

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HIDRICOS**

VICENTE DE PAULA SILVA FILHO

**PREVISÃO DE VAZÃO NO SEMI-ÁRIDO NORDESTINO, UTILIZANDO
MODELOS ATMOSFÉRICOS: UM ESTUDO DE CASO.**

Fortaleza
2005

VICENTE DE PAULA SILVA FILHO

**PREVISÃO DE VAZÃO NO SEMI-ÁRIDO NORDESTINO, UTILIZANDO
MODELOS ATMOSFÉRICOS:
UM ESTUDO DE CASO.**

Tese submetida à Coordenação do Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Sávio Martins

Fortaleza

2005

Silva Filho, Vicente de Paula

Previsão de vazão no semi-árido nordestino, utilizando modelos atmosféricos: Um estudo de caso – Fortaleza, 2005.

124 f.:il

Tese (Pos – Graduação em Engenharia Civil) – Curso de Doutorado, Universidade Federal do Ceara, 2005.

1. Modelagem Numérica, Previsão de vazão.

VICENTE DE PAULA SILVA FILHO

*Previsão de Vazão no Semi-Árido Nordestino, utilizando modelos atmosféricos:
Um Estudo de Caso.*

Tese submetida à Coordenação do Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Doutor.

Aprovada em 29 / 04 / 2005

BANCA EXAMINADORA

Dr. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins (Orientador)
Universidade Federal do Ceara.

Dr. Manoel Francisco Gomes Filho
Universidade Federal de Campina Grande

Dr. Walter Martins Ferreira Filho
Universidade Federal do Ceara

Dr. Vicente de Paulo Pereira Barbosa Vieira
Universidade Federal do Ceara

Dra. Ticiania Marinho de Carvalho Studart
Universidade Federal do Ceara

Fortaleza
2005

À minha querida esposa, companheira de todos os momentos, que sempre soube entender, suportar, aceitar e incentivar os caminhos trilhados para que aqui pudesse chegar...

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar energias e me permitir chegar ao meu atual nível de conhecimento e satisfação.

À minha família por entender a importância do meu trabalho e desculpar minhas ausências, e aos meus pais (in memoriam) pela educação recebida.

Aos meus amigos, principalmente os colegas da FUNCEME pelo apoio, incentivo e contribuições eventuais.

Aos meus professores que com paciência e dedicação me conduziram ao final desta trilha, particularmente ao Professor Walter Martins Ferreira Filho que me forneceu o apoio necessário nos momentos críticos e ao Professor Eduardo Sávio Martins pelo grande suporte prestado nos últimos meses deste trabalho.

Ao professor Carlos Oliveira Galvão pelas contribuições fornecidas em várias reuniões durante o período do trabalho.

Ao INPE, com meus colegas de trabalho, pelo apoio e incentivo.

À FUNCEME, pelo abrigo e suporte na realização deste trabalho.

Às Faculdades Integradas do Ceará pelo apoio dedicado em alguns dos momentos importantes da realização deste trabalho.

E finalmente a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho pudesse terminar com um final feliz.

RESUMO

A previsão numérica dinâmica climatológica de chuva para a região Nordeste do Brasil já é uma realidade cujos resultados têm mostrado contribuir nas tomadas de decisão relativas ao assunto. Estas previsões, que são baseadas na evolução da temperatura da água na superfície dos oceanos (TSM), podem ser usadas como base para a previsão de vazões em determinadas bacias da região. Este trabalho utiliza as previsões numéricas climatológicas de chuva realizadas na FUNCEME, assim como os campos de TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico centrais, para propor e testar um conjunto de seis possibilidades (modelos) que permitam a previsão das vazões ocorrendo em uma pequena bacia do Semi-Árido Nordeste. A bacia é a da Fazenda Cajazeiras, localizada na região centro-noroeste do Estado do Ceará - Brasil. Os modelos são combinações de regressões lineares simples e múltiplas entre as séries de TSM e a série de vazão observada, intercaladas ou não pelos modelos numéricos de simulação do comportamento da atmosfera ECHAM e RSM. O modelo hidrológico de chuva-vazão CN-3S também é usado como parte de algumas das possibilidades. Duas formas para melhorar a qualidade dos dados dos modelos numéricos são apresentadas e testadas, sendo uma delas adotada. O modelo que se mostrou com melhor desempenho para este caso da bacia hidrológica da Fazenda Cajazeiras, foi aquele que utiliza os dados de chuva gerados a partir da regressão linear múltipla com as séries de TSM e transformados em vazão com o auxílio do CN-3S. Os modelos que usam os resultados do ECHAM e do RSM, passando pelo CN-3S, também apresentaram alto potencial para a previsão de vazão. Um estudo de caso é feito para os anos de 2002 e 2003 e a previsão de chuva e de vazão para o ano de 2005 para a bacia da Fazenda Cajazeiras é apresentado.

ABSTRACT

The numerical dynamical climatological precipitation prediction for Northeast Region of Brazil is already a reality and its results have shown to help decision makers on their matters. Those predictions, which are based on sea surface temperature (SST) evolution, may be used as base for flow predictions. This work makes use of FUNCEMEs numerical climatological rain prediction and Central Atlantic/Pacific SST, to propose and test a set of six possibilities (models) to allow the prediction of flow at a small hydrological basin from Brazils Northeast Semi-Arid region. The basin name is Fazenda Cajazeiras and is located at the central northwest region of Ceará State – Brazil. The model set is composed by a set of combinations between single and multiple regressions from SST series and basin flow series, interchanged or not, with the ECHAM and RSM atmospheric models. The CN-3S hydrological model is also used as part of some of those possibilities. Two ways of improving the atmospheric simulated data are presented and tested. One of them is adopted. The model that has shown being best suited to predict Fazenda Cajazeiras flows is that one which uses the rain data set generated from the linear multiple regression form lagged SST, transformed into flow by the CN-3S model. The two models which used ECHAM and RSM results going through the CN-3S to get flow also have a high potential for flow prediction. A case study for the prediction of 2002 and 2003 flow is done and the prediction for 2005 flow is also presented.

LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS

- ACC** – Modelo estatístico de Análise de Correlações Canônicas.
- ANA** – Agência Nacional de Águas.
- CN-3S** – *Modelo Numérico* físico/estatístico elaborado para estimativa da vazão escoada em determinado rio, como função da chuva precipitada em sua bacia hidrográfica.
- COLA** – Center for Ocean-Land Atmosphere Studies.
- CPTEC** – Centro de Previsão de Tempo e Clima do *INPE*.
- CPRM** – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.
- DE** – *Downscaling Estatístico*.
- ECMWF** – *European Center for Medium Range Weather Forecasts*.
- ENSO** – El Nino/Oscilação Sul.
- FUNCEME** – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos.
- INMET** – Instituto Nacional de Meteorologia.
- INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- IRI** – *International Research Institute for Climate Prediction*.
- LDEO** – *Lamont-Doherty Earth Observatory*.
- MATLAB** – Linguagem específica (disponível para venda no mercado) de programação computacional.
- MCG** – Modelo Numérico para simulação e previsão do comportamento da Circulação da Atmosfera Global.
- MRE** – Modelo Regional.
- NCEP** – *National Centers for Environmental Prediction*.
- NEB** – Região Nordeste do Brasil.
- SIMOC** – Sistema de Modelagem Estatística dos Oceanos.
- TSM** – Temperatura da Superfície do Mar.
- ZCIT** – Zona de Convergência Intertropical.

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Estações Pluviométricas que forneceram dados para este trabalho, com suas respectivas localidades e posição geográfica.....	31
TABELA 4.1a - Áreas de maior correlação entre as TSMs dos Pacífico, Atlântico Norte e Atlântico Sul, com as séries de precipitação e de vazão da a Baci da Fazenda Cajazeiras, para cada um dos meses de janeiro a junho.....	61
TABELA 4.1b - Correlações encontradas entre os valores de TSM usados como preditores e as equações finais, com os valores observados de precipitação e de vazão.....	61
TABELA 4.1c - Coeficientes resultantes das regressões lineares múltiplas obtidas entre os valores de TSM indicados na tabela 4.1a e as séries de precipitação e de vazão da Fazenda Cajazeiras.....	63
TABELA 4.2 - Valores médios dos Coeficientes de desagregação.....	69
TABELA 4.3 - Conjunto de coeficientes da Função Gama, usados para a correção da chuva simulada.....	72
TABELA 4.4 - Valores de correlação relativos aos dados de precipitação observados e simulados, originais e corrigidos.....	72
TABELA 4.5 - Resumo das características dos dados obtidos com os Modelos Estatísticos.....	74
TABELA 4.6 - Aplicações do modelo CN-3S à bacias do Nordeste do Brasil, incluindo a da Fazenda Cajazeiras.....	77

TABELA 4.7 - Climatologia da precipitação média mensal (mm/mês) observada sobre a Fazenda Cajazeiras (1971 – 2000).....	80
TABELA 4.8 - Comparação entre as características da série de vazão observada e das séries obtidas através de cada um dos seis modelos analisados	80
TABELA 4.9a - Valores de vazão previstos com o DE-I para a bacia da Fazenda Cajazeiras para o período de 2002 a 2004.....	82
TABELA 4.9b - Valores de Chuva previstos como parte o DE-II, para a bacia da Fazenda Cajazeiras para o período de 2002 a 2004.....	82
TABELA 4.10 - Valores de Vazão obtidos usando o DE-II para a bacia da Fazenda Cajazeiras para o período de 2002 a 2004.....	83
TABELA 4.11 - Valores de precipitação interpolados para a área da Fazenda Cajazeiras, previstos pelos modelos ECHAM e RSM para o período de 2002 a 2005.....	83
TABELA 4.12 - Valores de Vazão obtidos usando os DEs III e IV para a bacia da Fazenda Cajazeiras, para o período de 2002 a 2004.....	84
TABELA 4.13 - Valores de Vazão obtidos usando os DEs V e VI para a bacia da Fazenda Cajazeiras, para o período de 2002 a 2004.....	85
TABELA 4.14 - Comparação entre os resultados obtidos com os diversos modelos para os anos de 2002 e 2003.....	85
TABELA 4.15 - Média Geral e por “Ensamble” dos resultados obtidos pelo conjunto de modelos e sua comparação com os resultados obtidos com a vazão observada.....	87
TABELA 4.16 - Previsões de Vazão para os seis primeiros meses do ano de 2005, para a bacia da Fazenda Cajazeiras, individualmente para cada um dos seis modelos propostos, e o resultado médio.....	89

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Skill do MRE para três e cinco categorias.....	22
FIGURA 2.2 - Climatologia e tendências encontradas no RSM para o período de simulação (1971-2000), da esquerda para a direita respectivamente.	23
FIGURA 2.3 - Distribuição espacial da correlação entre as anomalias dos valores de precipitação simulados e os observados.....	24
FIGURA 3.1a - % do total de precipitação que ocorre nos meses Mar-Abr-Mai, sobre o NEB.....	28
FIGURA 3.1b - Total Climatológico de precipitação que ocorre nos meses Mar-Abr-Ma sobre o NEB.....	28
FIGURA 3.2 - Bacia correspondente à porção superior do rio Acaraú, com exutório na Fazenda Cajazeiras.....	29
FIGURA 3.3 - Área de abrangência das simulações.....	40
FIGURA 3.4 - Topografia da região, como vista pelo ECHAM e pelo RSM.....	41
FIGURA 3.5 - Malha do modelo, sobre o Estado do Ceará.....	42
FIGURA 3.6 - fluxograma mostrando as várias formas usadas para se obter as séries de vazão previstas.....	49
FIGURA 3.7 - Relação esquemática da transformação dos valores simulados, através da Função Gama.....	53
FIGURA 4.1a - Campo de correlação entre a TSM do mês de setembro com a pré-precipitação ocorrida no mês de maio seguinte.....	62

FIGURA 4.1b - Campo de correlação entre a TSM do mês de novembro com a vazão ocorrida no mês de maio seguinte.....	62
FIGURA 4.2 - Séries de precipitação observada, e calculadas pelos modelos ECHAM e RSM, para o período de 1971 a 2000.....	65
FIGURA 4.3 - Climatologia dos dados de precipitação observados e simulados pelos ECHAM e RSM para o período de 1971 a 2000.....	66
FIGURA 4.4 - Coeficientes de Desagregação calculados para cada um dos trinta anos da série de precipitação média mensal observada na Fazenda Cajazeiras.....	68
FIGURA 4.5 - Faixas de variação dos valores dos coeficientes de desagregação, nas diferentes situações estudadas.....	70
FIGURA 4.6 - Densidade de probabilidade dos dados observados e simulados, aproximados por Funções Gama para os casos: a) - do ECHAM (esquerda) e b) - do RSM (direita).....	71
FIGURA 4.7a - Series de Vazão Observada e Simulada com o Modelo Hidrológico CN-3S, para a bacia da Fazenda Cajazeiras (serie completa).....	75
FIGURA 4.7b - Series de Vazão Observada e Simulada com o Modelo Hidrológico CN-3S, para a bacia da Fazenda Cajazeiras (pos-calibração)	76
FIGURA 4.8 - Erros Padrão encontrados para cada na calibração dos modelos.....	81
FIGURA 4.9 - Erros Padrão encontrados na aplicação dos modelos aos dados dos anos de 2002 e 2003.....	86
FIGURA 4.10 - Valores de vazão previstos para a Faz. Cajazeiras, para os 1 ^{os} semestres dos anos de 2002 e 2003.....	88
FIGURA 4.11 - Previsão de vazão para a Faz. Cajazeiras, para o 1 ^o semestre do ano de 2005.....	89

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
SUMÁRIO	xiv
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Objetivos.....	2
1.2 - Organização dos capítulos da tese.....	3
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 - Modelagem Oceânica.....	5
2.2 - Modelagem Atmosférica.....	7
2.3 - Modelagem Hidrológica e Previsão de vazão.....	12
2.4 - Aplicações da modelagem em hidrologia.....	15
2.5 - Estimativas de Erros.....	20
2.6 - O trabalho na Funceme.....	21
3 - MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 - Alguns aspectos climáticos do Estado Ceará.....	27
3.2 - A área em estudo.....	28
3.3 - Os dados utilizados.....	29
3.3.1 - Dados de TSM.....	29
3.3.2 - Dados de Precipitação.....	30
3.3.3 - Dados de Vazão.....	32
3.4 - Modelagem Numérica.....	32
3.4.1 - A modelagem da Temperatura da Superfície do Mar.....	33
3.4.2 - A modelagem do comportamento atmosférico.....	35
3.4.2.1 - Modelos Estatísticos.....	35
3.4.2.2 - Modelos Dinâmicos.....	36
3.4.2.2.1 - Modelos Globais.....	37

3.4.2.2.2 - Modelos Regionais.....	38
3.4.2.2.3 - Ajustes de um modelo atmosférico às características da região de simulação.....	43
3.4.3 - A modelagem do comportamento hidrológico.....	43
3.4.3.1 - O modelo Hidrológico.....	44
3.5 - Interligação entre os modelos (acoplamento).....	47
3.6 - Descrição do Sistema.....	47
3.7 - Correção nos dados simulados.....	50
3.7.1 - A Desagregação da Precipitação.....	51
3.7.2 - A Função Gama.....	52
3.8 - O cálculo dos erros.....	54
4 - RESULTADOS.....	56
4.1 - Cálculo da precipitação média na área da bacia da Faz. Cajazeiras.....	57
4.2 - Os modelos de regressão linear múltipla com as séries de TSM.....	59
4.3 - Dados de precipitação observados e simulados.....	64
4.3.1 - Correções nos dados simulados pelos modelos ECHAM e RSM.....	66
4.3.1.1 - A Desagregação dos dados de precipitação.....	67
4.3.1.2 - A Correção Gama.....	71
4.4 - Vazões obtidas a partir dos resultados dos modelos atmosféricos.....	73
4.5 - O modelo CN-3S e sua calibração.....	74
4.6 - Comparações entre os modelos e os erros envolvidos.....	79
4.7 - Resultados obtidos para os anos de 2002 a 2004 e as previsões para 2005.....	80
5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	90
5.1 - Conclusões.....	90
5.2 - Recomendações.....	91
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
GLOSSÁRIO	106

1 - INTRODUÇÃO

As diferenças climáticas entre regiões proporcionam a observação, tanto espacial quanto temporalmente, da ocorrência de grandes variabilidades nos regimes de precipitação e conseqüentemente na disponibilidade de água. Em algumas regiões, como no Nordeste do Brasil (NEB) por exemplo, a significativa variabilidade climática interanual coloca a ocorrência de secas como uma ameaça freqüente. Mesmo dentro do contexto de anos considerados chuvosos, as distribuições irregulares da precipitação no espaço e no tempo ocasionam problemas para os vários aspectos da vida social e econômica das pessoas que ali habitam. Em outras regiões, a exemplo das grandes cidades do sul do Brasil, os impactos geralmente se manifestam através do excesso de precipitação com os conseqüentes alagamentos e cheias que ocasionam grandes prejuízos materiais e até de vidas humanas. Os impactos do tempo e do clima se fazem sentir sobre atividades tão diversas como a agropecuária e o turismo, e influenciam a vida do cidadão em seu dia-a-dia.

Onde a escassez é o problema, o monitoramento, manejo e realocação da água de regiões com maior disponibilidade para regiões de menor disponibilidade, tornam-se de fundamental importância para sua sustentabilidade e desenvolvimento. Para regiões onde o problema é o excesso, é importante se entender como este excesso se processa para que medidas preventivas possam ser tomadas e os possíveis prejuízos sejam minimizados. A capacidade de convívio com as secas e com as enchentes, e a sua superação, podem ser profundamente melhoradas através do aumento na qualidade do monitoramento hidrometeorológico-ambiental e da habilidade de previsão dos fenômenos hidroclimatológicos envolvidos no processo. Dispor desta informação pode levar à preparação antecipada de medidas preventivas contra a calamidade prevista (Wilhite, 1991)

A elaboração de um mecanismo com capacidade para prever, tanto temporal quanto espacialmente e com antecedência de alguns meses, como estará distribuída a água para uma determinada região, geraria uma ferramenta de extrema importância para o seu desenvolvimento. Este sistema, naturalmente, deveria possibilitar também a quantificação

dos erros envolvidos em cada uma das partes do processo, assim como fornecer os valores de vazão acompanhados da quantificação desses erros.

Uma solução como a proposta acima, obviamente depende da qualidade das previsões sobre as quais o sistema é fundamentado. Em se tratando de previsões numéricas de Clima, esta qualidade pode ser analisada a partir da capacidade do modelo em reproduzir climatologicamente as séries temporais das varias variáveis meteorológicas, sobretudo as de precipitação. Trabalhos anteriores apresentam as capacidades de vários modelos na reprodução das séries climatológicas para diferentes regiões. Neste particular, a região Nordeste do Brasil é privilegiada, quando comparada com outras regiões, pois tem apresentado valores de correlação da ordem de 80% entre os valores reais e aqueles simulados. Apesar do fato de que, de uma forma geral, as correlações apresentam-se altas para o NEB, existem microrregiões onde este fato não é verdade. Como as correlações baixas comprometem a qualidade das previsões, algum mecanismo, que possibilite um incremento significativo nas correlações destas áreas, precisa ser utilizado.

1.1 - Objetivos

Os modelos dinâmicos numéricos constituem atualmente o estado da arte em termos de previsão climática, apresentando consistentes razões físicas para o processamento das simulações do comportamento da atmosfera. Estas simulações normalmente são feitas primeiramente pelos modelos globais para posteriormente serem regionalizadas, num processo conhecido por *Downscaling*. Do ponto de vista puramente matemático, física dos modelos estatísticos não é observada. Esta surge quando da escolha de suas variáveis através de suas relações físicas. Embora com menor grau de física envolvido, as simulações estatísticas servem como alternativa, ainda com bom nível de qualidade, ao uso dos modelos dinâmicos, principalmente por serem mais simples e apresentarem menor custo computacional. O trabalho propõe uma metodologia para previsão de vazões baseada em previsões dinâmicas e estatísticas de chuva. Esta metodologia também propõe formas para o incremento nas correlações entre os valores simulados e observados, quando a correlação entre as duas variáveis é muito baixa. Além de fazer uso dos resultados de modelos dinâmicos, a metodologia proposta apresenta

alternativas de previsão através do uso da regressão estatística, em algumas de suas fases. Este processo é conhecido por *Downscaling Estatístico* (DE). O objetivo deste trabalho é o de apresentar um sistema que, partindo da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e utilizando resultados de modelos dinâmicos, seja composto por um conjunto de pequenos modelos estatísticos que fornecerão várias possibilidades para as vazões previstas para uma bacia específica dentro da região semi-árida do estado do Ceará - Brasil. Para cada uma das possibilidades, incluindo aquelas que usam os resultados dos modelos dinâmicos como parte de seu processo, é fornecida também a quantificação dos erros envolvidos. Este mecanismo possibilita verificar qual das etapas de execução do sistema apresenta a maior adição de erros. Assim, o sistema é elaborado de tal forma que seja possível a permutação de qualquer uma de suas partes (modelos ou downscaling estatístico), visando uma possível melhora, através da diminuição dos erros totais e de um melhor nível de acertos nos prognósticos.

Além do sistema descrito acima, este trabalho fornece as previsões de vazão para os quatro meses da chamada “quadra chuvosa” do ano de 2005, acompanhadas das incertezas inerentes ao processo.

1.2 - Organização dos capítulos da tese

No primeiro capítulo deste trabalho são explanadas as razões e justificativas de sua execução.

No segundo capítulo ampla revisão bibliográfica, mostrando parte do histórico e o estado da arte nas modelagens numéricas dinâmicas e estatísticas do comportamento hidrológico e atmosférico do médio prazo (climatológico) e suas aplicações, é apresentada. Iniciando com a modelagem oceânica, os principais trabalhos que mostram as relações entre a temperatura da superfície do mar e o comportamento da atmosfera sobre o Nordeste, são apresentados. Trabalhos que fazem uso destas relações para a estimativa da precipitação sobre a região também são apresentados. A modelagem atmosférica sofre abordagem similar. Apresentando um breve histórico da modelagem numérica atmosférica, esta parte do trabalho culmina com os trabalhos que apresentam o uso de seu estado da arte para a região Nordeste do Brasil. A modelagem hidrológica e sua utilização na previsão de

vazão também são apresentadas. Os vários tipos de modelos hidrológicos e sua utilização recente são mostrados. A estimativa dos erros envolvidos no processo é analisada. O capítulo culmina com a apresentação dos trabalhos realizados na FUNCEME, que serviram como base para esta tese.

No terceiro capítulo as bases teóricas para a realização deste trabalho são apresentadas. Alguns aspectos teóricos da modelagem numérica oceânica, atmosférica e hidrológica são apresentados. Características específicas dos modelos, tais como as diferenças entre Modelo Global e Modelo Regional, Modelo Numérico e Modelo Estatístico, Modelo Concentrado e Modelo Distribuído, entre outras, são apresentadas. As características específicas dos modelos usados e sua forma de operação, também são apresentadas. De grande importância neste capítulo é a apresentação da estruturação dos modelos propostos e a serem testados. Uma outra parte de importância maior é a apresentação das metodologias usadas para o melhoramento da qualidade dos dados fornecidos pelos modelos de simulação do comportamento da atmosfera e dos erros envolvidos. O capítulo torna-se completo com a apresentação da área utilizada no estudo e suas características, e de todos os conjuntos de dados usados no trabalho.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos. Aqui, visando ampliar a clareza da estruturação do método, um pequeno detalhamento de cada uma das possibilidades de previsão da vazão é apresentada. Como uma das possibilidades, os modelos de correlação linear múltipla são elaborados testados e usados. A análise da qualidade dos dados de chuva observados e simulados é feita, e sua melhoria, através do uso dos modelos de desagregação e da correção através da distribuição Gama, é elaborada. Neste capítulo também é apresentada a calibração do modelo hidrológico CN-3S e os resultados são comparados com os de sua aplicação a outras bacias localizadas na região semi-árida nordestina. A definição dos demais modelos, suas calibrações e validações também são apresentadas. Uma comparação entre os modelos é feita para análise do desempenho de cada um deles. Um estudo de caso é feito usando os resultados das previsões e demais dados, para os anos de 2002 e 2003. A conclusão deste capítulo se dá com a apresentação da previsão de vazão para o ano de 2005, na Fazenda Cajazeiras.

O quinto capítulo apresenta as conclusões e recomendações feitas em relação a este trabalho e o último capítulo apresenta a lista das bibliografias utilizadas.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Modelagem Oceânica

O comportamento da atmosfera em longo prazo, tende a responder às oscilações de temperatura a que estão sujeitas as superfícies dos oceanos. A Temperatura da Superfície do Mar (TSM) é a base para a grande maioria dos modelos numéricos que se propõem a fornecer previsões climáticas para as várias regiões do globo, inclusive o NEB. Interações com o oceano nesta escala de tempo, proporcionam um importante impacto sobre a atmosfera, sendo responsáveis por grande parte da variabilidade no seu comportamento, tanto na dimensão do tempo quanto do espaço. O fenômeno El Niño/Oscilação Sul, no Pacífico tropical, contribui substancialmente para a variabilidade interanual, com grande influência nas temperaturas médias, global e hemisférica (Moura e Shukla, 1981; Pan e Oort, 1983; Jones, 1988).

Uvo *et al.* (1998) analisaram as áreas de influência do fenômeno El Niño e sua variabilidade intra-sazonal sobre as chuvas do NEB, e apresentaram as que seriam de maior importância. Correlações simultâneas e defasadas foram feitas a cada mês da estação chuvosa, visando descobrir os padrões no campo de TSM do Pacífico que precederiam sistematicamente os padrões da precipitação do NEB. Alguns resultados do trabalho de Uvo *et al.* (1998) são apresentados abaixo.

De acordo com Uvo *et al.* (1998), em janeiro, a estação chuvosa ainda não está completamente estabelecida sobre o NEB e a precipitação que ocorre sobre a região é, na maioria das vezes, causada pela presença de frentes frias ou outros sistemas meteorológicos secundários. A TSM sobre a região do El Niño se relaciona positivamente sobre algumas áreas da parte Sul do NEB, e negativamente sobre poucas áreas do NEB, principalmente sobre o Estado do Piauí. Fevereiro marcaria o início da quadra chuvosa, com o surgimento de algumas correlações. As TSM do Pacífico não parecem exercer grande influência sobre a precipitação deste mês, com exceção de uma pequena região ao longo do Equador, entre 160°W e a Linha da Data (0°), que por sua vez está positivamente correlacionada com a precipitação sobre a parte Sul do NEB (ao Sul de 12°S).

Em março, as precipitações do NEB (principalmente ao Norte de 7°S) apresentam correlações muito fracas com as anomalias de TSM sobre a região do Niño3. Em abril surgem os maiores coeficientes de correlação negativos da TSM da região equatorial do Pacífico entre 120°W e a Linha da Data e a precipitação do NEB, principalmente ao norte de 10°S e oeste de 29°W. Em maio, a região com máxima correlação sobre o Pacífico é deslocada para Leste, desde 150°W até a Costa da América do Sul, ao longo do Equador. Essa região é mais bem correlacionada com a precipitação ao Norte de 6°S;

Uvo *et al.* (1998) observaram também que, considerando-se uma média para toda a quadra chuvosa do NEB, os maiores coeficientes de correlação sobre o Pacífico se estabeleceriam ao longo do Equador e entre 170°E até a costa da América do Sul, sendo que o núcleo de correlações máximas foi localizado em torno de 140°W. Os coeficientes encontrados foram negativos, possuindo relação inversa com a precipitação sobre o Norte e o Oeste do NEB. Observaram também que quase todo o Estado do Ceará se encontraria numa área de grande influência do El Niño durante este período, sendo ainda observado um núcleo máximo de correlações sobre a região noroeste do Ceará.

O fenômeno Dipolo do Atlântico por sua vez, em escala um pouco menor, também interfere sobre a variabilidade do comportamento da atmosfera, sobretudo no que diz respeito ao clima de curto prazo sobre a região Nordeste do Brasil (Moura e Hastenrath, 2004; Repelli e Nobre, 2004). Desta forma, em se tratando de previsão climática da atmosfera, faz-se necessário, a priori, a obtenção de previsões de Temperatura da Superfície do Mar (TSM). A confiabilidade de uma previsão deste tipo será tanto maior quanto melhor forem as previsões das anomalias de TSM sobre os oceanos tropicais. Sabe-se que a quantidade de energia térmica retida pela água dos oceanos é algumas vezes mais elevada que aquela retida pelos continentes e, sendo a atmosfera aquecida por baixo, acaba sendo modulada pela energia disponível nos oceanos. As previsões de TSM são uma das áreas do campo da pesquisa que ainda pertencem à fronteira do conhecimento. Poucos são os trabalhos já publicados e, mesmo estes, com propostas e soluções de qualidade apenas moderada. Devido a sua grande importância e ao movimento atualmente ocorrendo na comunidade científica, espera-se brevidade na evolução da qualidade destes trabalhos.

Alguns modelos de TSM têm sido elaborados e testados visando sua utilização como entrada para os modelos de previsão de clima. Barnston e Ropelewski (1992) usaram a Análise de Correlação Canônica para prever a média trimestral de TSM sobre os Oceanos

Pacífico e Índico, e a ocorrência de episódios de El Niño, para até quatro estações posteriores à realização da previsão. Os melhores resultados deste trabalho ocorreram quando as previsões para o inverno foram feitas ao final do verão no hemisfério norte. Atualmente esta metodologia encontra-se operacional no Climate Analysis Center (EUA) sendo usada para a realização de previsões de TSM do pacífico com uma a duas estações (períodos de três meses) de antecedência (Barnston e Ropelewski, 1992).

Repelli e Nobre (2004) usaram a mesma metodologia proposta por Barnston e Ropelewski (1992) para desenvolver o que eles batizaram de SIMOC (Sistema de Modelagem Estatística dos Oceanos). O SIMOC utiliza os campos mensais, com resolução de 1 grau de latitude-longitude, de Temperatura da Superfície do Mar, Pressão ao Nível do Mar e Ventos à Superfície nas direções zonal e meridional, sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico, para a previsão de TSM sobre o Atlântico. O modelo SIMOC encontra-se atualmente em operação no Centro de Previsão de Tempo e Clima (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) na cidade de Cachoeira Paulista, SP, onde é operacionalmente usado para, a partir dos dados do mês disponíveis no mês de janeiro, prever os campos de TSM do Atlântico para os meses de fevereiro, março e abril (Pezzi *et al.*, 1998).

Vários esforços estão atualmente sendo feitos no sentido da evolução dos modelos dinâmicos acoplados Oceano-Atmosfera, como será mostrado oportunamente mais adiante.

2.2 - Modelagem Atmosférica

A primeira tentativa de execução de uma previsão numérica de tempo foi feita por L. F. Richardson (Holton, 1979). Em seu livro, *Weather Prediction by Numerical Process*, publicado em 1922, reuniu as equações que regem o comportamento da atmosfera, elaborando um modelo de previsão de tempo em duas camadas e, usando diferenças finitas, mostrou como seria possível prognosticar os valores futuros das variáveis meteorológicas em pontos discretos, distribuídos em uma grade espacial tridimensional. Sem vislumbrar a futura existência dos computadores, estimou que fossem necessárias 64.000 pessoas, cada uma com uma daquelas máquinas de calcular mecânicas antigas, e ele como uma espécie de maestro, para possibilitar o acompanhamento do comportamento da atmosfera global, com a propagação no espaço e no tempo das oscilações em suas

variáveis. Obviamente, de acordo com suas estimativas, para uma previsão, cujos resultados deveriam ser apresentados antes do acontecimento real do fato, seria necessário um trabalho mais rápido que isto, demandando uma logística mais complexa e um contingente de pessoas maior que aquele estimado. Muito mais que apenas uma “atitude impraticável”, esta experiência serviu como marco para o desenvolvimento dos modelos de simulação do comportamento da atmosfera que se tornou possível algum tempo depois com o advento do computador. A primeira tentativa relativamente bem sucedida da obtenção deste tipo de previsão foi feita por N. A. Phillips (Phillips, 1956) quando, após a inclusão das alterações propostas por J. G. Charney em 1948 ao modelo do Richardson, usou o modelo de duas camadas para simular numericamente o comportamento da circulação geral da atmosfera.

São muitos os modelos numéricos atmosféricos utilizados para pesquisas e operação na previsão tanto do tempo quanto do clima. À medida que a capacidade de processamento computacional aumenta, e como se sabe este aumento atualmente é exponencial, cada vez mais completos e complexos tornam-se os modelos atmosféricos. De acordo com Shukla *et al.*, 2000 e Marengo *et al.*, 2001, nos últimos anos os Modelos de Circulação Global para simulação e previsão do comportamento da Atmosfera (MCG) têm se mostrado uma ferramenta útil na tarefa de previsão das anomalias sazonais de precipitação sobre diversas áreas do globo.

Os MCGs são alimentados pelos campos de TSM e vários são os trabalhos que podem ser encontrados na literatura, mostrando a influência dos campos destes campos sobre o NEB. Hastenrath e Heller (1977), Moura e Shukla (1981), Nobre e Shukla (1996), Pezzi e Cavalcanti (2001), Ropelewski e Halpert (1996), Sun *et al.* (2005b) e Uvo *et al.* (1998) são unânimes quando mostram que a variabilidade climática interanual da precipitação sobre NEB é uma consequência primária das anomalias de TSM, principalmente sobre os oceanos Pacífico e Atlântico equatoriais. Quanto à qualidade da previsibilidade das anomalias de temperatura sobre os oceanos, Repelli e Nobre (2004) e Zebiak e Cane (1987) concordam que estas podem ser previstas, com boa qualidade, com vários meses de antecedência. Já Moura e Hastenrath (2004) indicam que a detecção de modificações no quadro de TSM sobre os oceanos Pacífico e Atlântico, pode ser usada como base para previsões climáticas sobre o NEB. Confirmando isto, trabalhos recentes de revisão em previsão climática têm mostrado uma habilidade (*skill*) relativamente alta para

as previsões climáticas sobre o NEB (Carson 1998; Goddard *et al.*, 2001). O International Research Institute for Climate Prediction (IRI), já vem divulgando desde 1997, com alguns meses de antecedência, previsões globais de precipitação e temperatura (Mason *et al.*, 1999). Goddard *et al.* (2003) avaliaram as previsões feitas no IRI e indicam que existem skills positivos para temperatura e para a precipitação sobre a maioria das áreas continentais tropicais do globo, principalmente para a precipitação sobre o NEB.

Sperber e Palmer (1996) mostraram que os modelos atuais de Circulação Global da Atmosfera, quando alimentados pelos campos de TSM observados, podem reproduzir com bom grau de precisão, a dinâmica dos movimentos em larga escala da atmosfera, sobre a região nordeste da América do Sul. Entretanto, de acordo com Nobre *et al.* (2001), estes modelos não são capazes de resolver os padrões locais de precipitação, devido aos grandes espaçamentos utilizados nas grades de simulação dos modelos globais. O trabalho de refinamento e até aperfeiçoamento dos resultados gerados pelos modelos globais é uma tarefa dos modelos regionais que os executam através da técnica denominada de *Downscaling Dinâmico*. A técnica do Downscaling Dinâmico consiste no aninhamento de um modelo regional de simulação do comportamento da atmosfera, em um MCG, sendo o regional forçado uni e bidirecionalmente em todo o domínio (nudging de borda e central), pelas informações geradas como resultado do MCG (Nobre *et al.*, 2001; Dickinson *et al.*, 1989; Giorgi e Bates, 1989; Liu *et al.*, 1994).

