composição. O estudo foi realizado nos meses de verão no período de 1980 a 2000. Algumas das composições foram realizadas em anos de El-niño e La-niña.

Com relação ao composto em anos de El-niño (EN), SANCHES (2002) verificou, entre outros, os seguintes comportamentos:

a. a atividade convectiva sobre o continente é menos intensa e ligeiramente deslocada para oeste;

b. sobre o oceano, na região da ZCAS, observou-se um setor cuja atividade convectiva era mais intensa, possivelmente associada às passagens dos transientes que são modulados pela circulação do EN.

Em relação aos anos de La-niña (LA), o autor verificou que:

1) a atividade convectiva, em comparação a anos de EN, é mais intensa sobre o continente;

2) em altos níveis, a subsidência ao norte da ZCAS é inibida pela circulação de grande escala; ao sul, verificou-se que a circulação anticiclônica estende-se para o continente inibindo a convecção, tanto na parte oceânica quanto sobre o continente.

Mesmo com o avanço do conhecimento das características físicas da ZCAS, incluindo estudos desenvolvidos quanto aos mecanismos de origem e influências remotas, muitos de seus aspectos observacionais, como variabilidade e intensidade, ainda não estão bem definidos. Segundo SANCHES (2002), existe uma necessidade de

se identificar e avaliar a evolução e padrões da circulação associados à banda de nebulosidade, principalmente na região continental, assim como o papel do ciclo diurno na intensificação da convergência do fluxo de umidade nos baixos níveis. Além do interesse científico, o conhecimento dessas características é de grande valia para os meteorologistas que trabalham com previsão do tempo.

Apesar do grande número de trabalhos desenvolvidos com a ZCAS, revela-se pouco estudada, na literatura, a relação entre precipitação e vazão em bacias hidrográficas sob esse prisma.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Conforme estabelecido anteriormente, o objetivo da presente tese é estudar a influência das ZCAS em bacias hidrográficas, já que, como descrito no Capítulo 2, a ZCAS é um dos fenômenos meteorológicos mais importantes na escala intrasazonal, que ocorre tipicamente no verão, ocasionando nebulosidade e precipitação por períodos que variam de 4 a 20 dias.

Mais especificamente, o trabalho inicial consistiu na determinação das bacias hidrográficas a serem estudadas. O ponto mais importante era a localização das bacias, que deveria ser ao longo do posicionamento médio da ZCAS. Além disso, deveriam ser estudadas bacias com algum destaque em âmbito nacional.

Assim, foram escolhidas as bacias dos rios Paraíba do Sul e Grande, localizadas na região sudeste e as bacias dos rios Paranaíba e Tocantins, localizadas na região centro-oeste do Brasil. Essas bacias apresentam posição semelhante com o alinhamento médio da banda de nebulosidade associada à ZCAS, com importância estratégica principalmente para a geração de energia elétrica, uma vez que estão sob os cuidados de Furnas Centrais Elétricas S.A.

O passo seguinte foi determinar qual o episódio ZCAS seria estudado, sendo a primeira opção por um evento recente. Foram realizadas pesquisas em várias revistas, publicadas mensalmente pelo Centro de Previsão Climática e Estudos Climáticos (CPTEC), a Climanálise. A Climanálise está disponível na página do CPTEC, http://www.cptec.inpe.br/clima, a partir de janeiro de 1995 e analisa os aspectos climáticos e sinóticos que influenciam as perturbações atmosféricas sobre o Brasil, apresentando todos os eventos ZCAS que ocorreram no período de disponibilidade da revista. Alguns desses eventos, ocorridos nos meses de dezembro, janeiro ou fevereiro estão listados na Tabela 3.1. É importante ressaltar que, eventualmente, podem ocorrer eventos de ZCAS durante a primavera ou outono, porém, por simplicidade serão listados apenas alguns eventos que ocorrem nos meses de verão. Em função da possibilidade de obtenção conjunta de dados hidrometeorológicos e imagens de satélite optou-se pelo estudo do mês de fevereiro de 2002, quando ocorreram dois episódios de ZCAS, o primeiro entre os dias 04 e 07 e o segundo entre os dias 16 e 24 de fevereiro. A análise desses eventos será realizada com maiores detalhes no Capítulo 4 desta tese.

Tabela 3.1: Lista de alguns episódios de ZCAS durante os meses de verão.

ANO	MÊS		
	JAN	FEV	DEZ
2001	01 a 04	X	17 a 21 e 24 a 28
2002	X	04 a 07 e 16 a 24	10 a 16 e 27 a 07/01/03
2003	13 a 19 e 25 a 01/02	X	X
2004	02 a 06 10 a 20 e 25 a 29	07 a 11 e 20 a 24	—

Fonte: CPTEC, 2004.

Complementarmente, foi utilizado o resultado obtido por SANCHES (2002), que analisou os padrões atmosféricos dominantes em situações de ZCAS a partir de uma técnica de composição, realizando o estudo nos meses de verão, abrangendo o período de janeiro de 1980 a fevereiro de 2000. Sanches (2002) identificou 65 casos de ZCAS, sendo 23 em dezembro, 29 em janeiro e 13 em fevereiro, dando uma média de aproximadamente 3 episódios por verão, com duração aproximada de 10 dias. No total, foram 677 dias dos 1800 que compreenderam o período de estudo. Assim, a ZCAS esteve em atividade durante 1/3 do total do período estudado, e segundo o autor, essa característica fortalece a hipótese que a climatologia de verão da América do Sul seja modulada pela ZCAS. SANCHES (2002) apresenta uma tabela com todos os episódios ZCAS, durante os meses verão, de janeiro de 1980 a fevereiro de 2000. Essa tabela pode ser vista no Apêndice A desta tese.

Depois de explicitados os eventos ZCAS e realizada a escolha das bacias hidrográficas a serem analisadas, o passo seguinte foi organizar os dados necessários para análise da influência da precipitação decorrente da ZCAS nas bacias.

3.1 DADOS UTILIZADOS

Para realizar as análises dos eventos ZCAS escolhidos e suas influências nas bacias hidrográficas de interesse, foram utilizados dados de Furnas Centrais Elétricas S.A., do ONS e do CPTEC, que são apresentados a seguir.

3.1.1 Precipitação

Foram empregados dados de precipitação acumulada em 24 horas de postos pluviométricos, que foram gentilmente cedidos pela Divisão de Hidrologia de Furnas Centrais Elétricas S.A. Os postos são pertencentes a Furnas e estão localizados nas bacias hidrográficas dos rios Paraíba do Sul, Grande, Paranaíba e Tocantins. Esses dados são colhidos diariamente sempre às 7 horas da manhã, ou seja, uma leitura realizada no dia 5, por exemplo, corresponde a precipitação acumulada entre as 7 horas da manhã do dia 4 até as 7 horas da manhã do dia 5. Os dados passam por processos de consistência, não sendo necessário qualquer estudo específico para preenchimento de possíveis falhas decorrentes, por exemplo, de erros de medida.

O período da série de dados disponibilizada variou de uma bacia hidrográfica para outra. Para a bacia do rio Tocantins, foi disponibilizada a menor série, apenas 9 anos, de 1995 a 2003. Já para as bacias dos rios Paraíba do Sul e Paranaíba, os dados são referentes ao período de 1985 a 2003, 19 anos e, na bacia do rio Grande, a série de dados abrange os anos de 1983 a 2003, totalizando uma série de 21 anos. Esses dados foram inicialmente utilizados para observar o comportamento médio anual da precipitação, determinando os períodos seco e chuvoso em cada bacia. Para tal determinação foram calculados os valores médios mensais em cada bacia. O número total de postos pluviométricos localizados nas bacias variou de uma para outra. Na bacia do rio Paraíba do Sul, são 34 postos pluviométricos, enquanto nas bacias do rio Grande, rio Paranaíba e rio Tocantins são 36, 24 e 32 postos respectivamente.

Existem diversos métodos para determinação da precipitação média em uma bacia hidrográfica, conforme a ponderação que se faz das observações pontuais disponíveis. No presente trabalho, que visa preliminarmente identificar e caracterizar a influência da precipitação em bacias hidrográficas, optou-se por utilizar o método da média aritmética, onde admite-se que todos os postos pluviométricos têm o mesmo peso. Esse método ignora as variações espaciais da precipitação.

Embora sejam reconhecidas as limitações do método empregado julgou-se suficiente para atender o propósito de lançar um novo enfoque no exame dos registros fluviométricos de importantes bacias hidrográficas a partir da perspectiva meteorológica da análise de eventos ZCAS. Estudos mais rigorosos no sentido de melhor representar a variabilidade espaço-temporal da precipitação, incluindo análises de incertezas, devem ser desenvolvidos, que certamente permitirão ampliar e enriquecer o prisma adotado nesta pesquisa.

Dessa forma, utilizando o método da média aritmética, foram calculadas, em cada bacia de estudo, as precipitações médias mensais, a média somente para o mês de fevereiro, já que os eventos ZCAS analisados ocorreram neste mês, e a média diária para o mês de fevereiro de 2002.

Na seqüência, foram estabelecidos os contornos das bacias e realizada a localização dos postos pluviométricos utilizados em cada uma delas. A partir desse procedimento simplificado foi possível gerar mapas diários com os valores observados de precipitação nos postos e observar espacialmente o comportamento da chuva, identificando, assim, os eventos de caráter local e aqueles onde a precipitação ocorreu de forma bem distribuída em toda a bacia.

Também foram analisados os dados observados juntamente com os valores mensais de longo termo, para determinar eventos extremos de precipitação em cada bacia. Para cada episódio em que a precipitação excedeu o valor de longo termo, buscou-se, na literatura, se esse evento já havia sido estudado.

3.1.2 Valores médios mensais de vazão natural

Neste estudo foram utilizados também dados de médias mensais de vazão natural para o período de 1931 a 2001, disponibilizados pelo ONS (ONS, 2004), para as UHE

de Funil, Furnas, Itumbiara e Serra da Mesa. A avaliação das vazões naturais foi precedida por uma ampla análise de consistência de dados fluviométricos e pluviométricos disponíveis nas principais estações hidrométricas existentes em cada bacia, bem como de uma abrangente análise de consistência dos dados operativos dos aproveitamentos. As vazões naturais foram obtidas em cada local de aproveitamento, retirando os efeitos da operação dos reservatórios existentes a montante, incorporando as vazões relativas à evaporação e utilizando o processo de balanço hídrico em base mensal, considerando os níveis de água e as curvas cota-volume. Nesse trabalho, foram ainda avaliados e incorporados os usos consuntivos da água na bacia incremental de cada aproveitamento, desde janeiro de1931 a dezembro de 2001.

A análise dessas informações permitiu identificar os meses onde a vazão natural apresenta maiores e menores valores.

3.1.3 Valores diários de vazão natural

Tendo em vista o interesse desta pesquisa de caracterizar mais especificamente os episódios ZCAS que ocorreram em fevereiro de 2002, foram empregados dados diários de vazão natural para o mês de fevereiro de 2002, disponibilizados por Furnas, para as UHE de Funil, Furnas, Itumbiara e Serra da Mesa.

3.1.4 Imagens de satélite

No sentido de fundamentar algumas análises realizadas nesta tese, fez-se o uso de imagens do satélite *Geostationary Operational Environmental* (GOES-8). A órbita do GOES é do tipo órbita geoestacionária, onde o satélite permanece relativamente parado perpendicular a um ponto da superfície terrestre a uma determinada altitude (em torno de 36 mil quilômetros), realizando varredura de parte do território brasileiro a cada meia hora. Neste trabalho, foram utilizadas imagens do canal infravermelho pela facilidade em visualizar o posicionamento da banda de nebulosidade associada a ZCAS. Foram utilizadas imagens do CPTEC (CPTEC, 2004) e imagens de Furnas, onde é possível destacar a localização das bacias (FURNAS, 2003c).

CAPÍTULO 4 – ESTUDO DE CASO

Neste Capítulo, serão descritas resumidamente as características principais das bacias hidrográficas estudadas, e será apresentada a análise sinótica dos eventos ZCAS que ocorreram em fevereiro de 2002.

A escolha das bacias ocorreu pela importância estratégica para geração de energia elétrica e pela localização geográfica, como será discutido no item 4.1.

4.1 AS BACIAS HIDROGRÁFICAS

O interesse pelo estudo das bacias dos rios Paraíba do Sul e Grande, localizadas na região sudeste e das bacias dos rios Paranaíba e Tocantins, situadas na região centro-oeste do Brasil, ocorreu primeiramente pelo posicionamento similar ao da ZCAS, quando configurada. Essa percepção constituiu o fundamento principal da questão científica levantada por esta tese, pois a ZCAS, como descrito no Capítulo 2, é um dos mais importantes fenômenos meteorológicos que ocorre tipicamente no verão, influenciando o regime pluviométrico das bacias de estudo. Além disso, essas bacias possuem destaque em âmbito nacional, entre outros aspectos, pela geração de energia elétrica através de usinas hidrelétricas.

Na Figura 4.1, são apresentadas as localizações das bacias de estudo. É importante ressaltar que essas bacias estão delimitadas conforme a área de interesse de Furnas Centrais Elétricas S.A. Destaca-se que o presente estudo foi realizado no âmbito das áreas de atuação de Furnas em cada bacia.

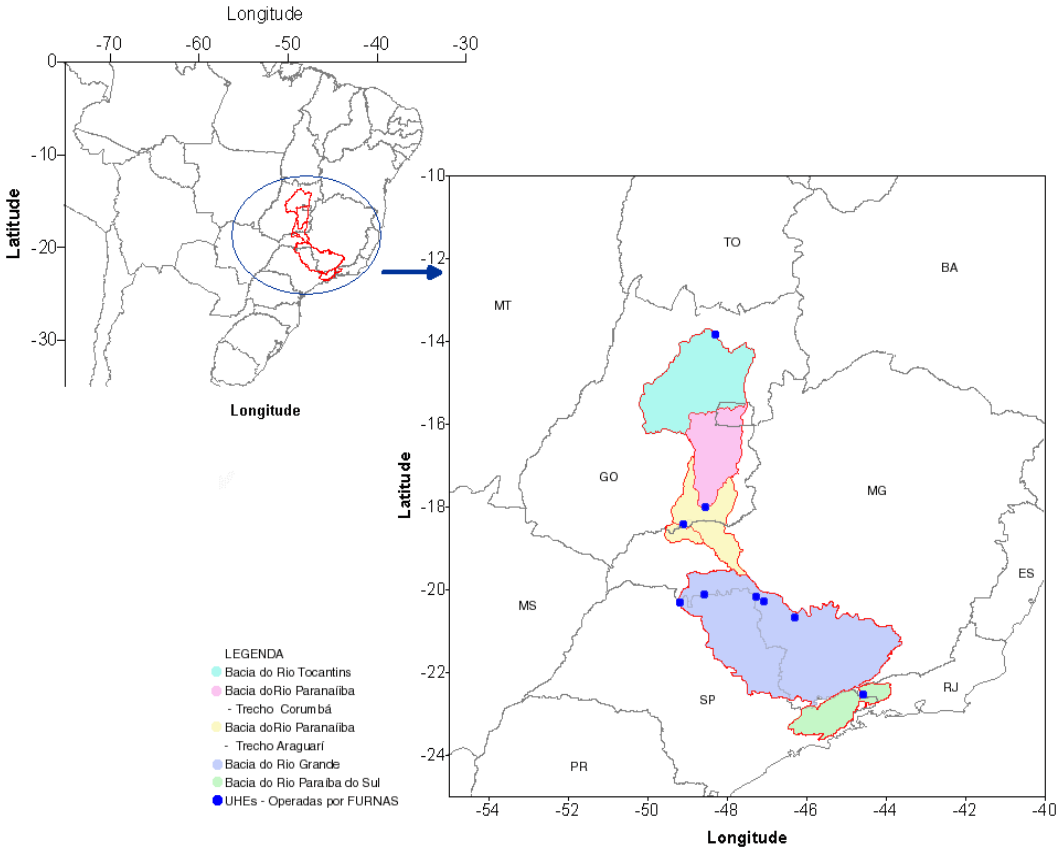


Figura 4.1: Localização das bacias dos rios Paraíba do Sul (verde), Grande (roxo), Paranaíba (trecho Araguari em amarelo e trecho Corumbá em rosa) e Tocantins (azul). Os pontos em azul representam as UHE de Furnas.

A seguir, serão descritas, de forma sucinta, algumas características das bacias hidrográficas de interesse.

Será dada uma ênfase especial na bacia do rio Paraíba do Sul, por se tratar de uma das mais importantes bacias hidrográficas no Brasil, já que drena uma das regiões mais desenvolvidas do país. Outro ponto importante é a questão da operação da UHE de Funil, especialmente durante o período chuvoso, quando o nível do reservatório quase sempre atinge o nível máximo de segurança, sendo necessária a liberação de descargas defluentes, sem que ocorram danos nas cidades a jusante, como Resende e Barra do Piraí.

4.2 A BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

A bacia do rio Paraíba do Sul abrange uma das mais desenvolvidas áreas industriais do país (Figura 4.1). Na bacia, vivem cerca de 5 milhões de habitantes, 87% dos quais vivem em áreas urbanas, numa área de 57.000 km^2, abrangendo os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. São 180 municípios, sendo que 36 estão parcialmente inseridos na bacia.

Possui expressiva relevância nacional devido ao elevado contingente populacional e importância econômica atrelada ao grande e diversificado parque industrial instalado. Essa região localiza-se em uma das mais complexas e desenvolvidas áreas do país, com grande potencial de conflitos no que se refere ao uso dos recursos hídricos. (ANA, 2003).

4.2.1 Ocupação e uso do solo

Nas últimas décadas do século XVIII, teve início a monocultura agrícola de exportação do país, o café, expandindo-se a partir dos núcleos de apoio das rotas de exploração de minérios do interior entre os estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais.

O cuidado com o que hoje se chama capacidade de uso do solo das terras era absolutamente inexistente. Em pouco tempo, as lavouras de café expandiram-se pelas terras do vale do Paraíba, destruindo suas matas naturais.

Devido ao relevo predominantemente acidentado na região do vale do Paraíba, a cafeicultura foi rapidamente à decadência. Logo a pecuária substituiu a agricultura como atividade econômica principal, até meados do século XX, quando o país entra na era industrial, transformando a região de uma condição de economia e população essencialmente rurais para uma condição predominantemente urbana em menos de três décadas (CEIVAP, 2001).

4.2.2 Cobertura Vegetal e uso atual do solo

As florestas naturais que ocupavam a maior parte da bacia antes da expansão da cafeicultura, estão hoje reduzidas a 11% do território, em remanescentes isolados, e que

são mais expressivos apenas onde o relevo se torna montanhoso, como nas cristas das serras do Mar e da Mantiqueira, principalmente na região de Itatiaia (RJ).

Apesar da área de florestas na bacia do rio Paraíba do Sul já estar severamente reduzida, a destruição persiste, tanto por exploração de madeira e lenha, como por incêndios acidentais ou criminosos.

Em termos de área ocupada, a pecuária aparece ainda como principal forma de uso do solo na bacia.

A distribuição das classes de vegetação e uso do solo pode ser observada no mapa de cobertura vegetal na Figura 4.2.

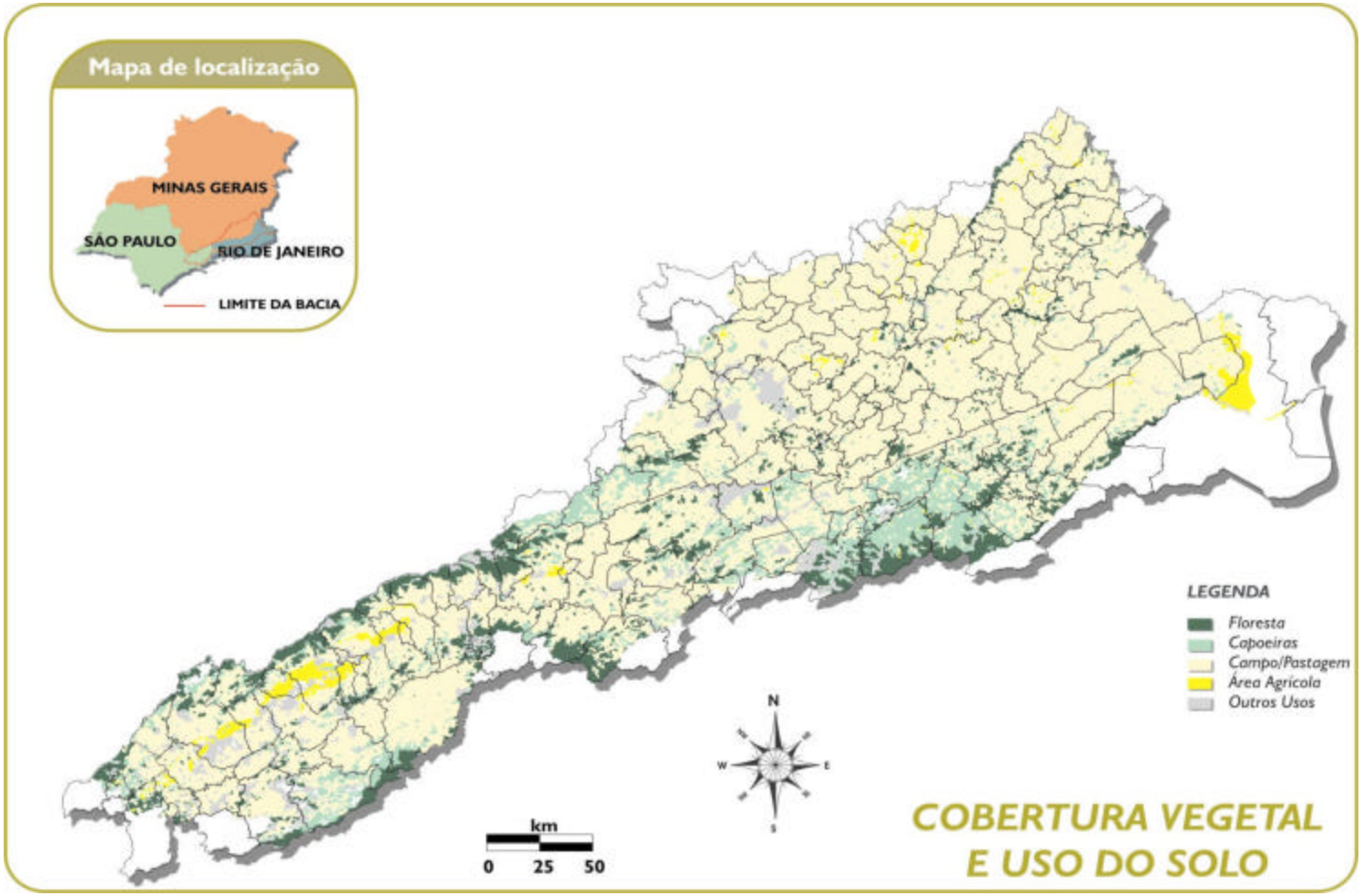


Figura 4.2: Distribuição das classes de vegetação e uso do solo (Fonte: CEIVAP, 2001).

4.2.3 Recursos Hídricos

4.2.3.1. Hidrografia

O rio Paraíba do Sul nasce na serra da Bocaina, no estado de São Paulo, a 1800 metros de altitude, e deságua no norte fluminense, no município de São João da Barra, percorrendo uma extensão aproximada de 1.150 km. Sua bacia tem forma alongada, com comprimento cerca de três vezes maior que a largura máxima, e distribui-se na direção leste-oeste entre as serras do Mar e da Mantiqueira, situando-se em uma das poucas regiões do país de relevo muito acidentado, com ponto culminante a 2.787 m de altitude (pico das Agulhas Negras no maciço do Itatiaia).

Ao longo de seu percurso, o rio Paraíba do Sul apresenta trechos com características físicas distintas, os quais podem ser divididos de acordo com a seguinte classificação:

- curso superior - estende-se até a cidade de Guararema (SP) a 572 m de altitude, apresentando fortes declives, com declividade média de 4,9 m/km e extensão de 317 km;
- curso médio superior - começa em Guararema e segue até Cachoeira Paulista (SP) a 515 m de altitude; nesse trecho, o rio é bastante sinuoso, com declividade média de 0,19 m/km e extensão de 208 km;
- curso médio inferior - entre Cahoeira Paulista e São Fidelis (RJ) com altitude de 20 m e declividade média de 1,0 m/km; trecho com muitas cachoeiras;
- curso inferior - de São Fidelis à foz, com 95 km de extensão.

4.2.3.2. Uso urbano

Além do abastecimento domiciliar da população residente na bacia, as águas do Paraíba do Sul constituem o principal manancial de abastecimento da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), atendendo a uma população de mais de 8 milhões de habitantes. Aproximadamente 2/3 da vazão do rio, em torno de 160 m^3/s, são captados).

4.2.3.3. Recreação

Ocorre apenas em pontos específicos da bacia, principalmente nas regiões serranas, onde há cachoeiras.

4.2.3.4. Uso agrícola

A bacia apresenta grande potencial para irrigação, mas somente uma pequena área é utilizada para tal finalidade.

4.2.3.5. Pesca e aqüicultura

Desenvolvem-se principalmente no baixo curso dos rios Paraíba do Sul, Muriaé e Dois Rios.

4.2.3.6. Navegação

As condições de navegabilidade na bacia não são boas, e não há tradição de transporte fluvial no Paraíba do Sul.

4.2.3.7. Geração de energia

O potencial hidrelétrico corresponde a 1,7% do total brasileiro. Nessa bacia, localiza-se a usina hidrelétrica (UHE) de Funil, pertencente a Furnas, que foi construída em Itatiaia, no estado do Rio de Janeiro. A UHE de Funil tem grande importância porque está localizada próxima aos grandes centros consumidores da região Sudeste, onde estão instaladas grandes indústrias (Figura 4.3).

