



**EDITAL FAPEMIG 006/2004**

**PRONEX MG - 2**

## **RELATÓRIO FINAL**

**Modelo para a gestão e o planejamento integrados dos  
recursos hídricos visando a revitalização e o  
desenvolvimento sustentável da bacia do São Francisco**

**Processo: EDT - 566/05**

**Coordenador: Fernando Falco Pruski**

**Professor Titular**

**DEA / UFV**

**VIÇOSA - MG**

**MAIO 2008**

## APRESENTAÇÃO

O presente relatório constitui na descrição dos resultados obtidos relativos ao projeto **“Modelo para a gestão e o planejamento integrados dos recursos hídricos visando a revitalização e o desenvolvimento sustentável da bacia do São Francisco”**, e que teve como objetivo principal o desenvolvimento e disponibilização de um modelo baseado em processos e um sistema computacional a ele associado para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, na forma de um modelo sistêmico, capaz de integrar as restrições físicas da bacia ao processo de avaliação de impactos ambientais de vários cenários relativos à dinâmica populacional, à evolução da atividade econômica regional e às mudanças climáticas esperadas em decorrência do efeito estufa.

Constituíram principais objetivos específicos do projeto:

- Estudar o impacto do uso de vazões naturais em estudos hidrológicos.
- Desenvolver metodologia que permita estimar as vazões disponíveis em qualquer posição da bacia hidrográfica do São Francisco.
- Elaborar um software que permita a aplicação e integração dos modelos desenvolvidos.
- Desenvolver um modelo que permita avaliar o impacto das mudanças climáticas na disponibilidade de água na bacia do São Francisco.
- Realizar o zoneamento climático para as principais culturas cultivadas ou com cultivo potencial na bacia, bem como quantificação das necessidades hídricas de cada uma destas culturas.
- Realizar o zoneamento climático considerando as condições de mudanças climáticas advindas do efeito estufa.
- Avaliar o impacto decorrente de diferentes condições de ocupação da bacia na disponibilidade de água e no seu desenvolvimento econômico e social, visando a otimização do uso da água na bacia.
- Avaliar, para as bacias do rio Preto e do ribeirão Entre Ribeiros, do impacto do uso do solo, e das mudanças ocorridas neste, no regime hídrico da bacia.

Tendo em vista a grande diversidade de assuntos abordados no projeto, a apresentação deste relatório está estruturada conforme cada objetivo específico proposto, sendo a ele associada a descrição da metodologia utilizada e dos resultados e conclusões obtidos.

Participaram diretamente do projeto, pela Universidade Federal de Viçosa, os seguintes pesquisadores

<b>Pesquisador</b>	<b>Função</b>
Adonai Bruneli de Camargos	Estudante de Eng. Agrícola e Ambiental
Aristides Ribeiro	Prof. Associado, DEA/UFV
Bruno Marcel Barros da Silva	Estudante de Eng. Ambiental
Cíntia Daniele Alves	Estudante de Economia
Demetrius David da Silva	Prof Associado, DEA/UFV
Eloy Lemos de Mello	Estudante de Doutorado
Fernanda Abreu Oliveira	Estudante de Mestrado
Fernando Falco Pruski	Prof Titular, DEA/UFV
Héber Tormentino de Sousa	Estudante de Mestrado
Isabel Santos Saraiva	Estudante de Eng. Ambiental
João Felipe Souza	Estudante de Ciência da Computação
Jonathas Batista G. Silva	Estudante de Eng. Agrícola e Amb./Bolsista FAPEMIG
José Márcio Alves da Silva	Pós-doutor
Josiane Rosa S. de Oliveira	Estudante de Eng. Agrícola e Ambiental
Juliana Carvalho Figueiredo	Estudante de Engenharia Ambiental
Leonardo F. de Carvalho	Estudante de Ciência da Computação
Luiz Henrique Nobre Bof	Estudante de Eng. Agrícola e Amb./Bolsista FAPEMIG
Marcelo de Oliveira Latuf	Estudante de Mestrado
Márcio Mota Ramos	Prof Titular, DEA/UFV
Mauro Aparecido Martinez	Prof Titular, DEA/UFV
Mirian Cristina M. Ferrão	Estudante de Agronomia
Newton Paulo Bueno	Prof. Associado, DEE/UFV
Nivia Carla Rodrigues	Estudante de Agronomia
Paulo Roberto Cecon	Prof. Associado, DPI/UFV
Renata del Giudice Rodriguez	Estudante de Doutorado
Róbson Alves de Oliveira	Estudante de Eng. Agrícola e Amb. Bolsista FAPEMIG

# ÍNDICE

<b>1. IMPACTO DO USO DE VAZÕES NATURAIS EM ESTUDOS HIDROLÓGICOS</b>	
1.1 - INTRODUÇÃO .....	1.1
1.2 - MATERIAIS E MÉTODOS .....	1.2
1.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	1.4
1.4 - CONCLUSÕES .....	1.7
1.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	1.7
<b>2. DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA QUE PERMITE ESTIMAR AS VAZÕES DISPONÍVEIS EM QUALQUER POSIÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO</b>	
2.1 - INTRODUÇÃO .....	2.1
2.2 - MATERIAL E MÉTODOS .....	2.2
2.2.1 - Desenvolvimento e aplicação à bacia do São Francisco de uma nova proposta de análise para a regionalização de vazões médias e mínimas .....	2.2
2.2.1.1 - Dados utilizados no estudo e seleção do período base .....	2.2
2.2.1.2 - Variáveis dependentes e independentes utilizadas no estudo .....	2.4
2.2.1.2.1 - Variáveis dependentes .....	2.4
2.2.1.2.2 - Variáveis independentes .....	2.5
2.2.1.3 - Métodos de regionalização de vazões aplicados .....	2.7
2.2.1.3.1 - Método tradicional .....	2.8
2.2.1.3.2 - Método da conservação de massa (continuidade de vazões) - MCM .....	2.9
2.2.1.4 - Espacialização das vazões regionalizadas .....	2.11
2.2.1.5 - Análise e comparação dos resultados obtidos pelas diferentes metodologias .....	2.12
2.2.1.5.1 - Erro relativo .....	2.12
2.2.1.5.2 - Análise da descontinuidade de vazões .....	2.12
2.2.1.5.3 - Indicadores utilizados para a análise do comportamento dos modelos .....	2.13
2.2.1.6 - Alternativa proposta para minimizar o uso da extrapolação das equações de regionalização obtidas .....	2.14
2.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	2.15
2.3.1 - Regionalização da vazão média de longa duração .....	2.15
2.3.1.1 - Análise com base nos erros relativos .....	2.16
2.3.1.2 - Análise da continuidade de vazões .....	2.24
2.3.1.3 - Análise com base no coeficiente de escoamento superficial .....	2.26
2.3.1.3.1 - Seleção do método pelo coeficiente de escoamento .....	2.26
2.3.1.3.2 - O uso do coeficiente de escoamento para a adequação da extrapolação das equações de regionalização .....	2.35
2.3.1.4 - Método e variáveis selecionadas para a regionalização da vazão média de longa duração .....	2.39
2.3.1.5 - Análise da regionalização da vazão média de longa duração para a calha do São Francisco .....	2.44
2.3.2 - Regionalização das vazões mínimas .....	2.53
2.3.2.1 - Regionalização da vazão associada à permanência de 95% - $Q_{95}$ .....	2.54
2.3.2.1.1 - Análise com base nos erros relativos .....	2.54
2.3.2.1.2 - Análise com base na vazão específica referente à $Q_{95}$ .....	2.61
2.3.2.1.2.1 - Seleção do método pela vazão específica referente à $Q_{95}$ .....	2.61

2.3.2.1.2.2 - O uso da vazão específica para a adequação da extrapolação das equações de regionalização .....	2.70
2.3.2.1.3 - Método e variáveis selecionadas para a regionalização da $Q_{95}$ .....	2.73
2.3.2.1.4 - Análise da regionalização da $Q_{95}$ para a calha do São Francisco .....	2.74
2.3.2.2 - Regionalização da vazão associada à permanência de 90% - $Q_{90}$ .....	2.80
2.3.2.3 - Regionalização da $Q_{7,10}$ .....	2.82
2.4 - CONCLUSÕES .....	2.85
2.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	2.85

### **3. ELABORAÇÃO DE SOFTWARE QUE PERMITE ESTIMAR A DISPONIBILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO SÃO FRANCISCO**

3.1 - INTRODUÇÃO .....	3.1
3.2 - MATERIAIS E MÉTODOS .....	3.1
3.2.1 - Desenvolvimento do software .....	3.1
3.2.2 - Metodologia de codificação de bacias hidrográficas proposta por Otto Pfafstetter .....	3.1
3.2.3 - Estimativa da disponibilidade hídrica .....	3.3
3.3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	3.3
3.3.1 - Caracterização do software.....	3.3
3.3.2 - Sobreposição de camadas .....	3.5
3.3.3 - Busca e localização da seção de interesse .....	3.6
3.3.4 - Barra de ferramentas.....	3.7
3.2 - CONCLUSÕES .....	3.9
3.3 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	3.9

### **4. DESENVOLVIMENTO DE MODELO QUE PERMITE AVALIAR O IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NA BACIA DO PARACATU**

4.1 - INTRODUÇÃO .....	4.1
4.2 - METODOLOGIA .....	4.3
4.2.1 - Vazões mínimas das séries históricas e precipitação média anual .....	4.3
4.2.2 - Modelo para estimativa de vazões mínimas a partir de dados pluviométricos .....	4.3
4.2.3 - Modelo de previsão de mudanças climáticas e <i>downscaling</i> .....	4.6
4.2.4 - Obtenção das vazões mínimas para as próximas décadas .....	4.7
4.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	4.8
4.4 - CONCLUSÕES .....	4.11
4.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	4.11

### **5. REALIZAÇÃO DE ZONEAMENTO CLIMÁTICO PARA AS PRINCIPAIS CULTURAS CULTIVADAS OU COM CULTIVO POTENCIAL NA BACIA, BEM COMO QUANTIFICAÇÃO DAS NECESSIDADES HÍDRICAS DE CADA UMA DESTAS CULTURAS**

5.1 - INTRODUÇÃO .....	5.1
5.2 - MATERIAL E MÉTODOS .....	5.2
5.3 - RESULTADOS .....	5.7
5.3.1 - Caracterização Climática da Bacia do São Francisco .....	5.7
5.3.2 - Zoneamentos Agroclimáticos.....	5.11
5.3.2.1 - Algodão .....	5.11
5.3.2.2 - Banana.....	5.12
5.3.2.3 - Café Arábica.....	5.13
5.3.2.4 - Café Robusta .....	5.14

5.3.2.5 - Cana-de-açúcar.....	5.16
5.3.2.6 - Coco Anão.....	5.17
5.3.2.7 - Feijão-Comum.....	5.18
5.3.2.7.1 - Feijão (plantado no mês de janeiro).....	5.18
5.3.2.7.2 - Feijão (plantado no mês de maio).....	5.20
5.3.2.7.3 - Feijão (plantado no mês de setembro).....	5.22
5.3.2.8 - Laranja.....	5.23
5.3.2.9 - Mamona.....	5.25
5.3.2.10 - Mandioca.....	5.26
5.3.2.11 - Milho.....	5.27
5.3.2.11.1 - Milho (plantado no mês de outubro).....	5.27
5.3.2.11.2 - Milho (plantado no mês de fevereiro).....	5.29
5.3.2.11.3 - Milho (plantado no mês de agosto).....	5.30
5.3.2.11.4 - Milho (plantado no mês de dezembro).....	5.31
5.3.2.12 - Soja.....	5.32
5.3.2.12.1 - Soja (plantada no mês de novembro).....	5.32
5.3.2.12.2 - Soja (plantada no mês de fevereiro).....	5.34
5.4 - CONCLUSÕES.....	5.35
5.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	5.35

## **6. REALIZAÇÃO DE ZONEAMENTO CLIMÁTICO CONSIDERANDO AS CONDIÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS ADVINDAS DO EFEITO ESTUFA**

6.1 - INTRODUÇÃO.....	6.1
6.2 - MATERIAL E MÉTODOS.....	6.1
6.3 - RESULTADOS.....	6.5
6.3.1 - Caracterização climática da bacia do São Francisco para cenários de mudanças climáticas.....	6.5
6.3.1.1 - Temperatura média anual.....	6.5
6.3.2 - Precipitação média anual.....	6.8
6.3.3 - Radiação média anual.....	6.12
6.3.4 - Umidade relativa do ar média anual.....	6.15
6.3.5 - Velocidade do vento média anual.....	6.19
6.3.6 - Déficit hídrico médio anual.....	6.22
6.4 - Aptidão agrícola para cenários de alterações climáticas.....	6.26
6.4.1 - Algodão.....	6.26
6.4.2 - Banana.....	6.29
6.4.3 - Café arábica.....	6.33
6.4.4 - Café robusta.....	6.37
6.4.5 - Cana de açúcar.....	6.40
6.4.6 - Coco-anão.....	6.44
6.4.7 - Feijão comum.....	6.47
6.4.7.1 - Feijão (plantado no mês de janeiro).....	6.47
6.4.7.2 - Feijão (plantado no mês de maio).....	6.51
6.4.7.3 - Feijão (plantado no mês de setembro).....	6.55
6.4.8 - Laranja.....	6.58
6.4.9 - Mamona.....	6.62
6.4.10 - Mandioca.....	6.65
6.4.11 - Milho.....	6.69
6.4.11.1 - Milho (plantado no mês de outubro).....	6.69
6.4.11.2 - Milho (plantado no mês de fevereiro).....	6.73
6.4.11.3 - Milho (plantado no mês de agosto).....	6.76

6.6.11.4 - Milho (plantado no mês de dezembro).....	6.80
6.4.12 - Soja.....	6.83
6.4.12.1 - Soja (plantada no mês de novembro).....	6.83
6.4.12.2 - Soja (plantada no mês de fevereiro).....	6.86
6.7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	6.90

## **7. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DECORRENTE DE DIFERENTES CONDIÇÕES DE OCUPAÇÃO DA BACIA NA DISPONIBILIDADE DE ÁGUA E NO SEU DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, VISANDO A OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA NA BACIA**

7.1 - INTRODUÇÃO .....	7.1
7.2 - REVISÃO DE LITERATURA.....	7.2
7.3 - METODOLOGIA .....	7.4
7.3.1 - Noções básicas de dinâmica de sistemas.....	7.4
7.3.2 - A abordagem de dinâmica de sistemas e os arquétipos sistêmicos .....	7.9
7.3.3 - Modos fundamentais de comportamentos dinâmicos.....	7.11
7.3.3.1 - Crescimento exponencial .....	7.11
7.3.3.2 - Tendência à meta.....	7.14
7.3.4 - Interação dos modos fundamentais de comportamento dinâmicos: crescimento em padrão logístico .....	7.16
7.4 - RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	7.17
7.4.1 - Bacia do rio Paracatu.....	7.17
7.4.1.1 - Análise das condições gerais de vida .....	7.17
7.4.1.2 - Caracterização geral .....	7.18
7.4.1.3 - Extrapolação de tendências demográficas e identificação de pontos potenciais de conflitos no uso de água .....	7.23
7.4.1.3.1 - Descrição do modelo de simulação .....	7.23
7.4.1.3.2 - Resultados das simulações.....	7.28
7.4.1.4 - Conclusões .....	7.33
7.4.2 - Bacia do rio Verde Grande .....	7.35
7.4.2.1 - Análise das condições gerais de vida.....	7.35
7.4.2.2 - Caracterização geral .....	7.36
7.4.2.3 - Extrapolação de tendências demográficas e identificação de pontos potenciais de conflitos no uso de água .....	7.43
7.4.2.3.1 - Descrição do modelo de simulação .....	7.44
7.4.2.3.2 - Simulações .....	7.47
7.4.2.4 - Conclusões .....	7.54
7.4.3 - Bacia do rio das Velhas .....	7.55
7.4.3.1 - Caracterização geral .....	7.55
7.4.3.2 - Análise das condições gerais de vida .....	7.56
7.4.3.2.1 - Grau de urbanização .....	7.58
7.4.3.2.2 - Educação.....	7.60
7.4.3.2.3 - Saúde.....	7.61
7.4.3.2.4 - Atividades econômicas .....	7.62
7.4.3.2.5 - Infra-estrutura regional .....	7.65
7.4.3.2.6 - Problemas ambientais na bacia .....	7.66
7.4.3.2.7 - Usos múltiplos dos recursos hídricos.....	7.67
7.4.3.2.8 - Abastecimento de água e diluição de efluentes .....	7.68
7.4.3.2.9 - Irrigação .....	7.68
7.4.3.2.10 - Industrial .....	7.69
7.4.5.1.11 - Mineração .....	7.69

7.4.3.2.12 - Identificação de conflitos potenciais.....	7.70
7.4.3.3 - O modelo básico de simulação.....	7.71
7.4.3.4 - Simulações .....	7.74
7.4.3.5 - Conclusões .....	7.76
7.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	7.77

## **8. AVALIAÇÃO, PARA AS BACIAS DO RIO PRETO E DO RIBEIRÃO ENTRE RIBEIROS, DO IMPACTO DO USO DO SOLO E DAS MUDANÇAS OCORRIDAS NESTE NO REGIME HÍDRICO DAS BACIAS**

8.1 - INTRODUÇÃO .....	8.1
8.2 - MATERIAL E MÉTODOS .....	8.2
8.2.1 - Uso do solo nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros .....	8.2
8.2.2 - Processamento digital das imagens .....	8.6
8.2.3 - Realce de histograma.....	8.8
8.2.4 - Filtragem.....	8.10
8.2.5 - Registro de imagens .....	8.10
8.2.6 - Segmentação .....	8.12
8.2.7 - Definição de amostras representativas .....	8.13
8.2.8 - Classificação automática .....	8.15
8.2.9 - Verificação da exatidão da classificação automática .....	8.16
8.2.10 - Monitoramento do uso do solo nas bacias.....	8.17
8.2.11 - Análise do comportamento hidrológico nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros.....	8.17
8.2.12 - Seleção do período de análise e preenchimento de falhas.....	8.18
8.2.13 - Análise de estacionariedade das séries .....	8.19
8.2.14 - Vazões médias, máximas e mínimas .....	8.20
8.2.15 - Análise de precipitações .....	8.20
8.2.16 - Análise de tendências das variáveis hidrológicas.....	8.20
8.2.17 - Estudo da associação entre vazões e uso do solo .....	8.21
8.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	8.24
8.3.1 - Mudanças ocorridas no uso do solo.....	8.24
8.3.2 - Análise do comportamento das variáveis hidrológicas .....	8.36
8.3.3 - Associações entre modificações no uso do solo e comportamento hidrológico ...	8.42
8.3.3.1 - Vazões máximas .....	8.42
8.3.3.2 - Vazões mínimas .....	8.48
8.3.3.3 - Vazões médias.....	8.56
8.4 - CONCLUSÕES .....	8.60
8.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS .....	8.61

# **CAPÍTULO 1**

## **IMPACTO DO USO DE VAZÕES NATURAIS EM ESTUDOS HIDROLÓGICOS**

Fernanda Abreu Oliveira

Eloy Lemos de Mello

Juliana Carvalho Figueiredo

Fernando Falco Pruski

Renata del Giudice Rodriguez

## 1.1 - INTRODUÇÃO

A Operadora Nacional do Sistema Elétrico (ONS), bem como outras instituições envolvidas no planejamento e gestão de recursos hídricos, têm dedicado grande atenção à reconstituição de séries de vazões naturais. Eles a consideram fundamental para o planejamento de recursos hídricos, uma vez que permite representar as condições naturais existentes na bacia (ONS, 2003). Por ser este um assunto de preocupação recente, pouco se conhece sobre o impacto do uso dessas vazões em estudos hidrológicos.

A bacia do Paracatu, que está localizada no trecho médio do São Francisco, corta os Estados de Minas Gerais e de Goiás e o Distrito Federal. A sua área de drenagem possui 45.600 km<sup>2</sup>, dos quais 92% estão no polígono mineiro (Ferreira e Euclides, 1997). A importância dessa bacia se deve ao fato de que o seu maior rio, o Paracatu, é também o maior afluente do São Francisco, contribuindo com cerca de 40% da vazão do São Francisco no ponto de intersecção desses dois rios (Brasil, 1996, citado por Rodriguez, 2004).

A interferência humana, seja por meio de ações consuntivas ou não consuntivas, pode alterar o regime hidrológico. A década de setenta do século passado foi marcada pelo início da aplicação de incentivos governamentais na bacia do Paracatu, devido, principalmente, ao clima seco da região, que restringia o avanço da exploração agropecuária. Naquela época, o principal uso de água na bacia era o abastecimento animal, o qual respondia por 63% do total. A construção dos canais de irrigação na região modificou o quadro de consumo de água, sendo que no ano de 1996 a irrigação passou a representar 87% da vazão de consumo da bacia. Devido ao desenvolvimento da região, o consumo de água aumentou 11 vezes em 27 anos (Rodriguez, 2004). E este consumo tem forte tendência a seguir aumentando, devido às crescentes demandas por alimento e por infra-estrutura na região.

Os estudos hidrológicos contemplam o cálculo de diferentes tipos de vazão. A vazão máxima está associada às condições de inundação do local e é utilizada no dimensionamento de obras hidráulicas. A vazão média de longa duração permite quantificar a disponibilidade de água na bacia e calcular o volume de regularização. Já a vazão mínima é utilizada na avaliação da disponibilidade hídrica, na elaboração de projetos de irrigação e de energia elétrica e concessão de uso da água para uma dada finalidade (Pruski et al., 2006).

O presente trabalho teve como objetivo estudar o impacto do uso de vazões naturais em relação às vazões observadas em 21 seções da bacia do Paracatu para fins de estudos hidrológicos.

## 1.2 - MATERIAIS E MÉTODOS

Foram escolhidas para o estudo 21 estações fluviométricas situadas na bacia do Paracatu (Figura 1.1) pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional das Águas (ANA), sendo as vazões aquelas medidas em cada uma destas seções. Foi utilizada uma série histórica de 25 anos (período-base de 1976 a 2000) com dados de vazões diárias.

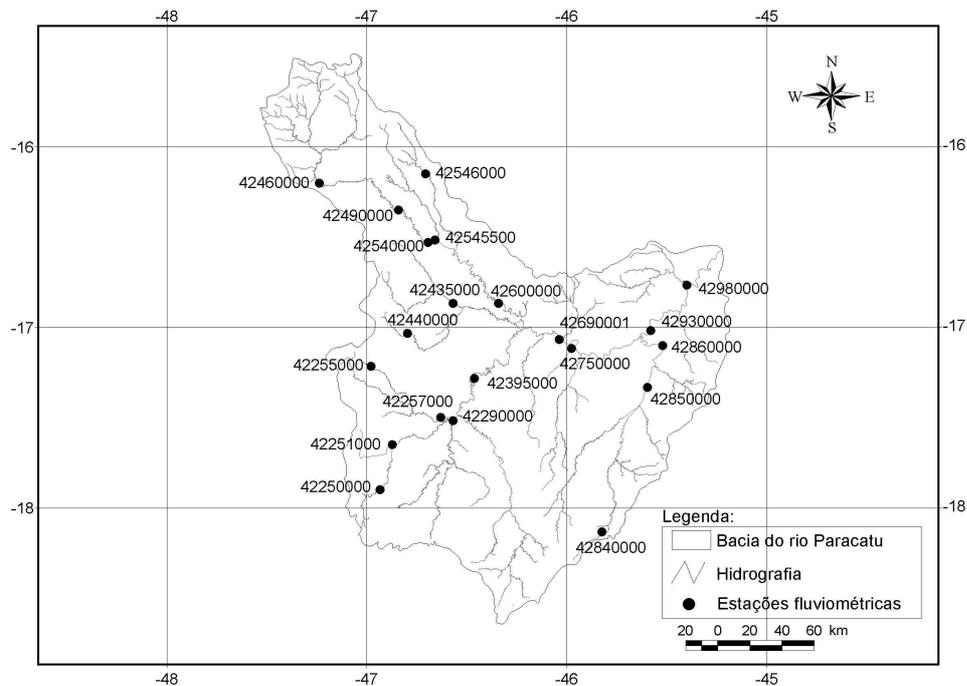


Figura 1.1. Localização das estações fluviométricas na bacia do Paracatu.

As vazões naturais foram estimadas pela equação

$$Q_{\text{nat}} = Q_{\text{obs}} + Q_{\text{consumo}} \quad (1.1)$$

em que  $Q_{\text{nat}}$  = vazão natural ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $Q_{\text{obs}}$  = vazão observada ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ); e  $Q_{\text{consumo}}$  = vazão de consumo ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ).

Para a obtenção da vazão de consumo foi utilizada a metodologia apresentada por Rodriguez et al. (2006), na qual sua estimativa foi definida para quatro segmentos de usuário: irrigação, abastecimento animal e abastecimento humano urbano e rural. Essa metodologia foi também utilizada no trabalho de reconstituição de vazões naturais desenvolvido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico. A estimativa da vazão natural deve ser igual ou superior à da vazão observada em qualquer situação, já que ela resulta de uma adição onde nenhum dos seus fatores pode adquirir valor negativo.

O *software* Siscah - versão beta - (Sistema Computacional de Análise Hidrológica), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), foi utilizado para estimar as vazões máxima, média de longa duração e mínima. Foram utilizados três índices para representar as vazões mínimas:  $Q_{7,10}$ ;  $Q_{95}$  e  $Q_{90}$ .

A vazão máxima foi ajustada à função de distribuição de probabilidade de Gumbel (Haan, 1977), considerando um período de retorno de 100 anos; já a vazão mínima  $Q_{7,10}$  foi ajustada à função Lognormal tipo III e Logpearson tipo III. Os índices  $Q_{95}$  e  $Q_{90}$  foram obtidos a partir da curva de permanência, utilizando análise de frequência com 50 classes.

As estimativas de vazão natural e observada serviram como base para o cálculo de um índice que permite estimar o impacto do uso de vazões naturais em substituição às vazões observadas. Esse índice é caracterizado neste trabalho como delta ( $\Delta$ ), sendo expresso pela equação

$$\Delta(\%) = \left( \frac{Q_{\text{nat}} - Q_{\text{obs}}}{Q_{\text{nat}}} \right) 100 \quad (1.2)$$

em que  $\Delta(\%)$  = delta;  $Q_{\text{nat}}$  = vazão natural ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ); e  $Q_{\text{obs}}$  = vazão observada ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ).

A análise do impacto do uso das vazões naturais em substituição às vazões observadas foi realizada para as vazões máxima, média de longa duração e mínimas. A escolha desses tipos de vazão se deve à importância delas em quaisquer estudos hidrológicos.

No intuito de verificar o grau de correlação entre o valor do delta e o tamanho da área de drenagem das seções da bacia do Paracatu, calculou-se o coeficiente de Pearson entre essas variáveis.

Foi realizada a análise estatística descritiva para os deltas calculados. Em relação às análises de inferência, foi verificada a significância do delta para cada tipo de vazão por meio do teste t pareado, o qual comparou vazões naturais e vazões observadas. O teste t de Student foi utilizado para comparar as médias dos deltas dos diferentes tipos de vazão. Por último, foi testada a significância dos graus de correlação pelo teste t de Student. Adotou-se em todos os testes um nível de significância de 5%.

Como forma de avaliar o comportamento do delta frente à magnitude da vazão natural, foi construído um gráfico, ajustando um modelo. Foram utilizados como pontos para esta curva as seguintes vazões: máxima, média de longa duração, vazões mínimas ( $Q_{7,10}$ ;  $Q_{95}$  e  $Q_{90}$ ) e quatro vazões da curva de permanência ( $Q_{80}$ ,  $Q_{70}$ ,  $Q_{60}$  e  $Q_{50}$ ).

### 1.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 1.1 apresenta os valores dos deltas calculados para cada tipo de vazão em cada estação fluviométrica. No caso das vazões máximas, o impacto é inexpressivo para fins de utilização em estudos hidrológicos, sendo que sete estações apresentaram deltas iguais a 0,00%. A média desse impacto foi de 0,01%, atingindo o máximo de 0,04% (estação 42257000) e o mínimo de -0,01% (estação 42460000). Somente uma estação apresentou o valor de delta negativo, mostrando que, neste caso específico, a vazão natural máxima ajustada foi inferior à observada. Esse comportamento não era esperado, já que a vazão natural é sempre igual ou superior à observada. No entanto, a partir da análise dos dados originais, pôde-se evidenciar que este comportamento está associado ao ajuste da função de distribuição utilizada. Analisando o modelo de Gumbel (Haan, 1977) e considerando um mesmo período de retorno e número de dados para as vazões naturais e observadas, a explicação desse resultado atípico se focaliza no desvio-padrão das vazões naturais e observadas. Nesse caso, o desvio-padrão das vazões observadas ( $159,77 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) foi ligeiramente superior ao das vazões naturais ( $159,72 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), o que explica um maior valor ajustado para as vazões observadas.

O impacto do uso das vazões naturais máximas em estudos hidrológicos foi considerado significativo estatisticamente ( $\alpha = 5\%$ ). A estatística utilizada para comprovar a significância desse impacto, ou seja, do delta, mostrou que mesmo os valores próximos à zero (delta médio das vazões máximas foi de 0,01%) foram considerados significativos. Isso se deve à paridade entre os desvios-padrões das vazões naturais e das observadas, que faz com que o valor de t calculado se eleve e, conseqüentemente, reduza, a baixos níveis, a probabilidade de aceitação da hipótese nula.

As vazões médias de longa duração mostraram ser mais suscetíveis às alterações antrópicas que as vazões máximas. O seu delta médio foi de 0,66%, com um coeficiente de variação de 30%, aproximadamente. A análise estatística mostra que o impacto do uso das vazões naturais de média longa duração também foi significativo ao nível de 5%, sendo que os desvios-padrões das vazões naturais e observadas também apresentaram a mesma paridade observada para o caso das vazões máximas. No entanto, para fins de estudos hidrológicos, as magnitudes dos deltas, tanto daqueles observados nas vazões máximas quanto nas médias de longa duração, não devem gerar grandes preocupações quando da utilização das vazões naturais na estimativa destes tipos de vazão.

As vazões mínimas, de uma maneira geral, foram aquelas que apresentaram o maior impacto quando do uso das vazões naturais. Sabe-se que a  $Q_{7,10}$  é a mais restritiva dentre as

três apresentadas, apresentando os menores valores de vazão; já a Q<sub>95</sub> é mais restritiva que a Q<sub>90</sub>. A vazão mínima Q<sub>7,10</sub> teve o maior valor de delta (5,76%) dentre todas as outras estudadas, mostrando que o impacto do uso de vazões naturais é mais expressivo quando do uso dessa vazão. Já a Q<sub>95</sub> apresentou um delta médio de 5,45% e a Q<sub>90</sub> de 4,26%. A variação dos deltas foi de 35 a 57% entre as estações estudadas. Os deltas desses três índices foram também considerados significativos estatisticamente e foram bem mais expressivos que os das vazões máxima e média de longa duração, mostrando que as vazões mínimas estão mais suscetíveis a sofrerem reduções quando da interferência humana no meio ambiente.

Quadro 1.1. Valores de delta para os cinco tipos de vazão estudados, graus de correlação entre a área de drenagem (Ad) e o delta e resultados estatísticos

Estações	Ad (km <sup>2</sup> )	Q max	Qmld	Q <sub>90</sub>	Q <sub>95</sub>	Q <sub>7,10</sub>
42250000	470	0,01%	0,31%	2,60%	0,63%	3,61%
42251000	1840	0,01%	0,49%	3,96%	5,50%	8,49%
42255000	257	0,00%	0,85%	3,37%	3,55%	6,25%
42257000	2013	0,04%	0,92%	4,43%	6,89%	7,30%
42290000	7720	0,01%	0,63%	3,42%	4,56%	5,13%
42395000	12880	0,02%	0,48%	3,27%	4,83%	4,99%
42435000	1594	0,01%	1,11%	10,74%	16,50%	8,64%
42440000	533	0,00%	0,59%	3,83%	6,07%	6,31%
42460000	4250	-0,01%	0,60%	1,68%	2,88%	3,32%
42490000	5770	0,01%	0,76%	2,97%	3,91%	4,84%
42540000	5840	0,01%	0,71%	4,46%	2,92%	3,20%
42545500	704	0,00%	0,81%	6,67%	9,18%	4,56%
42546000	503	0,00%	0,90%	6,65%	4,26%	4,64%
42600000	9370	0,01%	0,68%	4,50%	4,22%	4,74%
42690001	29060	0,02%	0,75%	4,52%	7,05%	6,64%
42750000	30230	0,02%	0,71%	4,51%	4,87%	5,13%
42840000	190	0,00%	0,31%	1,33%	3,08%	2,74%
42850000	4350	0,00%	0,35%	4,59%	5,55%	8,38%
42860000	5660	0,00%	0,63%	4,19%	6,89%	10,45%
42930000	39640	0,01%	0,67%	3,77%	5,10%	5,62%
42980000	40300	0,01%	0,64%	4,09%	6,06%	5,95%
<b>Média</b>		0,01% * d	0,66% * c	4,26% * b	5,45% * a,b	5,76% * a
<b>C.V. (%)</b>		116,19	30,62	45,87	57,43	34,86
<b>Máximo</b>		0,04%	1,11%	10,74%	16,50%	10,45%
<b>Mínimo</b>		-0,01%	0,31%	1,33%	0,63%	2,74%
<b>Correlação: Δ e Ad</b>		0,28 <sup>NS</sup>	0,02 <sup>NS</sup>	-0,07 <sup>NS</sup>	0,01 <sup>NS</sup>	0,00 <sup>NS</sup>

Q<sub>max</sub> = vazão máxima; Q<sub>mld</sub> = vazão média de longa duração; C.V. = coeficiente de variação; \* Significativo ao nível de 5% pelo teste t de Student; NS - Não significativo ao nível de 5% pelo teste t de Student; e médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste t de Student ( $\alpha = 5\%$ ).

Na comparação estatística entre as médias dos deltas dos cinco tipos de vazão, pode-se observar que o impacto gerado pelo uso das vazões naturais da Q<sub>7,10</sub> não diferiu estatisticamente daquele observado na Q<sub>95</sub>; mas ele foi superior e, portanto, diferente de todos os outros impactos analisados. Já o delta da Q<sub>95</sub> não diferiu também do da Q<sub>90</sub>, porém se

distinguiu dos da média de longa duração e da máxima. As vazões média de longa duração e máxima possuem deltas que diferenciam entre si e de quaisquer outros estudados. De uma maneira geral, pode-se dizer que as vazões mínimas sofreram os maiores impactos; a média de longa duração, um impacto intermediário, porém bem reduzido; e a máxima, o menor deles, sendo evidenciada diferença estatística entre o impacto das vazões mínimas, média de longa duração e máxima.

Os graus de correlação observados no Quadro 1.1 são todos muito baixos, variando de 0,28 a -0,07. De acordo com a análise estatística realizada, infere-se que não existe relação linear entre o tamanho da área de drenagem e a magnitude do delta, já que todos os coeficientes foram considerados não significativos. Portanto, não se pode associar a intensidade do impacto do uso das vazões naturais com o tamanho das bacias hidrográficas.

De uma maneira geral, nota-se que os tipos de vazão de maior magnitude conduziram a valores menores de delta. Pelo Quadro 1.1 é possível verificar que os menores valores de delta de cada estação corresponderam sempre à vazão máxima e que os maiores às vazões mínimas. Houve um aumento gradual dos deltas em função da redução da magnitude da vazão. O comportamento do delta em função da vazão natural segue um modelo potencial não se enquadrando em uma regressão linear (Figura 1.2). A equação gerada apresentou um bom ajuste dos dados, com um coeficiente de determinação de 0,9842 e declividade negativa, conforme evidenciada na equação:

$$\Delta(\%) = (7,8218 Q_{\text{nat}}^{-1,5375}) 100 \quad (1.3)$$

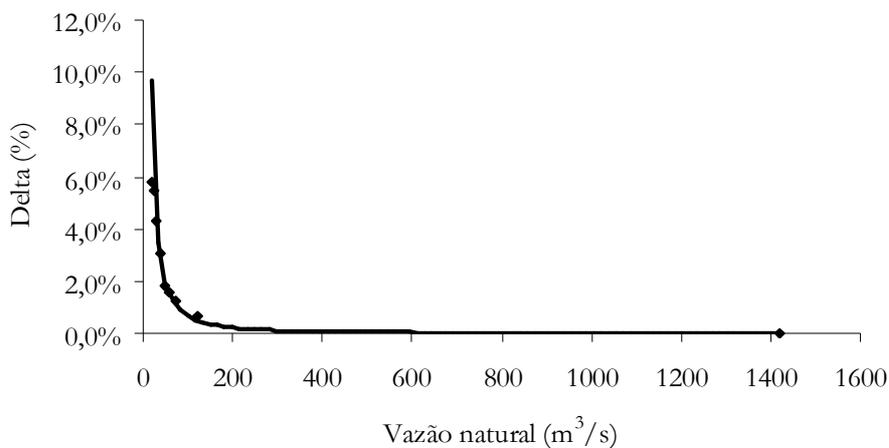


Figura 1.2. Comportamento do delta frente à magnitude da vazão natural.

Os deltas obtidos foram todos inferiores a 10%. Em estudos hidrológicos, é comum que dados de vazão estejam associados a alguns tipos de incertezas, seja pela medida indireta da vazão, seja pelo uso de modelos matemáticos não adequados. Desta forma, com base nos resultados obtidos para a bacia do Paracatu, considera-se que não cabem maiores preocupações quanto ao uso das vazões naturais para a estimativa das vazões máximas e médias de longa duração; já no caso das vazões mínimas, deve-se ter certo cuidado quando do uso das vazões naturais, já que o impacto observado foi um pouco mais expressivo.

## 1.4 - CONCLUSÕES

O impacto do uso das vazões naturais em substituição às vazões observadas foi considerado significativo estatisticamente quando se estimou as vazões máxima, média de longa duração e mínimas.

Para fins de utilização hidrológica, esses impactos verificados podem ser considerados inexpressivos para a estimativa das vazões máxima e média de longa duração e pouco expressivos para a estimativa das vazões mínimas.

Não há uma relação linear entre a magnitude do impacto e a área de drenagem das sub-bacias hidrográficas estudadas.

O comportamento do impacto do uso das vazões naturais frente à magnitude da vazão natural segue uma função potencial negativa.

## 1.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FERREIRA, P.A.; EUCLYDES, H.P. **Recursos hídricos e tecnologia necessária aos projetos hidroagrícolas**: bacia do Paracatu. Viçosa, MG: UFV/DEA, 1997. 200 p.
- HAAN, C.T. **Statistical methods in hydrology**. Iowa, Iowa State University. 1977.378 p.
- PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.da; KOETZ, M. Estudo da vazão em cursos d'água. Viçosa: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Agrícola - Universidade Federal de Viçosa. 2006. 151 p. (Caderno didático 43).
- ONS, Operadora Nacional do Sistema Elétrico; FAH-MADREER ; RODRIGUEZ, Renata Del Giudice. **Estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água nas principais bacias do sistema interligado nacional - Metodologia e resultados consolidados**. Brasília: Brasília: Operadora Nacional do Sistema Elétrico - Consórcio FAHMA/DREER, 2003. v. 1. 209 p.
- RODRIGUEZ, R. del G. **Metodologia para a estimativa das demandas e disponibilidades**

**hídricas: estudo de caso da bacia do Paracatu.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2004. 94 p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

RODRIGUEZ, R. del G; PRUSKI, F.F.;NOVAES, L.F. de; SILVA, D.D. da; RAMOS, M.M.; TEIXEIRA, A.F. **Vazões consumidas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano (urbano e rural) na bacia do Paracatu no período de 1970 a 1996.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 223 - 234, jul/set 2006.

## **CAPÍTULO 2**

### **DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA QUE PERMITE ESTIMAR AS VAZÕES DISPONÍVEIS EM QUALQUER POSIÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO**

Renata del Giudice Rodriguez

Fernando Falco Pruski

José Márcio Alves da Silva

Luiz Henrique Nobre Bof

Márcio Mota Ramos

Demétrius David da Silva

João Felipe Souza

Heber Tormentino de Sousa

Aristide Ribeiro

Bruno Marcel Barros da Silva

Isabel Santos Saraiva

Mirian Cristina M. Ferrão

Josiane Rosa Silva de Oliveira

Nivia Carla Rodrigues

## 2.1 - INTRODUÇÃO

O Brasil vem aprimorando a gestão de recursos hídricos, principalmente com a aprovação da Lei 9.433/97. Embora a implementação desta lei tenha representado um grande avanço na gestão de recursos hídricos, muito ainda tem que ser aprimorado de modo a integrar os diversos fatores requeridos no processo de outorga.

Para subsidiar o processo de decisão de outorgas nas bacias é fundamental o conhecimento da disponibilidade hídrica na hidrografia, entretanto este conhecimento fica restrito aos locais onde estão localizadas as estações fluviométricas. Visando suprir esta lacuna, a regionalização de vazão é uma técnica importante, e que consiste em explorar ao máximo as informações existentes, permitindo a estimativa das variáveis hidrológicas em locais sem dados ou com dados insuficientes (TUCCI, 2002). Como a variabilidade espacial da disponibilidade hídrica é decorrente da combinação de diversos fatores, como as características físicas e climáticas do local de interesse, a estimativa de seus valores se torna um problema complexo.

Um outro problema relativo à regionalização de vazões diz respeito ao fato da maioria dos estudos de regionalização hidrológica disponíveis no Brasil terem sido realizados utilizando informações providas de seções fluviométricas com grandes áreas de drenagem, apresentando, conseqüentemente, restrições de uso em seções com pequenas áreas de drenagem. Estas áreas, geralmente, apresentam comportamento hidrológico diferenciado das estações fluviométricas com maiores áreas de drenagem.

A proposição de uma metodologia de regionalização de vazões que necessite menos informações e que proporcione uma boa confiabilidade será uma grande contribuição para o gerenciamento dos recursos hídricos, colaborando, assim, para a otimização do uso da água e a minimização dos conflitos entre os usuários.

A bacia do São Francisco é a mais importante bacia brasileira sob o ponto de vista político-social (MAGALHÃES, 2007), uma vez que faz a ligação entre o Sudeste, região mais desenvolvida do país, e o Nordeste, considerada em estágio menos adiantado de desenvolvimento (ANA, 2003a). Esta bacia é vasta e complexa, sendo caracterizada pela grande variabilidade da precipitação ao longo de sua extensão, pela presença de rios intermitentes na região do semi-árido e de reservatórios de regularização de vazões, bem como pelo intenso uso da água na bacia, o qual acaba por exercer uma grande pressão sobre os recursos naturais (ANA, 2003a). Em virtudes destes fatores o conhecimento das disponibilidades hídricas ao longo da hidrografia desta bacia se torna um grande desafio.

Tendo em vista a importância da regionalização de vazão para o conhecimento da disponibilidade hídrica na hidrografia é que se desenvolveu o presente trabalho, cujos objetivos foram: desenvolver e aplicar à bacia do São Francisco uma nova proposta de análise para a regionalização de vazões média e mínima.

## **2.2 - MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.2.1 - Desenvolvimento e aplicação à bacia do São Francisco de uma nova proposta de análise para a regionalização de vazões médias e mínimas**

#### **2.2.1.1 - Dados utilizados no estudo e seleção do período base**

No estudo foram analisados os dados consistidos de 283 estações pluviométricas e 145 estações fluviométricas pertencentes à rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas (ANA) (Figura 2.1), tendo sido estes dados adquiridos em 7 de novembro de 2006. Dentre as estações fluviométricas estudadas, 23 estão localizadas na calha do rio São Francisco.

Três Marias e Sobradinho são os dois reservatórios de grande capacidade de acumulação e com regularização plurianual na bacia do São Francisco, tendo estes reservatórios iniciado suas operações em 1962 (CEMIG, 2007) e 1979 (CHESF, 2007), respectivamente. Os demais reservatórios na bacia são de menor capacidade, todos com ciclo de operação anual ou a fio de água, exercendo pouco controle na operação de múltiplo uso da água (ANA, 2002).

A fim de contemplar o efeito de regularização dos reservatórios de Três Marias e Sobradinho, e com base na análise dos dados disponíveis, optou-se por selecionar o período-base de 1979 a 2002.

Visando dar suporte aos objetivos do SNIRH, especificamente no que se refere à modelagem e ao tratamento dos dados geoespaciais da rede hidrográfica que irão compor o banco de dados desse sistema, a ANA desenvolveu para todo o Brasil uma base hidrográfica otocodificada na escala de 1:1.000.000 em formato shape e passou a utilizá-la como suporte à gestão em seus processos internos.

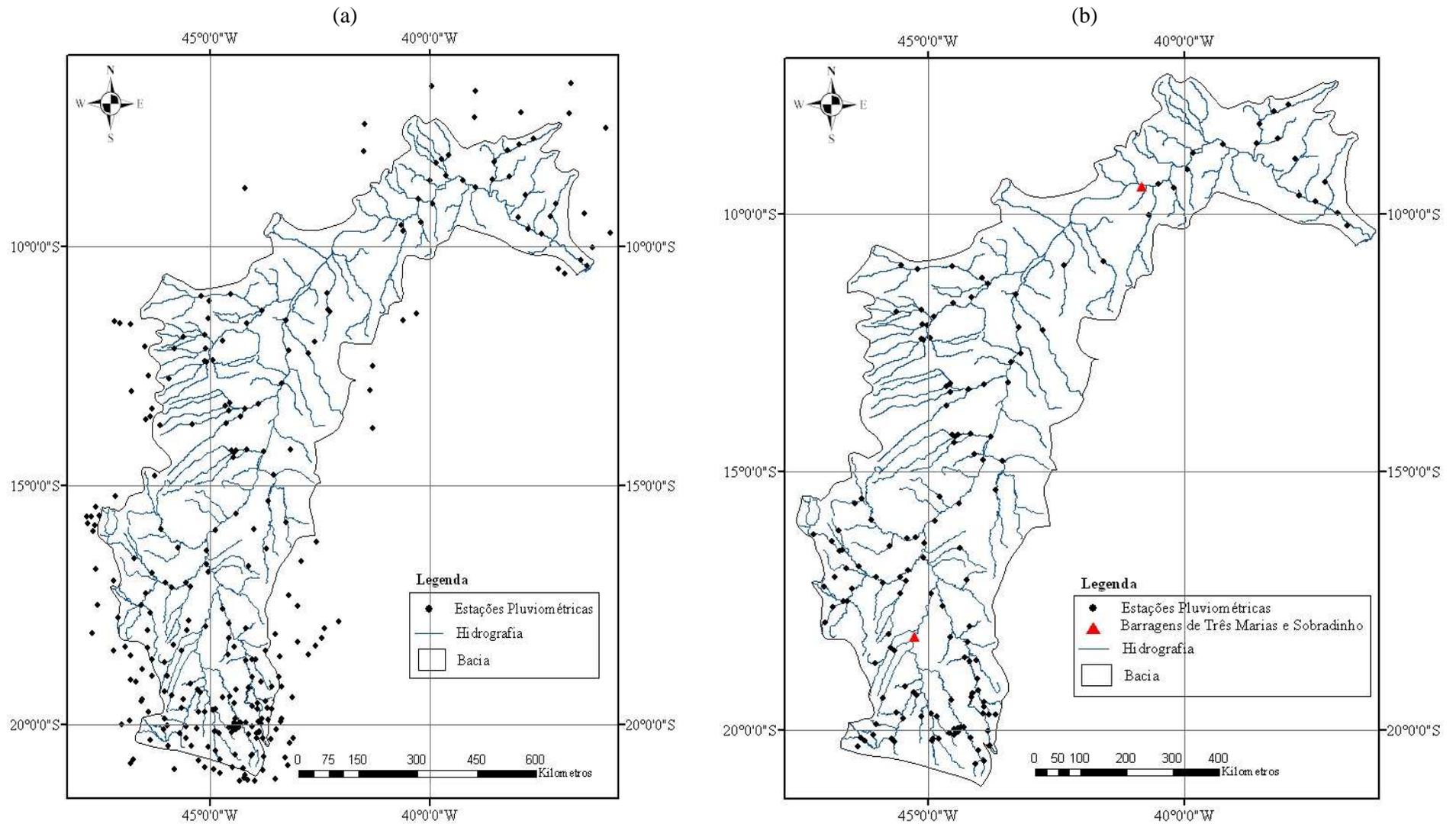


Figura 2.1. Localização das estações pluviométricas (a); e fluviométricas (b) utilizadas no estudo, bem como das barragens de Três Marias e Sobradinho.

Esta base hidrográfica otocodificada contém uma tabela de atributos com informações da chamada “Topologia Hídrica”, definida pela ANA (2006) como um conjunto de informações agregadas e discretizadas por trecho de curso de água, ou seja, por segmento entre uma foz e sua confluência, ou por segmento entre confluências, ou por segmento entre uma confluência e sua nascente. Essas informações de topologia hídrica são importantes para os processos de gestão de recursos hídricos, podendo se destacar o código Otto Pfafstetter da ottobacia referente ao trecho; comprimento do trecho de curso de água; área da bacia a montante do trecho do curso de água de referência (incluindo a área de contribuição do próprio trecho); e nome do curso de água no trecho propriamente dito.

## **2.2.1.2 - Variáveis dependentes e independentes utilizadas no estudo**

### **2.2.1.2.1 - Variáveis dependentes**

As variáveis dependentes utilizadas para a regionalização de vazões na bacia do São Francisco foram as vazões médias anuais de longa duração ( $Q_{mld}$ ) e as mínimas obtidas nas 145 estações fluviométricas para as quais foi realizado o estudo. Em virtude do fato de na bacia do São Francisco serem utilizados diferentes critérios para a caracterização das vazões mínimas pela União e pelos Estados os quais a bacia abrange, utilizou-se as vazões correspondentes à vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ) e às vazões mínimas associadas às permanências de 90% ( $Q_{90}$ ) e 95% ( $Q_{95}$ ), as quais foram calculadas a partir de séries de dados diários. O procedimento utilizado para a obtenção das vazões associadas às permanências de 90 e 95% para cada estação fluviométrica foi o baseado na obtenção de classes de frequência, sendo definidos 50 intervalos de classe com base na escala logarítmica e posteriormente calculado os limites dos intervalos e o número de vazões associadas em cada intervalo e a frequência associada ao seu limite inferior.

Para obtenção das vazões médias e mínimas foi utilizado o programa SisCAH - Sistema Computacional para Análises Hidrológicas, o qual foi desenvolvido pela rede de pesquisa 2 do SNIRH composta pelas seguintes instituições: Universidade Federal de Viçosa (instituição coordenadora), Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal Fluminense, Universidade Federal de Pernambuco, Universidade Federal do Espírito Santo, Escola de Engenharia de São Carlos e Instituto de Pesquisas Tecnológicas e supervisionada pela ANA. Antes do cálculo destas vazões foram descartados os anos da série histórica que apresentaram mais de 5% de falhas.

### **2.2.1.2.2 - Variáveis independentes**

As variáveis independentes utilizadas no estudo representam as características físicas e climáticas da bacia.

A característica física da bacia utilizada no estudo foi a área de drenagem, a qual foi obtida na rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb). Outras variáveis de quantificação possível a partir da bacia hidrográfica e de uso freqüente em estudos de regionalização de vazões são o comprimento do rio principal e a densidade de drenagem. Entretanto estas foram descartadas, uma vez que, considerando o processo de formação das vazões médias e mínimas, evidencia-se que estas variáveis têm pequena interferência em relação ao processo de geração destas vazões além de acarretarem, em alguns casos, problemas de caráter operacional.

Apesar da densidade de drenagem interferir na concentração do escoamento superficial, esta apresenta uma grande variação com a escala utilizada para a sua determinação, além de ter uma influência muito mais acentuada no escoamento superficial do que no escoamento subterrâneo. Em relação ao comprimento do rio principal, o seu uso na regionalização é pouco representativo das condições reais, uma vez que uma pequena variação do seu valor pode acarretar como consequência uma mudança brusca na área entre uma posição de montante e de jusante de uma confluência, advindo da contribuição de um afluente.

A variação da precipitação na bacia do São Francisco reflete diretamente no comportamento das vazões específicas, como observado na Figura 2.2. Assim sendo, considera-se que a inclusão da precipitação como variável explicativa das vazões pode representar uma expressiva melhoria do modelo de regionalização. Desta forma, a variável climática utilizada no estudo de regionalização foi a precipitação. Para a estimativa das vazões médias de longa duração as precipitações de uso mais freqüente são as precipitações médias anuais, enquanto para a estimativa das vazões mínimas as precipitações mais utilizadas são a precipitação total anual, a precipitação do semestre mais seco e a precipitação do trimestre mais seco.

Pela análise compreensiva do processo de formação das vazões mínimas evidencia-se que esta está diretamente associada à recarga do lençol freático, que ocorre justamente no período em que o balanço hídrico é positivo, permitindo que o excedente de água venha promover a recarga do lençol freático. Assim sendo, embora de uso freqüente em análises estocásticas, as precipitações correspondentes ao semestre mais seco e trimestre mais seco não foram consideradas na análise.

O cálculo da precipitação média nas áreas de drenagem das 145 estações fluviométricas estudadas foi realizado com base no mapa de isoietas relativo à precipitação média anual tendo como período base de 1979 a 2002. Para a obtenção deste mapa foram utilizados os dados das 283 estações pluviométricas e interpolados por krigagem.

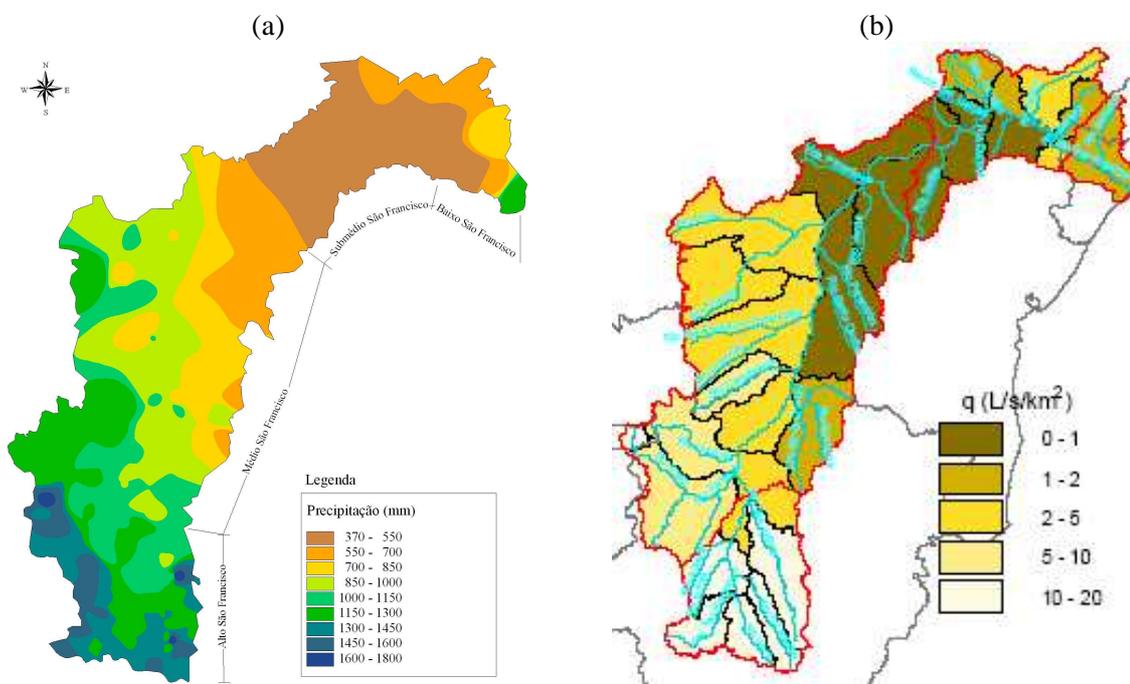


Figura 2.2. Precipitação média anual (Fonte: PEREIRA, 2004) (a) e vazões específicas (Fonte: ANA, 2004a) (b) na bacia do São Francisco.

Embora a precipitação média anual seja uma variável explicativa do processo de formação das vazões mínimas e médias, considera-se que esta não reflita efetivamente a contribuição para a formação destas vazões. Deste modo, Novaes (2005) propôs o conceito de inércia hídrica, que corresponde à precipitação mínima necessária para garantir a recarga do lençol freático. Portanto, para que haja a ocorrência do escoamento no leito do rio advindo da contribuição subterrânea, é necessário que, primeiramente, a precipitação venha suprir o déficit de água existente ao longo da zona de aeração, que, por sua vez, depende do processo de evapotranspiração.

Cada bacia deve apresentar um valor de inércia hídrica, sendo este tanto maior quanto maiores forem a evapotranspiração da bacia e a capacidade de retenção de água no solo. Para a bacia do Paracatu, Novaes (2005) estimou que, para precipitações médias anuais inferiores a 750 mm, a vazão deve se tornar nula no início do período de recessão. Desta forma, a utilização da variável que representa a inércia hídrica pode contribuir para o aperfeiçoamento dos modelos de regionalização de vazões. Para tanto, utilizou-se o valor de 750 mm, proposto por Novaes (2005), e de 700 mm, o qual foi obtido a partir de testes preliminares realizados.

Para a consideração da inércia hídrica foi subtraído um valor correspondente a 750 ou 700 para cada pixel do mapa de isoietas, sendo atribuído o valor zero quando a inércia foi maior que a precipitação. Uma vez obtidos os valores em cada pixel, calculou-se o valor médio nas áreas de drenagem das 145 estações fluviométricas estudadas.

Utilizou-se, ao invés de área de drenagem e da precipitação, uma única variável, representada pela equação

$$P_{eq} = \frac{P A}{31.536} P_{eq} \quad (2.1)$$

em que  $P_{eq}$  = precipitação equivalente,  $m^3 s^{-1}$ ;  $P$  = precipitação média anual na área de drenagem considerada, mm; e  $A$  = área de drenagem,  $km^2$ .

O uso de uma única variável além de permitir uma representação bidimensional da relação entre as variáveis dependentes e independentes, também permitiu o ganho de um grau de liberdade na análise estatística.

Assim como para a precipitação, para a consideração da precipitação menos a inércia hídrica de 700 mm, também utilizou-se uma única variável representada pela equação

$$P_{eq700} = \frac{(P - 700) A}{31.536} \quad (2.2)$$

em que  $P_{eq700}$  = precipitação equivalente, considerando uma diminuição da inércia hídrica igual a 700 mm,  $m^3 s^{-1}$ .

O mesmo procedimento também foi realizado para a consideração da precipitação da precipitação menos a inércia hídrica de 750 mm.

Desta forma, as variáveis independentes utilizadas foram a área de drenagem ( $A$ ), a precipitação equivalente ( $P_{eq}$ ) e a precipitação equivalente, considerando uma diminuição da inércia hídrica igual a 700 mm ( $P_{eq700}$ ) e 750 mm ( $P_{eq750}$ ).

### **2.2.1.3 - Métodos de regionalização de vazões aplicados**

No desenvolvimento do presente estudo de regionalização de vazões, optou-se pela utilização de duas metodologias, aqui denominadas como método tradicional e método de

conservação de massas (continuidade de vazões), proposto por Pereira (2004) e aperfeiçoado por Novaes (2005).

### 2.2.1.3.1 - Método tradicional

O procedimento normalmente empregado na utilização deste método envolve a definição prévia das regiões hidrologicamente homogêneas e, em um segundo momento, na obtenção das equações que permitem associar a vazão com variáveis topológicas e climáticas.

A análise de regressão permite estabelecer como as variações em uma ou mais variáveis independentes afetam a variação da variável dependente, tendo sido os seguintes modelos de regressão utilizados: linear, potencial, exponencial, logaritmo e recíproco.

Para a aplicação do método tradicional utilizou-se o software Sistema Computacional para a Regionalização de Vazões (SisCoRV), desenvolvido também pela rede de pesquisa 2 do SNIRH.

Uma das deficiências do método tradicional é a descontinuidade de vazões encontrada na transição de uma região homogênea para outra, onde ocorre uma mudança de equações ao longo do curso de água e, até mesmo, dentro de uma mesma região. Para a exemplificação desta descontinuidade são representados, na Figura 2.3, os trechos de cursos de água em uma confluência e suas direções de escoamento.

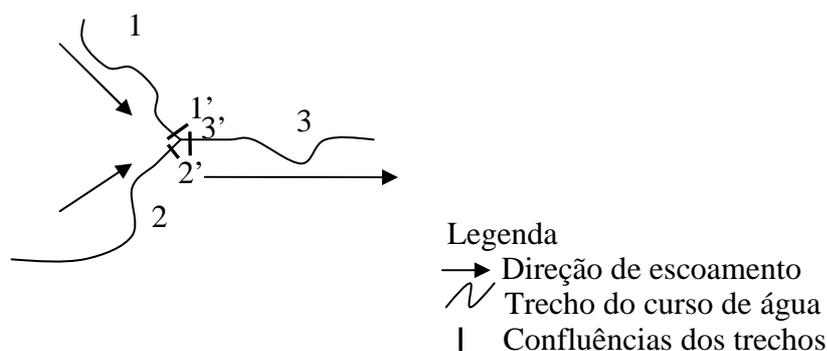


Figura 2.3. Representação dos trechos de cursos de água em uma confluência e suas respectivas direções de escoamento.

As descontinuidades de vazões ocorrem quando a soma das vazões nas seções 1' e 2', caracterizadas como vazões efluentes dos trechos 1 e 2, não correspondem à vazão na seção 3', caracterizada como vazão afluyente do trecho 3.

Quando a equação de regressão não é linear, ocorre a descontinuidade de vazão em uma mesma região, sendo válida a seguinte afirmação

$$Q_{a,3}(X_1 + X_2) \neq Q_{e,1}(X_1) + Q_{e,2}(X_2) \quad (2.3)$$

em que  $Q_{a,3}$  = vazão afluyente do trecho 3, estimada considerando a soma das variáveis independentes  $X_1$  e  $X_2$ ,  $m^3 s^{-1}$ ;  $Q_{e,1}$  = vazão efluente do trecho 1, estimada considerando a variável independente  $X_1$ ,  $m^3 s^{-1}$ ;  $Q_{e,2}$  = vazão efluente do trecho 2, estimada considerando a variável independente  $X_2$ ,  $m^3 s^{-1}$ ;  $X_1$  = área de drenagem ou volume precipitado a montante da foz do trecho 1,  $km^2$  ou  $m^3$ ; e  $X_2$  = área de drenagem ou volume precipitado a montante da foz do trecho 2,  $km^2$  ou  $m^3$ .