Alguns autores, utilizando a técnica do downscaling dinâmico, realizaram o detalhamento de previsões de anomalias de precipitações sazonais obtidas a partir dos MCGs, comprovando a eficácia desta técnica. Ji e Vernekar (1997) utilizaram o modelo ETA do NCEP (National Centers for Environmental Prediction) aninhado ao MCGA do Center for Ocean-Land Atmosphere Studies (COLA), para detalhar as circulações de monções de verão sobre a região sul do continente Asiático. Christensen *et al.*, (1998), utilizou o modelo regional OPYC3 do Max Planck Institute for Meteorology, aninhado no MCGA ECHAM4, para obter o detalhamento sobre simulações climáticas realizadas para a região da Península Escandinávia. No Brasil, algumas áreas têm maior potencial de previsão sazonal de chuva, como é o caso do setor norte do Nordeste, região semi-árida, e sul do Brasil, enquanto outras, região Centro-Oeste e setores oeste e centro-sul da Amazônia essa previsibilidade é menor (Marengo *et al.*, 2001).

Chou *et al.* (2000) aninharam um modelo regional (o ETA) em um MCG (o CPTEC/COLA). Seus resultados para os períodos seco (agosto) e chuvoso (novembro) de 1997, mostraram que este aninhamento foi capaz de capturar o total de precipitação acumulada sobre a América do Sul e o sinal climatológico de ambos os meses. Mais especificamente para a Região Nordeste do Brasil, Nobre *et al.* (2001) fez um estudo da técnica de "Downscaling" com a simulação de três membros, aninhando um modelo regional espectral desenvolvido no National Center for Environmental Prediction - NCEP) em um Modelo de Circulação Global (o ECHAM 3, Max Plank Institute), com três diferentes condições iniciais para o período de fevereiro a maio de 1999. As simulações dentro do modelo regional foram feitas utilizando-se uma grade de 80 km de resolução, e outra menor com 20 km de resolução. Seus resultados mostraram um melhor desempenho na resolução de 80 km que na de 20 km. De acordo com os autores, a resolução de 20 km parece ter forçado um incremento da chuva, não consistente com a realidade, sobre as áreas de topografia mais elevada, indicando possíveis problemas na parametrização da convecção utilizada. É importante observar que este tipo de problema também pode acontecer devido à instabilidades numéricas computacionais (Pielke, 1984). Outro resultado interessante foi uma melhor previsão da posição e largura da *Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)* sobre o Atlântico Tropical obtida pelo Modelo Regional com 80 km de resolução, quando comparada com os resultados obtidos com o Modelo de Circulação Global (Nobre *et al.*, 2001). Ainda neste mesmo estudo, Nobre *et al.* (2001) sugeriram que os resultados do MRE com 80 km apresentariam a possibilidade da previsão da frequência de distribuição de dias secos e chuvosos dentro da quadra chuvosa do setor norte do Nordeste (período de fevereiro a maio).

De acordo com Sun *et al.* (2005a), os padrões de escala espacial mais fina que se desenvolvem nos modelos regionais podem ser atribuídos a basicamente três tipos de fonte: os efeitos causados por uma topografia da superfície mais detalhada, às não linearidades presentes nas equações que regem a dinâmica da atmosfera, e por instabilidades hidrodinâmicas.

Em se tratando de climatologia, o resultado mais importante de um modelo dinâmico é sua capacidade em reproduzir as estatísticas do comportamento da atmosfera. Frequentemente os resultados dos modelos atmosféricos apresentam tendências (bias) à valores diferentes daqueles observados na prática. Existem diferentes formas para a

correção específica das tendências Wilks (1995). Tucci *et al.* (2002) corrigiram as tendências encontradas nos dados da precipitação simulada para a bacia do rio Uruguai, geradas pelo modelo do CPTEC/INPE, através da utilização das curvas de frequência de ocorrência da intensidade da precipitação acumulada (função de densidade de probabilidade acumulada – probabilidade de ocorrência de um valor de precipitação inferior ao considerado).

Atualmente, as previsões do comportamento da atmosfera são feitas utilizando-se, basicamente, dois tipos de modelos: os Estatísticos e os Dinâmicos. Existem vantagens e desvantagens na utilização destes modelos. Os modelos estatísticos são mais simples e demandam baixo custo computacional. Os modelos dinâmicos, apesar de apresentarem um custo computacional maior, são elaborados essencialmente baseados na física que rege o comportamento da atmosfera.

Em um passado recente, a disponibilidade de recursos computacionais adequados era mínima e os modelos dinâmicos, conseqüentemente, pouco usados e conhecidos. Apenas grandes centros, com recursos computacionais de grande porte, podiam se permitir trabalhar com simulações e previsões dinâmicas do comportamento da atmosfera. Mesmo em nossos dias, quando os computadores apresentam-se mais disponíveis, os modelos globais com baixa resolução espacial e grande número de pontos de grade e os modelos regionais com menor número de pontos de grade, mas com alta resolução espacial, demandam alto custo computacional, ainda inviabilizando sua utilização em centros de pesquisa e operação menores. Por outro lado, a qualidade dos resultados obtidos através dos modelos dinâmicos em muitos casos ainda deixa a desejar, e a utilização operacional dos modelos estatísticos continua sendo uma alternativa viável (Galvão, 1999).

Mesmo num Downscaling Dinâmico de qualidade, onde a escala espacial dos resultados dos modelos globais torna-se mais refinada através da utilização dos modelos regionais, existe uma diferença de uma ou duas ordens de grandeza entre as escalas praticadas para resolver os processos atmosféricos e aquela utilizada para resolver os processos hidrológicos. A solução para estes casos reside no Downscaling Estatístico que transporta as informações da escala dos modelos dinâmicos regionais para a escala dos modelos hidrológicos. Os modelos estatísticos têm sido usados mesmo antes da existência dos modelos dinâmicos regionais para a realização do downscaling entre os resultados de modelos globais e pontos ou áreas de menor escala, na região em estudo. Vários trabalhos

recentemente publicados revêm os conceitos, perspectivas e limitações do downscaling estatístico (von Storch (1995), Hewitson and Crane (1996), Wilby and Wigley (1997) e Gyalistras *et al.* (1998)).

Métodos estatístico-estocásticos também têm sido utilizados para a realização da redução de escala em Climatologia. Os trabalhos de Hastenrah e Greischar, (1993), e Ward e Folland, (1991) são exemplos do uso destas técnicas para o setor norte do NEB. Outros trabalhos têm mostrado a previsão climatológica sazonal considerando a variabilidade pluviométrica intra-regional do setor norte do NEB (Repelli *et al.*, 1996; Azevedo *et al.*, 1998; Xavier *et al.*, 1999; Sansigolo; 1999). Pode-se citar também os experimentos numéricos e a modelagem matemático-física da atmosfera (Moura e Shukla, 1981; Mechoso *et al.*, 1990; Pezzi e Cavalcanti, 2001).

2.3 - Modelagem Hidrológica e Previsão de Vazão

O planejamento e o gerenciamento da utilização dos recursos hídricos em determinada região, são de fundamental importância para o desenvolvimento de sua sociedade. Uma das informações de grande interesse nesta área são os valores das vazões que escoam nas calhas dos rios. Normalmente os valores de vazão são obtidos com o auxílio das estações fluviométricas (ou fluviográficas), mas o número de estações deste tipo disponíveis é obviamente limitado. As séries de valores de vazão gerados nas estações fluviométricas, por razões humanas ou operacionais, frequentemente apresentam falhas que prejudicam sua utilização. Uma das formas mais usadas para o preenchimento de séries incompletas, ou até mesmo para a geração de séries onde não existem postos de coleta desta informação, é a utilização dos chamados “modelos hidrológicos”. Os modelos hidrológicos são constituídos por formulações físicas e/ou empíricas do comportamento, e dos fatores que influenciam o comportamento, da água escoada em determinado rio (Tucci, 1998).

A previsão de vazão pode ser feita através de diferentes formas. De acordo com Hipel (1985), estas podem ser baseadas em informações hidrológicas tais como séries de precipitação e séries de vazão. Zubair (2003) correlacionou a ocorrência do fenômeno do El Niño com vazões afluentes, ao longo do ano, na Bacia do Rio Mahaweli, no Sri Lanka. Verificou uma significativa relação entre eles, sugerindo possíveis contribuições para a

previsão de vazão. De uma forma mais abrangente, Souza Filho e Lall (2003) sugerem que a série prevista de valores de temperatura do mar pode ser diretamente usada para a previsão de afluências. De fato, como mencionado anteriormente, as previsões de valores de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) podem servir como uma base para as previsões climáticas sobre a região Nordeste do Brasil (Moura e Hastenrath, 2004). Estas por sua vez, alimentando como entrada um modelo chuva-vazão pré-calibrado, podem gerar previsões de valores de vazões. Os valores de precipitação sobre o NEB também podem ser previstos especificamente a partir de variáveis climáticas como o Dipolo de Temperatura do Atlântico, o El Niño (*ENSO - El Nino Southern Oscillation*) e outras variáveis de escala global (Hamlet e Lettenmaier, 1999). Estes valores também podem servir de entrada para modelos hidrológicos de chuva-vazão que, conseqüentemente, resultarão em previsões de vazões para área da bacia em questão.

Em hidrologia, as previsões de vazão com antecedência de algumas horas ou dias, são denominadas previsões de curto prazo, o que em meteorologia poderia ser considerado dentro da escala do *Tempo* (contraposta à escala do *Clima* – longo prazo). Elas diferem das previsões de médio prazo (ou *sazonais* com escala de tempo da ordem de meses), e das previsões de longo prazo (baseadas em probabilidades, análise de tendências ou cenários de mudanças climáticas). Seguindo a linha dos modelos que trabalham com o curto prazo, alguns trabalhos recentes são citados.

Yu *et al.* (1999) usaram um acoplamento unidirecional entre um modelo atmosférico de previsão de tempo (MM5) e um modelo hidrológico (HMS) para simular a vazão gerada pela passagem de três tempestades distintas, na região nordeste dos EUA. Os autores encontraram grandes similaridades entre os hidrogramas simulados e os observados, mas admitiram que uma melhor estruturação dos modelos e uma discretização paramétrica melhor resolvida, poderiam melhorar os resultados obtidos. Ibbitt *et al.* (2001) fizeram estimativas de vazão em algumas das bacias existentes ao longo de 500 km da porção sul dos Alpes New-Zelandianos. As medidas foram basicamente feitas para investigar os processos físicos responsáveis pelas fortes precipitações que ocorrem na região e para testar o modelo RAMS na previsão da precipitação.

A possibilidade de previsão de cheias na bacia do Lago Maggiore, localizada ao sul porção central da cordilheira alpina foi estudada por Jasper *et al.* (2002) que usaram dados de observações e previsões meteorológicas como entrada para com um modelo hidrológico

distribuído. Os autores afirmaram ser sua metodologia altamente promissora para possíveis realizações futuras de previsões de cheias em bacias similares. As técnicas de Função de auto correlação, Espectro de potências de Fourier, Análise integral de correlações, Algoritmos de falsos vizinhos mais próximos, e métodos de previsão não linear foram usadas por Islam e Silvakumar (2002) para obter informações preliminares sobre o comportamento das vazões e, através do conceito Fase-Espaço Multidimensional, caracterizar e prever a dinâmica do escoamento.

Tentando aumentar o tempo de previsão de vazão para operação dos reservatórios de água das montanhas da Serra Nevada, na Califórnia – EUA, Anderson *et al.* (2002), decidiram usar as previsões de tempo do modelo ETA, feitas no *National Center for Environmental Prediction* – EUA, como parte do processo. Como as previsões feitas com o modelo ETA poderiam oferecer uma margem de tempo de antecedência de até 48 horas, as vazões poderiam ser previstas com esta antecedência de 48 horas, além do tempo de permanência da bacia.

Tucci *et al.* (2003) apresentam os resultados de previsão de vazões afluentes ao reservatório de Machadinho, na bacia do rio Uruguai, através de previsões de chuva de curto prazo obtidas com o modelo ARPS e um modelo distribuído de chuva-vazão. Entre suas conclusões, Tucci *et al.* (2003) afirmam que o uso de previsões de chuva geradas desta forma, permite antecipar a ocorrência de cheias. Além disto, enfatizam a melhoria significativa das previsões de vazão em relação às alternativas da previsão com base na previsão de chuva nula, especialmente para tempos e antecedência superiores a 12 horas.

Ainda na linha do curto prazo, Oliveira *et al.* (2003) usaram pseudo-previsões de médias espaciais de precipitação diária, em modelo determinístico chuva-vazão, para a aplicação em um sistema de previsão de vazões à montante do reservatório do APM Manso (bacias dos rios Manso e Cuiabá no MS), enquanto Cicogna *et al.* (2003) trabalharam com um sistema de Rede Neural Nebulosa (modelo que combina as Redes Neurais com Lógica Fuzzy), para prever as vazões médias mensais do rio Paranapanema. Em seu trabalho, Cicogna *et al.* (2003) preocuparam-se mais em apresentar a metodologia que propriamente os resultados.

As metodologias empregadas para obtenção das previsões de vazão na escala de curto prazo podem ser aplicadas, obedecendo-se às suas respectivas características e limitações, às previsões de mais longo prazo (previsões climatológicas). Considerando a

necessidade de compatibilidade entre as escalas de simulação dos modelos atmosféricos e hidrológicos, Wilby *et al.* (1998) analisaram um “downscaling” estatístico dos dados de um modelo atmosférico para a área de uma bacia, onde um modelo hidrológico seria utilizado.

A utilidade de previsões hidrológicas modernas, através de conceitos e idéias de gerenciamento de recursos hídricos, combinadas com informações climáticas, foi enfatizada por Georgakakos *et al.* (2001) em seu trabalho para a Bacia do Lago Folsom, Califórnia. Anderson *et al.* (2001) estudaram as associações existentes entre o El Niño/Oscilação Sul (ENSO) com as distribuições de vazão, através da análise da distribuição de probabilidade de ocorrência de valores de vazão, e afirmaram que a distribuição de probabilidade da resposta hidrológica pode ser prevista através da caracterização dos valores de ENSO. Baldwin (2001) usou os índices climáticos Niño3 (Oceano Pacífico Equatorial representando o fenômeno El Niño), Oscilação Inter-Decadal do Pacífico e o índice do Oceano do Atlântico Norte, para previsão de aflúências em quatro reservatórios na cidade de Denver (*USA*). Tentando uma metodologia diferente, Obeysekera *et al.* (2001) usaram Redes Neurais para a previsão de vazões do Lago Okeechobee a partir de ocorrências do fenômeno El Niño.

Vazões que aconteceriam no Rio Uruguai foram previstas por Tucci *et al.* (2003) com diferentes antecedências mensais. Em seu trabalho eles usaram os resultados das previsões de clima elaboradas com o modelo numérico de simulação dinâmica do comportamento do clima do CPTEC/INPE, acoplado a um modelo hidrológico distribuído de chuva-vazão. Os autores observaram que as previsões feitas considerando a precipitação acumulada em períodos de três meses apresentaram melhores resultados que quando a previsão era para acúmulo de apenas um mês.

Atualmente os cálculos relativos à chuva-vazão e previsão de vazões podem ser facilmente obtidos através dos modelos disponíveis no mercado, com o uso de pacotes computacionais de simulação genéricos ou específicos. De acordo com Braga Jr., (1987), os modelos genéricos são mais flexíveis, enquanto os modelos específicos são mais rápidos e econômicos.

2.4 - Aplicações da modelagem em hidrologia

As primeiras tentativas de desenvolvimento de técnicas numéricas para a solução de problemas hidrológicos aconteceram durante a década de 60, com os trabalhos do “*Harvard Water Resources Group*”. Naquela época havia a preocupação e a necessidade em resolver este tipo de problema para se utilizar o potencial de águas subterrâneas, o que foi tentado através de programação linear (Braga Jr., 1987). O advento dos computadores, sua popularização e contínuo aperfeiçoamento, fizeram surgir novas técnicas de otimização. Kuhn e Tucker (1951) estão entre os pioneiros destas novas técnicas, usando a Programação Não Linear. A grande vantagem da Programação Não Linear está na sua flexibilidade, entretanto, se faz necessário considerar a existência de problemas relacionados à incerteza de que a solução ótima obtida possa ou não realmente ser um máximo global (Cardoso, 2003).

A partir da década de 70, as pesquisas e aplicações nesta área do conhecimento foram intensificadas. O rápido desenvolvimento dos computadores, possibilitou o surgimento de várias técnicas e grandes avanços no uso de métodos de otimização/simulação. As principais técnicas de otimização conhecidas são a Programação Linear, a Programação Não Linear, a Programação Dinâmica, a Programação utilizando Redes Neurais, a Programação Fuzzy e a programação utilizando Algoritmos Genéticos, entre outras. Detalhes sobre a estrutura, funcionamento e operação sobre estes métodos e técnicas, podem ser encontrados em Duan *et al* (2003).

Toda técnica de otimização apresenta vantagens e desvantagens. Para o caso da Programação Linear, Yeh, (1985) cita como vantagens a garantia de obtenção de valores ótimos globais, a não necessidade de uma política inicial de operação de reservatórios, a habilidade para se ajustar facilmente a problemas multidimensionais, e a quantidade razoável de pacotes computacionais que auxiliam na solução de problemas. Já Loucks *et al*. (1981) e Votruba, (1988) mencionam como principais desvantagens da Programação Linear, a hipótese de linearidade nas relações, particularmente na Função Objetivo, e a otimização em um único estágio (representação estática), enquanto o sistema é dinâmico, variando no tempo. Apesar de a Programação Linear apresentar limitações em sua utilização na operação determinística de reservatórios, vários trabalhos, com bons resultados, tem sido realizados. Começando por Dorfman (1962), podemos citar também

Grygier e Stedinger (1985), Yeh (1985), Ellis e Revelle (1988), Trezos (1991), Wurbs *et al.* (1993) e Wurbs (1996), todos com importantes aplicações da Programação Linear. Sigvaldason (1976) usou a programação linear através de sub-modelos agregados a um modelo de simulação para determinação da política de operação de 48 reservatórios na Bacia do *Trent River* em Ontario, Canadá. A Programação Linear também pode ser feita estocasticamente, através de métodos Markovianos, com recursão e com restrição probabilística. Aplicações nesta linha de atuação foram apresentadas por Loucks *et al.* (1981), Yeh (1985) e Wurbs (1996), que usaram o Planejamento Linear Estocástico para gerenciamento e operação de reservatórios.

Assim como na Programação Linear, a Programação Não Linear também tem suas vantagens e desvantagens. A grande vantagem da Programação Não Linear reside no fato de poder ser aplicada a praticamente todos os problemas de engenharia, o que não seria o caso da Programação Linear, já que a formulação matemática dos processos físicos que acontecem em engenharia é geralmente composta por fórmulas e equações não lineares. Por outro lado, a Programação Não Linear oferece a desvantagem de apresentar uma pesada carga computacional, além de fornecer soluções que podem não conter a solução ótima. Enfatizando as desvantagens deste método, Simonovic (1992) afirmou que a Programação Não Linear era tratada exclusivamente na literatura, sendo a possível ausência da solução ótima e a necessidade de computação pesada, as razões da sua não popularização. Apesar disto, algumas tentativas foram feitas (ex. Hicks *et al.*, 1974 e Hiew, 1987).

As principais técnicas de Programação Não Linear são a Programação Quadrática e a Programação Geométrica. Alguns trabalhos sobre Programação Quadrática são desenvolvidos por Powell (1983) e por Marino e Loaiciga (1985). Estes últimos formulam um modelo quadrático para obter regras de operação para o projeto do *California Central Valley*. Os principais trabalhos de Programação Não Linear com Programação Quadrática e Geométrica em Sistemas de Recursos Hídricos são apresentados por Yeh (1985), Simonovic (1992) e Wurbs (1996). Em publicação mais recente encontram-se os trabalhos de Barbosa *et al.* (2001) que estudaram o comportamento da operação de um sistema constituído de três reservatórios em paralelo, sujeitos à múltiplos usos localizados na Bacia do Capibaribe-PE; de Andrade *et al.* (2001) que apresentaram os resultados de estudos para operação ótima do sistema hídrico formado pelos reservatórios, em série, Jucazinho e

Carpina, e três perímetros de irrigação, localizado na Bacia do rio Capibaribe-PE; e de Curi e Curi (2001), que apresentaram o modelo ORNAP como uma ferramenta para maximizar múltiplos benefícios ou objetivos relativos aos múltiplos usos da água resultantes da operação de um sistema de reservatórios com vistas a dar subsídios para o planejamento ou gerenciamento de Bacias Hidrográficas. O modelo ORNAP de Curi e Curi (2001) foi desenvolvido no ambiente MATLAB e se baseia no algoritmo Nelder-Mead.

São várias as vantagens da Programação Dinâmica. Entre elas, Labadie (1987) cita a possibilidade de otimização em processos dinâmicos, a retro-alimentação das normas de decisão, e a simulação do comportamento real do sistema através de relações funcionais, tanto da função objetivo, quanto das restrições que são não lineares, convexas e até descontínuas. Entre as desvantagens podemos citar o fato de que, quanto maior o número de variáveis de estado, exponencialmente maior será a dimensão do sistema, o que constitui a chamada “maldição da dimensionalidade” (Votruba, 1988). Lima (2000) utilizou a programação dinâmica determinística para avaliar o atual sistema de abastecimento de água de Fortaleza, e concluiu que sua metodologia seria adequada para aqueles propósitos.

De acordo com Yeh (1985), a Programação Dinâmica pode ser utilizada em problemas de planejamento e operação de reservatórios, uma vez que podem ser representados em estágios seqüenciais. Os trabalhos de Yakowitz (1982), Goodman (1984) e Simonovic (1992), utilizando a Programação Dinâmica para solução de problemas em Sistemas de Recursos Hídricos merecem ser mencionados. Já Yakowitz (1982) utilizou esta metodologia para pesquisar o controle de sistemas de irrigação, a análise de operação de reservatório e a manutenção da qualidade de água. Ponnambalam e Adams (1996) sugerem que a otimização na operação de multi-reservatórios é um problema de larga escala, e que a utilização da Programação Dinâmica geralmente não apresenta bons resultados, devido ao problema da maldição da dimensionalidade. Uma combinação entre a Programação Dinâmica, os Processos Estocásticos e a Simulação para a Otimização da operação de sistemas de abastecimento de água, também tem sido usada, como pode ser visto em Butcher (1971), Su e Deininger (1974), e Mawer e Thorn (1974).

Uma outra metodologia, também usada para otimização em sistemas de Recursos Hídricos, faz uso das chamadas Redes Neurais Artificiais. Valença e Ludermir (1999) descrevem a metodologia de Redes Neurais como sendo uma composição de modelos

matemáticos que, de uma maneira geral, tentam imitar o cérebro humano e produzir alguma forma de inteligência artificial. Algumas críticas à utilização das Redes Neurais, podem ser encontradas na literatura. Minsky e Papert (1969), por exemplo, criticaram as redes *Perceptron* (modelo mais simples de Rede Neural, no qual várias unidades de processamento estão conectadas unicamente a uma unidade de saída através de pesos (Rosenblatt, 1960)), porque estas não resolveriam problemas bastante simples. Apesar disto, várias aplicações de Redes Neurais em Recursos Hídricos, têm sido feitas. Como exemplo podemos citar (Rashid e Wong, 1992) que usaram esta metodologia para a determinação de parâmetros de aquíferos, Karunanithi *et al.* (1994), na previsão de vazões e Raman e Chandramouli, (1996) na operação de barragens.

Uma das formas mais recentemente usadas para algumas aplicações na área de recursos hídricos é a Programação Fuzzy. Detalhes sobre a lógica Fuzzy podem ser obtidos em Zadeh (1965), que foi o primeiro a tratar deste assunto. A lógica Fuzzy tem sido utilizada em muitas áreas da ciência aplicada, particularmente onde a pertinência na relação entre alguns fatores possa ser tratada como relativa. Exemplos de casos assim podem ser vistos em Klir e Folger (1988). Zadeh e Kacprzyk (1992), Kosko (1992 e 1993), Pedrycz (1993), e Mcneill e Thro (1994).

Kindler (1992) e Parent e Duckstein (1993) afirmam que a Lógica Fuzzy pode ser usada em recursos hídricos, como um refinamento das técnicas convencionais de otimização. De acordo com Kosko e Isaka (1993), as aplicações da Lógica *Fuzzy* em recursos hídricos, apresentam maior chance de sucesso quando acontecem em sistemas com poucas variáveis. Apesar de afirmarem que o uso da Lógica Fuzzy em recursos hídricos está sujeita à maldição da dimensionalidade, Campbell (1993), Tamaki (1994) e Agsorn (1995) são unânimes quando também afirmam que o sistema resultante seria suficientemente robusto para não ter seu desempenho comprometido.

Alguns trabalhos publicados têm mostrado a aplicabilidade da Lógica Fuzzy em recursos hídricos. Por exemplo, Russell e Campbell (1996) usaram a Lógica Fuzzy no controle da operação de um reservatório no Rio Powell, ao Norte de Vancouver, Canadá, para geração de energia. Já Galvão e Ikebuchi (1992) usaram a Lógica Fuzzy para simular, de uma forma simples, em situações de escassez, o processo usual de tomada de decisão em um reservatório.

A Simulação de Monte Carlo também pode ser usada como parte integrante dos modelos hidrológicos. Studart e Campos (2001) usaram este método para testar a influência da escolha dos valores iniciais de vazão na modelagem hidrológica elaborada para as regiões semi-áridas. Verificaram que esta influência existe e é bastante significativa, sendo, de acordo com eles, necessário a decisão por um adequado valor inicial de vazão.

Existem situações onde o problema é mais complexo, com múltiplos máximos e mínimos, e para os quais não existe um algoritmo de otimização eficiente conhecido para resolvê-los. Nestes casos, é possível a utilização dos chamados Algoritmos Genéticos (Goldberg, 1989, e Lacerda e Carvalho, 1999). Seguindo esta linha de trabalho, Tung et al (2003) propuseram e aplicaram um procedimento de Algoritmo Genético para aperfeiçoar as regras de operação em um reservatório, em Taiwan. Em suas conclusões afirmaram que a otimização das operações utilizando Algoritmos Genéticos pode fornecer resultados melhores e mais realísticos que outros. Um outro exemplo da utilização deste tipo de algoritmos pode ser encontrada na dissertação de Diniz (1994) que propôs um modelo para calibração automática de modelos chuva-vazão que usa algoritmo genético.

2.5 - Estimativas de Erros

As previsões em geral têm sempre um risco associado, gerando certa insegurança por parte das empresas que fazem a previsão, em passarem informações a órgãos externos que não tenham o entendimento técnico e que possam vir a não compreender a margem de incertezas existente na previsão (Oliveira *et al.*, 2003). Afirmando que as incertezas no processo de previsão, utilizando a modelagem dinâmica e/ou estatística, ainda seriam altas (já que os modelos precisam e podem ser melhorados, e que os coeficientes de correlação encontrados seriam da ordem de 0,6), Galvão (1999) apresentou resultados de um acoplamento entre um modelo dinâmico global e um estatístico e obteve uma melhoria 17% na qualidade de sua previsão, em relação à qualidade da previsão de referência (média climatológica).

A estimativa das discrepâncias que poderão acontecer entre os valores previstos e aqueles que realmente acontecerão, pode ser entendida como o cálculo do possível erro existente no processo. Estas estimativas são de grande importância para os tomadores de

decisão, pois permitem uma análise de qual seja o risco envolvido nos processos sob sua responsabilidade. O detalhamento, ou quantificação da propagação destes erros ao longo de todas as etapas e variáveis, parâmetros e coeficientes envolvidos no processo, precisariam ser obtidas (Buras *et al.*, 1991). Vários são os trabalhos que seguem esta linha, incluindo aqueles de Krzysztofowicz e outros (Krzysztofowicz, 1983, 1986a,b, 1991, 1992; Krzysztofowicz e Watada, 1986; Krzysztofowicz e Reese, 1991).

As formas de abordagem da quantificação os erros também são diversas. Usando uma 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) por outro lado, acha esta metodologia restritiva, já que é necessário supor subjetivamente uma distribuição de probabilidade para cada parâmetro do modelo. Quando a quantificação torna-se difícil, Denoeux *et al.* (1991) sugerem a utilização de intervalos qualitativos para a apresentação dos resultados.

Intervalos de confiança associados a previsões de precipitação e vazão, a partir de preditores climáticos de larga escala, foram usados por Liu *et al.* (1998), enquanto a metodologia de reamostragem sobre as previsões probabilísticas de precipitação foi usada tanto por Croley (1996, 1997) quanto por Briggs e Wilks (1996). O trabalho de Briggs e Wilks (1996) visava a estimativa das distribuições de probabilidade de vazão e umidade do solo.

De uma maneira mais prática, os erros podem ser quantificados como sendo o resultado integrado dos erros gerados pelas várias partes do sistema que vão sendo acumulados durante o processo. Os erros embutidos nos valores estimados ou previstos podem então ser quantificados quando comparados com os valores observados.

2.6 - O trabalho na Funceme

Como um centro de excelência em Hidrologia, Comportamento Atmosférico Regional, e na Previsão de Tempo e de Clima Regionais, a Funceme também faz uso de Modelos Hidrológicos e Atmosféricos. Os trabalhos de pesquisa e previsão do comportamento da atmosfera realizados pela Funceme, podem ser considerados dentro do

“estado da arte” nesta linha de atuação, e encontram-se em consonância com aqueles realizados nos maiores centros de pesquisas e operação no mundo.

Com o apoio de um convênio celebrado com o International Research Institute (IRI - USA), a Funceme montou em 2002 uma *Suíte Operacional* (suíte RSM) para elaboração de previsões climáticas para o NEB, e mais particularmente para o Estado do Ceará, a partir do modelo numérico regional RSM. Este trabalho realizado na Funceme constitui-se do primeiro sistema operacional de detalhamento (downscaling) dinâmico para previsão regional do clima no mundo (Sun *et al.*, 2005b). Como o modelo regional trabalha baseado nos resultados de um modelo global, estes viriam do ECHAM 4.5, gerados no IRI. Detalhes sobre os modelos RSM e ECHAM, assim como sobre a forma de processamento, são fornecidos no capítulo de Material e Métodos neste trabalho.

A suíte RSM da Funceme (doravante apenas *suíte RSM*) tem sido testada por alguns autores. Alves *et al.* (2002) fizeram uma avaliação preliminar da simulação da precipitação na suíte RSM e mostraram que os coeficientes de correlação entre as precipitações simuladas e observadas para cada um dos pixels da área em questão, foram iguais ou superiores a 0,6 para todas as áreas dentro do Estado do Ceará, considerando-se os meses de fevereiro a maio. Alves *et al.* (2002) também apresentaram os índices de *skill* deste sistema, para três (Seco, Normal e Chuvoso – fig. 2.1a) e cinco (Muito Seco, Seco, Normal, Chuvoso e Muito Chuvoso – fig. 2.1b) categorias. Com três categorias o MRE conseguiu simular a categoria em mais de 50% e em algumas áreas acima de 60% dos anos. Para cinco categorias o "Skill" foi menor, da ordem de 30% a 40% (fig. 2.1 abaixo).

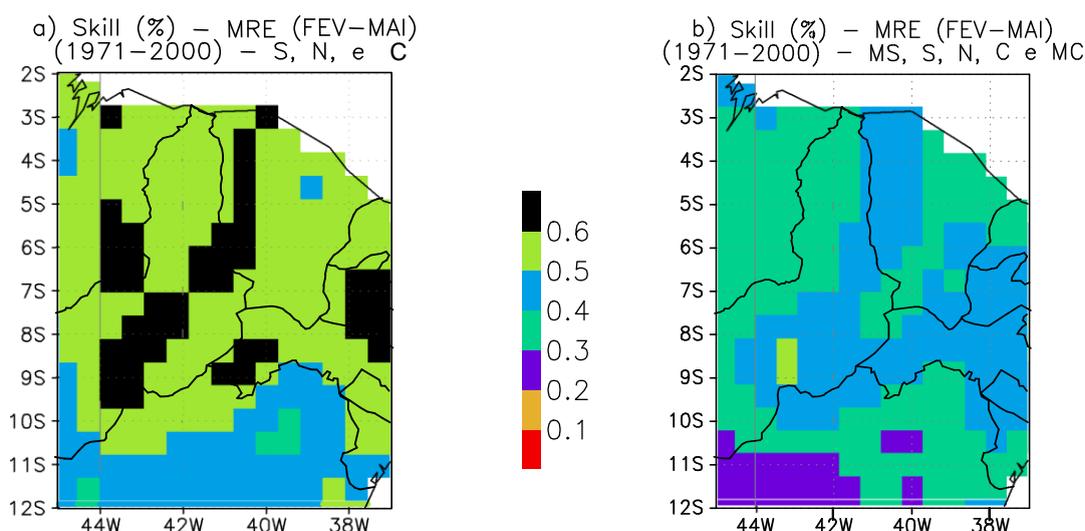


Figura 2.1 - Skill do MRE para: a) - três categorias e b) - cinco categorias (Alves *et al.*, 2002).

Alves *et al.* (2002) também apresentaram as distribuições espaciais das variâncias dos valores de precipitação observados e dos simulados pelo modelo. Observaram a predominância espacial da variância dos valores simulados sendo superior àquela dos valores observados e que em algumas áreas, a principal variável de controle, a TSM, seria responsável por mais de 60% da variância total. Para os anos de El Niño, foi observada a baixa dispersão entre os membros da simulação e que a correlação entre os valores simulados e observados foi superior a 0.6.

Silva *et al.* (2002) apresentaram a climatologia da precipitação do RSM e seus desvios com relação aos valores de precipitação observados (Fig. 2.2 - esquerda e direita, respectivamente, abaixo), para o total de precipitação acumulado nos meses de fevereiro a maio. Os desvios observados mostraram as tendências geradas pelo modelo e, para o caso da distribuição espacial sobre o Estado do Ceará verificou-se que o modelo tende predominantemente a diminuir os valores dos totais de precipitação do período. Esta informação é útil para corrigir os valores previstos de precipitação.

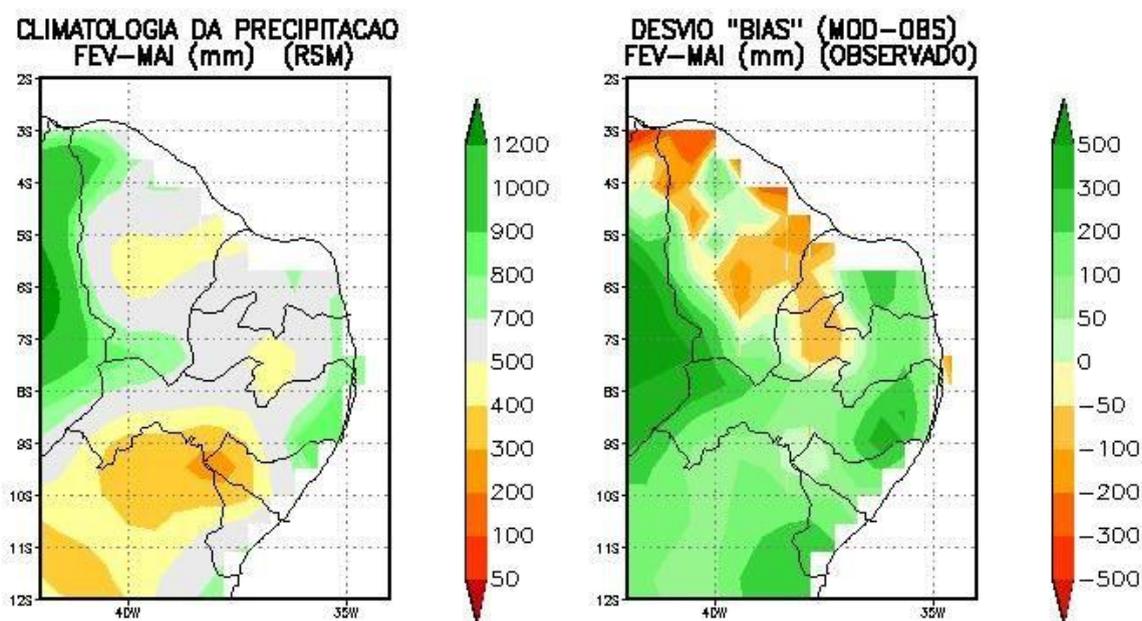


Figura 2.2 - Climatologia e tendências encontradas no RSM para o período de simulação (1971-2000), da esquerda para a direita respectivamente. (Adaptada de Silva et al. 2002)

O desempenho da suíte RSM, é satisfatório para a simulação do total médio de precipitação para o setor norte do Nordeste brasileiro Silva *et al.* (2002). Esta conclusão baseou-se em valores de até 0,8 para a correlação encontrada entre a precipitação

observada e a simulada pelo RSM, para algumas áreas do Estado do Ceará. Estes valores de correlação explicariam da ordem de 64% da variabilidade da precipitação nestas regiões.

