

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**APLICABILIDADE EM RECURSOS HÍDRICOS DA
PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO DE LONGO PRAZO
NO NORDESTE DO BRASIL**

Carlos Oliveira Galvão

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre, março de 1999

Apresentação

Este trabalho foi desenvolvido, entre março de 1995 e março de 1999, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sob a orientação do Professor Robin T. Clarke. Parte da pesquisa, ano de 1997, foi realizada na Climatic Research Unit (CRU) da Universidade de East Anglia (UEA), Reino Unido, sob supervisão dos Professores Trevor D. Davies e Phil D. Jones.

Apoio financeiro permanente para realização do programa foi concedido pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), instituição de origem do autor, e pela CAPES, através de bolsas de estudos dos programas PICDT e “doutorado sanduíche no exterior”. A UFRGS apoiou parcialmente a participação em vários eventos científicos.

Gostaria de agradecer o apoio recebido durante a realização deste trabalho de inúmeras pessoas e instituições, além das citadas acima:

- Ao orientador deste trabalho, Robin T. Clarke, que esteve sempre disponível, solícito e foi permanente fonte de estímulo durante todo o desenvolvimento do curso e da tese.
- Aos professores Carlos Tucci, Eduardo Lanna e Alwin Elbern, da UFRGS, e Trevor Davies e Phil Jones, da CRU/UEA, pelas suas contribuições ao trabalho.
- Aos professores e funcionários do IPH, especialmente Lygia Campos, Nadir Solari, Jussara Silva e Jussara Barbieri.
- Ao Departamento de Engenharia Civil da UFPB, ao qual estou vinculado, nas pessoas dos seus chefes Ailton Diniz e Milton Chagas Filho.
- Às instituições e pessoas que forneceram dados, informações e bibliografia, essenciais para a consecução da pesquisa: Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), Departamento de Ciências Atmosféricas da UFPB (DCA), Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco (SECTMA), Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto da

Paraíba (LMRS-PB), Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), Hadley Centre for Climate Prediction and Reseach e European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF); Carlos Alexandre Silveira (DNAEE), Edith Negromonte (SUDENE), Ricardo Pereira da Silva, Anna Bárbara Melo e Patrice Oliveira (LMRS-PB), Paulo Frassinete Araújo Filho (SECTMA), Joana D'Arc Medeiros, Néelson César Santos e Ueliton Pinheiro (EMPARN), Carlos Repelli e Brabo Alves (FUNCEME), Javier Tomasela (INPE), Laudízio Diniz (CAGEPA), JoséIVALDO Barbosa de Brito, Bernardo Barbosa da Silva e Manoel Francisco Gomes Filho (DCA/UFPB), Vicente de Paulo Araújo (UFPB), Andrew Colman e Mike Davey (Hadley Centre), Tim Palmer e Cedo Brankovic (ECMWF).

- Aos colegas e alunos da Área de Engenharia de Recursos Hídricos da UFPB, particularmente a Raulino Farias de Brito, Raimundo Sérgio Góis, Gledsneli Lins, Vajapeyam Srinivasan e Eduardo Enéas de Figueiredo.
- Aos colegas da UFRGS e da UEA, pelo apoio e companheirismo.
- Aos meus amigos, que foram os mais próximos colaboradores deste trabalho.
- Minha família foi suporte incondicional e permanente. Agradeço em especial a Márcia e Ana Rita.

A meus pais,

Stênio e Ana Rita

Resumo

APLICABILIDADE EM RECURSOS HÍDRICOS DA PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO DE LONGO PRAZO NO NORDESTE DO BRASIL.

Recentemente, significativo progresso tem sido alcançado no desenvolvimento de sistemas de previsão de precipitação de longo prazo no horizonte sazonal. Os métodos para aproveitamento, em recursos hídricos, desses avanços na previsão de precipitação sazonal ainda não estão consolidados. A principal razão é a diferença de escalas, espacial e temporal, entre os processos que controlam o clima no horizonte sazonal e os processos hidrológicos relevantes ao manejo de recursos hídricos. Este trabalho propõe um arcabouço metodológico para o aproveitamento, em recursos hídricos, da previsão de precipitação sazonal, especificamente no norte do Nordeste do Brasil. Os métodos que formam este arcabouço foram aplicados em uma bacia hidrográfica típica da sub-região norte do Nordeste. As previsões de precipitação foram obtidas de modelos representativos das duas principais classes atualmente utilizadas em regiões tropicais: um modelo de circulação global atmosférica e um estatístico/empírico. Produziram-se previsões de necessidade de irrigação e de volume escoado, empregando um método de reamostragem estatística, que utiliza a previsão probabilística de precipitação e produz previsões também probabilísticas. Aplicou-se a previsão de volume escoado na operação de um reservatório através de programação dinâmica. Adicionalmente foi proposto um modelo alternativo, baseado em controle difuso, para a operação do reservatório. Finalmente, foram empregadas medidas de desempenho das previsões e da operação do reservatório que avaliassem a viabilidade do uso da previsão de precipitação sazonal a essas aplicações. Comprovou-se que os métodos são adequados às condições estudadas e, provavelmente, a outras regiões tropicais com características climáticas semelhantes. Viáveis também são as previsões e suas aplicações em recursos hídricos.

Palavras-chaves: previsão sazonal, operação de reservatórios, irrigação.

Abstract

APPLICABILITY OF LONG-TERM RAINFALL FORECASTS IN WATER RESOURCE MANAGEMENT IN THE BRAZILIAN NORTHEAST.

There has recently been significant progress in the development of long-term rainfall forecasts, up to the seasonal horizon. Methods for exploiting these advances in seasonal rainfall forecasts for water resource management have not yet been established. The principal reason is the difference in scale, both spatial and temporal, between processes governing seasonal climate and the hydrological processes that are basic to water resource management. This thesis proposes a framework through which forecasts of seasonal rainfall can be used in water resource management, specifically in the northern part of the Brazilian Northeast. Methods within this framework were applied to a drainage basin typical of the region. Rainfall forecasts were obtained from two models representing the two main classes presently used for tropical regions: one a model of global atmospheric circulation, the other a statistical-empirical model. Forecasts were derived of irrigation need and flow volume using a statistical re-sampling method which used the probabilistic forecast of rainfall to yield forecasts that are also probabilistic. These forecasts of flow volume were used in the operation of a reservoir by means of dynamic programming. An alternative model for reservoir operation, based on fuzzy control, was also proposed. Finally, measures of forecast performance and of reservoir operation were used to evaluate the viability of using seasonal rainfall forecasts for such applications. The methods were shown to be appropriate both for the conditions under study and, probably, for other tropical regions with similar climate. The forecasts and their use for water resource management are also viable.

Keywords: seasonal forecasting, reservoir operation, irrigation.

Sumário

APRESENTAÇÃO	i
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
SUMÁRIO	vi
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	4
2. PREVISÃO DE LONGO PRAZO E MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS	5
2.1. PREVISÃO HIDROMETEOROLÓGICA DE LONGO PRAZO	5
2.2. PREVISÃO DE LONGO PRAZO E OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS	8
2.3. PREVISÃO DE LONGO PRAZO E PLANEJAMENTO AGRÍCOLA	10
2.4. PREVISÃO DE LONGO PRAZO E MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS NO NORDESTE	11
2.4.1. Regime climático	11
2.4.2. Mecanismos de geração de precipitação	13
2.4.3. Previsão de precipitação sazonal	14
2.4.4. Manejo de recursos hídricos	18
3. METODOLOGIA	20
3.1. SÍNTESE	20
3.2. DADOS	23
3.2.1. Registros climáticos e hidrológicos no Nordeste	23
3.2.2. Delimitação da região de estudo	23
3.2.3. Precipitação	25
3.2.4. Volume escoado	29
3.2.5. Evaporação e evapotranspiração	30
3.2.6. Temperaturas da superfície do mar	32
3.2.7. Reservatório Coremas-Mãe D'Água	33
3.3. TRANSFERÊNCIA DA PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO PARA OUTRAS VARIÁVEIS ATRAVÉS DE REAMOSTRAGEM	34
3.4. PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO	38

3.4.1. Modelo de circulação global	38
3.4.1.1. Considerações gerais	38
3.4.1.2. Simulações de previsões sazonais do MCG do ECMWF	42
3.4.1.3. Processamento da previsão de precipitação	46
3.4.1.4. Desagregação espacial da precipitação	46
3.4.2. Análise discriminante linear	48
3.5. PREVISÃO DE VOLUME ESCOADO	49
3.5.1. Considerações gerais	49
3.5.2. Previsão de volume a partir da precipitação usando reamostragem	50
3.5.3. Previsão de volume via ADL a partir da circulação oceano-atmosfera	51
3.6. OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO	52
3.6.1. Considerações gerais	52
3.6.2. Formulação do problema de operação	53
3.6.3. Operação por programação dinâmica	54
3.6.4. Operação por controle difuso	57
3.7. NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO	63
3.8. AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1. PREVISIBILIDADE DA PRECIPITAÇÃO	69
4.1.1. Previsão via MCG	70
4.1.1.1. Desagregação espacial da célula para a bacia	70
4.1.1.2. Análise da previsibilidade	75
4.1.2. Previsão via ADL	82
4.1.3. Subjetividade na produção e combinação das previsões	87
4.2. PREVISIBILIDADE DO VOLUME ESCOADO	89
4.2.1. Extensão da série de vazão	90
4.2.2. Análise da previsibilidade	92
4.3. APLICABILIDADE A OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS	99
4.4. PREVISIBILIDADE DA NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO	111
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	119
5.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES	119
5.2. DA POSSIBILIDADE DA PREVISÃO DE VOLUME ESCOADO	120
5.3. DA ESCALA DAS PREVISÕES	121
5.4. DA METODOLOGIA	121
5.5. DA APLICABILIDADE A RECURSOS HÍDRICOS	122
5.6. RECOMENDAÇÕES	123
REFERÊNCIAS	125
A. ANEXO	146

A.1. TEORIA DOS CONJUNTOS DIFUSOS.....	146
A.2. O MODELO TANK	151
A.3. DADOS EMPREGADOS PELA ANÁLISE DISCRIMINANTE LINEAR.....	152

Lista de tabelas

Tabela 2.1. Estudos sobre mecanismos climáticos atuantes no norte-NEB.	15
Tabela 2.2. Estudos sobre previsão de precipitação sazonal no norte-NEB.	16
Tabela 3.1. Postos pluviométricos da célula do MCG sobre a bacia do Piancó.	27
Tabela 3.2. Postos pluviométricos da bacia do Piancó.	27
Tabela 3.3. Características das séries de precipitação sazonal (fevereiro-maio).	29
Tabela 3.4. Características das séries de precipitação sazonal (março-junho).	30
Tabela 3.5. Características dos postos evaporimétrico (Evp) e fluviométrico (Flu) da bacia do Piancó.	30
Tabela 3.6. Características das séries de volume escoado sazonal (fevereiro-maio) na bacia do Piancó.	31
Tabela 3.7: Exemplo de regra de operação para o reservatório Engenheiro Arcoverde, na Paraíba.	57
Tabela 3.8. Regras de inferência para <i>MNC</i> .	60
Tabela 3.9. Ciclo vegetativo de culturas de subsistência no norte-NEB.	63
Tabela 4.1. Previsão de precipitação sazonal (março-junho), obtida de cada membro da integração do MCG, e sua média.	77
Tabela 4.2. Avaliação da previsão categorizada probabilística de precipitação sazonal (março-junho).	78
Tabela 4.3. Previsão de anomalias normalizadas <i>I</i> de precipitação sazonal (março-junho).	79
Tabela 4.4. Avaliação das previsões categorizadas probabilísticas para a precipitação sazonal (fevereiro-maio) usando ADL.	84
Tabela 4.5. Coeficientes de correlação entre vazões médias mensais e sazonais observadas e calculadas pelo modelo <i>Tank</i> para a bacia do Piancó.	90
Tabela 4.6. Média e desvio padrão de vazões médias mensais observadas e calculadas pelo modelo <i>Tank</i> para a bacia do Piancó, para o período 1964-88 (valores em mm).	91
Tabela 4.7. Avaliação das previsões categorizadas probabilísticas para o volume escoado sazonal (fevereiro-maio) na bacia do Piancó.	93

Tabela 4.8. Coeficientes de correlação para previsões <i>pontuais</i> para o volume escoado sazonal (fevereiro-maio) na bacia do Piancó.	94
Tabela 4.9. Avaliação da operação do reservatório Coremas-Mãe D'Água em termos de escassez relativa.	101
Tabela 4.10. Avaliação da operação do reservatório Coremas-Mãe D'Água em termos de caracterização das falhas.	102
Tabela 4.11. Características das séries de datas de semeadura para o feijão na bacia do Piancó.	111
Tabela 4.12. Avaliação das previsões categorizadas probabilísticas para a data de semeadura do feijão na bacia do Piancó.	112
Tabela 4.13. Coeficientes de correlação para previsões <i>pontuais</i> para a data de semeadura do feijão na bacia do Piancó.	112
Tabela 4.14. Características das séries de necessidade de irrigação para o feijão na bacia do Piancó.	113
Tabela 4.15. Avaliação das previsões categorizadas probabilísticas para a necessidade de irrigação sazonal do feijão na bacia do Piancó.	113
Tabela 4.16. Coeficientes de correlação para previsões <i>pontuais</i> para a necessidade de irrigação sazonal do feijão na bacia do Piancó.	113
Tabela A.1. Exemplo de avaliação de regras de inferência difusa.	148
Tabela A.2. Dados empregados para calibragem dos modelos de ADL.	152
Tabela A.3. Dados empregados para validação dos modelos de ADL.	153

Lista de figuras

Figura 2.1. Sub-regiões climáticas do Nordeste do Brasil.	12
Figura 3.1. Metodologia do trabalho.	22
Figura 3.2. Localização (a) da célula do MCG sobre a bacia do Piancó e dos 17 postos pluviométricos usados para a caracterização da precipitação da célula, e (b) da bacia do Piancó e dos 9 postos pluviométricos usados para a caracterização da precipitação da bacia.	25
Figura 3.3. Comparação das categorias de anomalias normalizadas para volume escoado e precipitação na bacia do Piancó.	51
Figura 3.4. Algoritmo simplificado da PD.	56
Figura 3.5. Funções de pertinência dos valores (representados por conjuntos difusos) para as variáveis de decisão.	59
Figura 4.1. Precipitação sazonal para março-junho (expressa em mm) na célula do MCG sobre a bacia do Piancó.	71
Figura 4.2. Anomalias de precipitação sazonal para março-junho na célula do MCG sobre a bacia do Piancó.	72
Figura 4.3. Topografia regional na célula do MCG sobre a bacia do Piancó.	73
Figura 4.4. Séries temporais de precipitação sazonal (março-junho) da célula e da bacia do Piancó (1911-88).	73
Figura 4.5. Regressão linear entre precipitação sazonal na célula e na bacia do Piancó.	74
Figura 4.6. Relação entre precipitação sazonal (março-junho) na célula e na bacia do Piancó.	75
Figura 4.7. Comparação entre o total precipitado sazonal (março-junho) observado e previsto pelo MCG do ECMWF.	76
Figura 4.8. Séries temporais de precipitação sazonal (fevereiro-maio) regional e da bacia do Piancó (1912-88).	83
Figura 4.9. Previsão categorizada probabilística de precipitação sazonal (fevereiro-maio) na bacia do Piancó usando ADL.	86
Figura 4.10. Parâmetros obtidos na calibragem do modelo <i>Tank</i> mensal para a bacia do Piancó, utilizando dados do período 1964-80.	90
Figura 4.11. Comparação entre vazões médias sazonais observadas e calculadas pelo modelo <i>Tank</i> para a bacia do Piancó, no período de observação (1964-88).	91

- Figura 4.12. Resíduos mensais – diferenças entre a vazão observada e a vazão calculada pelo modelo *Tank* – para a bacia do Piancó no período 1964-88. 92
- Figura 4.13. Previsão categorizada probabilística de volume escoado sazonal (fevereiro-maio) para a bacia do Piancó na bacia do Piancó obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *para a bacia do Piancó* via ADL. 96
- Figura 4.14. Previsão categorizada probabilística de volume escoado sazonal (fevereiro-maio) para a bacia do Piancó usando ADL. 97
- Figura 4.15. Previsões pontuais de volume escoado sazonal (fevereiro-maio) para a bacia do Piancó, obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *para a bacia do Piancó* via ADL. 98
- Figura 4.16. Previsões pontuais de volume escoado sazonal (fevereiro-maio) para a bacia do Piancó, obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *perfeitas*. 98
- Figura 4.17. Categorias observadas de precipitação e volume escoado sazonais (fevereiro-maio) na bacia do Piancó. 100
- Figura 4.18. Comportamento do reservatório Coremas-Mãe D'Água durante o período 1980-85. 104
- Figura 4.19. Comportamento do reservatório Coremas-Mãe D'Água durante o período 1947-60. 105
- Figura 4.20. Cenários de previsão de volumes afluentes mensais ao reservatório Coremas-Mãe D'Água, para o período 1980-85. 107
- Figura 4.21. Comportamento do reservatório Coremas-Mãe D'Água durante o período 1980-85, operado por controle difuso. 108
- Figura 4.22. Comportamento do reservatório Coremas-Mãe D'Água durante o período 1980-85, operado por programação dinâmica. 109
- Figura 4.23. Previsão categorizada probabilística de data de semeadura para o feijão na bacia do Piancó, obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *perfeitas* via ADL. 116
- Figura 4.24. Previsões pontuais de data de semeadura para o feijão na bacia do Piancó, obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *perfeitas* via ADL. 117
- Figura 4.25. Previsões pontuais de necessidade de irrigação sazonal para o feijão na bacia do Piancó, obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *para a bacia* via ADL. 117
- Figura 4.26. Previsão categorizada probabilística de necessidade de irrigação para o feijão na bacia do Piancó, obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *para a bacia* via ADL. 118
- Figura A.1. Variável lingüística *estação de chuvas*. 147
- Figura A.2. Procedimento de *fuzificação*. 148

Figura A.3. Parâmetros para inferência da estação de chuvas.	149
Figura A.4. Resultado da inferência da estação de chuvas.	149
Figura A.5. Configuração do modelo <i>Tank</i> mensal para a bacia do Piancó.	151

1. Introdução

1.1. Caracterização do problema

Nas últimas décadas, novos sistemas de previsão meteorológica têm sido desenvolvidos, testados e operacionalizados, como radar, satélite e modelos numéricos de tempo. A maioria deles é utilizada para previsões de curto e médio prazo (de algumas horas a uma semana de antecedência), tendo alcançado notáveis progressos quando associados a modelos hidrológicos de previsão de vazão, principalmente na operação de sistemas de recursos hídricos em tempo real.

Mais recentemente, significativo progresso tem sido alcançado também no desenvolvimento de sistemas de previsão meteorológica de longo prazo (uma semana a alguns meses de antecedência). Programas de aquisição de dados atmosféricos e oceânicos têm fornecido informações inéditas para construção de novas hipóteses sobre os mecanismos climáticos. O fenômeno *El Niño – Oscilação Sul* e as conexões climáticas em escala global passaram a ser melhor caracterizados. Novos modelos de previsão destes processos foram propostos. Supercomputadores permitem avaliar os modelos de circulação global, utilizando as novas bases de dados, e sua capacidade de reproduzir o clima atual e um clima futuro sob o impacto do efeito estufa. A modelagem hidrológica distribuída e os sistemas de geoprocessamento contribuem para a integração de dados.

Nas regiões tropicais, os mecanismos oceânicos e atmosféricos que determinam a maior parte da variabilidade climática interanual já estão razoavelmente caracterizados, dando origem a diversos métodos de previsão de longo prazo da precipitação. Algumas regiões têm recebido maior atenção dos pesquisadores, por apresentarem maior previsibilidade ou conexões com a variabilidade climática em outras regiões do planeta. Entre estas regiões estão o Nordeste do Brasil, o Sahel, o leste e o sul da África, partes da Índia e da Austrália. Os resultados para elas obtidos são importantes não apenas para aplicação local, mas também funcionam como referência comparativa no contexto amplo da pesquisa sobre variabilidade climática global.

Esses estudos usualmente tentam explicar e prever o comportamento da precipitação, principal variável característica do regime climático, nas principais estações chuvosas do ano, normalmente bem demarcadas nas regiões tropicais. À precipitação total acumulada na estação chuvosa (“precipitação sazonal”) têm-se atribuído influência de fatores atmosféricos e oceânicos de larga escala, como variações na temperatura dos oceanos. Esse tipo de previsão tem sido denominado de “sazonal”, “climática”, “climática de curto prazo”, “da variabilidade interanual”, “de longo prazo”. Neste trabalho adotam-se os termos “sazonal” ou “de longo prazo”. Métodos estatísticos ou assemelhados (regressão, métodos multivariados, análise de periodicidades, redes neurais, entre outros), dinâmicos (modelos de circulação global atmosférica), ou combinação deles, têm sido empregados nesta tarefa. A maioria produz previsões entre um e três meses antes da estação chuvosa, que se referem a todo o período da estação – três ou quatro meses – e a toda uma região. As previsões podem eventualmente ser realizadas para escalas temporal e espacial mais detalhadas, ou com maior antecedência, mas a maioria dos autores reconhece que nestes casos se verifica grande perda da capacidade preditiva.

Os métodos para aproveitamento, em recursos hídricos, desses avanços na previsão de precipitação sazonal, ao contrário da previsão de curto prazo, ainda não estão consolidados. A principal razão é a diferença de escalas, espacial e temporal, entre os processos que controlam o clima no horizonte sazonal e os processos hidrológicos relevantes ao manejo de recursos hídricos. Outra limitação é a não disponibilidade, na maioria das regiões tropicais, de registros climáticos e hidrológicos de duração, densidade espacial e qualidade adequadas.

O Nordeste do Brasil é uma região cuja precipitação sazonal já está sendo prevista de modo operacional. A partir dos meses que antecedem a estação chuvosa, meteorologistas pertencentes aos centros de previsão da região reúnem-se regularmente para avaliar o quadro climático. Previsões produzidas em diversos centros de pesquisa nacionais e internacionais, através de métodos estatísticos e modelos de circulação global, são analisadas e consolidadas em um prognóstico de consenso.

Circunstâncias políticas e institucionais tornam a sociedade nessa região extremamente vulnerável à variabilidade do clima, o que tem, historicamente, justificado esforços em pesquisa e desenvolvimento tecnológico com objetivo de redução dessa vulnerabilidade. A atividade agrícola é muito dependente do regime

climático na escala sazonal, assim como os sistemas de recursos hídricos, fortemente baseados em reservatórios de acumulação superficial. Como nas outras regiões mencionadas, instrumentos metodológicos para aproveitamento da previsão de precipitação no manejo desses recursos têm sido pouco estudados e utilizados.

A ligação adequada e eficiente entre a produção da previsão meteorológica e sua utilização efetiva no manejo dos recursos hídricos é uma lacuna real, que demanda atenção e é o foco desta tese.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo avaliar a previsão de precipitação sazonal no Nordeste do Brasil e analisar a viabilidade de empregá-la para prever o volume escoado sazonal em bacias hidrográficas e para melhorar o manejo de recursos hídricos. Pode-se detalhá-lo na forma das seguintes questões, ou objetivos específicos:

- É possível prever o volume escoado sazonal usando o conhecimento dos fatores atmosféricos que o controlam, ou usando as previsões de precipitação obtidas com os métodos utilizados correntemente?
- É possível obter as previsões de precipitação e volume escoado na escala de uma bacia hidrográfica, ou somente em escala regional?
- Que métodos são adequados a estas tarefas, considerando que os registros hidrometeorológicos na região são poucos e curtos?
- Como se pode obter medidas da confiança das previsões?
- Quais os ganhos propiciados pelo uso da informação da previsão de precipitação e de volume escoado nas aplicações a operação de reservatórios e a agricultura dependente de chuva?

Este trabalho não pretende comparar métodos de previsão sazonal ou de análise, interpretação ou transferência dessa informação, mas verificar a viabilidade de utilizá-los para aplicações em recursos hídricos. Também não tem intenção de estabelecer o mais alto nível atual de previsibilidade de precipitação ou volume escoado sazonal no Nordeste, tendo em vista a grande variedade de métodos de previsão existentes, mas indicar meios para esse tipo de avaliação e fornecer resultados concretos para as combinações de métodos que foram estudadas.

1.3. Organização do texto

A seguir, apresenta-se o trabalho realizado para perseguir os objetivos propostos, iniciando, no capítulo 2, pela revisão do estado-da-arte dos métodos de previsão de longo prazo e sua aplicação a manejo de recursos hídricos, com ênfase a operação de reservatórios e planejamento agrícola. No mesmo capítulo, revisam-se esses tópicos para o Nordeste do Brasil. A metodologia empregada no trabalho é descrita em detalhes no capítulo 3: a região do Nordeste escolhida para validação da metodologia e os dados utilizados, os métodos selecionados, dentre os existentes, para previsão de precipitação, como transformar essas previsões em volume escoado, como aplicá-las a operação de reservatórios e planejamento agrícola e os critérios de avaliação da previsibilidade e desempenho dos diversos métodos. O capítulo 4 apresenta e discute os resultados da aplicação da metodologia. As conclusões e recomendações estão no capítulo 5.

2. Previsão de longo prazo e manejo de recursos hídricos

2.1. Previsão hidrometeorológica de longo prazo

A previsão meteorológica e hidrológica de longo prazo é importante no planejamento de recursos hídricos por considerar as variações sazonais e interanuais da sua disponibilidade. Especialmente no caso de secas ou cheias excepcionais, dispor desta informação pode levar à preparação antecipada de medidas preventivas contra a calamidade prevista (Wilhite, 1991). Os métodos de previsão de longo prazo são aqui considerados aqueles que tentam explicar e modelar a variabilidade sazonal ou interanual da variável meteorológica ou hidrológica que se quer prever.

Nas regiões extra-tropicais, de clima temperado, o escoamento nos rios depende muitas vezes do derretimento de neve nas montanhas e sua propagação no curso d'água. Assim, previsões de temperatura são as principais entradas para os modelos de previsão de vazão de longo prazo (Shentzis, 1990; Garen, 1992). Alternativamente, a modelagem univariada das séries de vazão também tem sido aplicada com sucesso, com até 12 meses de antecedência (Hirsch, 1981; Smith, 1991; Krstanovic e Singh, 1991a,b; Bender e Simonovic, 1994). Por exemplo, o *National Weather Service* e o *Soil Conservation Service* dos Estados Unidos fornecem previsões para os rios da região oeste do país, para a estação de derretimento de neve, em que resultados de modelos de regressão são avaliados e ajustados pelos hidrólogos responsáveis antes da divulgação (Day, 1985; Krzysztofowicz, 1991; Garen, 1992; Smith *et al.*, 1992).

Nas regiões tropicais, o escoamento depende essencialmente da precipitação, e sua previsibilidade está vinculada à previsibilidade da precipitação e dos processos meteorológicos que a determinam. Recentemente, pesquisas sobre conexões geofísicas têm trazido progressos importantes à previsão de longo prazo em regiões tropicais (Glantz *et al.*, 1991; Hastenrath, 1986, 1990a, 1991, 1995). Estas conexões são ligações de eventos hidrológicos com outras características geofísicas (como certos padrões de circulação atmosférica ou o *El Niño–Oscilação Sul* – ENOS), às vezes separados

especialmente por distâncias em escala continental. Os regimes hidrológicos nas escalas local, de bacia e regional são determinados pelos padrões climáticos de circulação atmosférica de larga escala, latitude, fisiografia regional, geologia, vegetação e uso da terra; os padrões de circulação oceânica e atmosférica de larga escala são determinados pela rotação da terra e pela distribuição de áreas continentais e oceânicas. A análise conjunta dos regimes atmosféricos/oceânicos e hidrometeorológicos (principalmente precipitação) tem sido bastante investigada, através de métodos estatísticos e de modelos de circulação global (MCGs).

As conexões geofísicas têm sido documentadas, entre outras regiões, no Peru (Tapley e Waylen, 1990), Equador (Cadier *et al.*, 1995), Chile (Aceituno e Garreaud, 1994; Brown *et al.*, 1994; Montecinos e Garreaud, 1994); Colômbia (Mesa-Sanchez *et al.*, 1994a,b), Uruguai (Cazes *et al.*, 1994), Amazônia (Molion e Moraes, 1987; Hastenrath, 1990b; Marengo e Hastenrath, 1993; Paiva, 1996; Uvo e Graham, 1998), sul do Brasil (Rao e Hada, 1994; Fontana e Berlato, 1997), Nordeste do Brasil (vide seções 2.4.2 e 2.4.3), Sahel Africano (Folland *et al.*, 1989, 1991; Hulme *et al.*, 1992a; Ward, 1994), leste da África (Hastenrath *et al.*, 1993), sul da África (Hastenrath *et al.*, 1995), Índia (Kumar *et al.*, 1995), Austrália (Kuhnel *et al.*, 1990; Hunt, 1991; Simpson *et al.*, 1993; Cordery, 1997; Piechota *et al.*, 1998), Nova Zelândia (McKerchar e Pearson, 1994; Moss *et al.*, 1994) e Estados Unidos (Redmond e Koch, 1991; Cayan *et al.*, 1993; Woolhiser *et al.*, 1993, 1994; Kahya e Dracup, 1993; Dracup e Kahya, 1994; Guetter e Georgakakos, 1996). Os avanços rapidamente alcançados nesta área e seu impacto nas atividades sócio-econômicas têm imposto a necessidade de sua divulgação e discussão imediata. No momento da escrita deste trabalho, o *Experimental Long-lead Forecast Bulletin* (Experimental, 1998) é o principal fórum com esta finalidade.

Todos os esquemas de previsão deveriam incluir medidas quantitativas de incerteza para cada variável prevista, sendo desejável propagar todas as incertezas conhecidas ou estimadas em todos os parâmetros, coeficientes e entradas (Buras *et al.*, 1991). Nessa linha de raciocínio, em uma série de artigos, Krzysztofowicz e colaboradores advogam o uso da estatística Bayesiana como forma de avaliação da incerteza nos sistemas de previsão hidrometeorológica, propondo um sistema integrado de processamento de previsões de longo prazo, que avalia a incerteza de modo a fornecer ao usuário medidas da habilidade da previsão como subsídio para a tomada de decisão (Krzysztofowicz, 1983, 1986a,b, 1991, 1992; Krzysztofowicz e Watada, 1986; Krzysztofowicz e Reese,

1991). Ainda usando a abordagem Bayesiana, Freer *et al.* (1996) apresentam uma aplicação do método GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*, Beven e Binley, 1992) para estimativa da incerteza em previsão de vazão. Clarke (1994) observa que a necessidade de supor *a priori* uma distribuição de probabilidade para cada parâmetro (multivariada se os parâmetros forem interdependentes) e a subjetividade da escolha destas distribuições constituem empecilhos ao uso da metodologia. Outro modo de qualificar a informação da previsão é classificá-la usando critérios lingüísticos (associados a um conjunto de critérios técnicos quantitativos e qualitativos) do tipo “boa qualidade”, “qualidade razoável” ou “qualidade ruim”. Denoeux *et al.* (1991), por exemplo, advogam o uso de um método baseado em regras para estabelecer a qualidade de previsões quando as causas dos erros são conhecidas mas sua quantificação é difícil. Mais recentemente, Liu *et al.* (1998) produzem intervalos de confiança associados a previsões de precipitação e vazão a partir de preditores climáticos de larga escala, com base nos erros verificados em períodos anteriores do sistema de previsão; o filtro de Kalman é utilizado para atualização dos erros. Croley (1996, 1997) e Briggs e Wilks (1996) empregam reamostragem para estimar distribuições de probabilidade de vazão e umidade do solo utilizando previsões probabilísticas de precipitação.

Além da quantificação adequada da incerteza outros fatores são importantes quando se pensa na interface entre a previsão e a tomada de decisão: o crescimento da incerteza com o aumento da antecedência com a qual as previsões são elaboradas, a frequência ótima de atualização das previsões, e como deve ser expressa a previsão – e a incerteza a ela associada – de modo a ser uma base adequada à tomada de decisão (Krzysztofowicz, 1986a, 1991). Glantz (1982), sobre um caso de erro na estimativa de vazão sazonal nos Estados Unidos, quando se previu vazões bem menores que os níveis realmente observados, analisa vários aspectos relacionados ao impacto da previsão sobre os usuários da água e a sociedade. Entre esses, questiona se os usuários deveriam participar diretamente do processo de previsão, ao lado dos técnicos, e observa que os técnicos encarregados da previsão tendem a difundir a informação em termos mais conservadores (“aumentando” o risco).

Vários autores que descrevem os sistemas operacionais de previsão enfatizam a participação do técnico na interpretação e ajuste dos resultados dos modelos matemáticos de previsão, de modo a tornar a informação mais *realista* ou *razoável* (Krzysztofowicz, 1991; Repelli e Alves, 1994). Algumas vezes as distribuições de

probabilidade utilizadas como representação da incerteza não podem ser estimadas através dos métodos de previsão utilizados. Murphy (1980) propõe a estimativa de *probabilidades subjetivas* pelos próprios técnicos responsáveis pela previsão, baseando-se na experiência: aos resultados de modelos numéricos e estatísticos, era incorporada a experiência dos meteorologistas do *National Weather Service* dos Estados Unidos, que arbitravam então probabilidades de ocorrência de precipitação.

2.2. Previsão de longo prazo e operação de reservatórios

Como um dos objetivos deste trabalho é estimar a afluência a reservatórios e os ganhos proporcionados pela previsão, apresenta-se a seguir um levantamento de como a informação da previsão de longo prazo tem sido utilizada nos modelos de operação de reservatórios. Até recentemente as dificuldades eram tantas na previsão de longo prazo que os modelos de operação de reservatórios raramente consideravam a previsão de vazão ou volumes afluentes como dados de entrada (vide, por exemplo, Huang *et al.*, 1991). Os modelos determinísticos empregavam “cenários” possíveis e os estocásticos as distribuições de probabilidade *a priori*; a maior parte dos estudos definia regras de operação ou políticas operacionais *ex-ante*, utilizando séries sintéticas ou históricas (Wurbs, 1993). Entre os trabalhos que têm utilizado previsões de longo prazo para melhorar os resultados da operação dos reservatórios, alguns empregam modelos de simulação ou otimização determinísticos e o resultado da aplicação da previsão é apenas um cenário possível de ocorrer. À medida que as previsões são atualizadas o modelo de operação é novamente aplicado para atualização do cenário. Se a previsão foi probabilística, ou seja, uma probabilidade de ocorrência foi a ela associada, este nível de incerteza também pode ser estendido ao cenário obtido pelo uso do modelo de operação. No caso de previsões não probabilísticas, o cenário obtido pelo modelo determinístico não traz qualquer informação sobre a chance de ocorrência.

O uso de modelos estocásticos de operação, como a programação dinâmica estocástica (PDE), é uma alternativa aos modelos determinísticos para levar em conta as características estocásticas das variáveis hidrológicas envolvidas (Lanna, 1982; Yeh, 1985). Geralmente esses algoritmos não levam em conta a previsão explicitamente, mas através de uma variável de estado representativa da tendência hidrológica do sistema, como a afluência observada no mês anterior (Maceira, 1989). Nesse caso, as afluências futuras são representadas como um processo autorregressivo mensal de ordem unitária,

desconsiderando o comportamento sazonal e anual das vazões. A variável de estado representativa da tendência hidrológica do sistema pode também tomar valores da previsão de maior antecedência, o que levaria em conta o comportamento de longo prazo das vazões afluentes (Stedinger *et al.*, 1984). Outra alternativa, proposta por Kelman *et al.* (1990) e aplicada ao sistema elétrico brasileiro por Maceira (1989), é a programação dinâmica estocástica amostral. Nela, a representação do processo estocástico de afluências ao reservatório é feita de forma implícita através de cenários hidrológicos de afluências, observados na série histórica ou gerados sinteticamente (Maceira, 1989). Se há previsões de vazões disponíveis, elas também podem ser incorporadas aos cenários amostrados (Kelman *et al.*, 1990). Karamouz e Vasiliadis (1992) propõem um modelo de programação dinâmica estocástica Bayesiana. Estes autores argumentam que a maior parte dos modelos de PDE assumem informação estatística perfeita, ou seja, as incertezas associadas aos parâmetros da vazão afluente não são consideradas. No algoritmo por eles proposto, essas incertezas são incorporadas através do cálculo e atualização das probabilidades de transição das previsões, utilizando a teoria Bayesiana de decisão, a cada novo intervalo de tempo, quando valores observados da vazão forem monitorados. No estudo apresentado, o algoritmo Bayesiano mostrou os melhores resultados, quando comparado com um de PDE clássica e com o de Kelman *et al.* (1990). Na mesma linha, Krzysztofowicz (1986a,b) apresenta um modelo Markoviano para planejamento de uso da água desenvolvido para receber explicitamente a informação de previsão de volumes sazonais produzidas por um modelo Bayesiano.

A influência de melhorias na previsão sobre os resultados da operação é óbvia (Yeh *et al.*, 1982), mas a magnitude dos benefícios vai depender de sistema para sistema, dos objetivos da operação e da incerteza na previsão (Georgakakos *et al.*, 1998). Huang *et al.* (1991), por exemplo, testam quatro formulações diferentes de programação dinâmica estocástica para otimização da operação de longo prazo de um reservatório para geração de energia. Os autores partem do princípio da fragilidade da previsão e incluem dois casos considerando a previsão de vazão e dois casos em que a previsão não é levada em conta como variável de estado. A situação em que a previsão de vazão não é levada em conta, mas em vez dela o mais recente valor monitorado da vazão afluente, apresenta bons resultados. Nesse caso, aparentemente a previsão não acrescentaria ganho significativo à operação. A variação da magnitude dos ganhos obtidos com a previsão

em função dos objetivos é demonstrada por Kelman *et al.* (1990), também para um sistema de geração hidroelétrica, e por Georgakakos (1989) para três sistemas de usos múltiplos e diferentes características. Krzysztofowicz (1983) demonstra que a utilização de um arcabouço Bayesiano para tomada de decisão considerando previsões (sejam climatológicas, não-probabilísticas ou probabilísticas) é sempre mais vantajoso que ignorar as previsões, por maior que seja a incerteza a elas associadas.

Alguns modelos de operação apresentam como resultado as conseqüências da adoção de determinadas políticas ou regras operacionais sob determinados cenários (modelos descritivos), enquanto outros sugerem diretamente a política a adotar de modo a satisfazer critérios estabelecidos (modelos prescritivos). Wurbs (1993) discute o papel destes dois tipos de modelo e reconhece a tendência da formulação de modelos cada vez mais prescritivos. Em outras palavras, os técnicos estão tentando reproduzir nos seus modelos os procedimentos subjetivos que caracterizam a tomada de decisão nos diversos estágios do processo de previsão e divulgação da informação. Novas teorias sobre aquisição, representação e manipulação de conhecimento e tratamento de incertezas têm sido empregadas com este fim. As maiores dificuldades estão relacionadas à modelagem do comportamento do operador humano, dos usuários, da opinião pública e suas interrelações: ainda não se consegue *capturar* a complexidade deste processo nos esquemas matemático-computacionais. Alguns exemplos nessa linha reportados na literatura utilizam inferência Bayesiana (Armijos *et al.*, 1990), teoria dos jogos (Fronza *et al.*, 1977; Okada *et al.*, 1985), conjuntos difusos (Kojiri *et al.*, 1989; Galvão e Ikebuchi, 1992; Russell e Campbell, 1996), e sistemas especialistas (Palmer e Tull, 1987).

2.3. Previsão de longo prazo e planejamento agrícola

A avaliação dos efeitos da variabilidade climática na agricultura é uma área bastante consolidada e com metodologias validadas para várias partes do mundo (Parry e Carter, 1988; Monteith e Virmani, 1991; Angus, 1991; Keller *et al.*, 1998). Para a simulação do comportamento das culturas com o clima têm sido empregados desde modelos mais ou menos sofisticados de balanço hídrico (Doorenbos e Kassam, 1979; Chaib Filho *et al.*, 1988; Back, 1997) até complexos modelos de simulação de crescimento de culturas (Siqueira *et al.*, 1994; Semenov e Porter, 1995).

À primeira vista, a incorporação da previsão meteorológica de longo prazo a esses modelos seria uma tarefa fácil e direta. Mas, o aproveitamento da previsão, apesar de promissor (Marshall *et al.*, 1996; Mjelde *et al.*, 1997) ainda não vem sendo realizado operacionalmente (Hulme *et al.*, 1992b), principalmente devido à diferença entre as escalas de produção das previsões (regional – dezenas de milhares de km²) e de utilização em agricultura (local – dezenas de milhares de m²), e à não especificação da distribuição intra-sazonal da precipitação.

A maior parte dos esforços nesta direção tem procurado caracterizar as relações entre a variabilidade de precipitação na forma como é expressa na previsão, ou seus preditores (ENOS, por exemplo), e a produção agrícola ou o ciclo vegetativo das culturas (Thornton *et al.*, 1997; Rao *et al.*, 1997; Berlato e Fontana, 1998). A estimativa da distribuição intra-sazonal da precipitação ainda é incipiente, destacando-se a determinação do início da estação chuvosa com fins agrícolas, uma meta importante, mas sem resultados definitivos (Sivakumar, 1990; Adiku e Stone, 1995).

Grande atenção também tem sido direcionada aos sistemas de alerta de segurança alimentar (*Famine Early Warning Systems – FEWS*), especialmente na África. Esses sistemas, financiados por organizações internacionais, têm sua eficácia limitada pela incapacidade de prever a calamidade com antecedência suficiente para mobilizar os doadores e a logística de transporte e distribuição dos alimentos. Como atuam em áreas relativamente vastas, a previsão sazonal combinada com modelos de produção agrícola podem potencialmente ser úteis em um futuro imediato (Hulme *et al.*, 1992b; Buchanan-Smith *et al.*, 1994; Thornton *et al.*, 1997).

2.4. Previsão de longo prazo e manejo de recursos hídricos no Nordeste

2.4.1. Regime climático

A variabilidade espacial da precipitação no Nordeste do Brasil (NEB), quando considerada em maior escala, delimita duas regiões, a da zona da mata e a do semi-árido, com áreas de transição (o agreste) e variações dentro do semi-árido (como o seco Cariri Paraibano, ou o úmido Cariri Cearense), em geral definidas por acidentes topográficos, como mostrado na Figura 2.1. Quando a variabilidade é considerada em menor escala mostra diferenças (sem padrão definido) entre a ocorrência de precipitação

em áreas relativamente próximas espacialmente (Clarke e Galvão, 1995). Esta variabilidade em pequena escala é determinada pela natureza convectiva das precipitações.

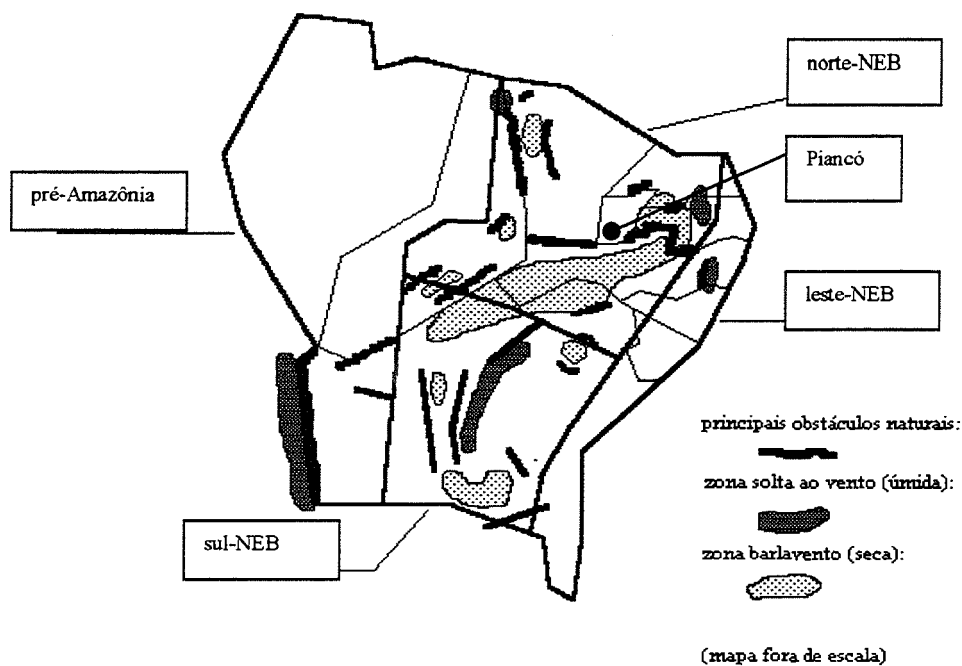


Figura 2.1. Sub-regiões climáticas do Nordeste do Brasil (adaptada de Nobre e Molion, 1988, e Cadier, 1994).

A região tem sido dividida em quatro sub-regiões, para fins de análise climática sazonal: o norte, o leste, o sul do NEB e a pré-Amazônia (Figura 2.1). Estas sub-regiões apresentam regimes climáticos distintos, condicionados por diferentes fatores atmosféricos (Nobre e Molion, 1988). O “norte do Nordeste” (norte-NEB) inclui a região semi-árida dos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e norte da Bahia e é a sub-região que dispõe de mais estudos relacionados à influência da circulação atmosférica e oceânica sobre a variabilidade climática da região, possui maior número de reservatórios construídos, apresenta maior variabilidade interanual de precipitação e maior escassez hídrica, e sua precipitação sazonal tem apresentado maior previsibilidade. O “leste do Nordeste” (leste-NEB)

inclui a faixa úmida litorânea dos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e da Bahia. É a área de maior atividade econômica do Nordeste, abriga cerca de 30% da sua população, e também apresenta grande variabilidade interanual da precipitação. O leste-NEB tem sido menos estudado, mas alguns estudos já indicam alguma previsibilidade para sua precipitação sazonal. As sub-regiões “sul do Nordeste” (sul-NEB) e “pré-Amazônia” são mais úmidas, carecem de estudos e poucos esforços têm sido feitos para melhor caracterizar a previsibilidade sazonal.

2.4.2. Mecanismos de geração de precipitação

No leste-NEB, as chuvas de outono e inverno (abril-julho) são responsáveis por 60% da precipitação média anual, enquanto que os meses mais secos são os de setembro a dezembro, que respondem por apenas 10% da precipitação média anual. As frentes frias e os ventos que sopram de sudeste perpendicularmente à costa, quando convergem com a brisa terrestre que sopra do continente para o oceano, são apontados como o principal mecanismo gerador de precipitação na região (Kousky, 1979, 1980; Nobre e Molion, 1988). Durante o período abril-julho, essa convergência atinge o seu máximo, causando o pico de precipitação. A variabilidade interanual seria causada principalmente pela *alta subtropical* no Atlântico Sul, que modula a intensidade e direção dos ventos ao longo da costa; o ENOS apresenta baixa correlação estatística com essa variabilidade, apesar de que anos de *El Niño* intenso, como 1983 e 1993, apresentaram também baixa pluviosidade no leste-NEB (Rao *et al.*, 1993). Brito *et al.* (1994) atribuem a conexões de maior escala a causa da variabilidade climática na região, e identificam uma “zona de convergência secundária”, que se estende da costa leste do NEB até o meridiano de Greenwich, como um outro fator determinante da pluviosidade. Esses autores também consideram relevante a influência do ENOS, e incluem as anomalias de temperaturas da superfície do mar (TSM) no Pacífico equatorial no seu modelo de previsão para o leste-NEB.

No norte-NEB, as chuvas se iniciam eventualmente a partir de outubro, na chamada “pré-estação”, culminando com uma estação chuvosa concentrada entre fevereiro e maio, quando a zona de convergência intertropical (ZCIT) no Atlântico Tropical atinge sua posição mais ao sul, próxima do Nordeste. Ao longo do ano, a TSM é maior no Atlântico Norte, contrastando com temperaturas menores ao sul do equador. Na última

parte do verão austral, porém, a TSM no Atlântico Sul se torna mais alta, o que provoca aumento de instabilidade e possivelmente também de umidade no fluxo da camada limite atmosférica para o interior do Nordeste, provocando as chuvas. Nos anos de seca, a ZCIT se localiza anormalmente mais ao norte, os ventos do Atlântico Norte são reduzidos e o fluxo no sentido sul-norte através do equador é acelerado; as águas do Atlântico Norte se mantêm aquecidas e as do Atlântico Sul frias. O sistema acoplado oceano-atmosfera no Atlântico parece ser o principal fator condicionador dos anos secos ou úmidos na região: o padrão de TSM (que é afetado pelo campo de ventos superficiais) exerce um controle hidrostático na baixa atmosfera, de modo que o gradiente de temperatura norte-sul leva a um aumento do gradiente de pressão ao sul, inibindo a precipitação. Os anos secos tendem a coincidir com a fase baixa do ENOS (quando ocorre aquecimento anormal da TSM no Pacífico Equatorial), porque nesta situação em geral a ZCIT tende a ficar mais ao norte. Nos anos úmidos o comportamento tende a ser o inverso. Estas hipóteses (Hastenrath e Greischar, 1993a) sobre as causas das anomalias climáticas no norte-NEB são hoje as mais aceitas. O relevo da região provoca efeitos orográficos significativos sobre a distribuição espacial da precipitação, que se somam aos efeitos de circulação global descritos acima. A Tabela 2.1 apresenta uma lista parcial dos estudos de caracterização dos mecanismos climáticos atuantes no norte-NEB.

2.4.3. Previsão de precipitação sazonal

Baseados nessas hipóteses, diversos métodos de previsão da variabilidade interanual da precipitação na região têm sido propostos, utilizando diferentes abordagens: (i) modelos univariados de modelagem de séries temporais (por exemplo, Brasil e Souza, 1993; Fernandes, 1995); (ii) regressão múltipla e outros modelos multivariados, utilizando como preditores parâmetros atmosféricos, oceânicos ou a precipitação na pré-estação chuvosa (Ward e Folland, 1991; Hastenrath e Greischar, 1993a; Repelli e Alves, 1996a); (iii) MCGs (Cavalcanti *et al.*, 1998); e (iv) análise conceitual subjetiva de padrões das principais variáveis atmosféricas e oceânicas sobre as bacias dos oceanos Pacífico e Atlântico tropicais (Repelli e Alves, 1994).

Quanto à antecedência da previsão, alguns métodos a fornecem com até alguns anos antes, mas com baixa precisão (caso dos modelos univariados de séries temporais). A maioria deles produz previsões entre um e três meses antes da estação chuvosa e se

referem a todo o período da estação – três ou quatro meses – e a toda a região (o norte-NEB – com cerca de 500 000 km²). Para o norte-NEB, a previsão é anunciada pela primeira vez em dezembro ou janeiro, para o período fevereiro-maio, a partir da situação dos preditores naquele momento, e a seguir atualizada mensalmente até o início de fevereiro.

Tabela 2.1. Estudos sobre mecanismos climáticos atuantes no norte-NEB.

Referência	Mecanismos e/ou variáveis explicativas
Namias (1972)	Circulação atmosférica
Caviedes (1973)	ENOS
Markham (1974)	Própria série
Ramos (1975)	Circulação atmosférica
Markham e McLain (1977)	TSM
Hastenrath e Heller (1977), Hastenrath (1990d, 1991, 1997), Hastenrath e Druyan (1993), Hastenrath e Greischar (1993b)	Circulação atmosférica
Gomes Filho (1979)	Albedo e orografia
Moura e Shukla (1981)	TSM
Molinier e Cadier (1984-85)	Regime de precipitação
Kousky (1979, 1985), Kousky e Moura (1981), Kousky e Ropelewski (1989)	Circulação atmosférica
Rao <i>et al.</i> (1986, 1995)	TSM, ENOS
Nobre e Molion (1988)	Revisão do estado-da-arte
Uvo e Nobre (1989a,b)	ZCIT, TSM e ventos
Hisard (1990)	ENOS
Mechoso <i>et al.</i> (1990)	TSM
Chu (1991)	ENOS
Alves e Repelli (1992)	ENOS
Sperber e Hameed (1993)	TSM
Nobre e Shukla (1996)	TSM, ventos e pressão
Uvo e Berndtsson (1996)	TSM, ZCIT
Harzallah <i>et al.</i> (1996), Roucou <i>et al.</i> (1996)	Circulação atmosférica
Wainer e Soares (1997)	TSM e ventos
Rao <i>et al.</i> (1997)	ENOS
Carton (1997), Chang <i>et al.</i> (1997), Carton <i>et al.</i> (1996)	TSM
Souza <i>et al.</i> (1998)	TSM
Uvo <i>et al.</i> (1998)	TSM

A maioria desses trabalhos não leva em conta a variabilidade espacial e temporal intra-sazonal da precipitação na região, pois usam um único índice para todo o período chuvoso e para toda a região. Hastenrath (1998), por exemplo, afirma que a previsibilidade é muito baixa para regiões de pequenas dimensões (menores que

aproximadamente 500 km por 500 km) e para escala temporal menor que a da estação chuvosa. Como medida de comparação, a bacia do Piancó, com 4550 km², que foi estudada neste trabalho, ocupa aproximadamente um retângulo de 100 km x 70 km.

Tabela 2.2. Estudos sobre previsão de precipitação sazonal no norte-NEB.