Portanto, a vazão calculada para a seção 3' difere da soma das vazões estimadas nas seções 1' e 2', comprometendo, assim, o princípio de continuidade das vazões ao longo da hidrografia.

### **2.2.1.3.2 - Método da conservação de massa (continuidade de vazões) - MCM**

O método consiste em ajustar modelos de regressão para representação das  $Q_{mld}$ ,  $Q_{95}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{7,10}$  em função da área de drenagem ou volume precipitado no rio principal, e a partir deste modelo obter as vazões na foz de cada rio afluyente direto do rio principal. A descrição deste método é feita na seqüência, conforme Novaes (2005).

O rio principal será denominado de Rp, o rio afluyente direto do rio principal será denominado Rad, e o rio afluyente direto do Rad será denominado de Rad(1).

Uma vez conhecidas as vazões observadas nos postos fluviométricos do rio principal (Rp) são ajustadas equações de regressão para a representação das  $Q_{mld}$ ,  $Q_{95}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{7,10}$  ao longo deste rio como uma função da área de drenagem correspondente a cada seção fluviométrica. Tais equações são forçadas a passar pela origem, uma vez que quando a área de drenagem é zero a vazão deve ser nula. Logo, com esta equação no Rp pode-se obter a vazão em qualquer seção situada neste rio, necessitando apenas da área de drenagem da seção de interesse.

Uma vez obtido o modelo de regressão para o Rp procede-se a estimativa das vazões na foz dos rios que lhe são afluyentes diretos (Rad). No mapa da bacia identifica-se o Rad e determina-se a área de drenagem para o Rp imediatamente a montante da confluência com o Rad e a área de drenagem do Rad, sendo, conseqüentemente, a área de drenagem imediatamente a jusante da confluência destes rios obtida pela soma destas áreas de drenagem. Este procedimento é detalhado na Figura 2.4, na qual é considerada a confluência

de dois, sendo a área de drenagem correspondente à seção 2 obtida pela soma das áreas de drenagem relativas às seções 1 e 3.

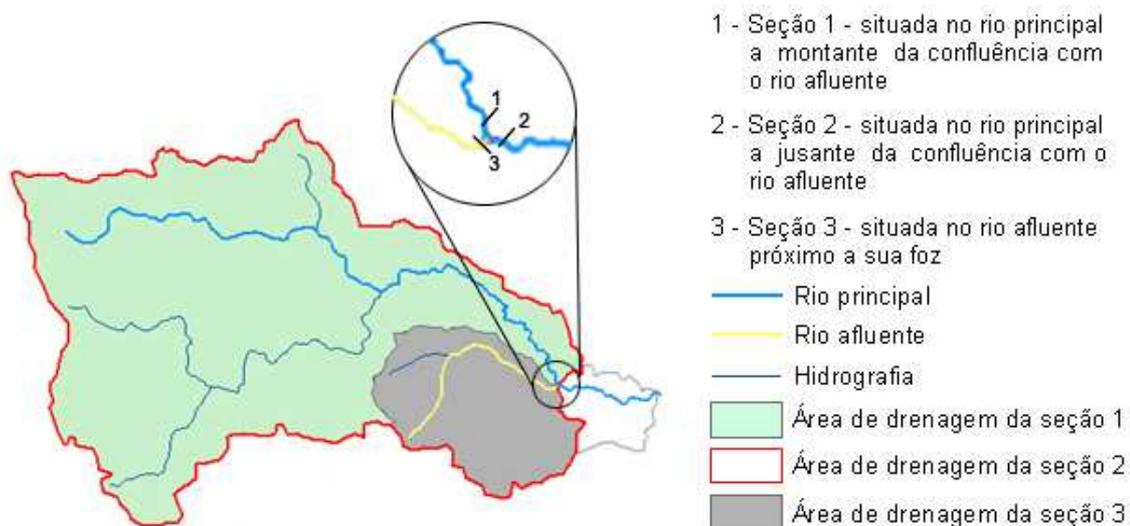


Figura 2.4. Procedimento para a determinação das vazões a montante e a jusante da confluência do rio com equação ajustada e um afluente direto. (Fonte: Moreira, 2006)

De posse das áreas de drenagens das seções a montante e a jusante da confluência dos  $R_p$  e  $R_{ad}$  estima-se as vazões nestas duas seções utilizando o modelo de regressão obtido para o  $R_p$ , sendo a diferença entre estas duas vazões aquela correspondente à vazão na foz do  $R_{ad}$ .

De posse da vazão na foz do  $R_{ad}$  e das vazões nos postos fluviométricos situados neste rio, procede-se o ajuste de uma equação de regressão para representação da vazão em função da área de drenagem, sendo este ajuste realizado de tal forma que a equação resultante produza uma vazão nula quando a área de drenagem é zero e uma vazão igual à estimada na foz do rio quando a área de drenagem é aquela correspondente à área de drenagem do rio. Para as situações em que o  $R_{ad}$  não possuía nenhum posto fluviométrico a equação utilizada para descrever a vazão foi uma equação linear que passa pelos mesmos pontos descrito anteriormente.

Para a estimativa das vazões nos  $R_{ad}(1)$  é utilizado o mesmo procedimento descrito anteriormente, sendo utilizada a equação ajustada para o  $R_{ad}$  para estimar as vazões imediatamente a montante e a jusante da confluência dos  $R_{ad}$  e  $R_{ad}(1)$  para então, através da diferença entre estas duas vazões, obter a vazão na foz do  $R_{ad}(1)$ .

Utilizou-se o software Sistema Computacional para a Regionalização de Vazões (SisCoRV) também para a aplicação do MCM.

### **2.2.1.4 - Espacialização das vazões regionalizadas**

Para a representação espacial das variáveis hidrológicas analisadas houve a necessidade de inserção das variáveis independentes ( $P_{eq}$ ,  $P_{eq700}$  e  $P_{eq750}$ ) no banco de dados da base hidrográfica otocodificada para posterior cálculo das vazões em cada trecho do curso de água da base.

A entrada destas variáveis independentes foi realizada por meio de um sistema de informações geográficas, com o qual obteve-se o volume precipitado a montante de cada ottobacia pelo cruzamento do mapa de isoietas gerado (referente à precipitação total e a precipitação menos a inércia hídrica) e do mapa de ottobacias. Este mapa de ottobacias consiste nos traçados dos limites das bacias de contribuição associadas a cada trecho de curso de água, contendo para cada delimitação do trecho o seu respectivo código Otto Pfafstetter (ANA, 2006).

Como os códigos Otto Pfafstetter do mapa de ottobacias são os mesmos da base hidrográfica, foi possível a transferência das informações geradas para a base, sendo criados mais três novos campos na tabela de atributos da base correspondentes ao  $P_{eq}$ , a  $P_{eq700}$  e a  $P_{eq750}$ . Visto que a tabela de atributos da base contém um campo com a informação referente à área de drenagem a montante de cada trecho, todas as informações relativas às variáveis independentes para cada trecho foram disponibilizadas para a estimativa das vazões.

Para o cálculo das vazões nos trechos utilizou-se o SisCoRV. Neste programa é selecionado, por meio do código Otto Pfafstetter, os trechos de uma região ou rio que possuem a mesma equação e em seguida é inserida a equação em função de um campo da tabela de atributos referente à variável independente utilizada e posteriormente a vazão é estimada no local selecionado.

Quando utilizado o método tradicional a seleção dos trechos é realizada para uma determinada região homogênea, enquanto que para o método de conservação de massa, a seleção é referente a um rio, cujos dados de suas estações foram utilizados para a geração da equação de regionalização.

Para os rios que não possuíram equações pelo método de conservação de massa, o SisCoRV permite o cálculo das vazões nestes rios. Este cálculo é baseado na vazão específica da foz do afluente (sem equação) de um rio com equação, sendo a vazão específica advinda da divisão da diferença entre as vazões a jusante e montante da confluência do afluente com o rio pela área de drenagem do afluente.

Deve-se levar em consideração na espacialização destas vazões as diferenças advindas das áreas de drenagem das estações fluviométricas disponíveis no sistema Hidroweb da ANA,

utilizadas no estudo de regionalização, e das áreas da base hidrográfica ottocodificada, na qual se aplicou as equações. Ao comparar as diferenças destas áreas nas 145 estações analisadas na bacia do São Francisco observou que em 10 estações as diferenças entre a área do Hidroweb e a obtida pela base foram superiores a 20%.

### **2.2.1.5 - Análise e comparação dos resultados obtidos pelas diferentes metodologias**

Uma vez obtidas as equações de regionalização utilizando as duas metodologias e as variáveis topológicas e climáticas consideradas no estudo foi procedida a seleção das equações que conduzem a condições mais representativas das vazões da bacia. Para tal analisou-se o erro relativo, as discontinuidades de vazões e os indicadores do comportamento físico das vazões.

#### **2.2.1.5.1 - Erro relativo**

Com os resultados das vazões estimadas ( $Q_{mld}$ ,  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) pelos diferentes modelos de regionalização para as 145 estações fluviométricas e os valores das vazões estimadas com base nos dados observados para as mesmas seções foi avaliada a precisão das vazões estimadas pela análise do erro relativo percentual. O erro relativo entre o valor observado e o estimado foi calculado pela equação

$$ER = \left( \frac{Q_{obs} - Q_{reg}}{Q_{obs}} \right) 100 \quad (2.4)$$

em que ER = erro relativo, %;  $Q_{obs}$  = vazão estimada com base nos dados observados na estação fluviométrica,  $m^3 s^{-1}$ ; e  $Q_{reg}$  = vazão estimada pelo modelo de regionalização,  $m^3 s^{-1}$ .

#### **2.2.1.5.2 - Análise da descontinuidade de vazões**

A análise da descontinuidade de vazões foi realizada com base nas vazões estimadas pelo tradicional para cada uma das confluências da base hidrográfica ottocodificada. Para tanto utilizou-se um índice que foi denominado de índice de descontinuidade (ID) e calculado pela equação

$$ID = \left( \frac{[Q_{e,1}(X_1) + Q_{e,2}(X_2)] - [Q_{a,3}(X_1 + X_2)]}{[Q_{e,1}(X_1) + Q_{e,2}(X_2)]} \right) 100 \quad (2.5)$$

em que ID é o índice de descontinuidade, %.

Visando a análise das vazões de contribuição de cada trecho do curso de água da base hidrográfica utilizada, estimou-se a vazão incremental pela equação

$$Q_{inc} = Q_{e,3}(X_3) - [Q_{e,1}(X_1) + Q_{e,2}(X_2)] \quad (2.6)$$

em que  $Q_{inc}$  = vazão incremental do trecho,  $m^3 s^{-1}$ ;  $Q_{e,3}$  = vazão efluente do trecho 3 (Figura 2.3),  $m^3 s^{-1}$ ; e  $X_3$  = área de drenagem ou volume precipitado a montante da foz do trecho 3,  $km^2$  ou  $m^3 s^{-1}$ .

### 2.2.1.5.3 - Indicadores utilizados para a análise do comportamento dos modelos

Visando a análise do comportamento físico das vazões obtidas pelos modelos de regionalização aplicados utilizou-se o coeficiente de escoamento para a análise das vazões médias de longa duração e a vazão específica para a análise das vazões mínimas.

O coeficiente de escoamento superficial caracteriza a relação entre o volume que escoar na seção de deságüe considerada e o volume total precipitado na área de drenagem, sendo este obtido pela equação

$$CE = \frac{V_{T(\text{escoado})}}{V_{T(\text{precipitado})}} \quad (2.7)$$

em que CE = coeficiente de escoamento superficial, adimensional;  $V_{T(\text{escoado})}$  = volume médio anual que escoar na seção de deságüe,  $m^3$ ; e  $V_{T(\text{precipitado})}$  = volume médio anual que precipita na área de drenagem,  $m^3$ .

O volume que escoar na seção de deságüe foi calculado pelo produto da vazão média de longa duração, em  $m^3 s^{-1}$ , e do número de segundos existentes no ano.

Para uma maior representatividade do comportamento destes indicadores foram gerados mapas da vazão específica e do coeficiente de escoamento ao longo da hidrografia da bacia.

### 2.2.1.6 - Alternativa proposta para minimizar o uso da extrapolação das equações de regionalização obtidas

Segundo Tucci (2002), a regionalização de vazões não é um método seguro para a extrapolação hidrológica, devido à variabilidade das escalas dos processos hidrológicos, ou seja, o comportamento hidrológico de pequenas bacias pode ser muito diferente das bacias maiores.

Portanto, o autor ressalta que a falta generalizada de dados de pequenas bacias no Brasil não pode ser suprida pela regionalização, entretanto existe a tendência de utilização da regionalização de forma generalizada sem um questionamento maior da qualidade de seus resultados, o que pode comprometer o processo de tomada de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos, gerando conflitos.

Considerando que o coeficiente de escoamento apresenta uma faixa de variação que em geral é de zero a um, e que as equações de regionalização tendem normalmente a apresentar uma grande amplitude de variação destes valores nas regiões de montante em que a extrapolação é feita, procedeu-se a análise do coeficiente de escoamento ao longo de toda a hidrografia a fim de impor um limite para a extrapolação destas equações referentes à vazão média de longa duração.

Portanto considerou-se um determinado valor de coeficiente de escoamento superficial para cada região ou rio como um limitador para as estimativas das vazões médias, sendo este valor limite obtido pelos dados observados nas estações fluviométricas.

Desta forma, caso o coeficiente de escoamento estimado no trecho da base hidrográfica fosse maior que o valor limite, a vazão média de longa duração era estimada pela equação

$$Q_{\text{mld}_{\text{ajust}}} = CE_{\text{lim}} P_{\text{eq}} \quad (2.8)$$

em que  $Q_{\text{mld,ajust}}$  = vazão média de longa duração ajustada com base no coeficiente de escoamento limite,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ; e  $CE_{\text{lim}}$  = coeficiente de escoamento utilizado como limite para a extrapolação da equação de regionalização, adimensional.

Para o método tradicional considerou-se como valor limite do coeficiente de escoamento superficial, o maior valor evidenciado nas estações fluviométricas em uma determinada região homogênea. Já para o método de conservação de massa considerou-se o maior valor do coeficiente evidenciado nas estações fluviométricas localizadas em um

determinado rio. Para rios que não possuíssem estações fluviométricas considerou-se o valor do coeficiente selecionado no rio mais próximo que contivesse estações fluviométricas.

Procedimento similar foi utilizado para as vazões mínimas, entretanto tendo como variável de análise a vazão específica mínima ( $q_{95}$ ,  $q_{90}$  ou  $q_{7,10}$ ). Portanto, se a vazão específica mínima estimada pela equação de regionalização no trecho fosse maior que o valor de vazão específica selecionada para a área (método tradicional) ou curso de água (MCM), a vazão mínima em questão ( $Q_{95}$ ,  $Q_{90}$  ou  $Q_{7,10}$ ) era estimada pela equação

$$Q_{\text{mín\_ajust}} = \frac{q_{\text{mín,lim}} A}{1.000} \quad (2.9)$$

em que  $Q_{\text{mín,ajust}}$  = vazão mínima ( $Q_{95}$ ,  $Q_{90}$  ou  $Q_{7,10}$ ) ajustada com base na vazão específica limite,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ; e  $q_{\text{mín,lim}}$  = vazão específica mínima ( $q_{95}$ ,  $q_{90}$  ou  $q_{7,10}$ ) utilizada como limite para a extrapolação da equação de regionalização,  $\text{L s}^{-1} \text{km}^{-2}$ .

Embora se reconheça que a tendência da grande amplitude de variação da vazão específica para pequenas áreas de drenagem, considera-se que a utilização do critério proposto permite minimizar o risco de estimativa das vazões para as regiões onde é feita a extrapolação.

Para a visualização espacial da ocorrência dos valores de coeficiente de escoamento superficial ou vazões específicas mínimas superiores ao maior valor selecionado dos respectivos indicadores, foram gerados mapas representando em cores diferentes as áreas que necessitaram de ajuste e as áreas em que estes indicadores encontravam-se dentro do limite especificado.

## **2.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **2.3.1 - Regionalização da vazão média de longa duração**

Conforme já descrito na metodologia, para a seleção dos diferentes métodos e das variáveis independentes utilizados para a regionalização da vazão média de longa duração ( $Q_{\text{mld}}$ ) na bacia do São Francisco procedeu-se a análise dos erros relativos entre as vazões estimadas com base nos dados observados e as estimadas pelo modelo de regionalização, da descontinuidade de vazões ao longo da hidrografia e do coeficiente de escoamento superficial.

Na Figura 2.5 é apresentado o mapa da bacia com as regiões homogêneas selecionadas pelo método tradicional. A região 1 abrange os pequenos afluentes do São Francisco situados a montante de Três Marias, compreendendo os rios Samburá, Ajudas, Bambuí, São Miguel, Mateus Grande, Marmelada, Indaía e Borrachudo, mais o rio dos Tiros, situado a jusante desta represa. As regiões 2 e 3 compreendem as bacias do Pará e Paraopeba. A bacia do rio das Velhas teve que ser dividida em duas regiões: a região 4 que vai até a confluência com o rio Jequitibá (incluído nesta região), e a região 5, que compreende o restante da bacia.

A bacia do Paracatu foi dividida em três regiões homogêneas. A região 6, que vai da cabeceira do Paracatu até a confluência com o ribeirão Entre Ribeiros; a região 7, que abrange as sub-bacias do Entre Ribeiros e do Preto; e a região 8, que abrange o restante da bacia.

A região 9 corresponde à bacia do Urucuia. A região 10 engloba as bacias do Carinhanha, do Japoré e do Pandeiros e a região 11 corresponde à bacia do rio Corrente.

A bacia do rio Grande foi dividida em duas regiões. A região 12 compreende a área da cabeceira até a confluência com o rio Preto e a 13 abrange este afluente e o restante da bacia.

A região 14 corresponde à parte Leste da bacia, desde a confluência do rio das Velhas até o rio Verde, abrangendo, portanto, os rios Jequitaí, Pacuí, Verde Grande, Paramirim e o Verde. A região 15 corresponde à bacia do Pajeú e a região 16 refere-se à calha do São Francisco até Sobradinho.

O método de conservação de massa, ao contrário do tradicional, não envolve a definição prévia das regiões hidrologicamente homogêneas.

### **2.3.1.1 - Análise com base nos erros relativos**

Nos estudos de regionalização de vazões realizados a avaliação da precisão das vazões estimadas pelos diferentes métodos e variáveis aplicados é realizada geralmente com base no erro relativo percentual (equação 2.4), sendo os menores valores dos erros utilizados para a seleção do modelo de melhor ajuste.

Nas Figuras 2.6 a 2.9 são apresentados os erros relativos entre as vazões estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas e as estimadas pelos dois métodos e as quatro variáveis independentes analisadas nas 145 estações fluviométricas da bacia do São Francisco situadas em locais onde foi possível a realização da regionalização.

O uso da precipitação equivalente apresentou, em geral, tanto pelo método tradicional como pelo MCM, melhor desempenho do que quando considerada apenas a área de drenagem, e a inserção das variáveis  $P_{eq700}$  e  $P_{eq750}$  possibilitou ainda uma maior precisão do que a obtida quando do uso de outras variáveis.

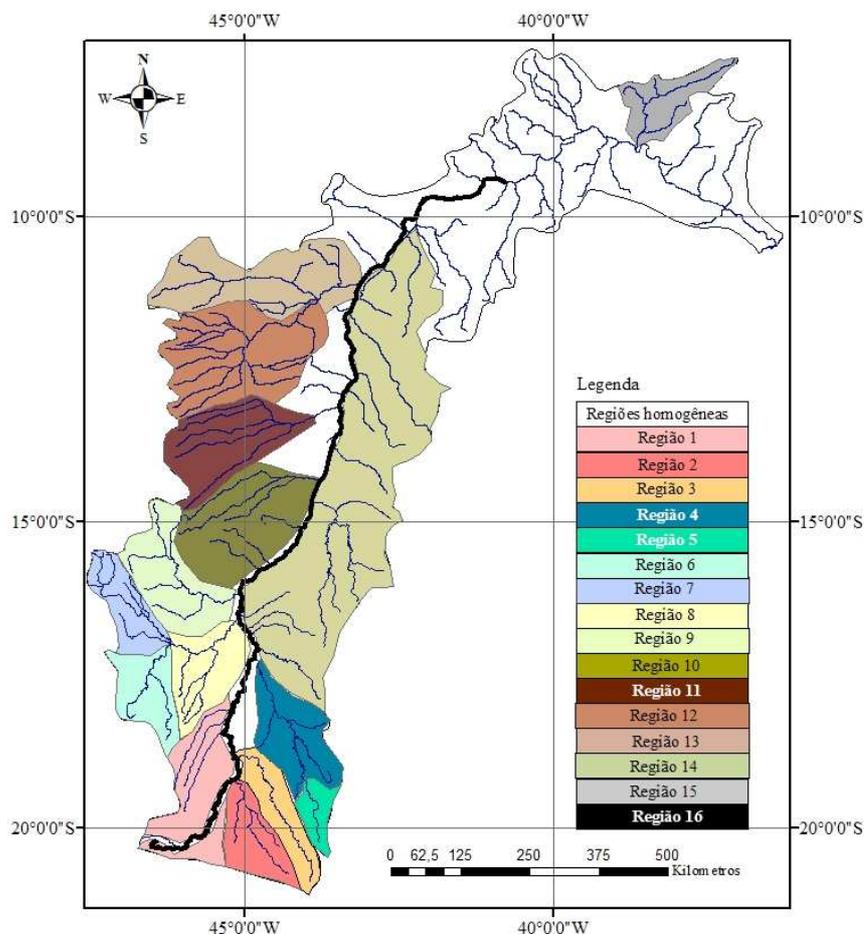


Figura 2.5. Regiões homogêneas consideradas para a regionalização da  $Q_{mld}$  na bacia do São Francisco pelo método tradicional.

Visando facilitar a seleção da combinação do método de regionalização e da variável independente que conduziu aos menores erros relativos em cada bacia ou região são apresentadas no Quadro 2.1 as amplitudes de variação dos erros relativos quando utilizadas as quatro variáveis independentes e os dois métodos analisados para as principais bacias ou regiões na bacia do São Francisco. Para fins de análise os erros negativos correspondem à superestimativa das vazões estimadas, enquanto os positivos, às subestimativas.

Na região 1 houve uma tendência de subestimativa das vazões pelo MCM, sendo esta minimizada quando utilizadas a  $P_{eq700}$  e a  $P_{eq750}$ , resultando nos menores erros, os quais foram inferiores a 20% (valor em módulo). Já no método tradicional não ocorreu uma melhora expressiva entre o uso das quatro variáveis independentes nesta região tendo uma variação dos erros de -30 a 30%.

Nas comparações realizadas para a bacia do rio Pará, os erros foram inferiores a 30% (valor em módulo), sendo os melhores ajustes obtidos tanto com o uso do MCM quando utilizada a área e a precipitação equivalente como pelo método tradicional com base na precipitação equivalente.

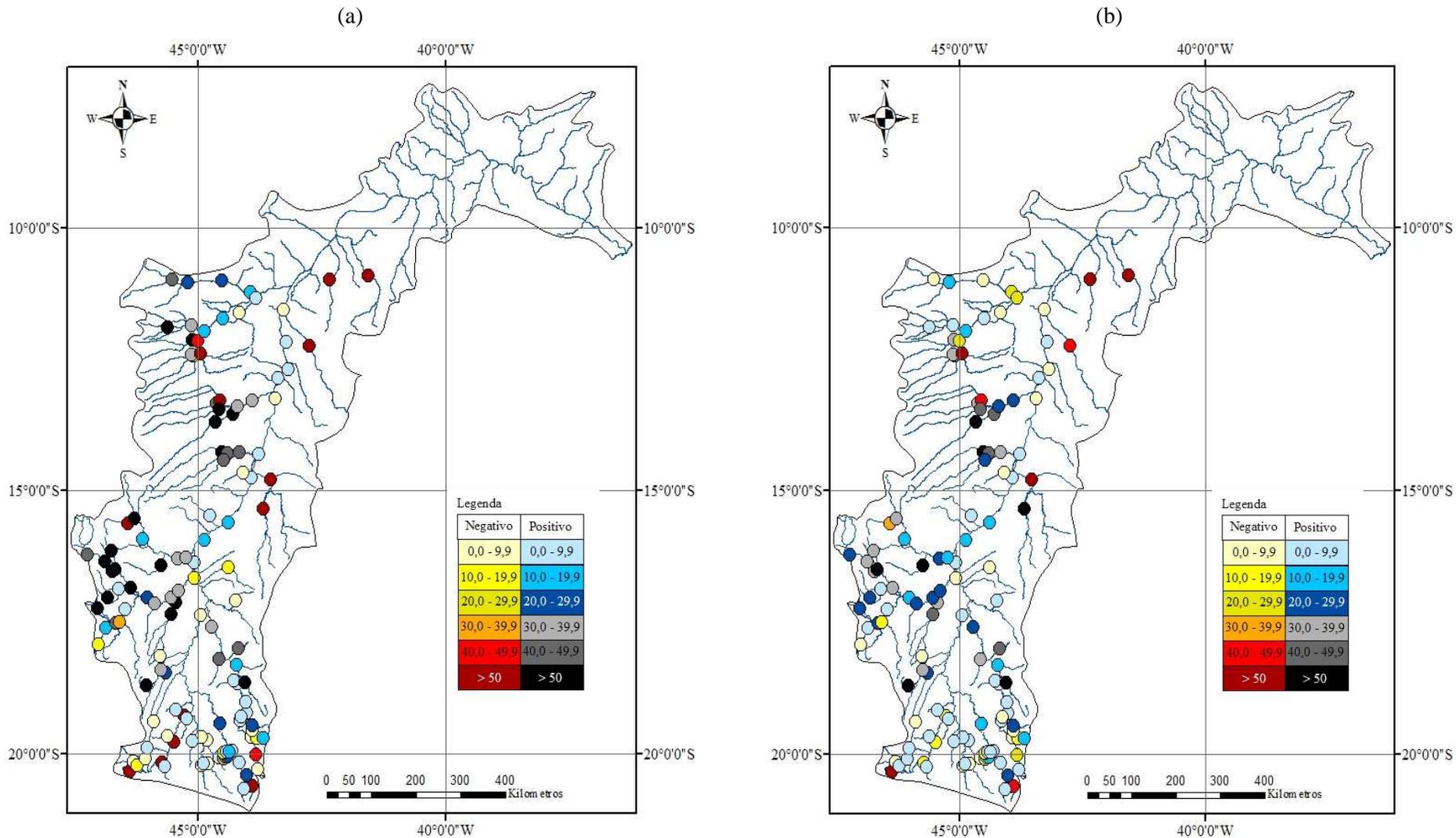


Figura 2.6. Erros relativos entre as  $Q_{mld}$  observadas e estimadas em função da área (a); e da precipitação equivalente (b) pelo MCM.

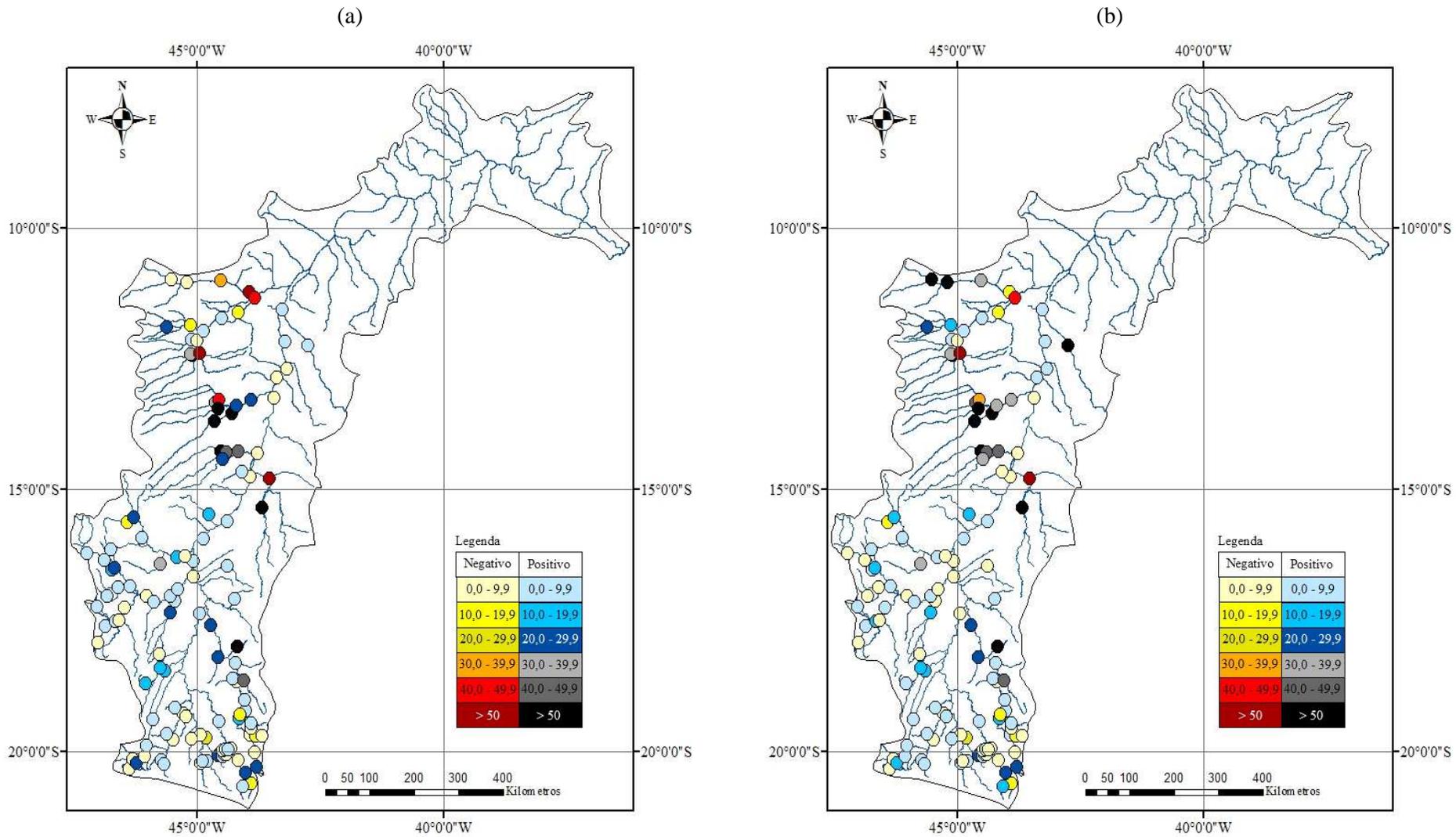


Figura 2.7. Erros relativos entre as  $Q_{mld}$  observadas e estimadas considerando a  $P_{eq700}$  (a); e a  $P_{eq750}$  (b) pelo MCM.

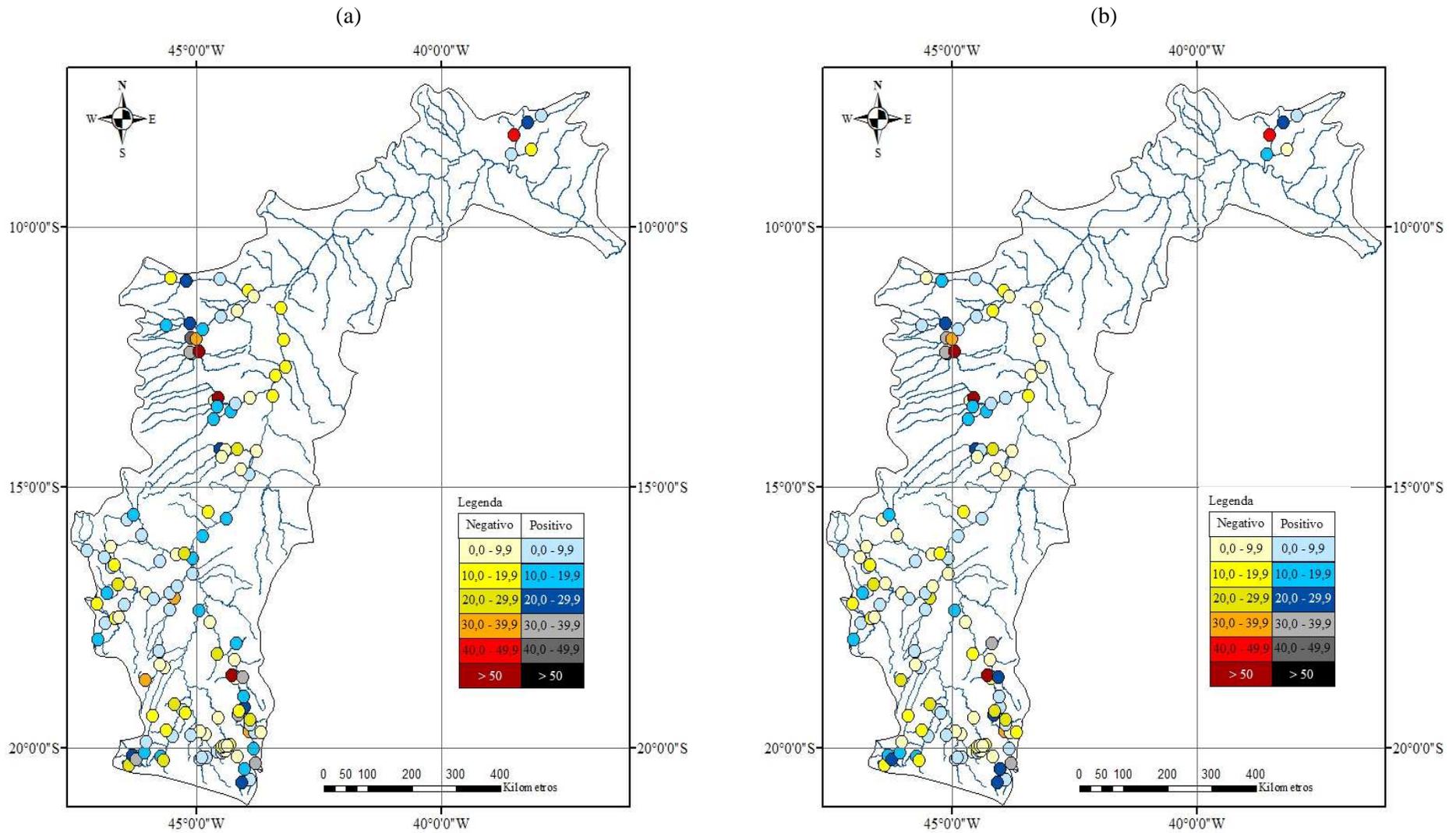


Figura 2.8. Erros relativos entre as  $Q_{mld}$  observadas e estimadas em função da área (a); e da precipitação equivalente (b) pelo Método Tradicional.

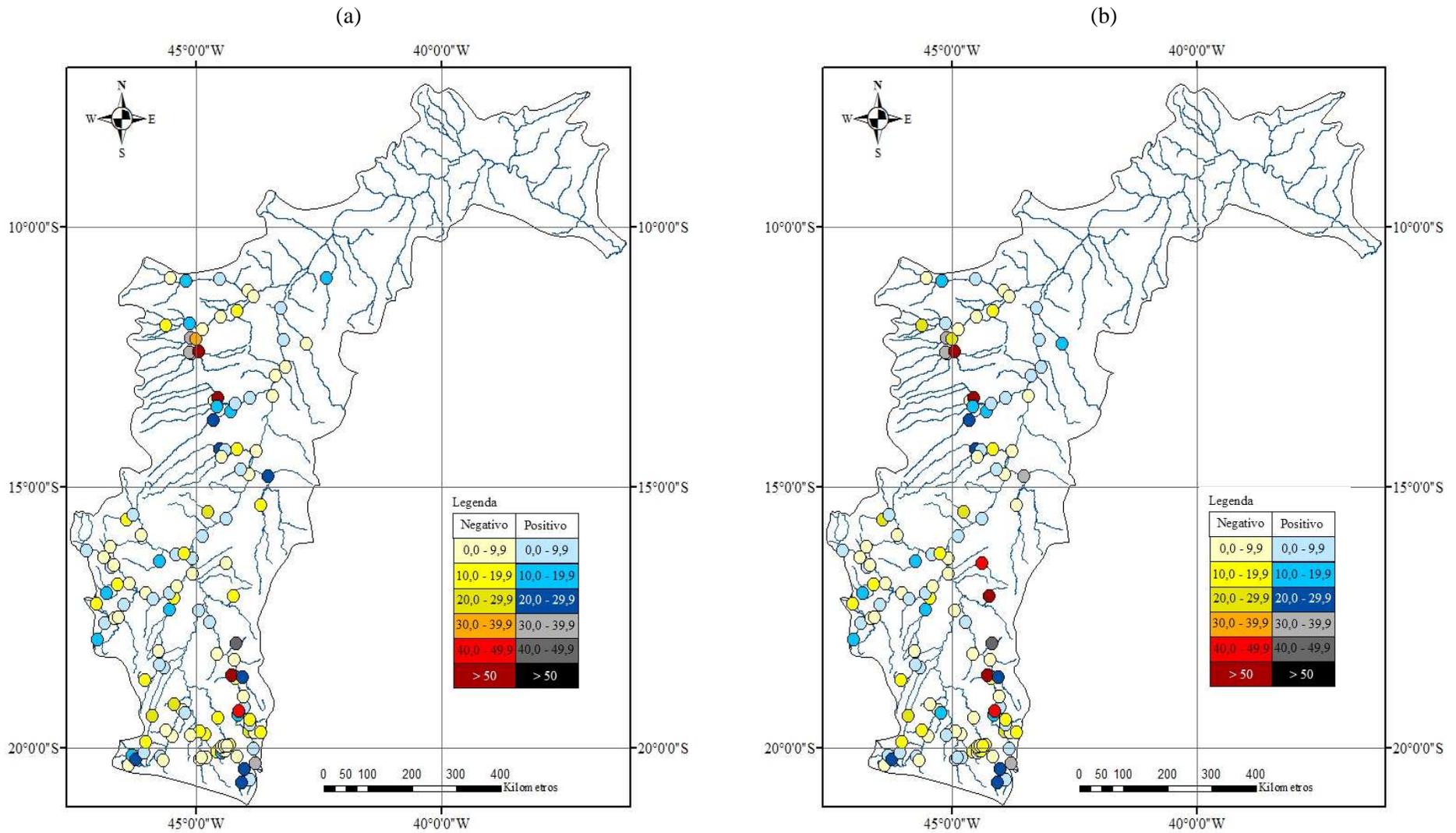


Figura 2.9. Erros relativos entre as  $Q_{mld}$  observadas e estimadas considerando a  $P_{eq700}$  (a); e a  $P_{eq750}$  (b) pelo Método Tradicional.

Quadro 2.1. Amplitudes de variações ( $\Delta$ ) dos erros relativos quando utilizadas as quatro variáveis independentes e os dois métodos analisados para as principais bacias ou regiões na bacia do São Francisco

Bacias ou regiões	Métodos	$\Delta(A)$	$\Delta(P_{eq})$	$\Delta(P_{eq700})$	$\Delta(P_{eq750})$
Região 1	MCM	-13,0 a 50,2	-0,1 a 66,52	-0,3 a 20,0	-0,0 a 18,4
	Tradicional	-30,0 a 30,5	-23,0 a 26,9	-29,8 a 23,7	-29,7 a 22,2
Pará	MCM	-5,9 a 2,7	-5,9 a 6,8	-21,3 a 21,3	-26,5 a 25,9
	Tradicional	-12,1 a 8,1	-6,2 a 5,4	-18,6 a 6,5	-16,0 a 11,7
Paraopeba	MCM	-53,7 a 22,8	-44,5 a 15,1	-18,4 a 22,0	-14,0 a 22,3
	Tradicional	-12,2 a 26,4	-14,3 a 26,6	-18,2 a 27,7	-21,0 a 25,7
Velhas	MCM	-41,1 a 61,4	-25,1 a 55,7	-16,1 a 54,3	-17,3 a 56,5
	Tradicional	-80,6 a 34,1	-70,8 a 34,0	-63,0 a 47,3	-62,9 a 50,0
Paracatu	MCM	-33,3 a 82,7	-19,0 a 57,0	-5,7 a 22,8	-6,2 a 18,0
	Tradicional	-30,3 a 19,5	-22,5 a 17,8	-17,9 a 15,9	-17,6 a 15,9
Urucuia	MCM	-62,3 a 69,4	-35,1 a 50,5	-14,6 a 31,7	-12,2 a 30,5
	Tradicional	-21,6 a 17,4	-18,0 a 11,7	-19,8 a 15,9	-22,3 a 17,2
Carinhanha	MCM	18,2 a 71,9	22,8 a 57,2	26,3 a 56,5	31,4 a 58,6
	Tradicional	-29,7 a 23,1	-25,1 a 22,0	-14,9 a 21,5	12,4 a 21,4
Corrente	MCM	-64,4 a 65,0 (32,0 a 65,0) <sup>1</sup>	-46,0 a 51,6 (22,3 a 51,6) <sup>1</sup>	-44,7 a 56,5 (26,8 a 56,5) <sup>1</sup>	-35,3 a 58,8 (31,1 a 58,8) <sup>1</sup>
	Tradicional	-62,9 a 19,1 (-4,5 a 19,1) <sup>1</sup>	-64,9 a 19,7 (-4,8 a 19,7) <sup>1</sup>	-69,2 a 21,1 (-5,5 a 21,1) <sup>1</sup>	-70,5 a 21,4 (-5,8 a 21,4) <sup>1</sup>
Grande	MCM	-199,7 a 57,5 (-46,2 a 57,5) <sup>2</sup>	-180,5 a 41,9 (-27,7 a 41,9) <sup>2</sup>	-125,8 a 66,9 (-68,8 a 66,9) <sup>2</sup>	-112,2 a 75,9 (-43,3 a 75,9) <sup>2</sup>
	Tradicional	-299,8 a 40,0 (-38,6 a 40,0) <sup>2</sup>	-212,4 a 38,4 (-37,3 a 38,4) <sup>2</sup>	-110,3 a 35,3 (-30,8 a 35,3) <sup>2</sup>	-93,5 a 36,8 (-28,8 a 36,8) <sup>2</sup>
Região 14	MCM	-1183 a -0,3	-295,4 a 81,4	(-145,9 a 71,4) <sup>3</sup>	(-82,6 a 60,8) <sup>3</sup>
	Tradicional	-	-	-15,5 a 21,6	-69,8 a 38,1
Pajeú	MCM	-	-	-	-
	Tradicional	-42,5 a 27,2	-43,1 a 23,9	-	-

<sup>1</sup> Amplitude de variação sem a consideração do erro evidenciado na estação Mocambo, localizada no rio do Meio.

<sup>2</sup> Amplitude de variação sem a consideração do erro evidenciado na estação Fazenda Coqueiro, localizada no ribeirão São Desidério.

<sup>3</sup> Não foi considerado o rio Verde, embora este esteja presente na região 14.

Na bacia do Paraopeba os erros foram inferiores a 30% (valor em módulo) com exceção dos ajustes realizados pelo MCM em função da área e da precipitação equivalente. Embora para as seis combinações restantes os erros tenham sido inferiores a 30%, uma maior quantidade de estações com erros inferiores a 10% foi evidenciada com o uso da  $P_{eq700}$  (dez das 12 estações localizadas na bacia) e da  $P_{eq750}$  (nove das 12 estações localizadas na bacia) pelo MCM.

Já para a bacia do rio das Velhas os erros apresentaram amplitudes superiores aos das três outras bacias em todas as combinações, sendo os erros maiores que 50% (valor em módulo). As menores variações ocorreram com o uso do MCM em função da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$ , tendo sido evidenciado erros inferiores a 10% em dez das 18 estações localizadas na bacia, sendo no restante menor que 30%, com exceção da estação Presidente Juscelino-

Jusante e de Curimataí em que os erros chegaram a 43,9 e a 54,3% quando aplicada a  $P_{eq700}$  e a 42,4 e a 56,5% quando aplicada a  $P_{eq750}$ , respectivamente.

Na bacia do Paracatu, as combinações realizadas apresentaram uma tendência de diminuição dos erros quando utilizadas as variáveis na seguinte ordem: área, precipitação equivalente,  $P_{eq700}$  e  $P_{eq750}$ , sendo este comportamento mais evidenciado com o uso do MCM. Os usos da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$  pelo MCM resultaram em menores erros, ocorrendo em 18 das 21 estações presentes na bacia erros inferiores a 10%.

Para a bacia do Urucuia evidenciou-se o melhor desempenho com o uso do método tradicional, sendo os erros em módulo inferiores a 22%, enquanto pelo MCM os erros foram superiores a 30%. Das combinações realizadas pelo método tradicional a realizada com base na precipitação equivalente apresentou a menor variação dos erros e o maior número de estações com erros inferiores a 10% (quatro das seis estações presentes na bacia).

A aplicação do MCM na bacia do Carinhanha tendeu a subestimar as vazões, apresentando erros superiores a 55%. Nas combinações realizadas pelo método tradicional os erros foram inferiores a 30% (valor em módulo), tendo a menor amplitude de variação dos erros ocorrido tanto em função da  $P_{eq700}$  como da  $P_{eq750}$ . Embora com o uso destas duas variáveis os erros tenham sido semelhantes, ocorreu o maior número de estações com erros inferiores a 9% quando aplicada a  $P_{eq750}$ . Neste método a bacia do Carinhanha juntamente com as bacias dos rios Japoré e Pandeiros compuseram uma região homogênea, em que os erros nas seções localizadas nestes rios quando considerado o melhor ajuste  $P_{eq750}$  foram de 6,1 e -26,3%, respectivamente.

A estação Mocambo situada na bacia do Corrente apresentou erros elevados na aplicação dos dois métodos e das quatro variáveis independentes. Fazendo uma análise dos erros sem considerar o desta estação observa-se que o MCM subestimou as vazões, apresentando erros superiores a 50%. Já com o método tradicional os erros foram inferiores a 21%, embora não ocorrendo uma variação expressiva dos erros, uma maior quantidade de erros inferiores a 5% ocorreu quando as vazões foram estimadas em função da área e da precipitação equivalente.

Na bacia do rio Grande a estação Fazenda Coqueiro também apresentou erros elevados na aplicação dos dois métodos e das quatro variáveis independentes. Fazendo uma análise dos erros nas estações situadas nesta bacia sem considerar o erro desta estação, verifica-se que os menores erros ocorreram em função da precipitação equivalente pelo MCM e quando utilizada qualquer uma das quatro variáveis pelo método tradicional. Entretanto no ajuste realizado pelo método tradicional utilizando a  $P_{eq750}$  ocorreu a maior quantidade de estações com erros inferiores a 10% (sete das 15 estações situadas na bacia).

Na região 14 os ajustes realizados pelo MCM apresentaram erros superiores a 60% (valor em módulo). Para o rio Verde, assim como para o Jacaré, não foi possível a simulação pelo MCM quando considerada a  $P_{eq700}$  e a  $P_{eq750}$ , uma vez que a diminuição da precipitação menos 700 mm resultou em  $P_{eq700}$  iguais na estação analisada e na foz de cada rio, e o uso de 750 mm geraram  $P_{eq750}$  iguais a zero para estas estações e a foz destes rios. Já com o método tradicional foi possível fazer a regionalização nesta região apenas utilizando a  $P_{eq700}$  e a  $P_{eq750}$ , sendo os menores erros evidenciados para a  $P_{eq700}$ , os quais foram inferiores a 21% (valor em módulo).

Devido à grande oscilação das vazões na calha do São Francisco a jusante de Sobradinho, bem como o pequeno número de estações nesta região não foi possível também a regionalização de vazões tanto pelo MCM e como pelo método tradicional. O único ajuste permissível foi na bacia do rio Pajeú tendo como variáveis independentes a área e a precipitação equivalente, uma vez que os usos da precipitação menos 700 e 750 mm geraram valores de  $P_{eq700}$  e de  $P_{eq750}$  iguais a zero para algumas estações desta bacia. Os ajustes em função da área e da precipitação equivalente na bacia do rio Pajeú apresentaram erros relativos semelhantes.

Da análise com base no erro relativo pode-se constatar que em grande parte da bacia do São Francisco a aplicação do MCM teve estimativas mais precisas, com exceção das bacias do Urucuia, Carinhanha, Corrente, Grande, Pajeú e da região 14, nas quais o método tradicional teve melhor ajuste.

### **2.3.1.2 - Análise da continuidade de vazões**

Enquanto o MCM está baseado no princípio da continuidade de vazões, uma das grandes limitações do método tradicional é a da ocorrência de descontinuidades de vazões, tanto entre regiões homogêneas, como, até mesmo, após as confluências de uma única região homogênea quando a equação ajustada para esta região não é linear.

A título de exemplo a análise foi realizada para a bacia do rio Grande, para a qual foram ajustadas duas regiões homogêneas que apresentaram as seguintes equações de ajuste:  $Q_{mld} = 0,715489 P_{eq750}^{0,914852}$  (região A) e  $Q_{mld} = 0,249026 P_{eq750}^{1,10474}$  (região B). Como os ajustes não são lineares é válida a desigualdade representada na equação 2.3, em que a soma das vazões efluentes dos trechos 1 e 2 (Figura 2.3), as quais são calculadas considerando a área ou volume precipitado a montante da foz dos respectivos trechos, difere da vazão afluente ao trecho 3, obtida com base no somatório das áreas ou volumes precipitados a

montante dos trechos 1 e 2. Deste modo, ocorre uma descontinuidade de vazões, mesmo sendo a região homogênea.

Na Figura 2.10 se apresenta os valores dos índices de descontinuidade estimados para cada confluência da base hidrográfica ottocodificada da bacia do rio Grande.

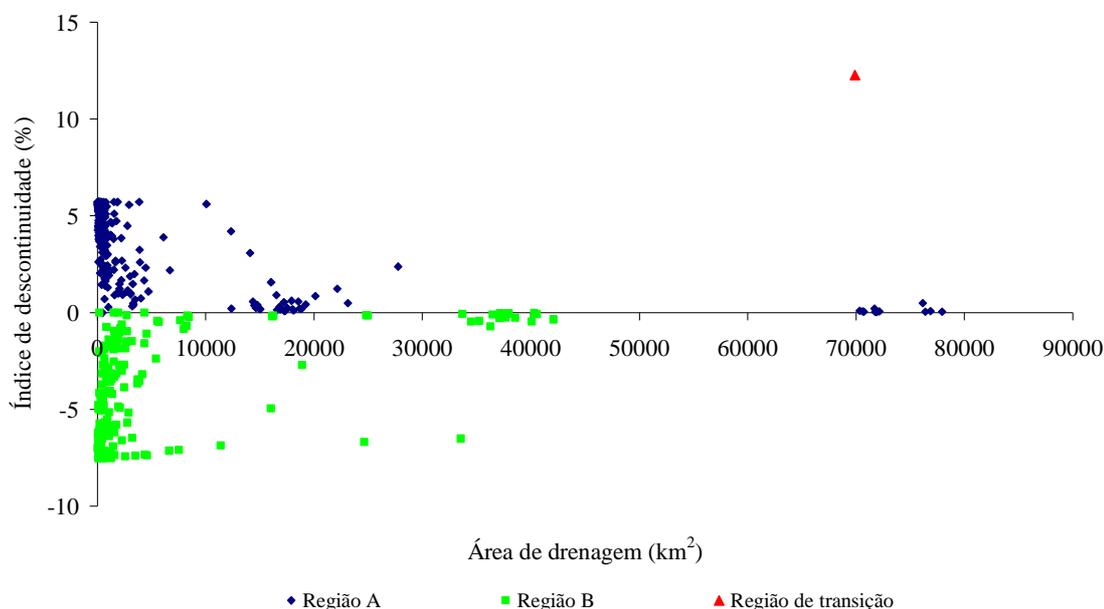


Figura 2.10. Índices de descontinuidades de vazões em cada confluência da base hidrográfica da bacia do rio Grande.

Os valores positivos e negativos dos índices foram decorrentes dos valores dos expoentes das equações potenciais ajustadas. Quando o expoente foi inferior ao valor um, a vazão afluente do trecho 3 (equação 2.3) foi menor que o somatório das vazões efluentes dos trechos 1 e 2, resultando em índices positivos, já para expoente superior a 1 ocorreu a situação inversa, tendo como consequência índices de descontinuidades negativos.

O maior índice de descontinuidade correspondente a 12% foi obtido na transição entre as duas regiões homogêneas, portanto ocorrendo a mudança das equações utilizadas.

Na região A, onde a equação ajustada apresentou um expoente menor do que um, os índices variaram de 0,03 a 5,73, implicando em uma subestimativa da vazão afluente ao trecho 3 (Figura 2.3), a qual é estimada em função da soma das áreas de drenagem (ou volume precipitado) dos trechos 1 e 2. As maiores magnitudes foram decorrentes de uma menor diferença entre as áreas (ou volume precipitado) a montante dos trechos 1 e 2, proporcionando uma menor soma das vazões efluentes destes trechos quando comparada à soma em que a diferença de área é maior. Como no cálculo do ID considera esta soma no denominador da equação, conseqüentemente, quanto menor for o denominador maior tenderá a ser o valor do

ID. Para a região B, em que o expoente foi maior que um, a amplitude de variação dos índices de descontinuidade foi de -0,03 a -7,3.

Visando a análise das vazões de contribuição de cada trecho do curso de água da base hidrográfica utilizada, na Figura 2.11 é apresentado o mapa da bacia do rio Grande com as regiões homogêneas e suas respectivas equações de regionalização, bem como os trechos da hidrografia onde a vazão incremental real foi negativa, ou seja, quando a soma das vazões advindas dos rios de montante de um determinado trecho foram superiores à vazão efluente deste trecho. Deste modo mesmo com o aumento da área, a vazão efluente do trecho não é suficiente para compensar a soma das vazões afluentes a este trecho.

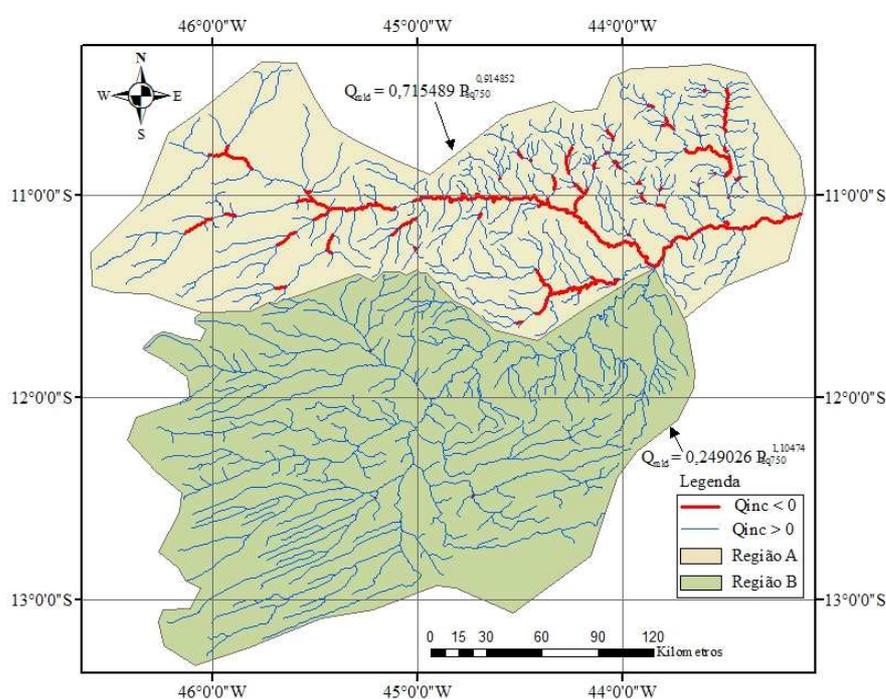


Figura 2.11. Regiões homogêneas e os locais onde ocorreram vazões incrementais negativas e positivas na bacia do rio Grande.

Esta situação somente ocorre na região A, em que o expoente da equação potencial ajustada foi inferior a um, fazendo com que a vazão incremental do trecho não seja suficiente para recuperar a descontinuidade que ocorre das vazões.

### 2.3.1.3 - Análise com base no coeficiente de escoamento superficial

#### 2.3.1.3.1 - Seleção do método pelo coeficiente de escoamento

O coeficiente de escoamento superficial, definido pela razão entre o volume escoado na seção de um curso de água e o volume precipitado na área de drenagem, além de

caracterizar o comportamento físico das vazões, apresenta uma faixa de variação definida de 0 a 1. Considerando este fato utilizou-se este indicador na avaliação das equações de regionalização ajustadas.

Na Figura 2.12 é apresentado o mapa com a variação espacial do coeficiente de escoamento superficial estimado com base nos dados observados nas 145 estações fluviométricas da bacia do São Francisco (coeficientes de escoamento observados). O coeficiente de escoamento superficial diminui do Alto em direção ao Baixo São Francisco, variando de 0,63 na estação Itabirito, localizada na bacia do rio das Velhas, a 0,003 na estação Jaguarice, localizada na bacia do rio Jacaré. Este comportamento pode ser compreendido pela análise das precipitações que ocorrem na bacia, que também decrescem nesse sentido (Figura 2.2), variando de 1.800 a 370 mm.

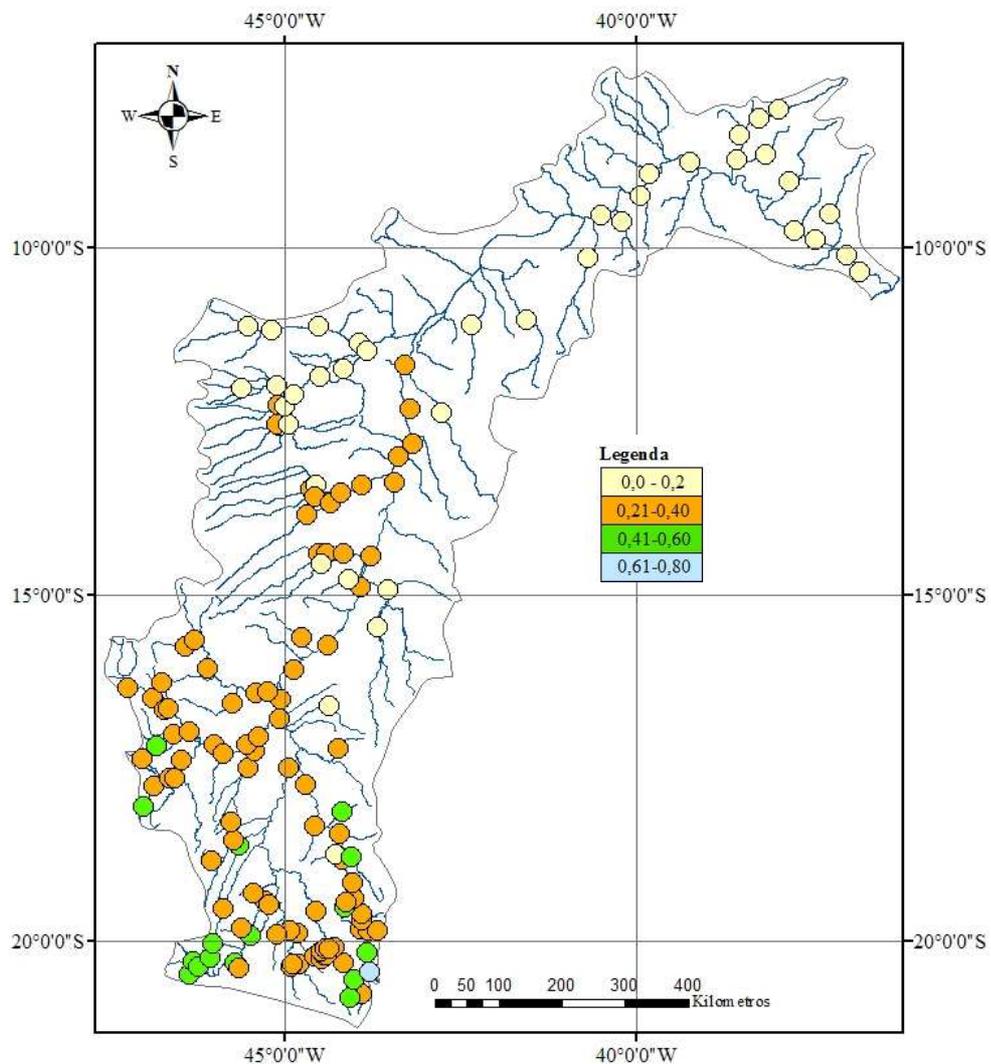


Figura 2.12. Coeficientes de escoamento superficial nas áreas de drenagem de 145 estações fluviométricas situadas na bacia do São Francisco considerando-se o período de 1979 a 2002.

Nas Figuras 2.13 a 2.16 são apresentados os mapas com os valores dos coeficientes de escoamento superficial estimados com base nos diferentes métodos e variáveis independentes analisados (coeficientes de escoamento estimados) para cada trecho do curso de água da base hidrográfica otocoficada da bacia do São Francisco.

Observa-se, em alguns trechos, sobretudo quando utilizadas as vazões estimadas pelo MCM, coeficientes de escoamento superiores a um, que irão acarretar volumes escoados maiores que os próprios volumes precipitados nas áreas de drenagem. Representando, portanto, uma superestimativa dos volumes de escoamento estimados em relação àqueles fisicamente possíveis.

Tanto a ocorrência das áreas com valores de coeficientes de escoamento superiores a um quanto a magnitude da superestimativa diminuiram conforme a seguinte ordem das variáveis independentes: A,  $P_{eq}$ ,  $P_{eq700}$  e  $P_{eq750}$ .

Quando os coeficientes foram obtidos em função das vazões regionalizadas pelo MCM com base na área, o coeficiente de escoamento chegou a atingir valor igual a 8,6 em um trecho do rio Bicudo, afluente do rio das Velhas. Já com o uso das vazões estimadas em função da precipitação equivalente o maior valor de coeficiente de escoamento foi igual a 3,4 observado em um trecho do rio Jabuticatubas, afluente do rio das Velhas. Embora o uso da precipitação equivalente em substituição à área tenha representado melhoria dos valores no coeficiente de escoamento, nas bacias dos rios Pará, Paraopeba, das Velhas, Paracatu, Urucuia e na cabeceira do rio São Francisco, passaram a ocorrer para esta condição, nas bacias do Verde Grande, Paramirim e Jacaré coeficientes superiores a um, o que não ocorria quando do uso da área. Os coeficientes encontrados com o uso das vazões estimadas em função da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$ , apresentaram ainda uma melhora com relação ao uso das outras duas variáveis, sendo os maiores valores iguais a 2,0, também observados no rio Jabuticatubas.

