

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CONTRIBUIÇÃO AO PROCESSO DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES:
ANÁLISE DE MÉTODOS E VARIÁVEIS EXPLICATIVAS**

AUTORA: VANEZA ANDREA LIMA DE FREITAS

ORIENTADOR: JOSÉ ALMIR CIRILO

CO-ORIENTADOR: JOSÉ ROBERTO GONÇALVES DE AZEVEDO

**CONTRIBUIÇÃO AO PROCESSO DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES:
ANÁLISE DE MÉTODOS E VARIÁVEIS EXPLICATIVAS**

VANEZA ANDREA LIMA DE FREITAS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL .

Aprovada por:

Prof. José Almir Cirilo (Presidente), D.Sc.

Prof. Jaime Joaquim da S. P. Cabral, PhD

Prof. José Roberto Gonçalves de Azevedo, PhD.

Prof. Carlos de Oliveira Galvão, D.Sc

O destino não é uma questão de sorte, é uma questão de escolha.

Não é algo que se espera, mas algo a alcançar.

William Jennings Bryan

DEDICATÓRIA

À minha avó Lenuzia.

Aos meus pais Felipe e Maria das Graças.

Aos meus tios Zuleide e Vladimir.

AGRADECIMENTOS

A busca do conhecimento é uma luta diária, contínua e incessante. Uma conquista pessoal, mas não solitária. Assim, expresso aqui os meus sinceros agradecimentos à todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a conclusão desta etapa.

Aos meus pais, irmão, tios e em especial à minha avó pelo apoio e incentivo constantes.

À Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL pelo apoio sem o qual não seria possível à realização deste trabalho.

À todos os professores do GRH que, além dos conhecimentos técnicos, ensinaram o valor da amizade.

Ao professor Almir Cirilo, onde qualquer palavra é insuficiente para agradecer a orientação, amizade e carinho recebidos

À professora Suzana Montenegro, pelo acompanhamento no início desta jornada e principalmente pelo apoio na reta final.

Ao professor Roberto Azevedo, co-orientador e amigo, pelos ensinamentos e pelo apoio nas horas mais difíceis.

A todos amigos de turma e, em especial, a Karina Moreira e a Penha Stanford pelo aprendizado diário da amizade.

À Ioná Rameh, que mais do que amiga de turma ou uma colega de trabalho, foi uma irmã, alguém que se fez presente em minha vida tanto nas horas alegres quanto nas mais difíceis, agradeço pelos gestos de amizade recebidos e cujo valor não tem preço.

À Márcia Moraes, amiga de todas as horas, pelas longas conversas e pelos conselhos recebidos, com quem aprendi que a construção da amizade não depende de tempo, mas sim do melhor que podemos oferecer para o próximo.

À Daniela Kyrillos, não só pelo ensinamento das ferramentas utilizadas nessa dissertação, mas pela amizade e companheirismo sem fronteiras.

Às amigas de sempre Roberta Alcoforado, Cristiane Ribeiro, Josilene de Paula, Emanuelle Matos, Simone Rosa, Margarida Regueira e, as mais recentes, Valéria Góes e Ana Emília Duarte.

À Suely Cordeiro, Janaína Nascimento, Walquíria Helena e Conceição Feitosa, funcionárias do GRH, pela amizade e apoio recebidos em todos os momentos.

Aos bolsistas que fizeram parte do projeto de Regionalização de Vazões: Maria Eduarda Cyreno, Juliana Santa Cruz, Igor Galindo, Hélder Gama e em especial Breno Correia e Maria Crystianne Rosal. Ao engenheiro Marcelo Cáuas Asfora, consultor do projeto, pela amizade e ensinamentos transmitidos para realização deste trabalho.

Aos amigos Hildeberto Jr., Aldo Sidney, Carlos Eduardo Dantas e Ronaldo Bitu, pela ajuda sempre disponível.

SUMÁRIO

RESUMO	I
ABSTRACT	II
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	4
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	12
3.1 GEOPOLÍTICA	12
3.2 CLIMA	16
3.3 SOLOS.....	16
3.4 VEGETAÇÃO.....	17
3.4.1 Floresta.....	17
3.4.2 Cerrado.....	18
3.4.3 Caatinga	18
3.5 HIDROGRAFIA	18
4 REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA	23
4.1 ETAPAS INICIAIS	23
4.1.1 Seleção e Análise dos Dados	23
4.1.2 Definição das Variáveis Explicativas	28
4.1.3 Regiões Homogêneas	28
4.2 TÉCNICAS ESTATÍSTICAS	29
4.2.1 Distribuição de Probabilidades	29
4.2.2 Análise de Regressão	36
4.3 MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO.....	41
4.3.1 Regionalização de Variáveis.....	41
4.3.2 Regionalização da Curva de Permanência	49
4.3.3 Regionalização das Curvas de Regularização	49
4.3.4 Indicadores Regionais.....	51
5 NOVAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS NO PROCESSO DE REGIONALIZAÇÃO	54
5.1 ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA DA COBERTURA VEGETAL NO PROCESSO DE REGIONALIZAÇÃO.....	54
5.1.1 Região I.....	60
5.1.2 Região II.....	61
5.1.3 Região III.....	62
5.1.4 Região IV.....	63

6	REGIONALIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE MODELO CHUVA-VAZÃO	65
6.1	MODELOS CHUVA-VAZÃO	65
6.2	MODELO GRH	65
6.3	ETAPAS PARA REGIONALIZAÇÃO.....	68
6.4	SIMULAÇÃO CHUVA-VAZÃO	68
6.4.1	<i>Caracterização das Bacias Contribuintes.....</i>	<i>69</i>
6.4.2	<i>Análise dos Dados.....</i>	<i>72</i>
6.4.3	<i>Calibração do modelo para a Bacia de Abreus</i>	<i>73</i>
6.4.4	<i>Transferência do hidrograma para a Bacia de Jaguaraci</i>	<i>74</i>
7	REDES NEURAIS	76
7.1	INTRODUÇÃO	76
7.2	APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS.....	77
7.3	REDES NEURAIS APLICADAS À REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES	78
7.4	RESULTADOS.....	78
7.4.1	<i>Análise com o Percentual de Solo</i>	<i>80</i>
7.4.2	<i>Análise com as Características Fisiográficas das Bacias</i>	<i>84</i>
8	CONCLUSÕES	89
9	RECOMENDAÇÕES.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Mapa de Localização	13
Figura 3.2: Regiões Fisiográficas	14
Figura 3.3: Mapa Político com destaque ao polígono das secas.....	15
Figura 3.4: Mapa de Clima.....	20
Figura 3.5: Mapa Pedológico	20
Figura 3.6: Mapa de solos segundo classificação do Soil Conservation Service	21
Figura 3.7: Mapa de vegetação.....	22
Figura 5.1: Distribuição espacial selecionados.....	55
Figura 5.2: Distribuição espacial dos postos pluviométricos selecionados	56
Figura 5.3: Divisão das regiões homogêneas	58
Figura 6.1: Análise gráfica da calibração do modelo para o posto Abreus	74
Figura 6.2: Análise gráfica da transferência de parâmetros para o posto Jaguaraci.....	75
Figura 7.1: Arquitetura da Rede Neural para simulação com percentual de solo – Grupo I	81
Figura 7.2: Análise dos resultados obtidos	82
Figura 7.3: Arquitetura da Rede Neural para simulação com percentual de solo – Grupo II.....	83
Figura 7.4: análise dos resultados dos modelos.....	84
Figura 7.5: Arquitetura da Rede Neural para simulação as características físicas e climáticas – Grupo I.....	85
Figura 7.6: análise dos resultados dos modelos.....	86
Figura 7.7: Arquitetura da Rede Neural para simulação as características físicas e climáticas – Grupo II.....	87
Figura 7.8: análise dos resultados dos modelos.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Divisão política	12
Tabela 3.2: Distribuição pedológica nas regiões na área em estudo.....	17
Tabela 5.1: Características físicas e climáticas das bacias utilizadas.....	58
Tabela 5.2: Análise da cobertura vegetal.....	59
Tabela 5.3: Ajustes estatísticos da regionalização para a região I.....	60
Tabela 5.4: Resultados obtidos para a região I.....	61
Tabela 5.5: Ajustes estatísticos da regionalização para a região II.....	61
Tabela 5.6 Resultados obtidos para a região II.....	62
Tabela 5.7: Ajustes estatísticos da regionalização para a região III	63
Tabela 5.8 Resultados obtidos para a região III.....	63
Tabela 5.9 Ajustes estatísticos da regionalização para a região IV	63
Tabela 5.10 Resultados obtidos para a região IV.....	64
Tabela 6.1: Postos pluviométricos selecionados na bacia Abreus.....	72
Tabela 6.2: Postos pluviométricos selecionados na bacia Jaguaraci.....	73
Tabela 7.1: Análise do percentual de solo	79
Tabela 7.2: Resultados obtidos na simulação com percentual de solo – Grupo I.....	81
Tabela 7.3: Resultados obtidos na simulação com percentual de solo – Grupo II.....	83
Tabela 7.4: Resultados obtidos na simulação com as características físicas e climáticas – Grupo I	85
Tabela 7.5: Resultados obtidos na simulação com as características físicas e climáticas – Grupo I	87

RESUMO

Os objetivos deste trabalho foram contribuir ao processo de regionalização hidrológica em regiões com dados escassos por meio de novas variáveis explicativas, bem como analisar diferentes métodos de regionalização. Inicialmente foi realizada uma análise da influência da cobertura vegetal no processo de regionalização na área em estudo. Neste caso, foram utilizadas como variáveis explicativas os percentuais de área coberta por caatinga, cerrado e floresta. Um segundo objetivo desta dissertação foi a regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão entre bacias caracterizadas dentro de uma mesma região fisicamente homogênea. Por fim, o último objetivo procurado nesta dissertação foi analisar a aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNA) como uma ferramenta de regionalização. Como conclusão, observou-se que as novas variáveis explicativas e o processo de redes neurais melhoraram de forma significativa a regionalização de vazões na região em estudo, as sub-bacias 46, 47,48 e 49 da Bacia Hidrográfica do São Francisco

ABSTRACT

The objectives of this work were contribute to the process of hydrologic regionalization in areas with scarce data by means of new explanatory variables, as well as to analyze different methods of regionalization. Initially, an analysis of the influence of the vegetable covering was accomplished in the process of regionalization in the study area. In the case, the percentage of area covered by caatinga, cerrado and forest were used as explanatory variables. The second objective of this dissertation was the regionalization of rainfall-runoff model parameters using for several watersheds within a physically homogeneous region. Finally, the last objective sought in this dissertation was the performance application of Artificial Neural Network as a regionalization tool. As conclusion, it was observed that the new explanatory variables an the process of neural network improved in a significant way the regionalization flow in the study area, the sub-basins 46, 47, 48 e 49 of the hydrographic basin of São Francisco River.

INTRODUÇÃO

A água, vital à sobrevivência humana, é um recurso natural que está se tornando cada vez mais escasso tanto em termos de qualidade quanto ao que se refere à quantidade. A demanda por este recurso teve aumento mais acentuado a partir da segunda metade do século XX, com a grande explosão demográfica e o desenvolvimento das atividades industriais, deixando de servir apenas ao abastecimento humano e à dessedentação animal para ser utilizado também como material de consumo de grandes indústrias, a cobrir áreas de irrigação cada vez maiores e sendo aproveitada como fonte de geração de energia elétrica, entre outros. Em virtude de tantos interesses por este recurso natural os conflitos por seu uso têm-se intensificado principalmente em anos de estiagem.

A região Nordeste possui clima semi-árido onde naturalmente já se apresenta um déficit dos recursos hídricos e sendo sua hidrografia formada em grande parte por rios intermitentes esses choques de interesses são constantes. Essa situação não é diferente na bacia hidrográfica do São Francisco, cuja calha principal atravessa 1.300km dentro da zona semi-árida abrangendo uma área de 365.882km², correspondente a 57% da área total. Em todo o seu percurso, o São Francisco mantém um regime permanente, o que lhe garante grande importância econômica e social para o Nordeste. Nesta região existem inúmeros interesses no uso dos recursos hídricos entre os quais se destacam a irrigação, o aproveitamento hidrelétrico, a navegação, a piscicultura e o turismo. A existência de grandes usuários ao longo de seu curso intensifica estes conflitos a ponto de gerar polêmica nacional, como é o caso em análise da transposição de parte das suas águas para Estados nordestinos fora da bacia.

Uma ação essencial para a gestão adequada dos recursos hídricos é o conhecimento das reais disponibilidades, usos e demandas potenciais, de forma sistemática e contínua. Para isso, necessita-se otimizar a rede de monitoramento de modo que se tenha séries com observações de dados hidrometeorológicos contínuos e bem distribuídos espacialmente, auxiliando assim a previsão de fenômenos naturais extremos. Entretanto, o alto custo de instalação, operação e manutenção ocasionam uma baixa densidade destas estações, principalmente no que se refere a pequenas bacias hidrográficas. Diante desta situação se torna necessária a busca de métodos alternativos para a obtenção de informações hidrológicas.

Entre as várias metodologias existentes para a obtenção de dados, a regionalização hidrológica é uma das ferramentas mais utilizadas. Ela consiste na transferência de informações entre bacias hidrologicamente semelhantes e está baseada no conceito de similaridade espacial das características físicas e climáticas.

Visando o levantamento de quantidade e da qualidade dos dados hidrológicos no território brasileiro, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL realizou em convênios com várias entidades de pesquisa um estudo de regionalização hidrológica nas principais bacias hidrográficas brasileiras.

A Universidade Federal de Pernambuco – UFPE desenvolveu nesse projeto a Regionalização Hidrológica da Bacia do São Francisco, sub-bacias 46, 47, 48 e 49. Este estudo foi realizado empregando ferramentas como: o software RH3a, fruto de convênio entre o Ministério do Meio Ambiente e da Amazônia Legal, Universidade Federal de Viçosa e a Fundação Rural Mineira (RURALMINAS), no qual é aplicada a metodologia exemplificada por TUCCI (2001) onde a divisão das regiões homogêneas é feita através de parâmetros estatísticos e a análise de regressão utiliza os parâmetros fisiográficos das bacias contribuintes (área, densidade de drenagem, comprimento e declividade do rio principal, desnível específico) além das características pluviométricas (precipitação total anual e precipitação máxima diária); o Hidro (BRASIL,2000) e o SIGMA (UFPE, 1998).

Com a base de dados oferecida por esse projeto, a proposta desta dissertação foi empregar as ferramentas e técnicas para a obtenção de dados hidrológicos em regiões com escassa rede hidrométrica. Procurou-se inserir novas informações que contribuíssem para o estudo de regionalização, dividindo este trabalho em três etapas.

Na primeira etapa procurou-se investigar a influência da cobertura vegetal no processo de regionalização, utilizando-a como variável explicativa. A vegetação foi classificada em três classes dominantes: florestas, cerrado e caatinga. Para cada uma das bacias em estudo foi extraído, através de técnicas de geoprocessamento, o percentual de área coberta por cada tipo de vegetação. Para esse trabalho utilizou-se o software de regionalização hidrológica RH3a.

A segunda etapa deste trabalho refere-se à regionalização de parâmetros de um modelo chuva-vazão. A área em estudo foi dividida em 9 regiões fisicamente homogêneas, baseadas nas informações de vegetação, índices pluviométricos e tipo de solo (BARBOSA, 2002). Em seguida foram escolhidas duas bacias pertencentes à mesma região na qual pudesse ser feita a transferência de informações. Nesta etapa utilizou-se o SIGMA como ferramenta de trabalho

O terceiro objetivo deste trabalho foi incorporar a ferramenta de Redes Neurais Artificiais (RNA) ao estudo de regionalização hidrológica e empregou-se o programa QNET2000. Para isso, foram utilizados dois modelos para a regionalização. No primeiro, os parâmetros utilizados foram a área e os percentuais de solos classificados quanto às características hidrológicas; no segundo foram empregadas as características físicas e climáticas das bacias.

O conteúdo desta dissertação é composto no capítulo 2 pela revisão da literatura e apresenta um breve resumo dos principais trabalhos publicados sobre os temas abordados. A caracterização da área em estudo é feita no capítulo 3 e no capítulo 4 é descrita a metodologia aplicada. No quinto capítulo são apresentados os resultados da regionalização dos parâmetros obtidos na simulação do modelo chuva-vazão, enquanto os resultados obtidos com a inclusão da vegetação como variável explicativa são apresentados no sexto capítulo. No capítulo 7 discute-se a aplicação de técnicas de redes neurais à regionalização de vazões, com os resultados para a área de estudo. E, finalmente, no oitavo capítulo apresenta-se a conclusão dos resultados gerados e são feitas algumas recomendações para trabalhos futuros.

REVISÃO DA LITERATURA

O conhecimento das variáveis hidrológicas é uma base de suma importância para qualquer projeto e planejamento de recursos hídricos. Porém nem sempre é possível a obtenção dos dados *in loco* em virtude da escassa rede hidrométrica. Alguns pesquisadores têm buscado métodos alternativos para a obtenção destas informações, entre os quais destacam-se a regionalização hidrológica, os modelos de simulação chuva-vazão e as redes neurais artificiais.

A seguir é feito o resumo de alguns dos principais trabalhos sobre essa três metodologias.

SILVEIRA, TUCCI e SILVEIRA (1998) apresentam metodologias para obtenção de dados de vazão em pequenas bacias hidrográficas onde há ausência de rede hidrométrica. Entre os processos destaca-se a regionalização da curva de permanência, onde poderiam ser adotados dois procedimentos: (a) parametrização da curva, relacionando os parâmetros com características fisiográficas e climatológicas da bacia e (b) interpolação gráfica ou analítica de uma curva passando por vazões com permanências pré-definidas e estimadas a partir das referidas características da bacia. Esta última é a mais recomendada por minimizar os erros em virtude da estimativa ponto a ponto da curva. Os autores citam alguns trabalhos realizados anteriormente entre os quais destaca-se o trabalho realizado por Mimikou e Kaemaki (1985) nas regiões oeste e noroeste da Grécia onde se contou com apenas onze estações para calibração e duas para validação.

A outra metodologia exemplificada pelos autores é a estimativa da disponibilidade hídrica por meio da simulação chuva-vazão, neste caso mostra-se que, independentemente da tipologia dos vários modelos, o seu uso eficiente para calcular vazões em bacias sem dados está condicionado à sua validação. O trabalho exemplifica os testes hierarquizados por Klemes (1986): (a) testes com amostras divididas, (b) testes com amostras divididas não estacionárias, (c) testes com bacias próximas e (d) testes com amostras não estacionárias de bacias próximas.

Por fim, a metodologia aplicada pelos autores consiste na avaliação da disponibilidade hídrica fluvial de pequenas bacias hidrográficas, baseando-se na estimativa do comportamento da bacia no período de estiagem. Em pequenas bacias o processo de depleção é mais marcante em virtude da resposta rápida da bacia a estímulos de precipitações, com duas etapas básicas: (a) amostragem de vazões e (b) simulação de séries de vazões. Este modelo se propõe a possuir o menor número de parâmetros possíveis que permita estimar a série de vazões médias diárias em uma pequena bacia hidrográfica e permitir um fácil ajuste e extensão de séries.

EUCLYDES, FERREIRA e SANTOS (2001) desenvolveram estudos na bacia hidrográfica do rio das Velhas, afluente do São Francisco em Minas Gerais, tendo como principal finalidade a estimativa de potencialidades e disponibilidades dos recursos hídricos nessa sub-bacia através da regionalização hidrológica. Os dados foram processados com o suporte do software RH3a. A metodologia aplicada consiste na utilização de dois critérios para a identificação das regiões hidrológicamente homogêneas para as vazões estudadas (máximas, médias de longo período e mínimas com sete dias de permanência) e de dois métodos de regionalização de vazões. O trabalho consiste ainda na determinação das curvas de permanência utilizando para isso o método interpolativo, regionalizando através de regressões múltiplas com as características físico-climáticas as vazões com probabilidades de 50 e 95%.

FINZI, AMARAL e VERSIANI (2001) estudaram as sub-bacias dos rios Carinhanha e Correntes com o objetivo de chegar à regionalização hidrológica das vazões máximas e médias de longo período. O estudo partiu do pressuposto da estacionariedade das séries e foram realizadas regressões com parâmetros físicos e climáticos das áreas em estudo. Para sua realização foi utilizado o software RH3a. Após à etapa inicial de um estudo de regionalização (delimitação da área, definição das variáveis dependentes e explicativas e seleção de dados) foram definidas funções regionais com a identificação das regiões homogêneas.

CIRILO, AZEVEDO e MONTENEGRO (1992) Utilizaram modelos de simulação hidrológica para diferentes bacias hidrográficas do Estado de Pernambuco visando a regionalização de parâmetros para a aplicação dos modelos a bacias sem dados

fluviométricos. Os resultados obtidos com esses modelos são confrontados com os obtidos com outros processos de avaliação do escoamento superficial para a região.

ANDRADE et al (2001) estudaram dezesseis sub-bacias da região litorânea do Estado do Ceará sendo o objetivo desse estudo o agrupamento em regiões homogêneas sem considerar a continuidade geográfica, mas sim os aspectos fisiográficos e climáticos. A área em estudo situa-se em uma zona de transição entre o litoral (clima sub-úmido) e a zona do semi-árido.

GÓES e CAMPANA (2001) tiveram como objetivo a formulação de modelos para regionalização de vazões que pudessem incorporar variáveis representativas das modificações no uso e ocupação do solo, possibilitando a estimativa de valores anuais de vazões mínimas, médias e máximas para a bacia hidrográfica utilizando técnicas de geoprocessamento. Para isso foram utilizadas imagens de satélites de seis datas diferentes; com a classificação dessas imagens pode-se perceber as modificações temporais dos percentuais de terras impermeáveis, solos expostos e área irrigada.

VEIGA e KRÜGER (1999) trataram da aplicação de um modelo chuva-vazão (IPH2SL) e métodos de regionalização hidrológica, para a caracterização do comportamento das vazões em um local para o aproveitamento de uma pequena central elétrica. A área de estudo está localizada no leito do rio São Jerônimo, possuindo uma área de drenagem de 317km². Neste estudo foram aplicadas três metodologias distintas para que assim fosse possível a confrontação de resultados: (a) modelagem chuva-vazão, (b) transferência por relação direta de áreas de drenagem entre o local de aproveitamento e postos a jusante e (c) regionalização de vazão baseada em técnicas probabilísticas.

Para a regionalização de vazões foi utilizada o modelo H77, desenvolvido pelo Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR). Os parâmetros regionalizados por esse modelo são: (a) curva de permanência de vazões médias, (b) vazões mínimas, (c) variação sazonal de vazões médias mensais, (d) vazões máximas anuais e (e) hidrogramas de cheias. Estes parâmetros regionalizados são obtidos por equações de regressões derivadas das seguintes técnicas: (I) análise de agrupamentos, (II) análise discriminante, (III) interpolação espacial e (IV) análise de regressão múltipla.

OBREGON, TUCCI e GOLDENFUM (1999) apresentam um modelo mensal de transformação de precipitação em vazão para as bacias afluentes à Lagoa Mirim - RS. Sua metodologia consiste em: (a) extensão de séries através de um modelo hidrológico mensal, IPHMEN e (b) na regionalização das vazões com base nas séries históricas geradas.

O modelo IPHMEN é baseado em intervalo mensal de cálculo e composto das seguintes etapas: distribuição de volumes, escoamentos superficial e subterrâneo e otimização de parâmetros. A regionalização foi aplicada para a curva de permanência das vazões com 50 e 95% de permanência.

BARBOSA et al (2000), em virtude das curtas séries históricas de vazões na região semi-árida, buscaram a extensão de séries por meio de modelos de simulação calibrados. Este trabalho utilizou para isso o modelo SMAP diário, calibrado e validado para a bacia Antenor Navarro no Estado da Paraíba. A calibração foi feita aproximando-se os valores das vazões calculadas às observadas, manualmente, para um ano normal. A validação dos parâmetros do modelo foi feita para três casos: (a) um ano seco, (b) um ano chuvoso e (c) uma série de 4 anos.

GUIMARÃES, RIGHETTO e MELO (2001) apresentaram um modelo hidrológico simples de transformação chuva-vazão mensal, denominado Modelo Hidrológico para o Semi-Árido - MODHISA, aplicável a pequenas, médias e grandes bacias hidrográficas do semi-árido nordestino que contém grande número de pequenos açudes. Este modelo pode ser classificado como determinístico, concentrado e explícito. Neste programa calcula-se para cada mês o deflúvio produzido na bacia a partir da precipitação mensal média na bacia São levadas em consideração a precipitação efetiva, lâmina máxima de retenção superficial, coeficientes de escoamento e a depleção das vazões.

DINIZ, L. S. e CLARKE, R. T. (2001) empregaram a técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) no estudo de regionalização de parâmetros de um modelo chuva-vazão em 14 bacias localizadas na região semi-árida do Nordeste. Para a obtenção de tais parâmetros utilizou-se o SMAP mensal, calibrando um modelo para cada bacia. Em seguida, a regionalização foi realizada por meio de RNA onde os autores utilizaram uma rede do tipo *perceptron multicamada*, formada por 4 camadas, sendo 1 de entrada, 2 intermediárias e 1 de

saída. A camada de entrada, formada por 6 neurônios, é representada pelas características físicas das bacias (área, altitude média e desnível específico), pelas características climáticas (precipitação média e evaporação média anual) e pela permeabilidade média do solo. As camadas intermediárias são formadas por doze neurônios cada e, finalmente, a camada de saída é formada por seis neurônios que representam os parâmetros obtidos do modelo chuva-vazão (capacidade de saturação, coeficiente de infiltração, coeficiente de recarga, constante de deplecionamento do reservatório subterrâneo e os parâmetros de escoamento E_1 e E_2). Para o treinamento da RNA foram utilizadas as informações de treze bacias, de forma que sempre ficasse uma bacia para posterior verificação, sendo este processo repetido quatorze vezes. Com os resultados obtidos em cada validação foram realizadas novas simulações do modelo chuva-vazão, utilizando agora os parâmetros gerados pela RNA, comparando as vazões geradas nos dois modelos.

BARP e BARBOSA (1999) compararam resultados de um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo chuva-vazão, através do modelo SMAP e outro modelo de simulação empregando Redes Neurais Artificiais, nos dois casos com dados mensais. Inicialmente os autores apresentam o modelo SMAP e conceituam algumas incertezas geradas na fase calibração em decorrência de que em muitos casos não se é possível obter informações de campo, ficando o ajuste dos parâmetros baseado em uma calibração manual (tentativa e erro) ou na calibração automática. Em seguida os autores definem o modelo de RNA como um caminho alternativo para a modelagem chuva-vazão pelas vantagens citadas a seguir: (a) incorporação de natureza não-linear dos processos hidrológicos, (b) trata-se de um processo automático de calibração que utiliza técnicas de otimização com uma série de recursos para evitar as situações de otimização local e (c) resultados de diversos estudos apresentados como superiores às técnicas de modelagem de séries temporais via Box-Jenkins, especialmente para séries curtas de dados.

RAMOS e GALVÃO (2001) tiveram em seu trabalho o objetivo de verificar a estabilidade da técnica de redes neurais em uma aplicação hidrometeorológica. Os autores concluem que, o modelo mesmo apresentando bons resultados na fase de calibração, obtendo-se altas correlações com os dados observados, o mesmo pode não acontecer na fase de validação. Os autores explicam que, para se obter sucesso com este tipo de técnica é necessário se ter alguns cuidados, entre os quais destaca-se o excesso de parâmetros numa

rede, o que ocasionaria superajustamento dos dados. Discutem ainda a necessidade de se realizar um pré-processamento dos dados de entrada da rede neural antes de utilizá-los no treinamento de modelos e também o estabelecimento de critérios de estabilidade para a escolha da melhor rede.