Referência	Técnica*	Variáveis explicativas
Girardi e Teixeira (1978)	Periodicidades	Própria série
Nobre <i>et al.</i> (1980)	Periodicidades	Própria série
Mesquita e Moretin (1984)	Periodicidades	Própria série
Hastenrath <i>et al.</i> (1984), Hastenrath (1990c), Hastenrath e Greischar (1993a), Greischar e Hastenrath (1998)	RL, ADL, RN	Chuva da pré-estação, TSM e ventos
Kane e Trivedi (1986, 1988), Kane (1997)	Periodicidades	Própria série
Silva (1988)	AF	Própria série
Harvey e Souza (1987), Tavares e Souza (1988), Brasil e Souza (1993)	MST	Própria série
Brito <i>et al.</i> (1991), Mello (1997)	RL	Chuva da pré-estação
Ward e Folland (1991), Colman <i>et al.</i> (1997, 1998)	RL, ADL	TSM
Repelli e Alves (1994)	MCG	–
Repelli e Alves (1994)	Análise subjetiva	Atmosfera e oceanos
Xavier e Xavier (1995), Xavier <i>et al.</i> (1998)	MLG, RL	TSM, ENOS, ventos, atividade solar
Fernandes (1995)	RN e MST	Própria série
Gang <i>et al.</i> (1996)	RN	Própria série
Repelli e Alves (1996a)	ACC	TSM
Sperber e Palmer (1996), Brankovic e Palmer (1997), Cavalcanti <i>et al.</i> (1997)	MCG	–
Freitas e Billib (1997)	RN	TSM
Graham (1997)	MCG	–
Cavalcanti <i>et al.</i> (1998)	MCG	–
Evans <i>et al.</i> (1998)	MCG	–

*ACC: análise de correlações canônicas; ADL: análise discriminante linear; AF: análise de frequência; MCG: modelo de circulação global; MLG: modelos lineares generalizados; MST: modelos univariados de séries temporais; RL: regressão linear; RN: rede neural.

A Tabela 2.2 apresenta uma lista parcial dos principais estudos de previsão da precipitação sazonal no norte-NEB. Atualmente, previsões são produzidas rotineiramente pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE (Cavalcanti *et al.*, 1998), pelo *Hadley Centre for Climate Prediction and Research*, do serviço meteorológico britânico (Colman *et al.*, 1998; Evans *et al.*, 1998), e pela Universidade de Wisconsin, nos Estados Unidos (Greischar e Hastenrath, 1998). Essas previsões e o estado dos oceanos

e da atmosfera em larga escala são analisados por meteorologistas das agências de previsão do Nordeste (os “núcleos estaduais de meteorologia e recursos hídricos do Nordeste”), que elaboram um prognóstico de consenso (a previsão subjetiva referida anteriormente nesta seção, Repelli e Alves, 1994).

Pensando em utilização em manejo de recursos hídricos, esses métodos podem mais adequadamente ser classificados segundo o tipo de informação que fornecem:

1. Categorizados. Estes métodos dividem a amplitude de variabilidade da precipitação sazonal em várias faixas, ou categorias, e emitem a previsão prescrevendo em qual (ou quais) categoria há maior probabilidade de ocorrência do total esperado de precipitação para a estação chuvosa. Este artifício na produção e divulgação da informação é utilizado em virtude da alta incerteza associada às previsões e é muito empregado atualmente para várias regiões do mundo. Na previsão para o norte-NEB a maior parte dos métodos usa cinco categorias (Brito *et al.*, 1991; Ward e Folland, 1991; Repelli e Alves, 1994), mas para o leste-NEB, que apresenta previsibilidade mais baixa, três categorias têm sido empregadas (Brito *et al.*, 1994). Dentre eles dois sub-grupos podem ser ainda identificados:

1.1. Categorizados probabilísticos. São métodos que prescrevem probabilidades de ocorrência às categorias de totais precipitados. Um método típico desta categoria é a análise discriminante linear (ADL), empregada por Ward e Folland (1991). Brito *et al.* (1994) categoriza os resultados de uma análise de correlações canônicas (ACC), atribuindo probabilidades de ocorrência às categorias. As previsões fornecidas via regressão também podem ser convertidas a este formato.

1.2. Categorizados não probabilísticos. Neste caso, a previsão prescreve a categoria de totais precipitados mais provável de acontecer, mas não fornece a probabilidade quantitativamente, caso do sistema de previsão subjetiva dos núcleos estaduais de meteorologia e recursos hídricos do NEB (Repelli e Alves, 1994).

2. Pontuais. Este grupo de métodos fornece os resultados como um valor numérico, associado ou não a uma medida de variabilidade:

- 2.1. Pontuais probabilísticos: métodos que fornecem previsões pontuais associadas à sua variância esperada (ou intervalos de confiança), como os métodos de regressão (Hastenrath e Greischar, 1993a).
- 2.2. Pontuais não probabilísticos: métodos que fornecem previsões pontuais sem fornecer uma medida de incerteza, como as redes neurais (Freitas e Billib, 1997).

As previsões por MCGs, se realizadas através de uma única execução do modelo, se enquadram no tipo 2.2, mas se realizadas através de um conjunto de execuções, o que tem se tornado mais comum (vide seção 3.4.1), podem ser expressas como os tipos 1.1 ou 2.1. As previsões subjetivas dos núcleos de meteorologia e recursos hídricos do NEB poderiam eventualmente adquirir características probabilísticas, se às categorias fossem atribuídas probabilidades de ocorrência subjetivamente pelo previsor (vide seção 4.1.3). Às previsões obtidas de redes neurais normalmente não se tem associado medidas de incerteza, mas isso parece factível, através de técnicas como *bootstrap* (Efron e Tibshirani, 1993). Nenhum desses métodos utiliza registros históricos não instrumentais sobre as secas na região (como fornecidos, por exemplo, por Moreira *et al.*, 1995), que poderiam acrescentar mais informações às séries observadas.

2.4.4. Manejo de recursos hídricos

Ainda não se utiliza previsões de vazões e/ou volumes escoados sazonais diretamente no planejamento do uso da água nos reservatórios no Nordeste. Assim, para a maior parte dos reservatórios a estratégia operacional é estabelecida através de modelos de simulação e/ou otimização, alimentados por séries mensais de vazões afluentes, históricas ou sintéticas (Ribeiro *et al.*, 1991, 1995; Souza Filho e Gondim Filho, 1996). As estratégias assim estabelecidas são indicadores de longo prazo para a operação, que podem ser ajustadas ano a ano em função do cenário hidrometeorológico (Galvão e Ribeiro, 1993; Souza Filho e Porto, 1997).

No planejamento agrícola, várias metodologias têm sido propostas para determinar a melhor época de semeadura de culturas dependentes de chuva no semi-árido do Nordeste brasileiro (por exemplo, Porto *et al.*, 1983; Paixão *et al.*, 1996; Repelli e Alves, 1996b; Araújo *et al.*, 1998). Estes métodos, com variações, analisam estatisticamente séries históricas de precipitação e outras variáveis climatológicas,

obtendo riscos associados a determinadas datas de semeadura. Em virtude da grande variabilidade interanual da precipitação na região, a aplicabilidade destes resultados tem sido limitada. Ainda não se utiliza a previsão associada diretamente a eles.

A prática corrente na região, executada pelos núcleos estaduais de meteorologia e recursos hídricos do Nordeste é de disseminar aos usuários, a partir da pré-estação chuvosa, a previsão de precipitação. Para o caso do abastecimento de água humano, simulam-se cenários hidrológicos possíveis para os reservatórios, considerando o prognóstico da previsão, identificando riscos de colapso no armazenamento e suprimento hídrico. Para a agricultura, monitoram-se as chuvas que ocorrem na pré-estação e no início da estação, simula-se a umidade disponível no solo para as culturas no curto prazo e sugere-se o momento de semeadura. Esta prática tem-se mostrado de muita valia (Repelli e Alves, 1994) e é permanentemente aperfeiçoada, principalmente na comunicação da informação aos diversos grupos usuários e aos tomadores de decisão no nível governamental.

3. Metodologia

3.1. Síntese

A partir dos seus objetivos, expostos no capítulo 1, do estado atual da previsão climática e hidrológica e de suas aplicações a manejo de recursos hídricos, no contexto global e no Nordeste do Brasil (NEB), conforme o capítulo 2, o trabalho foi conduzido da seguinte forma (Figura 3.1):

Quanto à localização:

Adotou-se o norte do Nordeste (norte-NEB) como região de validação da metodologia, usando informações na escala regional (cerca de 500 000 km²), na escala de resolução de um modelo de circulação global (cerca de 75 000 km²), e na escala de uma bacia hidrográfica, a do rio Piancó (cerca de 5000 km²). A escala, uma questão-chave do trabalho, pôde então ser analisada em dois níveis (regional/célula e bacia).

Quanto à previsão de precipitação:

Dentre os métodos atualmente utilizados para previsão de precipitação sazonal no NEB, selecionou-se um representativo do tipo estatístico e um representativo do tipo dinâmico. O uso destes métodos propicia a análise da viabilidade do emprego da previsão de precipitação à estimativa do volume escoado e ao manejo dos recursos hídricos, objetivo central do trabalho.

Ambos produzem previsões categorizadas probabilísticas: (1) O estatístico (análise discriminante linear – ADL) relaciona temperaturas da superfície dos oceanos tropicais (TSM) e a precipitação fevereiro-maio no NEB e foi proposto pelo *Hadley Centre for Climate Prediction and Research*, do Reino Unido (Ward e Folland, 1991). As previsões foram produzidas, neste trabalho, nas escalas regional e da bacia, calibrando o modelo sucessivamente usando as mesmas TSMs e dados de precipitação média para cada uma das escalas. (2) O modelo dinâmico é um de circulação global (MCG) executado sobre quatro meses (março-junho) pelo

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Becker, 1997). As previsões para a célula de resolução do modelo localizada sobre a bacia do Piancó foram desagregadas, através de regressão, para a escala da bacia.

Quanto ao volume escoado:

Os métodos utilizados foram: (1) A partir da previsão de precipitação, produziram-se previsões de volume escoado sazonal na bacia através de reamostragem estatística, com base em séries observadas de precipitação e volume escoado sazonais. (2) Alternativamente, previsões de volume escoado sazonal foram produzidas pelo mesmo método estatístico empregado para precipitação, relacionando diretamente as TSMs com o volume escoado na bacia do Piancó.

A principal limitação da série de volume escoado – ser curta – foi superada, nos procedimentos acima, estendendo-a, com a geração de dados com o registro mais longo da série de precipitação, através de um modelo precipitação-vazão.

Quanto à operação do reservatório:

As previsões de volume escoado, em formato categorizado probabilístico, alimentaram dois modelos para operação de um reservatório que é suprido pela bacia do Piancó. Um esquema de programação dinâmica determinística e um modelo de simulação com base em controle difuso (desenvolvido neste trabalho) foram utilizados. Para entrada nesses modelos de operação, as previsões categorizadas probabilísticas de volume foram transformadas em um único valor numérico, a sua mediana, e desagregadas mensalmente. As operações tiveram horizonte de um ano, a partir do momento da previsão de volume escoado.

Quanto à necessidade de irrigação:

O mesmo procedimento de reamostragem foi então utilizado para prever a data ideal de semeadura e a necessidade de irrigação da cultura do feijão, utilizando a previsão de precipitação e seqüências de simulações de balanço hídrico geradas com dados climatológicos observados na escala de bacia.

Avaliação comparativa:

Finalmente, a avaliação das previsões e dos eventuais ganhos em relação aos procedimentos atuais de previsão ou manejo foi realizada, baseada em medidas de

exatidão e destreza apropriadas ao formato categorizado probabilístico e ao formato pontual.

Um elemento central na metodologia utilizada é a reamostragem estatística. Esse procedimento é apropriado para produção de previsões de volume escoado e de informações de manejo, como necessidade de irrigação de culturas; aproveita eficientemente as informações contidas no formato categorizado probabilístico das previsões de precipitação; e produz explicitamente medidas de confiança das previsões, já que as expressa probabilisticamente.

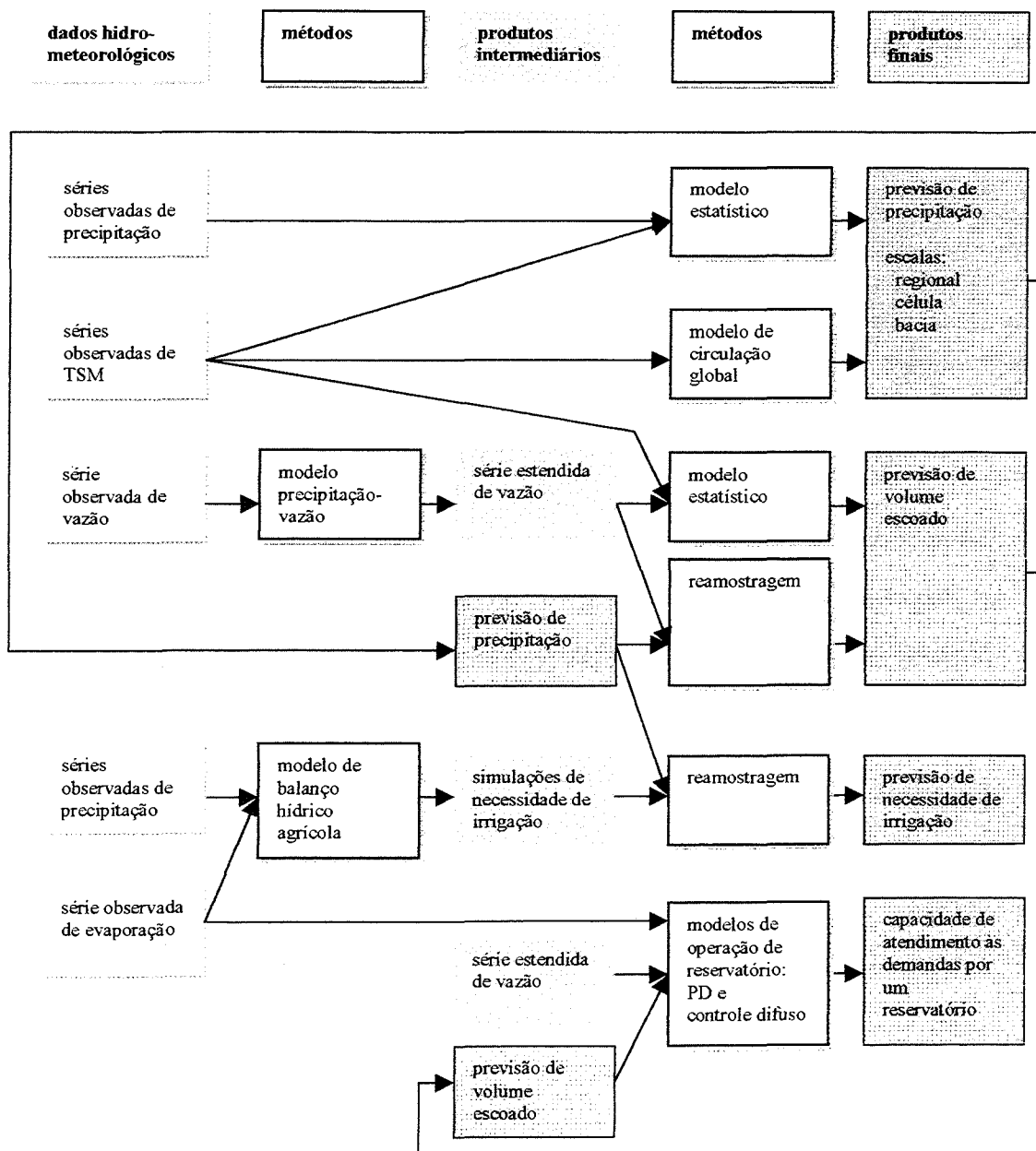


Figura 3.1. Metodologia do trabalho.

3.2. Dados

3.2.1. Registros climáticos e hidrológicos no Nordeste

No Nordeste, registros pluviométricos começaram a ser coletados rotineiramente no início do século (cerca de 1910). Nas décadas de 1930, 1960 e 1990 novos postos de medição foram incorporados à rede. A rede de estações climatológicas é bem menos densa. A rede fluviométrica tem sido historicamente projetada para dar suporte ao projeto de novos açudes e, sendo a de mais cara manutenção, tem sofrido bastante dos problemas de administração das redes. Os períodos de seca e problemas institucionais dos órgãos administradores das redes, ciclicamente afetaram a qualidade dos dados, pela descontinuidade na coleta ou no seu processamento. Assim, formar e manter bases de dados adequadas a estudos climáticos tem sido a preocupação de vários grupos de pesquisadores. Entre os vários esforços de caracterização da qualidade dos dados no Nordeste, dois foram referência básica deste trabalho: a base de dados de precipitação mantida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pelos núcleos estaduais de meteorologia e recursos hídricos do Nordeste (descrita em Brito *et al.*, 1991), originada dos arquivos do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE); e a avaliação da qualidade dos dados de pluviometria do Nordeste realizada por Molinier *et al.* (1994).

Para todas as séries utilizadas neste trabalho, dados posteriores a 1988 estavam disponíveis para apenas um pequeno número de postos, principalmente no período 1990-94, quando uma grande seca coincidiu com uma crise institucional no sistema de coleta e banco de dados da SUDENE. Em virtude disto, foram utilizados, aqui, dados de 1911 a 1988. A não ser quando referenciado explicitamente, todos os dados utilizados neste trabalho foram provenientes das fontes acima citadas.

3.2.2. Delimitação da região de estudo

O norte-NEB foi escolhido como a sub-região do NEB mais adequada, atualmente, para este trabalho. As razões que motivaram essa escolha, já mencionadas no capítulo 2, foram: o norte-NEB apresenta, no NEB, a maior variabilidade interanual de precipitação e maior escassez hídrica; sua economia tem como base o grande número de

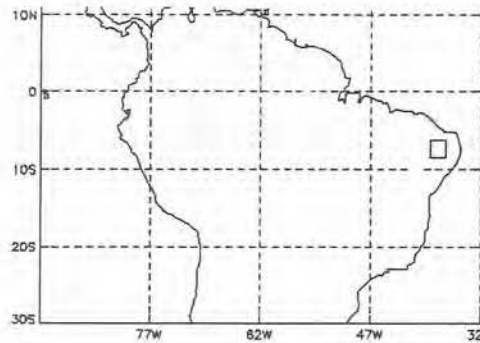
reservatórios construídos e a pequena agricultura familiar dependente de chuva; tem sido mais estudado climática e hidrológicamente; sua precipitação sazonal tem apresentado maior previsibilidade que a das outras sub-regiões; e séries de simulações de previsões foram disponibilizadas, para este trabalho, pelos pesquisadores que as produziram.

A bacia hidrográfica do rio Piancó, com 4550 km², foi selecionada para este estudo. Ela está localizada no extremo oeste do estado da Paraíba, na fronteira com o estado de Pernambuco. Fica na cabeceira da bacia do rio Piranhas-Açu, que ocupa a metade oeste dos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. A jusante da bacia localiza-se o reservatório Coremas-Mãe D'Água, que foi empregado neste estudo para avaliação da previsão em operação de reservatórios (vide, a seguir, a seção 3.2.7). A célula do MCG na qual se localiza a bacia abrange uma área de cerca de 275 km x 275 km, e inclui regiões dos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. A Figura 3.2 mostra a localização da célula, da bacia e do reservatório.

Toda a região abrangida pela célula possui características físico-climáticas semelhantes (Brasil, 1981a,b). A área está inserida, geologicamente, dentro da província estrutural Borborema, uma região de escudo cristalino. Geomorfologicamente é composta por grandes superfícies pediplanizadas sobre as quais erguem-se serras, chapadas e montanhas isoladas. Em alguns pontos encontram-se morros isolados, geralmente formados por afloramentos graníticos do tipo “inselbergs”, típicos de clima árido a semi-árido. Sobre o cristalino apresentam-se seqüências sedimentares sob a forma de chapadas, com topos tabulares. As conseqüências destas características geológicas sobre a topografia regional podem ser vistas na Figura 4.3 (seção 4.1.1.1). Em decorrência, os solos, de textura arenosa a média, possuem também fase pedregosa. A vegetação é a caatinga hiperxerófila. A terra é utilizada predominantemente para a pecuária e agricultura de subsistência, além de perímetros irrigados alimentados por reservatórios.

Bacias maiores teriam, em princípio, mais chance de sucesso com os modelos de previsão, por agregarem variações meteorológicas de menor escala (Molion e Moraes, 1987; Hastenrath, 1990b; Uvo e Graham, 1998). Por outro lado, os reservatórios, finalidade das previsões, possuem, no NEB, bacias contribuintes com áreas desde 200 km² até 15 000 km², aproximadamente. Por esta razão, escolheu-se avaliar a viabilidade de emprego das previsões de precipitação em uma bacia com área de ordem de grandeza

compatível com as contribuintes aos reservatórios da região. Os registros hidrometeorológicos da bacia do Piancó são típicos – em densidade espacial, duração e qualidade – das bacias do norte-NEB, assim como o uso do solo e da água nela observados.



localização da célula do MCG

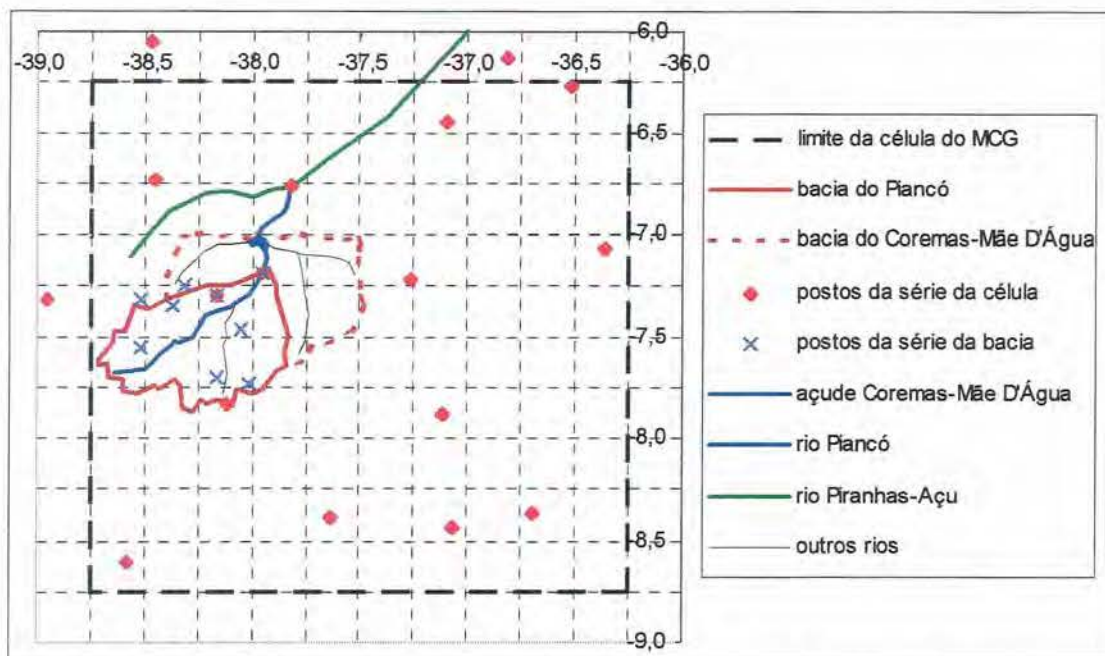


Figura 3.2. Mapas esquemáticos (fora de escala) mostrando: a célula do MCG sobre a bacia do Piancó e os 17 postos pluviométricos usados na série da precipitação da célula; a bacia do Piancó e os 9 postos pluviométricos usados na série da precipitação da bacia; o açude Coremas-Mãe D'Água e sua bacia de contribuição; o rio Piranhas e seu afluente, o rio Piancó.

3.2.3. Precipitação

Para os estudos de previsão de precipitação montaram-se várias séries, de acordo com a escala: a *regional*, a da *célula*, e a da *bacia*, descritas a seguir.

Regional

O *Hadley Centre* anualmente realiza a previsão da estação chuvosa para o Nordeste, utilizando como referência uma série histórica de anomalias normalizadas de precipitação regional. Essa série, denominada neste texto de “precipitação regional”, foi fornecida, para este trabalho, pelo *Hadley Centre*. Ela é formada, segundo Ward e Folland (1991) e Colman (1997), para cada ano de 1912 a 1985, pela média de *anomalias normalizadas* de precipitação sazonal (total de fevereiro-maio) de 113 postos sobre todo o norte-NEB; essa série é chamada pelo *Hadley Centre* de “série de Nobre”, por ter sido fornecida por Carlos Nobre, pesquisador do INPE. Ainda segundo aqueles autores, de 1986 a 1988 a série foi formada por dados de 27 postos sobre o norte-NEB, fornecidos por S. Hastenrath, da Universidade de Wisconsin, a denominada “série de Hastenrath” pelo *Hadley Centre*. Nesta pesquisa, decidiu-se utilizar a série de Nobre, apesar da (indesejável) particularidade de ter três anos com dados de origem diversa, de modo a preservar as condições reais de produção das previsões pelo *Hadley Centre*. É provável que os 27 postos da “série de Hastenrath” estejam incluídos na “série de Nobre”; segundo Ward e Folland (1991), as duas séries apresentam correlação de 0,83.

Célula

A célula do MCG sobre a bacia do rio Piancó se estende de $6,25^{\circ}$ S a $8,75^{\circ}$ S e de $36,25^{\circ}$ W a $38,75^{\circ}$ W (Figura 3.2). Tomaram-se dados de dezessete postos pluviométricos (Tabela 3.1) com séries de longa duração (1911-88), obtidas da base de dados de Brito *et al.* (1991), todos pertencentes ao conjunto de postos que formaram a série de “precipitação regional”. As precipitações médias foram calculadas no nível mensal para a célula e a seguir acumuladas sazonalmente para março-junho. Esta série constituiu a chamada “precipitação da célula”. Anomalias normalizadas sazonais foram calculadas usando como referência o período 1951-80, mantendo coerência com a série regional.

Bacia

Para constituir a chamada “precipitação da bacia” usaram-se dados de nove postos pluviométricos, dois dos quais coincidentes com os da célula e os da região (Tabela 3.2 e Figura 3.2). Os postos foram selecionados com base na sua distribuição espacial na bacia, na extensão da série e na qualidade dos dados, conforme avaliação realizada por Molinier *et al.* (1994). Toda a bacia encontra-se dentro de uma mesma região

homogênea pluviometricamente (Silva e Rao, 1994; Molinier *et al.*, 1994) e seu clima não é afetado por barreiras topográficas. Com os dados no nível diário, calculou-se a média na bacia, através de polígonos de Thiessen. As falhas não foram preenchidas diretamente, mas através do cálculo da média diária sem considerar a presença do posto na determinação dos polígonos. Dos nove postos, quatro foram implantados em 1911 e cinco em 1933. A média diária foi acumulada sazonalmente (fevereiro-maio e março-junho) e, a exemplo das outras séries, tendo como referência o período 1951-80, calcularam-se anomalias normalizadas sazonais.

Tabela 3.1. Postos pluviométricos da célula do MCG sobre a bacia do Piancó.

Posto	Código DNAEE	Coordenadas/Altitude
Florânia (Flores)	00636005	6°8'S – 36°49'W – 210m
Currais Novos	00636025	6°16'S – 36°31'W – 350m
Caicó	00637004	6°27'S – 37°6'W – 143m
Pombal	00637032	6°46'S – 37°49'W – 178m
Pereiro	00638011	6°3'S – 38°28'W – 220m
Antenor Navarro	00638033	6°44'S – 38°27'W – 240m
Soledade (Ibiapinópolis)	00736008	7°4'S – 36°22'W – 560m
Teixeira	00737002	7°13'S – 37°16'W – 770m
Piancó	00737006	7°11'S – 37°57'W – 250m
Monteiro	00737014	7°53'S – 37°7'W – 590m
Milagres	00738008	7°19'S – 38°57'W – 371m
Itaporanga (Misericórdia)	00738017	7°18'S – 38°10'W – 230m
Triunfo	00738032	7°50'S – 38°7'W – 1010m
Pesqueira	00836032	8°22'S – 36°42'W – 650m
Arcoverde (Rio Branco)	00837003	8°26'S – 37°4'W – 663m
Ibimirim (Jeritacó)	00837025	8°23'S – 37°38'W – 445m
Floresta	00838020	8°36'S – 38°35'W – 317m

Tabela 3.2. Postos pluviométricos da bacia do Piancó.

Posto	Código DNAEE	Coordenadas/Altitude	Início da série	Qualidade*	Influência no Thiessen (%)
Princesa Isabel	00738013	7°44'S – 38°01'W – 660m	1911	Muito boa	11
Piancó	00737006	7°11'S – 37°57'W – 250m	1911	Regular	8
Itaporanga	00738017	7°18'S – 38°10'W – 230m	1911	Regular	12
Conceição	00738020	7°33'S – 38°31'W – 370m	1911	Duvidosa	19
Bom Jesus	00738023	7°21'S – 38°22'W – 470m	1933	Excelente	10
Bonito de Santa Fé	00738022	7°19'S – 38°31'W – 575m	1933	Aceitável	1
Manaíra	00738015	7°42'S – 38°10'W – 605m	1933	Aceitável	16
Serra Grande	00738010	7°15'S – 38°19'W – 585m	1933	Boa	3
Nova Olinda	00738014	7°28'S – 38°3'W – 315m	1933	Aceitável	20

* Classificação em ordem decrescente: Excelente, Muito boa, Boa, Regular, Aceitável Duvidosa (Fonte: Molinier *et al.*, 1994).

Anomalias normalizadas

As anomalias normalizadas sazonais foram calculadas tendo como referência o período 1951-80 (Colman *et al.*, 1997) e são expressas, para cada posto, como:

$$I_{i,j} = 100 \frac{P_{i,j} - P_j}{s_j} \quad (3.1)$$

onde $I_{i,j}$ é a anomalia normalizada, expressa em %, para o ano i no posto j , $P_{i,j}$ é o total de precipitação sazonal (total acumulado nos meses da estação chuvosa), para o ano i no posto j , P_j é a média e s_j o desvio padrão da precipitação no posto j (calculados sobre o período de referência, 1951-80).

As séries apresentam correlação relativamente alta entre si, quando expressas em forma de anomalias normalizadas. As séries fevereiro-maio regional e da bacia tem coeficiente de correlação de 0,82, enquanto que as séries março-junho da célula e da bacia tem correlação de 0,86.

O uso de anomalias normalizadas permite distinguir anos secos de anos chuvosos quando se utiliza informações coletadas regionalmente, onde há diferenças intra-regionais nos valores absolutos da precipitação. Muitos dos estudos sobre variabilidade climática usam anomalias de precipitação ao invés dos valores originais. As anomalias são calculadas em relação à média, ou normalizadas (dividindo pelo desvio padrão). Essas últimas seriam mais adequadas para regiões que apresentam grandes variações na variância da precipitação (Jones e Hulme, 1996) e têm sido adotadas na maioria dos estudos sobre o Nordeste.

Categorização

Para uso na análise discriminante linear (seção 3.4.2), as séries fevereiro-maio regional e da bacia foram *categorizadas*, isto é, a cada valor de anomalia foi associada uma de cinco categorias. As categorias foram estabelecidas como equiprováveis no período de referência 1951-80 (Tabela 3.3). Assim, por exemplo, durante 1951-80, para a precipitação regional, em 20% dos anos as anomalias foram inferiores a -41%, em 20% dos anos se situaram entre -41% e -21%, em 20% dos anos foram superiores a +42%, e assim por diante. Em outras palavras, nomeando-se as categorias, pode-se dizer que, segundo esta classificação, na bacia do Piancó os anos *muito secos* (categoria 1) são aqueles que apresentaram anomalias normalizadas de precipitação sazonal inferiores

a -97%, os anos *secos* (categoria 2) são aqueles que apresentaram entre -97% e -37%, os anos *normais* (categoria 3) foram os de anomalias entre -37% e +10%, os *chuvosos* (categoria 4) tiveram anomalias na faixa de +10% a +54% e os *muito chuvosos* (categoria 5) tiveram anomalias maiores que +54%. O mesmo procedimento de categorização foi realizado para as séries março-junho na célula e na bacia (Tabela 3.4), para uso com a previsão do MCG (seção 3.4.1).

Tabela 3.3. Características das séries de precipitação sazonal (fevereiro-maio): (a) em forma de totais precipitados sazonais, expressos em mm, e de anomalias normalizadas (I), expressas em %; (b) definição das categorias de anomalias normalizadas, estabelecidas como equiprováveis no período de 1951-80.

a)

Série	Período	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Regional:					
precipitação	não disponível	não disponível	não disponível	não disponível	não disponível
anomalia	1912-88	3	73	-158	188
	1951-80	0	67	-138	188
Bacia:					
precipitação	1912-88	623,7	262,6	165,0	1320,2
	1951-80	605,1	223,9	254,6	1078,5
anomalia	1912-88	8	117	-197	319
	1951-80	0	100	-157	211

b)

Série	Limites das categorias de anomalias normalizadas sazonais fevereiro-maio				
	1	2	3	4	5
Regional	$I < -41$	$-41 \leq I < -21$	$-21 \leq I < 14$	$14 \leq I < 42$	$I \geq 42$
Bacia	$I < -97$	$-97 \leq I < -37$	$-37 \leq I < 10$	$10 \leq I < 54$	$I \geq 54$

3.2.4. Volume escoado

A série de volume escoado sazonal foi consolidada a partir dos registros de vazões médias diárias para o posto Piancó (Tabela 3.5), disponíveis para o período 1964-88. Em virtude do curto registro, em relação à série disponível de precipitação, julgou-se apropriado estender a série para o período 1911-63.

Utilizou-se o modelo *Tank* (Sugawara, 1979, 1995a,b), na configuração mensal proposta por Diniz (1994) e Diniz *et al.* (1996) para bacias semi-áridas do NEB. O modelo está descrito no Anexo e consiste de dois reservatórios dispostos verticalmente com um orifício no fundo e um ou mais orifícios laterais. Dados mensais do período de 1964-80 foram empregados para calibragem e a parametrização obtida foi validada com dados para 1981-88. Os resultados são apresentados na seção 4.2.1.

Foi construída uma série sazonal para fevereiro-maio (para estudo com a ADL); calculadas anomalias normalizadas (tendo como referência o período 1951-80) e a seguir categorizadas (ver procedimento análogo na seção 3.2.3). As características desta série estão apresentadas na Tabela 3.6. Seu cálculo foi realizado usando a mesma definição das anomalias de precipitação (equação 3.1), também de comum emprego para vazões (Mesa Sanchez *et al.*, 1994b).

Tabela 3.4. Características das séries de precipitação sazonal (março-junho): (a) em forma de totais precipitados sazonais, expressos em mm, e de anomalias normalizadas (I), expressas em %; (b) definição das categorias de anomalias normalizadas, estabelecidas como equiprováveis no período de 1951-80.

a)

Série	Período	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Célula:					
precipitação	1911-88	447,1	165,2	56,7	920,9
	1951-80	457,7	155,7	195,3	769,8
anomalia	1911-88	-7	106	-258	297
	1951-80	0	100	-168	200
Bacia:					
precipitação	1911-88	488,8	220,5	115,9	1075,0
	1951-80	479,4	190,5	185,8	827,1
anomalia	1911-88	5	116	-191	313
	1951-80	0	100	-154	182

b)

Série	Limites das categorias de anomalias normalizadas sazonais março-junho				
	1	2	3	4	5
Célula	$I < -84$	$-84 \leq I < -43$	$-43 \leq I < 30$	$30 \leq I < 98$	$I \geq 98$
Bacia	$I < -98$	$-98 \leq I < -42$	$-42 \leq I < 18$	$18 \leq I < 94$	$I \geq 94$

Tabela 3.5. Características dos postos evaporimétrico (Evp) e fluviométrico (Flu) da bacia do Piancó.

Posto	Tipo	Código DNAEE	Coordenadas/Altitude	Extensão da série
Piancó	Flu	37340000	7°11'S – 37°57'W – 250m	1964-1988
Nova Olinda	Evp	não disponível	7°28'S – 38°3'W – 315m	não disponível

3.2.5. Evaporação e evapotranspiração

Adotou-se a evapotranspiração potencial média mensal obtida dos dados de evaporação do tanque classe “A” do posto Nova Olinda, situado na bacia (Tabela 3.5). Estes dados foram anteriormente utilizados em outros estudos na mesma bacia (Irricon,

1991, apud Doherty Filho, 1992). Os dados aqui utilizados foram extraídos de Doherty Filho (1992), que não forneceu informações sobre a extensão da série.

A rede de estações climatológicas na Paraíba é pouco densa. Os outros postos da rede mais próximos da bacia do Piancó (Patos, Sumé, Monteiro e Souza) teriam influência menor, em relação ao posto Nova Olinda, por estarem mais distantes da bacia. Além disso, a variabilidade espacial da evaporação na região é baixa. Molle (1989) comparou dados de evaporação no Tanque Classe “A” de 11 postos de várias regiões do semi-árido do Nordeste (não incluindo o de Nova Olinda). O total médio anual e os valores médios mensais apresentaram pouca variabilidade entre os postos (coeficientes de variação iguais a 0,09). O total médio anual para o posto Nova Olinda (2992 mm) é bastante coerente com os dos postos de Patos (3333 mm), Sumé (2892 mm) e Souza (2936 mm), estudados por Molle (1989).

Em geral, estudos hidrológicos ou de projetos de áreas irrigadas no Nordeste semi-árido utilizam dados de evaporação média mensal. A justificativa usual é a pouca variabilidade interanual. Usando sete postos evaporimétricos no semi-árido, Molle (1989) confirma a validade dessa prática. Entre outros parâmetros, o coeficiente de variação médio encontrado foi de 0,15, no nível mensal, que pode ser considerado baixo.

O coeficiente do tanque (K_p) adotado para o cálculo da evapotranspiração foi de 0,7, seguindo as recomendações de Doorenbos e Kassam (1979) e baseando-se em Molle (1989), que encontrou, para os onze postos citados acima, um valor médio de 0,69, com variação entre 0,68 e 0,71.

Tabela 3.6. Características das séries de volume escoado sazonal (fevereiro-maio) na bacia do Piancó: (a) em forma de lâmina média sazonal, expressa em mm, e de anomalias normalizadas (I), expressas em %; (b) definição das categorias de anomalias normalizadas, estabelecidas como equiprováveis no período de 1951-80.

a)

Série	Período	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
lâmina escoada	1911-88	76,5	86,0	0,0	408,7
	1951-80	65,4	63,0	2,2	276,5
anomalia	1911-88	18	137	-104	545
	1951-80	0	100	-100	335

b)

Série	Limites das categorias de anomalias normalizadas sazonais fevereiro-maio				
	1	2	3	4	5
Volume escoado	$I < -74$	$-74 \leq I < -48$	$-48 \leq I < -6$	$-6 \leq I < 44$	$I \geq 44$

3.2.6. Temperaturas da superfície do mar

Um dos métodos para previsão de precipitação sazonal utilizados neste trabalho é a análise discriminante linear, empregada pelo *Hadley Centre*, utilizando como preditor a TSM nos oceanos Atlântico e Pacífico. As TSMs não foram empregadas diretamente, mas em forma de escores de autovetores de anomalias. A seguir apresenta-se sucintamente o procedimento descrito por Ward e Folland (1991) e Colman *et al.* (1997, 1998).

Originalmente disponíveis em uma malha global de 5° x 5° de latitude e longitude, as TSMs foram combinadas em uma malha de 10° x 10° e transformadas, mês a mês, em anomalias (não normalizadas) em relação às médias mensais do período 1951-80. A seguir, analisaram-se, separadamente, os dados para o Oceano Atlântico (a porção de 30°N – 30°S) e para todo o Oceano Pacífico. Para o Atlântico, foram utilizados 94 pontos da malha; para o Pacífico, 126 pontos. Para cada ponto, uma série temporal para 1901-80 foi considerada. O objetivo pretendido foi transformar, para cada ano, os 94 valores do Atlântico e os 126 valores do Pacífico em poucos valores que representassem a mesma informação contida nos dados originais.

Isto foi realizado através de uma transformação via “autovetores de covariância”. É um procedimento igual ao utilizado na técnica de análise de componentes principais (vide, por exemplo, Chatfield e Collins, 1980). Faz-se uma transformação linear de dados correlacionados em uma região (no caso, TSMs em um oceano), de modo que obtém-se como resultado uma série de “componentes” ortogonais (não correlacionados):

$$\begin{aligned}
 z_{1,t} &= a_{1,1}x_{1,t} + a_{1,2}x_{2,t} + \dots + a_{1,n}x_{n,t}, && \text{componente 1;} \\
 z_{2,t} &= a_{2,1}x_{1,t} + a_{2,2}x_{2,t} + \dots + a_{2,n}x_{n,t}, && \text{componente 2;} \\
 &\dots && \\
 z_{n,t} &= a_{n,1}x_{1,t} + a_{n,2}x_{2,t} + \dots + a_{n,n}x_{n,t}, && \text{componente } n;
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

onde, $x_{i,t}$ são os valores observados das anomalias de TSM em cada ponto i da malha do oceano em consideração (ou seja, n valerá 94 para o Atlântico e 126 para o Pacífico), para cada ano t . Os coeficientes $a_{1,j}$ formam o autovetor do primeiro componente (ou o primeiro autovetor), os coeficientes $a_{2,j}$ formam o autovetor do segundo componente (ou

o segundo autovetor), e assim por diante. O valor de $z_{k,t}$ encontrado quando substituindo os dados observados em cada ponto i da malha é chamado de “score” do componente k para o ano t .

Em geral, a depender da correlação entre os dados originais, alguns poucos componentes explicam quase toda a variância dos dados e podem ser usados para representá-los. O método é útil, assim, para “compactar” um conjunto de dados originalmente grande em poucos componentes. No caso, transformou uma grande malha de dados em cada oceano em um número bem menor de componentes.

As séries de escores utilizadas pelo *Hadley Centre* e neste trabalho foram produzidas da seguinte forma: (a) os autovetores para cada oceano foram determinados separadamente utilizando anomalias sazonais de TSM para o período 1901-80 (das quatro estações para o Atlântico, totalizando 320 valores para cada um dos 94 pontos, e da estação dezembro-fevereiro, para o Pacífico, ou seja, 80 valores para cada um dos 126 pontos); (b) a seguir, foram gerados escores mensais de cada componente, para cada ano, aplicando às equações 3.2 os valores observados mensais de anomalias de TSM (note-se que os autovetores são os mesmos para todos os anos).

Ward e Folland (1991) mostraram que escores produzidos por determinados autovetores estavam mais correlacionados a certos padrões de comportamento da circulação atmosférica, e dois deles explicavam relativamente bem a variabilidade interanual da precipitação sazonal no norte-NEB: o terceiro autovetor para o Atlântico e o primeiro autovetor para o Pacífico. Esses dois autovetores foram utilizados como preditores da precipitação sazonal no norte-NEB. O *Hadley Centre* forneceu, para fins de uso nesta pesquisa, as séries mensais dos seus escores. As séries completas dos escores e das anomalias de precipitação e volume escoado utilizados para a ADL estão listadas na seção A.3 do Anexo. Neste texto, para simplificar a notação, se usará o termo “escores dos autovetores de TSM”.

3.2.7. Reservatório Coremas-Mãe D'Água

A bacia do Piancó (4550 km²) situa-se na bacia de contribuição do reservatório Coremas-Mãe D'Água (7947 km²), Figura 3.2. O reservatório tem capacidade de acumulação de 1350 milhões de m³ e atende a demandas de irrigação, piscicultura, abastecimento humano, geração de energia e perenização dos rios Piancó e Piranhas, a

jusante do reservatório, estimadas atualmente em cerca de 30,6 milhões de m^3 mensais, cerca de $11,8 m^3 s^{-1}$ (Oliveira, 1998). Deste total, cerca de 42% são transpostos para áreas irrigadas da vizinha bacia do Alto Piranhas, 51% são usados para geração de energia e a seguir regularizam os rios a jusante e abastecem o reservatório Açú e áreas irrigadas no Rio Grande do Norte. Os 7% restantes são utilizados para abastecimento humano, animal e irrigação nas margens do reservatório. Como as transferências entre bacias são definidas por acordo, mediados pelo DNOCS, as retiradas do reservatório podem ser consideradas constantes ao longo do ano. A demanda média mensal “desejada” foi aqui adotada como constante em todos os meses do ano e igual a 35 milhões de m^3 (cerca de $13,5 m^3 s^{-1}$).

Para fins de cálculo do volume afluyente ao reservatório, considerou-se a mesma lâmina (mm) estimada para a bacia do Piancó, ou seja, realizou-se uma simples proporção de área de bacias-volumes.

3.3. Transferência da previsão de precipitação para outras variáveis através de reamostragem

A precipitação sazonal é uma variável que determina o volume escoado sazonal numa bacia hidrográfica, a recarga dos seus aquíferos durante a estação chuvosa, o déficit hídrico (e conseqüentemente a necessidade de irrigação) de culturas dependentes de chuva, ou as decisões de gerenciamento de um reservatório. A um registro histórico de precipitação sazonal correspondem registros (ou valores estimados) dele derivados, como de volume escoado, de volume armazenado no aquífero, de déficit hídrico para culturas dependentes de chuva ou de liberações para os diversos usuários de um reservatório.

Nos métodos de previsão de precipitação tratados neste trabalho (seção 3.4), a previsão é apresentada em cinco categorias. Estas categorias são definidas como equiprováveis (cada uma tendo ocorrido com 20% de frequência) sobre um período de referência no registro histórico. Uma análise de frequência da série anual de precipitação sazonal define os limites das cinco categorias (vide seção 3.2.3). A previsão da precipitação estima probabilidades de ocorrência para cada uma das cinco categorias, para a próxima estação chuvosa.

Esse formato é interessante por apresentar, explicitamente, uma medida da incerteza associada à previsão. Por outro lado, os modelos usuais de simulação e previsão das variáveis derivadas, como vazão ou necessidade de irrigação, não utilizam entradas nesse formato. Dentre as alternativas discutidas recentemente para resolver este problema (vide seção 2.1) os métodos de reamostragem estatística (Croley, 1996; Briggs e Wilks, 1996) parecem os mais adequados no contexto desta pesquisa.

Esses métodos de reamostragem utilizam previsões categorizadas probabilísticas de uma variável hidrometeorológica para inferir a probabilidade de ocorrência de uma outra variável derivada da primeira. Com a reamostragem, cria-se uma série sintética de precipitação sazonal e das outras variáveis derivadas, repetindo registros da série histórica de tal modo que a nova série obedeça às probabilidades de ocorrência estabelecidas pela previsão de precipitação. Assim, os registros pertencentes às categorias que tiveram maior probabilidade na previsão estarão presentes, na série sintética, em maior número que os registros pertencentes às categorias com menor probabilidade de ocorrência prevista. A previsão da variável derivada, também em forma categorizada probabilística, é obtida através da análise de frequência da sua série sintética.

Neste trabalho utilizou-se o método de reamostragem proposto por Croley (1996, 1997). Ele é baseado nas previsões emitidas para os Estados Unidos pelo *Climate Prediction Center* da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) daquele país, em formato probabilístico para três categorias. A seguir descreve-se o procedimento, aqui adaptado para cinco categorias.

Seja um método de previsão que forneça o prognóstico como probabilidades associadas a cinco categorias (intervalos de precipitação) pré-definidas como equiprováveis, tendo como referência os registros climatológicos históricos. A previsão especifica as seguintes probabilidades para a precipitação sazonal:

$$\begin{aligned}
 \hat{P}[Q \leq \theta_{0.2}] &= a \\
 \hat{P}[\theta_{0.2} < Q \leq \theta_{0.4}] &= b \\
 \hat{P}[\theta_{0.4} < Q \leq \theta_{0.6}] &= c \\
 \hat{P}[\theta_{0.6} < Q \leq \theta_{0.8}] &= d
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

$$\hat{P}[Q > \theta_{0.8}] = e$$

onde Q = precipitação sazonal; θ_γ = quantis de probabilidade γ de ocorrência para a estação; e a, b, c, d, e = probabilidades da previsão.

Uma série sintética de dados suficientemente grande pode ser construída, com frequências relativas que satisfaçam à equação (3.3), duplicando os anos no registro histórico, tal que:

$$\frac{N_A}{N} = a; \frac{N_B}{N} = b; \frac{N_C}{N} = c; \frac{N_D}{N} = d; \frac{N_E}{N} = e \quad (3.4)$$

onde, N é o tamanho da série sintética, N_A é o número de anos na série sintética com $Q \leq \theta_{0.2}$, N_B é o número de anos com $\theta_{0.2} < Q \leq \theta_{0.4}$, etc. A série histórica de precipitação de n anos tem n_A anos com $Q \leq \theta_{0.2}$, n_B anos com $\theta_{0.2} < Q \leq \theta_{0.4}$, etc. A série sintética é construída duplicando cada um dos n_A anos N_A/n_A vezes, cada um dos n_B anos N_B/n_B vezes, e assim por diante. Cada ano i ($i = 1, \dots, n$) é duplicado r_i vezes. Com a escolha adequada dos números de repetições (r_1, r_2, \dots, r_n), é possível forçar a frequência relativa de qualquer grupo arbitrário de cenários na série sintética para tomar qualquer valor desejado. Para N suficientemente grande pode-se aproximar as probabilidades da previsão em qualquer nível de precisão usando os números inteiros de repetições r_i .

Seja uma série histórica derivada da série de precipitação, por exemplo, de volumes escoados sazonais (x_1^n, \dots, x_n^n), correspondente à série histórica de precipitação sazonal (q_1^n, \dots, q_n^n), onde os subscritos ($1, \dots, n$) são os anos do registro histórico. Esta série é reamostrada seguindo os r_i determinados para a série de precipitação, gerando então uma série sintética de volume escoado de tamanho N , que pode ser considerada como a amostra de previsão de volume escoado. Descritores estatísticos podem ser expressos em função tanto da série sintética (x_1^N, \dots, x_N^N) ou da série original (x_1^n, \dots, x_n^n). Por exemplo, a média e variância da série sintética de volume escoado sazonal x_{med} e S^2 , são (Croley, 1996):

$$x_{med} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n r_i x_i^n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i x_i^n \quad (3.5)$$

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k^N - x_{med})^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n r_i (x_i^n - x_{med})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i (x_i^n - x_{med})^2 \quad (3.6)$$

onde os pesos w_i dependem, para cada ano i , do valor q_i da precipitação sazonal ocorrida naquele ano:

$$w_i = \frac{n}{N} r_i = a \frac{n}{n_A}, \forall i | q_i \leq \theta_{0.2}$$

$$w_i = \frac{n}{N} r_i = b \frac{n}{n_B}, \forall i | \theta_{0.2} < q_i \leq \theta_{0.4}$$

$$w_i = \frac{n}{N} r_i = c \frac{n}{n_C}, \forall i | \theta_{0.4} < q_i \leq \theta_{0.6}$$

$$w_i = \frac{n}{N} r_i = d \frac{n}{n_D}, \forall i | \theta_{0.6} < q_i \leq \theta_{0.8}$$

$$w_i = \frac{n}{N} r_i = e \frac{n}{n_E}, \forall i | q_i > \theta_{0.8}$$

A distribuição de probabilidade da série sintética de volume escoado sazonal pode ser determinada como as frequências relativas dos eventos x (Croley, 1996):

$$\hat{P}[X \leq x] = \frac{1}{n} \sum_{i \in \Omega} w_i, \Omega \equiv \{i | x_i^n \leq x\} \quad (3.7)$$

O procedimento de análise de frequência utilizado no método de reamostragem foi uma análise simples de proporções. O ajuste de uma distribuição paramétrica de probabilidade teria a vantagem de não restringir os limites de variabilidade da precipitação ou volume aos observados no registro histórico (Croley, 1996). Isto é limitado pela dificuldade de escolha de distribuições que se ajustem satisfatoriamente à distribuição obtida da reamostragem.

Procedimentos alternativos de reamostragem ao apresentado acima poderiam ter sido utilizados (vide Efron e Tibshirani, 1993, para uma apresentação ampla). Por exemplo, Briggs e Wilks (1996), propõem um “*bootstrap* ponderado” que usa como entrada as mesmas previsões do NOAA que inspiraram Croley. Para a finalidade deste estudo, o procedimento de reamostragem adotado é adequado, além de apresentar a vantagem da simplicidade conceitual e computacional.

3.4. Previsão de precipitação

3.4.1. Modelo de circulação global

3.4.1.1. Considerações gerais

Os MCGs se originaram de modelos regionais desenvolvidos para previsão de tempo no horizonte de horas ou dias (os *modelos numéricos de tempo*); depois foram estendidos para a escala global, com menor resolução espacial, para previsão climática no horizonte temporal de décadas ou séculos, no âmbito dos estudos de mudanças climáticas globais (Henderson-Sellers e McGuffie, 1987; Loaiciga *et al.*, 1996). Recentemente estão sendo testados para previsão climática nos horizontes sazonais e interanuais.

Os MCGs são modelos numéricos de balanço e transferência de calor e massa resolvidos em geral por esquemas de diferenças ou elementos finitos. A malha horizontal de solução das equações tem resolução de alguns (cerca de 2 a 4) graus de latitude-longitude, o equivalente a 2 – 5 centenas de quilômetros nas regiões tropicais, como o norte-NEB. Na vertical, a atmosfera e o oceano são divididos em várias camadas (normalmente entre 10 e 30 camadas). O intervalo de tempo de resolução numérica é da ordem de 30 minutos (Watterson, 1993). Os modelos que contêm apenas o componente atmosférico são chamados de *modelos de circulação global atmosférica* – MCGAs – e usam como entrada condições iniciais e de contorno do oceano, como temperaturas na superfície do mar. Recentemente *modelos de circulação global oceânica* – MCGOs – têm sido *acoplados* aos MCGAs, com solução simultânea, dando origem aos *MCGs acoplados*. Os modelos acoplados são mais coerentes teoricamente, mas nem sempre fornecem resultados melhores que os MCGAs inicializados com o estado dos oceanos; apesar disto, a tendência é de melhoria crescente do seu desempenho.