Com o uso do método tradicional os coeficientes de escoamento raramente superaram o valor de um, tendo somente ocorrido na região Leste da bacia, a jusante da confluência do rio das Velhas, quando considerada no cálculo das vazões a precipitação menos a inércia hídrica, sobretudo a de 750 mm.

Na região 1 os coeficientes tenderam a ser superestimados próximos às nascentes quando consideradas as vazões estimadas com base na área e na precipitação equivalente, já quando utilizadas as vazões obtidas em função da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$  os coeficientes ficaram em grande parte da bacia mais próximo dos valores observados nas estações, variando de 0,2 a 0,60. Pelo método tradicional não ocorreu uma variação expressiva dos coeficientes quando utilizada qualquer uma das variáveis independentes para a estimativa das vazões, ficando estes na margem dos observados.

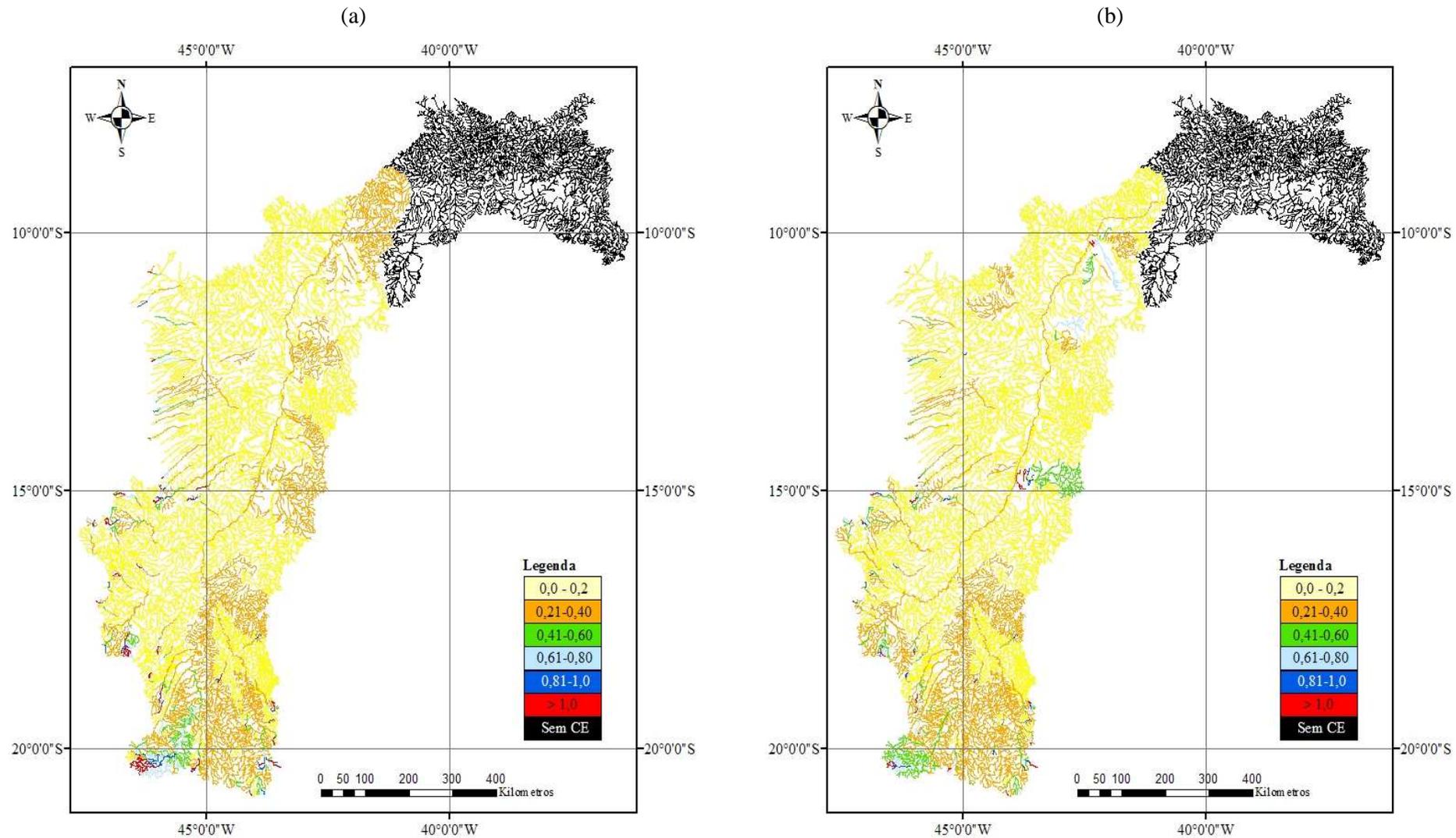


Figura 2.13. Coeficientes de escoamento superficial obtidos quando utilizadas as vazões regionalizadas em função da área (a); e da precipitação equivalente (b) pelo MCM.

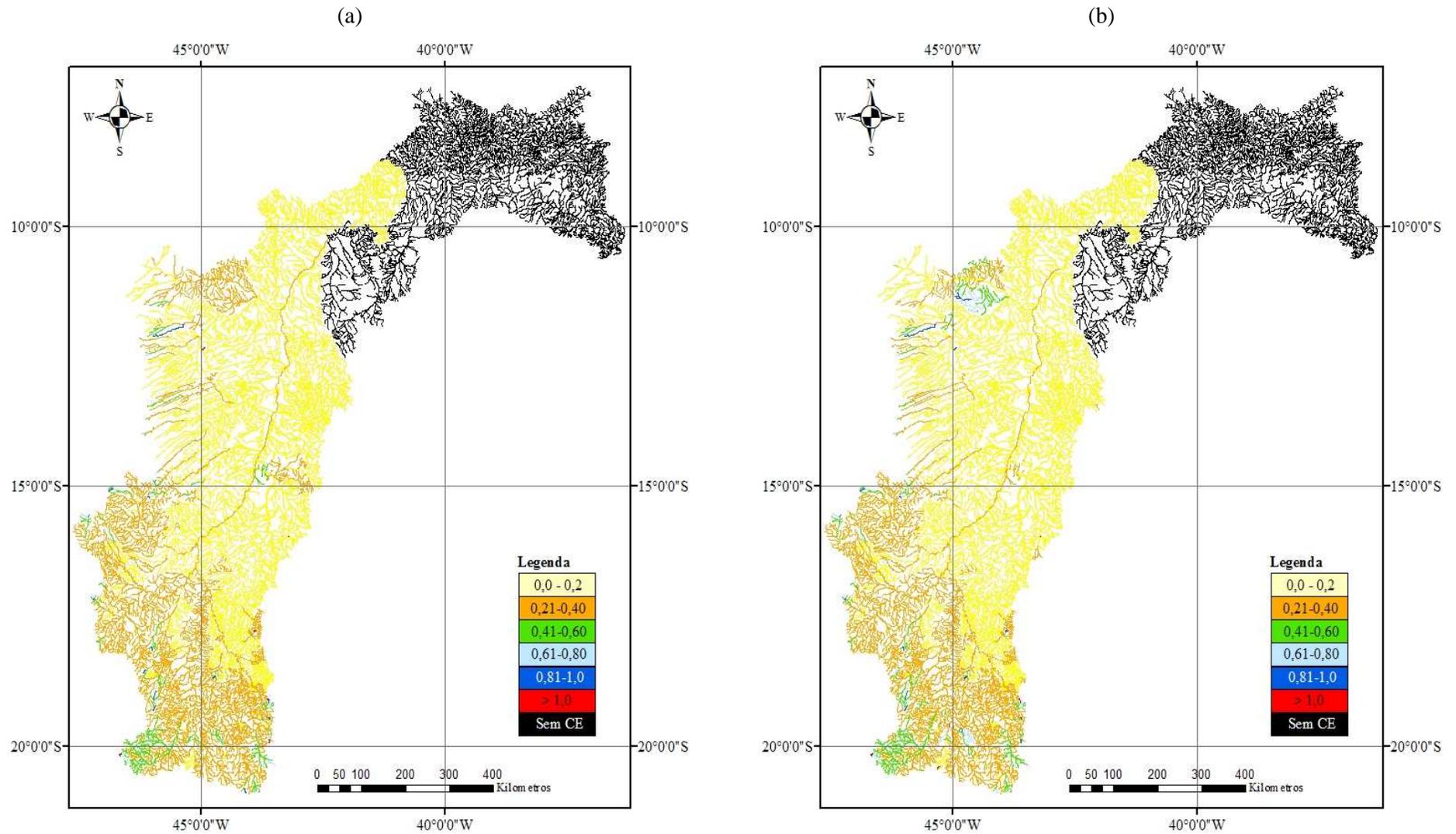


Figura 2.14. Coeficientes de escoamento superficial obtidos quando utilizadas as vazões regionalizadas em função da  $P_{eq700}$  (a); e da  $P_{eq750}$  (b) pelo MCM.

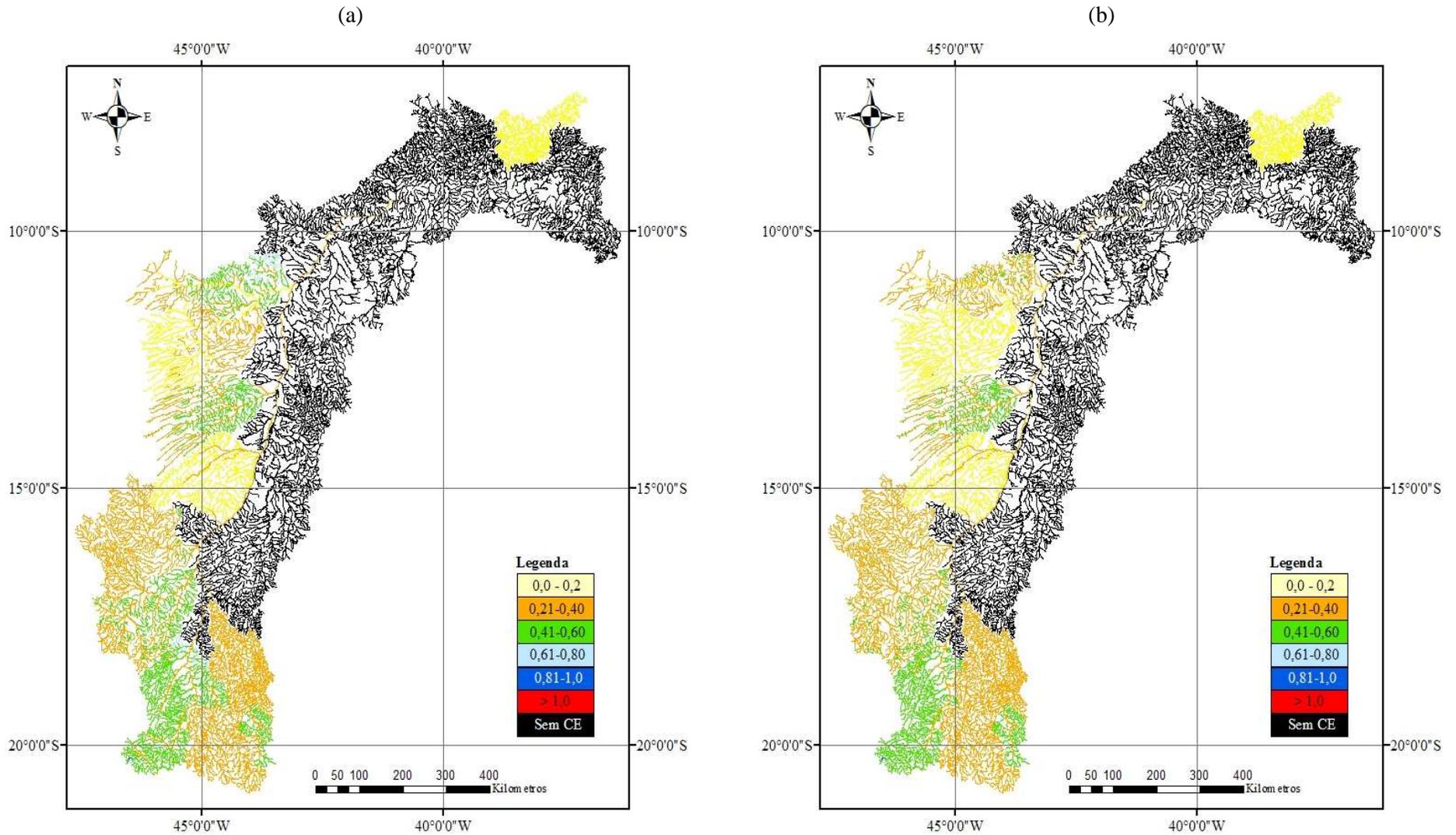


Figura 2.15. Coeficientes de escoamento superficial obtidos quando utilizadas as vazões regionalizadas em função da área (a); e da precipitação equivalente (b) pelo método tradicional.

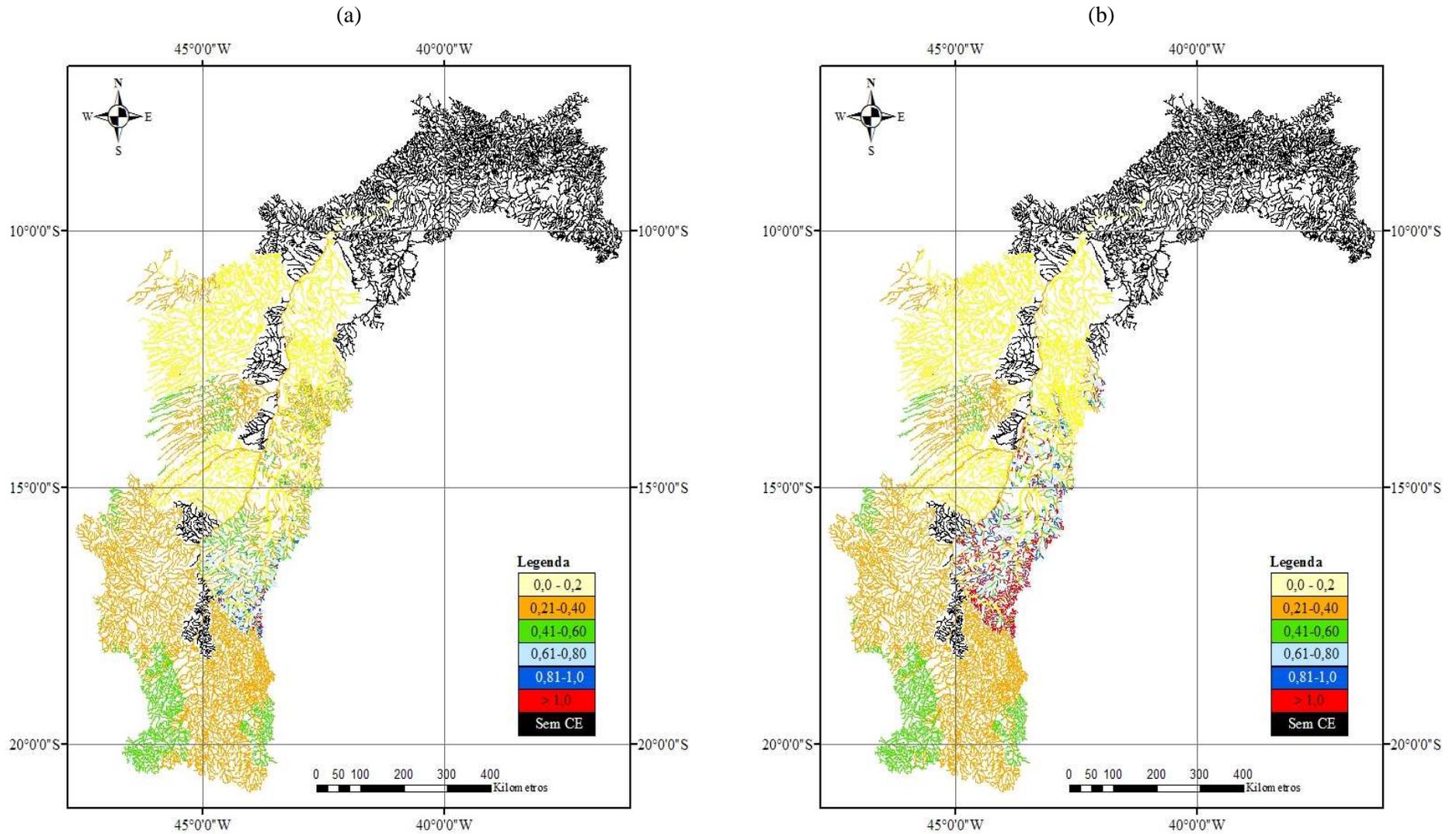


Figura 2.16. Coeficientes de escoamento superficial obtidos quando utilizadas as vazões regionalizadas em função da  $P_{eq700}$  (a); e da  $P_{eq750}$  (b) pelo método tradicional.

Em grande parte da bacia do rio Pará os coeficientes obtidos com base nas vazões estimadas pelos dois métodos e pelas quatro variáveis variaram de 0,21 a 0,40, portanto dentro do limite observado nas estações.

Pelo MCM os coeficientes variaram, em grande parte da bacia do Paraopeba, de 0,21 a 0,40 e em algumas nascentes estes foram superestimados. Já pelo método tradicional a variação foi de 0,21 a 0,60 quando utilizadas as vazões estimadas com base na área e na precipitação equivalente e de 0,21 a 0,40 quando estas foram estimadas em função da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$ . Portanto em ambas as combinações realizadas os coeficientes ficaram em quase toda a bacia na faixa dos observados (0,21 a 0,60).

Na bacia do rio das Velhas os coeficientes foram tanto subestimados quanto superestimados pelo MCM, tendo este comportamento ocorrido em maior extensão quando as vazões foram estimadas em função da área e da precipitação equivalente. Como pelo método tradicional esta bacia foi dividida em duas regiões homogêneas, os coeficientes variaram em todas as combinações realizadas de 0,21 a 0,40 na região 4 e de 0,21 a 0,60 na região 5, portanto estando no limite dos observados nas estações (0,18 a 0,64).

Em grande área da bacia do Paracatu os coeficientes obtidos com base nas vazões estimadas pelo MCM em função da área e da precipitação equivalente foram inferiores a 0,20, portanto estando abaixo dos valores evidenciados nas estações os quais variaram de 0,25 a 0,41. Já quando as vazões foram estimadas em função da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$  os coeficientes se aproximaram dos observados. Pelo método tradicional as vazões estimadas em função da área resultaram em coeficientes entre a 0,21 e 0,60, sendo minimizada a ocorrência de coeficientes superiores a 0,41 quando utilizada a precipitação equivalente e ainda mais com o uso da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$ .

Para a bacia do Urucuia, as vazões estimadas pelo MCM em função da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$  e pelo método tradicional em função da área e da precipitação equivalente, proporcionaram a ocorrência em uma maior extensão na bacia de valores de coeficientes dentro do limite de variação dos observados nas estações (0,21 a 0,40). As outras combinações tenderam a subestimar os coeficientes.

Os coeficientes estimados na bacia do Carinhanha, considerando todas as combinações realizadas pelo MCM para a obtenção das vazões, tenderam a ser inferiores aos observados (0,20 a 0,40) em grande parte da bacia. Pelo método tradicional os coeficientes de escoamento no curso de água principal foram dentro do limite dos observados.

Na bacia do rio Corrente, os coeficientes obtidos com base nas vazões estimadas pelo MCM foram em geral inferiores aos observados (0,16 a 0,40). Já pelo método tradicional os

curtos de água principais apresentaram coeficientes na margem dos observados, entretanto ocorreu uma superestimativa nos rios com menores áreas de drenagem.

A aplicação do MCM na bacia do rio Grande proporcionou valores de coeficientes inferiores a 0,2 em grande parte da bacia com exceção de seu afluente, o rio Preto, no qual os coeficientes tenderam a serem superestimados quando utilizados a precipitação equivalente, a  $P_{eq700}$  e a  $P_{eq750}$ . Pelo método tradicional a consideração da precipitação menos a inércia hídrica na equação de regionalização proporcionou estimativas mais precisas dos coeficientes, os quais foram inferiores a 0,2 em grande parte da bacia, portanto estando na margem dos observados em suas estações. Já nos trechos do rio Preto, os coeficientes foram superestimado, sendo a menor extensão de valores elevados evidenciada quando a vazão foi estimada com base na  $P_{eq750}$ .

Tanto o uso da área como da precipitação equivalente pelo método tradicional estimaram coeficientes de escoamento na bacia do rio Pajeú, dentro dos limites observados na bacia.

Na Figura 2.17 é apresentado a título de exemplo, o comportamento dos coeficientes de escoamento, para a bacia do rio das Velhas, estimados com base nos dados observados nas estações desta bacia e os estimados, em cada trecho da base hidrográfica, com base nas vazões obtidas considerando a  $P_{eq700}$  pelos métodos tradicional e MCM, sendo esta variável a que proporcionou o melhor ajuste por ambos os métodos.

Para o MCM, valores de coeficientes superiores a um são observados em sete trechos situados próximos às nascentes da bacia do rio das Velhas, sendo o maior valor igual a 2,1 (chegando a ser quatro vezes superior ao maior valor observado, o qual foi igual a 0,64). Já o menor valor de coeficiente de escoamento foi de 0,06, valor este correspondente a 1/3 do menor valor evidenciado na bacia (0,18). Pelo método tradicional os coeficientes estimados variaram de 0,61 a 0,22, ficando dentro dos limites observados nas estações.

Para as outras bacias foram evidenciados comportamentos semelhantes do coeficiente de escoamento pelo MCM e pelo método tradicional.

Desta forma, embora o MCM tenha caracterizado em diversas situações, conforme descrito no item 2.3.1.1., menores amplitudes de variações dos erros, considera-se que a adoção do MCM ocasionaria maiores imprecisões visto a grande variação dos coeficientes de escoamento, sobretudo nas cabeceiras onde por sinal a complexidade de estimativa das vazões já é mais acentuada. Já o método tradicional tendeu a apresentar menores amplitudes de variações dos coeficientes de escoamento.

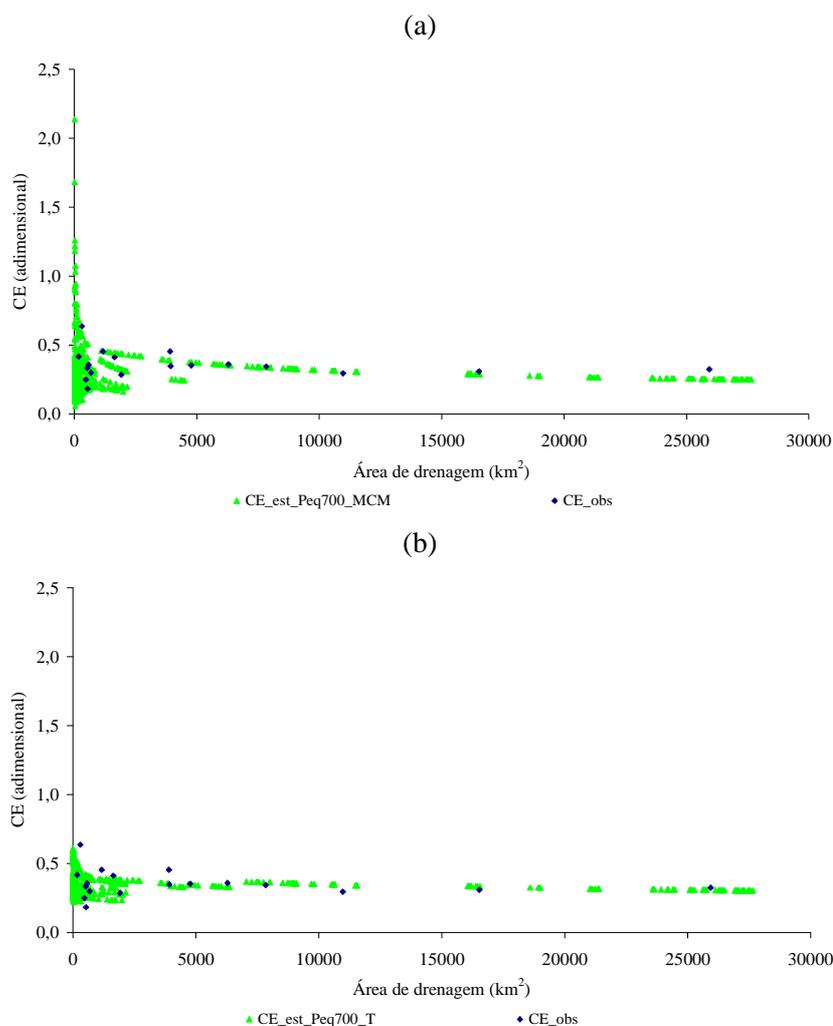


Figura 2.17. Coeficientes de escoamento superficial obtidos com base nas vazões estimadas em função da  $P_{eq,700}$  pelo MCM (a) e pelo método tradicional (b) em cada trecho da base hidrográfica da bacia do rio das Velhas e os estimados com base nos dados observados em suas estações.

### 2.3.1.3.2 - O uso do coeficiente de escoamento para a adequação da extrapolação das equações de regionalização

Uma vez que uma das grandes limitações da regionalização é a extrapolação dos dados de vazões gerados pelas equações de regionalização, analisaram-se os locais na base hidrográfica em que o coeficiente de escoamento estimado foi superior ao maior coeficiente observado em uma determinada região ou rio, no caso do método tradicional e do MCM, respectivamente. Na Figura 2.18 são apresentados os mapas representando os locais onde os coeficientes obtidos com base nas vazões estimadas em função da  $P_{eq750}$  por ambos os métodos analisados foram superiores aos valores máximos observados.

Observa-se, no MCM, que os coeficientes tenderam a ser superestimados, em todas as bacias, sobretudo nas regiões com áreas de drenagem de menores dimensões, onde os problemas associados a estimativas inadequadas das vazões trazem implicações práticas de

maior risco. No método tradicional os coeficientes estimados foram superiores ao maior valor observado as bacias dos rios das Velhas, do Paracatu, do Urucuia, do Corrente e do Grande, bem como na região 14. Enquanto nas bacias dos rios das Velhas, do Paracatu e do Grande a incidência de valores superiores foi menor ao do MCM, nas duas outras bacias bem como na região 14 a incidência de valores superiores foi maior que o evidenciado no MCM.

Portanto, para minimizar os erros advindos da extrapolação das equações de regionalização utilizou-se o coeficiente de escoamento associado a um valor considerado como limite para esta extrapolação, sendo este o maior valor observado nas estações de uma determinada região ou rio, no caso do método tradicional e do MCM, respectivamente. Desta forma quando os coeficientes estimados foram superiores ao valor limite, a vazão foi recalculada pelo produto da precipitação equivalente com o coeficiente limite (Equação 2.8).

Na Figura 2.19 é apresentado, para o rio Preto, afluente do Paracatu, o comportamento dos coeficientes de escoamento superficial observados nas estações fluviométricas, do estimado com base nas vazões regionalizadas e do ajustado em função do coeficiente de escoamento utilizado como limite, o qual é correspondente ao presente caso a 0,34.

Observa-se que até a área de drenagem de 3.059 km<sup>2</sup> o coeficiente de escoamento estimado supera o valor do coeficiente utilizado como limite, chegando a ser igual a 0,93 (aproximadamente três vezes superior ao valor considerado como limite). Deste modo a montante desta área foi necessário o ajuste dos coeficientes de escoamento estimados, sendo atribuído valor igual ao do coeficiente limite para esta região, tendo, portanto o coeficiente ajustado um comportamento linear.

Na Figura 2.20 é apresentada para o rio Preto, o comportamento das vazões médias de longa duração em função da área de drenagem estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas, bem como das vazões quando considerada a equação original e o procedimento adotado para o ajuste das vazões.

Como a montante da área de drenagem de 3.059 km<sup>2</sup> os coeficientes estimados foram superiores ao coeficiente utilizado como limite, foi necessário o ajuste das vazões médias desta região. Embora este ajuste apresente uma tendência de comportamento, que visualmente é linear, na prática este comportamento não é linear, visto que o ajuste é realizado com base na precipitação equivalente e não em relação à área de drenagem. O comportamento linear seria evidenciado em uma condição de precipitação uniforme na bacia ou caso as vazões fossem representadas em função da precipitação equivalente.

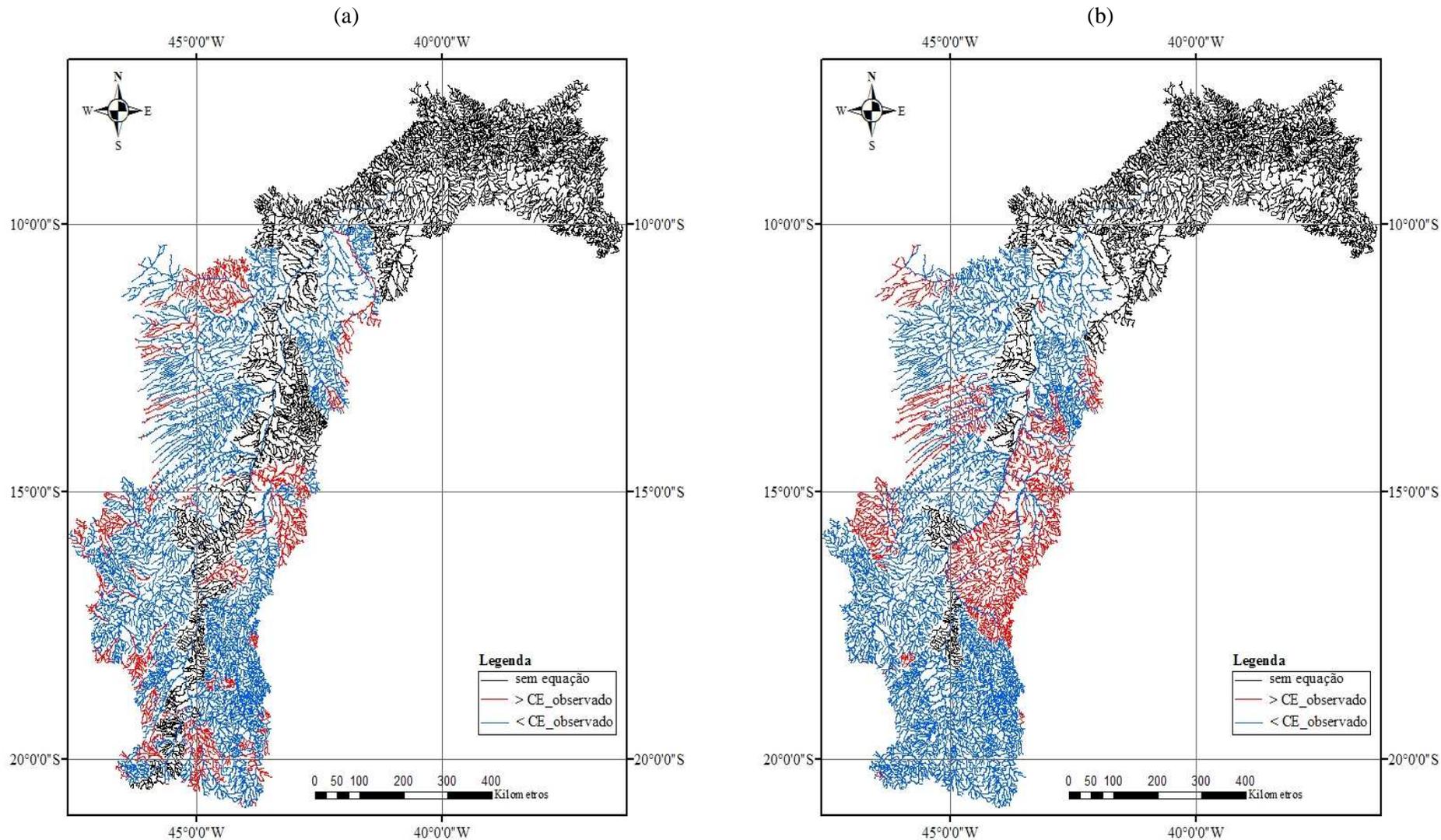


Figura 2.18. Regiões na bacia do São Francisco onde o coeficiente de escoamento superficial obtidos com base nas vazões estimadas em função da  $P_{eq750}$  pelo MCM (a); e pelo método tradicional (b) foi inferior ( $< CE_{observado}$ ) e superior ( $> CE_{observado}$ ) ao maior coeficiente de escoamento superficial observado.

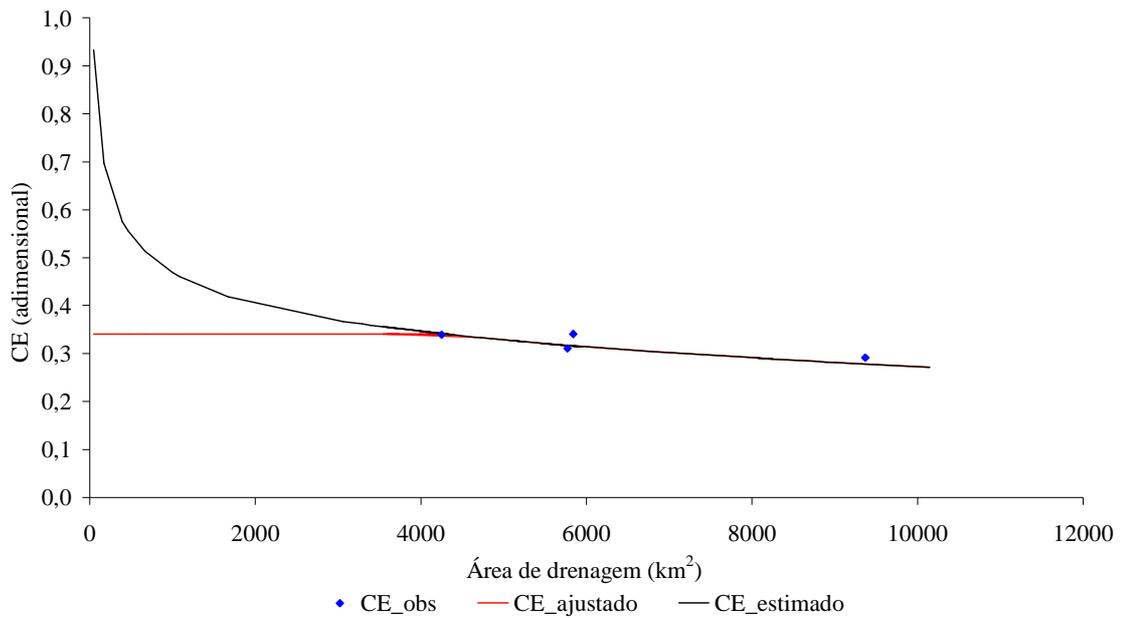


Figura 2.19. Coeficientes de escoamento superficial observados nas estações fluviométricas localizadas no rio Preto (CE\_obs), do estimado com base nas vazões regionalizadas (CE\_estimado) e do ajustado (CE\_ajustado).

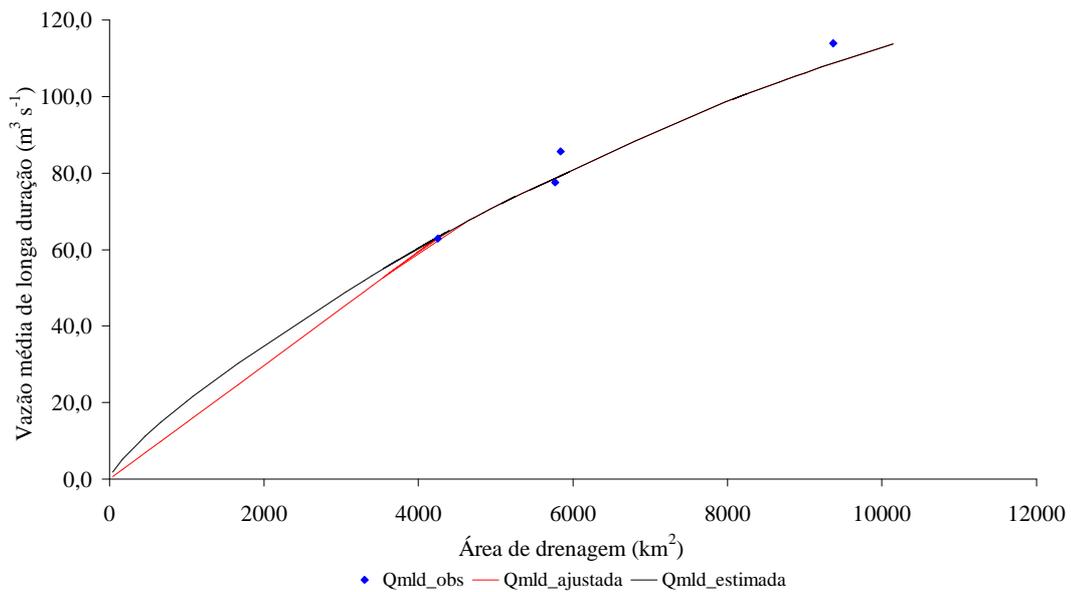


Figura 2.20. Vazões médias de longa duração estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas (Qmld\_obs) localizadas no rio Preto, da estimada pela equação de regionalização (Qmld\_estimado) e da ajustada (Qmld\_ajustada).

A declividade do ajuste corresponde à sua contribuição específica, sendo esta maior na cabeceira, devido ao comportamento decrescente da precipitação em direção à foz.

Verifica-se que o procedimento adotado minimiza as vazões onde os coeficientes estimados foram superiores ao selecionado como limite, permitindo, assim uma gestão mais segura dos recursos hídricos.

### 2.3.1.4 - Método e variáveis selecionadas para a regionalização da vazão média de longa duração

Devido à grande amplitude de variação dos coeficientes de escoamento estimados, excedendo os limites dos valores dos coeficientes de escoamento observados principalmente em pequenas áreas de drenagem quando aplicado o MCM, o método tradicional foi o que melhor representou o comportamento das vazões médias na bacia do São Francisco.

Desta forma, foram selecionados os melhores ajustes pelo método tradicional para todas as bacias do São Francisco, embora os erros relativos tenham sido menores pelo MCM em algumas bacias (bacias presentes na região 1, bacia do Paraopeba, bacia do rio das Velhas e bacia do Paracatu).

No Quadro 2.2 são apresentadas as equações selecionadas para cada região homogênea pelo método tradicional e os valores dos coeficientes de escoamento considerados como limite para cada região.

Quadro 2.2. Equações selecionadas para cada região homogênea pelo método tradicional e os valores dos coeficientes de escoamento considerados como limite para cada região

Regiões Homogêneas	Equação	CE (limite)
1	$Q_{mld} = 0,894627 P_{eq750}^{0,971246}$	0,564
2	$Q_{mld} = 0,26055 P_{eq}^{1,042028}$	0,332
3	$Q_{mld} = 0,324716 P_{eq}^{1,0281}$	0,483
4	$Q_{mld} = 0,784003 P_{eq700}^{0,985354}$	0,454
5	$Q_{mld} = 1,006889 P_{eq700}^{0,911246}$	0,637
6	$Q_{mld} = 0,91151 P_{eq750}^{0,943225}$	0,392
7	$Q_{mld} = 0,826476 P_{eq750}^{0,945929}$	0,414
8	$Q_{mld} = 0,809622 P_{eq750}^{0,969921}$	0,402
9	$Q_{mld} = 0,386132 P_{eq}^{0,950561}$	0,344
10	$Q_{mld} = 0,520535 P_{eq750}^{1,176477}$	0,343
11	$Q_{mld} = 0,025376 A^{0,880451}$	0,336
12	$Q_{mld} = 0,249026 P_{eq750}^{1,10474}$	0,238
13	$Q_{mld} = 0,715489 P_{eq750}^{0,914852}$	0,199
14	$Q_{mld} = 1,638569 P_{eq700}^{0,557448}$	0,216
15	$Q_{mld} = 0,017581 P_{eq}^{1,171984}$	0,053
16	$Q_{mld} = 1,2828 P_{eq750}^{0,9191}$	0,567

Na Figura 2.21 é apresentado o mapa mostrando os métodos e variáveis selecionados na regionalização de vazões para a bacia do São Francisco e as regiões onde foi necessário o ajuste com base no coeficiente de escoamento utilizado como limite.

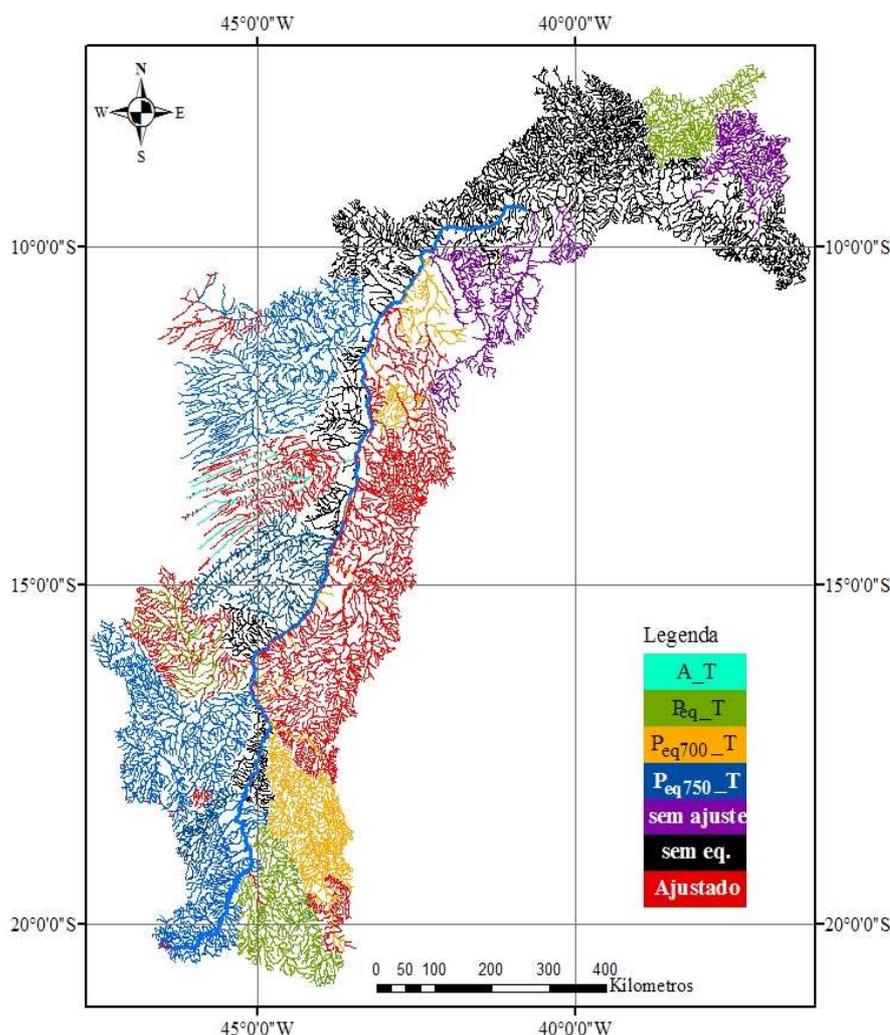


Figura 2.21. Métodos (T = método tradicional) e variáveis (A = área,  $P_{eq}$  = precipitação equivalente;  $P_{eq700}$  = precipitação equivalente considerando uma diminuição de 700 mm;  $P_{eq750}$  = precipitação equivalente considerando uma diminuição de 750 mm) selecionados para a regionalização da  $Q_{mld}$  na bacia do São Francisco. Sem ajuste corresponde às bacias que apresentam estações fluviométricas, mas não foi possível nenhum ajuste e sem eq. corresponde aos locais onde não existem estações fluviométricas, não sendo possível a obtenção de equações de regionalização. Ajustado corresponde aos locais onde foi necessário o ajuste com base no coeficiente limitador.

Nos afluentes da margem esquerda a montante de Sobradinho, com exceção das bacias dos rios Urucua e Corrente, a variável independente que melhor se ajustou foi a  $P_{eq750}$ . Já para a margem direita excluindo as bacias do Pará e Paraopeba foi a  $P_{eq700}$ .

Este menor valor de inércia hídrica na margem direita é decorrente da inexistência de água suficiente para evaporar em consequência da alta taxa de evaporação nesta região a qual abrange o semi-árido.

O ajuste das vazões foi necessário tanto para os afluentes da margem direita do São Francisco a jusante da confluência do rio das Velhas, como também nos afluentes dos rios Urucuia, Corrente e Preto (tributário do rio Grande).

Para fins de representação do impacto do uso do modelo de regionalização proposto em relação a outros modelos propostos para a bacia do São Francisco, são apresentadas, para os rios Grande e Carinhanha, na Figura 2.22 as vazões estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas e as curvas obtidas a partir de diferentes estudos de regionalização realizados para a bacia do São Francisco. As curvas apresentadas nesta figura são as relativas aos seguintes estudos: a) ANEEL (2002 e sem data), estes estudos correspondem aos desenvolvidos por diversas instituições para a ANEEL; b) Euclides e Ferreira (2002), o qual é apresentado pelo Hidrotec em forma de boletim técnico; c) e Euclides e Ferreira (2007) o qual é apresentado pelo Hidrotec via internet.

No rio Grande só foi possível a comparação das vazões estimadas pela equação proposta pelo presente estudo e pelo estudo elaborado para ANEEL, uma vez que os estudos apresentados pelo Hidrotec abrangeram somente a parte mineira da bacia do São Francisco. Verifica-se na Figura 2.22a que embora a área de drenagem tenha um aumento expressivo, como, por exemplo, no trecho de 42.000 a 70.000 km<sup>2</sup> a vazão variou pouco, de 166 a 171 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, refletindo o comportamento do comprimento do rio principal, apresentado na Figura 2.23a. Portanto, embora a equação ajustada possa ter refletido estatisticamente melhor o comportamento, fisicamente esta não correspondeu ao comportamento das vazões. Visto que o comprimento do rio é uma característica física que depende da escala na qual ele é obtido, ressalta-se que a escala utilizada para a aquisição desta característica física pelo estudo elaborado para ANEEL (1:100.000) foi 100 vezes maior que a da base hidrográfica, na qual a equação foi aplicada.

Já a equação proposta neste trabalho teve uma tendência de variação contínua das vazões com o aumento da área de drenagem. As mudanças de declividade são devido ao fato de que a equação de regionalização ajustada é função da  $P_{eq750}$ , sendo, portanto as diferenças de declividade decorrentes das contribuições dos afluentes, cuja precipitação média é variável. Assim os trechos com maior declividade correspondem a afluentes cujas áreas de drenagem ocorrem maior lâmina precipitada. Este fato vem a reiterar a importância de uso de variáveis representativas do comportamento físico das vazões obtidas ao longo da hidrografia.

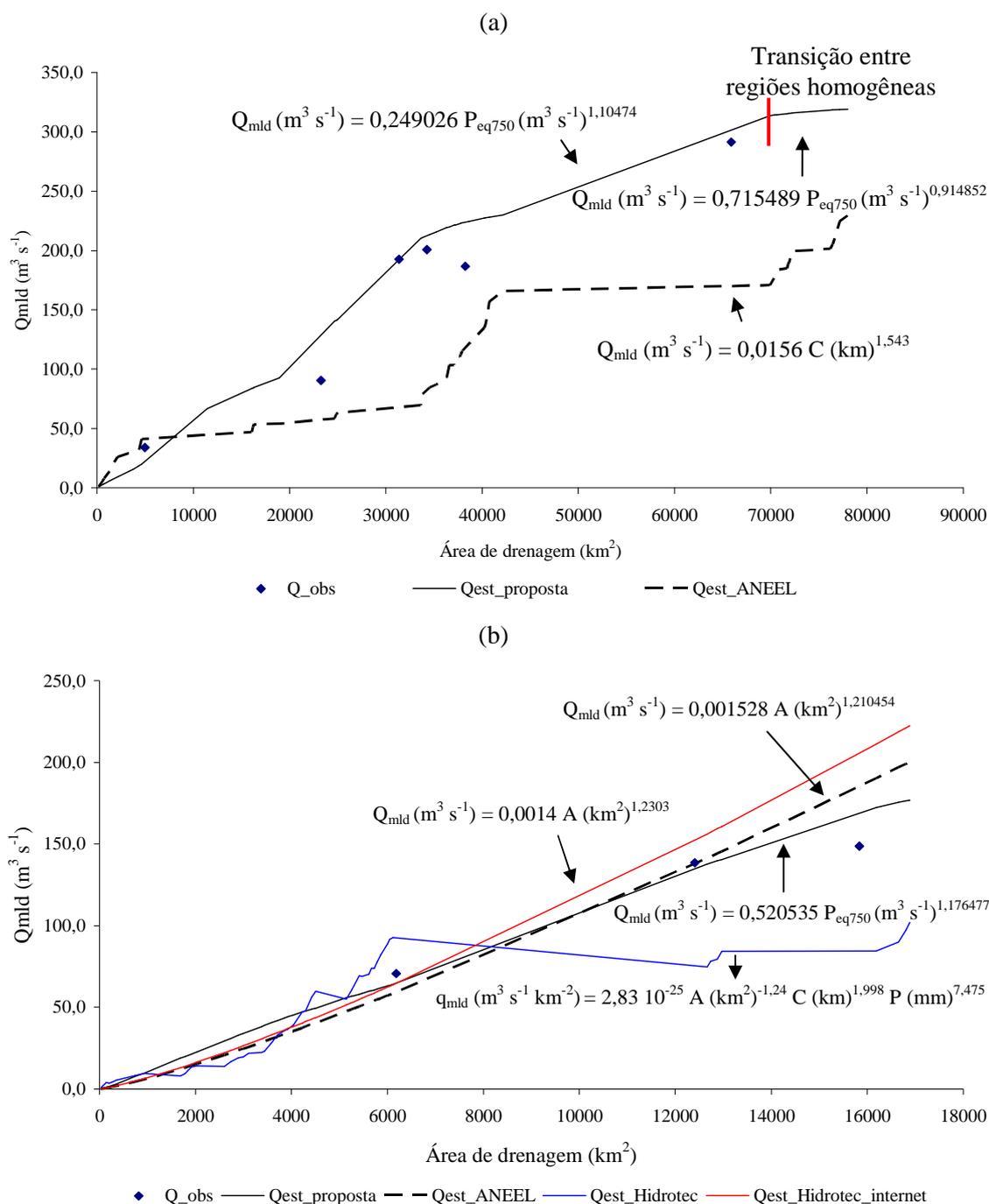


Figura 2.22. Vazões médias de longa duração estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas ( $Q_{obs}$ ), pelo ajuste proposto neste trabalho ( $Q_{est\_proposta}$ ), pela equação contida no trabalho elaborado para a ANEEL ( $Q_{est\_ANEEL}$ ), no trabalho apresentado pelo Hidrotec em forma de boletim técnico ( $Q_{est\_Hidrotec}$ ) e pela equação atualizada via Internet ( $Q_{est\_Hidrotec\_internet}$ ), ao longo dos rios Grande (a) e Carinhanha (b).

Para o rio Carinhanha conforme já descrito, o comprimento do rio principal (Figura 2.23b) refletiu no comportamento da vazão ajustada pela equação apresentada no boletim técnico pelo Hidrotec. Como nesta equação também foi considerada a precipitação média anual elevada a um expoente maior, observou-se valores decrescente de vazões refletindo

também o comportamento da precipitação que decresce de montante para jusante nesta bacia. As outras três curvas não apresentaram grandes variações. As equações apresentadas, via internet, pelo Hidrotec e pelo trabalho desenvolvido para a ANEEL foram em função da área de drenagem, sendo a taxa de crescimento da vazão mais acentuada quando aplicada a equação apresentada pelo Hidrotec em virtude do maior valor do expoente desta equação. A proposta no presente estudo como leva em conta a  $P_{eq750}$  apresentou conseqüentemente mudanças na declividade decorrentes das contribuições dos afluentes.

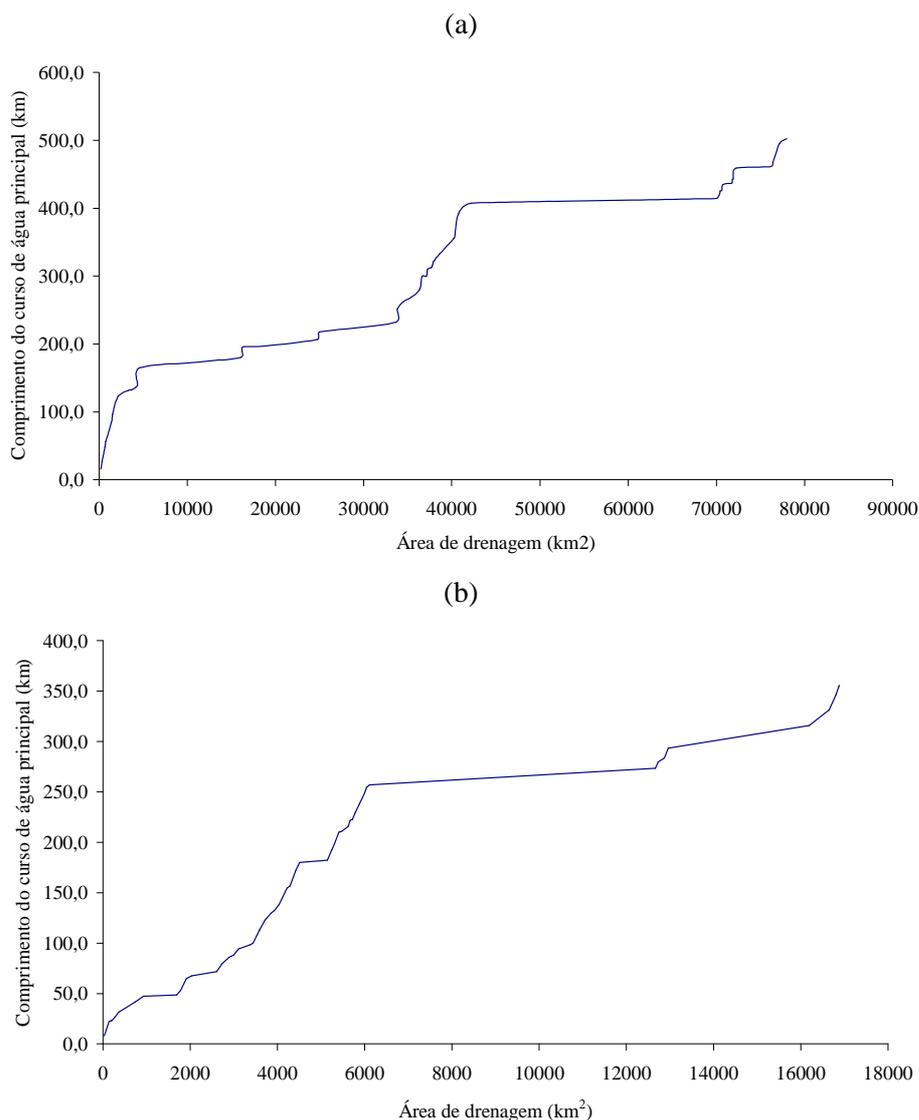


Figura 2.23. Comprimento dos rios Grande (a) e Carinhanha (b).

Desta forma evidencia-se que o uso de equações mais simples com base em variáveis que consideram os processos físicos na formação das vazões permite uma melhor caracterização da disponibilidade dos recursos hídricos.

### 2.3.1.5 - Análise da regionalização da vazão média de longa duração para a calha do São Francisco

Na Figura 2.24 são representadas, ao longo do rio São Francisco, as vazões médias anuais observadas nas estações fluviométricas, bem como o ajuste da vazão média em função da área de drenagem. O ajuste foi realizado até Sobradinho em virtude das vazões a jusante deste reservatório apresentarem um comportamento bastante diferenciado daquele de montante, tanto pelo efeito de ocorrência de reservatório como pela grande variação nas condições climáticas.

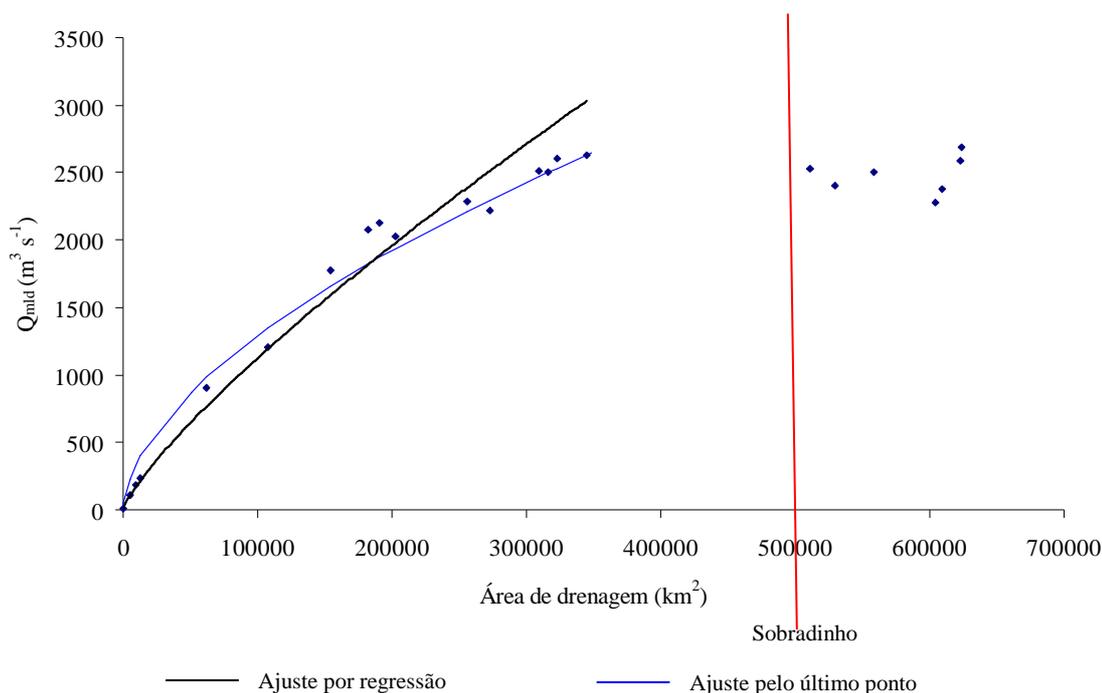


Figura 2.24. Vazões médias anuais ao longo do rio São Francisco e os ajustes, até Sobradinho, obtidos por regressão (Ajuste por regressão) e por uma equação que força a passagem pelo último valor de vazão a montante deste reservatório (Ajuste pelo último ponto).

Foi realizado um ajuste de uma regressão, baseado, portanto, na minimização da soma do quadrado dos resíduos. Com base neste ajuste verificou que esta equação tendia a impor uma taxa de crescimento das vazões pouco representativa das condições de jusante, tendendo a superestimar as vazões próximas à Sobradinho. Em função disto foi tentado um ajuste baseado nos princípios do MCM, forçando esta equação passar tanto pela origem como pelo último valor de vazão evidenciado tendo observado uma melhora nas variações das vazões, sobretudo nas condições mais próximas a Sobradinho.

Devido ao comportamento das vazões a jusante de Sobradinho, onde observa-se que mesmo com o aumento da área de drenagem não há um aumento expressivo nas vazões,

inclusive com uma grande oscilação das vazões entres as estações fluviométricas consideradas, chegando a atingir valores até mesmo inferiores aos das estações fluviométricas localizadas imediatamente a montante de Sobradinho, foram testados nesta região os ajustes em função das quatro variáveis independentes analisadas. A seleção da equação que melhor representou as vazões nesta região foi baseada na comparação da declividade da reta ajustada, ou seja, da vazão específica correspondente àquele trecho com a média das vazões específicas das estações localizadas nos afluentes desta região do São Francisco.

O comportamento das  $Q_{mld}$  observadas nas estações fluviométricas localizadas na calha do São Francisco em função da precipitação equivalente foi semelhante ao observado pela área, sendo, portanto utilizado para a região a montante de Sobradinho, tanto a equação de regressão quanto a equação baseada no princípio do MCM. Já para as variáveis independentes  $P_{eq700}$  e  $P_{eq750}$  o comportamento foi diferente, como mostra a Figura 2.25. O ajuste obtido por regressão representou adequadamente o comportamento das vazões até Sobradinho, de tal forma que o ajuste proposto anteriormente baseado nos princípios do MCM já não era mais necessário.

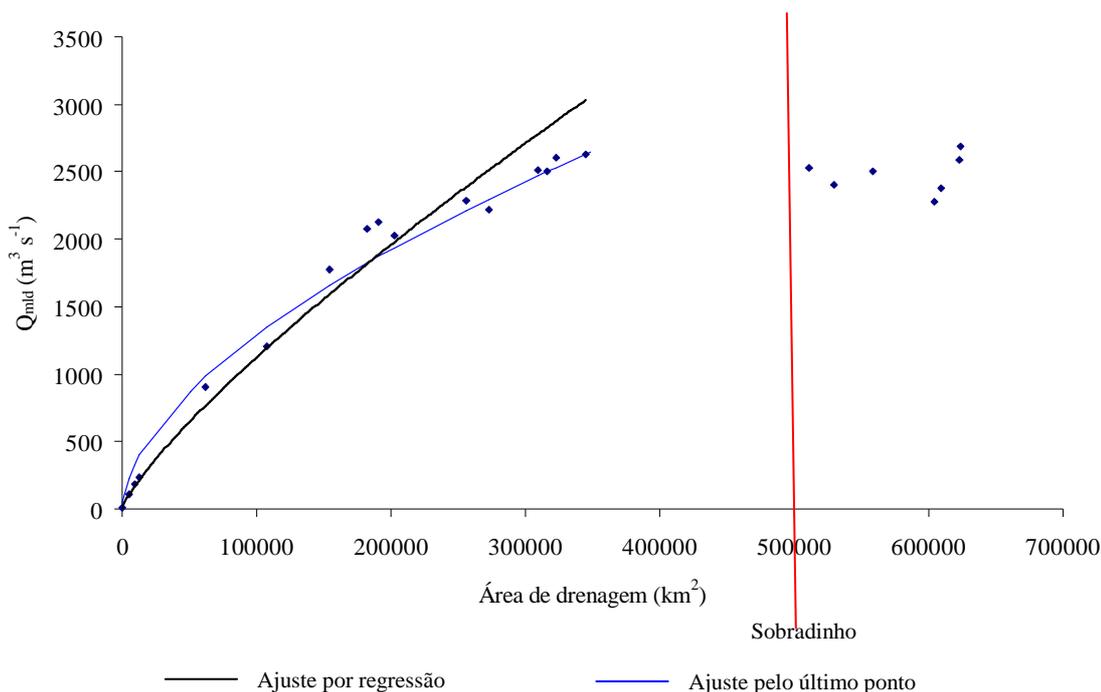


Figura 2.25. Vazões médias anuais ao longo do rio São Francisco em função da  $P_{eq750}$  e o ajuste a montante de Sobradinho.