SARMENTO (1996) faz um resumo da classificação das Redes Neurais Artificiais e em seguida apresenta aspectos da definição da arquitetura das redes neurais em função do problema a ser modelado. Finalmente, é mostrada a possibilidade de utilização dessa técnica na modelagem de variáveis hidrológicas. Dois exemplos foram apresentados: (a) simulação chuva-vazão ao nível mensal em uma bacia da região semi-árida do Nordeste e (b) na previsão de vazões médias diárias com intervalos de 1 a 2 dias do rio Leine, região central da Alemanha.

KHALIL, PANU e LENNOX (2001) desenvolveram modelo de estimação de dados hidrológicos. Este trabalho tem como objetivo o preenchimento de falhas, baseado na arquitetura de redes neurais, sendo propostos dois casos: (a) preenchimento das falhas baseado na própria série estudada ou (b) preenchimento das falhas com base nas séries de um ou mais postos vizinhos. No primeiro caso a vazão atual é uma função de uma vazão anterior. O número de nós da rede neural é definido pelo período mensal ao qual está submetido a estação em estudo. No segundo processo os nós são compostos pelas séries de postos vizinhos. A função de ativação utilizada foi a Sigmóide em ambos os casos.

CANNON e WHITFIELD (2002) aplicaram redes neurais para modelar uma bacia canadense. As vazões observadas foram correlacionadas com os dados de temperatura e precipitação no mesmo período. Foram trabalhados dados diários consistidos de 21 estações fluviométricas e para o treinamento/validação do modelo escolheu-se a estrutura *Perceptron Multi Layer*.

AMORIM, ROSSATO e TOMASELLA (1999) desenvolveram este trabalho tendo como objetivo a estimação da evapotranspiração potencial mensal no Brasil aplicando os dados de temperatura média do ar ao modelo de Thornthwaite, devidamente corrigidos para temperatura superiores a 26,5° C, utilizando para isso um sistema de informações geográficas.

Este trabalho realizado no INPE, utilizando informações fornecidas pelo INMET, tem sua importância tendo em vista a precariedade de informações sobre evaporação e a facilidade com que esse modelo se aplica, tendo apenas uma equação para qualquer temperatura.

ARAÚJO F^o e CIRILO (1994) analisaram diferentes fórmulas para o cálculo da evapotranspiração, juntamente com séries de evaporação medidas em tanques em diferentes postos no Estado de Pernambuco e daí desenvolveram metodologia de regionalização da evapotranspiração neste Estado. Entre as fórmulas analisadas estão a da UNESCO, Thornthwaite, Blaney-Criddle e Hargreaves. Sua metodologia baseia-se na correlação entre as variáveis climáticas e de posição geográfica com a evapotranspiração potencial através de tanques classe A em 5 postos onde havia informações sobre todas essas variáveis.

FERREIRA, ESPÍRITO SANTO e MANZI (1998) tiveram como objetivo a calibração de um modelo hidrológico para a bacia do São Francisco. Para tanto os autores utilizaram um modelo desenvolvido por Vorosmarty (1989) que consiste no balanço e transporte de água, processos esses conhecidos como MBA e MTA. No primeiro os dados de entrada são as informações espaciais de variáveis meteorológicas, tipos de vegetação, solos, topografia, evapotranspiração real, escoamento superficial e umidade do solo. O modelo MTA utiliza as informações do escoamento superficial, gerado pelo MBA, e de roteamento para, através de um modelo linear de transferência de água superficial entre blocos adjacentes, calcular as descargas resultantes em qualquer canal da bacia hidrográfica. Esse modelo é do tipo distribuído, sendo a bacia do rio São Francisco sub-dividida em 230 blocos com dimensões de 0,5 x 0,5 graus. A evapotranspiração potencial (ETP) foi obtida através do método de Thornthwaite e Mater (1957) e a taxa real de evapotranspiração (ETR) depende das taxas de ETP e precipitação (P) segundo a seguinte metodologia:

$$ETR=ETP \text{ se } P \geq ETP \quad \text{Equação 2.1}$$

$$ETR=P-\Delta W \text{ se } P < ETP \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde ΔW é a variação da umidade do solo (mm) durante o intervalo de tempo considerado. A partir do momento que o solo atinge a saturação o excesso de água incidente vai alimentar o reservatório subterrâneo e o teor de umidade no solo permanece constante. Para efeitos de modelagem considera-se uma função linear de transferência deste reservatório para os rios. O modelo de transporte utilizado exige um curso d'água superficial para cada

bloco. É através destes cursos d'água que os blocos podem interagir, exportando ou recebendo água de blocos adjacentes. A vantagem desse modelo é que se considera o represamento da calha do São Francisco.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange 4 sub-bacias (46, 47, 48 e 49) do total de 9 regiões delimitadas pela ANEEL na bacia do São Francisco (Figura 3.1 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), totalizando 320 mil km² e compreendendo parte dos Estados da Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe. A calha principal tem sua nascente na Serra da Canastra, a uma altitude de 1.428m, no município de São Roque de Minas - MG e possui uma extensão total de 2.700km.

Estas sub-bacias pertencem às regiões fisiográficas do Médio Inferior (sub-bacia 46 e parte da 47), Submédio (parte da sub-bacia 47 e sub-bacia 48) e Baixo São Francisco (sub-bacia 49), como mostra a Figura 3.2

3.1 GEOPOLÍTICA

A região em estudo compreende 277 municípios distribuídos conforme mostrado na Tabela 3.1. Salienta-se ainda que grande parte de sua área está inserida dentro dos limites do polígono das secas, sendo que a exceção deve-se a região oeste da Bahia (Figura 3.3). As informações apresentadas foram extraídas do banco de dados da ANEEL.

Tabela 3.1: Divisão política

ESTADO	ÁREA ¹ (km ²)	MUNICÍPIOS	POPULAÇÃO ²
Bahia	222.681,76	138	3.230.291
Alagoas	12.115,09	42	8.189
Pernambuco	63.113,85	74	1.825.071
Sergipe	6.551,71	23	237.126

¹ Inclui apenas a área do município inserida dentro da área em estudo

² Dados do ano de 1996, banco de dados da Aneel.

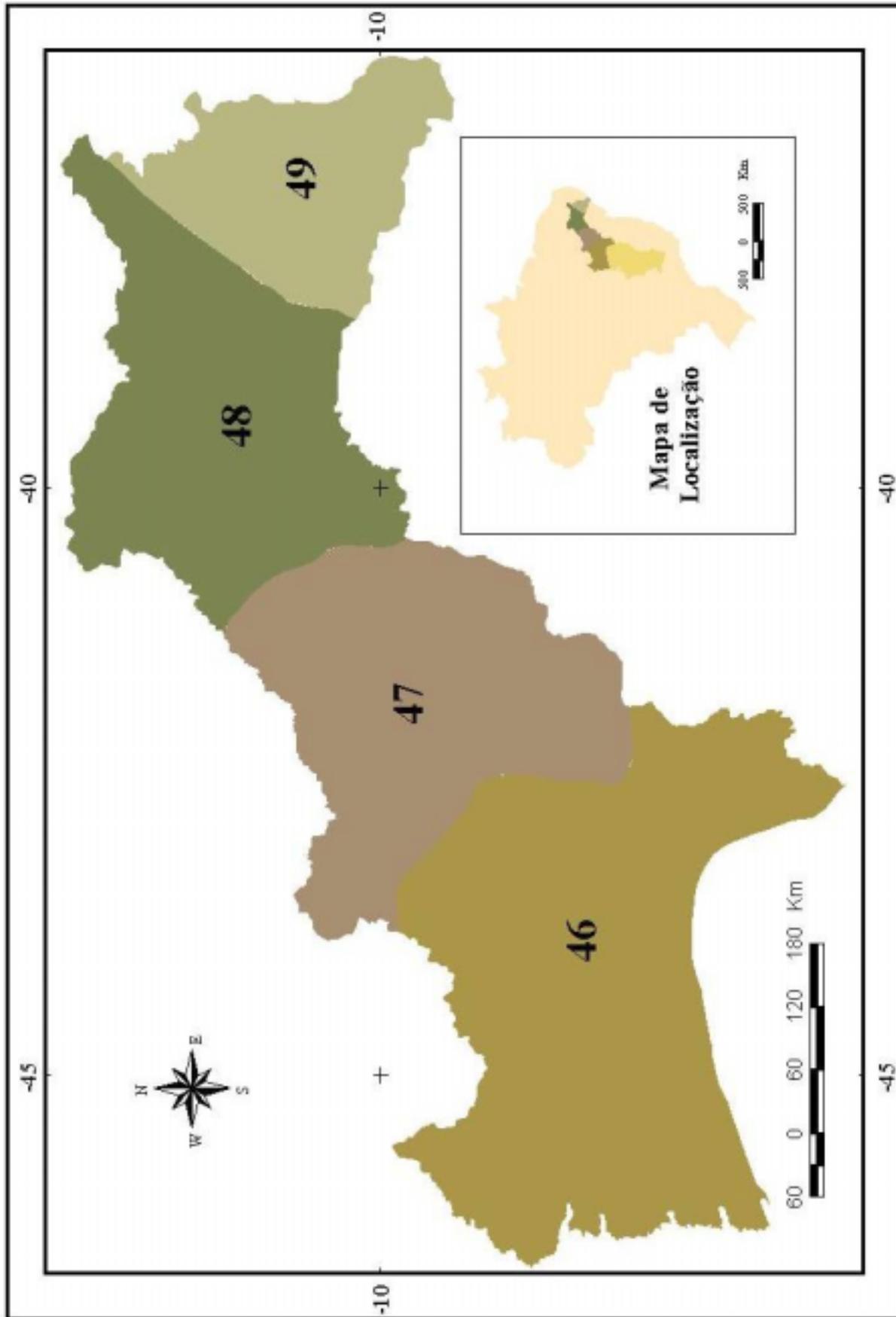


Figura 3.1: Mapa de Localização

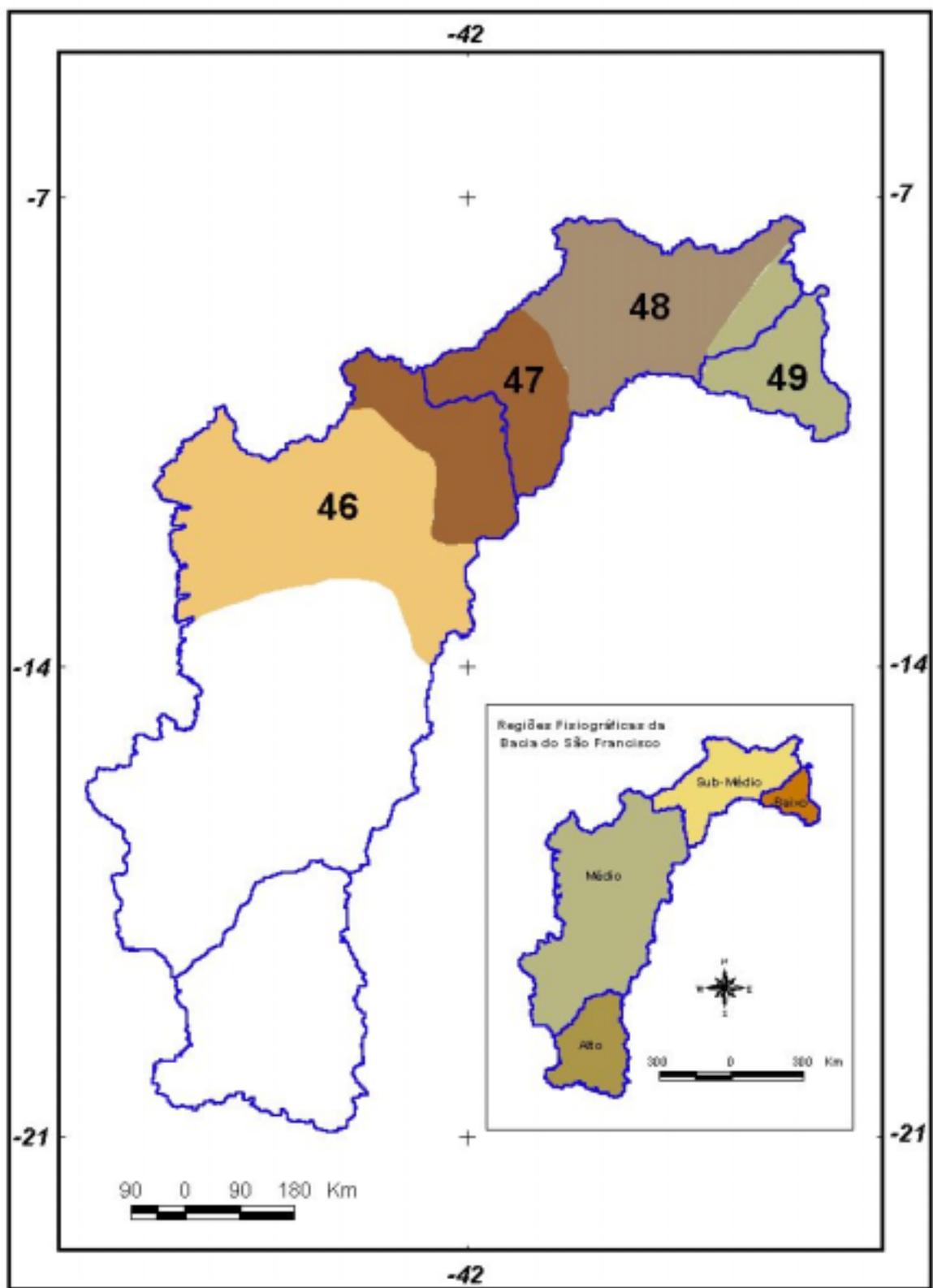


Figura 3.2: Regiões Fisiográficas

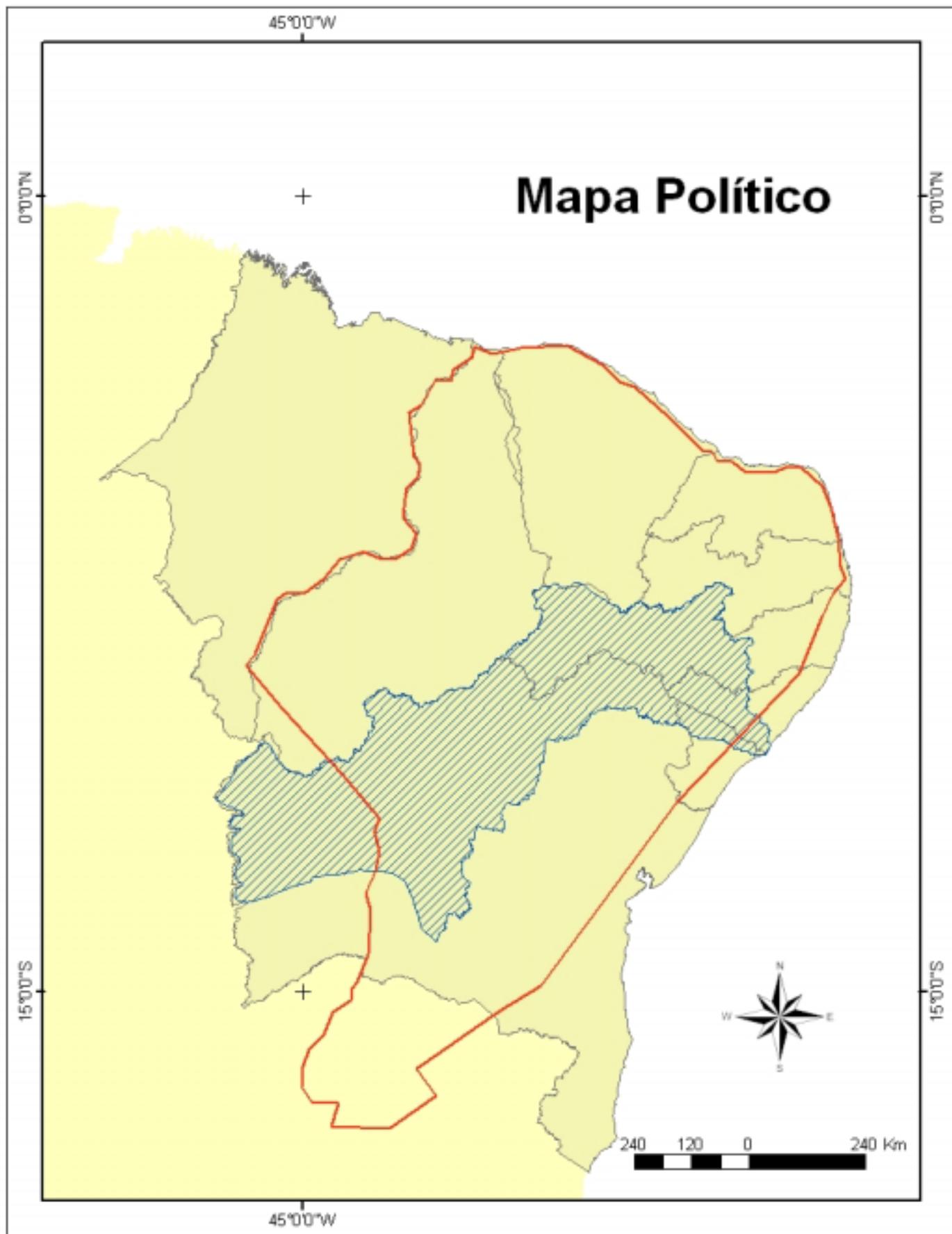


Figura 3.3: Mapa Político com destaque ao polígono das secas

3.2 CLIMA

O clima da bacia sofre diversas modificações ao longo de toda sua área. Este se justifica pela grande extensão territorial e a diversidade das formações geomorfológicas existentes. A região sofre influência de diferentes massas de ar que resultam em baixo índice de nebulosidade e, por consequência, grande incidência da radiação solar. As temperaturas médias anuais são elevadas, assim como as taxas de evaporação. Estas variáveis estão inter-relacionadas entre si e também com a posição geográfica. Seus maiores valores estão na região do Submédio São Francisco e atingem valores médios de 2.140mm. Os valores mínimos da evaporação, em torno de 1000mm, estão no extremo sul, no Médio São Francisco, atingindo valores inferiores em casos particulares da existência de micro-climas. Nesta região o clima varia entre tropical úmido e tropical muito seco (Figura 3.4).

3.3 SOLOS

Na área de estudo inserida dentro dos limites da região fisiográfica do Médio São Francisco ocorre uma predominância do *latossolos*, apresentando ainda proporções significativas de *areia quartzosas* e *solos litólicos*, onde apenas o primeiro apresenta aptidão para o uso agrícola.

No Submédio São Francisco não há predominância de uma unidade de solo, mas uma divisão entre os *brunos não cálcicos* e *podzólicos*, com uma proporção média de 24% (Tabela 3.2). Nesta região ocorre ainda a presença de *areias quartzosas*, *regossolos* e *solos litólicos*, cada um representando, em torno de 10% na composição. Esta área apresenta grande vulnerabilidade ambiental, tendo em vista que os solos *brunos não cálcicos* apresentam baixa profundidade, o que proporciona grande susceptibilidade à erosão. Os solos desta área são extremamente pobres em virtude da ocorrência das *areias quartzosas* e dos *regossolos* que possuem granulometria elevada, favorecendo a infiltração.

Na região do Baixo São Francisco um discreto predomínio dos *regossolos*, representando aproximadamente 35% da área. Ressalta-se ainda a ocorrência dos solos *brunos não cálcicos*, *podzólicos* e *solos litólicos*.

A seguir é apresentada uma tabela com todas as informações extraídas dos mapas digitais fornecidos pela EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias, no trabalho denominado ZANE – Zoneamento Agro-ecológico do Nordeste (EMBRAPA, 2000/CD-ROM), trabalhados por técnicas de geoprocessamento em uma escala de

1:2.000.000 através do software ArcView 3.2a. A Figura 3.5 mostra a distribuição do solo na área.

Em relação as propriedades hidrológicas dos solos, segundo a classificação do Soil Conservation Service, na área em estudo há uma predominância dos solos tipo A, que são mais permeáveis, na parte sul, e de solos tipo D, menos permeáveis, ao norte (Figura 3.6). Os solos tipo B apresentam uma distribuição mais uniforme ao longo de toda a área e os solos tipo C possuem uma pequena representatividade.

Tabela 3.2: Distribuição pedológica nas regiões na área em estudo

Solo	REGIÃO					
	Médio		Sub - Médio		Baixo	
	Área (Km ²)	%	Área (Km ²)	%	Área (Km ²)	%
Areia Quartzosas	32.758,24	20,72	15.068,48	12,48	1.636,29	5,70
Bruno não Cálculos	0,00	0,00	28.523,33	23,63	4.136,34	14,40
Cambissolos	11.304,36	7,15	10.039,78	8,32	0,00	0,00
Gleissolos	0,00	0,00	0,00	0,00	129,47	0,45
Latosolos	91.987	58,18	10.194,91	8,44	1.985,09	6,91
Planossolos	0,00	0,00	235,79	0,20	2.486,26	8,66
Podzólicos	135,67	0,09	29.620,57	24,53	3.131,57	10,90
Regossolos	0,00	0,00	12.744,78	10,56	10.259,61	35,72
Solos Aluviais	3.548,44	2,24	199,96	0,17	0,00	0,00
Solos Litólicos	2.6647,5	16,85	13.040,95	10,80	4.959,55	17,27
Vertissolos	0,00	0,00	1.064,62	0,88	0,00	0,00

3.4 VEGETAÇÃO

A área em estudo apresenta três tipos de vegetação dominantes: floresta, cerrado e caatinga (Figura 3.7). A distribuição espacial da vegetação é influenciada pelo clima, pela topografia e da natureza do solo. A seguir são apresentadas as principais características de cada uma delas.

3.4.1 FLORESTA

Predominante na região úmida, apresentando-se, também nas regiões sub-úmidas secas e úmidas, ao longo dos rios e riachos, onde ocorre maior umidade do solo, formando floresta de galerias ou mata ciliar. As florestas ocorrem, ainda, nas regiões de clima sub-úmido seco e

transicional para semi-árido, onde há presença de solos de alta fertilidade. Espacialmente, cobrem 8,0% da superfície da bacia, localizando-se em Minas Gerais (Alto São Francisco) e nas faixas costeiras de Sergipe e Alagoas (Baixo São Francisco).

3.4.2 CERRADO

Predomina nas regiões de clima úmido e sub-úmido e de solos de baixa fertilidade. O grande domínio deste tipo de vegetação, que cobre cerca de 33,9% da bacia, está localizado em Minas Gerais e no oeste da Bahia (Alto e Médio São Francisco).

3.4.3 CAATINGA

A caatinga é a vegetação das áreas de clima árido e semi-árido. Predominam na Bahia, Pernambuco e oeste de Alagoas e Sergipe, cobrindo 21,2% da bacia. Fisiograficamente situa-se no Médio, Submédio e Baixo São Francisco. Esse tipo de vegetação, portanto, predomina na área de estudo.

3.5 HIDROGRAFIA

O rio São Francisco, por nascer e ter grande parte do seu alto curso em região de clima tropical chuvoso, que lhe fornece a água necessária para atravessar a região cristalina e de clima semi-árido, possui um regime permanente e se destaca como o principal rio na região Nordeste e um dos principais rios em território brasileiro. No Alto São Francisco o curso principal e de seus afluentes estão situados sobre bacias sedimentares, o que garante uma contribuição do aquífero para a formação de vazão. No entanto, em sua área inserida no semi-árido, onde os solos são rasos, seus rios tributários possuem baixa capacidade de regularização de água e não possuem contribuição subterrânea. Como o embasamento cristalino situa-se próximo à superfície, o escoamento acontece de forma rápida, caracterizando assim o regime torrencial de alguns rios desta região. A bacia conta com 36 afluentes de grande importância, dos quais 17 possuem regime temporário. Os 19 tributários com regime permanente possuem suas nascentes nos Estados de Minas Gerais e da Bahia. Os rios contribuintes mais importantes são os da margem esquerda, onde existem cinco rios com áreas de drenagem entre 18.000km² e 76.000km² e desníveis entre 100 e 400 metros da nascente à foz.