O esquema numérico usado nos MCGAs pode ser do tipo espectral ou de malha cartesiana (Henderson-Sellers e McGuffie, 1987). Os modelos de malha resolvem as equações dinâmicas em uma rede de pontos distribuída na horizontal (latitude e longitude) e na vertical (camadas da atmosfera). A resolução do modelo é geralmente indicada na forma, por exemplo, 2,5 x 3,75 L19, especificando uma malha de 2,5° de

latitude por $3,75^\circ$ de longitude com 19 camadas na vertical (esta é a resolução do *Unified Model* do *UK Meteorological Office*). No modelo espectral, os processos na vertical e na superfície são resolvidos também numa malha retangular. As variáveis que descrevem os fluxos atmosféricos na horizontal, porém, são representadas sobre a esfera planetária como funções da latitude e da longitude. Estas funções são integradas no espaço espectral, ou seja, em uma representação de somatórios de senos e co-senos. A cada intervalo de tempo, os valores das variáveis são transformados do espaço espectral, onde são resolvidos os processos horizontais, para o espaço cartesiano, onde são resolvidos os processos verticais, através da transformada de Fourier. A resolução do modelo é indicada pelo nível e tipo de truncamento das harmônicas da transformada de Fourier. A um determinado número de harmônicas corresponde uma certa resolução da malha no espaço cartesiano. O tipo de truncamento (triangular, trapezoidal, pentagonal, etc.) determina a aproximação com que o truncamento será realizado. A resolução do modelo é geralmente indicada na forma, por exemplo, T63L31, especificando que tem 31 camadas na vertical, a resolução horizontal é representada por 63 harmônicas (também chamadas de “ondas zonais”) e o tipo de truncamento – T – é triangular (esta é a resolução do MCGA do ECMWF). O tipo espectral é menos exigente que o cartesiano em termos computacionais.

Variáveis típicas de saída dos MCGs, apresentadas em intervalo diário, são (Becker, 1997): altura geopotencial, temperatura do ar, velocidade do vento em duas direções ortogonais e velocidade vertical em diversos níveis de pressão atmosférica, como 500 e 200 hPa; cobertura de nuvens, precipitação, umidade do solo, cobertura de neve; radiação solar, temperatura e fluxo de calor sensível e latente à superfície; e pressão e temperatura na superfície do mar.

Para os estudos hidrológicos e agrícolas, as principais variáveis de interesse são a temperatura do ar, a precipitação, a umidade do solo e o escoamento superficial. Os MCGs ainda não apresentam um nível de exatidão desejável na simulação dessas variáveis, particularmente das duas últimas. Um dos principais motivos é a inadequada representação da topografia, das características e dos usos dos solos, e dos processos superficiais (entre eles a infiltração) nas áreas continentais e suas relações com os processos na atmosfera, principalmente devido à escala de resolução (Kite, 1995; Dickinson, 1996). O escoamento é calculado como o excesso de água no reservatório do solo e não é propagado de uma célula para outra do modelo (Henderson-Sellers e

Dickinson, 1993). Os resultados têm apresentado distorções significativas, como as encontradas por Kuhl e Miller (1992), que calcularam o volume sazonal escoado de vários grandes rios do mundo, em diferentes regiões geográficas, utilizando um MCG, comparando os resultados com observações mensais. A temperatura e a precipitação, porém, têm sido simuladas com destreza crescente, e já são consideradas nos estudos de validação dos MCGs (Folland *et al.*, 1991; Sperber e Palmer, 1996; Anderson, 1996). Nas regiões tropicais, a principal variável de interesse é a precipitação, sendo a temperatura de menor importância.

Quando utilizados para previsão de mudanças climáticas, os modelos são “forçados” (isto é, executados com determinadas condições iniciais) com cenários hipotéticos de concentrações de gases do efeito estufa ou de mudanças no uso do solo em larga escala (como o desmatamento da Amazônia, por exemplo). O período de simulação é de vários anos ou décadas, que não correspondem necessariamente à cronologia real. Em outras palavras, por exemplo, pode-se usar um cenário de concentração de gases prevista para cerca de 2050 e executar o modelo durante 10 anos naquelas condições. Isto não quer dizer que foram simulados os anos de 2050 a 2059 e que se obteve previsões para aqueles anos específicos. Importam médias e variâncias das variáveis de interesse sobre o período de simulação. Essas previsões de variações relativas (em relação ao clima atual) na média e variância de variáveis como temperatura e precipitação vão ser utilizados nos modelos de impactos, como os hidrológicos ou os de produção agrícola (Pittock, 1993; Semenov e Barrow, 1997).

Quando utilizados para previsão sazonal, mudanças de concentração de gases ou de uso do solo não são incluídas nas simulações, em virtude da baixa probabilidade de ocorrerem significativamente no horizonte de simulação. Os modelos são “forçados” utilizando condições iniciais observadas imediatamente antes do período que se quer prever, geralmente TSMs, e executados sobre alguns meses apenas. Os resultados referem-se realmente aos dias e meses cobertos pela simulação. Importam os valores efetivamente previstos, diários, acumulados mensalmente ou sazonalmente (Folland *et al.*, 1991; Sperber e Palmer, 1996; Brankovic e Palmer, 1997). Durante a execução, as TSMs, principal fator influente nas previsões, são mantidas nos valores calculados pelo modelo no intervalo de integração anterior (caso de MCGs acoplados), ou modificadas, quando o modelo não é considerado suficientemente preciso na simulação dos processos de previsão da TSM. Neste caso, as TSMs são “forçadas” usando valores previstos ou

“persistidos”. Por exemplo, Cavalcanti *et al.* (1998), na previsão do CPTEC para o NEB, utilizam três diferentes condições para as TSMs durante o horizonte de previsão: a) persistidas em todos os oceanos, somando o valor climatológico para cada mês com a anomalia observada no mês que antecedeu o início da previsão; b) para o Atlântico, valores previstos pelo modelo estatístico do CPTEC (Pezzi *et al.*, 1998), para o Pacífico, previsões do modelo dinâmico do NCEP (Ji *et al.*, 1996), e para os demais oceanos, valores persistidos como descrito em (a); c) como em (b), mas usando valores persistidos também para o Atlântico. O prognóstico final é inferido pela análise das três simulações. Este procedimento é justificado considerando que a geração atual de MCGOs tem maior destreza na previsão das TSMs no Pacífico (*El Niño*) e menor nos outros oceanos, e que na maior parte dos anos ocorrem poucas mudanças nas anomalias de TSM dentro da estação chuvosa em relação aos valores na pré-estação, fazendo com que os valores persistidos não se desviem muito dos observados. Outros grupos de previsão para o NEB usam valores persistidos de TSM (Graham, 1997; Evans *et al.*, 1998).

As previsões sazonais são em geral realizadas através de um procedimento chamado de *ensemble forecasting* (*conjunto de previsões* neste texto), que consiste em produzir várias previsões individuais para um mesmo período, partindo de condições iniciais diferentes (Wilks, 1995). Cada previsão individual é denominada de *membro* do conjunto. Este procedimento é originário dos serviços de previsão operacional de tempo e baseia-se na consideração da atmosfera como um sistema caótico, ou seja, mesmo diferenças mínimas no seu estado em determinado momento podem produzir comportamento bastante diferenciado ao longo do tempo (Palmer, 1993). As condições iniciais podem ser assumidas de diversas maneiras (Toth e Kalnay, 1993; Wilks, 1995). Uma das formas é iniciar a execução do modelo em momentos diferentes e utilizar como condições iniciais os valores observados das variáveis de entrada do MCG no momento de início da execução (Brankovic e Palmer, 1997). Na realidade, esses dados não são necessariamente observados, mas, de acordo com sua natureza, obtidos de várias fontes (redes de medição, outros modelos, etc), consistidos e interpolados na resolução do MCG. São as chamadas *reanálises*, na literatura de modelagem climática (Paolino *et al.*, 1995; Kalnay *et al.*, 1996). O conjunto de previsões pode ser analisado estatisticamente, gerando informações como um valor de tendência central, uma medida de dispersão, ou uma distribuição de probabilidade, que são estimativas da

previsibilidade da circulação atmosférica e dos elementos associados, como a precipitação (Wilks, 1995; Barnett, 1995; Sperber e Palmer, 1996; Anderson, 1996; Wang e Rui, 1996).

Alguns autores argumentam que, em virtude da inexatidão das previsões dos MCGs, deve-se interpretá-las em termos relativos, tendo como referência simulações “de controle”, que representariam a habilidade do MCG na reprodução do clima em tempo real. A diferença entre estas duas simulações é então empregada como o cenário climático para a finalidade desejada. A escolha da simulação de referência ainda é discutida e duas alternativas têm sido utilizadas: simulações sobre o mesmo período tendo como condições iniciais médias climatológicas de TSM (Cavalcanti *et al.*, 1998), e a média das previsões sobre um período de referência, anterior ao objeto da previsão (Brankovic e Palmer, 1997).

Nas previsões sazonais a incerteza associada aos resultados fornecidos pelas simulações aumenta quando as escalas temporal e espacial de interpretação são reduzidas. A escala de interpretação é aquela para a qual se quer transferir os resultados do modelo, seja, por exemplo, o nível continental, quando se agrega vários pontos de resolução do modelo, ou o nível da pequena bacia hidrográfica, menor que a malha de resolução do modelo. A aplicabilidade dos resultados em nível operacional vai depender da grandeza desta incerteza.

3.4.1.2. Simulações de previsões sazonais do MCG do ECMWF

O *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* – ECMWF, um centro de estudos climáticos da União Européia (UE), localizado no Reino Unido, vem, recentemente, realizando experimentalmente previsões sazonais utilizando um modelo acoplado oceano-atmosfera (Alves *et al.*, 1997). A integração entre os dois modelos se dá através da transferência diária de fluxos de quantidade de movimento, calor e água no sentido atmosfera → oceano, e de valores atualizados de temperatura na superfície do mar no sentido oceano → atmosfera. A incerteza associada às previsões é grande, como caracterizado pelo próprio ECMWF em relação ao seu modelo acoplado (European, 1998a):

- **Incerteza na previsão da temperatura da superfície do mar (TSM).** Acredita-se que a maior parte da variabilidade previsível da atmosfera no horizonte

sazonal está condicionada a anomalias de TSM, enquanto que a principal fonte de variabilidade de TSM é o *El Niño*. O modelo do ECMWF tem conseguido prever razoavelmente as flutuações do *El Niño*, mas a confiança nas previsões de outros tipos de variabilidade de TSM ainda é baixa. Além disso, outros componentes que influem na previsão da TSM, como umidade do solo e gelo oceânico, têm parametrizações muito simplificadas nesse MCG.

- **Erros na resposta da atmosfera.** A previsão vem do modelo acoplado, que tem um *drift* substancial na TSM. O termo *drift* tem sido utilizado na área de modelagem climática para denominar um erro nos resultados provocado pelo procedimento de acoplamento, ainda imperfeito, dos modelos atmosférico e oceânico. O *drift* é estimado durante um período de testes do MCG acoplado e removido dos resultados das simulações de previsão a posteriori (Alves *et al.*, 1997; European, 1998b,c). Embora as características globais da resposta da atmosfera são geralmente pouco afetadas por esta variação na TSM, certos padrões podem ser mudados e certas respostas regionais podem até ser invertidas. Além disso, quando o modelo atmosférico é executado usando até mesmo TSMs observadas, as previsões probabilísticas que ele produz em certas regiões são claramente irrealistas. Uma avaliação razoável da confiabilidade do modelo acoplado requereria a comparação das previsões e observações por muitas décadas, e isto ainda não está disponível. Acredita-se que o modelo possui alguma destreza, mas não se é capaz de quantificá-la. Espera-se melhorar o conhecimento deste tipo de incerteza no futuro, mas isto não ocorrerá rapidamente.
- **A variabilidade natural da atmosfera.** A técnica de previsões conjuntas, em princípio, pode apenas dizer as probabilidades de como será o clima. Mesmo com sistemas quase perfeitos, a realidade iria frequentemente diferir das previsões. Pode-se esperar que sobre um número suficiente de previsões independentes a destreza do sistema seja representativa.
- **Interpretação local do resultado do modelo.** O modelo é global, e no seu melhor desempenho, pode apenas esperar representar os padrões de tempo de larga escala. Tempo e clima locais podem ser muito influenciados por características (acidentes topográficos, linhas de costa, uso do solo) muito pequenas para serem incluídas no modelo de resolução relativamente baixa. De

modo geral, erros no modelo podem levar a comportamento irreal em certas áreas. Conhecimento local será importante para avaliar o resultado do modelo, e para transformá-lo em afirmações realistas na escala local e regional.

É interessante, portanto, realizar a avaliação do modelo acoplado como um todo e também de cada um de seus componentes separadamente, isto é, do MCG atmosférico e do MCG oceânico, para detectar as principais fontes de incerteza. Este é o objetivo do programa de pesquisa sobre previsibilidade sazonal denominado PROVOST – “*prediction of climate variations on seasonal to interannual timescales*” (Palmer, 1997). O PROVOST é executado em conjunto pelo ECMWF e outros grupos de pesquisa da UE, entre os quais as agências francesas *Météo France* e *Eléctricité de France*, e o serviço meteorológico britânico (*UK Meteorological Office*). Na primeira parte do PROVOST apenas os MCGs atmosféricos desses quatro centros foram testados. Foram simuladas previsões sazonais para o período 1979-93, usando dados *observados* do estado dos oceanos (isto é, TSMs) como condições iniciais e de contorno. Em outras palavras, assumiram-se previsões perfeitas para a TSM e, nestas condições, pode-se analisar a capacidade preditiva do componente atmosférico da atual geração de MCGs.

O MCG atmosférico do ECMWF é do tipo espectral (vide seção anterior), com resolução T63L31, ou seja, horizontal de $1,8^\circ \times 1,8^\circ$ de latitude e longitude e vertical de 31 níveis. A partir de agora, se usará neste texto o termo MCG, em lugar do mais preciso MCGA, para se designar o modelo de circulação global atmosférica do ECMWF.

As simulações para quantificação da previsibilidade sazonal têm as seguintes características (Alves *et al.*, 1997; Becker, 1997):

- ECMWF produziu previsões para o período 1979-93, para quatro estações do ano, com extensão de quatro meses cada: *inverno* (dezembro a março), *primavera* (março a junho), *verão* (junho a setembro) e *outono* (setembro a dezembro). Os nomes das estações referem-se ao hemisfério norte e são apenas denominações aplicadas aos períodos de quatro meses escolhidos para as previsões sazonais. Note-se também que o último mês incluído em cada estação corresponde ao primeiro mês da estação seguinte.
- O MCG foi executado nove vezes para produzir o conjunto de previsões (com, portanto, nove membros) para cada estação de quatro meses. Isto foi realizado

iniciando as integrações dos diversos membros em dias diferentes no mês que antecede cada estação. Por exemplo, para a estação março-junho, cada membro foi assim gerado: o membro 1 é a previsão obtida executando o MCG, com as condições iniciais do dia 20 de fevereiro, desde o dia 20 de fevereiro até o dia 30 de junho; o membro 2 é a previsão obtida executando o MCG, com as condições iniciais do dia 21 de fevereiro, desde o dia 21 de fevereiro até o dia 30 de junho; e o membro 9 foi obtido executando o MCG sobre o período de 28 de fevereiro até 30 de junho, utilizando como condições iniciais os valores observados em 28 de fevereiro das variáveis de entrada do MCG. Note-se, entretanto, que o resultado da previsão em si, para cada membro, são os valores obtidos no período de 1 de março a 30 de junho. Os dias anteriores servem apenas de período de inicialização do MCG.

- As TSMs foram prescritas, isto é, assumidas, como valores observados (ou *reanalisados*), atualizadas diariamente durante a execução do modelo.
- Os resultados da previsão são fornecidos aos usuários em nós de uma malha de resolução de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ de latitude-longitude (apesar do MCG ter resolução de $1,8^\circ \times 1,8^\circ$).
- As variáveis fornecidas incluem as já citadas na seção anterior, na forma de um valor médio diário para cada 10 dias de simulação na estação, ou seja, 12 valores para cada estação (que tem 120 dias no total).
- Adicionalmente, para cada estação, é fornecida uma simulação de controle. Esta simulação foi obtida inicializando-se o MCG a cada dia com dados observados (ou *reanalisados*), durante os 120 dias da estação, e executando-o durante 24 horas apenas.

Esse conjunto de resultados foi utilizado nesta tese, viabilizado porque o ECMWF os escreveu em CD-ROM, com finalidade de exploração da previsibilidade sazonal por pesquisadores de áreas correlatas (Becker, 1997). É importante ressaltar que as simulações sazonais do ECMWF não são realmente *previsões*, já que assumem-se como conhecidas as TSMs, que são a principal fonte da variabilidade climática no horizonte sazonal. Como visto na seção anterior, o que se tem feito experimentalmente nas previsões sazonais em tempo real via MCG é utilizar, como entrada para o MCGA, previsões de TSM geradas por um modelo oceânico acoplado, por outro modelo

oceânico, por modelos estatísticos, médias climatológicas mensais de TSM ou persistir durante o horizonte de previsão os valores observados no momento de início da previsão. Nesta tese as simulações sazonais do ECMWF poderão, eventualmente, ser tratadas como previsões, tendo-se, porém, sempre presente que elas representam a destreza apenas do MCG atmosférico, e não do sistema de previsão como um todo. Portanto, essas simulações não podem ser comparadas às previsões geradas com o modelo estatístico apresentado na seção 3.4.2.

3.4.1.3. Processamento da previsão de precipitação

Interessa a este trabalho avaliar a previsão de precipitação sazonal simulada pelo MCG do ECMWF, sob o ponto de vista de sua potencial utilidade para manejo de recursos hídricos em bacias como a do Piancó. Selecionaram-se então as previsões simuladas para a célula do MCG sobre essa bacia. A Figura 3.2 mostra a sua localização. O nó da malha de discretização numérica do modelo está localizado no centro geométrico da célula (ver seção seguinte, 3.4.1.4).

As previsões de precipitação, fornecidas pelo ECMWF originalmente em médias diárias para cada dez dias para 1979-93, foram acumuladas para toda a estação março-junho, ano a ano. Em virtude da não disponibilidade dos dados observados para o período 1989-93 para todos os postos, utilizou-se apenas o período 1979-88 dos dados de previsão.

A geração da previsão em forma probabilística foi realizada através da análise de frequência dos nove membros, em forma de anomalias normalizadas, a cada uma das categorias definidas na seção 3.2.3. (Tabela 3.4).

Não se usou a simulação de controle na análise. Todo o trabalho foi realizado, portanto, utilizando os dados efetivamente previstos pelo modelo na execução sazonal (vide seção anterior, 3.4.1.2).

3.4.1.4. Desagregação espacial da precipitação

Os MCGs ainda não simulam com exatidão satisfatória variações de temperatura ou precipitação em pontos específicos da malha de resolução do modelo, mas apenas padrões regionais dessas variáveis (vide seções 3.4.1.1 e 3.4.1.2). Surgiu então a necessidade de métodos de transferência dos dados de campos atmosféricos de larga

escala em dados de precipitação e temperatura em pequena escala (Wigley *et al.*, 1990). Esses métodos têm sido denominados, na área de estudo de MCGs, de *downscaling*, termo que poderia ser entendido como *redução de escala* ou *desagregação espacial*. Basicamente podem ser enquadrados em duas vertentes: (a) os modelos dinâmicos regionais, que são modelos numéricos semelhantes aos MCGs, mas com resolução mais fina, usando como dados iniciais e condições de contorno o resultado da simulação do MCG (McGregor *et al.*, 1993); e (b) métodos empíricos, a maior parte das vezes funções de transferência estatísticas entre os dados dos campos de larga escala e a variável de interesse na superfície (Wilby *et al.*, 1998). Os métodos dinâmicos, apesar de tenderem a se estabelecer no futuro, ainda sofrem por inexatidão e pelo custo computacional, o que tem impedido sua utilização mais ampla (Hewitson e Crane, 1996). Assim, os métodos empíricos têm sido largamente utilizados, por serem uma solução viável no curto prazo.

Neste trabalho optou-se, pelas razões acima, por utilizar um método empírico para desagregação da precipitação da escala de célula para a escala de bacia. Nessa classe de métodos, os mais empregados em estudos com MCGs são os estatísticos, principalmente à base de regressão, as redes neurais e os métodos estocásticos (Weichert e Burger, 1998; Wilby *et al.*, 1998). Esses métodos podem ser entendidos como variações dos métodos de desagregação espacial tradicionais (Salas *et al.*, 1980). A função de transferência de escala tem a forma genérica $Y = f(X)$, onde a função f pode ser qualquer dos métodos já mencionados e relaciona a variável de interesse Y na escala mais fina ao vetor de variáveis independentes, X , simuladas pelo MCG na escala de suas células. X pode ser composto de valores da própria variável dependente, Y , caracterizando uma desagregação espacial típica, ou ser composto de outras variáveis atmosféricas simuladas pelo MCG, como por exemplo pressão, do mesmo intervalo de tempo ou também de intervalos de tempo anteriores. As funções de transferência de escala são obtidas (calibradas) utilizando dados observados e utilizadas tendo como entrada os resultados das simulações do MCG.

Uma divergência ainda existente é quanto à natureza do dado do MCG, se pontual ou espacial. Em se considerando o dado pontual, a hipótese é de que o MCG estaria simulando um valor coincidente com a *superfície climática* naquele ponto específico, o que pode ser entendido também como uma amostra do clima naquela coordenada geográfica. Essa hipótese encontra suporte principalmente no esquema numérico do

modelo, que resolve as equações em cada um daqueles pontos da malha. Na abordagem espacial, o valor fornecido pelo modelo é considerado o valor médio da célula cujo centro geográfico é o ponto onde foi calculado o valor. Esta abordagem é mais intuitiva e encontra suporte na concepção e parametrização do MCG, que usa como valores de entrada dados calculados como médias espaciais. Skelly e Henderson-Sellers (1996) apresentam uma boa discussão sobre o assunto mas não chegam a uma conclusão definitiva sobre a natureza da informação fornecida pelos MCGs, concluindo que os usuários da informação não estariam cometendo erros em adotar uma ou outra abordagem, desde que considerem as hipóteses que a norteiam.

Aqui adotou-se a abordagem espacial, selecionando-se uma única célula como referência para a área que contém a bacia do Piancó. A primeira parte do estudo de desagregação foi uma caracterização do regime pluviométrico na célula do MCG sobre a bacia, com o objetivo de verificar a variabilidade espacial do total pluviométrico sazonal (período março-junho) sobre essa área e assim determinar a maneira mais adequada de realizar a transferência. Em virtude da alta correlação entre a precipitação sazonal na célula e na bacia, como citado na seção 3.2.3, escolheu-se a regressão linear como método de desagregação, definindo-se o período 1911-63 para estimativa dos parâmetros e 1964-88 para validação do ajuste.

3.4.2. Análise discriminante linear

O segundo método utilizado para previsão da precipitação sazonal foi o proposto e correntemente utilizado pelo *Hadley Centre*. A precipitação sazonal é a acumulada no período fevereiro-maio. Através da análise discriminante linear (ADL) relacionam-se os escores de dois autovetores de anomalias de TSM (um para o Atlântico e outro para o Pacífico; vide seção 3.2.6) aos valores das categorias de precipitação sazonal (vide seção 3.2.3). O resultado da ADL são estimativas do valor das probabilidades associadas a cada uma das categorias da precipitação.

Neste trabalho, para os escores dos autovetores, usaram-se médias dos meses novembro, dezembro e janeiro, imediatamente anteriores à estação chuvosa fevereiro-maio cuja precipitação se espera prever. Obteve-se uma relação discriminante para a precipitação regional e outra para a precipitação da bacia. Para estabelecimento (calibragem) dessas relações utilizou-se o período 1911-63. Depois testaram-se as relações para o período 1964-88.

A ADL (Ward e Folland, 1991; Statistical, 1995; Johnson e Wichern, 1998) usa o teorema de Bayes para estimar a probabilidade posterior associada a cada uma das cinco categorias de precipitação, dados os valores dos preditores. A formulação, considerando apenas um preditor, x , é:

$$P[Q_i | x] = \frac{q_i f_i(x)}{\sum_i q_i f_i(x)} \quad (3.8)$$

onde Q_i são as cinco categorias de precipitação; q_i é a probabilidade a priori da categoria i , que vale 0,2 para todas as categorias, equiprováveis neste caso; $f_i(x)$ é a probabilidade de se observar o valor x do preditor quando da ocorrência da categoria i de precipitação, sendo estimada da função densidade de probabilidade de x , para cada categoria, no período de calibragem do modelo. As distribuições de probabilidade das categorias são assumidas Normais com mesmo desvio padrão. Quando há mais de um preditor, como na situação estudada, supõe-se que eles não são correlacionados. As distribuições de probabilidade são assumidas como Normais multivariadas e a equação 3.8 é modificada para levar em conta a matriz de covariâncias dos preditores.

As análises foram executadas com o programa *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS), versão 6.

3.5. Previsão de volume escoado

3.5.1. Considerações gerais

No contexto deste trabalho, possíveis alternativas para previsão do volume escoado sazonal na escala de bacia seriam:

- Usar a previsão de precipitação sazonal como entrada para um procedimento de reamostragem (vide seção 3.3) que a relacione com o volume escoado.
- Usar a previsão de precipitação sazonal como entrada para um modelo precipitação-vazão, produzindo previsões de volume escoado.
- Usar variáveis representativas da circulação oceano-atmosfera em larga escala como preditores em modelos empíricos que as relacionem com o volume escoado.

A primeira alternativa é adequada apenas para o caso de se dispor de previsões categorizadas probabilísticas de precipitação, como as produzidas na seção 3.4. Uma vantagem é que se aproveita mais informação da previsão de precipitação e não somente um único valor, produzindo também previsões de volume de caráter probabilístico. Neste trabalho produziram-se previsões de volume escoado desta maneira, usando como entrada as previsões de precipitação produzidas pela ADL.

A segunda alternativa usa um único valor representativo da previsão de precipitação como entrada para o modelo de previsão de volumes. As previsões de precipitação fornecidas em termos categorizados probabilísticos podem ser convertidas a este formato tomando-se uma medida de valor central da distribuição de frequência, como a média ou a mediana. Em relação à alternativa anterior, perde informação, quando reduz a previsão a um único valor dela representativo. Para as previsões do MCG, esta alternativa é bastante adequada, por tomar cada *membro* do MCG como entrada e produzir então um conjunto de previsões de volume, que podem ser tratados estatisticamente em um momento posterior. Modelos precipitação-vazão sazonais serão necessários para as previsões de precipitação sazonal (ou, alternativamente, desagregá-las para uso em modelos mensais, por exemplo). As saídas de MCGs são fornecidas, em geral, no nível diário ou a cada 10 dias, o que as torna adequadas para uso direto em modelos hidrológicos mensais ou até diários. Aqui, não utilizou-se esta alternativa.

A última opção assume que o volume escoado em uma bacia tem como principal variável causal a precipitação e, assim, pode ser relacionado diretamente às variáveis que se acredita determinem a variabilidade da precipitação sazonal. O volume medido no exutório de uma bacia pode ser considerado integrador da precipitação em uma área. A possível vantagem desta alternativa em relação às alternativas anteriores é evitar o aumento de incerteza devido ao estágio intermediário de previsão de precipitação. Neste trabalho, utilizaram-se os escores dos autovetores de anomalias de TSM no Atlântico e Pacífico, utilizados pelo *Hadley Centre* para previsão de precipitação (vide seção 3.2.6), como preditores para o volume escoado sazonal na bacia do Piancó, através da mesma técnica estatística usada para prever precipitação, a ADL (vide seção 3.4.2).

3.5.2. Previsão de volume a partir da precipitação usando reamostragem

As probabilidades associadas a cada uma das cinco categorias que formam a previsão de precipitação sazonal produzida pela ADL foram utilizadas como entrada para o

procedimento de reamostragem descrito da seção 3.3. Dados de precipitação e volume escoado sazonais para 1911-63 foram usados para calibragem da reamostragem. Para validação da previsão, empregaram-se dados de 1964-88.

Para caracterização da influência da escala de produção da previsão da precipitação nas previsões de volume, foram comparados os resultados da previsão de volume que tiveram como base a previsão de precipitação nas escalas regional e de bacia. Previsões “perfeitas” de precipitação na escala de bacia e “climatológicas” foram empregadas como referência (vide seção 3.8).

3.5.3. Previsão de volume via ADL a partir da circulação oceano-atmosfera

A outra alternativa aqui considerada para prever volume escoado foi construir relações entre o volume sazonal em uma bacia hidrográfica e variáveis representativas da circulação oceano-atmosfera que controlaria em parte sua variabilidade. Testou-se esta possibilidade na bacia do Piancó, usando ADL para relacionar anomalias de volume escoado sazonal – fevereiro-maio (vide seção 3.2.4) com escores de autovetores de anomalias de temperatura da superfície dos oceanos Atlântico e Pacífico (vide seção 3.2.6), exatamente como realizado na previsão de precipitação regional no norte-NEB e da bacia (seção 3.4.2). O emprego dos mesmos preditores se baseia na alta correlação entre a precipitação e o volume sazonal. Na maioria dos anos (64% deles) os volumes sazonais foram classificados nas mesmas categorias da precipitação sazonal da bacia (Figura 3.3). Como anteriormente, os anos 1911-63 foram escolhidos para calibragem do modelo de ADL e o período 1964-88 selecionado para validação. Da mesma forma, médias dos escores dos autovetores de anomalias de TSM para os meses de novembro a janeiro de cada ano foram empregadas como preditores.

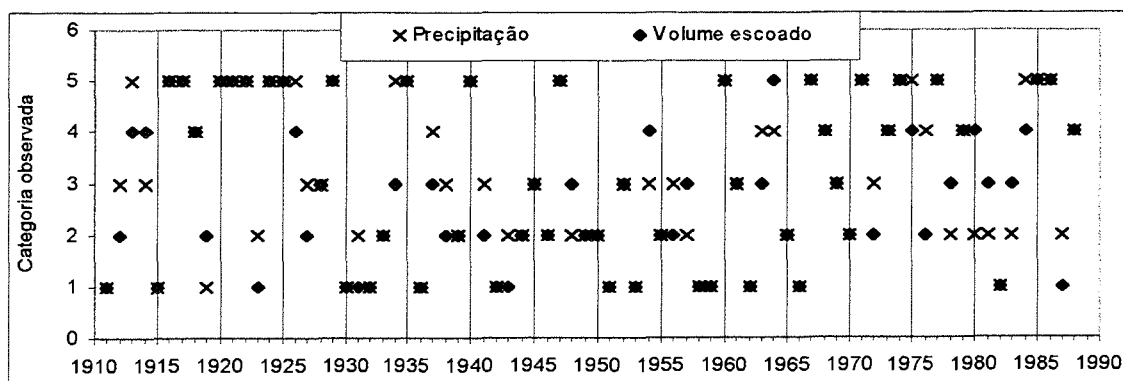


Figura 3.3. Comparação das categorias de anomalias normalizadas para volume escoado e precipitação na bacia do Piancó.

3.6. Operação do reservatório

3.6.1. Considerações gerais

Para avaliação do impacto da previsão de precipitação e volume escoado sazonais sobre a operação de reservatórios, simulações foram conduzidas para prever a capacidade de atendimento às demandas para um reservatório localizado no norte-NEB.

Utilizaram-se como cenários hidrológicos as previsões de precipitação e volume produzidas conforme os procedimentos descritos nas seções anteriores. Dois modelos de operação de reservatórios foram utilizados, um convencional e um, desenvolvido neste trabalho, hipoteticamente mais robusto à incerteza da previsão.

Para seleção dos modelos de operação deve-se considerar o formato da previsão. Quando a previsão é expressa como um único valor representativo da distribuição de probabilidade prevista (por exemplo, a média, mediana ou um valor associado a uma probabilidade de excedência), métodos determinísticos de otimização ou de simulação são adequados e geram uma única estratégia de operação. Em se aproveitando toda a informação da distribuição de probabilidade da previsão, métodos estocásticos de operação, tanto explícitos quanto implícitos podem ser usados. No caso dos métodos explícitos, a distribuição de probabilidade fornece os valores das probabilidades utilizadas no algoritmo do método. No caso dos métodos implícitos, séries sintéticas de volumes escoados podem ser geradas por Monte Carlo, com base na distribuição de probabilidade da previsão, dando origem cada uma a regras operativas obtidas de rodadas independentes de um algoritmo determinístico de otimização ou simulação. As liberações efetivas podem ser inferidas estatisticamente deste conjunto de liberações. Dois problemas, em ambas alternativas, são a desagregação temporal para os meses da estação chuvosa, caso se use modelos de operação mensal, e a estimativa dos volumes para os meses não incluídos na previsão.

Escolheu-se a programação dinâmica (PD) como o modelo convencional, em virtude de sua ampla utilização em recursos hídricos. A teoria do controle difuso (*fuzzy control*) foi utilizada como base para a construção do modelo alternativo (aqui denominado de CD). Os dois estão descritos a seguir, nas seções 3.6.3 e 3.6.4, e foram aplicados no modo determinístico.

A mediana da previsão de volume sazonal foi desagregada mensalmente (para os meses cobertos pela previsão, fevereiro-maio) proporcionalmente às médias históricas mensais. Para os meses não cobertos pela previsão, as médias históricas mensais foram usadas como estimativas de afluências.

Os cenários de previsão são:

- (a) previsão climatológica, onde médias mensais de volumes escoados para o período 1911-63 foram usadas, para todos os anos, como previsão;
- (b) previsões de volume produzidas na seção 3.5.2, em duas formas: usando a precipitação regional como referência e usando a precipitação da bacia do Piancó como referência; e
- (c) previsão perfeita, onde os volumes mensais observados para fevereiro-maio foram usados como previsão, e médias mensais para os outros meses.

O reservatório também foi simulado sem considerar previsão e sujeito às demandas desejadas, sem qualquer restrição, ou seja, obedecendo à chamada “regra padrão”.

O período de 1911-88 foi empregado para avaliar os modelos, usando-se 1911-63 para calibragem e 1964-88 para validação dos resultados. Estes anos contêm vários dos períodos mais secos já registrados na região, que incluem o *El Niño* de 1983, além de anos muito chuvosos, como 1985. As previsões e modelos de operação foram aplicados ao reservatório Coremas-Mãe D’Água, caracterizado na seção 3.2.7.

3.6.2. Formulação do problema de operação

Considere-se um único reservatório com vazões de entrada i_t , perdas por evaporação e infiltração e_t , e liberações r_t em cada intervalo de operação t . A seqüência de perdas e_t é assumida como conhecida, a seqüência de vazões i_t como prevista e a seqüência de liberações r_t deve ser determinada. Dada a capacidade armazenada do reservatório K , o problema de operação objetiva encontrar a seqüência de liberações r_t que otimize (maximize ou minimize) um critério de avaliação, expresso por uma função-objetivo, durante o horizonte de operação, aqui adotado como um ano. Assume-se que a operação será mensal, ou seja, haverá 12 estágios de operação em um ano, o primeiro iniciando no primeiro mês da estação chuvosa que está sendo prevista (fevereiro, neste caso).

As restrições do problema são o balanço hídrico mensal:

$$s_{t+1} = s_t + i_t - e_t - r_t, \text{ para cada estágio } t, \quad (3.9)$$

(onde s_t é o volume armazenado no reservatório), a capacidade K e o volume morto s_{min} :

$$s_{min} \leq s_t \leq K, \text{ para cada período } t. \quad (3.10)$$

O objetivo escolhido, no caso da PD, é a minimização do somatório da *escassez relativa* D_t no horizonte de operação, definida como:

$$D_t = \frac{R_t^* - R_t}{R_t^*} \quad (3.11)$$

sendo R_t^* e R_t as liberações desejadas e atendidas em cada estágio t .

No caso da operação via CD, o objetivo é a manutenção de valores considerados “razoáveis”, pelo operador, para o volume armazenado no reservatório e para a *escassez relativa média* D_m :

$$D_m = \frac{\sum D_t}{n} \quad (3.12)$$

onde n é o número de estágios nos quais ocorreu escassez.

A capacidade de atendimento às demandas em cada ano pode ser expressa como $(I - D_m)$ ou como $(I - \sum D_t)$, calculada simulando a operação do reservatório mensalmente, obedecendo as regras de operação formuladas pelos modelos, utilizando os valores efetivamente observados do volume afluente em cada mês. Neste trabalho utiliza-se a própria escassez como variável representativa do atendimento à demanda.

3.6.3. Operação por programação dinâmica

A idéia básica da programação dinâmica é subdividir o problema inicial em um conjunto de problemas mais simples ao invés de tentar resolver o problema complexo de uma vez. Cada problema simples é membro de uma classe de problemas similares e não um problema isolado para o estágio e o estado iniciais. Portanto, o enfoque é encaixar o problema inicial em uma família de problemas similares. A utilidade desse enfoque dependerá da viabilidade de se encontrar um encaixe tal que: 1) pelo menos um membro da família tenha uma solução simples; e 2) seja possível estabelecer relações funcionais entre os vários membros da família (Braga, 1987). A programação dinâmica tem sido usada extensivamente em operação de reservatórios (vide, entre muitos outros,

Young, 1967; Buras, 1972; Loucks *et al.*, 1981; Stedinger *et al.*, 1984; Yeh, 1985; Wurbs, 1993; Barros, 1997). Por isto, aqui não se faz uma ampla descrição do método e suas possibilidades, mas apenas descreve-se o esquema utilizado.

Neste trabalho utiliza-se um algoritmo de programação dinâmica determinística regressiva para operação de um único reservatório, desenvolvido a partir dos esquemas sugeridos por Sargent (1979) e Loucks *et al.* (1981), implementado por Galvão *et al.* (1994).

O problema de operação de reservatório definido pelas equações 3.9 a 3.11 pode ser entendido como um processo de tomada de decisão em múltiplos estágios. Os estágios são os períodos de tempo e os estados são os volumes armazenados. Uma seqüência de equações recursivas pode ser formulada, uma para cada estágio do processo.

A função $f^1_T(s_T)$ é a mínima escassez (*Esc*) obtida pela operação do reservatório no último período T do ano, dado um volume armazenado inicial de s_T :

$$f^1_T(s_T) = \min [Esc(s_T, s_T + i_T - e_T - r_T, r_T)] \quad (3.13)$$

A equação 3.13 deve ser resolvida para valores discretos de s_T , de 0, ou um mínimo volume armazenado permissível naquele período, ao máximo volume armazenado possível K . Esses valores de $f^1_T(s_T)$ serão necessários para resolver as próximas equações recursivas.

Movendo-se regressivamente no tempo, o próximo estágio é o período anterior, $T-1$. Há agora dois períodos remanescentes para operação do reservatório. Neste caso a função $f^2_{T-1}(s_{T-1})$ representa a escassez total mínima dos dois períodos que virão, dado o armazenamento inicial de s_{T-1} no período $T-1$:

$$f^2_{T-1}(s_{T-1}) = \min [Esc(s_{T-1}, s_{T-1} + i_{T-1} - e_{T-1} - r_{T-1}, r_{T-1}) + f^1_T(s_T)] \quad (3.14)$$

o que deve ser novamente resolvido para todos os valores discretos de s_{T-1} entre 0 e K . Voltando continuamente no tempo, a equação recursiva geral para cada período t com n ($n > 1$) períodos remanescentes pode ser escrita:

$$f^n_t(s_t) = \min [Esc(s_t, s_t + i_t - e_t - r_t, r_t) + f^{n-1}_{t-1}(s_t + i_t - e_t - r_t)] \quad (3.15)$$

onde o índice n aumenta em cada estágio sucessivo e o índice t varia regressivamente de um período T a 1.

A implementação algorítmica deste esquema é relativamente simples, podendo ser representada sinteticamente como mostrado na Figura 3.4. A variável f_0 no algoritmo guarda o valor ótimo (mínimo) da função recursiva f para cada estado de armazenamento s do reservatório em cada intervalo de operação n . Deve-se notar que n conduz o algoritmo regressivamente.

A regra de operação consiste na liberação que deve ser feita de acordo com o estado do reservatório, de modo que provoque a mínima escassez no horizonte de operação, podendo ser representada através de uma tabela que fornece a liberação para cada mês de acordo com o volume armazenado no início do mês (vide exemplo na Tabela 3.7). Este procedimento assegura que as liberações serão ótimas em todos os estágios, para qualquer estado de armazenamento em que o reservatório se encontre. As liberações, entretanto, podem se desviar bastante das ótimas, se houver grande diferença entre o volume afluente previsto e o efetivamente ocorrido. Os valores da tabela de liberações são em geral “filtrados” ou “suavizados”, para eliminar inconsistências geradas pelo algoritmo, como as liberações sombreadas na Tabela 3.7. Sargent (1979), por exemplo, ajusta uma curva polinomial a cada linha da tabela de liberações, para manter uma transição suave das liberações de mês a mês.

```

para cada mês do ano ( $n = 1$  a  $12$ ):
{
  para cada nível de armazenamento do reservatório ( $s = s_{min}$  a  $s_{max}$ ):
  {
    para cada nível de liberação ( $r = r_{min}$  a  $r_{max}$ ):
    {
       $s_1 = s + i - e - r$ 
      se  $s_1 < s_{min}$  então  $s_1 = s_{min}$ 
      se  $s_1 > s_{max}$  então  $s_1 = s_{max}$ 
       $f(n,s,r) = (r_{max} - r)/r_{max} + f_0(n-1,s_1)$ 
      se  $f(n,s,r) < f_0(n,s)$  então  $f_0(n,s) = f(n,s,r)$ 
    }
  }
}

```

Figura 3.4. Algoritmo simplificado da PD (Galvão *et al.*, 1994).

Devido ao fato de que o algoritmo percorre todas as combinações possíveis entre armazenamento-liberação-período do ano, a sua implementação computacional, apesar de simples, demanda muito tempo de execução para situações onde se requeira maior detalhe e precisão nos resultados, o que acarreta um grande número de intervalos na discretização do armazenamento e das liberações.

Tabela 3.7: Exemplo de regra de operação para o reservatório Engenheiro Arcoverde, na Paraíba: o modelo de PD propõe um racionamento gradual, reduzindo a demanda desejada (1 milhão m³ mensais), que se estende principalmente de março a outubro (Galvão *et al.*, 1994).

Armazenamento no início do mês (em milhões m ³)	Liberações mensais (em milhões m ³)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
4,0	1	0,8	0,9	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4,5	0,2	0,8	0,9	1	0,5	1	1	1	1	1	1	1
5,0	0,5	1	0,9	1	0,5	1	1	1	1	1	0,4	1
5,5	1	1	0,9	1	1	1	0,9	0,9	0,9	0,4	0,9	1
6,0	1	1	0,9	1	1	1	0,9	0,9	0,2	0,9	0,9	1
6,5	1	1	1	1	1	1	0,9	0,8	0,8	0,8	1	1
7,0	1	1	1	1	1	1	0,9	0,8	0,8	0,8	1	1
7,5	1	1	1	1	1	1	0,9	0,8	0,8	1	1	1
8,0	1	1	1	1	1	1	0,9	0,8	0,8	1	1	1
8,5	1	1	1	0,9	1	0,9	0,8	0,8	1	1	1	1
9,0	1	1	1	0,9	1	0,9	0,8	0,8	1	1	1	1
9,5	1	1	1	0,9	1	0,9	0,8	1	1	1	1	1
10,0	1	1	1	0,9	1	0,9	0,8	1	1	1	1	1
10,5	1	1	1	0,9	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1
11,0	1	1	1	0,9	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1
11,5	1	1	1	1	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1
12,0	1	1	1	1	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1
12,5	1	1	1	1	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1
13,0	1	1	1	1	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1
13,5	1	1	1	1	0,9	1	1	1	1	1	1	1
14,0	1	1	1	1	0,9	1	1	1	1	1	1	1
14,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
36,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

3.6.4. Operação por controle difuso

A teoria do controle difuso – “*fuzzy control theory*” (vide descrição no Anexo) tem sido aplicada com sucesso nas situações onde a forma de agir do operador humano precise ser imitada pelo sistema de controle ou otimização. Ela oferece um arcabouço bem definido matematicamente para expressar decisões subjetivas.

O modelo aqui desenvolvido evoluiu de uma série de trabalhos sobre a implementação de sistemas de operação de reservatórios baseados na teoria do controle difuso, voltados especificamente para condições de escassez (Ikebuchi *et al.*, 1990; Galvão e Ikebuchi, 1992; Galvão *et al.*, 1993; Kojiri *et al.*, 1994; Ikebuchi *et al.*, 1994; Galvão *et al.*, 1996). As características desejadas para estes sistemas é que estejam voltados para gerenciamento da demanda, possam aproveitar a informação meteorológica e, principalmente, sejam mais flexíveis e robustos que os convencionais,

de modo a não indicar estratégias de operação que comprometam os reservatórios em caso de erro exagerado da previsão.

Este modelo pretende simular de uma maneira simples o processo usual de tomada de decisão em um reservatório nas situações de escassez. Basicamente, a cada intervalo de operação o comportamento do reservatório é simulado para um número de intervalos adiante (o horizonte de operação) considerando os cenários esperados (previsões ou valores esperados de volumes escoados, evaporação e demandas). A escassez no atendimento às demandas e o armazenamento final assim obtidos são avaliados como variáveis de decisão e produzem uma ação de reduzir (ou não) a liberação desejada (aquela que atenderia às demandas previstas), de modo a minimizar a escassez no horizonte de operação e manter o armazenamento do reservatório em um nível *seguro* no final do horizonte.

As operações são conduzidas através de *níveis de controle*, que regulam a redução nas liberações e são projetados para manter o estado do reservatório tão próximo quanto possível de *níveis de armazenamento desejáveis*. O nível de controle é um coeficiente definido no intervalo $[0;1]$ e que multiplica a liberação desejada. Como este trabalho tem como objetivo a otimização da operação em períodos de seca, as ações de controle foram projetadas para a redução da escassez durante o horizonte de operação. A cada intervalo de operação as informações do estado de armazenamento do reservatório e da previsão de volumes afluentes são atualizadas e uma nova avaliação do nível de controle é realizada. O processo da avaliação do nível de controle é feito no início de cada intervalo de operação através (a) da sistematização da informação da previsão meteorológica e hidrológica em volumes afluentes previstos ou estimados para todo o horizonte de operação, (b) do monitoramento do volume atual armazenado no reservatório, (c) do cálculo das liberações, volumes armazenados e escassez para os próximos intervalos no horizonte de operação, assumindo que se mantenha o nível de controle atual, (d) da avaliação e *fuzificação* (vide Anexo para descrição) da escassez e do nível de armazenamento no final do horizonte de operação, e (e) da decisão em mudar (ou não) o nível atual de controle através de inferência difusa.

O armazenamento no reservatório ao final do horizonte de operação é expresso pela variável difusa *nível de armazenamento futuro* (S), que é o volume armazenado em relação ao volume desejado para aquele intervalo de operação:

$$S_t = \frac{S_t}{S_t^*} \tag{3.16}$$

onde s_t é o volume armazenado estimado e s_t^* é o volume armazenado desejado, ao final do horizonte de operação.

A *escassez média* D_m no horizonte de operação é definida pela equação 3.12. Os valores numéricos de S e D_m são então *fuzificados* (vide Anexo para descrição) de acordo com as definições das respectivas variáveis difusas (Figura 3.5). A *escassez média* D_m pode assumir os valores difusos *zero* (ZO), *pequena* (P), *média* (M), *grande* (G) e *muito grande* (MG); o nível de armazenamento futuro S pode assumir os valores difusos *volume morto* (VM), *muito baixo* (MB), *baixo* (B), *médio* (M) e *normal* (N).

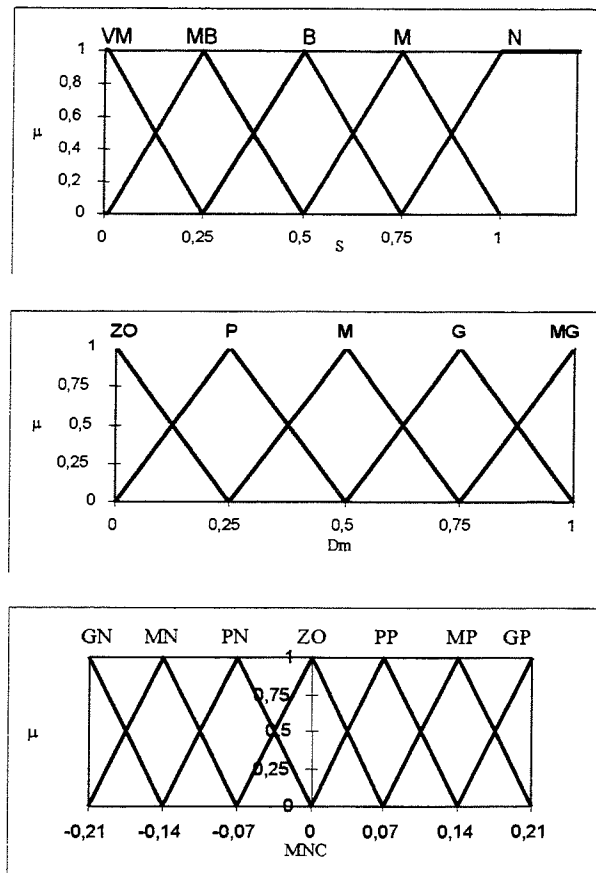


Figura 3.5. Funções de pertinência dos valores (representados por conjuntos difusos) para as variáveis de decisão. μ é a pertinência a um conjunto difuso do valor numérico de uma variável de decisão. A *escassez média* D_m pode assumir os valores difusos *zero* (ZO), *pequena* (P), *média* (M), *grande* (G) e *muito grande* (MG); o nível de armazenamento futuro S , os valores difusos *volume morto* (VM), *muito baixo* (MB), *baixo* (B), *médio* (M) e *normal* (N); a mudança no nível de controle MNC, *grande negativa* (GN), *média negativa* (MN), *pequena negativa* (PN), *zero* (ZO), *pequena positiva* (PP), *média positiva* (MP) e *grande positiva* (GP).

O nível de controle é inferido através de regras, definidas com a finalidade de manter um equilíbrio entre a escassez média e o armazenamento disponível ao final do horizonte de operação. As regras expressam uma relação entre essas variáveis de decisão e a *mudança no nível de controle (MNC)*. O novo nível de controle é obtido adicionando o nível de controle atual à *MNC* inferida e *desfuzificada* (vide Anexo para descrições da inferência difusa e do processo de *desfuzificação*). A Figura 3.5 apresenta os valores difusos assumidos por essa variável: *grande negativa (GN)*, *média negativa (MN)*, *pequena negativa (PN)*, *zero (ZO)*, *pequena positiva (PP)*, *média positiva (MP)* e *grande positiva (GP)*. Um exemplo de regras de inferência está mostrado na Tabela 3.8. Se, por exemplo, na simulação da operação, a escassez média foi *grande (G)* e o nível de armazenamento ao final do horizonte de operação foi *normal (N)*, a inferência vai sugerir uma mudança *grande positiva (GP)* no nível de controle, isto é, aumentar o valor numérico do nível de controle, aumentando a liberação para atendimento às demandas.

Tabela 3.8. Regras de inferência para *MNC*. Valores da escassez média D_m são *zero (ZO)*, *pequena (P)*, *média (M)*, *grande (G)* e *muito grande (MG)*; do nível de armazenamento futuro S , são *volume morto (VM)*, *muito baixo (MB)*, *baixo (B)*, *médio (M)* e *normal (N)*; e da mudança no nível de controle *MNC* são *grande negativa (GN)*, *média negativa (MN)*, *pequena negativa (PN)*, *zero (ZO)*, *pequena positiva (PP)*, *média positiva (MP)* e *grande positiva (GP)*.

ARMAZENAMENTO S	ESCASSEZ MÉDIA D_m				
	ZO	P	M	G	MG
VM	GN	GN	MN	PN	ZO
MB	GN	MN	PN	ZO	PP
B	MN	PN	ZO	PP	MP
M	PN	ZO	PP	MP	GP
N	ZO	PP	MP	GP	GP

A parametrização é conduzida em duas etapas, primeiro sendo definidas as funções de pertinência e regras de inferência de acordo com critérios de projeto recomendados na literatura e, então, ajustando-as, usando uma série de vazões observadas, para que o modelo atinja um melhor desempenho. Esta série de vazões para calibragem deve ser selecionada da série histórica total.

As funções de pertinência são triangulares ou trapezoidais, como na maioria das aplicações de controle difuso, em virtude da facilidade e eficiência de manipulação computacional que essas formas oferecem (Driankov *et al.*, 1993). Essas formas

também não apresentam inconvenientes para as finalidades deste modelo. Elas foram definidas de modo similar a números difusos triangulares/trapezoidais, com as seguintes características (Bardossy e Disse, 1993): (a) o valor, ou faixa de valores, mais provável tem pertinência 1; (b) os números que definem os extremos da faixa de variação possível das variáveis têm pertinência 0; e (c) a função de pertinência é definida como 0 fora do intervalo dos valores possíveis e é linear entre os pontos definidos dentro do intervalo. A *condição de largura* (Driankov *et al.*, 1993) foi também imposta, para assegurar uma transição gradual no resultado da inferência. A *condição de largura* estabelece que em funções de pertinência adjacentes o valor de pico de uma deve coincidir com o final da outra. Cox (1994) recomenda que a soma de todos os pontos através de conjuntos difusos sobrepostos não deve exceder 1. O número de funções de pertinência que define uma variável difusa deve ser escolhido para representar adequadamente o número de transições dentro da faixa de variação dos valores assumidos pela variável. Poucas funções podem não garantir uma ação de controle suave e gradual; muitas, por outro lado, irão desnecessariamente aumentar o processamento e o esforço de ajuste dos parâmetros.