Figura 4.3: Usina Hidrelétrica de Funil (Fonte: FURNAS, 2004).

Além da função de usina geradora de energia elétrica, o aproveitamento hidrelétrico de Funil assumiu o papel de elemento regularizador da vazão do rio Paraíba do Sul, no trecho sul Fluminense, entre os municípios de Itatiaia e Piraí.

De acordo com o Inventário das Restrições Operativas Hidráulicas dos Aproveitamentos Hidrelétricos (ONS, 2002b), as cidades de Resende, Barra Mansa e Volta Redonda são as principais restrições para operação da UHE de Funil, durante a ocorrência de cheias. Considerando-se essas restrições, adota-se, para o cálculo do volume de espera, a restrição de 700 m^3/s em Funil. Na operação durante os períodos chuvosos, no entanto, a descarga da usina pode oscilar dependendo das vazões incrementais entre a referida usina e os pontos de restrição.

A Figura 4.4 mostra a bacia do rio Paraíba do Sul com os postos pluviométricos que foram utilizados neste trabalho.

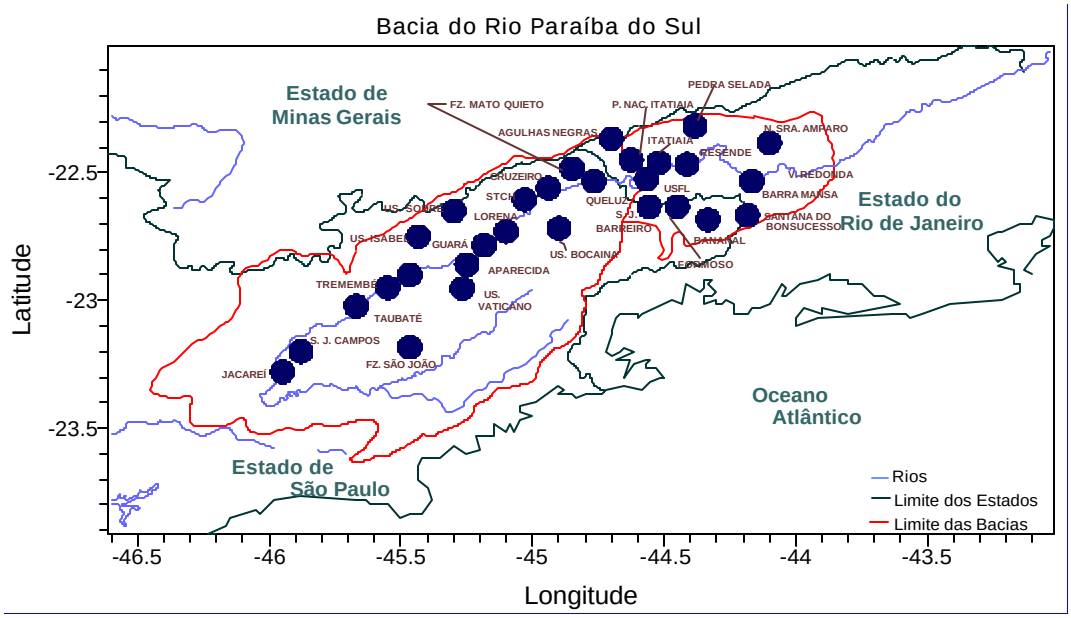


Figura 4.4: Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (Fonte: FURNAS, 2003a).

4.3 A BACIA DO RIO GRANDE

A bacia do rio Grande tem uma área total de 143.000 km^2, dos quais 86.400 km^2 localizam-se em território mineiro, o que equivale a 17,8% da área do estado. A população na bacia do estado mineiro é de aproximadamente 3 milhões de pessoas.

4.3.1 Usos do solo

Segundo o relatório de monitoramento das águas superficiais na bacia do rio Grande, realizado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM, 2002), dentre as atividades econômicas dominantes, destacam-se as indústrias metalúrgicas, alimentícias e químicas e extração de areia e argila.

4.3.2 Usos da água

A água na bacia do rio Grande é utilizada para abastecimento doméstico e industrial, irrigação, pesca, recreação e geração de energia elétrica.

4.3.3 Geração de energia elétrica

Nessa bacia, é gerada cerca de 67% de toda energia hidrelétrica produzida no estado de Minas Gerais. Nela, localiza-se a UHE de Furnas, a primeira a ser construída pela empresa, da qual herdou o nome (Figura 4.5). A UHE está localizada no curso médio do rio Grande, entre os municípios de São José da Barra e São João Batista do Glória e possui uma potência de 1.216 MW (FURNAS, 2004).

O reservatório da UHE de Furnas é um dos maiores do Brasil, com 1.440 km^2 e 3.500 km de perímetro, banhando 34 municípios de Minas Gerais.

Figura 4.5: Usina Hidrelétrica de Furnas (Fonte: FURNAS, 2004).

A localização dos postos pluviométricos, utilizados no presente trabalho, na bacia do rio Grande, é apresentada na Figura 4.6.

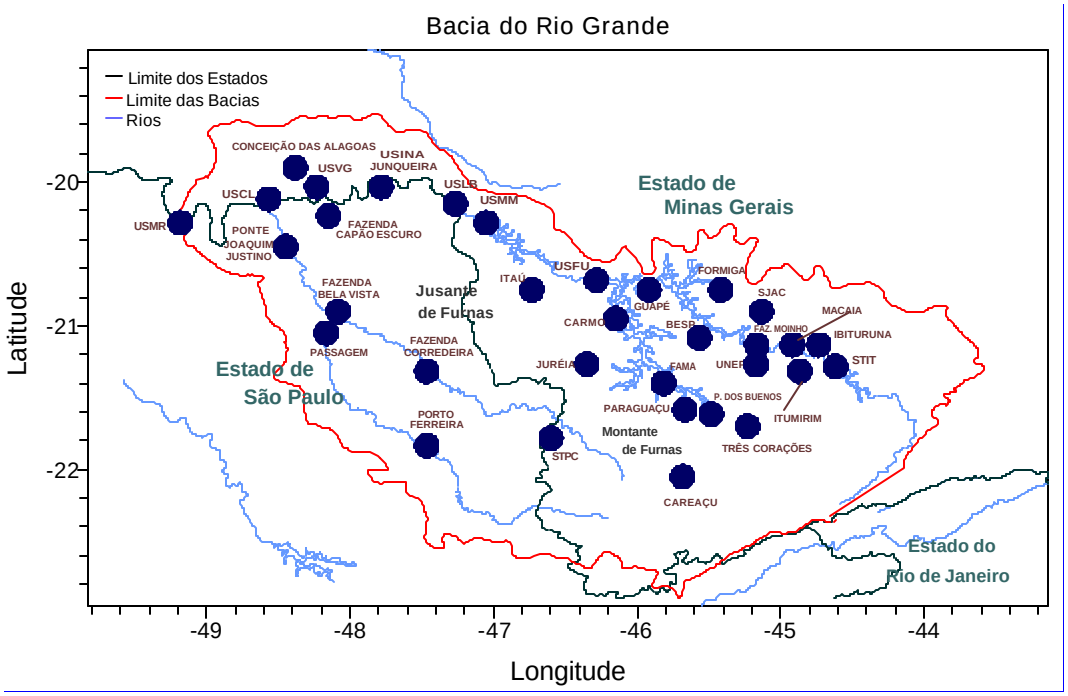


Figura 4.6: Bacia hidrográfica do rio Grande (Fonte: FURNAS, 2003a).

4.4 A BACIA DO RIO PARANAÍBA

O rio Paranaíba nasce na serra da Mata da Corda em Minas Gerais a uma altitude de 1.140 m, percorre uma extensão de 1.120 km até sua desembocadura no rio Paraná, com sua bacia de captação e drenagem totalizando 220.195 Km^2, sendo que 67,89% dessa área localiza-se no estado de Goiás.

Seus principais afluentes são: rio Aporé, rio dos Bois, rio Claro, rio Corrente, rio Corumbá, rio Meia Ponte, rio Piracanjuba, rio São Marcos, rio Turvo, rio Verde, rio Verdão, rio Veríssimo (SIMEGO, 2003).

4.4.1 Geração de energia elétrica

Entre as usinas hidrelétricas que operam na bacia do rio Paranaíba está a UHE de Itumbiara, localizada entre os municípios de Itumbiara (GO) e Araporã (MG). A Figura 4.7 mostra uma foto da UHE de Itumbiara.

A UHE de Itumbiara é a maior usina do sistema Furnas. Teve sua construção iniciada em 1974 entrando em operação em 1980 com uma capacidade instalada de 2.082 MW (FURNAS, 2004).

Figura 4.7: Usina Hidrelétrica de Itumbiara (Fonte: FURNAS, 2004).

A localização dos postos pluviométricos , utilizados neste trabalho, na bacia do rio Paranaíba, é apresentada na Figura 4.8.

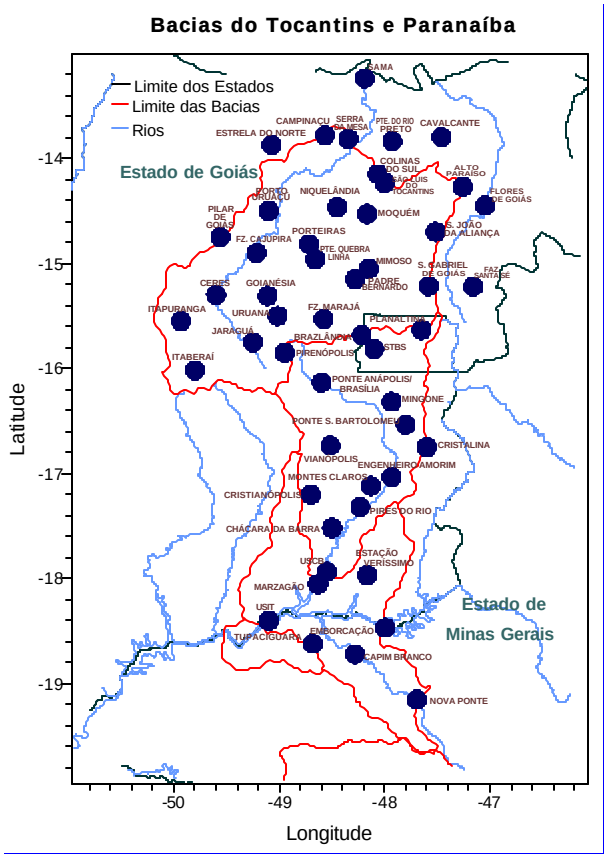


Figura 4.8: Bacia hidrográfica dos rios Paranaíba e Tocantins (Fonte: FURNAS, 2003a).

4.5 A BACIA DO RIO TOCANTINS

A região da bacia hidrográfica do rio Tocantins apresenta importância no contexto nacional, pois caracteriza-se pela expansão da fronteira agrícola, principalmente com relação ao cultivo de grãos, e pelo grande potencial hidroenergético (ANA, 2003).

A bacia possui uma área de 967.059 km² (11% do território nacional) e abrange os estados de Goiás (26,8%), Tocantins (34,2%), Pará (20,8%), Maranhão (3,8%), Mato Grosso (14,3%) e o Distrito Federal (0,1%). Grande parte situa-se na região centro-oeste, desde as nascentes dos rios Araguaia e Tocantins até a sua confluência, e daí, para jusante, adentra na região norte até a sua foz.

O rio Tocantins é formado a partir dos rios das Almas e Maranhão, cujas nascentes situam-se no planalto de Goiás, no Distrito Federal, região mais central do Brasil, na cota 1.100 m, desenvolve-se no sentido sul-norte, percorre uma extensão de 2.400 Km,

até desaguar na baía de Marajó, próximo, a Belém do Pará. Os principais usos são para abastecimento público, irrigação e geração de energia (SIMEGO, 2003).

4.5.1 Geração de energia elétrica

A UHE de Serra da Mesa, localizada na bacia do Alto Tocantins, em Goiás, possui grande importância no panorama energético brasileiro (Figura 4.9). Sua barragem está situada no curso principal do rio Tocantins, no município de Minaçu (GO), a 1790 Km de sua foz e a 640 Km de Brasília – DF (Furnas, 2004). Ela é responsável pela ligação entre o sistema interligado sul/sudeste/centro-oeste e o norte/nordeste, sendo o elo da interligação norte-sul.

O reservatório de Serra da Mesa é o maior do Brasil em volume de água, com 54,4 bilhões de m^3 e uma área de 1.784 km^2.

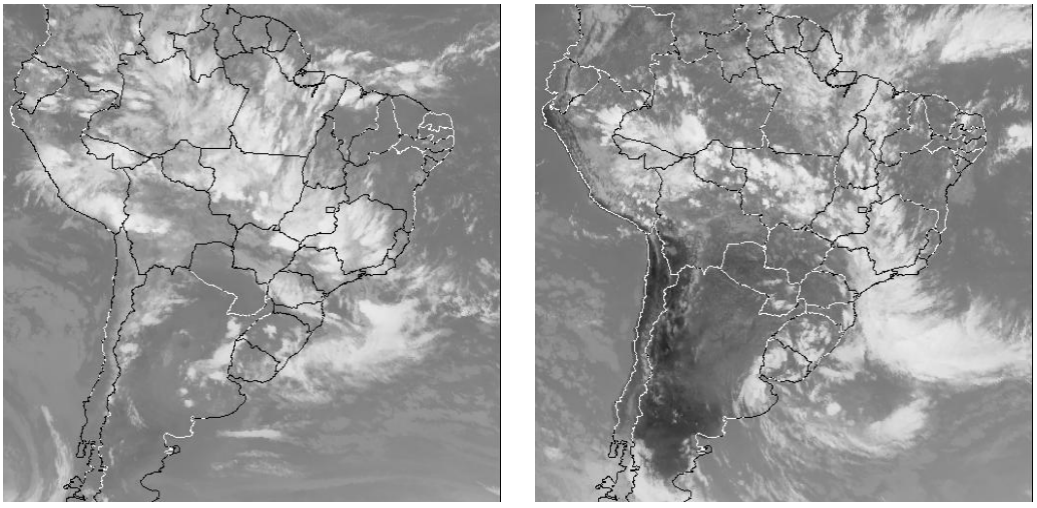
Figura 4.9: Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa (Fonte: FURNAS, 2004).

Na Figura 4.8, são apresentados os postos pluviométricos, localizados na bacia do rio Tocantins, que foram utilizados neste trabalho.

4.6 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA DO MÊS DE FEVEREIRO DE 2002

O mês de fevereiro de 2002 foi caracterizado por chuvas acima da média histórica na maior parte da região sudeste, resultando em inundações e perdas humanas e materiais em São Paulo e no aumento considerável do nível dos reservatórios em Minas Gerais. Foram observados quatro episódios de frentes frias e dois episódios de ZCAS.

Além disso, a atuação de um sistema de baixa pressão nas regiões sudeste e centro-oeste do país entre os dias 07 e 11, onde uma área de baixa pressão em baixos níveis propicia convergência de umidade, ocasionou precipitações intensas. As Figuras 4.10a e 4.10b apresentam as imagens de satélite do dia 08 às 00Z e do dia 09 as 18Z, respectivamente. Nas duas Figuras, observa-se a nebulosidade associada ao sistema de baixa pressão que atuava nas regiões sudeste e centro-oeste do Brasil. Áreas de instabilidade associadas ao sistema de baixa pressão provocaram chuvas intensas nas bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande e Paranaíba, enquanto o sistema permaneceu configurado.



(a) (b)

Figura 4.10: Imagem de satélite no canal infravermelho referente ao dia 08/02/02 às 00Z (a) e 09/02/02 às 18Z (b) (Fonte: CPTECb, 2004).

Dos quatro sistemas frontais que atuaram no país durante o mês de fevereiro de 2002, apenas um apresentou propagação, enquanto os outros atuaram apenas um dia no litoral do Rio Grande do Sul e São Paulo.

No dia primeiro, observou-se a atuação de um sistema frontal no litoral do Rio de Janeiro, que se formou no final do mês anterior e causou ventos fortes no litoral do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. A frente fria deslocou-se até Vitória (Espírito Santo) e, entre os dias 05 e 07, permaneceu estacionária em Salvador (Bahia), causando nebulosidade e chuvas isoladas no interior e litoral desta região.

O primeiro e terceiro sistemas frontais atuaram somente um dia no litoral do Rio Grande do Sul, deslocando-se posteriormente para o oceano. No dia 12, a segunda frente fria apresentou um rápido deslocamento pelo litoral da região sul do país e, ao atingir o litoral da região sudeste, permaneceu semi-estacionária entre o Rio de Janeiro e Espírito Santo. A partir do dia 21, o sistema frontal deslocou-se até Vitória, onde enfraqueceu. Na sua permanência sobre a região sudeste, originou o segundo episódio de ZCAS, como será visto mais adiante, além de muita nebulosidade e chuvas nas regiões centro-oeste e sudeste.

O quarto e último sistema frontal encontrava-se no dia 27, no sul do litoral de São Paulo. Esse sistema atuou somente um dia, deslocando-se para o oceano.

A Figura 4.11 apresenta o posicionamento e deslocamento dos sistemas frontais que atuaram no país durante o mês de fevereiro de 2002.

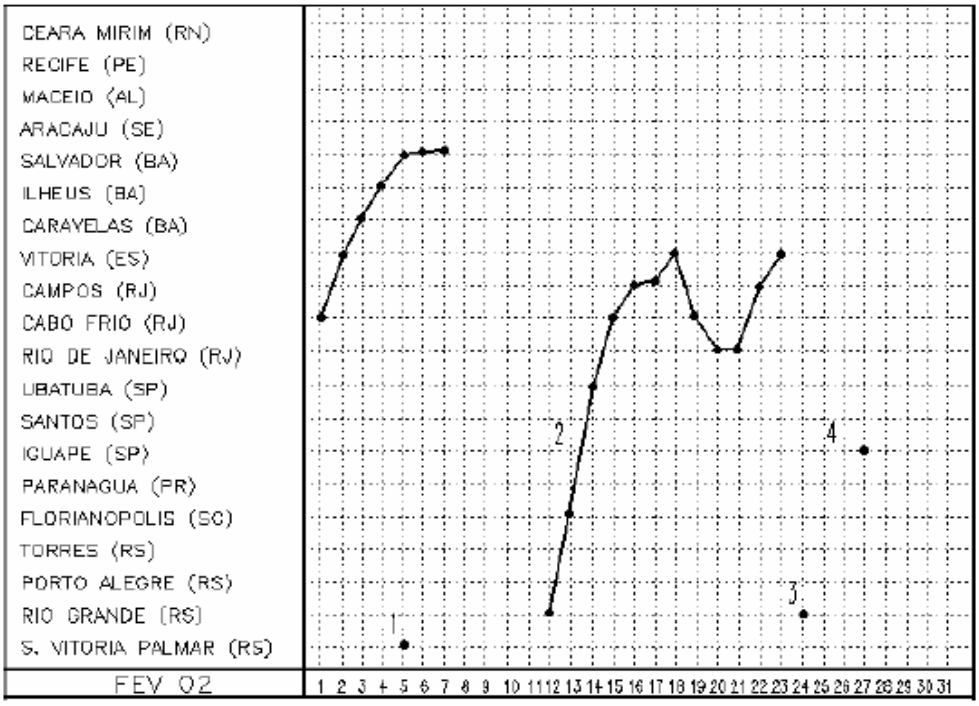
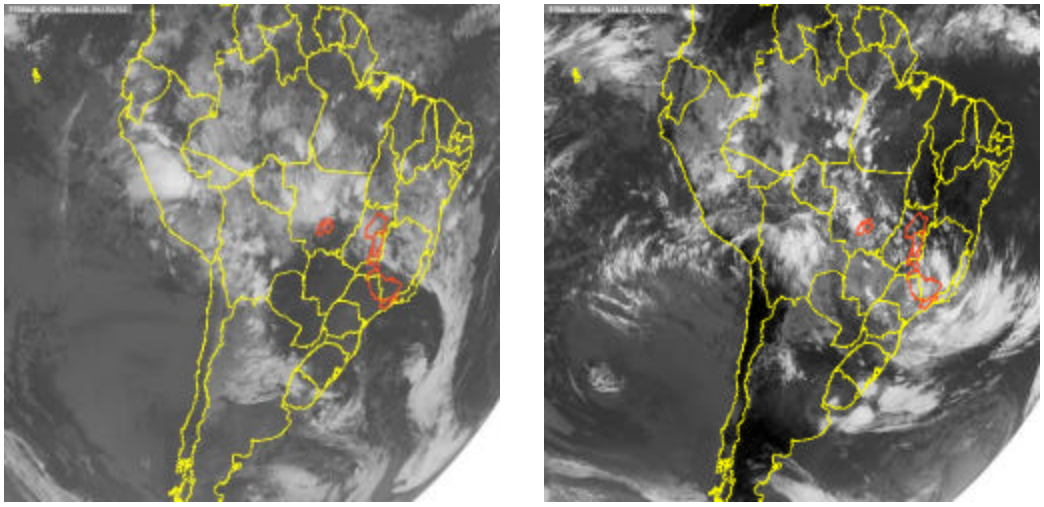


Figura 4.11: Seções estação versus tempo dos sistemas frontais que penetraram no Brasil em fevereiro de 2002. Os pontos indicam que a frente passou pela estação entre 09:00h (hora local) do dia anterior e 09:00h (hora local) do dia indicado (Fonte: CLIMANÁLISE, 2002).

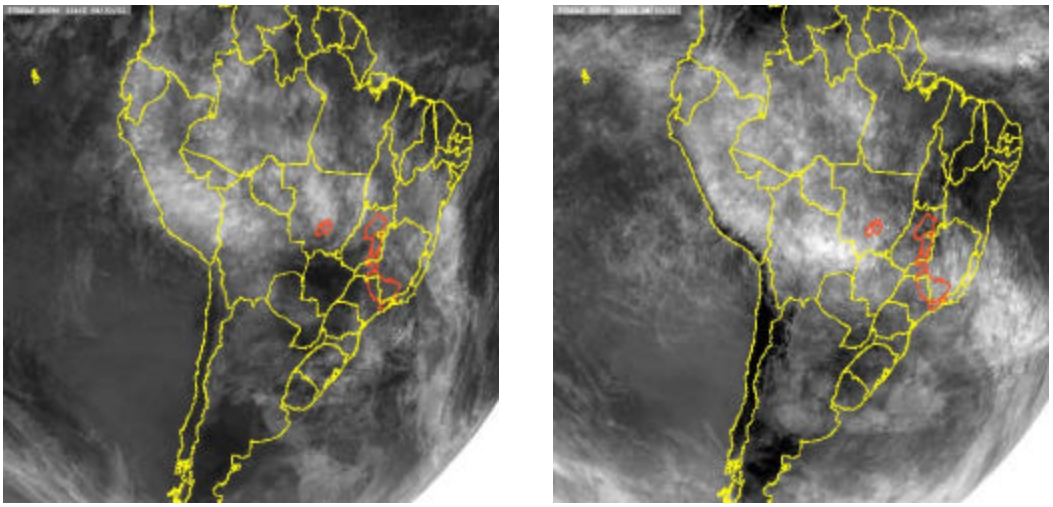
Os eventos ZCAS que ocorreram no mês de fevereiro de 2002 configuraram-se entre os dias 4 e 7 e entre os dias 16 e 24 (CLIMANÁLISE, 2002). Na Figura 4.12a, é apresentada uma imagem de satélite do dia 05 de fevereiro no horário das 0645Z, e, na Figura 4. 12b, uma imagem do dia 21/02 as 1445Z, representando o primeiro e segundo caso de ZCAS respectivamente. Em ambas as figuras, destacam-se, na cor laranja, as bacias hidrográficas de estudo.



(a) (b)

Figura 4.12: Imagem de satélite no canal infravermelho referente ao dia 05/02/02 às 0645Z (a) e 21/02/02 às 1445Z (b) (Fonte: FURNAS, 2003c).

Já na Figura 4.13, são apresentadas imagens de satélite médias, para verificação da posição média da nebulosidade, durante os períodos de atuação da ZCAS. Na Figura 4.13a, é apresentada a média das imagens de satélite dos dias 4 ao dia 7 no horário das 1145Z, e, na Figura 4.13b é apresentada a média das imagens do segundo episódio de ZCAS, entre os dias 16 e 24/02/02, no horário das 1445Z.

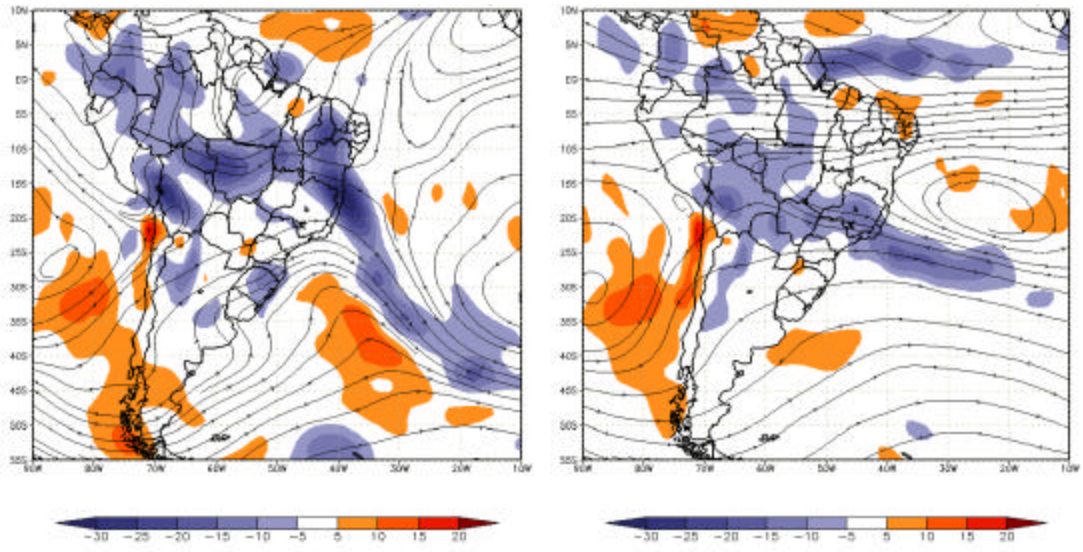


(a) (b)

Figura 4.13: Imagem de satélite média para os períodos de 04 a 07/02/02 (a) e de 16 a 24/02/02 (b) (Fonte: FURNAS, 2003c).