Em virtude do comportamento distinto das vazões estimadas nas estações fluviométricas da nascente do rio São Francisco até Sobradinho e posterior a esta represa, a análise das vazões na calha do São Francisco foi dividida nestas duas regiões.

Visando facilitar a seleção da combinação do método de regionalização e da variável independente que conduziu aos menores erros relativos na região a montante de Sobradinho são apresentadas no Quadro 2.3 as amplitudes de variação dos erros relativos quando utilizadas as quatro variáveis independentes e os dois métodos analisados.

O MCM apresentou uma maior amplitude de variação dos erros, tendendo a superestimar as vazões nas estações localizadas a montante de Três Marias. No método tradicional a consideração da precipitação equivalente proporcionou uma diminuição dos erros quando comparado ao ajuste em função da área. Os ajustes ainda foram mais precisos quando considerada a  $P_{eq700}$  e a  $P_{eq750}$ , sendo os erros relativos em todas as estações fluviométricas inferiores a 10%.

Quadro 2.3. Amplitudes de variações ( $\Delta$ ) dos erros quando utilizadas as quatro variáveis independentes e os dois métodos analisados para a calha do rio São Francisco a montante de Sobradinho

Métodos	$\Delta(A)$	$\Delta(P_{eq})$	$\Delta(P_{eq700})$	$\Delta(P_{eq750})$
MCM	-439,8 a 12,2	-84,8 a 12,7	-	-
Tradicional	-29,9 a 15,4	-14,9 a 10,5	-5,9 a 8,6	-6,5 a 8,1

Com relação à magnitude dos coeficientes de escoamento, pelo ajuste baseado no MCM em função da área e da precipitação equivalente ocorreram valores de coeficiente de escoamento maiores do que um, chegando a serem iguais a 5,8 e 1,5, respectivamente, portanto não representando um comportamento físico coerente. Já nos demais ajustes os coeficientes foram inferiores a um, sendo estes apresentados na Figura 2.26.

Embora as vazões estimadas em função da área e da precipitação equivalente pelo método tradicional tenham gerado coeficientes de escoamento menores do que um, estes ainda são elevados (0,95 para a área e 0,82 para a precipitação equivalente), sendo 68 e 45% superiores ao maior valor observado (0,57) no rio São Francisco, respectivamente.

As vazões estimadas com base na  $P_{eq700}$  e na  $P_{eq750}$  apresentaram valores de coeficientes de escoamento próximos aos obtidos nas estações fluviométricas. Os maiores coeficientes foram iguais a 0,67 para  $P_{eq700}$  e a 0,65 para  $P_{eq750}$ , sendo estes 19 e 15% superiores ao maior valor observado, respectivamente.

Portanto no rio São Francisco as aplicações da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$  conduziram tanto aos menores erros relativos como a valores de coeficientes de escoamento mais próximos aos observados.

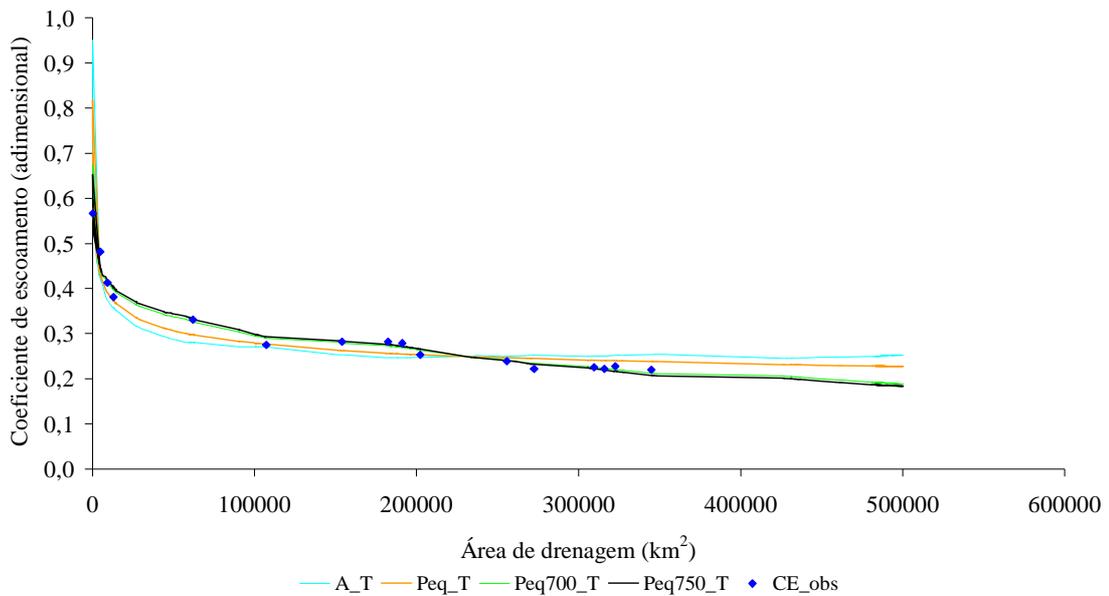


Figura 2.26. Coeficientes de escoamento superficial estimados com base nos dados observados nas estações fluviométricas (CE\_obs) e os coeficientes obtidos com base nas vazões regionalizadas em função da área (A), da  $P_{eq}$ , da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$  pelo Tradicional (T).

Considera-se um outro aspecto importante que ainda pode ser analisado na seleção do melhor método e variável, seja a análise do gráfico da  $Q_{mld}$  em função da área de drenagem (Figura 2.27) sabendo-se que a declividade da curva correspondente a este gráfico irá representar a vazão específica. Neste gráfico é possível caracterizar a contribuição dos afluentes na vazão do rio principal, sendo que na Figura 2.27 representa-se a vazão de contribuição correspondente ao rio Grande.

O símbolo  $A_m$  representa a área de drenagem imediatamente a montante da confluência do rio Grande no São Francisco e o  $A_j$  a área de drenagem imediatamente a jusante da confluência do rio Grande, sendo, portanto, a diferença entre estas duas áreas representada por  $A_c$ , ou seja, a área de drenagem da bacia do rio Grande ( $A_c$ ). Associa-se a esta área ( $A_c$ ) a sua vazão de contribuição ( $Q_c$ ) no rio São Francisco. Deste modo a declividade do trecho da curva ajustada correspondente à área da bacia do Grande representa a vazão específica desta bacia, que contribui para a formação da vazão do São Francisco.

A vazão de contribuição do rio Grande no São Francisco obtida a partir do rio Francisco foi igual a  $324,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , enquanto a vazão advinda do modelo de regionalização selecionado para esta bacia foi igual a  $342,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , a qual é representada na Figura 2.27 por um ponto verde.

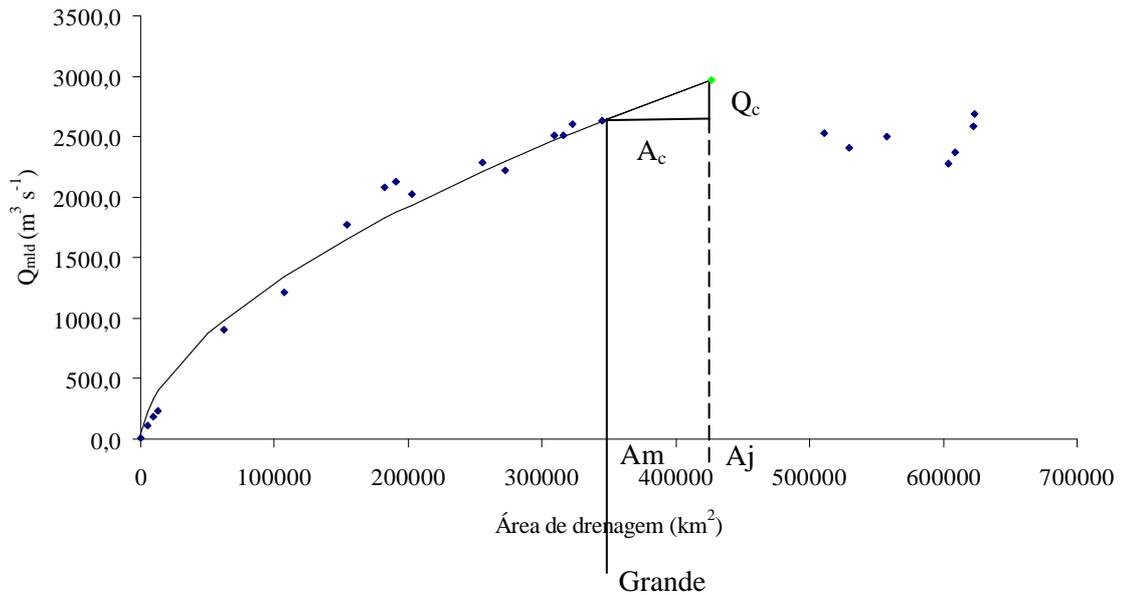


Figura 2.27. Vazões médias anuais de longa duração estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas localizadas na calha do São Francisco e o ajuste obtido em função da área até Sobradinho.

Na Figura 2.28 são apresentadas as vazões médias anuais de longa duração, a montante de Sobradinho, estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas e considerando as quatro variáveis e os dois métodos analisados.

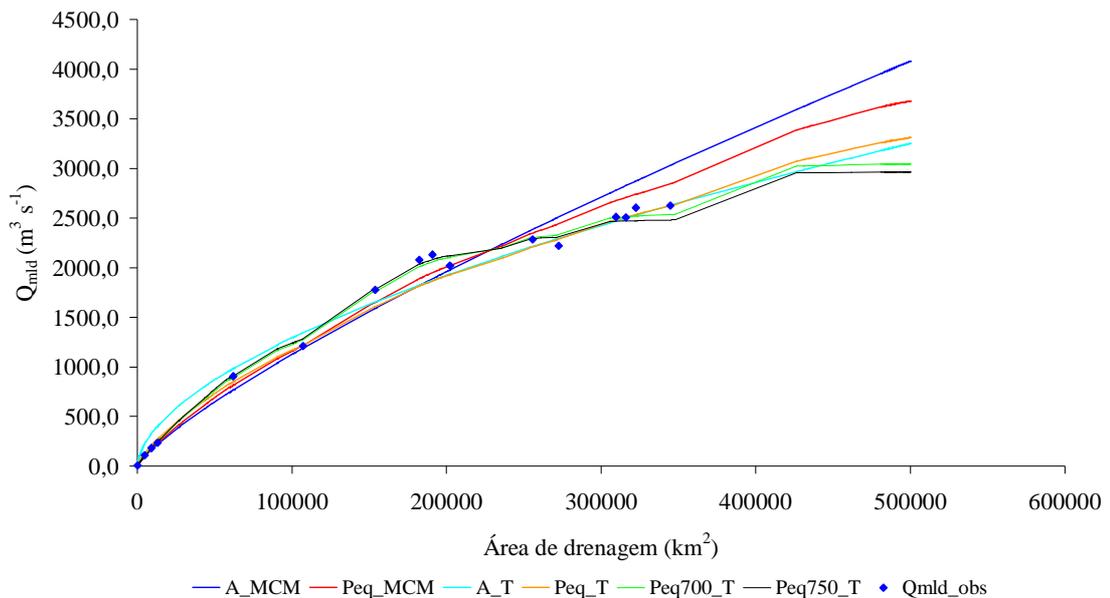


Figura 2.28. Vazões médias anuais de longa duração estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas, e as vazões estimadas em função da área (A), da  $P_{eq}$ , da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$  pelo Método de Conservação de Massa (MCM) e pelo Tradicional (T).

Os ajustes realizados em função das equações baseadas nos princípios do MCM tanto com o uso da área como da precipitação equivalente apresentaram superestimativas das vazões situadas mais a jusante.

A equação de regressão ajustada em função da área de drenagem apresentou uma variação progressiva da declividade, comportamento este advindo de um ajuste feito em função da própria variável considerada na abscissa. Portanto não refletiu a influência das variações de contribuições específicas associadas aos afluentes das margens direita e esquerda do São Francisco, como observado na Figura 2.2.

A inserção da precipitação equivalente proporcionou mudanças de declividade um pouco maiores quando comparado ao ajuste em função da área, sendo estas ainda mais acentuadas quando utilizada a  $P_{eq700}$  e a  $P_{eq750}$ . Desta forma a incorporação destas duas últimas variáveis refletiram mais efetivamente as contribuições dos afluentes na vazão do rio São Francisco, como observa-se sobretudo na Figura 2.29. Nesta figura está representada as  $Q_{mld}$  estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas e em função da  $P_{eq750}$ , bem como as vazões a jusante das confluências dos rios Paracatu, Paramirim e Grande.

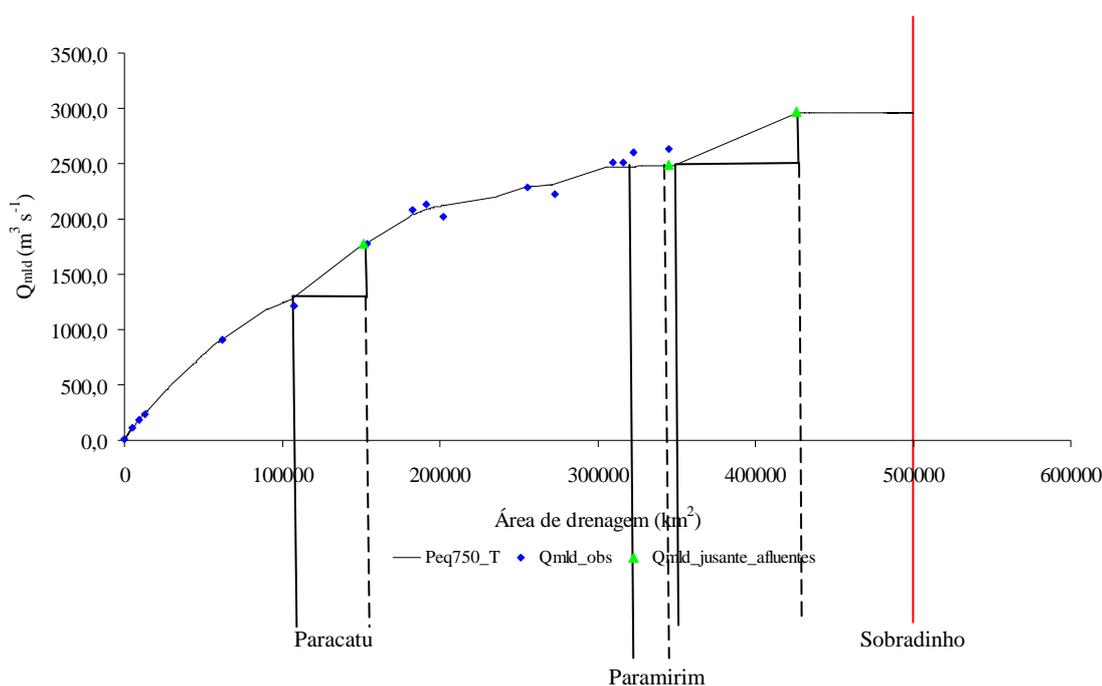


Figura 2.29. Vazões médias anuais de longa duração estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas ( $Q_{mld\_obs}$ ) e em função da  $P_{eq750}$ , bem como a representação das vazões de contribuição das bacias dos rios Paracatu, Paramirim e Grande no rio São Francisco.

Dentre os afluentes do rio São Francisco, os rios Paracatu e Grande são os que apresentam as maiores áreas de drenagem, com  $78.491 \text{ km}^2$  (PEREIRA, 2004) e  $45.600 \text{ km}^2$  (BRASIL, 1996), respectivamente. Embora a área de drenagem da bacia do

Grande seja 72% superior à da bacia do Paracatu, observa-se na Figura 2.29, que ocorreu uma maior declividade da curva ajustada no trecho correspondente à área de drenagem da bacia do Paracatu quando comparada à declividade no trecho do Grande, o que representa uma maior contribuição da bacia do Paracatu na formação da vazão do rio São Francisco.

Isto condiz com os resultados evidenciados por Pereira (2004) e por ANA (2004a) que embora a bacia do Paracatu tenha a segunda maior área de drenagem da bacia do São Francisco, é responsável pela maior contribuição na formação da vazão do rio São Francisco, enquanto a bacia do Grande apresenta a terceira maior contribuição atrás do rio das Velhas. Segundo o primeiro autor o comportamento destas bacias é decorrente de precipitações médias anuais mais baixas e de evapotranspirações potenciais superiores na bacia do Grande em relação à do Paracatu, contribuindo, portanto, para a menor conversão da precipitação ocorrida no Grande para a formação da vazão do rio São Francisco.

O comportamento constante da vazão evidenciado na Figura 2.29 representa bacias com pequenas contribuições, inferiores a  $1 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ , para a vazão do rio São Francisco, como pode ser verificado na área de contribuição do rio Paramirim, bem como a jusante da confluência do rio Grande até Sobradinho onde estão localizados os rios Verde e Jacaré.

Apesar de o ajuste permitir uma melhor representatividade das contribuições advindas de cada afluente diferenças ainda são encontradas quando da estimativa da vazão numa seção imediatamente a jusante da confluência de um rio, como mostra a equação

$$Q_{sf,j} \neq Q_{sf,m} + Q_a \quad (2.10)$$

em que  $Q_{sf,j}$  = vazão a jusante da confluência de um rio, obtida a partir da equação ajustada para o São Francisco,  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $Q_{sf,m}$  = vazão a montante da confluência de um rio, obtida a partir da equação ajustada para o São Francisco,  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; e  $Q_a$  = vazão do afluente, obtida pelo modelo de regionalização selecionado para o afluente,  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Desta forma ocorre uma descontinuidade de vazões, o que poderá ter reflexos no processo de gestão.

Na Figura 2.30 são apresentadas as vazões na calha do rio São Francisco e as vazões a jusante das confluências de seus principais afluentes, tendo sido a vazão da foz de cada afluente obtida com base nos seus respectivos modelos de regionalização selecionados.

Observa-se a presença da descontinuidade de vazões a jusante das confluências dos afluentes no rio São Francisco, tendo sido as vazões estimadas a partir do modelo de regionalização, para a foz dos rios Samburá, Pará, Jequitaí, Pacuí, Paracatu, Verde Grande e

Grande inferiores às vazões advindas do modelo da calha do São Francisco, já as vazões das demais bacias foram superiores.

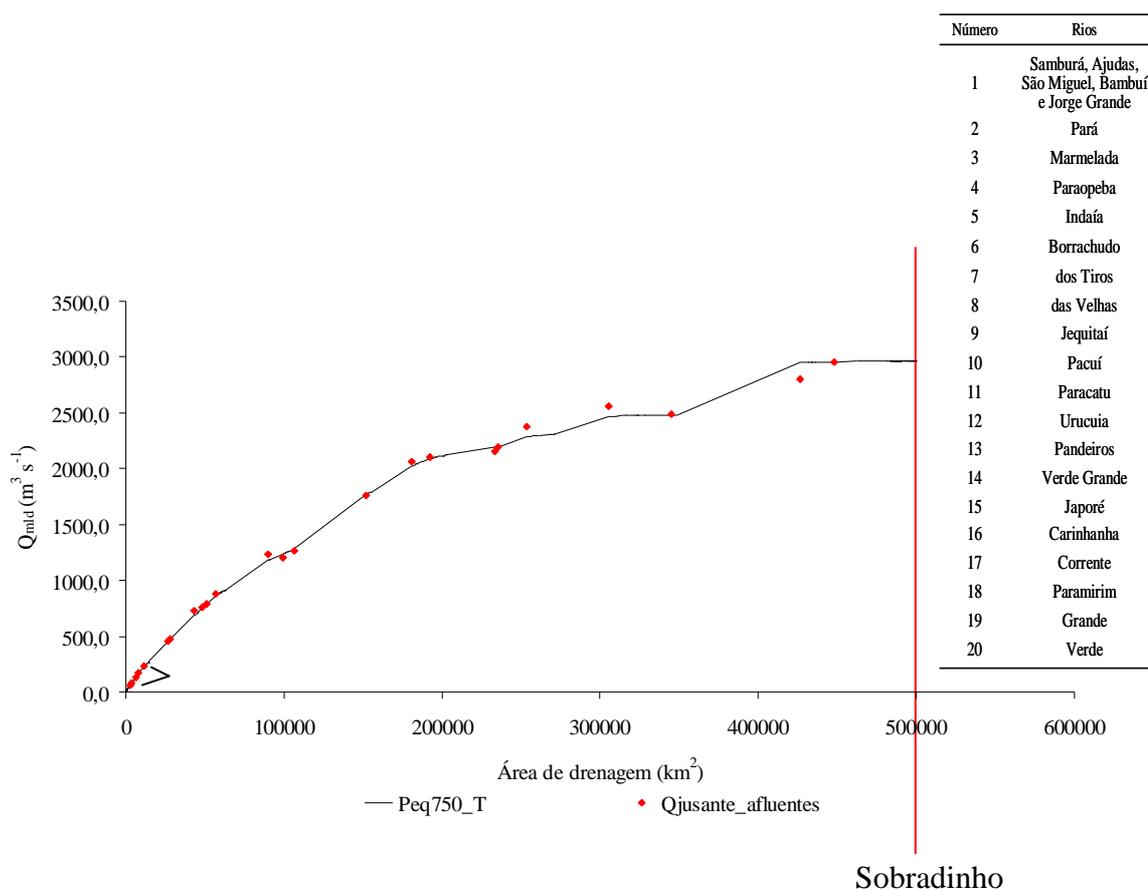


Figura 2.30. Vazões médias de longa duração ao longo do rio São Francisco e as vazões a jusante das confluências dos principais afluentes, tendo sido a vazão na foz destes afluentes estimadas com base nos respectivos modelos de regionalização selecionados.

As maiores discontinuidades de vazões foram evidenciadas nas bacias dos rios Grande, Carinhanha, Corrente e das Velhas. A vazão obtida pelo modelo de regionalização selecionado para a bacia do Grande teve um déficit de  $153 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , portanto apresentando uma condição mais conservadora na estimativa da disponibilidade hídrica nesta bacia. Enquanto nas bacias do Corrente e Carinhanha apresentaram um excedente de  $90 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e na do rio das Velhas de  $57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Na Figura 2.31 são apresentadas as vazões estimadas a montante de Sobradinho considerando a  $P_{eq750}$  e as estimadas a jusante deste reservatório, em função da área, da precipitação equivalente, da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$ , bem como a média das vazões estimadas nas estações localizadas neste trecho do São Francisco.

Embora a vazão média afluente a Três Marias ( $782,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) tenha sido estimada sem considerar os usos consuntivos, esta foi 14% superior à vazão natural média anual afluente deste reservatório ( $686 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) contida no Plano da bacia (ANA, 2004a).

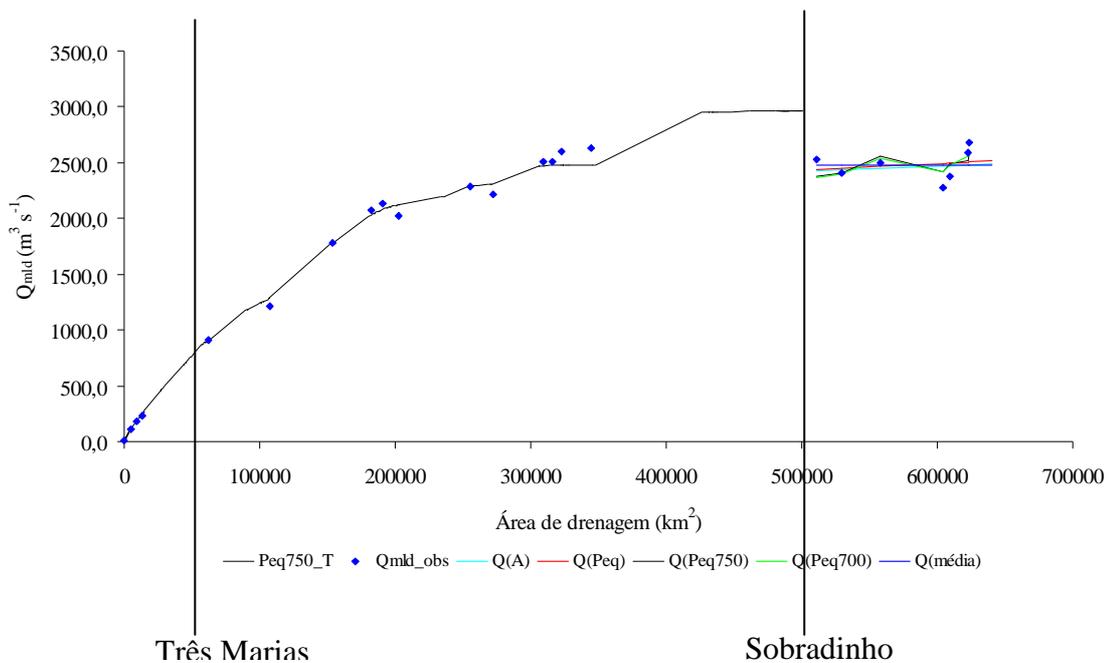


Figura 2.31. Vazões estimada com base nos dados observados nas estações fluviométricas ( $Q_{mld\_obs}$ ), estimadas a montante de Sobradinho, considerando a  $P_{eq750}$ , e a jusante deste reservatório, em função da área, da  $P_{eq}$ , da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$ , bem como a média das vazões neste trecho ( $Q(média)$ ).

Segundo ANA (ANA, 2004b) a jusante de Sobradinho há uma imprecisão nas medições das vazões. Nesta região, além da contribuição dos afluentes (onde muitos são intermitentes) na vazão do São Francisco ser pequena e da taxa de evaporação ser maior do que o restante da bacia, a presença de reservatórios também contribui para a oscilação das vazões. Dentre os diversos usos da água no baixo São Francisco, o que mais afeta o seu regime hídrico é a presença dos reservatórios (ANA, 2003b). Embora a maior produção de sedimentos ocorra no Alto e Médio São Francisco, a presença dos reservatórios no Sub-médio e Baixo São Francisco reduz a ocorrência das enchentes. Desta forma, a potencialidade de transporte destes sedimentos é reduzida, acarretando o assoreamento nesta região (ANA, 2003c). Diante do exposto recomenda-se estudos mais específicos nesta região do São Francisco.

Ao tentar realizar os diversos ajustes nesta região, observou-se que as vazões regionalizadas considerando a  $P_{eq700}$  e a  $P_{eq750}$  não representaram um comportamento físico coerente devido às mudanças de declividade das linhas ajustadas. As vazões estimadas em função da área e da precipitação equivalente nesta região apresentaram vazões específicas iguais a 0,40 e a 0,55  $L s^{-1} km^{-2}$ , respectivamente. Destes valores, o referente a precipitação equivalente foi o que mais se aproximou da média das vazões específicas dos afluentes nesta região, (0,48  $L s^{-1} km^{-2}$ ).

Embora o ajuste em função da precipitação equivalente tenha sido melhor que os obtidos pelas outras três variáveis, a vazão efluente a Sobradinho obtida ( $2.437 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) foi somente 1,7% inferior a média das vazões da calha neste trecho ( $2.479 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Portanto, em virtude das imprecisões evidenciadas, acredita-se que no estágio atual do conhecimento a consideração de um valor constante igual à média das vazões observadas nas sete estações fluviométricas situadas na calha do São Francisco seja representativa na região.

Uma vez que a vazão afluente a Sobradinho foi igual a  $2.962,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e considerando a vazão efluente a esta represa igual a  $2.479 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , ocorreu uma redução de  $484 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

### **2.3.2 - Regionalização das vazões mínimas**

Conforme já descrito na metodologia, para a seleção dos diferentes métodos e das variáveis independentes utilizados para a regionalização das vazões mínimas na bacia do São Francisco procedeu-se a análise dos erros relativos entre as vazões estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas e as estimadas pelos modelos de regionalização e da vazão específica mínima.

Na Figura 2.32 é apresentado o mapa da bacia do São Francisco com as regiões homogêneas selecionadas pelo método tradicional.

A região 1 abrange os pequenos afluentes do rio São Francisco situados a montante de Três Marias, compreendendo os rios Samburá, Ajudas, Bambuí, São Miguel, Mateus Grande, Marmelada, Indaía e Borrachudo.

As regiões 2 e 3 compreendem as bacias do Pará e Paraopeba, respectivamente. A bacia do rio das Velhas teve que ser dividida em duas regiões: a região 4 que vai até a confluência com o rio Jequitibá (incluído nesta região), e a região 5, que compreende o restante da bacia.

A bacia do Paracatu também foi dividida em três regiões homogêneas: a região 6, que vai da cabeceira do rio Paracatu até a confluência com o ribeirão Entre Ribeiros, a região 7, que abrange as sub-bacias do Entre Ribeiros e do Preto, e a região 8, que abrange o restante da bacia.

A região 9 corresponde à bacia do Urucuia. A região 10 engloba as bacias do Carinhanha, do Japoré e do Pandeiros e a região 11 corresponde à bacia do rio Corrente.

A bacia do rio Grande foi dividida em duas regiões. A região 12 compreende a área da cabeceira até a confluência com o rio Preto e a 13 abrange este afluente e o restante da bacia.

Em virtude do efeito de regularização dos reservatórios de Três Marias e Sobradinho na calha do São Francisco, esta foi dividida em duas regiões: a montante de Três Marias (região 14) e entre esta barragem e Sobradinho (região 15).

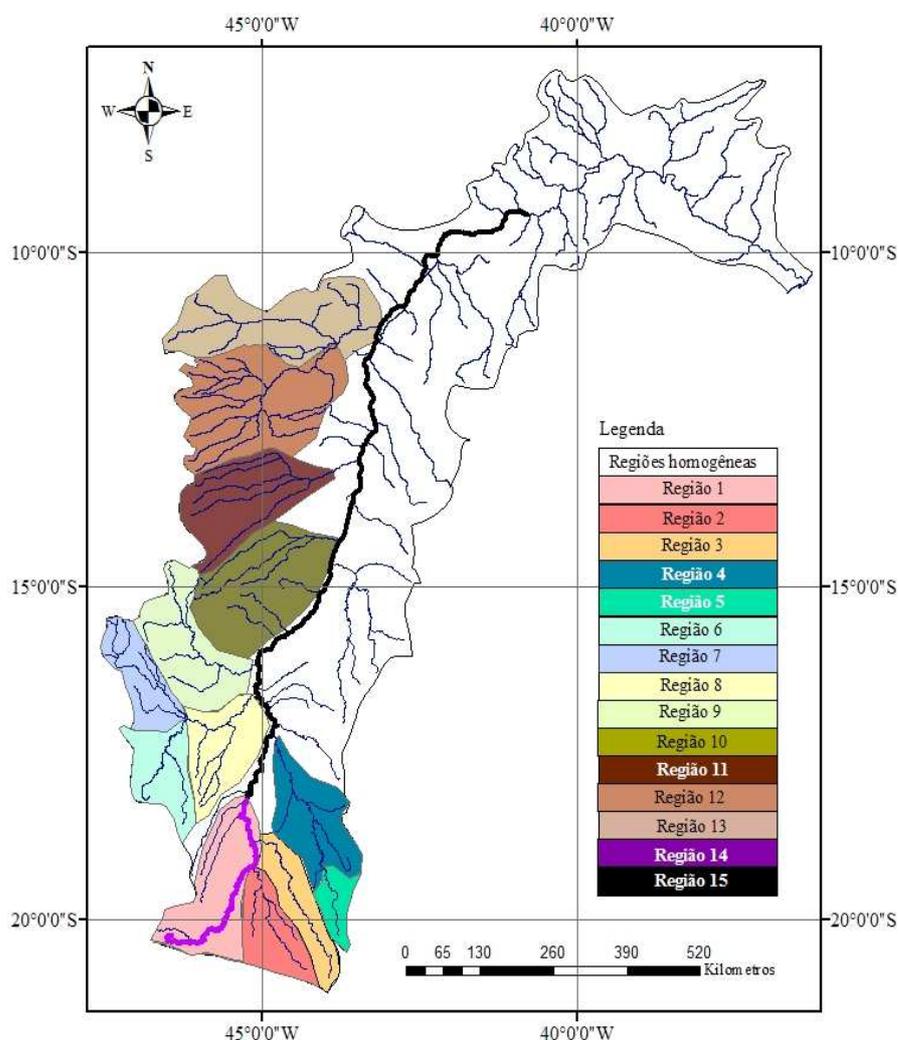


Figura 2.32. Regiões homogêneas consideradas para a regionalização das vazões mínimas na bacia do São Francisco pelo método tradicional.

Na seqüência é apresentada a análise da seleção do modelo de regionalização das vazões associadas à permanência de 95 ( $Q_{95}$ ) e de 90% ( $Q_{90}$ ) e da vazão com sete dias de duração e período de retorno de dez anos ( $Q_{7,10}$ ).

### 2.3.2.1 - Regionalização da vazão associada à permanência de 95% - $Q_{95}$

#### 2.3.2.1.1 - Análise com base nos erros relativos

Nas Figuras 2.33 a 2.36 são apresentados os erros relativos entre as vazões estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas e estimadas considerando os dois

métodos e as quatro variáveis independentes analisadas nas 145 estações fluviométricas da bacia do São Francisco situadas em locais onde foi possível a realização da regionalização.

Observa-se que o uso da precipitação equivalente no lugar da área de drenagem não apresentou uma expressiva melhora dos ajustes, tanto pelo método tradicional como pelo MCM. Já a inserção das variáveis  $P_{eq700}$  e  $P_{eq750}$  apresentou em geral nos dois métodos, um melhor desempenho do que quando considerado o uso das outras variáveis.

Visando facilitar a seleção da combinação do método de regionalização e da variável independente que conduziu aos menores erros relativos em cada bacia ou região são apresentadas no Quadro 2.4 as amplitudes de variação dos erros relativos quando utilizadas as quatro variáveis independentes e os dois métodos analisados para as principais bacias ou regiões na bacia do São Francisco. Para fim de análise os erros negativos presentes neste quadro correspondem a superestimativa das vazões estimadas, enquanto os positivos, às subestimativas.

Na região 1 o uso pelo MCM da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$  em relação à área e à precipitação equivalente, resultou nos menores erros, os quais foram inferiores a 30% (valor em módulo).

Embora a consideração da  $P_{eq750}$  pelo método tradicional tenha apresentado erros menores em comparação à aplicação das outras variáveis, estes erros ainda foram superiores ao evidenciado pelo MCM, sendo maiores que 50% (valor em módulo).

Nas comparações realizadas para a bacia do rio Pará, o MCM apresentou menores erros relativos, os quais foram inferiores a 22% (valor em módulo), não ocorrendo uma mudança expressiva na amplitude de variação dos erros quando aplicada qualquer uma das quatro variáveis independentes. Já o método tradicional apresentou erros superiores a 30% (valor em módulo), tendo ocorrido as menores variações quando aplicado a  $P_{eq700}$  e a  $P_{eq750}$ .

Embora na bacia do Paraopeba os erros pelo MCM tenham sido superiores ao método tradicional, uma maior quantidade de estações com erros inferiores a 10% foi evidenciada quando aplicada a área e a precipitação equivalente pelo MCM (sete das 12 estações localizadas na bacia).

Na bacia do rio das Velhas os erros evidenciados em ambas as combinações na estação Ponte do Bicudo foram superiores a 240%, em virtude do ocorrido analisou-se os erros relativos sem a consideração desta estação. As menores variações ocorreram com o uso do MCM em função da área e da precipitação equivalente (erros inferiores a 40% - valor em módulo), tendo sido evidenciado erros inferiores a 10% em oito das 18 estações localizadas na bacia. Já no método tradicional mesmo não considerando a estação Ponte do Bicudo os erros permaneceram elevados, sendo superiores a 70% (valor em módulo), sendo o menor número de estações com erros inferiores a 10% (cinco estações) evidenciado para  $P_{eq700}$ .

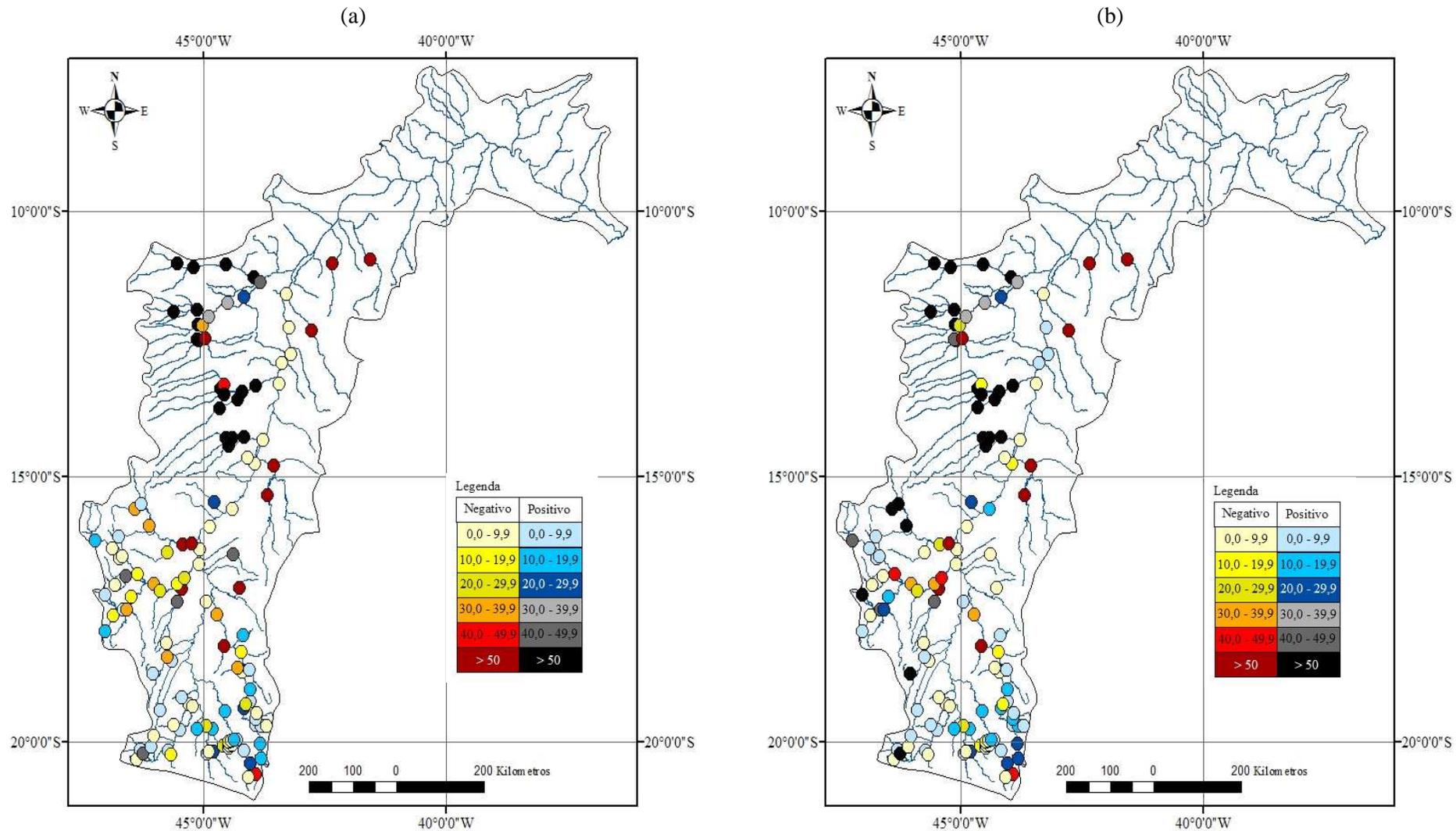


Figura 2.33. Erros relativos entre as  $Q_{95}$  observadas e estimadas em função da área (a); e da precipitação equivalente (b) pelo MCM.

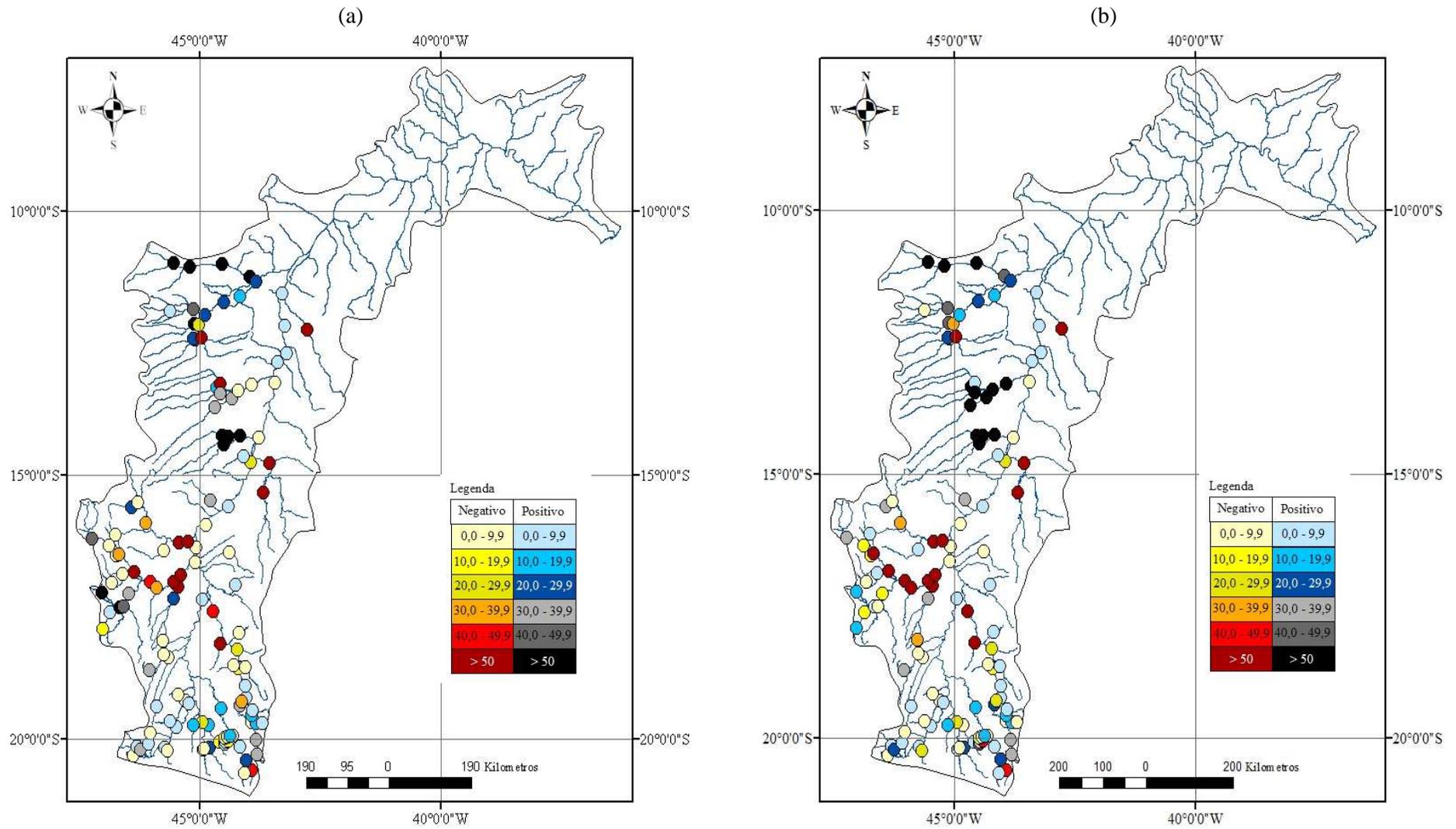


Figura 2.34. Erros relativos entre as  $Q_{95}$  observadas e estimadas considerando a  $P_{eq700}$  (a); e a  $P_{eq750}$  (b) pelo MCM.

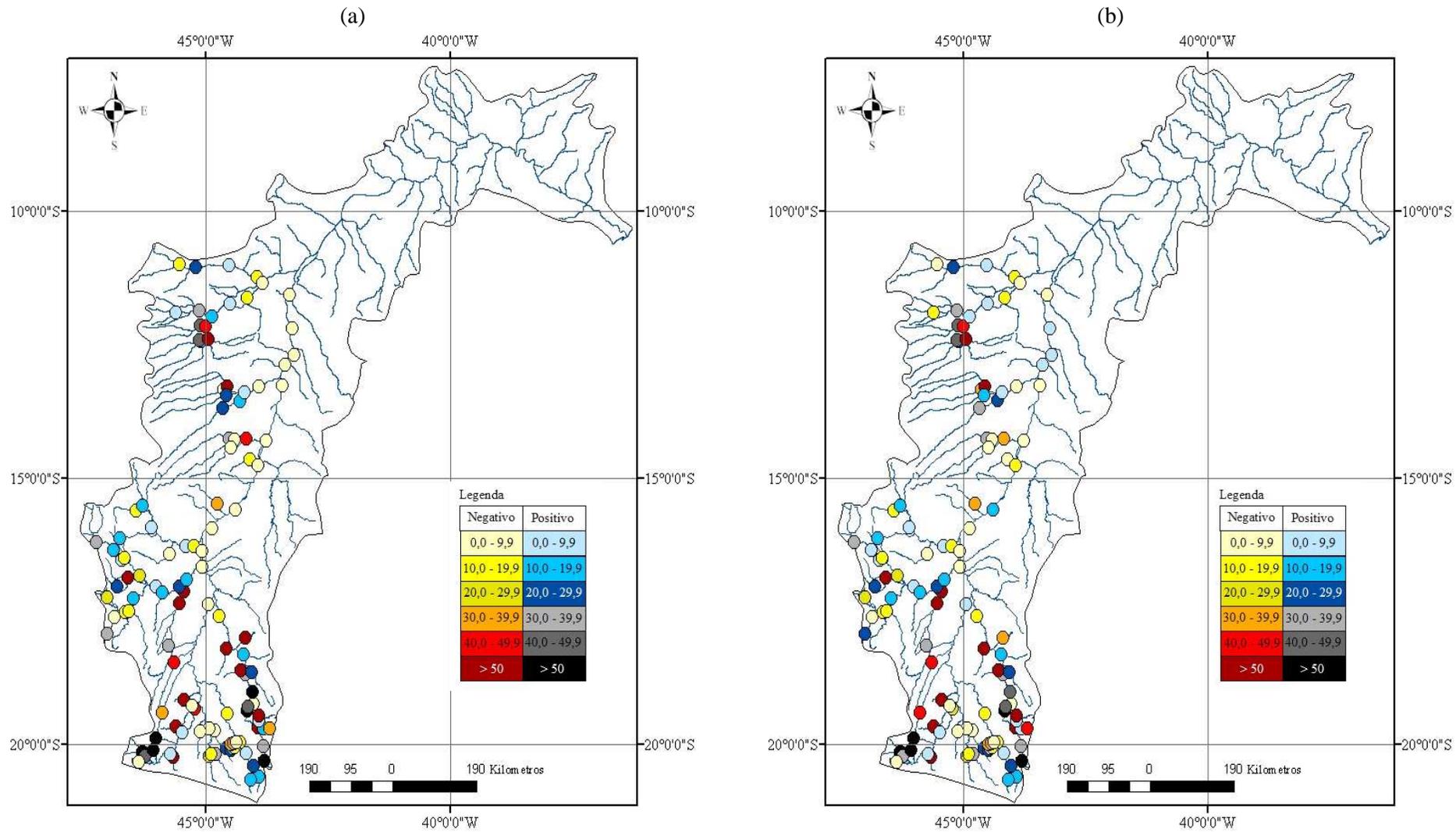


Figura 2.35. Erros relativos entre as  $Q_{95}$  observadas e estimadas em função da área (a); e da precipitação equivalente (b) pelo Método Tradicional.

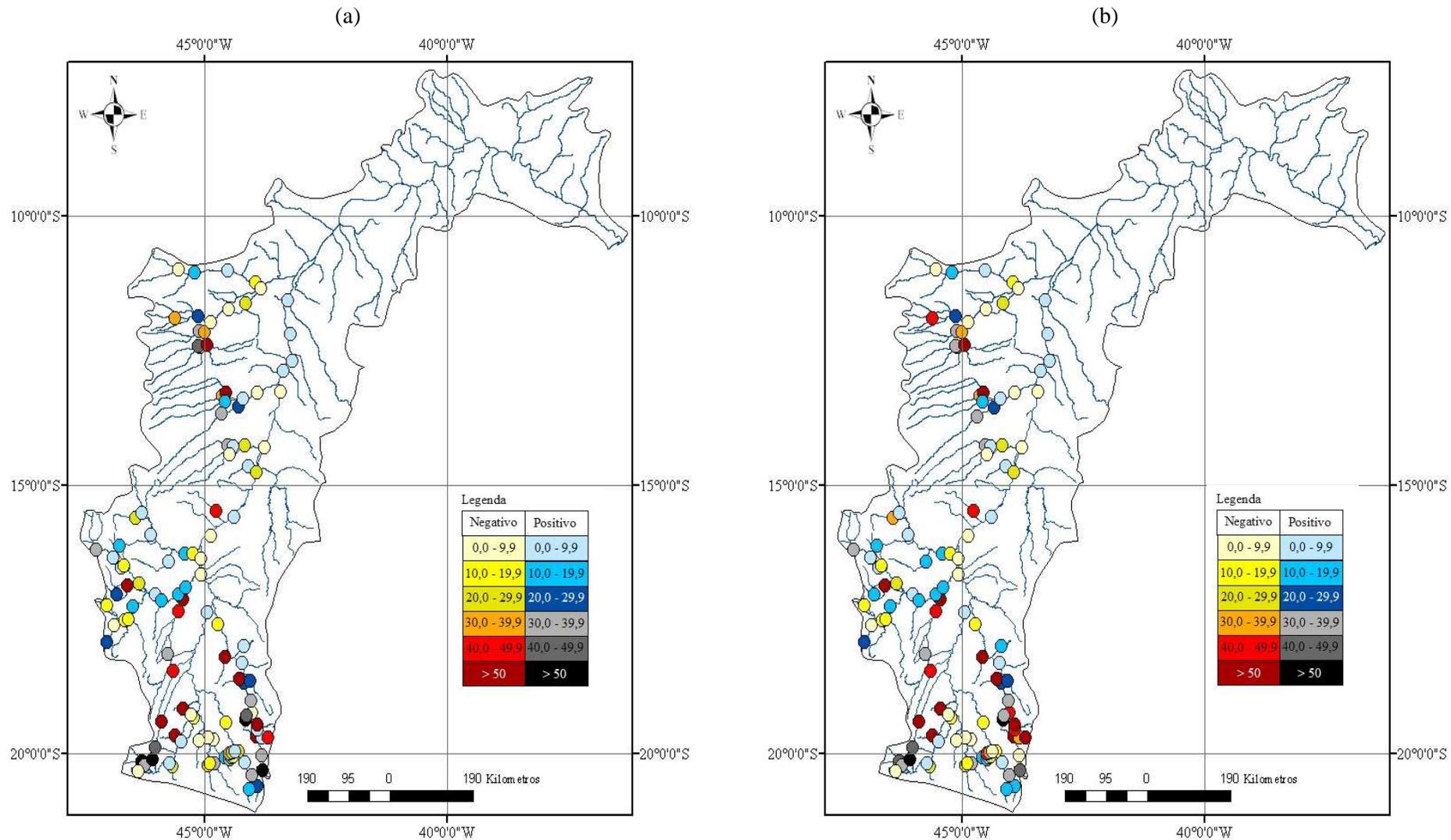


Figura 2.36. Erros relativos entre as  $Q_{95}$  observadas e estimadas considerando a  $P_{eq700}$  (a); e a  $P_{eq750}$  (b) pelo Método Tradicional.

Quadro 2.4. Amplitudes de variações ( $\Delta$ ) dos erros relativos quando utilizadas as quatro variáveis independentes e os dois métodos analisados para as principais bacias ou regiões na bacia do São Francisco

Bacias ou regiões	Métodos	$\Delta(A)$	$\Delta(P_{eq})$	$\Delta(P_{eq700})$	$\Delta(P_{eq750})$
Região 1	MCM	-16,1 a 48,7	-2,6 a 58,6	-0,9 a 30,3	-21,6 a 28,6
	Tradicional	-182,7 a 60,9	-164,8 a 55,8	-154,1 a 51,9	-97,9 a 53,6
Pará	MCM	-22,1 a 21,8	-21,7 a 21,8	-21,5 a 21,7	-21,5 a 21,6
	Tradicional	-41,0 a 38,5	-26,7 a 35,8	-22,8 a 33,4	-22,9 a 33,1
Paraopeba	MCM	-45,0 a 24,4	-48,1 a 24,7	-48,6 a 25,6	-47,7 a 43,3
	Tradicional	-35,0 a 27,8	-36,4 a 29,4	-32,1 a 30,6	-46,4 a 32,3
Velhas	MCM	-320,1 a 25,6 (-39,2 a 25,6) <sup>1</sup>	-244,5 a 24,1 (-38,6 a 24,1) <sup>1</sup>	-286,7 a 39,4 (-47,9 a 39,4) <sup>1</sup>	-270,6 a 38,5 (-50,4 a 38,5) <sup>1</sup>
	Tradicional	-454,6 a 77,7 (-395,0 a 77,7) <sup>1</sup>	-402,4 a 76,6 (-348,8 a 76,6) <sup>1</sup>	-345,4 a 73,8 (-306,0 a 73,8) <sup>1</sup>	-337,5 a 73,0 (-301,7 a 73,0) <sup>1</sup>
Paracatu	MCM	-91,2 a 47,4	-189,0 a 89,1	-338,3 a 71,3	-276,8 a 38,9
	Tradicional	-104,9 a 38,7	-98,3 a 36,9	-90,8 a 35,1	-90,0 a 34,7
Urucuia	MCM	-95,3 a 0,6	-86,0 a 92,2	-157,7 a 22,2	-165,9 a 35,9
	Tradicional	-16,6 a 15,9	-18,3 a 12,9	-29,0 a 11,3	-31,0 a 11,8
Carinhanha	MCM	41,3 a 88,2	49,1 a 84,1	54,1 a 83,6	55,2 a 83,9
	Tradicional	-43,8 a 37,3	-36,3 a 37,9	-23,5 a 37,5	-20,4 a 37,4
Corrente	MCM	-46,6 a 88,6 (61,9 a 88,6) <sup>2</sup>	-18,2 a 84,5 (62,5 a 84,5) <sup>2</sup>	-144,5 a 38,9 (-8,6 a 38,9) <sup>2</sup>	2,5 a 84,1 (66,0 a 84,1) <sup>2</sup>
	Tradicional	-90,2 a 22,2 (-3,7 a 22,2) <sup>2</sup>	-68,5 a 30,4 (-37,0 a 30,4) <sup>2</sup>	-71,4 a 30,9 (-37,1 a 30,9) <sup>2</sup>	-72,2 a 31,0 (-37,2 a 31,0) <sup>2</sup>
Grande	MCM	-130,8 a 87,8 (-110,7 a 87,8) <sup>3</sup>	-134,0 a 75,9 (-55,3 a 75,9) <sup>3</sup>	-160,8 a 65,2 (-40,2 a 65,2) <sup>3</sup>	-132,1 a 63,3 (-37,8 a 63,3) <sup>3</sup>
	Tradicional	-404,8 a 47,7 (-43,4 a 47,7) <sup>3</sup>	-289,1 a 45,7 (-42,2 a 45,7) <sup>3</sup>	-151,2 a 40,4 (-36,4 a 40,4) <sup>3</sup>	-128,9 a 40,8 (-43,3 a 40,8) <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Amplitude de variação sem a consideração do erro evidenciado na estação Ponte do Bicudo, localizada no rio do Bicudo.

<sup>2</sup> Amplitude de variação sem a consideração do erro evidenciado na estação Mocambo, localizada no rio do Meio.

<sup>3</sup> Amplitude de variação sem a consideração do erro evidenciado na estação Fazenda Coqueiro, localizada no ribeirão São Desidério.

Para a bacia do Paracatu, as aplicações do MCM em função da área e do método tradicional em função das quatro variáveis apresentaram as menores amplitudes de variações dos erros, com erros inferiores a 105% (valor em módulo) enquanto o uso do MCM com base na precipitação equivalente, na  $P_{eq700}$  e na  $P_{eq750}$  os erros chegaram a ser superiores a 150% (valor em módulo). Das cinco combinações com menores amplitudes a maior quantidade de estações com erros inferiores a 10% ocorreu com o uso da área pelo MCM (em nove das 21 estações localizadas na bacia).

Na bacia do Urucuia evidenciou-se o melhor desempenho com o uso do método tradicional, sendo os erros em módulo inferiores a 22%, enquanto pelo MCM os erros foram superiores a 31%. Das combinações realizadas pelo método tradicional as que consideraram a área e a precipitação equivalente apresentaram o maior número de estações com erros inferiores a 10% (metade das estações presentes na bacia).

A aplicação do MCM na bacia do Carinhanha tendeu a subestimar as vazões, apresentando erros superiores a 40% (valor em módulo). Nas combinações realizadas pelo método tradicional os erros foram inferiores a 40% (valor em módulo), tendo a menor amplitude de variação dos erros ocorrido tanto em função da  $P_{eq700}$  como da  $P_{eq750}$ .

O MCM tendeu a subestimar as vazões na bacia do Corrente, com exceção da estação Mocambo, em que as vazões foram superestimadas. Esta estação apresentou erros elevados na aplicação do método tradicional, portanto fazendo uma análise dos erros sem considerar o desta estação observa-se que os menores erros foram evidenciados em função da área, sendo estes inferiores a 22% (valor em módulo).

Na bacia do rio Grande a estação Fazenda Coqueiro também apresentou erros elevados na aplicação dos dois métodos e das quatro variáveis independentes. Fazendo uma análise dos erros nas estações situadas nesta bacia sem considerar o erro desta estação, verifica-se que o MCM apresentou erros superiores a 50% (valor em módulo), enquanto o método tradicional os erros foram inferiores. No método tradicional não ocorreu uma mudança expressiva na amplitude dos erros quando utilizadas as quatro variáveis independentes.

Na parte Leste da bacia a jusante da confluência do rio das Velhas só foi possível o ajuste pelo MCM, mesmo assim tendeu a superestimar as vazões nas bacias dos rios Verde Grande, Paramirim, Verde e Jacaré. Para o rio Verde, assim como para o Jacaré, não foi possível a simulação pelo MCM quando considerada a  $P_{eq700}$  e a  $P_{eq750}$ , uma vez que a diminuição da precipitação menos 700 mm resultou em valores de  $P_{eq700}$  iguais na estação analisada e na foz de cada rio, e o uso de 750 mm geraram valores de  $P_{eq750}$  iguais a zero para estas estações e a foz destes rios.

Em decorrência da oscilação das vazões a jusante de Sobradinho, bem como do reduzido número de estações nesta região, não foi possível a aplicação tanto do MCM como do método tradicional.

Da análise com base no ER pode-se constatar que em grande parte da bacia do São Francisco a aplicação do MCM teve estimativas mais precisas, com exceção das bacias do Urucuia, Carinhanha, Corrente e Grande, nas quais o método tradicional teve melhor ajuste.

### **2.3.2.1.2 - Análise com base na vazão específica referente à $Q_{95}$**

#### **2.3.2.1.2.1 - Seleção do método pela vazão específica referente à $Q_{95}$**

Na Figura 2.37, é apresentado o mapa com a variação espacial da vazão específica referente à  $Q_{95}$  ( $q_{95}$ ) estimada com base nos dados observados nas 145 estações fluviométricas

da bacia do São Francisco (vazão específica observada). Assim como o coeficiente de escoamento superficial a  $q_{95}$  também diminui do Alto em direção ao Baixo São Francisco, variando de 12,2 na estação Itabirito, localizada na bacia do rio das Velhas a  $0,0001 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$  na estação Ponte BR-242, localizada no rio Paramirim.

Na parte Leste da bacia a jusante da confluência do rio Pacuí as  $q_{95}$  foram inferiores a  $0,016 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ . Embora a precipitação tenha sido mais elevada na bacia do Paracatu que nas bacias do Grande, Carinhanha e Corrente, em algumas estações destas bacias as  $q_{95}$  foram superiores às evidenciadas no Paracatu. Isto pode ser decorrente da presença do aquífero Urucua Aerado, o qual faz parte do aquífero poroso e representa 41% da disponibilidade hídrica subterrânea da bacia do São Francisco, sendo responsável pela manutenção do escoamento base dos rios Grande, Corrente e Carinhanha.

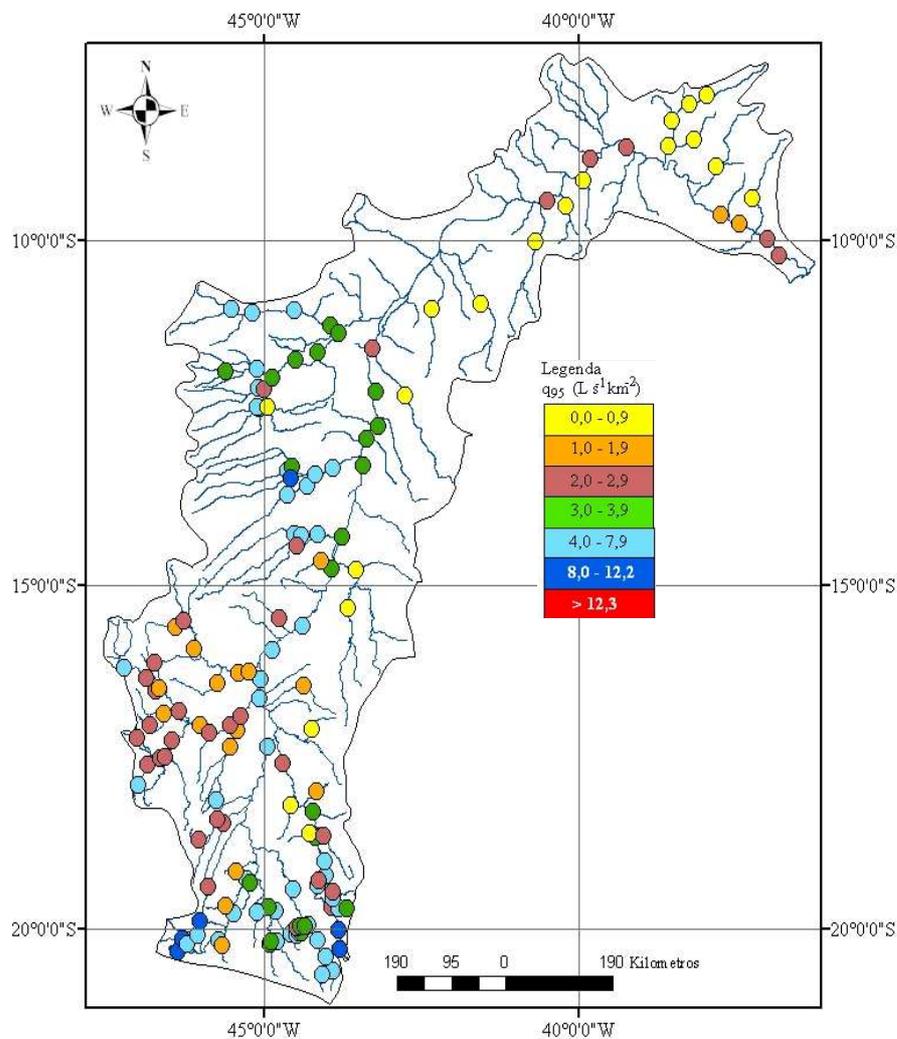


Figura 2.37. Vazão específica referida à  $Q_{95}$  nas áreas de drenagem de 145 estações fluviométricas situadas na bacia do São Francisco, considerando-se o período de 1979 a 2002.