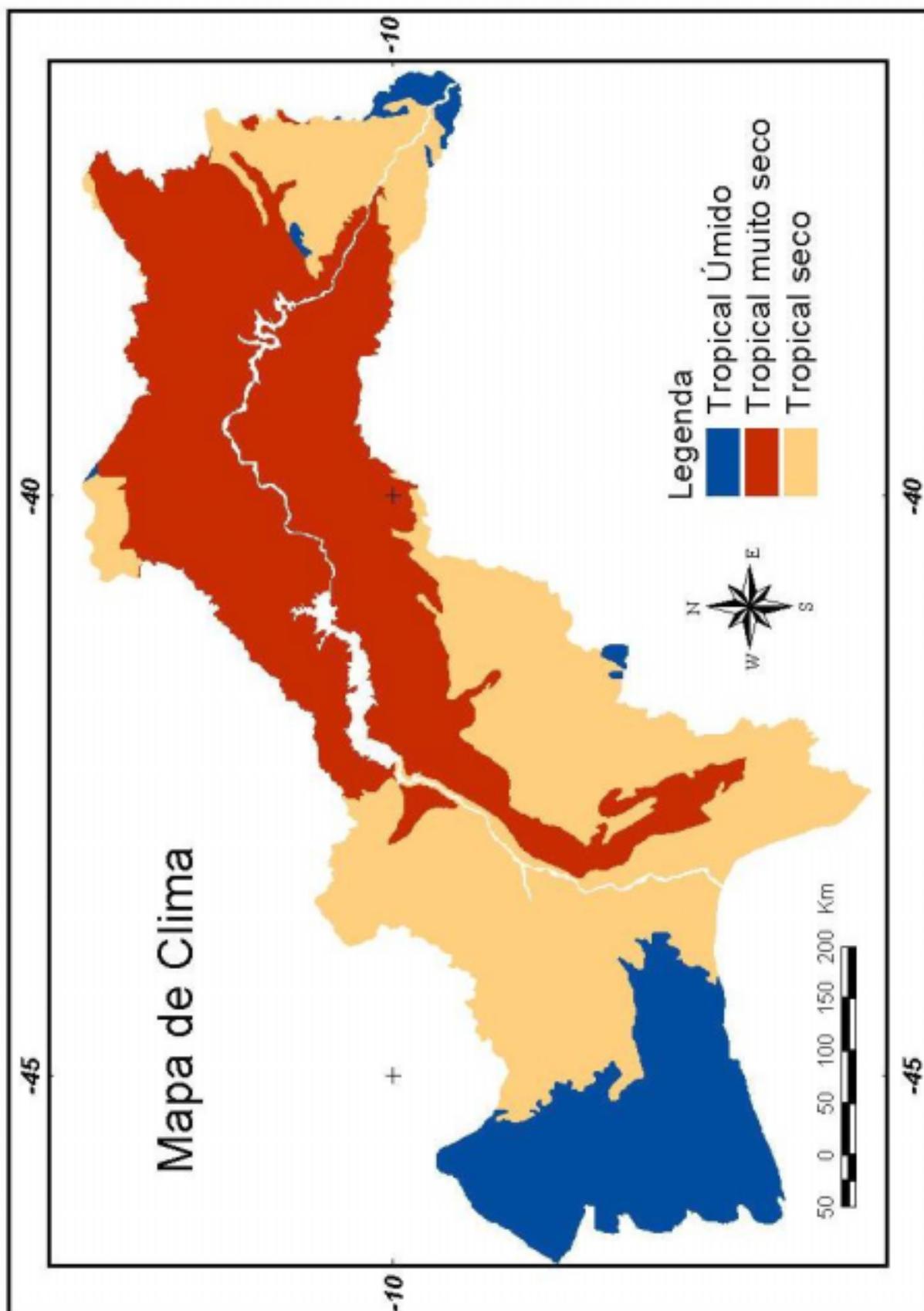


Figura 3.4: Mapa de clima

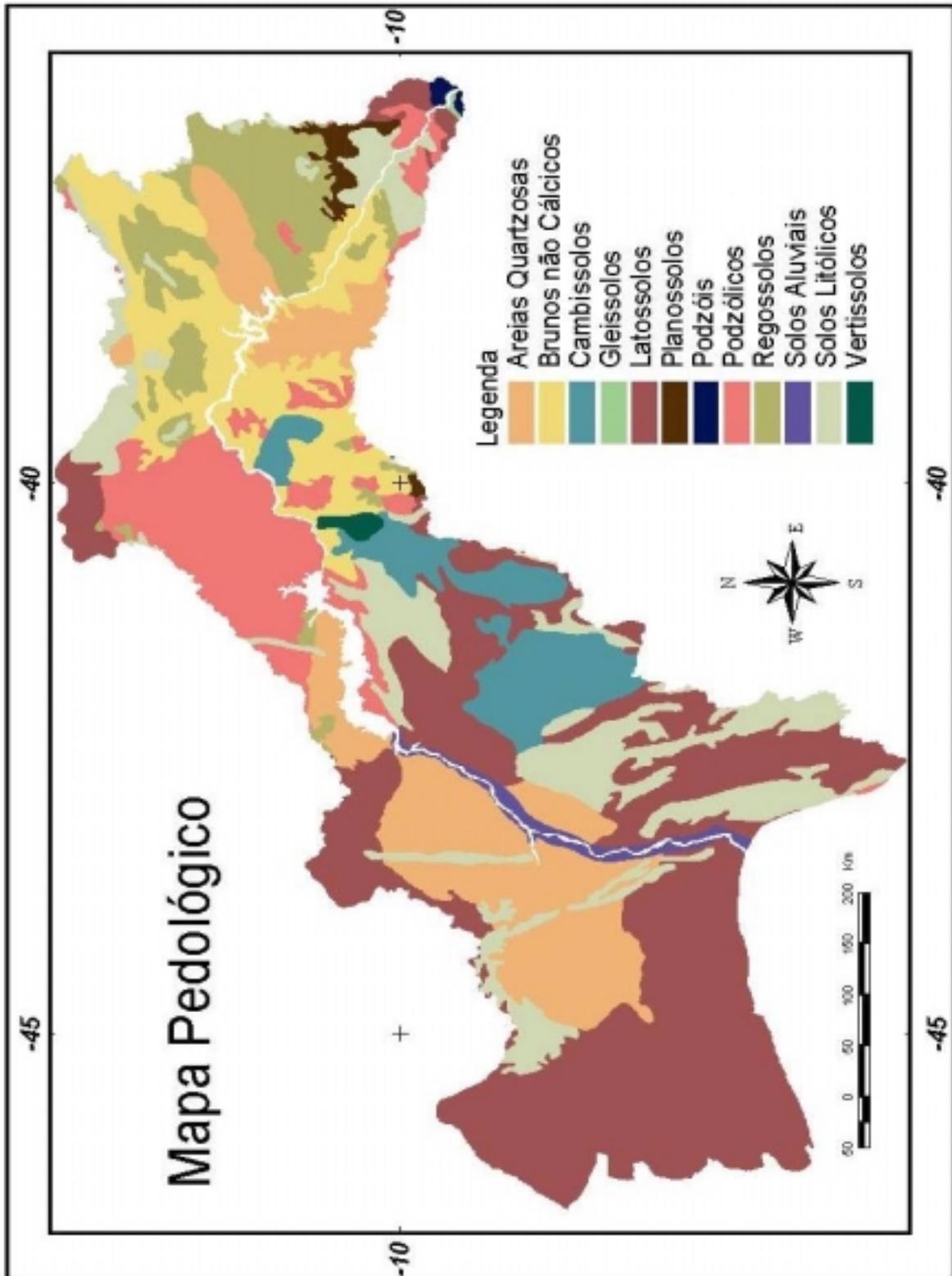


Figura 3.5: Mapa Pedológico

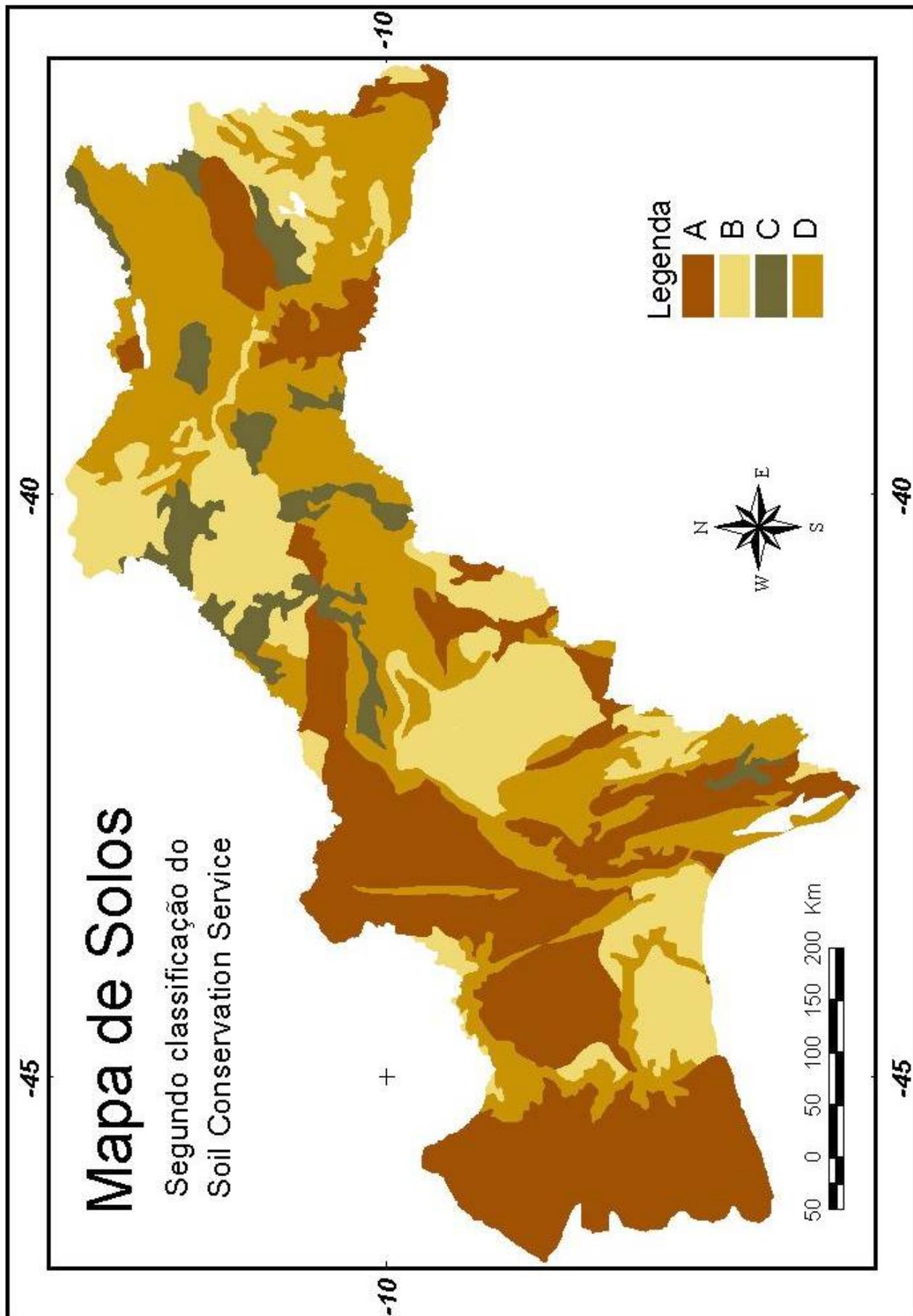


Figura 3.6: Mapa de solos segundo classificação do Soil Conservation Service

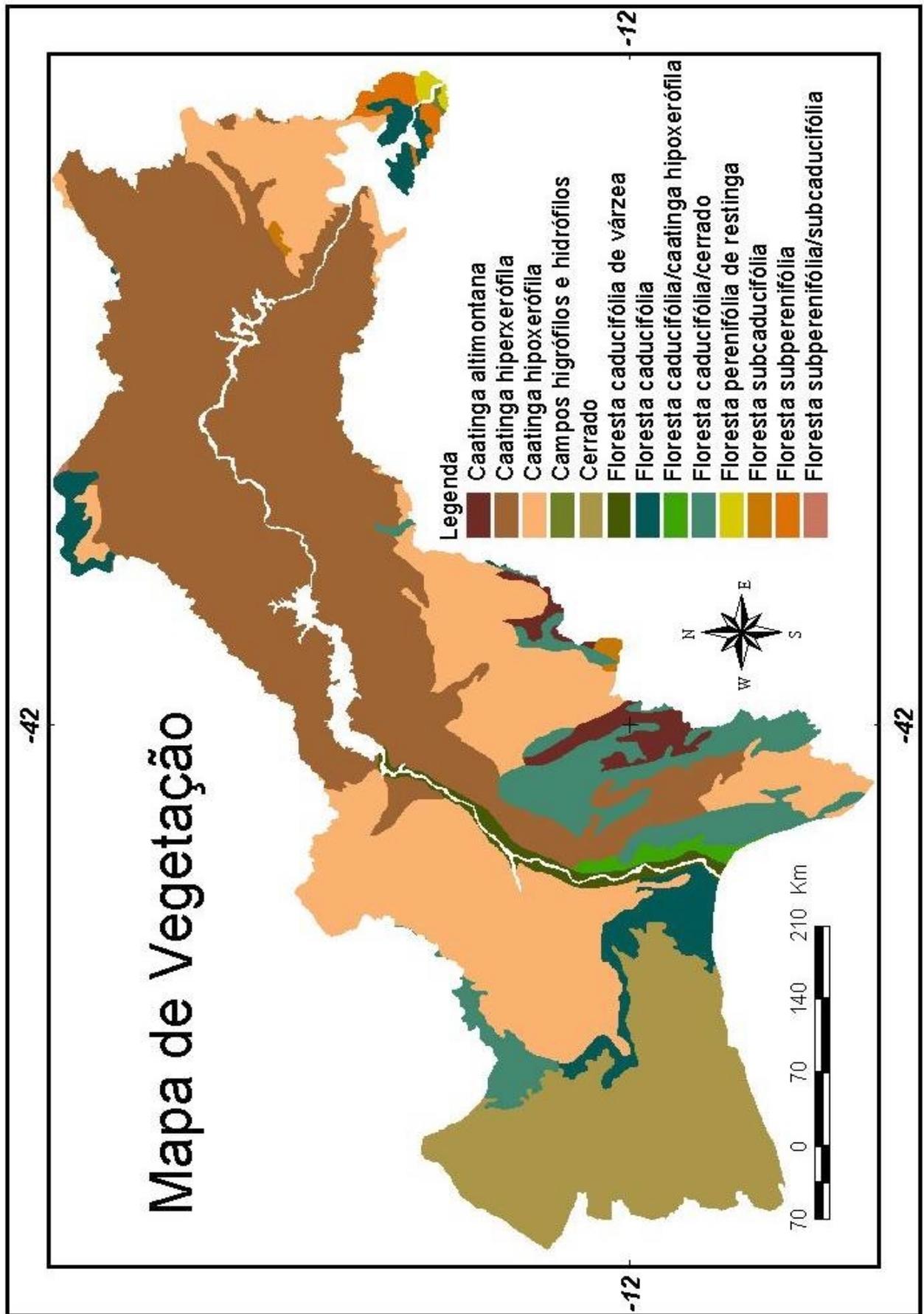


Figura 3.7: Mapa de vegetação

REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA

Conceitua-se regionalização como sendo a transferência de informações entre bacias com mesmo comportamento hidrológico. Esta metodologia é uma ferramenta bastante utilizada por explorar ao máximo as informações existentes visando à estimativa das variáveis hidrológicas em locais sem dados ou com insuficiência desses (TUCCI, 2001). Após a definição dos limites da área de estudo o processo de regionalização deve seguir algumas etapas que serão explicadas a seguir.

4.1 ETAPAS INICIAIS

4.1.1 SELEÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

A qualidade dos resultados de qualquer estudo hidrológico está associada diretamente aos dados selecionados, tanto em termos quantitativos como também quanto à sua qualidade. Para que esse objetivo seja alcançado, TUCCI (2001) estabelece alguns critérios para seleção das informações que serão utilizadas na determinação das curvas de probabilidades de vazões máximas, médias e mínimas.

4.1.1.1 AVALIAÇÃO DA REPRESENTATIVIDADE DA AMOSTRA

Os parâmetros estatísticos calculados com base nas informações das séries históricas dependem não somente do tamanho da série, como também da tendenciosidade ou não dos dados observados. Ou seja, é necessário que não existam apenas períodos de estiagem ou de cheias, caso em que há um aumento das incertezas geradas no processo. Para a regionalização hidrológica os postos analisados devem possuir série mínima com 5 anos de observações diárias. Embora 5 anos seja pouco tempo de observação, o conjunto dos postos poderá representar bem o comportamento das vazões no local em estudo.

4.1.1.2 INTERDEPENDÊNCIA DE VAZÕES

Dois eventos são considerados independentes quando a ocorrência de um não implica no resultado do outro, ou seja, não existe uma correlação entre seus valores. A interdependência dos valores amostrais dos eventos extremos escolhidos pode ser verificada através do teste do coeficiente de autocorrelação linear dado por:

$$r_1 = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^{N-1} \frac{(y_t - \bar{y})(y_{t+1} - \bar{y})}{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \bar{y})^2} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde: y_t são os valores da série, \bar{y} representa a média e N o tamanho da série

Quando a série é independente, o valor teórico de r_1 é zero, e a estatística anterior é distribuída normalmente, com média $\frac{-1}{N-1}$ e variância $\frac{(N-2)}{\sqrt{N-1}}$. Portanto, se o valor calculado de r_1 pela estimativa anterior cair fora do intervalo dado por $\left[\frac{-1 - 1,96\sqrt{N-2}}{N-1}, \frac{-1 + 1,96\sqrt{N-2}}{N-1} \right]$, o valor do coeficiente de autocorrelação não tenderá a zero, podendo ser rejeitada a hipótese de independência da série amostral, assumindo um erro de 5%.

4.1.1.3 ESTACIONARIEDADE DAS SÉRIES

Uma série é dita estacionária quando durante o período de observações não ocorreram mudanças nas características dos dados estatísticos das séries históricas. Entre as alterações que podem modificar estas características destacam-se o aumento da urbanização, desmatamento e a construção de reservatórios. Caso isto ocorra, é necessária a quantificação das alterações das estatísticas das variáveis em estudo. Esta verificação poderá ser feita através de dois tipos de testes estatísticos: paramétricos e não paramétricos.

4.1.1.3.1 *Testes Paramétricos*

Esta metodologia é aplicada quando há indícios de mudanças no comportamento hidrológico de um sistema a partir de um determinado período. Com a utilização dos testes paramétricos é possível verificar se ocorreram mudanças nas estatísticas da média e da variância destes dois períodos, mas para isso os dados observados devem ser independentes entre si e devem se ajustar a uma distribuição normal. Os testes usualmente empregados são o de *Student* para a média e o de *Fischer* para a variância.

4.1.1.3.1.1 *Teste de Identidade de Variâncias*

Para a verificação de alterações na estatística de variância é necessário sub-dividir a série em dois períodos. O primeiro período, com uma série de tamanho N_1 e variância s_1^2 , seria formado pelos valores observados anteriormente à suposta alteração. Enquanto o segundo período, posterior às mudanças, possui série com tamanho N_2 e variância s_2^2 . A partir destas informações calcula-se o valor F , dado por:

$$F_{calc} = \frac{\text{variância maior}}{\text{variância menor}} \quad \text{Equação 4.2}$$

Supondo que as séries amostrais utilizadas tenham uma distribuição F , com $(N_1-1; N_2-1)$ ou $(N_2-1; N_1-1)$ graus de liberdade, respectivamente. O valor calculado de F deverá ser comparado com o valor de F teórico (F_t), retirado da tabela de distribuição F , com os graus de liberdade e com o nível de significância requerido. Se $F_{calc} > F_t$ a hipótese de identidade entre as variâncias poderá ser rejeitada, assumindo um erro de acordo com o nível de significância adotado, geralmente em torno de 1 a 5%.

4.1.1.3.1.2 *Teste de Identidade das Médias*

Esta metodologia, assim como o teste de identidade de variâncias, requer a divisão da série em dois períodos, anterior e posterior às mudanças, com tamanhos das amostras N_1 e N_2 e médias respectivamente. \bar{x}_1 e \bar{x}_2 . A análise final para a verificação da identidade das médias dependerá do resultado obtido anteriormente para as variâncias.

Caso a hipótese de identidade das variâncias tenha sido aceita e as médias \bar{x}_1 e \bar{x}_2 sejam idênticas do ponto de vista estatístico, a estatística t com distribuição de *Student* e apresentando N_1+N_2-2 graus de liberdade será calculada da seguinte maneira:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}} \quad \text{Equação 4.3}$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=1}^{N_2} (x_j - \bar{x}_2)^2}{N_1 + N_2 - 2} \quad \text{Equação 4.4}$$

Onde s^2 é uma estimativa da variância em todo período de dados. Neste caso a identidade das médias poderá ser rejeita quando o valor calculado de t cair fora do intervalo mostrado a seguir:

$$\left[-t_{\alpha/2; N_1+N_2-2} ; t_{\alpha/2; N_1+N_2-2} \right] \quad \text{Equação 4.5}$$

Estes valores são obtidos nas tabelas de distribuição de Student, para o grau de liberdade (GL) que é calculado através da seguinte equação:

$$GL = \frac{1}{\frac{k^2}{N_1-1} + \frac{(1-k)^2}{N_2-1}} \quad \text{Equação 4.6}$$

$$\text{Onde : } k = \frac{N_2 s_1^2}{N_2 s_1^2 + N_1 s_2^2} \quad \text{Equação 4.7}$$

Caso a hipótese da identidade das variâncias tenha sido rejeitada o valor de t é calculado por meio da seguinte fórmula:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2}}} \quad \text{Equação 4.8}$$

Neste caso o grau de liberdade é calculado também pela Equação 4.8

4.1.1.3.2 Testes não Paramétricos

A vantagem desta metodologia é sua aplicabilidade mesmo quando as séries observadas não se ajustam à distribuição normal, critério exigido na utilização dos testes paramétricos. Isso poderá ser aplicado a vazões máximas e mínimas que geralmente não se distribuem normalmente. Existem vários testes não paramétricos, sendo descrito a seguir apenas o de *Wilkinson*.

Esta metodologia consiste no desmembramento de uma série hidrológica em dois períodos, cujos valores x_i e y_i são ordenados de forma decrescente. As séries com pelo menos 10 valores cada pertencem à mesma população se o número de inversões for distribuído de acordo com a normal. Uma inversão é contada a cada valor de y menor a um determinado valor de x . A média do número de inversões é:

$$M = \frac{n_x \cdot n_y}{2} \quad \text{Equação 4.9}$$

$$D = \frac{n_x \cdot n_y}{12} (n_x + n_y + 1) \quad \text{Equação 4.10}$$

Onde n_x e n_y são, respectivamente, os tamanhos das séries de x e y . Para um nível de significância α , a região crítica para a hipótese de igualdade das médias é:

$$M - t_\alpha S \leq \mu \leq M + t_\alpha S \quad \text{Equação 4.11}$$

Onde $S = \sqrt{D}$; μ é o número de inversões e t_a é o valor obtido da tabela de Student.

4.1.2 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS

Após a seleção dos postos a serem utilizados é necessário escolher as variáveis que melhor expliquem o comportamento hidrológico da bacia. Estas variáveis, denominadas explicativas, podem ser as características fisiográficas de cada bacia contribuinte, os fatores climáticos ou as características “espaço-temporais”. Entre as características fisiográficas destacam-se a área de contribuição, a densidade de drenagem, o desnível e comprimento do rio principal; entre os fatores climáticos pode-se citar a taxa de evaporação, a precipitação anual média e a precipitação máxima diária e entre as características “espaço-temporais”, a cobertura vegetal e a ocupação e uso do solo. Entretanto, no estudo de regionalização a escolha destas variáveis deve ser feita seguindo alguns critérios:

- As variáveis explicativas devem ser de fácil obtenção;
- Deve se aplicar método diretos, evitando assim as incertezas para a determinação das variáveis explicativas;
- Muitas variáveis explicativas possuem alta correlação entre si, de tal maneira que a introdução de uma nova variável não acarretaria um aumento das informações. Sendo assim, é necessário um exame minucioso na escolha das mesmas;
- A regionalização deve prover ao usuário a metodologia de estimativa das variáveis explicativas nas diferentes áreas em que poderá ser aplicada;
- A regionalização deve fornecer os níveis de incertezas para a estimativa das variáveis dependentes.

4.1.3 REGIÕES HOMOGÊNEAS

De acordo com TUCCI e CLARKE (2001) as regiões homogêneas são definidas pela delimitação física que apresente melhor aproximação das funções regionais. Para isso deve-se agrupar os postos cujo comportamento hidrológico se assemelhem, utilizando metodologias estatísticas que identifiquem as tendências semelhantes nas curvas adimensionais. Neste caso são consideradas as similaridades das características geográficas das regiões em estudo para a definição preliminar das regiões homogêneas. A qualidade do ajuste pode ser verificada após

à obtenção da equação de regressão através da análise dos resíduos. Ou seja, a diferença entre os valores estimados e os observados ($Q_e - Q_o$) é plotada graficamente e a tendência é a de que os postos que apresentem mesmo sinal formem uma única região.

4.2 TÉCNICAS ESTATÍSTICAS

A associação de dados hidrológicos por meio de técnicas estatísticas e matemáticas permitem o estabelecimento de relações empíricas e conceituais destes fenômenos. Neste item serão abordadas as principais técnicas utilizadas em Hidrologia. Inicialmente serão descritos os métodos empregados para a estimativa de probabilidades das variáveis, dos quais destaca-se a distribuição normal e a distribuição de extremos. Em seguida, serão apresentadas, de forma sucinta, as técnicas de relacionamento de variáveis de regressão linear simples e múltiplas.

4.2.1 DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES

Segundo definição de SOONG (1986) o comportamento de uma variável aleatória é caracterizado por sua função de distribuição de probabilidades, isto é, pela maneira como as probabilidades se distribuem pelos valores que elas assumem.

Uma Função de Distribuição de Probabilidade (**FDP**) pode ser expressa através da seguinte equação:

$$F_x(x) = P(X \leq x) \quad \text{Equação 4.12}$$

Onde X representa a variável aleatória, sendo x um valor real qualquer para uma probabilidade $P(X \leq x)$.

A **FDP** representa a probabilidade de X assumir um valor em um subconjunto S formado por todos os pontos menores ou iguais ao valor x . Na medida em que o valor x cresce este subconjunto tende a aumentar até que o valor da **FDP** assumo o valor 1, sendo chamada também de *função de distribuição cumulativa*.

Alguns fenômenos hidrológicos podem ser modelados através de ajustes a determinadas distribuições teóricas de probabilidade e a análise da natureza destes

fenômenos influenciará diretamente na escolha do modelo a ser aplicado. No item a seguir serão mostradas as principais distribuições aplicadas para as variáveis aleatórias contínuas.

4.2.1.1 DISTRIBUIÇÃO NORMAL

A distribuição normal, também denominada distribuição Gaussiana, é de grande importância tanto do ponto de vista teórico quanto nas suas aplicações em Hidrologia. Uma variável aleatória é dita *normal* quando sua densidade de probabilidade $f_X(x)$ tem a seguinte forma:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad -\infty < x < \infty \quad \text{Equação 4.13}$$

Onde μ e σ representam, respectivamente, a média e o desvio padrão da amostra, sendo $\sigma > 0$. A função de distribuição de probabilidade correspondente é dada por:

$$F_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{\left[-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} du \quad -\infty < x < \infty \quad \text{Equação 4.14}$$

4.2.1.1.1 *Distribuição Log-Normal*

As distribuições normais são decorrentes de um somatório de eventos independentes, ou seja, os valores sucessivos da variável Y_t são dados pelo valor assumido anteriormente acrescido do produto deste mesmo valor por outra variável aleatória Z_t , sendo ambas modificadas pelos parâmetros α_t e β_t específicos para o fenômeno e para o instante considerado (LANNA, 2001). Para descrever matematicamente o fenômeno considera-se a seguinte função:

$$Y_{t+1} = \alpha_t \cdot Y_t + \beta_t \cdot Z_t \cdot Y_t = [\alpha_t + \beta_t \cdot Z_t] Y_t \quad \text{Equação 4.15}$$

Onde se verifica que a variável Y_t pode ser descrita da mesma maneira recursiva, e assim sucessivamente; daí, a expressão resultaria em:

$$Y_{t+1} = [\alpha_t + \beta_t \cdot Z_t] \cdot [\alpha_{t-1} + \beta_{t-1} \cdot Z_{t-1}] \cdot Y_{t-1} \quad \text{Equação 4.16}$$

Substituindo os termos em colchetes por W_t obtemos a seguinte equação:

$$Y_t = W_t \cdot W_{t-1} \dots W_1 \cdot W_0 \cdot Y_0 \quad \text{Equação 4.17}$$

Adotando-se agora o logaritmo desta função resulta em:

$$\log[Y_t] = \log[W_t] + \dots + \log[W_0] + \log[Y_0] \quad \text{Equação 4.18}$$

Isto quer dizer que o logaritmo de Y_t é a soma dos logaritmos de um grande número de variáveis aleatórias W_t com o logaritmo de Y_0 . Caso o logaritmo destas variáveis atenda às condições citadas para a distribuição normal, o logaritmo de Y_t também se distribuirá normalmente. Assim, a sua **FDP** será dada por:

$$P[x] = \frac{1}{x \cdot \sigma_n \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0,5 \cdot \left(\frac{\ln(x) - \mu_n}{\sigma_n} \right)^2} \quad \text{com } x \geq 0 \quad \text{Equação 4.19}$$

Onde:

$$\mu = E[X_n] = E[\ln(X)] \quad \text{Equação 4.20}$$

$$\sigma_n^2 = \text{VAR}[X_n] = \text{VAR}[\ln(X)] \quad \text{Equação 4.21}$$

Sendo μ_n o valor esperado dos logaritmos de X e σ_n^2 a variância destes logaritmos. As relações entre o valor esperado μ e a variância σ da variável X e os parâmetros da distribuição citados acima são:

$$E[X] = \mu = e^{\mu_n + 0,5\sigma_n^2} \quad \text{Equação 4.22}$$

$$VAR[X] = \sigma^2 = \mu^2 \cdot [e^{\sigma_n^2} - 1] \quad \text{Equação 4.23}$$

4.2.1.1.2 *Transformações Normalizantes*

A aplicação de uma distribuição normal como um modelo probabilístico é apropriada para se fazer um ajuste dos dados transformados a esta distribuição. O modelo Log-Normal, mostrado anteriormente, é um exemplo destas transformações. LANNA (2001) cita uma transformação generalizada de potências proposta por HINKLEY (1977) apresentada na seguinte forma:

$$Y = \frac{1}{\alpha} (X_i^\alpha - 1) \quad \text{Equação 4.24}$$

onde α é a potência normalizante.