Moncunil *et al.* (2002) fizeram uma breve descrição do sistema de previsão climática regionalizada da Funceme e apresentaram a distribuição espacial da correlação entre as anomalias (diferença entre os valores obtidos e o valor da média climatológica para cada mês) de precipitação simulada e observada para os meses de março a maio (Fig. 2.3 abaixo). Enfatizaram que estes seriam os limites superiores da previsão regionalizada, já que as correlações foram obtidas a partir dos valores de TSM observados.

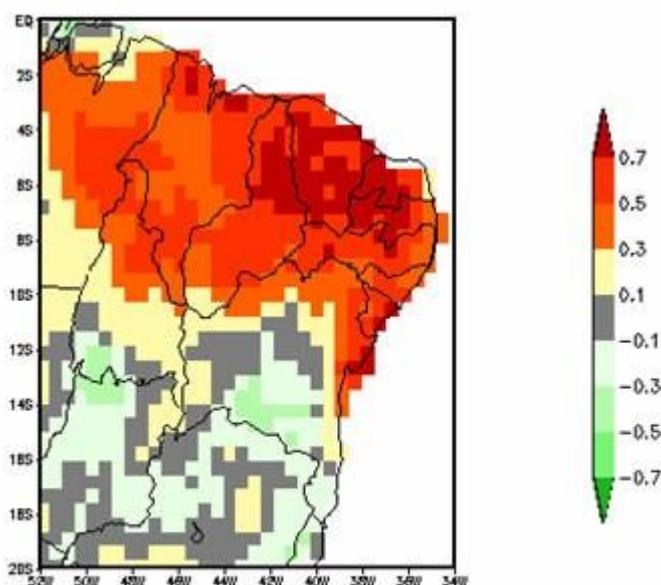


Figura 2.3 - Distribuição espacial da correlação entre as anomalias dos valores de precipitação simulados e os observados. (Adaptada de Moncunil *et al.* 2002)

Em seu trabalho, Moncunil *et al.* (2002) apresentaram a previsão obtida pela suíte RSM, em 2002, tendo esta previsão sido apresentada em termos probabilísticos.

Uma descrição mais detalhada sobre o desempenho do RSM para o Nordeste do Brasil, e particularmente sobre o Estado do Ceará, é dada por Sun *et al.* (2005a). Devido ao grande espaçamento de grade normalmente usado, as oscilações de menor escala não podem ser simuladas pelos Modelos Globais (o ECHAM, no nosso caso). Interessados em analisar a capacidade da reprodução adequada das informações de larga escala pelo modelo regional, Sun *et al.* (2005a) mostram que as oscilações de menor escala apresentaram-se evidentes como função das características de topografia, tipo de solo, vegetação e

cobertura hídrica da região. Quanto à possibilidade das informações na escala espacial mais fina poderem ser previsíveis e se o caráter temporal da variabilidade seria previsível pelo RSM, os autores afirmam que a maior parte dos eventos climatológicos observados sobre a região, pôde ser simulada pelo RSM.

Três previsões de clima usando este sistema foram realizadas até o presente. Sun *et al.* (2005b) usaram o *revised Ranked Probability Skill Score* (rRPSS) (Mason, 2004), para avaliar a qualidade das previsões já realizadas na Funceme. De acordo com o rRPSS, o sistema apresenta máxima habilidade na previsão quando o resultado obtido é de 100%. Um resultado de rRPSS nulo (igual a zero) significa que esta previsão não é melhor (nem pior) que a climatologia. Valores de rRPSS negativos significam que usar a climatologia como previsor é mais acertado que o uso da previsão feita pelo modelo. Em geral, Sun *et al.* (2005b) encontraram que, em anos de extremos (muita ou muito pouca chuva), o sistema apresenta os melhores resultados. Em anos onde a precipitação observada encontra-se próximo à média climatologia, a qualidade destes resultados cai significativamente. Isto foi observado para as previsões feitas com o sistema na Funceme, para os anos de 2002-2004, quando se observou que o total de precipitação ocorrido esteve próximo dos valores climatológicos e os resultados do rRPSS encontrados não foram muito bons. Estes resultados melhoraram quando os totais de chuva previstos apenas para os meses março a maio e de abril a junho foram considerados. A má qualidade dos resultados obtidos para os períodos de janeiro a março e de fevereiro a abril, deve-se provavelmente às tendências encontradas nos campos de TSM previstas para o oceano Atlântico (Sun *et al.*, 2005b).

Mais recentemente, a Funceme implantou uma outra suíte operacional para previsão de clima (atualmente com 30 computadores, contra os 14 da outra suíte), de processamento mais rápido (2,8MHz contra 1MHz da suíte anterior), para realizar a previsão de clima usando um outro modelo regional, o RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), desenvolvido na Colorado State University – USA (Pielke *et al.*, 1992). Resultados preliminares apontam o RAMS como um bom modelo para este trabalho, inclusive apresentando um grau de habilidade (Skill) para os meses de janeiro e fevereiro, maiores que aqueles observados com o RSM (Dr. Alexandre Costa, Chefe do Dpto. de Meteorologia da FUNCEME – comunicação pessoal).

A previsão da quantidade de chuva a ser precipitada sobre a região norte do Nordeste do Brasil durante a chamada “Quadra Chuvosa” (período que compreende de fevereiro a maio), é feita de forma consensual. Uma vez por ano, antes do período das chuvas, a Funceme promove uma reunião onde convidados de várias instituições brasileiras e estrangeiras comparecem para apresentar os resultados de suas pesquisas e metodologias e, através de uma exaustiva análise e consenso, divulgar a previsão para a quadra chuvosa seguinte. Este trabalho, que vem sendo desenvolvido já há vários anos na Funceme, envolve resultados de modelos estatísticos, dinâmicos e conceituais. A suíte RSM é, então, apenas uma parte do processo de previsão climática da Funceme.

Nosso sistema de previsão de vazão é composto em sua grande maioria pela suíte RSM que tem como base a previsão da Temperatura da Superfície do Mar (TSM). Uma vez previstos estes valores alimentam os modelos globais de simulação do comportamento da atmosfera que, por sua vez, geram um conjunto de valores que são utilizados pelos modelos regionais para suas simulações. Os valores de precipitação gerados pelos modelos regionais podem então, como uma alternativa, servir de entrada para alimentar os modelos hidrológicos que, finalmente, produzem as desejadas previsões de vazão. Neste momento, é de extrema importância observar que a qualidade das TSM previstas deve ser suficiente para que o comportamento da atmosfera, simulado pelos modelos Global e Regional, e as vazões geradas pelo modelo Hidrológico, ainda apresentem qualidade suficiente para serem úteis.

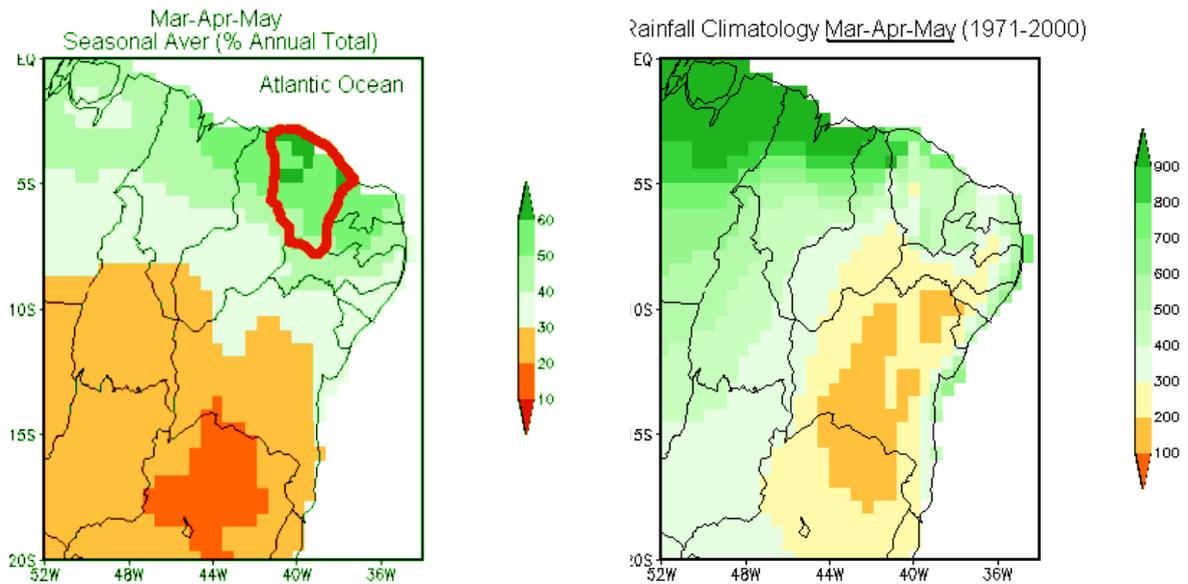
3 – MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Alguns aspectos climáticos do Estado Ceará

O Ceará é um dos nove Estados que compõem o NEB. Como se sabe, esta região é caracterizada por seu clima semi-árido e por índices que apresentam pouca, e espacialmente má distribuída, precipitação. Estando localizado na porção mais ao norte da região, o Estado do Ceará tem como principal responsável por seu regime pluviométrico a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), uma faixa de nuvens predominantemente dos tipos cumulus e cumulonimbus, que se estende ao longo da faixa equatorial terrestre. Em termos médios ao longo do ano, o posicionamento médio da ZCIT oscila entre as latitudes de 10°N e 5°S, como função do movimento aparente do sol e do conseqüente aquecimento e resfriamento da superfície do mar. Em média, a temperatura da superfície no hemisfério norte é maior que no hemisfério sul. Esta diferença é a causa para o desvio médio do posicionamento da ZCIT em direção ao norte. Climatologicamente, a ZCIT encontra-se posicionada sobre o NEB durante os meses de fevereiro a maio de cada ano, período este que caracteriza a chamada “quadra chuvosa”.

A variação da TSM ao longo do ano, apresenta desvios temporais e oscilações significativas de um ano para o outro. Isto faz com que o posicionamento da ZCIT também sofra variações, atingindo latitudes mais ao sul quando as TSMs do Atlântico Sul encontram-se mais altas que a média climatológica (em contraste com as TSMs do Atlântico Norte) - anos mais chuvosos, e menos ao sul, na situação inversa - anos menos chuvosos.

As figuras 3.1a e b abaixo mostram respectivamente, o percentual da precipitação total anual climatologicamente concentrado e os valores totais médios, durante os meses de março a maio, referentes ao período entre os anos de 1971 e 2000 (inclusive). Os limites políticos do Estado do Ceará são evidenciados por uma linha vermelha, na primeira destas figuras. Observa-se que a concentração climatológica da precipitação durante os meses centrais do primeiro semestre (março a maio) no Estado do Ceará é superior a 50% do total anual, e que os totais para este período oscilam entre valores de 400mm a 900mm. Conclui-se, portanto, que as previsões de precipitação e de vazão durante o período indicado corresponderiam a previsões de altos percentuais dos totais anuais.



3.2 - A área em estudo

A área escolhida para a realização deste estudo foi aquela que contém a porção superior da bacia hidrográfica do rio Acaraú, com exutório na Fazenda Cajazeiras. A estação fluviométrica da Fazenda Cajazeiras está localizada aproximadamente a 10km acima (sul) do ponto central da barragem principal do açude de Araras e aproximadamente 1km ao norte da cidade de Conceição, no quadrante noroeste do Estado do Ceará (latitude 4°22'43"S; longitude 40°32'48"W), e a 190m de altitude (Fig. 3.2), no município de Hidrolândia.

Apresentando uma forma alongada com escoamento de sudeste para noroeste, (fig. 3.2) a bacia da Fazenda Cajazeiras é parte de uma planície com solos rasos que, com exceção das cabeceiras de seus tributários, apresenta topografia suave, cobrindo uma área aproximada de 1.550km². A Figura 3.2 abaixo é constituída por um mapa da região onde podem ser observadas as características de relevo, as dimensões da bacia estudada e os limites da sub-bacia do rio Acaraú, com exutório na Fazenda Cajazeiras. Nesta figura podem ser observadas também a relação da sub-bacia com seus rios e lagos, e pontos característicos tais como povoações, estradas e limites políticos. A estação fluviométrica da Fazenda Cajazeiras encontra-se em operação já a mais de 30 anos.

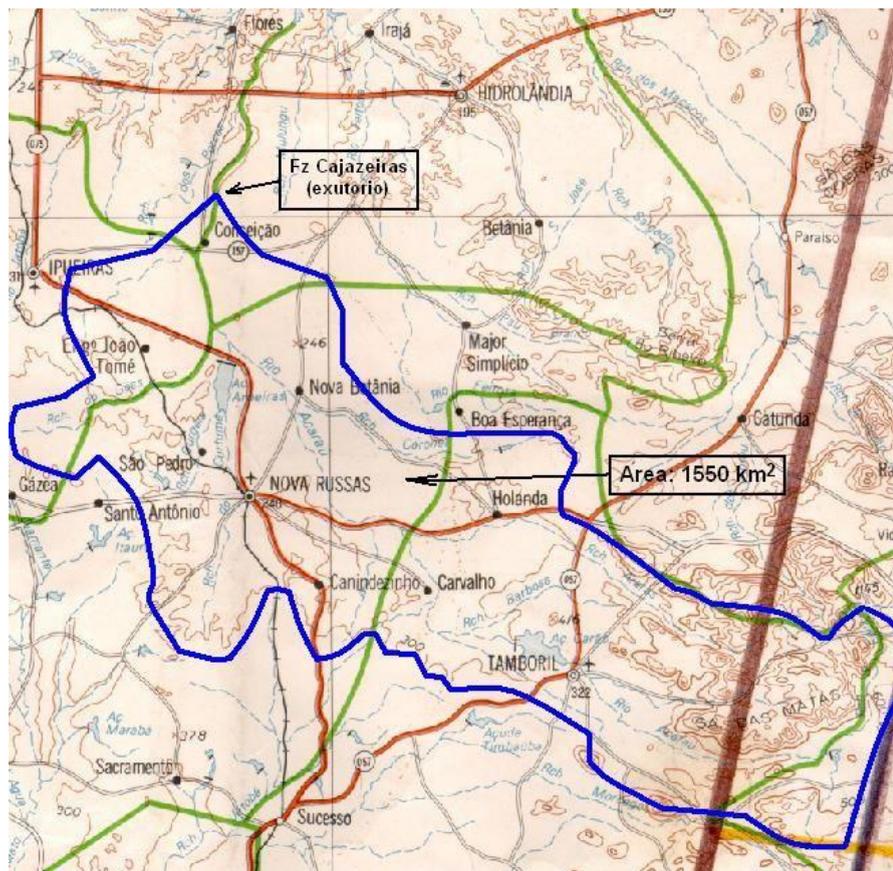


Figura 3.2 - Bacia correspondente à porção superior do rio Acaraú.

Esta bacia foi escolhida por apresentar um clima semi-árido, com tipo de solo, relevo e vegetação característicos de um alto percentual das demais regiões do Estado do Ceará, além da existência de séries de precipitação e vazão simultâneas. O conjunto de dados utilizados neste trabalho é composto pelos totais mensais de precipitação e de vazão, apresentados mais adiante, todos referentes ao período do ano de 1970 ao ano de 2000.

3.3 - Os dados utilizados

3.3.1 - Dados de TSM

As TSMs são usadas neste trabalho de duas formas básicas. TSMs observadas e TSMs previstas. Para elaboração dos modelos estatísticos foram usados os dados de TSM observada disponibilizados pela NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder Colorado EUA, em sua página na internet (<http://www.cdc.noaa.gov/correlation>). Ali, os campos de TSM são encontrados na forma de pixels que contêm médias espaciais cobrindo

a superfície dos oceanos. Nesta página pode-se encontrar um sistema automatizado que permite a inserção de séries particulares de dados, para o cálculo dos campos de correlação. As TSMs observadas são aqui usadas como base para a análise de sua regressão com os valores de precipitação e vazão da bacia.

As TSMs observadas, extraída do Banco de Dados do IRI, pertencentes ao conjunto de dados chamado de *Interpolação Ótima* (Reynolds e Smith, 1994), e previstas, como descrito mais adiante, foram usadas como base (dados de entrada) para a modelagem dinâmica da atmosfera. Os valores de TSM do período de 1971-2000, cobrindo todos os oceanos, foram interpolados para a grade dos modelos Global e Regional sendo usados para ajustes, calibração e cálculo de suas climatologias. Valores de TSM previstos e persistidos foram usados para obtenção das previsões de chuva feitas com os modelos atmosféricos dinâmicos.

3.3.2 - Dados de Precipitação

A quantidade de dados de precipitação disponível para análise sobre a região Nordeste do Brasil e, particularmente sobre os oceanos adjacentes, não é muito grande. Os dados utilizados para o cálculo da climatologia da precipitação sobre o NEB, e para servirem de base para comparação com os resultados dos modelos, são uma composição de vários conjuntos de dados observacionais. Espera-se, com a utilização destes dados, obter uma informação de boa qualidade sem que a cobertura espacial seja comprometida.

Os dados utilizados na modelagem dinâmica da atmosfera tiveram como base o conjunto de dados de precipitação global, com 0,5 graus de resolução, do *Climate Research Unit* da University of East Anglia (conjunto de dados CRU05, New *et al.*, 2000). Este conjunto de dados cobre o período de 1901 até 1996, mas neste trabalho apenas o período de 1971 até 1996 é usado devido ao período de simulação dos modelos. Mais de 19.800 estações foram utilizadas para construir este conjunto de dados, sobre o qual um extensivo controle de qualidade foi aplicado. Como não existem dados sobre os oceanos, os dados do CRU05 foram linearmente interpolados para a grade do modelo.

Sobre o Brasil, a precipitação mensal obtida no Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, com resolução de 0,25 graus, para o período de 1994 a 2000, foram linearmente interpolados para a grade do modelo. O conjunto de dados do INMET foi construído a

partir de um conjunto de estações com densidade maior que a do usado no CRU05, mas parece ter sofrido um controle de qualidade inferior ao do CRU05. Onde estiveram disponíveis, estes dois conjuntos de dados receberam pesos iguais na sua utilização.

Um terceiro conjunto de dados é composto por 95 estações, aproximadamente bem distribuídas ao longo do Estado do Ceará, cobrindo o período desde 1971 a 2000, coletados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Os dados da FUNCEME passaram por uma extensiva análise de controle de qualidade (Xavier e Xavier, 1998). O conjunto de dados final teve como base a composição entre os dados do CRU05 e do INMET, exceto para o Estado do Ceará onde foram utilizados apenas os dados da FUNCEME, sendo os resultados interpolados para a grade do modelo.

Para a área da bacia da Fazenda Cajazeiras, os dados usados foram aqueles observados através das estações pluviométricas da FUNCEME. Como várias das estações pluviométricas com influência sobre a área da bacia na Fazenda Cajazeiras não se encontravam entre as 95 estações usadas no trabalho de consistência dos dados de precipitação do banco de dados da FUNCEME, optamos por também utiliza-las em nosso trabalho. Desta forma, uma nova série de dados foi gerada contendo as médias mensais de precipitação calculadas a partir dos conjuntos de estações com influência sobre a área da bacia, que possuíam dados a cada mês ao longo de suas séries.

Das estações pluviométricas operadas pela FUNCEME existentes na região, as que, de acordo com o Método de Thiessen, tinham influência dentro da área da bacia, foram escolhidas para utilização neste trabalho e são apresentadas na Tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1 - Estações Pluviométricas que forneceram dados para este trabalho, com suas respectivas localidades e posição geográfica.

Est.	Localidade	Município	Latitude	Longitude
A	HIDROLANDIA	HIDROLANDIA	4°25'S	40°24'W
B	IPUEIRAS	IPUEIRAS	4°32'S	40°43'W
C	MONSENHOR TABOSA	MONSENHOR TABOSA	4°48'S	40°04'W
D	NOVA RUSSAS	NOVA RUSSAS	4°43'S	40°34'W
E	TAMBORIL	TAMBORIL	4°50'S	40°20'W
F	LOGRADOURO	SANTA QUITERIA	5°05'S	40°08'W
G	ENGENHEIRO JOAO TOME	IPUEIRAS	4°36'S	40°38'W
H	GAZEA	IPUEIRAS	4°24'S	40°27'W
I	BOA ESPERANCA	TAMBORIL	4°38'S	40°23'W
J	CURATIS	TAMBORIL	4°59'S	40°12'W
K	SUCESSO	TAMBORIL	4°56'S	40°32'W

3.3.3 - Dados de Vazão

Os dados de vazão foram coletados na estação fluviométrica da Fazenda Cajazeiras, localizada como anteriormente já descrito. Estes dados contemplam uma série de totais diários de vazão, coletada durante o período compreendido desde o ano 1971 até o ano de 2000. A partir desta série, foi calculada a série de totais mensais de vazão, para a mesma estação. A coleta e consistência destes dados são rotineiramente feitas pela Agência Nacional de Águas (ANA), através da CPRM no Estado do Ceará, o que assegurou a disponibilização de uma série completa sem qualquer tipo de falhas.

3.4 - Modelagem Numérica

A principal fonte da energia responsável pela manutenção da vida na terra, é o sol. Parte desta energia é usada pela atmosfera como combustível para a sua dinâmica. De acordo com a lei de Stephan-Boltzman, os comprimentos de onda da energia eletromagnética emitida por um corpo qualquer, é função de sua temperatura. Como a temperatura da superfície solar é de aproximadamente 6000 graus Kelvin, o espectro eletromagnético de sua radiação apresenta comprimentos de onda que giram em torno daqueles perceptíveis ao olho humano (o chamado visível), e é denominado de “ondas curtas”. A composição química da atmosfera, por sua vez, permite a passagem livre da maior parte da energia solar capturada pelo sistema terra atmosfera, com o conseqüente aquecimento da superfície. A principal fonte de energia para o movimento atmosférico, desta forma, reside na superfície terrestre.

Devido a grande quantidade de energia que pode ser armazenada e liberada pelos oceanos, este é apontado como sendo um dos principais responsáveis, em médio prazo, pelo comportamento atmosférico. Este fato é então utilizado para o prognóstico da evolução mais provável do comportamento da atmosfera, numa escala de tempo da ordem de meses que depende do tamanho da bacia oceânica.

O conhecimento do ciclo hidrológico, aliado à capacidade de cálculos dos computadores atuais, permite a elaboração de sistemas numéricos computacionais para a simulação, com nível aceitável de precisão, do comportamento hidrológico na biosfera. Este tipo de sistema, denominado Modelo Numérico - ou simplesmente Modelo, tem por

finalidade simular e integrar os vários processos físicos que ocorrem durante as relações existentes entre a atmosfera e a superfície terrestre, para facilitar seu entendimento e até possibilitar a previsão de seu comportamento futuro. De uma maneira geral, quanto mais completos e precisos forem os sistemas, melhores os resultados obtidos. O detalhamento destes sistemas, entretanto, demanda, além da necessidade de um conhecimento mais detalhado sobre o comportamento do meio ambiente, uma maior capacidade computacional. A utilização deste tipo de sistema pressupõe a existência de um equilíbrio entre a capacidade de produção de bons resultados e sua exequibilidade computacional.

Atualmente existem inúmeros modelos numéricos que simulam o comportamento do meio ambiente, incluindo os oceânicos, os atmosféricos e os hidrológicos.

3.4.1 - A modelagem da Temperatura da Superfície do Mar

Como visto anteriormente, o comportamento da atmosfera em médio prazo, é fortemente influenciado pela evolução do campo de Temperatura da Superfície do Mar (TSM). Sendo o nosso sistema baseado na evolução do campo de TSM, é de grande importância a existência e disponibilidade desta informação.

As pesquisas relativas às previsões de TSM ainda encontram-se em fase embrionária. Em muitos casos, a persistência nos campos de TSM tem sido usada como uma das formas de previsão. Os modelos atuais de previsão, por outro lado, têm apresentado resultados que, embora geralmente melhores que aqueles da persistência, não têm mostrado melhorias muito significativas. Espera-se, com o rápido avanço nesta área de pesquisa, que em breve tenhamos resultados que satisfaçam às necessidades e os interesses na previsão de TSM.

As TSMs usadas para a modelagem dinâmica neste trabalho são obtidas no IRI, e servem de entrada para o modelo global. Estas são de dois tipos, observadas e previstas. As TSMs previstas são divididas em outros dois tipos: as simuladas e as persistidas (que são usadas como uma espécie de previsão). A TSM observada é utilizada no modo de simulação, para verificação e calibração dos modelos dinâmicos. Para previsão dos valores de precipitação e de vazão, são usadas as TSMs previstas através de simulação e as persistidas.

As simulações e previsões dos campos de TSM estão fora da abrangência deste trabalho. As previsões para a TSM são feitas usando-se uma combinação de modelos dinâmicos e estatísticos. O modelo de maior peso para o caso da TSM do Pacífico é o modelo acoplado, oceano-atmosfera do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) (Ji *et al.*, 1994ab e 1998). Previsões feitas com outros modelos, tais como o COLA (Huang e Schneider, 1995) e o modelo executado pelo *European Center for Medium Range Weather Forecasts* (ECMWF) (Simmons *et al.*, 1989 e Simmons, 1991), também são usadas. A partir de junho de 2003, os valores de TSM do Pacífico usados foram uma combinação linear de igual peso entre os resultados das previsões do modelo acoplado oceano-atmosfera do *Lamont-Doherty Earth Observatory* – LDEO (Chen *et al.*, 2000) e do modelo do NCEP (van den Dool 1994; van den Dool e Barnston 1995).

As previsões para a TSM do Atlântico são feitas usando o modelo estatístico de Análise de Correlações Canônicas (ACC) do Centro de Previsões de Tempo e Clima (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), usando os campos típicos de TSM do Atlântico e do Pacífico como preditores (Repelli e Nobre, 2004). As previsões de TSM para o Índico são feitas no IRI, através do modelo ACC do CPTEC (Repelli e Nobre, 2004), usando as anomalias Indo-Pacíficas de TSM e os campos recentemente previstos de TSM do Pacífico, como preditores, e também as previsões de TSM do NCEP para o Oceano Pacífico Tropical (Goddard e Graham 1999).

Para latitudes extra-tropicais, as previsões geralmente são de qualidade inferior e têm menor influência sobre as simulações do comportamento da atmosfera. Desta forma, a metodologia utilizada para determinar os valores de TSM para aquelas regiões considera a proporção de três quartos da TSM climatológica observada no meio do mês inicial do período de simulação, proporcionalmente complementado pela TSM observada no meio do segundo mês do período de simulação (Página Internet do IRI). Para estabelecimento da climatologia do modelo, valores de TSM derivados de imagens de satélites e coletados por bóias e por navios, durante o período de 1971 a 2000, foram interpolados através de uma tecnologia denominada de Interpolação Ótima (Reynolds e Smith, 1994) e usados como entrada para a execução das simulações do comportamento da atmosfera. Todas as previsões e simulações de TSM foram suavemente misturadas em suas interfaces geográficas.

3.4.2 - A modelagem do comportamento atmosférico

No caso da atmosfera, os modelos numéricos podem ser divididos em *Estatísticos* e *Dinâmicos*.

3.4.2.1 - Modelos Estatísticos

Os modelos estatísticos são elaborados para o estabelecimento de relações entre variáveis que apresentem algum grau de correlação entre si. Normalmente são usados para permitir a obtenção de valores não disponíveis de uma variável, a partir de valores disponíveis de outra(s). Estas relações podem ser obtidas de várias formas diferentes, como mencionado no capítulo anterior.

Neste trabalho buscamos relações entre séries de TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico com séries de precipitação (que servirão como valores de entrada para o modelo hidrológico) e com as séries finais de Vazão no exutório da bacia. Buscamos também relações entre as séries de precipitação geradas pelos modelos dinâmicos (descritos mais à frente) com a de vazão da bacia. Estas relações podem ser vistas na figura 3.6. A técnica utilizada para obtenção destas relações foi a análise de regressão linear múltipla, pois esta é capaz de estabelecer uma equação para gerar valores para uma determinada variável, a partir da variável de interesse, se houver um adequado grau de correlação entre elas. A regressão linear é obtida a partir da técnica dos mínimos quadrados, que consiste da minimização da soma dos quadrados dos resíduos em torno da função de regressão obtida.

O uso das regressões é fundamentado no grau de correlação existente entre as variáveis.

A fundamentação teórica para o cálculo da vazão diretamente da TSM é baseada no fato desta ter controle não apenas sobre o montante total da precipitação (mensal, por exemplo) numa determinada região, mas também sobre sua distribuição temporal e espacial. Esta hipótese é razoável, já que o efeito da TSM sobre a estabilidade termodinâmica e quantidade de vapor d'água disponível, determina um certo grau de controle sobre o tipo de precipitação (estratiforme ou convectiva), que acontece sobre a região em questão. (Tucci et al., 2002).

Iniciando com os campos de TSM, (unidade retangular da divisão espacial dos oceanos) verificaram-se quais de seus pixels apresentam as séries melhor correlacionadas com as séries de precipitação e de vazão dentro da bacia. As séries de valores de TSM destes pixels foram usadas, juntamente com as séries de precipitação e de vazão da bacia, para determinação dos modelos estatísticos (regressões lineares múltiplas) TSM/Chuva e TSM/Vazão. Uma vez determinadas, estas equações de regressão são usadas para, a partir dos valores de TSM previstos, determinar as previsões diretas de precipitação e de vazão para o período considerado.

Outras correlações são calculadas entre os resultados das simulações dos modelos e os valores observados para verificação e validação de sua qualidade, como poderá ser observado na apresentação dos resultados.

3.4.2.2 - Modelos Dinâmicos

Os modelos dinâmicos atmosféricos utilizados neste trabalho baseiam-se no conjunto de equações que governam o movimento atmosférico que é basicamente o seguinte:

Conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\left[u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} \right]$$

Conservação de calor:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left[u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + S_{\theta}$$

Conservação de movimento:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -V \cdot \nabla V - \frac{1}{\rho} \nabla p - gk - 2\Omega \times V$$

Conservação de água:

$$\frac{\partial q_n}{\partial t} = -V \cdot \nabla q_n + S_{q_n}, \quad n = 1, 2, 3$$

Conservação de outros gases e aerossóis:

$$\frac{\partial X_m}{\partial t} = -V \cdot \nabla X_m + S_{X_m}, \quad m = 1, 2, \dots, M$$

Equação dos gases:

$$P = \rho R^* T$$

Onde:

ρ - densidade do ar
 θ - temperatura potencial
 u, v e w - componentes do vento
 g - constante gravitacional
 p - pressão
 q - umidade específica
 X - outros gases ou aerossóis
 R^* - constante específica do gás
 Os demais símbolos são mais comuns e usualmente entendidos.

Os modelos numéricos atmosféricos dinâmicos podem ser subdivididos em *Globais* e *Regionais*.

3.4.2.2.1 - Modelos Globais

Como o próprio nome sugere, um modelo é dito Global, quando as simulações são feitas cobrindo toda a superfície do globo. Esta área de abrangência e o número de pontos de grade utilizados na discretização proporcionam sérias implicações no tempo computacional de execução de um modelo atmosférico. Cobrir a superfície da Terra nestas condições demanda um número muito grande de pontos de grade e conseqüentemente um alto consumo computacional. A diminuição do número de pontos de grade (pontos mais espaçados) pode possibilitar a execução de um modelo global em computadores menos velozes. Entretanto esta prática pode gerar resultados com tão baixo nível de qualidade que pode torná-los inúteis. Mesmo com o uso de supercomputadores, a distancia usual entre os pontos de grade é de aproximadamente 300 km. Esta baixa resolução espacial impossibilita o modelo global simular os sistemas locais de meso-escala, existentes no campo atmosférico. A solução para este caso é dada através de sua utilização acoplada à Modelos Numéricos Regionais, como será visto mais adiante.

O Modelo de Circulação Global (MCG) usado é o *European Community – HAMburg* (ECHAM) versão 4.5, desenvolvido pelo *Max Plank Institute fur Meteorologie* (MPI) na Alemanha. Este foi configurado para o truncamento espectral triangular 42 (T42), fornecendo uma resolução espacial de aproximadamente 2.8 graus de latitude-longitude, e 19 camadas verticais que se estendem desde a superfície até 10hPa (Roegner *et al.*, 1996). O esquema de fluxo de massa de Tiedtke (1989), modificado pelo esquema de penetração convectiva e entranhamento organizado de Nordeng (1995), é usado neste modelo para simular o comportamento das convecções baixa, média e alta.

O esquema de radiação é uma versão adaptada do esquema do *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Neste esquema, dois e seis intervalos são respectivamente usados para representar as influências dos espectros de radiação solar e terrestre, no modelo. A difusão vertical é calculada com um esquema de fechamento de alta ordem, dependente da energia cinética turbulenta. Os fluxos superficiais são baseados

na teoria de similaridade de Monin-Obukhov. O esquema de superfície é composto por um modelo que inclui a parametrização de escoamento superficial de Dumenil e Todini (1992). Este modelo é capaz de reproduzir bem a variabilidade climática sobre a América do Sul (Sun *et al.*, 2005b).

3.4.2.2.2 - Modelos Regionais

Os Modelos Regionais também são conhecidos por Modelos Numéricos de Área Limitada, pelo fato de simular o comportamento da atmosfera sobre uma região específica com limites espaciais bem definidos. Por questões principalmente de custos computacionais, os MCGs simulam o comportamento da atmosfera em escalas esparsas, normalmente com algumas centenas de quilômetros entre um ponto de grade e outro. Este espaçamento não é suficiente para que as características geo-ambientais da região possam, como acontece na natureza, influir no comportamento da atmosfera simulada, e para que os sistemas meteorológicos da escala regional possam ser simulados. Dentro dos MCGs, as influências dos mecanismos da escala regional são introduzidas através das chamadas “parametrizações”. Aumentando-se a resolução espacial do modelo, vários destes mecanismos, sobretudo aqueles de escala regional, podem ser resolvidos, e isto é o que é feito com a utilização dos modelos atmosféricos regionais de área limitada.