No primeiro episódio de ZCAS (Figuras 4.12a e 4.13a), a banda de nebulosidade esteve semi-estacionária sobre o Mato Grosso, Tocantins, norte de Minas Gerais, Espírito Santo e em grande parte da Bahia, atuando principalmente na bacia do rio Tocantins. No segundo episódio, que ocorreu no mês de fevereiro de 2002 (Figuras 4.12b e 4.13b), a banda de nebulosidade atuou sobre o Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, sul de Goiás e o centro da região Sudeste, atuando em todas as bacias de estudo, exceto na bacia do rio Tocantins.

O posicionamento da ZCAS também pode ser identificado pelas Figuras 4.14a e 4.14b, que representam o campo médio de linha de corrente e velocidade vertical em 500 hPa para o período de 04 a 07 (Figura 4.14a) e de 16 a 24 de fevereiro (Figura 4.12 4). Valores negativos de velocidade vertical estão associados a movimento ascendente. Assim, observa-se, na Figura 4.14, o movimento ascendente associado à banda de nebulosidade em ambos os casos.

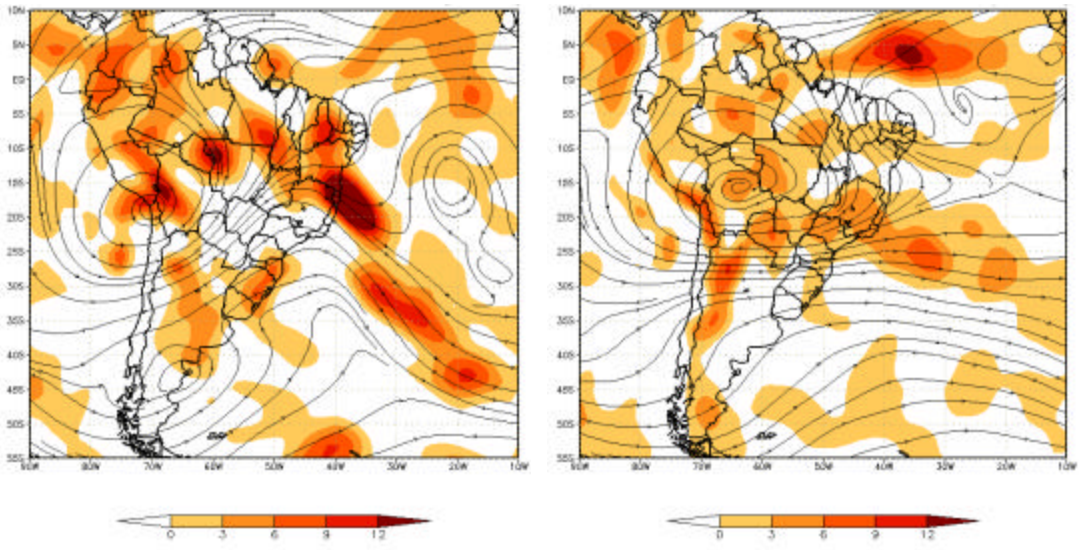


(a) (b)

Figura 4.14: Linha de corrente e velocidade vertical em 500 hPa: (a) média de 04/02/2002 a 07/02/2002; (b) média de 16/02/2002 a 24/02/2002 (Fonte: CLIMANÁLISE, 2002).

As Figuras 4.15a e 4.15b apresentam as linhas de corrente e a divergência do vento no nível de 200 hPa, para o primeiro e segundo caso de ZCAS de fevereiro de 2002, respectivamente. Nota-se que, em ambos os casos, foi marcante a configuração da Alta da Bolívia e do vórtice ciclônico em altos níveis, sendo que, no primeiro caso, o

vórtice esteve distante do continente. Os valores positivos de divergência em 200 hPa contribuem para movimento vertical ascendente em baixos níveis.



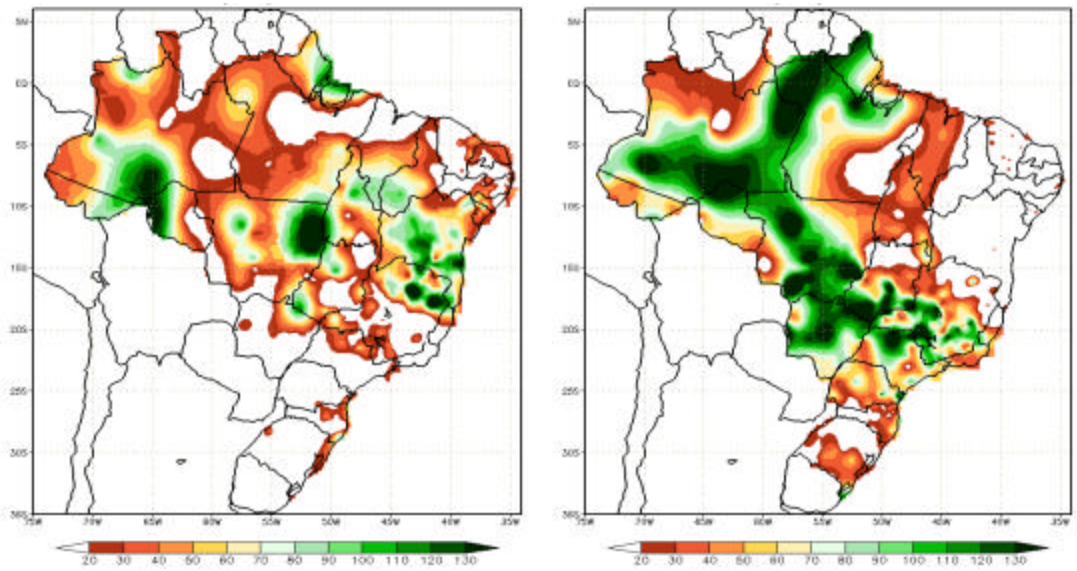
(a) (b)

Figura 4.15: Linha de corrente e divergência do vento em 200 hPa: (a) média de 04/02/2002 a 07/02/2002; (b) média de 16/02/2002 a 24/02/2002 (Fonte: CLIMANÁLISE, 2002).

De acordo com a Climanálise de fevereiro de 2002, na região sudeste, a ZCAS favoreceu a ocorrência de chuvas no norte de São Paulo e centro-sul de Minas Gerais, onde os totais excederam os 350 mm. Apenas o centro-sul de São Paulo e o Rio de Janeiro apresentaram déficit pluviométrico superior a 100 mm em algumas áreas. Já na região centro-oeste do Brasil, a atuação da ZCAS favoreceu o aumento das chuvas em praticamente toda a região, destacando-se o Mato Grosso e o centro-sul de Goiás, que apresentaram chuvas até 100 mm acima da média histórica. As chuvas foram mais escassas no norte de Goiás e sudoeste do Mato Grosso.

As Figuras 4.16a e 4.16b apresentam o campo de precipitação total nos dois eventos. Pode-se observar que, no primeiro evento, que abrange o volume total precipitado entre os dias 04 a 07 de fevereiro, as chuvas foram mais intensas principalmente na parte sul do Amazonas, nordeste de Mato Grosso e na região norte de Minas Gerais. Já a região sul do Brasil apresentou áreas com pouca ou nenhuma precipitação com valores inferiores a 20 mm (Figura 4.16a). O campo de precipitação total no período de 16 a 24 de fevereiro é apresentado na Figura 4.16b. Durante esse período, a precipitação foi mais intensa no sul do Amazonas, Mato Grosso, sul de

Goiás, norte de Mato Grosso do Sul e partes do sul de Minas Gerais e norte de São Paulo. Observa-se também a pouca ou nenhuma precipitação na região nordeste do Brasil, com valores menores que 20 mm. O fato das regiões sul e nordeste apresentarem pouca precipitação se dá porque, quando ocorre a formação da ZCAS, essas regiões são áreas onde reside a subsidência associada à convecção da banda de nebulosidade. A subsidência associada a ZCAS tende a ocorrer principalmente no lado polar, ou seja, na região sul. Somente quando a ZCAS atinge um estágio de dissipação é que a subsidência no lado equatorial, ou seja, na região nordeste, se intensifica (MARTON, 1994 e SEABRA, 2002).



(a) (b)

Figura 4.16: Campo de precipitação total entre os dias (a) 04 e 07/02/2002 e (b) 16 a 24/02/2002 (Fonte: CLIMANÁLISE, 2002).

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos seguindo a metodologia descrita no Capítulo 3. A análise empreendida por essa dissertação, apesar do conjunto de limitações destacadas e reconhecidas, fornece subsídios importantes para o estudo da influência da precipitação decorrente da ZCAS em bacias hidrográficas.

Primeiramente, serão apresentados os períodos seco e chuvoso e o comportamento histórico da precipitação, através dos valores médios, no mês de fevereiro em cada bacia.

Em seguida, será apresentada a importância do estudo da ZCAS nas bacias hidrográficas de estudo. Até este ponto, a principal consideração feita sobre o estudo da ZCAS nas bacias hidrográficas diz respeito ao posicionamento das bacias com alinhamento coincidente ao da ZCAS quando configurada. Mas será que o posicionamento coincidente por si só é suficiente para observar a influência da ZCAS nas bacias? A resposta a essa pergunta pode ser elaborada a partir da análise contida neste trabalho, que será apresentada a seguir.

5.1 VALORES MÉDIOS MENSAIS DE PRECIPITAÇÃO NAS BACIAS

Com o objetivo de determinar e caracterizar os períodos seco e chuvoso das bacias escolhidas para estudo, foram utilizados os valores médios mensais de precipitação, obtidos através de Furnas Centrais Elétricas S.A. A série desses dados, conforme descrito no Capítulo 3, varia em cada bacia. Na bacia do rio Tocantins, tem-se a menor série de dados, com apenas 9 anos, no período de 1995 a 2003. Nas bacias dos rios Paranaíba e Paraíba do Sul, os dados disponíveis são de 1985 a 2003 (19 anos). Para a bacia do rio Grande, os dados são de 1983 a 2003 (21 anos).

As Figuras 5.1 a 5.4 mostram a variação da precipitação ao longo do ano nas bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande, Paranaíba e Tocantins, respectivamente. Observa-se que as bacias apresentam períodos chuvoso e seco bem definidos, sendo que os meses mais secos (junho a agosto) são idênticos em todas as bacias.

O período chuvoso nas bacias analisadas compreende os meses de novembro a março, enquanto que o período seco vai de abril a outubro. Durante o período seco, a precipitação corresponde a menos de 30% da precipitação total no ano, em todas as bacias. Destaca-se a bacia do rio Tocantins, onde, durante o período seco, a precipitação corresponde a apenas 19% do total anual.

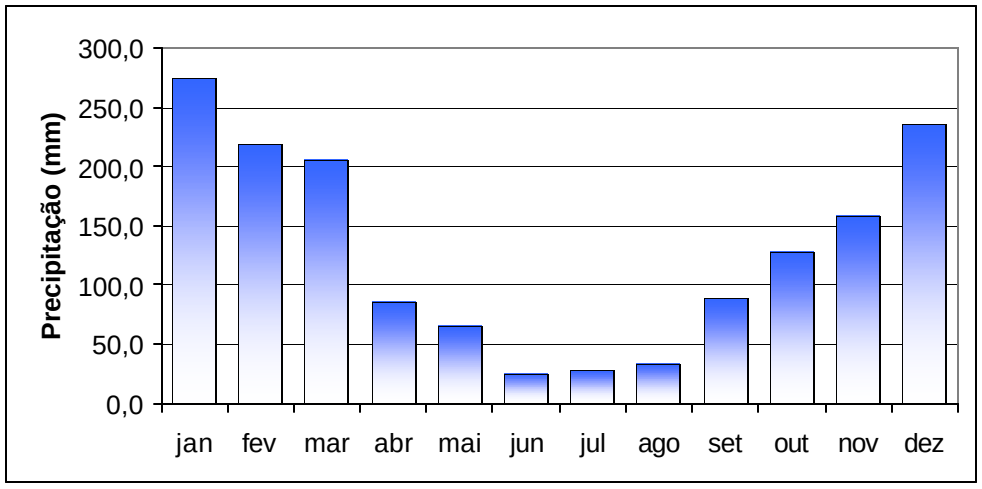


Figura 5.1: Precipitação média mensal na bacia do rio Paraíba do Sul (Fonte: FURNAS, 2003a).

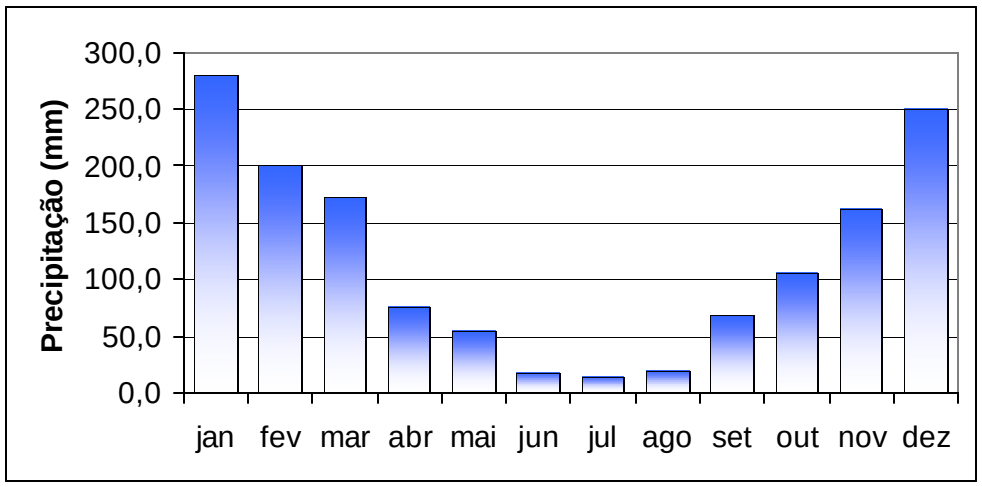


Figura 5.2: Precipitação média mensal na bacia do rio Grande (Fonte: FURNAS, 2003a).

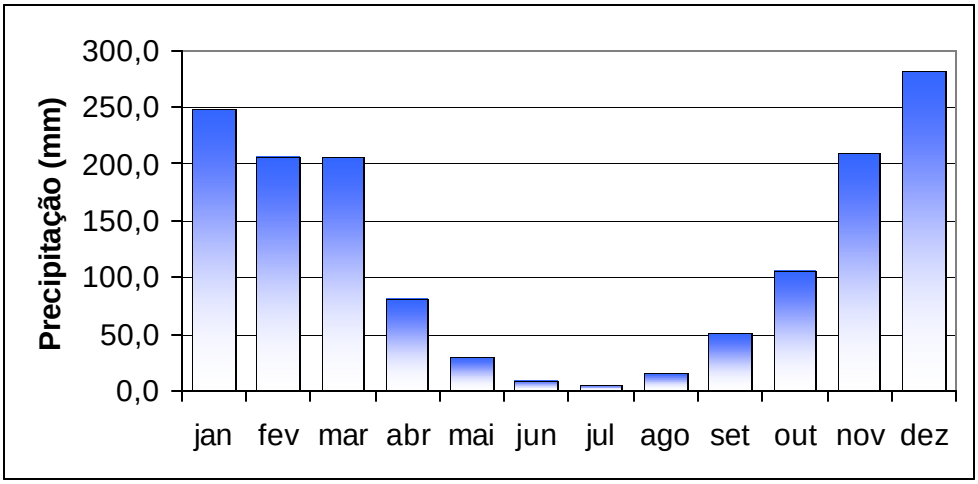


Figura 5.3: Precipitação média mensal na bacia do rio Paranaíba (Fonte: FURNAS, 2003a).

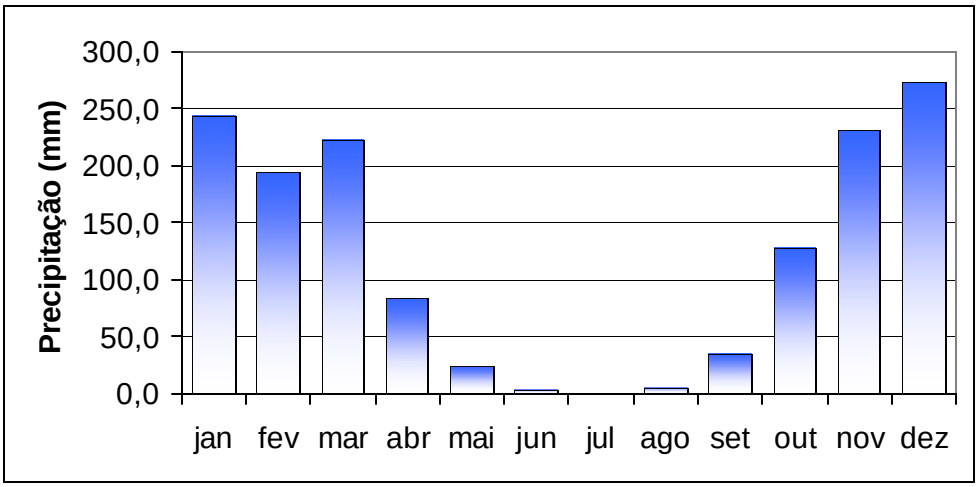


Figura 5.4: Precipitação média mensal na bacia do rio Tocantins (Fonte: FURNAS, 2003a).

Nas quatro bacias estudadas, os meses com menores índices pluviométricos são junho, julho e agosto, sendo que, nas bacias dos rios Paranaíba (Figura 5.3) e Tocantins (Figura 5.4), esses índices são bem menores do que nas bacias dos rios Paraíba do Sul (Figura 5.1) e Grande (Figura 5.2). Na bacia do rio Tocantins, por exemplo, a média histórica é de apenas 0,7 mm no mês de julho e 3,7 mm no mês de agosto.

5.2 VALORES MÉDIOS DE PRECIPITAÇÃO NO MÊS DE FEVEREIRO

Como os eventos ZCAS analisados ocorreram durante o mês de fevereiro, são apresentados os valores de precipitação, obtidos pela média da precipitação dos postos pluviométricos, nas quatro bacias estudadas especificamente no referido mês.

Na Figura 5.5, são apresentados os valores médios de precipitação para os meses de fevereiro na bacia do rio Paraíba do Sul. A precipitação média mensal no período de 1985 a 2003 é de 231,6 mm, com desvio padrão de 76 mm. Pode-se destacar os anos de 1986, quando a precipitação ficou 42% acima da média e, o ano de 1997, quando a precipitação apresentou déficit de aproximadamente 50%. O mês de fevereiro de 2003 apresentou o menor valor observado de precipitação, com apenas 68,2 mm. Nesse período, apenas uma frente fria atingiu o estado do Rio de Janeiro. É sugerido que a presença de vórtices ciclônicos em altos níveis, regiões de baixa pressão em altitude que causam subsidência na superfície, podem ter inibido a formação de chuvas (CLIMANÁLISE, 2003).

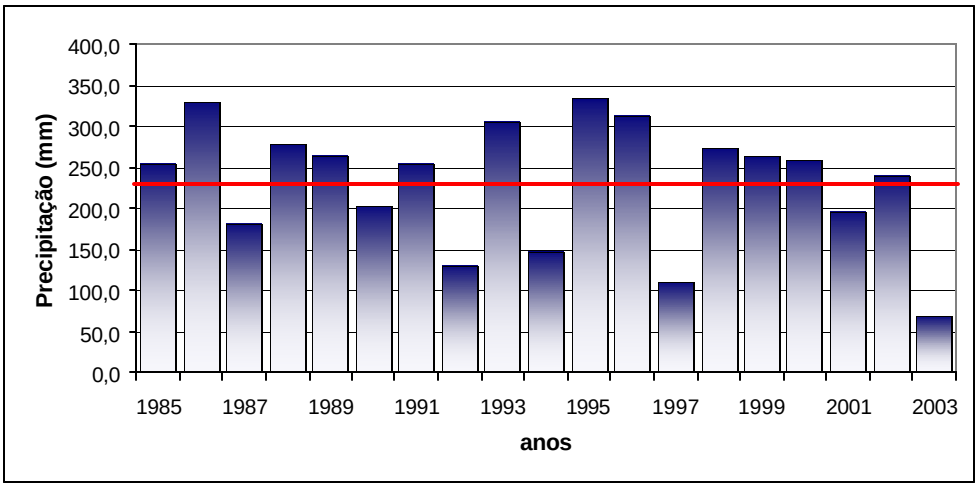


Figura 5.5: Precipitação média na bacia do rio Paraíba do Sul nos meses de fevereiro. A linha vermelha indica o valor médio mensal no período (Fonte: FURNAS, 2003a).

A série de dados de precipitação média para os meses de fevereiro na bacia do rio Grande é apresentada na Figura 5.6. A precipitação média mensal na bacia para o período disponível é de 188,3 mm, com um desvio padrão de 90,2 mm. No ano de 1995, a precipitação média no mês de fevereiro na bacia do rio Grande foi 383,6 m, que corresponde a 104 % acima da média.

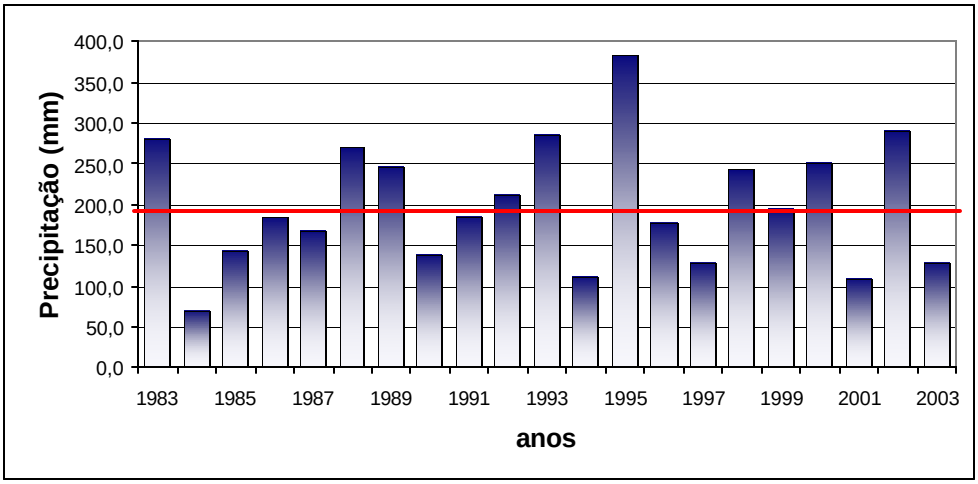


Figura 5.6: Precipitação média na bacia do rio Grande nos meses de fevereiro. A linha vermelha indica o valor médio mensal no período (Fonte: FURNAS, 2003a).

A Figura 5. 7 apresenta a precipitação nos meses de fevereiro na bacia do rio Paranaíba. O valor médio da precipitação no período de 1985 a 2003 para o mês de fevereiro é de 206,1 mm, com desvio padrão de 77,1 mm. Destacam-se os anos de 1993 e 1995, com precipitação acima da média de aproximadamente 77% e 51%, respectivamente e, o ano de 2001, com precipitação média de 84 mm, ou seja, 60% abaixo da média no período de 1985 a 2003.

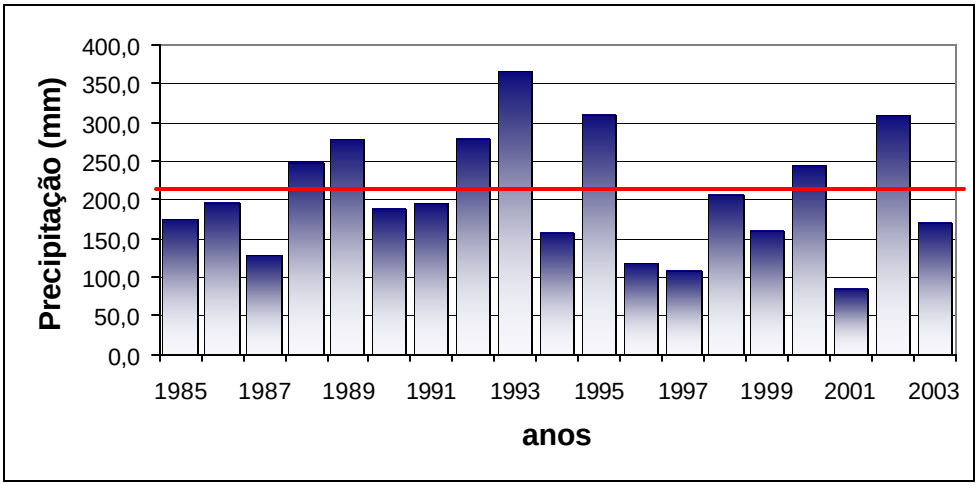


Figura 5.7: Precipitação média na bacia do rio Paranaíba nos meses de fevereiro. A linha vermelha indica o valor médio mensal no período (Fonte: FURNAS, 2003a).