Verifica-se que quando $\alpha \rightarrow \infty$, $Y_i \rightarrow \ln(X_i)$ sendo um caso geral da transformação logarítmica. Para se estabelecer o valor de α pode-se adotar o critério simplificado de minimizar o valor absoluto de assimetria. Quando ele for nulo, a potência α deverá fazer com que a série transformada se ajuste aproximadamente à distribuição Normal.

4.2.1.2 DISTRIBUIÇÕES DE EXTREMOS

A aplicação desta distribuição é bastante utilizada em estudos hidrológicos em virtude dos bons ajustes aos valores de vazões máximas e mínimas. Sua teoria consiste em que, tendo-se uma amostra com n valores extremos máximos ou mínimos e retirando-se um grupo com m valores aleatórios e independentes, sua distribuição aproxima-se de uma forma

limite (assintótica) quando o valor de m cresce. Esta forma limite depende da distribuição dos $m.n$ valores dos quais são retirados os extremos. Neste caso pressupõe-se que:

- Existem n grupos de m valores, sendo que estes m valores correspondem àqueles obtidos no período anual, em se trabalhando com séries históricas anuais;
- O valor de m é suficientemente grande para que haja a aproximação à forma limite;
- Os m valores originais são independentes.

4.2.1.2.1 Distribuição de Extremos tipo I (Gumbel)

Esta distribuição resulta quando os $m.n$ valores possuem distribuição do tipo exponencial. A função de distribuição de probabilidade acumulada é dada por:

$$F(Q) = P(q \leq Q) = e^{-e^{-(Q-\mu)/\alpha}} \quad \text{Equação 4.25}$$

Onde $F(Q)$ é a probabilidade de Q ser menor ou igual a q . Para a distribuição das vazões máximas, deseja-se conhecer o seu complemento:

$$F(Q) = 1 - e^{-e^{-y}} \quad \text{Equação 4.26}$$

Onde $y = \frac{Q-\mu}{\alpha}$ é chamada de variável reduzida. Esta variável também pode ser expressa em função da probabilidade ou tempo de retorno:

$$y = -\ln\{-\ln[1 - P(q \geq Q)]\} \quad \text{Equação 4.27}$$

$$y = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right] \quad \text{Equação 4.28}$$

A média e a variância estimadas pelo método dos momentos são:

$$\mu = U - 0,5772 \cdot \alpha \quad \text{Equação 4.29}$$

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2 \cdot \alpha^2}{6} \quad \text{Equação 4.30}$$

Resolvendo a equação acima para os dois parâmetros do modelo fica:

$$\alpha = 0,78s \quad \text{Equação 4.31}$$

$$\mu = \bar{x} - 0,5772 \cdot \alpha \quad \text{Equação 4.32}$$

4.2.1.2.2 Distribuição de Extremos tipo III

Esta função teórica resulta de um tipo de distribuição dos $m.n$ valores os quais são limitados inferiormente a um mínimo. Devido a isto, esta distribuição tem sido freqüentemente usada para ajustar séries de mínimos hidrológicos. A função distribuição de probabilidades é dada por:

$$P(Q \geq q) = e^{-\left[\frac{(Q-\gamma)}{(\beta-\gamma)}\right]^2} \quad \text{Equação 4.33}$$

Com as condições $Q > \gamma$; $\alpha > 0$; $\beta > \gamma$ e $\gamma \geq 0$ onde α é um parâmetro de escala; β é o parâmetro de locação e γ é o parâmetro que limita a função e caracteriza o valor mínimo possível. A variável de transformação é :

$$y = \left(\frac{Q - \gamma}{\beta - \gamma}\right)^\alpha \quad \text{Equação 4.34}$$

Assim, resulta da equação da distribuição de probabilidade a seguinte expressão:

$$P(Q \geq q) = e^{-y} \quad \text{Equação 4.35}$$

Para $\gamma > 0$ as estimativas de α , β e γ pelo método dos momentos são:

$$\beta = \mu + \sigma \cdot A(\alpha) \quad \text{Equação 4.36}$$

$$\gamma = \beta - \sigma \cdot B(\alpha) \quad \text{Equação 4.37}$$

Onde $A(\alpha)$ e $B(\alpha)$ dependem do coeficiente de simetria C_s . O procedimento para estimar os parâmetros é o seguinte:

I. A média \bar{Q} e o desvio padrão s são determinados com base em:

$$\bar{Q} = \frac{\sum Q_i}{N} \quad \text{Equação 4.38}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}} \quad \text{Equação 4.39}$$

Onde n é o tamanho da amostra;

II. Determina-se o coeficiente de simetria por:

$$C_s = \frac{n \cdot \sum (Q_i - \bar{Q})^3}{(n-1)(n-2)s^3} \quad \text{Equação 4.40}$$

III. Com o valor de C_s e através de gráfico é obtido o valor de $1/\alpha$, A e B ;

IV. Através das Equação 4.36 e Equação 4.37 são determinados os valores de β e γ

4.2.1.2.3 Distribuição log-Pearson III

A distribuição Log-Pearson III possui três parâmetros: média, desvio padrão e coeficiente de simetria dos logaritmos das vazões. A estimativa destes parâmetros é obtida pelas Equação 4.38 a Equação 4.40 com o valor da vazão Q_i substituído por $\log Q_i$. A estimativa de vazão para um tempo e retorno T é obtida por:

$$\log Q_T = \log \bar{Q} + K(T, G).S \quad \text{Equação 4.41}$$

Onde $K(T, G)$ é obtido com base em tabelas, sendo T o tempo de retorno e G o coeficiente de assimetria obtido da Equação 4.40 com valores de $\log Q$. Para valores de G entre -1 e 1 o valor de K pode ser estimado por:

$$K = \frac{2}{G} \left\{ \left[\left(K_n - \frac{G}{6} \right) \cdot \frac{G}{6} + 1 \right]^3 - 1 \right\} \quad \text{Equação 4.42}$$

Onde K_n é o coeficiente para $G=0$.

4.2.2 ANÁLISE DE REGRESSÃO

4.2.2.1 REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

A regressão linear simples consiste no ajuste de uma reta aos pares de valores de y e x tais que:

$$y = a.x + b + \varepsilon \quad \text{Equação 4.43}$$

Onde a e b são parâmetros e ε é o erro.

Os parâmetros são determinados pelo método dos mínimos quadrados, que minimiza a diferença quadrática entre os valores observados e calculados pela expressão acima. As estimativas são:

$$a = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Equação 4.44}$$

$$b = \bar{y} - a.\bar{x} \quad \text{Equação 4.45}$$

O somatório dos erros resultante é igual a zero. O coeficiente de determinação representa a parcela que o modelo consegue explicar da variação total da variável dependente y .

$$R^2 = \frac{\sigma_y^2 - \sigma_{y.x}^2}{\sigma_y^2} \quad \text{Equação 4.46}$$

Onde σ_y^2 é a variância de y ; $\sigma_{y.x}^2$ é a variância residual ou dos erros de regressão. Um modelo ideal seria aquele que reduza a variância dos resíduos, maximizando o coeficiente de determinação para 1. Por outro lado, um modelo ruim resulta num grande valor da variância residual onde $\sigma_y^2 = \sigma_{y.x}^2$ e o coeficiente $R^2 = 0$.

O coeficiente de correlação R é também uma medida de associação entre os valores y e x , obtido por:

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{Equação 4.47}$$

A variação do coeficiente de correlação deve ficar no intervalo -1 e +1. Quanto mais próximos dos limites, melhores é o resultado da regressão.

A variância do coeficiente da reta de regressão pode ser estimada por:

$$V(\hat{a}) = \frac{s^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Equação 4.48}$$

Onde s^2 é a estimativa da variância residual, ou quadrado do erro padrão, dada pela expressão:

$$s^2 = \frac{\sum \varepsilon^2}{N - 2} \quad \text{Equação 4.49}$$

Supondo que o erro ε tem uma distribuição normal $N(0, \sigma^2)$, é possível mostrar que o intervalo de confiança do coeficiente angular da reta de regressão \mathbf{a} , com nível de significância α é:

$$a \pm t\left(N - 2, 1 - \frac{1}{2}\alpha\right) \frac{s}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad \text{Equação 4.50}$$

Onde $t\left(N - 2, 1 - \frac{1}{2}\alpha\right)$ é o valor aleatório que limita a percentagem $1 - \frac{1}{2}\alpha$ da área sobre a curva de distribuição t (Student) com $N-2$ graus de liberdade. Pode-se testar se o coeficiente é significativamente igual a zero, verificando a viabilidade da regressão, através do teste de hipótese H_0 , sendo $H_0: a=0$. Calcula-se inicialmente:

$$t_c = \frac{a\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2}}{s} \quad \text{Equação 4.51}$$

Se $|t_c| > t_{\text{tabela}}$ a hipótese H_0 pode ser rejeitada com risco menor que α de estar incorrendo em erro onde t_{tabela} é o valor da distribuição $t\left(N - 2, 1 - \frac{1}{2}\alpha\right)$ referido anteriormente. No caso oposto a hipótese H_0 não pode ser rejeitada ao nível de significância escolhido. A variância do coeficiente b da reta é:

$$V(b) = \frac{s^2 \sum x_i^2}{N \sum(x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Equação 4.52}$$

Os limites de confiança deste coeficiente são:

$$b \pm t\left(N - 2, 1 - \frac{1}{2}\alpha\right) \cdot s \cdot \sqrt{\frac{\sum x_{i2}}{N \sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad \text{Equação 4.53}$$

Da mesma forma como anteriormente a hipótese é $H_0 : b = 0$ pode ser rejeitada ao nível de significância α se b cair fora do intervalo de confiança. Portanto:

$$t_c = \frac{b}{s} \sqrt{\frac{N \sum (x_i - \bar{x})^2}{\sum x_i^2}} \quad \text{Equação 4.54}$$

A variância de y (quando estimado por \hat{y}) cujo valor de x é x_k pode ser calculado por:

$$\text{var}(\hat{y}) = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(x_k - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right] \quad \text{Equação 4.55}$$

O erro padrão da estimativa é:

$$e_p(\hat{y}) = s \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(x_k - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad \text{Equação 4.56}$$

O intervalo de confiança é obtido como nos itens anteriores por:

$$\hat{y} \pm t \left(N - 2, 1 - \frac{1}{2} \alpha \right) \cdot e_p(\hat{y}) \quad \text{Equação 4.57}$$

4.2.2.2 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Ao contrário da regressão linear simples, na qual existe apenas uma variável independente para explicar a variação de y , a regressão múltipla passa a ter a seguinte forma:

$$y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n + b \quad \text{Equação 4.58}$$

Onde x_i representa a variável e $i = 1, 2, \dots, n$.

Para a estimativa dos coeficientes desta equação utiliza-se o método dos mínimos quadrados por meio de:

$$a = (X'.X)^{-1}.X'.Y \quad \text{Equação 4.59}$$

$$X = \begin{vmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{vmatrix} \quad a = \begin{vmatrix} b \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{vmatrix} \quad e \quad y = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{vmatrix}$$

Onde X' representa a matriz transposta.

4.2.2.2.1 *Teste de Significância*

O teste de significância pode ser obtido pela estatística F. Um teorema estatístico estabelece que a relação:

$$F = \frac{s_y^2}{s^2} \quad \text{Equação 4.60}$$

segue uma distribuição F com p e $n-p-1$ graus de liberdade, desde que os coeficientes das p variáveis sejam iguais a zero. A Equação 4.60 pode ser transformada para:

$$F = \frac{(n-p-1)R^2}{p(1-R^2)} \quad \text{Equação 4.61}$$

Quando o valor calculado de F é maior que o valor tabelado para uma significância de $100.(1-\alpha)\%$, a hipótese de que os coeficientes da equação de regressão são nulos pode ser rejeitada e a regressão é aceita a este nível de significância.

4.2.2.2.2 Coeficiente de correlação múltipla e de correlação parcial

O coeficiente de correlação múltipla é uma medida adimensional da associação linear entre as variáveis. É mais fácil compreender seu significado utilizando o coeficiente de determinação, que é o quadrado do coeficiente de correlação.

O valor de R^2 ajustado ou não tendencioso é calculado considerando o número de variáveis independentes da equação de regressão. Este valor de R^2 pode reduzir o aumento de p . O valor $n-p-1$ é em realidade o grau de liberdade da regressão. Para pequenos graus de liberdade $s_{y,x}$ pode ser maior que s_y , o que resulta em R^2 negativo e, neste caso deve-se adotar $s_{y,x} = s_y$.

O coeficiente de correlação parcial da associação da variável dependente y com uma dada variável independente x e é calculado por:

$$r_{y,i}^2 = 1 - \frac{R^2}{1 - R_{y,i}^2} \quad \text{Equação 4.62}$$

onde R é o coeficiente de correlação múltipla; $R_{y,i}$ é o coeficiente de correlação de y com todas as outras variáveis menos x_i .

4.3 MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO

A regionalização é um conjunto de ferramentas que explora ao máximo as informações existentes, visando à estimativa das variáveis hidrológicas em locais onde os dados sejam inexistentes ou insuficientes. Estas informações podem ser uma variável hidrológica, uma função específica ou parâmetros de modelos hidrológicos. Para cada uma delas é definida uma metodologia específica para a regionalização, como será explicado na sequência (TUCCI, 2001).

4.3.1 REGIONALIZAÇÃO DE VARIÁVEIS

Uma variável hidrológica pode ser entendida como sendo uma expressão representativa de um processo ou fenômenos. Entre essas variáveis destaca-se a vazão média de longo

período, a vazão média de enchente e a vazão mínima com sete dias de permanência. Para a regionalização destas variáveis podem ser aplicados um dos três modelos citados a seguir.

▪ **Métodos que regionalizam parâmetros de uma distribuição estatística:** Este modelo consiste em um ajuste inicial dos dados hidrológicos das diferentes bacias a uma distribuição estatística. Em seguida, com a obtenção dos parâmetros μ e σ , é feita a correlação com as características físicas e climáticas das bacias. Sendo n o número de bacias ou de postos, μ e σ os parâmetros obtidos através das estimativas:

$$\hat{\mu}_1; \hat{\sigma}_1; \hat{\mu}_2, \hat{\sigma}_2; \dots; \hat{\mu}_n, \hat{\sigma}_n$$

Com isso obtêm-se as seguintes equações.

$$\mu = f_1(A, P, S, \dots) \quad \text{Equação 4.63}$$

$$\sigma = f_2(A, P, S, \dots) \quad \text{Equação 4.64}$$

onde A= área, P= precipitação, S= declividade, ou seja, são as características físicas e climáticas das bacias.

As Equação 4.63 e Equação 4.64 serão utilizadas para a obtenção dos parâmetros μ e σ no caso de locais com ausência ou insuficiência de dados. Conhecidos os parâmetros da distribuição estatística, as vazões com um risco desejado são determinadas para o local em estudo.

▪ **Métodos que regionalizam a vazão com um determinado risco:** Neste método também são ajustadas distribuições de probabilidades aos dados hidrológicos dos postos em estudo. As vazões para alguns tempos de retorno de interesse são obtidas das distribuições ajustadas a cada posto, ou seja,

$$Q_{T1}^1 = g_1(\mu_1, \sigma_1, T_1); \quad Q_{T2}^1 = g_1(\mu_1, \sigma_1, T_2) \dots \dots \dots Q_{Tm}^1 = g_1(\mu_1, \sigma_1, T_m) \quad \text{Equação 4.65}$$

$$Q_{T1}^2 = g_2(\mu_2, \sigma_2, T_1); \quad Q_{T2}^2 = g_2(\mu_2, \sigma_2, T_2) \dots \dots \dots Q_{Tm}^2 = g_2(\mu_2, \sigma_2, T_m) \quad \text{Equação 4.66}$$

$$Q_{T1}^n = g_n(\mu_n, \sigma_n, T_1); \quad Q_{T2}^n = g_n(\mu_n, \sigma_n, T_2) \dots \dots \dots Q_{Tm}^n = g_n(\mu_n, \sigma_n, T_m) \quad \text{Equação 4.67}$$

Nestas expressões, m é o número de tempos de retorno escolhido. O índice superior indica o posto ou bacia e o inferior o tempo de retorno; $g_i(u_i, \sigma_i, T_j)$ é a solução da equação $\int_{g_i}^{\infty} p(x_i) dx_i = \frac{1}{T}$, onde $p(x)$ é a função de distribuição de probabilidade do posto i com parâmetros μ_i e σ_i .

A obtenção de uma equação regional é feita através da análise de regressão entre os valores médios das vazões associados a um determinado tempo de retorno com as características físicas e climáticas das bacias, baseados na análise individual dos postos selecionados. Com isso, obtêm-se as seguintes relações:

$$Q_{T_1} = G_1(A, P, S, \dots) \quad \text{Equação 4.68}$$

$$Q_{T_2} = G_2(A, P, S, \dots) \quad \text{Equação 4.69}$$

$$Q_{T_m} = G_m(A, P, S, \dots) \quad \text{Equação 4.70}$$

onde $G_1 = (A, P, S, \dots)$ é a equação de regressão regional para o tempo de retorno T_j . Para bacias sem dados compreendidas na área regionalizada são utilizadas diretamente as equações acima.

▪ **Métodos que regionalizam uma curva de probabilidade adimensional e o fator de adimensionalização:** Esta metodologia aplica a adimensionalização de uma curva de probabilidade, pelo valor médio das curvas individuais dos postos selecionados, agrupando aqueles que possuem a mesma tendência. Esta tendência pode ser expressa por:

$$F_1(Q_m / Q_T) = \frac{1}{T} \quad \text{Equação 4.71}$$

onde T= tempo de retorno; Q_m = valor médio da vazão em estudo; Q_T = valor da vazão com tempo de retorno T. O valor médio é regionalizado em função das características fisiográficas e climáticas das bacias, por meio de uma equação de regressão:

$$Q_m = F_2(A, P, S, \dots) \quad \text{Equação 4.72}$$

sendo $F_2(A, P, S, \dots)$ é a equação de regressão.

4.3.1.1 VAZÕES MÉDIAS

A vazão média de um rio representa a máxima capacidade de regularização desse corpo d'água e o seu conhecimento é fundamental para estudos e planejamento dos recursos hídricos. Trata-se de informação essencial, nem sempre possível de obter, tendo em vista a precária rede hidrométrica instalada no território brasileiro. Na ausência de dados observados, existem metodologias para a avaliação destas vazões entre as quais destaca-se a estimativa pelo balanço hídrico, pelos mapas de vazão específica obtidos de bacias próximas e pela regressão simples com a área da bacia. Entretanto, a técnica mais apropriada para a estimativa da vazão média é a regionalização.

O processo de regionalização da vazão média e de sua distribuição estatística pode ser realizado baseada em duas etapas: Na primeira etapa, plota-se em um mesmo gráfico as curvas adimensionais de todos os postos selecionados e definem-se sub-regiões formadas por estações que apresentem a mesma tendência. Em seguida, é realizada a análise de regressão. De uma maneira geral, a variabilidade da vazão média de longo período pode ser explicada pela área da bacia, podendo ser inserida a variável precipitação caso exista uma grande variação nas isoietas.

4.3.1.2 VAZÕES MÁXIMAS

A vazão máxima de um rio pode ser definida como um valor associado a um determinado risco de ser igualado ou superado. Essa informação, aplicada para previsão de

enchentes e projetos de obras hidráulicas, pode ser obtida através de: a) ajustes de distribuições estatísticas b) com base nos dados de precipitação ou c) através da regionalização de vazões. O primeiro caso é aplicável quando no local existe uma série de dados representativos. Muitas vezes esses dados não existem ou as séries são curtas, de modo que, a vazão máxima deve ser estimada a partir de um dos outros métodos citados. Quando se dispõe de dados de chuva com longos períodos de informações, pode-se aplicar modelos de simulação de chuva-vazão utilizando os valores máximos de precipitação associados a um determinado risco ou tempo de retorno. A aplicação deste método não implica na igualdade dos riscos de precipitação com a vazão resultante, tendo em vista os fatores que influenciam na transformação chuva-vazão, tais como as condições iniciais de perdas do solo, escoamento nos rios, presença de reservatórios e a própria distribuição espaço-temporal da precipitação. Assim, caso haja postos próximos ao local de estudo e partindo do princípio de que as bacias contribuintes destes possuam similaridades do comportamento hidrológico, pode-se transferir dados entre elas através da regionalização.

Para a aplicação da regionalização existem três metodologias, todas partindo da determinação da curva de probabilidade individual de cada posto, na forma explicada no item 4.3. Neste caso a estimativa da vazão para um determinado risco T é obtida através do método da curva adimensional pela seguinte expressão:

$$Q_T = \frac{Q_T}{Q_{mc}} \cdot Q_{mc} \quad \text{Equação 4.73}$$

Onde Q_T e Q_{mc} são, respectivamente, a vazão máxima para um tempo de retorno T e a vazão média de enchente.

A variância de Q_T é dada por:

$$\text{var } Q_T \cong \left(\frac{Q_T}{Q_{mc}} \right)^2 \cdot \text{var } Q_{mc} + Q_{mc}^2 \cdot \text{var } \frac{Q_T}{Q_{mc}} \quad \text{Equação 4.74}$$

e a variância da média de enchente igual a:

$$\text{var } Q_{mc} = \frac{\sigma^2}{N} \quad \text{Equação 4.75}$$

Onde σ^2 representa a variância da população; N é o tamanho da amostra. Utilizando o coeficiente de variação $C_v = \frac{\sigma}{Q_{mc}}$ a Equação 4.75 fica:

$$\text{var } Q_{mc} = \frac{(C_v \cdot Q_{mc})^2}{N} \quad \text{Equação 4.76}$$

O valor de N pode ser obtido através de :

$$N = 5,31 \cdot \frac{\varepsilon^2}{C_v^2} \quad \text{Equação 4.77}$$

No caso, ε é o erro padrão dos logaritmos de base 10 da equação de regressão. A estimativa da variância foi feita com base na variância da equação de regressão regional e o coeficiente de variação é obtido com base num valor ponderado regionalmente de acordo com a seguinte equação:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (n_j - 1) C_v^2(j)}{\sum_{j=1}^n (n_j - 1)}} \quad \text{Equação 4.78}$$

$C_v(j)$ é o coeficiente de variação de cada posto j e n_j é o tamanho da amostra de cada posto j .

Este procedimento admite que a variância de Q_m para um posto pode ser estimada com base nos valores regionais.

A variância da vazão adimensional é estimada pela equação:

$$\text{var}(Q_T/Q_{mc}) = \frac{\sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{Q_T}{Q_{mc}} \right)_r - \left(\frac{Q_T}{Q_{mc}} \right)_i \right]^2}{N-1} \quad \text{Equação 4.79}$$

Onde $(Q_T/Q_{mc})_r$ é o valor adimensional da curva regional para o tempo de retorno T ; $(Q_T/Q_{mc})_i$ é o valor adimensional para o posto de ordem i ; N é o número de postos. Os valores obtidos através da equação anterior podem ser ajustados a uma função para valores de tempo de retorno acima de 2 anos dada por:

$$\text{var}(Q_T/Q_{mc}) = a.T^b \quad \text{Equação 4.80}$$

Substituindo todas as equações em Equação 4.74 tem-se:

$$\sigma_T = \sqrt{\text{var } Q_T} = K.Q_{mc} \quad \text{Equação 4.81}$$

Onde:

$$K = C_v \sqrt{\frac{\left(\frac{Q_T}{Q_{mc}} \right)^2 + \frac{a.T^b . N}{C_v^2}}{N}} \quad \text{Equação 4.82}$$

4.3.1.3 VAZÕES MÍNIMAS

O conhecimento da distribuição temporal das vazões mínimas é de fundamental importância em estudos hidrológicos, principalmente no que se refere a projetos de abastecimento de água, irrigação e energia elétrica. Estes valores são utilizados para análise, projetos, previsões e/ou estimativas, outorga, operação e planejamento dos recursos hídricos. A vazão mínima não se caracteriza por um valor absoluto, mas associada a uma duração d e a um tempo de retorno T , geralmente se adotando em estudos hidrológicos vazão mínima com 7 dias de permanência e com um tempo de retorno de 10 anos. A variabilidade das vazões

mínimas decorre de vários fatores dentre os quais se destacam a topografia, a geologia, as características climáticas e o uso da terra. Assim, é importante utilizar as informações hidrogeológicas da região em estudo. A metodologia adotada para a regionalização das vazões mínimas é igual à adotada para as vazões máximas, como foi apresentado no item 4.3.

Para as vazões mínimas a variável de adimensionalização é a mínima de cada duração e sua regionalização pode ser feita por uma das seguintes opções:

a) Duração na equação de regressão

Da mesma forma como aplicado na regionalização de vazões máximas, as mínimas são regionalizadas introduzindo-se a duração como uma variável independente. A equação fica:

$$\bar{Q}_{\min}(d) = a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_n \cdot X_n \quad \text{Equação 4.83}$$

Onde X_i representa as variáveis independentes, $i = 1, 2, \dots, n$. Com isso, é possível a estimativa da vazão mínima com uma duração específica.

b) Duração e vazão mínima média de longo período

Esta alternativa envolve a definição da relação entre vazões mínimas médias de diferentes durações com a vazão média de longo período. Determina-se para cada posto a seguinte função:

$$\frac{Q_{\min}(d)}{Q_m} = f(d) \quad \text{Equação 4.84}$$

Assim, é possível regionalizar esta função adimensional com base nos diferentes postos. Considerando que a vazão média de longo período Q_m já está regionalizada, a vazão mínima de cada duração é obtida por:

$$Q_{\min}(d) = F_r(d) \cdot Q_m$$

Equação 4.85

Onde $F_r(d)$ é a função regionalizada entre as vazões.

4.3.2 REGIONALIZAÇÃO DA CURVA DE PERMANÊNCIA

A curva de permanência é a representação gráfica da relação entre a vazão e a probabilidade de ocorrência de valores excedentes, para vazões máximas e médias, e de não excedência no caso de vazões mínimas. Esta curva pode ser estabelecida com base em valores diários, semanais ou mensais e retrata a variabilidade da vazão ao longo do tempo, sendo dependente da capacidade de regularização natural do rio.

Para a regionalização das curvas de permanência podem ser aplicados os dois procedimentos mencionados anteriormente. As situações são as seguintes:

- Regionalização dos parâmetros da distribuição: estabelecimento de correlação com as características físicas das bacias;
- Regionalização com determinadas probabilidades: nesta metodologia são escolhidas algumas vazões a serem regionalizadas, sendo as mais comuns as vazões com 50 e 95% de permanência, estabelecendo correlações com as características físicas e climáticas das bacias em estudo. Devido à dificuldade de se obter uma equação que represente toda a curva, opta-se por escolher apenas um trecho de interesse que, em geral, é a sua parte inferior. Além de apresentar as vazões de maior interesse em estudos hidrológicos, o trecho inferior da curva de permanência, quando plotado em escala logarítmica, se apresenta em forma linear.

4.3.3 REGIONALIZAÇÃO DAS CURVAS DE REGULARIZAÇÃO

O aproveitamento dos recursos hídricos ao longo do tempo depende da variação sazonal do escoamento dos corpos d'água. Isto acontece devido a fatores climáticos e à própria demanda requerida ao sistema. Daí, torna-se necessária a regularização de vazões. Esta regularização depende de como a demanda será solicitada ao sistema fluvial. Na irrigação a demanda é solicitada durante alguns meses do ano. No abastecimento das populações, ela ocorre durante todo o ano, aumentando no verão.