Nas Figuras 2.38 a 2.41 são apresentados os mapas com os valores das vazões específicas referente à  $Q_{95}$  estimadas com base nos diferentes métodos e variáveis independentes analisados (vazão específica estimada) para cada trecho do curso de água da base hidrográfica otocoficadada da bacia do São Francisco.

Observa-se que quando utilizadas as vazões estimadas pelo MCM, as vazões específicas foram superiores à maior vazão específica observada nas 145 estações fluviométricas. Estes valores superiores ocorreram em alguns trechos com menores áreas de drenagem nas bacias do Samburá, Bambuí, Pará, Paraopeba, das Velhas, Paracatu, Urucuia, Carinhanha, Corrente e Grande.

Quando as vazões específicas foram obtidas em função das vazões regionalizadas pelo MCM com base na área, a vazão específica chegou a atingir o valor igual a  $175,2 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ , na nascente do rio Carinhanha. Já com o uso das vazões estimadas em função da precipitação equivalente o maior valor de vazão específica foi igual a  $144,0 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$  observado em um trecho do rio Santo Antônio, afluente do rio Samburá. As vazões específica obtidas com o uso das vazões estimadas em função da  $P_{eq700}$  apresentou ainda uma melhora com relação ao uso das outras duas variáveis, sendo o maior valor igual a  $121,9 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ , também observados no rio Santo Antônio. Embora o uso da  $P_{eq700}$  tenha apresentado uma diminuição das vazões específicas em relação ao uso da área e da precipitação equivalente, com a aplicação da  $P_{eq750}$  o maior valor da vazão específica ( $172,5 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ) foi próximo ao obtido pela área, sendo este valor evidenciado em um afluente do rio Camapuã, o qual pertence à bacia do rio Paraopeba.

Com o uso do método tradicional também foram evidenciadas vazões específicas superiores ao maior valor ocorrido na bacia do São Francisco. Entretanto isto aconteceu somente na bacia do rio Corrente, quando as  $Q_{95}$  foram estimadas em função das quatro variáveis independentes, e na bacia do rio Grande, quando as  $Q_{95}$  foram estimadas em função da área e da precipitação equivalente. Valores de vazões específicas (maiores que  $250,0 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ) superiores aos evidenciados com o uso do MCM, ocorreram na bacia do rio Corrente, quando as vazões foram estimadas em função da precipitação equivalente, da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$ . Já com base na área o maior valor de vazão específica foi de  $26,5 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$  na bacia do rio Grande.

Na região 1 as vazões específicas apresentaram, quando aplicado o MCM, uma maior ocorrência de valores entre  $4,0$  e  $7,9 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ , entretanto em alguns rios estas foram tanto subestimadas quanto superestimadas. Pelo método tradicional ocorreu uma variação expressiva das vazões específicas quando utilizada qualquer uma das variáveis independentes para a estimativa das vazões, ocorrendo em muitos trechos da região valores subestimados.

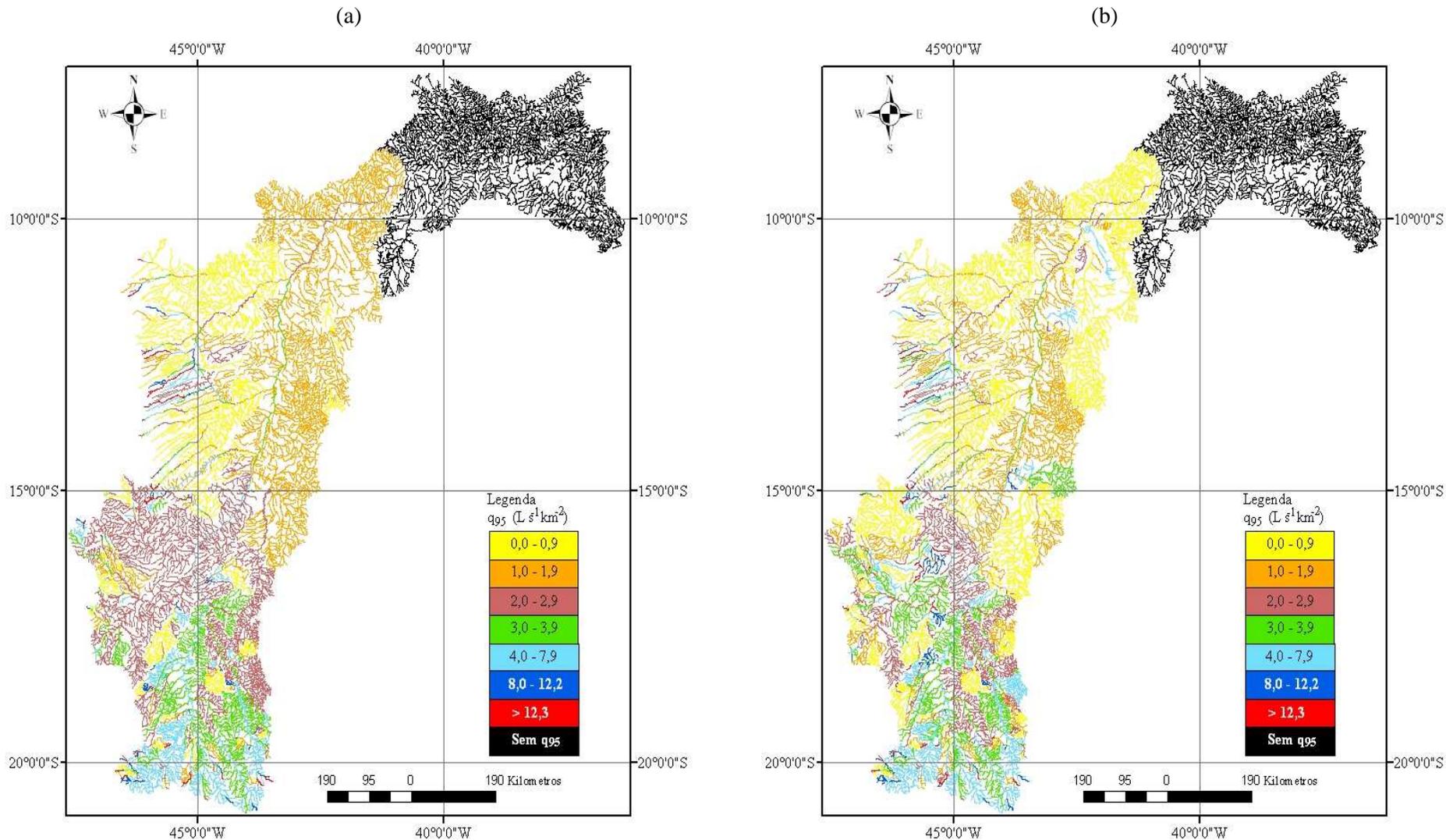


Figura 2.38. Vazões específicas referente à  $Q_{95}$  ( $q_{95}$ ) obtidas quando utilizadas as vazões regionalizadas em função da área (a); e da precipitação equivalente (b) pelo MCM.

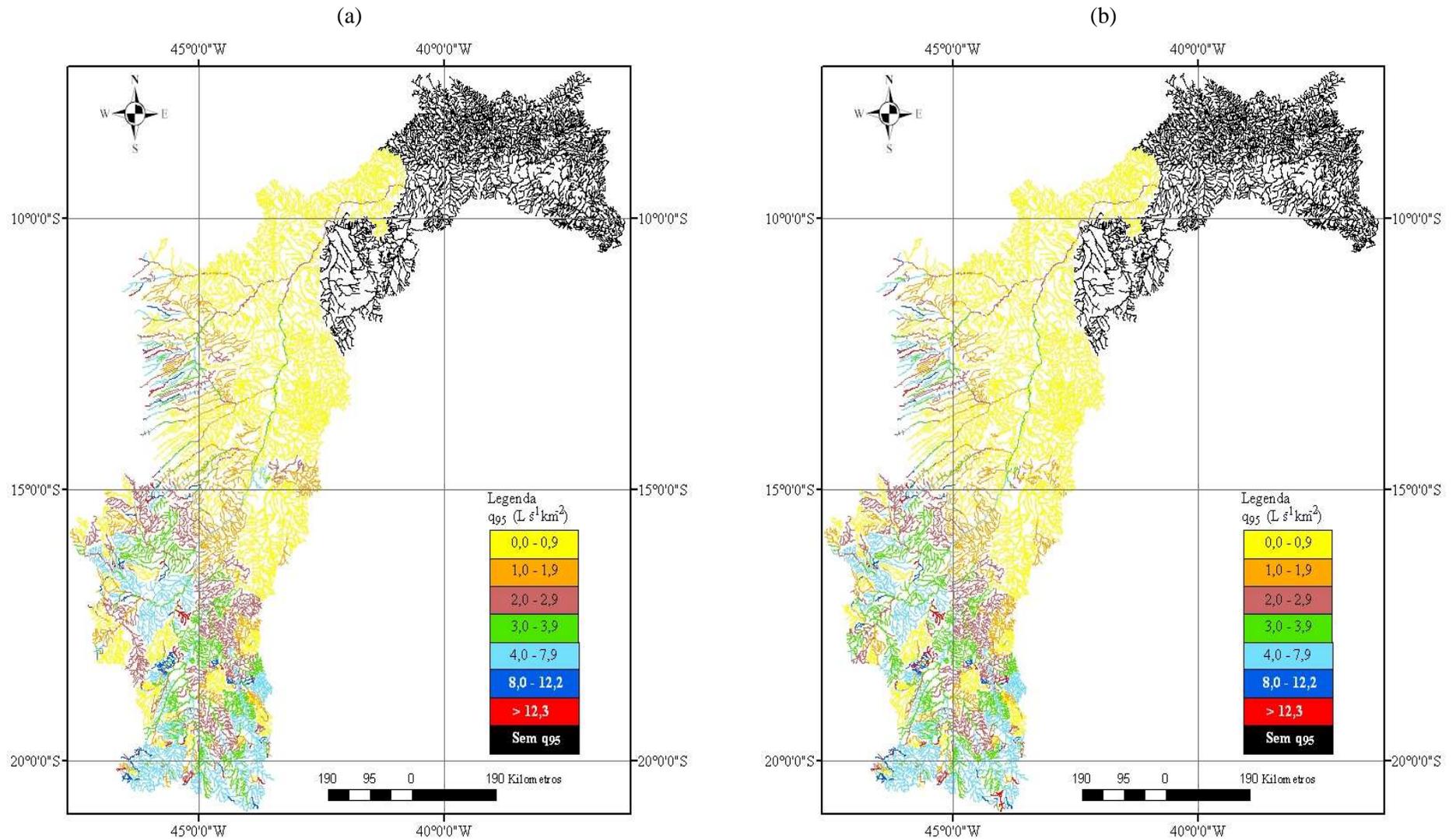


Figura 2.39. Vazões específicas referente à  $Q_{95}$  ( $q_{95}$ ) obtidas quando utilizadas as vazões regionalizadas em função da  $P_{eq700}$  (a); e da  $P_{eq750}$  (b) pelo MCM.

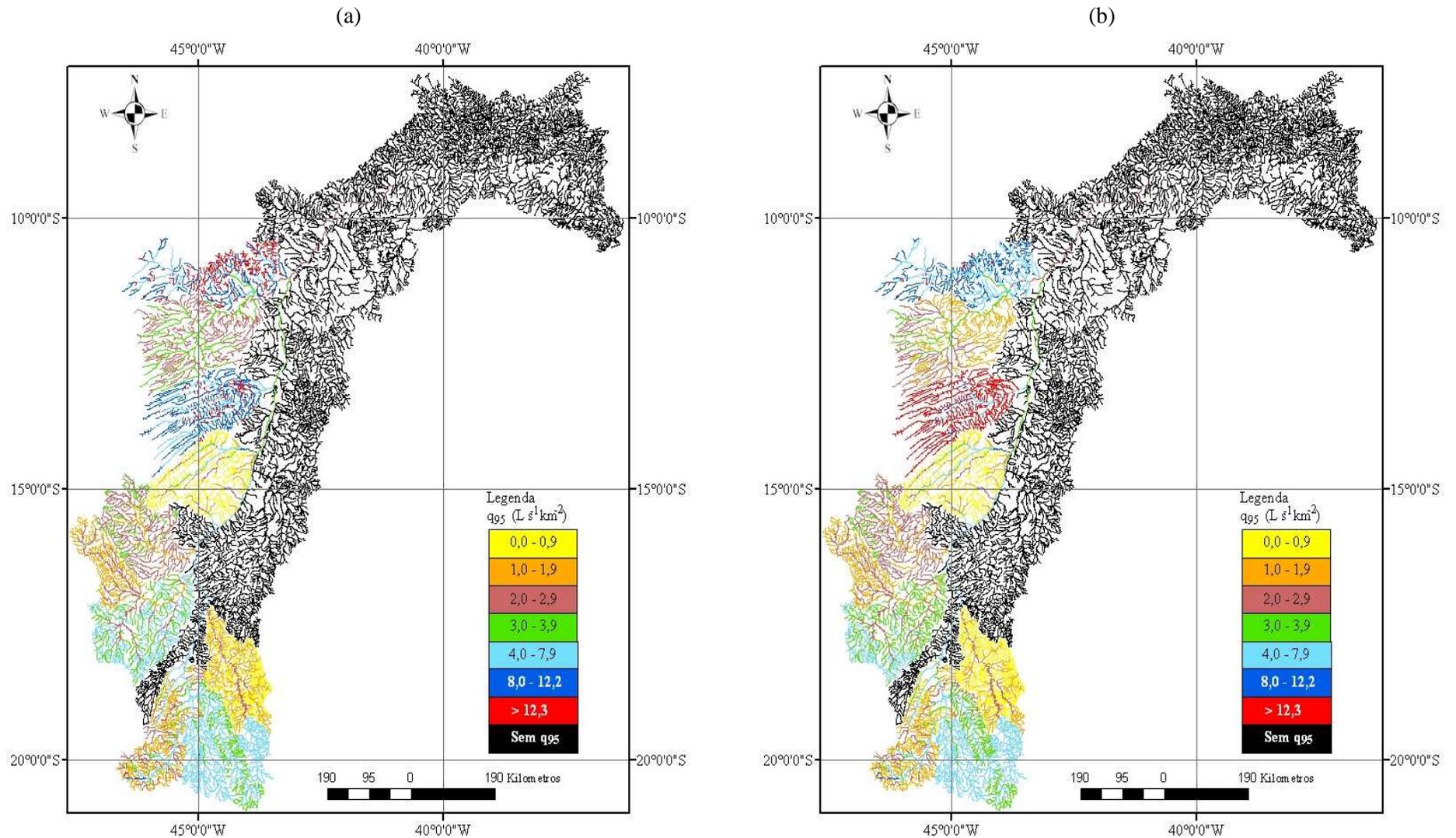


Figura 2.40. Vazões específicas referente à  $Q_{95}$  ( $q_{95}$ ) obtidas quando utilizadas as vazões regionalizadas em função da área (a); e da precipitação equivalente (b) pelo método tradicional.

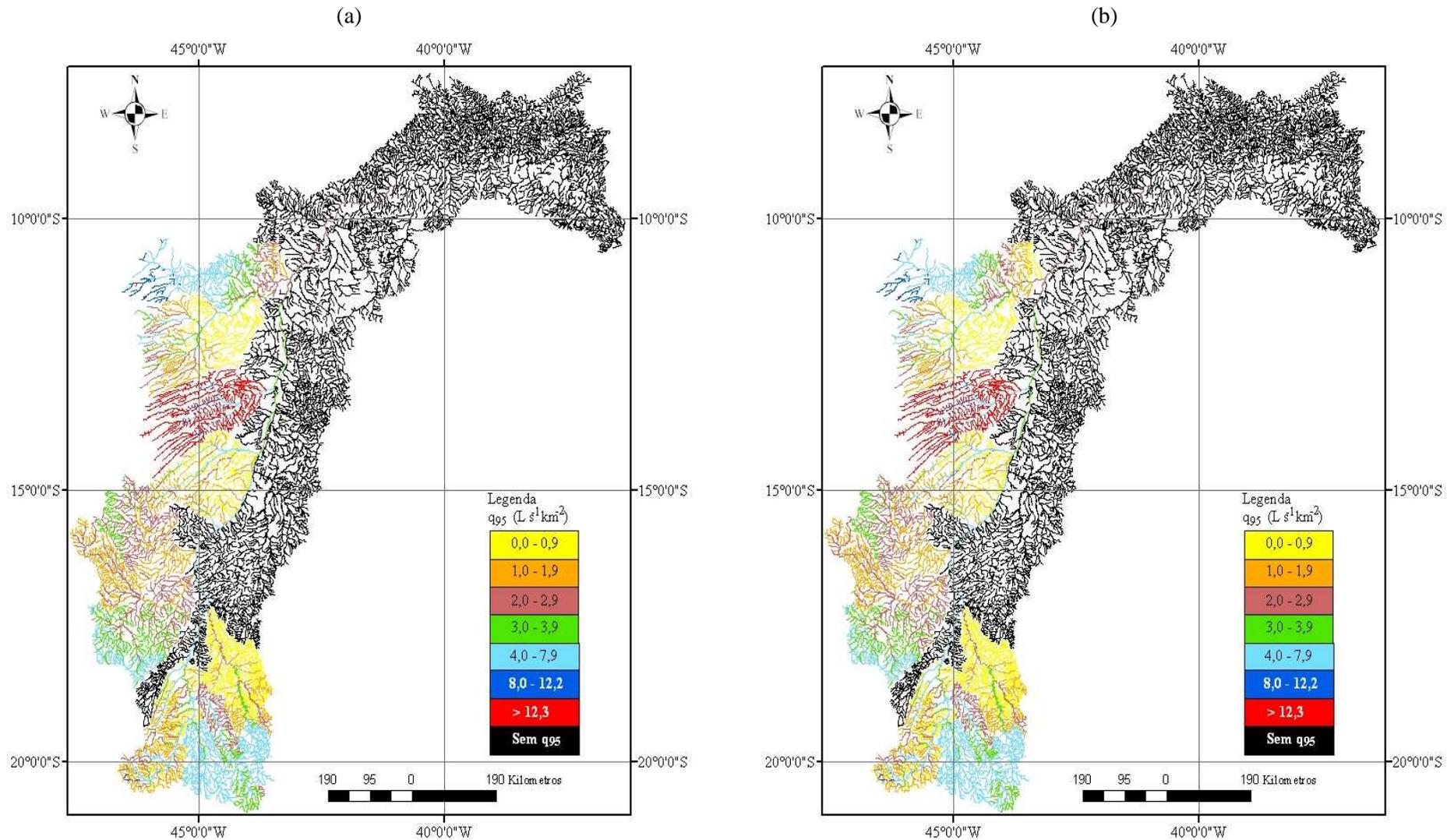


Figura 2.41. Vazões específicas referente à  $Q_{95}$  ( $q_{95}$ ) obtidas quando utilizadas as vazões regionalizadas em função da  $P_{eq700}$  (a); e da  $P_{eq750}$  (b) pelo método tradicional.

Pelo MCM as vazões específicas variaram, em grande parte da bacia do Pará, de 3,0 a 4,9 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>, portanto estando na faixa das observadas (3,0 a 7,9), enquanto que em alguns trechos do curso de água estas foram, sobretudo subestimadas. Em ambas as combinações realizadas pelo método tradicional as vazões específicas estiveram na margem das observadas em toda a bacia.

Para a bacia do Paraopeba as vazões específicas foram próximas das observadas quando utilizada a área e a precipitação equivalente pelo método tradicional, nas outras seis combinações evidenciou-se uma maior ocorrência de subestimativas das vazões específicas.

Na bacia do rio das Velhas as vazões específicas apresentaram uma grande variação pelo MCM, refletindo a diversidade de valores referentes às vazões específicas observadas nesta bacia (0,34 a 12,2). Como pelo método tradicional esta bacia foi dividida em duas regiões homogêneas (regiões 4 e 5), estas apresentaram variações distintas. Na região 4 as vazões específicas foram inferiores a 2,9 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>, quando utilizados a área e a precipitação equivalente, e inferiores a 3,9 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>, quando utilizadas a P<sub>eq700</sub> e a P<sub>eq750</sub>, enquanto na região 5 as vazões específicas variaram foi de 4,0 a 7,9 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup> (estando dentro do limite das observadas).

Ocorreu também uma grande variação das vazões específicas na bacia do Paracatu quando aplicado tanto o MCM e como o método tradicional, tendo ocorrido em maior extensão valores na margem dos observados quando utilizada a P<sub>eq700</sub> e a P<sub>eq750</sub> pelo método tradicional.

As vazões específicas estimadas na bacia do Urucuia com base nas vazões obtidas pelo MCM tenderam a ser superestimadas. Pelo método tradicional as vazões específicas estiveram dentro do limite das observadas (1,0 a 2,9 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>) em grande parte da bacia, entretanto foram evidenciadas vazões mais elevadas em alguns trechos do curso de água, tendo ocorrido em menor extensão quando utilizado a precipitação equivalente.

Em grande parte da bacia do Carinhanha as vazões específicas foram subestimadas quando utilizadas as Q<sub>95</sub> obtidas pelos dois métodos e pelas quatro variáveis. Entretanto pelo método tradicional aplicado com base na P<sub>eq700</sub> e na P<sub>eq750</sub>, as vazões específicas do rio Carinhanha estiveram na margem das observadas neste rio (4,0 a 7,9 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>).

Para a bacia do rio Corrente o uso da área pelo método tradicional possibilitou valores de vazões específicas mais próximas das observadas. Para as outras três variáveis ocorreu uma superestimativa destas vazões em áreas de drenagem menores. Já pelo MCM as vazões específicas tenderam a ser subestimadas. As aplicações do MCM na bacia do rio Grande proporcionaram valores de vazões específicas subestimados em grande parte da bacia (inferiores a 1,9 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>), entretanto em algumas áreas de drenagem estas chegaram a

apresentar valores superiores ao maior valor evidenciado na bacia do São Francisco. Valores superiores também foram evidenciados em seu afluente, o rio Preto, com o método tradicional em função da área e da precipitação equivalente. Já a consideração da precipitação menos a inércia hídrica na equação de regionalização proporcionou vazões específicas próximas das observadas principalmente nos principais cursos de água da bacia do Grande.

Na parte Leste da bacia do São Francisco a jusante da confluência do rio Pacuí, a consideração da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$  pelo MCM tendeu a diminuir os valores de vazão específica estimados, aproximando dos valores observados. Pelo método tradicional nenhum ajuste foi possível nesta região. Na Figura 2.42 apresentam-se, a título de exemplo, o comportamento das vazões específicas, para a bacia do rio Pará, observadas e estimadas, em cada trecho da hidrografia, com base nas vazões obtidas considerando a  $P_{eq750}$  pelos métodos tradicional e MCM, sendo esta variável a que proporcionou o melhor ajuste por ambos os métodos.

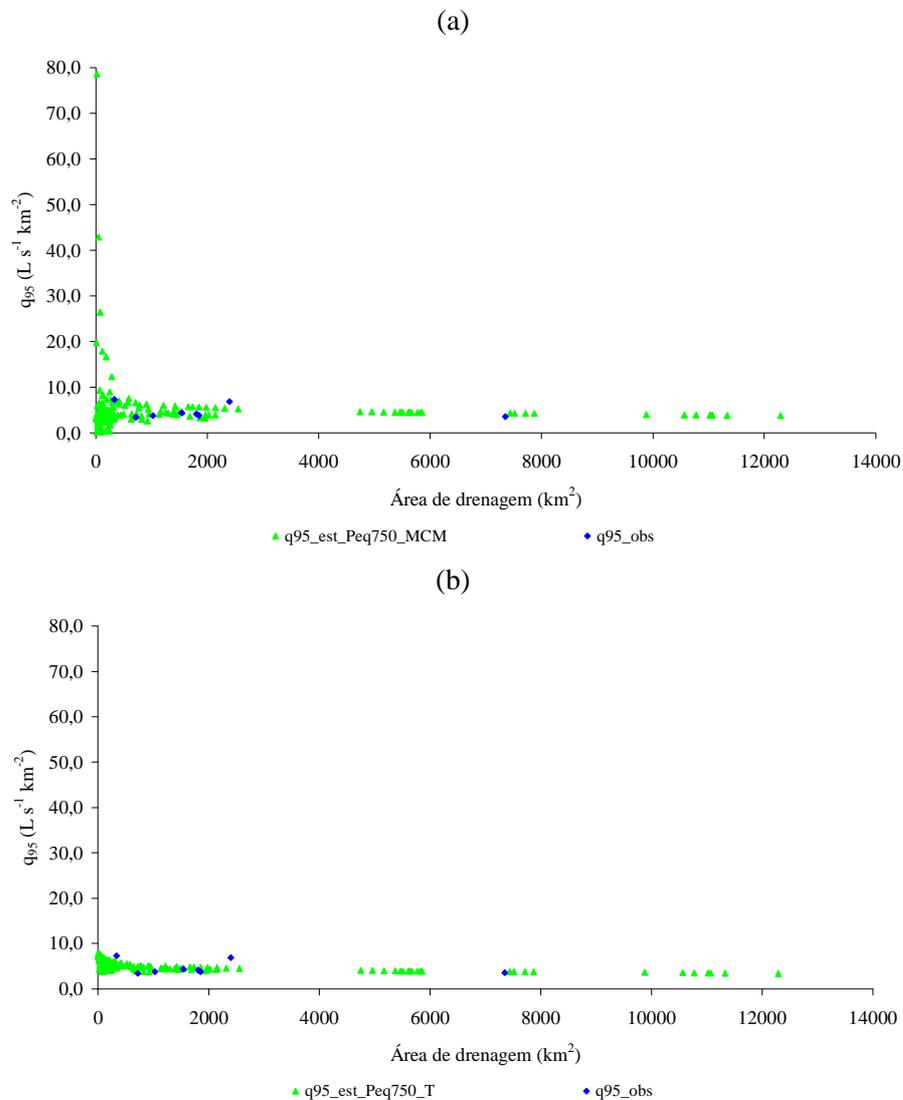


Figura 2.42. Vazões específicas referente à  $Q_{95}$  obtidas com base nas vazões estimadas em função da  $P_{eq750}$ , pelo MCM (a) e pelo método tradicional (b) em cada trecho da hidrografia da bacia do Pará e as obtidas com base nos dados observados.

Observa-se que as  $q_{95}$  estimadas pelo MCM variaram de 0,14 a 78,6 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup> próximo às nascentes, portanto, representando 4,0% do menor valor observado (3,3 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>) e 11 vezes superior ao maior valor observado (7,3 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>), respectivamente. Enquanto pelo método tradicional a variação foi de 3,4 a 7,9 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>, estando próximos dos menores e maiores valores observados, respectivamente.

Para as outras bacias foram evidenciados comportamentos semelhantes da vazão específica pelo MCM e pelo método tradicional.

Assim como observado na análise do coeficiente de escoamento para a vazão média, as  $Q_{95}$  advindas do uso do MCM embora tenham sido caracterizadas em diversas situações, conforme descrito no item 2.3.1. menores amplitudes de variações dos erros também apresentaram grande variação de suas vazões específicas, sobretudo nas cabeceiras ocasionando, portanto maiores imprecisões. Já o método tradicional tendeu a apresentar menores amplitudes de variações das vazões específicas.

#### **2.3.2.1.2.2 - O uso da vazão específica para a adequação da extrapolação das equações de regionalização**

Para amenizar os efeitos da extrapolação dos dados de vazões gerados pelas equações de regionalização, analisaram-se os locais na base hidrográfica em que a vazão específica estimada com base na vazão regionalizada foi superior à maior vazão específica observada em uma determinada região ou rio, no caso do método tradicional e do MCM, respectivamente. Na Figura 2.43 são apresentados os mapas representando os locais onde as vazões específicas obtidas com base nas vazões estimadas em função da  $P_{eq750}$  por ambos os métodos analisados foram superiores aos valores máximos observados.

Observa-se, no MCM, que as vazões específicas foram superestimadas em todas as bacias, tendo sido evidenciado em maior extensão nas bacias do Paracatu, Urucuia, Jequitai e Verde Grande, enquanto no método tradicional esta superestimativa concentrou-se nas bacias do Urucuia, do Corrente e do Grande.

Portanto, para minimizar os erros advindos da extrapolação das equações de regionalização utilizou-se a vazão específica associada a um valor considerado como limite para esta extrapolação, sendo este o maior valor observado nas estações de uma determinada região ou rio, no caso do método tradicional e do MCM, respectivamente. Desta forma quando a vazão específica estimada foi superior ao valor limite, a  $Q_{95}$  foi recalculada pelo produto da área de drenagem com a vazão específica limite (equação 9).

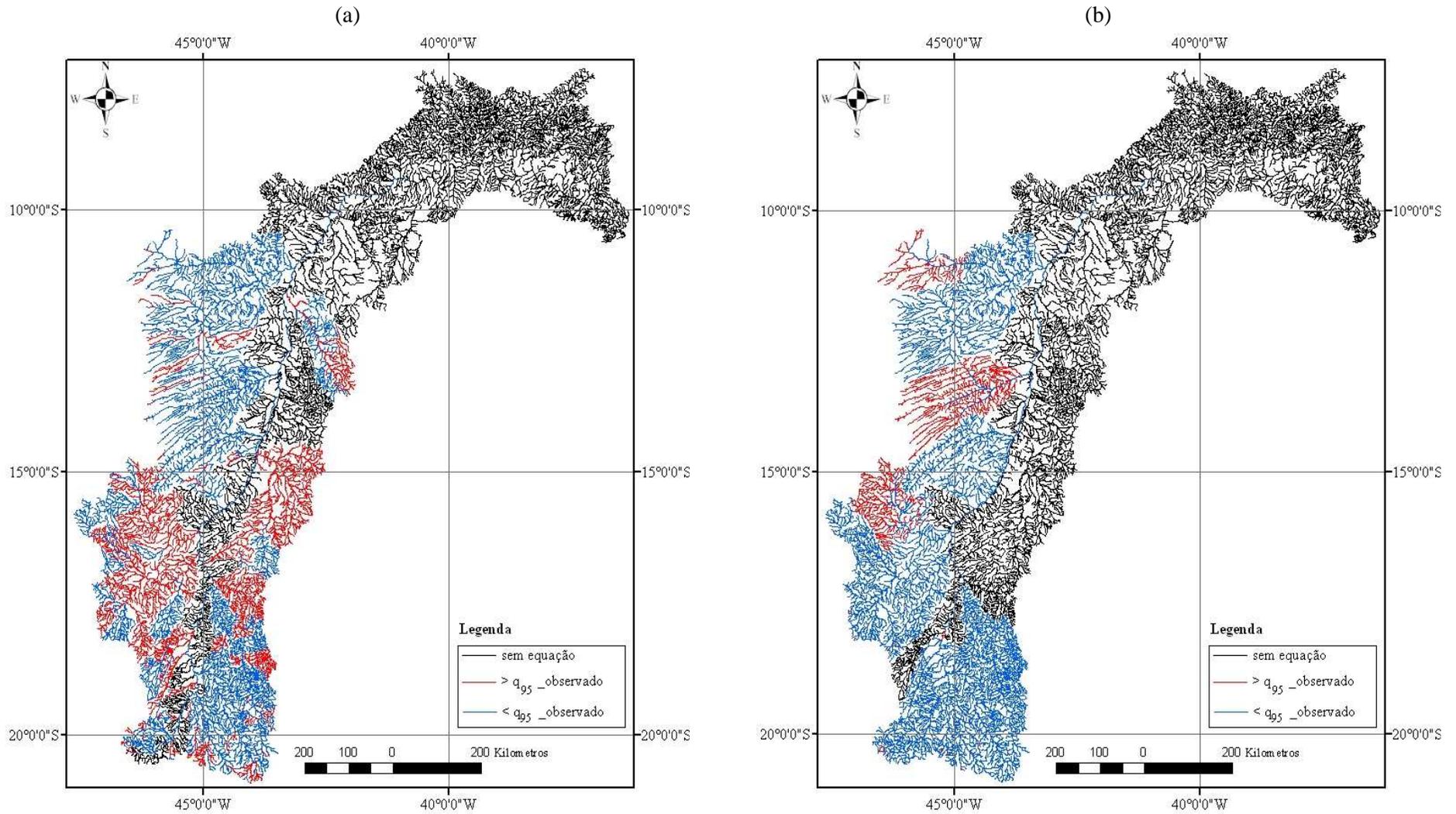


Figura 2.43. Regiões na bacia do São Francisco onde as vazões específicas obtidas com base nas vazões estimadas em função da  $P_{eq750}$  pelo MCM (a); e pelo método tradicional (b) foi inferior ( $< q_{95\_observado}$ ) e superior ( $> q_{95\_observado}$ ) ao maior valor de vazão específica observado.

Na Figura 2.44 é apresentado, para o rio Preto, afluente do Paracatu, o comportamento das vazões específicas observadas, da estimada pelo modelo de regionalização e da ajustada com base na vazão específica utilizada como limite, a qual é correspondente ao presente caso a  $4,2 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ .

Observa-se que até a área de drenagem de  $3.059 \text{ km}^2$  a vazão específica estimada supera o valor da vazão específica utilizada como limite, chegando a ser igual a  $23,7 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$  (aproximadamente seis vezes superior ao valor considerado como limite). Deste modo a montante desta área foi necessário o ajuste das vazões específicas estimadas, sendo atribuído valor igual ao da vazão específica limite para esta região, apresentando, portanto um comportamento linear da vazão específica ajustada.

Como a montante da área de drenagem de  $3.059 \text{ km}^2$  as vazões específicas estimadas pelo modelo de regionalização foram superiores à vazão específica utilizada como limite, foi necessário o ajuste das  $Q_{95}$  desta região. Este ajuste teve um comportamento linear, uma vez que está baseado na área de drenagem, sendo sua declividade correspondente à sua contribuição específica. Deste modo, o procedimento adotado minimiza as  $Q_{95}$  onde as vazões específicas foram superiores à selecionada como limite, permitindo, assim uma gestão mais segura dos recursos hídricos.

Na Figura 2.45 são apresentadas, para o rio Preto, as  $Q_{95}$  estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas, bem como as vazões quando considerada a equação original e o procedimento adotado para o ajuste das vazões.

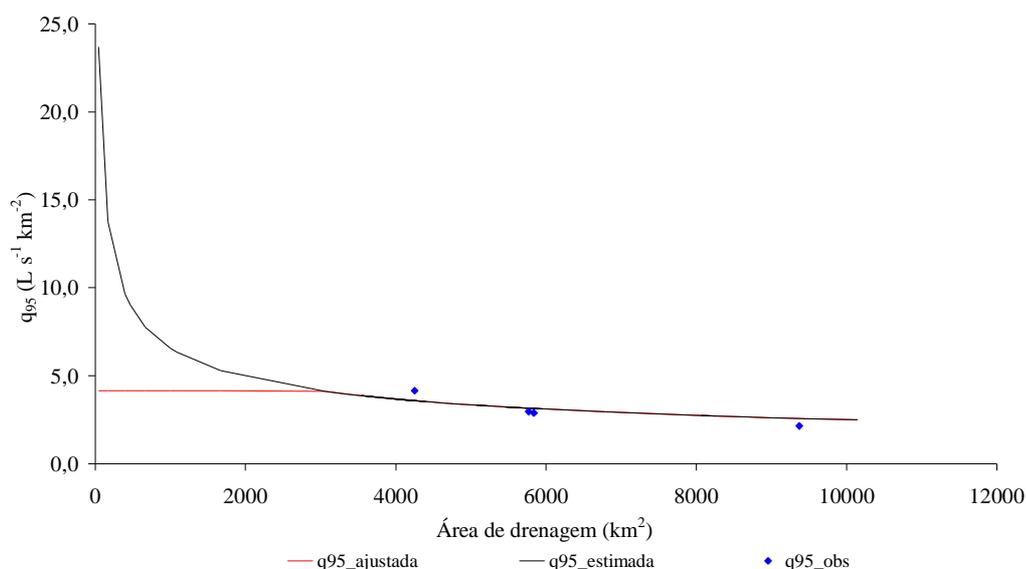


Figura 2.44. Vazões específicas associadas à permanência de 95% estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas localizadas no rio Preto ( $q_{95\_obs}$ ), da estimada com base nas vazões regionalizadas ( $q_{95\_estimada}$ ) e da ajustada ( $q_{95\_ajustada}$ ).

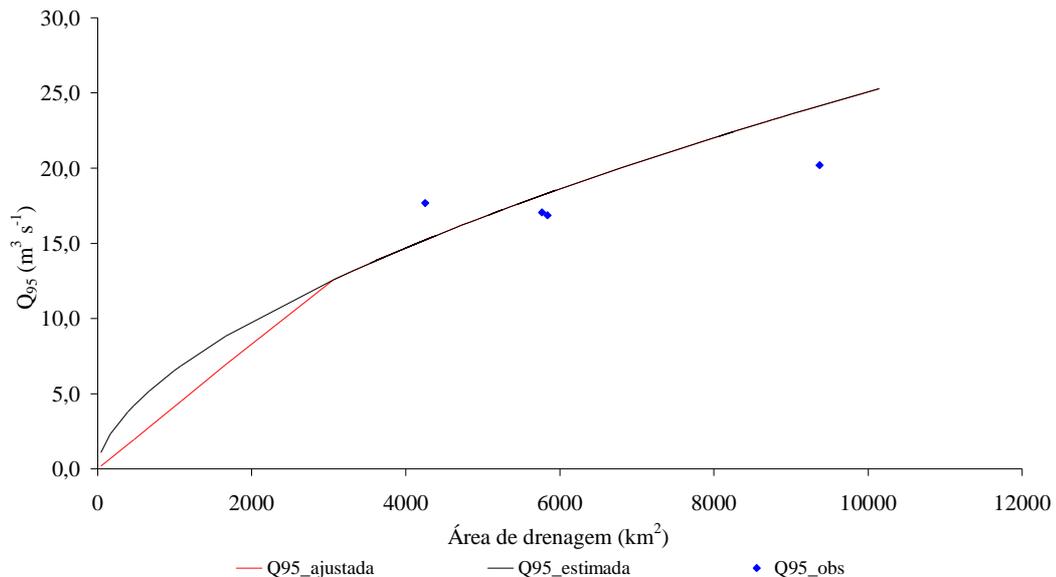


Figura 2.45. Vazões associadas à permanência de 95% estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas (Q95\_obs), da estimada pela equação de regionalização (Q95\_estimada) e da ajustada (Q95\_ajustada).

### 2.3.2.1.3 - Método e variáveis selecionadas para a regionalização da Q<sub>95</sub>

Devido à grande amplitude de variação das vazões específicas referente às Q<sub>95</sub> estimadas, excedendo os limites dos valores das vazões específicas observadas principalmente em pequenas áreas de drenagem quando aplicado o MCM, o método tradicional foi o que melhor representou o comportamento das Q<sub>95</sub> na bacia do São Francisco.

Desta forma, foram selecionados os melhores ajustes pelo método tradicional para todas as bacias do São Francisco, embora os erros relativos tenham sido menores pelo MCM em algumas bacias (bacias presentes na região 1, bacia do Pará, bacia do Paraopeba, bacia do rio das Velhas e bacia do Paracatu).

No Quadro 2.5 são apresentadas as equações selecionadas para cada região homogênea pelo método tradicional e os valores das vazões específicas consideradas como limite para cada região.

As variáveis independentes utilizadas para a regionalização da Q<sub>95</sub> nas regiões homogêneas foram as mesmas selecionadas para a obtenção da Q<sub>mld</sub>, com exceção da bacia do Pará. Enquanto para Q<sub>95</sub> nesta bacia selecionou-se a variável P<sub>eq750</sub>, para a Q<sub>mld</sub> foi selecionado a precipitação equivalente.

Na Figura 2.46 é apresentado o mapa mostrando os métodos e variáveis selecionados na regionalização de vazões para a bacia do São Francisco e as regiões onde foi necessário o ajuste com base na q<sub>95</sub> utilizada como limite.

O ajuste das vazões foi necessário nas bacias dos rios Urucuaia, Corrente e no rio Preto afluente do Grande, bem como na nascente do rio São Francisco e no trecho a jusante de Três Marias.

Quadro 2.5. Equações seleccionadas para cada região homogênea pelo método tradicional e os valores das vazões específicas consideradas como limite para cada região

Regiões Homogêneas	Equação	$q_{95}$ (limite) ( $L s^{-1} km^{-2}$ )
1	$Q_{95} = 0,043744 P_{eq750}^{1,451275}$	10,0
2	$Q_{95} = 0,29405 P_{eq750}^{0,887164}$	7,3
3	$Q_{95} = 0,074072 P_{eq}^{1,069348}$	6,6
4	$Q_{95} = 0,064763 P_{eq700}^{1,155432}$	5,8
5	$Q_{95} = 0,215652 P_{eq700}^{1,015947}$	12,2
6	$Q_{95} = 0,19859 P_{eq750}^{0,88242}$	4,8
7	$Q_{95} = 0,090574 P_{eq750}^{1,092948}$	4,2
8	$Q_{95} = 0,215794 P_{eq750}^{0,880982}$	5,8
9	$Q_{95} = 0,082122 P_{eq}^{0,87143}$	2,1
10	$Q_{95} = 0,146236 P_{eq750}^{1,351391}$	7,7
11	$Q_{95} = 0,021108 A^{0,85975}$	8,1
12	$Q_{95} = 0,088584 P_{eq750}^{1,212411}$	6,3
13	$Q_{95} = 0,665729 P_{eq750}^{0,865652}$	5,6
14	$Q_{95} = 0,478 P_{eq750}^{0,8599}$	9,3
15	$Q_{95} = 1,9726 P_{eq750}^{0,7544}$	7,4

#### 2.3.2.1.4 - Análise da regionalização da $Q_{95}$ para a calha do São Francisco

Em virtude do efeito de regularização dos reservatórios de Três Marias e Sobradinho, a calha do São Francisco foi dividida em três regiões: a montante de Três Marias, entre Três Marias e Sobradinho e a jusante de Sobradinho.

Na Figura 2.47 caracteriza-se o efeito produzido pelo reservatório de Três Marias na  $Q_{95}$ , na qual se constata que o reservatório, como era esperado, conduz a um expressivo aumento da vazão mínima a jusante deste.

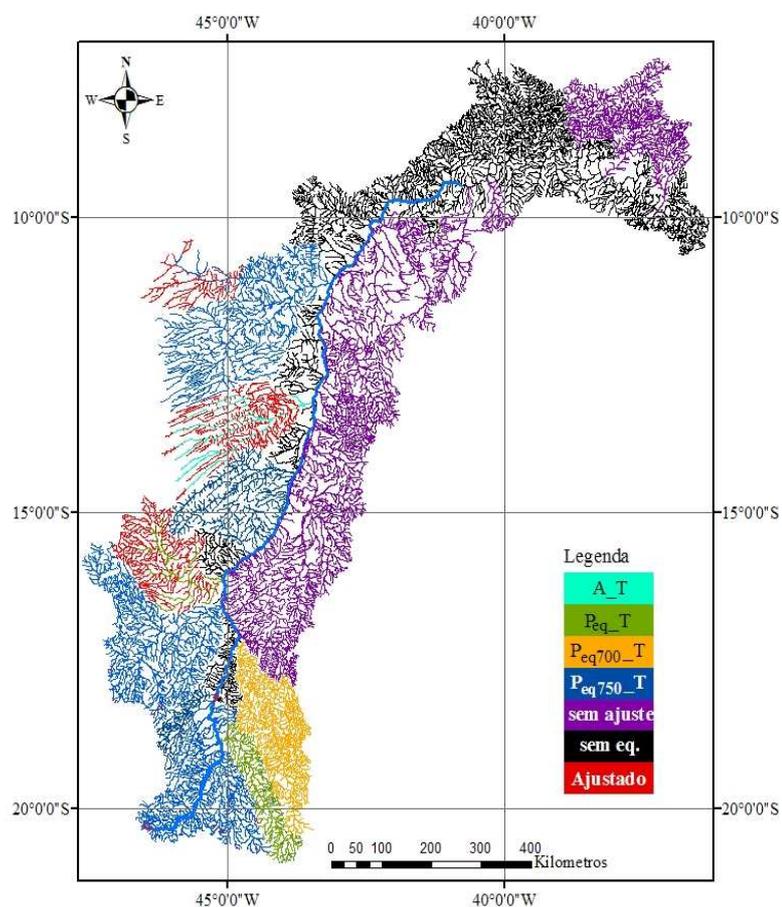


Figura 2.46. Métodos (T = método tradicional) e variáveis (A = área,  $P_{eq}$  = precipitação equivalente;  $P_{eq700}$  = precipitação equivalente considerando uma diminuição de 700 mm;  $P_{eq750}$  = precipitação equivalente considerando uma diminuição de 750 mm) selecionados para a regionalização da  $Q_{95}$  na bacia do São Francisco. Sem ajuste corresponde às bacias que apresentam estações fluviométricas, mas não foi possível nenhum ajuste e sem eq. corresponde aos locais onde não existem estações fluviométricas, não sendo possível a obtenção de equações de regionalização. Ajustado corresponde aos locais onde foi necessário o ajuste com base na vazão específica.

Deste modo os ajustes em função das quatro variáveis independentes analisadas foram realizados a montante de Três Marias e entre este reservatório e Sobradinho. No caso da vazão mínima, ao contrário das vazões médias não se evidenciou uma distorção próximo a Sobradinho, de tal forma que não foram feitos os ajustes baseados no princípio do MCM, o qual força a equação passar pela origem e pelo último valor de vazão.

Visando facilitar a seleção da combinação do método de regionalização e da variável independente que conduziu aos menores erros relativos nas regiões a montante de Três Marias (região 14) e entre este reservatório e Sobradinho (região 15) são apresentadas no Quadro 2.6 as amplitudes de variação dos erros relativos quando utilizadas as quatro variáveis independentes.

Quadro 2.6. Amplitudes de variações ( $\Delta$ ) dos erros quando utilizadas as quatro variáveis independentes e os dois métodos analisados a montante de Três Marias (região 14) e no trecho entre Três Marias e Sobradinho (região 15)

Região	$\Delta(A)$	$\Delta(P_{eq})$	$\Delta(P_{eq700})$	$\Delta(P_{eq750})$
14	-9,6 a 7,5	-9,0 a 7,4	-8,4 a 7,3	-8,3 a 7,3
15	-17,4 a 14,4	-16,3 a 14,6	-23,8 a 9,1	-24,8 a 8,6

A montante de Três Marias os erros relativos foram inferiores a 10% para ambas as variáveis aplicadas. Entre Três Marias e Sobradinho as equações de regionalização em função da área e da precipitação equivalente apresentaram erros inferiores a 20% (valor em módulo), sendo que valores maiores que 10% somente ocorreram nas estações Pedras de Maria da Cruz e Manga. Já para a  $P_{eq700}$  e a  $P_{eq750}$ , apenas a estação Manga teve erros maiores que 10%.

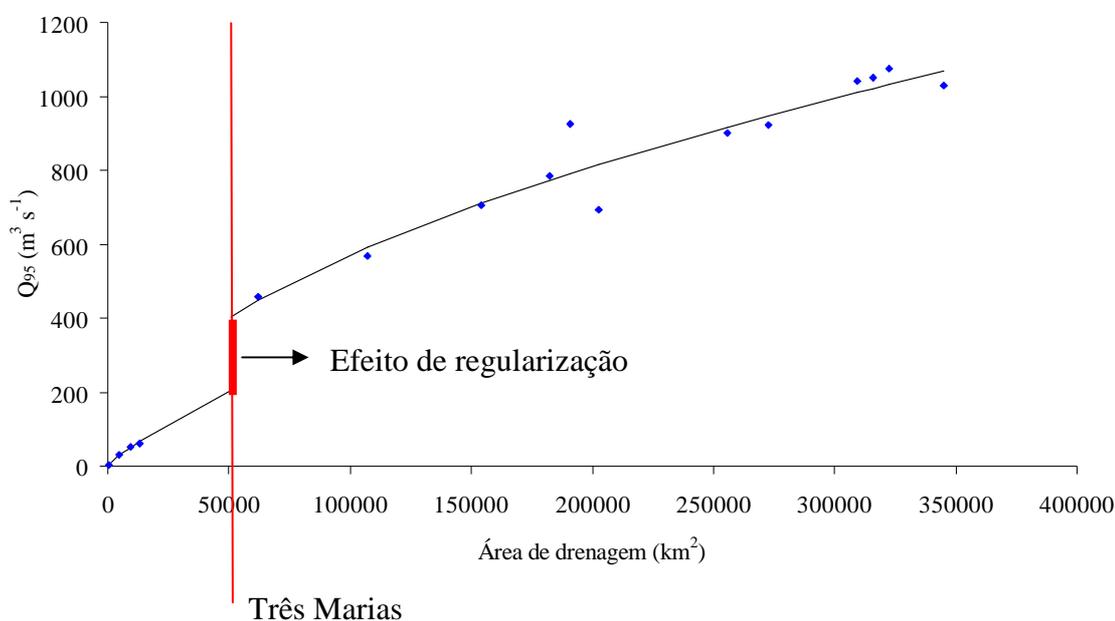


Figura 2.47. Efeito de regularização do reservatório de Três Marias na  $Q_{95}$  na calha do São Francisco.

Com relação à magnitude das vazões específicas referentes à  $Q_{95}$  observa-se na Figura 2.48 o comportamento destas vazões específicas estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas (vazões específicas observadas), bem como as vazões específicas estimadas com base nas  $Q_{95}$  regionalizadas em função das quatro variáveis independentes (vazão específica estimada).

A montante de Três Marias, as vazões estimadas, próximas à nascente, considerando as quatro variáveis independentes foram superiores à maior  $q_{95}$  observada ( $9,3 L s^{-1} km^{-2}$ ), tendo ocorrido o valor mais próximo ao observado quando utilizada a  $P_{eq750}$  ( $11,96 L s^{-1} km^{-2}$ ), o qual foi 28,0% superior ao maior valor de vazão específica observado. Esta mesma

variável foi responsável pela menor  $q_{95}$  a jusante de Três Marias ( $7,49 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ), sendo 1,7% superior ao maior valor observado neste trecho do São Francisco ( $7,38 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ).

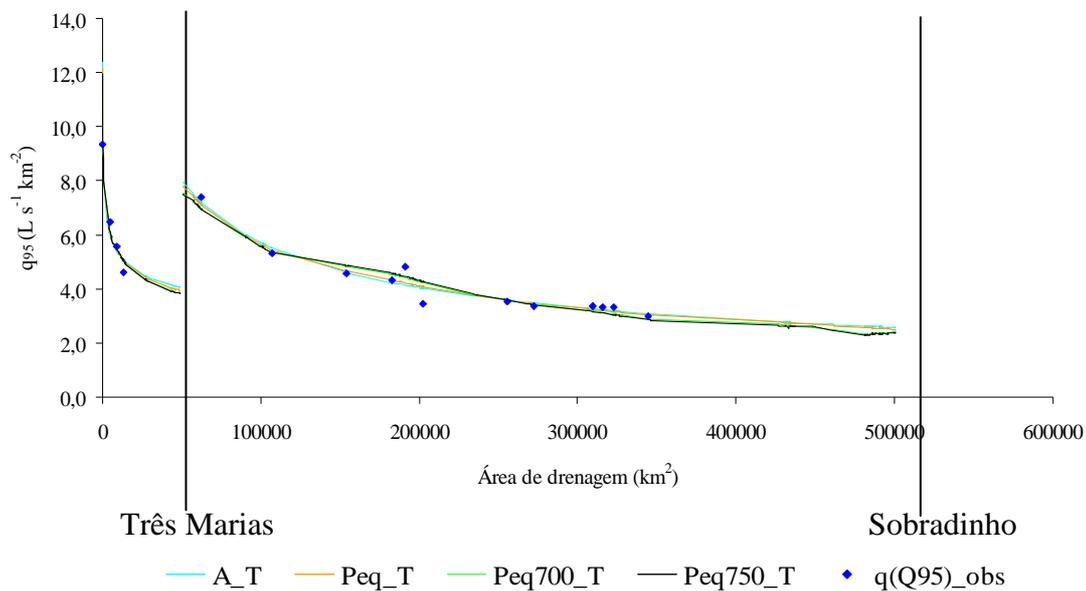


Figura 2.48. Vazões específicas estimadas com base nas  $Q_{95}$  regionalizadas em função da área (A),  $P_{eq\_T}$ , da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$  pelo método tradicional (T) e as estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas ( $q_{95\_obs}$ ).

Para a seleção do melhor método e variável também analisou-se o gráfico da  $Q_{95}$  em função da área. Portanto são apresentadas na Figura 2.49 as  $Q_{95}$  estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas, bem como as obtidas pelos ajustes utilizando as quatro variáveis analisadas.

As  $Q_{95}$  afluentes em Três Marias obtidas por ambas as variáveis analisadas, mesmo não considerando os usos consuntivos foram superiores à  $Q_{95}$  natural afluente a este reservatório ( $148 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) adotada no Plano de Recursos Hídricos da bacia do São Francisco (ANA, 2004a). O ajuste utilizando a variável  $P_{eq750}$  ( $188,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) foi o que mais se aproximou do valor da literatura, sendo 26,5% superior ao valor adotado pelo Plano.

Com relação aos efeitos de regularização, observa-se que as vazões efluentes de Três Marias foram inferiores à sua vazão máxima regularizável ( $513 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) adotada em caráter provisório pelo Plano da bacia (ANA, 2004a). Entretanto ANA (2004a) ressalta que a vazão efluente deste reservatório tem sido bastante inferior ao valor máximo regularizável, ocorrendo com uma permanência de 72%. As vazões efluentes de Três Marias estimadas variaram de 383,6 (obtida em função da  $P_{eq750}$ ) a  $406,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (obtida em função da área) sendo, respectivamente, 25,2 e 20,8% inferiores à vazão máxima regularizável adotada pelo Plano.

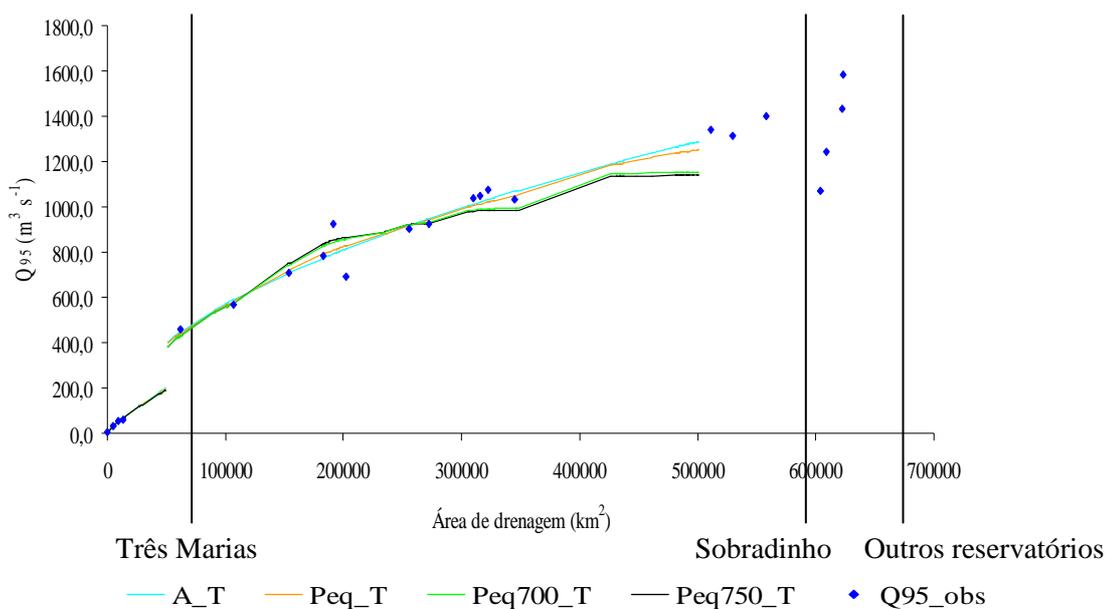


Figura 2.49.  $Q_{95}$  estimadas em função da área ( $A$ ), da  $P_{eq}$ , da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$  pelo método tradicional (T) e as estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas ( $Q_{95\_obs}$ ).

As vazões observadas a jusante de Sobradinho também foram inferiores à vazão máxima regularizável por este reservatório ( $1.815 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) adotada em caráter provisório pelo Plano da bacia (ANA, 2004a). Segundo ANA (2004a) as vazões efluentes de Sobradinho têm sido bastante inferiores ao valor máximo regularizável, ocorrendo com uma permanência 66%.

Neste trecho do São Francisco a existência dos reservatórios de Itaparica/Luiz Gonzaga, de Moxotó, de Paulo Afonso e de Xingó tenderia a promover o aumento das vazões devido ao efeito de regularização desses reservatórios, entretanto verifica-se uma diminuição da vazão na estação Piranhas localizada após estes reservatórios. Portanto devido ao comportamento das vazões neste trecho do São Francisco, bem como a impossibilidade de comparação entre as vazões específicas da calha e a dos afluentes desta região do São Francisco, as quais são, segundo ANA (2004b), praticamente nulas, não foi possível nenhum ajuste nesta região.

Assim como evidenciado na análise da  $Q_{mld}$  a consideração da  $P_{eq700}$  e da  $P_{eq750}$  na regionalização da  $Q_{95}$  também refletiram as variações de contribuições específicas associadas aos afluentes das margens direita e esquerda do São Francisco (Figura 2.2).

Na Figura 2.50 são apresentadas as vazões observadas e as estimadas em função da  $P_{eq750}$ , bem como a representação da contribuição dos afluentes na vazão do São Francisco.

Como observado na análise da vazão média, embora a bacia do rio Grande possua a maior área de drenagem, a bacia do Paracatu apresentou a maior contribuição na formação da vazão do rio São Francisco, devido à maior declividade do ajuste no trecho correspondendo à área de drenagem desta bacia.

Apesar do ajuste permitir uma melhor representatividade das contribuições advindas de cada afluente diferenças ainda são encontradas quando da estimativa da vazão numa seção imediatamente a jusante da confluência de um rio (equação 2.10), ocorrendo, portanto uma descontinuidade de vazões.

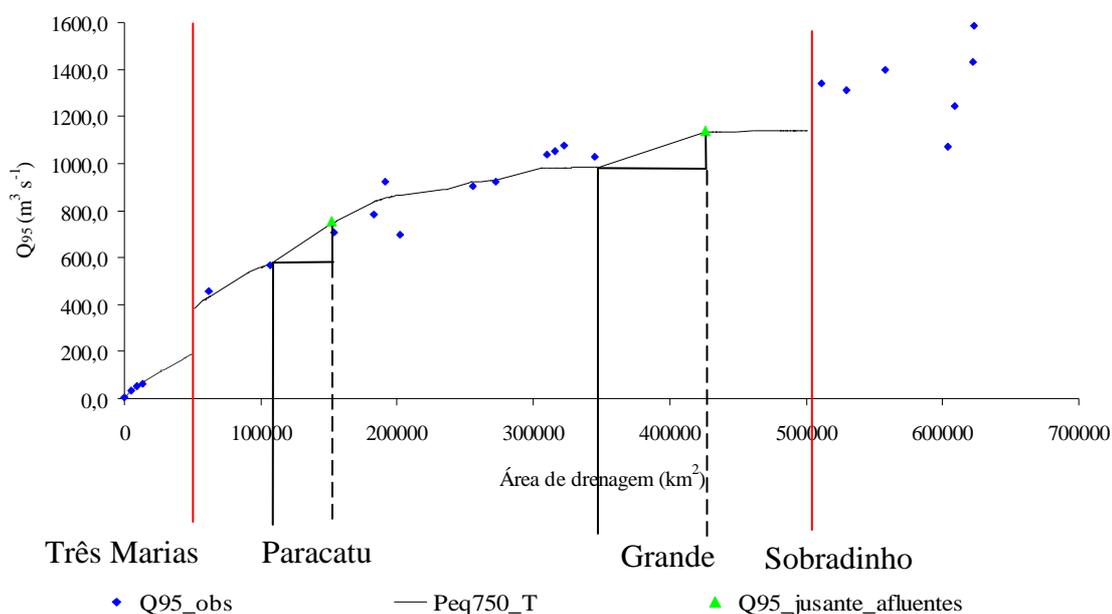


Figura 2.50. Q<sub>95</sub> estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas (Q<sub>95\_obs</sub>) e a estimada em função da P<sub>eq750</sub> na calha do São Francisco.

Na Figura 2.51 são apresentadas as vazões na calha do rio São Francisco e as vazões a jusante da confluência de seus principais afluentes, tendo sido a vazão da foz de cada afluente obtida com base nos seus respectivos modelos de regionalização selecionados.

As maiores descontinuidades ocorreram na confluência dos rios Corrente, Paracatu, Carinhanha, Grande e Urucuia. As vazões obtidas pelos modelos de regionalização selecionados para as bacias dos rios Corrente, do Grande e do Carinhanha tiveram um excedente de 115,4, 89,5 e 62,5 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente, em relação às vazões advindas da calha do São Francisco. Enquanto que as vazões do Paracatu e do Urucuia apresentaram déficits de 98,2 e 46,6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente.