A utilização de modelos regionais está associada à disponibilidade dos resultados fornecidos por um MCG. Como a área a ser simulada pelo modelo regional é limitada, torna-se necessário introduzir na simulação, a influência dos sistemas de larga escala gerados pelo modelo global. A influência dos sistemas gerados pelo modelo global nas simulações do modelo regional é realizada através do chamado *Acoplamento*. O acoplamento entre um MCG e um Modelo regional é feito através de uma técnica conhecida por “*Downscaling* Dinâmico”. A técnica do “*downscaling* dinâmico” consiste no aninhamento de um modelo regional de simulação do comportamento da atmosfera, em um MCG, onde há uma troca dinâmica de informações entre os dois modelos, durante (quando os dois modelos são executados simultaneamente) ou posterior (quando os modelos são executados separadamente) ao período de simulação (Nobre *et al.*, 2001; Dickinson *et al.*, 1989; Giorgi e Bates, 1989; Liu *et al.*, 1994). Desta forma, embora nem

sempre ocorra, a função do modelo Regional é a de detalhar e melhorar, tanto espacial quanto temporalmente, os resultados das simulações fornecidas pelos MCGs.

As simulações numéricas no modelo regional são feitas a partir da integração em uma grade com resolução mais refinada que a do MCG, normalmente com espaçamentos constantes entre 10 e 80 km. Com a diminuição do espaçamento de grade (aumento na resolução) espera-se obter uma melhor representação e definição dos processos físicos que acontecem na atmosfera, já que o *downscaling* incorpora melhor os efeitos da topografia, vegetação, contrastes entre continente e oceano, e outros. Sendo a área de simulação dos modelos regionais bem inferiores às das dos modelos globais, o número de pontos de grade utilizados, mesmo com uma maior densidade, diminui consideravelmente, diminuindo também o tempo computacional e permitindo que estes modelos possam ser executados em computadores menos velozes. A maior densidade de pontos de grade, por outro lado, permite a simulação de um maior detalhamento espacial e temporal do comportamento da atmosfera. Mesmo nas simulações com modelos regionais o número de pontos de grade não pode ser aumentado indefinidamente, sem que o limite computacional seja atingido. Além disto, uma densidade exagerada de pontos de grade muitas vezes apenas gera ruídos computacionais, ao invés de gerar um maior detalhamento, devendo ser evitada.

Para se verificar a qualidade da simulação numérica dos aspectos característicos do clima de uma região, é necessário obter-se a climatologia dos modelos utilizados. Os índices de correlação entre as anomalias de precipitação observadas e as simuladas, são então calculados. Estes índices são considerados como limite superior da previsão regionalizada, porque representam as diferenças climatológicas entre o que o modelo produziu (simulação) e o que realmente aconteceu (observação).

Devido à natureza caótica da atmosfera, pequenas diferenças generalizadas em seu campo, podem ser responsáveis por grandes mudanças em sua condição futura. Assim, modelos atmosféricos simulam o comportamento da atmosfera a partir das condições iniciais levemente diferentes entre si, para que diferentes resultados da simulação possam ser obtidos. Cada um destes resultados é chamado de *membro*. O conjunto de todos os resultados obtidos desta forma contém as características estatísticas de reprodução do comportamento da atmosfera por parte do modelo. Apesar de diferentes, se o modelo estiver simulando bem o comportamento da atmosfera, as características estatísticas de

seus resultados serão similares e compatíveis com as características estatísticas dos dados observados. Desta forma, vários membros são calculados para que as estatísticas possam ser representativas. Esta metodologia é conhecida pelo nome de *ensemble*.

Os resultados dos modelos regionais, apesar de influenciados pelas características da região e apresentarem uma resolução mais alta que os resultados dos modelos globais, ainda trabalham com uma resolução espacial muito inferior àquela praticada pelos modelos hidrológicos (os modelos hidrológicos apresentam resoluções mais altas que os modelos Regionais).

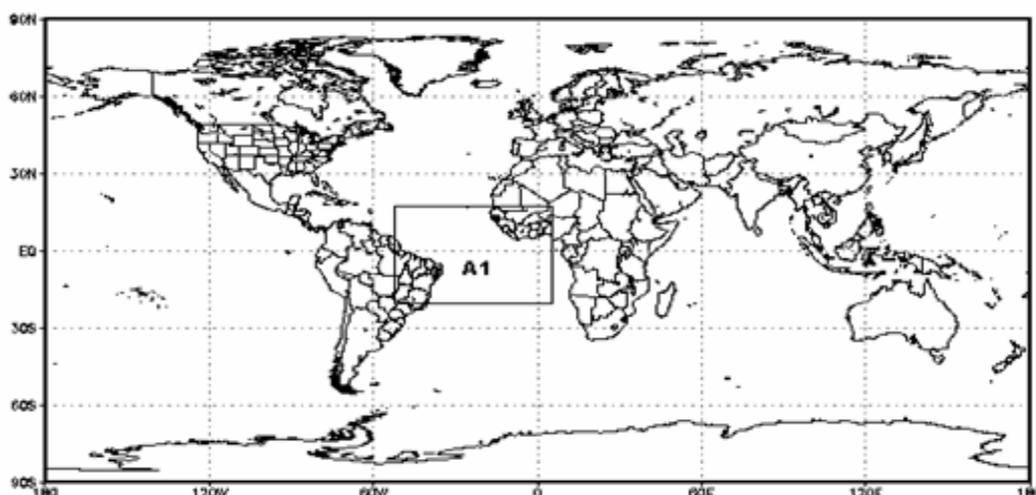


Figura 3.3 - Área de abrangência das simulações.

O Modelo Regional usado neste estudo é o Regional Spectral Model (RSM) versão 97, desenvolvido no *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) (Juang e Kanamitsu 1994), rodando aninhado em um acoplamento unidirecional com o MCG (Juang 1996). O RSM opera com 19 camadas em um sistema sigma de coordenadas verticais. O esquema simplificado de Arakawa-Schubert é usado para a convecção profunda (Pan e Wu 1995). A convecção rasa de Tiedtke (1984) é acionada apenas quando não existe convecção profunda. Os esquemas de radiação solar e terrestre são aqueles de Chou (1992) e Harshvardhan *et al.*, (1987), respectivamente. A física da Camada Limite emprega o mecanismo de difusão proposto por Hong e Pan (1996), para tratamento das ondas de gravidade. Os fluxos na camada superficial são baseados na teoria de similaridade de Monin-Obukhov. O RSM também inclui o modelo de solo de duas camadas de Pan e Mahrt (1987) e Pan (1990). Dentre os vários modelos utilizados para previsão numérica no IRI, o RSM foi um dos que apresentou melhores resultados para o Brasil (Roads *et al.*, 2003). Uma grade de 109x72 pontos (retângulo A1 na Fig. 3.3 acima - Silva *et al.*, 2002),

abrindo uma área que vai desde 100°W e 30°S, até 10°E e 20°N, (centrada na latitude de 3° Sul e na longitude de 27° Oeste), foi definida como sendo a mais indicada para as simulações regionais da área em questão. A opção pela realização das simulações nesta área, baseou-se em um conjunto de simulações para verificação da sensibilidade do modelo a várias de suas características e região de influência (Sun *et al.*, 2005a), e também pelo fato de deixar o NEB longe das bordas da área de simulação o que evitaria a influência de ruídos possivelmente gerados nos limites laterais que pudessem contaminar a solução para o NEB (Seth e Giorgi 1998). O comportamento da Zona de Convergência Intertropical, sistema de fundamental importância para a qualidade da quadra chuvosa no NEB, pode ser resolvido pelo RSM sobre o Oceano Atlântico (Sun *et al.*, 2005b).

Uma grade com resolução de 60 km permitiu que a maioria dos acidentes geográficos da região pudesse ser representada no modelo. Entre estes acidentes podemos observar o Rio São Francisco cruzando a região em uma direção aproximadamente sul-norte, limitado à oeste pela Serra Geral do Goiás e a oeste pela Serra do Espinhaço e Chapada Diamantina. Serras menos acentuadas como Borborema e Ibiapaba também puderam ser incluídas nas simulações. Estes acidentes geográficos não podem ser resolvidos pelo Modelo Global na resolução T42. Ao contrário, a altitude da superfície se eleva lentamente a partir da costa em direção ao centro, com um pico de altitude em aproximadamente 46° W, 18° S. A topografia como vista pelo RSM (60 km de resolução), pode ser comparada com aquela como vista pelo ECHAM4.5, nas figuras 3.4 abaixo.

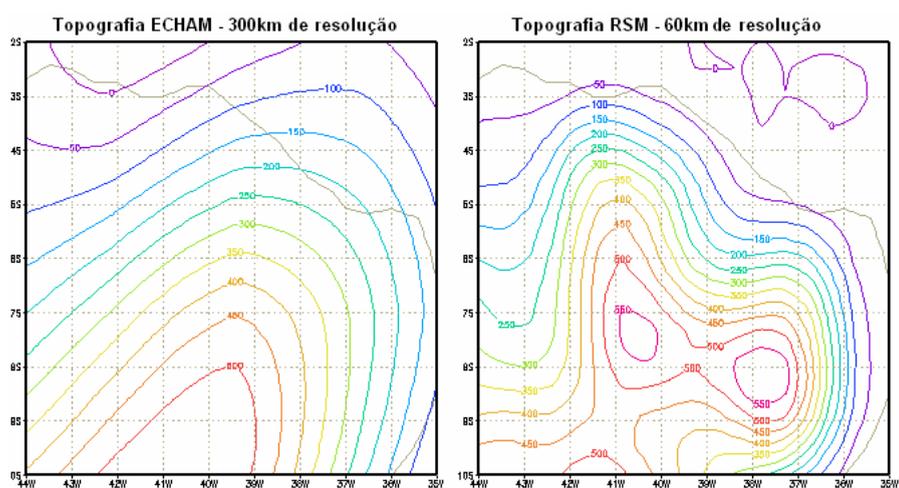


Figura 3.4 – Topografia da região, como vista pelo ECHAM e pelo RSM.

A linha cinza claro que aparece idêntica nas duas figuras, representa o contorno da costa no NEB, centrado nos Estados do Rio Grande do Norte e Ceará (observar latitudes e longitudes). Ali verificam-se as influências mais detalhadas e localizadas da topografia sobre as simulações do RSM que sobre as do ECHAM. A figura seguinte (3.5, ao lado), mostra esquematicamente a disposição da malha utilizada no modelo regional, sobre o Estado do Ceará. Uma vez estando aninhado dentro do modelo global, onde seus resultados são utilizados como condições de contorno, as simulações com o modelo regional

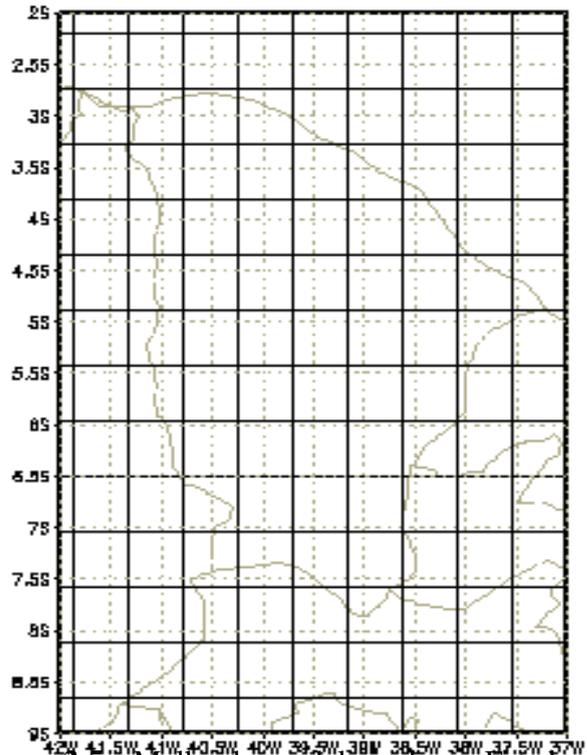


Figura 3.5 - Malha do modelo, sobre o Estado do Ceará.

(RSM) são sujeitas aos mesmos critérios assumidos para o modelo global. As componentes meridional e zonal do vento, a umidade específica, a temperatura e a pressão utilizados na inicialização são linear, espacial e temporalmente interpolados, a partir dos resultados das simulações com o MCG, para alimentar a cada 6 horas todo o domínio do RSM. A umidade e a temperatura do solo no RSM são simuladas após a inicialização. As inicializações ocorreram a cada primeiro de janeiro de cada ano. As simulações foram realizadas no modo conjunto (ensemble), com a integração de 10 membros, na versão não-hidrostática e passo de tempo de 600 segundos, para um período de trinta anos (1971 a 2000), cobrindo os meses de janeiro a junho (período de concentração do regime pluviométrico da região). Neste trabalho, apenas a série média dos 10 membros é utilizada para nossos cálculos. Para a superfície, utilizou-se o modelo de solo de duas camadas (Pan e Marth, 1987). O modelo de solo é designado para descrever o papel da vegetação e a interação da umidade do solo em modificar as trocas de momento, vapor d'água e energia. A vegetação utilizada nestas simulações foi do tipo savana com 70% de cobertura em cada um dos elementos da grade do domínio, cobrindo toda superfície de solo dentro de uma área que vai desde o oeste da África, até a Região Amazônica.

3.4.2.2.3 - Ajustes de um modelo atmosférico às características da região de simulação

Entre as condições de contorno que devem ser introduzidas nos modelos, estão as características geo-ambientais da região sobre a qual o comportamento da atmosfera deve ser simulado. Através da introdução destas condições de contorno, o modelador pode fazer com que o modelo utilize de forma adequada suas equações como será explicado melhor a seguir.

A força de coriolis, por exemplo, é um parâmetro cujo resultado depende da latitude. A latitude de cada um dos pontos de grade é, portanto, de grande importância dentro de uma simulação com estes modelos. Vários outros fatores são de importância. A topografia, por sua vez, influencia no comportamento das linhas de corrente da simulação, induzindo a criação de sistemas locais que são de grande importância na modelagem regional. Da mesma forma, tipos de solo, cobertura de água e terra, além de outras, são variáveis regionais que determinam a caracterização de uma região dentro de um modelo atmosférico.

3.4.3 - A modelagem do comportamento hidrológico

Assim como no caso da atmosfera, os modelos numéricos hidrológicos, também conhecidos como modelos chuva-vazão ou chuva-deflúvio, visam simular e quantificar as componentes do ciclo hidrológicos podendo utilizar para isto equacionamento de natureza empírica, física ou uma combinação de ambos. Estes modelos podem ainda ser classificados em modelos concentrados e distribuídos, dependendo de como os dados e equacionamento são tratados na bacia, se de forma homogênea ou heterogênea, respectivamente. Os modelos concentrados consideram a área da bacia em estudo como uma unidade onde são feitos os balanços internos que levam à quantificação dos processos envolvidos. Nos modelos distribuídos há uma fragmentação da área da bacia em unidades menores que, em princípio independentes, são interligadamente estruturadas para fornecerem os deslocamentos hídricos dentro da área da bacia. Estes modelos são em geral previamente calibrados com eventos ou séries concomitantes (dependendo da escala temporal) de precipitação e vazão, ou seus parâmetros identificados a partir do uso de regionalização hidrológica de seus parâmetros (Alexandre, 2005). Uma vez identificados

os parâmetros destes modelos pode-se, a partir dos valores de precipitação observados (ou simulados) disponíveis, simular ou prever os valores de vazão em um dado local de interesse.

De uma forma um pouco mais detalhada, Yeh (1982) divide a estrutura básica de um modelo hidrológico em: *Variáveis de Entrada* (vazões afluentes, precipitações, evaporações), *Variáveis de Estado* (volumes armazenados nas várias partes do modelo), *Variáveis de Saída* (respostas da simulação), *Parâmetros do Modelo* (variáveis que caracterizam o sistema) e *Intervalo de Tempo* (determinado de acordo com as necessidades do estudo).

Os modelos de simulação hidrológica podem ainda ser determinísticos ou estocásticos. Quando o sistema está sujeito a eventos aleatórios, o modelo é considerado estocástico. Caso não haja componente aleatório, o modelo é determinístico. Alguns modelos podem operar nas duas maneiras, variando de um para o outro conforme o estado do sistema (Loucks *et al.*, 1981).

3.4.3.1 - O modelo Hidrológico

O Modelo Hidrológico escolhido para a simulação das vazões foi o CN-3S, *Curve Number 3 Step antecedent precipitation*, (Taborga e Freitas, 1987). Esta escolha foi feita considerando-se o fato deste modelo já ter sido testado para várias localidades na região semi-árida do NEB (valores apresentados na seção de resultados). O CN-3S é um modelo determinístico chuva-vazão, que foi desenvolvido com o objetivo principal de gerar vazões sintéticas para a simulação de operações de reservatórios.

O modelo baseia-se nas relações das curvas CN (*Curve Number*) desenvolvidas pelo *U. S. Conservation Service*, sendo composto por seis parâmetros de calibração. O “3S” do CN-3S representa o fato de que a série de dados de precipitação pluviométrica do período que serve de entrada para o modelo, é precedida pelas precipitações dos três períodos antecedentes. Em nosso caso particular, cada período corresponde ao intervalo de tempo de um mês. Ou seja, o modelo é integrado com um passo de tempo mensal. Os dados de precipitação que alimentam o modelo servem para os cálculos da lâmina de escoamento superficial em cada intervalo de tempo de simulação. Para a avaliação do

valor dessa lâmina o CN-3S usa a equação que relaciona o escoamento real com o escoamento potencial, conforme o *U. S. Conservation Service*, mostrada a seguir:

$$\frac{(P - I_m) - Q}{S} = \frac{Q}{(P - I_m)}, \quad (1)$$

onde: P – altura de chuva (mm); Q – lâmina de escoamento direto (mm); S – diferença máxima de potencial entre P e Q; e Im – interceptação, infiltração e armazenamento superficial.

Tirando o valor de Q na expressão anterior, com $I_m = \alpha S$, resulta em:

$$Q = \frac{(P - \alpha S)^2}{P + (1 - \alpha)S} \quad (2)$$

Os técnicos do *U. S. Conservation Service* adotam α igual 0.2, ou seja, 20% da capacidade de armazenamento do solo. Para o modelo CN-3S, entretanto, α é um parâmetro de calibração. Nos diversos casos analisados (Freitas e Porto, 1990), a calibração adotando-se o valor de α igual a 0.2, mostrou-se satisfatória, o que reduz para cinco o número de parâmetros a serem ajustados.

Conforme detalhes encontrados em Taborga e Freitas (1987), a partir dos valores numéricos dos CNs tabelados pelo USCS, em função das características da chuva antecedente e dos complexos solo-vegetação, estima-se as curvas de regressão potencial:

$$CNV_j = \frac{0.925}{CNI} V_j^{1.019 - 8.256 - 0.479 \ln(CNI)}, \quad (3)$$

onde CNI é um parâmetro de ajuste do modelo.

O valor de V_j na equação acima exprime o coeficiente de chuva antecedente, empregando como entrada, a chuva dos três intervalos de tempo antecedentes ao intervalo em questão. Os valores de V_j ($1 \leq j \leq 3$) são calculados pela expressão a seguir:

$$V_j = 1 + \beta(P_{j-1} + k_0 P_{j-2} + k_0^2 P_{j-3}), \quad (4)$$

onde β e k_0 são parâmetros de ajuste da chuva antecedente,

Com o valor de CNV_j obtido, calcula-se, então, substituindo-se CN por CNV_j na equação seguinte e resolvendo-a para S. Este valor encontrado corresponde a S_j .

$$CN = \frac{1000}{(S / 25.4) + 10} \quad (5)$$

A equação anterior representa as relações das curvas CN (*Curve Number*), em função da variável S, ou seja, da diferença máxima de potencial. A lâmina referente ao escoamento direto Q_{up} é obtido pela equação (1), com os valores de precipitação P e do parâmetro α .

O escoamento básico ou de base é calculado sob a hipótese de que uma parcela da diferença entre a precipitação e a lâmina de escoamento direto alimenta o lençol freático a uma taxa k_1 . Este por sua vez sofre uma depleção a uma taxa k_2 correspondente ao escoamento básico Q_{low} (mm), como segue:

$$R_j = R_{j-1} + k_1(P_j - Q_{up}), \quad k_1 < 1 \quad (6)$$

$$Q_{low} = k_2 R_j \quad (7)$$

Do lençol freático, após a depleção Q_{low} , no fim do período j, resulta:

$$R_j = R_{j-1} + k_1(P_j - Q_{up}) - Q_{low} \quad (8)$$

Então, teremos o escoamento total dado por:

$$Q_{total} = Q_{up} + Q_{low} \quad (9)$$

Para rios intermitentes R_0 pode assumir um valor de zero como condição inicial. Para rios perenes, o valor de R_0 pode ser calculado através de interações múltiplas, até que o primeiro valor de vazão observado seja atingido.

A calibração do modelo é feita utilizando-se uma parte da série de dados disponíveis e sua validação, através da utilização do restante da série.

3.5 - Interligação entre os modelos (acoplamento)

As escalas de tempo e de espaço praticadas na utilização dos modelos atmosféricos são diferentes daquelas praticadas na utilização dos modelos hidrológicos. Enquanto nos modelos atmosféricos (particularmente os regionais) as escalas de tempo e de espaço são respectivamente da ordem de minutos e de dezenas a centenas de quilômetros, nos modelos hidrológicos estas escalas são da ordem de horas, dias ou meses, para o tempo, e de metros para o espaço. Estas diferenças de escala evidenciam a necessidade de uma interface para a conexão (acoplamento) entre os modelos atmosféricos e os hidrológicos.

Duas alternativas de acoplamento entre os modelos atmosféricos e os hidrológicos podem ser implementadas. No Acoplamento direto, os resultados dos modelos atmosféricos são utilizados como dados de entrada para os modelos hidrológicos, que executam suas simulações independentemente das simulações dos modelos atmosféricos.

No acoplamento integrado, a estruturação das equações que representam as trocas de massa e energia entre a superfície terrestre e a atmosfera, e o comportamento físico das variáveis envolvidas dentro de cada um destes dois meios, é modificada para que se possa ter um único modelo que possa representar o processo como um todo. Dependendo do interesse, do grau de precisão e dos recursos disponíveis, diferentes graus de integralização entre os modelos podem ser adotados. Considerando que estamos integrando processos que ocorrem em escalas diferentes, é importante se levar em conta que quanto maior for a integração mais problemas de compatibilização de escalas podem surgir.

Quanto mais precisa pretenda-se que seja uma simulação do comportamento de um mecanismo físico integrado como o sistema terra-atmosfera, mais precisos deverão ser seus detalhes internos assim como a representatividade do meio a ser simulado e as interligações entre as várias partes do modelo e/ou de modelos de natureza diferentes.

3.6 - Descrição do Sistema

O sistema proposto tem como parte integrante um modelo de TSM, um modelo global de previsão de clima, um modelo regional de previsão de clima, uma metodologia para ajustes a serem feitos sobre os valores de precipitação simulados, um modelo estatístico para o downscaling da resolução da grade do modelo regional para a resolução

da área da bacia, e finalmente, um modelo “chuva vazão” (MH). Alternativamente, regressões são usadas como uma espécie de “atalho” entre os resultados da TSM, do modelo global, e do modelo regional diretamente para a precipitação da área da bacia em questão, assim como diretamente para os valores de vazão a serem estimados como previsão. O sistema é inicializado com os valores de TSM. Valores intermediários de precipitação são gerados em algumas das fases da modelagem para serem usados como entrada em outras fases. A saída é composta pelas séries de valores de vazão previstos para a área da bacia.

O processo se inicia através da previsão da TSM. Uma vez prevista, a TSM serve como condição de contorno para impulsionar a simulação do provável comportamento da atmosfera, através de um modelo numérico atmosférico que trabalha em escala global (Modelo de Circulação Global - MCG). Os resultados do modelo global servem como entrada para um modelo numérico atmosférico regional. Para que se possam utilizar os resultados dos modelos global e regional, como dados de entrada nos modelos hidrológicos, uma correção é feita. Após esta etapa, os valores obtidos são usados como dados de entrada para o modelo hidrológico que tem como resultado final, a vazão prevista.

Adicionalmente, a TSM pode ser diretamente usada para prever valores de precipitação e de aflúências da bacia, a partir de equações de regressão previamente identificadas entre estas variáveis de interesse e a TSM. A série de valores de precipitação gerados pelos modelos global e regional para a área da bacia são usadas para regressões diretas com os valores de precipitação que irão alimentar o modelo hidrológico, e com os valores de vazão da bacia.

A figura 3.4 abaixo mostra a estruturação do sistema utilizado para previsão de vazões, o qual consiste de seis alternativas possíveis de combinações de modelos em seus vários níveis (TSM, Modelo Global, Modelo Regional, Modelo de correção Gama e de desagregação, e Modelo Hidrológico Estatístico e/ou Empírico/Físico). O esquema desta figura mostra a complexidade das possibilidades disponíveis.

Estruturação do sistema

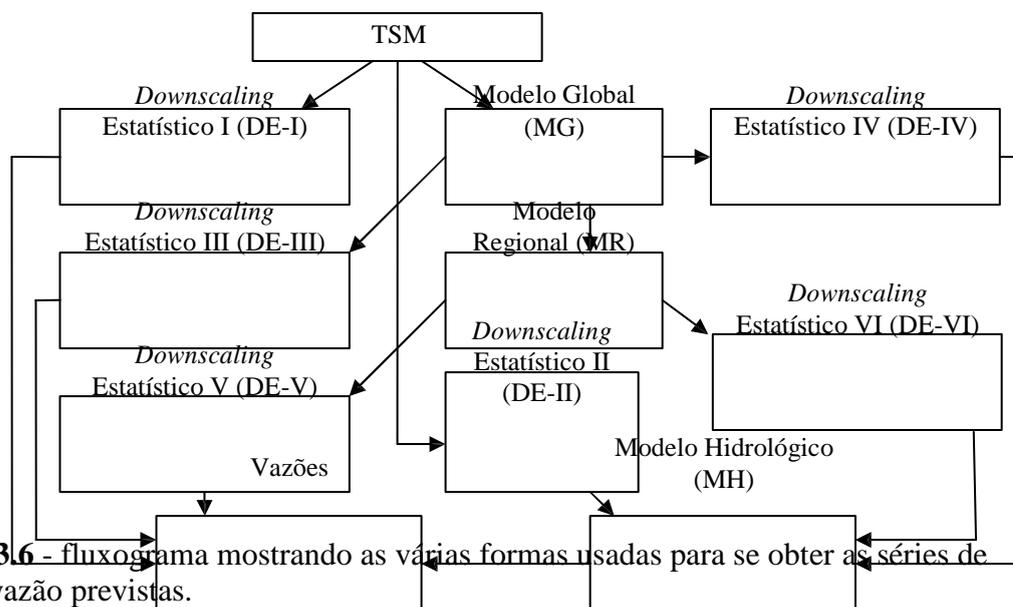


Figura 3.6 - fluxograma mostrando as várias formas usadas para se obter as séries de vazão previstas.

Como pode ser visto na figura acima, dentro deste esquema existem várias possibilidades para a obtenção da previsão dos valores de vazão. As letras DE representam uma abreviação para cada uma das possibilidades que constituem os chamados *Downscaling Estatísticos*. Sendo a TSM já prevista, a primeira possibilidade (primeiro modelo – DE-I) constitui-se de uma regressão linear simples entre os valores de TSM e de vazão. A segunda possibilidade (DE-II) trata da regressão entre os valores de TSM e os valores de precipitação observados na bacia, gerando valores de chuva (previstos) que são transformados em vazão por um modelo chuva-vazão. O Modelo Global (MG) é alimentado pelos valores de TSM, gerando três outras possibilidades. A primeira é o DE-III que utiliza os valores de saída do modelo global para uma regressão linear simples com os valores de vazão. A segunda possibilidade, o DE-IV, utiliza os valores de saída do MG para através do MH gerar valores de vazão. A outra destas três possibilidades permite que os valores de precipitação gerados pelo MG passem pelo Modelo Regional (MR), em um *Downscaling Dinâmico*, que por sua vez gera mais outras duas possibilidades: uma regressão simples entre os valores gerados pelo MR e os valores de vazão (DE-V), e o DE-VI que, após passar pelo MH, proporciona a geração do último conjunto de valores de

vazão previsto. Observa-se, diante do exposto, a existência de seis possibilidades para o *downscaling* e geração da previsão dos valores de vazão.

3.7 - Correção nos dados simulados

Devido a sua natureza essencialmente caótica, a atmosfera possui uma memória de tempo de no máximo duas semanas. Este fato, aliado a outras razões, fazem com que a previsibilidade de tempo na atmosfera fique reduzida a pouco mais de 10 dias (Holton, 1979; Moura e Hastenrath, 2004). O clima, por outro lado, nada mais é que uma resposta da atmosfera, integrada em um determinado intervalo de tempo, às condições a ela impostas pelo meio que a circunda. No caso do NEB, o comportamento da atmosfera em longo prazo é fortemente influenciado pelos oceanos Pacífico e Atlântico (Hastenrath e Heller, 1977; e Moura e Shukla, 1981). Devido ao tamanho de suas bacias, a influência do Pacífico em um determinado instante sobre a atmosfera, tende a perdurar por intervalos de tempo da ordem de seis a sete meses enquanto que no caso do Atlântico esta influência é da ordem de três a quatro meses. Isto permite que as características estatísticas do comportamento da atmosfera integrado em um determinado período possam, através dos modelos numéricos, ser previstas com significativa antecedência. Como a representatividade da amostra se torna maior quanto maior for o período de observação, quanto menor o período de simulação utilizado para prever a estatística do comportamento da atmosfera, menor a qualidade dos resultados obtidos.

Os resultados dos modelos atmosféricos frequentemente apresentam distorções. Estas distorções podem ser observadas nos valores simulados, tanto da média quanto da variância. Um modelo de simulação numérica do clima apresenta bons resultados quando consegue simular bem a variância observada, sendo os valores médios passíveis de correção (Sun *et al.*, 2005ab). Dependendo do interesse, pode-se eliminar o problema da tendência dos valores médios através do uso apenas dos desvios (que posteriormente podem ser adicionados à média climatológica) ou através da correção dos valores absolutos. Em estatística, quanto maior o tamanho da amostra, maior será a probabilidade de que esta proporcionalmente contenha representantes de todos os eventos possíveis, e consequentemente mais representatividade da população. Na simulação numérica do clima, os resultados integrados para um período de seis meses por serem mais representativos

apresentam uma qualidade superior à dos resultados integrados para períodos menores. Embora de grande interesse para o usuário, a qualidade dos resultados da climatologia obtidos na integração mensal deixa muito a desejar. A qualidade dos resultados para valores mensais simulados pode ser recuperada através de tratamentos estatísticos que possibilitem a captura das características estatísticas dos valores observados pelos valores simulados. Neste trabalho usam-se duas formas distintas para correção do problema das tendências nos valores médios e resgate das características dos valores mensais observados pelos valores simulados. É o caso da *Desagregação da Precipitação* e da *Função Gama*. Estas duas formas de corrigir os dados são apresentadas a seguir.

3.7.1 - A Desagregação da Precipitação

A precipitação obtida a partir dos modelos atmosféricos, sejam eles global (ECHAM4.5) ou regional (RSM), refere-se ao total precipitado durante os meses do primeiro semestre (P_{JJ}). Uma vez obtido P_{JJ} , pode-se obter os valores mensais para os meses do período multiplicando-se P_{JJ} por coeficientes mensais que refletem a proporção da chuva em cada um dos meses do período, com relação a P_{JJ} . O problema reduz-se à identificação de tais coeficientes.

A abordagem usada considera o cálculo dos percentuais mensais de precipitação com relação aos totais anuais, para cada ano da série, a partir da série de valores observados. A média mensal desta série de coeficientes constitui o conjunto de coeficientes mensais a serem usados para a desagregação dos totais sazonais calculados pelo modelo. Uma compensação é feita para os totais do primeiro semestre de cada ano, já que os valores simulados referem-se apenas a este período. Tomando-se os totais simulados acumulados para o semestre, obtêm-se os valores mensais multiplicando-os por seus respectivos coeficientes mensais. Assim, se o resultado dos valores simulados apresentarem um máximo ocorrendo em um determinado mês (ou um mínimo e proporcionalmente qualquer outro valor), haverá uma transferência proporcional da posição deste máximo (ou mínimo) para o mês onde ocorre o máximo dos valores observados, i.é., haverá uma redistribuição mensal do total de precipitação previsto para o semestre.

Como os modelos atmosféricos prevêm com alguma habilidade somente os totais da estação, a metodologia de desagregação, onde os correspondentes coeficientes são calculados a partir da climatologia, deve ser vista apenas como um meio de identificar um cenário provável de chuva desagregada e não de prever o mês de maior total precipitado (ou menor). Assumindo que o processo de desagregação é dependente da categoria do ano (*Acima do Normal*, *Normal* e *Abaixo do Normal*), os resultados podem ser melhorados. Assim, os valores observados são categorizados através de sua separação como função dos tercís de intensidade de precipitação, para todo o período de seis meses, e três novos conjuntos de coeficientes são calculados respectivamente para cada uma das categorias consideradas. Agora, o conjunto de coeficientes a ser usado para a desagregação dependerá da categoria em que o total simulado acumulado irá ocorrer.

3.7.2 - A Função Gama

A estatística teórica mostra que qualquer função de densidade acumulada de probabilidade pode ser transformada em outra, se for uniformizada para, posteriormente, usar a transformação inversa da distribuição de interesse (Tucci *et al.*, 2002). Sendo assim, dado o valor de uma variável aleatória X (por exemplo, a precipitação diária prevista pelo modelo meteorológico) com distribuição $f(X)$, deseja-se transformar esta variável em uma outra X^* , cuja distribuição é $g(X^*)$. A primeira etapa é a transformação da distribuição de X a uma distribuição uniforme no intervalo $(0, 1)$ a partir de $U = \int_{z=0}^X f(z)dz = F(X)$, sendo $F(X)$ a função de probabilidade acumulada de X . Então a nova variável U tem distribuição uniforme no intervalo $(0,1)$. A segunda etapa envolve a transformação de U para X^* . Sendo $G(X^*)$ a função de densidade de probabilidade acumulada de X^* , a transformação desejada é $X^* = G^{-1}(U)$.

Na prática, as funções $F(X)$ e $G(X^*)$ não são conhecidas analiticamente, entretanto, para o caso da precipitação, pode-se assumir que tanto X e X^* seguem uma distribuição Gama, cujos parâmetros podem facilmente ser obtidos, a partir dos dados respectivamente observados e simulados através de algum método de estimação (Momentos, Máxima Verossimilhança ou Momentos-L).

A equação para a função de densidade de probabilidade Gama é:

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

De posse das funções $F(X)$ e $G(X^*)$, o procedimento para as transformações dos valores (que pode ser visualizado na figura 3.7 abaixo), percorre os seguintes passos:

- Confecciona-se um gráfico contendo as duas Funções Gama $F(X)$ e $G(X^*)$ obtidas, representando respectivamente os dados observados e os simulados;
- A partir de um valor x de precipitação no eixo horizontal, localiza-se a distância vertical do eixo até a curva da Função Gama $G(X^*)$ dos valores simulados. Esta distância representa a frequência acumulada da precipitação simulada até o valor do ponto x ;
- Seguindo horizontalmente a partir do ponto de cruzamento da linha vertical do ponto x com a curva da Função Gama $G(X^*)$ dos valores simulados (obtido no item b, acima), cruza-se com a curva da Função Gama $F(X)$ dos Valores observados e neste cruzamento obtêm-se o ponto para o próximo passo;
- A partir do ponto obtido no item (c) acima, traça-se uma vertical retornando ao eixo horizontal, onde se poderá obter o valor corrigido da precipitação. Assim obtêm-se a transformação $X \rightarrow X^*$. Este procedimento é efetuado para todos os valores simulados, sendo seu cálculo facilmente programado com qualquer software estatístico.