Uma das dificuldades que o hidrólogo normalmente encontra é não disponibilidade de dados relativos ao local de interesse. Para obter a série no local desejado são utilizadas as mais diferentes práticas, desde o uso da vazão específica até à aplicação de modelos chuva-vazão. A regionalização da curva de regularização visa à utilização de vazões dos postos da região para melhor estimar a relação desejada no local sem dados.

Para cada volume de reservatório existe uma vazão que pode ser regularizada com um nível de probabilidades de garantia. A combinação de vários volumes e vazão regularizável permite o traçado das curvas de regularização. Ao final podem ser obtidas várias curvas de acordo com o nível de probabilidades adotado.

A curva de regularização pode ser expressa por:

$$V = f_1(q, p) \quad \text{Equação 4.86}$$

Onde V é a capacidade necessária do reservatório, q é a vazão regularizável e p é a probabilidade de ocorrência.

- Modificando as variáveis envolvidas para:

$$\alpha = \frac{V}{Q_m \times 1 \text{ ano}} \quad \text{Equação 4.87}$$

$$\beta = \frac{q}{Q_m} \quad \text{Equação 4.88}$$

Onde Q_m é a vazão média de longo período.

- Introduzindo a adimensionalização das Equação 4.87 e Equação 4.88. resulta uma função adimensional do tipo:

$$\alpha = f_2(\beta, p) \quad \text{Equação 4.89}$$

Com base nos valores obtidos na simulação pode-se ajustar uma função do seguinte tipo, fixando uma probabilidade p .

$$\alpha = a \cdot \beta^b \quad \text{Equação 4.90}$$

Onde a e b são obtidos pela técnica dos mínimos quadrados.

Considerando que as curvas adimensionais das Equação 4.89 e Equação 4.90 são obtidas para cada posto, pode-se verificar a possibilidade de que postos de bacias com características semelhantes tenham a mesma tendência, já que as vazões mensais, que são as variáveis do processo, podem ser correlacionáveis.

Neste caso, dois procedimentos podem ser seguidos: **i)** estabelecer a regressão entre os parâmetros a e b da função da Equação 4.90 com base em características físicas das bacias estudadas e **ii)** ajuste de uma curva média com postos de tendências semelhantes.

4.3.4 INDICADORES REGIONAIS

Segundo definição de TUCCI (2002) um indicador regional é um valor médio de uma variável ou proporção entre variáveis hidrológicas. A utilização destes valores está sujeita às incertezas dos dados hidrológicos e às indefinições dos locais sem dados, porém ele deve ser aplicado quando:

- a) Deseja-se verificar se os resultados de estudos específicos estão dentro de uma ordem de grandeza de uma determinada região;
- b) O objetivo é calcular uma primeira estimativa dos usos e controles dos recursos hídricos em locais sem dados.

Os principais indicadores utilizados na hidrologia são explicados em seqüência.

4.3.4.1 VAZÃO ESPECÍFICA

Este indicador é definido como sendo a relação entre a vazão e a área contribuinte da bacia e é expresso por:

$$q = \frac{Q_m}{A} \quad \text{Equação 4.91}$$

Sendo q a vazão específica; Q_m a vazão média de longo período e A a área de contribuição da bacia.

4.3.4.2 RELAÇÃO A PARTIR DA CURVA DE PERMANÊNCIA

As principais relações utilizadas são a r_{cp95} e r_{cp50} que representam, respectivamente, a relação entre as vazões com 95 e 50% de permanência com a vazão média de longo período:

$$r_{cp95} = \frac{Q_{95\%}}{Q_m} \quad \text{Equação 4.92}$$

$$r_{cp50\%} = \frac{Q_{50\%}}{Q_m} \quad \text{Equação 4.93}$$

4.3.4.3 ÍNDICES DE ENCHENTE

Os indicadores de enchente r_{mc} e r_{100} se relacionam diretamente com a vazão média de enchente (Q_{mc}) onde esta apresenta um tempo de retorno aproximado de 2 anos. O indicador r_{mc} é expresso por:

$$r_{mc} = \frac{Q_{mc}}{Q_m} \quad \text{Equação 4.94}$$

O índice r_{100} representa a relação entre a vazão associada a um tempo de retorno de 100 anos (Q_{100}) e a vazão média de enchente (Q_{mc}), conforme a Equação 4.95:

$$r_{100} = \frac{Q_{100}}{Q_{mc}} \quad \text{Equação 4.95}$$

4.3.4.4 ÍNDICES DE VAZÕES MÍNIMAS

Os índices relativos às mínimas tem valores associados aos períodos de estiagem, sendo a Equação 4.92 apresentada anteriormente um exemplo destes valores. Outros indicadores utilizados são o $r_{7,10}$ e r_m . O primeiro indica a relação entre a vazão mínima com 7 dias de permanência associada a um tempo de retorno igual a 10 anos $Q_{7,10}$ e a vazão média de longo período :

$$r_{7,10} = \frac{Q_{7,10}}{Q_m} \quad \text{Equação 4.96}$$

O segundo permite a identificar a relação entre as duas condições usualmente utilizadas de vazão mínima: a vazão com 95% de permanência (Q_{95}) e a vazão $Q_{7,10}$ (Equação 4.97)

$$r_m = \frac{Q_{95}}{Q_{7,10}} \quad \text{Equação 4.97}$$

NOVAS VARIÁVEIS EXPLICATIVAS NO PROCESSO DE REGIONALIZAÇÃO

5.1 ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA DA COBERTURA VEGETAL NO PROCESSO DE REGIONALIZAÇÃO

Em trabalho desenvolvido para a ANEEL(2002) para a região objeto desta pesquisa, as variáveis explicativas utilizadas para a regionalização hidrológica foram as características fisiográficas e climáticas das bacias em estudo: área (A), comprimento do rio principal (Cr), declividade média do rio (Dr), desnível específico (Ds), precipitação máxima diária (Pmd) e precipitação total anual (Pta). Os valores destas variáveis são mostradas na Tabela 5.1. Sabe-se entretanto, que fatores como o tipo e o uso dos solos e a cobertura vegetal influenciam diretamente no comportamento hidrológico de uma bacia, podendo ser utilizados como uma variável explicativa. BARBOSA (2002) utilizou no seu trabalho o percentual dos tipos de solos, segundo classificação do *Soil Conservation Service* (SCS) como variável explicativa para a regionalização de vazões. Os resultados obtidos pela autora, de maneira geral, foram bastante satisfatórios e para algumas regiões resultaram em significativas melhoras dos índices estatísticos.

Um dos objetivos centrais desta pesquisa é analisar a influência do tipo de vegetação no processo de regionalização. A carência de dados hidrológicos na maior parte da região em estudo, como mostra as Figuras 5.1 e 5.2, justifica plenamente o emprego de método de regionalização. Pela carência de dados, não foi possível enquadrar em regiões homogêneas a maior parte da área em estudo, no trabalho desenvolvido para a ANEEL (Figura. 5.3). Posteriormente, BARBOSA (2002), com a inserção de novas variáveis explicativas (desnível específico e tipologia dos solos) expandiu a regionalização para 85% da área em estudo, como será mostrado no próximo capítulo.

Adotou-se nesta fase do trabalho a mesma divisão das regiões homogêneas do projeto desenvolvido para a ANEEL, foram calculados os percentuais referente a Caatinga, Florestas e Cerrado para cada bacia contribuinte dos postos fluviométricos selecionados por meio de mapas temáticos através de técnicas de geoprocessamento,. Estas informações foram extraídas do CD Zane Digital (EMBRAPA, 2000).

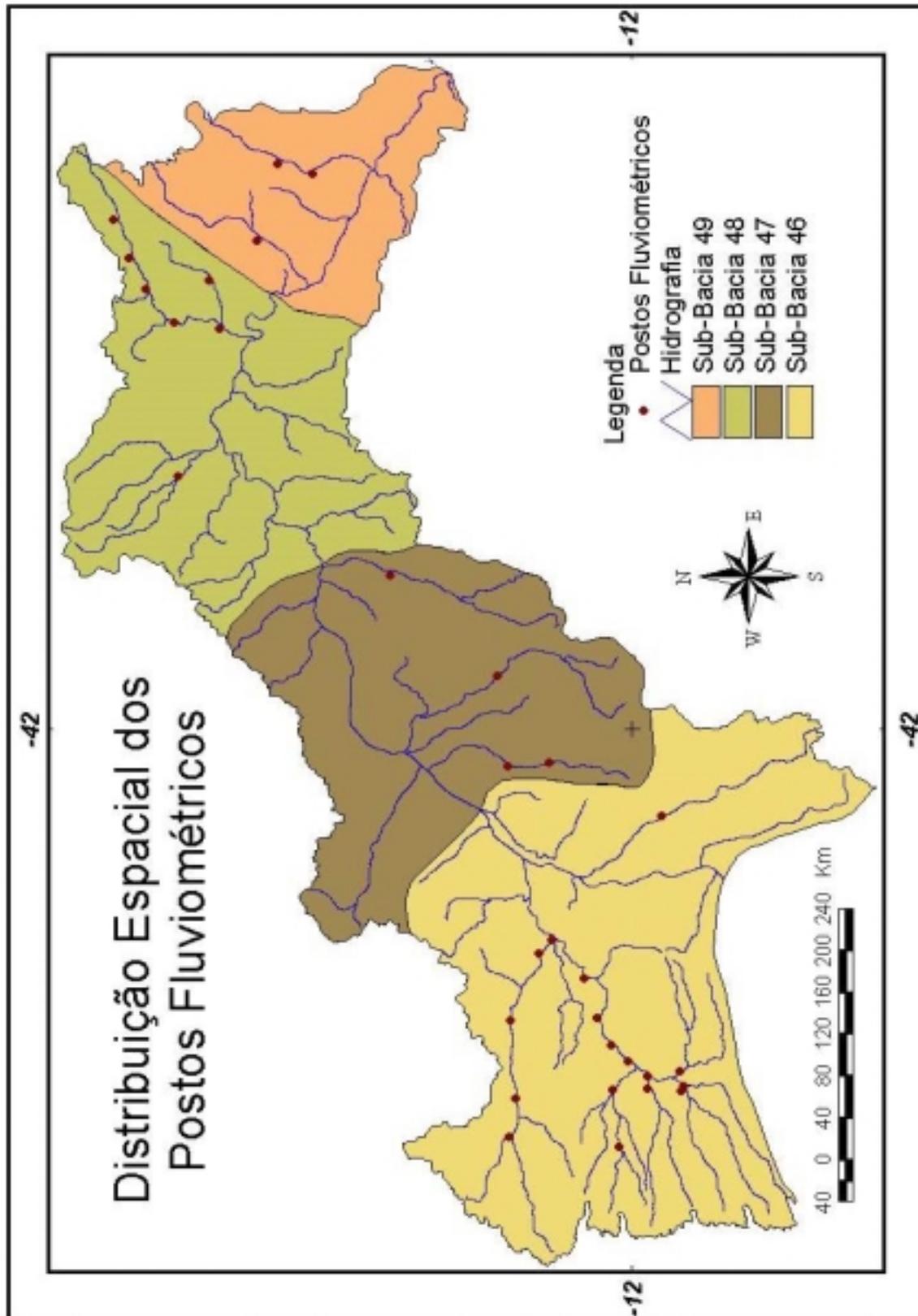


Figura 5.1: Distribuição espacial dos postos fluviométricos selecionados

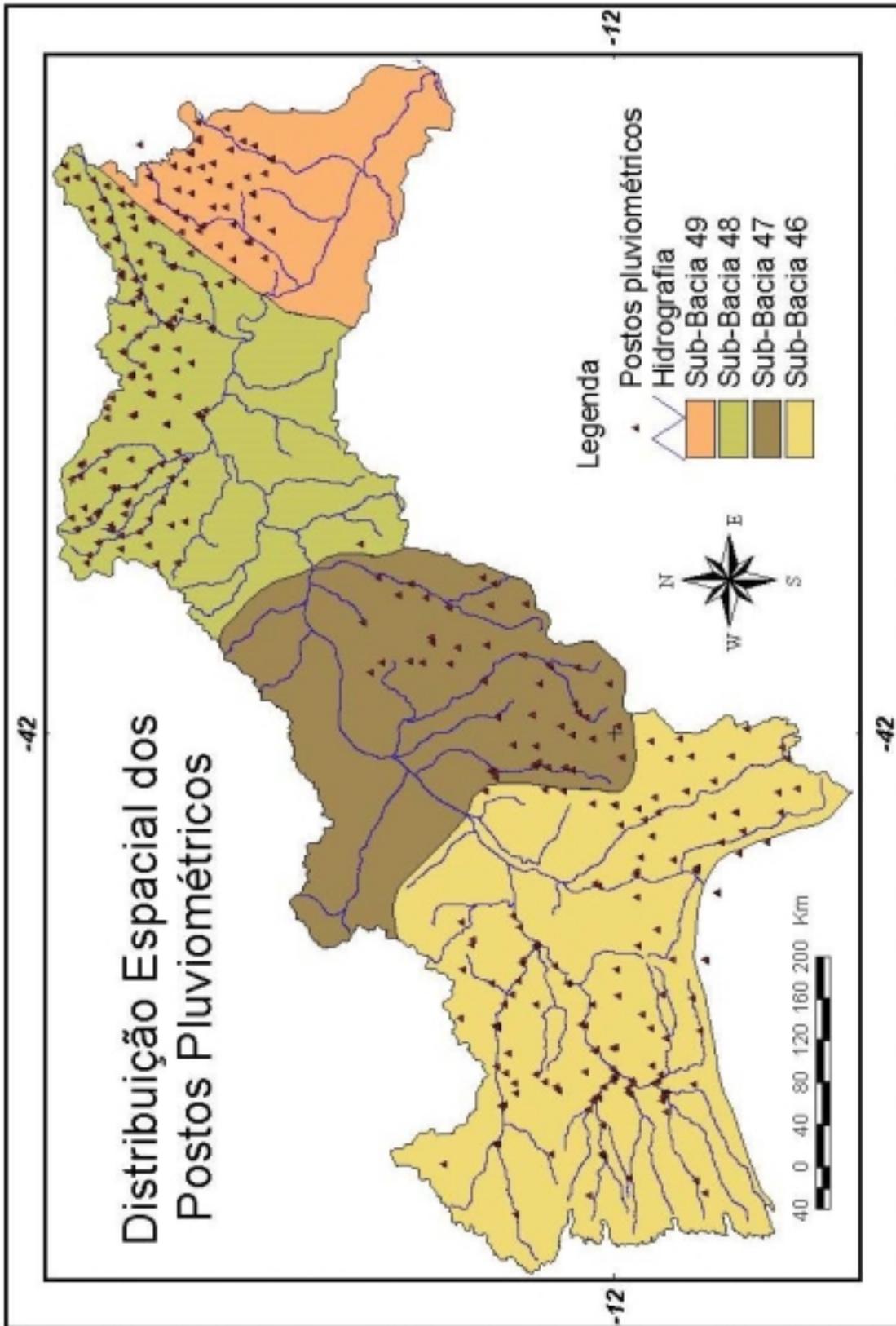


Figura 5.2: Distribuição espacial dos postos pluviométricos selecionados

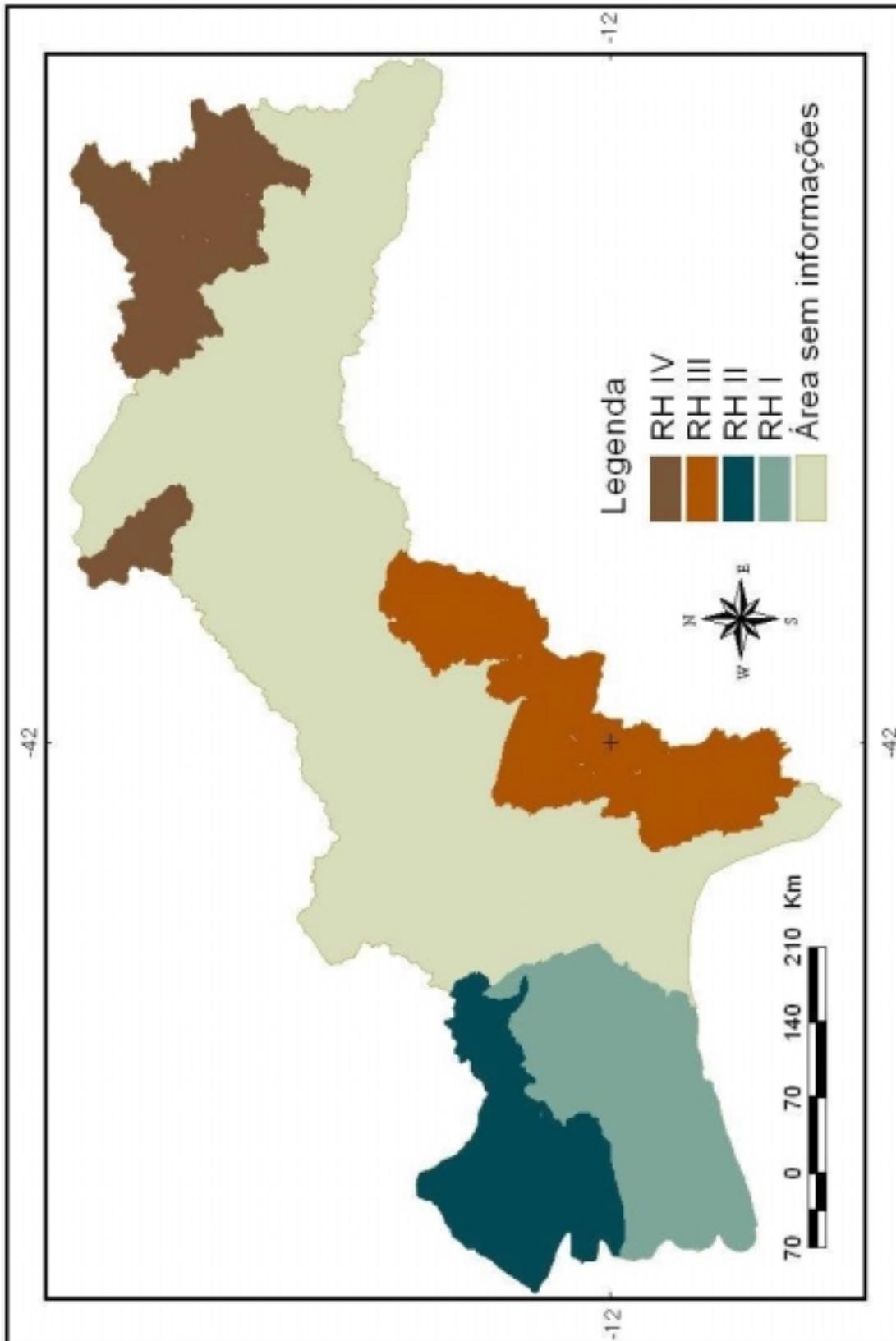


Figura 5.3: Divisão das regiões homogêneas

Tabela 5.1: Características físicas e climáticas das bacias utilizadas

REGIÃO	ESTAÇÃO	A (km ²)	Cr (km)	Dr (m/km)	Dd (km/km ²)	Ds (m)	Pta (mm)	Pmd (mm)
I	Barreiras	21697	239	1,888	0,266	93,11	1064	138
	Boqueirão	67170	498	0,907	0,376	188,40	969	138
	Derocal	5951	152	2,685	0,203	116,90	1023	106
	Fazenda Coqueiro	4407	149	2,132	0,269	78,15	913	150
	Fazenda Macambira	38817	417	1,339	0,319	209,63	1014	126
	Fazenda Redenção	5148	160	2,249	0,278	133,38	930	120
	Nupeba	31267	312	1,448	0,402	134,51	1035	124
	São Sebastião	30264	273	1,675	0,271	114,45	1042	124
	Sítio Grande	4652	192	1,953	0,234	73,38	1019	168
	Taguá	33243	354	1,337	0,296	165,73	1023	122
II	Nova Vida	7298	142	2,562	0,225	148,87	841	101
	Ponte Serafim	2590	74	1,092	0,148	47,82	1029	102
	Fazenda Bom Jardim	5629	114	2,207	0,220	109,73	900	101
	Fazenda Porto Limpo	21122	437	1,211	0,448	127,28	909	162
	Formosa do Rio Preto	13420	213	1,356	0,272	183,27	891	155
	Ibipetuba	17402	329	1,464	0,410	164,06	883	206
III	Abreus	11871	276	2,122	0,325	230,39	388	159
	Fazenda Refrigério	3096	100	5,410	0,717	316,80	741	164
	Fazenda Rio Verde II	7355	155	3,867	0,502	345,01	671	158
	Ponte Br 242	12681	222	4,713	0,700	325,00	760	152
	Jaguaraci	9018	250	13,746	0,370	176,97	568	131
IV	Afogados da Ingazeira	3544	99	2,610	0,960	108,22	546	151
	Águas Belas	3910	119	2,255	0,740	226,91	567	133
	Flores	4990	154	2,141	1,026	119,06	545	134
	Floresta	12318	326	1,552	0,922	107,30	614	136
	Ilha Grande	2253	81	6,537	0,844	138,48	467	112
	Inajá	8248	170	1,871	0,800	164,16	456	162
	Jacaré	5051	192	2,790	0,436	172,32	550	159
	Santana do Ipanema	5154	163	2,852	0,844	202,36	581	172
	Serra Talhada	5933	207	1,660	1,030	118,14	595	135
	Serrinha	9952	265	1,477	0,971	93,56	632	132

Legenda: **A:** área contribuinte; **Cr:** comprimento do rio principal; **Dr:** declividade do rio principal; **Dd:** densidade de drenagem; **Ds:** desnível específico; **Pta:** precipitação total anual e **Pmd:** precipitação máxima diária.

A tabela 5.2 apresenta o percentual de cobertura de cada tipo de vegetação para as bacias selecionadas, sendo %Ca o percentual de Caatinga, %Ce o percentual de Cerrado e %Flo de Florestas.

Tabela 5.2: Análise da cobertura vegetal

REGIÃO	ESTAÇÃO	%Ca	%Ce	%Flo
I	Barreiras	0,000	0,998	0,002
	Boqueirão	0,199	0,698	0,103
	Derocal	0,000	1,000	0,000
	Nupeba	0,008	0,965	0,027
	Fazenda Coqueiro	0,000	0,989	0,011
	Fazenda Macambira	0,066	0,865	0,069
	Fazenda Redenção	0,000	1,000	0,000
	São Sebastião	0,000	0,982	0,018
	Sítio Grande	0,000	1,000	0,000
Taguá	0,032	0,921	0,047	
II	Nova Vida	0,000	0,984	0,016
	Fazenda Bom Jardim	0,000	0,995	0,005
	Fazenda Porto Limpo	0,191	0,632	0,177
	Formosa do Rio Preto	0,000	0,965	0,035
	Ibipetuba	0,055	0,772	0,172
	Ponte Serafim	0,000	1,000	0,000
III	Abreus	0,950	0,000	0,050
	Fazenda Refrigério	0,378	0,000	0,622
	Fazenda Rio Verde II	0,541	0,000	0,459
	Jaguaraci	0,754	0,000	0,243
	Ponte Br 242	0,601	0,000	0,399
IV	Afogados da Ingazeira	1,000	0,000	0,000
	Águas Belas	1,000	0,000	0,000
	Flores	1,000	0,000	0,000
	Floresta	0,997	0,000	0,003
	Ilha Grande	1,000	0,000	0,000
	Inajá	1,000	0,000	0,000
	Jacaré	0,870	0,000	0,130
	Serra Talhada	0,996	0,000	0,004
	Serrinha	0,996	0,000	0,004
	Santana do Ipanema	1,000	0,000	0,000

A seguir serão apresentados os principais resultados obtidos da análise sobre a interferência do tipo de vegetação nos estudos de regionalização. A avaliação foi feita levando em consideração os principais índices estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), erro padrão (e.p.), coeficiente de variação (C_v), desvio relativo (%d.r.) e graus de liberdade (GL). Para as tabelas apresentadas abaixo Q_o é a vazão média observada e Q_i' é vazão calculada pelo modelo de índice i , o primeiro modelo apresentado para cada região refere-se aos resultados obtidos para regionalização utilizando-se apenas os parâmetros físicos e climáticos das sub-bacias em questão. Os valores a seguir apresentados para %d.r. representam os maiores desvios apresentados, em módulo, entre as estações para cada modelo gerado.

5.1.1 REGIÃO I

Na sub-divisão da área de estudo, a Região I agrupou 9 estações situadas na calha do rio Grande e seus afluentes da margem direita, com áreas contribuintes variando de 4.404 a 67.170km². Esta região possui alto potencial subterrâneo, o que garante um regime de escoamento permanente para os seus cursos d'água. Além disso, devido às elevadas altitudes, possui taxa de evaporação anual em torno de 900mm, que pode ser considerada baixa, comparada com as outras áreas, excetuando a Região II. A área está situada entre as isoietas de precipitação de 900 a 1400mm e este fator, associado aos citados anteriormente, garante uma vazão média bastante significativa.

A utilização da cobertura vegetal como variável explicativa apresentou melhoras na qualidade do ajuste para esta região, como apontam os índices estatísticos na Tabela 5.3. Na escolha do melhor modelo, a inclusão do percentual de cobertura do tipo Cerrado foi fundamental para essa melhoria, representando bem a realidade local enquanto a inclusão do percentual de caatinga levou à sensível redução do desvio relativo entre os valores observados e os valores gerados pelo modelo.

Tabela 5.3: Ajustes estatísticos da regionalização para a região I

MODELO	R^2_a	e.p.	C_v (%)	%d.r.	GL	EQUAÇÃO
1	0,965	1,15	2,88	22,91	7	$Q = 0,0991 . A^{0,7176}$
2	0,979	1,11	2,19	20,45	6	$Q = 0,1737 . A^{0,6642} . \%Ce^{0,02298}$
3	0,979	1,11	2,19	16,62	5	$Q = 0,4034 . A^{0,5889} . \%Ce^{0,0234} . \%Ca^{0,0144}$

Tabela 5.4: Resultados obtidos para a região I

ESTAÇÃO	Q₀ (m³/s)	Q₁ (m³/s)	Q₂ (m³/s)	Q₃ (m³/s)
São Sebastião	190,92	162,77	164,45	159,18
Fazenda Redenção	50,25	45,65	50,73	51,66
Nupeba	177,36	166,63	167,98	171,06
Taguá	179,77	174,12	174,77	180,76
Fazenda Macambira	184,01	194,61	193,44	199,78
Sítio Grande	34,54	42,46	34,52	34,49
Barreiras	109,49	128,19	131,88	121,37

5.1.2 REGIÃO II

A região II agrupou 6 estações fluviométricas, dos quais 4 estão situadas na calha do rio Preto, afluente da margem esquerda do rio Grande, e os outros estão situados em bacias menores próximas a estes. Os postos utilizados possuem área contribuinte variando em torno de 2.590 a 17.402km². As características físicas e climáticas desta região são semelhantes às da região I.

Nesta região, a inclusão da cobertura vegetal incorporou um pequeno ganho na qualidade do ajuste do modelo. Este resultado já era previsto tendo em vista os excelentes ajustes conseguidos anteriormente, quando se utilizaram as características físicas e climáticas como parâmetros de regionalização. O cerrado, sendo a vegetação dominante na região, foi a variável explicativa que mais se ajustou e contribuiu para esse aumento.