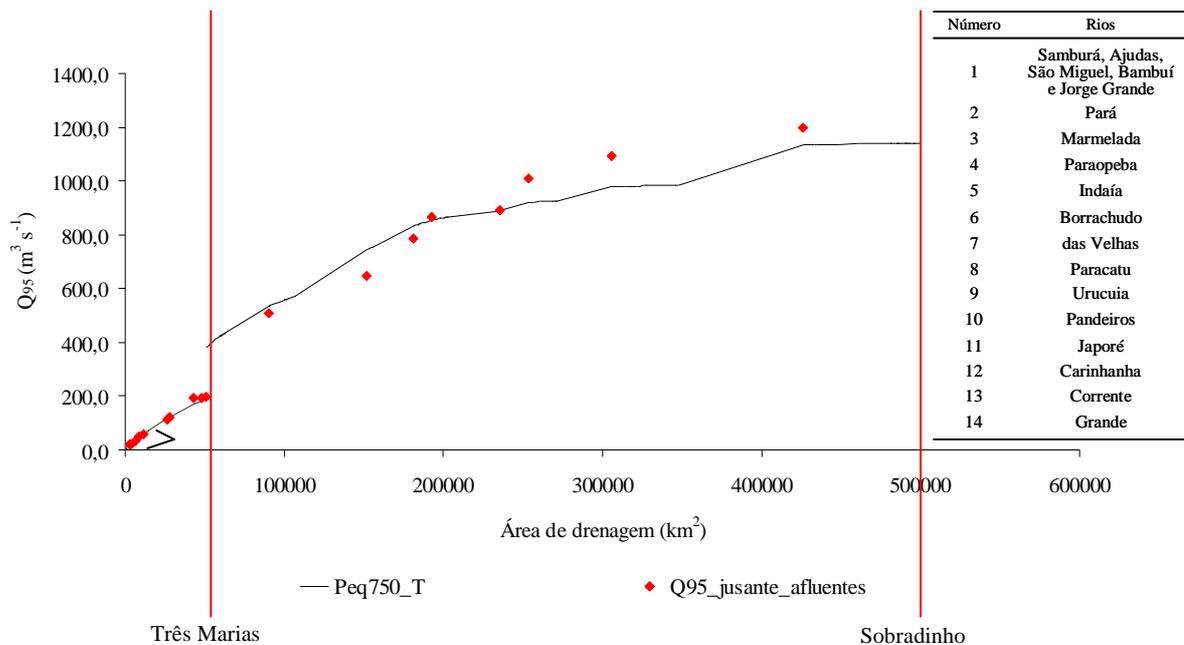


Figura 2.51.  $Q_{95}$  estimada ao longo do rio São Francisco até Sobradinho e as vazões a jusante das confluências dos principais afluentes, tendo sido a vazão na foz destes afluentes estimadas com base nos respectivos modelos de regionalização selecionados.

### 2.3.2.2 - Regionalização da vazão associada à permanência de 90% - $Q_{90}$

Quando aplicado o MCM na região 1, bem como nas bacias do Pará, Paraopeba, Velhas e Paracatu os erros relativos foram menores, já para as demais bacias o método tradicional proporcionou erros inferiores.

Embora o MCM tenha apresentado os menores erros para as bacias mencionadas, foi evidenciado assim como para as outras variáveis hidrológicas analisadas, uma grande amplitude de variação das vazões específicas estimadas pelas equações de regionalização, excedendo os limites dos valores das vazões específicas estimadas com base nos dados observados nas estações principalmente em pequenas áreas de drenagem.

Desta forma, foram selecionados os melhores ajustes pelo método tradicional para todas as bacias do São Francisco.

No Quadro 2.7 são apresentadas as equações selecionadas para cada região homogênea pelo método tradicional e os valores das vazões específicas consideradas como limite para cada região.

Em grande parte da bacia do São Francisco a consideração da  $P_{eq750}$  foi a que melhor representou o comportamento das vazões. As variáveis independentes utilizadas para a regionalização da  $Q_{90}$  foram as mesmas da  $Q_{95}$ , com exceção da selecionada para a bacia do

Paraopeba. Enquanto para a regionalização da  $Q_{90}$  selecionou-se a área de drenagem para a regionalização da  $Q_{95}$  foi a precipitação equivalente.

Quadro 2.7. Equações selecionadas para cada região homogênea pelo método tradicional e os valores das vazões específicas consideradas como limite para cada região

<b>Regiões Homogêneas</b>	<b>Equação</b>	<b><math>q_{90}</math> (limite) (<math>L s^{-1} km^{-2}</math>)</b>
1	$Q_{90} = 0,069697 P_{eq750}^{1,346738}$	11,1
2	$Q_{90} = 0,32742 P_{eq750}^{0,899485}$	8,1
3	$Q_{90} = 0,003916 P_{eq750}^{1,048348}$	8,1
4	$Q_{90} = 0,087596 P_{eq700}^{1,126699}$	13,3
5	$Q_{90} = 0,263414 P_{eq700}^{0,996639}$	6,6
6	$Q_{90} = 0,239307 P_{eq750}^{0,899005}$	5,7
7	$Q_{90} = 0,11324 P_{eq750}^{1,104485}$	5,2
8	$Q_{90} = 0,256334 P_{eq750}^{0,895385}$	6,8
9	$Q_{90} = 0,08074 P_{eq}^{0,918414}$	2,7
10	$Q_{90} = 0,1760039 P_{eq750}^{1,325245}$	8,1
11	$Q_{90} = 0,021899 A^{0,861704}$	8,5
12	$Q_{90} = 0,103441 P_{eq750}^{1,196738}$	6,6
13	$Q_{90} = 0,662305 P_{eq750}^{0,873933}$	5,8
14	$Q_{90} = 0,561 P_{eq750}^{0,8505}$	10,8
15	$Q_{90} = 3,3444 P_{eq750}^{0,7004}$	8,4

Na Figura 2.52 é apresentado o mapa mostrando os métodos e variáveis selecionados na regionalização de vazões para a bacia do São Francisco e as regiões onde foi necessário o ajuste com base na vazão específica referente à  $Q_{90}$  utilizada como limite.

O ajuste das vazões foi necessário para os afluentes dos Urucuia, Corrente e no rio Preto afluente do Grande, bem como na nascente do rio São Francisco e no trecho a jusante de Sobradinho.

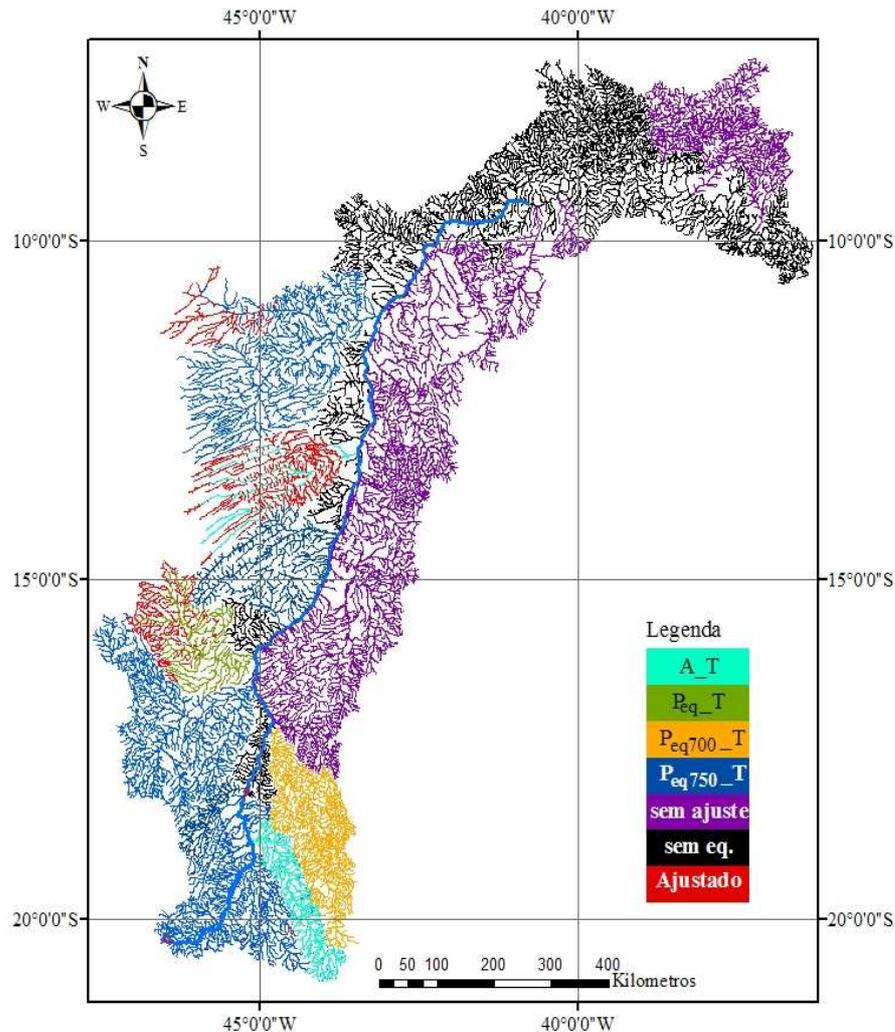


Figura 2.52. Métodos (T = método tradicional) e variáveis (A = área,  $P_{eq}$  = precipitação equivalente;  $P_{eq700}$  = precipitação equivalente considerando uma diminuição de 700 mm;  $P_{eq750}$  = precipitação equivalente considerando uma diminuição de 750 mm) selecionados para a regionalização da  $Q_{90}$  na bacia do São Francisco. Sem ajuste corresponde às bacias que apresentam estações fluviométricas, mas não foi possível nenhum ajuste e sem eq. corresponde aos locais onde não existem estações fluviométricas, não sendo possível a obtenção de equações de regionalização. Ajustado corresponde aos locais onde foi necessário o ajuste com base na vazão específica utilizada como limite.

### 2.3.2.3 - Regionalização da $Q_{7,10}$

Com o uso do MCM foram evidenciados os menores erros relativos na região 1, bem como nas bacias do Pará, Paraopeba e Velhas e Paracatu, já para as demais bacias o método tradicional proporcionou erros inferiores.

Assim como observado na análise das vazões específicas para as demais vazões mínimas, a aplicação do MCM proporcionou uma grande amplitude de variação das vazões específicas estimadas com base nas vazões regionalizadas, excedendo os limites dos valores

das vazões específicas estimadas com base nos dados observados nas estações principalmente em pequenas áreas de drenagem.

Portanto foram selecionados os melhores ajustes pelo método tradicional para todas as bacias do São Francisco.

No Quadro 2.8 são apresentadas as equações selecionadas para cada região homogênea pelo método tradicional e os valores das vazões específicas consideradas como limite para cada região.

Quadro 2.8. Equações selecionadas para cada região homogênea pelo método tradicional e os valores das vazões específicas consideradas como limite para cada região

Regiões Homogêneas	Equação	$q_{7,10}$ (limite) ( $L s^{-1} km^{-2}$ )
1	$Q_{7,10} = 0,014394 P_{eq750}^{1,671881}$	8,2
2	$Q_{7,10} = 0,188167 P_{eq750}^{0,881706}$	6,1
3	$Q_{7,10} = 0,077747 P_{eq750}^{1,124333}$	4,8
4	$Q_{7,10} = 0,000101 A^{1,283122}$	4,3
5	$Q_{7,10} = 0,001944 A^{1,098639}$	9,8
6	$Q_{7,10} = 0,122804 P_{eq750}^{0,886758}$	3,0
7	$Q_{7,10} = 0,079248 P_{eq750}^{1,03187}$	2,5
8	$Q_{7,10} = 0,155311 P_{eq750}^{0,848925}$	4,1
9	$Q_{7,10} = 0,059693 P_{eq}^{0,826689}$	1,2
10	$Q_{7,10} = 0,1705 P_{eq750}^{1,309002}$	7,2
11	$Q_{7,10} = 0,020466 A^{0,856218}$	7,8
12	$Q_{7,10} = 0,063134 P_{eq750}^{1,257171}$	5,3
13	$Q_{7,10} = 0,63859 P_{eq750}^{0,859366}$	5,5
14	$Q_{7,10} = 0,3618 P_{eq750}^{0,8696}$	7,2
15	$Q_{7,10} = 3,4732 P_{eq750}^{0,6627}$	6,8

Em grande parte da bacia do São Francisco a consideração da  $P_{eq750}$  foi a que melhor representou o comportamento das vazões. As variáveis independentes utilizadas para a regionalização da  $Q_{7,10}$  nas regiões homogêneas foram as mesmas selecionadas para a obtenção da  $Q_{95}$ , com exceção da bacia do Paraopeba e do rio das Velhas. Para a regionalização da  $Q_{7,10}$  selecionou-se a  $P_{eq750}$  para a bacia do Paraopeba e a área para a bacia do rio das Velhas, enquanto para a regionalização da  $Q_{95}$  selecionou-se a precipitação equivalente e a  $P_{eq700}$ , respectivamente.

A Figura 2.53 é apresentado o mapa mostrando os métodos e variáveis selecionados na regionalização da  $Q_{7,10}$  para a bacia do São Francisco e as regiões onde foi necessária o ajuste das vazões com base na vazão específica referente à  $Q_{7,10}$ , utilizada como limite.

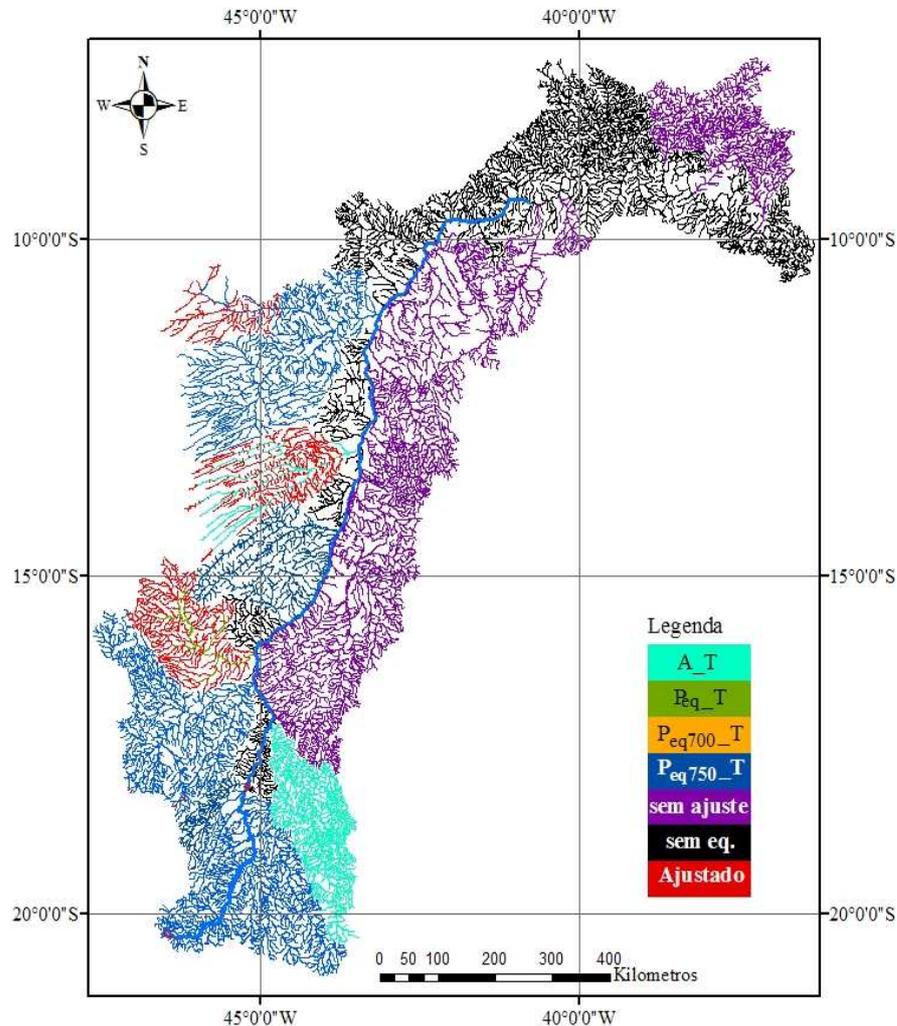


Figura 2.53. Métodos (T = método tradicional) e variáveis (A = área,  $P_{eq}$  = precipitação equivalente;  $P_{eq700}$  = precipitação equivalente considerando uma diminuição de 700 mm;  $P_{eq750}$  = precipitação equivalente considerando uma diminuição de 750 mm) selecionados para a regionalização da  $Q_{7,10}$  na bacia do São Francisco. Sem ajuste corresponde às bacias que apresentam estações fluviométricas, mas não foi possível nenhum ajuste e sem eq. corresponde aos locais onde não existem estações fluviométricas, não sendo possível a obtenção de equações de regionalização. Ajustado corresponde aos locais onde foi necessário o ajuste com base na vazão específica utilizada como limite.

O ajuste das vazões foi necessário para os afluentes dos Urucuia, Corrente e no rio Preto afluente do Grande, bem como na nascente do rio São Francisco e no trecho a jusante de Sobradinho.

## 2.4 - CONCLUSÕES

A consideração da precipitação média anual menos a inércia hídrica possibilitou ajustes das equações de regionalização das vazões média de longa duração e mínimas ( $Q_{90}$ ;  $Q_{95}$ ;  $Q_{7,10}$ ) mais precisos na maior parte das sub-bacias do São Francisco.

elo uso do critério de seleção baseado no erro relativo, o Método de Conservação de Massa (MCM) apresentou melhor desempenho. Entretanto, evidenciou-se que o uso deste método acarretou uma amplitude de variação dos valores do coeficiente de escoamento e das vazões específicas mínimas, o que não representou a amplitude de variação obtida com base nos dados observados nas estações fluviométricas, motivo pelo qual o método tradicional foi o selecionado.

A consideração de limites físicos para a  $Q_{mld}$  (CE) e para as vazões mínimas (vazões específicas mínimas) possibilitou reduzir o risco de superestimativa quando da extrapolação das equações de regionalização de vazões.

A subdivisão ao longo da calha do São Francisco em duas regiões: a montante de Três Marias e entre Três Marias e Sobradinho, permitiu para as vazões mínimas a consideração do efeito de regularização destes dois reservatórios.

A jusante de Sobradinho não foi possível o ajuste de nenhum modelo de regionalização.

A regionalização das vazões considerando as interações diferentes nas sub-bacias e na calha do São Francisco, permitiu à redução das discontinuidades decorrentes da análise individualizada de cada região hidrológica homogênea.

## 2.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Subprojeto 4.4- Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco -PBHSF (2004-2013). Resumo executivo do relatório final. Determinação de subsídios para procedimentos operacionais dos principais reservatórios da bacia do São Francisco. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/ OEA, 2002. 20 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Subprojeto 4.5.A - Diagnóstico analítico da bacia e sua zona costeira. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/ OEA, 2003a. 190 p.

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Subprojeto 1.1.A- Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco -PBHSF (2004-2013). Nota técnica. Estudo do processo erosivo das margens do Baixo São Francisco e seus efeitos na dinâmica de sedimentação do rio. Aracaju: UFSE, ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003b. 81 p.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Subprojeto 1.1.A- Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco -PBHSF (2004-2013). Nota técnica. Estudo hidrodinâmico - sedimentológico do baixo São Francisco, estuário e zona costeira adjacente - AL/SE. Maceió: UFAL, ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003c. 33 p.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Brasília: ANA, 2004a. 318 p.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Subprojeto 4.5C- Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco -PBHSF (2004-2013). Nota técnica. Disponibilidade hídrica quantitativa e usos consuntivos na bacia hidrográfica do rio São Francisco. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004b. 71 p.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Topologia hídrica: método de construção e modelagem da base hidrográfica para suporte à gestão de recursos hídricos versão 1.11. Brasília: ANA, 2006. 29 p.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Regionalização de vazões das sub-bacias 44 e 45. Belo Horizonte: UFMG, 184 p., 2002.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Regionalização de vazões das sub-bacias 46 a 49. Pernambuco: Fundação de apoio ao desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco (FADE), 196 p., sem data.
- BRASIL - Governo Federal. MINAS GERAIS; Governo do estado. DISTRITO FEDERAL. Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio Paracatu - PLANPAR. [S. l.]: 1996. v. 1, T. 1. (CD-ROM).
- BRASIL. Política Nacional de Recursos Hídricos. Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997. [S. l.]: MMA/ SRH, 1997.
- CEMIG - COMPANHIA DE ENERGIA ELÉTRICA DE MINAS GERAIS, As usinas da Cemig, 2007. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/>

- CHESF - COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO, Descrição do aproveitamento de Sobradinho, 2007. Disponível em: [http://www.chesf.gov.br/energia\\_usinas\\_sobradinho.shtml](http://www.chesf.gov.br/energia_usinas_sobradinho.shtml).
- EUCLYDES, H. P., FERREIRA, P.A. Recursos hídricos e suporte tecnológico a projetos hidroagrícolas: bacia do Alto e Médio São Francisco (boletim técnico 6). Viçosa: UFV; Belo Horizonte: RURALMINAS; Brasília: ANA, 258 p., 2002.
- EUCLYDES, H. P., FERREIRA, P.A. Ferramenta para o planejamento e gestão de recursos hídricos nos Estado de Minas Gerais - HIDROTEC. Viçosa: UFV, DEA; Brasília, DF: MMA; Belo Horizonte, MG: RURALMINAS. 2007. Disponível em: [www.ufv.br/dea/hidrotec](http://www.ufv.br/dea/hidrotec).
- MAGALHÃES, P.C. A água no Brasil e os instrumentos de gestão e o setor mineral. In: FERNADES, F.R.C.; MATOS, G.M.M.; CASTILHOS, Z.C.; LUZ, A.B. Tendências tecnológicas Brasil 2015: geociências e tecnologia mineral, Rio de Janeiro: CETEM, MCT, 2007, 380 p.
- NOVAES, L. F. Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu. 2005. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- PEREIRA, S. B. Evaporação no lado de sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco, 2004. 103 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.
- TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS, 2002. 256 p.

## **CAPÍTULO 3**

### **ELABORAÇÃO DE SOFTWARE QUE PERMITE ESTIMAR A DISPONIBILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO SÃO FRANCISCO**

João Felipe Souza

Fernando Falco Pruski

Leonardo Fonseca de Carvalho

Renata del Giudice Rodriguez

Heber Tormentino de Sousa

Luiz Henrique Nobre Bof

## **3.1 - INTRODUÇÃO**

Dada a complexidade da espacialização dos resultados da regionalização e a ausência de ferramentas adequadas a esta tarefa, tornou-se necessário o desenvolvimento de um aplicativo capaz de hidrorreferenciar as variáveis hidrológicas estudadas e, com elas, estimar as vazões ao longo da hidrografia.

Desta forma, o principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um software capaz de estimar, em qualquer segmento da hidrografia na bacia do rio São Francisco, as vazões médias e mínimas ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ).

## **3.2 - MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.2.1 - Desenvolvimento do software**

O software Disponibilidade dos Recursos Hídricos na Bacia do São Francisco (DRHi-SF) foi desenvolvido utilizando a ferramenta de programação Borland Delphi 7.0, enquanto que as rotinas afetas a Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) foram implementadas com a utilização do componente ESRI MapObjects 2.4 (MapObjects), o qual constitui um conjunto de funções para mapeamento, sendo este de uso freqüente por programadores no desenvolvimento de aplicativos que envolvem o uso de mapas.

O software foi projetado para ser utilizado no sistema operacional Microsoft Windows 2000 ou superior, podendo também ser executado no sistema operacional Linux ou similares por meio do aplicativo WINE.

### **3.2.2 - Metodologia de codificação de bacias hidrográficas proposta por Otto Pfafstetter**

Proposta em 1989, a metodologia criada pelo engenheiro brasileiro Otto Pfafstetter reúne características desejáveis do ponto de vista topológico, geográfico e computacional. Permite localizar uma bacia, rio ou trecho de rio através de uma codificação numérica hierárquica.

A resolução nº 30 de 11 de dezembro de 2002 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos estabelece a Ottocodificação como metodologia oficial de codificação de bacias hidrográficas no âmbito nacional.

A codificação de uma bacia hidrográfica é feita em níveis (número de dígitos do código). A codificação em nível 1 é feita para todo o continente e a codificação em nível 2 representa as subdivisões da codificação de nível 1, e assim por diante. Através do código de um trecho de rio é possível determinar quais são as bacias a montante e/ou a jusante. Por exemplo, a bacia do rio Amazonas é representada pelo código 4 e seu afluente, o rio Xingu, é representado pelo código 42.

Segundo Pfafstetter (1989), a codificação de uma bacia (Figura 3.1), em cada nível, é realizada da seguinte forma:

- seleciona-se os quatro afluentes com maior área de drenagem no rio principal, que recebem os códigos 2, 4, 6, e 8, de jusante a montante;
- a inter-bacia entre a foz e a bacia 2 recebe código 1, a interbacia entre as bacias 2 e 4 recebe o código 3, e assim por diante até a cabeceira, que recebe o código 9;

Por definição, a interbacia de código 9 possui área de drenagem maior que a área de drenagem da bacia 8.

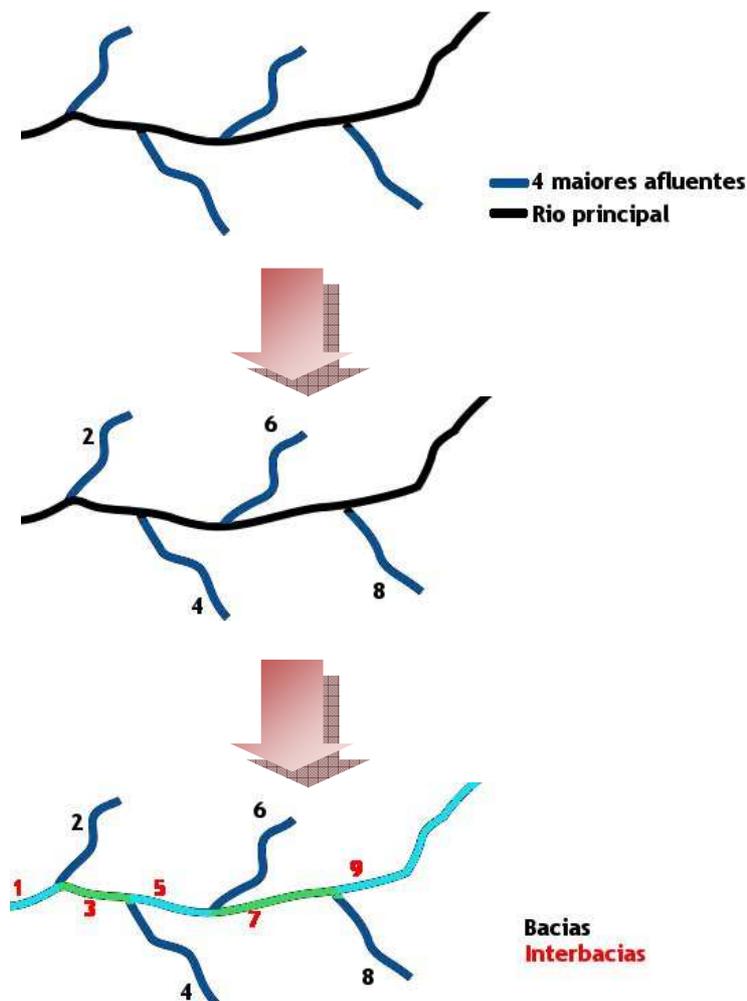


Figura 3.1 - Procedimento de ottocodificação de uma bacia hidrográfica.

### 3.2.3 - Estimativa da disponibilidade hídrica

Como base de informações geográficas utilizou-se a base hidrográfica do Brasil, fornecida pela Agência Nacional de Águas (ANA) e disponível gratuitamente na Biblioteca Virtual da ANA (<http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/solicitacaoBaseDados.asp>).

A base hidrorreferenciada contém informações detalhadas para cada trecho de rio, sendo representada na escala do milionésimo e disponibilizada no formato shapefile. Os principais bancos de dados disponíveis são os de ottobacias e de trechos de rios. A Figura 3.2 apresenta uma bacia hidrográfica extraída da base hidrorreferenciada.

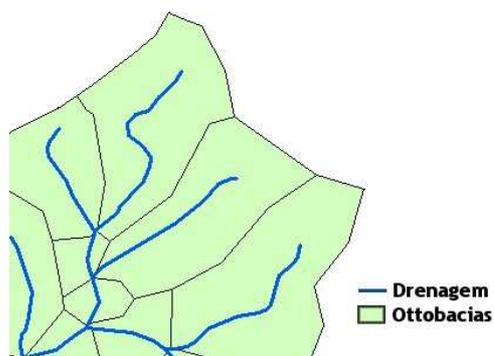


Figura 3.2 - Representação das ottobacias e da rede de drenagem disponíveis na base hidrorreferenciada.

A Figura 3.3 apresenta o fluxograma do processo de criação do banco de dados do DRHi-SF, sendo este constituído dos dados existentes na base hidrorreferenciada e das informações necessárias para a regionalização. No processo de inserção das equações de regionalização de vazões, obtidas conforme procedimento descrito no capítulo 2, no banco de dados do DRHi-SF, é feita a conexão das equações com cada trecho da hidrografia. O próximo passo é a inserção dos resultados no banco de dados operacional do DRHI-SF.

## 3.3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.3.1 - Caracterização do software

O aplicativo DRHi-SF é um SIG (Sistema de Informações Geográficas) desenvolvido para a visualização e extração de informações da base hidrorreferenciada e, com elas, permite estimar, para cada segmento da hidrografia, as vazões média e mínimas ( $Q_{7-10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ), utilizando equações de regionalização.

A Figura 3.4 ilustra a tela de apresentação do software, sendo destacadas as instituições que contribuíram para o desenvolvimento do aplicativo.

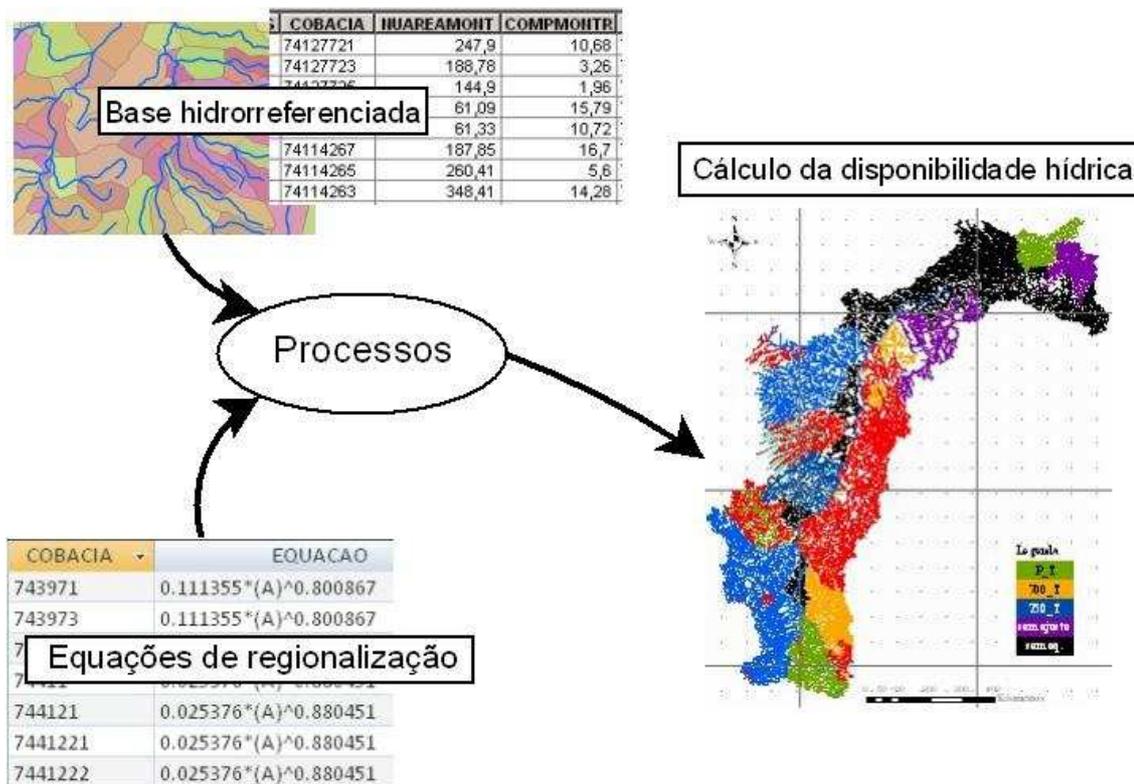


Figura 3.3 - Fluxograma de estimativa das vazões.



Figura 3.4 - Tela de apresentação do DRHi-SF.

A Figura 3.5 apresenta a tela principal do aplicativo, sendo o campo 1 correspondente à lista de camadas visíveis; o campo 2 refere-se à ferramenta de busca e localização; o campo

3 à barra de ferramentas de navegação; o campo 4 ao mapa da hidrografia e o campo 5 à caixa de informações.

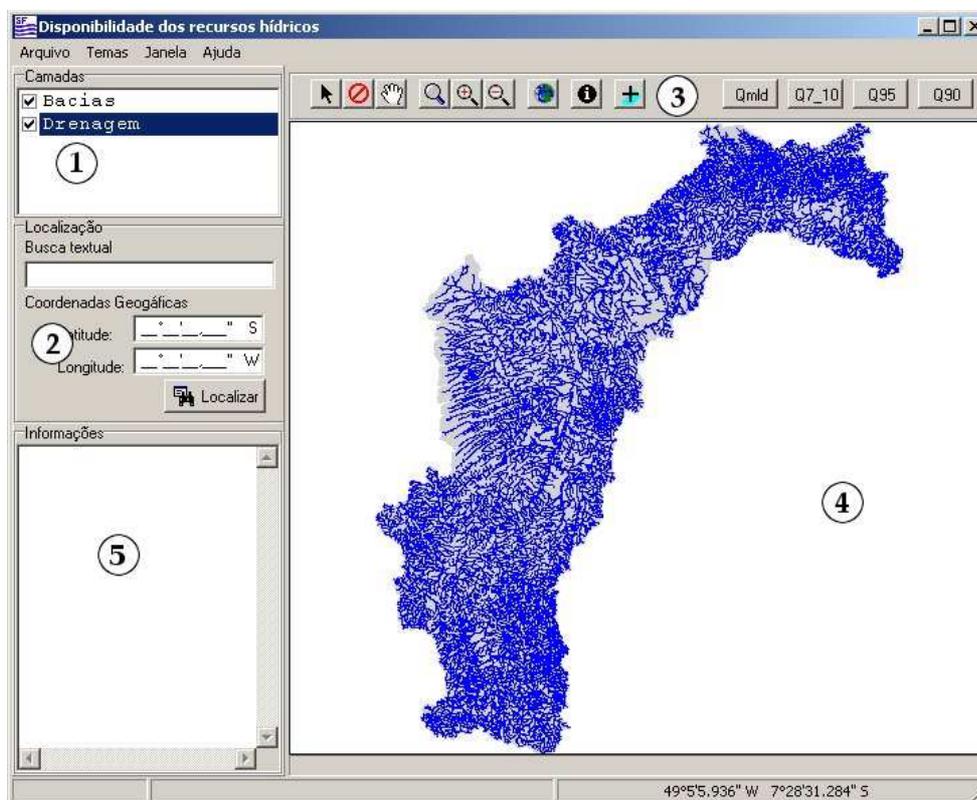


Figura 3.5 - Tela principal.

### 3.3.2 - Sobreposição de camadas

Foi implementada uma ferramenta para sobreposição de camadas que facilita a localização e delimitação de seções de interesse na hidrografia. Para sobrepor é necessário que a camada a ser inserida pelo usuário esteja no formato shapefile. A inserção é feita clicando no botão “Adicionar camada”, que abrirá a caixa de diálogo mostrada na Figura 6a. Após adicionar a camada será exibida uma tela como a apresentada na Figura 6b, sendo que em uma camada, é possível alterar as cores de preenchimento e borda e a espessura do traço.

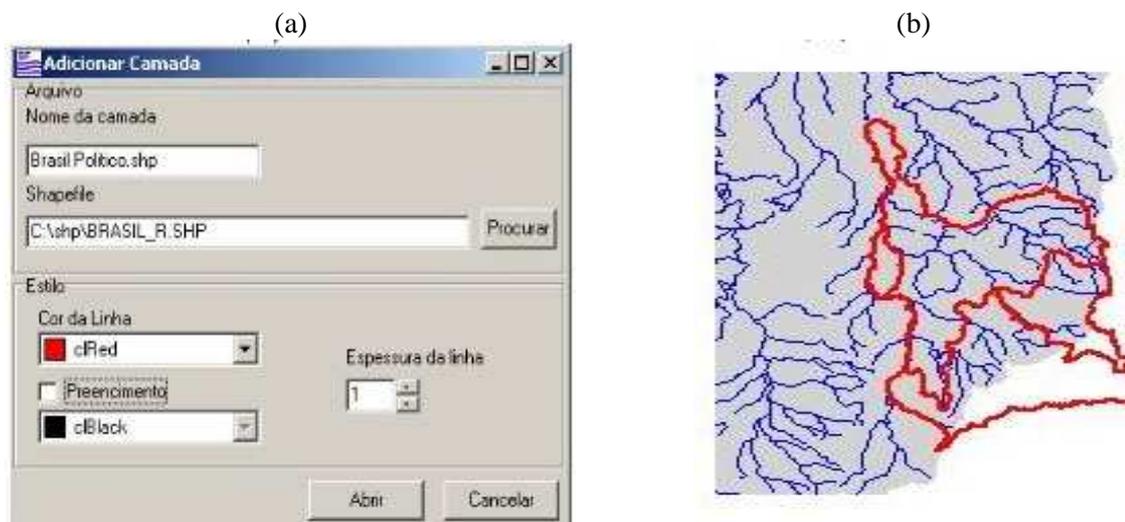


Figura 3.6 - Caixa de diálogo para sobreposição de camadas (a) e exemplo de sobreposição de camadas (b).

O campo Camadas é o local de apresentação das camadas adicionadas ao arquivo, na Figura 7 são apresentas as duas camadas já existentes no software (Bacias e Drenagem) e outra adicionada pelo usuário (municípios). É possível ocultar uma camada clicando no caixa de seleção (item 1), podendo-se extrair informações não somente das camadas pré-disponibilizadas no software como também de uma camada adicionada pelo usuário. A camada selecionada para trabalho sempre aparecerá destacada em azul.

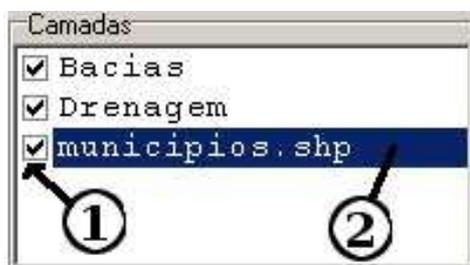


Figura 3.7 - Lista de camadas.

### 3.3.3 - Busca e localização da seção de interesse

A funcionalidade de busca permite localizar um ponto, um rio ou uma bacia através das coordenadas geográficas, do nome do rio ou da codificação da bacia, respectivamente. Ao realizar uma consulta, a cor do campo de entrada será alterada para verde caso encontre resultados (Figura 8a) e, caso contrário, receberá a cor vermelha (Figura 8b). Sempre que a pesquisa encontrar resultados, estes serão destacados no mapa na cor vermelha (Figura 9).

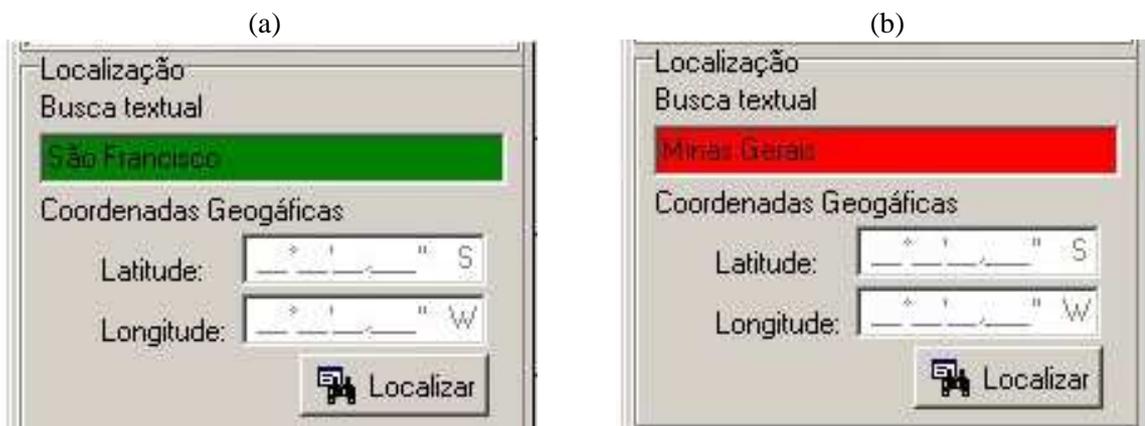


Figura 3.8 - Ferramenta de Busca e localização.

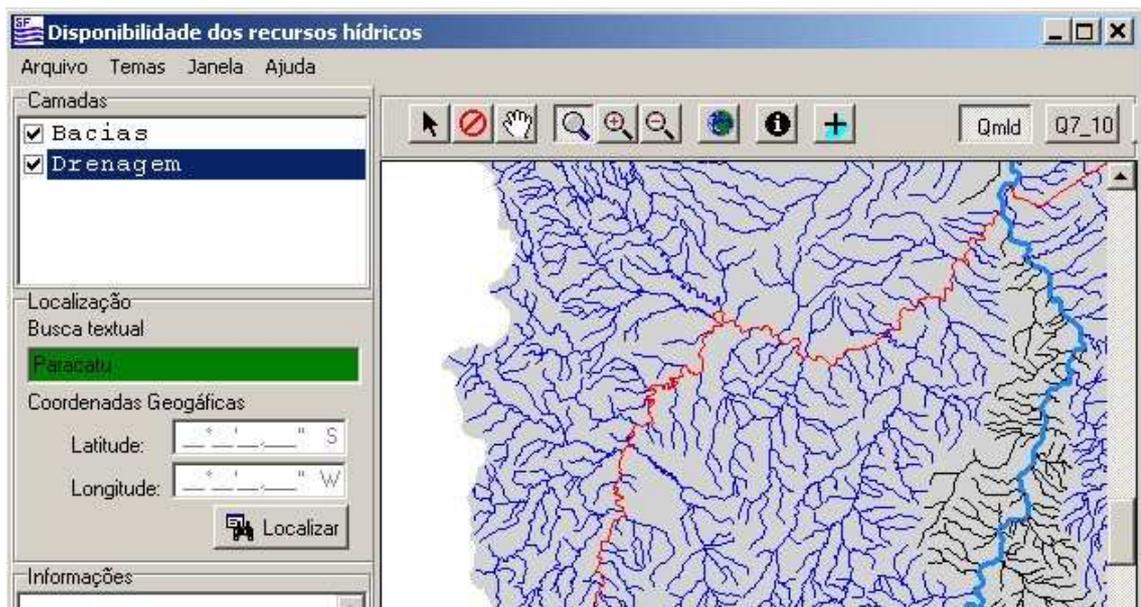


Figura 3.9 - Destaque, em vermelho, de um resultado positivo em uma busca.

### 3.3.4 - Barra de ferramentas

A barra de ferramentas reúne atalhos para a execução das principais utilidades do software. Em sua composição, estão os seguintes botões:

-  Selecionar: Seleciona um trecho e exibe o resumo das informações.
-  Limpar seleção: Desfaz a seleção atual.
-  Mover mapa: Permite movimentar o mapa para ajustar a sua visualização.
-  Ampliar mapa: Permite ampliar a visualização do mapa, ajustando-a a um retângulo definido pelo usuário.
-  Ampliar fixo: Amplia a visualização do mapa em uma proporção fixa.

 Reduzir fixo: Reduz a visualização do mapa em uma proporção fixa.

 Visualizar todo o mapa: Retorna à visualização de toda a extensão o mapa.

 Informações: Esta ferramenta extrai todas as informações de uma seleção e as apresenta na caixa de informações.

 Adicionar camada: Possibilita ao usuário adicionar uma nova camada ao mapa.

São disponibilizados quatro temas para a visualização das vazões, sendo estes selecionados através das seguintes ferramentas:

 Tema  $Q_{mld}$ : Altera o tema de visualização para a vazão média de longa duração;

 Tema  $Q_{7,10}$ : Altera o tema de visualização para a vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos;

 Tema  $Q_{95}$ : Altera o tema de visualização para a vazão mínima com permanência de 95%; e

 Tema  $Q_{90}$ : Altera o tema de visualização para a vazão mínima com permanência de 90%.

As informações de toponímia e as características físicas da bacia são extraídas da base hidrorreferenciada, enquanto que as vazões são calculadas a partir das equações de regionalização de vazões (capítulo 2) e incorporadas ao aplicativo. Em qualquer segmento da hidrografia é possível obter dados como nome do rio, área de drenagem, área de contribuição do segmento, valores de vazão, precipitação equivalente e coeficiente de escoamento (Figura 10).

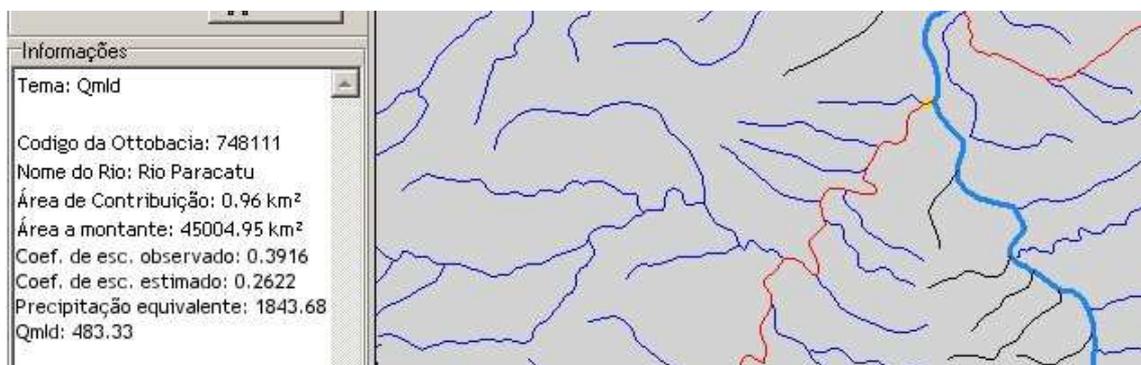


Figura 3.10 - Exibição das informações relativas à foz do rio Paracatu.

## **3.2 - CONCLUSÕES**

O software DRHi-SF permite estimar as vazões médias e mínimas ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) em qualquer segmento da hidrografia da bacia do rio São Francisco correspondente à base hidrorreferenciada.

## **3.3 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

PFAFSTETTER, O. “Classificação de bacias hidrográficas: metodologia de codificação”, manuscrito não publicado, Departamento Nacional de Obras e Saneamento, Rio de Janeiro, 1989.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos, Resolução nº 30, de 11 de dezembro de 2002 (Publicado DOU em 19/03/2003).

# **CAPÍTULO 4**

## **DESENVOLVIMENTO DE MODELO QUE PERMITE AVALIAR O IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NA BACIA DO PARACATU**

Eloy Lemos de Mello

Fernanda Abreu de Oliveira

Fernando Falco Pruski

Juliana Carvalho Figueiredo

## 4.1 - INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são influenciadas pelas atividades humanas associadas à emissão de gases de efeito estufa, e afetam os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, como a disponibilidade e qualidade de água. Estas mudanças podem induzir a riscos ambientais, econômicos e sociais, sendo os países mais pobres e em desenvolvimento, os mais vulneráveis.

De acordo com o IPCC (2001), o século XXI deve apresentar maior frequência de eventos extremos de temperatura, precipitação, seca e enchentes, que poderão aumentar os riscos de erosão, deslizamentos de terra, incêndios florestais, riscos à saúde humana, e poderão reduzir o potencial agrícola e a disponibilidade de água para os diversos usos.

De modo geral, os aumentos previstos de temperatura para o Brasil (1 a 6° C, dependendo do cenário de emissão de gases), poderiam causar aumento da evaporação à superfície, provocando alterações no balanço hídrico da vegetação natural e das culturas agrícolas (Nobre, 2001). Este efeito deve ser mais negativo em regiões onde predomina a agricultura de sequeiro, a não ser que o aumento de temperatura seja acompanhado de aumento e/ou regularização no regime de chuvas.

O efeito projetado das mudanças climáticas no escoamento de água superficial e na recarga de água subterrânea é variável, dependendo da região e do cenário climático considerado (IPCC, 2001), mas se relaciona, em grande parte, com as mudanças previstas para a precipitação (IPCC, 2001; KROL et al., 2006). É previsto que a magnitude e frequência de vazões máximas aumentem na maioria das regiões do planeta, e que as vazões mínimas sejam menores em muitas regiões.

De acordo com Hulme e Sheard (1999), é de se esperar que as alterações no regime de precipitação tenham implicações no regime de escoamento dos rios brasileiros, embora não exista uma tendência bem definida para o aumento ou a redução da vazão. Os autores destacam a forte relação entre a vazão de vários rios da Amazônia e o fenômeno El Niño. Também relatam o aumento de 15% nas vazões do Rio Paraná desde a década de 60, consistente com o aumento das precipitações observado nesta década.

A partir de um estudo realizado para diversas regiões do mundo, Rosenzweig et al. (2004), prevêem que o suprimento de água na região sul do Brasil (Rio Grande do Sul e Santa Catarina) será suficiente para atender a demanda da agricultura e, ainda, promover a expansão das áreas irrigadas.

Na região do semi-árido do nordeste brasileiro, Krol e Bronstert (2007), identificaram

uma tendência significativa de redução nas vazões do Rio Jaguaribe, após 2025, considerando um cenário de redução de 50% da precipitação nas próximas cinco décadas. Em um cenário de redução de 21% da precipitação os autores não encontraram uma tendência significativa de alteração da vazão.

O rio Paracatu, situado no médio São Francisco, drena uma área de aproximadamente 45.600 km<sup>2</sup>, contribuindo com 40% da vazão do São Francisco. No entanto, o aumento da demanda pelo uso da água na bacia vem ocasionando sérios impactos ambientais e conflitos entre os usuários.

Segundo Rodriguez (2004), o crescimento econômico que tem sido observado na bacia do Paracatu a partir da década de 70 vem ocasionando um expressivo crescimento no consumo de água, sendo comum, nos meses de maior demanda, um consumo total superior ao critério adotado para outorga em Minas Gerais, que é de 30% da  $Q_{7,10}$  (vazão mínima com duração de sete dias e período de retorno de 10 anos).

Em uma situação de conflitos pelo uso da água, como se observa na bacia do Paracatu, a gestão participativa torna-se fundamental para o desenvolvimento sustentável da região. Para uma gestão eficiente dos recursos hídricos é importante o conhecimento do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica, no presente e no futuro, devido às fortes evidências de mudanças climáticas no planeta.

Cenários de mudanças climáticas são representações plausíveis do futuro, que são consistentes com as tendências de emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes, e com o entendimento científico atual sobre o efeito destes gases sobre o clima global (IPCC-TGCI, 1999). Vários cenários podem ser utilizados para identificar a sensibilidade de um país, região, ou local, às mudanças climáticas.

Os modelos de circulação global (GCMs) são representações dos processos físicos na atmosfera, oceano e superfície da terra, que simulam a resposta do clima global terrestre ao aumento nas concentrações de gases de efeito estufa. Estes modelos descrevem o clima utilizando um grid tri-dimensional sobre o planeta, tendo uma resolução global variando entre 250 e 600 km. Esta resolução é suficiente para previsões climáticas em nível global, mas torna difícil a realização de estudos em nível regional e, principalmente, à escala da bacia hidrográfica, onde as consequências das mudanças climáticas serão realmente sentidas. Neste caso, é necessário aplicar a técnica de *downscaling*, que consiste na transferência das informações meteorológicas para escalas menores.

O objetivo deste trabalho é estimar a tendência de variação da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Paracatu, até o final deste século, considerando dois cenários de mudanças climáticas.

## 4.2 - METODOLOGIA

### 4.2.1 - Vazões mínimas das séries históricas e precipitação média anual

Para a realização deste estudo foram utilizados os dados consistidos correspondentes ao período de 1970 a 2000 de 21 estações fluviométricas (Quadro 4.1) e 30 estações pluviométricas (Quadro 4.2) pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA). As áreas de drenagem apresentadas no Quadro 4.1 foram obtidas por meio de mapa digitalizado na escala 1:100.000 correspondente à rede hidrográfica.

Para cada estação fluviométrica foi determinada a  $Q_{7,10}$  (vazão mínima com duração de sete dias e período de retorno de 10 anos), a partir do ajuste de distribuições de probabilidade às  $Q_7$  anuais. Foi selecionada a distribuição que apresentou significância a 20% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, associada ao menor coeficiente de variação.

O cálculo da precipitação média anual sobre cada área de drenagem foi feito pelo método do Polígono de Thiessen.

### 4.2.2 - Modelo para estimativa de vazões mínimas a partir de dados pluviométricos

Para a caracterização da curva de recessão do escoamento subterrâneo foi utilizada a equação:

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (4.1)$$

em que  $Q$  = vazão subterrânea num instante  $t$ ,  $m^3 s^{-1}$ ;  $Q_0$  = vazão subterrânea correspondente ao início do período de recessão do escoamento subterrâneo,  $m^3 s^{-1}$ ; e  $\alpha$  = coeficiente de recessão,  $d^{-1}$  e  $t$  = tempo contado a partir do início do período de recessão,  $d$ .

Com base no estudo desenvolvido por Novaes (2005), os dias primeiro de junho e 30 de setembro foram escolhidos como sendo o início e o final do período de recessão do escoamento subterrâneo, respectivamente. Em seguida, foi ajustado um modelo de regressão linear para cada uma das 21 estações fluviométricas, visando a representação das  $Q_0$  como função da precipitação total acumulada nos cinco meses anteriores ao início do período de recessão do escoamento subterrâneo, ou seja, de janeiro a maio.

$$Q_0 = a + b PT_5 \quad (4.2)$$

em que a e b = parâmetros de ajuste da equação;  $PT_5$  = precipitação total acumulada nos cinco meses anteriores ao início do período de recessão do escoamento subterrâneo, mm.

Os valores dos coeficientes de recessão ( $\alpha$ ) foram obtidos de Novaes (2005), que ajustou a equação 4.1 aos dados observados das mesmas séries históricas das 21 estações fluviométricas (Quadro 4.3).

Quadro 4.1. Estações fluviométricas utilizadas no estudo

<b>Código</b>	<b>Estação</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Área de Drenagem (Km<sup>2</sup>)</b>
42250000	Fazenda Limoeiro	17° 54' 56"	47° 00' 38"	490
42251000	Fazenda Córrego do Ouro	17° 36' 48"	46° 51' 31"	1.846
42255000	Fazenda Nolasco	17° 13' 48"	47° 01' 20"	264
42257000	Barra do Escurinho	17° 30' 45"	46° 38' 46"	2.035
42290000	Ponte da BR-040 (Paracatu)	17° 30' 10"	46° 34' 18"	7.756
42395000	Santa Rosa	17° 15' 19"	46° 28' 26"	12.537
42435000	Fazenda Barra da Égua	16° 52' 28"	46° 35' 12"	1.591
42440000	Fazenda Poções	17° 02' 31"	46° 49' 04"	545
42460000	Fazenda Limeira	16° 12' 35"	47° 13' 58"	3.901
42490000	Unáí	16° 20' 58"	46° 52' 48"	5.265
42540000	Santo Antônio do Boqueirão	16° 31' 47"	46° 43' 16"	5.844
42545500	Fazenda o Resfriado	16° 30' 10"	46° 39' 46"	697
42546000	Fazenda Santa Cruz	16° 08' 06"	46° 44' 52"	554
42600000	Porto dos Poções	16° 50' 23"	46° 21' 26"	9.419
42690001	Porto da Extrema	17° 01' 49"	46° 00' 49"	28.721
42750000	Caatinga	17° 08' 45"	45° 52' 49"	31.401
42840000	Veredas	18° 08' 19"	45° 45' 32"	185
42850000	Cachoeira das Almas	17° 21' 02"	45° 31' 57"	4.370
42860000	Cachoeira do Paredão	17° 07' 16"	45° 26' 08"	5.679
42930000	Porto do Cavalo	17° 01' 50"	45° 32' 22"	40.869
42980000	Porto Alegre	16° 46' 29"	45° 22' 55"	41.868

Quadro 4.2. Estações pluviométricas utilizadas no estudo

<b>Código</b>	<b>Estação</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Altitude (m)</b>
01546005	Cabeceiras	15° 48' 03"	46° 55' 29"	900
01547002	Planaltina	15° 27' 12"	47° 36' 48"	1.000
01645000	São Romão	16° 22' 18"	45° 04' 58"	472
01645002	Santo Inácio	16° 16' 54"	45° 24' 51"	460
01645003	Barra do Escuro	16° 16' 07"	45° 14' 16"	437
01645009	Cachoeira da Manteiga	16° 39' 25"	45° 04' 51"	-
01645013	Fazenda Água Branca	16° 48' 26"	45° 01' 49"	-
01646000	Porto dos Poções	16° 49' 47"	46° 19' 20"	540
01646001	Unai	16° 21' 05"	46° 53' 23"	-
01646003	Santo Antônio do Boqueirão	16° 31' 47"	46° 43' 16"	-
01647001	Ponte São Bartolomeu	16° 32' 16"	47° 48' 02"	790
01647002	Cristalina	16° 45' 23"	47° 36' 22"	1.239
01744006	Pirapora-Barreiro	17° 21' 50"	44° 56' 54"	471
01745000	Caatinga	17° 08' 45"	45° 52' 49"	502
01745001	Cachoeira do Paredão	17° 06' 40"	45° 26' 16"	520
01745007	Porto do Cavalo	17° 01' 37"	45° 32' 26"	473
01746001	Porto da Extrema	17° 01' 51"	46° 00' 49"	510
01746002	Santa Rosa	17° 15' 19"	45° 28' 26"	490
01746006	Ponte da BR-040 (Prata)	17° 39' 49"	46° 21' 18"	-
01746007	Ponte da BR-040 (Paracatu)	17° 30' 10"	46° 34' 18"	-
01746008	Paracatu	17° 13' 00"	46° 52' 00"	-
01747001	Campo Alegre de Goiás	17° 30' 15"	47° 33' 20"	800
01747005	Guarda Mor	17° 46' 21"	47° 05' 55"	-
01845013	São Gonçalo do Abaeté	18° 20' 37"	45° 50' 12"	836
01846003	Major Porto	18° 42' 25"	46° 02' 13"	672
01846005	Presidente Olegário	18° 24' 45"	46° 25' 20"	-
01846016	Ponte Firme	18° 02' 02"	46° 25' 10"	-
01846017	Leal dos Patos	18° 38' 28"	46° 20' 04"	-
01847003	Abadia dos Dourados	18° 29' 28"	47° 24' 23"	784
01847040	Fazenda São Domingos	18° 06' 11"	47° 41' 41"	-

Quadro.4.3. Valores dos coeficientes de recessão (Novaes, 2005)

<b>Código</b>	<b>Estação</b>	<b>Coefficiente de Recessão - <math>\alpha</math> (d<sup>-1</sup>)</b>
42250000	Fazenda Limoeiro	0,0058
42251000	Fazenda Córrego do Ouro	0,0067
42255000	Fazenda Nolasco	0,0059
42257000	Barra do Escurinho	0,0072
42290000	Ponte da BR-040 (Paracatu)	0,0064
42395000	Santa Rosa	0,0057
42435000	Fazenda Barra da Água	0,0066
42440000	Fazenda Poções	0,0056
42460000	Fazenda Limeira	0,0063
42490000	Unai	0,0065
42540000	Santo Antônio do Boqueirão	0,0060
42545500	Fazenda o Resfriado	0,0046
42546000	Fazenda Santa Cruz	0,0029
42600000	Porto dos Poções	0,0057
42690001	Porto da Extrema	0,0057
42750000	Caatinga	0,0059
42840000	Veredas	0,0032
42850000	Cachoeira das Almas	0,0065
42860000	Cachoeira do Paredão	0,0064
42930000	Porto do Cavalo	0,0059
42980000	Porto Alegre	0,0054
<b>Média</b>		<b>0,0058</b>

### 4.2.3 - Modelo de previsão de mudanças climáticas e *downscaling*

Foi realizado o *downscaling* das precipitações mensais para os anos de 2001 a 2099, simulados pelo modelo de circulação global HadCM3, para os cenários de alta e baixa emissão de gases de efeito estufa, A2 e B2, respectivamente.

O cenário A2 caracteriza um mundo onde prevalece o fortalecimento das identidades culturais regionais, com ênfase aos valores familiares e tradições locais, alto crescimento populacional e menor preocupação com o rápido desenvolvimento econômico. O cenário B2 descreve um mundo onde as soluções para os problemas econômicos, sociais e ambientais, são desenvolvidas por iniciativas locais e comunitárias, ao invés de se buscar soluções globais. É um mundo heterogêneo com mudanças tecnológicas mais lentas e diversificadas (IPCC, 1999).

O modelo HadCM3 apresenta resolução horizontal de 2,5° de latitude x 3,75° de longitude, o que produz um grid global de 96 x 73 células. A partir de uma análise prévia com auxílio de um SIG, foram determinadas as células que estavam sobre a bacia hidrográfica do Paracatu (Figura 4.1). Depois disso, para cada uma das 21 estações fluviométricas, foi determinada a proporção da área de drenagem que está sob cada célula. Para a realização do *downscaling* foi utilizada a equação:

$$P_{ma} = FC \left[ \left( P_{ma,c1} A_{c1} \right) + \left( P_{ma,c2} A_{c2} \right) + \left( P_{ma,c3} A_{c3} \right) + \left( P_{ma,c4} A_{c4} \right) \right] \quad (4.3)$$

em que  $P_{ma}$  = precipitação estimada para o mês 'm' do ano 'a', sobre a área de drenagem considerada, mm;  $P_{mf,c1} \dots P_{mf,c4}$  = precipitação para o mês 'm' do ano 'a', na célula 1, 2, 3 e 4, respectivamente, previsto pelo HadCM3, mm;  $A_{c1} \dots A_{c4}$  = proporção da área de drenagem da estação sob a célula 1, 2, 3 e 4, respectivamente, adimensional.

FC é um fator de conversão calculado pela equação:

$$FC = \frac{P_{mm,Ad}}{\left( P_{mm,c1} A_{c1} \right) + \left( P_{mm,c2} A_{c2} \right) + \left( P_{mm,c3} A_{c3} \right) + \left( P_{mm,c4} A_{c4} \right)} \quad (4.4)$$

em que  $P_{mm,Ad}$  = precipitação total mensal na área de drenagem, com base na série histórica de 1970 a 2000, mm;  $P_{mm,c1} \dots P_{mm,c4}$  = precipitação total mensal nas células 1, 2, 3 e 4, respectivamente, com base na série histórica de 1970 a 2000, mm.

A  $PT_5$ , para cada ano de 2001 a 2099, foi calculada pela soma das precipitações mensais de janeiro até maio de cada ano, que foram obtidas através do *downscaling*.