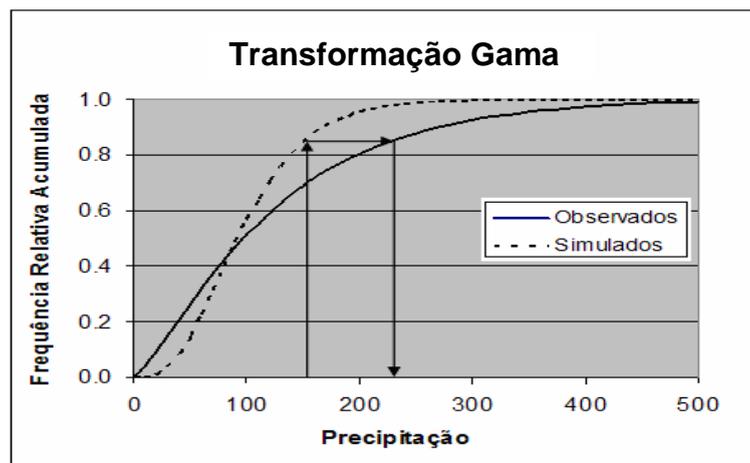


Figura 3.7 – Relação esquemática da transformação dos valores simulados, através da Função Gama.

3.8 - O cálculo dos erros

Todos os esquemas de previsão deveriam incluir medidas quantitativas de incerteza para cada variável prevista, sendo desejável propagá-las através de todas as entradas, coeficientes e parâmetros (Buras *et al.*, 1997). Na impossibilidade de obtenção deste nível de detalhamento, os erros podem ser calculados de maneira integrada. Para analisar os erros ocorridos em cada uma das alternativas de previsão de vazão dentro do sistema, os resultados obtidos serão comparados com valores reais. As “verdades” disponíveis para calibração e ajustes das diversas partes do sistema, são os valores observados de TSM, de Precipitação e de Vazão.

Os testes de calibração iniciam-se através da utilização dos valores de TSM observada como entrada para o modelo global. Os resultados das simulações com o modelo global servem, por sua vez, como entrada para as simulações com o modelo regional. Os valores de precipitação simulados com o modelo regional são comparados com os valores observados para análise do potencial do sistema integrado Modelo Global – Modelo Regional. A calibração e análise do potencial do modelo hidrológico são feitas através da comparação da vazão simulada a partir dos valores de precipitação observados, e os valores de vazão observados. Além dos testes de calibração já descritos, existem os testes de ajuste realizados nos modelos de regressão linear entre os valores de TSM com os de precipitação gerada nas várias componentes do sistema, e com os valores de vazão.

No sistema existem seis possibilidades para obtenção da previsão de vazão, cada uma delas com fontes de erros específicas. O acúmulo de erros durante a execução do sistema é diferente para cada uma destas possibilidades. Todas as possibilidades de obtenção da vazão em nosso sistema iniciam-se com a previsão da TSM e é aí que se encontra a primeira fonte de erros. Os erros produzidos nesta fonte podem ser estimados através do cálculo das diferenças entre os valores previstos de TSM e os valores reais.

No caso da regressão direta entre a TSM e a vazão, existem duas fontes de erros, uma na obtenção da TSM e a outra no modelo de regressão. Já no caso da opção que inclui a regressão entre a TSM e a precipitação na bacia, e o uso do modelo hidrológico, três fontes de erros existem. A primeira está na obtenção da TSM, a segunda no modelo de regressão e a última no modelo hidrológico.

Em nossas quatro opções restantes existem, além das fontes de erros decorrentes de outras etapas, duas fontes de erros que são a da obtenção da TSM e aquela decorrente do uso do modelo global. A primeira destas quatro inclui, além das duas fontes de erros citadas, erros decorrentes da regressão entre os valores de precipitação gerados pelo modelo global diretamente para os valores de vazão. A segunda destas quatro opções, além de incluir erros da previsão da TSM e do modelo global, inclui também a erros decorrentes da utilização do modelo hidrológico, o qual substitui o modelo de regressão usado na opção anterior.

Nas duas últimas opções são acumulados os erros decorrentes tanto das previsões feitas pelos modelos de TSM e global, como também pelo uso do modelo regional. No primeiro destes dois últimos casos, às fontes de erros já mencionadas, é acrescida dos erros decorrentes do uso do modelo de regressão entre os valores de precipitação gerados pelo modelo regional e os valores de vazão. Na última das possibilidades, ao invés de erros resultantes do uso de regressão entre os valores de precipitação do modelo regional e os valores de vazão, na opção anterior, tem-se erros devido ao uso de um modelo hidrológico.

Um outro conjunto similar de erros é obtido quando a TSM persistida é usada em substituição à TSM prevista.

Otimamente, as simulações devem ser feitas usando-se os dados reais. Os resultados obtidos desta forma devem ser comparados com aqueles gerados a partir de valores já resultantes de simulações anteriores.

4 - RESULTADOS

Como discutido no capítulo anterior, o objetivo deste trabalho é o de, partindo dos campos de TSM globais que são usados como preditores, tentar-se obter em dezembro, previsões dos valores de vazão para os meses de janeiro a julho seguintes, para a bacia da Fazenda Cajazeiras. As bases para este trabalho seriam as previsões climatológicas de chuva realizadas pela FUNCEME, incluindo algumas outras abordagens de base estatísticas a serem testadas. O conjunto de possibilidades adotadas para consecução deste objetivo pode ser visualizado na Figura 3.4 e engloba as seis opções descritas abaixo:

- 1^a. – TSM/Vazão (DE - I) – Nesta opção, buscar-se-ão valores de TSM que estejam bem correlacionados com os valores de vazão observados na bacia para, através de regressões lineares múltiplas, obterem-se equações que permitam o prognóstico das vazões que ocorrerão mês a mês de janeiro a julho seguintes.
- 2^a. – TSM/Chuva/Modelo Hidrológico/Vazão (DE - II) – Similarmente ao caso anterior, buscar-se-ão valores de TSM que estejam bem correlacionados com os valores da chuva na área da bacia. As equações obtidas gerarão valores de chuva que serão transformados em valores de vazão através do uso do Modelo Hidrológico CN3S, previamente calibrado com dados observados de chuva e vazão.
- 3^a. – TSM/Modelo global/Vazão (DE - III) – O Modelo Global é executado baseado nos campos de TSM. Os valores de precipitação gerados por este modelo para a área da bacia são correlacionados com os valores de vazão para, através de uma regressão linear simples, gerar uma equação que permita a previsão da vazão do período.
- 4^a. – TSM/Modelo global/Modelo Hidrológico/Vazão (DE - IV) – Neste caso, ao invés do uso de uma regressão linear, os valores de precipitação gerados pelo Modelo Global para a área da bacia são transformados em vazão através do uso do Modelo Hidrológico CN3S, previamente calibrado com dados observados de chuva e vazão.

- 5^a. – TSM/Modelo global/Modelo Regional/Vazão (DE - V) – O Modelo Regional é executado baseado nos campos gerados pelo Modelo Global. Os valores de precipitação gerados pelo Modelo Regional para a área da bacia são correlacionados com os valores de vazão para, através de uma regressão linear simples, gerar uma equação que permita a previsão da vazão do período.
- 6^a. – TSM/Modelo global/Modelo Regional/Modelo Hidrológico/Vazão (DE - VI) – Neste caso, ao invés do uso de uma regressão linear, os valores de precipitação gerados pelo Modelo Regional para a área da bacia são transformados em vazão através do uso do Modelo Hidrológico, previamente calibrado com dados observados de chuva e vazão.

Estas seis opções são implementadas e testadas individualmente, sendo os seus resultados apresentados em seguida. Uma discussão sobre a qualidade dos dados gerados pelos modelos ECHAM e RSM é apresentada e duas opções para sua melhoria são aplicadas para que possam posteriormente ser usados.

Uma vez disponibilizadas, simuladas e/ou corrigidas, as séries de TSM e de precipitação formam um conjunto de dados completo para a definição de cada uma das partes do sistema. O conjunto de dados usados para esta tarefa é composto pelas séries que contêm:

- Os totais de precipitação e vazão mensais observados na área da bacia,
- Valores de TSM dos seis meses anteriores ao da previsão, em três pontos de maior correlação sobre os oceanos Pacífico e Atlântico, individualmente para cada um dos seis primeiros meses do ano,
- As séries de precipitação total mensal, simuladas pelos modelos ECHAM e RSM e corrigidas através de um dos dois modelos de correção e,
- Valores totais mensais de vazão gerados pelo CN-3S.

4.1 - Cálculo da precipitação média na área da bacia da Faz. Cajazeiras

Sendo a área da bacia considerada relativamente pequena e bastante uniforme, a média espacial mensal da precipitação para sua área foi obtida, Na utilização dos dados de

precipitação, verificou-se que algumas das séries apresentavam falhas; Desta forma, para aqueles meses em que as falhas ocorreram, o Método dos Polígonos de Thiessen foi aplicado apenas para as estações que apresentavam a existência de dados. Como as falhas nas séries nem sempre eram coincidentes, os coeficientes de Thiessen foram calculados considerando cada uma das combinações possíveis, e respectivamente, de acordo com as disponibilidades dos dados utilizados. Como o trabalho é desenvolvido em bases mensais, os dados são utilizados também em bases mensais.

A precipitação média mensal na área da bacia foi calculada para o período de simulação (1971 a 2000), através do Método de Polígonos de Thiessen, e constitui o conjunto principal de dados usados nos cálculos que relacionam diretamente a área da bacia. Como nem todas as séries de precipitação das estações passíveis de serem usadas, estavam completas, diferentes combinações tiveram de ser feitas para que se pudesse atender cada um dos diferentes casos.

O banco de dados da FUNCEME apresenta algumas destas estações com séries iniciando-se desde 1912. Para outras estações, as séries de dados iniciam-se um pouco mais recentemente. Em 1971, ano de referência do início do nosso trabalho, todas as estações já haviam iniciado suas operações. Mesmo a partir de 1971, algumas destas séries apresentam-se incompletas. Desta forma, apenas as estações que possuíam dados foram usadas, gerando combinações diferentes entre as estações, dependendo da situação, a cada mês, para diferentes períodos durante os 30 anos de dados do trabalho. O número mínimo combinado de estações usadas no cálculo da precipitação média mensal foi de quatro (dois dos 360 meses, ~0,6% do total). O segundo número mínimo de estações foi de cinco, com ~31% do total. Entre seis e onze houve 11% das estações. Aproximadamente 20% das combinações usaram doze ou treze estações. O restante das combinações (~39% do total) usou entre quatorze e dezesseis estações.

A série de precipitação média mensal obtida desta forma foi comparada com a série interpolada para a grade do modelo (conjunto final de dados observados usados para as simulações, citado em parágrafo anterior no início deste capítulo), ponderada para a área da bacia. O resultado desta comparação mostrou uma correlação de 96,5%, evidenciando a conformidade entre estes dois conjuntos de dados.

No caso específico da Faz. Cajazeiras, o total anual médio de precipitação foi de 813,6mm (climatologia dos anos de 1971 a 2000). Para o período da quadra chuvosa

(fevereiro a maio), o total climatológico de precipitação encontrado foi de 642,7mm, o que corresponde a 77,3% do total anual precipitado. Quando a climatologia da precipitação ocorrida durante os meses de janeiro a junho é considerada, o total de precipitação se eleva para 757,1 mm, que corresponde a 93,1% do total climatológico anual. Apenas 6,9% do total climatológico da precipitação aconteceram durante os meses de julho a dezembro, na área da nossa bacia. Em se tratando de vazão, as concentrações são ainda maiores. O total anual médio de vazão no exutório de nossa bacia (fazenda Cajazeiras) foi de aproximadamente 2.150m^3 de água. Durante o período da quadra chuvosa (fevereiro a maio), este total caiu para $2.072,5\text{m}^3$, o que corresponde a 96,4% do total escoado. Quando todo o período do 1º semestre do ano é considerado, o total escoado eleva-se para 2.138m^3 , correspondendo a 99,4% do total anual escoado da nossa bacia. Verifica-se, então, que apenas aproximadamente 0,6% do total anual da vazão que ocorre através do posto de coleta da Fazenda Cajazeiras ocorre durante o 2º semestre do ano. Neste trabalho apresentamos os resultados considerando os valores mensais do 1º semestre do ano, o qual inclui a “Quadra Chuvosa”.

A série de dados de precipitação observada usada como base para este trabalho é aquela citada na seção 3.3.2. As tarefas de coleta de dados, compilação e cálculos referentes aos campos de TSM e sua previsão, não fazem parte de nossos objetivos; estas tarefas, que incluem a execução do modelo ECHAM com os campos de TSM como dados de entrada, são realizadas no IRI (seção 3.3.1). Os resultados dessa linha de trabalho no IRI são rotineiramente enviados para a FUNCEME onde este trabalho foi executado. Prossegue-se agora com o desenvolvimento de cada uma das partes do sistema.

4.2 - Os modelos de regressão linear múltipla com as séries de TSM

Visando encontrar dentro dos campos de TSM do período de 1971 a 2000 disponíveis na NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), séries temporais de valores que estivessem bem correlacionadas com as séries temporais de precipitação e de vazão na bacia, valores de correlação linear entre as séries temporais de cada píxel nos campos de TSM e da precipitação média mensal e vazão observados na bacia, foram calculados.

A idéia central nesta parte do trabalho é a de se ter disponível, em dezembro, valores de TSM que pudessem ser usados como preditores para as precipitações e vazões

mensais médias que iriam ocorrer em cada um dos seis primeiros meses do ano seguinte na bacia. Equações de regressão linear múltipla forneceriam os valores de precipitação e de vazão na área da bacia, a partir de valores de TSM obtidos nas regiões de maior correlação com estas duas variáveis, respectivamente. Para um melhor resultado, seria necessário descobrir quais seriam as áreas de melhor correlação. Como o interesse era o de se obter valores individualmente para cada um dos seis primeiros meses do ano, os dados de TSM, de Precipitação e de Vazão foram separados em séries mensais (um valor por ano). Desta forma, os campos de TSM dos meses de julho a dezembro, foram defasadamente correlacionados com as series de dados médios de precipitação e de vazão de cada um dos meses de janeiro a julho seguintes, para verificar em quais situações obter-se-ia os melhores valores. As correlações mais altas indicariam as séries que deveriam ser usadas como preditores para estas precipitações e vazões de cada mês.

Da mesma forma, visando ampliar o leque de possibilidades de resultados, series conjugadas contendo médias bimensais, trimestrais e quadrimestrais de TSM, foram calculadas e com as séries de chuva e vazão. Como resultado, as séries mensais apresentaram valores de correlação melhores (ou no mínimo do mesmo nível) do que aqueles obtidos com o uso das séries conjugadas. Considerando este fato e a maior facilidade na obtenção dos valores apenas mensais sobre os conjugados, optou-se pela utilização dos valores das séries mensais.

De acordo com a literatura (já mencionada) as regiões oceânicas de maior influência sobre o NEB são o Pacífico Central, com suas situações de El Niño – La Niña, e as regiões do Atlântico Norte e Sul, com o chamado Dipolo de TSM. Assim, procurou-se obter séries de valores de TSM (uma para cada uma destas três regiões) que apresentassem as maiores correlações com as séries de precipitação e de vazão da bacia da Fazenda Cajazeiras, como preditores para a precipitação e a vazão respectivamente de cada um dos meses de janeiro a julho seguintes.

Estes valores foram encontrados e os resultados são apresentados nas Tabelas 4.1a e 4.1b abaixo. A Tabela 4.1a mostra a localização geográfica e o mês (do ano anterior) de onde deve-se obter os valores de TSM a serem usados para a previsão dos valores de chuva e de vazão na bacia da Fazenda Cajazeiras, através deste método. A Tabela 4.1b mostra os valores das correlações encontradas para cada uma das localidades, e seu respectivo mês.

Tabela 4.1a – Áreas de maior correlação entre as TSMs dos Pacífico, Atlântico Norte e Atlântico Sul, com as séries de precipitação e de vazão da bacia da Fazenda Cajazeiras, para cada um dos meses de janeiro a junho.

Regiões de maior correlação com a precipitação									
Região	Oceano Pacífico			Oceano Atlântico Norte			Oceano Atlântico Sul		
Mês	Mês origem	Lat.	Lon.	Mês origem	Lat.	Lon.	Mês origem	Lat.	Lon.
Jan.	Dez.	18N-24N	115W-110W	Jul.	25N-28N	75W-70W	Ago.	10S-3S	20W-15W
Fev.	Ago.	3N-6N	125W-122W	Dez.	20N-22N	58W-55W	Ago.	12S-10S	19W-17W
Mar.	Dez.	1S-6N	132W-124W	Jul.	26N-28N	92W-85W	Set.	13S-7S	4W-4E
Abr.	Dez.	2N-5N	144W-142W	Jul.	16N-20N	54W-48W	Jul.	1S-2N	40W-18W
Mai.	Dez.	24S-19S	110W-98W	Ago.	22N-24N	40W-37W	Nov.	2N-4N	42W-39W
Jun.	Dez.	20S-18S	85W-80W	Nov.	33N-36N	16W-12W	Nov.	17S-13S	20W-15W
Regiões de maior correlação com a vazão									
Jan.	Jul.	13S-10S	160W-157W	Dez.	27N-30N	64W-61W	Jul.	40S-36S	24W-18W
Fev.	Jul.	6S-4S	157W-155W	Ago.	12N-15N	65W-62W	Set.	12S-8S	1E-7E
Mar.	Nov.	3N-7N	128W-125W	Set.	11N-15N	65W-60W	Set.	10s-7s	15W-12W
Abr.	Dez.	8S-5S	157W-155W	Ago.	24N-26N	85W-82W	Jul.	3S-EQ	41W-36W
Mai.	Dez.	8S-5S	156W-153W	Ago.	22N-26N	40W-30W	Ago.	6S-1S	26W-22W
Jun.	Dez.	9S-4S	156W-151W	Out.	28N-31N	64W-62W	Nov.	7S-4S	9W-6W

Tabela 4.1b - Correlações encontradas entre os valores de TSM usados como preditores e as equações finais, com os valores observados de precipitação e de vazão.

Correlações com os valores de precipitação				
Mês Região	Oceano Pacífico	Oceano Atlântico Norte	Oceano Atlântico Sul	Final
Jan.	-0,5	-0,4	+0,6	0,80
Fev.	-0,5	-0,5	+0,4	0,63
Mar.	-0,5	-0,3	+0,5	0,68
Abr.	-0,5	-0,5	+0,5	0,72
Mai.	-0,5	-0,5	+0,5	0,79
Jun.	-0,4	-0,5	+0,5	0,78
Correlações com os valores de Vazão				
Jan.	-0,5	-0,4	+0,5	0,53
Fev.	-0,5	-0,5	+0,5	0,75
Mar.	-0,5	-0,4	+0,6	0,78
Abr.	-0,5	-0,4	+0,6	0,82
Mai.	-0,6	-0,4	+0,5	0,75
Jun.	-0,5	-0,5	+0,6	0,74

De uma maneira geral, observou-se que as maiores correlações entre as séries de TSM e de Chuva ou Vazão realmente ocorrem sobre as regiões de El Niño/La Niña e do Dipolo do Atlântico, como citados acima. Embora com valores significativos, as correlações individuais nunca ultrapassam os 70%. Como seria esperado, as correlações de TSM da região do Pacífico central e do Atlântico Norte apresentaram valores negativos

indicando uma relação inversa com a precipitação e com a vazão na bacia, e que para o caso do Atlântico sul, esta correlação é positiva indicando uma relação direta. Valores de correlação com magnitudes aproximadamente iguais aos das regiões citadas foram encontrados sobre outras regiões, com aparente ausência de mecanismos físicos que representassem a relação entre as TSMs e a precipitação ou vazão da bacia da Fazenda Cajazeiras. As Figuras 4.1a e b mostram exemplos dos campos de correlação obtidos.

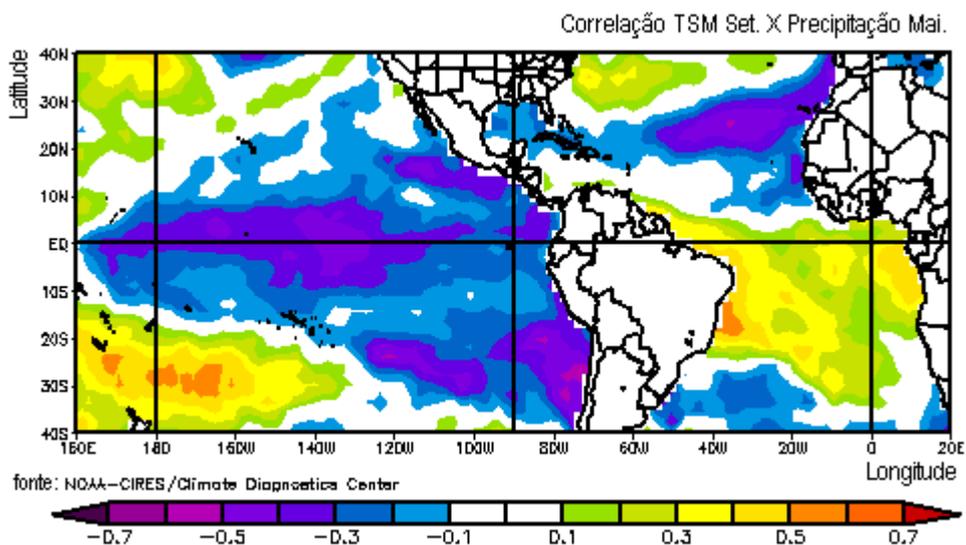


Figura 4.1a - Campo de correlação entre a TSM do mês de setembro com a precipitação ocorrida no mês de maio seguinte.

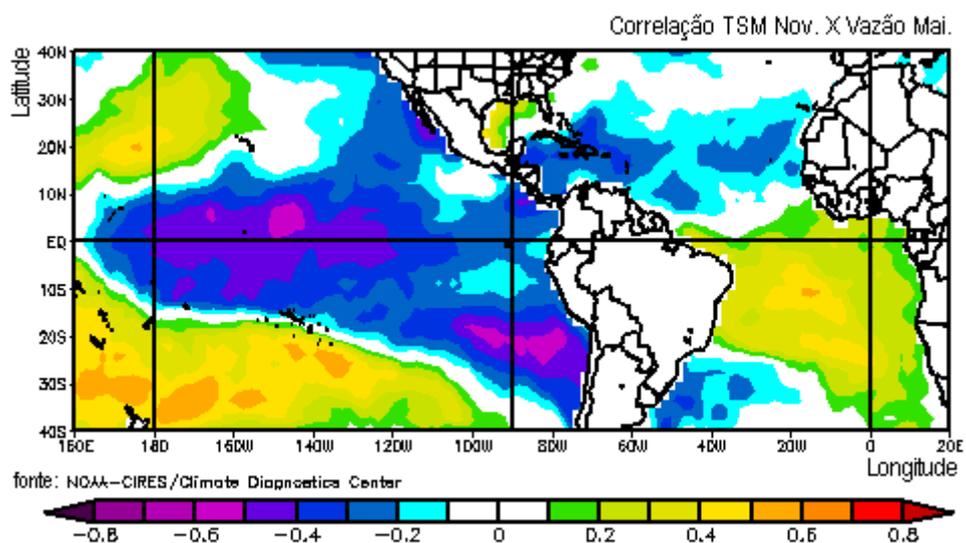


Figura 4.1b - Campo de correlação entre a TSM do mês de novembro com a vazão ocorrida no mês de maio seguinte.

Os tons de azul e de lilás mostram as áreas com correlações negativas e os tons de verde, amarelo e de laranja, as áreas com correlações positivas. Como os valores de correlação são funções do tempo e do espaço e nem sempre seu valor máximo ocorre ao mesmo tempo para lugares diferentes, na maioria das vezes as séries individuais de TSM usadas como preditores da chuva e da vazão para um determinado mês foram originárias de meses diferentes, como pode ser visto na Tabela 4.1a.

A obtenção das séries de TSM melhores correlacionadas com as séries de precipitação e de vazão permitiu a elaboração dos modelos de regressão linear múltipla para cada caso individualmente. Estes modelos foram calibrados e validados através do método de “Validação Cruzada”, usando os dados coletados e simulados referentes aos anos de 1971 a 2000 (30 anos). Como resultado obteve-se os valores de correlação de 0,74, 0,50, 0,57, 0,62, 0,72 e 0,67, respectivamente para os meses de janeiro a junho.

A Tabela 4.1b acima mostra também os valores de correlação final obtidos quando os dados de todos os trinta anos foram utilizados, respectivamente para cada um dos meses. Observa-se nesta tabela que quando os modelos de correlação linear múltipla foram montados, as correlações obtidas entre as séries de valores de vazão e de precipitação observadas e as séries de vazão e de precipitação simuladas apresentaram valores maiores que aqueles obtidos anteriormente para correlação entre os valores de TSM e de Chuva ou Vazão. A média de correlação obtida foi de 0,73 tanto para os casos da precipitação quanto para os de vazão. Os coeficientes resultantes das regressões lineares múltiplas mensais são apresentados na Tabela 4.1c.

Tabela 4.1c - Coeficientes resultantes das regressões lineares múltiplas obtidas entre os valores de TSM indicados na tabela 4.1a e as séries de precipitação e de vazão da Fazenda Cajazeiras.

	Equações para a Precipitação				Equações para a Vazão			
	Interseção	Coef. P.	Coef. A.N.	Coef. A.S.	Interseção	Coef. P.	Coef. A.N.	Coef. A.S.
Janeiro	-878,96	-23,46	-1,48	77,06	23,27	-0,30	-0,29	-0,41
Fevereiro	1490,68	-41,21	-42,00	29,95	116,12	-8,29	-3,01	8,88
Março	-982,99	-14,35	-31,46	110,50	128,67	1,75	-34,81	36,53
Abril	-611,73	-64,18	-54,79	139,34	-910,75	-13,34	-31,34	83,29
Maio	155,38	-45,20	-37,82	72,30	-28,67	-13,77	-14,25	30,44
Junho	326,96	-19,05	-12,98	22,35	32,44	-1,75	-2,62	3,28

4.3 - Dados de precipitação observados e simulados

Após o cálculo da média espacial da precipitação observada para a área da bacia (seção 3.8.2), procedeu-se a obtenção dos valores médios de precipitação simulados através dos modelos ECHAM e RSM, para a mesma área. Os resultados dos modelos ECHAM e RSM foram obtidos através da metodologia de “ensemble” com 10 membros. A média aritmética pixel a pixel dos 10 membros do “ensemble” foi calculada para fornecer o chamado membro médio, tanto para o modelo ECHAM quanto para o modelo RSM. Após o cálculo dos dois membros médios, as séries médias aritméticas da precipitação sobre a bacia foram calculadas, ponderadas proporcionalmente pela influência de cada um dos pixels sobre a área da bacia.

As simulações com os modelos foram realizadas apenas para os meses de janeiro a junho (desde 1971 a 2000); Conseqüentemente, a série de valores de precipitação observada ficou composta apenas pelos meses em que as simulações foram feitas. Existem duas razões básicas para a não realização das simulações para o período do segundo semestre. A primeira reside no fato de que aproximadamente 94,4% do total precipitado climatologicamente durante o ano, cai no decorrer dos meses de janeiro a junho, diminuindo consideravelmente a importância de se simular o segundo semestre do ano. Por outro lado, a realização das simulações tanto do ECHAM quanto do RSM, são computacionalmente muito dispendiosas e, como as simulações para o segundo semestre foram evitadas, tiveram seus custos reduzidos pela metade. Só para se ter uma idéia, a simulação da climatologia do RSM (que é bem menos custosa que a do ECHAM) demorou 50 dias ininterruptos em 14 computadores com processadores de 1 GHz de velocidade de processamento.

As simulações com o ECHAM e RSM foram realizadas a partir das TSMs observadas, no chamado modo ótimo, cujos resultados apresentam os menores erros possíveis. A Figura 4.2 apresenta as séries temporais de dados observados e simulados, tanto pelo ECHAM, quanto pelo RSM, para o período de 1971 a 2000 (janeiro a junho), representativos da bacia com exutório na Fazenda Cajazeiras. Verifica-se que existe uma concordância relativamente boa entre os valores observados e aqueles simulados pelo ECHAM.

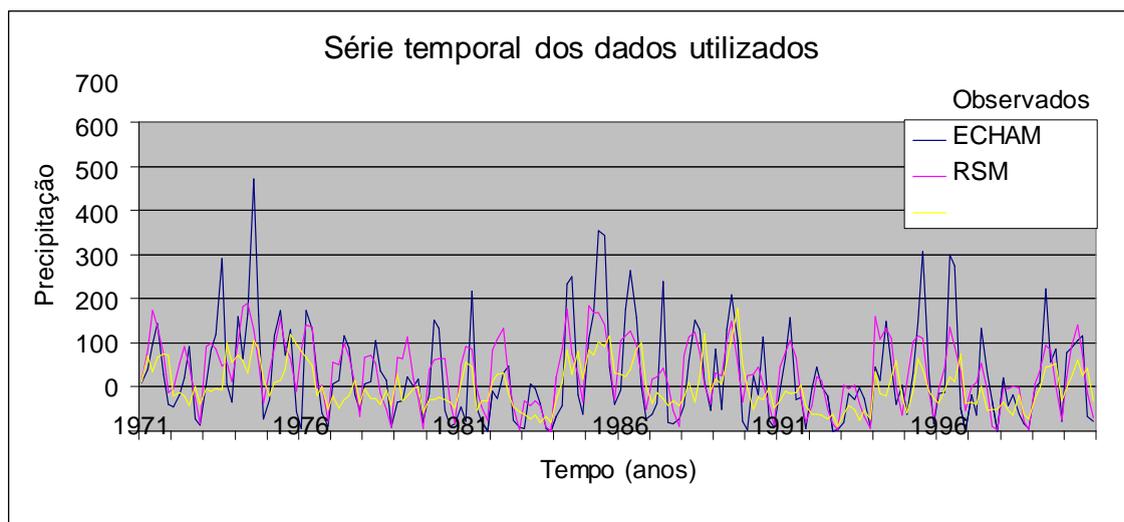


Figura 4.2 - Séries de precipitação observada, e calculadas pelos modelos ECHAM e RSM, para o período de 1971 a 2000 na área de captação da bacia hidrológica da Fazenda cajazeiras. Os dados se referem apenas aos seis primeiros meses de cada ano.

Por outro lado, a concordância entre os valores observados e os simulados pelo RSM não parece ser tão significativa. Este fato pode ser melhor observado na Figura 4.3, que contém a climatologia observada e as simuladas (pelo ECHAM e pelo RSM) para o período que compreende o primeiro semestre do ano. Estas observações contemplam as razões para a ocorrência dos valores de correlação encontrados. A correlação linear encontrada entre os valores mensais simulados pelo ECHAM e os observados foi de $r = 0,71$. Já no caso do RSM esta correlação foi de $r = 0,49$, sendo esta última considerada muito baixa. A principal causa para esta queda na correlação estaria provavelmente associada à diferença entre o tamanho das áreas dos pixels (espaçamento de grade) do ECHAM e do RSM. Para verificar se isto era verdade, foram realizadas várias simulações onde os pixels do RSM foram agregados aos seus vizinhos numa progressão que vai desde o tamanho do pixel do RSM até um tamanho um pouco maior que o do pixel do ECHAM. As séries médias decorrentes da agregação destes pixels foram calculadas, tanto para a precipitação observada (dados interpolados para a grade do RSM) quanto para a precipitação simulada pelo RSM. Os valores de correlação entre estas séries foram calculados e os resultados mostraram que, de fato, na medida em que a área considerada aumenta, a correlação entre as séries também aumenta. Os valores encontrados situaram-se progressivamente entre os já citados.

As correlações anteriores são calculadas para valores mensais. Quando os totais semestrais de precipitação são analisados, verifica-se que as correlações aumentam significativamente, sobretudo a calculada entre os valores de precipitação observados e os simulados pelo RSM. Os valores de correlação encontrados para os totais semestrais foram de 0,88 e 0,87 para as correlações dos dados observados com os simulados pelo ECHAM e pelo RSM, respectivamente. O aumento generalizado nas correlações encontradas deve-se

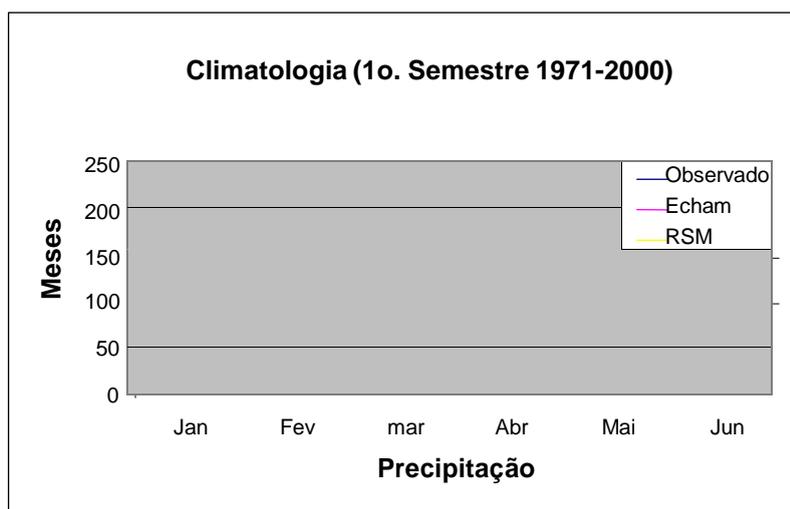


Figura 4.3 - Climatologia dos dados de precipitação observados e simulados pelos ECHAM e RSM para o período de 1971 a 2000.

provavelmente ao fato de que quanto maior for a amostra, maior será a probabilidade de que todas as possibilidades relacionadas ao evento estejam presentes e, conseqüentemente, haverá um aumento em sua representatividade. Por outro lado, a totalização da precipitação em um determinado intervalo de tempo, faz com que sua variabilidade ao longo do tempo diminua. A variabilidade dos totais semestrais é menor que a variabilidade dos totais mensais, porque qualquer variação existente ao longo do semestre (mês a mês) deixará de existir quando os valores mensais forem acumulados.

4.3.1 - Correções nos dados simulados pelos modelos ECHAM e RSM

Um dos objetivos básicos deste trabalho é o de tentar melhorar as relações entre as séries de dados, corrigindo-os de distorções possivelmente geradas durante as simulações.

Sendo o modelo regional desenvolvido para simular o comportamento da atmosfera em um nível de detalhamento maior que o do modelo global, o RSM tem a função de melhorar a qualidade dos resultados simulados sobre aqueles do ECHAM. Como pode ser observado em Moncunil *et al.* (2002), nem sempre isto acontece. Embora os resultados

possam ser realmente melhorados, existem alguns pixels dentro da área de simulação sobre os quais não há melhoria com o uso do modelo Regional. De fato, este parece ser o caso da relação entre as séries de dados simulados pelo ECHAM e RSM para a área da bacia da Fazenda Cajazeiras, já que os coeficientes de correlação sugerem que esta melhoria não aconteceu. A metodologia de correção dos dados simulados usada visa auxiliar na superação deste tipo de dificuldade.