A parametrização das funções de pertinência segundo essas recomendações está mostrada na Figura 3.5. No caso das variáveis *escassez média* e *nível de armazenamento futuro*, cinco funções de pertinência foram definidas, considerando a magnitude da faixa possível de variação dos valores. Os níveis de armazenamento desejados para cada mês do calendário (s_t^* na equação 3.16), empregados na derivação das funções de pertinência do *nível de armazenamento futuro*, são os volumes armazenados médios obtidos por simulação simples do reservatório sujeito às demandas desejadas, utilizando as séries históricas de vazão afluente e evaporação. No caso da *MNC*, sete funções foram estabelecidas, três das quais com ação positiva (*PP*, *MP* e *GP*), isto é, aumentando o nível de controle e se aproximando da liberação desejada, três com ação negativa (*PN*, *MN* e *GN*), isto é, reduzindo o nível de controle e a liberação, e uma que mantém o nível de controle e a liberação inalterados (*ZO*). Os limites de variação devem ser ajustados de acordo com os valores que possam realisticamente ocorrer e que garantam uma transição gradual e suave nas ações de controle entre meses consecutivos.

As regras são usualmente derivadas do conhecimento e experiência do administrador do reservatório (quando for possível) e um protótipo inicial normalmente apresenta uma

disposição simétrica das ações positivas e negativas, dividida pela diagonal *zero* (Driankov *et al.*, 1993), como mostrado na Tabela 3.8. Esses autores também recomendam que as regras devem apresentar as propriedades de *completeza*, *consistência*, *continuidade* e *interação*, que foram satisfeitas neste estudo:

- *completeza*: um conjunto de regras do tipo *se-então* é completo se qualquer combinação de valores de entrada resultar num valor de saída;
- *consistência*: um conjunto de regras do tipo *se-então* é consistente se não contém contradições; em outras palavras, um conjunto de regras é inconsistente se há duas ou mais regras com idênticas partes antecedentes mas com diferentes partes conseqüentes;
- *continuidade*: um conjunto de regras do tipo *se-então* é contínuo se não tem regras vizinhas com resultados que não apresentem interseção;
- *interação*: um conjunto de regras do tipo *se-então* interage se o resultado através de inferência baseada em composição é diferente do resultado através de inferência baseada em avaliação individual das regras; como as regras neste modelo são avaliadas pela inferência de Mamdani (vide Anexo), elas nunca interagem (Driankov *et al.*, 1993).

As funções de pertinência e regras definidas da maneira descrita são, numa segunda fase, ajustadas por um procedimento de tentativa e erro, tendo como critério a melhoria do desempenho da operação, avaliada pela redução da escassez média no período de calibragem, utilizando séries observadas de volumes afluentes e evaporação (situação de *previsão perfeita*). O modelo é então utilizado com a nova parametrização tendo como entrada a *previsão real*.

Um procedimento valioso para o ajuste das regras de inferência é a *trajetória lingüística* (Braae e Rutherford, 1979ab; Driankov *et al.*, 1993). Os valores assumidos pelas variáveis *nível de armazenamento* (S) e *escassez média* (D_m), que definem a *MNC*, são monitorados, mostrando as regras ativadas. Assim, o modelador pode mudar as regras que têm maior influência no comportamento do modelo, de modo a melhorar seu desempenho.

3.7. Necessidade de irrigação

A previsão de precipitação na estação chuvosa para o Nordeste pode, potencialmente, ser útil para melhorar as estimativas de risco de plantio e de necessidade de irrigação complementar para a agricultura dependente de chuva.

Com este fim, utilizou-se a metodologia do *Planagro* (Araújo *et al.*, 1998) para estimar datas de semeadura e necessidade de irrigação da cultura do feijão, típica da agricultura de subsistência da região, para a série histórica de precipitação e evaporação na bacia do Piancó. A reamostragem (vide seção 3.3) das séries de precipitação sazonal, datas de semeadura e necessidade de irrigação, considerando a previsão de precipitação, produziu previsões destas variáveis para o período da estação chuvosa fevereiro-maio. O método de previsão de precipitação utilizado foi o de análise discriminante linear, aplicado à bacia do Piancó. As previsões via MCG não são adequadas por não incluírem todo o período de cultivo do feijão na região. O estudo considerou o período de 1911 a 1963 para calibragem dos modelos, e de 1964 a 1988 para sua validação.

Para estimativa da data de semeadura ideal, no *Planagro*, é utilizado o trimestre mais chuvoso do ano quando trabalhando com culturas de ciclo de 90 dias, caso do feijão (Tabela 3.9). Aos três meses são adicionados mais 15 dias antes e quinze dias depois desse período. O trimestre mais chuvoso para a bacia do Piancó é fevereiro-abril, o que implica no período de 16 de janeiro a 20 de maio para estimativa da data de semeadura do feijão.

Tabela 3.9. Ciclo vegetativo de culturas de subsistência no norte-NEB. *Kc* é o coeficiente da cultura em cada fase do seu ciclo de desenvolvimento (Navarro, 1993; Pedrosa, 1993).

Cultura	Duração do ciclo vegetativo (dias)	Fase do ciclo								
		Inicial		Desenvolvimento		Florescimento e enchimento de grãos: fase crítica		Maturação		Colheita
		Duração (dias)	Kc	Duração (dias)	Kc	Duração (dias)	Kc	Duração (dias)	Kc	Kc
Algodão herbáceo	120	20	0,45	25	0,75	50	1,15	25	0,85	0,67
Feijão	90	20	0,35	20	0,75	30	1,12	20	0,70	0,27
Milho	90	15	0,40	30	0,77	30	1,12	15	0,85	0,62

Define-se a data mais adequada para a semeadura utilizando como critério a redução do déficit hídrico no período de maior demanda de água pela cultura. Dentro do período chuvoso, ano a ano, procura-se o intervalo, com duração da fase crítica da cultura

(aquela em que a demanda hídrica é maior), que apresente a maior precipitação acumulada, definindo-se, então, a data de semeadura correspondente. Obtém-se, então, uma série de datas de semeadura, formada pelas datas encontradas para cada ano da série histórica de precipitação.

A necessidade de irrigação durante o ciclo de desenvolvimento da cultura foi obtida através de um balanço hídrico simplificado:

$$I = \sum_{i=1}^m D_i \quad (3.17)$$

onde:

I é a necessidade de irrigação total para o ciclo de desenvolvimento da cultura;

i é o intervalo de cálculo do balanço, igual a cinco dias;

m é o número de intervalos para o ciclo da cultura, igual a 18 para o feijão;

D_i é o déficit hídrico da cultura para o intervalo i :

$$D_i = ETm_i - P_i, \text{ se } ETm_i - P_i > 0, \text{ ou}$$

$$D_i = 0, \text{ em caso contrário;}$$

ETm_i é a demanda hídrica da cultura, ou evapotranspiração máxima, para o intervalo i :

$$ETm_i = ETP_i * Kc_i$$

ETP_i é a evapotranspiração potencial média para o intervalo i ;

Kc_i é o coeficiente da cultura para o intervalo i ;

P_i é a precipitação acumulada no intervalo i .

A cada ano da série histórica, para cada cinco dias (pêntada) do seu ciclo vegetativo, foi realizado o balanço hídrico entre a demanda da cultura e a precipitação neste período, considerando a data de semeadura determinada anteriormente para aquele ano. A escolha de pequenos intervalos para cálculo do balanço é necessária em virtude da má distribuição temporal intra-sazonal da precipitação na região. É comum a ocorrência de períodos contínuos de vários dias sem chuva (os “veranicos”), que podem conduzir à frustração do desenvolvimento da cultura. O valor de cinco dias é considerado adequado para o feijão (Chaib Filho *et al.*, 1988).

A demanda hídrica é obtida (Doorenbos e Kassam, 1979) pela multiplicação do coeficiente de cultura (Kc), da fase do ciclo (Tabela 3.9) que coincide com cada pântada, pela evapotranspiração potencial média no período (ETP). A evapotranspiração, originalmente disponível em médias mensais (vide seção 3.2.5), é discretizada diariamente (mesmo valor para cada dia do mês), e acumulada para cada pântada. O déficit hídrico (D) calculado na pântada corresponde à necessidade de irrigação suplementar. Seu somatório para todo o ciclo de cultivo fornece o valor total da necessidade de irrigação que se quer prever (I).

Essa formulação simplificada para o balanço hídrico é suficiente para o propósito deste trabalho, que é avaliar a previsibilidade interanual da necessidade de irrigação a partir da previsão de precipitação. O trabalho não se propõe a verificar se a necessidade de irrigação aqui prevista seria realmente a observada no campo, mas sim caracterizar a variabilidade interanual desta variável, que é principalmente dependente dos elementos climáticos. Assim, alguns aspectos, levados em consideração em modelos de balanço hídrico mais completos, não necessitam ser incluídos aqui. O fator solo, por exemplo, pode ser omitido neste caso, considerando que a cultura está cultivada em mesmo local e tipo de solo para todos os anos. É o caso também da preservação do armazenamento da água no solo de um intervalo de cálculo para o seguinte, ou dos cálculos do escoamento superficial e das perdas por percolação profunda, ou a consideração de um valor limite para a capacidade de água disponível no solo para uso pela cultura. Também é desnecessário considerar a precipitação como a efetiva (a que realmente infiltra e pode ser utilizada pela cultura), em vez da total, como aqui realizado. O cálculo do balanço hídrico em intervalos diários, ou até horários, comprovadamente mais preciso (Back, 1997; Louzada *et al.*, 1992), também não trará informação significativa para sua variabilidade interanual.

3.8. Avaliação das previsões

Os objetivos deste trabalho (vide capítulo 1) são “*avaliar* a previsão de precipitação no NEB e analisar a *viabilidade* de empregá-la para prever o volume escoado e para melhorar o manejo de recursos hídricos”. O trabalho investiga se é *possível* obter previsões e quais os *ganhos* de empregar tais previsões em aplicações, e se os métodos de manejo são *adequados* às características da previsão.

Metodologicamente, os seguintes objetos da investigação foram tratados como *previsões* (vide Figura 3.1): de precipitação, em várias escalas; de volume escoado; de data de semeadura e de necessidade de irrigação. Isto permite avaliar os resultados obtidos usando um mesmo arcabouço metodológico. Apenas a operação de reservatórios foi avaliada através de medidas de atendimento à demanda (vide seção 3.6).

Como descrito nas seções anteriores deste capítulo, a *possibilidade* de realizar as previsões, a sua *viabilidade*, os *ganhos* por elas propiciados, e a *adequabilidade* dos métodos empregados para utilizá-las foram avaliados em relação a cenários de referência ou, em caso de comparação, a previsões em outras escalas ou produzidas por diferentes métodos.

As previsões, neste trabalho, são apresentadas em dois formatos: o categorizado probabilístico (cada categoria tem uma probabilidade associada) e o pontual (um único valor numérico, a mediana da distribuição de probabilidade categorizada). O arcabouço de avaliação das previsões deve levar em conta essa diversidade de formatos.

A avaliação de previsões tem historicamente merecido grande atenção de pesquisadores de várias áreas do conhecimento. Neste trabalho optou-se por utilizar medidas de avaliação empregadas na meteorologia e hidrologia, em virtude da própria temática da pesquisa. A escolha de uma ou outra medida de avaliação de previsões não é simples, e depende do método empregado para previsão e da aplicação da previsão (Murphy, 1994). Dentre as inúmeras possibilidades (vide, por exemplo, Krzysztofowicz 1991, 1992; Murphy, 1991; Wilks, 1995; Potts *et al.*, 1996; Katz e Murphy, 1997), adotaram-se neste trabalho duas medidas de *exatidão* e uma de *destreza*, todas simples e de uso bastante difundido na literatura e nos centros operacionais. As medidas de exatidão são: o *índice de probabilidade ordenada* (*ranked probability score* – RPS), para previsões categorizadas probabilísticas; e o coeficiente de correlação, empregado para avaliar previsões pontuais.

O RPS (Wilks, 1995), usado para previsões probabilísticas em categorias, é uma medida sensível à distância; ou seja, penaliza mais as previsões que prescrevam maiores probabilidades a categorias mais afastadas da categoria em que o evento realmente ocorreu. O RPS é função do quadrado dos erros, mas, para que seja sensível à distância,

os erros são calculados em relação às probabilidades acumuladas nos vetores de valores previstos e observados. Sejam:

J , o número de categorias e portanto o número de probabilidades que constituem cada previsão;

y_i , as probabilidades previstas associadas às categorias i ($i=1, \dots, J$);

o_i , as probabilidades observadas para cada categoria ($i=1, \dots, J$); apenas uma categoria terá probabilidade 1, a que contém o valor que foi observado, enquanto as outras têm valor 0;

Y_m , as probabilidades previstas acumuladas:

$$Y_m = \sum_{j=1}^m y_j \quad m = 1, \dots, J \quad (3.18)$$

O_m , as probabilidades observadas acumuladas:

$$O_m = \sum_{j=1}^m o_j \quad m = 1, \dots, J \quad (3.19)$$

O RPS de uma determinada previsão k é dado por:

$$RPS_k = \sum_{m=1}^J (Y_m - O_m)^2 \quad (3.20)$$

Para uma previsão perfeita, a probabilidade 1 seria atribuída a um único y_i ; os vetores previstos, y , e observados, o , seriam iguais e $RPS = 0$. O pior valor possível é $RPS = J - 1$, onde J é o número de categorias no qual o espaço de previsão é dividido. Se $J = 5$, caso das previsões neste trabalho, o pior valor é $RPS = 4$. Para uma previsão usando normais climatológicas, probabilidades 0,2 (no caso de 5 categorias) seriam atribuídas a cada categoria. Para uma série de n previsões, o RPS conjunto é definido como a média dos RPS das previsões individuais:

$$RPS = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n RPS_k \quad (3.21)$$

O coeficiente de correlação é uma medida estatística bastante conhecida e é calculado como (Benjamin e Cornell, 1970):

$$R_{X,Y} = \frac{S_{X,Y}}{S_X S_Y} \quad (3.22)$$

onde, X e Y são as variáveis cujas séries estão sendo comparadas, $S_{X,Y}$ é a covariância entre as duas séries, e S_X e S_Y são os seus desvios padrão.

A *destreza* da previsão se refere à exatidão relativa de um conjunto de previsões em relação a um conjunto de previsões de referência. Neste trabalho a normal climatológica da variável que está sendo prevista foi empregada como referência e é designada ao longo do texto como “previsão climatológica”. A destreza é geralmente apresentada em forma percentual, interpretada como a melhoria percentual da previsão em análise em relação à previsão de referência. De forma genérica, a destreza para previsões caracterizadas por uma certa medida de desempenho A , em relação ao desempenho A_{ref} de um conjunto de previsões de referência, é dada por:

$$S_{ref} = 100 \frac{(A - A_{ref})}{(A_{perf} - A_{ref})} \quad (3.23)$$

onde A_{perf} é o valor da medida de desempenho que seria atingido no caso de previsões perfeitas. Se $A = A_{perf}$, a destreza atinge seu valor máximo de 100%. Se $A = A_{ref}$, então $S_{ref} = 0\%$, indicando que não houve melhoria sobre as previsões de referência. Se as previsões que estão sendo avaliadas forem inferiores às previsões de referência, $S_{ref} < 0\%$ (Wilks, 1995).

Neste trabalho, empregou-se a destreza apenas para o RPS, que pode ser expressa, considerando $RPS_{perf} = 0$, como:

$$S_{ref} = 100 \left(1 - \frac{RPS}{RPS_{ref}} \right) \quad (3.24)$$

Para o coeficiente de correlação, a destreza não pode ser calculada quando as previsões de referência (o valor da normal climatológica) são iguais para todos os anos, como adotado aqui.

4. Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da aplicação da metodologia apresentada no capítulo 3. A ênfase das análises é a caracterização da previsibilidade das variáveis, a precipitação, o volume escoado e a necessidade de irrigação, e a utilidade da previsão do volume escoado para a operação de reservatórios. A previsibilidade é assumida como base para avaliação da *possibilidade* da previsão e sua aplicabilidade, objetivo deste trabalho (vide capítulo 1). As características dos métodos aplicados são discutidas na profundidade necessária para avaliar a “estabilidade” da previsibilidade alcançada.

Discute-se, em primeiro lugar, a previsibilidade da precipitação, base para todo o resto, e, em seguida, a previsibilidade do volume escoado, a aplicabilidade à operação de reservatórios e à previsão da data de semeadura e da necessidade de irrigação do feijão.

4.1. Previsibilidade da precipitação

A análise aqui realizada da previsibilidade da precipitação sazonal no Nordeste tem como referência três pontos principais (vide os objetivos do trabalho no capítulo 1): (a) a previsão de precipitação não é um fim em si mesma, mas será a base para a previsão de volume escoado, para a operação de reservatórios e para a previsão de necessidade de irrigação; (b) a quantificação e representação da incerteza associada à previsão; e (c) a relação entre a previsibilidade e a escala espacial para a qual foi formulada.

Nas próximas seções são discutidos os principais resultados obtidos, utilizando os procedimentos descritos no capítulo 3, na produção e análise das previsões pelos modelos de circulação global (MCG) e de análise discriminante linear (ADL). As previsões foram produzidas em duas escalas espaciais para cada modelo. O modelo de ADL do *Hadley Centre* produziu previsões na escala regional para o norte-NEB (500000 km²) e na escala de bacia hidrográfica (4550 km²), para a bacia do Piancó. O MCG do ECMWF simulou a precipitação na escala de célula (2,5° x 2,5° de latitude-

longitude, 75000 km²), que foi em seguida desagregada para a escala da bacia hidrográfica.

4.1.1. Previsão via MCG

4.1.1.1. Desagregação espacial da célula para a bacia

Como exposto na seção 3.4.1.4, a primeira parte do estudo de desagregação foi uma caracterização do regime pluviométrico na célula do MCG sobre a bacia, com o objetivo de verificar a variabilidade espacial do total pluviométrico sazonal (período março-junho) sobre essa área e assim determinar a maneira mais adequada de realizar a transferência.

A Figura 4.1 mostra o padrão de distribuição espacial da precipitação sazonal para os totais sazonais médios para anos muito secos (20% mais secos), secos, normais (20% intermediários), úmidos e muito úmidos (20% mais úmidos) e para a média de todos os anos do registro histórico (1911-88). Pode-se observar que os padrões permanecem semelhantes para todos esses conjuntos de dados, e seguem aproximadamente a topografia (Figura 4.3). O mesmo não acontece com a distribuição espacial das anomalias normalizadas sazonais (equação 3.1, na seção 3.2.3), mostrada na Figura 4.2. Esses mapas foram obtidos por interpolação dos valores de precipitação dos 17 postos da célula sobre a bacia do Piancó (seção 3.2.3, Figura 3.2 e Tabela 3.1), via *Kriging* com variograma linear, utilizando o programa *Surfer* (Golden, 1995). As séries temporais dos totais e anomalias sazonais na bacia e na célula estão mostradas na Figura 4.4.

Os totais precipitados, em contraposição às anomalias, foram então escolhidos como variável para a desagregação, em virtude da sua distribuição espacial relativamente bem definida. Devido à alta correlação entre a precipitação sazonal na célula e na bacia (0,86 para o período 1911-88), escolheu-se a regressão linear como método de desagregação, definindo-se o período 1911-63 para estimativa dos parâmetros e 1964-88 para validação do ajuste. A equação de regressão encontrada foi (Figura 4.5a):

$$P_b = 1,216 P_c - 47,7 \quad (4.1)$$

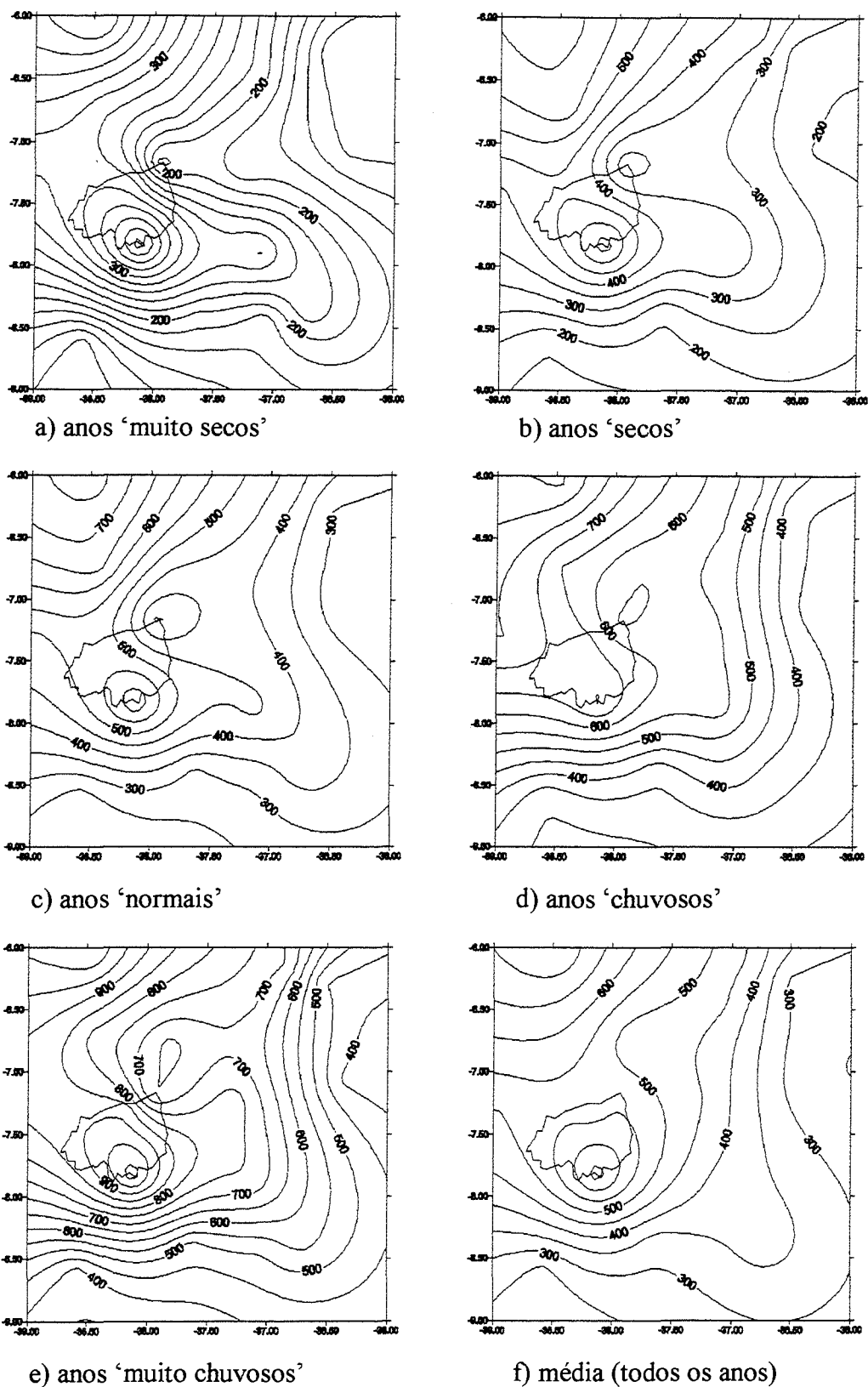


Figura 4.1. Precipitação sazonal para março-junho (expressa em mm) na célula do MCG sobre a bacia do Piancó: (a) anos 'muito secos' (20% mais secos); (b) anos 'secos'; (c) anos 'normais' (20% intermediários); (d) anos 'chuvosos'; (e) anos 'muito chuvosos' (20% mais úmidos); (f) média (todos os anos).

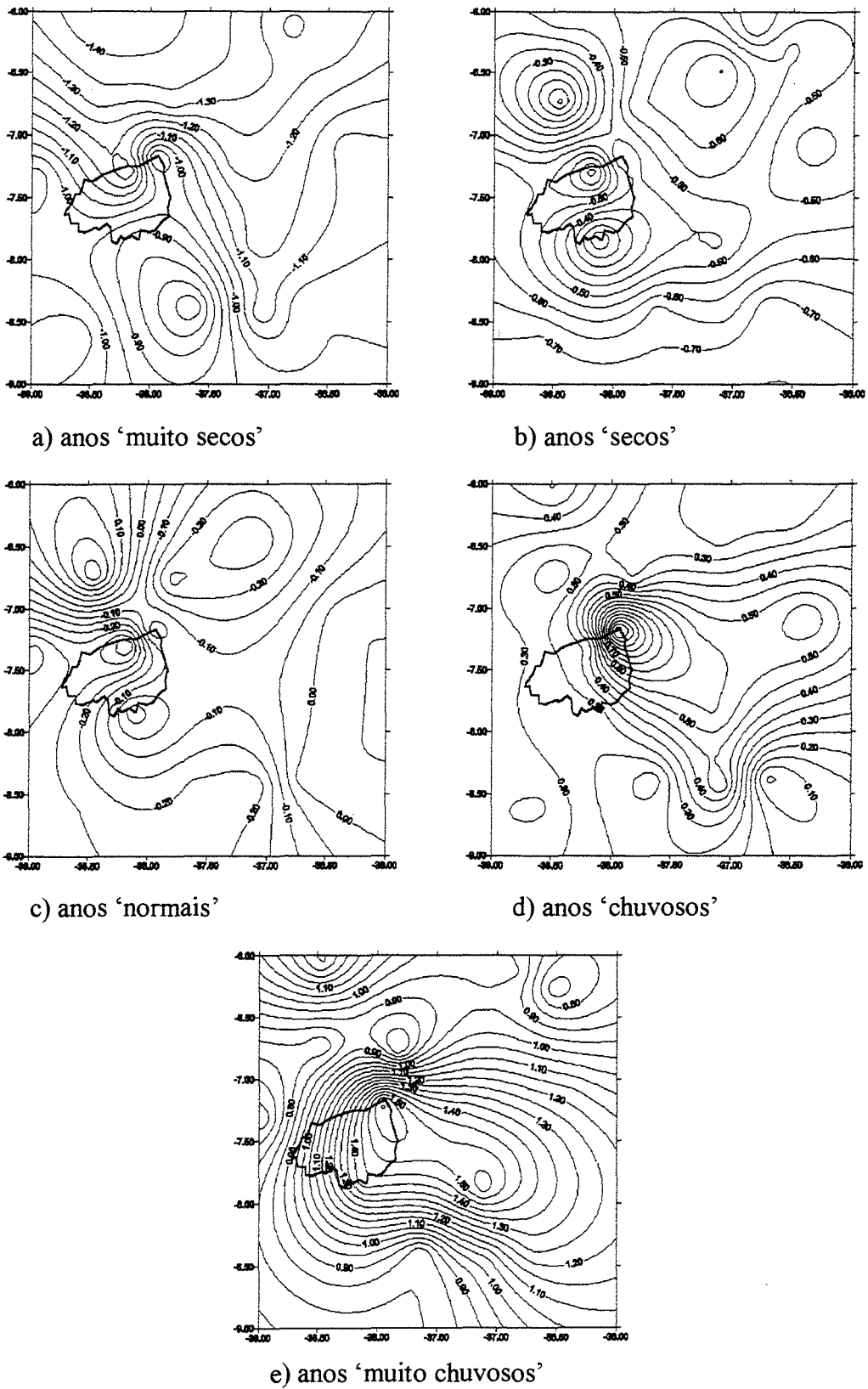


Figura 4.2. Anomalias de precipitação sazonal para março-junho (vide definição na equação 3.1, seção 3.2.3) na célula do MCG sobre a bacia do Piancó: (a) anos muito secos (20% mais secos); (b) anos secos; (c) anos normais (20% intermediários); (d) anos úmidos; (e) anos muito úmidos (20% mais úmidos).

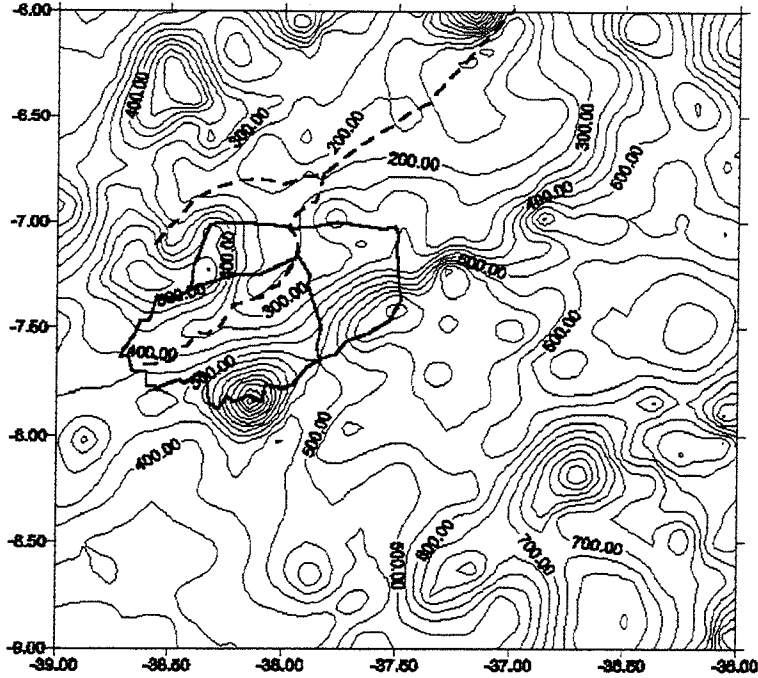
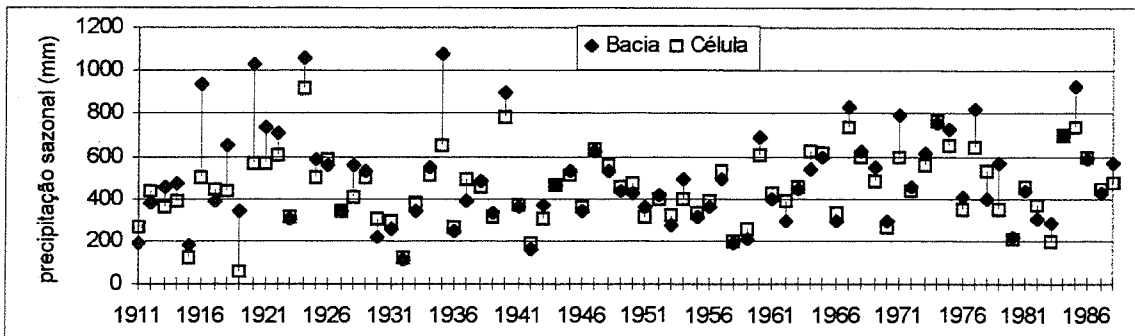
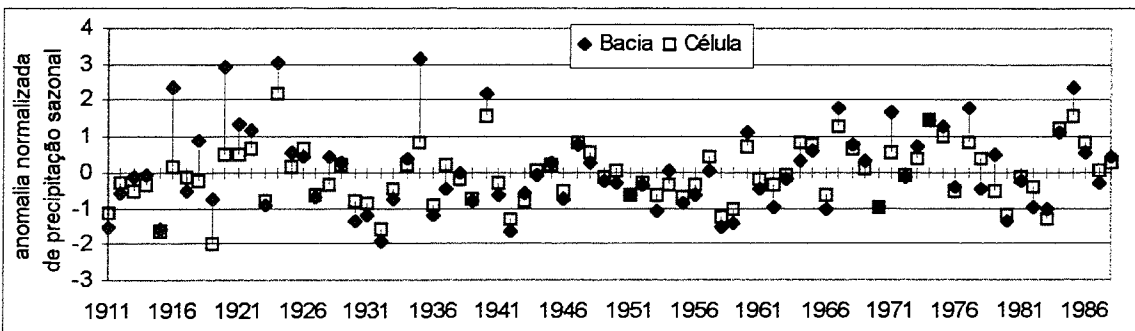


Figura 4.3. Topografia regional aproximada na célula do MCG sobre a bacia do Piancó (cotas em metros). Intervalos entre isolinhas iguais a 50 m. Estão apresentados também os limites das bacias do Piancó e do açude Coremas-Mãe D'Água (linha sólida) e dos rios Piancó e Piranhas (linha tracejada).



a) em forma de totais precipitados



b) em forma de anomalias normalizadas

Figura 4.4. Séries temporais de precipitação sazonal (março-junho) da célula e da bacia do Piancó (1911-88): (a) em forma de totais precipitados (mm); (b) em forma de anomalias normalizadas (%).

onde P_b é a precipitação na bacia (série “precipitação da bacia”, seção 3.2.3) e P_c a precipitação na célula (série “precipitação da célula”, seção 3.2.3), em mm. A variância explicada (R^2) pelo modelo no período de ajuste foi de 71,3%. A inclusão de mais um parâmetro no modelo, o quadrado de P_c , não mostrou ganho significativo, avaliado através do teste F , mesmo ao nível de 90%. Análise gráfica dos resíduos confirmou este diagnóstico, pois não mostrou qualquer relação entre P_c e os resíduos. Os resíduos também não apresentaram qualquer padrão definido, quando comparados graficamente com a ordem cronológica – o que poderia sugerir não-estacionariedade da série – ou com os valores estimados pelo modelo – o que poderia sugerir que a variância dos resíduos não fosse constante, uma hipótese exigida pelo modelo. A normalidade dos resíduos, outra hipótese dos modelos de regressão linear, foi também verificada, através de métodos de diagnóstico gráficos (Clarke, 1994). Para redução de espaço, esses diagramas não são apresentados aqui.

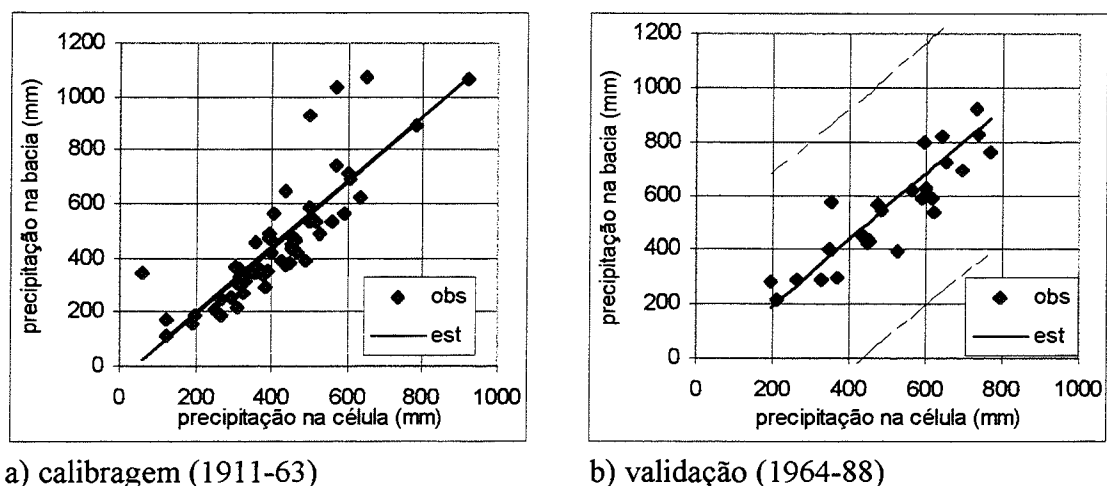
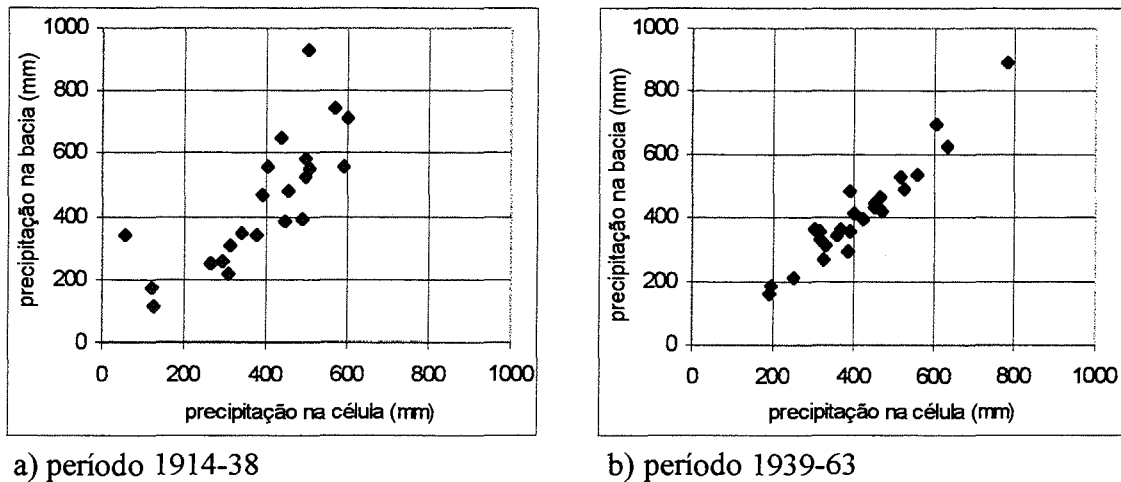


Figura 4.5. Regressão linear entre precipitação sazonal na célula e na bacia do Piancó: a) calibragem (1911-63); b) validação (1964-88), com intervalos de confiança ao nível de 95% para a previsão de cada observação.

No período de validação (1964-88) o valor de R^2 foi de 79,8%. A Figura 4.5b mostra a precipitação na bacia calculada pela equação (4.1) tendo como entrada a precipitação na célula para esse período, e os intervalos de confiança ao nível de 95%, calculados para a previsão de cada observação (Draper e Smith, 1981). Esses resultados demonstram que o modelo é adequado para estimar a precipitação sazonal na bacia a partir da precipitação sazonal na célula.

Interessante também observar as diferenças das séries nos períodos de validação e de calibragem, em se dividindo os últimos 75 anos da série total em três períodos de 25 anos. Nos primeiros 25 anos, ou seja, 1914-38, a relação entre a precipitação março-

junho na célula e na bacia está mostrada na Figura 4.6a. Note-se que a dispersão é maior que durante 1939-63 (Figura 4.6b) e 1964-88 (Figura 4.5b). Para os vinte primeiros anos de 1914-38, dados de apenas quatro dos nove postos da bacia foram utilizados para o cálculo da precipitação média; para a célula, os postos foram os mesmos em todos os períodos analisados. Outras possíveis causas para essa inconsistência com os 50 anos seguintes (1939-88) podem ter sido os meios e instrumentos de medição utilizados na época e, pode-se especular, mudanças climáticas (cuja comprovação demandaria um estudo rigoroso de estacionariedade das séries). Essas observações sugerem trabalhar com os últimos 50 anos, ou seja, utilizar 1939-63 como período de calibragem e 1964-88 para validação. Aqui, para preservar a uniformidade com o restante do trabalho, mantiveram-se os períodos 1911-63 e 1964-88.



a) período 1914-38

b) período 1939-63

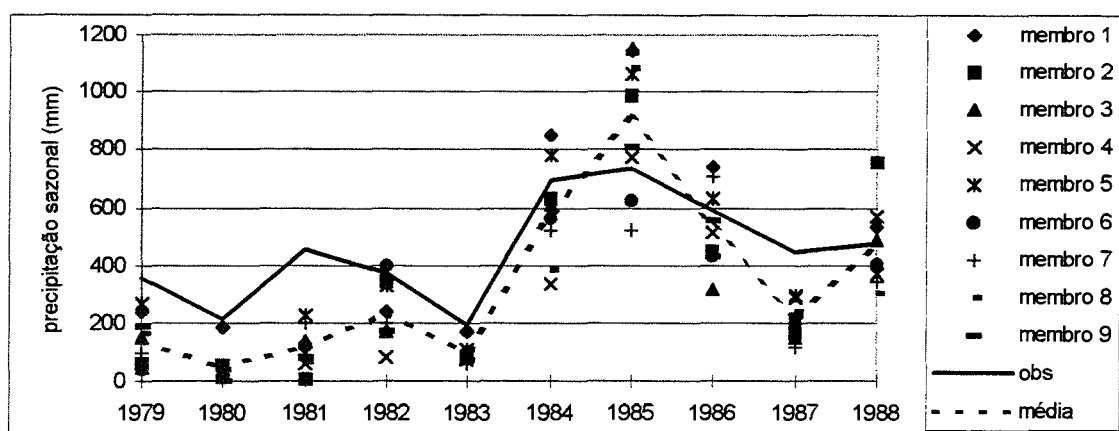
Figura 4.6. Relação entre precipitação sazonal (março-junho) na célula e na bacia do Piancó: (a) período 1914-38; (b) período 1939-63.

4.1.1.2. Análise da previsibilidade

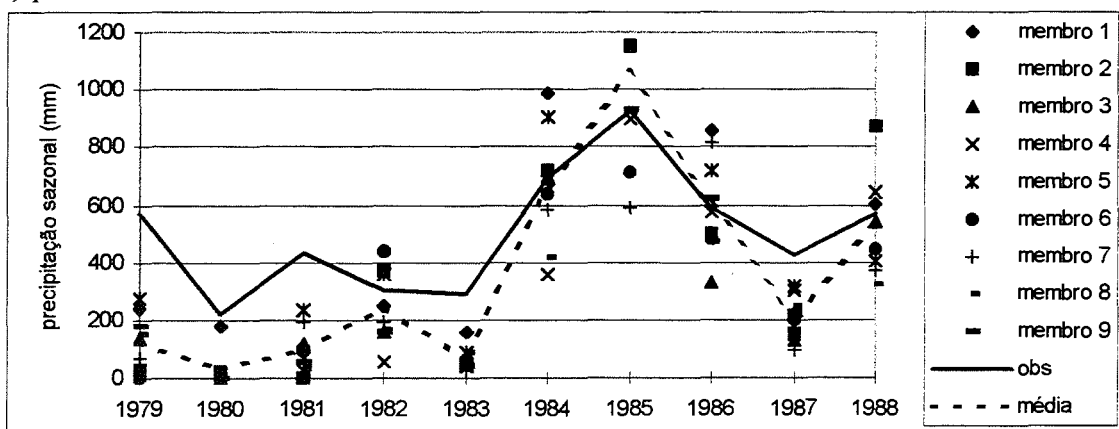
A previsão gerada pelo MCG para os totais sazonais de precipitação, tanto para a célula quanto para a bacia, são apresentadas na Figura 4.7 e na Tabela 4.1. Para nove dos dez anos (a exceção foi 1985) a precipitação foi subestimada. Para metade da série nenhum dos membros atingiu o valor da precipitação observada (1979-81, 1983 e 1987). Como pode ser visto nas Tabelas 4.1 e 4.3, o nono membro não pôde ser recuperado dos arquivos do ECMWF para os anos de 1984 e 1988.

A previsão em formato categorizado probabilístico (Tabela 4.2) foi obtida da análise de frequência dos nove membros, em forma das anomalias normalizadas da Tabela 4.3, a cada uma das categorias definidas na Tabela 3.4 (seção 3.2.3), também apresentadas

na Tabela 4.2. Sua avaliação numérica é aqui realizada através do índice RPS (definido na seção 3.8), também apresentado, para cada ano, na Tabela 4.2. Para a célula sobre a bacia do Piancó (Tabela 4.2a), seu valor médio foi 0,65, enquanto que o índice RPS de referência médio foi 0,78, correspondente a considerar a climatologia como previsão (na qual probabilidades 0,2 foram atribuídas a cada categoria). Isto fornece a destreza para o conjunto de previsões, conforme definida na seção 3.8, igual a 17%. As previsões sobre a bacia, após desagregação (vide seção anterior), tiveram o RPS médio 0,81 e o de referência 0,80, apresentando então uma destreza negativa (-1%), o que significa que o conjunto de previsões têm desempenho ainda pior que o uso da climatologia. Estes resultados são fruto da subestimativa da precipitação pelo MCG.



a) para a célula



b) para a bacia do Piancó

Figura 4.7. Comparação entre o total precipitado sazonal (março-junho) observado e previsto pelo MCG do ECMWF: (a) para a célula sobre a bacia do Piancó; e (b) para a bacia do Piancó, obtido por desagregação. A linha ‘média’ corresponde à média dos nove membros. A linha ‘obs’ corresponde (a) à média de precipitação de 17 postos localizados na célula, ou (b) à média de precipitação de 9 postos localizados na bacia.

Por outro lado, a Figura 4.7 também demonstra que as previsões seguiram bem a tendência de anos secos e chuvosos, tanto na escala de bacia como na escala de célula.

Prova disto são os altos coeficientes de correlação obtidos entre a precipitação observada e a prevista por cada um dos membros, ou a sua média (Tabelas 4.1 e 4.3: (note que os valores são iguais nas duas tabelas, pois as anomalias normalizadas são uma transformação linear dos totais).

Tabela 4.1. Previsão de precipitação sazonal (março-junho), obtida de cada membro da integração do MCG, e sua média: (a) para a célula sobre a bacia do Piancó; e (b) para a bacia do Piancó, obtido por desagregação. R é o coeficiente de correlação entre a precipitação observada e cada membro, e a média dos membros, para 1979-88.

a) para a célula

Ano	Precip.	Precipitação sazonal, em mm, prevista pelos membros									
	Observ.	Média	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1979	353,5	139,0	237,2	60,0	152,5	47,8	267,2	41,6	93,8	165,3	185,3
1980	212,6	49,8	185,9	55,0	39,1	53,1	41,6	11,6	18,1	41,3	2,2
1981	450,2	113,3	113,8	8,8	134,7	60,9	228,4	124,4	195,6	70,0	83,4
1982	370,8	234,7	240,6	345,3	171,6	81,9	331,6	400,0	196,3	173,8	171,3
1983	194,2	97,3	169,4	80,6	100,0	73,4	112,2	92,8	60,0	111,6	75,3
1984	695,4	584,0	849,1	631,6	612,2	334,1	782,8	561,6	518,1	382,5	
1985	734,2	906,1	1141,9	989,1	1150,6	775,3	1060,9	624,4	522,5	1081,9	808,4
1986	591,0	530,2	741,9	448,1	312,5	515,3	629,4	432,8	709,1	429,7	552,8
1987	445,7	211,0	218,4	162,8	147,8	286,6	297,8	201,9	116,9	243,1	223,4
1988	475,3	472,0	534,7	756,9	487,2	571,6	369,7	407,5	343,4	305,0	
R		0,90	0,88	0,79	0,83	0,79	0,94	0,87	0,87	0,79	0,92

b) para a bacia do Piancó

Ano	Precip.	Precipitação sazonal, em mm, prevista pelos membros									
	Observ.	Média	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1979	571,5	121,3	240,8	25,2	137,8	10,4	277,3	2,9	66,4	153,3	177,7
1980	217,2	24,4	178,4	19,2	0,0	16,9	2,9	0,0	0,0	2,5	0,0
1981	430,7	94,2	90,7	0,0	116,1	26,3	230,1	103,6	190,2	37,4	53,7
1982	300,2	237,8	244,9	372,3	161,0	51,9	355,6	438,8	191,0	163,7	160,6
1983	285,5	70,6	158,3	50,3	73,9	41,5	88,7	65,1	25,2	88,0	43,9
1984	694,7	662,6	985,1	720,5	696,9	358,6	904,4	635,4	582,4	417,5	
1985	926,9	1054,4	1341,2	1155,3	1351,8	895,3	1242,7	711,7	587,8	1268,2	935,6
1986	586,4	597,1	854,7	497,3	332,4	579,0	717,8	478,7	814,8	474,9	624,7
1987	421,9	208,9	217,9	150,3	132,0	300,9	314,5	197,8	94,5	248,0	224,0
1988	568,4	526,4	602,6	872,9	544,9	647,5	401,9	447,9	370,0	323,2	
R		0,90	0,89	0,80	0,90	0,80	0,92	0,73	0,73	0,87	0,90

Como mostrado na seção anterior, a precipitação observada na célula e na bacia apresentam comportamento bastante semelhante. Em apenas dois anos, 1979 e 1988, as categorias de precipitação observada foram diferentes (Tabela 4.2). Nos dois anos, a precipitação na bacia foi maior, em duas categorias em 1979 e em uma categoria em 1988. O procedimento linear de desagregação espacial preservou também as características da previsão, quando transferindo-a para a bacia. As probabilidades previstas para cada categoria foram, em seis anos, as mesmas para a célula e para a bacia (1979-83 e 1985), e muito semelhantes nos outros quatro anos (Tabela 4.2). No

ano de 1988, a desagregação até atribuiu um pouco mais de probabilidade à categoria 4 (a efetivamente observada) para a previsão da bacia (Tabela 4.2).

Tabela 4.2. Avaliação da previsão categorizada probabilística de precipitação sazonal (março-junho), obtida da análise de frequência dos nove membros, em forma de anomalias normalizadas (I), a cada uma das categorias definidas na Tabela 3.4 (seção 3.2.3). Probabilidades da previsão por categoria e índices RPS_{ref} e RPS (para definições vide seção 3.8): (a) para a célula sobre a bacia do Piancó; e (b) para a bacia do Piancó, obtido por desagregação.

a) para a célula

Ano	Categoria observada	Probabilidades previstas para as categorias					RPSref	RPS
		Cat. 1: $I < -84$	Cat. 2: $-84 \leq I < -43$	Cat. 3: $-43 \leq I < 30$	Cat. 4: $30 \leq I < 98$	Cat. 5: $I \geq 98$		
1979	2	1	0	0	0	0	0,60	1,00
1980	1	1	0	0	0	0	1,20	0,00
1981	3	1	0	0	0	0	0,40	2,00
1982	2	0,67	0,22	0,11	0	0	0,60	0,46
1983	1	1	0	0	0	0	1,20	0,00
1984	5	0	0,25	0	0,25	0,50	1,20	0,38
1985	5	0	0	0	0,11	0,89	1,20	0,01
1986	4	0,11	0	0,33	0,22	0,33	0,60	0,33
1987	3	1	0	0	0	0	0,40	2,00
1988	3	0,13	0,25	0,25	0,25	0,13	0,40	0,31
Média							0,78	0,65

b) para a bacia do Piancó

Ano	Categoria observada	Probabilidades previstas para as categorias					RPSref	RPS
		Cat. 1: $I < -98$	Cat. 2: $-98 \leq I < -42$	Cat. 3: $-42 \leq I < 18$	Cat. 4: $18 \leq I < 94$	Cat. 5: $I \geq 94$		
1979	4	1	0	0	0	0	0,60	3,00
1980	1	1	0	0	0	0	1,20	0,00
1981	3	1	0	0	0	0	0,40	2,00
1982	2	0,67	0,22	0,11	0	0	0,60	0,46
1983	1	1	0	0	0	0	1,20	0,00
1984	5	0	0,13	0,13	0,25	0,50	1,20	0,33
1985	5	0	0	0	0,11	0,89	1,20	0,01
1986	4	0	0,11	0,33	0,22	0,33	0,60	0,32
1987	3	0,78	0,22	0	0	0	0,40	1,60
1988	4	0	0,25	0,25	0,38	0,13	0,60	0,33
Média							0,80	0,81

No entanto, no ano de 1979, a precipitação observada na bacia foi bastante diferente da precipitação na célula (Tabela 4.2). Na bacia, 1979 não foi seco, com precipitação na categoria 4; na célula, observou-se a categoria 2. A previsão do MCG para a célula foi relativamente boa (a precipitação prevista pelos nove membros ficou na categoria 1, dando um RPS de 1,00, Tabela 4.2a). Entretanto, a linearidade do procedimento de desagregação da precipitação resultou no mesmo prognóstico para a bacia, dando um RPS muito alto (Tabela 4.2b). Como o período de teste é muito curto, apenas dez anos,

o RPS para 1979 (3,00) influenciou bastante o RPS médio para os dez anos. Se o ano de 1979 for extraído do cálculo do RPS médio, obtém-se, para a bacia, o novo valor médio do RPS igual a 0,56, o do RPS de referência de 0,82, e uma destreza de 32%. Para a célula, a eliminação de 1979 eleva a destreza para 24% (médias do RPS igual a 0,61 e do RPSref igual a 0,80).

Tabela 4.3. Previsão de anomalias normalizadas I de precipitação sazonal (março-junho), obtidas da desagregação de cada membro da integração do MCG, e sua média: (a) para a célula sobre a bacia do Piancó; e (b) para a bacia do Piancó, obtido por desagregação. R é o coeficiente de correlação entre a anomalia observada e cada membro, e a média dos membros, para 1979-88.

a) para a célula

Ano	Anom. Observ.	Anomalias normalizadas, em %, previstas pelos membros									
		Média	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1979	-67	-205	-142	-255	-196	-263	-122	-267	-234	-188	-175
1980	-157	-262	-175	-259	-269	-260	-267	-286	-282	-267	-293
1981	-05	-221	-221	-288	-207	-255	-147	-214	-168	-249	-240
1982	-56	-143	-139	-72	-184	-241	-81	-37	-168	-182	-184
1983	-169	-231	-185	-242	-230	-247	-222	-234	-255	-222	-246
1984	153	39	251	112	99	-79	209	67	39	-48	-294
1985	178	288	439	341	445	204	387	107	42	401	225
1986	86	47	183	-06	-93	37	110	-16	161	-18	61
1987	-08	-158	-154	-189	-199	-110	-103	-164	-219	-138	-150
1988	11	-24	49	192	19	73	-57	-32	-73	-98	-294
R		0,90	0,88	0,79	0,83	0,79	0,94	0,87	0,87	0,79	0,92

b) para a bacia do Piancó

Ano	Anom. Observ.	Anomalias normalizadas, em %, previstas pelos membros									
		Média	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1979	48	-188	-125	-238	-179	-246	-106	-250	-217	-171	-158
1980	-138	-239	-158	-242	-252	-243	-250	-252	-252	-250	-252
1981	-26	-202	-204	-252	-191	-238	-131	-197	-152	-232	-223
1982	-94	-127	-123	-56	-167	-224	-65	-21	-151	-166	-167
1983	-102	-215	-169	-225	-213	-230	-205	-217	-238	-205	-229
1984	113	96	265	127	114	-63	223	82	54	-32	
1985	235	302	452	355	458	218	401	122	57	414	239
1986	56	62	197	9	-77	52	125	0	176	-2	76
1987	-30	-142	-137	-173	-182	-94	-87	-148	-202	-121	-134
1988	47	25	65	207	34	88	-41	-17	-57	-82	
R		0,90	0,89	0,80	0,90	0,80	0,92	0,73	0,73	0,87	0,90

Estes resultados mostram que o curto período de simulação, apenas 10 anos, ainda é insuficiente para caracterizar completamente a previsibilidade do MCG. Mostram também que, ao menos para a bacia e célula estudadas, a previsibilidade entre as escalas é semelhante, resultado importante para as aplicações. É importante também lembrar que o MCG foi executado com atualização diária das TSMs, usando valores observados (vide seção 3.4.1.2). Pode-se então considerar que a previsibilidade obtida é o limite

superior possível com a atual geração de MCGs. Na previsão em tempo real usando MCGs assume-se, em geral, persistência das anomalias TSM durante o horizonte de previsão, ou utilizam-se previsões de modelos oceânicos (vide seção 3.4.1.1).