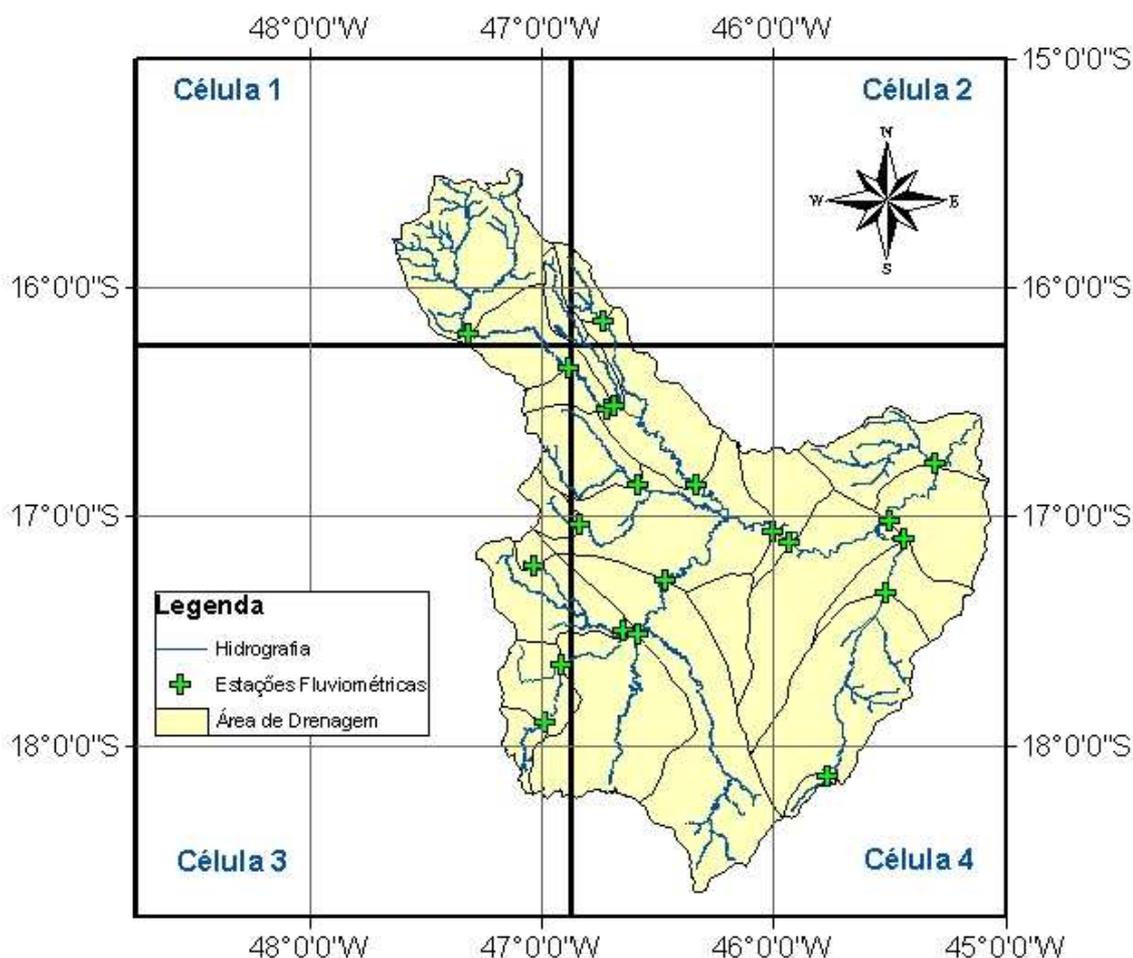


Figura 4.1. Células do modelo de circulação global sobre a bacia do Paracatu, estações fluviométricas e áreas de drenagem.

#### 4.2.4 - Obtenção das vazões mínimas para as próximas décadas

Obtidos os valores de  $PT_5$ , eles foram aplicados na equação 4.2, que foi substituída, em seguida, na equação 4.1. Desta maneira, foi possível estimar as curvas de recessão do escoamento para cada ano, de 2001 a 2099. Conhecendo-se as curvas de recessão, foram calculados os valores de  $Q_7$  para cada ano, e os valores de  $Q_{7,10}$  com base em cada década. Para o período de 1970 a 2000 foi calculada a  $Q_{7,10}$  com base na série histórica de cada estação.

Para facilitar as comparações, os valores de  $Q_{7,10}$  foram divididos pelas respectivas áreas de drenagem, obtendo-se assim as  $Q_{7,10}$  específicas ( $q_{7,10}$ ). Por fim, a tendência das  $q_{7,10}$  foi analisada por regressão linear, tendo o tempo como variável independente.

### 4.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4.2 é apresentada a  $PT_5$  sobre a bacia do Paracatu, de 2001 a 2099, considerando o modelo de previsão de mudanças climáticas (HadCM3), e os dois cenários de emissão de gases utilizados neste trabalho.

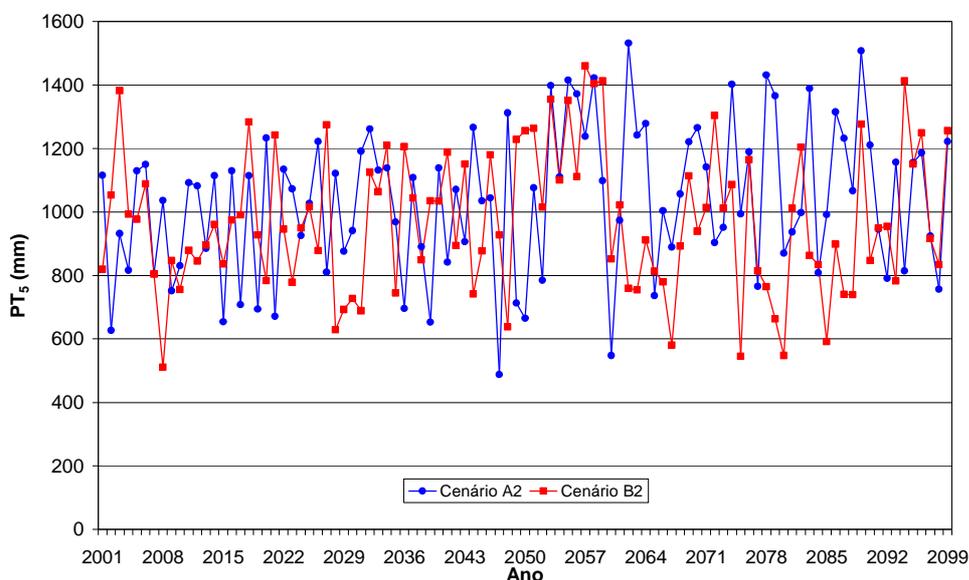


Figura 4.2. Precipitação acumulada nos cinco meses anteriores ao início do período de recessão do escoamento subterrâneo ( $PT_5$ ) de 2001 a 2099.

A análise destes resultados permitiu observar que do ano 2001 até 2059 a  $PT_5$  média será semelhante nos dois cenários, sendo esperado aproximadamente 1002 mm para o cenário A2, e 1005 mm para o cenário B2, embora fique evidenciada na Figura 4.2 a ocorrência de variações sazonais.

A partir de 2060, considerando o modelo de circulação global utilizado, pode-se esperar aumento nas precipitações para o cenário A2, enquanto para o cenário B2 pode-se esperar que ocorra uma redução neste período. A  $PT_5$  média será de, aproximadamente, 1079 mm para o cenário A2, e 921 mm para o cenário B2.

No Quadro 4.4 são apresentadas as equações de regressão das  $q_{7,10}$  em função do tempo, nos dois cenários, para cada estação fluviométrica. No cenário B2, se evidencia que, apesar de todas as estações terem apresentado tendência de crescimento nas vazões com o passar do tempo, as equações de regressão não foram significativas.

O comportamento das precipitações ao longo deste século explica os resultados encontrados para as vazões mínimas na bacia do Paracatu, pois a  $PT_5$  afeta diretamente o valor da vazão subterrânea no início do período de recessão, como mostrado na equação 4.2.

De acordo com o Quadro 4.4, para 17 das 21 estações estudadas, as equações de

regressão são significativas, quando se considera o cenário A2. Neste cenário, fica evidenciada uma tendência de aumento nas vazões mínimas com o passar do tempo, em todas as estações estudadas, devido à tendência de aumento da PT<sub>5</sub> em toda a bacia a partir de 2060, como discutido anteriormente.

Quadro 4.4. Equações de regressão e R<sup>2</sup> ajustadas para cada estação fluviométrica

Estação	Cenário A2		Cenário B2	
	Equação	r <sup>2</sup>	Equação	r <sup>2</sup>
42250000	$q_{7,10} = 4,05 + 0,24 P$	0,48	$q_{7,10} = 4,08 + 0,16 P^{NS}$	0,27
42251000	$q_{7,10} = 2,76 + 0,12 P$	0,51	$q_{7,10} = 2,77 + 0,07 P^{NS}$	0,23
42255000	$q_{7,10} = 2,26 + 0,11 P$	0,51	$q_{7,10} = 2,29 + 0,06 P^{NS}$	0,24
42257000	$q_{7,10} = 2,38 + 0,24 P$	0,50	$q_{7,10} = 2,41 + 0,07 P^{NS}$	0,26
42290000	$q_{7,10} = 1,85 + 0,09 P$	0,58	$q_{7,10} = 1,80 + 0,04 P^{NS}$	0,08
42395000	$q_{7,10} = 2,21 + 0,13 P$	0,57	$q_{7,10} = 2,05 + 0,06 P^{NS}$	0,06
42435000	$q_{7,10} = 6,81 + 0,89 P$	0,53	$q_{7,10} = 6,21 + 0,56 P^{NS}$	0,16
42440000	$q_{7,10} = 2,68 + 0,11 P$	0,49	$q_{7,10} = 2,69 + 0,08 P^{NS}$	0,26
42460000	$q_{7,10} = 3,40 + 0,04 P^{NS}$	0,18	$q_{7,10} = 3,42 + 0,01 P^{NS}$	0,01
42490000	$q_{7,10} = 2,53 + 0,03 P^{NS}$	0,19	$q_{7,10} = 2,54 + 0,01 P^{NS}$	0,00
42540000	$q_{7,10} = 3,21 + 0,08 P^{NS}$	0,24	$q_{7,10} = 3,22 + 0,04 P^{NS}$	0,03
42545500	$q_{7,10} = 2,19 + 0,10 P$	0,36	$q_{7,10} = 2,12 + 0,04 P^{NS}$	0,02
42546000	$q_{7,10} = 3,12 + 0,04 P^{NS}$	0,11	$q_{7,10} = 3,03 + 0,02 P^{NS}$	0,01
42600000	$q_{7,10} = 2,29 + 0,08 P$	0,43	$q_{7,10} = 2,12 + 0,04 P^{NS}$	0,02
42690001	$q_{7,10} = 1,93 + 0,09 P$	0,51	$q_{7,10} = 1,86 + 0,04 P^{NS}$	0,05
42750000	$q_{7,10} = 1,96 + 0,09 P$	0,52	$q_{7,10} = 1,88 + 0,04 P^{NS}$	0,04
42840000	$q_{7,10} = 6,05 + 0,19 P$	0,41	$q_{7,10} = 5,86 + 0,14 P^{NS}$	0,19
42850000	$q_{7,10} = 1,55 + 0,12 P$	0,52	$q_{7,10} = 1,38 + 0,06 P^{NS}$	0,05
42860000	$q_{7,10} = 1,27 + 0,07 P$	0,51	$q_{7,10} = 1,17 + 0,04 P^{NS}$	0,07
42930000	$q_{7,10} = 1,93 + 0,09 P$	0,52	$q_{7,10} = 1,84 + 0,04 P^{NS}$	0,06
42980000	$q_{7,10} = 2,03 + 0,12 P$	0,53	$q_{7,10} = 1,92 + 0,06 P^{NS}$	0,07

P = período considerado, sendo que P = 0 corresponde ao período de 1970 - 2000; P = 1 corresponde ao período de 2001 - 2010, P = 10 corresponde ao período de 2090 - 2099; NS = regressão não significativa (P > 0,05).

Na Figura 4.3 é apresentado o exemplo correspondente à estação 42290000, nos cenários A2 e B2. Destaca-se o fato de que o comportamento apresentado por esta estação é representativo do comportamento observado nas outras estações utilizadas neste trabalho. Na figura se pode evidenciar a maior dispersão dos pontos no cenário B2, o que explica, em parte, os baixos valores de r<sup>2</sup> e a ausência de significância das equações de regressão neste cenário.

Com base nas equações de regressão obtidas no cenário A2, o Quadro 4.5 apresenta os acréscimos esperados na q<sub>7,10</sub> para o período de 2090 - 2099, em relação ao período correspondente a 1970 - 2000. Como nenhuma das equações de regressão obtidas no cenário B2 foram significativas, os acréscimos esperados para a q<sub>7,10</sub> neste cenário foram omitidos.

No Quadro 4.5 pode se evidenciar que os acréscimos nas q<sub>7,10</sub>, para o final deste

século, variam de 31 a 131%. Embora os acréscimos esperados nas estações 42460000, 42490000, 42546000 e 42540000, sejam de 12, 12, 13 e 25%, respectivamente, as equações de regressão para estas estações não foram significativas, como já apresentadas no Quadro 4.4.

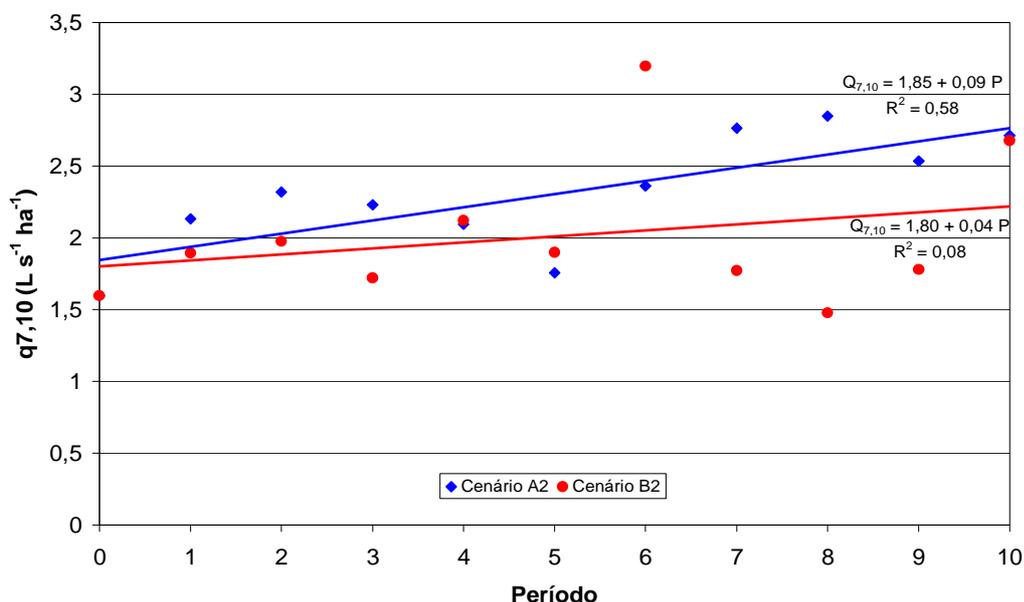


Figura 4.3.  $q_{7,10}$  específica na estação 42290000 (BR-040 - Paracatu).

Quadro 4.5.  $Q_{7,10}$  específicas estimadas pelas equações de regressão, para os períodos de 1970 - 2000 e 2090 - 2099, e acréscimo esperado nesta variável no período considerado para o cenário A2

Estação	1970 - 2000		2090 - 2099	
	$q_{7,10}$ ( $L s^{-1} ha^{-1}$ )	$q_{7,10}$ ( $L s^{-1} ha^{-1}$ )	$q_{7,10}$ ( $L s^{-1} ha^{-1}$ )	Acréscimo (%)
42250000	4,1	6,5		59,0
42251000	2,8	4,0		43,0
42255000	2,3	3,4		48,0
42257000	2,4	4,8		100,0
42290000	1,9	2,8		47,0
42395000	2,2	3,5		59,0
42435000	6,8	15,7		131,0
42440000	2,7	3,8		41,0
42460000	3,4	3,8		12,0 <sup>NS</sup>
42490000	2,5	2,8		12,0 <sup>NS</sup>
42540000	3,2	4,0		25,0 <sup>NS</sup>
42545500	2,2	3,2		45,0
42546000	3,1	3,5		13,0 <sup>NS</sup>
42600000	2,3	3,1		35,0
42690001	1,9	2,8		47,0
42750000	2,0	2,9		45,0
42840000	6,1	8,0		31,0
42850000	1,6	2,8		75,0
42860000	1,3	2,0		54,0
42930000	1,9	2,8		47,0
42980000	2,0	3,2		60,0

NS = estações para as quais as equações de regressão não foram significativas, como apresentadas no Quadro 4.4.

## 4.4 - CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos com os dois cenários de mudanças climáticas considerados neste trabalho, A2 e B2, o efeito das mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica, estimada através da  $q_{7,10}$ , pode ser resumido da seguinte maneira:

Cenário A2 (maior emissão de gases de efeito estufa):

Há tendência significativa de aumento da disponibilidade hídrica ( $q_{7,10}$ ) em 81% das estações fluviométricas da bacia do rio Paracatu que foram analisadas neste trabalho.

O aumento da disponibilidade hídrica ( $q_{7,10}$ ), nas diferentes estações fluviométricas, variou de 31 a 131% até o final deste século.

Cenário B2 (menor emissão de gases de efeito estufa): As tendências de aumento da disponibilidade hídrica ( $q_{7,10}$ ) até o final deste século, não foram significativas para nenhuma das estações fluviométricas utilizadas neste trabalho.

## 4.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HULME, M., SHEARD, N. Cenários de alterações climáticas para o Brasil. Climate Research Unit, Norwich, UK. 6 pp (1999). ([www.cru.uea.ac.uk/~mikeh/research/brazil.pdf](http://www.cru.uea.ac.uk/~mikeh/research/brazil.pdf))
- IPCC. Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability. In: MCCARTHY, J. J., et al. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, p. 1032, 2001.
- IPCC-TGCI. Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 1. Prepared by Carter, T.R., M. Hulme, and M. Lal, Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, 69pp, 1999.
- KROL, M. S., BRONSTERT, A. Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. Environmental Modelling & Software. v. 22, p. 259 - 268, 2007.
- KROL, M., JAEGER, A., BRONSTERT, A., GÜNTNER, A. Integrated modelling of climate, water, soil, agricultural and socio-economic processes: A general introduction of the methodology and some exemplary results from the semi-arid north-east of Brazil. Journal of Hydrology. v. 328, p. 417- 431, 2006.
- NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país.

- Parcerias Estratégicas. n. 12 - Set. p. 239-258, 2001.
- NOVAES, L. F. Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Viçosa - MG, 104 p. 2005. (Dissertação de Mestrado)
- RODRIGUEZ, R. D. G. Metodologia para estimativa das demandas e disponibilidades hídricas: estudo de caso da bacia do Paracatu. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Viçosa - MG, 94 p. 2004. (Dissertação de Mestrado)
- ROSENZWEIG, C., STRZEPEKB, K. M., DAVID C. MAJORC, D. C., et al. Water resources for agriculture in a changing climate: international case studies. Global Environmental Change. v. 14 p. 345-360, 2004.

## **CAPÍTULO 5**

### **REALIZAÇÃO DE ZONEAMENTO CLIMÁTICO PARA AS PRINCIPAIS CULTURAS CULTIVADAS OU COM CULTIVO POTENCIAL NA BACIA, BEM COMO QUANTIFICAÇÃO DAS NECESSIDADES HÍDRICAS DE CADA UMA DESTAS CULTURAS**

Aristides Ribeiro

Jonathas Batista G. Silva

Robson Alves de Oliveira

## 5.1 - INTRODUÇÃO

O setor agrícola desempenha importantes funções na economia brasileira, sendo responsável por, aproximadamente, 12% do PIB do País. Se forem consideradas as indústrias fornecedoras de insumos (tratores, fertilizantes, inseticidas, etc.) e as indústrias de processamentos de produtos agrícolas (laticínios, alimentos enlatados, frigoríficos, etc.), o complexo agroindustrial representa aproximadamente 37% do PIB. Logo o desempenho da agricultura brasileira tem sido bastante satisfatório, apesar de sofrer diversos problemas, como, estruturais, climáticos, econômicos, etc. A Figura 5.1 mostra a participação da agropecuária e agronegócio no PIB do Brasil.

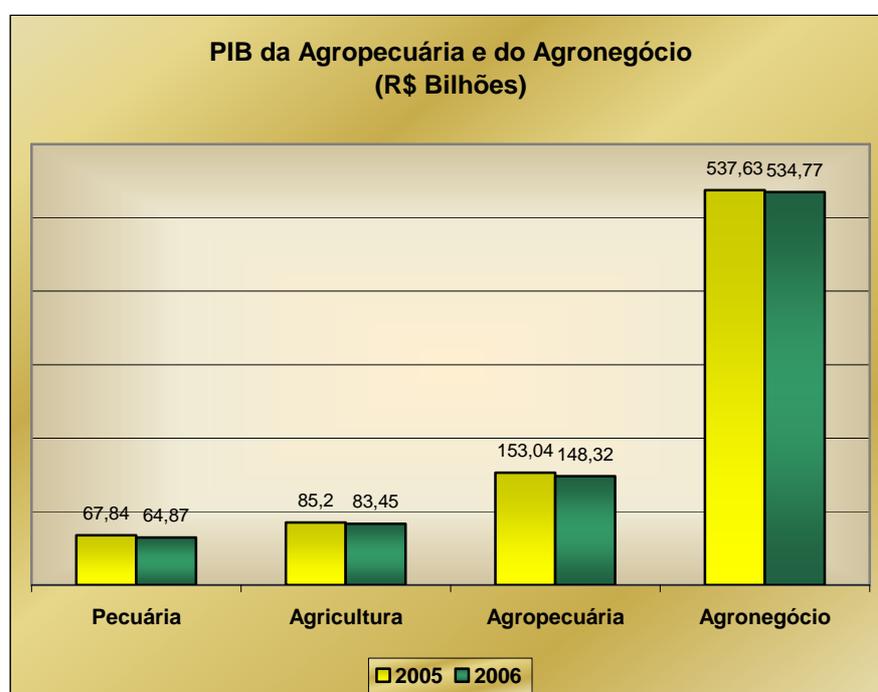


Figura 5.1. PIB da Agropecuária e do Agronegócio em bilhões de reais, (SILVA, 2006).

A ocorrência de fenômenos meteorológicos adversos contribui para grandes prejuízos na agricultura causando preocupações nos setores governamentais ligados ao planejamento agrícola, bem como aos agricultores, Quadro 5.1. Logo para aumentar a seguridade e sustentabilidade da agricultura é necessário que se façam estudos agroclimáticos que permitam, não só, estabelecer indicadores do potencial da região, assim como a introdução de certa cultura.

Quadro 5.1. Sinistralidades (perdas) na safra de 91/92 nos Estados de São Paulo e Bahia e na região do Nordeste, (ROSSETI, 2001).

	São Paulo (%)	Bahia (%)	Nordeste (%)
Arroz	30	34	47
Feijão	21	34	41
Milho	16	37	71
Soja	16	29	-
Soja Irrigada	-	-	32
Algodão	22	22	81
Mamona	-	-	87

Como forma de garantir a atividade dos produtores rurais, frente aos prejuízos que estes sofrem em função de fenômenos naturais adversos, foi criado o Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (PROAGRO). O PROAGRO possui os seguintes objetivos: exonerar o produtor do cumprimento de obrigações financeiras em operações de crédito rural de custeio, no caso de perdas das receitas em consequência fenômenos naturais, pragas, doenças que atinjam bens, rebanhos ou plantações; indenizar os recursos próprios do produtor utilizados em custeio rural, no caso de perdas das receitas em consequência das causas citadas anteriormente; promover a utilização de tecnologia, obedecida à orientação preconizada pela pesquisa como, por exemplo, ZONEAMENTOS.

O zoneamento agrícola no Brasil foi uma proposta implementada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) a partir da safra de inverno de 1996, sob coordenação da Secretaria da Comissão Especial de Recursos - Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (CER/PROAGRO), (Cunha et al. 2001). Seus principais beneficiários são os produtores rurais e suas associações, agentes financeiros de crédito rural, seguradoras, agroindústrias, entidades de pesquisa agropecuária e de extensão rural e instituições responsáveis pela formulação e implementação de políticas agrícolas.

O trabalho ora proposto tem como objetivo apresentar um novo zoneamento agroclimático para diversas culturas na bacia do São Francisco.

## 5.2 - MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho ora proposto foi realizado no Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

Dentre as culturas selecionadas para elaboração deste trabalho estão as principais espécies cultivadas no país e na bacia do São Francisco, Quadro 5.2. Além deste critério adotado para seleção das culturas, foram selecionadas espécies que apresentam alto potencial para a implantação do cultivo na bacia, levando em consideração as características climáticas da região e necessidades da cultura, fatores econômicos e tecnológicos exigida por estas.

Quadro 5.2. Áreas colhidas (ha), das principais culturas brasileiras , no ano de 2002 (IBGE - SIDRA).

Cultura	Área (ha)
Soja	16.365.441
Milho	11.750.889
Cana-de-açúcar	5.100.485
Feijão	4.140.528
Arroz	3.145.868
Café	2.370.908
Trigo	2.104.902
Mandioca	1,675.274
Laranja	828.846
Algodão Herbáceo	768.182

As culturas selecionadas foram: algodão, banana, café-arábica, café-robusta, cana-de-açúcar, coco-anão, feijão, laranja, mamona, mandioca, milho e soja

Para desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados climáticos da Bacia do São Francisco e de suas regiões limítrofes, obtidos do Climatic Research Unit, (CRU), com resolução espacial de meio grau, ou seja, 55,5 quilômetros, Figura 5.2.

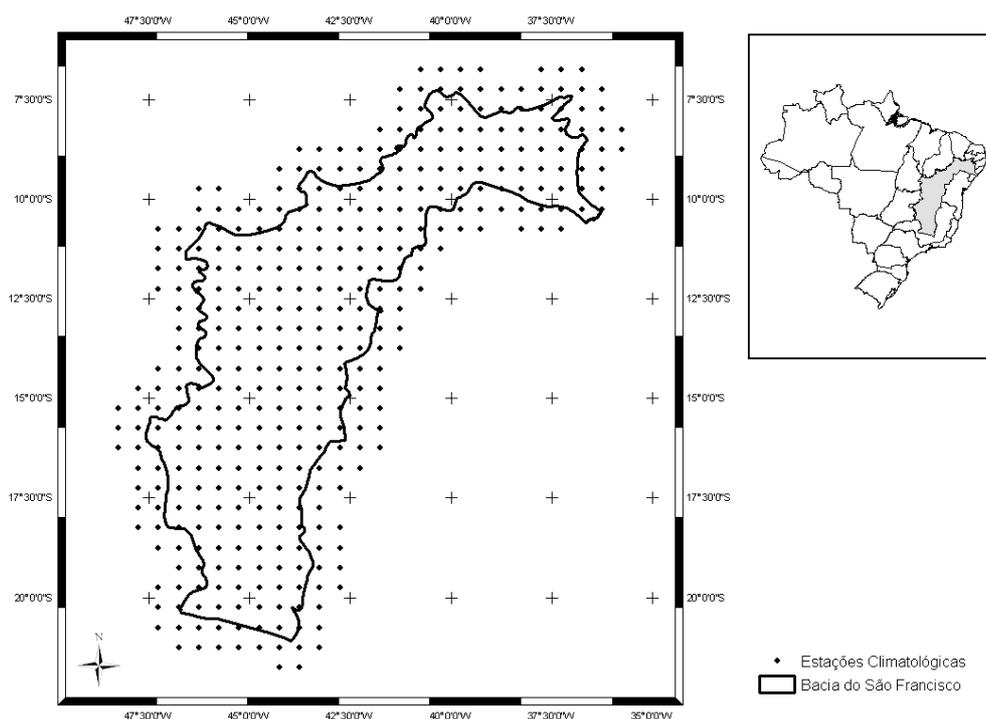


Figura 5.2. Estações climatológicas do CRU.

O modelo digital de elevação do terreno utilizado foi o Gtopo 30, com resolução espacial de 30”, Figura 5.3.

A interpolação foi realizada utilizando o módulo Spatial Analysis do software ArcGIS Desktop 9.1, gerando mapas com a espacialização dos dados climáticos (temperatura média,

precipitação, radiação, umidade relativa do ar, velocidade do vento e déficit hídrico) para a Bacia do Rio São Francisco.

O método de interpolação utilizado foi o Inverso da Distância Ponderada (IDW), o qual é comumente usado em SIGs para gerar mapas temáticos no formato matricial de elementos climáticos a partir de dados pontuais. O algoritmo IDW calcula estimativas de valores desconhecidos dependendo dos valores vizinhos. A distância atua como o peso e o expoente usado permite ajustamentos a esse peso: maiores expoentes, maior a influência do valor vizinho conhecido. Utilizou-se neste trabalho um expoente com valor igual a 2 (dois).

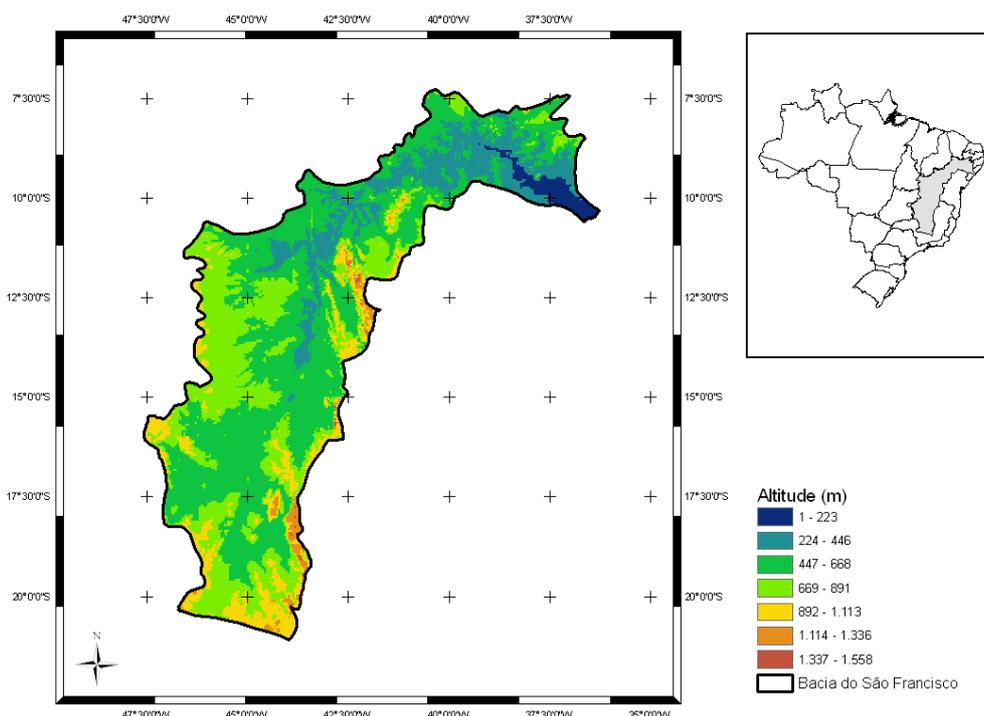


Figura 5.3. Modelo Digital de Elevação da Bacia do São Francisco.

Uma vez realizada a interpolação dos dados climáticos, os mapas gerados foram reclassificados segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cada cultura em estudo. Abaixo estão apresentados os parâmetros técnicos adotados para cada cultura (Quadros 5.3 a 5.14).

Quadro 5.3. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do algodão (KASSAB, 1986)

Parâmetros Técnicos	Algodão		
	Faixas de Aptidão		
	Apto	Restrito	Inapto
Temperatura (°C)	> 20	< 20	-
Precipitação (mm)	500 - 1500	> 1500	-

Quadro 5.4. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da banana (EMBRAPA, 2003)

<b>Banana</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	18 - 34	15 - 18; 34 - 35	< 15; > 35
Precipitação (mm)	> 1200	< 1200	-

Quadro 5.5. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do cafeeiro (café arábica) (SEDIYAMA et. al., 2001)

<b>Café Arábica</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	18 - 22	18 - 19; 22 - 23	< 18; > 23
Déficit Hídrico (mm)	< 150	150 - 200	> 200

Quadro 5.6. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do cafeeiro (café robusta) (SEDIYAMA et. al., 2001)

<b>Café Robusta</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	22 - 26	21 - 22	< 21
Déficit Hídrico (mm)	< 200	200 - 400	> 400

Quadro 5.7. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da cana de açúcar (SILVA, 1969)

<b>Cana-de-açúcar</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	19 - 35	15 - 18	< 15; > 47
Precipitação (mm)	1000 - 1500	< 1000	-

Quadro 5.8. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do coco anão (MIRISIOLA FILHO, 2002).

<b>Coco anão</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	20 - 32	15 - 20	< 15
Precipitação (mm / mês)	500	< 500	-
Umidade Relativa do Ar (%)	> 60	< 60	-
Altitude (m)	< 500	> 500	-

Quadro 5.9. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do feijoeiro comum (VIEIRA, 1967; FANCELI e DOURADO NETO, 1999)

<b>Feijão</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	21 - 29	12 - 21	< 12; > 29
Precipitação (mm / ciclo)	300 - 400	< 300; > 400	-
Radiação (W / m <sup>2</sup> )	150 - 250	< 150	-

Quadro 5.10. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da laranja (KOLLER, 1994)

<b>Laranja</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	20 - 30	< 20	< 12; > 29
Precipitação (mm / ciclo)	1000 - 2000	< 1000	-
Velocidade do vento (m / s)	< 2,78	> 2,78	-

Quadro 5.11. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da mamoneira (EMBRAPA, 2006)

<b>Mamona</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	20 - 30	-	< 20; > 30
Precipitação (mm)	> 500	-	< 500
Altitude (m)	300 - 1500	-	< 300

Quadro 5.12. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da mandioca (EMBRAPA, 2003)

<b>Mandioca</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	20 - 27	15 - 20	< 15
Precipitação (mm)	1000 - 1500	400 - 1000	< 400

Quadro 5.13. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do milho (COSTA, 1986)

<b>Milho</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	> 20	< 20	-
Precipitação (mm / ciclo)	500 - 800	< 500	-

Quadro 5.14. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da soja (PEREIRA, 2002)

<b>Soja</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	> 22	< 22	-
Precipitação (mm / ciclo)	450 - 800	< 450	-

A partir destes resultados e através de uma operação de álgebra de mapas disponível no Spatial Analysis (Map Calculator), um único mapa foi produzido, o qual consta das áreas aptas, restritas e inaptas ao cultivo destas espécies na Bacia do São Francisco.

Como exemplo, no fluxograma abaixo está apresentado os passos tomados para elaboração do zoneamento agroclimático da mamoneira (*Ricinus communis L.*) para a Bacia do São Francisco, Figura 5.4.

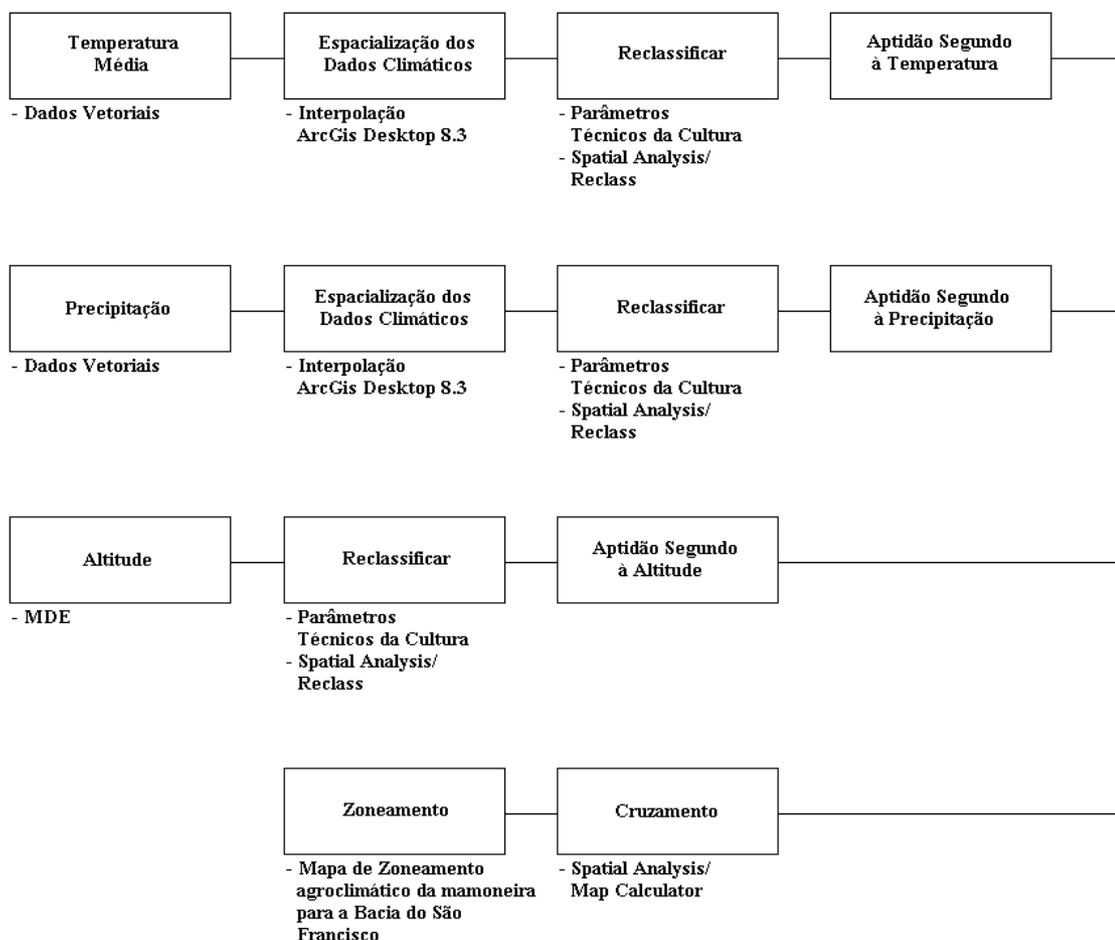


Figura 5.4. Fluxogramas das etapas de elaboração do zoneamento agroclimático da mamoneira para a bacia do São Francisco.

## 5.3 - RESULTADOS

### 5.3.1 - Caracterização Climática da Bacia do São Francisco

A caracterização climática da bacia do São Francisco foi obtida através da espacialização dos dados climáticos pontuais, como foi descrito acima na metodologia.

Abaixo serão apresentados os mapas de temperatura média, precipitação, radiação, umidade relativa do ar, velocidade do vento e déficit hídrico (Figuras 5.5 a 5.10).

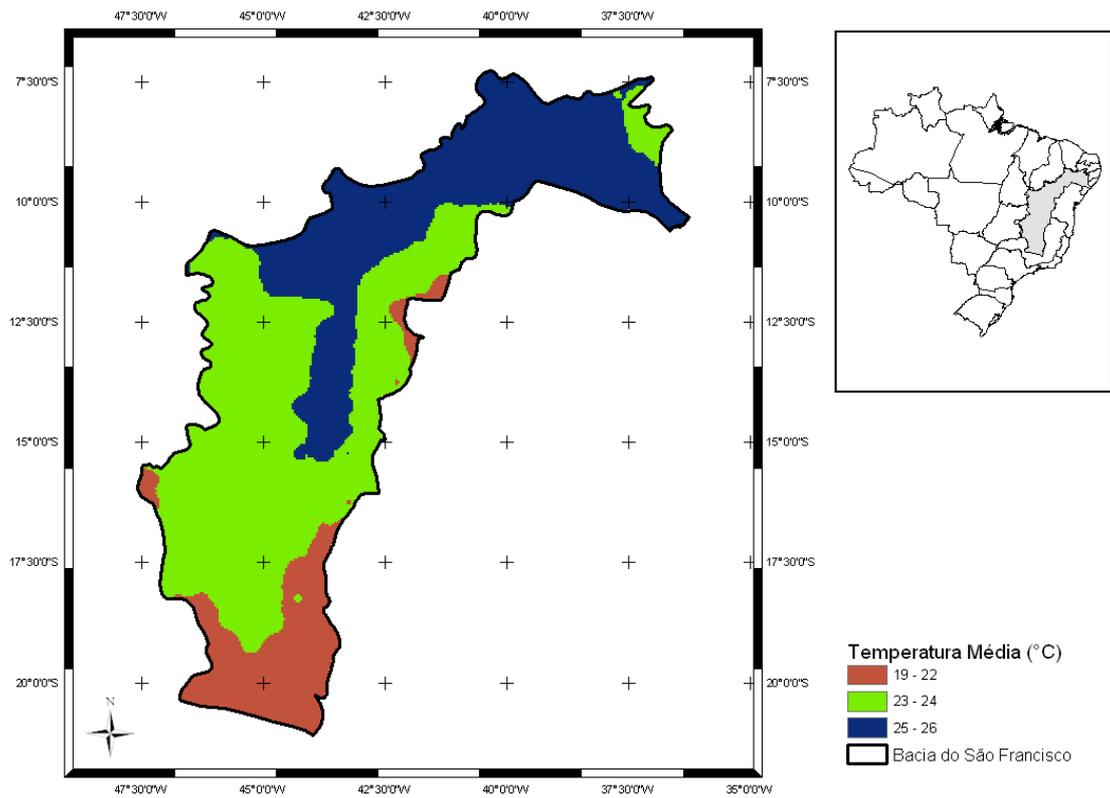


Figura 5.5. Dados espacializados de temperatura média anual para a bacia do São Francisco.

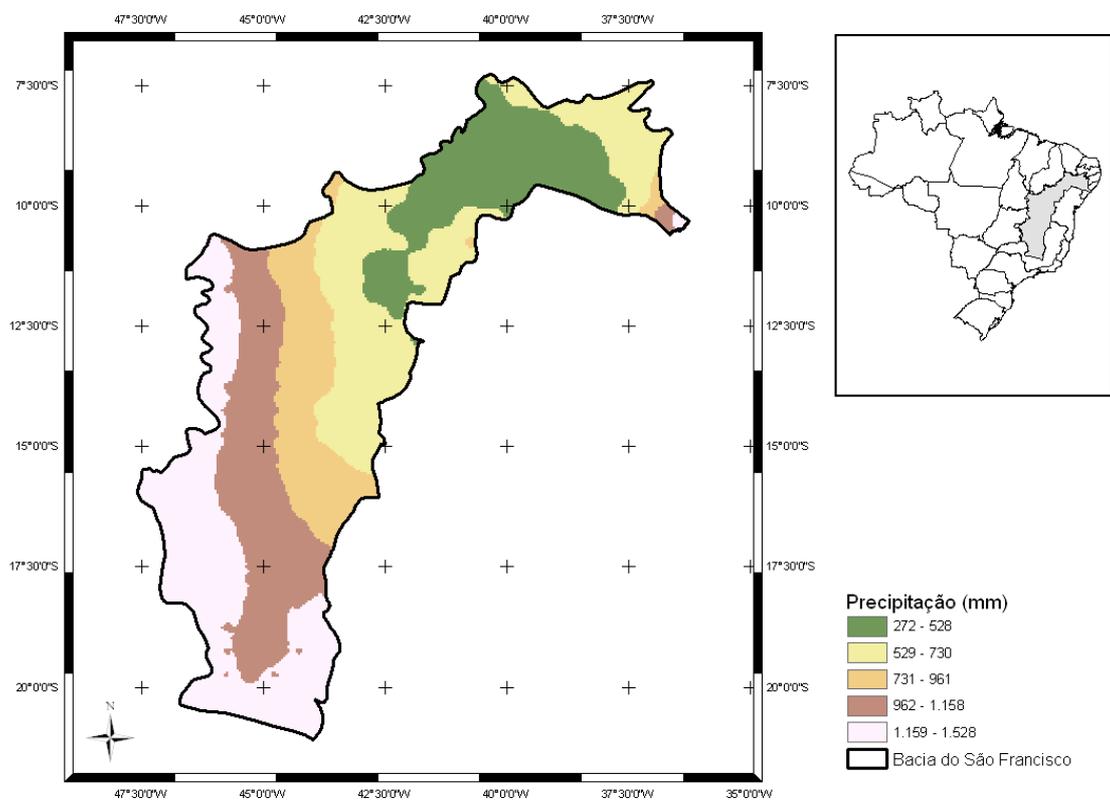


Figura 5.6. Dados espacializados de precipitação total anual para a bacia do São Francisco.

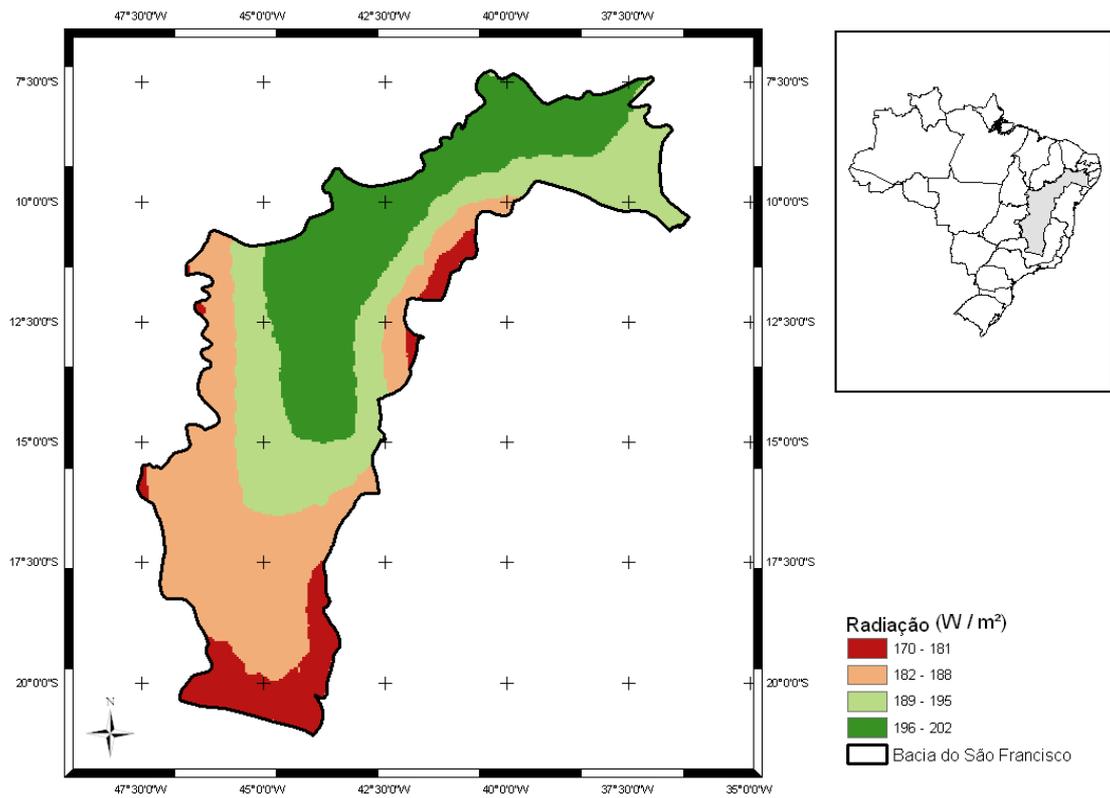


Figura 5.7. Dados espacializados de radiação média anual para a bacia do São Francisco.

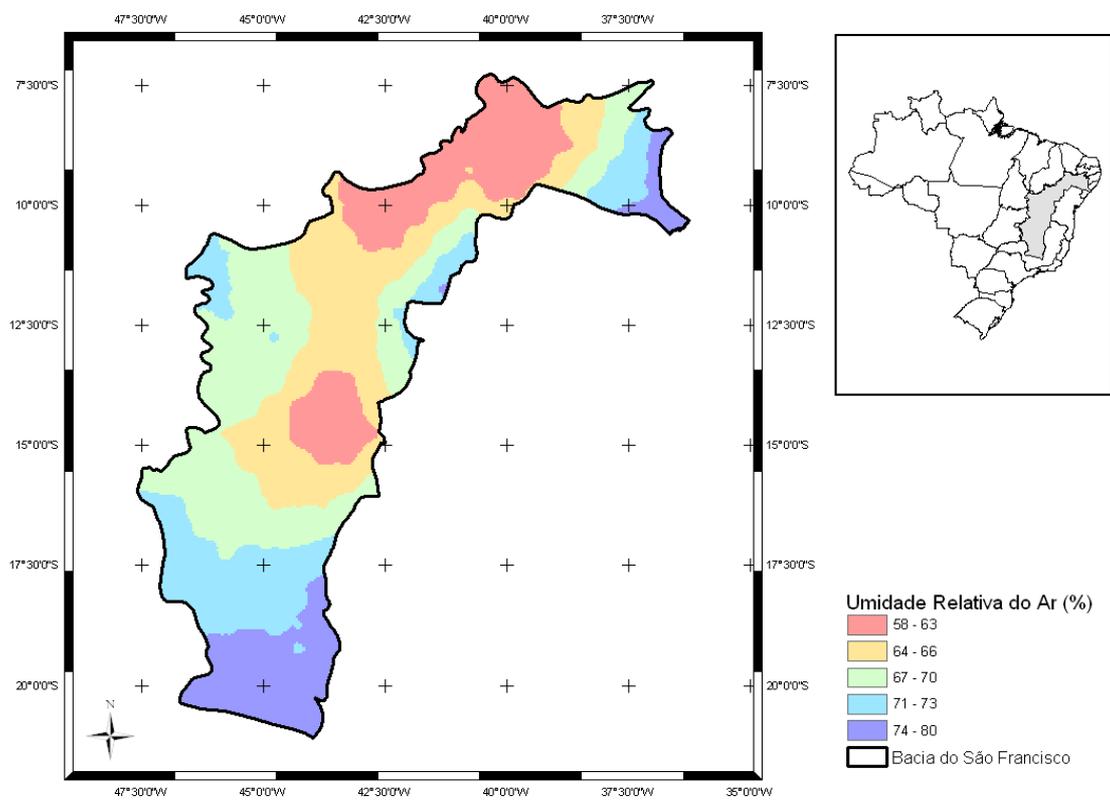


Figura 5.8. Dados espacializados de umidade relativa do ar média anual para a bacia do São Francisco.

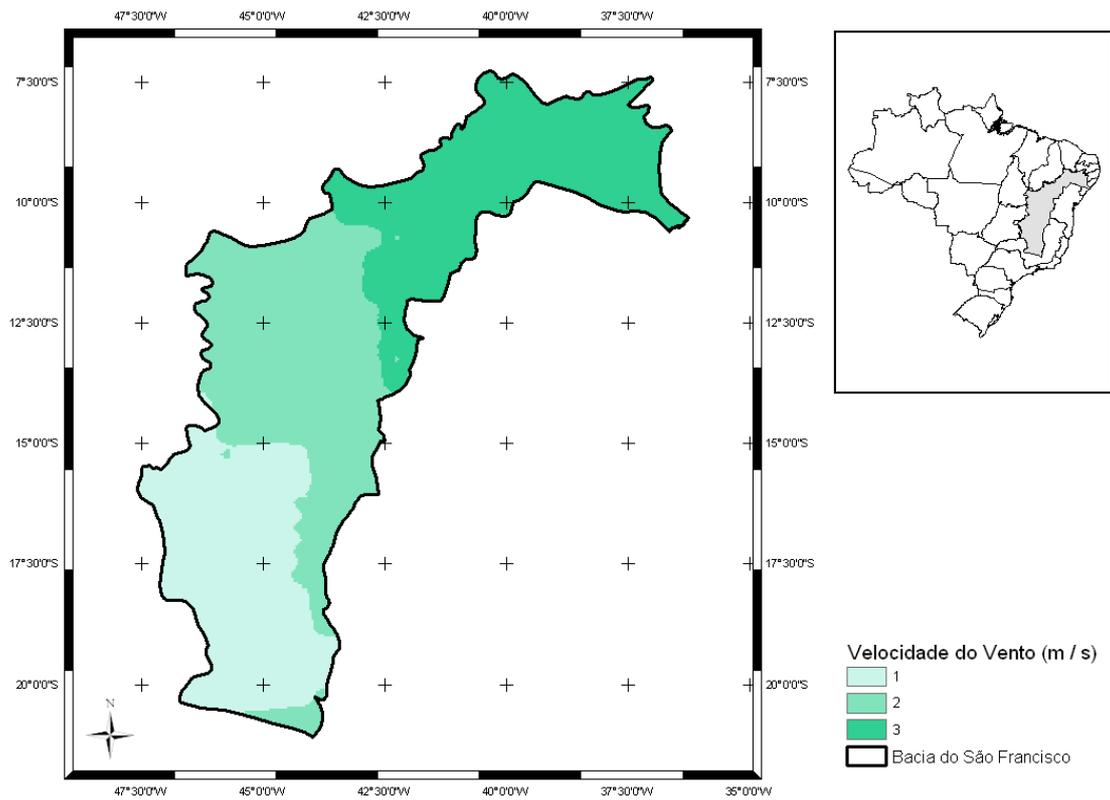


Figura 5.9. Dados especializados de velocidade do vento média anual para a bacia do São Francisco.

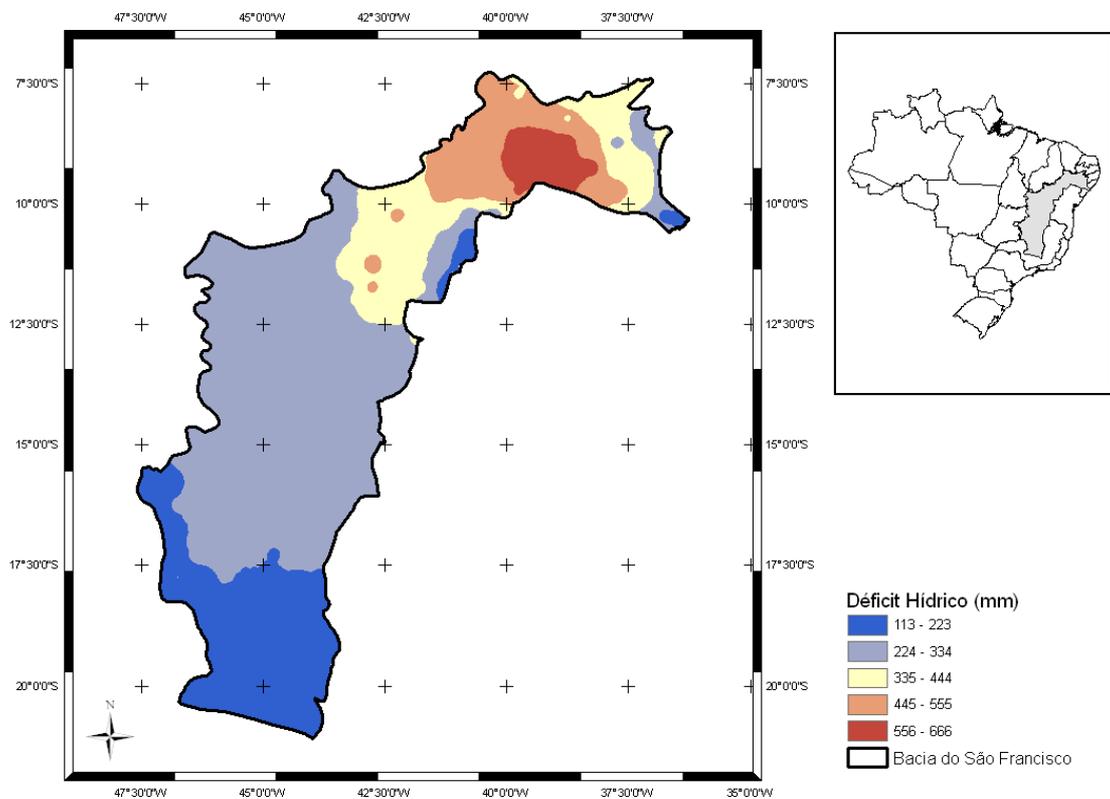


Figura 5.10. Dados especializados de déficit hídrico total anual para a bacia do São Francisco.

## 5.3.2 - Zoneamentos Agroclimáticos

### 5.3.2.1 - Algodão

Abaixo estão apresentadas as delimitações das áreas consideradas aptas e inaptas para a cultura do algodão em relação à precipitação e temperatura média de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.11.

Com o cruzamento das informações abaixo foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura do algodão para a bacia do São Francisco, Figura 5.12.

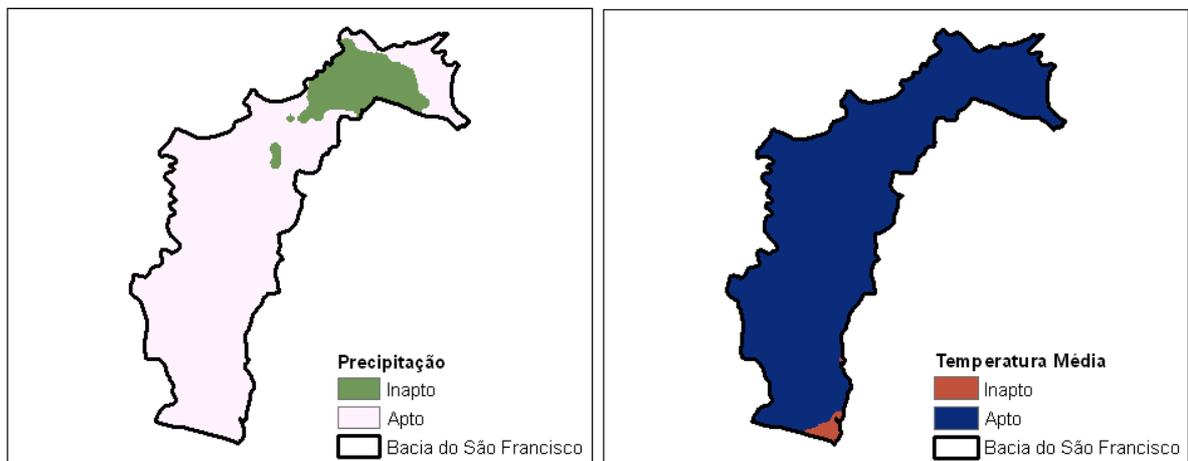


Figura 5.11. Mapas reclassificados de precipitação (esquerda) e temperatura média (direita) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do algodão.

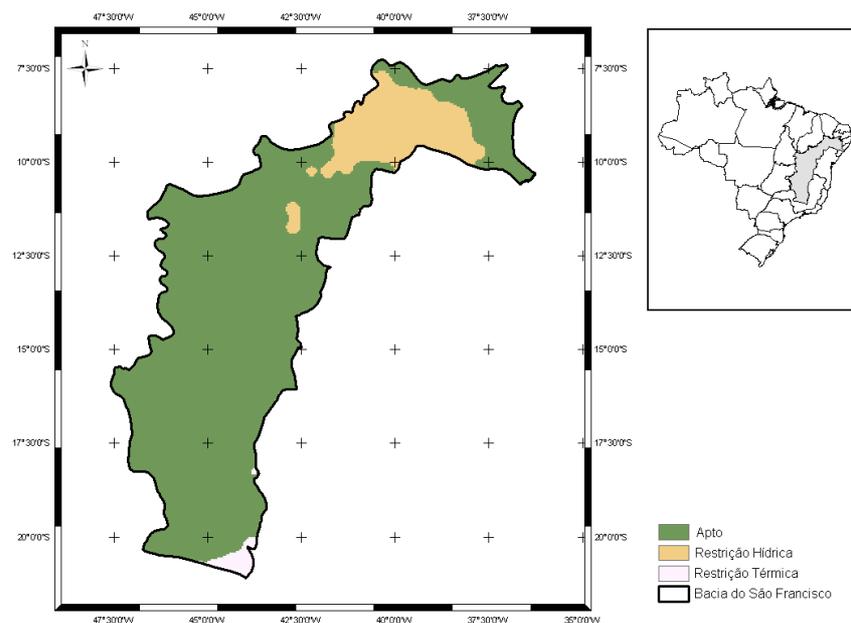


Figura 5.12. Mapa de aptidão da Bacia do São Francisco para o cultivo do algodão.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas são: norte e noroeste do Estado de Minas Gerais; leste goiano; oeste e centro baiano; norte do Estado do Pernambuco e quase a totalidade do Estado do Sergipe e Alagoas. As áreas que apresentam restrição hídrica ao cultivo do algodão estão situadas no norte do Estado na Bahia e sul de Pernambuco. As áreas que apresentam restrição térmica estão situadas em uma pequena parte ao sul da bacia, na região dos campos das vertentes.

### 5.3.2.2 - Banana

Abaixo estão apresentadas as delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura da banana em relação à precipitação e temperatura média de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.13.

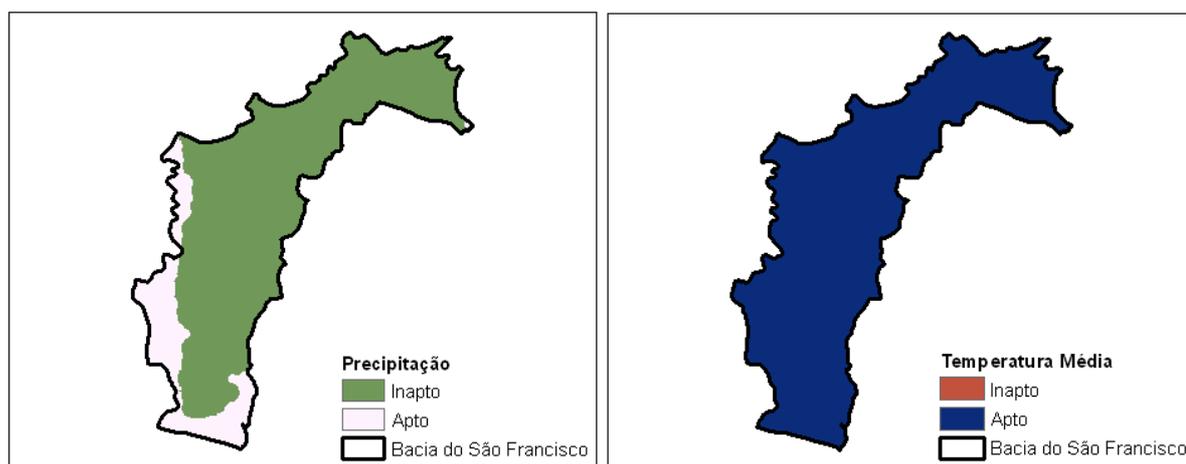


Figura 5.13. Mapas reclassificados de precipitação (esquerda) e temperatura média (direita) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da banana.

Com o cruzamento das informações acima foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura da banana para a bacia do São Francisco, Figura 5.14.