A dificuldade acima deve está sendo acentuada por se estar trabalhando com valores mensais. Como mencionado anteriormente, quando as correlações entre os totais semestrais dos casos ECHAM e RSM são obtidas, seus valores aumentam significativamente, em relação aqueles obtidos com os totais mensais. Mesmo no caso dos totais semestrais, a correlação entre os resultados do ECHAM foi superior que a do RSM, embora esta diferença seja insignificante. É importante observar que mesmo que o resultado da correlação com RSM tenha sido inferior ao do ECHAM para a área da bacia, ainda resta o detalhamento espacial como benefício para os resultados do RSM, já que os resultados do ECHAM não apresentam a mesma qualidade na distribuição espacial. Para os valores mensais, entretanto, a diferença nos valores de correlação obtidos para os dois modelos foi bastante significativa. Esta diferença é atribuída ao fato de que o modelo, por ser do tipo climatológico, apresenta maior dificuldade em precisar variações na precipitação para intervalos de tempo menores.

Devido à necessidade da existência de valores mensais adequados, optou-se pela busca de metodologias apropriadas para sua melhoria. Como uma das principais características do modelo regional (RSM) é a simulação das estatísticas climatológicas da precipitação, duas metodologias que usam estas características foram utilizadas. A primeira é conhecida nos meios da hidrologia por Desagregação e a segunda foi denominada de Correção Gama.

4.3.1.1 - A Desagregação dos dados de precipitação

Como pode ser visto através dos coeficientes de correlação, os valores precipitação acumulada simulados pelos modelos ECHAM e RSM são melhores quando o período considerado é maior. Valores mensais, entretanto, são importantes para o planejamento nas diversas áreas do campo da hidrologia operacional. Uma das formas de se obter os totais

mensais de precipitação, a partir dos totais semestrais, é através da desagregação. Neste trabalho, os coeficientes de desagregação foram calculados a partir dos dados de precipitação observada. Estes cálculos constituem-se da simples divisão das médias mensais climatológicas pelo total anual médio para o mesmo período. Estas divisões fornecem como resultado o conjunto de coeficientes mensais a serem usados na desagregação. Esta metodologia foi aplicada ao conjunto total de dados e também aos conjuntos de dados classificados por qualidade da quantidade de chuva do período (*Acima do Normal*, *Normal* e *Abaixo do Normal*). Os resultados são apresentados na Figura 4.4, anualmente para os 30 anos de dados do período de simulações, e na Tabela 4.2 para as médias mensais durante os seis primeiros meses do ano para o conjunto com todos os valores e separados em função da qualidade da chuva precipitada.

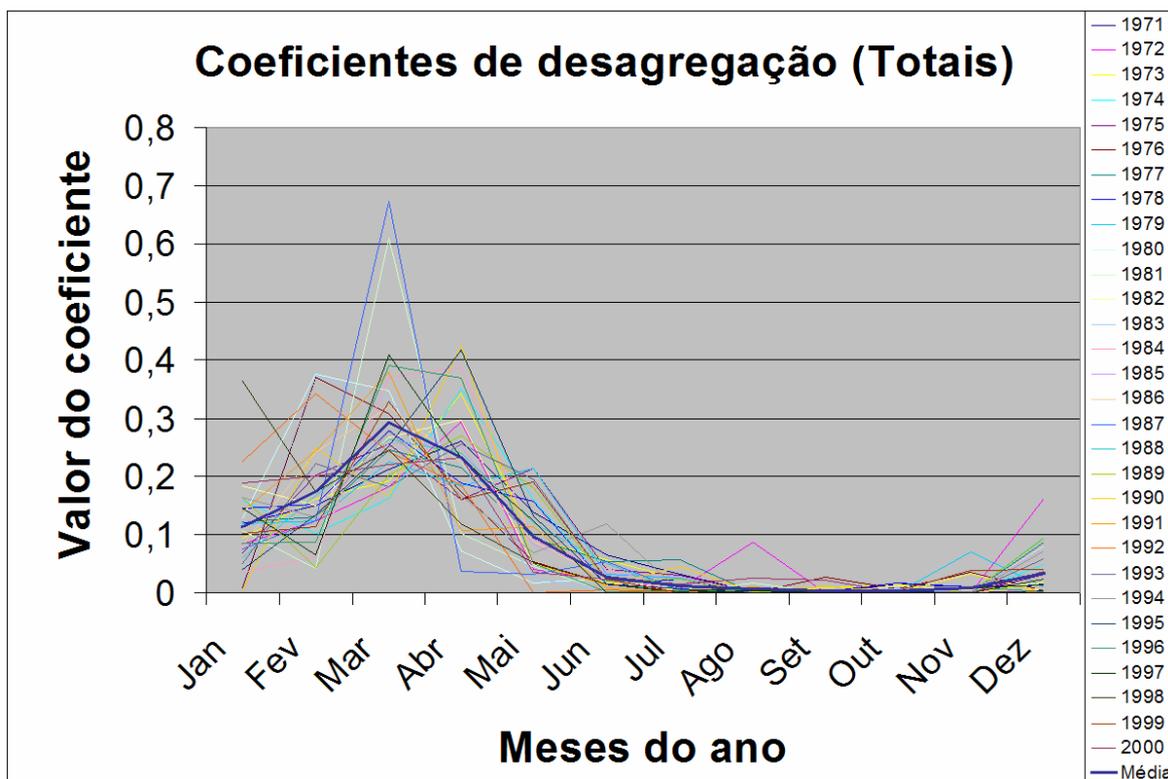


Figura 4.4 - Coeficientes de Desagregação calculados para cada um dos trinta anos da série de precipitação média mensal observada na Fazenda Cajazeiras.

A Figura 4.4 mostra a variabilidade de um ano para o outro, existente entre os coeficientes obtidos. A linha azul mais espessa representa a média aritmética dos valores mensais dos coeficientes. Observa-se, como já mencionado, que a maior parte da

precipitação ocorre durante o primeiro semestre do ano, e que, exceto talvez para os meses de julho e dezembro, os coeficientes de desagregação para o segundo semestre podem ser desconsiderados.

A Tabela 4.2 apresenta os valores médios mensais dos coeficientes de desagregação. Estes valores foram calculados a partir do conjunto dos 30 anos de dados (*Todos*) e a partir dos conjuntos dos 10 anos mais secos (*Abaixo*), 10 anos em torno da média (*Normal*) e 10 anos mais chuvosos (*Acima*). Observa-se que quando todos os dados são utilizados, o valor máximo de coeficiente acontece no mês de março. Este mesmo comportamento é observado quando os anos abaixo da normal e dentro da faixa normal são analisados. Para os anos dentro da faixa considerada acima da normal, o máximo acontece no mês de abril. Outra diferença significativa encontrada entre os coeficientes dos anos acima do normal e os demais, é que seu mês de janeiro apresenta-se com precipitações menores.

Tabela 4.2 - Valores médios dos Coeficientes de desagregação.

Mês	Coeficientes			
	Todos	Abaixo	Normal	Acima
1º semestre				
Janeiro	0,113	0,111	0,113	0,097
Fevereiro	0,173	0,208	0,193	0,140
Março	0,293	0,341	0,282	0,262
Abril	0,231	0,199	0,209	0,278
Mai	0,096	0,076	0,080	0,131
Junho	0,028	0,015	0,039	0,028
%Total da Precipitação Anual	0,934	0,950	0,916	0,936
2º semestre				
Julho	0,012	0,009	0,014	0,013
Agosto	0,006	0,003	0,013	0,002
Setembro	0,003	0,002	0,005	0,001
Outubro	0,003	0,002	0,004	0,002
Novembro	0,009	0,011	0,009	0,005
Dezembro	0,034	0,023	0,038	0,041
%Total da Precipitação Anual	0,066	0,050	0,084	0,064

A observação destas duas diferenças sugere que o período de ocorrência da precipitação sobre a bacia da Fazenda Cajazeiras é retardado em aproximadamente um mês, quando o total precipitado acontece dentro da faixa considerada acima da faixa normal. Além disto, se a precipitação do mês de janeiro estiver abaixo da faixa normal, existe uma maior possibilidade deste ser um ano com índices pluviométricos um pouco mais altos. Estas diferenças podem ser observadas na Figura 4.3 que mostra a variabilidade

de todos os casos estudados, através dos primeiros e terceiros quartís. Pode-se observar também que em anos considerados secos (precipitação dentro da faixa abaixo da considerada Normal), a precipitação ocorrida durante os meses de fevereiro e, principalmente, março, contribuem decisivamente para a qualidade de seus regimes de precipitação.

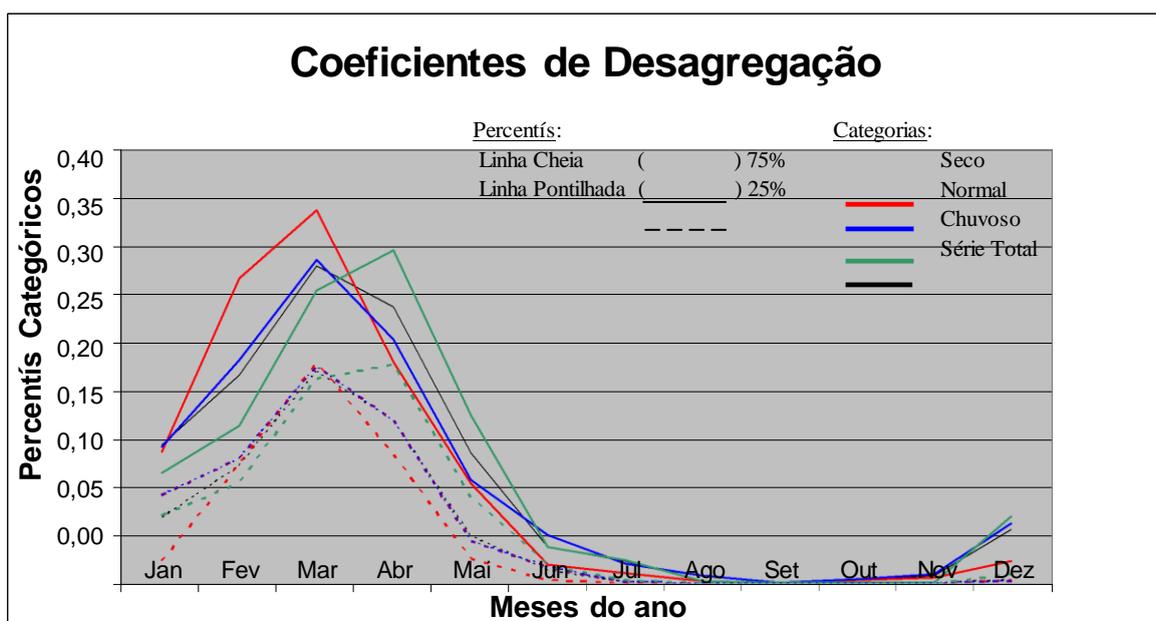


Figura 4.5 - Faixas de variação dos valores dos coeficientes de desagregação, nas diferentes situações estudadas.

Uma vez determinados, os coeficientes foram aplicados aos dados simulados para sua correção. Como as séries de precipitação foram simuladas apenas para o primeiro semestre do ano (portanto apenas os totais deste semestre estavam disponíveis), a diferença entre os totais anuais e dos primeiros semestres teve que ser compensada no momento da aplicação dos coeficientes. Isto foi feito multiplicando-se um coeficiente de compensação (divisão entre os totais médios observados durante o primeiro semestre e os totais médios observados durante o ano todo), por cada um dos valores obtidos durante a desagregação. As correlações obtidas entre os valores mensais simulados e observados, após a desagregação, foram de 0,79 para ambos os modelos (ECHAM e RSM). Quando a separação por regime de chuvas foi feita, os valores de correlação aumentaram para 0,81.

4.3.1.2 - A Correção Gama

No caso da Correção Gama, os valores de precipitação mensal simulados tanto pelo ECHAM quanto pelo RSM, foram substituídos pelos valores observados que apresentassem as mesmas características de probabilidade. Para que isto pudesse ser mais facilmente feito, as funções de densidade de probabilidade das precipitações observada e simuladas foram aproximadas por Funções Gama. As comparações entre as Funções Gama geradas a partir das series de dados observados e simulados, tanto para os resultados do ECHAM, quanto para os resultados do RSM, permitem o ajuste dos dados simulados. As Figuras 4.3 a e b abaixo, mostram o processo de transformação dos dados simulados, através de sua substituição pelos dados observados.

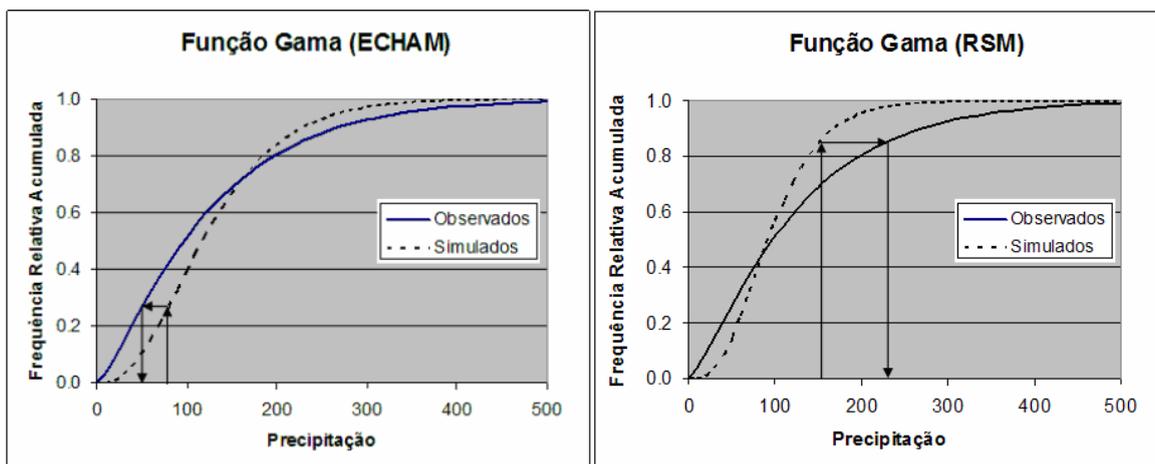


Figura 4.6 - Densidade de probabilidade dos dados observados e simulados, aproximados por Funções Gama para os casos: a) - do ECHAM (esquerda) e b) - do RSM (direita).

De acordo com a metodologia apresentada no capítulo anterior (seção 3.2.2), as frequências relativas acumuladas dos valores simulados foram comparadas com as frequências relativas acumuladas dos valores observados que os substituíam. Desta forma, uma nova série de dados foi gerada, mantendo as características de densidade de probabilidade simuladas.

Os modelos de correção Função Gama foram elaborados utilizando-se os vinte primeiros anos da série de dados disponível. O restante da série foi usado para testar a qualidade do modelo. Os resultados aqui apresentados foram obtidos com o uso apenas dos últimos 10 anos de dados. A Tabela 4.3 apresenta os coeficientes mensais usados na

Função Gama, tanto diretamente sobre as séries de dados previstos pelo ECHAM e pelo RSM, quanto inversamente sobre a série de dados observados.

Tabela 4.3 - Conjunto de coeficientes da Função Gama, usados para a correção da chuva simulada.

Séries	Coef.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.
Observada - Inversa	α	1,67	2,98	5,87	2,20	1,53	1,87
	β	52,19	46,94	39,82	96,52	60,59	14,76
ECHAM - Direta	α	10,86	11,88	14,22	7,51	4,17	1,49
	β	14,32	15,20	14,54	20,74	24,24	27,61
RSM - Direta	α	7,00	6,04	6,25	3,55	3,97	3,16
	β	14,95	17,55	17,67	30,44	34,99	28,37

Como o comportamento da atmosfera é diferente, em função dos sistemas meteorológicos predominantes, a cada mês, o comportamento do regime de precipitação também é diferente para cada mês. Desta forma, optou-se pela construção de uma Função Gama para cada um dos meses em questão. Após a Correção Gama, verificou-se um significativo aumento na correlação entre os valores mensais simulados e aqueles observados. No caso do modelo ECHAM, o valor do coeficiente de correlação subiu para $r = 0,78$ enquanto para o modelo RSM este valor aumentou para $r = 0,79$. A Correção Gama sobre os totais dos períodos proporcionou um leve aumento nos coeficientes de correlação. No caso do ECHAM este valor subiu para $r = 0,90$, enquanto para o RSM este não foi alterado ($r = 0,87$).

Uma comparação entre os valores de correlação obtidos das diversas formas pode agora ser feita. A Tabela 4.4 abaixo resume os valores dos coeficientes de correlação encontrados.

Tabela 4.4 - Valores de correlação relativos aos dados de precipitação observados e simulados, originais e corrigidos.

	Totais Mensais		Totais Semestrais	
	ECHAM	RSM	ECHAM	RSM
Valores originais	0,71	0,49	0,88	0,87
Correção Gama	0,78	0,79	0,90	0,87
Desagregação				
Sem classificação	0,79	0,79	-	-
Com classificação	0,81	0,81	-	-

Observa-se que os maiores valores de correlação foram encontrados quando os totais semestrais foram usados. Por sua própria definição, resultados de Desagregação para o total semestral não existem. A Correção Gama para os totais semestrais por outro lado, não melhorou significativamente os dados originais. Quando os totais mensais foram trabalhados, os melhores resultados foram obtidos através da desagregação, sobretudo quando a classificação por regime de chuva foi usada. Observa-se, entretanto, que os coeficientes de correlação para os totais mensais não apresentam diferenças significativas entre si. Assim, apesar da desagregação com classificação ter apresentado as melhores correlações, optou-se pela escolha dos resultados corrigidos através da Função Gama, pois esta não teria problemas na previsão de em qual mês iria acontecer o máximo da precipitação do período, como ocorre com o caso da desagregação.

4.4 – Vazões obtidas a partir dos resultados dos modelos atmosféricos.

Como pode ser observado no esquema da Figura 3.4 (cap. anterior), e descrito no *caput* deste capítulo, existem duas possibilidades onde a precipitação simulada pelos modelos ECHAM e RSM são transformadas em vazão, através de regressões lineares simples. Para realização dos cálculos nesta parte do trabalho usaram-se as séries de dados resultantes da correção feita com o Modelo Gama. Desta forma os coeficientes das curvas de regressão foram calculados comparando-se os valores de precipitação gerados pelos modelos ECHAM e RSM com os da vazão observada para o período de 1971 a 1995. O restante do período (1996 a 2000) foi usado para verificação das equações de regressão obtidas. Tendo os modelos ECHAM e RSM sido executados apenas para o 1º semestre do ano, apenas os dados dos meses de janeiro a junho foram usados. Como este método resume-se a apenas uma regressão linear simples, existe sempre a possibilidade da ocorrência de valores negativos para a vazão, quando valores pequenos (ou nulos) de precipitação são usados. Nestes casos, como a vazão não pode assumir valor negativo, os valores inferiores a zero obtidos foram substituídos por vazão zero. A Tabela 4.5 resume as características das duas equações obtidas.

Tabela 4.5 - Resumo das características dos dados obtidos com os Modelos Estatísticos.

	Observado	ECHAM	RSM
Correlação c/ Observado	-	0,73	0,58
Média	6,66	9,37	12,29
Desvio. Padrão	12,31	13,16	15,78
Constante da regressão	-	-6,10	-7,45
Coefficiente Angular	-	0,15	0,17

Observa-se na Tabela 4.5 que, também neste caso, os resultados obtidos com os dados do ECHAM, foram de qualidade superior aos obtidos com os dados do RSM. Esta diferença pode ser constatada tanto na Média aritmética quanto no Desvio Padrão e no Coeficiente de Correlação. Com relação à média aritmética individual dos conjuntos de dados, verifica-se que para o RSM esta se mostrou mais afastada do valor original que a do ECHAM. O Desvio Padrão, por sua vez, mostra que os dados do RSM apresentam acentuadamente maior variabilidade do que os do ECHAM. Já os coeficientes de correlação mostraram que a relação entre os valores observados e os simulados com auxílio do RSM, seria mais fraca que a relação existente entre os dados observados e os simulados com auxílio do ECHAM.

4.5 - O modelo CN-3S e sua calibração

A maneira mais comum de se obter séries sintéticas de vazão com base em precipitação é através do uso dos modelos hidrológicos chuva-vazão. Para que as séries de vazão assim obtidas possam ser confiáveis, é necessário que os modelos hidrológicos que as geraram tenham sido calibrados e validados. Sendo a série de chuva usada como dado de entrada do modelo hidrológico, uma simulação chuva-vazão, utilizando como precipitação a previsão para determinado prazo, é uma previsão. Partindo deste princípio, as séries de chuva previstas através do uso dos modelos ECHAM e RSM para a bacia da Fazenda Cajazeiras são usadas para que a previsão das vazões possa ser feita. Como descrito no capítulo anterior, o modelo chuva-vazão usado foi o CN-3S. As séries usadas no modo de previsão, como dado de entrada para o modelo hidrológico, foram aquelas geradas pelos modelos ECHAM e RSM e corrigidas pelo Modelo Gama. Para calibração e validação do CN-3S, foram usadas as séries de chuva e de vazão observadas durante o período de 1971 a 1995 e de 1996 a 2003 respectivamente.

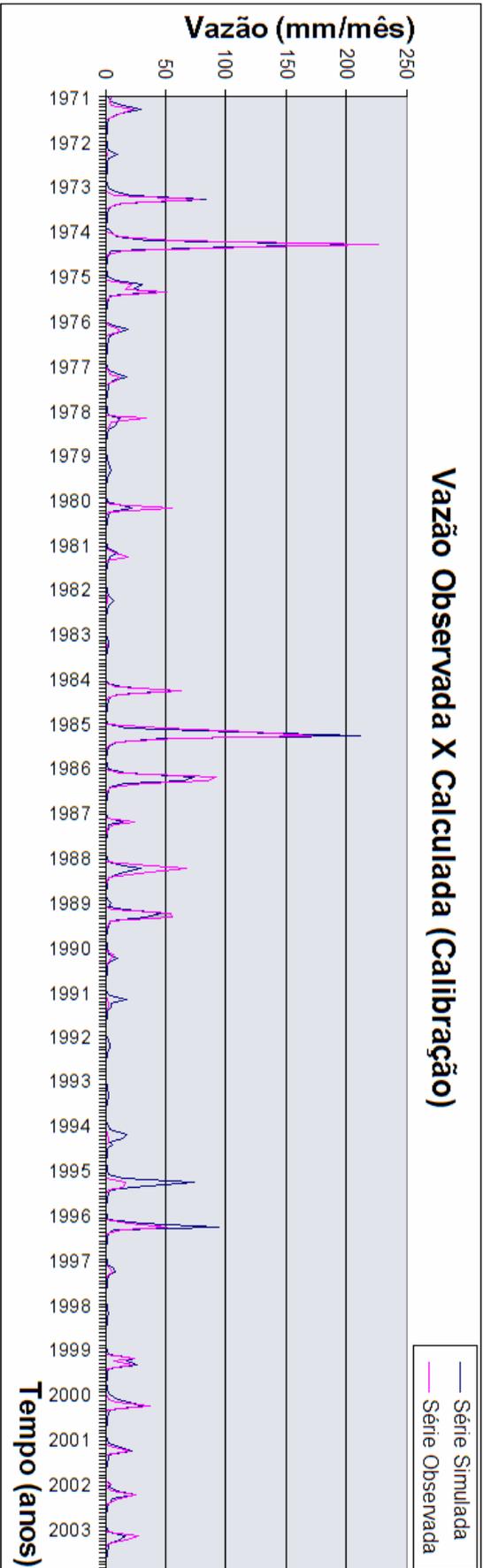


Figura 4.7a - Series de Vazão Observada e Simulada com o Modelo Hidrológico CN-3S, para a bacia da Fazenda Cajazeiras. Série completa (calibrada com os dados de 1971 a 1995).

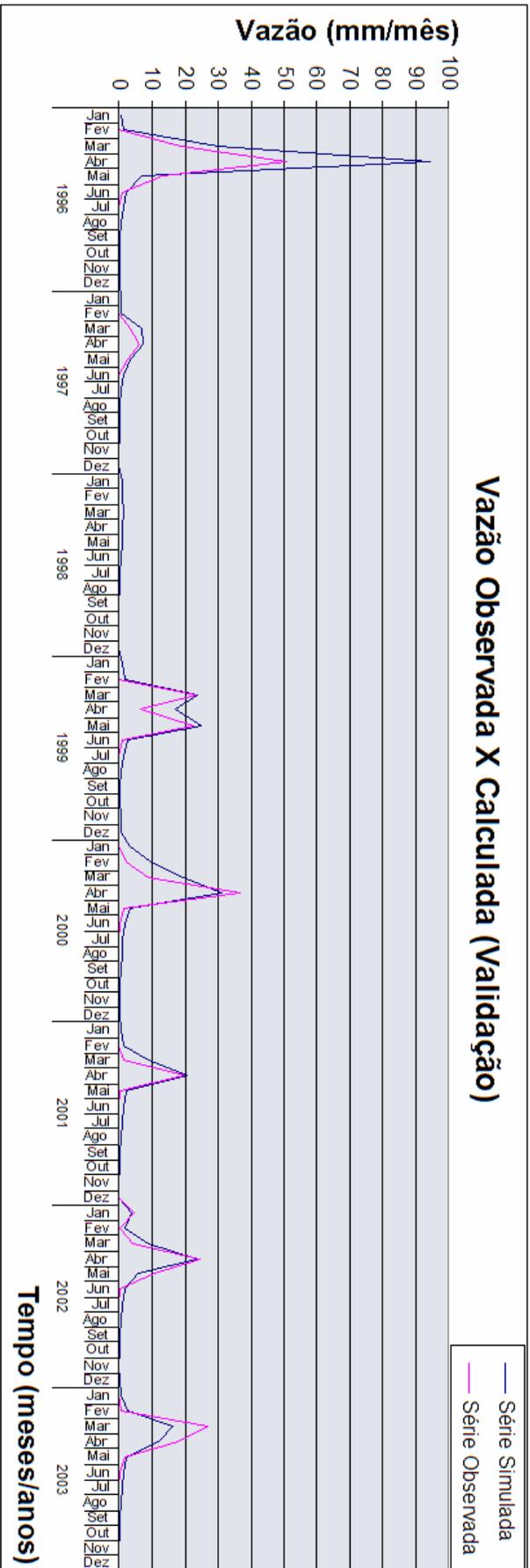


Figura 4.7a - Series de Vazão Observada e Simulada com o Modelo Hidrológico CN-3S, para a bacia da Fazenda Cajazeiras. Período de pós-calibração (1996 a 2003)

A análise da série de vazão observada na Fazenda Cajazeiras durante o período de 1971 a 2003, mostra uma vazão média mensal de 5,72 mm/mês, com um coeficiente de assimetria de 0,012 e desvio padrão de 20,49 mm/mês. Para os 25 anos do *período de calibração* (1971 a 1995) as séries de vazão observada e simulada apresentaram respectivamente para a média, coeficiente de variação e desvio padrão, os valores de 6,50 mm/mês, 0,049 e 23,01 mm/mês, e 6,95 mm/mês, 0,089 e 21,95. O coeficiente de correlação entre estas duas séries para o período de calibração foi de 0,95 e o erro quadrático médio foi de 51,31 (mm/mês)². Já para o *período de verificação* (1996 a 2003), as médias, coeficientes de variação e desvios padrão da vazão observada e simulada foram respectivamente de 3,27 mm/mês e 4,54 mm/mês, 0,038 e 0,126, e 8,51 mm/mês e 12,12 mm/mês. O coeficiente de correlação entre as duas séries durante o período de verificação foi de 0,91 e o erro padrão encontrado foi de 28,18 (mm/mês)².

Tabela 4.6 - Aplicações do modelo CN-3S à bacias do Nordeste do Brasil, incluindo a da Fazenda Cajazeiras (adaptada de Freitas e Porto, 1990).

NOME DA BACIA	Pedra Redonda	Groairas	Matriz	Antenor Navarro	Pajeú	Maria Preta	Fazenda Cajazeiras
Área (km ²)	3340	2759	468	1257	6170	-	1550
Estado	Pi	Ce	Pe	Pb	Pe	Pi	Ce
Parâmetros Calibrados							
CNI	24.0	26.5	21.1	15.5	16.5	23.7	2,6
α	0.2	0.2	0.225	0.2	0.2	0.2	0,016
β	0.00300	0.00135	0.00260	0.00390	0.00600	0.003	0,003639
K_0	0.57	0.88	1.00	0.69	0.25	0.94	0,84
K_1	0.0105	0.0110	0.0090	0.0180	0.0600	0.01	0,0256
K_2	0.42	0.95	0.95	0.40	0.40	0.33	0,68
Série Observada							
Média (mm/mês)	2.02	8.50	2.19	4.59	6.20	2,85	6,50
Desvio Padrão (mm/mês)	6.01	31.12	7.40	15.98	20.08	8,23	23,01
Assimetria (tipo)	4.13	6.09	5.11	4.34	5.69	2,81	6,50
Série Calculada							
Média (mm/mês)	2.05	8.33	2.15	4.59	6.86	2,67	6,95
Desvio Padrão (mm/mês)	5.83	31.43	7.24	12.75	18.98	8,27	21,95
Assimetria (tipo)	3.98	5.92	5.29	3.85	6.54	2,67	5,79
Correlação Mensal	0.916	0.978	0.983	0.921	0.956	0,935	0,950

CNI = coeficiente que traduz a relação solo-vegetação

α = parâmetro relacionado à interceptação e infiltração

β = parâmetro de ajuste relacionado à chuva antecedente

K_0 = parâmetro de ajuste relacionado à chuva antecedente

K_1 = taxa de alimentação do lençol freático

K_2 = taxa de depleção do lençol freático

A Tabela 4.6 (adaptada de Freitas e Porto, 1990) apresenta algumas das aplicações do modelo CN-3S feitas à bacias hidrológicas da região do Semi-Árido Nordeste. A tabela essencialmente contém as áreas, os Estados, os parâmetros calibrados e as Médias, Desvios Padrão e Coeficientes de Assimetria das séries observadas e geradas para cada uma das bacias citadas. Os resultados referentes à Fazenda Cajazeiras são apresentados em destaque nesta tabela. Quanto aos parâmetros calibrados, verifica-se que, exceto pelo o parâmetro α , todos os outros parâmetros ocorreram dentro de seus respectivos intervalos de variação, dentre os demais já publicados. O resultado numérico do parâmetro α entretanto, mostra-se bem inferior e fora do intervalo de variação dos demais citados. Este parâmetro que é responsável pelas relações de interceptação e infiltração no modelo, basicamente representa a capacidade de armazenamento de água do solo. Os técnicos do U. S. Conservation Service adotam α igual 0.2, ou seja, 20% da capacidade de armazenamento do solo (Freitas e Porto, 1990). O baixo valor encontrado para este parâmetro na Fazenda Cajazeiras pode indicar a possibilidade de solos muito rasos e com baixíssima capacidade de armazenamento. Isto, no entanto, não pôde ser verificado.

Em termos estatísticos, como pode ser visto através da comparação dos resultados obtidos para as séries de vazão observada e calculada, incluindo os da Fazenda Cajazeiras, o CN-3S parece ter feito um bom trabalho para todos os casos apresentados na Tabela 4.6. O significado da palavra *Assimetria* na tabela 4.6, não foi esclarecido pelo autor. Esta variável, entretanto, parece representar as diferenças entre os valores das *médias aritméticas* em cada caso, e suas respectivas *medianas* (ou *modas*). Assim as diferenças entre as médias e as medianas foram calculadas para o caso da Fazenda Cajazeiras, para que a tabela pudesse ser completa. Desta forma, o que se tem é apenas o tipo de assimetria que em todos os casos apresentou-se positiva, como seria de se esperar para distribuições de vazão em rios de regiões similares. Os desvios padrão de aproximadamente quatro vezes o valor da média (coeficiente de variação de 354% para o caso da Fazenda Cajazeiras), quando não existem valores negativos, mostram um elevado grau de variabilidade nos valores das séries. A unanimidade em alta variabilidade encontrada sugere ser este o caso da vazão em geral para rios deste porte na região semi-árida Nordeste. Como pode ser observado na Tabela 4.6, as correlações entre as séries observadas e geradas apresentaram sempre valores superiores a 90%. A comparação dos resultados obtidos para as duas séries reforça a qualidade do CN-3S em reproduzir as

características da vazão para este tipo de rio. Pelo exposto e também pela análise do comportamento das curvas que pode ser observado na Figura 4.7, pode-se concluir que, apesar do CN-3S ser um modelo semi-empírico, os resultados obtidos para a Fazenda Cajazeiras mostram-se de boa qualidade; Esta foi uma das razões de sua escolha como parte deste trabalho.

4.6 - Comparações entre os modelos e os erros envolvidos

De acordo com a metodologia proposta, seis caminhos diferentes podem ser usados para, a partir dos valores de TSM, se obter a previsão dos valores de vazão na Fazenda Cajazeiras. Visando uma utilização posterior, seria importante saber quais destes caminhos (ou modelos) teriam maiores possibilidades para apresentar melhores resultados. A comparação entre os seis modelos é feita baseada nos dados dos anos de 1971 a 2000. Lembrando que os modelos atmosféricos ECHAM e RSM não fornecem as previsões de precipitação para o segundo semestre do ano e que se pretende prever as vazões ocorrendo apenas durante os meses de janeiro a junho, a comparação entre os resultados das seis opções disponíveis é limitada aos resultados do primeiro período do ano.

Metade das seis opções (apresentadas na Figura 3.4 e na Tabela 4.7) disponíveis usa o CN-3S para gerar as séries de vazão como parte de seu processo. Estas opções são os DE-II, DE-V e DE-VI. As outras três não usam. Como visto anteriormente, o DE-I é constituído por (seis) regressões lineares múltiplas mensais diretas entre valores de TSM e a vazão da bacia. Os DE-III e DE-IV são constituídos por regressões lineares simples entre as séries de precipitação geradas pelos modelos atmosféricos ECHAM e RSM respectivamente com a série de vazão observada. No modelo DE-II, uma série de valores de precipitação é gerada para a área da bacia, através da equação de regressão linear múltipla que correlaciona séries de TSM com a série de chuva observada, para servir de entrada para o CN-3S que, por sua vez, gera os valores de vazão. Nos modelos DE-III e DE-IV as séries de precipitação são geradas respectivamente pelos modelos ECHAM e RSM para serem submetidas ao CN-3S que gera as séries de vazão.

As séries de precipitação geradas no DE-II e pelos modelos ECHAM e RSM contêm apenas dados referentes aos meses de janeiro a junho de cada ano. Como visto anteriormente o CN-3S precisa ter disponível os valores de precipitação referentes aos três

meses anteriores ao período que se pretende simular. Assim, para que o modelo CN-3S funcione mais adequadamente, entendeu-se conveniente ter-se séries anuais de precipitação completas. Desta forma, para completar as séries de precipitação geradas, a climatologia da precipitação dos meses de julho a dezembro foi usada. A Tabela 4.7 apresenta a climatologia da precipitação média mensal ocorrida sobre a Fazenda Cajazeiras. Uma vez as séries anuais de vazão geradas, os valores obtidos para os meses de julho a dezembro foram excluídos.

Tabela 4.7 - Climatologia da precipitação média mensal (mm/mês) observada sobre a Fazenda Cajazeiras (1971 – 2000)

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
89,80	130,62	227,76	199,24	85,07	24,63	10,92	4,22	2,23	2,22	5,96	30,66

A Tabela 4.8 resume as características estatísticas de cada um dos casos. Ali podem ser vistos os valores das médias, os desvios padrão e os coeficientes de variação, assimetria e de curtose para as séries de vazão observada e simulada para a Fazenda Cajazeiras. Os coeficientes de correlação encontrados entre as séries geradas por cada uma das possibilidades e os valores observados, além dos erros quadráticos médios, erro padrão e significância estatística (representada pelo “t de Student”), encontrados para cada um dos casos, também são fornecidos nesta tabela. Os erros quadráticos médios, os erros padrão são calculados e usados como indicadores da qualidade de cada uma das opções adotadas como solução.