Uma contribuição secundária da avaliação da previsibilidade de precipitação no MCG é a avaliação da confiabilidade do modelo como um todo. A geração de precipitação é dependente de outros campos atmosféricos – pressões, radiação, ventos, e fluxos de calor e vapor d'água – e, portanto, pode ser utilizada como um índice de desempenho de parte dos processos do MCG.

Cavalcanti *et al.* (1997) analisaram preliminarmente estes mesmos resultados do MCG do ECMWF, para todo o período disponível (1979-93) e para o norte-NEB (2°S – 12°S; 45°W – 35°W), utilizando dados de 31 postos pluviométricos. Confirmam os resultados mostrados acima, de que o modelo captura bem o sinal da anomalia de precipitação para a maior parte dos anos, mas encontraram valores bem maiores na simulação do MCG do que os observados, ao contrário do que verificado para a célula específica aqui analisada. Numa avaliação posterior, Brankovic e Palmer (1998) compararam os dados simulados pelo MCG com as “reanálises” do ECMWF (vide seção 3.4.1.1), que não reproduzem com exatidão as precipitações observadas (como também mostraram Cavalcanti *et al.*, 1997), mas têm sido utilizadas como tal na ausência dos dados observados. Eles encontram um padrão bastante similar ao verificado para a célula sobre a bacia do Piancó: subestimativa na maior parte dos anos, principalmente entre 1979 e 1981. Uma importante constatação relativa à previsibilidade geral do MCG é que erros sistemáticos na reprodução de várias variáveis foram encontrados, apesar de não terem aparentemente influenciado a previsibilidade sobre o Nordeste (Brankovic e Palmer, 1998).

As simulações do PROVOST (vide seção 3.4.1.2 para sua descrição) realizadas com o MCG do Serviço Meteorológico Britânico (*UK Met. Office*) confirmam a previsibilidade de precipitação sobre o Nordeste, com correlações maiores que 0,8 com dados observados (série de Hulme, 1994, construída com apenas parte dos postos do Nordeste), capturando bem a variabilidade interanual, mas apresentando variabilidade insuficiente (Evans *et al.*, 1998). Palmer *et al.* (1998) usaram o total de execuções dos quatro modelos testados no PROVOST, ou seja, 36 membros, e encontraram melhoria significativa na destreza das simulações. Segundo os autores, cerca de um terço da melhoria da destreza pode ser atribuída à diversidade dos modelos (à combinação das

previsões) e os outros dois terços ao aumento do número de membros. Este resultado reitera o caráter preliminar das análises aqui realizadas com apenas nove membros.

Concluindo, sob o ponto de vista das aplicações em recursos hídricos, pode-se tecer alguns comentários finais:

- O formato das previsões do MCG apresenta duas características interessantes: (a) são valores numéricos pontuais, para um certo número de execuções do modelo, os membros; e (b) são fornecidos em intervalos menores que o sazonal (no caso do MCG do ECMWF a cada 10 dias). Isto possibilita a categorização probabilística, como realizado acima, para utilização em procedimentos como o de reamostragem. Mas sua maior vantagem é poder ser entrada direta para modelos mensais e até diários de geração de vazão, balanço hídrico agrícola, armazenamento e umidade do solo, recarga de aquíferos, qualidade de água, e tantos outros comumente utilizados em recursos hídricos. A análise de frequência, para produção da previsão probabilística da variável de interesse, deve ser realizada no final do processo de modelagem.
- A avaliação da previsibilidade da distribuição intra-sazonal de precipitação é, portanto, prioritária.
- Uma avaliação mais adequada da previsibilidade do MCG para aplicações em recursos hídricos deve considerar um total de cinco escalas espaciais: (a) a regional, da mesma ordem utilizada pela maioria dos modelos de previsão (o norte-NEB); (b) a sub-regional, formada por áreas homogêneas pluviometricamente, com dimensões entre a escala regional e a escala de célula; (c) a das células do MCG; (d) a de bacias; e (e) a pontual, a da área de influência dos postos pluviométricos individuais. O mosaico composto por estas áreas, seus agrupamentos e sobreposições, sobre todo o norte-NEB, estudado conjuntamente, definiria mais adequadamente a previsibilidade do MCG com o objetivo de utilização operacional.
- O procedimento de desagregação espacial deve ser aprimorado, considerando modelos mais apropriados (Hewitson e Crane, 1996; Wilby *et al.*, 1998).
- A definição do “mosaico” acima citado e os procedimentos de desagregação devem, idealmente, considerar que os MCGs ainda vão continuar em evolução (muito dinâmica) por muitos anos. Devem, portanto, ser genéricos do ponto de

vista a aceitar resultados de qualquer MCG, que apresentam resoluções diversas, permitindo a rápida incorporação dos avanços.

- Todo este arcabouço pode ser diretamente empregado em estudos de impactos de mudanças climáticas no horizonte de décadas.
- Os modelos numéricos *de tempo* globais, que produzem previsões no horizonte de um dia a seis dias (Bonatti, 1996), possuem resolução similar aos MCGs aqui considerados. Os seus resultados, desagregados adequadamente, podem ser aproveitados diretamente pela geração atual de modelos de previsão hidrológica e operação de sistemas em tempo real utilizados no Brasil (por exemplo, Mine, 1998).

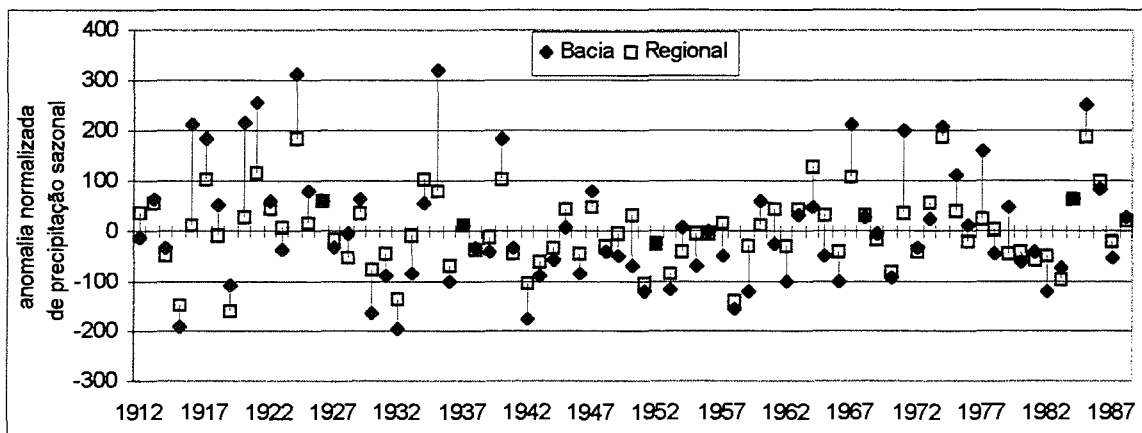
4.1.2. Previsão via ADL

Esta parte do trabalho trata da previsibilidade da precipitação sazonal estimada através de um método estatístico, a análise discriminante linear (ADL). Seguiu-se a abordagem empregada pelo *Hadley Centre* (Ward e Folland, 1991; Colman *et al.*, 1997, 1998), na qual os únicos preditores do total precipitado em fevereiro-maio são os escores de dois autovetores de anomalias de TSM (médias para novembro-janeiro) no Atlântico e Pacífico. A ADL têm sido utilizada também pela Universidade de Wisconsin para prever a precipitação sazonal no norte-NEB, utilizando, porém, outros preditores (Hastenrath e Greischar, 1993a; Greischar e Hastenrath, 1998).

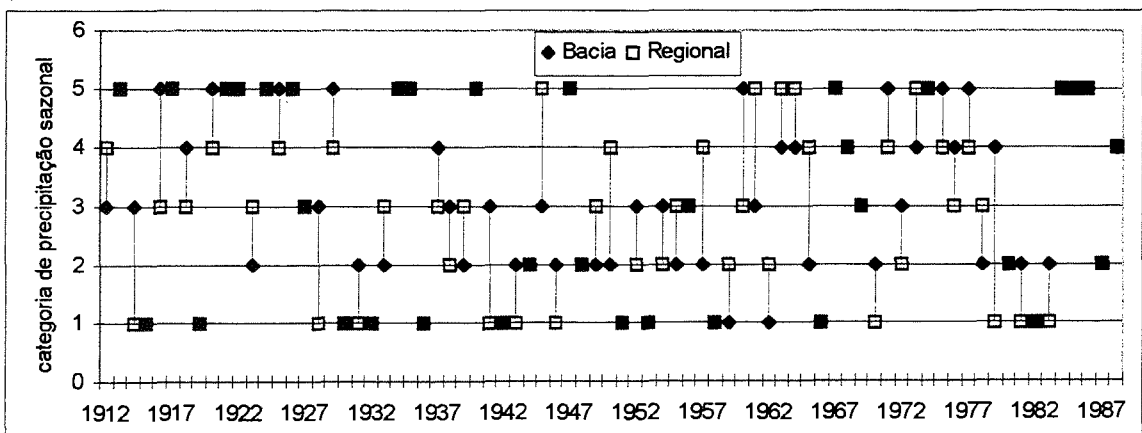
O *Hadley Centre* cedeu para esta pesquisa as séries históricas dos preditores – escores dos autovetores de anomalias de TSM – e do preditando – anomalias normalizadas de precipitação sobre o norte-NEB (vide seções 3.2.3 e 3.2.6). A ADL relaciona os valores dos escores dos dois autovetores a cinco categorias de anomalias normalizadas de precipitação (vide seção 3.4.2). O modelo foi calibrado utilizando o programa SPSS v.6.

A abordagem utilizada para analisar a previsibilidade da precipitação nas duas escalas (regional e bacia) foi calibrar o modelo separadamente à série de categorias de anomalias de precipitação regional e à série de categorias de anomalias de precipitação da bacia do Piancó. Esta decisão foi baseada na hipótese de que os processos atmosféricos que determinam a variabilidade da precipitação na escala regional também devem ter grande influência na variabilidade em pequena escala. A correlação

relativamente alta – 0,82 – entre as séries de anomalias regionais e da bacia do Piancó (vide seção 3.2.3) incentivou o procedimento. Como pode-se perceber da Tabela 3.3 (seção 3.2.3) e da Figura 4.8a, a variabilidade das anomalias na escala da bacia é maior que na escala regional. Quando categorizadas (Figura 4.8b), as duas séries apresentam diferenças em 55% dos anos, o que implica em relações diferentes produzidas pela ADL, já que exatamente os mesmos preditores foram usados para as duas séries. Essas diferenças e a notória influência de fatores sub-regionais e locais, especialmente os topográficos, sobre a precipitação em menor escala (Nobre e Molion, 1988), sugerem perda de previsibilidade para a bacia em relação à região. Isto realmente foi confirmado pelos resultados (Tabela 4.4), com crescimento do índice RPS (vide definição na seção 3.8) da ordem de um décimo para a bacia, em relação à região, o que significou uma perda de previsibilidade de cerca de 40%, medida pela destreza em relação à climatologia (que caiu de 29% para 17%, para 1912-88).



a) em forma de anomalias normalizadas (%)



b) em forma de categorias

Figura 4.8. Séries temporais de precipitação sazonal (fevereiro-maio) regional e da bacia do Piancó (1912-88): (a) em forma de anomalias normalizadas (%); (b) em forma de categorias.

Tabela 4.4. Avaliação das previsões categorizadas probabilísticas para a precipitação sazonal (fevereiro-maio) usando ADL: (a) regional; e (b) para a bacia do Piancó. Para definição dos índices RPS e destreza, vide seção 3.8.

	Calibragem	Validação	Total
A) Previsões regionais			
RPS da climatologia	0.88	0.89	0.88
RPS da ADL	0.67	0.53	0.63
Destreza sobre a climatologia	24%	40%	29%
B) Previsões para a bacia do Piancó			
RPS da climatologia	0.86	0.82	0.85
RPS da ADL para a bacia do Piancó	0.74	0.66	0.71
Destreza sobre a climatologia	15%	20%	17%
RPS da ADL regional aplicada à bacia	0.78	0.64	0.73
Destreza sobre a climatologia	9%	23%	14%

Uma abordagem alternativa para a transferência da previsão entre as duas escalas surgiu da pergunta: até que ponto as categorias previstas para toda a região poderiam ser utilizadas diretamente para a previsão da precipitação para a bacia do Piancó? Esta questão se justifica pelo problema, real, de não se dispôr em tempo hábil dos valores dos escores dos autovetores de TSM para produção da previsão para a bacia, mas apenas das probabilidades da previsão regional divulgadas pelo *Hadley Centre*. Os resultados (Tabela 4.4) mostram que a destreza total, apesar de menor que em se usando o modelo adequadamente calibrado para a bacia, é positiva e pode potencialmente ser útil para aplicações.

O uso da climatologia como previsão, assumido aqui como a previsão de referência, já produz o RPS médio de aproximadamente 0,9. Qualquer novo sistema de previsão, para ser aceito, deve pelo menos superar o desempenho da previsão de referência, no caso apresentando RPS menor que 0,9. As previsões por ADL, usando os preditores do *Hadley Centre*, superam em desempenho, como mostra a Tabela 4.4, as previsões de referência, tanto para a região quanto para a bacia. A destreza é uma medida, em termos percentuais, desta superação.

O desempenho do modelo, para os casos estudados, é sistematicamente menor no período de calibragem do que no de validação (Tabela 4.4). Em geral, pode-se esperar o contrário, ou seja, o modelo apresentar melhor desempenho para o período em que foi calibrado. Ward e Folland (1991) apresentam resultados semelhantes: quando calibrando o modelo com dados de 1912-48, a destreza sobre o período 1949-85 foi de 34%, e de apenas 16% na situação inversa (destreza para 1912-48 do modelo calibrado

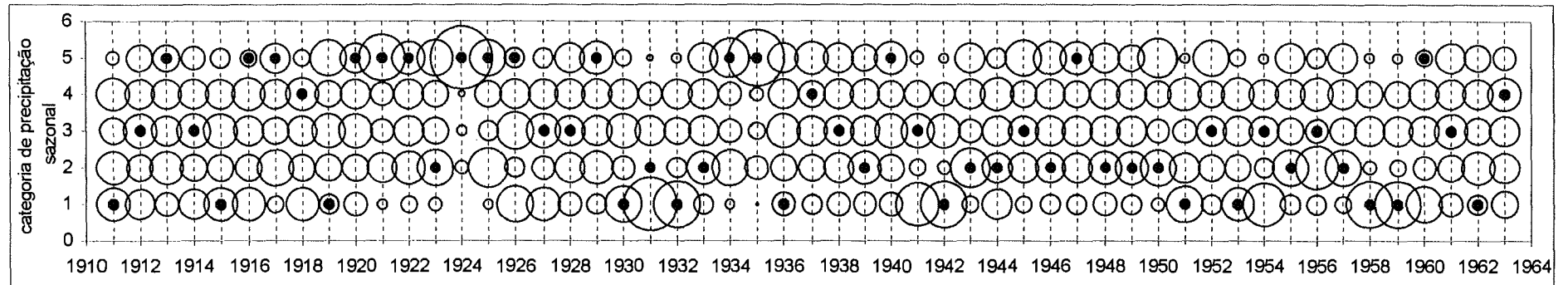
para 1949-85). A razão deste comportamento pode estar na qualidade dos dados de TSM na primeira metade do século, segundo esses autores.

De fato, analisando as previsões para a bacia em maior detalhe (Figura 4.9), percebe-se que as probabilidades atribuídas pela ADL às categorias são mais difusas no período de calibragem (1911-63) do que no período de validação (1964-88). Esse mesmo padrão foi verificado nas previsões regionais.

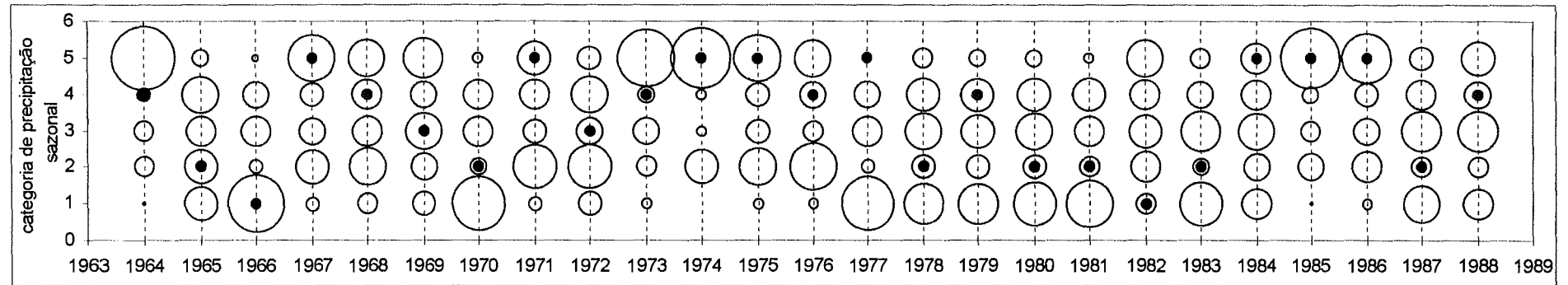
Como esta abordagem foi devidamente validada pelo *Hadley Centre* (Ward e Folland, 1991), não houve preocupação, aqui, com aspectos de teste do método e preditores empregados. Apenas se observou dois destes aspectos durante a modelagem. A ADL supõe que os preditores não sejam correlacionados, e uma das características de uma boa discriminação é que a variabilidade “intra-grupo” seja significativamente menor que a variabilidade “inter-grupos” (Johnson e Wichern, 1998). O SPSS, programa empregado para execução da ADL, testa estes aspectos, para os quais não houve restrições em qualquer dos casos estudados.

Em resumo, os resultados obtidos mostram que: (a) a previsibilidade de um método empírico típico, como a ADL empregada pelo *Hadley Centre*, supera previsões usando a climatologia; (b) a aplicação direta da previsão regional a uma bacia específica, apesar de superar a climatologia, não apresenta desempenho melhor que a de um modelo calibrado diretamente aos dados da bacia; (c) as previsões de precipitação são potencialmente úteis para aplicações em recursos hídricos; e (d) é importante a continuidade dos esforços de pesquisa que buscam melhorar a previsibilidade em menor escala.

Estes resultados do modelo do *Hadley Centre*, na forma como foi calibrado, tendem a apresentar destreza um pouco menor que a realmente alcançada quando empregado em tempo real. Uma razão para isto é que foi utilizada, como valores dos preditores, a média dos escores dos autovetores para o trimestre novembro-janeiro. Diversos autores, inclusive Ward e Folland (1991), reconhecem que o desempenho dos modelos estatísticos, e também dos MCGs, está condicionado à persistência das anomalias de TSMs, empregadas na calibragem, durante a estação chuvosa. Assim, a utilização da TSM de janeiro, isoladamente, ao invés da média novembro-janeiro, tende a dar melhores resultados.



a)



b)

Figura 4.9. Previsão categorizada probabilística de precipitação sazonal (fevereiro-maio) na bacia do Piancó usando ADL: (a) período de calibragem; (b) período de validação. As categorias estão definidas na Tabela 3.3 (seção 3.2.3). Os círculos abertos representam as probabilidades previstas para cada categoria e seus tamanhos são proporcionais à magnitude das probabilidades (o círculo maior representa a probabilidade 1); o círculo preto assinala a categoria da precipitação observada.

A razão de se ter empregado a média novembro-janeiro, seguindo o procedimento de Ward e Folland (1991), é que nas primeiras décadas do século as medições de TSM não cobriam razoavelmente todos os meses. Este motivo é também uma causa da possibilidade de aumento da previsibilidade em relação à calculada neste trabalho. Ward e Folland (1991) afirmam que as previsões em tempo real do *Hadley Centre* são produzidas combinando (através de média aritmética) estimativas realizadas utilizando vários diferentes períodos de treinamento. O período 1912-63, como já comentado acima, apresenta destreza menor que o período 1964-88. A melhoria na qualidade das previsões de TSM obtidas recentemente (vide, por exemplo, Pezzi *et al.*, 1998) pode também trazer melhoria de destreza aos modelos que as utilizam. Neste caso, ao invés do valor de janeiro, pode-se utilizar os valores previstos para a estação chuvosa. O modelo teria sido, também, calibrado com valores de TSM observados nos meses fevereiro-maio.

Além dessas razões para se esperar melhor destreza dos modelos estatísticos que a apresentada aqui, deve-se lembrar que utilização de outros preditores, além das TSMs do Atlântico e do Pacífico, tem trazido melhoria de destreza aos modelos da Universidade de Wisconsin (Hastenrath e Greischar, 1993a; Greischar e Hastenrath, 1998). A precipitação ocorrida na chamada pré-estação chuvosa (outubro-janeiro), por exemplo, apresenta correlação significativa com a precipitação fevereiro-maio.

4.1.3. Subjetividade na produção e combinação das previsões

É notória a influência da subjetividade na produção de previsões meteorológicas e na combinação, em um prognóstico único, de previsões de diversas fontes (modelos ou especialistas), como comentado na seção 2.1. No caso da previsão de precipitação para o norte-NEB esta constatação é também válida.

Por exemplo, Ward e Folland (1991) descrevem previsões em tempo real realizadas para os anos 1987-90, nas quais: (a) a previsão consolidada é a média de estimativas obtidas utilizando dois modelos diferentes (ADL e regressão linear) e vários períodos de treinamento; e (b) a evolução do padrão das TSMs nos meses anteriores à preparação da previsão é analisada e um julgamento subjetivo sobre a confiança esperada na previsão é emitido. Esta prática vem sendo seguida anualmente pelo *Hadley Centre* e, mais recentemente, as previsões do seu MCG têm sido incorporadas ao prognóstico consolidado (Colman *et al.*, 1998).

Os núcleos estaduais de meteorologia e recursos hídricos do Nordeste, já referenciados na seção 2.4.3, produzem prognósticos subjetivos da precipitação sazonal no Nordeste baseando-se (Repelli e Alves, 1994): (a) na análise do estado e evolução de cerca de uma dúzia de campos atmosféricos e oceânicos nos meses que antecedem a estação chuvosa; e (b) na previsão fornecida por modelos quantitativos, estatísticos ou MCGs. O prognóstico era fornecido até 1998 como uma categoria, entre cinco (como as da ADL, na seção anterior, mas sem definição precisa dos seus limites), de maior possibilidade de ocorrência, sem probabilidade associada. Muito recentemente, na previsão preparada em janeiro de 1999, pela primeira vez foi divulgado um prognóstico probabilístico (Tendência, 1999), associado a apenas três categorias, ao invés das cinco usuais. Essas categorias são definidas apenas como “acima da média”, “próximo da média” e “abaixo da média”, sem quantificação dos seus limites. Segundo Brito (1999), as probabilidades foram atribuídas subjetivamente pelo grupo de meteorologistas (representantes de cinco núcleos estaduais, uma universidade, dois institutos federais e um instituto internacional). A base foi a previsão categorizada probabilística do *International Research Institute for Climate Prediction (IRI)*, modificada com base na análise subjetiva dos campos atmosféricos e oceânicos no momento da preparação da previsão. A previsão do IRI, por sua vez, é a combinação de estimativas de MCGs atmosféricos e acoplados, modelos estatísticos de previsão de TSM e análise do clima observado na região (International, 1999). O IRI não descreve o método utilizado na combinação.

A inclusão do julgamento subjetivo na preparação das previsões é encarada com reservas no meio acadêmico (Hastenrath, 1998), apesar de prática comum nos centros operacionais. A principal crítica é à dificuldade de reprodutibilidade e, conseqüentemente, de avaliação rigorosa dos resultados obtidos.

Para combinação de previsões, vários métodos objetivos, reprodutíveis, podem ser utilizados (Clemen, 1989) e até têm sido propostos para previsões sazonais de precipitação (Casey, 1995). Há indicações, entretanto, de que a combinação de previsões quantitativas não aumenta consideravelmente a destreza, apesar de emprestar mais consistência ao prognóstico (Armstrong, 1989; Palmer *et al.*, 1998). Assim, a incorporação objetiva e quantitativa do julgamento subjetivo do previsor na produção e/ou combinação de previsões tem sido apontada como uma forma de melhorar a destreza e a confiabilidade dos sistemas de previsão em geral. Os arcabouços

matemáticos sugeridos para acomodar as informações subjetivas incluem a teoria da decisão Bayesiana (Faria e Souza, 1995), sistemas especialistas (Armstrong, 1989; Rodionov e Martin, 1996) e a teoria da possibilidade (Sandri *et al.*, 1995).

Em uma etapa preliminar deste trabalho (Galvão, 1995), cogitou-se realizar a sistematização da previsão de consenso dos núcleos estaduais de meteorologia e recursos hídricos do Nordeste, descrito acima. Foi proposto um sistema a base de regras, com inferência difusa (vide seção A.1, do Anexo), que produziria a previsão combinando a análise dos campos atmosféricos e oceânicos realizada pelos meteorologistas aos resultados dos diversos modelos quantitativos de previsão. Este sistema teria a propriedade da reprodutibilidade, serviria para documentar e consolidar o conhecimento e experiência dos previsores e ainda poderia ser utilizado para treinamento de jovens profissionais.

4.2. Previsibilidade do volume escoado

Conforme descrito na seção 3.5, a previsão do volume escoado sazonal (fevereiro-maio) foi produzida de dois modos distintos:

- usando a previsão de precipitação sazonal em formato categorizado probabilístico, produzida na seção 4.1.2, como entrada para o procedimento de reamostragem (vide seção 3.3), que a relacionou com o volume escoado;
- usando os escores dos autovetores de anomalias de TSM no Atlântico e Pacífico, utilizados pelo *Hadley Centre* para previsão de precipitação (vide seções 3.2.6 e 4.1.2), como preditores para o volume escoado sazonal na bacia do Piancó, através da mesma técnica estatística usada para prever precipitação, a ADL (vide seção 3.4.2).

Não utilizou-se a previsão de precipitação produzida pelo MCG, porque, apesar de ter apresentado destreza similar à previsão pela ADL, (a) possui série muito curta, prejudicando a avaliação dos resultados; (b) não cobre o mês de fevereiro, bastante importante para a aplicação a operação de reservatórios que se fez em seguida; e (c) provavelmente não adicionaria contribuição significativa à discussão dos objetivos propostos para o trabalho.

4.2.1. Extensão da série de vazão

O modelo *Tank* mensal foi calibrado para a bacia do Piancó (vide seção 3.2.4 e Anexo), durante o período de 1964-80, obtendo-se o conjunto de parâmetros da Figura 4.10. Antes do seu emprego para a extensão da série de vazão em Piancó a partir da série mais longa de precipitação, deve-se realizar uma análise do ajuste para os períodos de calibragem (1964-80) e de validação (1981-88). Os critérios de verificação do ajuste utilizados foram: a correlação, a comparação das médias e desvios padrões, a verificação gráfica do ajuste e a análise dos resíduos entre as vazões observadas e calculadas, mensais e sazonais (Clarke, 1973; Tucci, 1998).

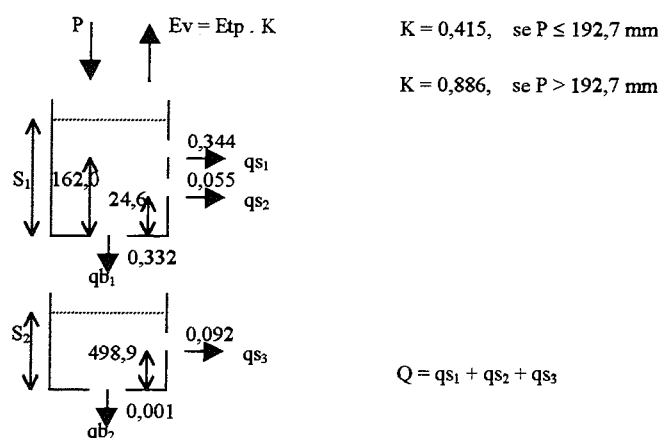


Figura 4.10. Parâmetros obtidos na calibragem do modelo *Tank* mensal para a bacia do Piancó, utilizando dados do período 1964-80.

Tabela 4.5. Coeficientes de correlação entre vazões médias mensais e sazonais observadas e calculadas pelo modelo *Tank* para a bacia do Piancó. O coeficiente de correlação mensal foi calculado utilizando apenas os meses onde pelo menos uma das seguintes variáveis não foi nula: precipitação, vazão observada ou vazão calculada.

	calibragem (1964-80)	validação (1981-88)	total (1964-88)
mensal	0,93	0,93	0,91
fevereiro-maio	0,93	0,99	0,94

Os coeficientes de correlação (Tabela 4.5) entre as vazões mensais observadas e calculadas e entre suas médias sazonais – para as duas estações de interesse do trabalho – foram relativamente altos, acima de 0.9, tanto para o período de calibragem como para o de validação. A comparação gráfica das médias sazonais (Figura 4.11) confirma o diagnóstico de ajuste adequado sugerido pela correlação. As características das vazões

para os meses da estação chuvosa, expressas pela média e desvio padrão, também foram bem reproduzidas pelo modelo (Tabela 4.6).

Tabela 4.6. Média e desvio padrão de vazões médias mensais observadas e calculadas pelo modelo *Tank* para a bacia do Piancó, para o período 1964-88 (valores em mm).

mês	média		desvio padrão	
	calculada	observada	calculado	observado
janeiro	1,5	2,7	2,1	5,0
fevereiro	9,1	10,9	17,2	18,5
março	25,0	27,4	23,8	27,9
abril	36,7	38,5	31,1	47,5
maio	11,7	11,8	15,2	16,3
junho	3,0	1,4	3,6	2,1

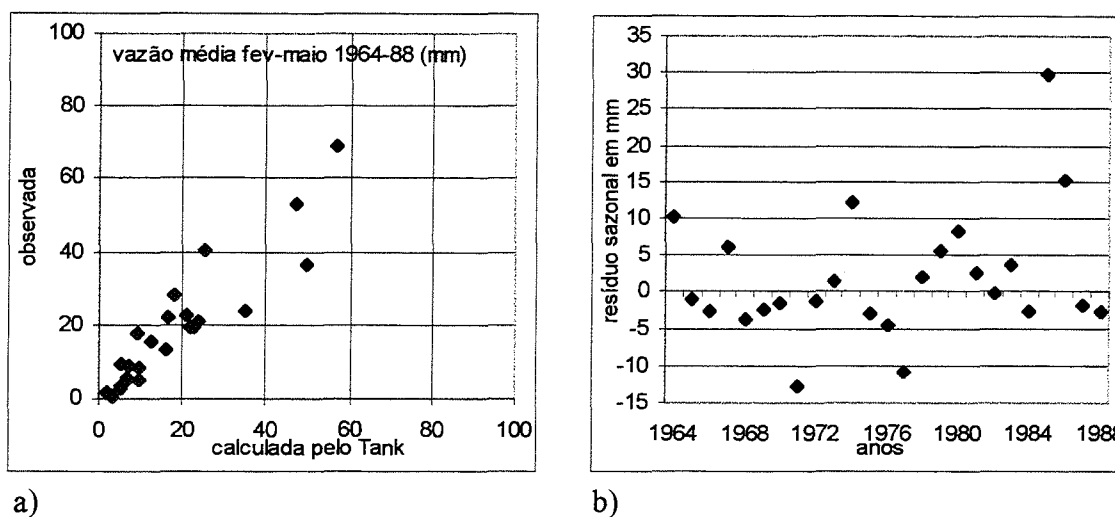


Figura 4.11. Comparação entre vazões médias sazonais observadas e calculadas pelo modelo *Tank* para a bacia do Piancó, no período de observação (1964-88): (a) valores absolutos, e (b) resíduos sazonais – diferenças entre a vazão observada e a vazão calculada pelo modelo.

Da Tabela 4.6 pode-se perceber, porém, uma indicação de subestimativa das vazões calculadas pelo modelo: (a) apesar da pouca diferença, os valores médios calculados são sistematicamente mais baixos que a média dos valores observados, (b) a variabilidade (expressa pelo desvio padrão) também é um pouco menor na série gerada, e (c) a comparação gráfica das vazões (Figura 4.11a) também parece confirmar a subestimativa. A análise dos resíduos (diferenças entre as vazões observadas e calculadas) calculados mensalmente e sazonalmente (fevereiro-maio) mostra que alguns eventos extremos influenciaram muito estes números. Na Figura 4.12 pode-se observar que em dois meses o resíduo se apresenta bem maior que os dos outros meses: março de 1974 (resíduo de 46,2 mm) e abril de 1985 (resíduo de 101,8 mm), dois dos anos mais

chuvosos de todo o registro histórico da bacia. A exclusão destes dois eventos excepcionais traria o somatório do resíduo mensal, de 181,4 mm, para 33,3 mm, valor aceitável, considerando a extensão da série e a magnitude, entre ± 10 mm e ± 30 mm de vários dos resíduos, conforme se verifica na Figura 4.12. Estes dois anos muito chuvosos também estão determinando os maiores resíduos sazonais (Figura 4.11b).

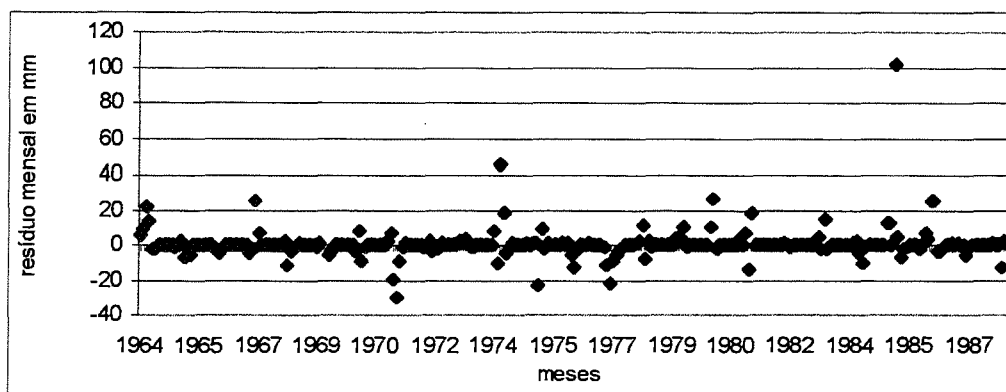


Figura 4.12. Resíduos mensais – diferenças entre a vazão observada e a vazão calculada pelo modelo *Tank* – para a bacia do Piancó no período 1964-88.

Estes resultados são esperados para uma bacia de clima semi-árido, com alta variabilidade interanual e intra-sazonal, que apresenta dificuldades para ajuste de modelos precipitação-vazão. A avaliação do ajuste mostra que deve-se esperar que a série gerada para o período 1911-63 subestime a magnitude e a variabilidade das vazões sazonais que teriam realmente ocorrido. As implicações para este trabalho devem-se à escolha da série de vazões do período 1911-63 para calibrar os métodos de previsão de volume escoado sazonal (vide seção 3.5) e de operação de reservatórios (vide seção 3.6). A análise das previsões deve ter em vista este diagnóstico.

4.2.2. Análise da previsibilidade

Utilizando-se o procedimento de reamostragem descrito na seção 3.3, produziram-se previsões de volume escoado sazonal, tendo como entrada as séries de anomalias normalizadas sazonais de precipitação e volume na bacia do Piancó. Os cenários de previsão de precipitação, em formato categorizado probabilístico (produzidos na seção 4.1.2), foram os seguintes:

- previsões para a precipitação regional: alternativa útil quando não se dispõe da previsão para a bacia, mas apenas das probabilidades da previsão regional divulgadas pelo *Hadley Centre*;

- previsões para a precipitação para a bacia do Piancó: quando as previsões via ADL para a bacia específica estão disponíveis;
- previsões perfeitas para a precipitação para a bacia do Piancó: quando, hipoteticamente, se dispusesse do melhor prognóstico possível para a precipitação na forma categorizada probabilística (para a categoria em que a precipitação foi observada se atribui probabilidade 1, com probabilidades zero atribuídas às outras categorias); cenário utilizado para avaliar o limite superior de previsibilidade da abordagem da reamostragem.

Além dessas três séries de volume previsto, produziu-se uma série de previsões via ADL, relacionando o volume escoado sazonal diretamente aos escores dos autovetores de anomalias de TSM (“ADL-TSM”). A quinta e última série é a de referência (“climatologia”), onde probabilidades iguais (0,2) são atribuídas a todas as categorias de volume escoado, para todos os anos.

Para as quatro séries de previsões categorizadas probabilísticas, os mesmos índices de desempenho foram utilizados, o RPS e a destreza (vide seção 3.8 para definições). Para as previsões obtidas da reamostragem, calcularam-se também os valores pontuais para o 10^o, o 50^o (correspondente à mediana) e o 90^o percentis da distribuição de frequência prevista para o volume escoado. Assumindo a mediana como o “melhor” prognóstico pontual, calcularam-se as correlações com os valores observados, fornecendo mais uma medida de avaliação. Todos esses índices, para os períodos 1911-63 e 1964-88, utilizados respectivamente para calibragem e validação dos modelos, estão apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7. Avaliação das previsões categorizadas probabilísticas para o volume escoado sazonal (fevereiro-maio) na bacia do Piancó. Para definição dos índices RPS e destreza, vide seção 3.8.

	Calibragem	Validação	Total
RPS da Climatologia	0,86	0,81	0,84
RPS da precipitação <i>regional</i> + reamostragem	0,74	0,80	0,76
Destreza sobre a climatologia	14%	1%	10%
RPS da precipitação <i>para a bacia</i> + reamostragem	0,72	0,70	0,72
Destreza sobre a climatologia	16%	13%	15%
RPS da precipitação <i>perfeita</i> + reamostragem	0,25	0,45	0,31
Destreza sobre a climatologia	71%	44%	63%
RPS da ADL usando anomalias de TSM	0,73	0,65	0,70
Destreza sobre a climatologia	15%	20%	17%

Tabela 4.8. Coeficientes de correlação para previsões *pontuais* para o volume escoado sazonal (fevereiro-maio) na bacia do Piancó.

	Calibragem	Validação	Total
Precipitação <i>regional</i> + reamostragem	0,55	0,59	0,57
Precipitação <i>para a bacia</i> + reamostragem	0,59	0,66	0,62
Precipitação <i>perfeita</i> + reamostragem	0,82	0,72	0,79

A comparação das duas previsões via reamostragem da precipitação com a previsão via ADL-TSM (Tabela 4.7) mostra o que poderia ser esperado a princípio: a supressão da etapa intermediária de previsão de precipitação, resultou em menor incerteza e maior exatidão da previsão de volume. A diferença não é tão grande quando se analisa série toda (17% para 15%), mas cresce bastante em se tomando apenas o período de validação (20% para 13%). As distribuições de frequência previstas para cada ano dos períodos de calibragem e validação podem ser observadas nas Figuras 4.13 (via reamostragem) e 4.14 (via ADL-TSM).

A previsão de volume via ADL-TSM (Tabela 4.7) apresenta previsibilidade praticamente idêntica à da previsão de precipitação na escala de bacia (Tabela 4.4b, da seção 4.1.2). As previsões via reamostragem, como já comentado, sofrem, entretanto, perda de previsibilidade.

A previsão de volume via ADL-TSM apresenta o mesmo comportamento das previsões de precipitação apresentadas na seção 4.1.2: a maior destreza foi verificada durante o período de validação. As previsões de volume via reamostragem, porém, seguem o comportamento usual na aplicação de modelos empíricos, apresentando maior destreza no período de calibragem. A diferença é maior quando se usou previsões de precipitação regional ou perfeita. Para o primeiro caso, já era esperada uma redução na destreza, pois, como na seção 4.1.2, utilizaram-se, com a série da bacia, previsões produzidas para uma outra série, com definição diferente das categorias. Para o caso das previsões perfeitas, a diferença da série de 1911-63, gerada sinteticamente, para a de 1964-88, natural, é uma razão possível (veja discussão na seção anterior).

As previsões pontuais são as séries de volume que foram empregadas para a operação do reservatório, descrita na próxima seção. Pode-se observar na Figura 4.15 (reamostragem da precipitação prevista para a bacia) que os intervalos correspondentes ao 10° e 90° percentis incluem a grande maioria das observações, mas são muito largos, expressando a alta incerteza associada a estas previsões. Também pode-se observar nessa figura que a série de previsões é bastante “suavizada” em relação aos valores

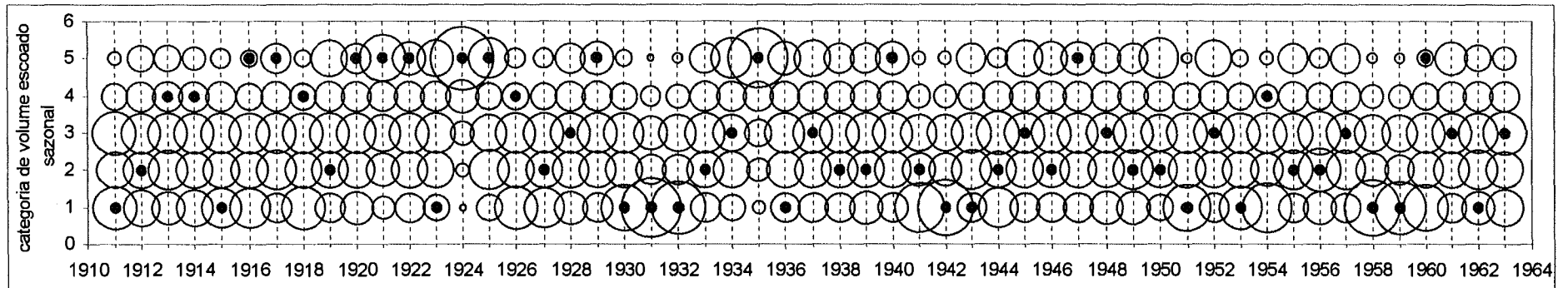
observados, não conseguindo acompanhar os picos nos anos muito chuvosos. Isto é consequência da discretização da amplitude de variação do volume em apenas cinco categorias. Para as previsões derivadas da reamostragem da precipitação prevista regional os resultados foram semelhantes.

No caso da reamostragem da previsão de precipitação *perfeita*, os intervalos correspondentes ao 10° e 90° percentis (Figura 4.16) são mais estreitos, o que expressa a redução na incerteza, e incluem os valores observados em 70% dos anos no período de validação.

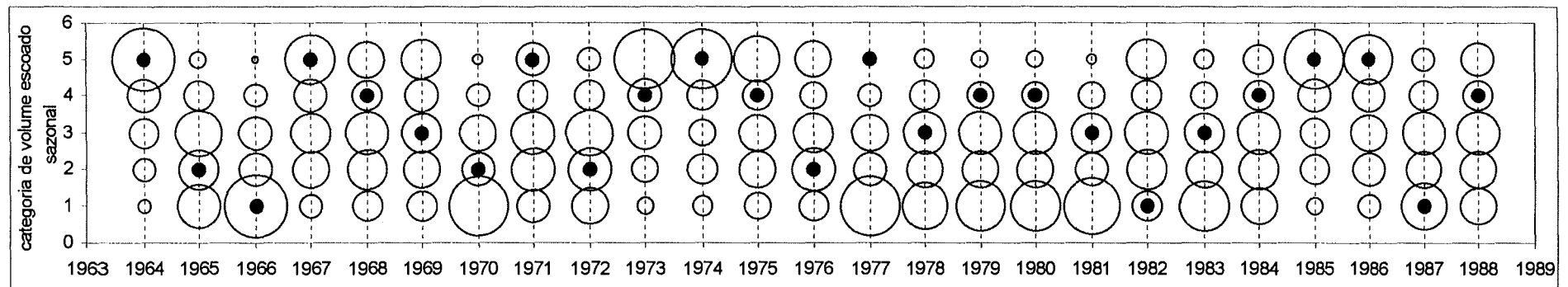
Os resultados para a previsão *perfeita* mostram que a possibilidade de melhoria na qualidade da previsão probabilística de volume utilizando a previsão de precipitação é grande, mas limitada a níveis de destreza entre cerca de 45% e 70% (Tabela 4.7), se o formato atual com cinco categorias para precipitação e volume for mantido. No formato pontual, os coeficientes de correlação encontrados (Tabela 4.8) mostram menor possibilidade de melhoria.

A possibilidade de produção de previsões sazonais de volume escoado na escala de bacia, potencialmente úteis para aplicação em recursos hídricos – hipótese testada neste trabalho – está demonstrada pelas evidências acima. Outras alternativas, além da reamostragem e métodos correlatos, como simulação Monte Carlo, podem então ser testadas para melhoria das previsões de volume escoado.

Um modelo precipitação-vazão que poderia aproveitar diretamente as previsões probabilísticas de precipitação é o “distribuído probabilístico” (Moore e Clarke, 1981; Moore, 1985; Hosking e Clarke, 1990; Clarke, 1998). É um modelo versátil, econômico em número de parâmetros e já foi aplicado em conjunto com resultados de um MCG para estimativa de impactos de mudanças climáticas (Hulme, 1996). A precipitação é expressa como probabilidades de transição de uma cadeia de Markov e o volume escoado também é produzido em formato probabilístico. A incorporação da previsão probabilística de precipitação seria realizada através da modificação das probabilidades de transição, de modo que obedecessem à distribuição prescrita pela previsão. Alternativamente, se poderia utilizar variáveis climáticas, como os escores dos autovetores de TSM da previsão do *Hadley Centre*, para modificar os parâmetros da representação Markoviana da precipitação diária (Woolhiser, 1992; Bardossy e Plate, 1991).

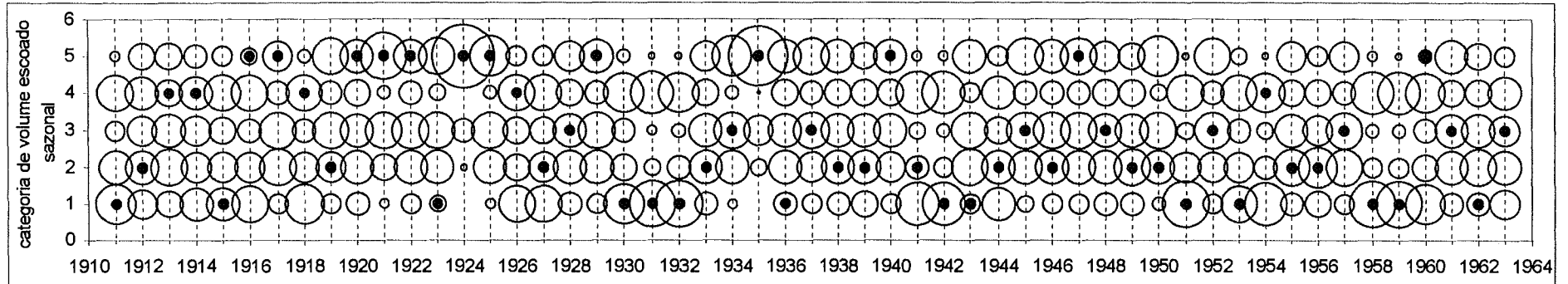


a) calibragem

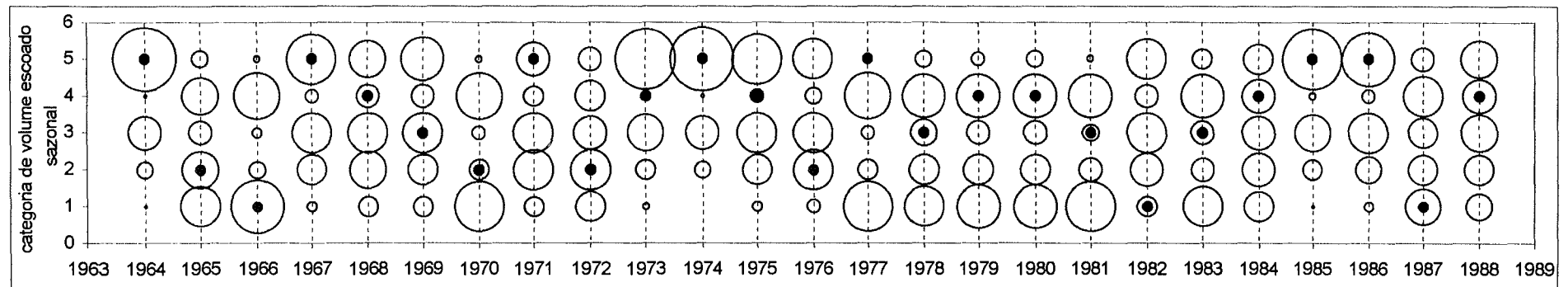


b) validação

Figura 4.13. Previsão categorizada probabilística de volume escoado sazonal (fevereiro-maio) para a bacia do Piancó obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *para a bacia do Piancó* via ADL: (a) período de calibragem; (b) período de validação. As categorias estão definidas na Tabela 3.6 (seção 3.2.4). Os círculos abertos representam as probabilidades previstas para cada categoria e seus tamanhos são proporcionais à magnitude das probabilidades (o círculo maior representa a probabilidade 1); o círculo preto assinala a categoria do volume observado.



a) calibragem



b) validação

Figura 4.14. Previsão categorizada probabilística de volume escoado sazonal (fevereiro-maio) para a bacia do Piancó usando ADL-TSM: (a) período de calibragem; (b) período de validação. As categorias estão definidas na Tabela 3.6 (seção 3.2.4). Os círculos abertos representam as probabilidades previstas para cada categoria e seus tamanhos são proporcionais à magnitude das probabilidades (o círculo maior representa a probabilidade 1); o círculo preto assinala a categoria do volume observado.

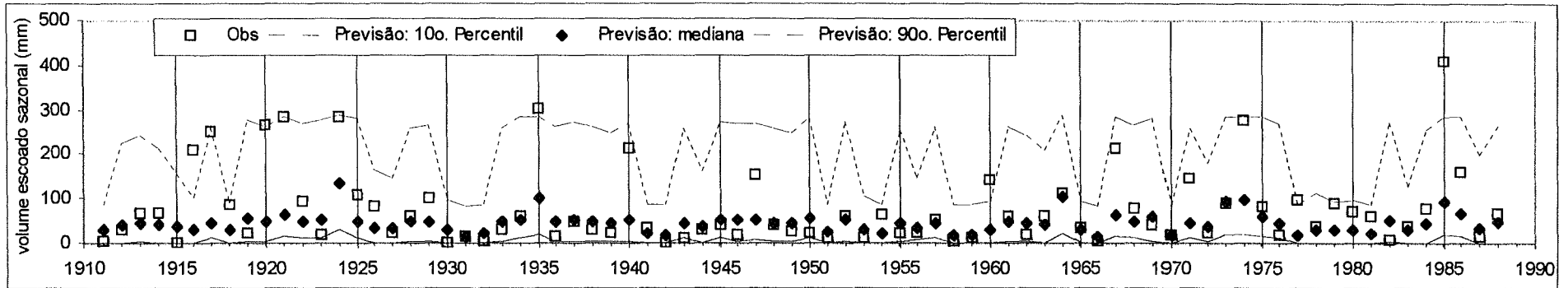


Figura 4.15. Previsões pontuais de volume escoado sazonal (fevereiro-maio) para a bacia do Piancó, obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *para a bacia do Piancó* via ADL.

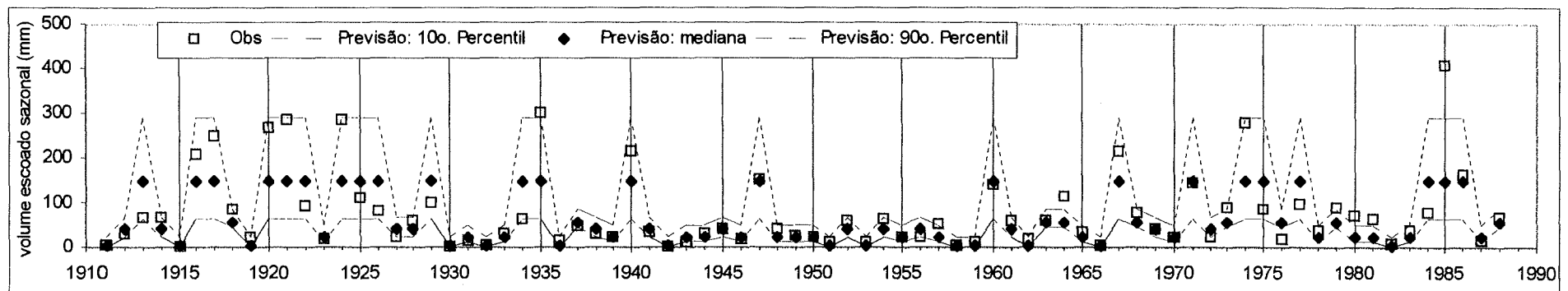


Figura 4.16. Previsões pontuais de volume escoado sazonal (fevereiro-maio) para a bacia do Piancó, obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *perfeitas*.