Tabela 5.5: Ajustes estatísticos da regionalização para a região II

MODELO	R²_a	e.p.	C_v (%)	%d.r.	GL	EQUAÇÕES
1	0,994	1,06	1,57	7,72	3	$Q = 0,0002.A^{2,104}.Cr^{-1,3285}$
2	0,995	2,39	3,91	11,68	3	$Q = 0,008.A + 194.\%Ce - 204$
3	0,997	1,04	1,18	6,12	3	$Q = 0,000511.A^{1,2815}.\%Ce^{1,493}$

Tabela 5.6 Resultados obtidos para a região II

ESTAÇÃO	Q₀ (m³/s)	Q'₁ (m³/s)	Q'₂ (m³/s)	Q'₃ (m³/s)
Nova Vida	47,46	44,13	46,45	44,56
Ibipetuba	91,18	90,43	89,15	94,51
Fazenda Porto Limpo	91,65	93,02	92,89	89,90
Ponte Serafim	11,94	11,83	10,54	12,10
Fazenda Bom Jardim	31,84	34,30	34,76	32,48
Formosa do Rio Preto	93,19	93,32	93,48	94,45

5.1.3 *REGIÃO III*

A região III reuniu os 5 postos fluviométricos situados nos afluentes da margem direita do São Francisco, com áreas contribuintes variando entre 3.096 a 12.681km². Para esta região a regionalização utilizando apenas os parâmetros físicos e climáticos das bacias não apresentou resultados satisfatórios, levando em consideração os índices estatísticos. Este fato pode ser explicado pela grande heterogeneidade física e climática da área que interferem diretamente na formação de vazões. Na parte sul desta região, formada por maciços e serras de grandes altitudes, as bacias contribuintes possuem desníveis específicos superiores a 300m e os leitos de seus rios principais possuem declividades médias de 5m/km. Já na parte norte, de relevo mais suave, há uma dominância das formações calcárias, reduzindo as vazões médias nos postos ali situados. Entretanto, devido à baixa densidade da rede hidrométrica, não foi possível sub-dividir essa região.

A cobertura vegetal nesta região apresentou grande interferência no processo de regionalização. A inclusão desta variável apresentou uma melhora significativa dos ajustes estatísticos nos modelos obtidos, sendo a caatinga, a variável mais representativa. Esses resultados, no entanto, devem ser vistos com reserva, em função do baixo grau de liberdade resultante do fato de se dispor de dados em apenas cinco postos.

Tabela 5.7: Ajustes estatísticos da regionalização para a região III

MODELO	R ² _a	e.p.	C _v (%)	%d.r.	GL	EQUAÇÕES
1	0,900	1,50	113,50	55,85	2	$Q = 3,48.10^{-10} .Dr^{0,6168} .Ds^{3,7345}$
2	0,939	1,38	89,06	32,99	2	$Q = 2,85.10^{-15} .A^{3,4144} .\%Ca^{-6,5913}$
3	0,978	0,44	16,93	85,81	2	$Q = 0,00107A - 18,68\%Ca + 5,2311.$
4	0,978	0,44	16,93	85,78	2	$Q = 0,00107.A + 18,68.\%Ca - 13,45$

Tabela 5.8 Resultados obtidos para a região III

Estação	Q ₀ (m ³ /s)	Q' ₁ (m ³ /s)	Q' ₂ (m ³ /s)	Q' ₃ (m ³ /s)	Q' ₄ (m ³ /s)
Jaguaraci	0,44	0,43	0,59	0,82	0,82
Fazenda Rio Verde II	3,45	2,40	2,59	3,00	3,00
Fazenda Refrigério	1,38	2,15	1,45	1,49	1,49
Abreus	0,38	0,37	0,33	0,21	0,21
Ponte BR-242	7,49	7,23	8,35	7,60	7,60

5.1.4 REGIÃO IV

A região IV agrupou 9 estações situadas nas bacias dos rios Pajeú, Moxotó e Ipanema e apresentou bons resultados utilizando as características físicas e climáticas como variável explicativa. A utilização do tipo de vegetação não trouxe melhorias ao processo de regionalização pois, como apresentado na Tabela 5.92 , praticamente não ocorrem variações na vegetação.

Tabela 5.9 Ajustes estatísticos da regionalização para a região IV

MODELO	R ² _a	e.p.	c.v.(%)	%d.r.	GL	EQUAÇÃO
1	0,943	1,24	13,07	29,19	6	$Q = 0,00253 .Cr^{1,5673} .Dd^{3,1482}$
2	0,929	1,27	14,22	29,01	5	$Q = 0,003562.Cr^{1,4936} .Dd^{2,8595} .\%Ca^{-27,779}$
3	0,931	1,27	14,09	28,71	5	$Q = 0,00524.Cr^{1,4606} .Dd^{2,8215} .\%Flo^{0,01706}$

Tabela 5.10 Resultados obtidos para a região IV

ESTAÇÃO	Q₀ (m³/s)	Q'₁ (m³/s)	Q'₂ (m³/s)	Q'₃ (m³/s)
Águas Belas	2,54	1,80	1,91	1,92
Flores	8,77	7,51	7,12	7,00
Floresta	19,41	17,37	17,58	17,77
Serra Talhada	13,08	12,06	12,36	12,51
Serrinha	13,36	14,73	15,24	15,21
Ilha Grande	1,40	1,49	1,56	1,58
Afogados Ingazeira	2,87	3,07	3,07	3,07
Inajá	3,26	4,01	4,06	4,02
Santana do Ipanema	3,45	4,45	4,45	4,39

REGIONALIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE MODELO CHUVA-VAZÃO

Esta metodologia consiste na transferência dos parâmetros de uma função ou de um modelo matemático determinados pela relação entre as características físicas das bacias. Como parte desta pesquisa, buscou-se analisar a possibilidade de ajustar modelos hidrológicos a segmentos da área em estudo e daí utilizar os parâmetros para simulação nas áreas hidrologicamente semelhantes.

6.1 MODELOS CHUVA-VAZÃO

Diversos modelos chuva-vazão são amplamente utilizados como forma de aumentar a quantidade de informações fluviométricas. Tais modelos, quando devidamente calibrados, permitem a extensão dos registros, preenchimento de falhas e simulação de novos eventos a partir da precipitação ocorrida ou prevista (CIRILO et al, 1997). Devido às características da região em estudo, no semi-árido em sua maior parte e com predominância de solos cristalinos, procurou-se um modelo testado para este tipo de região. A escolha recaiu no modelo GRH, testado exaustivamente no Plano de Recursos Hídricos de Pernambuco (SECTMA,1998) e aplicado a outras áreas do Nordeste.

6.2 MODELO GRH

O GRH é um modelo de simulação mensal, desenvolvido na UFPE, do tipo conceitual e se caracteriza pela combinação de dois reservatórios lineares e funções de transferência, onde os reservatórios representam as zonas não-saturada e saturada do solo. Neste modelo a separação do escoamento superficial é feita em função da precipitação através de equação não-linear, realizando um balanço de massa a cada evento de precipitação.

A primeira etapa deste modelo é a obtenção da precipitação efetiva (P_{ef}) resultante da diferença entre a precipitação total e a interceptação superficial (I_S). Essa parcela da precipitação resulta em escoamento superficial direto (E_S) dado por:

$$ES = P_{ef} \cdot (C_4 + TU^E) \quad \text{Equação 6.1}$$

Sendo:

$$E = C_1 - C_2 \cdot P_{ef} \quad \text{Equação 6.2}$$

Onde: C_1 , C_2 são parâmetros que caracterizam o escoamento superficial em função do montante precipitado e são ajustados pelo usuário; TU é a taxa de umidade do solo e C_4 , também ajustado pelo usuário, é um parâmetro que define o percentual escoado independentemente da umidade do solo.

Após este balanço a lâmina restante, que não gerou escoamento superficial, infiltra-se na camada não-saturada do solo. Neste reservatório a umidade é atualizada a cada evento através das perdas por evapotranspiração. Ocorre também um deplecionamento do mesmo como recarga para o reservatório que representa a camada saturada do solo. Essa recarga é representada pela seguinte expressão:

$$REC = RSOLO \cdot TU^{CREC_2} \cdot CREC_1 \cdot (1 - PERDAS) \quad \text{Equação 6.3}$$

$RSOLO$ é o nível do reservatório da camada não saturada, $CREC_1$ e $CREC_2$ são parâmetros característicos do comportamento da recarga e $PERDAS$ é fração da recarga que se perde no solo sem contribuir para o reservatório subterrâneo. Os valores indicados para estes parâmetros são:

$$0 \leq CREC_1 \leq 1 \quad 0 \leq CREC_2 \leq 3 \quad 0 \leq PERDAS \leq 1$$

O nível do reservatório da camada saturada, $RSUB$ também sofre um deplecionamento constante a uma taxa de RK_1 , gerando um escoamento de base, EB , dado por:

$$EB = RSUB \cdot (1 - RK_1) \quad \text{Equação 6.4}$$

A cada ciclo o equilíbrio do excedente de evapotranspiração potencial (EI), resultante da diferença entre a evaporação potencial e a evapotranspiração, é restabelecido pela redução do nível do reservatório da camada não saturada, que passa a ser dado por:

$$RSOLO = RSOLO - EI \geq 0 \quad \text{Equação 6.5}$$

Para o início da operação do modelo é necessária a definição de três parâmetros que permitem estabelecer a condição inicial dos reservatórios: abstração potencial do solo (S), a umidade inicial do solo (TU_{ini}) e o escoamento de base inicial (EB_{ini}). Com os dois primeiros parâmetros é possível a determinação da capacidade de saturação (SAT) do reservatório da camada não saturada, dada por:

$$SAT = \frac{S}{1 - TU_{ini}} \cdot CSAT \quad \text{Equação 6.6}$$

Onde $CSAT$ é um fator utilizado para adequar os processos hidrológicos associados ao ciclo chuva-vazão em uma escala mensal. Determinado o valor do nível máximo (SAT) do reservatório da camada não saturada, o seu nível inicial é obtido multiplicando-se este valor pela umidade inicial (TU_{ini}) e é dada em função do escoamento de base inicial (EB_{ini}) através da seguinte equação:

$$RSUB_{ini} = \frac{2592 \cdot EB_{ini}}{A \cdot (1 - RK_1)} \quad \text{Equação 6.7}$$

Onde A é a área da bacia contribuinte em km^2 .

6.3 ETAPAS PARA REGIONALIZAÇÃO

Os parâmetros de um modelo hidrológico nem sempre apresentam relação definida com as características físicas do sistema. Sua estimativa é feita quando se possui dados nos locais de interesse e, em caso contrário, por meio da transferência de informações de outras bacias que apresentem similaridades em características físicas e comportamento hidrológico. Para a regionalização destes parâmetros são obedecidas algumas etapas:

a) Determinação de equação de regressão entre os parâmetros, ou combinação de parâmetros e características físicas e climáticas das bacias;

b) Definição do intervalo de variação possível dos parâmetros com base em informações características das bacias.

Muitas vezes, estes parâmetros apresentam interdependência, criando assim tendenciosidade nas estimativas.

6.4 SIMULAÇÃO CHUVA-AZÃO

Em virtude da baixa densidade da rede hidrométrica apenas 27% da área em estudo pôde ser regionalizada no trabalho desenvolvido para a ANEEL, conforme citado anteriormente.

Na área em estudo situam-se 31 estações fluviométricas localizadas nos afluentes do rio São Francisco. Destas, 17 concentram-se na sub-bacia 46 enquanto que, nas sub-bacias 47, 48 e 49 situam-se apenas 4, 7 e 3 estações, respectivamente, como mostra a Figura 5.1. Para os dados de precipitação foram analisadas 384 das 691 estações instaladas e que estão situadas no interior ou nas proximidades das bacias contribuintes aos postos fluviométricos selecionados, conforme mostrado na Figura 5.2 (apenas para as sub-bacias controladas por postos fluviométricos).

Não diferente dos demais estudos hidrológicos, a realização deste trabalho encontrou dificuldades quer pela ausência de dados, quer pelo desconhecimento das séries de chuva, vazão e/ou evaporação. Além disso, mesmo existindo uma grande quantidade de informações pluviométricas, as estações apresentaram uma distribuição irregular ao longo de toda área em estudo. Na região oeste da Bahia, por exemplo, onde se concentram metade das estações fluviométricas, há escassez de informações de chuvas principalmente em sua parte mais extrema, impossibilitando assim, a simulação chuva-vazão em sub-bacias pertencentes àquela

região. Além disso, os inúmeros barramentos de pequeno e médio porte típicos do semi-árido, desconhecidos pelos órgãos gestores, dificultam a aplicação de modelos de simulação.

A base inicial para a simulação deste modelo partiu da delimitação de regiões fisicamente homogêneas feita por BARBOSA (2002). A autora empregou mapas temáticos de clima, vegetação e tipo de solos para delimitar a área em regiões homogêneas (Figura 5.3). Com o resultado obtido, verificou-se que a área que apresentava vazios de informações ficou inserida em duas grandes regiões. Nestas, os índices pluviométricos anuais são inferiores a 1000mm, a vegetação dominante é a caatinga e as áreas diferenciam-se apenas quanto ao tipo de solo.

Com as similaridades apresentadas na definição das regiões fisicamente homogêneas, buscou-se aumentar as informações fluviométricas por meio da regionalização dos parâmetros do modelo chuva-vazão. Entre os vários postos analisados escolheu-se as estações Abreus e Jaguaraci por se situarem dentro das mesmas regiões fisicamente homogêneas, e além disso, apresentarem períodos comuns entre as séries históricas de vazão, precipitação e evaporação. As bacias contribuintes destes postos apresentam solos dominantes do tipo A ou B e pequenos percentuais dos solos do tipo C ou D. A calibração foi feita para o posto Abreus e os parâmetros obtidos foram transferidos para a estação de Jaguaraci. A seguir serão apresentadas as principais características dos postos escolhidos.

6.41 CARACTERIZAÇÃO DAS BACIAS CONTRIBUINTES

6.4.1.1 ABREUS

O posto fluviométrico de Abreus está situado a uma distância de 277km da cabeceira do rio Salitre, um dos principais afluentes da margem direita do São Francisco, possuindo uma área de contribuição igual a 11.872km². De acordo com as informações extraídas do CD Zane Digital (EMBRAPA, 2000) destaca-se que a bacia de Abreus possui duas áreas distintas. A primeira, formada por superfícies cársticas, ocupa 47% da área total e possui altitudes variando entre 500 e 800m. O clima predominante nesta região é o tropical seco, mudando para tropical muito seco nas proximidades do exutório. A segunda, correspondendo a 42% da bacia, compreende a formação da Chapada Diamantina e possui relevo acidentado com altitudes variando entre 600 e 1300m apresentando clima tropical seco.

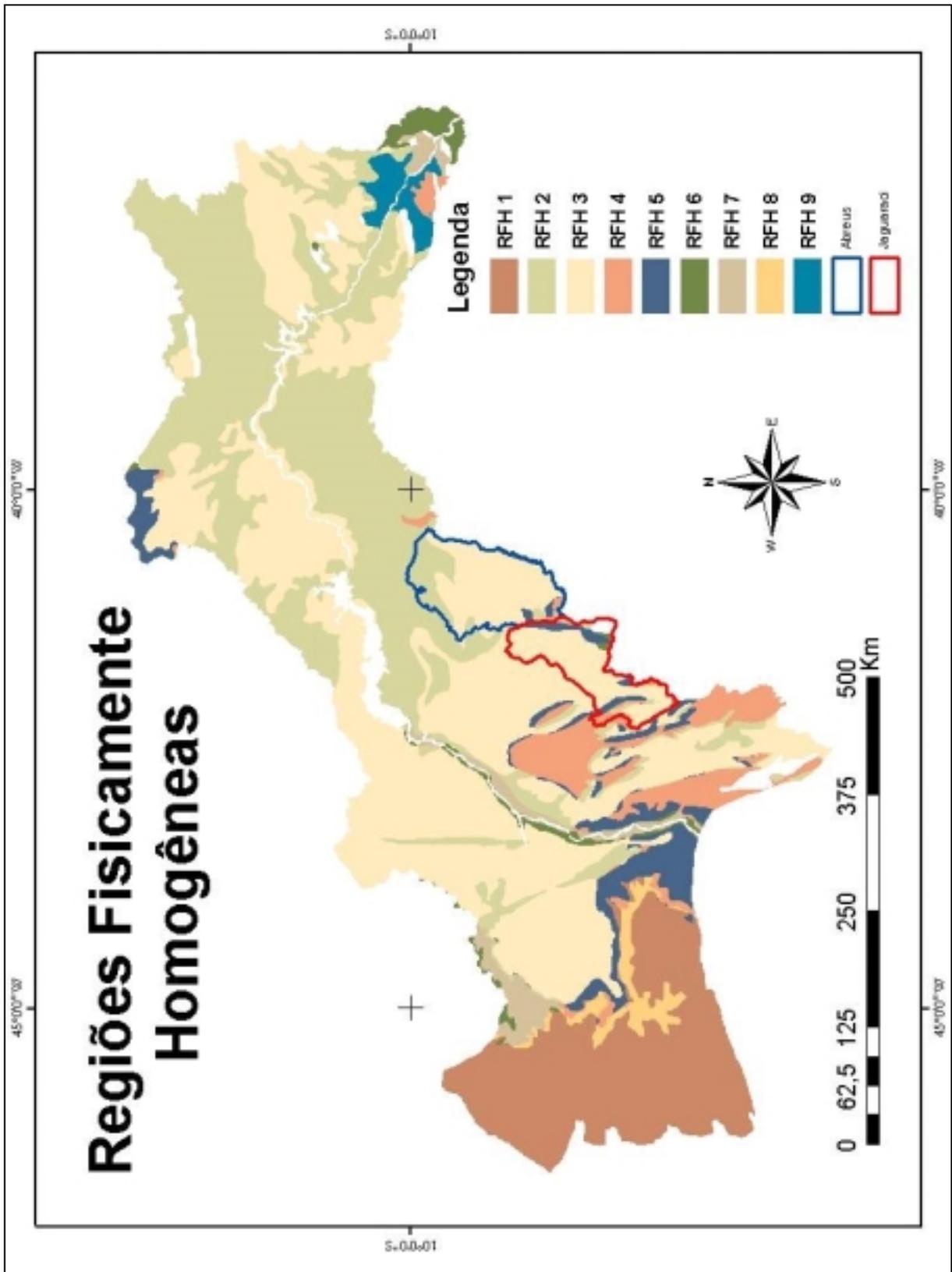


Figura 6.1: Regiões Fisicamente Homogeneas

Os índices pluviométricos não sofrem grandes alterações entre essas duas regiões, ficando em torno de 400 a 600mm, exceção feita em locais onde constata-se a presença de micro-climas onde esses valores atingem 1000 mm.

Na classificação feita por BARBOSA (2002), a área contribuinte ao posto Abreus ficou inserida nas regiões fisicamente homogêneas 2 e 3. Essas regiões possuem cobertura vegetal formada por caatinga e índices pluviométricos inferiores a 1000mm, diferenciando-se apenas no tipos de solo. Enquanto na região fisicamente homogênea 2 há um predomínio do solos C ou D, na região 3 os solos predominantes são do tipo A ou B.

Com rede de drenagem formada por rios temporários e possuindo solos altamente permeáveis, o escoamento na bacia contribuinte de Abreus só acontece em algumas semanas durante o período chuvoso, entre os meses de novembro e março, resultando assim, em vazões características extremamente baixas. Sua vazão média de longo período não supera $0,4\text{m}^3/\text{s}$ e sua vazão média de enchente, a $5\text{m}^3/\text{s}$.

6.4.1.2 JAGUARACI

Situado a 250 km da nascente do rio Jacaré, o posto fluviométrico de Jaguaraci possui uma área contribuinte de 9.018km^2 . O clima predominante nesta região é o tropical seco, com pequena área de altitude apresentando o tropical úmido. Seu relevo bastante acidentado é formado por extensas chapadas e serras de grandes altitudes na parte sul e confere à calha uma declividade média superior a 13 m/km . A rede de drenagem de toda bacia do rio Jacaré está situada em regiões cársticas e sob falhas geológicas, o que favorece o aumento da capacidade de infiltração. Em alguns trechos o rio Jacaré submerge no solo, sendo comum nesta região a formação de grutas.

A bacia contribuinte ao posto de Jaguaraci possui grande parte de sua área inserida na região fisicamente homogênea 3, com vegetação do tipo caatinga, índices pluviométricos inferiores a 1000 mm e solos tipo A ou B. Existem ainda inseridas nesta sub-bacia outras regiões fisicamente homogêneas, de menor amplitude, definidas como sendo as regiões fisicamente homogêneas 4, 5 e 6 (Figura 6.1 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**). Nestas regiões a vegetação dominante é a floresta. Os índices pluviométricos estão entre 600 e 1000 mm nas regiões 4 e 5 e superiores a 1000 mm na região 6. Em relação à classificação dos solos as regiões 5 e 6 possuem solos do tipo A ou B enquanto que, a região 4 possui solos C ou D.

As características hidrológicas do posto Jaguaraci são semelhantes às do posto Abreus. Sua rede de drenagem é formada apenas por rios intermitentes e possui alta permeabilidade dos solos. Sua vazão média de longo período está em torno de $0,45\text{m}^3/\text{s}$ e sua vazão média de enchente é da ordem de $9\text{m}^3/\text{s}$.

6.4.2 ANÁLISE DOS DADOS

Para a realização deste trabalho utilizou-se os dados disponibilizados na Internet pela Agência Nacional de Águas – ANA. Além disso, para os dados pluviométricos foram acrescentadas as informações dos postos monitorados pela SUDENE na região em estudo. As séries de vazões utilizadas encontram-se atualizadas até o ano de 1999, com início em 1977 e 1985 nos postos de Jaguaraci e Abreus, respectivamente. As estações pluviométricas (Tabelas 6.1 e 6.2) apesar de possuírem séries longas, em sua grande maioria encontram-se atualizadas somente até 1983. Foram empregadas ainda as informações de evaporação média mensal das estações climáticas de Irecê e do Senhor do Bonfim fornecidas pelo INMET, situadas nas proximidades dos postos de Jaguaraci e Abreus. O período de observações vai de 1971 a 1990 em Irecê e de 1975 a 1987 em Senhor do Bonfim. Apesar de, isoladamente, apresentarem longos períodos de observações, as séries hidro-climáticas possuem curto período coincidente, o que representou uma dificuldade a mais na realização deste trabalho.

Tabela 6.1: Postos pluviométricos selecionados na bacia Abreus

CÓDIGO	ESTAÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE	PERÍODO
1040001	Abreus	-10,0097	-40,6908	1965-1983
1040007	Lajes dos Pretos	-10,1825	-40,8436	1964-1983
1040005	Lagoa Branca	-10,2828	-40,7458	1964-1987
1041008	Alagadiço	-10,6800	-41,2872	1964-1983
1041006	Delfino	-10,4542	-41,2055	1964-1983
1041007	Campo Largo	-10,3833	-41,4166	1919-1983
1041011	Upamirim	-10,4667	-41,2500	1943-1963
1040018	São Tomé	-10,6000	-40,9500	1937-1987
1040016	Taquarandi	-10,8900	-40,6997	1964-1983
1041001	Olho d'Água do Faundo	-10,9222	-41,2736	1964-1983
1040015	Açude Serrinha	-10,9500	-40,9333	1964-1983
1041010	Bela Vista	-10,9855	-40,7480	1964-1983
1140027	Várzea Nova	-11,2500	-40,9166	1962-1983

Tabela 6.2: Postos pluviométricos selecionados na bacia Jaguaraci

CÓDIGO	ESTAÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE	PERÍODO
1041002	Jaguaraci	-10,9000	-41,5833	1964-1983
1041001	Olho d'Água do Facundo	-10,9222	-41,2736	1964-1983
1141004	Fazenda Garapa	-11,2333	-41,3500	1964-1971
1141006	Ipanema	-11,3667	-41,8666	1964-1983
1141010	Cafarnaum	-11,6833	-41,4666	1963-1983
1141011	Canarana	-11,6666	-41,7666	1963-1983
1141000	Mulungo do Morro	-11,9500	-41,6000	1964-1979
1141017	Jacaré	-11,7000	-41,8500	1917-1964
1141009	Barro Alto	-11,7666	-41,8833	1963-1983
1142014	Barra do Mendes	-11,8167	-42,0666	1937-1983
1241015	Milagres	-12,0333	-41,9666	1963-1983
1242013	Saudável	-12,0625	-42,2322	1963-1983
1242009	Olho d'Água do Francisco	-12,3061	-42,0919	1963-1983
1242003	Fazenda Caraibas	-12,5500	-42,0667	1963-1983

6.4.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA A BACIA DE ABREUS

Em virtude do desencontro das séries hidrológicas, a calibração do modelo chuvavão para a bacia contribuinte ao posto de Abreus só pôde ser realizada para um período de 10 anos, de 1978 a 1987. Para garantir a certeza e a qualidade do ajuste do modelo buscou-se investigar a existência de barramentos da calha do rio Salitre. Porém, nenhuma referência foi obtida para o período de simulação. Entretanto, por se tratar de uma região semi-árida sabe-se que é comum a construção de açudes sem que haja o conhecimento de órgãos competentes, ocasionando assim uma ausência de informações oficiais. Assim, não se tendo informações mais abrangentes da realidade local, considerou-se todo o período comum entre as séries hidrológicas para a simulação do modelo.

O ajuste para o período inicial da simulação apresentou uma qualidade mediana, como mostrado a seguir. Observou-se que não há correlação entre as precipitações e as vazões observadas em boa parte do hidrograma, o que remete a dúvidas sobre a qualidade dos dados e à representatividade da chuva média adotada, ou à existência de represamentos.

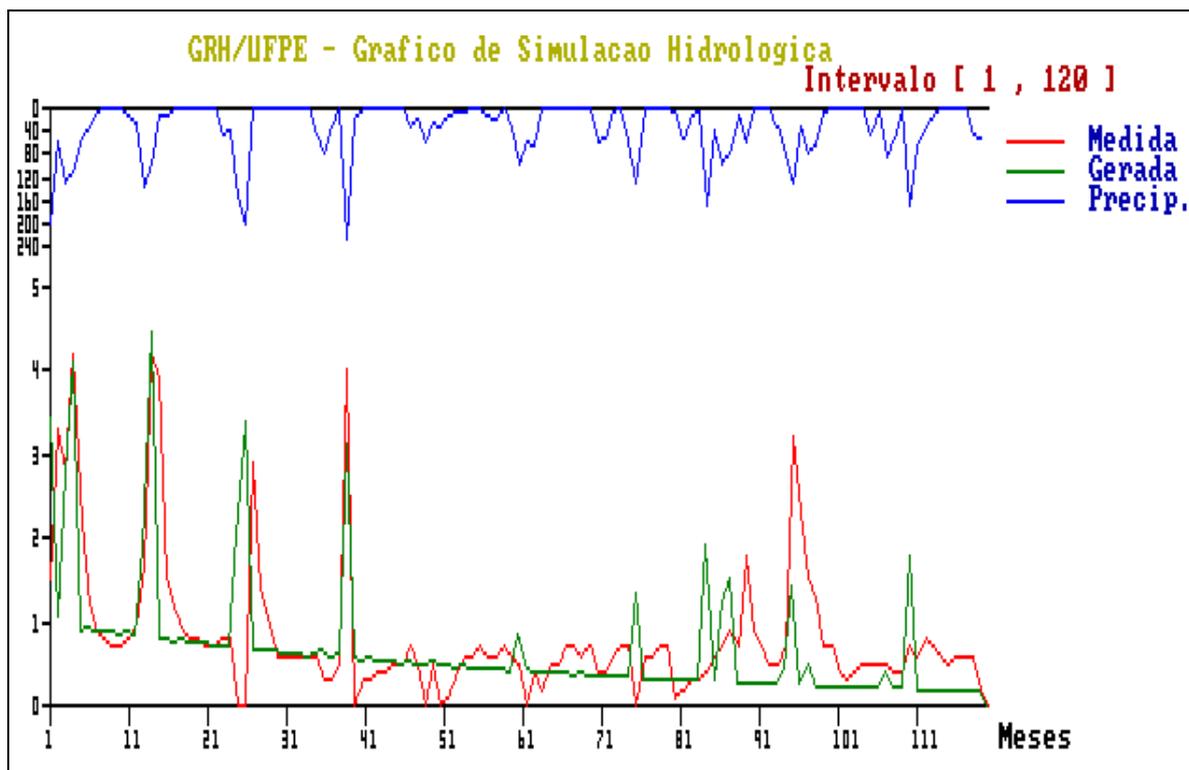


Figura 6.1: Análise gráfica da calibração do modelo para o posto Abreus

6.4.4 TRANSFERÊNCIA DO HIDROGRAMA PARA A BACIA DE JAGUARACI

Com o modelo calibrado para a bacia de Abreus, buscou-se aplicá-lo para a bacia contribuinte ao posto Jaguaraci em virtude das similaridades espaciais existentes entre elas. O período comum entre as séries hidrológicas nesta área é de apenas 6 anos, indo de 1978 a 1983, que coincide com o período de melhor ajuste na calibração.