Nota-se que, nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, as precipitações médias de fevereiro nos anos de 1987, 1994 e 1997, nas bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande e Paranaíba, respectivamente, ficaram abaixo da média mensal de longo termo. E, ao mesmo tempo, nos anos de 1988, 1993, 1995 e 2002, a precipitação média de fevereiro nessas bacias apresentou-se acima do valor médio mensal de longo curso.

A Figura 5.8 mostra a série de dados para a bacia do rio Tocantins. A precipitação acumulada média para os meses de fevereiro no período disponível é de 193,6 mm e o desvio padrão, 54,9 mm. Dentro do período estudado, destaca-se o ano de 2000, quando a precipitação ficou 42% acima da média.

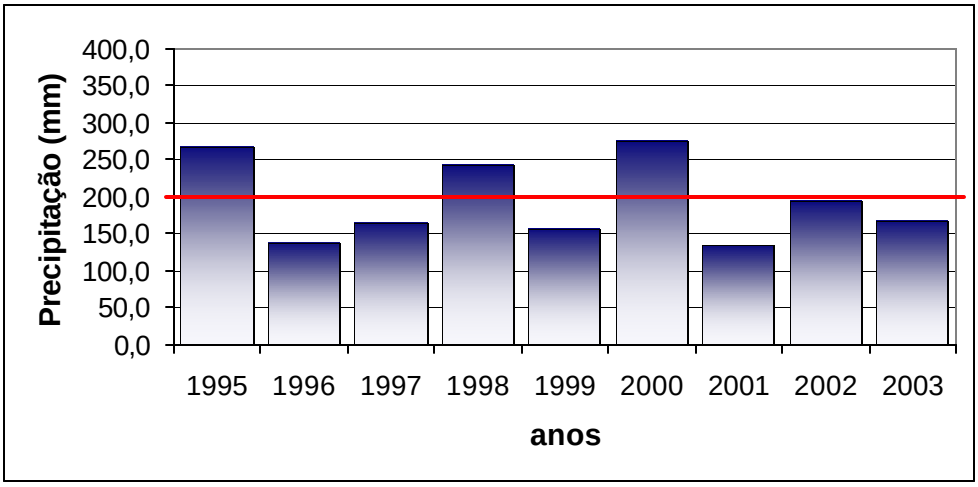


Figura 5.8: Precipitação média na bacia do rio Tocantins nos meses de fevereiro. A linha vermelha indica o valor médio mensal no período (Fonte: FURNAS, 2003a).

5.3 IMPORTÂNCIA DA ZCAS NAS BACIAS DE ESTUDO

Como descrito no Capítulo 3, a partir dos valores médios mensais de toda a série disponível e dos valores de precipitação média mensal de longo curso, foram localizados os eventos extremos em cada bacia ao longo do período de dados disponível.

Em todas as bacias, nos meses onde a precipitação média mensal foi maior do que a média mensal de longo curso, buscou-se, na literatura, como descrito no Capítulo 3, se havia ocorrido algum evento ZCAS nesse mês. Nesse caso, não foi considerado o posicionamento da banda de nebulosidade associada a ZCAS. Somente se considerou se

houve ou não a configuração do fenômeno. Com isso foi possível relacionar eventos de precipitação acima da média com eventos ZCAS.

Nas Figuras 5.9 a 5.12, são apresentados os resultados dessa análise para as bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande, Paranaíba e Tocantins, respectivamente. Nelas, observa-se que, em quase todos os meses onde a precipitação foi maior do que a média mensal de longo curso, houve eventos de ZCAS.

O resultado para a bacia do rio Paraíba do Sul é apresentado na Figura 5.9. Nota-se a grande influência da ZCAS no regime pluviométrico dessa bacia, já que quase todos os eventos, onde a precipitação média mensal foi maior do que o valor médio mensal de longo curso, foram episódios de ZCAS, segundo SANCHES (2002) ou pela Climanálise. Foram 16 episódios de ZCAS em 19 anos de dados. Destacam-se os episódios de dezembro de 1986, março de 1991 e janeiro de 2000.

Na Figura 5.10, é apresentado o resultado obtido para a bacia do rio Grande. Foram observados 16 episódios de ZCAS em 21 anos de dados analisados. Assim como na bacia do rio Paraíba do Sul, destacam-se os eventos ocorridos em dezembro de 1986 e janeiro de 2000, além dos episódios de janeiro de 1985, fevereiro de 1995 e janeiro de 1991 e 2003.

O resultado obtido para a bacia do rio Paranaíba é apresentado na Figura 5.11. Nessa bacia, foram observados 18 episódios de ZCAS em 19 anos de dados analisados. Pode-se destacar os eventos ocorridos em dezembro de 1989 e janeiro de 1997. No evento de dezembro de 1989, o valor observado foi de 532,2 mm, enquanto a média histórica para dezembro é de 281,9 mm.

Finalmente, na Figura 5.12 é apresentado o resultado para a bacia do rio Tocantins. Apesar de serem apenas 9 anos de dados disponíveis, foram observados 10 episódios de ZCAS, indicando a influência da ZCAS na bacia. O evento mais significativo, onde a precipitação observada excedeu o valor médio mensal de longo curso em 198%, ocorreu em março de 1997.

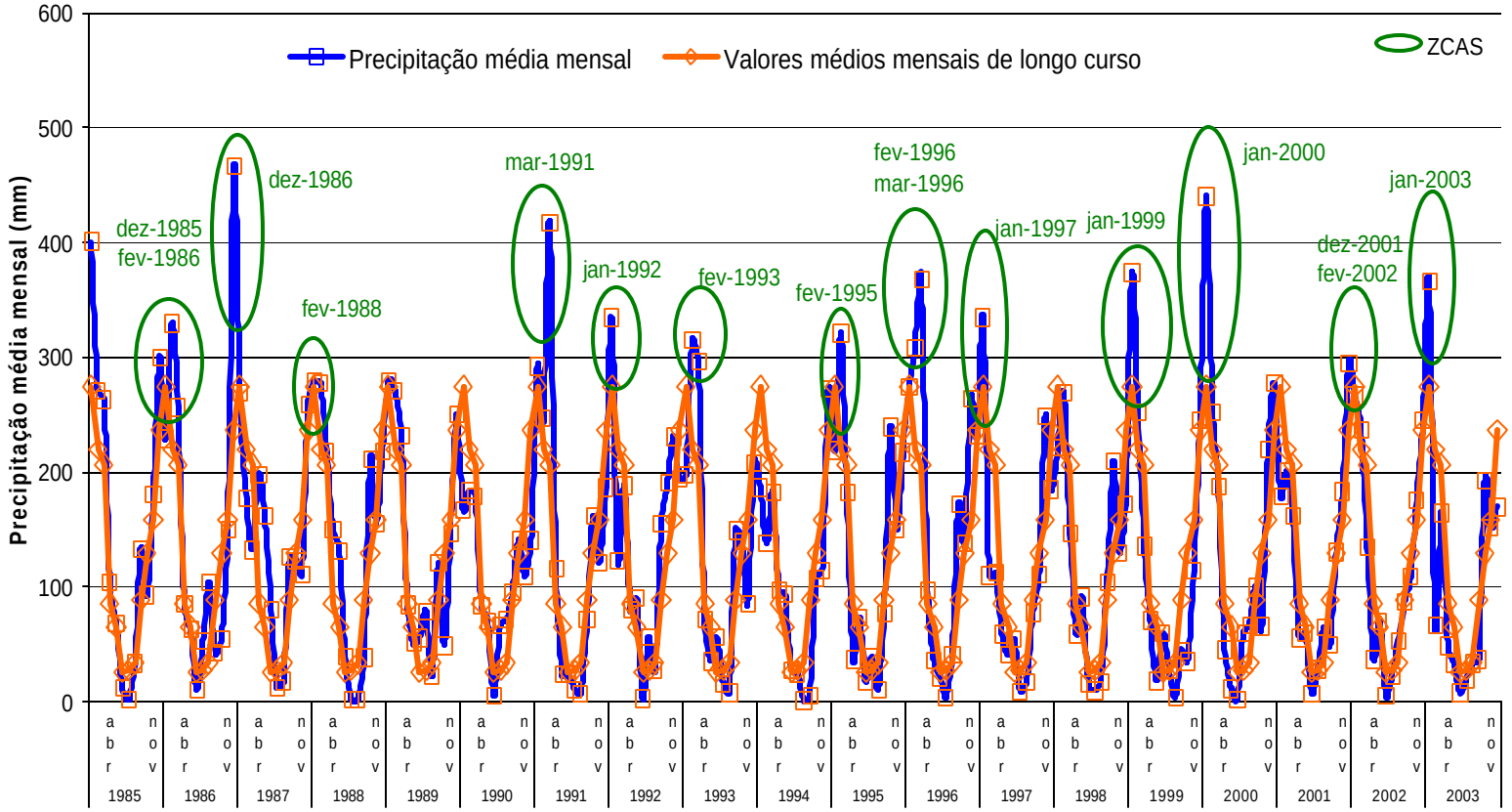


Figura 5.9: Precipitação média mensal (linha azul) para o período de 1985 a 2003 e valores médios mensais de longo curso de precipitação (linha vermelha) para a bacia do rio Paraíba do Sul. Os círculos verdes indicam episódios de ZCAS (Fonte: FURNAS, 2003a).

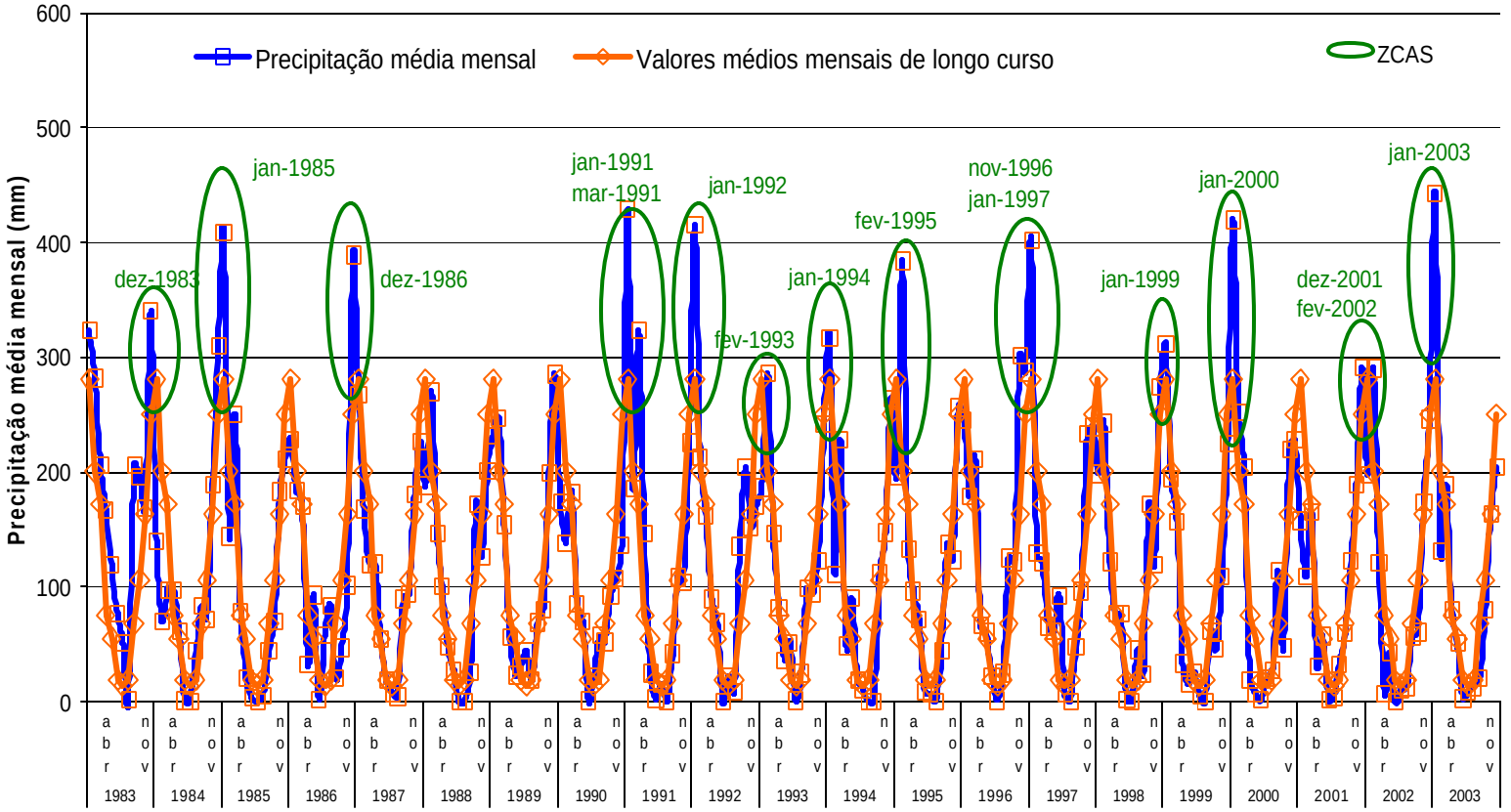


Figura 5.10: Precipitação média mensal (linha azul) para o período de 1985 a 2003 e valores médios mensais de longo curso de precipitação (linha vermelha) para a bacia do rio Grande. Os círculos verdes indicam episódios de ZCAS (Fonte: FURNAS, 2003a).

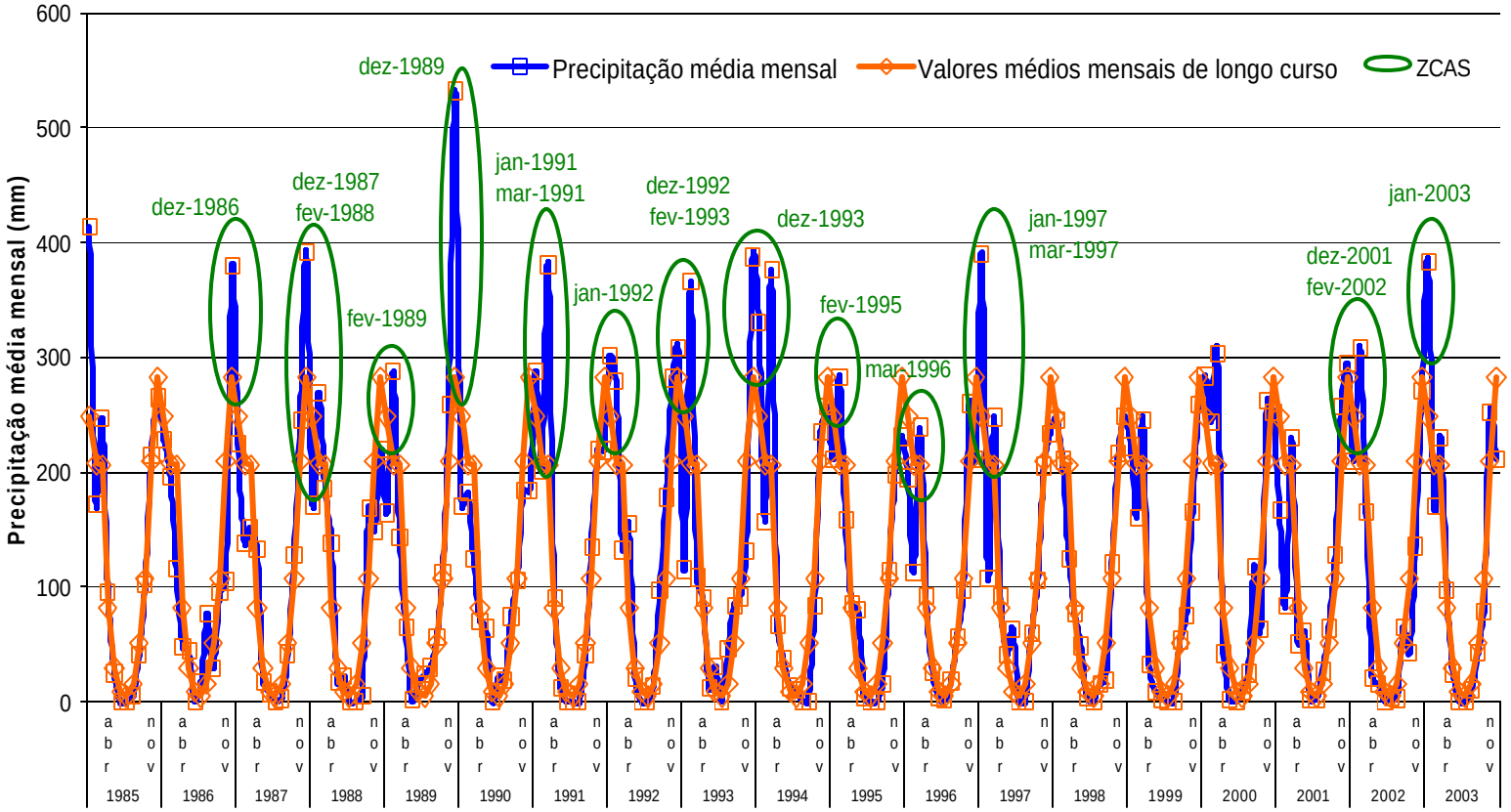


Figura 5.11: Precipitação média mensal (linha azul) para o período de 1985 a 2003 e valores médios mensais de longo curso de precipitação (linha vermelha) para a bacia do rio Paranaíba. Os círculos verdes indicam episódios de ZCAS (Fonte: FURNAS, 2003a).

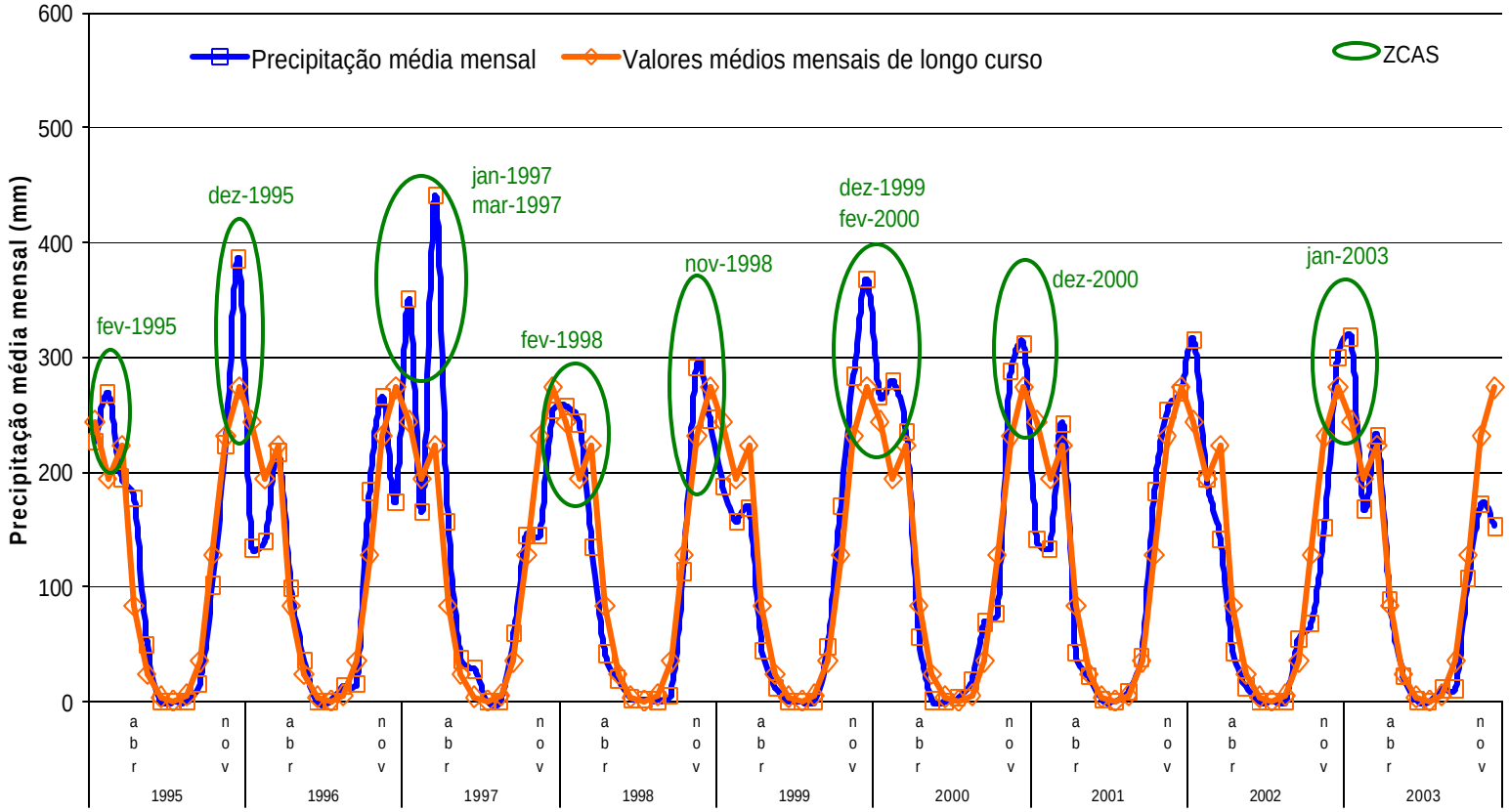


Figura 5.12: Precipitação média mensal (linha azul) para o período de 1985 a 2003 e valores médios mensais de longo curso de precipitação (linha vermelha) para a bacia do rio Tocantins. Os círculos verdes indicam episódios de ZCAS (Fonte: FURNAS, 2003a).

A partir das Figuras 5.9 a 5.12, pode-se observar a importância do estudo da ZCAS nas bacias hidrográficas dos rios Paraíba do Sul, Grande, Paranaíba e Tocantins, dado o número de eventos observados em cada bacia. Algumas divergências em relação aos episódios mais significativos podem ser explicadas pelo posicionamento da banda de nebulosidade associada a ZCAS, que varia de um evento para outro.

A partir dessa análise realizada com os dados de precipitação, verifica-se que existem episódios de ZCAS que foram observados nas quatro bacias, como o episódio ocorrido em fevereiro de 1995 e o de janeiro de 2003, e outros, como o evento de janeiro de 2000, onde a ZCAS foi observada nas bacias dos rios Paraíba do Sul e Grande. O evento de fevereiro de 2002 pode ser observado nas bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande e Paranaíba.

Os eventos ZCAS escolhidos para estudo apresentaram resultados bastante significativos, como serão mostrados nos próximos itens.

5.4 PRECIPITAÇÃO MÉDIA NAS BACIAS EM FEVEREIRO DE 2002

5.4.1 Bacia do Rio Paraíba do Sul

A partir dos dados de precipitação acumulada em 24 horas em postos pluviométricos localizados nas bacias hidrográficas operadas por Furnas Centrais Elétricas S.A, foram analisados os eventos ZCAS que ocorreram em fevereiro de 2002. Vale lembrar que ocorreram dois episódios de ZCAS nesse período: o primeiro, entre os dias 4 e 7, e o segundo, entre os dias 16 e 24 de fevereiro (CLIMANÁLISE, 2002).

Na Figura 5.13, são apresentados os valores diários de precipitação média na bacia do rio Paraíba do Sul durante o mês de fevereiro de 2002. O segundo evento ZCAS desse mês foi o que mais influenciou essa bacia, conforme discutido no Capítulo 4, que pode ser verificado pela presença de chuva em dias subseqüentes do dia 14 ao dia 26. Durante esse período, a precipitação apresentou-se de forma bem distribuída em toda a bacia, ou seja, distribuída de forma regular na bacia, alternando dias de precipitação intensa com outros de chuva fraca. Como exemplo, é apresentada, na Figura 5.14, a distribuição espacial da precipitação, a partir de agora chamado simplesmente de mapa de chuva, do dia 24 de fevereiro de 2002. Pode-se observar que precipitou em quase todos os pontos da bacia. O valor máximo de precipitação, 74,0 mm, foi registrado no

posto pluviométrico de Taubaté. Durante os dias 07 e 11, a atuação de um sistema de baixa pressão nas regiões sudeste e centro-oeste do país, conforme discutido no Capítulo 4, ocasionou chuvas intensas na bacia do rio Paraíba do Sul, principalmente no dia 10 de fevereiro. O mapa de chuva do dia 10 é apresentado na Figura 5.15.

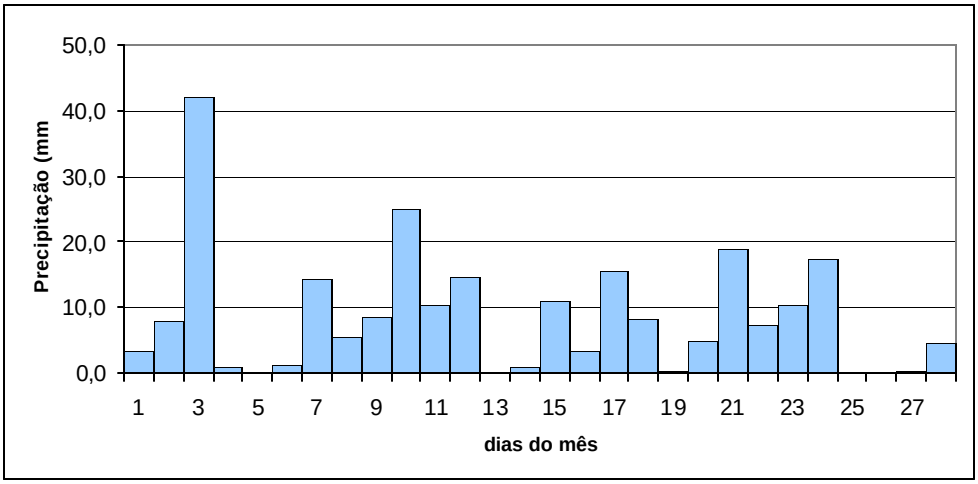


Figura 5.13: Precipitação acumulada em 24 horas média na bacia do rio Paraíba do Sul para o mês de fevereiro 2002 (Fonte: FURNAS, 2003a).