4.3. Aplicabilidade a operação de reservatórios

Para estabelecer o ganho pelo uso da previsão de volume escoado sazonal na capacidade de atendimento às demandas pelo reservatório Coremas-Mãe D'Água, sua operação foi simulada utilizando um esquema de programação dinâmica (PD) e um de controle difuso (CD), descritos na seção 3.6.

Os modelos de PD e CD não são diretamente comparáveis, pois usam critérios diferentes para estabelecer a redução (ou não) da liberação de água para os usuários. O modelo de PD foi executado tendo como função objetivo a minimização do somatório da escassez relativa mensal (equação 3.11, seção 3.6.2) ao longo do horizonte de operação; o de CD levou em conta a média, e não o somatório, da escassez relativa (equação 3.12, na mesma seção) e também o volume armazenado no reservatório ao final do horizonte de operação. Essas diferenças decorrem das características de cada abordagem: na PD clássica, como o esquema aqui empregado, é mais difícil definir funções objetivo que expressem várias (e conflitantes) metas de operação; os métodos de simulação, como o de CD, por outro lado, também não conseguem ser otimizantes como a PD, apesar de representarem com maior facilidade os detalhes da operação. A análise dos resultados dos dois modelos, a seguir empreendida, deve, portanto, ser compreendida neste contexto. Como variável representativa do atendimento à demanda, utilizou-se a escassez no atendimento.

Como explicado na seção 3.2.7, as demandas atuais para o reservatório Coremas-Mãe D'Água, estimadas por Oliveira (1998), somam cerca de 30,6 milhões de m³ por mês. A simulação do comportamento do reservatório sujeito a este volume de retirada mensal, mesmo sem qualquer controle operacional, não apresentou falhas para o período 1964-88, apesar da ocorrência de alguma escassez para os períodos de seca relativamente mais críticos verificados entre 1911-63. Para que aqui se pudesse analisar a sensibilidade da operação do reservatório à previsibilidade do volume escoado sazonal, aumentou-se arbitrariamente a demanda desejada mensal para 35 milhões de m³. Esta retirada provoca colapso do reservatório em duas seqüências de anos secos (1965-67 e 1982-84) durante o período 1964-88. Em contrapartida, também aumenta a quantidade de colapsos durante 1911-63. Por “colapso” se entende o esvaziamento total do reservatório ou falha total (ou “severa”; ver definição no parágrafo seguinte) no atendimento à demanda desejada, em pelo menos um mês. A diferença de

comportamento entre os dois períodos, 1911-63 e 1964-88, pode ser atribuída a dois fatores: (a) durante a primeira fase ocorrem realmente mais seqüências de anos secos, como pode ser visto na Figura 4.17; e (b) a série de volume escoado mensal gerada para 1911-63 provavelmente apresenta média e variabilidade menores do que as que realmente ocorreram, conforme discutido na seção 4.2.1. Isto não compromete os resultados obtidos para o primeiro período, mas deve ser lembrado nesta análise.

Os modelos foram parametrizados como descrito na seção 3.6. O nível de controle no CD foi limitado ao intervalo [0,4; 1,0]; na PD, a faixa de liberação mensal para uso pelo algoritmo, entre 40% e 100% da liberação desejada, foi discretizada em 10 valores. Esta limitação define o que aqui se considerou como “falhas severas”: aquelas maiores que 60% da demanda desejada. Estas falhas não são prescritas pelos modelos de operação e só ocorrem em caso de colapso do sistema. Falhas de até 40% da demanda desejada mensal são aqui consideradas “moderadas”. Para o modelo de CD, as funções de pertinência de todas as variáveis e as regras de inferência foram mantidas como descritas na Figura 3.6 e Tabela 3.8 (seção 3.6.4). Não foi realizada qualquer modificação nesses valores originais através do uso de dados observados, como recomendado na seção 3.6.4. Os dados do período de calibragem (1911-63) foram utilizados apenas para definição dos níveis de armazenamento desejados para cada mês (s_t^* na equação 3.16, seção 3.6.4): os volumes armazenados médios obtidos por simulação simples do reservatório sujeito às demandas desejadas.

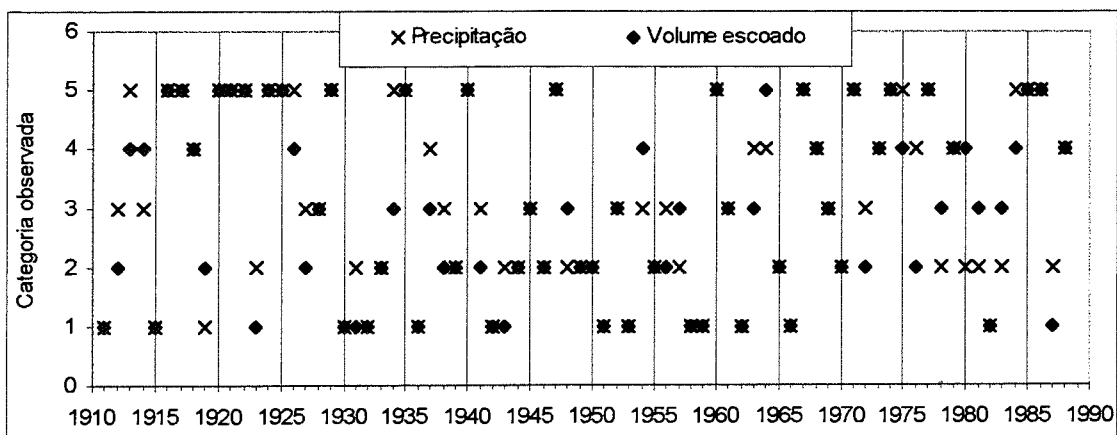


Figura 4.17. Categorias observadas de precipitação e volume escoado sazonais (fevereiro-maio) na bacia do Piancó. A definição das categorias está nas Tabelas 3.3 e 3.6, na seção 3.2.3. Os períodos mais críticos na simulação da operação do reservatório Coremas-Mãe D’Água foram observados em torno de: 1915, 1932, 1943, década de 1950, 1966 e 1983.

As Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam os resultados para os seguintes cenários de previsão, como estabelecidos na seção 3.6.1:

- (a) previsão climatológica, onde médias mensais de volumes escoados para o período 1911-63 foram usadas, para todos os anos, como previsão;
- (b) previsões de volume afluente produzidas na seção 4.2.2, em duas formas: usando a precipitação regional como referência e usando a precipitação da bacia do Piancó como referência; e
- (c) previsão perfeita, onde os volumes afluentes mensais observados para fevereiro-março foram usados como previsão, e médias mensais para os outros meses.

O reservatório também foi simulado sem considerar previsão e sujeito às demandas desejadas, ou seja, obedecendo à chamada “regra padrão”. Esta simulação é aqui denominada “sem operação”.

Tabela 4.9. Avaliação da operação do reservatório Coremas-Mãe D’Água em termos de escassez relativa.

a) Sem operação (regra padrão):

Cenário de previsão	Período	Escassez relativa			Armazenamento mínimo (10^6 m^3)
		Total	Média	Máxima	
Sem previsão	1911-63	103,40	0,85	1,00	0
	1964-88	4,33	0,72	0,98	0

b) Operação por controle difuso:

Cenário de previsão	Período	Escassez relativa			Armazenamento mínimo (10^6 m^3)
		Total	Média	Máxima	
Climatológica de volume	1911-63	148,31	0,39	1,00	0
	1964-88	15,35	0,22	0,56	133,7
Reamostragem prec. regional	1911-63	155,49	0,39	1,00	0
	1964-88	19,60	0,19	0,52	161,8
Reamostragem prec. da bacia	1911-63	155,14	0,39	1,00	0
	1964-88	17,92	0,19	0,50	160,3
Perfeita de volume	1911-63	155,67	0,40	1,00	0
	1964-88	16,27	0,21	0,50	162,1

c) Operação por programação dinâmica:

Cenário de previsão	Período	Escassez relativa			Armazenamento mínimo (10^6 m^3)
		Total	Média	Máxima	
Climatológica de volume	1911-63	105,57	0,61	1,00	0
	1964-88	4,60	0,33	0,90	0
Reamostragem prec. regional	1911-63	107,06	0,55	1,00	0
	1964-88	4,84	0,32	0,98	0
Reamostragem prec. da bacia	1911-63	107,20	0,54	1,00	0
	1964-88	4,53	0,28	0,89	0
Perfeita de volume	1911-63	107,13	0,54	1,00	0
	1964-88	4,77	0,28	1,00	0

Tabela 4.10. Avaliação da operação do reservatório Coremas-Mãe D'Água em termos de caracterização das falhas.

a) Sem operação (regra padrão):

Cenário de previsão	Período	Porcentagem de falhas com magnitude de					Total de Falhas
		0 a 0,2	0,20 a 0,40	0,40 a 0,60	0,60 a 0,80	0,8 a 1,00	
Sem previsão	1911-63	6,6	5,8	2,5	8,3	76,9	121
	1964-88	0	16,7	16,7	16,7	50,0	6

b) Operação por controle difuso:

Cenário de previsão	Período	Porcentagem de falhas com magnitude de					Total de Falhas
		0 a 0,2	0,20 a 0,40	0,40 a 0,60	0,60 a 0,80	0,8 a 1,00	
Climatológica de volume	1911-63	23,2	25,6	47,2	1,3	2,6	379
	1964-88	52,1	28,2	19,7	0	0	71
Reamostragem prec. regional	1911-63	26,1	20,1	52,4	0,0	1,5	399
	1964-88	62,9	21,9	15,2	0	0	105
Reamostragem prec. da bacia	1911-63	26,0	19,4	53,0	0,0	1,5	396
	1964-88	60,4	27,1	12,5	0	0	96
Perfeita de volume	1911-63	23,4	23,1	52,0	0,3	1,3	394
	1964-88	51,3	35,9	12,8	0	0	78

c) Operação por programação dinâmica:

Cenário de previsão	Período	Porcentagem de falhas com magnitude de					Total de Falhas
		0 a 0,2	0,20 a 0,40	0,40 a 0,60	0,60 a 0,80	0,8 a 1,00	
Climatológica de volume	1911-63	17,4	20,3	13,4	6,4	42,4	172
	1964-88	42,9	28,6	0	21,4	7,1	14
Reamostragem prec. regional	1911-63	28,2	14,9	16,4	5,6	34,9	195
	1964-88	53,3	20,0	6,7	13,3	6,7	15
Reamostragem prec. da bacia	1911-63	28,0	17,5	15,0	6,0	33,5	200
	1964-88	62,5	12,5	6,3	12,5	6,3	16
Perfeita de volume	1911-63	27,0	16,0	19,0	5,0	33,0	200
	1964-88	52,9	29,4	0	5,9	11,8	17

A simulação “sem operação” revela que o reservatório entraria em colapso em menos de 20% dos meses de 1911-63 e em apenas 2% (6 meses) nos 25 anos de 1964-88 (Tabela 4.10). Em parte desses anos, a escassez ainda seria amenizada, pois a vazão afluente durante o mês supriria parte das demandas. Os valores da escassez total nos dois períodos (1911-63 e 1964-88) são menores que os obtidos por qualquer das duas estratégias de operação (PD e CD), sob qualquer cenário de previsão (Tabela 4.9). Sob este critério, não vale a pena implementar sistemas de operação, usando ou não a previsão sazonal. Esta característica importante do reservatório está relacionada à sua (enorme) capacidade de armazenamento.

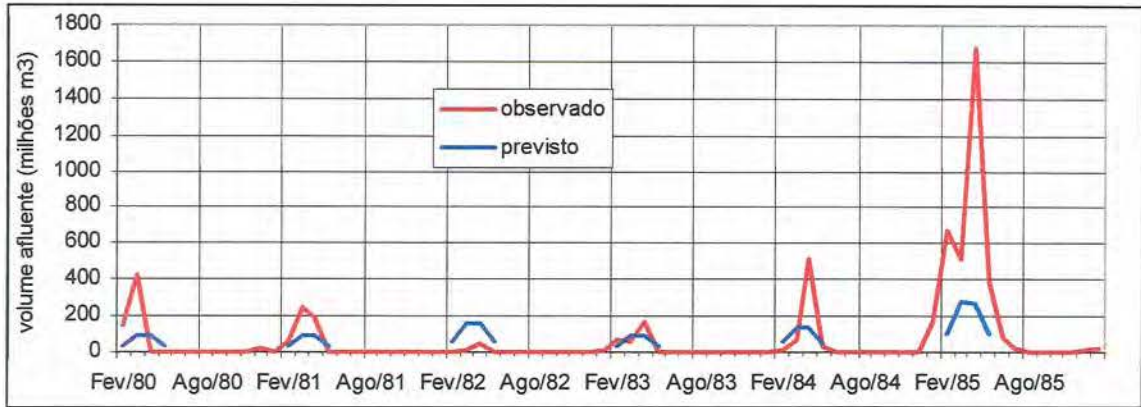
Os resultados obtidos quando usando a “previsão climatológica” mostram a reação da operação ao “conhecimento” do ciclo intra-anual (a sazonalidade) das vazões na bacia. Apenas este conhecimento já proporciona grande benefício para a operação: a simulação “sem operação” apresentou 85% e 67% de falhas maiores que 0,6, para os

períodos 1911-63 e 1964-88, contra 49% (PD) e 4% (CD), para o primeiro período, e 29% (PD) e nenhuma falha (CD) desta magnitude, para o segundo (Tabela 4.10).

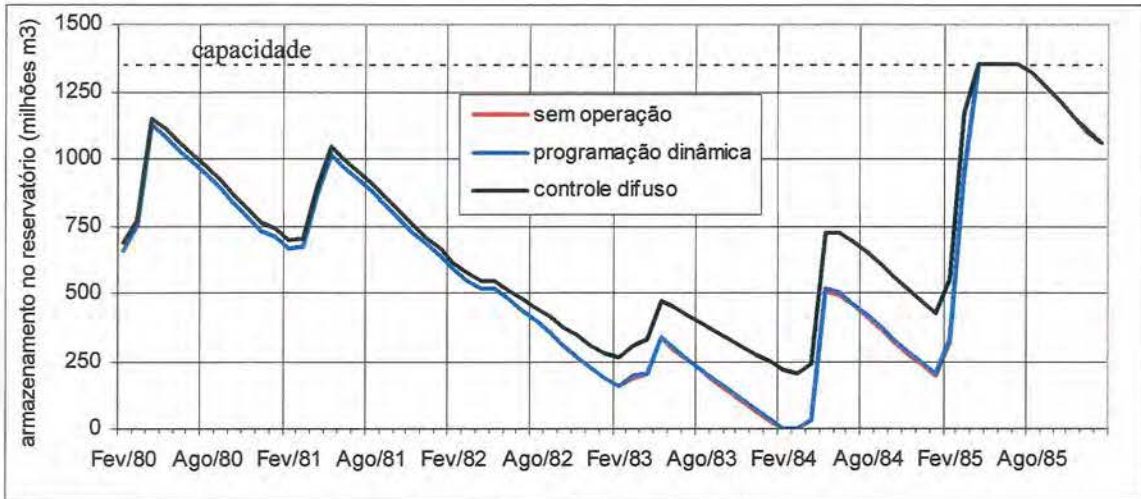
A introdução da previsão permite verificar a reação da operação ao “conhecimento” do ciclo interanual das vazões na bacia, principal objetivo desta parte do trabalho. Examinando em maior detalhe o período 1964-88, pode-se enumerar os aspectos da operação beneficiados pela melhoria da previsibilidade (nesta ordem: climatológica, regional, bacia, perfeita):

- (a) o percentual de falhas severas foi reduzido (só pôde ser observado com a PD, pois o CD não produziu falhas desta magnitude), Tabela 4.10;
- (b) o percentual de falhas moderadas cresceu, Tabela 4.10;
- (c) a escassez máxima de todos os meses do período também foi reduzida (só pôde ser observado com o CD, pois com a PD estes eventos ocorreram em colapsos), Tabela 4.9;
- (d) a escassez média diminuiu, Tabela 4.9.

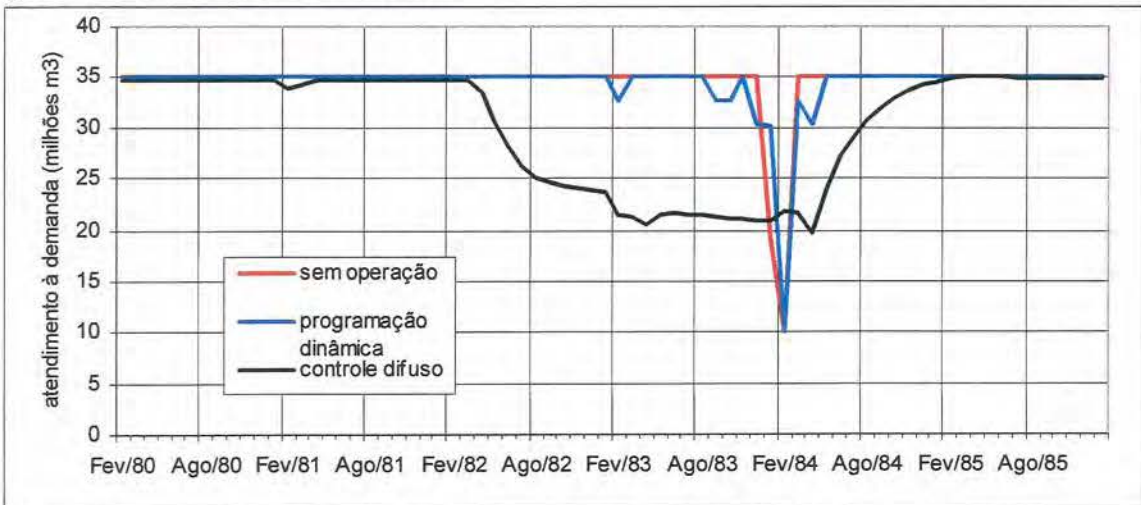
Pode-se afirmar que a PD aproveitou a previsão (excluindo o cenário de previsão perfeita) para, mantendo a escassez total na mesma magnitude do cenário sem operação, (a) reduzir a escassez média de 0,33 para 0,28 (Tabela 4.9), (b) reduzir o número de falhas severas de 29% para 19% (Tabela 4.10) e (c) aumentar o número de falhas moderadas de 72% para 75% (Tabela 4.10). Mas não conseguiu evitar os colapsos nas duas seqüências críticas do período. O CD evitou os colapsos e manteve o nível do reservatório sempre relativamente alto, mas ao custo de uma escassez total mais de três vezes superior que a obtida pela PD. Por outro lado, a escassez média foi de dois terços e a escassez máxima de pouco mais da metade das obtidas com a PD (Tabela 4.9). O CD não precisou utilizar o nível máximo de redução de demanda permitido (60%), tendo atingido apenas 50%, nos casos mais críticos. Parece mais adequado analisar a melhoria da operação sob o ponto de vista da redução da magnitude da escassez em cada mês com falha e do volume armazenado ao longo do período, do que da escassez total. O modelo de CD, por considerar explicitamente estes parâmetros, apresentou melhores resultados que o de PD, que se baseou apenas no critério de redução da escassez total. A Figura 4.18 ilustra bem essas diferenças na operação realizada pelos dois métodos, para o período 1980-85, em termos de armazenamento no reservatório e atendimento às demandas.



a) volume afluente.

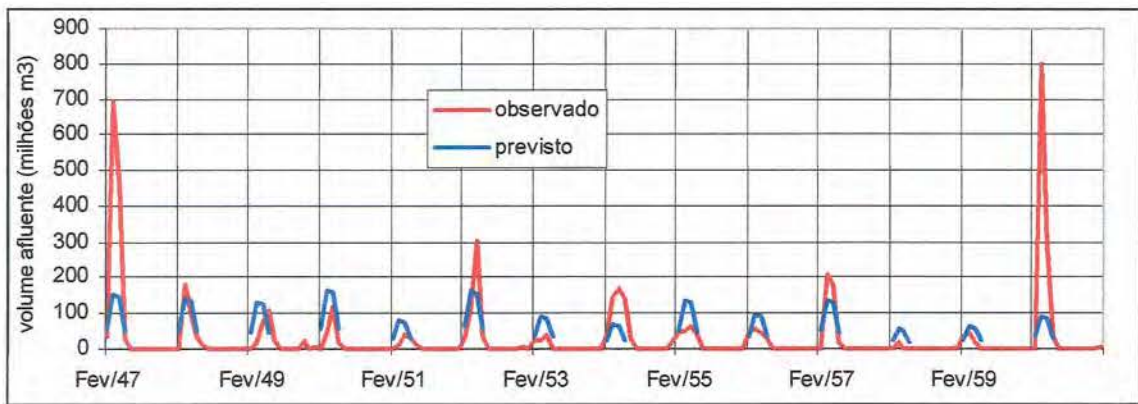


b) armazenamento no reservatório.

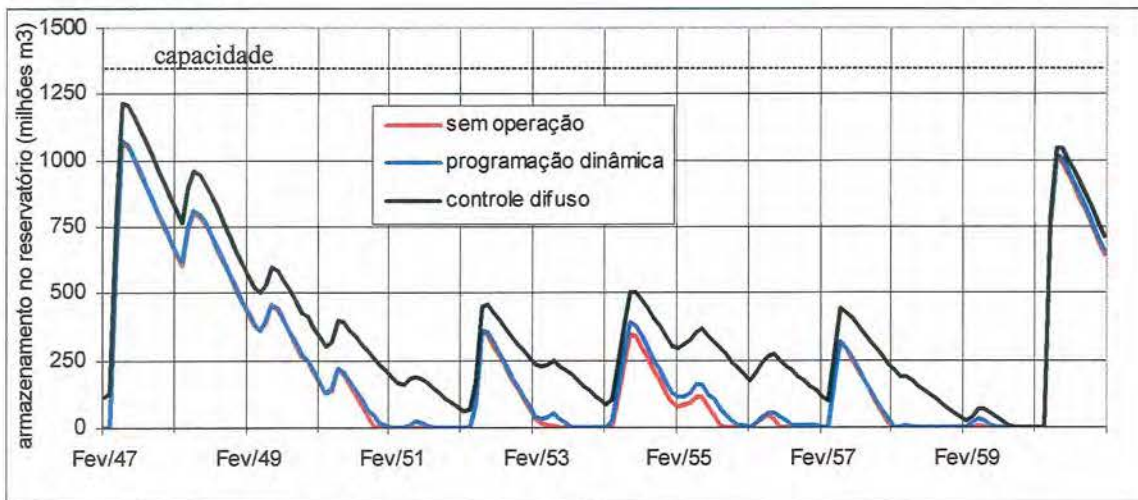


c) atendimento à demanda.

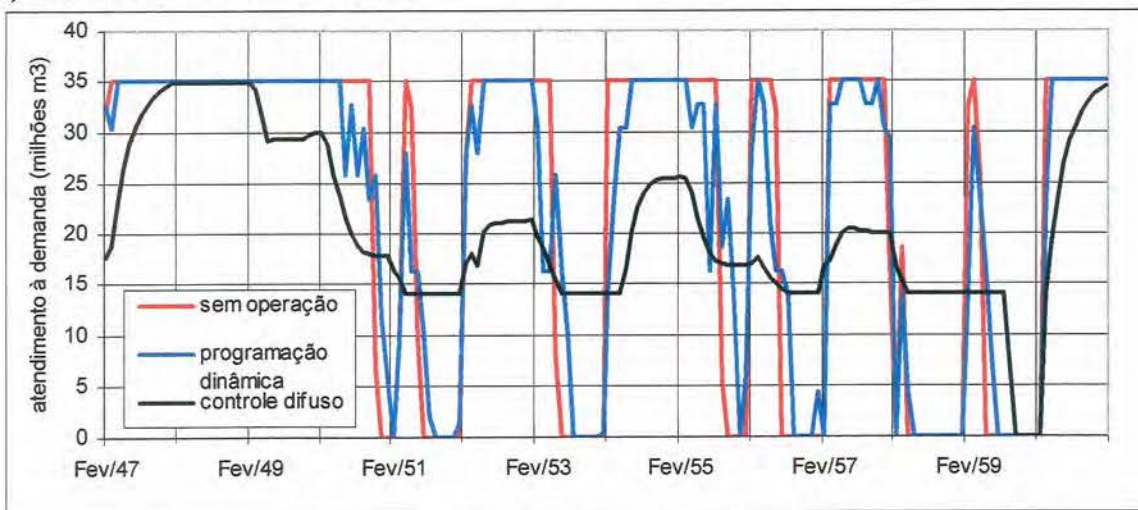
Figura 4.18. Comportamento do reservatório Coremas-Mãe D'Água durante o período 1980-85: (a) volume afluente; (b) armazenamento no reservatório; e (c) atendimento à demanda. O cenário de previsão de volume afluente é a reamostragem da previsão de precipitação *para a bacia do Piancó*. As alternativas de operação com controle difuso (CD) e programação dinâmica (PD) são comparadas ao comportamento sem operação.



a) volume afluente.



b) armazenamento no reservatório.



c) atendimento à demanda.

Figura 4.19. Comportamento do reservatório Coremas-Mãe D'Água durante o período 1947-60: (a) volume afluente; (b) armazenamento no reservatório; e (c) atendimento à demanda. O cenário de previsão de volume afluente é a reamostragem da previsão de precipitação *para a bacia do Piancó*. As alternativas de operação com controle difuso (CD) e programação dinâmica (PD) são comparadas ao comportamento sem operação.

Para o período 1911-63 o comportamento da operação não é bem definido como para 1964-88, provavelmente porque as épocas de colapso do reservatório são mais numerosas que durante 1964-88. Os colapsos representam quase completamente o somatório da escassez, o que deixou pouco espaço para avaliar a atuação dos modelos de operação. A fase mais crítica desse período foi a década de 1950, quando o comportamento do reservatório seria o apresentado na Figura 4.19, se estivesse submetido à demanda mensal aqui simulada. A adoção, pelo método de CD, da meta de manutenção do volume armazenado, sem muito comprometimento do atendimento à demanda, resultou numa operação mais bem sucedida que a realizada pela PD.

Apesar da melhoria em relação à ausência de controle, a operação não se mostrou muito sensível à previsibilidade do volume escoado sazonal. Isto é evidente da pouca diferença entre os resultados para o cenário de previsão climatológica e o cenário de previsão perfeita (Tabelas 4.9 e 4.10). O principal motivo que parece explicar este fato é que o reservatório falha apenas como resultado de seqüências de vários anos secos, cuja previsão está além do horizonte da previsão do volume escoado.

Por outro lado, como mostram as Tabelas 4.9 e 4.10, a diferença dos ganhos na operação entre os cenários da previsão climatológica e da previsão regional foi um pouco maior que a diferença entre os cenários da previsão regional e da previsão perfeita. A operação com o cenário da previsão para a bacia parece, por alguns critérios, até superar o desempenho da operação com a previsão perfeita: escassez média menor (CD) ou igual (PD) e mesma escassez máxima (CD e PD). Isto demonstra que, em se considerando o horizonte de apenas uma estação chuvosa, é recomendável implantar algum sistema de previsão, mas que pode não valer a pena investir em sua melhoria.

A sensibilidade à previsão pode ser melhor caracterizada examinando, para o período 1980-85, as previsões do volume afluente mensal e sua influência no comportamento do reservatório. A Figura 4.20 mostra que as previsões expressas em forma pontual, como já discutido na seção 4.2.2, não acompanham satisfatoriamente a variabilidade dos volumes escoados observados. Por isso, pode-se estranhar que a operação do reservatório seja também insensível à previsão perfeita, como mostram os números das Tabelas 4.9 e 4.10. Apesar de não poder ser bem visualizado quando empregando a programação dinâmica (Figura 4.22), a operação com controle difuso demonstra outro aspecto desta questão (Figura 4.21). Para a estação chuvosa de 1982, as previsões, próximas dos valores climatológicos, superestimaram o volume afluente ao reservatório

(Figura 4.20). Neste caso, quando conhecendo perfeitamente a afluência, o modelo antecipa o racionamento (Figura 4.21b) em comparação com as estratégias propostas em se considerando os outros cenários. No ano seguinte, 1983, o modelo de CD distingue com bastante clareza os quatro cenários de previsão (Figura 4.21b), (a) reduzindo o racionamento com o cenário climatológico, que superestimou a afluência (Figura 4.20), (b) mantendo a tendência de racionamento dos meses anteriores, com o cenário de previsão perfeita, e (c) aumentando o nível de severidade do controle proporcionalmente aos cenários pessimistas das previsões para a bacia e regional. Para o ano de 1984 o comportamento é semelhante, desta vez trazendo o atendimento à demanda aos níveis normais. A maior suavidade do controle definido pelo cenário de previsão para a bacia, em relação aos cenários climatológico e regional, confirma, do ponto de vista da aplicação, os melhores, apesar de discretos, índices de exatidão e desempenho apresentados pelas previsões de volume na seção 4.2.2 (Tabela 4.8). Em resumo, apesar de, em longo prazo, os resultados da operação não mostrem benefícios pelo uso do sinal da previsão, no horizonte de um ano, o controle difuso mostrou-se bastante sensível a este sinal.

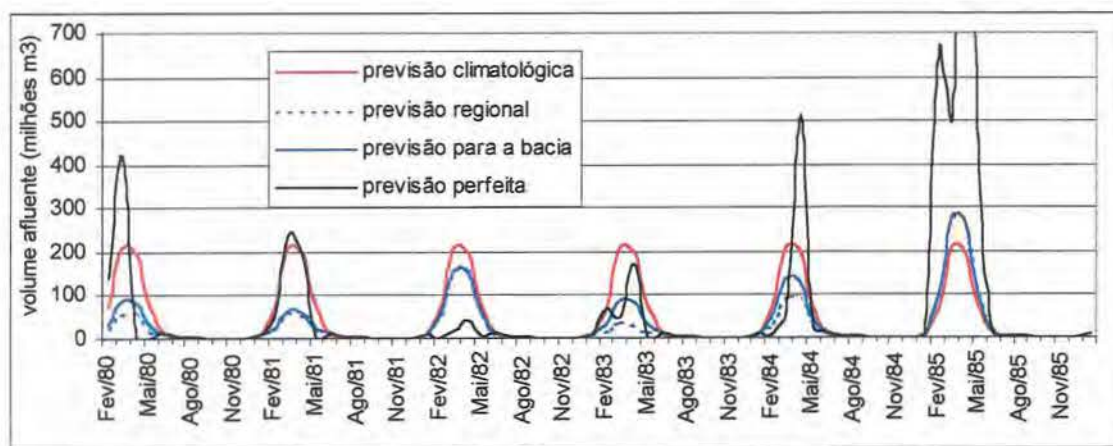
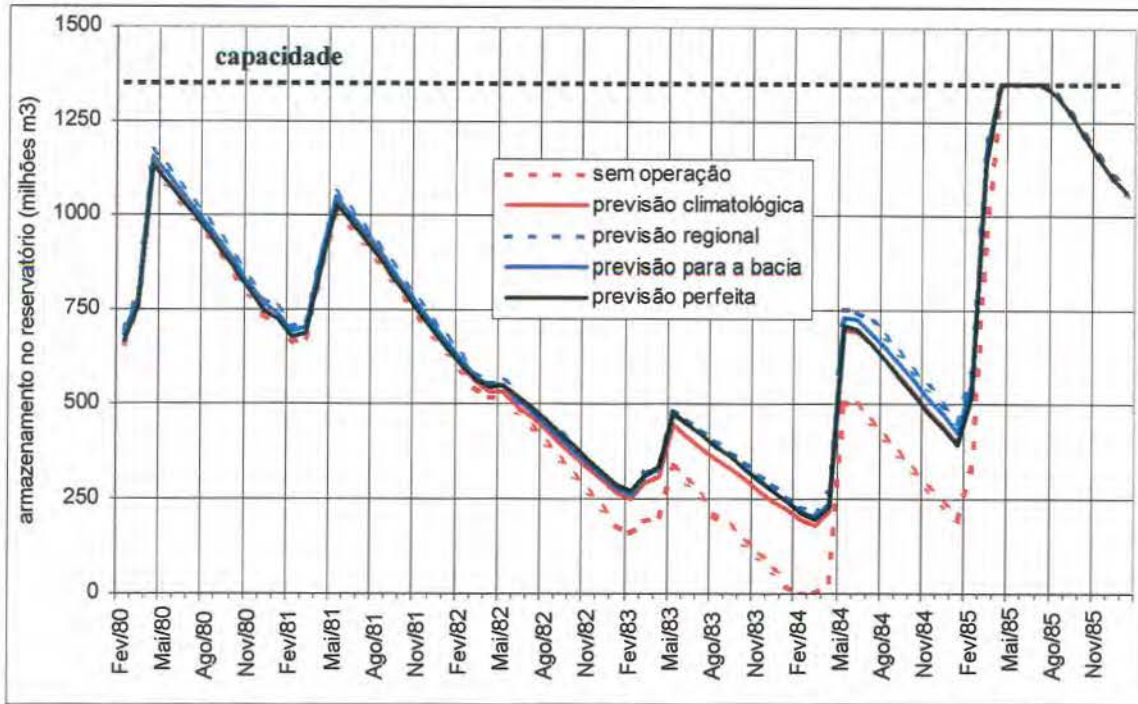


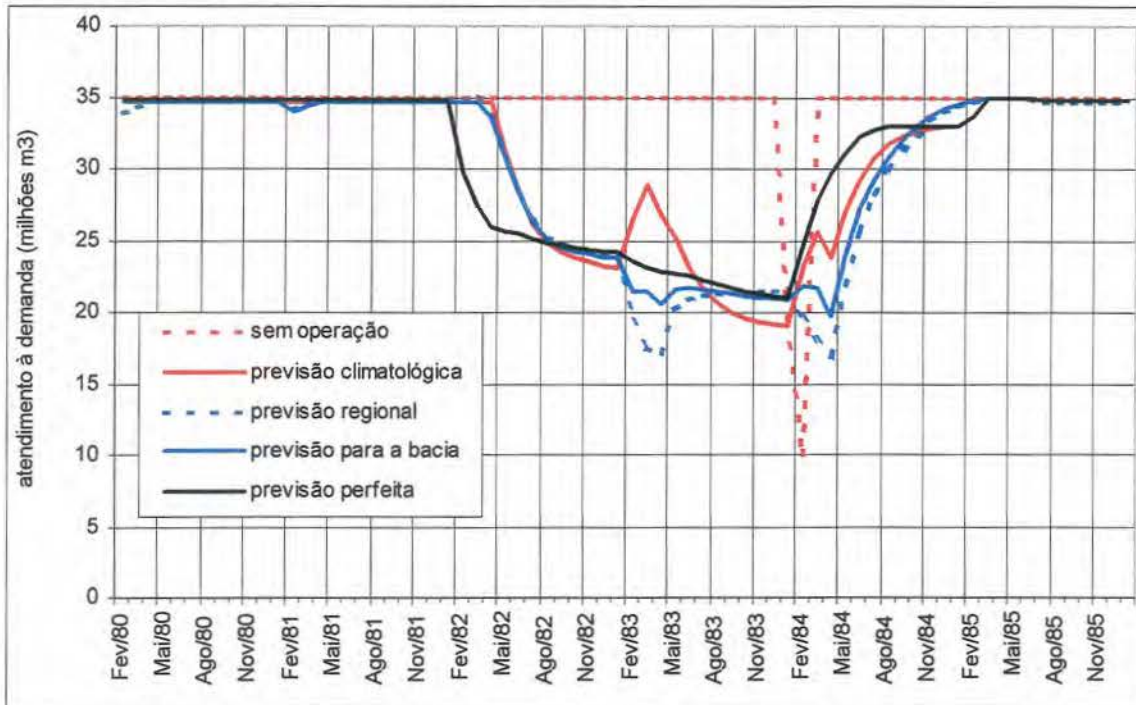
Figura 4.20. Cenários de previsão de volumes afluentes mensais ao reservatório Coremas-Mãe D'Água, para o período 1980-85. A previsão perfeita equivale ao volume afluente observado. O pico de afluência em abril de 1985 (1681 milhões m^3) foi truncado para possibilitar a visualização dos volumes mais baixos dos outros anos.

Ambos os modelos podem ser ajustados para melhorar o seu desempenho. Por exemplo, as regras do modelo de CD podem ser mudadas para diminuir sua sensibilidade a “falsos alertas” de queda no armazenamento, reduzindo então o número de restrições impostas à demanda sem aparente necessidade. Para o modelo de PD, parece que o contrário é desejado: torná-lo mais conservador, o que pode ser obtido pela inclusão, na função objetivo, de um termo que leve em conta o armazenamento mensal

desejado, penalizando operações que levem a níveis baixos. Não é objetivo deste trabalho obter a “melhor” operação do sistema, mas avaliar até que ponto modelos de operação reagiriam à introdução da previsão de volume escoado sazonal.

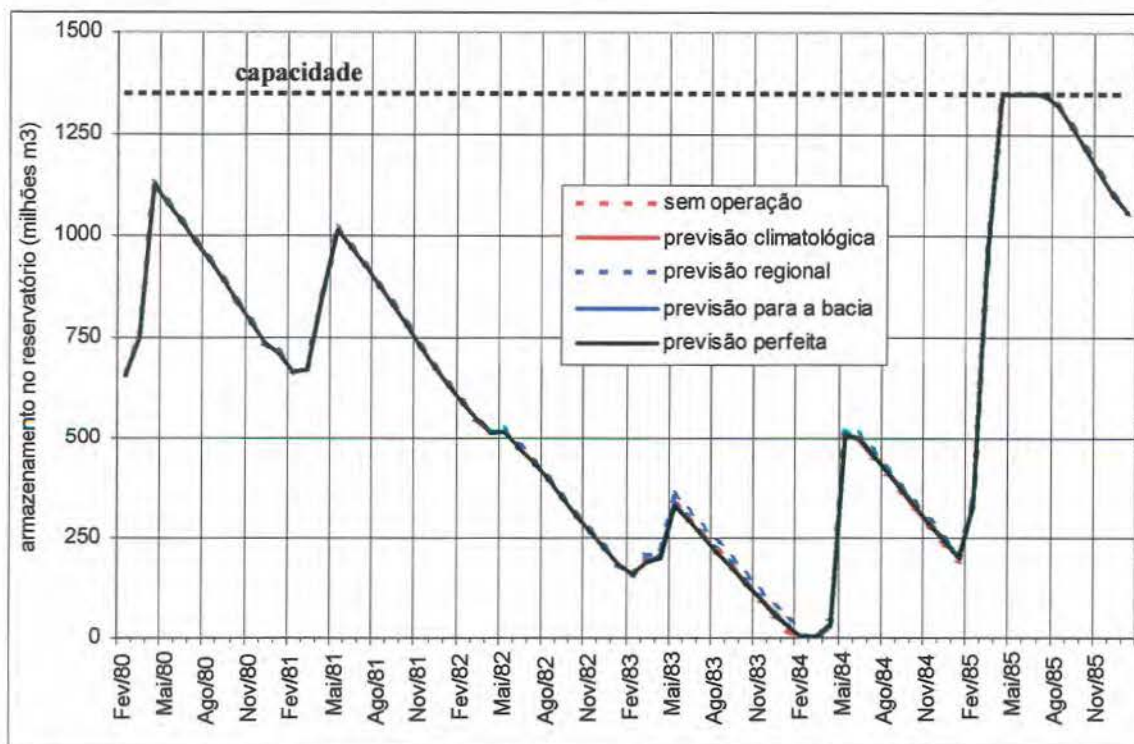


a) Controle difuso: armazenamento no reservatório.

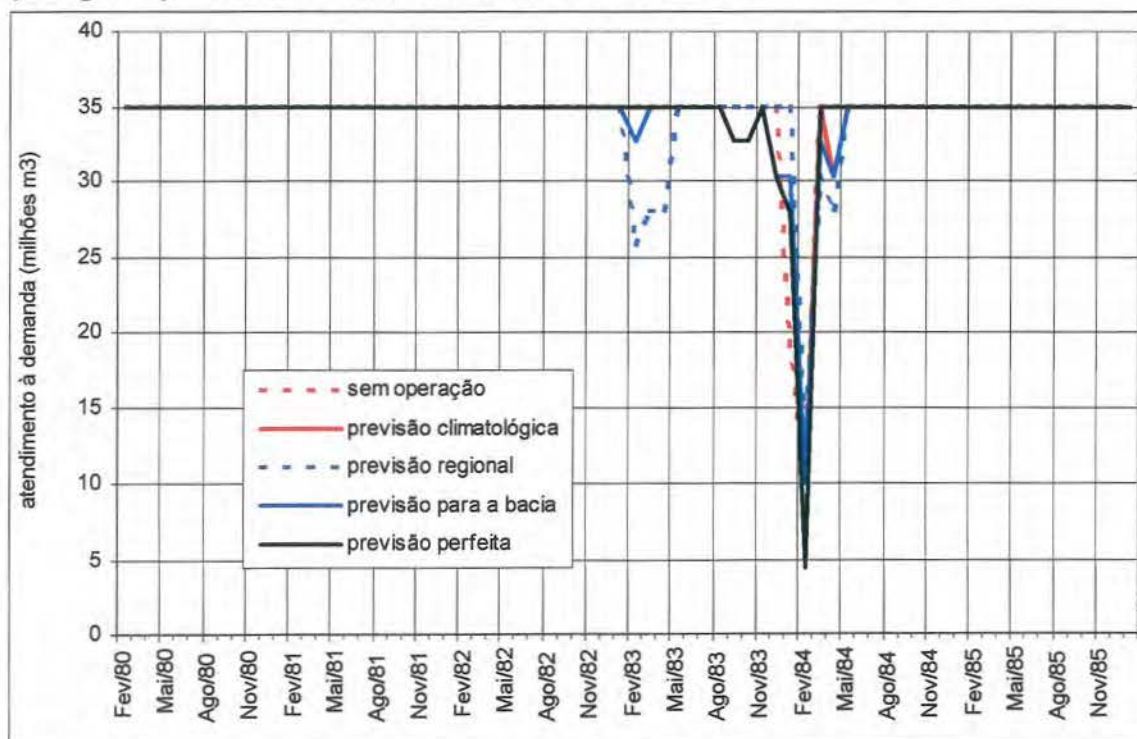


b) Controle difuso: atendimento à demanda.

Figura 4.21. Comportamento do reservatório Coremas-Mãe D'Água durante o período 1980-85, operado por controle difuso, sujeito a diferentes cenários de previsão do volume afluente: (a) armazenamento e volume afluente; e (b) atendimento à demanda.



a) Programação dinâmica: armazenamento no reservatório.



b) Programação dinâmica: atendimento à demanda.

Figura 4.22. Comportamento do reservatório Coremas-Mãe D'Água durante o período 1980-85, operado por programação dinâmica, sujeito a diferentes cenários de previsão do volume afluente: (a) armazenamento e volume afluente; e (b) atendimento à demanda.

É recomendável que se teste a falta de sensibilidade do desempenho da operação à previsibilidade do volume escoado sazonal no horizonte de uma estação chuvosa utilizando um reservatório menor e, portanto, potencialmente mais sensível à variabilidade dos volumes em horizonte mais curto que um reservatório da capacidade do Coremas-Mãe D'Água.

Parece, porém, mais importante, dada a natureza interanual da maioria dos reservatórios do Nordeste, que se investigue o papel do aumento do horizonte de previsão sobre esta sensibilidade. Isto pode ser feito, em uma primeira etapa, usando o cenário de previsões perfeitas para três ou cinco anos à frente. Numa segunda fase, podem ser testados modelos de previsão neste horizonte, como os de Brasil e Souza (1993) e Fernandes (1995), entre outros citados na seção 2.4.3. Para a operação com o modelo de PD, a função objetivo pode continuar a mesma. No de CD, porém, o valor do armazenamento ao final do horizonte deve ser substituído pelo valor mínimo do armazenamento durante o horizonte.

Caso se obtenha indicações de que o desempenho da operação pode melhorar bastante com a melhoria da previsão – isto é, caso o desempenho da operação em cenário de previsão perfeita melhore muito em relação ao cenário climatológico – deve-se pensar em modelos de operação estocásticos. Estes modelos, já caracterizados na seção 3.6.1., aproveitam o formato probabilístico da previsão de volume, e poderiam apresentar melhor desempenho. Para o caso do Coremas Mãe D'Água, no horizonte de apenas uma estação chuvosa, não seriam de maior utilidade que os aqui empregados.

Uma alternativa estocástica seria usar o modelo de PD para o modo estocástico implícito, através do mesmo procedimento de reamostragem deste trabalho. No cenário de previsão perfeita, obteve-se uma tabela de liberações para atendimento às demandas do reservatório associada a cada ano da série histórica, semelhante à Tabela 3.7, na seção 3.6.3. Em uma situação de indisponibilidade de previsões, a operação do reservatório poderia ser conduzida por uma tabela média, onde o valor de cada célula seria a média aritmética das células de mesma posição das tabelas de todos os anos. Em uma situação de disponibilidade de previsões probabilísticas, como é o caso, seria calculada para cada célula a média ponderada das liberações de cada ano, através da reamostragem (vide seção 3.3). Uma vantagem desta alternativa é que se suprime uma etapa adicional no processo previsão→decisão (a de previsão de volume), evitando agregação de mais incerteza (a não ser quando previsões de volume na escala de bacia a

partir da circulação oceano-atmosfera estivessem disponíveis, como aqui também realizado, seção 3.5.3 e 4.2.2). Esta alternativa também elimina o primeiro dos problemas citados na seção 3.6.1, o da desagregação mensal do volume sazonal previsto, apesar de não resolver o segundo problema, o dos meses não incluídos na estação objeto da previsão (também adotados como as médias históricas mensais).

4.4. Previsibilidade da necessidade de irrigação

O balanço hídrico agrícola sazonal e, conseqüentemente, a necessidade de irrigação, para cultivos no Nordeste foram aqui calculados (vide seção 3.7) como funções simples da precipitação e evapotranspiração. Para condições específicas de solos e tratos culturais, seu valor dependeu adicionalmente apenas da data de semeadura. A previsibilidade da data de semeadura mais adequada para minimização do risco climático vai depender, essencialmente, da relação entre o total precipitado sazonal, informação básica para todo este estudo, e a época de chuvas mais abundantes dentro da estação.

Como descrito na seção 3.7, a data de semeadura foi estimada, todos os anos, dentro do período de 16 de janeiro a 20 de maio. A Tabela 4.11 mostra as características da série calculada, que será referenciada como “série Planagro”, já que não pode ser considerada como “observada”, denominação adotada para a precipitação e para o volume escoado nas seções anteriores. Por facilidade computacional, as datas foram tratadas como um número de ordem, correspondendo 1 de outubro à data de número 1.

Tabela 4.11. Características das séries de datas de semeadura para o feijão na bacia do Piancó: (a) em forma de datas, e de anomalias normalizadas (I), expressas em %; (b) definição das categorias de anomalias normalizadas, estabelecidas como equiprováveis no período de 1951-80.

a)

Série	Período	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
data de semeadura	1911-88	122 (30 jan)	12	108 (16 jan)	143 (20 fev)
	1951-80	121 (29 jan)	11	108 (16 jan)	142 (19 fev)
anomalia (%)	1911-88	3	103	-117	190
	1951-80	0	100	-117	181

b)

Série	Limites das categorias de anomalias normalizadas (%)				
	1	2	3	4	5
Data de semeadura	$I < -104$	$-104 \leq I < -56$	$-56 \leq I < 19$	$19 \leq I < 98$	$I \geq 98$

A previsão foi realizada via reamostragem (vide seção 3.3), baseada na precipitação sazonal (fevereiro –maio), para os mesmos cenários da previsão de volume escoado sazonal (vide seção 4.2.2): (a) a partir da previsão de precipitação regional; (b) a partir da previsão de precipitação para a bacia do Piancó; e (c) a partir de previsões de precipitação perfeitas hipotéticas para a bacia do Piancó. Os resultados mostraram que não se pode esperar qualquer previsibilidade para a data de semeadura, quando estimada da forma aqui considerada. Outras possibilidades de estimativas da data de semeadura ideal podem ser testadas para avaliação da sua previsibilidade. Por exemplo, Chaib Filho *et al.* (1988) usam, como critério de definição da data de semeadura, a expectativa de rendimento da cultura, definido de forma semelhante à proposta por Doorenbos e Kassam (1979). A avaliação da previsão das datas de semeadura, tanto em formato probabilístico (Tabela 4.12), como em formato pontual (Tabela 4.13), indica ausência de previsibilidade. O exame das probabilidades da previsão para cada ano e das estimativas pontuais confirma este diagnóstico (Figuras 4.23 e 4.24, para previsão perfeita de precipitação).

Tabela 4.12. Avaliação das previsões categorizadas probabilísticas para a data de semeadura do feijão na bacia do Piancó. Para definição dos índices RPS e destreza, vide seção 3.8.

	Calibragem	Validação	Total
RPS da Climatologia	0,79	0,83	0,80
RPS da precipitação <i>regional</i> + reamostragem	0,80	0,90	0,83
Destreza sobre a climatologia	-1%	-8%	-3%
RPS da precipitação <i>para a bacia</i> + reamostragem	0,79	0,91	0,83
Destreza sobre a climatologia	0%	-9%	-3%
RPS da precipitação <i>perfeita</i> + reamostragem	0,74	0,84	0,77
Destreza sobre a climatologia	6%	-1%	4%

Tabela 4.13. Coeficientes de correlação para previsões pontuais para a data de semeadura do feijão na bacia do Piancó.

	Calibragem	Validação	Total
Precipitação <i>regional</i> + reamostragem	-0,10	-0,16	-0,13
Precipitação <i>para a bacia</i> + reamostragem	-0,18	-0,22	-0,20
Precipitação <i>perfeita</i> + reamostragem	0,21	0,23	0,22

A série de necessidade de irrigação possui as características apresentadas na Tabela 4.14. As previsões foram produzidas por amostragem, para os mesmos cenários utilizados para a previsão de volume escoado sazonal e datas de semeadura. Os resultados mostraram previsibilidade nos mesmos níveis da do volume escoado sazonal a partir da previsão de precipitação (vide Tabela 4.7, para previsões categorizadas probabilísticas, e 4.8, para previsões pontuais, seção 4.2.2) e da previsibilidade da

própria precipitação na escala de bacia estimada via ADL (Tabela 4.4, seção 4.1.2). As Tabelas 4.15 e 4.16 apresentam os índices de avaliação para os períodos de calibragem e de validação da previsão.

Tabela 4.14. Características das séries de necessidade de irrigação para o feijão na bacia do Piancó: (a) em forma de lâmina (mm), e de anomalias normalizadas (I), expressas em %; (b) definição das categorias de anomalias normalizadas, estabelecidas como equiprováveis no período de 1951-80.

a)

Série	Período	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
necessidade de irrigação (mm)	1911-88	87,8	62,2	49,1	221,0
	1951-80	89,7	51,3	11,9	208,1
anomalia (%)	1911-88	-4	121	-79	256
	1951-80	0	100	-151	231

b)

Série	Limites das categorias de anomalias normalizadas sazonais (%)				
	1	2	3	4	5
necessidade de irrigação	$I < -95$	$-95 \leq I < -32$	$-32 \leq I < 8$	$8 \leq I < 82$	$I \geq 82$

Tabela 4.15. Avaliação das previsões categorizadas probabilísticas para a necessidade de irrigação sazonal do feijão na bacia do Piancó. Para definição dos índices RPS e destreza, vide seção 3.8.

	Calibragem	Validação	Total
RPS da Climatologia	0,77	0,81	0,78
RPS da precipitação regional + reamostragem	0,67	0,64	0,66
Destreza sobre a climatologia	13%	20%	16%
RPS da precipitação para a bacia + reamostragem	0,67	0,62	0,65
Destreza sobre a climatologia	13%	24%	17%
RPS da precipitação perfeita + reamostragem	0,38	0,56	0,44
Destreza sobre a climatologia	50%	31%	44%

Tabela 4.16. Coeficientes de correlação para previsões pontuais para a necessidade de irrigação sazonal do feijão na bacia do Piancó.

	Calibragem	Validação	Total
Precipitação regional + reamostragem	0,50	0,56	0,51
Precipitação para a bacia + reamostragem	0,54	0,55	0,53
Precipitação perfeita + reamostragem	0,86	0,69	0,82

As probabilidades e os valores pontuais prescritos pela previsão para os cenários simulados (as Figuras 4.25 e 4.26 mostram os resultados para o cenário de previsão de precipitação para a bacia) apresentam os mesmos padrões encontrados para a previsão de volume escoado (vide seção 4.2.2). Para as previsões pontuais, os intervalos correspondentes ao 10° e 90° percentis incluem a grande maioria das observações, mas são muito largos, expressando a alta incerteza associada às previsões. Também pode-se

observar nessa figura que a série de previsões é bastante “suavizada” em relação aos valores observados, não conseguindo acompanhar os valores extremos. Isto é consequência da discretização da faixa de valores assumidos pela variável em apenas cinco categorias.

A possibilidade de melhoria da previsibilidade da variabilidade interanual é grande, como mostram as destrezas e coeficientes de correlação para a reamostragem utilizando previsões perfeitas de precipitação (Tabelas 4.15 e 4.16). Como no caso do volume escoado, o aumento da previsibilidade depende da melhoria da previsibilidade da precipitação.