Os resultados mostrados na Figura 6.2, não foram bons. No entanto, não podem ser conclusivos quanto à impropriedade de aplicação da metodologia, pelos motivos expostos, principalmente quanto à escassa quantidade de dados hidrológicos disponíveis.

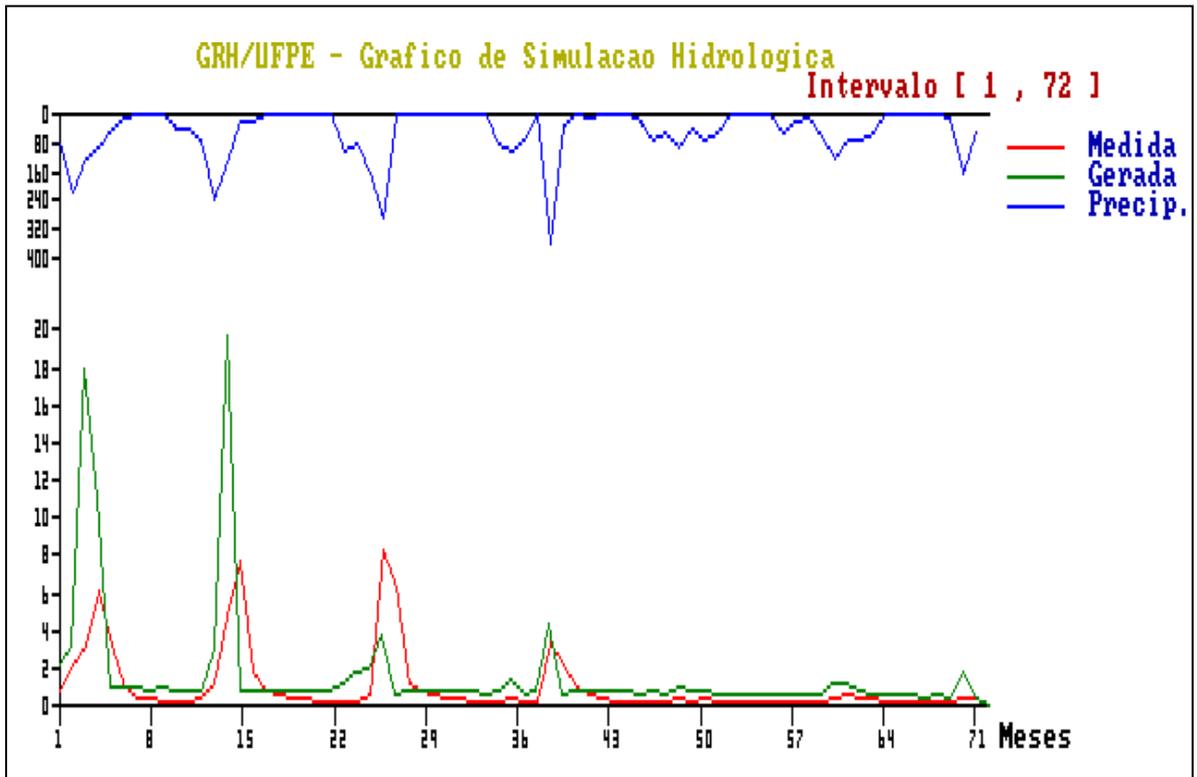


Figura 6.2: Análise gráfica da transferência de parâmetros para o posto Jaguaraci

REDES NEURAIS

7.1 INTRODUÇÃO

Uma Rede Neural Artificial (**RNA**) é definida por Valença e Ludemir (1999) como sendo um sistema constituído por elementos de processamento interconectados, chamados de neurônios, os quais estão dispostos em camadas e são responsáveis pela não linearidade da rede, através do processamento interno de certas funções matemáticas. Essa possibilidade de se trabalhar com transformações não lineares faz da RNA uma ferramenta poderosa se comparada com os modelos estatísticos convencionais. Além disso, uma RNA consegue extrair automaticamente as características necessárias para representação dos dados fornecidos e essa capacidade de aprendizagem possibilita a generalização dessas informações mesmo com um conjunto reduzido de exemplos (BRAGA et al, 2000).

A estrutura elementar de uma RNA é constituída de uma função de combinação e uma função de transferência. A primeira é responsável pela composição das informações de entrada do neurônio e, se esta função for linear, representará a soma das entradas ponderadas pelos respectivos pesos. A função de ativação é o estímulo transmitido pelas conexões para as camadas adjacentes. Para isso várias funções podem ser empregadas, entre as quais se destacam a sigmóide $\left(\frac{1}{1+e^{-x}}\right)$ e a gaussiana (e^{-x^2}) .

A rede mais simples existente é composta por duas camadas. A primeira camada é composta por n neurônios de entrada interligados a um único neurônio de saída através dos pesos sinápticos. Este tipo de rede é denominado *Perceptron* e foi proposta por Frank Rosenblatt em 1958. A aprendizagem desse modelo é feita por meio do algoritmo conhecido como *regra delta*, que se constitui de um treinamento supervisionado, ou seja, são fornecidos ao sistema os dados de entrada e as respostas desejadas. A convergência desse sistema ocorre com o ajuste dos pesos de tal forma que se garanta a minimização dos erros em um número finito de interações.

As redes *perceptron* foram fortemente criticadas por não poderem classificar exemplos de entrada que não fossem linearmente separáveis, ficando esquecidas até o início da década de 80. Mais precisamente em 1982, John Hopfield apresentou um modelo constituído de

elementos de processamento interconectados cuja memória encontra-se armazenada nas interconexões. A introdução de uma camada escondida à rede *perceptron* aumentou a capacidade da RNA de modelar funções não lineares que, após treinamento, podem ser generalizada com grande precisão.

Em uma rede multicamadas o valor de saída de cada neurônio é multiplicado por um peso e este produto será a entrada para o neurônio da camada seguinte. Em cada neurônio receptor são somados todos os produtos recebidos e acrescentados a estes uma parcela conhecida como ruído. O resultado disso é, em seguida, transformado por uma função de ativação e transmitido para a camada seguinte.

A aprendizagem de uma RNA multicamada é feita por meio do algoritmo de *backpropagation*, que nada mais é que uma forma generalizada da *regra delta*. Essa regra consiste na aplicação de um gradiente descendente visando à busca de um mínimo global do erro entre o valor de saída desejada e o valor fornecido através de incrementos nos valores dos pesos proporcional a este gradiente.

Apesar das vantagens na utilização de RNA, Ramos e Galvão (2001) recomendam alguns cuidados especiais no seu emprego. Os autores sugerem que se faça um pré-processamento dos dados de entrada da RNA antes de utilizá-lo na sua calibração, que se atribuam critérios de estabilidade para a escolha da melhor rede e que se evite excesso de parâmetros que ocasione um superajustamento dos dados.

7.2 APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS

Os modelos de redes neurais têm sido amplamente utilizados nos estudos hidrológicos devido à capacidade de reproduzir a natureza não linear desses fenômenos e por se mostrarem superiores aos modelos estatísticos convencionais. Na hidrologia, a RNA começa a ser utilizada para o preenchimento e extensão das séries históricas, previsão de vazões ou de chuvas extremas.

Uma das principais aplicações das RNA em Hidrologia é a previsão de vazões. Neste caso, as simulações do tipo chuva-vazão são as mais encontradas na literatura. Um trabalho a ser destacado nesta área foi realizado por BARP e BARBOSA (1999), onde os autores comparam os resultados obtidos pelo modelo SMAP com os obtidos pelas redes neurais.

Uma nova aplicação para as RNA é o processo de regionalização hidrológica. DINIZ e CLARKE (2001) trabalharam com a regionalização dos parâmetros de um modelo chuva-

vazão baseada nas características físicas e climáticas de 14 bacias localizadas no semi-árido. O conjunto de parâmetros obtidos na calibração individual de cada posto foi associado a essas características através de uma rede neural do tipo *perceptron* de múltiplas camadas.

7.3 REDES NEURAI APLICADAS À REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

Nas metodologias discutidas nesse texto, a regionalização sempre se baseou na classificação da área em estudo segundo regiões homogêneas. Tal premissa se justifica pelo fato de que outras variáveis físicas além daquelas em uso no modelo influenciam as condições de escoamento. Isso leva à hipótese de que, se variáveis como tipologia de solos e cobertura vegetal forem consideradas, a divisão por regiões homogêneas pode ser evitada ou reduzida. Isso é particularmente interessante quando a quantidade de postos de observações é pequeno, como no caso em estudo.

Com base nessa premissa, a aplicação de redes neurais à regionalização de vazões, apresentadas a seguir, desconsidera as regiões homogêneas discutidas anteriormente.

7.4 RESULTADOS

Nesta etapa do trabalho, utilizando-se o software QNET, foram analisadas duas arquiteturas de RNA. Na primeira, os neurônios de entradas são formados pela área de drenagem e pelos percentuais de solo de cada uma das bacias (Tabela 7.1). Enquanto na segunda foram considerados os parâmetros físicos e climáticos (Tabela 5.1).

Inicialmente as 31 estações foram reunidas em um único grupo, mas não se obteve sucesso na etapa de validação em virtude da grande diferença entre os valores individuais das vazões médias

. Este fato pode ser explicado pela grande diferença entre os valores individuais das vazões médias, havendo uma tendência a ajustar melhor as vazões elevadas. Então, para obtenção de um melhor ajuste do modelo, o conjunto das estações foi dividido em dois grupos. O primeiro reuniu os postos fluviométricos cujas vazões são superiores a 15m³/s, ficando o segundo grupo com os demais postos. Nesta divisão não se considerou a localização geográfica das estações.

Para cada modelo apresentado a seguir será feito um comparativo com os resultados obtidos no trabalho de regionalização de vazões desenvolvido para a ANEEL. Nesse

trabalho, em virtude da escassez de dados, não foi possível retirar estações para posterior validação do modelo. Com os modelos de redes neurais apresentados a seguir alguns postos foram escolhidos de forma aleatória para a validação, visto que o grau de liberdade resultante da união dos dados permite isso.

Tabela 7.1: Análise do percentual de solo

ESTAÇÃO	%A	%B	%C	%D
Abreus	0,35	0,39	0,00	0,26
Afogados da Ingazeira	0,00	0,00	0,21	0,79
Águas Belas	0,05	0,70	0,00	0,25
Barreiras	0,72	0,21	0,00	0,07
Boqueirão	0,72	0,14	0,00	0,14
Derocal	0,98	0,00	0,00	0,02
Fazenda Bom Jardim	1,00	0,00	0,00	0,00
Fazenda Coqueiro	0,04	0,88	0,00	0,08
Fazenda Macambira	0,66	0,22	0,00	0,12
Fazenda Porto Limpo	0,77	0,03	0,00	0,20
Fazenda Redenção	0,96	0,00	0,00	0,04
Fazenda Refrigério	0,22	0,16	0,00	0,62
Fazenda Rio Verde II	0,11	0,47	0,000	0,42
Flores	0,00	0,00	0,30	0,70
Floresta	0,05	0,00	0,27	0,65
Formosa do Rio Preto	0,96	0,00	0,00	0,04
Ibipetuba	0,81	0,02	0,00	0,17
Ilha Grande	0,02	0,00	0,36	0,62
Inajá	0,40	0,02	0,20	0,38
Jacaré	0,00	0,72	0,24	0,04
Jaguaraci	0,22	0,64	0,00	0,14
Nova Vida	0,94	0,00	0,00	0,06
Nupeba	0,74	0,16	0,00	0,10
Ponte Br 242	0,40	0,11	0,08	0,37
Ponte Serafim	1,00	0,00	0,00	0,00
Santana do Ipanema	0,05	0,68	0,02	0,25
São Sebastião	0,75	0,16	0,00	0,09
Serra Talhada	0,00	0,00	0,29	0,71
Serrinha	0,07	0,00	0,22	0,68
Sítio Grande	0,98	0,00	0,00	0,02
Taguá	0,71	0,18	0,00	0,11

7.4.1 ANÁLISE COM O PERCENTUAL DE SOLO

Nos modelos analisados a seguir foram considerados como parâmetros de entrada a área de drenagem e os percentuais de solos de cada bacia. As estações foram divididas em grupos (I e II) tendo como referência os valores de suas vazões médias.

O Grupo I reúne estações cujas vazões médias variam entre 19 e 272m³/s e áreas contribuintes entre 5.148 e 67.170km². As estações reunidas no Grupo II apresentam vazões entre 1,3 e 13m³/s e suas áreas de drenagem variam entre 2.000 e 12.000km².

7.4.1.1 GRUPO I

As estações reunidas neste grupo apresentam predomínio dos solos A e manchas dos solos B e D, exceto a bacia contribuinte do posto de Floresta onde predomina o solo tipo D.

Para esta etapa do trabalho foram analisadas várias estruturas, sendo que a rede *Perceptron* com uma única camada intermediária foi a que melhor representou o modelo. O esquema adotado é mostrado na Figura 7.1, onde a melhor função de ativação na camada intermediária foi a gaussiana e na camada de saída, a sigmóide.

O modelo gerado levou a excelente resultado tanto na calibração quanto na verificação, com coeficientes de determinação iguais a 0,993 e 0,992, respectivamente. Analisando o peso de cada neurônio, a área contribuinte aos postos (A) foi o parâmetro mais representativo do modelo, apresentando um percentual de contribuição igual a 67,68%, seguido pelo percentual de solos A (%A) com 11%, solos C (%C) com 9,92%, solos D (%D) com 9,70% e solos B (%B) com 1,71%.

Na Tabela 7.2 mostrada a seguir são apresentados os resultados gerados para cada estação. Ressalta-se que na simulação foram retiradas 5 estações para posterior validação.

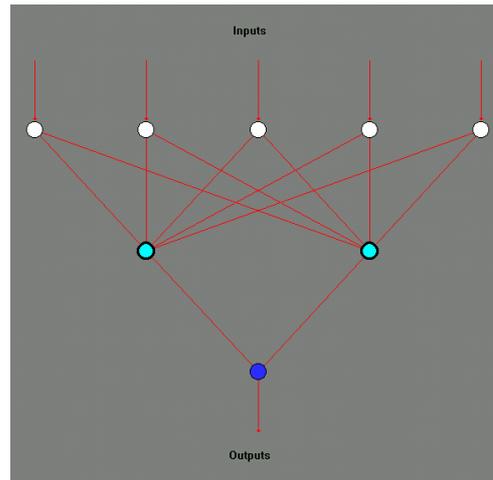


Figura 7.1: Arquitetura da Rede Neural para simulação com percentual de solo – Grupo I

Tabela 7.2: Resultados obtidos na simulação com percentual de solo – Grupo I

ESTAÇÃO	Q_{med}	Q'	%dr	Q''	%d.r.
Barreiras	109,00	103,10	5,41	128,19	-17,61
Boqueirão	272,00	267,59	1,62	288,45	-6,05
Derocal	57,73	52,46	9,14	50,66	12,25
Fazenda Bom Jardim	31,84	53,23	-67,17	34,3	-7,73
Fazenda Macambira	184,00	190,12	-3,32	194,61	-5,77
Fazenda Porto Limpo	91,65	98,86	-7,86	93,02	-1,49
Fazenda Redenção	50,25	47,74	5,00	45,65	9,15
Floresta	19,41	19,19	1,12	17,37	10,51
Formosa do Rio Preto	93,19	83,31	10,61	93,32	-0,14
Ibipetuba	91,18	84,18	7,68	90,43	0,82
Nova Vida ¹	47,46	53,53	-12,80	44,13	7,02
Nupeba ¹	177,00	159,28	10,01	166,63	5,86
São Sebastião ¹	191,00	155,08	18,81	162,77	14,78
Sítio Grande ¹	34,54	47,84	-38,51	42,46	-22,93
Taguá ¹	180,00	166,57	7,46	174,12	3,27

Legenda: Q_{med} : vazão média observada; Q' : vazão gerada pela RNA; Q'' : vazão gerada pelo modelo desenvolvido para a ANEEL e %dr: desvio relativo.

¹ Estação utilizadas para verificação no modelo de RNA

O gráfico a seguir mostra o ajuste dos valores gerados no modelo de rede neurais nas etapas de calibração (Q') e validação (Q''), e por métodos estatísticos usuais (Q''). Da amostra, em 60% dos dados usados para treinamento da RNA os desvios foram menores que os correspondentes ao modelo ajustado por técnica estatística. Na validação os resultados foram um pouco inferiores, com a vantagem de que esses dados não foram usados

no treinamento da rede, mas foram no ajuste do modelo convencional, o que valoriza os resultados obtidos pela RNA.

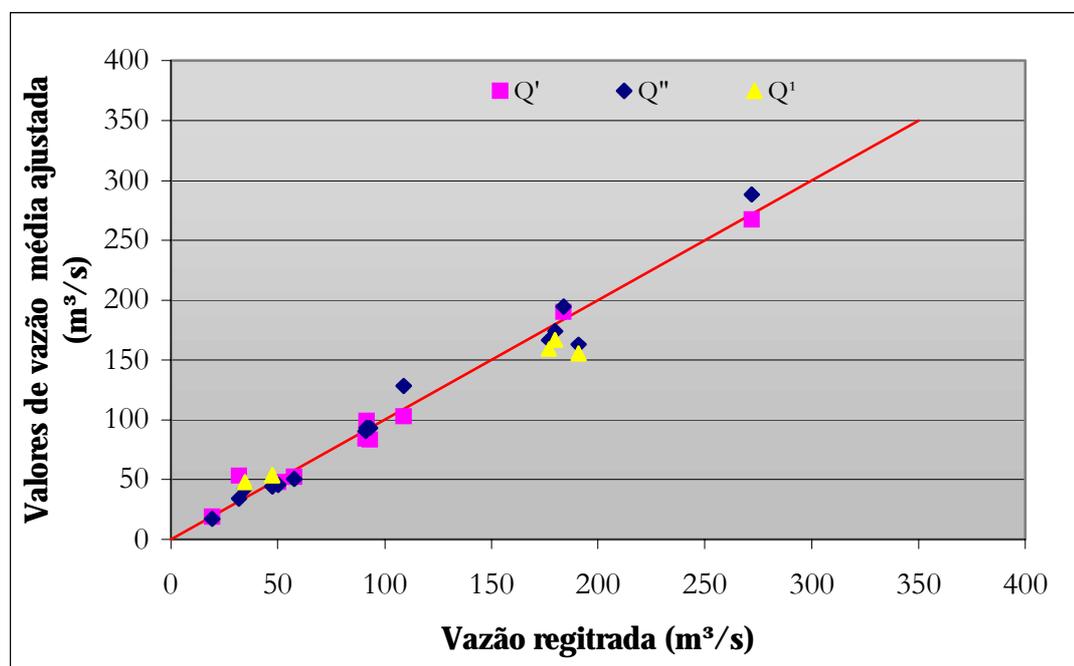


Figura 7.2: Análise dos resultados obtidos

7.4.1.2 GRUPO II

As estações reunidas neste grupo possuem solos predominantes do tipo B ou D, porém há uma presença dos outros tipos de solos.

A arquitetura que melhor representou esse modelo, indicada na Figura 7.3, foi a rede *Perceptron* com duas camadas intermediárias cujas funções de ativação são do tipo gaussiana e na camada de saída a função sigmóide.

A aplicação de RNA apresentou bons resultados tanto no treinamento quanto na validação, apresentando, respectivamente, coeficientes de determinação iguais a 0,999 e 0,806. A maior contribuição das variáveis para esse modelo foi a área (A) cujo peso percentual foi igual a 31,88%, seguido do solo tipo D (%D) com 25,69%, do solo A (%A) com 20,10%, do solo B (%B) com 14,51% e do solo C (%C) com 7,82%.

As estações de Jacaré e Fazenda Coqueiro não foram utilizadas na regionalização hidrológica convencional pois suas curvas adimensionais não possibilitaram o agrupamento

destas em qualquer região homogênea definida. Nesse grupo foram retiradas 4 estações para a verificação do modelo.

A Tabela 7.3 apresenta os resultados gerados e o gráfico dos ajustes com os resultados gerados e o gráfico de ajuste do modelo. Em toda a amostra usada para treinamento da rede os desvios foram menores que os obtidos por métodos estatísticos. Dos 4 postos usados para a validação da RNA, em dois os desvios foram maiores que os correspondentes na calibração do modelo pelo método convencional, enquanto que para os postos de Serrinha e Santana do Ipanema a simulação por RNA trouxe melhor ajuste à vazão medida.

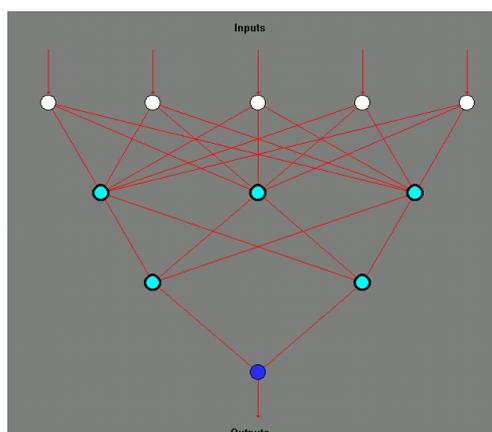


Figura 7.3: Arquitetura da Rede Neural para simulação com percentual de solo – Grupo II

Tabela 7.3: Resultados obtidos na simulação com percentual de solo – Grupo II

Estação	Q_{med}	Q'	%dr	Q''	%dr
Afogados da Ingazeira	2,87	2,97	-3,61	3,07	-6,97
Águas Belas	2,54	2,09	17,62	1,8	29,13
Fazenda Coqueiro	4,67	4,69	-0,45	—	—
Fazenda Refrigério	1,38	1,62	-17,44	2,15	-55,80
Fazenda Rio Verde II	3,45	3,58	-3,70	2,4	30,43
Flores	8,77	8,72	0,59	7,51	14,37
Serra Talhada	13,08	12,93	1,16	12,06	7,80
Ilha Grande	1,40	1,47	-4,70	1,49	-6,43
Inajá	3,26	3,29	-1,05	4,01	-23,01
Jacaré	3,26	3,27	-0,42	—	—
Ponte Br 242 ¹	7,49	9,68	-29,21	7,23	3,47
Ponte Serafim ¹	11,94	7,62	36,21	11,83	0,92
Santana do Ipanema ¹	3,45	3,34	3,15	4,45	-28,99
Serrinha ¹	13,36	13,41	-0,37	14,73	-10,25

Legenda: Q_{med} : vazão média observada; Q' : vazão gerada pela RNA; Q'' : vazão gerada pelo modelo enviado a ANEEL e %dr: desvio relativo.¹ Estação utilizadas para verificação no modelo de RNA

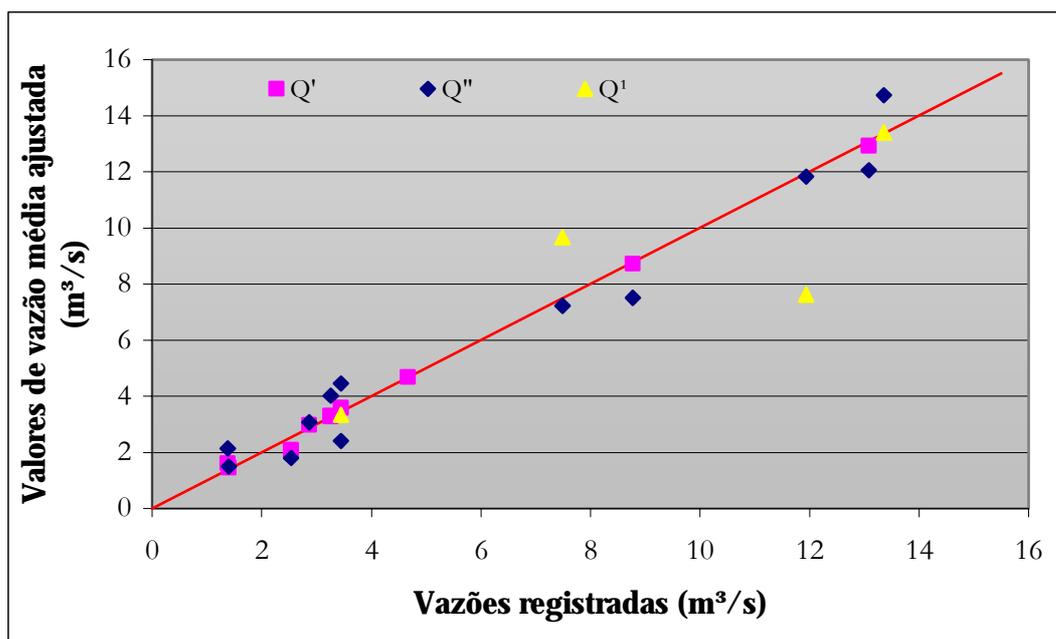


Figura 7.4: análise dos resultados dos modelos

7.4.2 ANÁLISE COMAS CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS DAS BACIAS

Nesta etapa adotou-se a mesma divisão empregada no modelo anterior. Os parâmetros de entrada agora foram, em ordem, a área de drenagem (A), comprimento (Cr) e declividade do rio principal (Dr), densidade de drenagem (Dd), desnível específico (Ds), precipitação total anual (Pta) e precipitação máxima diária (Pmd)

7.4.2.1 GRUPO I

A arquitetura de RNA que melhor representou esse modelo foi a rede *Perceptron* com uma camada intermediária (Figura 7.5) cuja função de ativação foi a gaussiana, e na camada de saída, a sigmóide.

O resultado obtido nesse modelo foi bastante satisfatório. Na etapa de treinamento o coeficiente de determinação foi igual a 0,999 enquanto que na validação esse valor foi de 0,979. A área contribuinte aos postos (A) foi o neurônio com maior peso nessa simulação, onde seu percentual de contribuição foi de 51,10%, seguido pela precipitação total anual (Pta) com 16,53%. Os demais parâmetros obtiveram percentual de contribuição inferior a 10%.