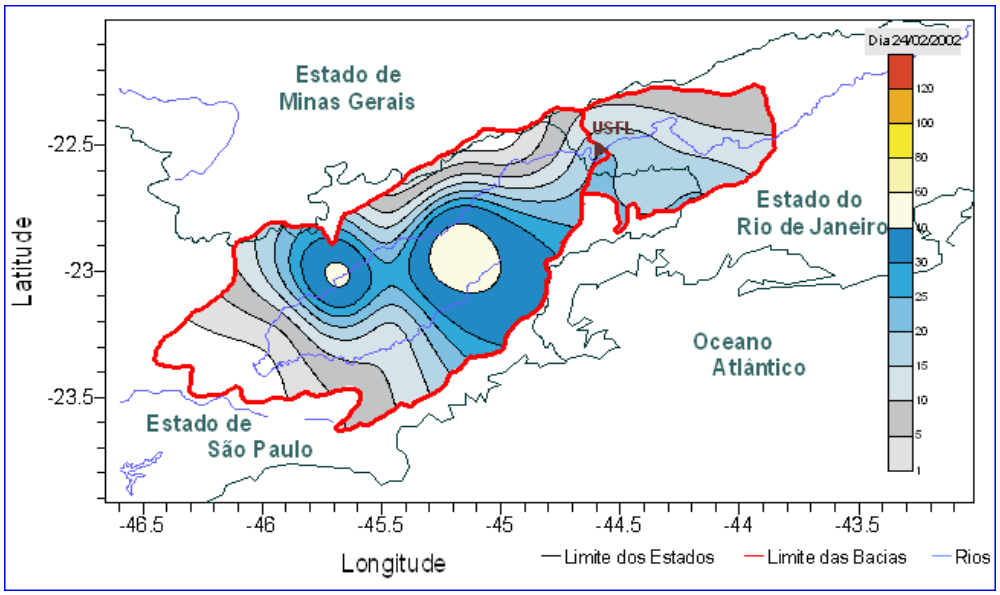


Figura 5.14: Mapa de chuva (em mm) na bacia do rio Paraíba do Sul no dia 24 de fevereiro de 2002 (Fonte: FURNAS , 2003a).

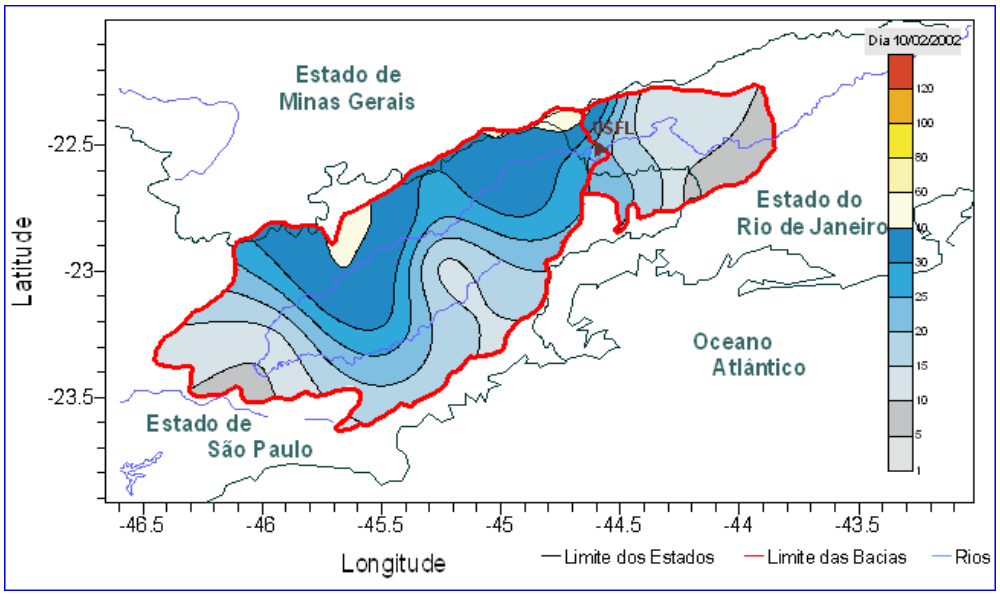


Figura 5.15: Mapa de chuva (em mm) na bacia do rio Paraíba do Sul no dia 10 de fevereiro de 2002 (Fonte: FURNAS, 2003a).

Os demais mapas de chuva referentes ao período de atuação da ZCAS na bacia, de 16 a 23 de fevereiro de 2002, são apresentados na Figura 5.16. Dentro desse período, os dias 17 e 21 foram aqueles que registraram maiores valores de precipitação média (Figura 5.13). Entretanto, os mapas de chuva referentes a esses dias mostram que a precipitação observada ocorreu de forma diferenciada na bacia. No dia 17, Figura 5.16b, a precipitação foi mais intensa em pontos isolados, enquanto, no dia 21, na Figura 5.16f, a precipitação foi registrada em quase todos os pontos da bacia.

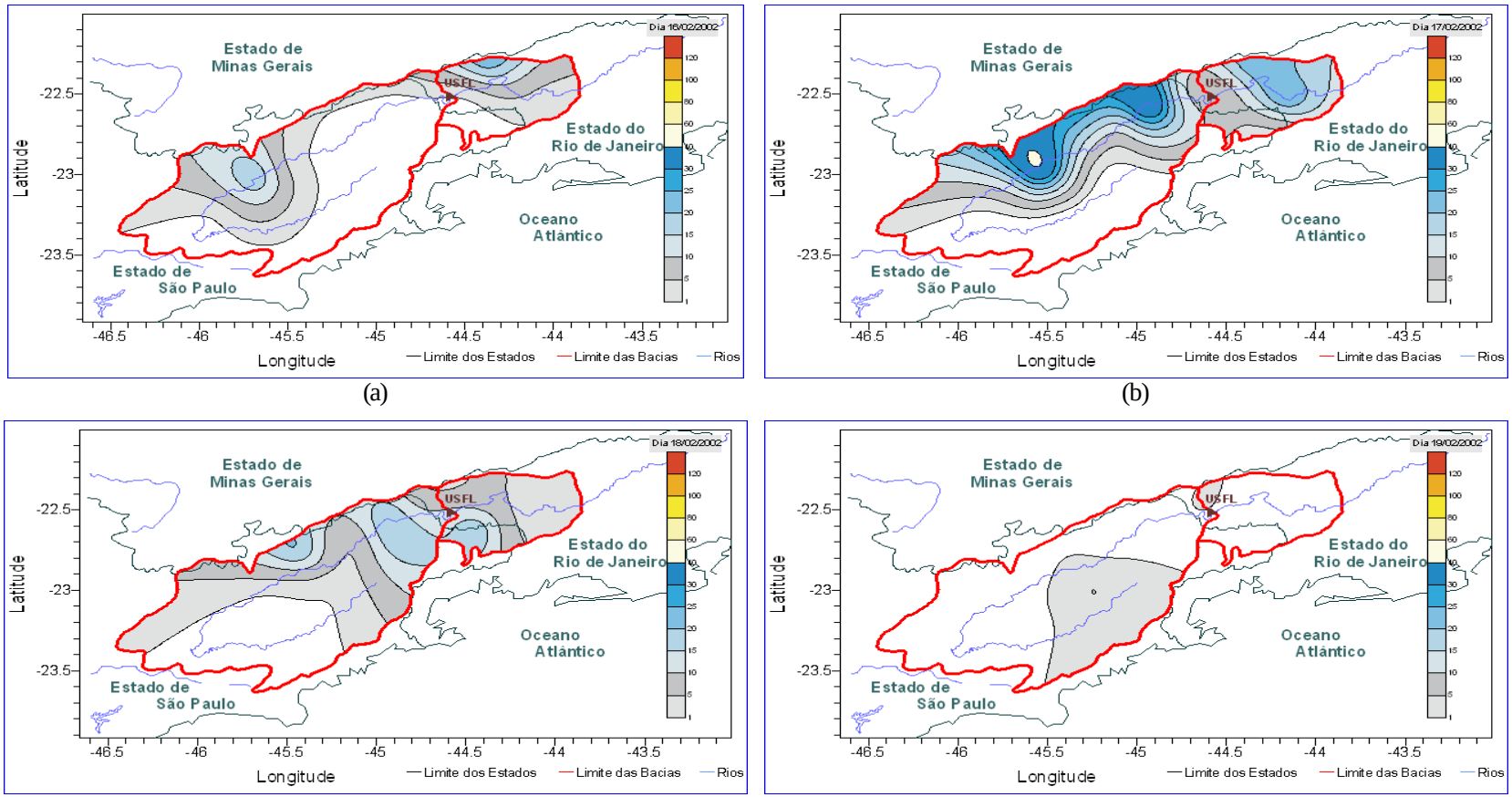
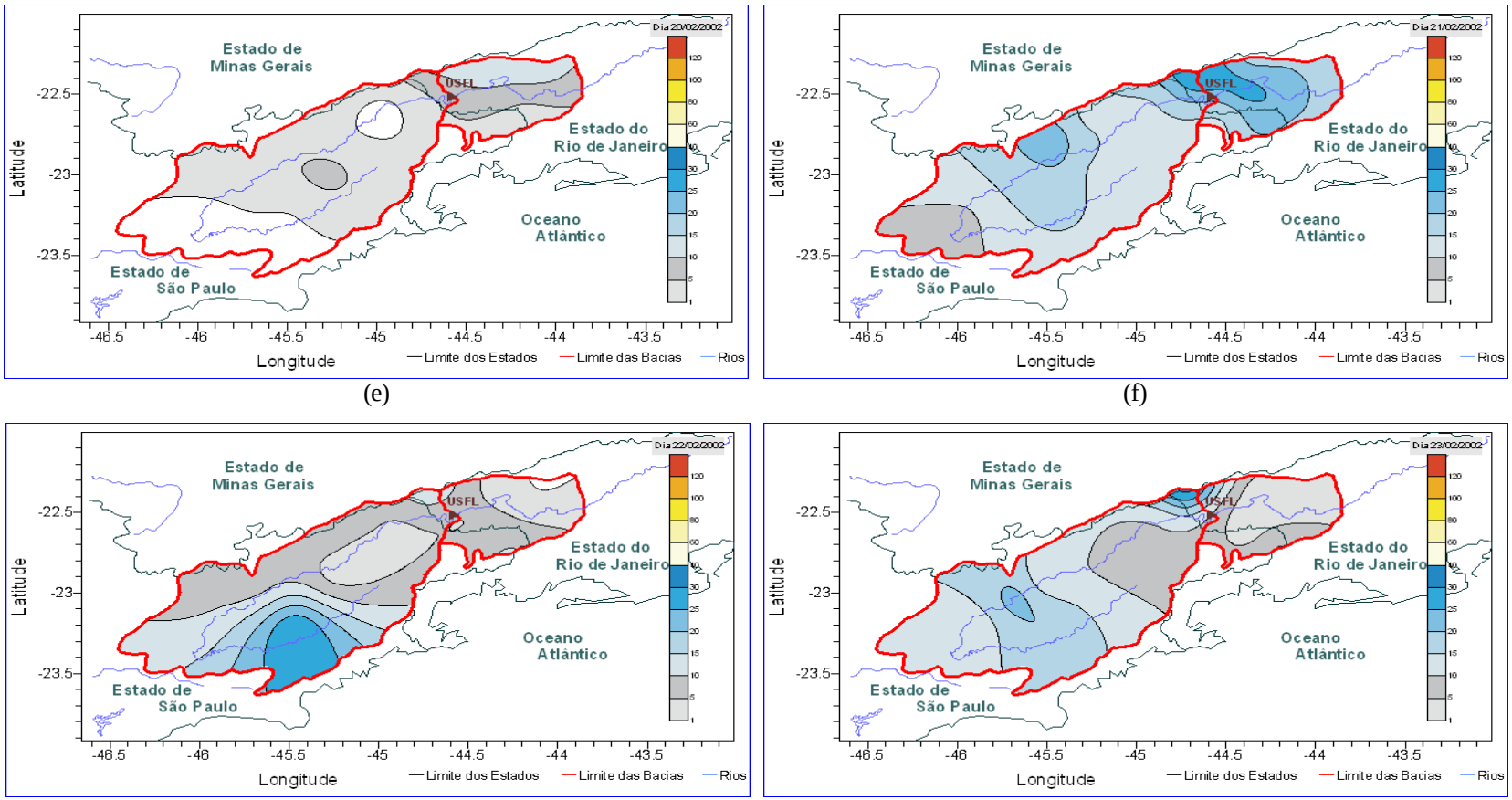


Figura 5.16: Mapas de chuva (em mm) na bacia do rio Paraíba do Sul referentes aos dias 16/02/02 (a), 17/02/02 (b), 18/02/02 (c), 19/02/02 (d), 20/02/02 (e), 21/02/02 (f), 22/02/02 (g) e 23/02/02 (h) (Fonte: FURNAS, 2003a).



(e) (f)

(g) (h)

Figura 5.16: Mapas de chuva (em mm) na bacia do rio Paraíba do Sul referentes aos dias 16/02/02 (a), 17/02/02 (b), 18/02/02 (c), 19/02/02 (d), 20/02/02 (e), 21/02/02 (f), 22/02/02 (g) e 23/02/02 (h) (Fonte: FURNAS, 2003a).

Porém, o valor máximo de precipitação média diária registrado na bacia foi de 42,0 mm. Ocorreu no dia 03 de fevereiro (Figura 5.13), sendo que não havia configuração da ZCAS nesse dia. Esse caso foi estudado por MENEZES e LIMA (2004), que verificaram que, nesse evento, a precipitação teve caráter local, caracterizando a presença de um sistema de mesoescala na área do vale do Paraíba, no trecho bem próximo a UHE de Funil. Resultados observacionais e de modelagem numérica mostraram que se tratou de uma tempestade local. O mapa de chuva referente ao dia 03 de fevereiro de 2002 é apresentado na Figura 5.17 e mostra claramente a localização dos maiores valores de precipitação registrados durante esse evento, próximo a UHE de Funil.

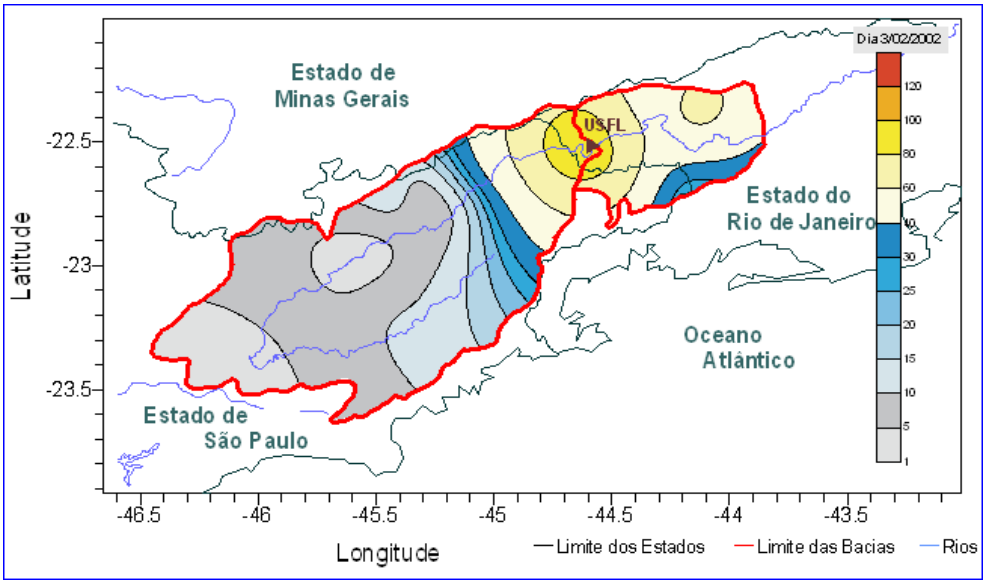


Figura 5.17: Mapa de chuva (em mm) na bacia do rio Paraíba do Sul no dia 03 de fevereiro de 2002 (Fonte: FURNAS, 2003a).

5.4.2 Bacia do Rio Grande

A precipitação média diária referente ao mês de fevereiro de 2002 para a bacia do rio Grande é apresentada na Figura 5.18. Foram registrados picos nos dias 08 (31,8 mm) e 10 (37,5 mm), eventos que serão analisados mais adiante. Porém, o período de atuação da ZCAS, nessa região, abrange de 16 a 24 de fevereiro, representado na Figura 5.18 por chuva contínua nesse período e picos nos dias 21 e 24 de fevereiro de 2002.

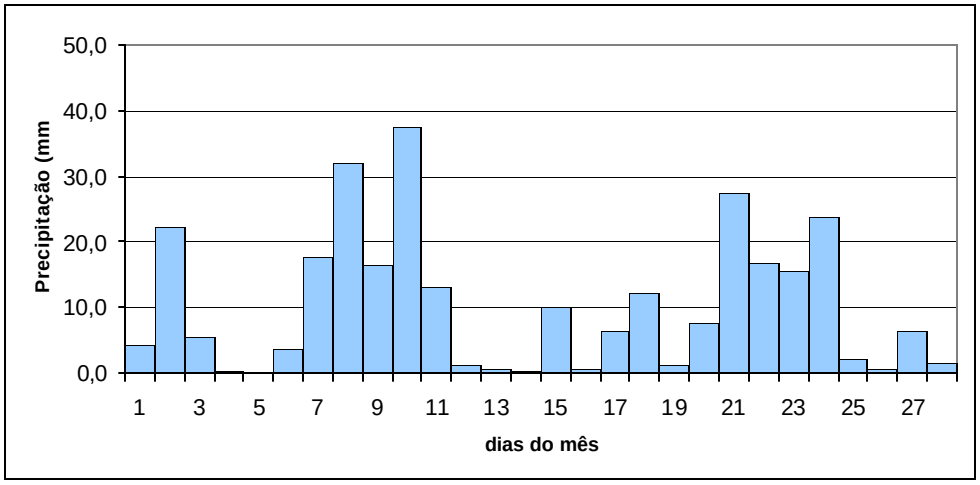
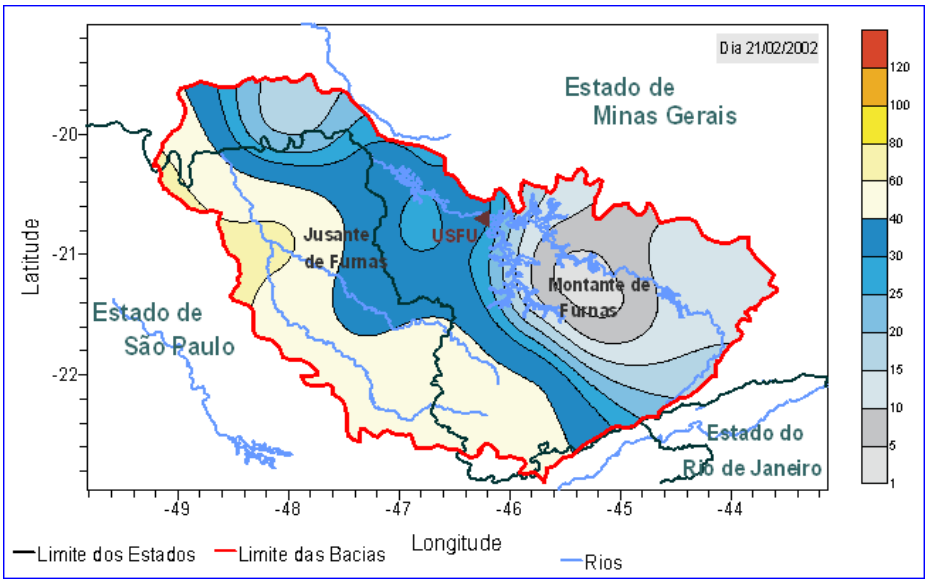
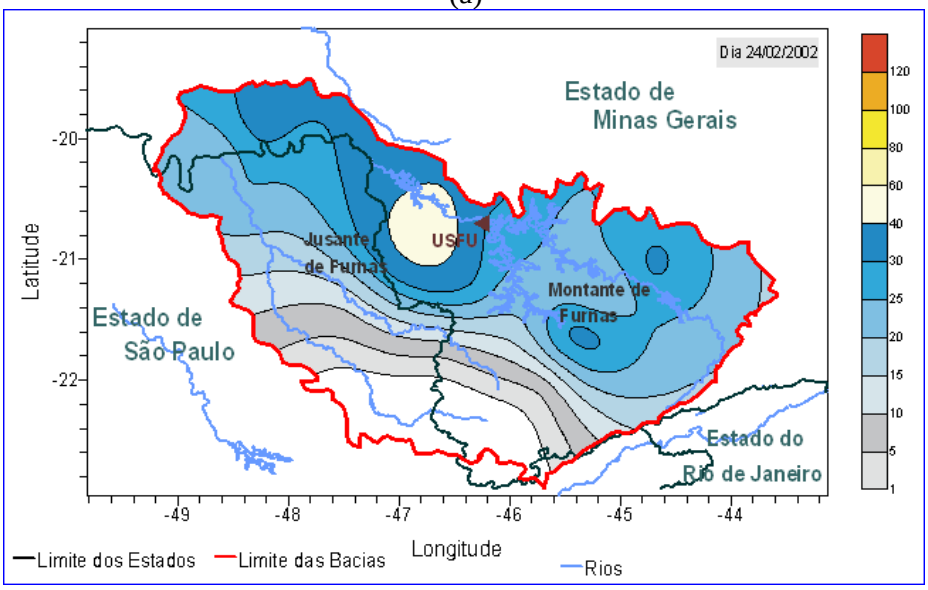


Figura 5.18: Precipitação acumulada em 24 horas média na bacia do rio Grande para o mês de fevereiro de 2002 (Fonte: FURNAS, 2003a).

Durante o episódio que ocorreu entre os dias 16 e 24 de fevereiro de 2002, destacam-se os dias 21 e 24, com maiores valores observados de precipitação. No dia 21, a precipitação ocorreu de forma relativamente bem distribuída em toda bacia do rio Grande, com os maiores valores registrados na região sudoeste da bacia (Figura 5.19a). O mesmo ocorreu no dia 24, porém os maiores valores ocorreram na região próxima a UHE de Furnas (Figura 5.19b).



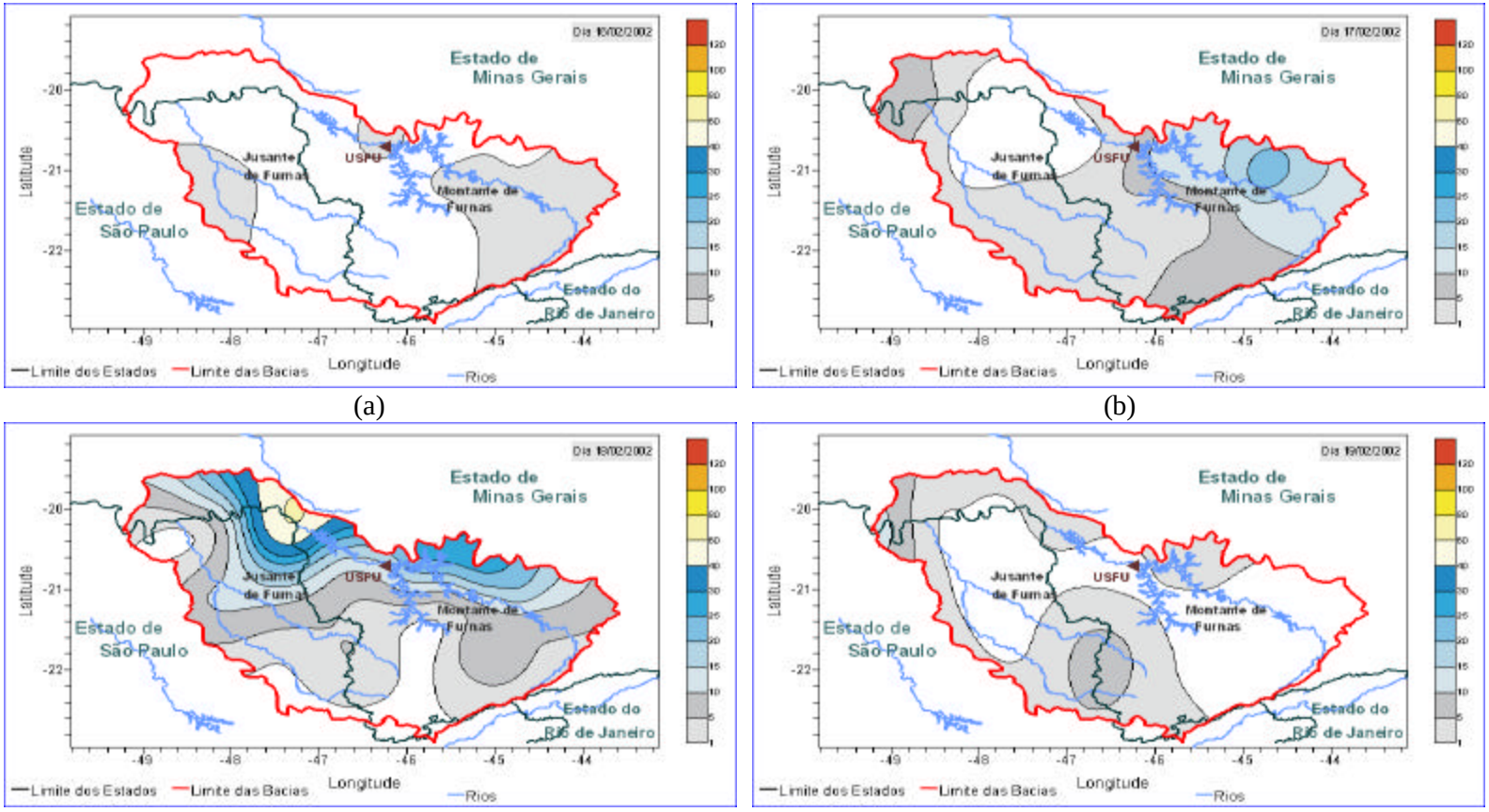
(a)



(b)

Figura 5.19: Mapa de chuva (em mm) na bacia do rio Grande referente aos dias 21/02/02 (a) e 24/02/02 (b) (Fonte: FURNAS, 2003a).