Tabela 4.8 - Comparação entre as características da série de vazão observada e das séries obtidas através de cada um dos seis modelos estudados.

Série/Modo	Observada	DE-I	DE-II	DE-III	DE-IV	DE-V	DE-VI
Média (mm/mês)	11,88	13,22	12,72	13,09	13,84	12,70	12,71
Desvio Padrão (mm/mês)	29,07	23,07	28,19	15,28	16,87	25,66	27,00
Coeficiente de Variação (%)	245	175	222	117	122	202	212
Coeficiente de Assimetria	1,16	1,39	1,04	1,20	1,12	1,19	1,12
Coeficiente de Curtose	0,114	0,265	0,182	0,302	0,258	0,145	0,148
Coeficiente de Correlação	-	0,86	0,94	0,54	0,58	0,80	0,80
Erro quadrático médio	-	225,36	98,28	597,00	562,36	306,89	324,86
Erro padrão	-	0,048	0,026	0,120	0,105	0,051	0,049
T de Student	-	22,40	36,96	8,56	9,48	17,87	17,49

Os valores médios encontrados para cada um dos casos são sempre um pouco superiores àquele da vazão observada. Isto não constitui erro grave, mas mostra os DEs II, V e VI apresentando os melhores resultados. Nos casos DEs I e II este pequeno aumento

foi reforçado pela substituição de alguns dos valores pelo valor de zero que, devido constituírem-se de apenas regressões lineares, apresentaram pequenos valores de “vazão negativa”. Os desvios padrão, assim como os coeficientes de variação, mostram que os valores simulados apresentaram menos variabilidade que os valores observados, e sugerem que os DEs II, V e VI são os melhores resultados. Exceto pelo DE-I que se mostrou, através do Coeficiente de Assimetria, um pouco mais assimétrico que os valores observados, os demais não apresentaram diferenças significativas na assimetria. Já o Coeficiente de Curtose, mostrou que os resultados dos DEs I, III e IV, são de duas a três vezes mais dispersos que os valores observados. Verifica-se também que existe uma diferença de curtose, não muito acentuada, mas significativa, entre os resultados observados e os do DE-II.

Observa-se que existe uma grande variabilidade entre os resultados obtidos para cada um dos casos. Rapidamente pode se perceber que os melhores resultados devem ser obtidos com o uso do DE-II e que os DE-III e IV provavelmente oferecerão os piores resultados. Estas conclusões são reforçadas pela análise dos coeficientes de correlação, que foi muito bom para o DE-II e foram os piores para os DEs III e IV. A análise dos erros médios quadráticos e erro padrão é favorável ao DE-II e desfavorável aos DEs III e IV; A figura 4.8 apresenta a relação encontrada entre os erros padrão de cada caso, onde claramente se verifica esta afirmativa. O valor do T de Student confere aos resultados de todos os seis casos, uma significância superior a 99,99%.

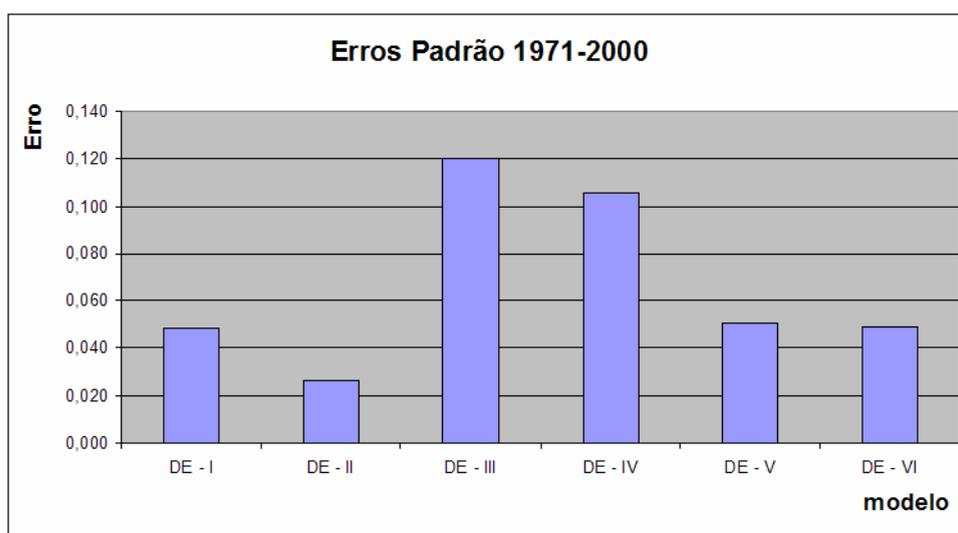


Figura 4.8 - Erros Padrão encontrados para cada na calibração dos modelos

Estes resultados, sugerem que os DEs III e IV devem ser descartados. Apresentando resultados intermediários, mas ainda com boa qualidade, encontram-se os DEs I, V e VI que provavelmente devem ser usados para uma melhor avaliação posterior.

4.7 - Resultados obtidos para os anos de 2002 a 2004 e as previsões para 2005

Os resultados gerados pelos modelos ECHAM e RSM para o período de 1971 a 2000 podem ser considerados ótimos, no sentido de que suas simulações foram feitas com base nas TSM observadas e não nas previstas como seria de se esperar. Isto aconteceu porque as previsões com o RSM iniciaram-se na FUNCEME, apenas em 2001 (previsão para 2002). Tendo disponíveis os dados de previsão para os anos de 2002 a 2004, seria interessante um estudo de caso para verificar qual dos modelos melhor se comportaria durante este período.

As equações de regressão múltipla dos DEs I e II foram aplicadas aos dados de TSM dos anos de 2000 a 2003 para se obter as “previsões” dos anos de 2001 a 2004. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.9a e 4.9b.

Tabela 4.9a - Valores de vazão previstos com o DE-I para a bacia da Fazenda Cajazeiras para o período de 2001 a 2004.

(mm/mês)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.
2001	0,17	0,00	3,12	23,94	23,00	4,12
2002	0,30	0,00	6,10	57,18	17,26	2,07
2003	0,00	0,00	5,85	91,57	23,25	0,99
2004	0,00	8,59	19,29	70,93	26,30	0,00

Tabela 4.9b - Valores de Chuva previstos como parte o DE-II, para a bacia da Fazenda Cajazeiras para o período de 2001 a 2004.

(mm/mês)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.
2001	168,30	130,74	242,45	207,81	52,09	28,50
2002	90,55	130,57	253,65	282,37	58,87	0,00
2003	106,16	164,93	200,25	327,35	93,54	5,48
2004	148,26	129,91	258,00	227,48	48,25	13,38

De acordo com a metodologia proposta, os resultados apresentados na Tabela 4.9b serviram de entrada para a geração de vazões pelo CN-3S. A exemplo do que foi feito na fase de calibração e verificação do DE-II, a série de precipitação prevista foi completa com

os valores climatológicos da precipitação observada (Tabela 4.7) dos meses de julho a dezembro, viabilizando a utilização do CN-3S. Os resultados são apresentados na tabela 4.10 abaixo.

Tabela 4.10 - Valores de Vazão obtidos usando o DE-II para a bacia da Fazenda Cajazeiras para o período de 2002 a 2004.

(mm/mês)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.
2001	3,69	5,02	20,73	27,95	4,12	2,22
2002	1,22	2,59	16,67	42,86	5,40	2,04
2003	1,38	4,29	12,99	54,07	10,54	2,35
2004	1,88	3,67	21,25	32,73	3,98	1,99

Sabendo que as condições de temperatura da superfície dos oceanos podem persistir de um mês para o outro, TSMs constantes são usadas como uma das possibilidades para a realização de previsões do comportamento da atmosfera. Sendo assim, simulações com o ECHAM e com o RSM foram feitas baseadas na persistência da TSM de dezembro para alguns dos meses seguintes. Desta forma, as previsões de chuva do ECHAM e do RSM são feitas baseadas em duas fontes de dados diferentes. Uma com a TSM prevista e a outra com a TSM persistida. Os resultados que foram obtidos são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Valores de precipitação interpolados para a área da Fazenda Cajazeiras, previstos pelos modelos ECHAM e RSM para o período de 2002 a 2005.

TSM usada	Precipitação prevista pelo ECHAM (mm/mês)					
Prevista	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.
2002	138,14	180,01	206,83	133,62	-	-
2003	121,24	127,88	164,15	117,09	20,89	-
2004	155,38	177,92	231,23	201,43	90,45	17,23
2005	105,77	196,76	228,78	163,53	75,36	24,15
Persistida						
2002	178,16	158,31	199,73	-	-	-
2003	97,12	89,80	65,78	64,05	-	-
2004	193,50	194,26	203,86	151,41	-	-
2005	116,93	106,40	159,74	98,07	31,56	-
TSM usada	Precipitação prevista pelo RSM (mm/mês)					
Prevista	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.
2002	80,60	76,69	101,65	64,95	-	-
2003	68,17	59,08	51,18	38,52	64,98	35,28
2004	63,43	127,99	96,50	97,86	106,39	84,27
2005	39,96	52,56	87,76	69,87	119,35	99,96
Persistida						
2002	127,29	97,61	99,98	-	-	-
2003	35,62	35,06	7,04	23,46	-	-
2004	70,28	61,01	75,86	80,10	-	-
2005	51,37	44,86	51,09	39,06	77,93	-

Alguma das células da Tabela 4.11 encontra-se em branco, indicando os meses para os quais as previsões de chuva não foram feitas. A maioria refere-se às previsões baseadas nas TSMs persistidas, mas alguns são referentes às previsões com as TSMs previstas. Por outro lado, os dados de Vazão Observada na Fazenda Cajazeiras estavam disponíveis apenas até o ano de 2003. O estudo de caso fica então restrito às previsões de vazão para os meses dos anos de 2002 e 2003, onde a disponibilidade de dados simulados de vazão existiu. Os resultados dos anos de 2004 e 2005 serão vistos como previsões a serem checadas quando o futuro já tiver acontecido e/ou os dados estiverem disponíveis.

De acordo com a metodologia proposta, os valores de precipitação previstos pelos modelos ECHAM e RSM foram corrigidos através do Modelo Gama de Correção. Após a correção, as séries de precipitação obtidas para as condições de TSM previstas e persistidas pelos dois modelos foram completas com a precipitação climatológica mensal e usadas pelos DEs III, IV, V e VI para obtenção das séries finais de vazão. Uma vez obtidas, as vazões para os meses de julho a dezembro foram descartadas. A Tabela 4.12 apresenta os valores de vazão obtidos pelos DEs III e IV e a Tabela 4.13 aqueles obtidos pelos DEs V e VI.

Tabela 4.12 - Valores de Vazão obtidos usando os DEs III e IV para a bacia da Fazenda Cajazeiras, para o período de 2002 a 2004.

(mm/mês)	ECHAM (DE-III)		RSM (DE-IV)		
	Prevista	Persistida	Prevista	Persistida	
2002	Jan.	2,15	10,26	0,00	12,08
	Fev.	13,64	8,98	6,50	12,54
	Mar.	28,35	26,50	28,22	27,62
	Abr.	16,00	23,88	10,04	25,77
	Mai.	6,70	6,70	6,73	6,73
	Jun.	0,00	0,00	0,00	0,00
2003	Jan.	0,00	0,00	0,00	0,00
	Fev.	3,28	0,00	1,87	0,00
	Mar.	17,66	0,00	10,05	0,00
	Abr.	10,80	0,00	1,04	0,00
	Mai.	0,00	6,70	0,00	6,73
	Jun.	0,00	0,00	0,00	0,00
2004	Jan.	5,36	13,94	0,00	0,00
	Fev.	13,17	16,93	22,04	2,36
	Mar.	34,87	27,57	26,36	18,89
	Abr.	41,69	22,13	22,68	15,71
	Mai.	4,42	6,70	1,52	6,73
	Jun.	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 4.13 - Valores de Vazão obtidos usando os DEs V e VI para a bacia da Fazenda Cajazeiras, para o período de 2002 a 2004.

(mm/mês)	ECHAM (DE-V)		RSM (DE-VI)		
	Prevista	Persistida	Prevista	Persistida	
2002	Jan.	0,85	1,41	0,73	1,50
	Fev.	2,07	2,04	1,30	2,69
	Mar.	11,75	11,26	7,34	12,11
	Abr.	10,99	19,05	4,98	20,10
	Mai.	5,38	5,88	3,96	6,02
	Jun.	1,99	2,13	1,77	2,14
2003	Jan.	0,66	0,47	0,57	0,33
	Fev.	1,04	0,55	0,92	0,45
	Mar.	3,36	0,65	1,69	0,40
	Abr.	3,89	0,68	1,50	0,50
	Mai.	1,52	1,29	1,12	1,18
	Jun.	1,16	1,02	0,74	0,96
2004	Jan.	1,05	1,64	0,49	0,57
	Fev.	2,28	4,43	2,65	0,95
	Mar.	17,93	16,83	10,25	3,16
	Abr.	54,28	21,30	15,42	5,33
	Mai.	7,44	6,40	3,59	3,59
	Jun.	2,34	2,17	1,90	1,74

As variáveis estatísticas usuais foram calculadas, conjuntamente para os anos de 2002 e 2003, para cada uma das séries resultantes do uso dos DEs de I a VI. Seus resultados foram comparados com os resultados obtidos a partir da série de vazão observada, através da Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Comparação entre os resultados obtidos com os diversos modelos, para os anos de 2002 e 2003.

	Obs.	DE-I	DE-II	DE-III		DE-IV		DE-V		DE-VI	
				Prev.	Pers.	Prev.	Pers.	Prev.	Pers.	Prev.	Pers.
Média (mm/mês)	7,73	17,05	13,03	8,22	6,92	5,37	7,62	3,72	3,87	2,22	4,03
Desv. Padrão(mm/mês)	9,93	28,74	17,44	9,17	9,41	8,23	10,11	3,84	5,72	2,10	6,10
Coef. Variação (%)	129	169	134	112	136	153	133	103	148	095	151
Coef. Assimetria	1,44	1,37	1,41	1,06	1,14	1,43	1,26	1,25	1,12	1,10	1,15
Coef. Curtose	0,264	0,119	0,125	0,283	0,185	0,171	0,226	0,156	0,104	0,154	0,115
Coef. Correlação		0,60	0,69	0,50	0,17	0,25	0,16	0,47	0,41	0,30	0,39
Erro quad. médio		621,3	178,6	84,2	142,2	120,5	154,8	86,9	92,6	113,4	94,6
Erro padrão		0,11	0,13	0,30	0,33	0,37	0,31	0,72	0,50	1,42	0,47
Stat t		-0,55	3,01	1,83	0,56	0,82	0,51	1,70	1,42	0,98	1,35

Embora a comparação destes resultados não seja muito conclusiva, já que o número de valores em cada série é relativamente pequeno e pouco significativamente relacionados

(6 em cada ano, sendo 12 valores no total), pode-se tecer alguns comentários a respeito desta comparação. A variabilidade nas médias encontradas foi muito alta com valores oscilando entre 2,22 para o caso do DE-IV (prevista) e 17,05 para o caso do DE-I, quando a média dos valores observados foi de 7,73. As médias encontradas a partir da utilização dos outros modelos pareceram um pouco mais aceitáveis que as já citadas, sendo que o modelo que mais se aproximou do observado foi o DE-III, para os dois tipos de TSM. No Desvio Padrão o comportamento foi similar ao das médias, com os DEs I e IV(prevista) ocupando as posições extremas (maior e menor respectivamente). A variabilidade dos resultados foi consideravelmente alta, oscilando entre -5% e 69% ao redor do valor da média do valor observado. Os coeficientes de assimetria apresentaram-se todos levemente inferiores à dos valores observados, mas ainda dentro da categoria de Assimetria Forte, o que seria de se esperar para uma região Semi-Árida como a que contém a bacia da Fazenda Cajazeiras.

Quanto ao espalhamento dos dados, a série de valores observados apresentou-se Mesocúrtica, ou seja, sem achatamento como na Curva Normal. Exceto pelo DE-III (TSM prevista) que se mostrou com uma distribuição de frequências Platicúrtica, a maioria dos modelos apresentaram resultados Leptocúrticos, com dispersão inferior à da série de vazão observada.

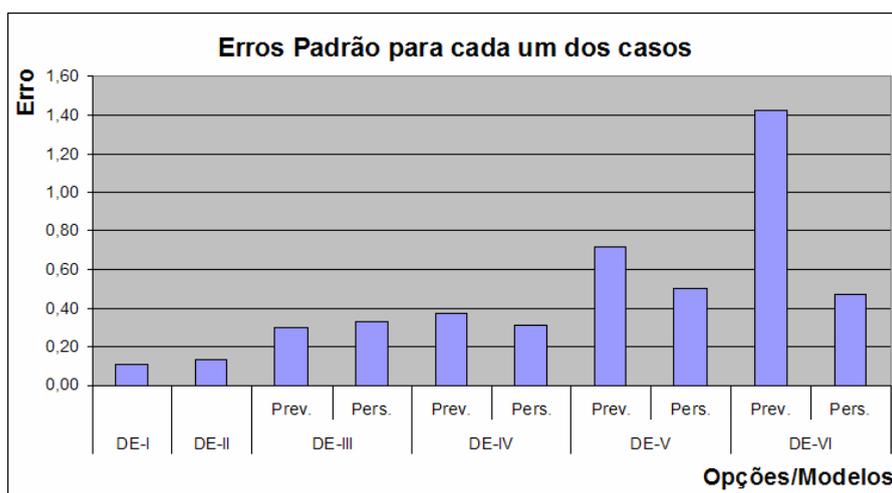


Figura 4.9 - Erros Padrão encontrados na aplicação dos modelos aos dados dos anos de 2002 e 2003.

Os valores de correlação apresentados na Tabela 4.14 são inferiores àqueles apresentados na Tabela 4.8. Destes, o que apresentou o melhor resultado foi novamente o DE-II, que foi seguido de perto pelo DE-I. Numa posição intermediária apareceu o DE-III (prevista). O DE-IV novamente apresentou os resultados de menor qualidade. Os erros quadráticos mostram uma disparidade nos resultados do DE-I, sendo que os demais apresentaram valores relativamente semelhantes. O menor destes valores foi o do DE-III (prevista). Quanto aos erros padrão, mais significativos, os resultados são apresentados na figura 4.9. Ali pode ser visto que os melhores resultados foram encontrados nos DEs I e II, sendo que o DE-VI (prevista) apresentou o pior de todos. O teste T de Student mostra que apenas um dos casos (o DE-II) apresentou significância superior aos desejados 99%. Além deste, penas um caso (DEs III prevista) apresentou significância superior a 90% e mais outros três, significância superior a 80%. Para os demais a significância foi, como pode ser visto na tabela 4.14, muito baixa.

Como mais uma possibilidade de resultado, as Médias Geral e por “Ensamble” foram calculadas para o conjunto de modelos. Entenda-se por Média Geral o calculo simples da média aritmética dos resultados gerados individualmente por cada um dos seis modelos. No caso do “Ensamble” o que se fez foi adicionar os resultados de todas as séries em uma única série e recalculer os resultados. Os resultados destes cálculos são apresentados na Tabela 4.15. Verifica-se que em ambos os casos o conjunto de resultados se aproximou dos resultados obtidos para a série de valores de vazão observada. As correlações ficaram próximo aos 50%, em um nível apenas razoável. A vazão média obtida da Média Geral ficou mais próxima da média da vazão observada que a média obtida pelo ensemble. Alguns dos demais valores perdem o significado estatístico quando usados desta forma, mas servem para fornecer uma noção genérica a respeito do comportamento dos resultados obtidos.

Tabela 4.15 - Média Geral e por “Ensamble” dos resultados obtidos pelo conjunto de modelos e sua comparação com os resultados obtidos com a vazão observada.

(mm/mês)	Observado	média geral	Ensamble
Coefficiente de Correlação		0,37	0,50
Média	6,35	6,11	8,59
Desvio Padrão	9,27	8,01	13,38
Coefficiente de Variação	1,46	1,29	1,56
Coefficiente de Assimetria	1,64	1,21	1,34
Coefficiente de Curtose	0,27	0,17	0,23
Erro quadrático médio		118,68	144,78

A qualidade dos resultados obtidos neste trabalho aumenta quando os totais do período são considerados. Entretanto os resultados mês a mês também devem ser analisados. As “previsões” mensais, feitas para as vazões da Fazenda Cajazeiras para os períodos chuvosos dos anos de 2002 e 2003, são apresentadas na figura 4.10. Esta figura mostra destacadamente as Médias Geral e por Ensemble encontradas para o período.

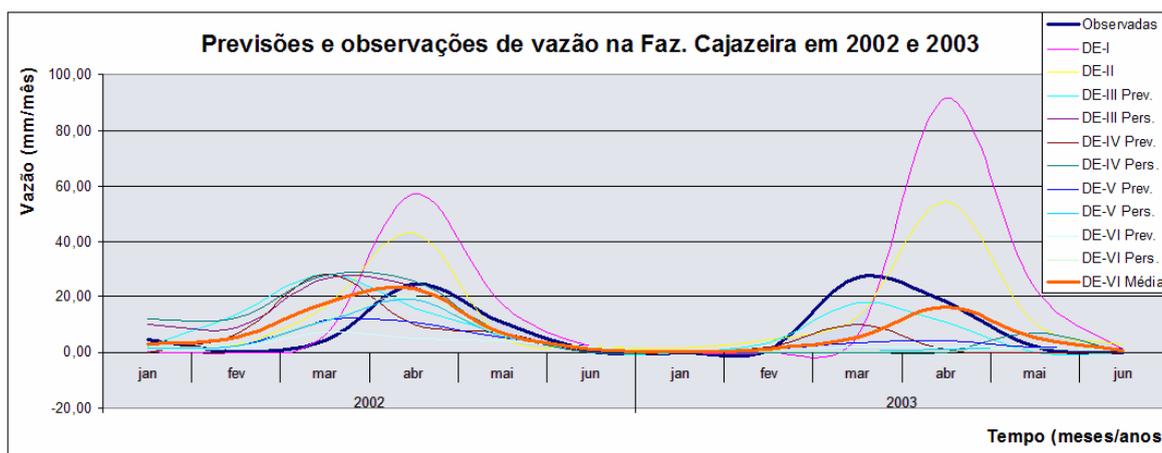


Figura 4.10 - Valores de vazão previstos para a Faz. Cajazeiras, para os 1os semestres dos anos de 2002 e 2003.

De uma forma geral, verifica-se que os modelos apenas estatísticos apresentaram uma tendência a valores máximos ocorrendo mais tarde que aqueles baseados nos resultados dos modelos dinâmicos. Isto fez com que a “previsão” deste máximo em 2002 fosse mais acertada pelos modelos apenas estatísticos que por aqueles que tem como base os modelos dinâmicos. Já em 2003, aconteceu o contrário. Observa-se também que os DEs I e II superestimaram os valores máximos (o DE-I, exageradamente), enquanto os demais subestimaram. Sendo esta super-estimativa dos DEs I e II (principalmente do DE-II) sempre proporcional à dos valores observados, esta dificuldade poderia ser minimizada.

A metodologia sugerida foi aplicada aos dados disponíveis ao final do mês de dezembro de 2004, para que as previsões para o ano de 2005 pudessem ser feitas. Os resultados são apresentados na tabela 4.16 e figura 4.11, que mostram os resultados mensais individuais de cada modelo e sua média geral, assim como os totais para o semestre (ou até o mês de maio, quando for o caso).

Tabela 4.16 - Previsões de Vazão para os seis primeiros meses do ano de 2005, para a bacia da Fazenda Cajazeiras, individualmente para cada um dos seis modelos propostos, e o resultado médio.

mm mês	Cli- Mato logia.	DE-I	DE-II	(DE-III)		(DE-IV)		(DE-V)		(DE-VI)		Média Geral
				Prev.	Pers.	Prev.	Pers.	Prev.	Pers.	Prev.	Pers.	
Jan.	0,21	0,00	2,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54	0,63	0,35	0,41	0,41
Fev.	2,91	0,87	3,51	17,53	0,00	0,29	0,00	2,19	0,79	0,69	0,62	2,65
Mar.	18,42	43,25	16,38	34,21	16,62	23,19	10,01	16,18	2,59	3,33	1,45	16,72
Abr.	32,16	70,07	45,67	26,58	5,49	11,85	1,21	25,59	2,18	3,98	1,40	19,40
Mai.	15,60	19,87	4,09	1,48	0,00	3,52	0,00	4,16	1,28	2,57	1,15	3,81
Jun.	1,98	0,00	1,94	0,00	-	0,00	-	2,01	-	1,63	5,58	0,93
Total	71,27	134,05	73,80	79,79	22,12	38,85	11,22	50,67	7,47	12,53	10,62	43,93

Analisando os totais semestrais apresentados na Tabela 4.17, verifica-se que os DEs II e III (prevista) prevêm totais mensais aproximadamente iguais ao da climatologia. Já o DE-I prevê aproximadamente o dobro da climatologia, enquanto os demais modelos, todos indicam valores de vazão inferiores ao da climatologia. Como a maioria dos valores previstos foi inferior ao da climatologia, o total médio para todos os modelos também prevê valores inferiores ao da climatologia. A variação dos valores previstos ao longo do semestre pode ser melhor observada através da figura 4.11 que apresenta o incremento provavelmente (ainda não aconteceu) exagerado do DE-I. Quanto aos demais modelos, inclusive a média dos resultados, apresentam uma alta variabilidade que torna difícil a escolha por um ou outro.

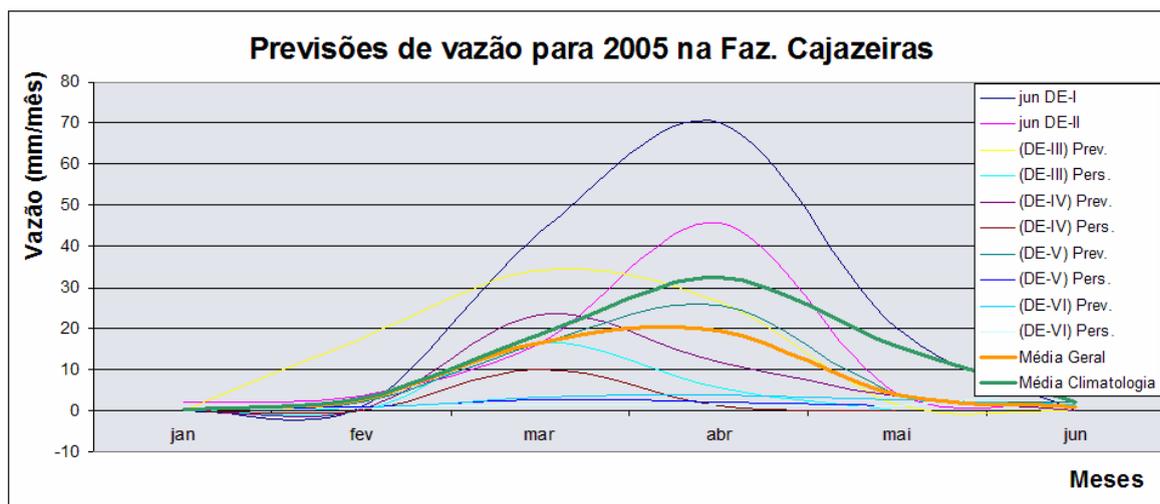


Figura 4.11 - Previsão de vazão para a Faz. Cajazeiras, para o 1º semestre do ano de 2005

A julgar pelas previsões de *abaixo da média climatológica* para o total de Chuva do período, feitas pelas instituições de pesquisas, incluindo a FUNCEME, que vem se concretizando, os modelos que estiverem prevendo valores de vazão inferiores à média climatológica devem apresentar melhores resultados. Resta esperar para ver...

5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 - Conclusões

Várias são as conclusões que podem ser extraídas deste trabalho. Abaixo estão listadas apenas aquelas que foram consideradas as mais importantes.

O modelo que se mostrou com melhor desempenho para este caso da bacia hidrológica da Fazenda Cajazeiras, foi aquele que utiliza os dados de chuva gerados a partir da regressão linear múltipla com as séries de TSM e transformados em vazão com o auxílio do CN-3S (o DE-II). Os modelos que usam os resultados do ECHAM e do RSM, passando pelo CN-3S, também apresentaram alto potencial para a previsão de vazão.

Existem áreas sobre os oceanos Pacífico Central e Atlântico Sul e Norte cujas TSMs apresentam relativamente bons índices de correlação defasada com as séries de chuva e de vazão ocorrendo sobre pequenas bacias do Nordeste Brasileiro. As séries de TSM destas áreas podem ser usadas com perspectivas de bons resultados para a realização de previsões de algumas de suas variáveis climatológicas, particularmente a precipitação.

As previsões climatológicas de chuva para pequenas áreas geradas pelos modelos de simulação numérica, sobretudo aqueles de área limitada (Regionais), podem apresentar alta variabilidade e baixa concordância com os valores observados.

As previsões de precipitação geradas pelos modelos Globais e Regionais podem ser melhoradas/corrigidas através dos métodos de Desagregação e da Função Gama, Sendo a Função Gama mais interessante já que permite a previsão de qual o mês que o máximo de precipitação deverá ocorrer.

As correlações entre as séries de valores de precipitação observados e simulados aumentam na medida em que o tamanho das áreas em consideração (pixels) aumenta.

O modelo CN-3S pode ser usado com bons resultados para bacias da região Semi-Árida do Nordeste brasileiro.

5.2 - Recomendações

Este trabalho é embrionário, e muitos avanços ainda podem ser obtidos. Algumas sugestões são listadas abaixo visando contribuir para sua evolução.

Testar o modelo Gama separadamente para anos categorizados como função da qualidade da quadra chuvosa.

Aplicar a correção Gama aos dados gerados pelo modelo DE-II e verificar se esta aplicação proporcionou alguma melhoria aos resultados finais.

Verificar com detalhes a possibilidade da utilização do modelo Função Gama na previsão de qual seria o mês de máxima precipitação, na série prevista.

Quantificar os erros cometidos em cada uma das fases de processamento dos seis modelos propostos.

Testar estes modelos para outras bacias, em especial de maiores áreas de drenagem.

Usar outro modelo dinâmico para o cálculo das precipitações.

Usar um número maior de resultados de previsão dos Modelos Dinâmicos para possibilitar uma melhor análise de seu uso neste tipo de previsão.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGSORN, S., “Fuzzy Logic in polder flood control operations in Bangkok”, Phd Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1995.

ALVES, J. M. B., SILVA, E. M., MONCUNILL, D. F., SILVA FILHO, V. P., e MELCIADES, W. L. B., “Uma avaliação preliminar da simulação de precipitação sobre o Nordeste do Brasil usando um aninhamento de um modelo numérico regional em um modelo numérico global”. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Foz do Iguaçu - PR – Brasil, 2002.

ALVES, J. M. B. e REPELLI, C. A., “A variabilidade pluviométrica no setor norte do nordeste e os eventos El Niño/Oscilação Sul (ENOS)”, Rev. Bras. Meteor., v.7, n.2, p.583-592, 1992.

ANDERSON, M. L., CHEN, Z. Q., KAVVAS, M. L., e FELDMAN, A., “Coupling HEC-HMS with Atmospheric Models for Prediction of Watershed Runoff”, J. Hydrologic Eng., v.7, (4), 312-318, 2002.

ANDERSON, M. L., KAVVAS, M. L., MIERZWA, M. D., “Probabilistic/ensemble forecasting: a case study using hydrologic response distributions associated with El Niño/Southern Oscillation (ENSO)”, Journal of Hydrology 249, 134-147, 2001.

ANDRADE, P. R. G. S., CURI, W. F. e CURI, R. C., “Otimização da operação do sistema hídrico Juczinho-Carpina, para múltiplos usos, via modelo de Programação Não Linear”, XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001.

AZEVEDO, P. V., SILVA, B. B e RODRIGUES, M. F. G., “Previsão Estatística das chuvas de outono no Estado do Ceará”, Revista Brasileira de Meteorologia, São Paulo, Vol.13, No.1, p.19-30. 1998.

BALDWIN, C. K., “Final Report: Phase II long-range streamflow forecasting using climate information”, Report from Denver Water, 2001.

BARBOSA, D. L., CURI, R. C. e CURI, W. F., “Um estudo de caso da operação integrada ótima de três reservatórios em paralelo com usos múltiplos”, XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001.

BARNSTON, A. G. e ROPELEWSKI, C., “Prediction of ENSO episodes using Canonical Correlation Analysis”, Journal of Climate, Vol. 5. Nr. 11. November, 1992. 1316-1345, 1992.

BEVEN, K.J., e BINLEY, A. “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, 1992.

BRAGA JUNIOR, B. P. F., “Técnicas de otimização e simulação aplicadas em Sistemas de Recursos Hídricos”, em: Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos. São Paulo: Nobel: ABRH. Cap.5, 427-517, 1987.

BRIGGS, W.M., e WILKS, D.S., “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, 1996.

BURAS, N., “Scientific allocation of water resources”, New York: Elsevier, 1972.

BURAS N., “Reflections on hydrology: science and practice”, Washington, DC, U.S.A.: American Geophysical Union, 314pp, 1997.

BUTCHER, W., “Stochastic dynamic programming for optimum reservoir operation”, Water Resour. Bull., 7(1), 115-123, 1971.

CAMPBELL, P. F., “Applications of fuzzy set theory in reservoir operation”, MASc. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1993.

CARDOSO, G.B., “Uso de otimização/simulação e previsão de aflúências na operação tática dos reservatórios do Sistema Jaguaribe-Metropolitano”, Dissertação de mestrado em Eng. Civil, UFC, 140pp. 1993.

CARSON, D. J., “Seasonal forecasting”, Q. J. R. Meteor. Soc., 124, 1-26, 1998.

CHRISTENSEN, O.B., CHRISTENSEN, J. H, MACHENHAUER, B. e BOTZET, M. “Very-High-Resolution Regional Climate Simulations over Scandinavia – Present Climate”, J. Climate, 12, v.11, 3204-3229, 1998.

CHEN, D., CANE, M. A., ZEBIAK, S. E., CANIZARES, R. e KAPLAN, A., “Bias correction of an ocean-atmosphere coupled model”, Geophys. Res. Lett., 27, 2585-2588, 2000.

CHOU, M. D., “A solar radiation model for use in climate studies”, J. Atmos. Sci., 49, 762-772, 1992.

CHOW, S. C., NUNES, A. M. B. e CAVALCANTI, I. F. A., “Extend range forecast over South America using the regional ETA model”, J. Geophys. Res. 105, d8, 10.147-10160, 2000.

CICOGNA, M., KADOWAKI, M., BALLINI, R., e SOARES, S., “Previsão de Vazões Médias Mensais: Uma Aplicação para as Usinas do Rio Paranapanema”, Anais do II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 440-444, 2003.

CLARKE, R.T., “Statistical modelling in hydrology”, Chichester: Wiley, 1994.

CROLEY, T.E., “Using NOAA’s new climate outlooks in operational hydrology”, Journal of Hydrologic Engineering, New York, v.1, n.3, p.93-102, 1996.

CROLEY, T.E., “Water resource predictions from meteorological probability forecasts”, In: RABAT INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1997. Sustainability of water resources under increasing uncertainty. Wallingford: IAHS. p.301-309, 1997.

CURI, W. F. e CURI, R. C., “ORNAP: Optimal Reservoir Network Analysis Program”, XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001.

DENOEUX, T., EINFALT, T., e JACQUET, G., “Determination in real time of the reliability of radar rainfall forecasts”, Journal of Hydrology, Amsterdam, v.122, p.353-371, 1991.