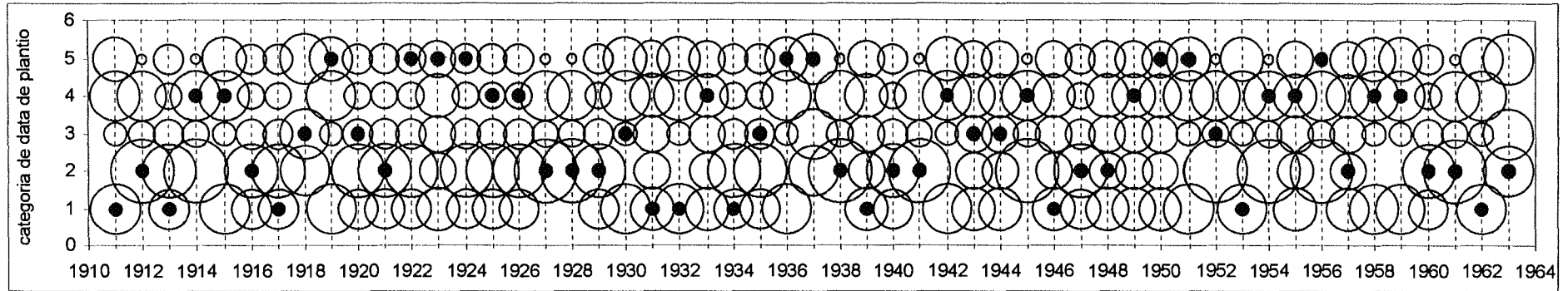
Estes resultados se referem à escala de bacia, e não à escala local, que é a escala das áreas cultivadas. Recomenda-se que sejam empreendidos estudos utilizando dados de postos pluviométricos individuais para verificar a perda de previsibilidade verificada. As possibilidades de aplicação, entretanto, são várias, principalmente no nível de planejamento agrícola nas escalas municipal, de bacia hidrográfica, de micro-região e estadual.

A metodologia testada pode ser empregada em complemento, ou alternativamente, às estimativas de safra agrícola com base em índices de circulação atmosférica (Rao *et al.*, 1997; Berlato e Fontana, 1998). Para os modelos de simulação de crescimento de culturas e de sua produção, muito sensíveis à variabilidade intra-sazonal da precipitação na escala diária, a sua utilidade vai estar condicionada às relações entre o total sazonal e a distribuição diária de precipitação.

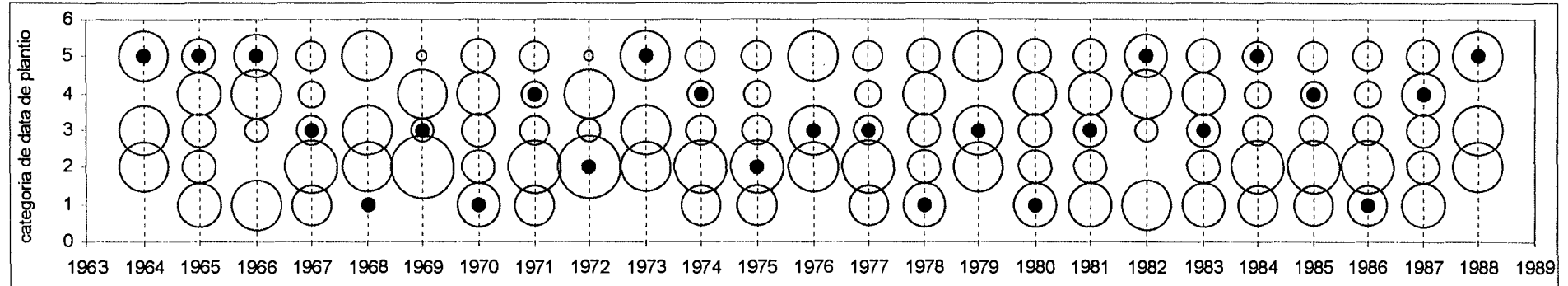
Outra aplicação que necessita de simulação diária da precipitação e apresentação de resultados no horizonte intra-sazonal é a previsão da umidade do solo. Atualmente, o INPE está conduzindo, em cooperação com os núcleos estaduais de meteorologia e recursos hídricos do Nordeste, a implantação em um sistema de informações geográficas de dados meteorológicos, pedológicos e de uso do solo, com objetivo de estimativa do estado de armazenamento de água no solo, a partir do monitoramento da precipitação em tempo real, através de estações telemétricas (Instituto, 1999). A descrição do sistema não prevê, segundo Instituto (1999), a implantação da informação da previsão de precipitação.

Como resposta ao problema, pode-se tentar o condicionamento dos modelos Markovianos tipo Stern-Coe de precipitação diária, referidos no final da seção 4.2.2, a

parâmetros de circulação atmosférica, ou às probabilidades da previsão de precipitação sazonal, ou às previsões intra-sazonais de precipitação produzidas por MCGs. Clarke (1998) mostra como estes modelos podem ser usados para estimar o número dias secos ou chuvosos em um período, ou para estimar a distribuição de probabilidade do armazenamento de água no solo. Daí decorre que os modelos Stern-Coe podem ser uma alternativa viável à estimativa da data de semeadura.



a) período de calibragem



b) período de validação

Figura 4.23. Previsão categorizada probabilística de data de semeadura para o feijão na bacia do Piancó, obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *perfeitas* via ADL: (a) período de calibragem; (b) período de validação. As categorias estão definidas na Tabela 4.11. Os círculos abertos representam as probabilidades previstas para cada categoria e seus tamanhos são proporcionais à magnitude das probabilidades (o círculo maior representa a probabilidade 1); o círculo preto assinala a categoria da data de semeadura calculada pelo Planagro.

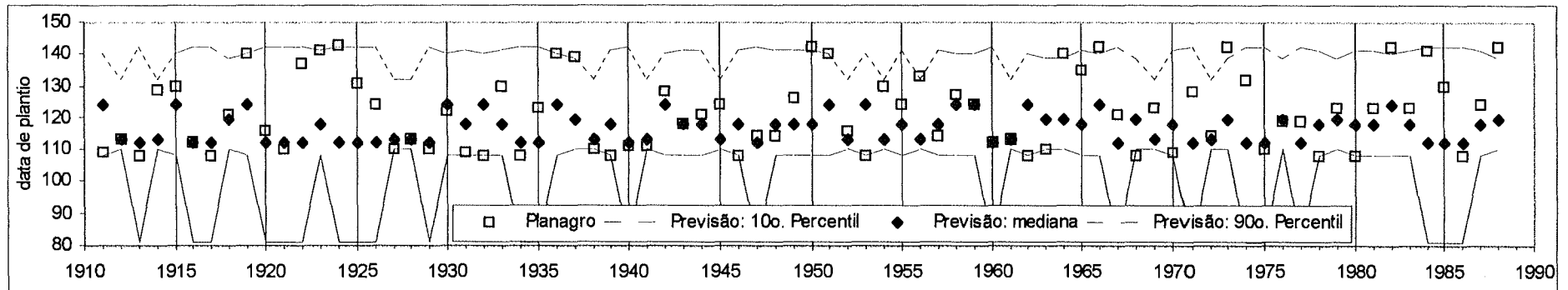


Figura 4.24. Previsões pontuais de data de semeadura para o feijão na bacia do Piancó, obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *perfeitas* via ADL. A data 110 corresponde a 18 de janeiro, 120 a 28 de janeiro, 130 a 7 de fevereiro e 140 a 17 de fevereiro.

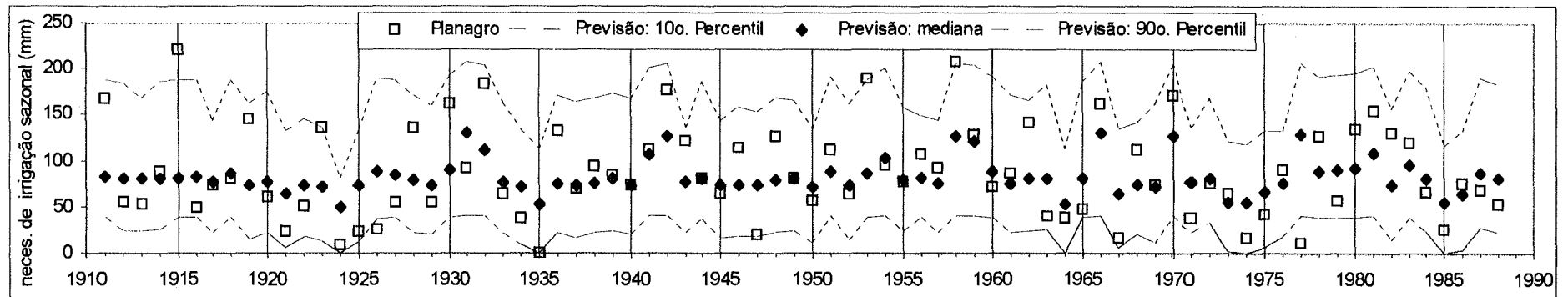
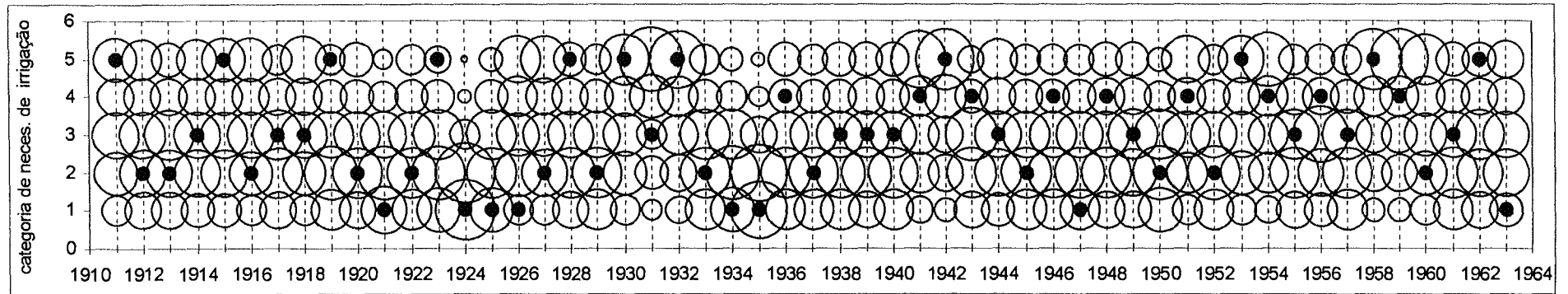
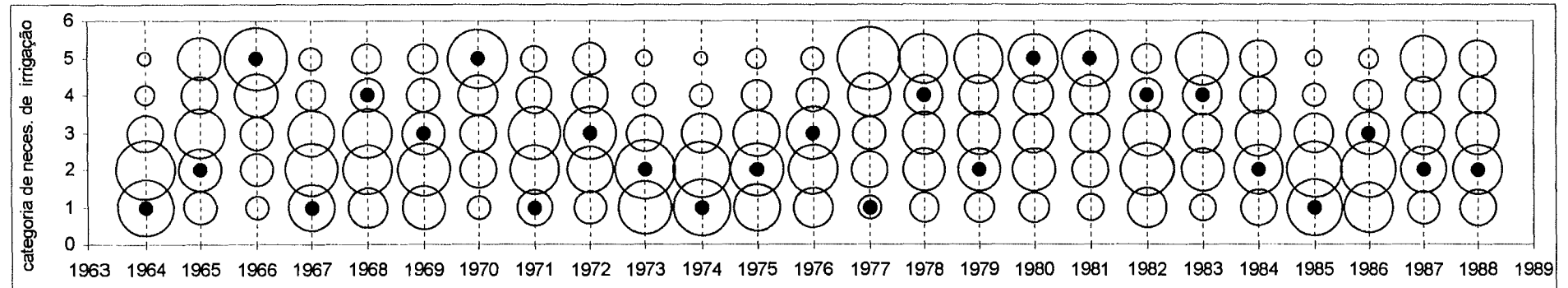


Figura 4.25. Previsões pontuais de necessidade de irrigação sazonal para o feijão na bacia do Piancó, obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *para a bacia* via ADL.



a) período de calibragem



b) período de validação

Figura 4.26. Previsão categorizada probabilística de necessidade de irrigação para o feijão na bacia do Piancó, obtidas através de reamostragem, utilizando como entrada previsões de precipitação *para a bacia* via ADL: (a) período de calibragem; (b) período de validação. As categorias estão definidas na Tabela 4.14. Os círculos abertos representam as probabilidades previstas para cada categoria e seus tamanhos são proporcionais à magnitude das probabilidades (o círculo maior representa a probabilidade 1); o círculo preto assinala a categoria da necessidade de irrigação calculada pelo Planagro.

5. Conclusões e recomendações

5.1. Síntese das conclusões

Este trabalho procura contribuir para um melhor aproveitamento, em recursos hídricos, da previsão de precipitação sazonal, especificamente no norte do Nordeste do Brasil. Propõe um arcabouço metodológico para (a) previsão de volume escoado sazonal em bacias hidrográficas, a partir de informações sobre a previsão de precipitação, e dos fatores que a determinam, em escala regional, (b) sua utilização em aplicações de recursos hídricos, e (c) avaliação do valor das previsões.

Os métodos que formam este arcabouço são gerais, típicos de suas classes. As previsões de precipitação foram obtidas de modelos representativos das duas principais classes atualmente utilizadas em regiões tropicais (dinâmicos e estatístico/empíricos), e têm exatidão similar àquelas dos outros modelos do mesmo tipo. A bacia escolhida para aplicação é representativa da sub-região norte do Nordeste, em suas características físicas, de uso da água, e de disponibilidade de registros históricos de precipitação, vazão e evaporação. Para produção das previsões de necessidade de irrigação e de volume escoado, foi empregado um método de reamostragem estatística conceitualmente simples, que utiliza a previsão probabilística de precipitação e produz previsões também probabilísticas. A operação do reservatório e o cálculo do balanço hídrico agrícola foram realizados através de métodos consagrados. Adicionalmente foi proposto um modelo alternativo para a operação do reservatório. Finalmente, foram empregadas medidas também consagradas de avaliação das previsões e da operação do reservatório. O objetivo dessas escolhas foi realizar uma avaliação – clara e realista – da viabilidade de aplicação das previsões sazonais em recursos hídricos.

Comprovou-se que os métodos são viáveis, adequados às condições estudadas e, provavelmente, a outras regiões tropicais com características climáticas semelhantes. Viáveis também são as previsões e suas aplicações em recursos hídricos. O aprimoramento dos métodos utilizados, ou substituição por outros mais eficientes, e a

caracterização detalhada das séries de dados das bacias, caso a caso, deve levar a um aumento da exatidão dos resultados.

Demais aplicações das previsões através deste arcabouço, além das exemplificadas neste trabalho, podem ser, entre outras: estimativa de recarga e manejo de aquíferos, dimensionamento e manejo de pequenos sistemas de captação de água de chuva, novas metodologias para dimensionamento de grandes reservatórios, adaptação de sistemas de outorga e cobrança pelo uso da água à variabilidade climática.

Conclusões sobre os objetivos específicos do trabalho, propostos no capítulo 1, são expostas a seguir.

5.2. Da possibilidade da previsão de volume escoado

- *É possível prever o volume escoado sazonal usando o conhecimento dos fatores atmosféricos que o controlam, ou usando as previsões de precipitação obtidas com os métodos utilizados correntemente?*

É possível, das duas maneiras.

Os resultados obtidos corroboram a hipótese de que as previsões são viáveis, superando as *de referência* (médias climatológicas) em cerca de 17%, quando avaliadas em formato probabilístico. Entretanto, ainda apresentam incerteza alta, como mostram as correlações (da ordem de 0,6) das estimativas pontuais com os valores observados. Os limites superiores encontrados, utilizando previsões categorizadas probabilísticas de precipitação hipoteticamente perfeitas, foram aproximadamente 60% para a destreza e 0,8 para a correlação com valores pontuais observados.

Testou-se a hipótese de que seria menos vantajoso utilizar a previsão da precipitação para estimar o volume escoado, do que utilizar os preditores atmosféricos e oceânicos da precipitação diretamente como preditores do volume. Haveria, supostamente, perda de previsibilidade em um sistema de previsão de múltiplos estágios (temperatura da superfície do mar → previsão de precipitação sazonal → previsão de volume escoado sazonal), em relação a um sistema com menor número de estágios (temperatura da superfície do mar → previsão de volume escoado sazonal). A previsão de volume, quando realizada diretamente dos preditores atmosféricos mostrou-se mais eficiente do que quando realizada a partir da previsão da precipitação, mas ambos os níveis de

destreza podem ser considerados da mesma ordem de magnitude (17% e 15% superiores às de referência, respectivamente).

A perda de previsibilidade verificada pela transformação da previsão de precipitação em previsão de volume escoado via reamostragem foi pequena, medida pela comparação entre a destreza da previsão de precipitação na escala de bacia (17%) e a obtida para a previsão de volume (15%).

5.3. Da escala das previsões

- *É possível obter as previsões de precipitação e volume escoado na escala de uma bacia hidrográfica, ou somente em escala regional?*

É também possível obtê-las na escala de bacia hidrográfica, ainda que à custa de redução de destreza em relação à previsão na escala regional.

Em relação à previsão de precipitação, da escala regional (500000 km²) para a escala de bacia hidrográfica (5000 km²), a perda de destreza ficou em cerca de 40% (de 29% na região para 17% na bacia, em relação às previsões climatológicas de referência), para as previsões produzidas com o modelo estatístico. Da escala da célula do MCG (75000 km²) para a escala da bacia, as previsões apresentaram a mesma previsibilidade quando avaliadas pelo coeficiente de correlação com a precipitação pontual observada (0,9 em média). O período de avaliação (apenas 10 anos) revelou-se pouco extenso para permitir uma avaliação estável das previsões probabilísticas: a inclusão/exclusão de um único ano (1979) na avaliação fez mudar a destreza de 17% para 24%, para a célula, e de -1% para 32%, para a bacia.

Para o volume escoado, como mostrado na seção anterior, as previsões na escala de bacia apresentaram destreza acima das de referência, o que tornou desnecessário a verificação da previsibilidade de um índice regional de escoamento, potencialmente de pouca utilidade para aplicações. A destreza para a previsão de volume apresentou coerência com a da previsão de precipitação na mesma escala, ambas de 17%.

5.4. Da metodologia

- *Que métodos são adequados a estas tarefas, considerando que os registros hidrometeorológicos na região são poucos e curtos? Como se pode obter medidas da confiança das previsões?*

As previsões de precipitação sazonal utilizadas no trabalho são expressas probabilisticamente em categorias. Esta informação pôde ser adequadamente transferida à previsão de volume, de balanço hídrico agrícola e à operação de reservatórios através de *reamostragem estatística*. A reamostragem permite, operacionalmente, a incorporação, na previsão de volume e da necessidade de irrigação, dos resultados de novas técnicas para previsão de precipitação sazonal, ou melhoramentos nas atuais, desde que preservado o formato probabilístico. Sua principal vantagem é a produção de previsões também probabilísticas de volume escoado ou necessidade de irrigação, que é uma medida explícita da confiança esperada nos valores estimados.

Sua adequabilidade foi comprovada quando, na previsão do volume escoado, mostrou desempenho similar à produzida diretamente da temperatura dos oceanos, como citado acima. Entretanto, as previsões pontuais derivadas das probabilísticas mostraram perda da variabilidade original dos registros históricos (correlação igual a 0,6), sendo a principal desvantagem do procedimento.

A reamostragem requer registros hidrometeorológicos relativamente longos. A extensão, via modelo precipitação-vazão, dos curtos registros de vazão a partir da série, suficientemente longa, de precipitação, mostrou-se uma solução adequada.

5.5. Da aplicabilidade a recursos hídricos

- *Quais os ganhos propiciados pelo uso da informação da previsão de precipitação e de volume escoado nas aplicações a operação de reservatórios e a agricultura dependente de chuva?*

As simulações do uso da previsão do volume escoado sazonal à operação de um reservatório e da previsão da precipitação sazonal à estimativa da necessidade de irrigação do feijão mostraram que os ganhos derivados são relevantes.

Na avaliação da aplicabilidade para operação de reservatórios, utilizou-se um método convencional baseado em programação dinâmica e um método de operação que usa controle difuso, desenvolvido nesta tese. Apesar de não diretamente comparáveis, o controle difuso mostrou-se mais sensível à informação da previsão do volume escoado, antecipando-se à programação dinâmica na imposição de medidas racionadoras do uso da água quando da expectativa de um ano seco. Pelo emprego da previsão, a proporção de falhas severas (maiores que 60% da demanda desejada) foi reduzida de 29% para

19% quando usando a programação dinâmica. O controle difuso proporcionou uma operação sem falhas severas e aumentou a proporção de falhas moderadas (menores que 40% da demanda desejada) de 80% para 88%. O desempenho da operação para o cenário de previsão perfeita, porém, não mostrou melhoria significativa em relação aos outros cenários de previsão. O principal motivo que parece explicar este fato, mas que ainda requer comprovação, é que o reservatório falha apenas como resultado de seqüências de vários anos secos, cuja previsão está além do horizonte atual da previsão do volume escoado.

Na segunda aplicação, utilizaram-se as previsões de precipitação sazonal para previsão da data de semeadura e da necessidade de irrigação suplementar durante o ciclo de cultivo do feijão. As previsões de data de semeadura, produzidas através de reamostragem, apresentaram baixo desempenho, enquanto que a previsibilidade da necessidade de irrigação mostrou destreza (17%) equivalente à do volume escoado produzido por reamostragem (15%). A baixa previsibilidade da data de semeadura merece mais investigação, e pode estar ligada ao método de estimativa dos valores utilizados como referência.

5.6. Recomendações

Ao longo dos capítulos anteriores, várias possibilidades de aprofundamento ou de alternativas ao trabalho realizado foram comentadas. Entre elas, algumas podem ser recomendadas com maior ênfase:

- A quantificação das incertezas em cada estágio do processo de previsão, o que permitiria indicar quais deles adicionam mais incerteza à previsão como um todo, e sobre os quais se deve prioritariamente investir em aprimoramento.
- A busca por padrões de comportamento da precipitação e da vazão na escala pontual ou de bacia, que modulem a previsão realizada a partir dos parâmetros de larga escala. O papel dos hidrólogos junto aos meteorologistas é importante neste contexto. Enquanto estes têm a resolver diversas questões ainda pendentes na explicação das relações entre mecanismos de larga escala e as variações climáticas regionais, os hidrólogos podem contribuir agregando aos métodos de previsão as características dos sistemas e processos físicos em menor escala e indicando prioridades de pesquisa climática na ótica das aplicações.

- A utilização de uma estrutura de sistemas de informação geográfica, incluindo a topografia, considerando várias escalas espaciais, da regional à local, para estudo integrado da previsibilidade da precipitação e da vazão, sua regionalização e utilização operacional. Essa estrutura pode ser baseada nos sistemas de monitoramento hidrometeorológico já implementados ou em desenvolvimento pelos núcleos estaduais de meteorologia e recursos hídricos do Nordeste e pelo INPE.
- O desenvolvimento de um sistema de produção e combinação de previsões que aproveite o conhecimento e julgamento subjetivo dos meteorologistas e hidrólogos, reproduzindo computacionalmente a análise realizada rotineiramente na preparação das previsões mensais pelos núcleos estaduais do Nordeste.
- A investigação sobre as relações entre a produção da previsão e os diversos usuários aos quais se destina. Devem ser especialmente considerados: (a) o formato, os meios e o momento de apresentação e de disseminação; (b) os aspectos institucionais envolvidos; e (c) os usuários de baixa renda, especialmente difusos no meio rural.

Referências

- ACEITUNO, P., GARREAUD, R. 1994. Impacto de los fenomenos El Niño y La Niña en regimenes fluviometricos andinos. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 16., 1994, Santiago. *Anais ...* Santiago: Sociedad Chilena de Ingenieria Hidráulica. v.5, p.15-25.
- ADIKU, S.G.K., STONE, R.C. 1995. Using the Southern Oscillation Index for improving rainfall prediction and agricultural water management in Ghana. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.29, p.85-100.
- ALVES, J.M.B., REPELLI, C.A. 1992. A variabilidade pluviométrica no setor norte do Nordeste e os eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS). *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v.7, n.2, p.583-592.
- ALVES, O., ANDERSON, D., BALMASEDA, M., BECKER, B., BRANKOVIC, C., FERRANTI, L., PALMER, T., STOCKDALE, T. 1997. Seasonal climate prediction at the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). In: THE PHYSICS OF CLIMATE CONFERENCE, 1997, London. *The Physics of Climate: abstracts of oral and poster sessions*. London: RMS:IOP. Não paginado.
- ANDERSON, J.L. 1996. A method for producing and evaluating probabilistic forecasts from ensemble model integrations. *Journal of Climate*, Boston, v.9, p.1518-1530.
- ANGUS, J.F. 1991. The evolution of methods for quantifying risk in water limited environments. In: MUCHOW, R.C., BELLAMY, J.A. *Climatic risk in crop production: models and management for the semiarid tropics and subtropics*. Wallingford: CAB International. p.39-53.
- ARAÚJO, V.P.A., GALVÃO, C.O., PEDROSA, L.N., NAVARRO, E.F. 1998. Um sistema de informações para zoneamento agroclimático. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS, 1998, Gramado. *Anais ...* Disponível on-line em http://www.ufrgs.br/iph/simposio/4_1.htm. 30 Out 1998.
- ARMIJOS, A., WRIGHT, J.R., HOUCK, M.H. 1990. Bayesian inferencing applied to real-time reservoir operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.116, n.6, p.38-51.
- ARMSTRONG, J.S. 1989. Combining forecasts: the end of the beginning or the beginning of the end? *International Journal of Forecasting*, Amsterdam, v.5, p.585-588.
- BACK, A.J. 1997. *Determinação da precipitação efetiva para irrigação suplementar pelo balanço hídrico horário: um caso-estudo em Urussanga, SC*. Porto Alegre. Tese (Doutor em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- BARDOSSY, A., BRONSTERT, A., MERZ, B. 1995. 1-, 2- and 3-dimensional modeling of water movement in the unsaturated soil matrix using a fuzzy approach. *Advances in Water Resources*, Oxford, v.18, n.4, p.237-251.

- BARDOSSY, A., DISSE, M. 1993. Fuzzy rule-based models for infiltration. *Water Resources Research*, Washington, v.29, n.2, p.373-382.
- BARDOSSY, A., PLATE, E. 1991. Modeling daily rainfall using a semi-markov representation of circulation pattern occurrence. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.122, p.33-47.
- BARNETT, T.P. 1995. Monte Carlo climate forecasting. *Journal of Climate*, Boston, v.8, p.1005-1022.
- BARROS, M.T.L. 1997. A programação dinâmica aplicada à engenharia de recursos hídricos. In: PORTO, R.L.L. (Org.) *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS:ABRH. p.239-303.
- BECKER, B.D. 1997. *The ECMWF ensemble simulation CD-ROMs*. Reading: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Em CD-ROM.
- BENDER, M., SIMONOVIC, S. 1994. Time-series modeling for long-range stream-flow forecasting. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.120, n.6, p.857-870.
- BENJAMIN, J.R., CORNELL, C.A. 1970. *Probability, statistics and decision for civil engineers*. New York: McGraw-Hill.
- BERLATO, M.A., FONTANA, D.C. 1998. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria. [Submetido].
- BEVEN, K.J., BINLEY, A. 1992. Future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. In: BEVEN, K.J., MOORE, I.D. (Ed.) *Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology*. Chichester: Wiley. p.227-246.
- BEZDEK, J. 1993. Editorial: fuzzy models - what are they and why? *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, New York, v.1, n.1, p.1-6.
- BEZDEK, J. 1994. Editorial: fuzziness vs. probability - again (!?). *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, New York, v.2, n.1, p.1-3.
- BONATTI, J.P. 1996. Verificação estatística do modelo global do CPTEC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9., 1996, Campos do Jordão. *Anais ...* Rio de Janeiro: SBMET. v.2, p.1453-1456.
- BRAAE, M., RUTHERFORD, D.A. 1979a. Selection of parameters for a fuzzy logic controller. *Fuzzy Sets and Systems*, Amsterdam, v.2, p.185-199.
- BRAAE, M., RUTHERFORD, D.A. 1979b. Theoretical and linguistic aspects of the fuzzy logic controller. *Automatica*, Elmsford, v.5, p.553-577.
- BRAGA, B.P.F. 1987. Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In: MODELOS para gerenciamento de recursos hídricos. São Paulo: Nobel:ABRH. cap.5, p.427-518.
- BRANKOVIC, C., PALMER, T.N. 1997. Atmospheric seasonal predictability and estimates of ensemble size. *Monthly Weather Review*, Boston, v.125, p.859-874.
- BRANKOVIC, C., PALMER, T.N. 1998. *Seasonal skill and predictability of ECMWF PROVOST ensembles*. Reading: ECMWF. (ECMWF Technical Memorandum No. 263). [Submetido ao Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society].
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. 1981a. *Projeto RADAMBRASIL*; folhas SB 24/25 Jaguaribe/Natal: geologia, geomorfologia,

- pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro. 744p. (Série Levantamento de Recursos Naturais. v. 23).
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. 1981b. *Projeto RADAMBRASIL*; folhas SC 24/25 Aracaju/Recife: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro. 856p. (Série Levantamento de Recursos Naturais. v. 30).
- BRASIL, G.H., SOUZA, R.C. 1993. A Bayesian approach to modelling stochastic cycles. *Journal of Forecasting*, Chichester, v.12, p.525-538.
- BRIGGS, W.M., WILKS, D.S. 1996. Extension of the Climate Prediction Center long-lead temperature and precipitation outlooks to general weather statistics. *Journal of Climate*, Boston, v.9, p.3496-3504.
- BRITO, J.I.B. 1999. *Reunião de previsão da estação chuvosa de 1999 para o Nordeste do Brasil*. Campina Grande: Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal da Paraíba, 05 fevereiro. [Comunicação pessoal].
- BRITO, J.I.B., NOBRE, C.A., ZARANZA, A.R. 1991. A precipitação da pré-estação chuvosa e a previsibilidade da estação chuvosa do norte do Nordeste. *Climanálise*, São José dos Campos, v.6, n.6, p.39-55.
- BRITO, J.I.B., SILVA JR., A.M., NOBRE, C.A. 1994. Modelo estatístico para previsão da precipitação de inverno no leste do Nordeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8., 1994, Belo Horizonte. *Anais ...* Belo Horizonte: SBMET. v.1, p.502-504.
- BROWN, E., PIECHOTA, T., VARGAS, X., DRACUP, J. 1994. Analisis de series de caudales en Chile durante las fases extremas de ENOS. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 16., 1994, Santiago. *Anais ...* Santiago: Sociedad Chilena de Ingenieria Hidráulica. v.5, p.73-83.
- BUCHANAN-SMITH, M., DAVIES, S., PETTY, C. 1994. Food security: let them eat information. *IDS Bulletin*, Brighton, v.25, n.2, p.69-80.
- BURAS, N. 1972. *Scientific allocation of water resources*. New York: Elsevier.
- BURAS, N., BURGESS, S., CHANG, T., DAVIS, C.P., DEASON, J., DRACUP, J., DUCKSTEIN, L., EASTERLING, W., FARNSWORTH, R. et al. 1991. Technical Reports. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Berlin, v.5, p.280-294.
- CADIER, E. 1994. *Hidrologia das pequenas bacias do Nordeste semi-árido: transposição hidrológica*. Recife: SUDENE.
- CADIER, E., ROSSEL, F., GOMEZ, G. 1995. Se puede prever las anomalias climaticas en la costa ecuatoriana? In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., 1995, Recife. *Anais ...* Recife: ABRH. v.1, p.57-61.
- CARTON, J.A. 1997. See-saw sea. *Nature*, London, v.385, p.487-489.
- CARTON, J.A., CAO, X., BIESE, B.S., SILVA, A.M. 1996. Decadal and interannual SST variability in the tropical Atlantic Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, Boston, v.26, p.1165-1175.
- CASEY, T. 1995. Optimal linear combination of seasonal forecasts. *Australian Meteorological Magazine*, Melbourne, v.44, p.219-224.
- CAVALCANTI, I.F.A., BRANCOVIK, C., PALMER, T. 1997. *Seasonal precipitation over Brazil using ECMWF PROVOST results, ECMWF reanalyses data and*

- observed data*. Reading: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. [Não publicado].
- CAVALCANTI, I.F.A., PEZZI, L.P., NOBRE, P., SAMPAIO, G., CAMARGO JR., H. 1998. Climate Prediction of Precipitation in Brazil for the Nordeste Rainy Season (MAM) 1998. *Experimental Long-lead Forecast Bulletin*, v.7, n.1. Disponível on-line em <http://grads.iges.org/ellfb/Mar98/sam.html>. 03 Dez 1998.
- CAVIEDES, C.N. 1973. Secas and El Niño: two simultaneous climatic hazards in South America. *Proceedings of Association of American Geographers*, v.5, p.44-49.
- CAYAN, D.R., RIDDLE, L.G., AGUADO, E. 1993. The influence of precipitation and temperature on seasonal streamflow in California. *Water Resources Research*, Washington, v.29, n.4, p.1127-1140.
- CAZES, G., GENTA, J.L., PISCIOTTANO, G. 1994. Generación de información hidrológicamente relevante a partir de información y diagnóstico climático; Aplicación en Uruguay. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 16., 1994, Santiago. *Anais ...* Santiago: Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. v.5, p.121-132.
- CHAIB FILHO, H., AMORIM NETO, M.S., GARAGORRY, F.L., PORTO, E.R. 1988. The effects on crop yields: a simulation approach. In: PARRY, M.L., CARTER, T.R., KONIJN, N.T. (Ed.) *The Impact of Climate Variations on Agriculture*. Dordrecht: Kluwer:IIASA:UNEP. v.2, p.325-342.
- CHANG, P., LINK, J., HONG, L. 1997. A decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air-sea interactions. *Nature*, London, v.385, p.516-518.
- CHATFIELD C., COLLINS, A.J. 1980. *Introduction to multivariate analysis*. London: Chapman and Hall.
- CHU, P.S. 1991. Brazil's climate anomalies and ENSO. In: GLANTZ, M.H., KATZ, R.W., NICHOLLS, N. (Ed.) *Teleconnections linking worldwide climate anomalies; scientific basis and societal impacts*. Cambridge: Cambridge University Press. p.43-71.
- CIVANLAR, M.R., TRUSSELL, H.J. 1986. Constructing membership functions using statistical data. *Fuzzy Sets and Systems*, Amsterdam, v.18, p.1-13.
- CLARKE, R.T. 1973. *Mathematical models in hydrology*. Roma: FAO.
- CLARKE, R.T. 1994. *Statistical modelling in hydrology*. Chichester: Wiley.
- CLARKE, R.T. 1998. *Stochastic processes for water scientists: developments and applications*. Chichester: Wiley.
- CLARKE, R.T., GALVÃO, C.O. 1995. Descrição de tendências espaciais na precipitação média anual através de "polimento por medianas". In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., 1995, Recife. *Anais ...* Recife: ABRH. v.1, p.7-12.
- CLEMEN, R.T. 1989. Combining forecasts: a review and annotated bibliography. *International Journal of Forecasting*, Amsterdam, v.5, p.559-583.
- COLMAN, A. 1997. *Rainfall series and the Atlantic and Pacific SST indices used for the Hadley Centre's Northeast Brazil forecasts*. Bracknell: Hadley Centre for Climate Prediction and Research, 01 dezembro. [Comunicação pessoal].

- COLMAN, A., DAVEY, M., HARRISON, M., EVANS, T., EVANS, R. 1997. Multiple regression, discriminant analysis predictions of Mar-Apr-May 1997 rainfall in Northeast Brazil. *Experimental Long-lead Forecast Bulletin*, v.6, n.2. Disponível on-line em <http://nic.fb4.noaa.gov/products/predictions/experimental/bulletin/Mar97/A10.html>. 03 Dez 1998.
- COLMAN, A., DAVEY, M., HARRISON, M., EVANS, A. 1998. Prediction of March-April-May 1998 Rainfall in Northeast Brazil Using Input from Multiple Regression, Discriminant Analysis and an Atmospheric Global Circulation Model. *Experimental Long-lead Forecast Bulletin*, v.7, n.1. Disponível on-line em <http://grads.iges.org/ellfb/Mar98/co2.html>. 03 Dez 1998.
- CORDERY, I. 1997. Interaction of phenomena to cause drought. In: RABAT INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1997. *Sustainability of water resources under increasing uncertainty*. Wallingford: IAHS. p.83-88.
- COX, E. 1994. *The fuzzy systems handbook*. Boston: AP Professional.
- CROLEY, T.E. 1996. Using NOAA's new climate outlooks in operational hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, New York, v.1, n.3, p.93-102.
- CROLEY, T.E. 1997. Water resource predictions from meteorological probability forecasts. In: RABAT INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1997. *Sustainability of water resources under increasing uncertainty*. Wallingford: IAHS. p.301-309.
- DAY, G.N. 1985. Extended streamflow forecasting using NWSRFS. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.111, n.2, p.157-170.
- DENOEU, T., EINFALT, T., JACQUET, G. 1991. Determination in real time of the reliability of radar rainfall forecasts. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.122, p.353-371.
- DICKINSON, R.E. 1996. Advances in land surface parameterisations for GCMs. In: GASH, J.H.C., NOBRE, C.A., ROBERTS, J.M., VICTORIA, R.L. (Ed.) *Amazonian deforestation and climate*. Chichester: Wiley. p.399-411.
- DINIZ, L.S. 1994. *Calibração automática de modelos chuva-vazão usando um algoritmo genético*. Campina Grande. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1994.
- DINIZ, L.S., GÓIS, R.S.S., SRINIVASAN, V.S. 1996. Application of a genetic algorithm for calibration and structural modification of Tank Model. In: HYDRAULIC ENGINEERING SOFTWARE, 6., 1996, Penang. *Proceedings ...* Ashurst Lodge: Computational Mechanics Publications. p.11-20.
- DOHERTY FILHO, M.J. 1992. *Simulação e operação dos reservatórios de Canoas, Saco de Nova Olinda e Queimadas; disponibilidade de água para o Projeto Piancó; volume I - texto*. Recife: Programa de Apoio ao Pequeno Produtor Rural : IICA : SUDENE. [Não publicado]
- DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. 1979. *Yield response to water*. Roma: FAO. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).
- DRACUP, J.A., KAHYA, E. 1994. The relationships between U.S. streamflow and La Niña events. *Water Resources Research*, Washington, v.30, n.7, p.2133-2141.
- DRAPER, N.R., SMITH, H. 1981. *Applied regression analysis*. 2.ed. New York: Wiley.

- DRIANKOV, D., HELLENDORF, H., REINFRANK, M. 1993. *An introduction to fuzzy control*. Berlin: Springer-Verlag.
- DUBOIS, D., PRADE, H. 1988. *Possibility theory: an approach to computerized processing of uncertainty*. New York: Plenum.
- DUBOIS, D., PRADE, H. 1989. Fuzzy sets, probability and measurement. *European Journal Operational Research*, Amsterdam, v.40, p.135-154.
- DUBOIS, D., PRADE, H., SANDRI, S. 1993. On possibility/probability transformations. In: LOWEN, R., ROUBENS, M. (Ed.) *Fuzzy logic; state of the art*. Dordrecht: Kluwer. p.103-112.
- DUCKSTEIN, L. 1991. Bayes statistics in hydrology and water resources management. *Hydrological Sciences Journal*, Wallingford, v.36, n.6, p.661-663.
- EFRON, B., TIBSHIRANI, R.J. 1993. *An introduction to the bootstrap*. New York: Chapman & Hall.
- EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS. 1998a. *ECMWF's seasonal forecast project: uncertainties*. Disponível on-line em <http://www.ecmwf.int/html/seasonal/forecast/uncertainties.html>. 30 Ago 1998.
- EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS. 1998b. *ECMWF's seasonal forecast project: introduction*. Disponível on-line em <http://www.ecmwf.int/html/seasonal/info/info.html>. 30 Ago 1998.
- EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS. 1998c. *Drift in the coupled system (SST)*. Disponível on-line em <http://www.ecmwf.int/html/seasonal/info/drift.html>. 30 Ago 1998.
- EVANS, T., HARRISON, M., GRAHAM, R., DAVEY, M., COLMAN, A. 1998. A Dynamical One-Month Lead Seasonal Rainfall Prediction for March to May 1998 for the North-Eastern Area of South America. *Experimental Long-lead Forecast Bulletin*, v.7, n.1. Disponível on-line em <http://grads.iges.org/ellfb/Mar98/ev1.html>. 03 Dez 1998.
- EXPERIMENTAL LONG-LEAD FORECAST BULLETIN, 1998. v.7, n.1, Mar. Disponível on-line em <http://grads.iges.org/ellfb/Mar98/contents.html>. 03 Dez 1998.
- FARIA, A.E., SOUZA, R.C. 1995. A re-evaluation of the quasi-Bayes approach to the linear combination of forecasts. *Journal of Forecasting*, Chichester, v.14, p.533-542.
- FERNANDES, L.G.L. 1995. *Utilização de redes neurais na análise e previsão de séries temporais*. Porto Alegre. Dissertação (Mestre em Ciência da Computação) – Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.
- FOLLAND, C.K., OWEN, J., MASKELL, K. 1989. Physical causes and predictability of variations in seasonal rainfall over sub-saharan Africa. In: BALTIMORE INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1989. *Remote sensing and large-scale global processes*. Wallingford: IAHS. p.87-95.
- FOLLAND, C.K., OWEN, J., WARD, N., COLMAN, A. 1991. Prediction of seasonal rainfall in the Sahel region using empirical and dynamical methods. *Journal of Forecasting*, Chichester, v.10, p.21-56.
- FONTANA, D.C., BERLATO, M.A. 1997. A influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.5, n.1, p.127-132.

- FREER, J., BEVEN, K., AMBROISE, B. 1996. Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE approach. *Water Resources Research*, Washington, v.32, n.7, p.2161-2174.
- FREITAS, M.A.S., BILLIB, M.H.A. 1997. Drought prediction and characteristic analysis in semiarid Ceará, northeast Brazil. In: RABAT INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1997. *Sustainability of water resources under increasing uncertainty*. Wallingford: IAHS. p.105-112.
- FRONZA, G., KARLIN, A., RINALDI, S. 1977. Reservoir operation under conflicting objectives. *Water Resources Research*, Washington, v.13, n.2, p.296-302.
- GALVÃO, C.O. 1995. Modelagem fuzzy da previsão climática no Nordeste para uso em operação de reservatórios. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., 1995, Recife. *Anais ... Recife: ABRH*. v.2, p.57-62.
- GALVÃO, C.O., IKEBUCHI, S. 1992. Rule-based reservoir operation considering long-range forecast. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, Kyoto, v.42, n.368, p.71-94.
- GALVÃO, C.O., IKEBUCHI, S., KOJIRI, T. 1993. Conjuntos difusos como modelo de incerteza em sistemas de apoio à decisão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10., 1993, Gramado. *Anais ... Porto Alegre: ABRH*. v.4, p.113-121.
- GALVÃO, C.O., IKEBUCHI, S., KOJIRI, T. 1996. Reservoir operation and climate forecasting in a tropical region. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER RESOURCES AND ENVIRONMENT RESEARCH, 1996, Kyoto. *Proceedings ... Kyoto: Kyoto University*. v.2, p.71-78.
- GALVÃO, C.O., RABBANI, E.R., RIBEIRO, M.M.R. 1994. Otimização do uso da água em reservatórios no semi-árido através de programação dinâmica. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2., 1994, Fortaleza. *Anais ... Fortaleza: ABRH*. p.461-469.
- GALVÃO, C.O., RIBEIRO, M.M.R. 1993. A previsibilidade da estação chuvosa e a utilização dos recursos hídricos no Nordeste. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA, 45., 1993, Recife. *Anais ... Recife: SBPC*. v.1, p.145.
- GANG, L.W., SÁ, L.D.A., NORDEMAN, D.J.R. 1996. Neural networks for prediction of meteorological and climatic signal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES NEURAS, 3., 1996, Recife. *Anais ... Recife: UFPE-DI*. p.235-242.
- GAREN, D.C. 1992. Improved techniques in regression-based streamflow volume forecasting. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.118, n.6, p.654-670.
- GEORGAKAKOS, A.P. 1989. The value of streamflow forecasting in reservoir operation. *Water Resources Bulletin*, Bethesda, v.25, n.4, p.789-807.
- GEORGAKAKOS, A.P., YAO, H., MULLUSKY, M.B., GEORGAKAKOS, K.P. 1998. Impacts of climate variability on the operational forecast and management of the upper Des Moines River basin. *Water Resources Research*, Washington, v.34, n.4, p.799-821.
- GIRARDI, C., TEIXEIRA, L. 1978. *Prognóstico de tempo a longo prazo*. São José dos Campos: CTA/IAE. [Não publicado].

- GLANTZ, M.H. 1982. Consequences and responsibilities in drought forecasting: the case of Yakima, 1977. *Water Resources Research*, Washington, v.18, n.1, p.3-13.
- GLANTZ, M.H., KATZ, R.W., NICHOLLS, N. (Ed.). 1991. *Teleconnections linking worldwide climate anomalies*. Cambridge: Cambridge University Press.
- GOLDEN SOFTWARE. 1995. *Surfer*: surface mapping system, version 6.01. Golden: Golden Software.
- GOMES FILHO, M.F. 1979. *Um estudo sobre a influência do albedo diferencial e da orografia na circulação atmosférica: uma aplicação para o Nordeste brasileiro*. São José dos Campos. Tese (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1979.
- GRAHAM, N. 1997. Prediction of precipitation in Northeast Brazil for boreal spring 1997 using an atmospheric GCM with persisted SST anomalies. *Experimental Long-lead Forecast Bulletin*, v.6, n.2. Disponível on-line em <http://nic.fb4.noaa.gov/products/predictions/experimental/bulletin/Mar97/A07.html>. 03 Dez 1998.
- GREISCHAR, L., HASTENRATH, S. 1998. Multiple Regression and Discriminant Analysis to Predict Mar-Apr-May-Jun 1998 Rainfall in Northeast Brazil. *Experimental Long-lead Forecast Bulletin*, v.7, n.1. Disponível on-line em <http://grads.iges.org/ellfb/Mar98/gre.html>. 03 Dez 1998.
- GUETTER, A.K., GEORGAKAKOS, K.P. 1996. Are the El Niño and La Niña predictors of the Iowa River seasonal flow? *Journal of Applied Meteorology*, Boston, v.35, p.690-705.
- HARVEY, A.C., SOUZA, R.C. 1987. Assessing and modeling the cyclical behavior of rainfall in Northeast Brazil. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Boston, v.26, p.1339-1344.
- HARZALLAH, A., ARAGÃO, J.O.R., SADOURNY, R. 1996. Interannual rainfall variability in North-east Brazil: Observation and model simulation. *International Journal of Climatology*, Chichester, v.16, p.861-878.
- HASTENRATH, S. 1986. On climate prediction in the tropics. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v.67, p.692-902.
- HASTENRATH, S. 1990a. Tropical climate prediction: a progress report, 1985-1990. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v.71, n.6, p.819-825.
- HASTENRATH, S. 1990b. Diagnostics and prediction of anomalous river discharge in northern South America. *Journal of Climate*, Boston, v.3, p.1080-1096.
- HASTENRATH, S. 1990c. Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. *Journal of Climate*, Boston, v.3, p.893-904.
- HASTENRATH, S. 1990d. The relationship of highly reflective clouds to tropical climate anomalies. *Journal of Climate*, Boston, v.3, p.353-365.
- HASTENRATH, S. 1991. *Climate Dynamics of the Tropics*. Dordrecht: Kluwer.
- HASTENRATH, S. 1995. Recent advances in tropical climate prediction. *Journal of Climate*, Boston, v.8, p.1519-1532.
- HASTENRATH, S. 1997. Annual cycle of upper air circulation and convective activity over the tropical Americas. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v.102, n.D4, p.4267-4274.

- HASTENRATH, S. 1998. *Curso meteorologia tropical*; notas de aula. Maceió: Nucleo de Meteorologia e Recursos Hídricos de Alagoas. [Não publicado].
- HASTENRATH, S., DRUYAN, L. 1993. Circulation anomaly mechanisms in the tropical Atlantic sector during the Northeast Brazil rainy season: results from the GISS general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v.98, n.D8, p.14917-14923.
- HASTENRATH, S., GREISCHAR, L. 1993a. Further work on the prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. *Journal of Climate*, Boston, v.6, p.743-758.
- HASTENRATH, S., GREISCHAR, L. 1993b. Circulation mechanisms related to Northeast Brazil rainfall anomalies. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v.98, n.D3, p.5093-5102.
- HASTENRATH, S., GREISCHAR, L., VAN HEERDEN, J. 1995. Prediction of the summer rainfall over South Africa. *Journal of Climate*, Boston, v.8, p.1511-1518.
- HASTENRATH, S., HELLER, L. 1977. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Berks, v.103, p.77-92.
- HASTENRATH, S., NICKLIS, A., GREISCHAR, L. 1993. Atmospheric-hydrospheric mechanisms of climate anomalies in the western equatorial Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v.98, n.C11, p.20219-20235.
- HASTENRATH, S., WU, M.C., CHU, P.S. 1984. Towards the monitoring and prediction of north-east Brazil droughts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Berks, v.110, p.411-425.
- HENDERSON-SELLERS, A., DICKINSON, R.E. 1993. Atmospheric-land surface fluxes. In: JAKEMAN, A.J., BECK, M.B., MCALEER, M.J. (Ed.) *Modelling change in environmental systems*. Chichester: Wiley. p.387-405.
- HENDERSON-SELLERS, A., MCGUFFIE, K. 1987. *A climate modelling primer*. Chichester: Wiley.
- HEWITSON, B.C., CRANE, R.G. 1996. Climate downscaling: techniques and application. *Climate Research*, v.7, p.85-95.
- HIRAGA, I., FURUKASHI, T., UCHIKAWA, Y., NAKAYAMA, S. 1995. An acquisition of operator's rules for collision avoidance using fuzzy neural networks. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, New York, v.3, n.3, p.280-287.
- HIRSCH, R.M. 1981. Stochastic hydrologic model for drought management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.107, n.2, p.303-313.
- HISARD, P. 1990. Variabilité des précipitations dans l'Atlantique tropical sud-est pendant un El Niño. *Hydrologie Continentale*, Paris, v.5, n.2, p.87-104.
- HOSKING, J.R.M., CLARKE, R.T. 1990. Rainfall-runoff relations derived from the probability theory of storage. *Water Resources Research*, Washington, v.26, n.7, p.1455-1463.
- HUANG, W.-C., HARBOE, R., BOGARDI, J.J. 1991. Testing stochastic dynamic programming models conditioned on observed or forecasted inflows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.117, n.1, p.28-36.

- HULME, M. 1994. Validation of large-scale precipitation fields in general circulation models. In: DESBOIS, M., DESALMAND, F. (Ed.) *Global precipitation and climate change*. Berlin: Springer-Verlag. p.387-406. (NATO ASI Series, v. 23).
- HULME, M. (Ed.) 1996. *Climate change and southern Africa: an exploration of some potential impacts and implications in the SADC region*. Norwich: Climatic Research Unit: WWF International.
- HULME, M., BIOT, Y., BORTON, J., BUCHANAN-SMITH, M., DAVIES, S., FOLLAND, C., NICHOLDS, N., SEDDON, D., WARD, N. 1992a. Seasonal rainfall forecasting for Africa. Part I: Current status and future developments. *International Journal Environmental Studies*, London, v.39, p.245-256.
- HULME, M., BIOT, Y., BORTON, J., BUCHANAN-SMITH, M., DAVIES, S., FOLLAND, C., NICHOLDS, N., SEDDON, D., WARD, N. 1992b. Seasonal rainfall forecasting for Africa. Part II: Application and impact assessment. *International Journal Environmental Studies*, London, v.40, p.103-121.
- HUNT, B.G. 1991. The simulation and prediction of drought. In: HENDERSON-SELLERS, A., PITMAN, A.J. (Ed.) *Vegetation and climate interactions in semi-arid regions*. Dordrecht: Kluwer. p.89-103.
- IKEBUCHI, S., KOJIRI, T., MIYAKAWA, H. 1990. A study of long-term and real-time reservoir operation by using middle and long-term weather forecast. *Annals of the Disaster Prevention Research Institute*, Kyoto, n.33/B-2, p.167-192.
- IKEBUCHI, S., KOJIRI, T., TOMOSUGI, K., GALVÃO, C.O. 1994. Knowledge-based system for reservoir operation during low flows utilizing weather forecast information In: STOCHASTIC AND STATISTICAL METHODS IN HYDROLOGY AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 1993, Waterloo. *Papers ...* Dordrecht: Kluwer. v.4, p.295-308.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. 1999. *Monitoramento climático em tempo real para a região Nordeste*. Disponível on-line em http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/infoclima/especial3/Moni_NE/Monitoramento.htm. 16 Fev 1999.
- INTERNATIONAL RESEARCH INSTITUTE FOR CLIMATE PREDICTION. 1999. *IRI net assessment forecasts*. Disponível on-line em http://iri.ucsd.edu/forecast/net_asmt/index.html. 05 Fev 1999.
- IRRICON. 1991. *Projeto executivo de irrigação Queimadas*; volume I – diagnóstico. s.l. [Não publicado]
- Jl, M., LEETMAA, A., KOUSKY, V.E. 1996. Coupled model forecasts of ENSO during the 1980s and 1990s at the National Meteorological Center. *Journal of Climate*, Boston, v.9, p.3105-3120.
- JOHNSON, R.A., WICHERN, D.W. 1998. *Applied multivariate statistical analysis*. 4.ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- JONES, P.D., HULME, M. 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International Journal of Climatology*, Chichester, v.16, p.361-377.
- KAHYA, E., DRACUP, J.A. 1993. U.S. streamflow patterns in relation to the El Niño/Southern Oscillation. *Water Resources Research*, Washington, v.29, n.8, p.2491-2503.

- KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W., DEAVEN, D., GANDIN, L. et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v.77, n.3, p.437-471.
- KANE, R.P. 1997. Prediction of droughts in north-east Brazil: role of ENSO and use of periodicities. *International Journal of Climatology*, Chichester, v.17, p.655-665.
- KANE, R.P., TRIVEDI, N.B. 1986. Are droughts predictable? *Climatic Change*, Dordrecht, v.8, p.209-223.
- KANE, R.P., TRIVEDI, N.B. 1988. Spectral characteristics of the annual rainfall series for Northeast Brazil. *Climatic Change*, Dordrecht, v.13, p.317-336.
- KARAMOUZ, M., VASILIADES, H.V. 1992. Bayesian stochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecasts. *Water Resources Research*, Washington, v.28, n.5, p.1221-1232.
- KATZ, R.W., MURPHY, A.H. (Ed.) 1997. *Economic value of weather and climate forecasts*. Cambridge: Cambridge University Press.
- KELLER, T., GÖPFERT, H., SCHUBNELL, P. 1998. *Redução de riscos climáticos na agricultura: uma abordagem probabilística*. Rio de Janeiro: MARA:FINATEC.
- KELMAN, J., STEDINGER, J.R., COOPER, L.A., HSU, E., YUAN, S.-Q. 1990. Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation. *Water Resources Research*, Washington, v.26, n.3, p.447-454.
- KITE, G.W. 1995. Scaling of input data for macroscale hydrologic modeling. *Water Resources Research*, Washington, v.31, n.11, p.2769-2781.
- KOJIRI, T., IKEBUCHI, S., YAMADA, H. 1989. Basinwide flood control system by combining prediction and reservoir operation. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Berlin, v.3, p.31-49.
- KOJIRI, T., TOMOSUGI, K., GALVÃO, C.O. 1994. Knowledge-based decision support system of real-time reservoir operation for drought control. *Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources*, Tokyo, v.7, n.3, p.188-195.
- KOSKO, B. 1992. *Neural networks and fuzzy systems*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- KOUSKY, V.E. 1979. Frontal influences on Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, Boston, v.107, p.1140-1153.
- KOUSKY, V.E. 1980. Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, Boston, v.108, p.488-498.
- KOUSKY, V.E. 1985. Atmospheric circulation changes associated with rainfall anomalies over tropical Brazil. *Monthly Weather Review*, Boston, v.113, p.1951-1957.
- KOUSKY, V.E., MOURA, A.D. 1981. Previsão de precipitação no Nordeste do Brasil: o aspecto dinâmico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 4., 1981, Fortaleza. *Anais ... Fortaleza: ABRH*. v.4, p.253-267.
- KOUSKY, V.E., ROPELEWSKI, C.F. 1989. Extremes in the Southern Oscillation and their relationship to precipitation anomalies with emphasis on the South American region. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v.4, n.2, p.351-363.

- KRSTANOVIC, P.F., SINGH, V.P. 1991a. A univariate model for long-term streamflow forecasting; 1. Development. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Berlin, v.5, p.173-188.
- KRSTANOVIC, P.F., SINGH, V.P. 1991b. A univariate model for long-term streamflow forecasting; 2. Application. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Berlin, v.5, p.189-205.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. 1983. Why should a forecaster and a decision maker use Bayes theorem. *Water Resources Research*, Washington, v.19, n.2, p.327-336.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. 1986a. Expected utility, benefit, and loss criteria for seasonal water supply planning. *Water Resources Research*, Washington, v.22, n.3, p.303-312.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. 1986b. Optimal water supply planning based on seasonal runoff forecasts. *Water Resources Research*, Washington, v.22, n.3, p.313-321.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. 1991. Drought forecasting: methodological topics from a systems perspective. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Berlin, v.5, p.267-279.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. 1992. Bayesian correlation score: a utilitarian measure of forecast skill. *Monthly Weather Review*, Boston, v.120, p.208-219.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., REESE, S. 1991. Bayesian analysis of seasonal runoff forecasts. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Berlin, v.5, p.295-322.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., WATADA, L.M. 1986. Stochastic model of seasonal runoff forecasts. *Water Resources Research*, Washington, v.22, n.3, p.296-302.
- KUHL, S.C., MILLER, J.R. 1992. Seasonal river runoff calculated from a global atmospheric model. *Water Resources Research*, Washington, v.28, n.8, p.2029-2039.
- KUHNEL, I., MCMAHON, T.A., FINLAYSON, B.L., HAINES, A., WHETTON, P.H., GIBSON, T.T. 1990. Climatic influences on streamflow variability: a comparison between southeastern Australia and southeastern United States of America. *Water Resources Research*, Washington, v.26, n.10, p.2483-2496.
- KUMAR, K.K., SOMAN, M.K., KUMAR, K.R. 1995. Seasonal forecasting of Indian summer monsoon rainfall: a review. *Weather*, Reading, v.50, n.12, p.449-467.
- LANNA, A.E. 1982. *Operação estratégica de reservatórios para suprimento hídrico e controle de cheias*. Porto Alegre: IPH/UFRGS.
- LIU, Z., VALDÉS, J.B., ENTEKHABI, D. 1998. Merging and error analysis of regional hydrometeorologic anomaly forecasts conditioned on climate precursors. *Water Resources Research*, Washington, v.34, n.8, p.1959-1969.
- LOAICIGA, H.A., VALDÉS, J.B., VOGEL, R., GARVEY, J., SCHWARZ, H. 1996. Global warming and the hydrologic cycle. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.174, p.83-127.
- LOUCKS, D. P., STEDINGER, J. R., HAITH, D. A. 1981. *Water resource systems planning and analysis*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- LOUZADA, J.A., LANNA, A.E., BELTRAME, L.F., COTRIM, S.L., VEZZINI, F.M. 1992. Comparação entre modelos diário e mensal de balanço hídrico para estimativa da necessidade de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 9., 1991, Natal. *Anais ... Fortaleza: ABID*. v.1, t.3, p.1601-1620.

- MACEIRA, M.E.P. 1989. *Operação ótima de reservatórios com previsão de aflúências*. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestre em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1989.
- MARENGO, J.A., HASTENRATH, S. 1993. Case studies of extreme climatic events in the Amazon Basin. *Journal of Climate*, Boston, v.6, p.617-627.
- MARKHAM, C.G. 1974. Apparent periodicities in rainfall at Fortaleza, Ceara, Brazil. *Journal of Applied Meteorology*, Boston, v.13, p.176-179.
- MARKHAM, C.G., MCLAIN, D.R. 1977. Sea surface temperature related to rain in Ceara, north-eastern Brazil. *Nature*, London, v.265, p.320-323.
- MARSHALL, G.R., PARTON, K.A., HAMMER, G.L. 1996. Risk attitude, planting conditions and the value of seasonal forecasts to a dryland wheat grower. *Australian Journal of Agricultural Economics*, Parkville, v.40, n.3, p.211-233.
- MCGREGOR, J.L., WALSH, K.J., KATZFEY, J.J. 1993. Nested modelling for regional climate studies. In: JAKEMAN, A.J., BECK, M.B., MCALEER, M.J. (Ed.) *Modelling change in environmental systems*. Chichester: Wiley. p.367-386.
- MCKERCHAR, A.I., PEARSON, C.P. 1994. Forecasts of seasonal river flows using Southern Oscillation index. *Journal of Hydrology New Zealand*, Wellington, v.32, n.2, p.16-29.
- MECHOSO, C.R., LYONS, S.W., SPAHR, J.A. 1990. The impact of sea surface temperature anomalies on the rainfall over Northeast Brazil. *Journal of Climate*, Boston, v.3, p.812-826.
- MELLO, A.B.C. 1997. *Previsibilidade da precipitação na região semi-árida do Nordeste do Brasil, durante a estação chuvosa, em função do comportamento diário das chuvas na pré-estação*. Campina Grande. 124f. Dissertação (Mestre em Meteorologia) – Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1997.
- MESA-SANCHEZ, O.J., POVEDA J., G., CARVAJAL S., L.F., SALAZAR V., J.E. 1994a. Efecto del fenomeno de 'El Niño - Oscilacion del Sur' en la hidrologia colombiana. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 16., 1994, Santiago. *Anais ...* Santiago: Sociedad Chilena de Ingenieria Hidráulica. v.5, p.373-384.
- MESA-SANCHEZ, O.J., CARVAJAL S., L.F., SALAZAR V., J.E., POVEDA J., G. 1994b. Prediccion hidrológica usando redes neuronales. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 16., 1994, Santiago. *Anais ...* Santiago: Sociedad Chilena de Ingenieria Hidráulica. v.5, p.385-396.
- MESQUITA, A.R., MORETTIN, P.A. 1984. Interannual variations of precipitation at Fortaleza, Ceara, Brazil. *Tropical Ocean-Atmosphere Newsletter*. September.
- MINE, M.R.M. 1998. *Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias*. Porto Alegre. Tese (Doutor em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- MJELDE, J.W., THOMPSON, T.N., NIXON, C.J., LAMB, P.J. 1997. Utilising a farm-level decision model to help prioritise future climate prediction research needs. *Meteorological Applications*, Reading, v.4, p.161-170.

- MOLINIER, M., ALBUQUERQUE, C.H.C., CADIER, E. 1994. *Análise da pluviometria e isoietas homogêneas do Nordeste brasileiro*. Recife: SUDENE.
- MOLINIER, M., CADIER, E. 1984-85. Les sécheresses du Nordeste brésilien. *Cahier ORSTOM Série Hydrologie*, v.21, n.4, p.23-49.
- MOLION, L.C.B., MORAES, J.C. 1987. Oscilação sul e descarga de rios na América do Sul tropical. *Revista Brasileira de Engenharia. Caderno de Recursos Hídricos*, Rio de Janeiro, v.5, n.1, p.53-63.
- MOLLE, F. 1989. Evapotranspiração – evaporação do Tanque Classe A – evaporação nos pequenos açudes: variações e correlações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 8., 1989, Foz do Iguaçu. *Anais ...* São Paulo: ABRH. v.1, p.282-293.
- MONTECINOS, A., GARREAUD, R. 1994. Prognóstico estacional del régimen fluviométrico en Chile central. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 16., 1994, Santiago. *Anais ...* Santiago: Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. v.5, p.421-432.
- MONTEITH, J.L., VIRMANI, S.M. 1991. Quantifying climatic risk in the semiarid tropics: ICRISAT experience. In: MUCHOW, R.C., BELLAMY, J.A. *Climatic risk in crop production: models and management for the semiarid tropics and subtropics*. Wallingford: CAB International. p.183-204.
- MOORE, R.J. 1985. The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales. *Hydrological Sciences Journal*, Wallingford, v.30, n.2, p.273-297.
- MOORE, R.J., CLARKE, R.T. 1981. A distribution function approach to rainfall-runoff modelling. *Water Resources Research*, Washington, v.17, n.5, p.1367-1382.
- MOREIRA, A.F., SILVA, M.A., GAREIS, M.G.S., NASCIMENTO, J.A. 1995. As secas no nordeste brasileiro no período colonial. *Cadernos Nordeste*, Campina Grande, n.2, p.11-24.
- MOSS, M.E., PEARSON, C.P., MCKERCHAR, A.I. 1994. The Southern Oscillation index as a predictor of the probability of low streamflows in New Zealand. *Water Resources Research*, Washington, v.30, n.10, p.2717-2723.
- MOURA, A.D., SHUKLA, J. 1981. On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Boston, v.38, p.2653-2675.
- MURPHY, A.H. 1980. Subjective quantification of uncertainty in real-time weather forecasts in the United States. In: WOOD, E.F., SZÖLLÖSI-NAGY, A. (Ed.) *Real-Time Forecasting/Control of Water Resource Systems*. Oxford: Pergamon Press. p.247-267.
- MURPHY, A.H. 1991. Forecast verification: its complexity and dimensionality. *Monthly Weather Review*, Boston, v.119, p.1590-1601.
- MURPHY, A.H. 1994. Assessing the economic value of weather forecasts: an overview of methods, results and issues. *Meteorological Applications*, Reading, v.1, p.69-73.
- NAMIAS, J. 1972. Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil. *Tellus*, Stockholm, v.24, p.336-343.
- NAVARRO, E.F. 1993. *Planejamento agroclimático informatizado do semi-árido paraibano*; relatório de pesquisa. Campina Grande: UFPB:CNPq. [Não publicado].

- NOBRE, C.A., MOLION, L.C.B. 1988. The climatology of droughts and drought prediction. In: PARRY, M.L., CARTER, T.R., KONIJN, N.T. (Ed.) *The Impact of Climate Variations on Agriculture*. Dordrecht: Kluwer:IIASA:UNEP. v.2, p.305-323.
- NOBRE, P., SHUKLA, J. 1996. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the Tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate*, Boston, v.9, p.2464-2479.
- NOBRE, C.A., YANASSE, H.H, YANASSE, C.C.F. 1980. *Previsão de secas no Nordeste pelo método das periodicidades: usos e abusos*. Cambridge: MIT. [Não publicado].
- OKADA, N., HIPEL, K.W., OKA, Y. 1985. Hypergame analysis of the Lake Biwa conflict. *Water Resources Research*, Washington, v.21, n.7, p.917-926.
- OLIVEIRA, E.F.C.C. 1998. *Simulação da operação e estimativa dos benefícios sócio-econômicos do reservatório Coremas/Mãe D'água sujeito a múltiplos usos*. Campina Grande. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1998.
- PAIVA, E.M.C.D. 1996. *Regime de precipitação na Amazônia e sua relação com o desmatamento e temperatura da superfície do mar*. Porto Alegre. Tese (Doutor em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- PAIXÃO, E.B., BRAGA, C.C., SILVA, B.B. 1996. Risco climático associado a diferentes épocas de plantio no Estado do Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9., 1996, Campos do Jordão. *Anais ...* Rio de Janeiro: SBMET. v.1, p.321-324.
- PALMER, T.N. 1993. Extended-range atmospheric prediction and the Lorenz model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v.74, p.49-65.
- PALMER, T.N. 1997. A coordinated European programme on the prediction of climate variations on seasonal to interannual timescales (PROVOST). In: CONFERENCE ON CLIMATE VARIATIONS, 1997, Long Beach. *Proceedings ...* Boston: American Meteorological Society. p.55.
- PALMER, T.N., BRANKOVIC, C., RICHARDSON, D.S. 1998. *A probability and decision-model analysis of PROVOST seasonal multi-model ensemble integrations*. Reading: ECMWF. (ECMWF Technical Memorandum No. 265). [Submetido ao Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society].
- PALMER, R.N., TULL, R.M. 1987. Expert system for drought management planning. *Journal of Computing in Civil Engineering*, New York, v.1, n.4, p.284-297.
- PAOLINO, D.A., YANG, Q., DOTY, B., KINTER, J.L., SHUKLA, J., STRAUS, D.M. 1995. A pilot reanalysis project at COLA. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v.76, n.5, p.697-710.
- PARRY, M., CARTER, T. 1988. The assessment of effects of climatic variations on agriculture: a summary of results from studies in semi-arid regions. In: PARRY, M.L., CARTER, T.R., KONIJN, N.T. (Ed.) *The Impact of Climate Variations on Agriculture*. Dordrecht: Kluwer:IIASA:UNEP. v.2, p.9-60.
- PEDROSA, L.N. 1993. *Planejamento agroclimático informatizado do semi-árido paraibano; relatório de pesquisa*. Campina Grande: UFPB:CNPq. [Não publicado].

- PEDRYCZ, W. 1989. *Fuzzy control and fuzzy systems*. Tauton: Research Studies Press.
- PEDRYCZ, W. 1991. Fuzzy modelling: fundamentals, construction and evaluation. *Fuzzy Sets and Systems*, Amsterdam, v.41, p.1-15.
- PEZZI, L.P., REPELLI, C.A., NOBRE, P., CAVALCANTI, I.F.A., SAMPAIO, G. 1998. Forecasts of Tropical Atlantic SST Anomalies Using a Statistical Ocean Model at CPTEC/INPE-Brazil. *Experimental Long-lead Forecast Bulletin*, v.7, n.1. Disponível on-line em <http://grads.iges.org/ellfb/Mar98/pez.html>. 03 Dez 1998.
- PIECHOTA, T.C., CHIEW, F.H.S., DRACUP, J.A., MCMAHON, T.A. 1998. Seasonal streamflow forecasting in eastern Australia and the El Niño-Southern Oscillation. *Water Resources Research*, Washington, v.34, n.11, p.3035-3044.
- PITTOCK, A.B. 1993. Climate scenario development. In: JAKEMAN, A.J., BECK, M.B., MCALEER, M.J. (Ed.) *Modelling change in environmental systems*. Chichester: Wiley. p.481-503.
- PORTO, E.R., GARAGORRY, F.L., SILVA, A.S., MOITA, A.W. 1983. *Risco climático; estimativa de sucesso da agricultura dependente de chuva para diferentes épocas de plantio*. 1. Cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). Petrolina: EMBRAPA-CPATSA. (EMBRAPA-CPATSA. Documentos, 23).
- POTTS, J.M., FOLLAND, C.K., JOLLIFFE, I.T., SEXTON, D. 1996. Revised "LEPS" scores for assessing climate model simulations and long-range forecasts. *Journal of Climate*, Boston, v.9, p.34-53.
- RAMOS, R.P.L. 1975. Precipitation characteristics in the Northeast Brazil dry region. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v.80, n.12, p.1666-1678.
- RAO, V.B., HADA, K. 1994. An experiment with linear regression in forecasting of spring rainfall over south Brazil. *Atmósfera*, México, v.7, p.83-87.
- RAO, V.B., HADA, K., HERDIES, D.L. 1995. On the severe drought of 1993 in north-east Brazil. *International Journal of Climatology*, Chichester, v.15, p.697-704.
- RAO, V.B., LIMA, M.C., FRANCHITO, S.H. 1993. Seasonal and interannual variations of rainfall over eastern Northeast Brazil. *Journal of Climate*, Boston, v.6, p.1754-1763.
- RAO, V.B., SÁ, L.D.A., FRANCHITO, S.H., HADA, K. 1997. Interannual variations of rainfall and corn yields in Northeast Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.85, p.63-74.
- RAO, V.B., SATYAMURTY, P., BRITO, J.I.B. 1986. On the 1983 drought in north-east Brazil. *Journal of Climatology*, Chichester, v.6, p.43-51.
- REDMOND, K.T., KOCH, R.W. 1991. Surface climate and streamflow variability in the western United States and their relationship to large-scale circulation indices. *Water Resources Research*, Washington, v.27, n.9, p.2381-2399.
- REPELLI, C.A., ALVES, J.M.B. 1994. O estado da arte da previsibilidade operacional da quadra chuvosa do setor norte do Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8., 1994, Belo Horizonte. *Anais ...* Belo Horizonte: SBMET. v.3, p.438-442.
- REPELLI, C.A., ALVES, J.M.B. 1996a. Uso de análise de correlações canônicas para prognosticar a variabilidade espacial da precipitação sazonal sobre o Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v.11, n.2, p.67-75.

- REPELLI, C.A., ALVES, J.M.B. 1996b. Variabilidade interanual da estação chuvosa no estado do Ceará e a probabilidade de ocorrência de veranicos. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.4, n.1, p.107-118.
- RIBEIRO, M.M.R., GALVÃO, C.O., DINIZ, L.S. 1995. Níveis de alerta para os reservatórios Gramame-Mamuaba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., 1995, Recife. *Anais ...* Recife: ABRH. v.1, p.189-194.
- RIBEIRO, M.M.R., KOCH, U., GÓIS, R.S.S. 1991. Operação de reservatórios para fins de abastecimento e irrigação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9., 1991, Rio de Janeiro. *Anais ...* Rio de Janeiro: ABRH. v.2, p.422-431.
- RODIONOV, S., MARTIN, J.H. 1996. A knowledge-based system for the diagnosis and prediction of short-term climatic changes in the North Atlantic. *Journal of Climate*, Boston, v.9, p.1816-1823.
- ROUCOU, P., ARAGÃO, J.O.R., HARZALLAH, A., FONTAINE, B., JANICOT, S. 1996. Vertical motion changes related to North-east Brazil rainfall variability: a GCM simulation. *International Journal of Climatology*, Chichester, v.16, p.879-891.
- RUSSELL, S.O., CAMPBELL, P.F. 1996. Reservoir operating rule with fuzzy programming. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.122, n.3, p.165-170.
- SALAS, J.D., DELLEUR, J.W., YEVJEVICH, V., LANE, W.L. 1980. *Applied modeling of hydrologic time series*. Littleton: Water Resources Publications.
- SANDRI, S.A., DUBOIS, D., KALFSBEEK, H.W. 1995. Elicitation, assessment, and pooling of expert judgments using possibility theory. *IEEE Transactions of Fuzzy Systems*, New York, v.3, n.3, p.313-335.
- SARGENT, D.M. 1979. Reservoir operating rules for drought conditions. *Hydrological Sciences Bulletin*, Wallingford, v.24, n.1, p.83-94.
- SEMENOV, M.A., BARROW, E.M. 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*, Dordrecht, v.35, n.4, p.397-414.
- SEMENOV, M.A., PORTER, J.R. 1995. Climatic variability and the modelling of crop yields. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.73, p.265-283.
- SHENTZIS, I.D. 1990. Mathematical models for long-term prediction of mountainous river runoff: methods, information and results. *Hydrological Sciences Journal*, Wallingford, v.35, n.5, p.487-500.
- SILVA, B.B. 1988. Estimativa da chuva de outono nos sertões do Estado da Paraíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 5., 1988, Rio de Janeiro. *Anais ...* Rio de Janeiro: SBMET. v.1, p.IV.16-IV.19.
- SILVA, F.A.S., RAO, T.V.R. 1994. Regionalização referente à pluviosidade anual e sua distribuição intra-anual no estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.2, p.93-97.
- SIMPSON, H.J., CANE, M.A., HERCZEG, A.L., ZEBIAK, S.E., SIMPSON, J.H. 1993. Annual river discharge in southeastern Australia related to El Niño - Southern Oscillation forecasts of sea surface temperatures. *Water Resources Research*, Washington, v.29, n.11, p.3671-3680.

- SIQUEIRA, O.J.F., FARIAS, J.R.B., SANS, L.M.A. 1994. Potential effects of global climate change for Brazilian agriculture and adaptive strategies for wheat, maize and soybean. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.2, p.115-129.
- SIVAKUMAR, M.V.K. 1990. Exploiting rainy season potential from the onset of rains in the Sahelian zone of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.51, p.321-332.
- SKELLY, W.C., HENDERSON-SELLERS, A. 1996. Grid box or grid point: what type of data do GCMs deliver to climate impacts researchers? *International Journal of Climatology*, Chichester, v.16, p.1079-1086.
- SMITH, J.A. 1991. Long-range streamflow forecasting using nonparametric regression. *Water Resources Bulletin*, Bethesda, v.27, n.1, p.39-46.
- SMITH, J.A., DAY, G.N., KANE, M.D. 1992. Nonparametric framework for long-range streamflow forecasting. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.118, n.1, p.82-92.
- SOUZA, E.B., ALVES, J.M.B., XAVIER, T.M.B.S. 1998. A estação chuvosa no semi-árido nordestino nos anos de predominância de aquecimento ou de resfriamento em toda a bacia do Atlântico Tropical. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.3, n.2, p.47-55.
- SOUZA FILHO, F.A., GONDIM FILHO, J.G.C. 1996. Operação de sistemas de reservatórios, o caso do Ceará. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 3., 1996, Salvador. *Anais ...* Salvador: ABRH. p.465-471.
- SOUZA FILHO, F.A., PORTO, R.L.L. 1997. Modelo de otimização da alocação intra-sazonal de estoques de água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., 1997, Vitória. *Anais ...* São Paulo: ABRH. v.2, p.359-366.
- SPERBER, K.R., HAMEED, S. 1993. Phase locking of Nordeste precipitation with sea surface temperatures. *Geophysical Research Letters*, Washington, v.20, n.2, p.113-116.
- SPERBER, K.R., PALMER, T.N. 1996. Interannual tropical rainfall variability in general circulation model simulations associated with the atmospheric model intercomparison project. *Journal of Climate*, Boston, v.9, p.2727-2750.
- STATISTICAL PACKAGE FOR THE SOCIAL SCIENCES. 1995. *SPSS^{cc} Advanced statistics guide*. Chicago.
- STEDINGER, J.R., SULE, B.F., LOUCKS, D.P. 1984. Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization. *Water Resources Research*, Washington, v.20, n.11, p.1499-1505.
- STERN, R.D., COE, R. 1984. A model fitting analysis of daily rainfall data. *Journal of the Royal Statistical Society. Serie A: General*, London, v.147, part 1, p.1-34.
- SUGAWARA, M. 1979. Automatic calibration of the tank model. *Hydrological Sciences Bulletin*, Wallingford, v.24, n.3, p.375-388.
- SUGAWARA, M. 1995a. The development of a hydrological model – Tank. In: KITE, G. (Ed.) *Time and the river: essays by eminent hydrologists*. Fort Collins: Water Resources Publications. p.201-258.
- SUGAWARA, M. 1995b. Tank Model. In: SINGH, V.P. (Ed.) *Computer models of watershed hydrology*. Highlands Ranch: Water Resources Publications. p.165-214.

- SUGENO, M., TANAKA, K. 1991. Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system. *Fuzzy Sets and Systems*, Amsterdam, v.42, p.315-334.
- TAPLEY, T.D., WAYLEN, P.R. 1990. Spatial variability of annual precipitation and ENSO events in western Peru. *Hydrological Sciences Journal*, Wallingford, v.35, n.4, p.429-446.
- TAVARES, L.V., SOUZA, R.C. 1988. A multiple distribution Markovian model for annual hydrologic time series. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Berlin, v.2, p.295-302.
- TENDÊNCIA de normalidade para a estação chuvosa no semi-árido do norte do Nordeste (fevereiro a maio de 1999). 1999. Campina Grande: SEMARH/LMRS-PB. 2p. Disponível on-line em <http://www.lmrs.pb.gov.br/prev99.htm>. 26 Jan 1999.
- THORNTON, P.K., BOWEN, W.T., RAVELO, A.C., WILKENS, P.W., FARMER, G., BROCK, J., BRINK, J.E. 1997. Estimating millet production for famine early warning: an application of crop simulation modelling using satellite and ground-based data in Burkina Faso. *Agriculture and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.83, p.95-112.
- TOTH, Z., KALNAY, E. 1993. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v.74, p.2317-2330.
- TUCCI, C.E.M. 1998. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Ed. da Universidade UFRGS:ABRH.
- TURKSEN, I.B. 1991. Measurement of membership functions and their acquisition. *Fuzzy Sets and Systems*, Amsterdam, v.40, p.5-38.
- UVO, C., BERNDTSSON, R. 1996. Regionalization and spatial properties of Ceará State rainfall in northeast Brazil. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v.101, n.D2, p.4221-4233.
- UVO, C.B., GRAHAM, N.E. 1998. Seasonal runoff forecast for northern South America: a statistical model. *Water Resources Research*, Washington, v.34, n.12, p.3515-3524.
- UVO, C.R.B., NOBRE, C.A. 1989a. A zona de convergência intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do Nordeste do Brasil; parte I: a posição da ZCIT no Atlântico Equatorial. *Climanálise*, São José dos Campos, v.4, n.7, p.34-42.
- UVO, C.R.B., NOBRE, C.A. 1989b. A zona de convergência intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do Nordeste do Brasil; parte II: a influência do ventos e TSM no Atlântico Tropical. *Climanálise*, São José dos Campos, v.4, n.10, p.39-49.
- UVO, C.R.B., REPELLI, C.A., ZEBIAK, S., KUSHNIR, Y. 1998. The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and the Northeast Brazil monthly precipitation. *Journal of Climate*, Boston, v.11, p.551-562.
- WAINER, I., SOARES, J. 1997. North northeast Brazil rainfall and its decadal-scale relationship to wind stress and sea surface temperatures. *Geophysical Research Letters*, Washington, v.24, n.3, p.277-280.
- WANG, X.L., RUI, H.L. 1996. A methodology for assessing ensemble experiments. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v.101, n.D23, p.29591-29597.

- WARD, M.N. 1994. *Tropical north African rainfall and worldwide monthly to multi-decadal climate variations*. Reading. Tese (Ph.D.) – Department of Meteorology, Reading University, 1994.
- WARD, M.N., FOLLAND, C.K. 1991. Prediction of seasonal rainfall in the north Nordeste of Brazil using eigenvectors of sea-surface temperature. *International Journal of Climatology*, Chichester, v.11, p.711-743.
- WATTERSON, I.G. 1993. Global climate modelling. In: JAKEMAN, A.J., BECK, M.B., MCALEER, M.J. (Ed.) *Modelling change in environmental systems*. Chichester: Wiley. p.343-366.
- WEICHERT, A., BURGER, G. 1998. Linear versus nonlinear techniques in downscaling. *Climate Research*, v.10, p.83-93.
- WELSTEAD, S.T. 1994. *Neural network and fuzzy logic applications in C/C++*. New York: Wiley.
- WIGLEY, T.M.L., JONES, P.D., BRIFFA, K.R., SMITH, G. 1990. Obtaining sub-grid-scale information from coarse-resolution general circulation model output. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v.95, p.1943-1953.
- WILBY, R.L., WIGLEY, T.M.L., CONWAY, D., JONES, P.D., HEWITSON, B.C., MAIN, J., WILKS, D.S. 1998. Statistical downscaling of general circulation model output: a comparison of methods. *Water Resources Research*, Washington, v.34, n.11, p.2995-3008.
- WILHITE, D.A. 1991. Drought planning: a process for state government. *Water Resources Bulletin*, Bethesda, v.27, n.1, p.29-38.
- WILKS, D.S. 1995. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. San Diego: Academic Press.
- WOOLHISER, D.A. 1992. Modeling daily precipitation – progress and problems. In: WALDEN, A.T., GUTTORP, P. (Ed.) *Statistics in the environmental & earth sciences*. London: Edward Arnold. p. 71-89.
- WOOLHISER, D.A., KEEFER, T.O., REDMOND, K.T. 1993. Southern oscillation effects on daily precipitation in the southwestern United States. *Water Resources Research*, Washington, v.29, n.4, p.1287-1295.
- WOOLHISER, D.A., KEEFER, T.O., REDMOND, K.T. 1994. Correction to "Southern oscillation effects on daily precipitation in the southwestern United States". *Water Resources Research*, Washington, v.30, n.5, p.1639.
- WURBS, R.A. 1993. Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.119, n.4, p.455-472.
- XAVIER, T.M.B.S., XAVIER, A.F.S. 1995. Modelos lineares generalizados na explicação e previsão da chuva no estado do Ceará (1964-91). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., 1995, Recife. *Anais ... Recife: ABRH*. v.1, p.303-307.
- XAVIER, T.M.B.S., XAVIER, A.F.S., DIAS, P.L.S., DIAS, M.A.F.S. 1998. Papel da componente meridional do vento na costa do Nordeste brasileiro e de outras covariáveis para prever a chuva no estado do Ceará (1964-97). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.3, n.4, p.121-139.
- YEH, W.W.-G. 1985. Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review. *Water Resources Research*, Washington, v.21, n.12, p.1797-1818.

- YEH, W.W.-G, BECKER, L., ZETTLEMOYER, R. 1982. Worth of inflow forecast for reservoir operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.108, n.3, p.257-269.
- YOUNG., G.K. 1967. Finding reservoir operating rules. *Journal of the Hydraulics Division. ASCE*, New York, v.93, n.HY6, p.297-321.
- ZADEH, L.A. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, New York, v.8, p.338-353.
- ZADEH, L.A. 1973. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, New York, v.SMC-1, p.28-44.
- ZADEH, L.A. 1978. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, Amsterdam, v.1, p.3-28.

A. Anexo

A.1. Teoria dos conjuntos difusos

A essência dos métodos aqui denominados “difusos” – *fuzzy* – (Zadeh, 1965, 1973, 1978) é que eles trabalham com o conceito de definição de classe, de incerteza relativa ao significado. Por isso costuma-se dizer que os métodos difusos são “possibilísticos”, em contraposição aos métodos probabilísticos. Como a definição de significado de uma variável geralmente tem implicações sobre sua probabilidade de ocorrência (o teorema de Bayes de certo modo expressa isto), há relações entre os dois tipos de abordagem (Dubois e Prade, 1988, 1989; Dubois *et al.*, 1993). As aplicações de métodos difusos têm sido então muito discutidas comparando-se aos métodos probabilísticos, especialmente os Bayesianos (Duckstein, 1991; Bezdek, 1993, 1994).

Um *conjunto difuso* é uma generalização do conceito clássico de um conjunto. Na abordagem clássica cada elemento do conjunto tem uma função de pertinência μ que vale 1 ou 0, indicando pertinência ou não pertinência, respectivamente. Um conjunto difuso permite vários graus de pertinência para os elementos, definidos no intervalo $\mu=[0,1]$. Um *valor* ou *número* difuso é definido por um conjunto difuso. Uma *variável lingüística* difusa assume números difusos como valores.

Uma variável *estação* (de chuvas), que pode ser definida tendo cinco categorias ou valores (muito seca – *MS*, seca – *S*, normal – *N*, chuvosa – *C*, muito chuvosa – *MC*), é um exemplo típico de uma variável lingüística. Cada categoria foi definida por Brito *et al.* (1991) como uma faixa numérica, mostradas na Figura A.1(a). Uma categorização difusa para esta variável está mostrada na Figura A.1(b). Determinado previsor poderia assumir, por exemplo, um prognóstico tal que 0,57 fosse a pertinência μ da precipitação para a categoria *muito seca*, 0,29 para *seca*, 0,09 para *normal*, 0,03 para *chuvosa* e 0,03 para *muito chuvosa*. Este prognóstico pode ser representado como na Figura A.1(b). Essas pertinências têm o significado de possibilidade de pertencer à categoria e não o de probabilidade de ocorrência.

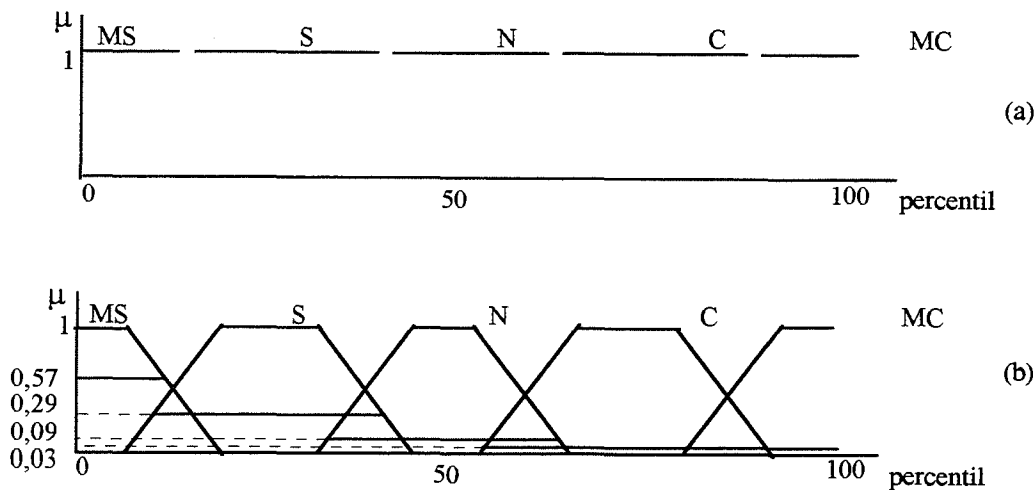


Figura A.1. Variável lingüística *estação de chuvas*: (a) conforme Brito *et al.* (1991); e (b) em termos de categorias difusas. μ é o valor da pertinência do elemento ao conjunto difuso. As categorias são: muito seca – *MS*, seca – *S*, normal – *N*, chuvosa – *C*, muito chuvosa – *MC*.

Nas aplicações voltadas a controle de processos, é comum que as variáveis de entrada sejam expressas em números reais, como por exemplo, o nível de água em um reservatório (dada em metros), ou a temperatura de uma caldeira (em °C), ou a precipitação prevista (em mm, ou em % da média). Assim, para que essas variáveis possam ser processadas no arcabouço difuso, é necessário que sejam “fuzificadas”, ou seja, transformadas no domínio dos reais para o domínio de uma variável lingüística difusa. Este procedimento está ilustrado na Figura A.2, onde um valor de precipitação de 60% da média climatológica transforma-se, no domínio difuso da variável lingüística “estação”, em *normal* com pertinência $\mu = 0,29$ e *chuvoso* com pertinência $\mu = 0,57$ (pertinência nula para as outras categorias).

A *inferência difusa* é feita através de regras que relacionam as variáveis. Considerem-se, por exemplo, três parâmetros determinantes da estação de chuvas: situação do fenômeno ENOS, posição da zona de convergência intertropical (ZCIT) e anomalia da temperatura da superfície do Oceano Pacífico (TSM PAC), com situação dada pelos conjuntos difusos da Figura A.3. Supondo apenas três regras, a Tabela A.1 mostra o procedimento de avaliação. ENOS, ZCIT, TSM PAC e ESTAÇÃO são variáveis lingüísticas, enquanto *neutro*, *favorável*, *desfavorável*, *normal* e *chuvosa* são categorias associadas às variáveis. A pertinência μ de cada regra é dada pela mínima pertinência das variáveis do primeiro termo da regra. A pertinência de cada categoria da variável ESTAÇÃO é o máximo valor obtido nas regras para cada categoria (Figura A.1):

$$\mu(\text{normal}) = \max[\mu(\text{regra 1}), \mu(\text{regra 3})] = \max[0,1; 0,6] = 0,6$$

$$\mu(\text{chuvosa}) = \mu(\text{regra 2}) = 0,7$$

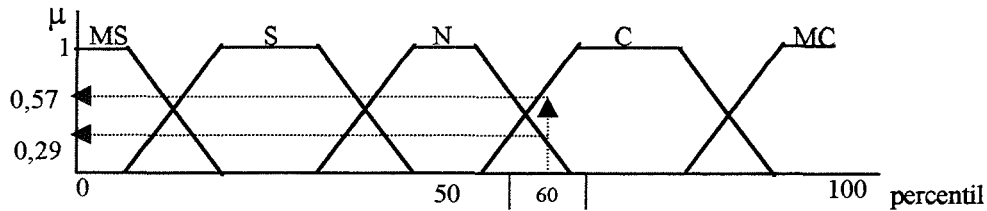


Figura A.2. Procedimento de *fuzificação*. μ é o valor da pertinência do elemento ao conjunto difuso. As categorias são: muito seca – *MS*, seca – *S*, normal – *N*, chuvosa – *C*, muito chuvosa – *MC*.

Tabela A.1. Exemplo de avaliação de regras de inferência difusa.

Regra	Enunciado	Pertinência μ
1	Se ENOS é neutro	0,7
	E ZCIT é neutra	0,1
	Então ESTAÇÃO é normal	$\min[0,7; 0,1] = 0,1$
2	Se ENOS é neutro	0,7
	E ZCIT é favorável	0,8
	Então ESTAÇÃO é chuvosa	$\min[0,7; 0,8] = 0,7$
3	Se TSM PAC é desfavorável	0,6
	E ZCIT é favorável	0,8
	Então ESTAÇÃO é normal	$\min[0,6; 0,8] = 0,6$

O conjunto difuso resultante da inferência já exprime diretamente a incerteza associada ao prognóstico. Caso seja necessário obter um valor no domínio dos números reais que sintetize o seu significado, faz-se a chamada “desfuzificação”. Um método bastante aceito é adotar o valor do centro de gravidade do conjunto difuso resultante. No exemplo, o algoritmo de “desfuzificação” transforma o valor difuso da *previsão consolidada* em um valor no domínio dos números reais, no centro de gravidade (esp), como mostrado na Figura A.4.

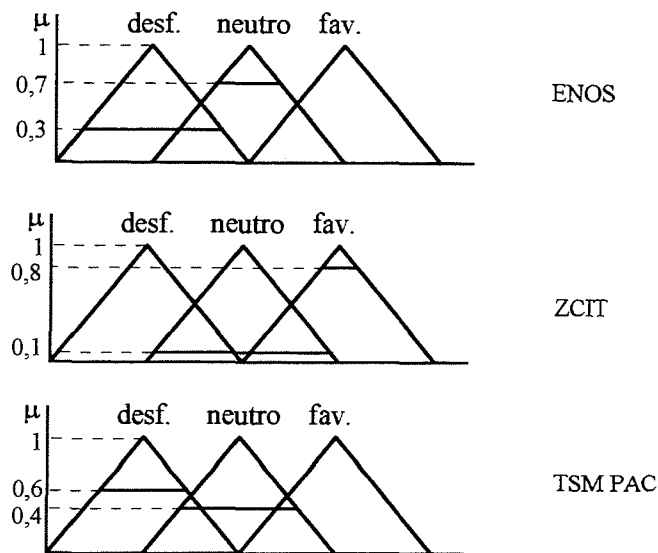


Figura A.3. Parâmetros para inferência da estação de chuvas. μ é o valor da pertinência do elemento ao conjunto difuso. Os parâmetros, ou variáveis, são a situação do fenômeno ENOS, a posição da zona de convergência intertropical (ZCIT) e a anomalia da temperatura da superfície do Oceano Pacífico (TSM PAC); os valores associados às variáveis são *neutro*, *favorável*, *desfavorável*, *normal*.

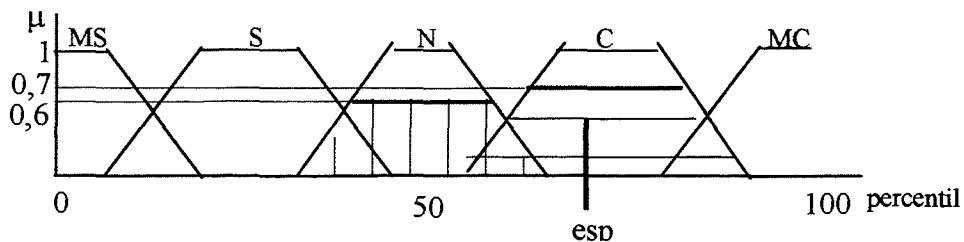


Figura A.4. Resultado da inferência da estação de chuvas. μ é o valor da pertinência do elemento ao conjunto difuso. As categorias são: muito seca – *MS*, seca – *S*, normal – *N*, chuvosa – *C*, muito chuvosa – *MC*. *Esp* é o valor desfuzificado da inferência, obtido do centro de gravidade das áreas hachuradas.

A modelagem da implicação de cada regra, ou seja, do 'E' da regra, através do operador '*min*', assim como a agregação das conclusões de todas as regras para determinada categoria, através do operador '*max*', é o tipo de inferência mais comum nas aplicações de controle e é conhecida como a *inferência de Mamdani*. Outros operadores podem ser utilizados na inferência, gerando implicações com características diferenciadas (Driankov *et al.*, 1993).

A inferência através de regras é o sistema de inferência mais utilizado em aplicações práticas e foi chamado de memórias associativas difusas (FAM – *fuzzy associative memory*) por Kosko (1992). Quando há duas variáveis de entrada, uma matriz em duas dimensões pode apresentar a relação entre as variáveis e o valor resultante da variável

de saída para cada regra. Esta FAM pode ser imaginada no hiperespaço quando houver mais de três variáveis de entrada e mais de uma de saída.

Uma característica dos métodos difusos é que se deve especificar o formato das funções de pertinência (ou conjuntos difusos) das variáveis envolvidas no problema. Estas funções de pertinência definem o significado daquela variável. Uma grande vantagem associada a este conceito é que estas funções são definidas subjetivamente, incorporando a experiência e o bom senso do analista e até a opinião dos envolvidos no problema. A grande desvantagem associada a este conceito vem da mesma característica: como a definição das funções é subjetiva, perde-se a objetividade característica dos procedimentos usuais de avaliação. Quando não se dispõe desta “experiência”, torna-se mais difícil montar e definir as funções. O mesmo vale em relação à definição das regras de inferência. Esta é uma área de muita pesquisa na teoria dos conjuntos difusos e vários métodos de formulação das funções e construção das regras têm sido propostos (Civanlar e Trussel, 1986; Turksen, 1991; Welstead, 1994; Hiraga *et al.*, 1995).

Procedimentos e critérios para modelagem difusa têm sido propostos (por exemplo, Pedricz, 1989, 1991; Sugeno e Tanaka, 1991) de modo a dotar a identificação e parametrização de modelos difusos com ferramentas de avaliação semelhantes aos modelos estatísticos. O uso do modelo difuso em previsão (sua aplicação maior tem sido a controle de processos e tomada de decisão) tem gerado proposições sobre a construção de 'intervalos de confiança' para o resultado da inferência (Pedricz, 1991).

Bardossy e Disse (1993) e Bardossy *et al.* (1995) mostram uma interessante aplicação à modelagem da infiltração e fluxo não saturado no solo. Utilizando regras de inferência conseguem descrever o fluxo da água, reduzir o esforço computacional na resolução aproximada das equações diferenciais e chegam a resultados comparáveis aos métodos usuais. Um aspecto interessante nestes trabalhos é a utilização de modelos teóricos como os de Green-Ampt e de Richards para gerar dados de treinamento para ajustar o modelo difuso. Na validação com dados de campo, o modelo difuso mostrou reproduzir bem o fenômeno, não sendo muito sensível às diferenças entre os modelos teóricos e os dados de campo.

A.2. O modelo *Tank*

O modelo consiste de dois reservatórios dispostos verticalmente com um orifício no fundo e um ou mais orifícios laterais (Figura A.5). A vazão através dos orifícios é linearmente proporcional à lâmina acumulada acima do nível do orifício. A evapotranspiração real, subtraída sucessivamente dos dois tanques, é calculada como uma fração da evapotranspiração potencial, com coeficientes diferentes para meses secos e meses chuvosos. Um valor de referência para a lâmina mensal precipitada define se o mês é seco ou chuvoso. Os coeficientes de vazão dos orifícios, as alturas nas quais estão localizados, os coeficientes de evapotranspiração e a lâmina de referência para definição de meses secos e chuvosos são parâmetros do modelo, que devem ser calibrados para cada bacia. Como qualquer modelo concentrado, o *Tank* é adequado para bacias pequenas e médias, com cobertura vegetal, solos, geologia, topografia e distribuição espacial de precipitação relativamente homogêneos, como a do Piancó (vide seção 3.2.2). O ajuste dos parâmetros para a bacia do Piancó foi realizado através da ferramenta de otimização automática apresentada por Diniz (1994) e Diniz *et al.* (1996).

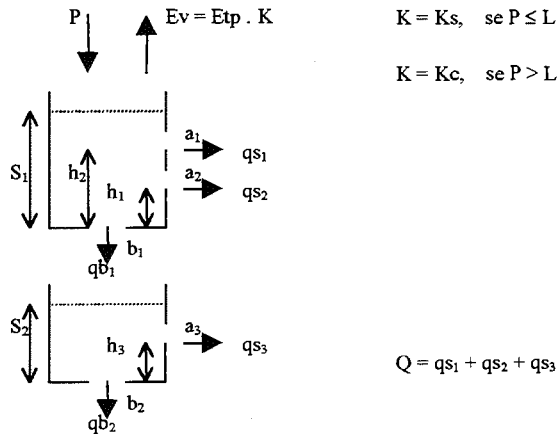


Figura A.5. Configuração do modelo *Tank* mensal para a bacia do Piancó (Diniz, 1994; Diniz *et al.*, 1996). Os parâmetros calibráveis são: os coeficientes de vazão a_1 , a_2 , a_3 , b_1 e b_2 , as alturas dos orifícios h_1 , h_2 e h_3 , dois valores para o coeficiente de evapotranspiração K , um para os meses secos (K_s) e outro para os meses chuvosos (K_c), e a precipitação de referência para definição de meses secos e chuvosos L . P , Ev e Etp são as lâminas mensais de precipitação, evapotranspiração real e evapotranspiração potencial, S_1 e S_2 são as lâminas armazenadas nos tanques, q_{s1} , q_{s2} e q_{s3} as descargas laterais e q_{b1} e q_{b2} as descargas de fundo. A vazão mensal Q é calculada como a soma das descargas laterais e a descarga de fundo q_{b2} é considerada “perda” para o lençol subterrâneo.

A.3. Dados empregados pela análise discriminante linear

Tabela A.2. Dados empregados para calibragem dos modelos de ADL: ATA: escores do terceiro autovetor de anomalias de TSM no Oceano Atlântico (média novembro-janeiro); ATP: escores do primeiro autovetor de anomalias de TSM no Oceano Pacífico (média novembro-janeiro); APSr: anomalias normalizadas de precipitação sazonal regional (fevereiro-maio); APSb: anomalias normalizadas de precipitação sazonal na bacia do Piancó (fevereiro-maio); AVS: anomalias normalizadas de volume escoado sazonal na bacia do Piancó (fevereiro-maio). Para definições, vide seção 3.2.

Ano	ATA	ATP	APSr	APSb	AVS
1911	1,20	-3,86	-	-175	-101
1912	0,15	1,05	38	-10	-57
1913	0,34	-2,00	56	64	3
1914	0,25	0,89	-48	-31	4
1915	0,38	0,72	-147	-192	-102
1916	0,71	-0,99	12	211	227
1917	0,34	-3,36	104	182	292
1918	0,81	-1,23	-7	51	34
1919	-0,28	1,40	-158	-108	-70
1920	-0,07	1,14	28	215	317
1921	-0,44	-1,36	115	258	346
1922	0,02	-1,22	43	62	45
1923	0,00	-2,61	7	-38	-76
1924	-1,95	0,94	185	312	349
1925	0,10	-5,14	16	81	70
1926	0,06	3,78	61	59	26
1927	0,38	1,17	-15	-34	-71
1928	0,10	-0,32	-50	-3	-8
1929	0,05	-0,89	36	62	54
1930	0,50	1,45	-74	-164	-102
1931	0,65	5,29	-45	-87	-78
1932	1,16	-0,02	-134	-197	-101
1933	0,17	-1,46	-9	-86	-57
1934	-0,04	-3,93	103	56	-7
1935	-1,20	-1,14	81	319	375
1936	-0,07	0,90	-66	-98	-82
1937	-0,21	1,06	11	11	-26
1938	0,01	0,00	-34	-32	-56
1939	0,25	-1,10	-12	-41	-70
1940	-0,14	1,01	103	182	236
1941	0,44	3,68	-42	-32	-48
1942	0,32	5,95	-104	-176	-104
1943	0,36	-4,18	-58	-89	-88
1944	0,53	-0,96	-31	-57	-55
1945	-0,08	-0,73	43	8	-38
1946	-0,05	-0,31	-45	-85	-72
1947	-0,06	-0,46	50	80	139
1948	0,16	-0,97	-26	-39	-41
1949	0,35	-2,26	-4	-48	-65
1950	-0,06	-3,24	31	-69	-68
1951	1,48	-4,35	-103	-120	-89
1952	-0,24	1,11	-22	-22	-7
1953	0,60	0,01	-83	-116	-87
1954	0,92	0,38	-39	9	-5
1955	0,34	-2,80	-2	-68	-66
1956	1,04	-7,01	-2	0	-69
1957	0,28	-3,06	17	-48	-23
1958	0,44	5,23	-138	-157	-100
1959	0,75	2,92	-26	-121	-85
1960	0,58	0,86	11	61	121
1961	-0,06	0,78	46	-23	-8
1962	0,38	-2,47	-27	-102	-75
1963	0,50	-1,48	45	33	-11

Tabela A.3. Dados empregados para validação dos modelos de ADL: ATA: escores do terceiro autovetor de anomalias de TSM no Oceano Atlântico (média novembro-janeiro); ATP: escores do primeiro autovetor de anomalias de TSM no Oceano Pacífico (média novembro-janeiro); APSr: anomalias normalizadas de precipitação sazonal regional (fevereiro-maio); APSb: anomalias normalizadas de precipitação sazonal na bacia do Piancó (fevereiro-maio); AVS: anomalias normalizadas de volume escoado sazonal na bacia do Piancó (fevereiro-maio). Para definições, vide seção 3.2.

Ano	ATA	ATP	APSr	APSb	AVS
1964	-1,45	2,27	127	47	76
1965	0,94	-2,92	31	-49	-50
1966	0,73	4,61	-41	-101	-100
1967	-0,48	-0,47	110	211	235
1968	0,13	-2,22	31	27	18
1969	-0,52	3,07	-14	-3	-38
1970	0,88	2,66	-80	-92	-71
1971	0,43	-5,43	36	201	128
1972	0,81	-4,80	-40	-30	-68
1973	-1,33	4,52	56	26	40
1974	-0,82	-7,28	188	209	335
1975	-0,29	-2,89	39	111	29
1976	0,35	-7,16	-20	11	-73
1977	0,71	3,99	26	159	47
1978	0,31	2,59	4	-44	-46
1979	0,57	1,10	-44	47	35
1980	0,37	2,65	-38	-59	8
1981	0,92	0,92	-55	-40	-6
1982	-0,18	0,45	-48	-121	-92
1983	-0,18	6,91	-95	-71	-46
1984	-0,03	1,62	65	64	20
1985	-0,97	-1,27	188	253	545
1986	-0,57	-0,58	99	82	153
1987	-0,04	4,31	-21	-53	-82
1988	-0,51	5,26	20	28	2