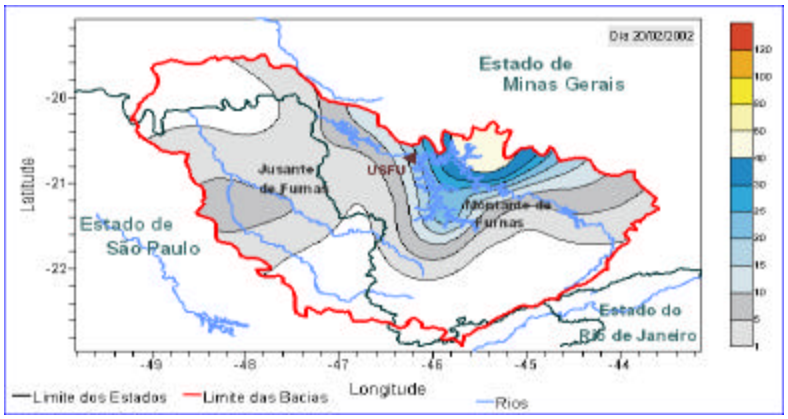
Na Figura 5.20, são apresentados os demais mapas de chuva para a bacia do rio Grande durante o evento ZCAS de 16 a 24 de fevereiro de 2002. Os dias 22 e 23, Figuras 5.20f e 5.20g, respectivamente, registraram precipitação em toda a bacia, e nos dias 18 e 20, apresentados nas Figuras 5. 20c e 5.20e, ocorreram picos isolados nas áreas a jusante e montante da UHE de Furnas, respectivamente.



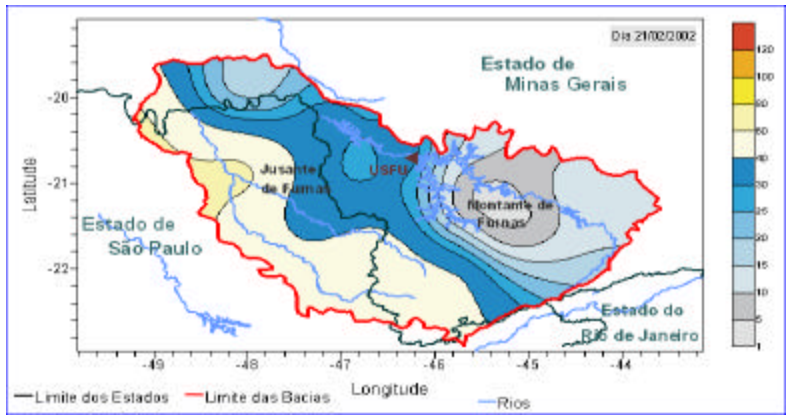
(a) (b)

(c) (d)

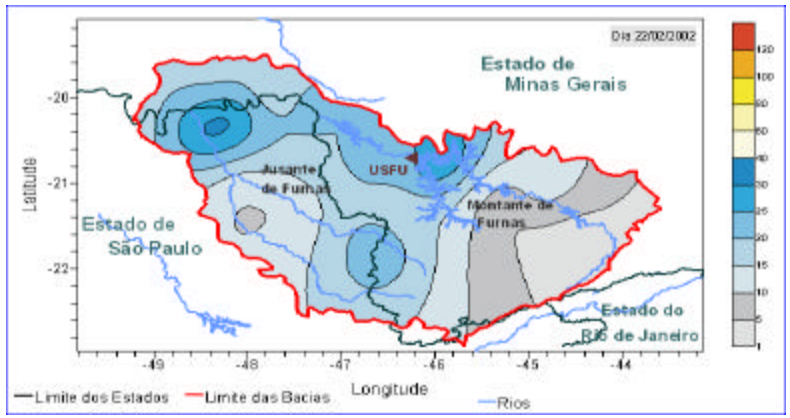
Figura 5.20: Mapas de chuva (em mm) na bacia do rio Grande referentes aos dias 16/02/02 (a), 17/02/02 (b), 18/02/02 (c), 19/02/02 (d), 20/02/02 (e), 22/02/02 (f) e 23/02/02 (g) (Fonte: FURNAS, 2003a).



(e)



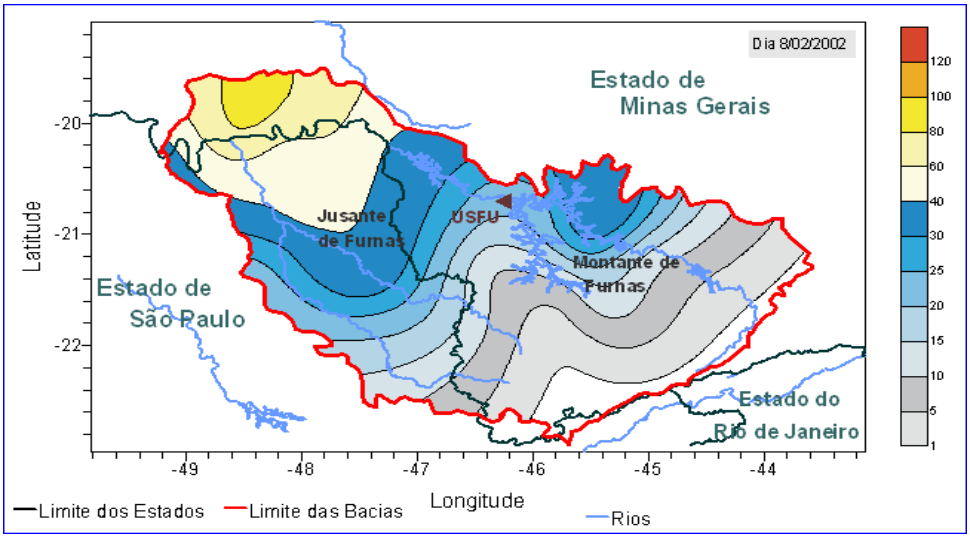
(f)



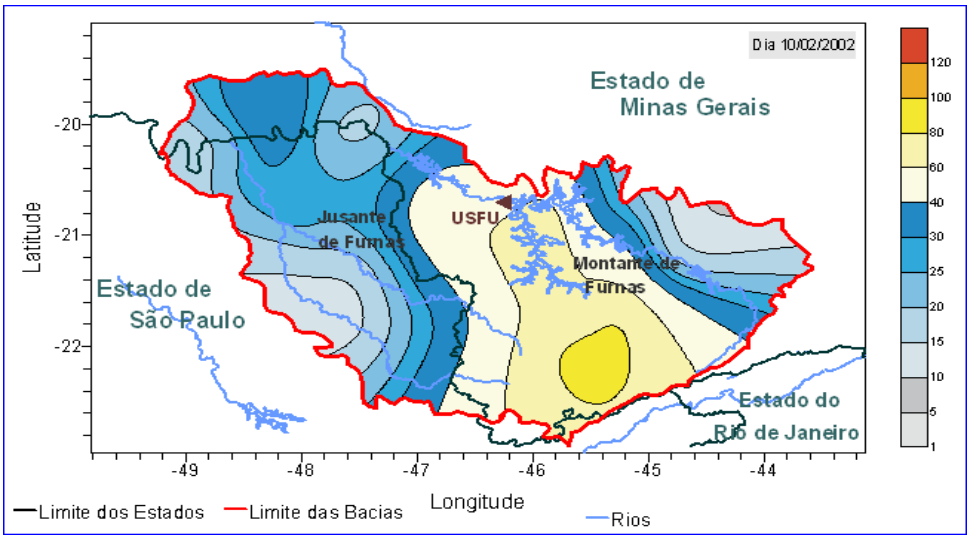
(g)

Figura 5.20: Mapas de chuva (em mm) na bacia do rio Grande referentes aos dias 16/02/02 (a), 17/02/02 (b), 18/02/02 (c), 19/02/02 (d), 20/02/02 (e), 22/02/02 (f) e 23/02/02 (g) (Fonte: FURNAS, 2003a).

Entretanto, como visto na Figura 5.18, os máximos de precipitação média na bacia do rio Grande, durante o mês de fevereiro de 2002, ocorreram nos dias 08 e 10. Durante esses dias a ZCAS não esteve configurada. As chuvas foram ocasionadas por um sistema de baixa pressão que atuava nas regiões sudeste e centro-oeste do Brasil. Os mapas de chuva desses eventos são apresentados nas Figuras 5.21a e 5.21b, respectivamente. É interessante notar que o evento do dia 08/02 foi mais intenso no extremo oeste da bacia, na região a jusante da UHE de Furnas. No evento do dia 10/02, foram registrados valores de precipitação em toda a bacia, com máximos no trecho a montante da UHE de Furnas.



(a)



(b)

Figura 5.21: Mapa de chuva (em mm) na bacia do rio Grande referente aos dias 08/02/02 (a) e 10/02/02 (b) (Fonte: FURNAS, 2003a).

5.4.3 Bacia do Rio Paranaíba

A Figura 5.22 apresenta a precipitação média diária para o mês de fevereiro de 2002 na bacia do rio Paranaíba. Foram registrados valores de precipitação em todos os dias do mês, com picos nos dias 08 e 09 de 43,8 mm e 39,2 mm, respectivamente. Os mapas de chuva referentes a esses dias são mostrados na Figura 5.23a e 5.23b. É interessante notar que, nesses dois dias, a precipitação ocorreu de forma bem localizada, especialmente no dia 09/02, quando a precipitação ficou localizada na região sul, no trecho chamado Araguari, da bacia do rio Paranaíba, e foi causada por um sistema de baixa de pressão que atuava na área da bacia.

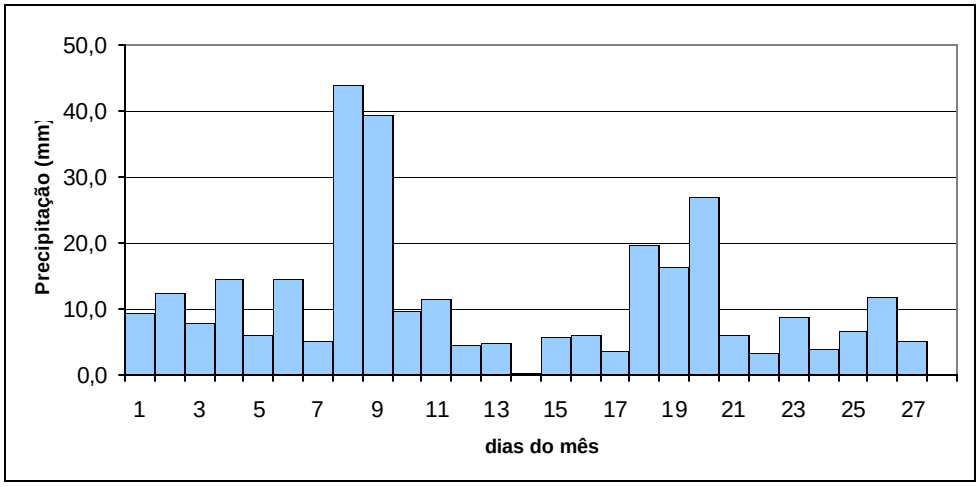
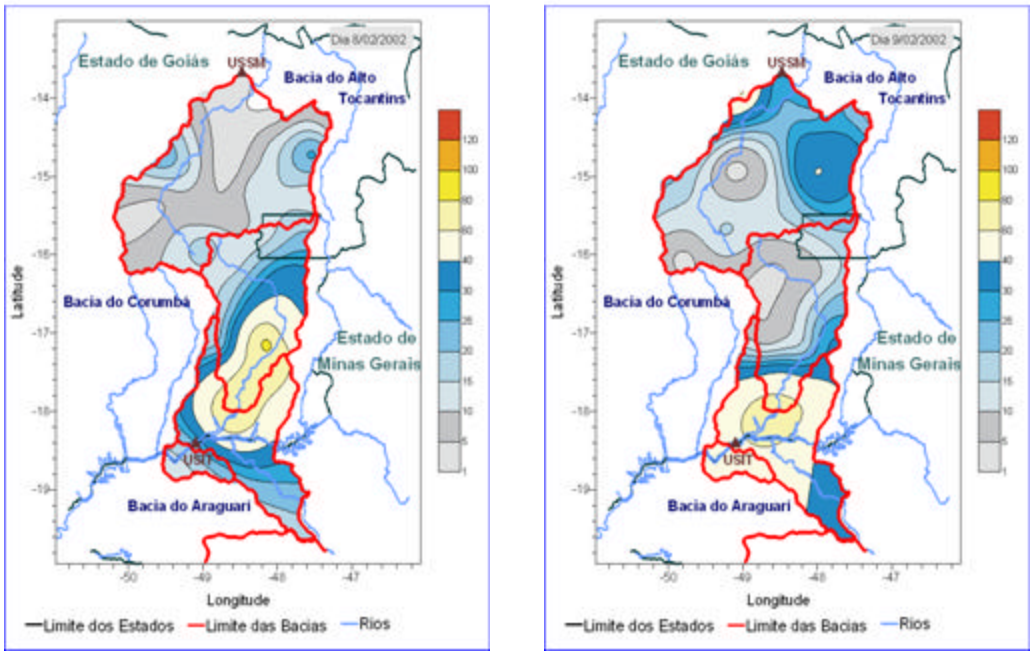


Figura 5.22: Precipitação acumulada em 24 horas média na bacia do rio Paranaíba para o mês de fevereiro de 2002 (Fonte: FURNAS, 2003a).



(a) (b)

Figura 5.23: Mapa de chuva (em mm) nas bacias dos rios Paranaíba e Tocantins referente aos dias 08/02/02 (a) e 09/02/02 (b) (Fonte: FURNAS, 2003a).

Porém, como nas bacias dos rios Paraíba do Sul e Grande, o posicionamento do segundo evento de ZCAS, entre os dias 16 e 24/02, coincidiu com a localização dessa bacia. Durante esse período, ocorreram picos de precipitação nos dias 18, 19 e 20/02. Os mapas de chuva referentes a esses dias são apresentados nas Figuras 5.24a, 5.24b e 5.24c, respectivamente. Observa-se, nessas figuras, que a precipitação ocorreu relativamente bem distribuída, principalmente nos dias 18 e 19, Figuras 5.24a e 5.24b, respectivamente.

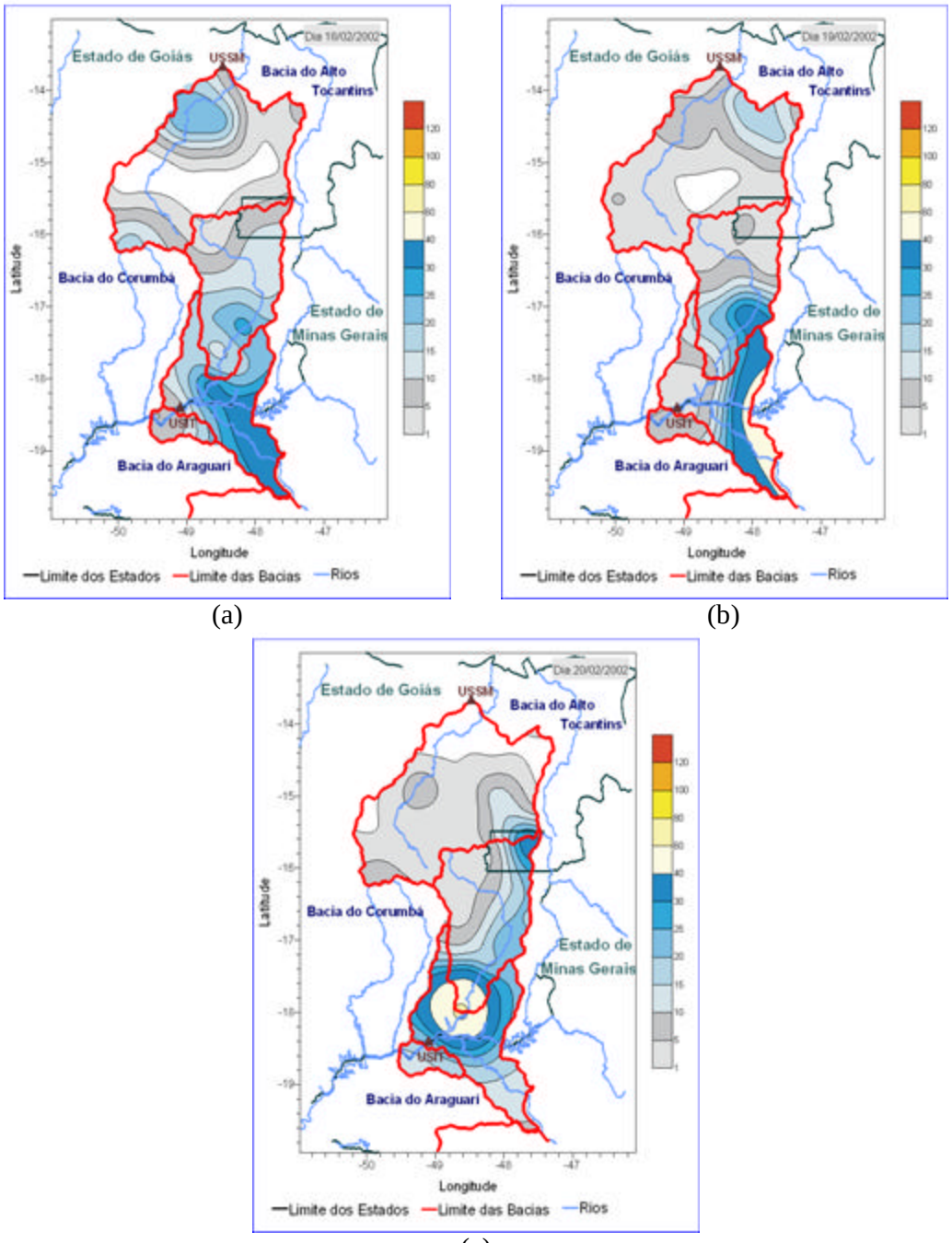


Figura 5.24: Mapa de chuva (em mm) nas bacias dos rios Paranaíba e Tocantins referente aos dias 18/02/02 (a), 19/02/02 (b) e 20/02/02 (c) (Fonte: FURNAS, 2003a).

5.4.4 Bacia do Rio Tocantins

Na Figura 5.25, é apresentada a precipitação média diária na bacia do rio Tocantins durante o mês de fevereiro de 2002. Observa-se que ocorreu precipitação em todos os dias, desde o dia 1 ao dia 21 de fevereiro de 2002, com picos de 32,5 mm e 22,6 mm nos dias 4 e 9, respectivamente. Conforme discutido no Capítulo 4, a região dessa bacia esteve mais influenciada pelo primeiro evento ZCAS, entre os dias 4 a 7 de fevereiro.

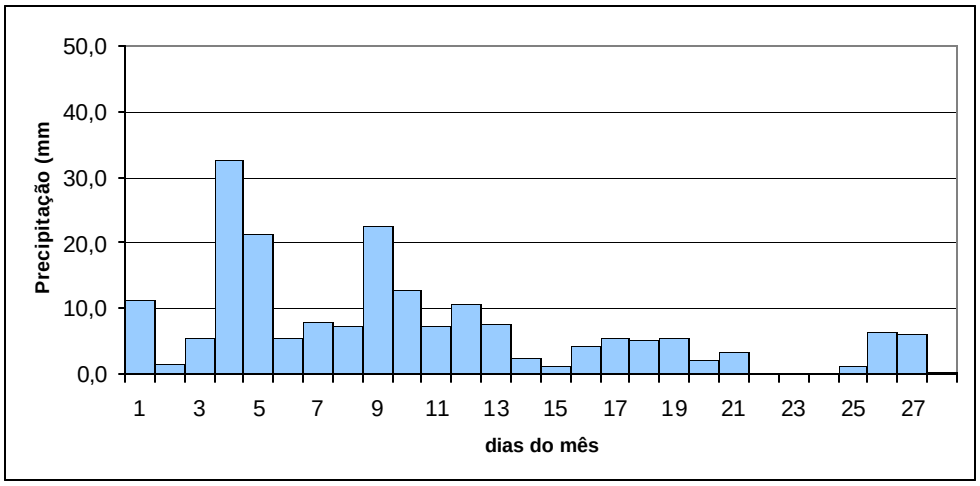
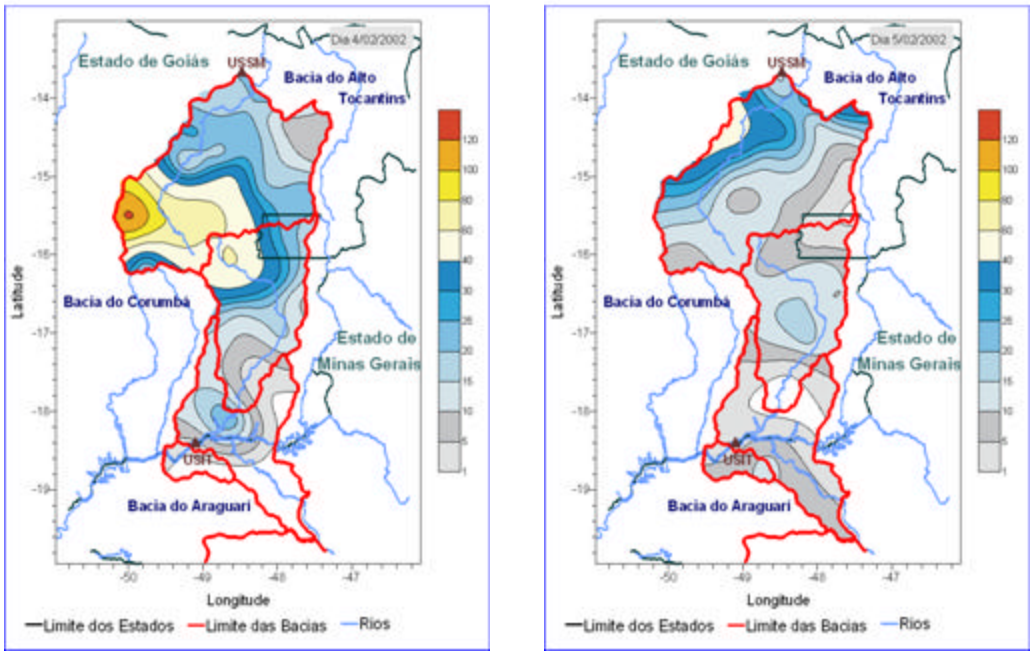


Figura 5.25: Precipitação acumulada em 24 horas média na bacia do rio Tocantins para o mês de fevereiro de 2002 (Fonte: FURNAS, 2003a).

Dentro do período de atuação da ZCAS na bacia do rio Tocantins, destacam-se os dias 04 e 05, quando foram registrados os maiores valores de precipitação. As Figuras 5.26a e 5.26b apresentam os mapas de chuva das bacias dos rios Paranaíba e Tocantins referentes a esses dias. Nota-se que no dia 04/02, os maiores valores de precipitação ocorreram na região sudoeste da bacia do rio Tocantins e no dia 05/02 na região noroeste da bacia, na região próxima à UHE de Serra da Mesa.



(a) (b)

Figura 5.26: Mapas de chuva (em mm) nas bacias dos rios Paranaíba e Tocantins referentes ao dia 04/02/02 (a) e 05/02/02 (b) (Fonte: FURNAS, 2003a).

Até este ponto do trabalho, foram apresentados os resultados obtidos a partir de dados de precipitação acumulada em 24 horas, em postos pluviométricos pertencentes a Furnas Centrais Elétricas S.A., localizados nas bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande, Paranaíba e Tocantins. Essas bacias possuem grande importância nacional, especialmente no campo de produção de energia elétrica. A ZCAS mostrou ser um dos fenômenos meteorológicos mais importantes, no que diz respeito à precipitação, nas bacias de estudo, principalmente devido a localização dessas ao longo da ZCAS.

Geralmente, os meteorologistas enfocam somente a parte atmosférica dos fenômenos meteorológicos, não dando uma atenção mais detalhada as suas conseqüências, especialmente com os efeitos da precipitação quando atinge a superfície. Um exemplo de grande importância é o efeito da precipitação em vazões de rios, como foi visto no Capítulo 2.

A seguir, serão apresentados os efeitos da precipitação nas vazões naturais calculadas em algumas usinas hidrelétricas localizadas nas bacias de estudo. Primeiramente, será apresentado o comportamento médio anual da vazão natural e, em

seguida, durante o mês de fevereiro de 2002, dando-se uma atenção especial aos dias nos quais a ZCAS esteve configurada.