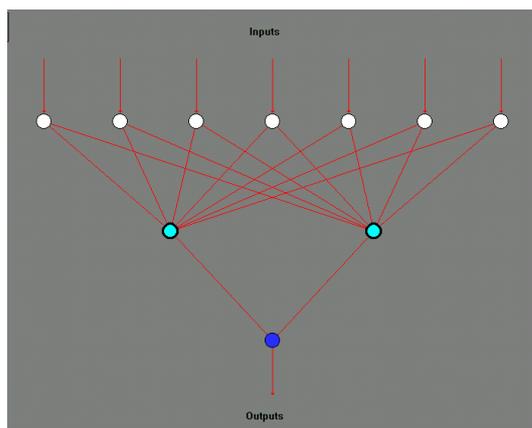


Figura 7.5: Arquitetura da Rede Neural para simulação as características físicas e climáticas – Grupo I

Tabela 7.4: Resultados obtidos na simulação com as características físicas e climáticas – Grupo I

Estação	Q_{med}	Q'	%dr	Q''	%dr
Barreiras	109,00	108,55	0,41	128,19	-17,61
Boqueirão	272,00	266,48	2,03	288,45	-6,05
Derocal	57,73	54,10	6,28	50,66	12,25
Fazenda Bom Jardim	31,84	38,76	-21,74	34,3	-7,73
Fazenda Macambira	184,00	186,67	-1,45	194,61	-5,77
Fazenda Porto Limpo	91,65	91,76	-0,12	93,02	-1,49
Fazenda Redenção	50,25	50,13	0,25	45,65	9,15
Floresta	19,41	18,57	4,32	17,37	10,51
Formosa do Rio Preto	93,19	90,39	3,01	93,32	-0,14
Ibipetuba	91,18	92,40	-1,34	90,43	0,82
Nova Vida ¹	47,46	46,45	2,13	44,13	7,02
Nupeba ¹	177,00	146,10	17,46	166,63	5,86
São Sebastião ¹	191,00	146,28	23,42	162,77	14,78
Sítio Grande ¹	34,54	50,89	-47,33	42,46	-22,93
Taguá ¹	180,00	168,43	6,43	174,12	3,27

Legenda: Q_{med} : vazão média observada; Q' : vazão gerada pela RNA; Q'' : vazão gerada pelo modelo desenvolvido para a ANEEL e %dr: desvio relativo.

¹ Estação utilizadas para verificação no modelo de RNA

De forma geral a qualidade do ajuste manteve a tendência observada, com melhor ajuste para a RNA.

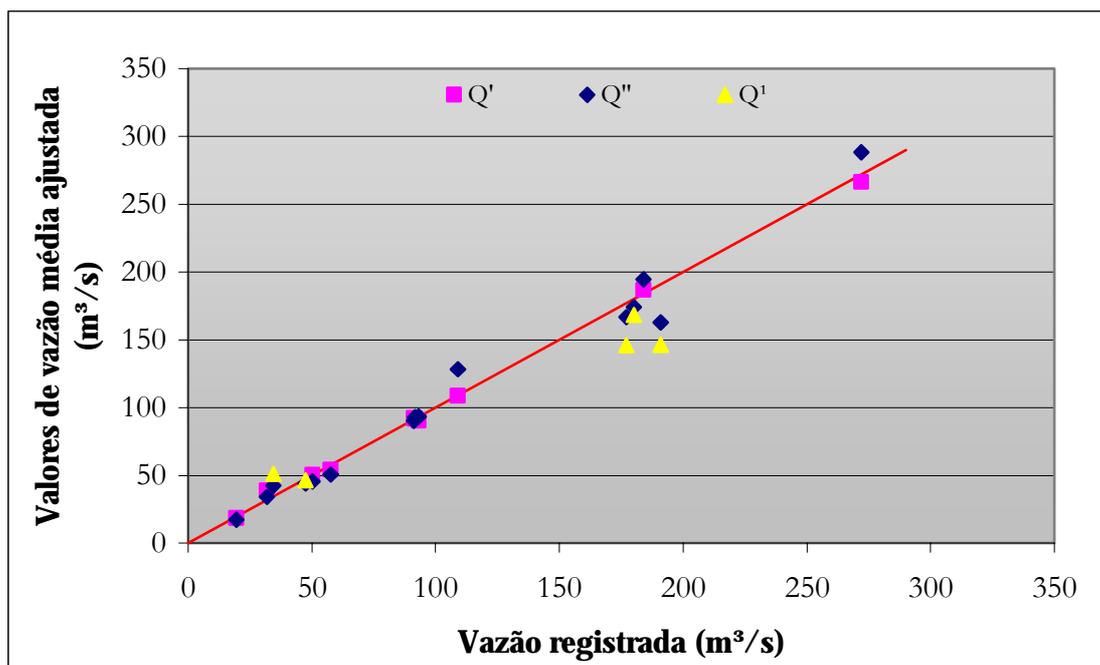


Figura 7.6: análise dos resultados dos modelos

7.4.2.2 GRUPO II

A arquitetura apresentada na Figura 7.7 foi a que melhor representou o modelo. A rede *Perceptron* possui uma camada intermediária cuja função de ativação é a gaussiana e na camada de saída a função sigmóide.

O modelo apresentou na fase de calibração um coeficiente de determinação igual a 0,999 e na verificação esse valor foi de 0,838. Os parâmetros com maiores pesos foram o comprimento do rio principal (C_r) com 27,27% e a densidade de drenagem (D_d) com 17,57%, seguidos da precipitação máxima diária (P_{md}) com 14,01%, da precipitação total anual (P_{ta}) com 12,62%, da declividade do rio principal (D_r) com 12,33%, do desnível específico (D_s) com 9,57% e da área (A) com 6,63%.

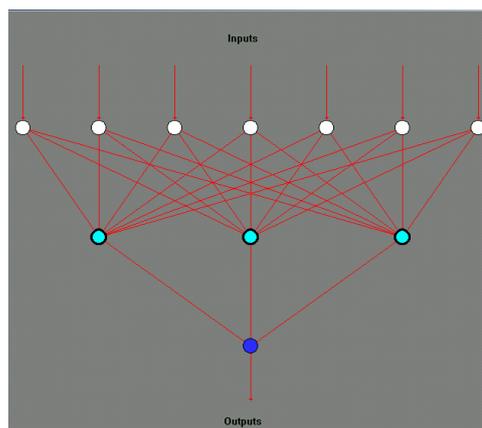


Figura 7.7: Arquitetura da Rede Neural para simulação as características físicas e climáticas – Grupo II

Tabela 7.5: Resultados obtidos na simulação com as características físicas e climáticas – Grupo I

Estação	Q_{med}	Q'	%dr	Q''	%dr
Afogados da Ingazeira	2,87	2,74	4,20	3,07	-6,97
Águas Belas	2,54	2,48	2,02	1,8	29,13
Fazenda Coqueiro	4,67	4,69	-0,59	—	—
Fazenda Refrigério	1,38	1,43	-4,14	2,15	-55,80
Fazenda Rio Verde II	3,45	3,42	0,77	2,4	30,43
Flores	8,77	8,96	-2,20	7,51	14,37
Serra Talhada	13,08	12,77	2,30	12,06	7,80
Ilha Grande	1,40	1,42	-1,95	1,49	-6,43
Inajá	3,26	3,28	-0,86	4,01	-23,01
Jacaré	3,26	3,26	-0,23	—	—
Ponte Br 242 ¹	7,49	3,97	46,92	7,23	3,47
Ponte Serafim ¹	11,94	6,17	48,27	11,83	0,92
Santana do Ipanema ¹	3,45	2,50	27,47	4,45	-28,99
Serrinha ¹	13,36	13,84	-3,63	14,73	-10,25

Legenda: **Q_{med}** : vazão média observada; **Q'**: vazão gerada pela RNA; **Q''** vazão gerada pelo modelo desenvolvido para a ANEEL e **%dr**: desvio relativo.

¹ Estação utilizadas para verificação no modelo de RNA

A comparação entre os resultados das duas metodologias manteve a tendência das análises anteriores.

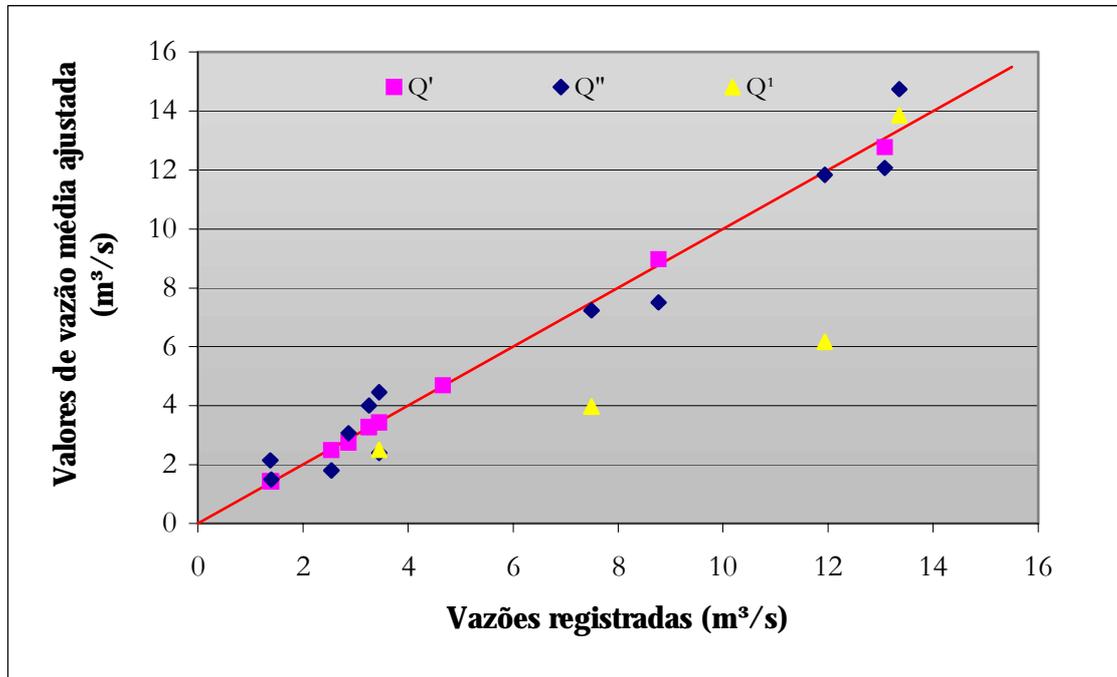


Figura 7.8: análise dos resultados dos modelos

CONCLUSÕES

A elaboração de estudos, planos e projetos de recursos hídricos, bem como a outorga do direito do uso da água, dependem da quantidade e da qualidade dos dados hidrológicos de que se dispõe: quanto maior a série histórica com dados confiáveis, em postos bem distribuídos na bacia hidrográfica e em rede representativa da variabilidade fisioclimática, mais segurança se tem na qualidade dos estudos e procedimentos. Quando não se dispõe da rede de monitoramento adequada, como é o caso de diversas regiões do Brasil e em particular do semi-árido, a regionalização de vazões ou de parâmetros de modelos de simulação surgem como ferramentas imprescindíveis para suprir a deficiência de dados.

Num estudo preliminar realizado pelo Grupo de Recursos Hídricos da UFPE para a ANEEL na região objeto desta pesquisa, cuja área envolve cerca de 320 mil km² na bacia do rio São Francisco, compreendendo as sub-bacias 46, 47, 48 e 49 nos Estados da Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, a regionalização só foi possível em apenas 27% da área em virtude da precariedade dos dados. Esta pesquisa traz como contribuição ao conhecimento sobre o assunto dois aspectos em particular: a) a inserção de novas variáveis no processo de regionalização de vazões; b) o emprego de redes neurais artificiais como ferramenta de cálculo para a geração dos modelos.

Inicialmente, buscou-se verificar a influência da cobertura vegetal no processo de regionalização hidrológica. Para isso, as técnicas de geoprocessamento, que se tornam cada vez mais poderosas e necessárias para o estudo dos recursos naturais, permitiram a utilização da cobertura vegetal como variável explicativa neste estudo. O uso destas variáveis, associadas às características físicas e climáticas, incluindo a tipologia dos solos, quando combinados em quantidade e propriedade adequada a cada caso pode levar à descrição dos processos físicos na bacia de forma muito mais integrada. Assim, a separação em regiões homogêneas, que representa a divisão dos dados já muito escassos, pode vir a ser dispensada.

De forma geral, comprovou-se que as variáveis que descrevem a cobertura vegetal da bacia, bem como a caracterização dos solos, em continuação de trabalho realizado por Barbosa (2002) trouxeram claros benefícios à qualidade dos modelos.

Como alternativa à regionalização das vazões, buscou-se a transferência de parâmetros de um modelo chuva-vazão entre bacias que possuíssem características físicas semelhantes. Essa opção foi feita tendo em vista a maior quantidade de informações de séries pluviométricas, justificando a aplicabilidade do modelo gerado. Na área em estudo, problemas como o desencontro de datas entre as séries hidrológicas, e rede pluviométrica com pouca cobertura espacial levaram à resultados aquém das expectativas. No entanto, apesar da baixa qualidade do resultado não se deve ignorar a validade da metodologia, requerendo-se porém um levantamento de dados que supram a necessidade da análise.

Por fim, em uma nova tentativa de integrar um universo maior de dados e variáveis sem a preocupação em dividir a área em estudo em regiões homogêneas, foi feita a regionalização de vazões utilizando Redes Neurais Artificiais. O estudo de regionalização com todos os postos formando uma única região homogênea foi tentado inicialmente com métodos estatísticos convencionais, porém não se obteve sucesso. No treinamento inicial do modelo de RNA verificou-se tendência do modelo a se ajustar às vazões mais elevadas, obrigando assim a divisão das estações utilizadas em dois agrupamentos de acordo com a magnitude da vazão média de cada posto. Como resultado, foram obtidas melhorias dos índices estatísticos, com maior grau de liberdade dos modelos, o que os torna mais consistentes. Assim, embora os modelos RNA tragam consigo a dificuldade de exigirem o software adequado para a simulação, com o agravante de não conduzirem a fórmulas explícitas de cálculo, tais modelos apresentam bom potencial para a regionalização de vazões em áreas com escassez de dados, como se buscou demonstrar nesse trabalho.

RECOMENDAÇÕES

Do ponto de vista de aplicação dos resultados para outros estudos e projetos, algumas avaliações precisam ser feitas:

- Para a quantificação da vegetação utilizaram-se mapas temáticos elaborados na escala 1:2.000.000, sendo interessante comparação destes resultados com o conhecimento da variação da vegetação ao longo dos anos, fazendo-se uso das imagens de satélites;

- Se não houve sucesso no trabalho de regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos, um levantamento complementar de dados junto a outras instituições como INMET e secretarias estaduais poderiam viabilizar a aplicação da metodologia;

- A análise das variáveis explicativas no modelo de redes neurais merece mais atenção. Dada a gama de variáveis que interferem no processo de escoamento (área da bacia, cobertura vegetal, tipo de solo, precipitação, declividade e comprimento dos rios, densidade de drenagem) um trabalho investigativo da combinação mais apropriada destas variáveis no modelo de redes neurais parece-nos relevante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Bacia do rio São Francisco**. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/Bacias/Sfrancisco/INDEXSF.htm> . Acesso em: agosto/2002.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **HidroWeb- Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: www.hidroweb.ana.gov.br/hidroweb/ . Acesso em: junho/2002.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **HidroWeb - Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <http://hidroweb.aneel.gov.br/hidroweb> . Acesso em: setembro/ 2001.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Sistema de Informações Georreferenciadas de Energia e Hidrologia – HIDROGEO**. Brasília: ANEEL, versão 1.1, 2000, CD-ROM.
- AMORIM, M. C., ROSSATO, L. e TOMASELLA, J. Determinação da evaporação potencial do Brasil aplicando o modelo de Thornthwaite a um sistema de informações geográficas. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 4., n. 3, p.83-90, jul/set de 1999
- ANDRADE, E. M., COSTA, R. N. T., SOUZA, I. H., AQUINO, L. C. e OLIVEIRA, M. S. Regionalização de bacias hidrográficas na região litorânea do Estado do Ceará. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS E V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju. **Gestão de Recursos Hídricos: O Desafio da Prática**. 11 p, CD-ROM.
- ARAÚJO Fº, P. F. e CIRILO, J. A. Regionalização da evapotranspiração para o Estado de Pernambuco. In: II SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 1994, Fortaleza.
- AZEVEDO, J. R. G., TANTON, T. W. e CLARKE, D. Desenvolvimento de um modelo hidrológico empírico-estatístico relacionando clima e vazão. In: V SIMPÓSIO DE RECURSO HÍDRICOS DO NORDESTE, 2000, Natal, 10 p, CD-ROM.

- BARBOSA, I. M. B. R., Contribuição aos Estudos de Regionalização de Vazões a partir do Conhecimento do Meio Físico – Estudo de Caso: bacia do Rio São Francisco. 2002. Dissertação (Mestrado em tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife
- BARBOSA, J. M. S. G., BARBOSA, D. L., ALMEIDA, M. A., COSTA, C. F. L., BRAGA, A. C. F. M. e FIGUEIREDO, E. E. Calibração e validação do modelo SMAP para uma bacia do semi-árido da Paraíba. In: V SIMPÓSIO DE RECURSO HÍDRICOS DO NORDESTE, 2000, Natal, 10 p, CD-ROM
- BARP, A. R. B. e BARBOSA, P. S. F. Comparação entre modelo hidrológico conceitual chuva-vazão (SMAP) e modelo de redes neurais artificiais (RNA). In: IV SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 1999, Coimbra, 18 p., CD-ROM.
- BRAGA, A. P., LUDEMIR, T. B. e CARVALHO, A. C. L. F.. **Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Regionalização Hidrológica de Vazões na Bacia do Rio São Francisco (Sub-Bacias 46, 47, 48 e 49). Relatório. 2002. Brasília.
- BRASIL. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA Solos. **Zoneamento Agroecológico do Nordeste do Brasil: Diagnóstico e Prognóstico**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, n. 14, 2000. CD-ROM.
- BRASIL. SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE- SUDENE. **Plano Integrado de Recursos Hídricos do Nordeste- PLIRHINE/ Análise do Meio Físico e Regionalização**. SUDENE: Recife, 1978, v. 1.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e da Amazônia Legal. Secretaria de Recursos Hídricos. **Regionalização da Vazão Máxima, Mínima e média de Longo Período para a Bacia do rio Paracatu, Minas Gerais**. Viçosa.
- CANNON, A. J. e WHITFIELD, P. H. Downscaling recent streamflow conditions in British Columbia, Canada using ensemble neural network models. **Journal of Hydrology**. 2002, v.259, p.136-151.
- CIRILO, J. A., BALTAR, A. M., ROLIM JR., A. L., TORRES Fº, C.O. e AZEVEDO, J. R. G. Processamento integrado de dados para a análise hidrológica. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v.2, n. 1, p.15-28, jan/jul de 1997

- CIRILO, J. A., AZEVEDO, J. R. G. e MONTENEGRO, S. M. G. L. Modelos de simulação hidrológica aplicados à bacias hidrográficas do Estado de Pernambuco. In: I SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 1992, Recife.
- CLARKE, R. T. Hidrologia Estatística. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciências e Aplicações**. 2ªed., Porto Alegre: Editora da Universidade – ABRH. 2001. p.659-698.
- COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA - CODEVASF. **Os vales**. Vale do São Francisco. Disponível em: <http://www.codevasf.gov.br> . Acesso em: 10/08/2002.
- DINIZ, L. S. e CLARKE, R. T. Regionalização de parâmetros de modelos chuva-vazão usando redes neurais. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS E V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju. **Gestão de Recursos Hídricos: O Desafio da Prática**, CD-ROM
- EUCLYDES, Humberto P. ; SOUZA, Elias F.; FERREIRA, Paulo A.; RUBERT, Og A. V.; SANTOS, Wellington L. RH 3.0 – Regionalização hidrológica Manual do Programa, 1999,149p
- EUCLYDES, H.P., FERREIRA, P. A., RUBERT, O. A. V. e SANTOS, R. M. Regionalização hidrológica na bacia do alto São Francisco à montante da barragem de Três Marias, Minas Gerais. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 6, n. 2, p.81-105, abr/jun de 2001.
- EUCLYDES, H. P., FERREIRA, P. A. e SANTOS, R. M. Regionalização hidrológica na bacia do rio das velhas, Minas Gerais. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS E V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju. **Gestão de Recursos Hídricos: O Desafio da Prática**. 20 p, CD-ROM
- FAVORETO, R. S., ROHN, M. C. e MINE, M. R. M. A técnica de rede neural artificial aplicada na previsão de vazões. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS E V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju. **Gestão de Recursos Hídricos: O Desafio da Prática**.10 p, CD-ROM.
- FERREIRA, J. A. S., MANZI, A. O., ESPÍRITO-SANTO, C. M..Calibração de um Modelo Hidrológico para a Bacia do São Francisco In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE

METEOROLOGIA / VII CONGRESSO LATINO-AMERICANO E IBÉRICO DE METEOROLOGIA. 1998, Brasília.

FINZI, C M., AMARAL, I. R. e VERSIANI, B. R. Regionalização de vazões para as bacias hidrográficas dos rios Carinhanha e Corrente (sub-bacia 45). In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS E V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju. **Gestão de Recursos Hídricos: O Desafio da Prática.** 10 p, CD-ROM.

FREITAS, V. A. L., BARBOSA, I. M. R. B., VIEIRA, H. B. G., ASFORA, M. C. e CIRILO, J. A. Regionalização das sub-bacias 46, 47, 48 e 49 da bacia do São Francisco. In: VI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, Maceió, 2002,

GÓES, V. CAMBOIM e CAMPANA, N. A. C. Regionalização de vazões no Distrito Federal. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS E V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju. **Gestão de Recursos Hídricos: O Desafio da Prática.** 16 p, CD-ROM.

GUIMARÃES JR, J. A., RIGHETTO, A. M. e MELO, J. M. B. G. Aplicação do modelo MODHISA para a geração de vazões médias mensais em rios do semi-árido nordestino. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS E V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju. **Gestão de Recursos Hídricos: O Desafio da Prática.** 10 p, CD-ROM.

IMRIE, C. E., DURUCAN, S. e KORRE, A. River flow prediction using artificial neural networks: generalisation beyond the calibration range. **Journal of Hydrology.** 2000, v. 233, p.138-153.

KHALIL, M., PANU, U.S. e LENNOX, W.C. Groups and neural networks based streamflow data infilling procedures. **Journal of Hydrology.** 2001, V. 241, p.153-176.

KYRILLOS, Daniela S. Sistema de Suporte ao Planejamento dos Recursos Hídricos. Estudo de Caso: Bacia do Rio São Francisco. 2000. 140f.. Dissertação (Mestrado em tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – centro de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

- LANNA, A. E. Elementos de Estatísticas e Probabilidades. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciências e Aplicações**. 2ªed., Porto Alegre: Editora da Universidade – ABRH. 2001. p.79-164.
- LOPES, A. V., NASCIMENTO, A. C., EID, N. J. e CAMPANA, N. A. Simulação hidrológica para estimativa de vazões de projeto na bacia do Alto Corumbá. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS E V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju. **Gestão de Recursos Hídricos: O Desafio da Prática**. 21 p, CD-ROM.
- LUK, K. C., BALL, J. E. e SHARMA, A. A study of optimal model lag spatial inputs to artificial neural networks for rainfall forecasting. **Journal of Hydrology**. 2000, v. 227, p.56-65.
- MACHADO, R., SANTOS, C. M., AGUIAR NETTO, A. O. Caracterização fisiográfica e hidrológica da sub-bacia hidrográfica do riacho da Onça-SE. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS E V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju. **Gestão de Recursos Hídricos: O Desafio da Prática**. 10 p, CD-ROM.
- OBREGON, E., TUCCI, C. E. M. e GOLDENFUM, J. A. Regionalização de vazões com base em séries estendidas: bacias afluentes à Lagoa Mirim, RS. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 4, n. 1, p.57-75, jan/mar de 1999.
- PANDEY, G. R. e NGUYEN, V. T. V A comparative study of regression based methods in regional flood frequency. **Journal of Hydrology**. 1999, v. 225, p.92-101.
- PERNAMBUCO. Secretaria de Tecnologia e Meio Ambiente - SECTMA. Diretoria de Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos**. Recife, 1998, 8v.
- POST, D. A., JONES, J. A. e GRANT, G. E. An improved methodology for predicting the daily hydrologic response of ungauged catchments. **Environmental Modelling & Software**. 1998, v. 13, p.395-403.
- RAMOS, A. M. e GALVÃO, C. O. Estabilidade de redes neurais em modelagem hidrometeorológica. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS E V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju. **Gestão de Recursos Hídricos: O Desafio da Prática**. 20 p, CD-ROM.

- SARMENTO, F. J. Modelagem de séries hidrológicas através de redes de neurônios. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 1, n. 2, p.19-31, jul/dez de 1996.
- SCHURMANN, A. H., FUNKE, R. e SCHULTZ, G. A. Application of a geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling. **Journal of Hydrologic**. 2000, v. 240, p.45-61.
- SEIBERT, J. Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**. 1999, v. 98 e 99, p.279-293.
- SILVA, A. P. L. M., SANTOS, I. A. e ROTUNNO Fº, O. C. Aplicação do modelo RAMS na bacia do rio São Francisco. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS E V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju. **Gestão de Recursos Hídricos: O Desafio da Prática**. 13 p, CD-ROM.
- SILVEIRA, G. L., TUCCI, C. E. M. e SILVEIRA, A. L. L. Quantificação de vazões em pequenas bacias sem dados. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 3, n. 3, p.111-131, jul/set de 1998.
- SOONG, T. T.. **Modelos Probabilísticos em Engenharia e Ciências**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1986, 236p.
- TUCCI, C. E. M., **Regionalização de Vazões**. Porto Alegre: Editora da Universidade, 2002, 256p.
- TUCCI, C. E. M., **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da Universidade – ABRH, 1998, 669p.
- TUCCI, C. E. M.. Regionalização de Vazões. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciências e Aplicações**. 2ªed., Porto Alegre: Editora da Universidade – ABRH. 2001. p.79-164.
- TUCCI, C. E. M. e CLARKE, R. T. Regionalização Hidrológica. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001, p.169-222.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE. Sistema de Informações para Gestão do Meio Ambiente – SIGMA.

- VALENÇA, M. J. S. e LUDEMIR, T. B.. Redes Neurais. In: GALVÃO, C. O.; VALENÇA, M. J. S.. **Sistemas Inteligentes**. Porto Alegre: Editora da Universidade – ABRH, 1999, p.19-96.
- VEIGA , Bruno V.; KRÜGER, Cláudio M. Estudo comparativo das estimativas de vazões com um modelo chuva-vazão e métodos de regionalização. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIII, 1999, Belo Horizonte.
- WOOLDRIDGE, S., KALMA, J. e KUCZERA, G. Parameterization of a simple semi-distributed model for assessing the impact of land-use on hydrologic response. **Journal of Hydrology**. 2001, v. 254, p-16-32.
- XIONG, L. e GUO, S. A two-parameter monthly waterbalance modelo and its application. **Journal of Hydrology**. 1999, v. 216, p.111-123.
- YOKOO, Y., KAZAMA, S., SAWAMOTO, M. e NISHIMURA, H. Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression. **Journal of Hydrology**. 2001, V. 246, p.209-222.
- YU, P. S. e YANG, T. C. Fuzzy multi-objective function for rainfall-runoff modelo calibration. **Journal of Hydrology**. 2000, v. 238, p.1-14.
- ZHANG, B. e GOVINDARAJU, R. S. Geomorphology based artificial neural networks (GANNs) for estimation of direct runoff over watersheds. **Journal of Hydrology**. 2002, p.1-17.