DICKINSON, R. E., ERRICO, R. M. GIORGI, F., e BATES, G. T., “A regional climate model for the western U.S.”, J. Climatic Change, 15, 383-422, 1989.

DINIZ, L.S., “Calibração automática de modelos chuva-vazão usando um algoritmo genético”, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. 130pp, 1994.

DORFMAN, R., “Mathematical models: the multistructure approach”, in: MAAS, A. *et al.* Design of water resource systems. Cambridge: Harvard University. ch. 13, 494-539, 1962.

DUAN, Q., GUPTA, H.V., S. SOROOSHIAN, S., ROUSSEAU, A.N., e TURCOTTE, R., “Calibration of Watershed Models”, AGU Water Science and Applications Series, Vol. 6, 345pp, 2003.

DUMENIL, L., e TODINI, E., “A rainfall-runoff scheme for use in the Hamburg climate model”, Advances in Theoretical Hydrology, A Tribute to James Dooge, European Geophysical Society Series on Hydrological Sciences, Vol. 1, Elsevier Press, 129-157, 1992.

ELLIS, J. H. e REVELLE, C. S., “A separable linear algorithm for hydropower Optimization”, Water Resources Bulletin, Bethesda, v. 24, nº 2, 435-447, 1988.

FREER, J., BEVEN, K., e AMBROISE, B. “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, 1996.

FREITAS, M.A.S. e PORTO, A.S., “Considerações Sobre um Modelo Determinístico Chuva-Vazão Aplicado às Bacias do Semi-Árido Nordeste”, Revista Tecnologia - UNIFOR, vol. 11, 45-49, 1990.

GALVÃO, C. O. “Aplicabilidade em recursos hídricos da previsão de precipitação de longo prazo no Nordeste do Brasil”, Tese de doutorado no IPH da UFRG, 1999.

GALVÃO, C. O. e IKEBUCHI, S., “Rule-based reservoir operation considering long-range forecast”, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto, v.42, n.368, p.368, p.71-97, 1992.

GEOGAKAKOS, K. P., GEOGAKAKOS, J. S. e YAO, H., “Hydrologic Forecasting and Water Resources Management for Folsom Lake Watershed in California”, Hydrologic Forecasting – Lake Folsom, California, 2001.

GIORGI, F. e BATES, G. T., “On climatological skill of a regional model over complex terrain”, *Mon. Wea. Rev.*, 117, 2325-2347, 1989.

GODDARD, L., BARNSTON, A. G. e MASON, S. J., “Evaluation of the IRI’s “net assessment” seasonal climate forecasts 1997-2001”. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 1761-1781, 2003.

GODDARD, L., MASON, S. J., ZEBIAK, S. E., ROPELEWSKI, C. F., BASHER, R. e CANE, M. A., “Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions”, *Int. J. Climatol.*, 21, 111-1152, 2001.

GODDARD, L. e GRAHAM N. E., “The importance of the Indian Ocean for simulating precipitation anomalies over eastern and southern Africa” *J. Geophys. Res.*, 104: 19099-19116, 1999.

GOLDBERG, D. E., “Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning”, Addison-Wesley, 1989.

GOODMAN, A., “Principles of water resources planning”, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.

GRYGIER, J. C. e STEDINGER, J. R., “Algorithms for optimization hydropower system operation”, *Water Resources Research*, Washington, v.21, n.1, 1-10, 1985.

GYALISTRAS, D., NEIDHÖFER, F. e WANNER, H., “Sensitivity and uncertainty analyses of climate scenarios and ecosystem responses in the Alps (SENSUALP). Part A — Bioclimatic scenarios”, Progress Report 1998 to the Swiss National Science Foundation, Grant Nr. 5001-044605/1. Institute of Geography, Univ. of Bern, Switzerland, 8pp., 1998.

HAMLET, A. F. e LETTENMAIER, D. P., “Columbia river streamflow forecasting based on ENSO and PDO climate signals”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 125(6), 333-341, 1999.

HARSHVARDHAN, R. D., RANDALL, D. A., e CORSETTI, T. G., “A fast radiation parameterization for atmospheric circulation model”, *J. Geophys. Res.*, 92(D1), 1009-1016, 1987.

HASTENRATH, S. e HELLER, L., “Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil”, *Q. J. Roy Meteor. Soc.*, 103, 77-92, 1977.

HASTENRATH, S. e GREISCHAR, L., “Circulation mechanisms related to Northeast Brazil rainfall anomalies”, *Journal of Geophysical Research*, 98(D3): 5093-5102, 1993.

HEWITSON, B.C. e CRANE, R.G., “Climate downscaling techniques and applications”, *Climate Research*, 7: 85-95, 1996.

HICKS, R. H., GAGNOR, C. R., JACOBY, S. L. e KOWALIC, J. S., “Large scale nonlinear optimization of energy capability for the Pacific Northwest hydroelectric system”, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, PAS-93(5), 1604-1612, 1974.

HIEW, K. L., “Optimization algorithms for large-scale multireservoir hydroelectric systems”, PHD Thesis, CSU, Fort Collins, 1987.

HIPEL, K. W., “Time series analysis in perspective”, *Water Resources Bulletin*, 609-624, 1985.

HOLTON, J. R., “An introduction to dynamic meteorology”, *International Geophysics Series*, Vol. 23 Sec. Ed, Academic Press., 1979.

HONG, S. Y., e PAN, H. L., “Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model”, *Mon Wea. Rev.*, 124, 2322-2339, 1996.

HUANG, B. e SCHNEIDER, E. K. “The response of an ocean general circulation model to surface wind stress produced by an atmospheric general circulation model”, *Mon. Wea. Rev.*, 123, 3059-3085, 1995.

IBBITT, R. P., HENDERSON, R. D., COPELAND, J., e WRATT, D.S., “Simulating mountain runoff with meso-scale weather model rainfall estimates: a New Zealand experience”, *Journal of Hydrology* 239, 19–32, 2001.

ISLAM, M. N. e SIVAKUMAR, B., “Characterization and prediction of runoff dynamics: a nonlinear dynamical view” *Advances in Water Resources* 25, 179–190, 2002.

JASPER, K., GURTZ, J., e LANG, H., “Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model”, *J. of Hydrol.* 267, 40-52, 2002

JI, M., KUMAR A. e LEETMAA, A., “A multi season climate forecast system at the National Meteorological Center”, *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 75, 569-577, 1994a.

JI, M., KUMAR A. e LEETMAA, A., “An experimental coupled forecast system at the National Meteorological Center: some early results”, *Tellus*, 46A, 398-481, 1994b.

JI, M., BEHRINGER, D., e LEETMAA, A., “An Improved Coupled Model for ENSO Prediction and Implications for Ocean Initialization. Part II: The Coupled Model”, *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1022-1034, 1998.

JI, Y e VERNEKAR, A., “Simulation of the Asian summer Monsoons of 1987 and 1988 with a Regional Model nested in a global GCM”, *J. Climate*, 8, v.10, 1965-1979, 1997.

JONES, P.D., “The influence of ENSO on global temperatures”, *Climate Monitor*, 17 (3) 80-9, 1988.

JUANG, H. M. H., “Multi monthly simulation of 1987 and 1988 East Asian monsoon by the NCEP global and regional spectral models”, 2nd East Asian Weather and Climate Recent Development Conference, Chungli, Taiwan, March 1-2, 1996, 156-176, 1996.

JUANG, H. M. H. e KANAMITSU M., “The NMC nested regional spectral model”, *Mon. Wea. Rev.*, 122, 3-26, 1994.

KARUNANITHI, N., GRENNEY, W. J., WHITLEY, D. e BOVEE, K., “Neural networks for river flow prediction”, *J. Comp. In Civ. Engrg.*, ASCE, 8(2), 201–220, 1994.

KINDLER, J., “Rationalizing water requirements with the aid of fuzzy allocation model”, *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 118(3), 308-323, 1992.

KLIR, G. J., e FOLGER, T. A., “Fuzzy sets, uncertainty and information”, Prentice Hall, New York, N.Y., 1988.

KOSKO, B., “Neural networks and fuzzy systems”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1992.

KOSKO, B., “Fuzzy thinking: The new science of fuzzy logic”, Hyperion, New York, N.Y., 1993.

KOSKO, B. e ISAKA, S., “Fuzzy logic”, *Scientific Am.* July, 76-81, 1993.

KRZYSZTOFOWICZ, R., “Why should a forecaster and a decision maker use Bayes theorem”, *Water Resources Research*, Washington, v.19, n.2, p.327-336, 1983.

KRZYSZTOFOWICZ, R., “Expected utility, benefit, and loss criteria for seasonal water supply planning”, *Water Resources Research*, Washington, v.22, n.3, p.303-312, 1986a.

KRZYSZTOFOWICZ, R., “Optimal water supply planning based on seasonal runoff forecasts”, *Water Resources Research*, Washington, v.22, n.3, p.313-321, 1986b.

KRZYSZTOFOWICZ, R., “Drought forecasting: methodological topics from a systems perspective”, *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Berlin, v.5, p.267-279, 1991.

KRZYSZTOFOWICZ, R., “Bayesian correlation score: a utilitarian measure of forecast skill”, *Monthly Weather Review*, Boston, v.120, p.208-219, 1992.

KRZYSZTOFOWICZ, R., e REESE, S., “Bayesian analysis of seasonal runoff forecasts”, *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Berlin, v.5, p.295-322, 1991.

KRZYSZTOFOWICZ, R., e WATADA, L.M. “Stochastic model of seasonal runoff forecasts”, *Water Resources Research*, Washington, v.22, n.3, p.296-302, 1986.

KUHN, H. W. e TUCKER, A. W., “Nonlinear Programming”, *Proc.2nd Berkeley Symp. Math. Statistics Probabilities*, J. Neyman (ed.), University of California Press, Berkeley, 1951.

LABADIE, J. W., “Otimização da operação de projetos agrícolas”, Brasília: PRONI, 1987.

LACERDA, G. M. E. e CARVALHO, A. F., “Introdução aos Algoritmos Genéticos”, editado por C. O. Galvão e M. J. S. Valença, em: “Sistemas Inteligentes: Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais”, Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, pag. 99-150, 1999.

LIMA, H. V. C., “Operação ótima de sistemas de reservatórios com aplicação ao Sistema da Região Metropolitana de Fortaleza”, *Dissertação de Mestrado*, IPH/UFRGS, Porto Alegre, 2000.

LINDERSON, M L., ACHBERGER, C. e CHEN, D., “Statistical downscaling and scenario construction of precipitation in Scania, southern Sweden”, *Nordic Hydrology* No 3 Vol. 35pp 261–278 q IWA Publishing, 2004.

LIU, Z., VALDÉS, J.B., e ENTEKHABI, D., “Merging and error analysis of regional hydrometeorologic anomaly forecasts conditioned on climate precursors”, *Water Resources Research*, Washington, v.34, n.8, p.1959-1969, 1998.

LIU, Y. Q., GIORGI, F. e WASHINGTON, W. M., “Simulation of summer monsoon climate over east Asia with an NCAR regional Climate Model”, *Mon. Wea. Rev.*, 122, 2331-2348, 1994.

LOUCKS, D. P., STEDINGER, J. R., e HAITH, D. A., “Water Resource Systems Planning and Management”, Prentice Hall, N. J., 118(4):356-370, 1981.

MACNEILL, F. M. e THRO, E., “Fuzzy logic: A practical approach”, AP Professional, Boston, Mass, 1994.

MARENGO, J. CAVALCANTI, I.F.,A., SATYAMURTY, P., NOBRE, C. A., TROSNIKOV, I., BONATTI, J. P., MANZI, A. O., ALMEIDA F. C., SAMPAIO, G., CASTRO, C. C., SANCHES, M., CAMARGO, H., e PEZZI L. P., “Ensemble simulation of interannual climate variability using the CPTEC/COLA atmospheric model”, INPE-8135-RPQ/717. São José dos Campos, São Paulo, 77pp, 2001.

MARINO, M. A. e LOAICIGA, H. A., “Quadratic model for reservoir management application to the Central Valley project”, *Water Resour. Res.*, 21(5), 631-641, 1985.

MASON, S. J., GODDARD, L., GRAHAM, N. E., YULAEVA, E., SUN, L., e ARKIN P. A., “The IRI seasonal climate prediction system and the 1997/98 El Nino event”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 1853-1873, 1999.

MAWER, P. e THORN, D., “Improved dynamic programming procedures and their practical application”, *Water Resour. Res.*, 10(2), 183-190, 1974.

MECHOSO, C. R., LYONS, S. W. e SPAHR, J. A., “The impact of sea surface temperature anomalies on the rainfall over northeast Brazil”, *J. Climate*, 3, 812-816, 1990.

MINSKY, M. L. e PAPERT, S. A., “Perceptrons”, Cambridge, Massachussets: Mit Press, 1969.

MONCUNILL, D. F., SILVA, E. M., SILVA FILHO, V. P. e MELCIADES, W. L. B., “Uma breve descrição do sistema de previsão climática regionalizada (downscaling dinâmico) implantado na Funceme”, XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Foz do Iguaçu - PR – Brasil, 2002.

MOURA, A. D. e HASTENRATH, S., “Climate prediction for Brazil’s Nordeste: Performance of empirical and numerical modeling methods”, *J. Climate*, 17, 2667-2672, 2004.

MOURA, A. D. e SHUKLA, J., “On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model”, *J. Atmos. Sci.*, 38, 2653-2675, 1981.

NEW, M. G., HULME, M., e JONES, P. D., “Representing twentieth century space time climate variability. Part II: Development of a 1901-1996 monthly terrestrial climate fields”, *J. Climate*, 13, 2217-2238, 2000.

NOBRE, P., MOURA, A. D. e SUN, L., “Dynamical downscaling of seasonal climate prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP’s Regional Spectral Model at IRI”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82, 2787-2796, 2001.

NOBRE, P. A. e SHUKLA, J., “Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America”, *J. Climate*, 9, 2464-2479, 1996.

NORDENG, T. E., “Extended versions of the convective parameterization scheme at ECMWF and their impact on the mean and transient activity of the model in the tropics”, ECMWF Research Dept. Tech. Memo., 206, European Center for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, United Kingdom, 41pp, 1995.

OBEYSEKERA, J., TRIMBLE, P., CADAVID, L., SANTEE, R. e WHITE, C., “Use of climate outlook for water management in South Florida, USA”, Report from South Florida Water Management District”, 2001.

OLIVEIRA, L. C. K., DAMÁZIO, J. M. e MASCARENHAS, F. C. B., “Desenvolvimento de modelos para previsão de vazões nas bacias dos rios Manso e Cuiabá após a implantação do APM Manso – I”, Anais do II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 425-426, 2003.

PAN, H. L., “A simple parameterization scheme of evapotranspiration over land for the NMC medium-range forecast model”, Mon. Wea. Rev., 118, 2500-2512, 1990.

PAN, H. L. e MARTH, L., “Interaction between soil hydrology and boundary layer development”, Bound. Layer Meteor., 38, 185-202, 1987.

PAN, H. L., e WU, W. S., “Implementing a mass flux convective parameterization package for the NMC medium-range forecast model”, NMC office note 409, 40pp, 1995.

PAN, Y. H. e OORT, A.H., “Global climate variations connected with sea surface temperature anomalies in the eastern equatorial Pacific Ocean for the 1958-1973 period”, Mon. Wea. Rev., 111, 1244-58, 1983.

PARENT, E. e DUCKSTEIN, L., Proc. 20th Anniversary Conf., Water Resources Plng. and Mgmt. Div., ASCE, New York, N. Y, 1993.

PEDRYES, W., “Fuzzy control and fuzzy systems”, 2nd Ed. John Wiley, New York, N.Y, 1993.

PEZZI, L. P., e CAVALCANTI, I. F. A., “The relative importance of ENSO and tropical Atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over South America: a numerical study”, Clim. Dyn., 17, 205-212, 2001.

PEZZI, P., REPELLI, C. A., NOBRE, P., CAVALCANTI, I. F. A. e SAMPAIO, G., “Forecasts of Tropical Atlantic SST Anomalies Using a Statistical Ocean Model at CPTEC/INPE – Brazil”, Experimental Long-Lead Forecast Bulletin, 7, no. 1, 28-31, 1998.

PHILLIPS, N. A., “The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment”, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 82, 123-164, 1956.

PIELKE, R. A., COTTON, W. R., WALKO, R. L., TREMBACK, C. J., LYONS, W. A., GRASSO, L. D., NICHOLLS, M. E., MORAN, M. D., WESLEY, D. A., LEE, T. J. e COPELAND, J. H., “A comprehensive meteorological modeling system – RAMS”, Meteorol. Atmos. Phys., 49, 69-91, 1992.

PIELKE, R. A., “Mesoscale meteorological modeling”, Academic press, Londres, 1984.

PONNAMBALAM, K. e ADAMS, B. J., “Stochastic optimization of multireservoir systems using a heuristic algorithm: Case study from India”, technical reports, Dept. of Syst. Design Eng., Univ. of Waterloo, Waterloo, Ont, 1996.

- POWELL, M. J. D.**, “Variable metric methods for constrained optimization”, *Mathematical Programming: The State of the Art*, (Bachem, A., Grottschel, M., e Korte, B. eds.), Springer-Verlag, New York, N. Y., 288-311, 1983.
- RAMAN, H. e CHANDRAMOULI, V.**, “Deriving a General Operating Policy for Reservoirs using Neural Network”, *Jornal of Water Resources. Planning and Management*, Vol. 122, n° 5, ASCE, ISSN 0733-9496/96/0005-0342-0347, 1996.
- RAO, V. B., LIMA, M.C. e FRANCHITO, S. H.**, “Seazonal and interannual variations of rainfall over eastern Northeast Brazil”, *J. Climate*, 6, 1754-1763, 1993.
- RASHID, A. A. e WONG, K. V.**, “A neural network approach to the determination of aquifer parameters”, *Ground Water*, 30, 164 – 166, 1992.
- REPELLI, C. A., e NOBRE, P.**, “Statistical prediction of sea surface temperature over the tropical Atlantic”, *Int. J. Climatol.*, 24, 45-55, 2004.
- REYNOLDS, R.W., SMITH, T. M.**, “Improved global sea surface temperature analysis using optimum interpolation”, *J. Climate*. 7, 929-948, 1994.
- ROADS, J. O., CHEN, S., COCKE, S., DRUYAN, L., FULAKEZA, M., LAROW, T., LONERGAN, P., QIAN J., ZEBRAK, S.**, “The IRI/ARCs regional model intercomparison over Brazil”, *J. Geophys. Res.*, 108 (D14), 4425, 2003.
- ROECKNER, E., ARPE, K., BENGTSSON, L., CHRISTOPH, M., CLAUSSEN, M., DUMENIL L., ESCH, M., GIORGETTA, M., SCHLESE, U., e SCHULZWEIDA, U.**, “The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate”. Technical Report 218, Max-Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany, 90pp, 1996.
- ROPELEWSKI, C. F., e HALPERT, M. S.**, “Quantifying Southern Oscillation-precipitation relationships”, *J. Climate*, 9, 1043-1059, 1996.
- ROSEMBLAT, F.**, “Perceptron simulation experiments”, *Proceedings of the Inst. Of radio Eng.*, n. 48, 301-309, 1960.
- RUSSELL, O. S. e CAMPBELL, P. F.**, “Reservoir Operating Rules with Fuzzy Programming”, *Jornal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 122, n° 3, 165-170, 1996.
- SANSIGOLO, C. A.**, “Verificação de um modelo discriminante de previsão das precipitações sazonais no nordeste” *Revista Brasileira de Meteorologia*. São Paulo, v.14, (2), 29-36. 1999.
- SETH, A., e GIORGI, F.**, “The effects of domain choice on summer precipitation simulation and sensitivity in a regional climate model”, *J. Climate*, 11, 2698-2712, 1998.

SHUKLA, J. S., MARX, L., PAOLINO, D., STRAUS, D., ANDERSON, J., PLOSHAY, J., BAUMHEFNER, D., TRIBBIA, J., BRANKOVIC, C., PALMER, T., CHANG, Y., SCHUBERT, S., SUAREZ, M., E KALNAY, E., “Dynamical Seasonal Prediction”, Bull. Amer. Meteor. Soc., 81, 2593-2605, 2000.

SILVA, E. M., ALVES, J. M. B., MONCUNILL, D. F., SILVA FILHO, V. P. e MELCIADES W. L. B., “Resultados de uma simulação climática utilizando "Downscaling" dinâmico sobre o Nordeste do Brasil”, XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Foz do Iguaçu - PR – Brasil, 2002.

SIGVALDASON, O. T., “A simulation model for operating a multireservoir system”, Water Resour. Res., 12(2), 263-278, 1976.

SIMMONS A., “Development of the operational 31-level T213 version of the ECMWF forecast model”, ECMWF Newsletter, 56pp.3-13, 1991.

SIMMONS A.J., BURRIDGE, D.M., JARRAUD, M., GIRARD, C. e WERGEN, W., “The ECMWF medium range prediction models. Development of the numerical formulations and the impact of increased resolution”, Meteor.Atmos.Phys., 40, 28-60, 1989.

SIMONOVIC, S. P., “Reservoir systems analysis: Closing gap between theory and practice”, J. Water Resources Plng. and Mgmt., ASCE, 118(3), 262-280, 1992.

SOUZA FILHO, F. A. e LALL, U., “Seasonal to Interannual Streamflow Forecasts for Ceará, Brazil: Applications of a Multivariate, Semi-Parametric Algorithm”, to be published in Water Resources Res., 2003.

SPERBER, K. R., e PALMER, T. N., “Interannual tropical rainfall variability in general circulation model simulations associated with the Atmospheric Model Intercomparison Project”, J. Climate, 9, 2727-2750, 1996.

STUDART, T. M. C. e CAMPOS, J. N. B., “A escolha do volume inicial assumido para um reservatório: Uma questão irrelevante ?”, XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001.

SU, S. Y. e DEININGER, R. A., “Modeling the regulation of Lake Superior under uncertainty of future water supplies”, Water Resources Res., 10(1), 11-25, 1974.

SUN, L., MONCUNILL, D. F., LI, H., MOURA, A. D. e SOUZA FILHO F. A., “Climate Downscaling over Nordeste Brazil using NCEP RSM97”, Aceito para publicação no J. Clim., 2005a.

SUN, L., MONCUNILL, D. F., LI, H., MOURA, A. D., SOUZA FILHO F.A. e ZEBIAK, S., “An Operational Dynamical Downscaling Prediction System for Nordeste Brazil and the 2002-04 Real-Time Forecast Evaluation”, Aceito para publicação no J. Clim., 2005b.

TABORGA, J., e FREITAS M. A. S., “Simulação da Lâmina de Escoamento Mensal, III Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos”, VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, vol. 2, 558-570, Salvador, Bahia, 1987.

TAMAKI, R. D., “Real-time fuzzy logic control of combined sewer flows”, M.Sc. thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1994.

TIEDTKE, M., “A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models”, *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1779-1800, 1989.

TIEDTKE, M., “The effect of penetrative cumulus convection on the large-scale flow in a general circulation model”, *Beitr. Phys. Atmos.*, 57, 216-239, 1984.

TREZOS, T., “Integer programming application for planning of hydropower production”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v. 117, n^o 3, 340-351, 1991.

TUCCI, C. E. M., CLARKE, R. T., e COLLISCHONN, W., DIAS, P. L. S., SAMPAIO, G. O., “Long term flow forecast based on climate and hydrological modeling: Uruguay river basin”, *Water Resources Research*, Vol. 39 No. 7, 1181, 10.1029/2003WR002074., 2003.

TUCCI, C. E. M., CLARKE, R. T., DIAS, P. L. S. e COLLISCHONN, W., “Previsão de médio prazo da afluência de reservatórios com base na previsão climática”, Relatório Final do Projeto BRA/00/029 do IPH/IAG/USP, 2002.

TUCCI, C.E.M., 1998. “Modelos Hidrológicos”. Editora da UFRGS ABRH 652p.

TUNG, C., HSU, S., LIU, C. e LI, J.S., “Application of the Genetic Algorithm for Optimizing Operation Rules of the LiYuTan Reservoir in Taiwan”, *Journal of the American Water Resources Association*, V. 39, Number 3, 649-657, 2003.

UVO, C. B., REPELLI, C. A., ZEBIAK, S. E. e KUSHNIR, Y., “The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil monthly precipitation”. *J. Climate*, 11, 551-561, 1998.

VALENÇA, M. J. S. e LUDEMIR, T. B., “Introdução às Redes Neurais”, editado por C. O. Galvão e M. J. S. Valença, em : “Sistemas Inteligentes: Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais”, Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 19-59, 1999.

VAN DEN DOOL, H.M., “Searching for analogues, how long must we wait?”, *Tellus*, 46A, 314-324, 1994.

VAN DEN DOOL, H.M. e BARNSTON, A.G., “Forecasts of global sea surface temperature out to a year using the constructed analogue method”, *Proceedings of the 19th Annual Climate Diagnostics Workshop*, November 14-18, 1994, College Park, Maryland, 416-419, 1995.

VON STORCH, H., BÜRGER, G., SCHNUR, R. e VON STORCH J. S., “Principal Oscillation Patterns”, *J. Climate* 8, 377-400, 1995.

VOTRUBA, L., “Analysis of water resources systems”, Amsterdam: Elsevier, 1988.

WARD, M. N. e FOLLAND, C. K., “Prediction of seasonal rainfall in the north Nordeste of Brazil using eigenvectors of sea surface temperature”, *Int. J. Climatology*, 11, 711-743, 1991.

WILBY, R. L., HASSAN, H., e HANAKI, K., “Statistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output”, *Journal of Hydrology*, 205, 1-19, 1998.

WILBY, R.L. e WIGLEY, T.M.L., “Downscaling General Circulation Model output: a review of methods and limitations”, *Progress in Physical Geography*, 21, 530–548, 1997.

WILHITE, D.A., “Drought planning: A process for state government”, *Water Resources Bulletin*, Volume 27, No. 1, pp. 29-38, 1991.

WILKS, D. S., “Statistical Methods in the Atmospheric Sciences”, Academic Press, 464pp, 1995.

WURBS, R. A., DUNN, D. D. e WALLS, W. B., “Water rights analysis program (TAMUWRAP), model description and users manual”, Tech. Rep. 146, Texas Water Resources Institute, College Station, Tex, 1993.

WURBS, R. A., “Modeling and analysis of reservoir system operations”, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1996.

XAVIER, T. M. B. S. e XAVIER, A. F. S., “Quantis para séries pluviométricas do estado do Ceará e caracterização de períodos secos ou excepcionalmente chuvosos: 1964-1998”, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Fortaleza. Ceará. 33p. 1998.

XAVIER, T. M. B. S., XAVIER, A. F. S., SILVA DIAS, P. L., “Avaliação da *Quadra Chuvosa* no Estado do Ceará, em 1997, 1998, 1999”, Projeto TEMPO DE CHUVA, Cadernos Atena, No. 19, 36 + iii páginas, Fortaleza-Ceará, 30 de julho, 1999.

YAKOWITZ, S., “Constrained differential dynamic programming”, submitted to *Math. Anal. Appl.*, 1982.

YEH, W. W. G., “State-of-the-art review: Theories and application of systems analysis techniques to the optimal management and operation of a reservoir system”, Report UCLA-ENG-82-52, Civ, Engrg. Dept., Univ. of California, Los Angeles, Calif., 1982.

YEH, W. W. G., “Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review”, *Water Resources Res.*, 21(12), 1797-1818, 1985.

YU, Z., LAKHTAKIA, M. N., YARNAL, B., WHITE, R. A., MILLER, D.A., FRAKES, B., BARRON, E. J., DUFFY, C., e SCHWARTZ, F. W., “Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system”, *Journal of Hydrology*, 218, 72–91, 1999.

ZADEH, L. A., “Fuzzy sets”, *Information and Control*, 8(3), 38-53, 1965.

ZADEH, L. e KACPRZYK, J., “Fuzzy logic for the management of uncertainty” John Wiley, New York, N.Y, 1992.

ZEBIAK, S. E. e CANE, M. A., “A model El Niño -Southern Oscillation”, *Mon Wea. Rev.*, 115, 2262-2278, 1987.

ZUBAIR, L., “El Niño–Southern oscillation influences on the Mahaweli streamflow in Sri Lanka”, *International Journal of Climatology*, no 23, 91-102. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com), 2003.

GLOSSÁRIO

Acoplamento – Integração entre modelos que operam em escalas diferentes de espaço e/ou tempo.

Alíseos – Cinturão de ventos que sopram de leste para oeste sobre a *Região Tropical*, ao redor do globo, gerado como consequência do movimento de rotação da terra e da circulação global de sua atmosfera.

Anomalia – Diferença entre o valor real e o valor médio de determinada variável, para determinado local ou região.

Clima – Conjunto de todas as condições atmosféricas ocorridas em determinado lugar ou região durante certo período de tempo.

Climático – relativo ao *Clima*.

Condições de Contorno – Conjunto de valores que servem para balizar a simulação, nas regiões limítrofes de um modelo.

Correção Gama – Metodologia utilizada para ajustar valores obtidos como resultado das simulações com os *Modelos Dinâmicos* para que eles se tornem mais estatisticamente corretos.

Desagregação – Metodologia utilizada para distribuir, em função de coeficientes apropriados, percentuais de um valor total ocorrido em determinado período (normalmente chuva), sobre frações deste período, para representar suas respectivas quantidades.

Dipolo do Atlântico – Fenômeno oceanográfico que caracteriza a alternância de desvios positivos e negativos de *TSM* entre as porções norte e sul do Oceano Atlântico Equatorial.

Downscaling – Processo através do qual as informações existentes em determinada escala de espaço ou tempo são transportadas para escalas que oferecem maior detalhamento.

Downscaling Estatístico – Tipo de *Downscaling* realizado estatisticamente.

Downscaling Dinâmico – Processo dinâmico (que acontece a cada passo de tempo da simulação do *Modelo Dinâmico*) para o refinamento dos resultados gerados pelos modelos atmosféricos.

El Niño – Fenômeno climático que acontece na porção *equatorial* do Oceano Pacífico, decorrente do aumento na intensidade dos ventos *alíseos* que, arrastando a água

superficial (mais quente) para a região da Indonésia, faz com que águas mais frias e ricas em plâncton (consequentemente mais piscosas) sejam elevadas e surjam na região da costa do Peru (Ressurgência). Águas superficiais mais frias na região da costa do Peru contribuem para o aumento da precipitação sobre a região Nordeste do Brasil.

Ensemble – Grupo de resultados de simulações que tem como diferença básica apenas uma leve variação nos seus respectivos instantes de inicialização.

Equatorial – Relativos ao Equador Terrestre.

Força de Coriolis – Força aparente que desvia os objetos em movimento (para direita no hemisfério norte e esquerda no hemisfério sul terrestre), resultante do movimento de rotação da terra.

Inter-anual – De um ano para o outro

Intra-sazonal – Que ocorre dentro de uma mesma estação climática ou vizinhança temporal.

La Nina – Fenômeno climático que corresponde à situação inversa do Fenômeno *El Nino*.

Latitude – Distância em graus, na direção norte-sul, entre o ponto em questão e a linha do Equador Terrestre.

Linha de data – Meridiano de longitude de 180 graus (oposto ao de Greenwich).

Linhas de Corrente – São as linhas que, a cada instante, representam a direção e o sentido do movimento de cada uma das partículas imersas dentro de um fluido em movimento.

Longitude - Distância em graus, na direção leste-oeste, entre o ponto em questão e *Meridiano de Greenwich*.

Meridiano de Greenwich - Meridiano que passa sobre o Observatório de Greenwich, localizado em Londres – Inglaterra (*Meridiano de Latitude zero*).

Método de Thiessen – Método utilizado para o cálculo da precipitação média sobre uma área sob influência de várias estações meteorológicas.

Modelo Atmosférico – *Modelo Numérico* que simula o comportamento da atmosfera.

Modelo Atmosférico de Área Limitada – *Modelo Regional*.

Modelos Chuva-Vazão – Modelos numéricos que servem para fornecer valores de vazão, a partir de valores, previamente obtidos, de precipitação.

Modelo Concentrado – Na Hidrologia, os modelos concentrados são aqueles que simulam o comportamento do ciclo hidrológico (ou parte dele) considerando toda a bacia hidrológica como um único ponto.

Modelo Dinâmico – Modelo que, utilizando as equações diagnósticas e/ou prognósticas que regem o comportamento de determinado mecanismo físico, tenta simular a intervalos de tempo a evolução do comportamento deste mecanismo.

Modelo Distribuído – Embora com o mesmo propósito, os modelos distribuídos diferenciam-se dos *Modelos Concentrados* por simular o comportamento das componentes do ciclo hidrológico sobre uma malha de pontos onde o resultado de um influencia no resultado de seu vizinho.

Modelo Estatístico – *Modelo Numérico* que simula alguns aspectos de mecanismos físicos, considerando a história estatística deste mesmo mecanismo ou de outro com o qual tenha alguma relação.

Modelo Global – *Modelo Numérico Dinâmico* de simulação do comportamento da atmosfera global.

Modelo Numérico – Conjunto de equações de diagnóstico e/ou prognóstico que são convenientemente arquitetadas para a tentativa de se simular o comportamento de um sistema qualquer.

Modelo Regional – *Modelo Numérico Dinâmico* de simulação do comportamento da atmosfera sobre determinada região. Também conhecido por *Modelo Atmosférico de Área Limitada*.

Niño3 – Região do Oceano Pacífico localizada entre as latitudes de 5°S-5°N e longitudes de 150°W-90°W

Normal Climatológica – Conjunto de todas as condições atmosféricas que tenham ocorrido em determinado lugar ou região, durante um período de trinta anos.

Oscilação Sul – Fenômeno climático que acontece sobre o Oceano Pacífico, quantificando a alternância entre a ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña. É usado como indicativo da probabilidade da ocorrência futura de períodos secos, normais ou chuvosos sobre várias regiões do globo.

Parametrização – Definição de um conjunto de valores, com significado físico ou não, que servem para ajustar o comportamento de um modelo para que ele possa representar com maior fidelidade o comportamento físico ao qual se propõe a simular.

Parâmetro – Cada um dos valores usados na Parametrização.

Pixel – Limite da resolução espacial existente em uma imagem. Cada um desses pontos.

Ponto de Grade – Um dos vários pontos, bi ou tri-dimensionais, que compõem a malha usada nos modelos de simulação.

Preditor – Aquele que serve como base para a previsão.

Quadra Chuvosa – Período de quatro meses (de fevereiro a maio, no Ceara) que concentra a maior parte da precipitação anual (~77% do total, na Fazenda Cajazeiras).

Região Tropical – Região localizada no entorno da linha equatorial, entre os *Trópicos de Câncer e de Capricórnio*, caracterizada por receber a maior parte da energia solar que chega à superfície terrestre.

Regressão – Expressão matemática que representa a relação existente entre duas ou mais variáveis.

Sazonal – De uma estação climática para outra.

Skill – Habilidade de um modelo em conseguir realizar satisfatoriamente uma previsão.

Teoria de similaridade de Monin-Obukhov – Teoria que tenta explicar as relações existentes entre as trocas de energia e massa entre determinada superfície e sua atmosfera circundante e seus respectivos gradientes.

Tempo – Condições atmosféricas sobre determinado lugar ou região, em um determinado instante.

Trópico de Câncer – Latitude mais ao sul onde o sol ainda pode passar pela vertical local (23° e 27'S).

Trópico de Capricórnio – Latitude mais ao norte onde o sol ainda pode passar pela vertical local (23° e 27'N).