5.5 PRECIPITAÇÃO x VAZÃO NATURAL – VALORES MÉDIOS MENSAIS

Inicialmente, para analisar o comportamento da vazão natural durante o ano, serão apresentadas figuras a partir dos valores médios mensais, obtidos através do ONS no período de 1931 a 2001, na UHE de Funil, localizada na bacia do rio Paraíba do Sul; na UHE de Furnas, localizada na bacia do rio Grande, na UHE de Itumbiara, na bacia do rio Paranaíba e na UHE de Serra da Mesa, na bacia do rio Tocantins.

A Figura 5.27 apresenta os valores médios mensais de precipitação na bacia do rio Paraíba do Sul juntamente com os dados de vazão natural na UHE de Funil. Na Figura 5.28, são apresentados os dados de precipitação na bacia do rio Grande com os dados de vazão natural na UHE de Furnas. Os dados de precipitação da bacia do rio Paranaíba e vazão natural na UHE de Itumbiara são apresentados na Figura 5.29. Finalmente, a Figura 5.30 mostra os dados de precipitação na bacia do tio Tocantins e os dados de vazão natural na UHE de Serra da Mesa.

Nas Figuras 5.27 a 5.30, pode-se notar que o comportamento da vazão natural acompanha a variação da precipitação durante o ano, com maiores valores durante o período chuvoso (novembro a março) e menores no período seco (abril a outubro).

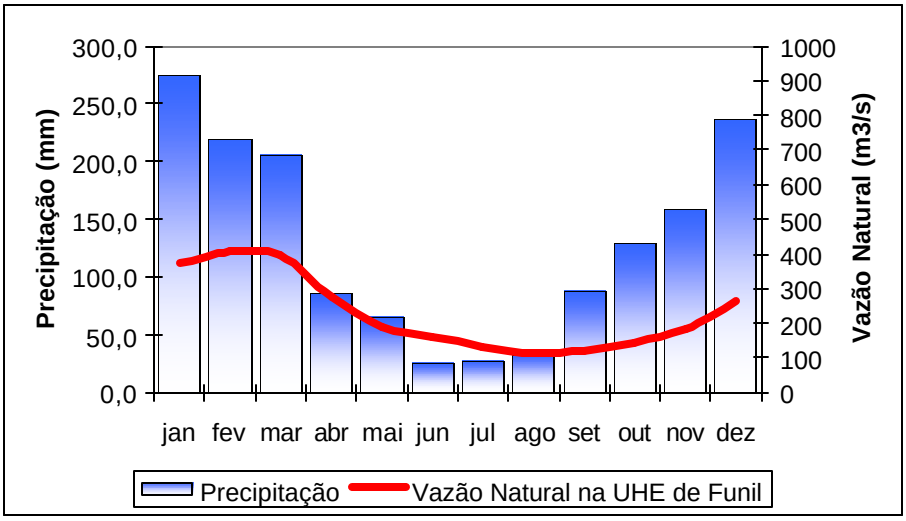


Figura 5.27: Precipitação média mensal na bacia do rio Paraíba do Sul (barras azuis) e vazão natural média mensal na UHE de Funil (linha vermelha) (Fonte: FURNAS, 2003a e ONS, 2004).

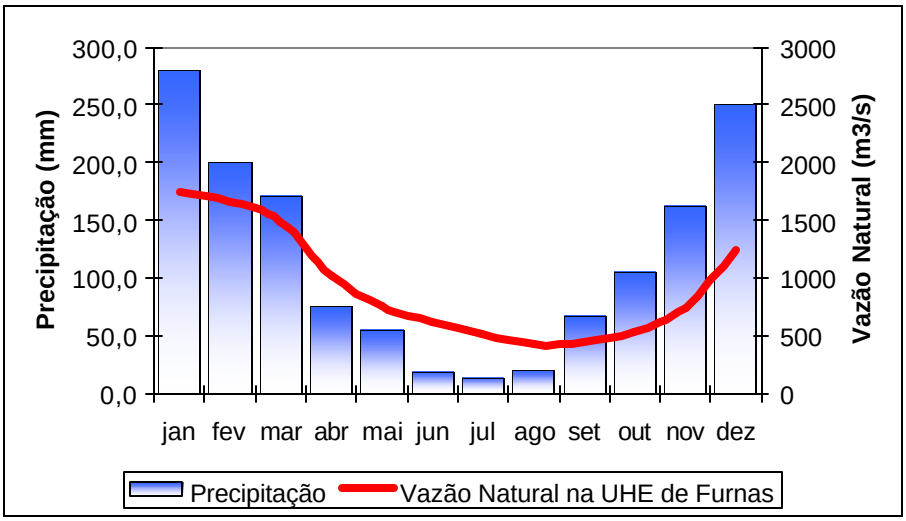


Figura 5.28: Precipitação média mensal na bacia do rio Grande (barras azuis) e vazão natural média mensal na UHE de Furnas (linha vermelha) (Fonte: FURNAS, 2003a e ONS, 2004).

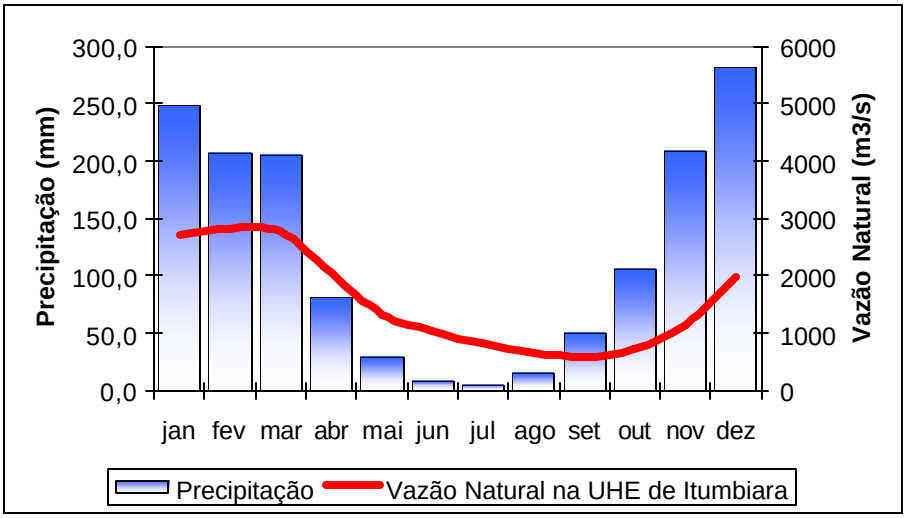


Figura 5.29: Precipitação média mensal na bacia do rio Paranaíba (barras azuis) e vazão natural média mensal na UHE de Itumbiara (linha vermelha) (Fonte: FURNAS, 2003a e ONS, 2004).

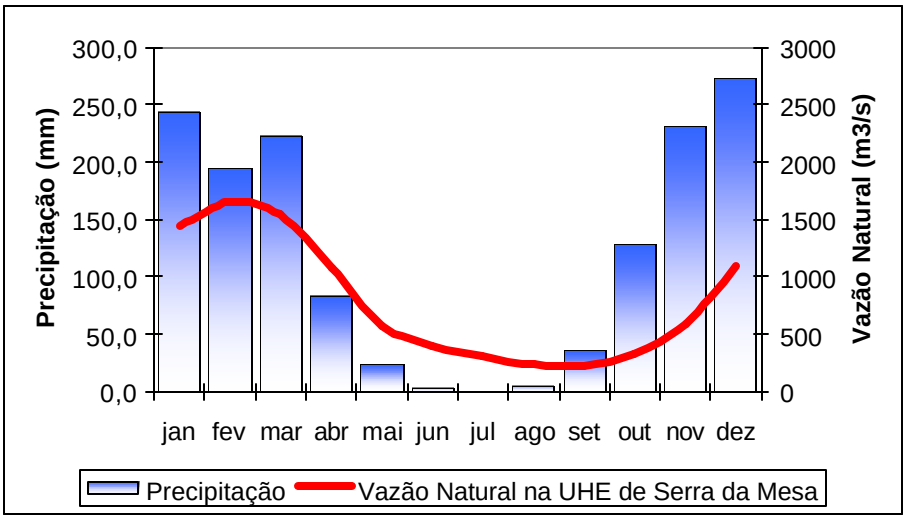


Figura 5.30: Precipitação média mensal na bacia do rio Tocantins (barras azuis) e vazão natural média mensal na UHE de Serra da Mesa (linha vermelha) (Fonte: FURNAS, 2003a e ONS, 2004).

5.6 PRECIPITAÇÃO x VAZÃO NATURAL EM FEVEREIRO DE 2002

Como citado anteriormente, durante o mês de fevereiro de 2002, ocorreram dois episódios de ZCAS. O primeiro, entre os dias 4 e 7, e o segundo, de 16 a 24 de fevereiro. Para analisar o efeito ocasionado na precipitação durante os períodos nos quais a ZCAS esteve configurada nas bacias hidrográficas de estudo, foram utilizados, além de dados pluviométricos, dados de vazão natural, calculada diariamente durante o mês de fevereiro em algumas UHE operadas por Furnas Centrais Elétricas S.A.

A vazão natural é uma conseqüência da precipitação ocorrida em uma bacia hidrográfica. A resposta da vazão natural varia de bacia para bacia, porque depende, entre outros fatores, do tipo e usos do solo, da declividade do terreno, da forma da bacia e da distância entre o local onde a precipitação ocorre e onde a vazão é medida ou calculada. Portanto, para um mesmo valor observado de precipitação, existem respostas diferentes de vazão natural nas bacias. Até na mesma bacia uma mesma precipitação pode levar a vazões diferentes, dependendo das condições antecedentes.

5.6.1 Precipitação x Vazão Natural da UHE de Funil

Na Figura 5.31, são apresentados os dados de precipitação média diária na bacia do rio Paraíba do Sul, somente no trecho a montante da usina de Funil, e os dados de vazão natural, calculados na UHE de Funil. Foram considerados apenas os dados dos postos pluviométricos localizados a montante da UHE de Funil, porque a precipitação ocorrida nos postos a jusante não influencia na vazão calculada na usina. Pode-se notar, nessa figura, que, como o pico de precipitação observado no dia 03/02 ocorreu bem próximo a UHE de Funil (ver Figura 5.17), a resposta da vazão foi quase que imediata. O segundo máximo foi no dia 13/02, associado a precipitação acumulada entre os dias 6 e 12. Durante o segundo episódio de ZCAS, a vazão natural comportou-se de forma mais constante, ou seja, sem grandes variações. Destaca-se apenas o pico de vazão natural no dia 18/02. Como os maiores valores de precipitação não ocorreram tão próximos a UHE de Funil (ver Figura 516b), o tempo de resposta da vazão natural foi de aproximadamente 1 dia. O mesmo foi observado no dia 24/02, quando os maiores valores observados de precipitação foram localizados em torno do centro da bacia, e o tempo de resposta da vazão também foi de 1 dia.

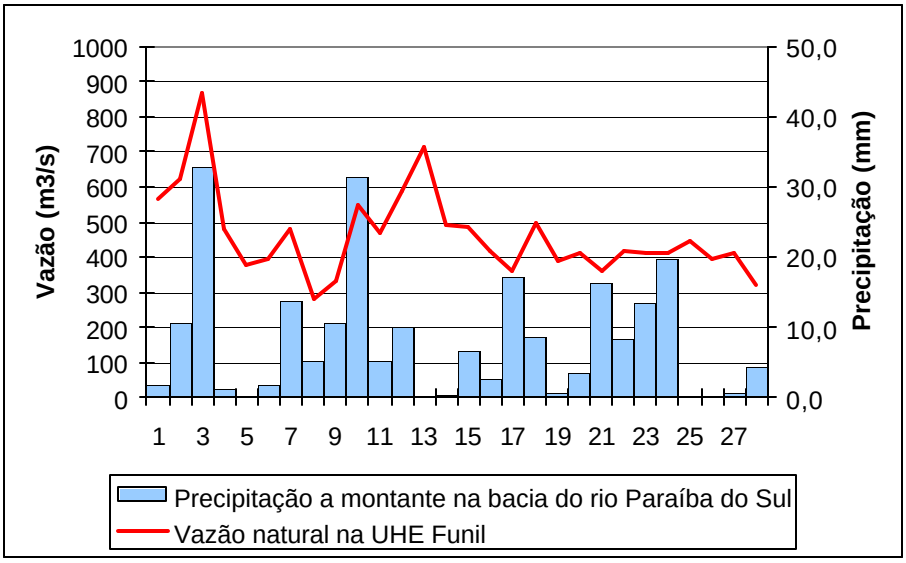


Figura 5.31: Precipitação média diária no trecho a montante da bacia do rio Paraíba do Sul (barras azuis) e vazão natural diária na UHE de Funil (linha vermelha) no mês de fevereiro de 2002 (Fonte: FURNAS, 2003a e 2003b).

5.6.2 Precipitação x Vazão Natural da UHE de Furnas

A Figura 5.32 apresenta os dados de precipitação acumulada diária na bacia do rio Grande, no trecho a montante da UHE de Furnas e, os dados de vazão natural, calculados nesta usina, durante o mês de fevereiro de 2002. Como discutido no item 5.4.2 deste capítulo, a precipitação observada no dia 10/02 registrou máximos no trecho a montante da UHE de Furnas e, esse fato também pode ser observado na Figura 5.32. A resposta mais significativa de vazão natural ocorreu no dia 13/02, dois dias após o máximo de precipitação. Durante o período de atuação da ZCAS na bacia, a precipitação apresentou-se de forma regular, contribuindo no comportamento quase constante da vazão natural, exceto no dia 24/02, quando a precipitação foi um pouco mais intensa e localizada próxima a UHE de Furnas, ver Figura 5.19b, quando então a vazão natural apresentou uma ligeira elevação. Nesse caso, diferente do ocorrido no dia 10/02, quando os maiores valores de precipitação não foram localizados próximos a UHE de Furnas e o tempo de resposta da vazão natural ficou em torno de dois dias, a precipitação apresentou-se melhor distribuída e com picos próximos a usina hidrelétrica, resultando em um tempo de resposta menor, aproximadamente um dia, na vazão natural.

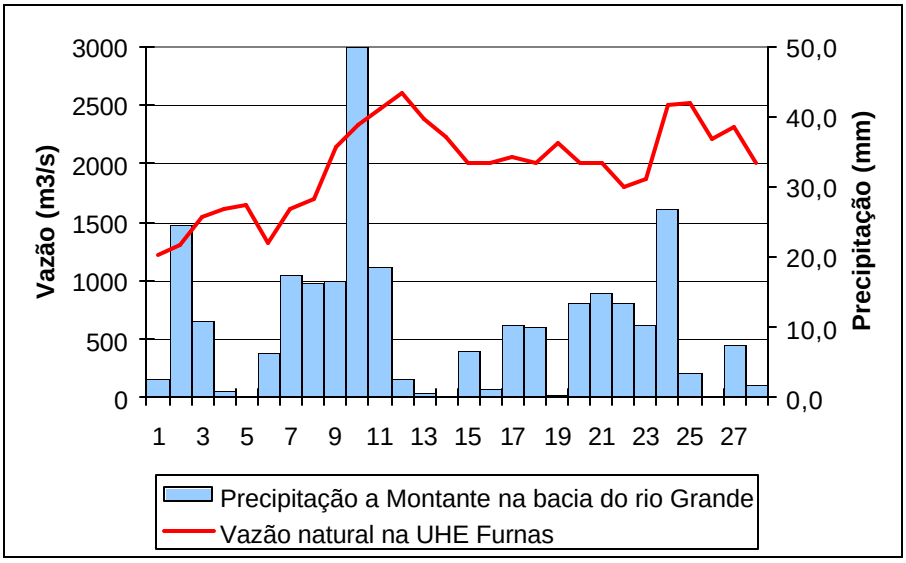


Figura 5.32: Precipitação média diária no trecho a montante da bacia do rio Grande (barras azuis) e vazão natural diária na UHE de Furnas (linha vermelha) no mês de fevereiro de 2002 (Fonte: FURNAS, 2003a e 2003b).

5.6.3 Precipitação x Vazão Natural da UHE de Itumbiara

Os comportamentos da precipitação média diária na bacia do rio Paranaíba e da vazão natural calculada para a UHE de Itumbiara durante o mês de fevereiro de 2002 são apresentados na Figura 5.33. O segundo episódio de ZCAS, entre os dias 16 e 24 de fevereiro, foi o que mais influenciou na bacia do rio Paranaíba, devido ao posicionamento da banda de nebulosidade associada a ZCAS ser coincidente com a localização da bacia (ver Figuras 4.14b e 4.15b). Durante esse período, os picos de precipitação observados nos dias 18, 19 e 20/02 localizaram-se próximos a UHE de Itumbiara, conforme Figura 5.24, contribuindo no aumento da vazão natural a partir do dia 19/02.

Nos dias 08 e 09/02, apesar de não estar dentro do período de atuação da ZCAS, a precipitação também foi intensa, principalmente nas áreas próximas a UHE de Itumbiara, favorecendo ao aumento da vazão natural logo em seguida.

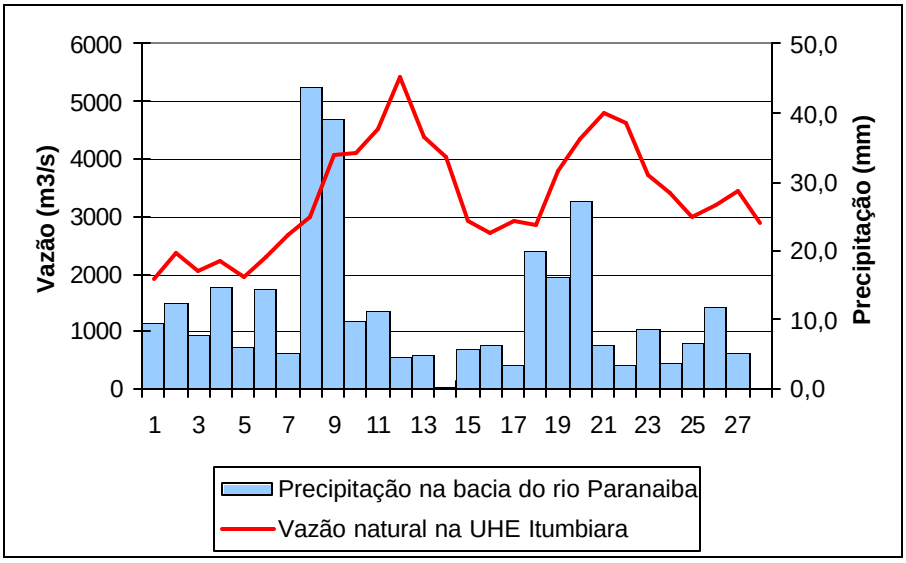


Figura 5.33: Precipitação média diária na bacia do rio Paranaíba (barras azuis) e vazão natural diária na UHE de Itumbiara (linha vermelha) no mês de fevereiro de 2002 (Fonte: FURNAS, 2003a e 2003b).

5.6.4 Precipitação x Vazão Natural da UHE de Serra da Mesa

Na Figura 5.34, são apresentadas a precipitação média diária na bacia do rio Tocantins e a vazão natural calculada na UHE de Serra da Mesa durante o mês de fevereiro de 2002. Essa foi a única bacia de estudo na qual o primeiro episódio de ZCAS, do dia 4 ao dia 7, mais influenciou, conforme visto no Capítulo 4. Os picos de vazão natural observados nos dias 5, 6 e 07/02 foram mais ocasionados pelas chuvas que ocorreram nos dias 04 e 05/02. Nos mapas de chuva dos dias 04 e 05/02, Figuras 5.26a e 5.26b, observa-se que a localização dos maiores valores de precipitação registrados, encontra-se próxima à UHE de Serra da Mesa. No dia 13/02, nota-se mais um pico de vazão natural, ocasionado provavelmente pela precipitação ocorrida no dia 09/02. A partir do dia 09/02, os valores observados de precipitação apresentam uma ligeira diminuição acarretando, conseqüentemente, em menores valores de vazão natural.

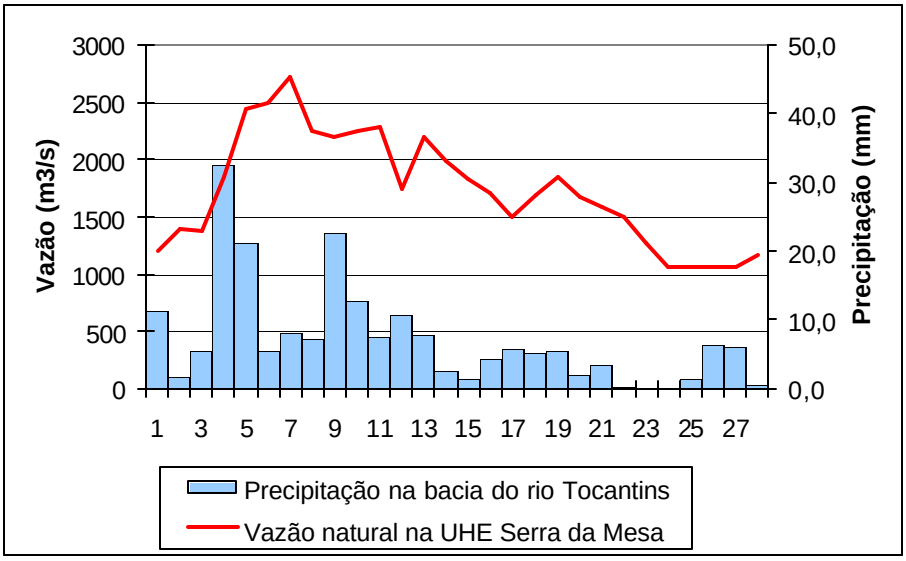


Figura 5.34: Precipitação média diária na bacia do rio Tocantins (barras azuis) e vazão natural diária na UHE de Serra da Mesa (linha vermelha) no mês de fevereiro de 2002 (Fonte: FURNAS, 2003a e 2003b).

Como informado anteriormente, a escolha pelo estudo do mês de fevereiro de 2002 foi decorrente da ocorrência de dois eventos ZCAS no mesmo mês que, como apresentado, possuíam diferentes características e posicionamento, influenciando em áreas distintas, além de se tratarem de eventos recentes. Adicionalmente, a disponibilidade de dados hidrometeorológicos e de imagens de satélite simultaneamente influenciou a escolha.

Os resultados aqui apresentados sobre os eventos ZCAS que ocorreram durante o mês de fevereiro de 2002 ficaram um pouco mascarados por outros fenômenos meteorológicos que atuaram nas bacias hidrográficas estudadas nesse período, dificultando na análise da influência da precipitação causada pelos dois eventos ZCAS. Nas bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande e Paranaíba, por exemplo, os maiores valores de precipitação foram observados em dias nos quais a ZCAS não esteve configurada, sendo causadas pela atuação de um sistema de baixa pressão nas regiões sudeste e centro-oeste do país, conforme apresentado na seção 4.6 do Capítulo 4.

Outro ponto que merece destaque é a limitação da modelagem conceitual empregada no presente trabalho. A utilização de médias aritméticas para cálculo da precipitação média, tanto diária quanto mensal, nas bacias estudadas, ignora as

variações espaciais da precipitação nas bacias. Com a finalidade de se observar a distribuição espacial da precipitação, foram plotados os mapas de chuva diários de fevereiro de 2002 para cada bacia estudada. Através deles, foi possível identificar casos de precipitação isolada, como o visto no dia 03 de fevereiro na bacia do rio Paraíba do Sul (Figura 5.17) e outros onde a precipitação apresentou-se melhor distribuída espacialmente nas bacias. Como o objetivo deste trabalho baseou-se na identificação e influência da precipitação decorrente da ZCAS em bacias hidrográficas, a simplicidade do método não impediu a obtenção de resultados satisfatórios que poderão ser utilizados em trabalhos futuros.

Assim, diante dos resultados apresentados neste capítulo, observou-se que um mesmo evento ZCAS pode influenciar de diferentes formas as bacias hidrográficas estudadas nesta tese, dependendo do posicionamento da banda de nebulosidade associada a ZCAS.

Nos eventos aqui estudados, essa dependência ficou bem determinada, já que, no primeiro evento, entre os dias 4 e 7 de fevereiro de 2002, a banda de nebulosidade esteve semi-estacionária sobre o Mato Grosso, Tocantins, norte de Minas Gerais, Espírito Santo e em grande parte da Bahia, atuando principalmente na bacia do rio Tocantins (Figuras 4.12a e 4.13a) . No segundo evento, que ocorreu entre os dias 16 e 24 de fevereiro de 2002, a banda de nebulosidade atuou sobre o Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, sul de Goiás e o centro da região Sudeste, influenciando no regime pluviométrico das bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande e Paranaíba (Figuras 4.12b e 4.13b).

A atuação da ZCAS em bacias hidrográficas apresenta algumas características importantes, principalmente para a operação de usinas hidrelétricas. Como este é um fenômeno que causa precipitação por alguns dias consecutivos, a vazão, mesmo não apresentando uma relação linear com a precipitação, é influenciada de tal forma que permanece com valores altos devido a persistência da precipitação, exceto em casos de vertimento nas usinas.

O tempo de resposta da vazão em uma bacia depende de algumas características físicas, como tipo e uso do solo e declividade e, além disso, pode variar dentro de um mesmo evento ZCAS, dependendo da umidade do solo. No início do evento, se não tiver ocorrido uma precipitação precedente, com o solo seco, a precipitação deverá preencher as falhas do terreno e infiltrar no solo até que esse atinja a saturação,

iniciando-se, em seguida, os escoamentos superficial e subsuperficial. Caso seja outra a situação de umidade antecedente a um evento chuvoso, o escoamento inicia-se mais rapidamente, atingindo picos no hidrograma mais pronunciados.

Além disso, o efeito da ZCAS nas vazões das bacias hidrográficas é um pouco diferente de outros fenômenos meteorológicos. No caso de uma tempestade isolada, por exemplo, haverá um pico na vazão e depois esta decairá rapidamente, como visto no episódio que ocorreu no dia 3 de fevereiro de 2002 na bacia do rio Paraíba do Sul (Figura 5.31). Já sob a influência da ZCAS, com precipitação por alguns dias seguidos, a vazão tende a manter valores altos por períodos mais prolongados.

Uma visualização de como a previsão meteorológica de um fenômeno como a ZCAS é importante está ligada à operação e à manutenção de usinas hidrelétricas. Quando o nível de um reservatório está próximo ao limite máximo, a previsão do tempo, especialmente a previsão de chuva na bacia considerada, torna-se uma ferramenta de grande utilidade para os responsáveis na operação da UHE. Se essa bacia estiver sob a influência de um evento ZCAS, por exemplo, com previsão de chuva por mais alguns dias, pode ser necessário o vertimento da barragem. Entretanto, o volume do vertimento também deve considerar a precipitação prevista tanto a montante, para que o nível do reservatório não ultrapasse o limite máximo, quanto a jusante, para evitar que prejuízos sejam causados.

No caso específico das operações dos reservatórios pertencentes à Furnas Centrais Elétricas S.A., o setor de Meteorologia acompanha, por meio de resultados de modelos meteorológicos, dados observacionais e imagens de satélite, a formação e desenvolvimento de eventos ZCAS com até 10 dias de antecedência. Os prognósticos são atualizados diariamente e passados ao setor de Hidrologia e à Divisão de Planejamento da Operação, para que medidas de controle de cheias possam ser tomadas de forma a minimizar possíveis danos. É importante ressaltar que, desde a criação do setor de Meteorologia em Furnas, vários eventos meteorológicos com característica de causar precipitação intensa, não somente eventos de ZCAS, puderam ser previstos, auxiliando na operação de suas usinas hidrelétricas.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A motivação para a realização deste trabalho surgiu na observação do fato da posição geográfica de algumas das mais importantes bacias hidrográficas brasileiras, no que diz respeito à geração de energia elétrica, possuir uma orientação ao longo do posicionamento médio do sistema meteorológico conhecido como ZCAS, no sentido NW/SE. Além disso, a localização dessas bacias é bastante similar com a posição climatológica da ZCAS. As bacias aqui estudadas foram a do rio Paraíba do Sul e do rio Grande, localizadas na região sudeste, e as bacias dos rios Paranaíba e Tocantins, na região centro-oeste do Brasil.

O objetivo geral da presente tese consistiu na avaliação e análise da influência da precipitação decorrente da ZCAS nas bacias hidrográficas de estudo. Para isso, foram estudados dois episódios desse fenômeno, que ocorreram durante o mês de fevereiro de 2002. Durante esse mês, também ocorreram outros fenômenos meteorológicos que causaram precipitação nas bacias estudadas, dificultando a análise da precipitação decorrente da ZCAS nos dois eventos.

Para que os objetivos deste trabalho fossem alcançados, foram utilizados dados de precipitação acumulada em 24 horas de postos pluviométricos, pertencentes a Furnas Centrais Elétricas S.A, que estão localizados nas bacias hidrográficas dos rios Paraíba do Sul, Grande, Paranaíba e Tocantins. Também foram utilizados dados de vazão natural para as UHE de Funil, Furnas, Itumbiara e Serra da Mesa, além de imagens do satélite GOES-8 no canal infravermelho.

A escolha das bacias foi determinada de acordo com localização e importância estratégica, especialmente para a geração de energia elétrica. As bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande, Paranaíba e Tocantins possuem localização ao longo do posicionamento médio da banda de nebulosidade associada à ZCAS e são áreas de interesse de Furnas Centrais Elétricas S.A. no que diz respeito à geração de energia elétrica. Por esses motivos, foram escolhidas para o estudo.

A escolha dos episódios de ZCAS estudados neste trabalho, que ocorreram em fevereiro de 2002, partiu de uma análise preliminar de alguns eventos citados na revista Climanálise, publicada mensalmente pelo CPTEC, eventos analisados por SANCHES (2002) e eventos já estudados na literatura. Além de se tratar de eventos recentes, com

características e posicionamento distintos, a possibilidade de obtenção conjunta de dados hidrometeorológicos e imagens de satélite, foram determinantes para a escolha dos episódios de fevereiro de 2002.

Os resultados alcançados nesta dissertação são relevantes e importantes para futuros trabalhos relacionados a ZCAS e suas influências em bacias hidrográficas, especialmente no regime pluviométrico, embora se tenha optado pelo uso de metodologia simplificada na identificação e avaliação de impactos decorrentes da precipitação associada a ZCAS. Além disso, os resultados apresentados mostram como é importante a interação de várias áreas de conhecimento, neste caso específico, na interação entre a Meteorologia e a Hidrologia.

Dentre os resultados obtidos, destaca-se que os eventos de precipitação intensa observados em dias consecutivos, característicos da atuação de um evento ZCAS, nas bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande, Paranaíba e Tocantins, foram, em sua maioria, episódios de ZCAS. Em trabalhos já publicados relacionados a ZCAS, entre eles GRIMM (1992), KODAMA (1992 e 1993), MARTON (1994 e 2000) e ROBERTSON e MECHOSO (2000), esta é referida como um dos fenômenos meteorológicos mais importantes na América do Sul. A grande influência da precipitação ocasionada por eventos ZCAS nas bacias hidrográficas aqui estudadas é mais uma confirmação marcante da importância de estudos sobre a ZCAS.

Os episódios de ZCAS estudados ocorreram entre os dias 04 e 07 e de 16 a 24 de fevereiro de 2002. O posicionamento da banda de nebulosidade relacionada a ZCAS varia, o que pôde ser verificado nos episódios estudados. No primeiro episódio, a ZCAS esteve configura sobre os estados de Mato Grosso, Tocantins, norte de Minas Gerais, Espírito Santo e em grande parte da Bahia, influenciando basicamente no regime pluviométrico da bacia do rio Tocantins. Já no segundo episódio estudado, a banda de nebulosidade atuou um pouco mais sul, sobre o Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, sul de Goiás e centro da região Sudeste, influenciando bastante na precipitação das bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande e Paranaíba.

Durante todo o período de atuação da ZCAS na bacia do rio Paraíba do Sul, entre os dias 16 e 24 de fevereiro de 2002, foram registrados valores de precipitação. A precipitação apresentou-se distribuída espacialmente de forma regular na bacia, alternando dias de precipitação intensa com outros de chuva fraca. Analisando o

comportamento da vazão natural na UHE de Funil, juntamente com os dados de precipitação a montante desta, observou-se que o máximo na vazão natural depende do local onde foram registrados os picos de precipitação. Os maiores valores de precipitação observados durante o segundo episódio de ZCAS na bacia do rio Paraíba do Sul ocorreram nos dias 18 e 24/02, e o tempo de resposta da vazão natural, em Funil, foi de aproximadamente 1 dia em ambos os casos.

Na bacia do rio Grande, o segundo episódio de ZCAS que ocorreu no mês de fevereiro de 2002 ocasionou chuva contínua com picos nos dias 21 e 24/02. Nesses dias, os valores observados de precipitação foram intensos em praticamente toda a bacia. O comportamento da vazão natural na UHE de Furnas varia de acordo com as regiões onde ocorreram os maiores valores de precipitação. No dia 24/02, por exemplo, o tempo de resposta da vazão natural foi pequeno, já que os maiores valores de precipitação observados ocorreram próximos à usina.

Os resultados obtidos para a bacia do rio Paranaíba mostraram que foram observados valores de precipitação durante quase todo o mês de fevereiro de 2002 na referida bacia, exceto no dia 14/02. Isto se deve ao fato de se encontrar em uma região típica de pancadas de chuva de caráter local, em resposta ao aquecimento diurno. A atuação do segundo episódio de ZCAS, entre os dias 16 e 24/02, foi o que mais influenciou no regime pluviométrico da bacia do rio Paranaíba. Durante esse período, foram observados picos de precipitação nos dias 18, 19 e 20. Nesses três eventos, a precipitação foi mais intensa na região sul da bacia, no trecho conhecido como Araguari. Os dados de vazão natural na UHE de Itumbiara mostraram que o comportamento desse parâmetro acompanha os valores de precipitação, com tempo de resposta em torno de um dia.

A bacia do rio Tocantins, diferentemente das demais bacias estudadas, foi influenciada pelo episódio ZCAS que ocorreu nos dias 04 a 07 de fevereiro de 2002. Entretanto, assim como na bacia do rio Paranaíba, devido a localização em uma região com grande atividade convectiva, foram registrados valores de precipitação em praticamente todos os dias do mês estudado, com exceção dos dias 23 e 24. A vazão natural na UHE de Serra da Mesa apresentou maiores valores no início do mês, decaindo depois do dia 15, seguindo o mesmo padrão observado na precipitação.

Pode-se concluir também que um mesmo evento ZCAS acarreta diferentes impactos, por exemplo, na vazão gerada pela precipitação associada a esse fenômeno em bacias hidrográficas distintas, dependendo, entre outros, da área e dos tipos de solo das bacias e do local, duração e intensidade da precipitação.

Outras características importantes da influência da ZCAS em bacias hidrográficas dizem respeito à vazão e à operação de usinas hidrelétricas. Durante um evento ZCAS, a vazão permanece praticamente constante devido a precipitação decorrente do fenômeno meteorológico. Essa precipitação que persiste por alguns dias influencia ainda na operação e na manutenção do reservatório. Quando o nível do reservatório encontra-se próximo ao limite máximo e a previsão do tempo indica a ocorrência de precipitação nos dias seguintes, é necessário o vertimento da barragem, considerando o volume de precipitação previsto tanto a montante quanto a jusante do reservatório. Essa medida é necessária para que UHE opere dentro dos limites de segurança e para evitar prejuízos em cidades a jusante do reservatório.

Além disso, esses resultados constituem em uma ferramenta importante sobre futuros trabalhos relacionados com essas bacias e nos impactos decorrentes da ZCAS em demais áreas.

Entretanto, algumas hipóteses precisam ser melhor estudadas e novos procedimentos podem ser adotados, como:

- melhorar a metodologia utilizada, especialmente para o cálculo da precipitação média nas bacias;
- analisar outro evento ZCAS, já que no mês de fevereiro de 2002, mesmo tendo ocorrido dois eventos ZCAS, outros fenômenos meteorológicos atuaram nas regiões sudeste e centro-oeste do país, causando precipitação intensa nas bacias, dificultando na análise da influência da ZCAS nas bacias hidrográficas estudadas;
- estudar os fatores fisiográficos das bacias que podem influenciar no escoamento superficial, como o tipo e uso do solo, a declividade do terreno, permeabilidade do solo, entre outros;
- tentar analisar com maiores detalhes a umidade do solo nas bacias, já que este é um fator importante no escoamento superficial; quanto mais úmido estiver o

solo, mais rápido inicia-se o escoamento; como a ZCAS é um fenômeno que causa precipitação por alguns dias consecutivos, no final de um evento, o solo estará mais úmido do que no início do mesmo, desconsiderando alguma precipitação precedente ao evento ZCAS, gerando escoamentos mais rapidamente; com isso, o tempo de resposta da vazão pode ser diferente em uma bacia hidrográfica durante um mesmo evento ZCAS;

- analisar melhor a intensidade e duração da precipitação, já que quanto maior a intensidade da precipitação, mais rápido o solo atinge a sua capacidade de infiltração; no caso de precipitação com intensidade constante, quanto maior a duração, maior será o escoamento;
- estudar casos de enchentes nas bacias e tentar relacioná-los com episódios de ZCAS;
- realizar estudos buscando relacionar o tempo de resposta da vazão à intensidade, duração e localização da precipitação na bacia de interesse;
- comparar os efeitos causados pela precipitação, em bacias hidrográficas, decorrente de eventos ZCAS, com outros fenômenos meteorológicos, como, por exemplo, frentes frias.

CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, C. B., 1993, Essentials of Meteorology – An Invitation to the Atmosphere, 437p.

ANA - Agência Nacional de Águas, 2003, disponível em http://www.ana.gov.br, acessada em 05 de setembro de 2003.

BARBOSA, M. C. D., 2000, *"Geoestatística Aplicada a Dados de Radar Meteorológico"*, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

BISWAS, A. K., 1970, History of Hidrology, North Holland Publishing Company, pp 336.

BRASIL, 1997, Leis, Política Nacional de Recursos Hídricos: Lei n. 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Brasília, Diário Oficial da União de 09 de janeiro de 1997.

CARVALHO, L.M.V., JONES, C., LIEBMANN, B., 2004, "The South Atlantic Convergence Zone: Intensisty, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall", *Journal of Climate*, v.17, pp 88-108.

CASARIN, D. P., KOUSKY, V. E., 1986, "Anomalias de Precipitação no Sul do Brasil e Variações na Circulação Atmosférica", *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.1, pp 83-90.

CEIVAP – Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, 2001, *Bacia do Rio Paraíba do Sul: Livro da Bacia*, Brasília, Ministério do Meio Ambiente, Agência Nacional de Águas.

CLIMANÁLISE – Boletim de Monitoramento e Análise Climática, 2002, v.17, n.2, Fevereiro.

CLIMANÁLISE – Boletim de Monitoramento e Análise Climática, 2003, v.18, n.2, Fevereiro.

COELHO, D.G., JUSTI DA SILVA, M.G.A., SANTOS, I.A., SILVA, A. S., TOZZI, L.R.L., 2004, "Teste de Diferentes Parametrizações do Modelo MM5 em um Caso de ZCAS". *In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza, CE.

CORTESÃO, J., 1968, *Historiador da Expansão Portuguesa*, Rio de Janeiro, Edições Livros de Portugal.

CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, 2004a, Revista Climanálise, disponível em http://www.cptec.inpe.br/clima, acessada em 10 de janeiro de 2004.

CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, 2004b, imagem de satélite disponível em http://satelite.cptec.inpe.br/, acessada em 15 de julho de 2004.

CRAWFORD, N.H., LINSLEY, R.K., 1966, Digital simulation in hydrology, Stanford Watershed Model IV, Department of Civil Engineering, Stanford University, Technical Report 39.

DAVIS, E. G., 2000, Estudo de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro, 2ª ed revista e ampliada. Brasília, Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, disponível em http://www.dhn.mar.mil.br/chm/meteo, acessada em 10 de março de 2004.

EAGLESON, P., 1986, "The emergence of global-scale hydrology", *Water Resources Research*, 22, 46S-58S.

EVANS, J. M., 2003, "The Water Cycle", U.S. Geological Survey -USGS, Colorado District.

FIGUEROA, S. N., 1997, *"Estudo de Sistemas de Circulação de Verão sobre a América do Sul e suas Simulações com Modelos Numéricos"*, Tese de Doutoramento, INPE, São José dos Campos, SP.

FIGUEROA, S. N., SATYAMURTY, P., SILVA DIAS P. L., 1995, "Simulations of the Summer Circulation over the South American Region with an Eta Coordinate Model", *Journal of Atmospheric Sciences*, v.52, pp 1573-1584.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., 2003a, Dados históricos de precipitação e localização dos postos pluviométricos para as bacias dos rios Paraíba do Sul, Grande, Paranaíba e Tocantins.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., 2003b, Dados de vazão natural durante o mês de fevereiro de 2002 para as usinas hidrelétricas de Funil, Furnas, Itumbiara e Serra da Mesa.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., 2003c, Imagens do satélite GOES-8.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., 2004, disponível em http://www.furnas.com.br, acessada em 15 de julho de 2004.

GANDU, A., W., 1993, "*Modelagem Numérica da Resposta Troposférica Regional a Fontes Tropicais de Calor*", Tese de Doutorado, DCA, IAG-USP, São Paulo, SP.

GRIMM, A. M, 1992, "*Influência Remota de Fontes Tropicais Anômalas de Calor*", Tese de Doutorado, DCA, IAG-USP, São Paulo, SP.

GRIMM, A. M., SILVA DIAS, P. L., 1995, "Analysis of Tropical-Extratropical Interactions With Influence Functions of a Barotropic Model", *Journal of Atmospheric Sciences*, v.52, pp 3538-3555.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2002, Relatório de Monitoramento das Águas Superficiais na Bacia do Rio Grande em 2002, disponível em http://www.igam.mg.gov.br/, acessada em 01 de agosto de 2004.

KAYANO, M. T., 1996, "Oscilações Intrasazonais ou oscilação de 30-60 dias", Climanálise especial de 10 anos, CPTEC/INPE, São José dos Campos, SP.

KODAMA, Y., 1992, "Large-scale Commom Features of Subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones", *Journal Meteorological Society of Japan*, v.70, 813-835.

KODAMA, Y., 1993, "Large-scale Commom Features of Subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part II: Conditions of the

Circulations for Generating the STCZs", *Journal Meteorological Society of Japan*, v.71, 581-610.

LAMMA – Laboratório de Modelagem de Processos Marinhos e Atmosféricos, 2003, "*Curso Básico de Meteorologia e Oceanografia*", Apostila do Curso de Extensão fornecido pelo LAMMA/Departamento de Meteorologia/UFRJ.

LIBOS, M. I. P. C., 2002, "*Modelagem da Poluição Não Pontual na Bacia do Rio Cuiabá Baseada em Geoprocessamento*", Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

LIMA, S. M., 2004, "*Avaliação de Duas Parametrizações de Difusão Turbulenta em um Evento de Linha de Instabilidade Utilizando o Modelo Atmosférico RAMS*", Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

LOU, A. P. F., 2004, "*Modelagem Geoestatística Aplicada à Integração entre Dados de Postos Pluviométricos e Radar Meteorológico*", Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

MARTON, E., 1994, "*Efeito da resolução espacial nas simulações numéricas de fontes de calor na América do Sul*", Tese de Mestrado, IAG/USP, São Paulo, SP.

MARTON, E., 2000, "*Oscilações Intrasazonais Associadas a Zona de Convergência do Atlântico Sul no Sudeste Brasileiro*", Tese de Doutorado, IAG/USP, São Paulo, SP.

MENEZES, W. F., LIMA, D.O., 2004, *Sistema Integrado de Simulação Numérica da Atmosfera e de Avaliação de Prognósticos de Tempo, para Bacia do Rio Paraíba do Sul Parte V: Aspectos Observacionais e Numéricos do Caso de Chuvas Intensas de Fevereiro de 2002*, In: Relatório Final do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor Elétrico Brasileiro: Sistema Integrado de Simulação Numérica da Atmosfera e de Avaliação de Prognósticos de Tempo, para a Bacia do Rio Paraíba do Sul., Furnas Centrais Elétricas S.A., Rio de Janeiro.

NOBRE, P., MALAGUTTI, M., CHAVES, R. R., SANCHES, M. B., 2002, "Modulações da ZCAS pelas Temperaturas da Superfície do Mar no Atlântico Sudoeste". *In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, pp 3520-3527, Foz do Iguaçu, PR.

O'CONNELL, P.E., TODINI, E., 1996, "Modeling of rainfall, flow and mass transport in hydrological systems: an overview", *Journal of Hydrology*,175, 3-16.

OLIVEIRA, L. C. K., 2003, *"Papel do Monitoramento e da Previsão de Vazões no Gerenciamento de Bacias Hidrográficas"*, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

OLIVEIRA, A. S., NOBRE, C. A., 1986, "Interações entre Sistemas Frontais e a Convecção na Amazônia. Parte I: Aspectos Climatológicos". In: *IV Congresso Brasileiro de Meteorologia* , 311-316, 4, Brasília.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2000, *Hidrologia Operacional – Submódulo 6: Disponibilização de Informações Meteorológicas e Climáticas*, disponível em http://www.ons.org.br, acessada em 10 de junho de 2004.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2002a, *Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias – Bacia do Rio Paraíba do Sul (Ciclo 2002-2003)*, disponível em http://www.ons.org.br, acessada em 10 de junho de 2004.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2002b, *Inventário das Restrições Operativas Hidráulicas dos Aproveitamentos Hidrelétricos*, disponível em http://www.ons.org.br , acessada em 10 de junho de 2004.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2003, *Manual de Procedimentos da Operação – Submódulo 10.13: Operação de Reservatórios*, disponível em http://www.ons.org.br , acessada em 10 de junho de 2004.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2004, *Vazões Médias Mensais nos Aproveitamentos Hidrelétricos Período de 1931 a 2001 – Anexo*, disponível em http://www.ons.org.br , acessada em 10 de junho de 2004.

RAY, P. S., 1986, Mesoscale Meteorology and Forecasting, American Meteorology, Boston, pp 793.

RIVIÈRE, J. W. M., 1989, "Threats to the World's Water", *Scientific American*, Special Issue - Managing Planet Earth.

ROBERTSON, A. W., MECHOSO, C. R., 2000, "Interannual and Interdecadal Variability of the South Atlantic Convergence Zone", *American Meteorology Society*, pp 2947-2957.

ROCHA, V. F., 1999, *"Choque das Águas"*, Monografia, MBA/Energia Elétrica, Instituto de Economia/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

SANCHES, M. B., 2002, *"Análise Sinótica da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) Utilizando-se a Técnica de Composição"*, Tese de Mestrado, INPE, São José dos Campos, SP.

SEABRA, M. S., 2002, *"Balanço de Calor na Zona de Convergência do Atlântico Sul e suas Relações com a Circulação Atmosférica"*, Monografia submetida ao Departamento de Meteorologia, CCMN/UFRJ.

SETTI, A. A., WERNECK LIMA, J. E. F., CHAVES, A. G. M., PEREIRA, I. C., 2001, *Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos*, 2ª. ed Brasília. Agência Nacional de Energia Elétrica; Agência Nacional de Águas.

SIMEGO - Secretaria do Estado de Goiás de Ciência e Tecnologia - Núcleo de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2003, disponível em http://www.simego.sectec.go.gov.br/, acessada em 23 de julho de 2003.

SILVA DIAS, P. L., 1995, *"A Zona de Convergência do Atlântico Sul"*, Universidade de São Paulo, SP.

SILVA DIAS, P. L., CAPLAN, P. e KOUSKY, V., 1988, "As Chuvas Intensas de Fevereiro de 1988: Circulação Global e Previsibilidade". *In: V Congresso Brasileiro de Meteorologia*, pp 6-10, 5, Rio de Janeiro.

SILVA DIAS, P. L., ETCHICHURY, P., SCOLAR, J., PEREIRA FILHO, A., SATYAMURTI, P., DIAS, M. F., GRAMMELSBACHER, I., GRAMMELSBACHER, E., 1991, "As Chuvas de Março de 1991 na Região de São Paulo". *Climanálise*, pp 44-59, v. 6, n.5, CPTEC/INPE, São José dos Campos, SP.

SILVEIRA, C. A. C., MEJIA, L., FERREIRA, R. S. A., GUILHON, L.G.F., SILVA, O. B., FREITAS, M. A. V., 1999, "Água e Energia Elétrica", In: Freitas, M. A. V.

(ed.), *O Estado das Águas no Brasil*. Capítulo 3, Brasília, DF.: ANEEL, SIH; MMA, SHR; MME.

SURFER – Surface Mapping System, version 7, Golden Software Inc, 1999.

VIANELLO, R. L., ALVES, A. R., 2000, "*Meteorologia Básica e Aplicações*", Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 449p.

XAVIER, L. N., R., 2002, *Análise da Incerteza Causada pela Representação da Precipitação no Modelo Topmodel*, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

ANEXOS

APÊNDICE A

PERÍODOS DE OCORRÊNCIA DE ZCAS

Tabela A.1: Períodos de ocorrência de ZCAS entre os anos de 1980 e 2000 para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Quadrados hachurados indicam os períodos de ocorrência de ZCAS (Fonte: SANCHES, 2002).

A	M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
80	J																															
	F																															
80	D																															
81	J																															
	F																															
81	D																															
82	J																															
	F																															
82	D																															
83	J																															
	F																															
83	D																															
84	J																															
	F																															
84	D																															
85	J																															
	F																															
85	D																															
86	J																															
	F																															
86	D																															
87	J																															
	F																															
87	D																															
88	J																															
	F																															
88	D																															
89	J																															
	F																															
89	D																															
90	J																															
	F																															

Tabela A.1: Períodos de ocorrência de ZCAS entre os anos de 1980 e 2000 para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Quadrados hachurados indicam os períodos de ocorrência de ZCAS (Fonte: SANCHES, 2002).

A	M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
90	D												■	■	■	■	■	■	■	■	■	■										
91	J					■	■	■	■				■	■	■	■	■	■	■	■								■	■	■	■	■
	F	■	■	■																												
91	D	■	■	■	■	■																										
92	J					■	■	■	■	■	■					■	■	■	■	■	■											
	F																															
92	D		■	■	■	■	■	■	■	■	■																				
93	J						■	■	■	■	■	■																				
	F																						■	■	■	■	■	■				
93	D																		■	■	■	■	■	■	■					■	■	■
94	J	■	■	■	■	■	■				■	■	■	■	■																	
	F																															
94	D															■	■	■	■	■												
95	J																															
	F	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■										
95	D				■	■	■	■	■	■	■			■	■	■	■															
96	J	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					■	■	■	■	■	■										
	F			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
96	D																															
97	J		■	■	■	■	■	■	■												■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	F																															
97	D								■	■	■	■																				
98	J																															
	F												■	■	■	■	■								■	■	■	■	■			
98	D																															
99	J					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■													
	F																						■	■	■	■	■	■	■			
99	D								■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■											
00	J	■	■	■	■	■	■	■	■													■	■	■	■							
	F						■	■	■	■	■	■	■	■																		