De acordo com o mapa gerado, as áreas que apresentam restrição em relação à umidade relativa, estão situadas no extremo oeste baiano; no noroeste e região metalúrgica em Minas Gerais e leste do Estado de Goiás e Alagoas. As áreas que apresentaram restrição à umidade relativa e hídrica se localizam no norte de Minas Gerais, região central do Estado da Bahia e grande parte dos Estados do Pernambuco, Sergipe e Alagoas. Os fatores determinantes para não ocorrência de áreas aptas foi a grande exigência hídrica da cultura e pelo baixo índice pluviométrico em extensas áreas da bacia do São Francisco.

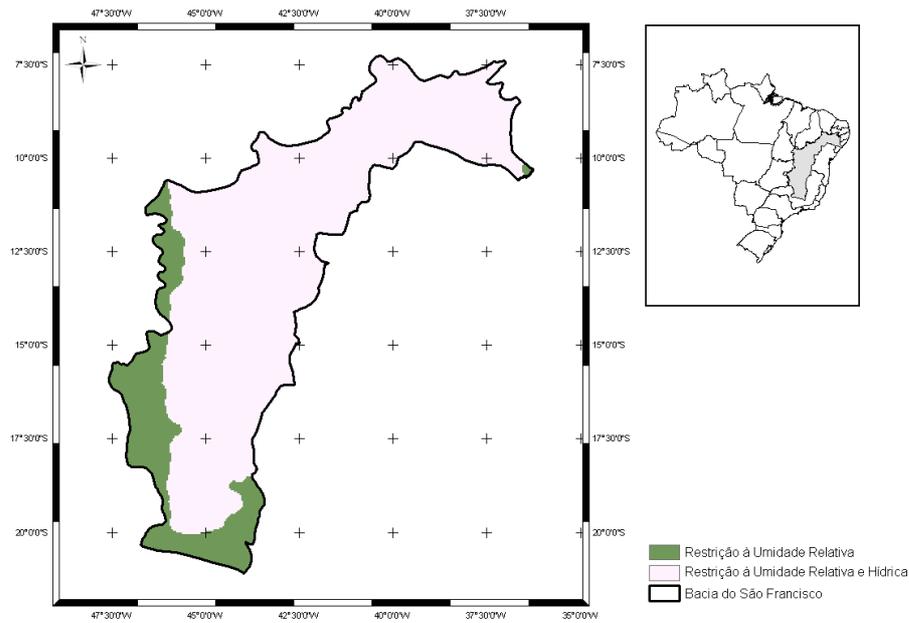


Figura 5.14. Mapa de aptidão da Bacia do São Francisco para o cultivo da banana.

### 5.3.2.3 - Café Arábica

Abaixo estão apresentadas as delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura do café arábica em relação à temperatura média e ao déficit hídrico de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.15.

Com o cruzamento das informações abaixo foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura do cafeeiro para a bacia do São Francisco, Figura 5.16.

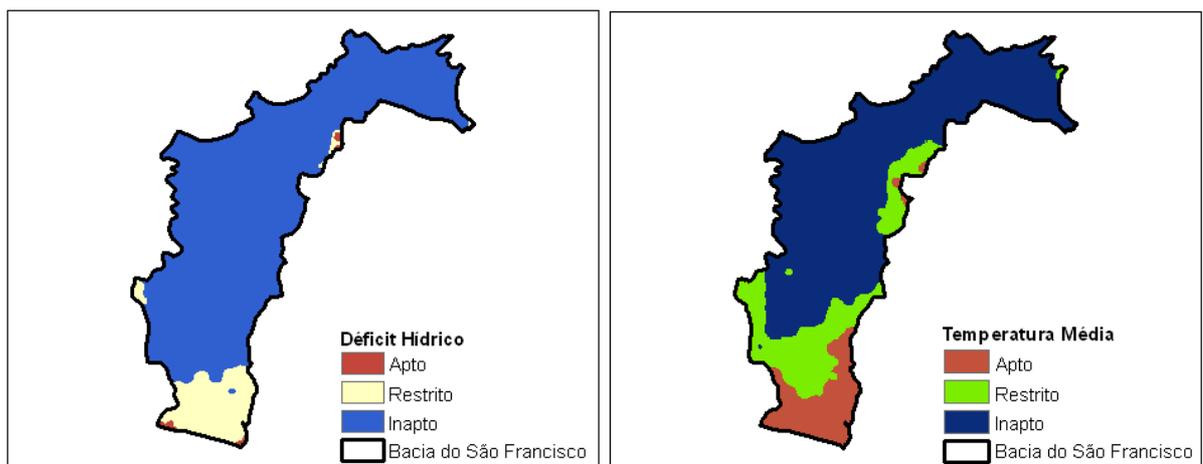


Figura 5.15. Mapas reclassificados de déficit hídrico (esquerda) e temperatura média (direita) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do cafeeiro.

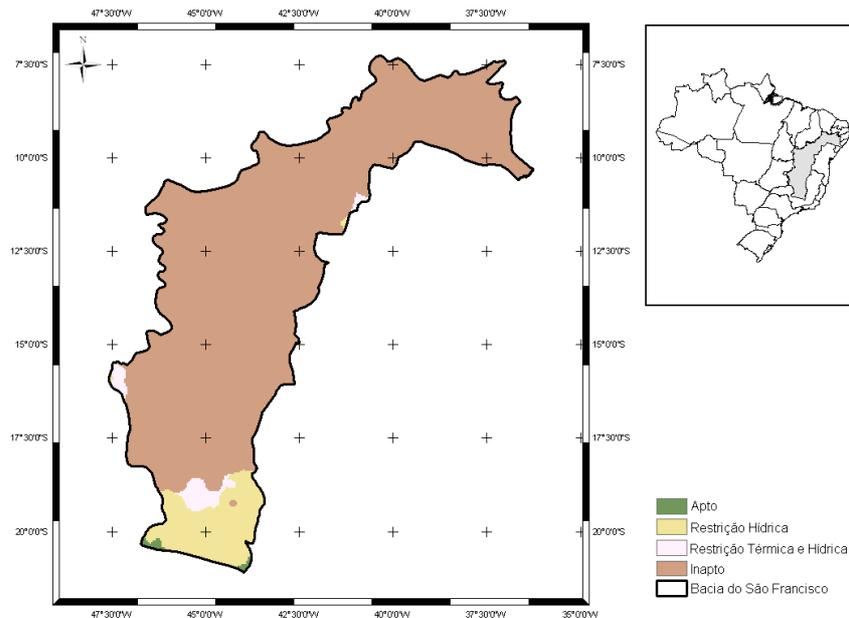


Figura 5.16. Mapa de aptidão da Bacia do São Francisco para o cultivo do café arábica.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas estão situadas em pequenas faixas no sul da bacia, na região metalúrgica no Estado de Minas Gerais. As áreas que apresentaram restrição hídrica estão situadas na região na porção central de Minas Gerais. As áreas com restrição térmica e hídrica estão situadas na porção norte da região central de Minas Gerais, leste de Goiás e centro norte baiano. As inaptas para o cultivo do café arábica na bacia do São Francisco em estão compreendidas nas regiões norte e noroeste de Minas Gerais; central e oeste baiano e parte dos Estados do Pernambuco, Sergipe e Alagoas. O fator determinante para extensas áreas inaptas na bacia do São Francisco foram os elevados valores no déficit hídrico na bacia.

#### 5.3.2.4 - Café Robusta

Abaixo estão apresentadas as delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura do café robusta em relação à temperatura média e déficit hídrico de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.17.

Com o cruzamento das informações abaixo foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura do cafeeiro para a bacia do São Francisco, Figura 5.18.

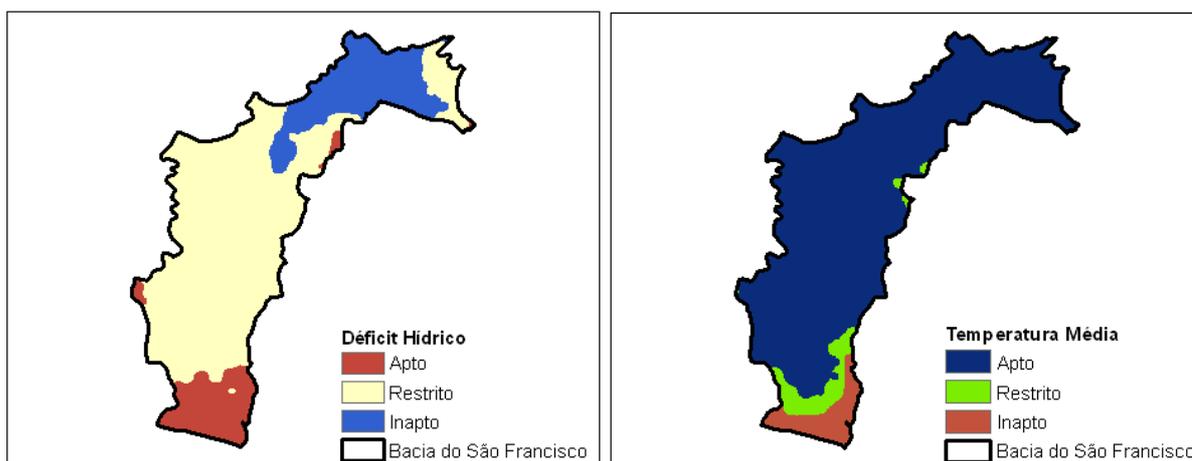


Figura 5.17. Mapas reclassificados de déficit hídrico (esquerda) e temperatura média (direita) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do cafeeiro.

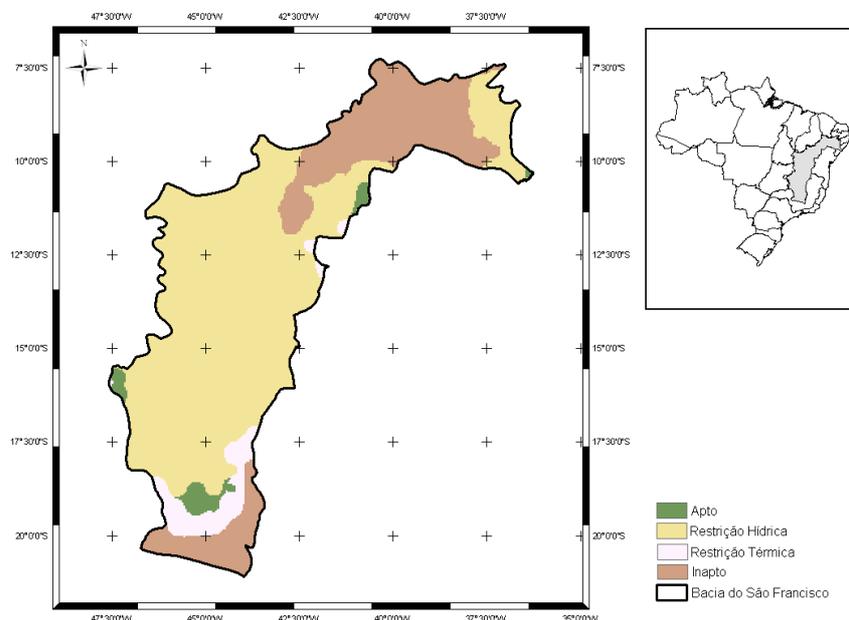


Figura 5.18. Mapa de aptidão da Bacia do São Francisco para o cultivo do café robusta.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas são: o norte da região central de Minas Gerais, leste de Goiás, uma pequena porção do centro norte baiano e a leste do Estado de Alagoas. As áreas que apresentam restrição hídrica estão situadas na região norte e noroeste de Minas Gerais; oeste e região central do Estado da Bahia e no sertão de Pernambuco. As áreas que apresentaram restrição térmica estão situadas em uma estreita faixa no norte e região central mineira e no centro norte baiano. As áreas inaptas estão situadas no sul da bacia, norte do estado baiano e em parte do sertão pernambucano. A temperatura é o fator climático que proporcionou a inaptidão do cultivo desta cultura no sul do estado, já no norte no Estado da Bahia e sertão de Pernambuco o baixo índice pluviométrico foi o elemento determinante para a inaptidão da região.

### 5.3.2.5 - Cana-de-açúcar

Abaixo estão apresentadas as delimitações das áreas consideradas apta, restritas e inaptas para a cultura da cana de açúcar em relação à precipitação e temperatura média de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.19.

Com o cruzamento das informações abaixo foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura da cana de açúcar para a bacia do São Francisco, Figura 5.20.

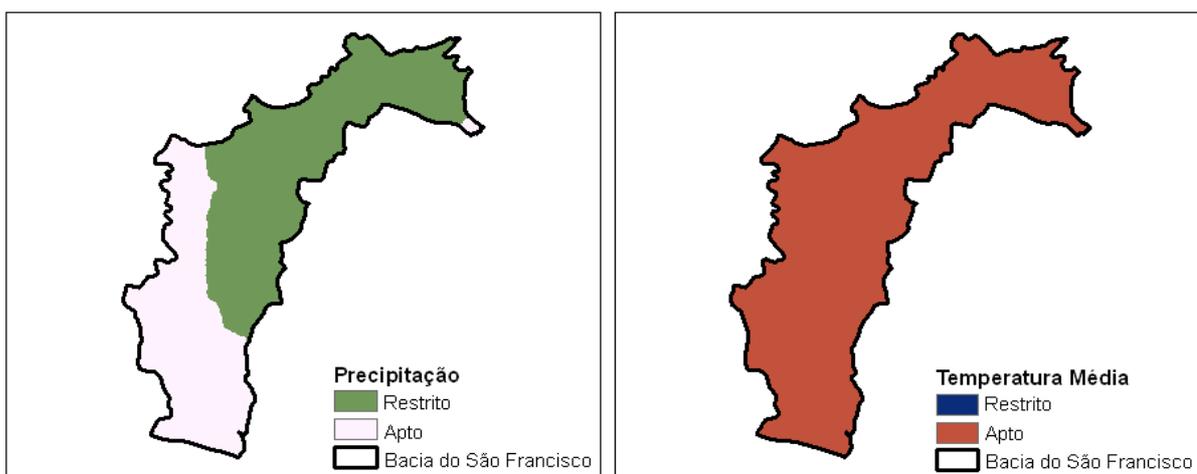


Figura 5.19. Mapas reclassificados de precipitação (esquerda) e temperatura média (direita) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da cana de açúcar.

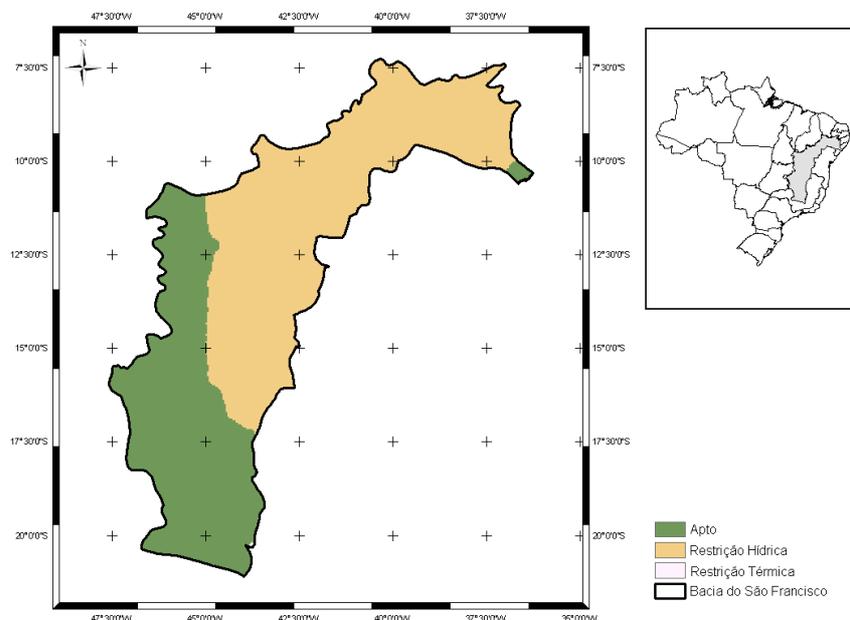


Figura 5.20. Mapa de aptidão da Bacia do São Francisco para o cultivo da cana-de-açúcar.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas são: noroeste do Estado de Minas Gerais; leste goiano; oeste baiano e oeste de Alagoas e Sergipe. As áreas inaptas estão

situadas na porção central Estado da Bahia e grande parte dos Estados de Pernambuco, Sergipe e Alagoas. Verificou-se que o fator determinante para as áreas consideradas restritas pelo zoneamento da cana-de-açúcar na Bacia do São Francisco, é o baixo índice de precipitação em grande parte da bacia que não atende a exigência hídrica da cultura. A temperatura não foi responsável por inaptidão de extensas áreas, pois atendeu as exigências da cultura.

### 5.3.2.6 - Coco Anão

Abaixo estão apresentadas as delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura do coco anão em relação à precipitação, temperatura média, umidade relativa do ar e altitude de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.21.

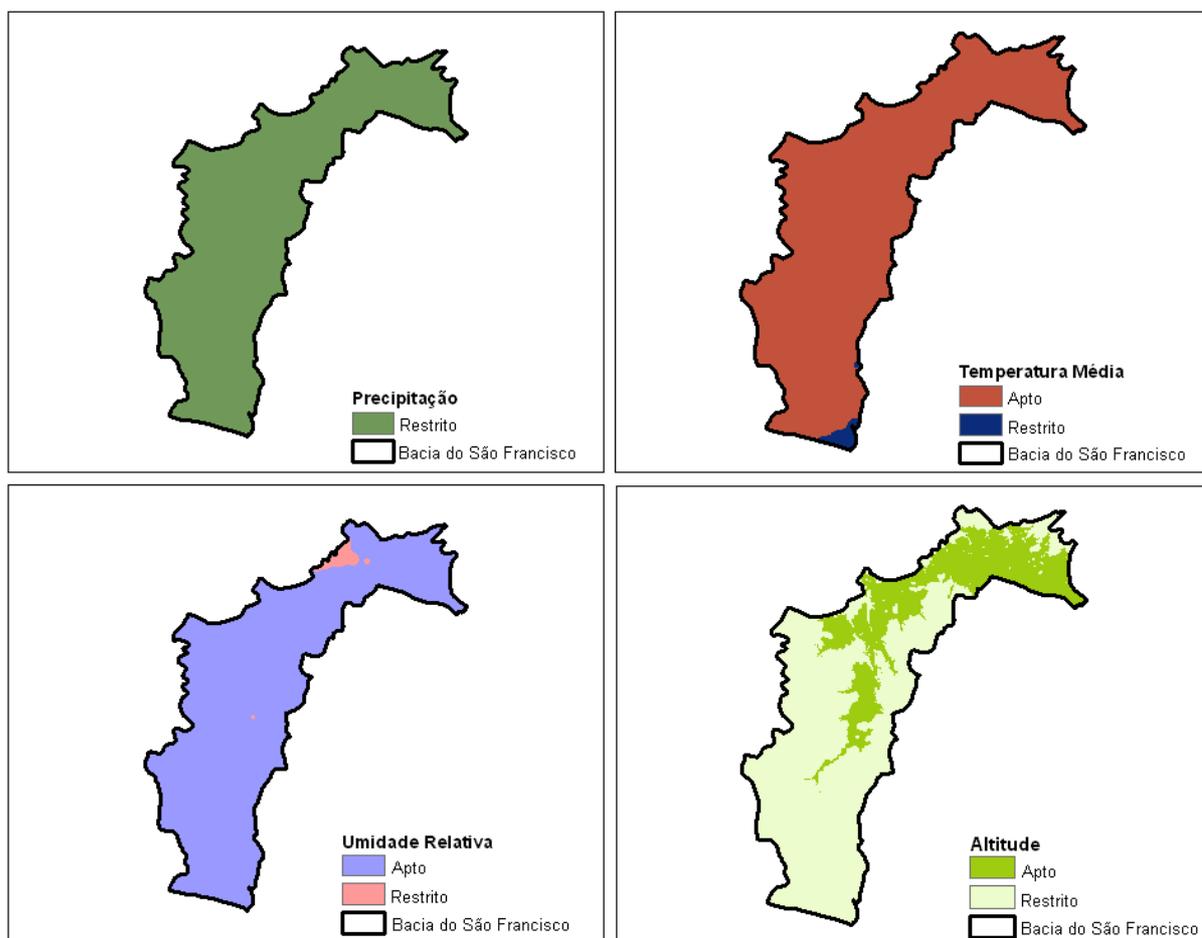


Figura 5.21. Mapas reclassificados de precipitação (esquerda acima), temperatura média (direita acima), umidade relativa (esquerda abaixo) e altitude (direita abaixo) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do coqueiro.

Com o cruzamento das informações acima foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura do coco anão para a bacia do São Francisco, Figura 5.22.

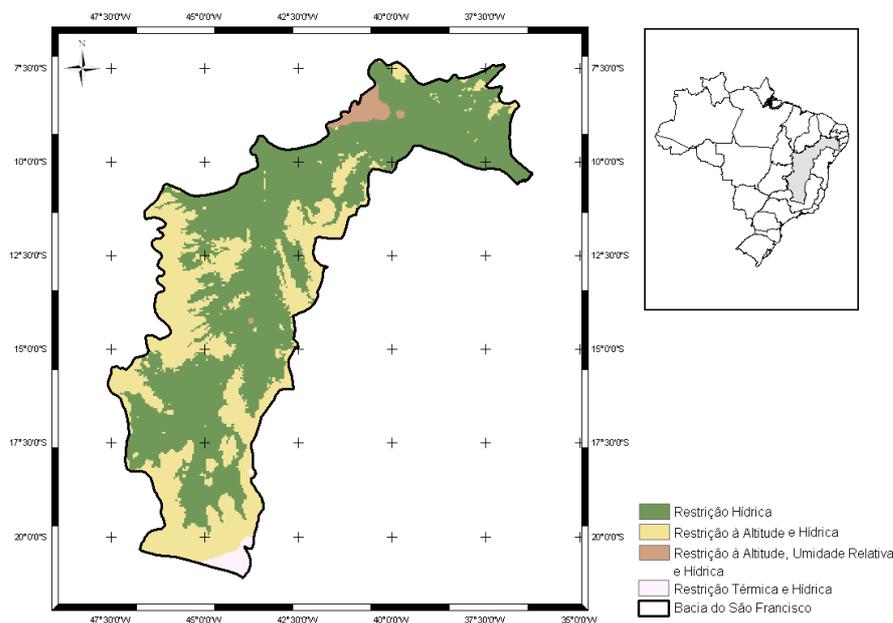


Figura 5.22. Mapa de aptidão da Bacia do São Francisco para o cultivo do coco anão.

De acordo com o mapa gerado, as áreas que apresentaram restrição hídrica são: sertão de Pernambuco; parte do Estado de Alagoas e Sergipe; norte e porção central baiano e norte e porção central de Minas Gerais. As áreas que apresentaram restrição à altitude e restrição hídrica estão situadas em pequenas faixas no sertão de Pernambuco; oeste, pequenas faixas na região centro sul e centro norte do Estado da Bahia e parte do norte de Minas Gerais. As áreas que apresentaram restrição térmica e hídrica estão contidas no extremo sul da bacia. As áreas que apresentaram restrição à altitude, umidade relativa e hídrica estão situadas no norte da Bahia e sul de Pernambuco. A alta exigência hídrica do coco anão, 300 mm ao mês, foi o fator que determinou restrição hídrica em toda bacia do São Francisco em relação ao cultivo desta cultura.

### 5.3.2.7 - Feijão-Comum

#### 5.3.2.7.1 - Feijão (plantado no mês de janeiro)

Abaixo estão apresentados as delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura do feijoeiro comum plantado em janeiro em relação à precipitação, temperatura média e radiação de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.23

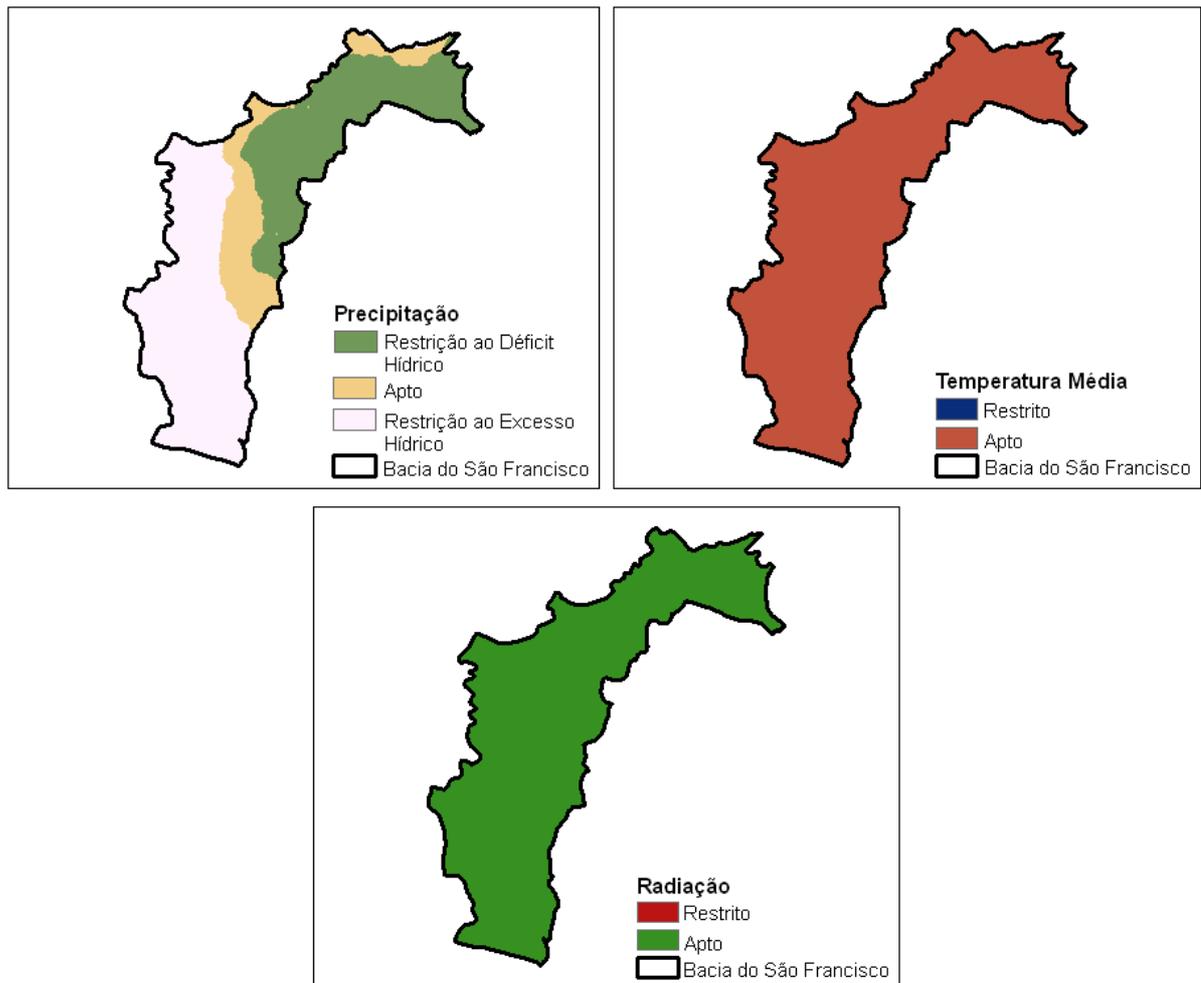


Figura 5.23. Mapas reclassificados de precipitação (esquerda acima), temperatura média (direita acima) e radiação (abaixo) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do feijão plantado em janeiro.

Com o cruzamento das informações acima foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura do feijoeiro para a bacia do São Francisco, Figura 5.24.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas são: noroeste do Estado de Minas Gerais e oeste baiano. As áreas restritas estão situadas ao norte do estado mineiro; leste goiano; porção central Estado da Bahia e grande parte dos Estados de Pernambuco, Sergipe e Alagoas. Verificou-se que o fator determinante para as áreas consideradas restritas pelo zoneamento do feijoeiro-comum na Bacia do São Francisco, é o baixo índice de precipitação em grande parte da bacia que não atende a exigência hídrica da cultura. Os outros fatores climáticos atenderam as exigências da cultura, portanto não foram responsáveis por inaptidão de extensas áreas.

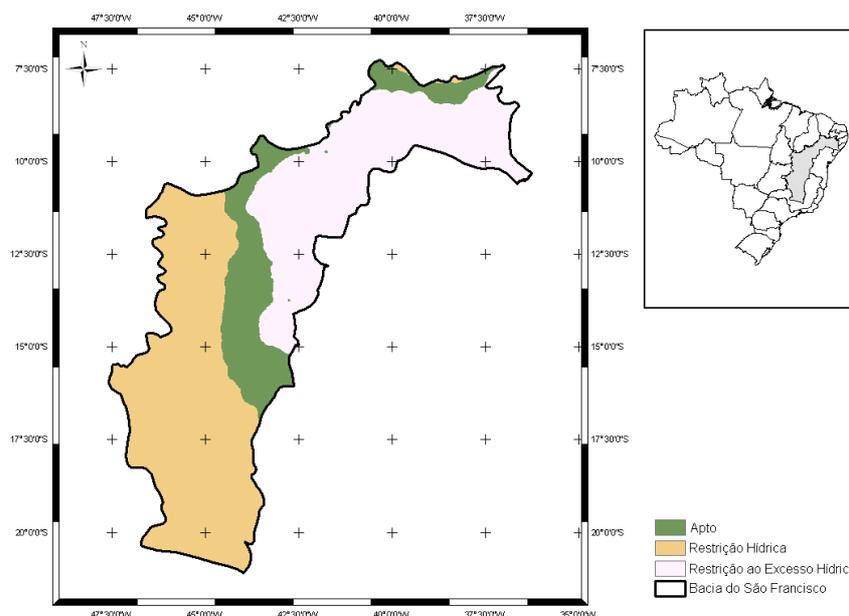


Figura 5.24. Mapa de aptidão da Bacia Rio São Francisco para o cultivo do feijoeiro-comum.

### 5.3.2.7.2 - Feijão (plantado no mês de maio)

Abaixo estão apresentadas às delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura do feijoeiro comum plantado em maio em relação à precipitação, temperatura média e radiação de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.25.

Com o cruzamento das informações da Figura 5.25 foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura do feijoeiro para a bacia do São Francisco, Figura 5.26.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas são: leste do Estado de Alagoas e uma estreita faixa no agreste e Pernambuco. As áreas com restrição hídrica estão situadas no extremo norte de Minas Gerais; oeste de Goiás; oeste, norte e centro do Estado da Bahia; sul e sertão de Pernambuco e leste de Alagoas e Sergipe. As áreas que apresentaram restrição hídrica e térmica estão situadas no norte, região metalúrgica e noroeste de Minas Gerais; leste de Goiás e uma estreita faixa no centro sul e centro norte baiano. O fator determinante para delimitação de extensas áreas com restrição hídrica é o baixo índice pluviométrico neste período do ano.

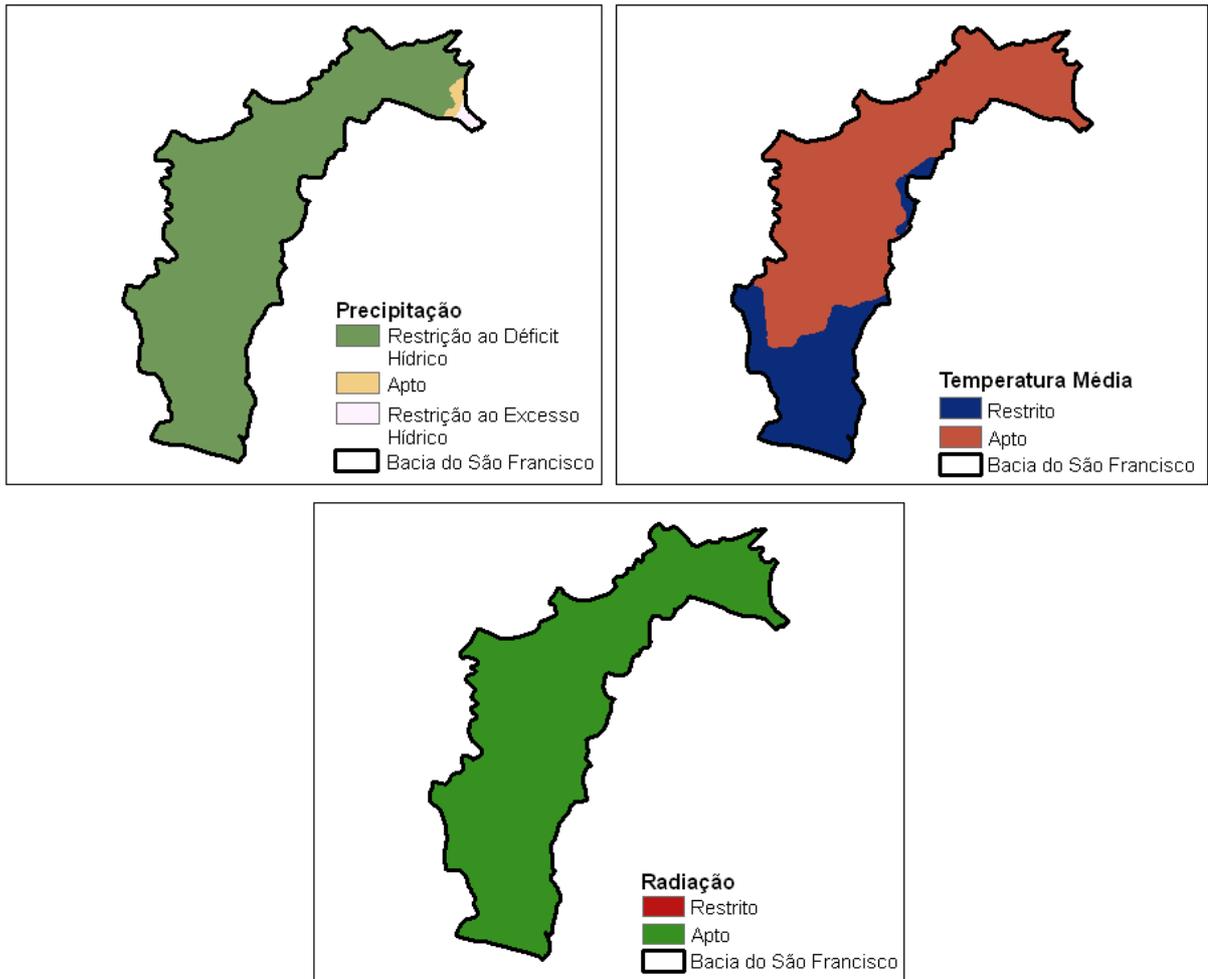


Figura 5.25. Mapas reclassificados de precipitação (esquerda acima), temperatura média (direita acima) e radiação (abaixo) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do feijão plantado em maio.

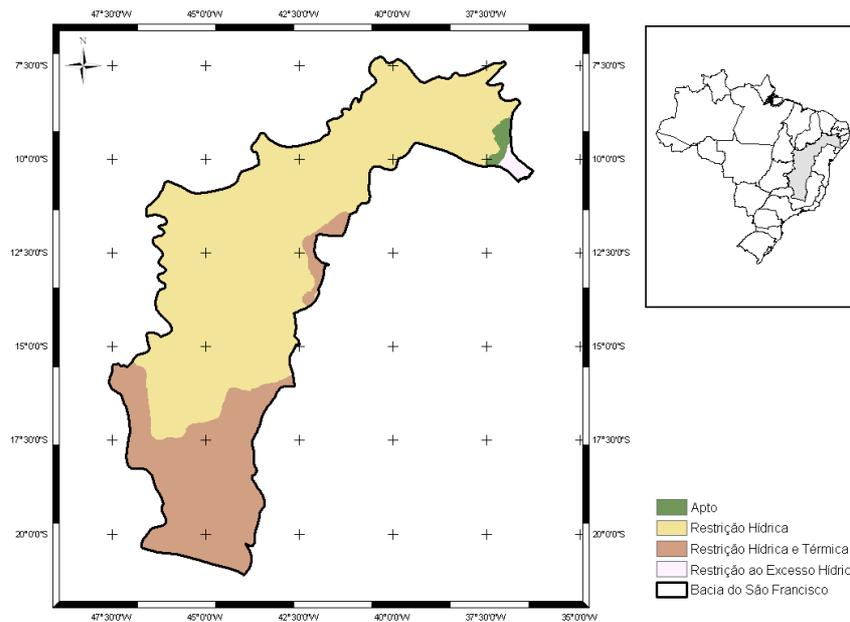


Figura 5.26. Mapa de aptidão da Bacia Rio São Francisco para o cultivo do feijoeiro-comum.

### 5.3.2.7.3 - Feijão (plantado no mês de setembro)

Abaixo estão apresentadas às delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura do feijoeiro comum plantado em setembro em relação à precipitação, temperatura média e radiação de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.27.

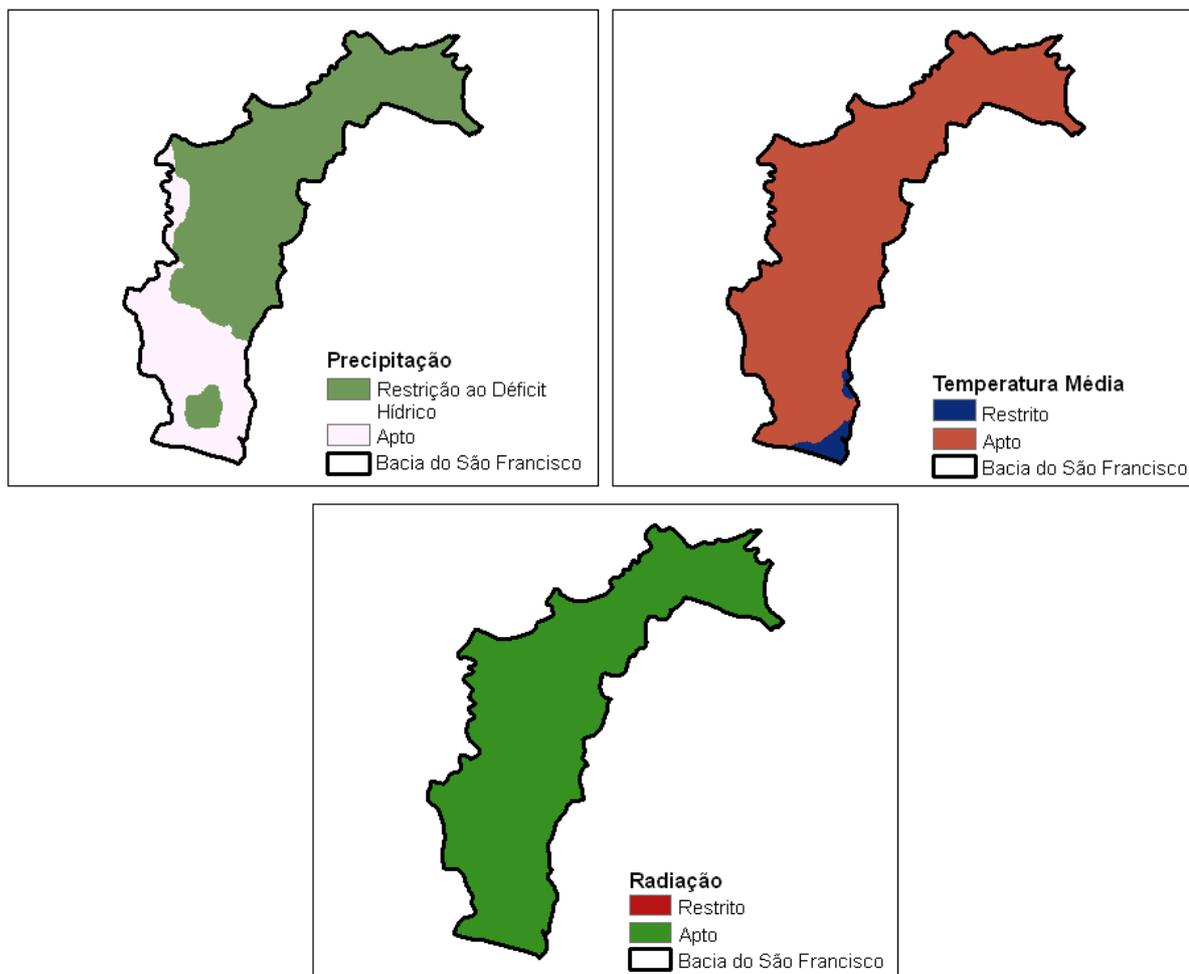


Figura 5.27. Mapas reclassificados de precipitação (esquerda acima), temperatura média (direita acima) e radiação (abaixo) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do feijão plantado em setembro.

Com o cruzamento das informações acima foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura do feijoeiro para a bacia do São Francisco, Figura 5.28.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas são: parte da região norte e noroeste de Minas Gerais; leste do Estado de Goiás; e extremo oeste da Bahia. As áreas com restrição hídrica estão situadas em parte do norte e uma porção da região central mineira; norte e centro do Estado da Bahia; sul e sertão de Pernambuco e parte do Estado de Alagoas e Sergipe. As áreas que apresentaram restrição térmica estão situadas no sul da bacia. O fator

determinante para delimitação de extensas áreas com restrição hídrica é o baixo índice pluviométrico neste período do ano.

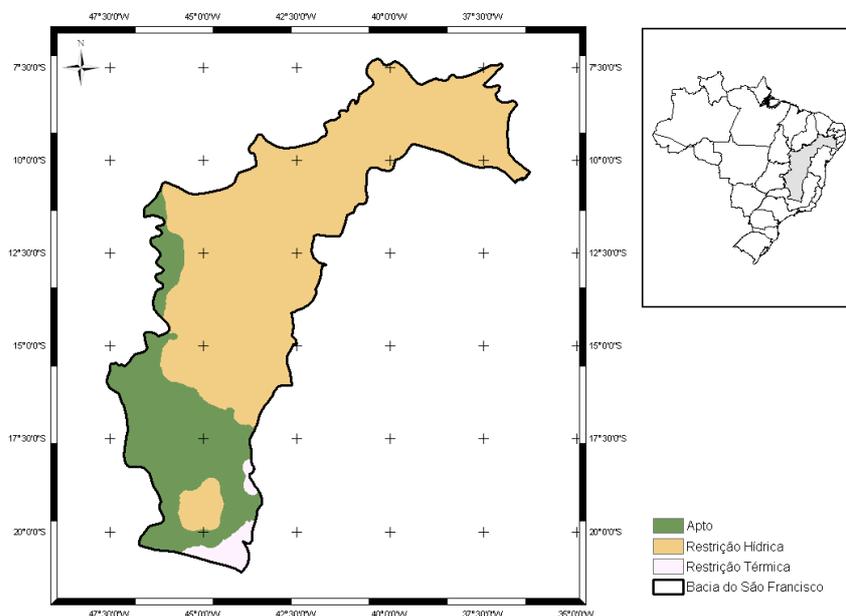


Figura 5.28. Mapa de aptidão da Bacia Rio São Francisco para o cultivo do feijoeiro-comum.

### 5.3.2.8 - Laranja

Abaixo estão apresentadas às delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura da laranja em relação à precipitação, temperatura média e velocidade do vento de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.29.

Com o cruzamento das informações da Figura 5.29 foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura da laranja para a bacia do São Francisco, Figura 5.30.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas são: parte da região norte e noroeste de Minas Gerais; leste do Estado de Goiás; oeste da Bahia e leste do Estado de Alagoas e Sergipe. As áreas com restrição hídrica estão situadas em parte do norte de Minas Gerais; norte e centro do Estado da Bahia; sul e parte do sertão de Pernambuco e parte do Estado de Alagoas e Sergipe. As áreas que apresentaram restrição térmica estão situadas no sul da bacia e sertão pernambucano.

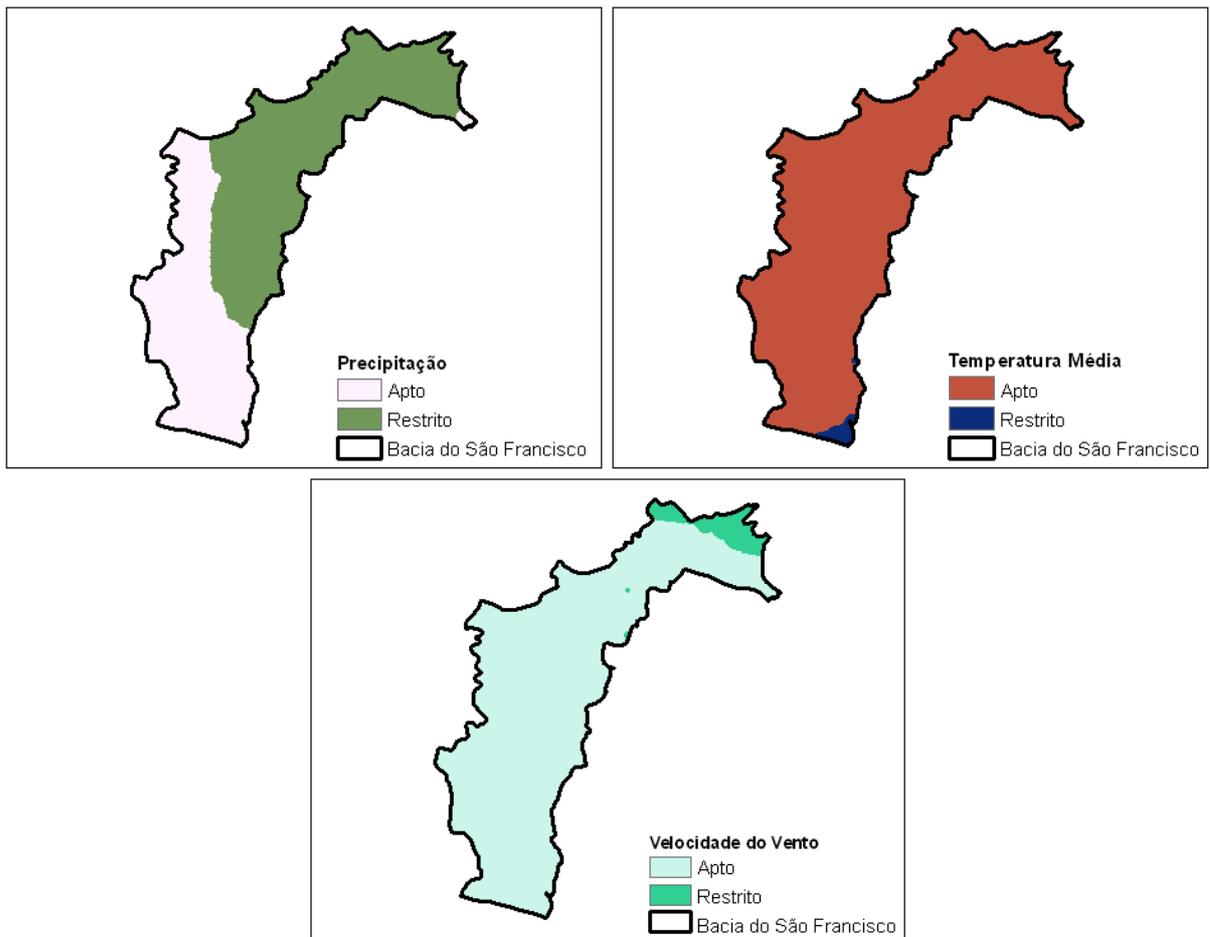


Figura 5.29. Mapas reclassificados de precipitação (esquerda acima), temperatura média (direita acima) e velocidade do vento (abaixo) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da laranja.

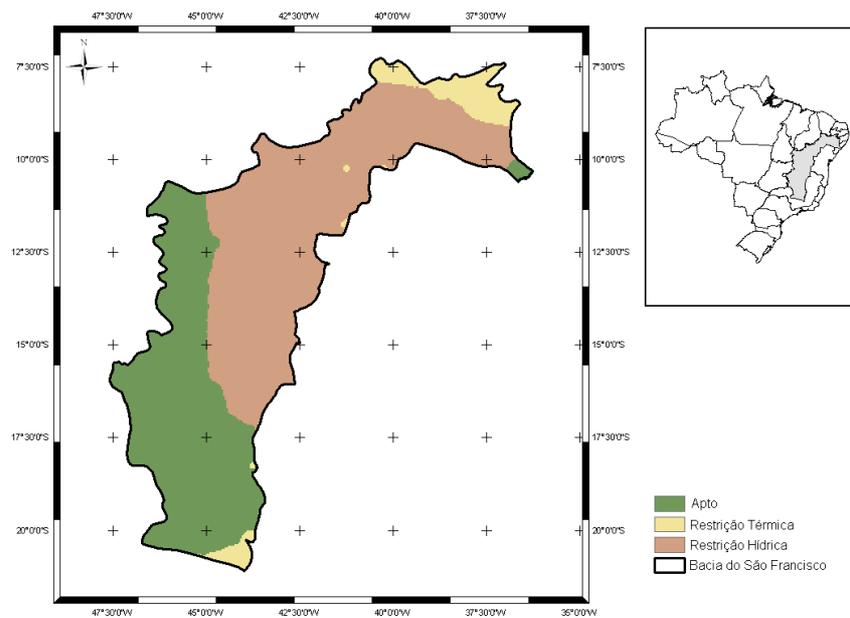


Figura 5.30. Mapa de aptidão da Bacia Rio São Francisco para o cultivo da laranja.

### 5.3.2.9 - Mamona

Abaixo estão apresentadas as delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura da mamona em relação à precipitação, temperatura média e altitude de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.31.

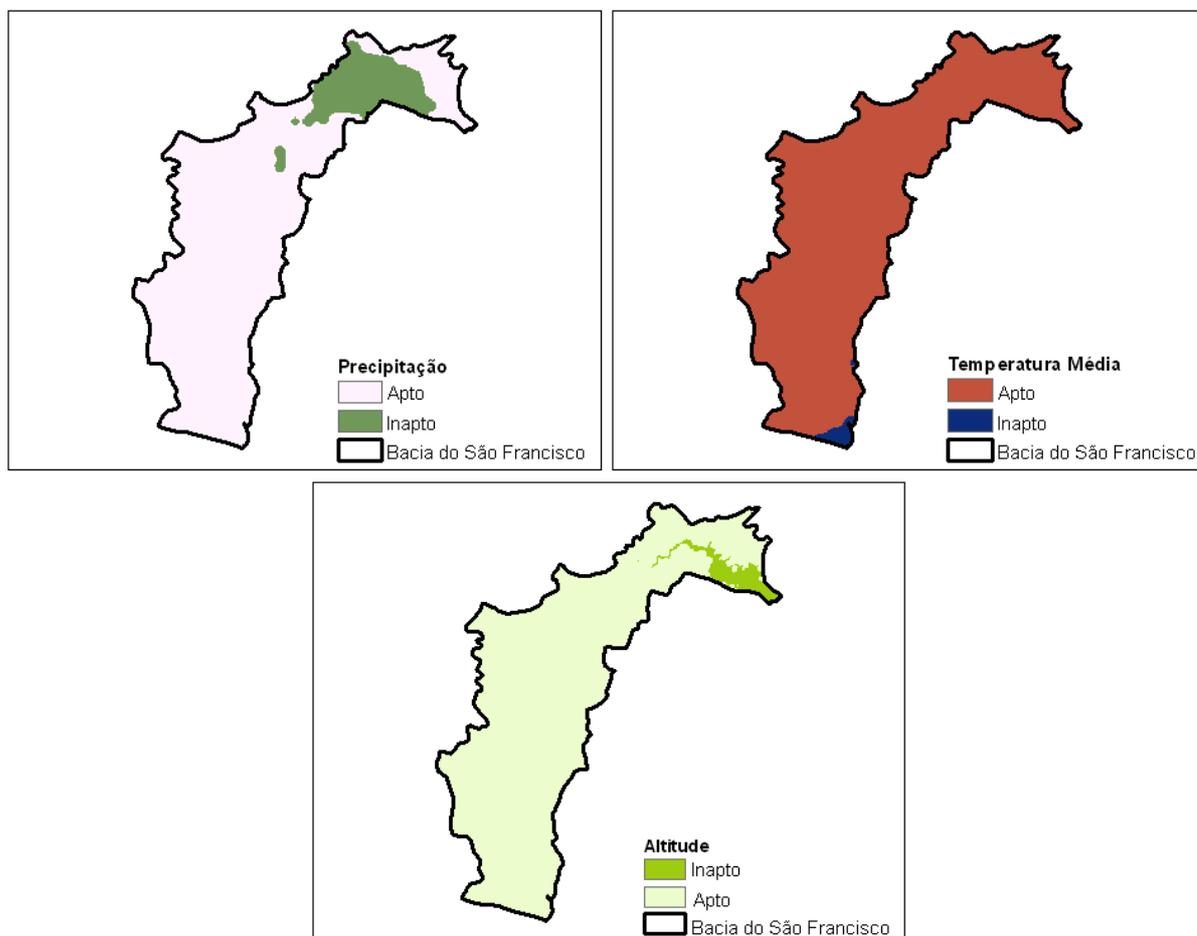


Figura 5.31. Mapas reclassificados de precipitação (esquerda acima), temperatura média (direita acima) e altitude (abaixo) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da mamoneira.

Com o cruzamento das informações acima foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura da mamoneira para a bacia do São Francisco, Figura 5.32.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas são: noroeste, alto São Francisco e norte da região metalúrgica do estado de Minas Gerais; oeste baiano; leste de Goiás; nordeste de Alagoas e a região central do Pernambuco. Verificou-se que o fator determinante para as extensas áreas consideradas aptas pelo zoneamento da mamoneira na Bacia do São Francisco, é a baixa exigência hídrica da cultura, até 500mm anuais, e capacidade de resistir temperaturas elevadas. As áreas inaptas estão situadas ao norte do

estado baiano, sul do Estado de Pernambuco e parte do Estado do Sergipe e Alagoas. Além da limitação da altitude, a precipitação se responsabiliza pela inaptidão ao cultivo da mamoneira, tendo em vista o baixo índice pluviométrico verificado nas regiões.

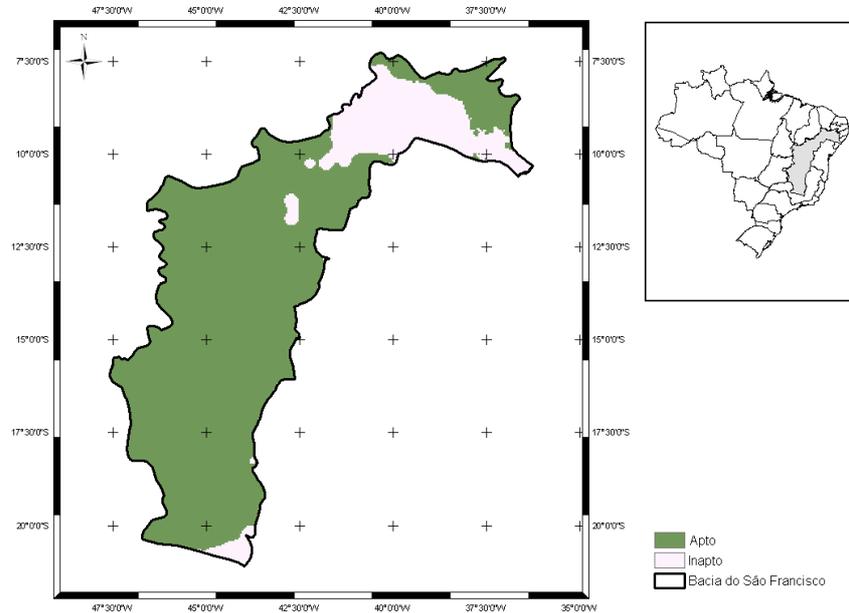


Figura 5.32. Mapa de aptidão da Bacia Rio São Francisco para o cultivo da mamoneira.

### 5.3.2.10 - Mandioca

Abaixo estão apresentadas às delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura da mandioca em relação à precipitação e temperatura média de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.33.

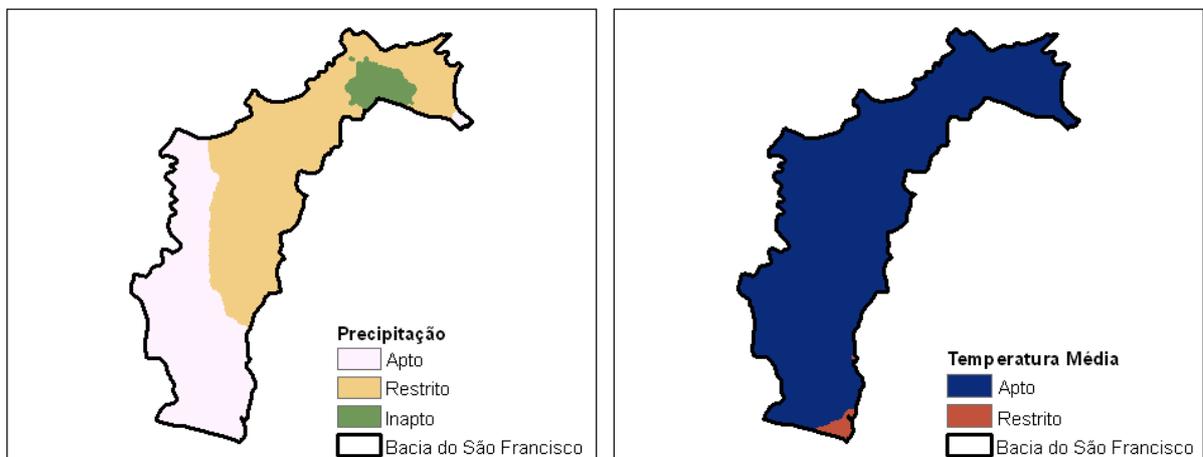


Figura 5.33. Mapas reclassificados de déficit hídrico (esquerda) e temperatura média (direita) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da mandioca.

Com o cruzamento das informações acima foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura da mandioca para a bacia do São Francisco, Figura 5.34.

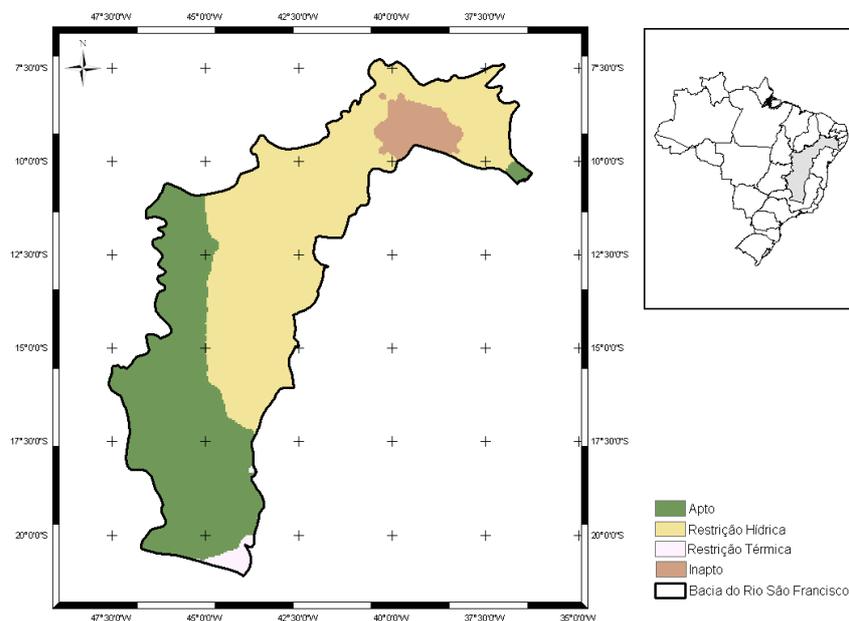


Figura 5.34. Mapa de aptidão da Bacia Rio São Francisco para o cultivo da mandioca.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas são: parte da região norte e noroeste de Minas Gerais; leste do Estado de Goiás; oeste da Bahia e leste do Estado de Alagoas e Sergipe. As áreas com restrição hídrica estão situadas em parte do norte de Minas Gerais; norte e centro do Estado da Bahia; parte do sertão de Pernambuco e parte do Estado de Alagoas e Sergipe. As áreas que apresentaram restrição térmica estão situadas no sul da bacia. As áreas consideradas inaptas ao cultivo da cultura da mandioca estão situadas no vale do São Francisco na Bahia e Pernambuco. O fator que determinou a inaptidão do cultivo desta cultura em algumas áreas da bacia do São Francisco, vale do São Francisco da Bahia e do Pernambuco, foi o baixo índice pluviométrico nestas regiões.

### 5.3.2.11 - Milho

#### 5.3.2.11.1 - Milho (plantado no mês de outubro)

Abaixo estão apresentadas às delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura do milho plantado em outubro em relação à precipitação e temperatura média de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.35.

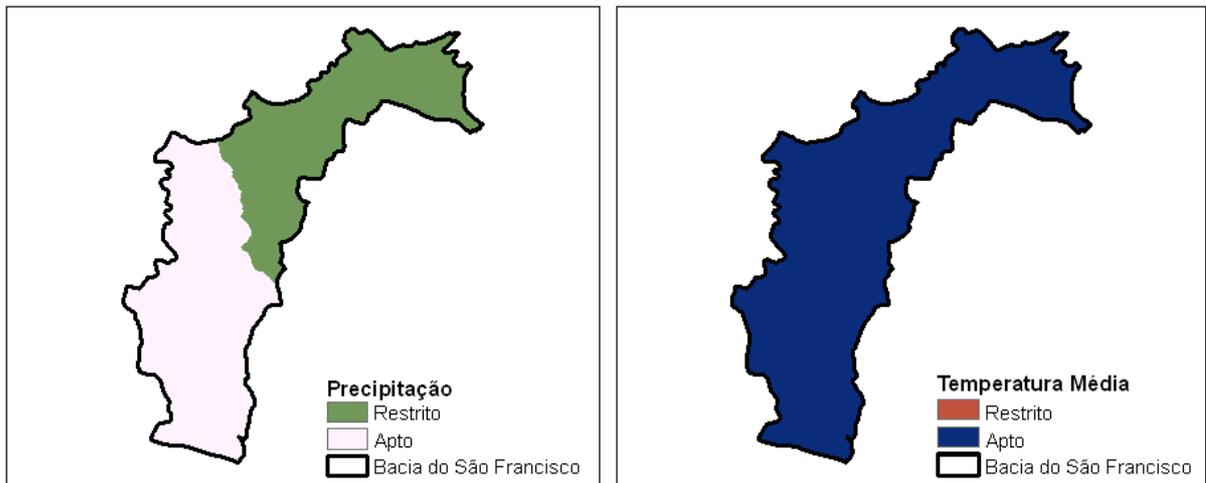


Figura 5.35. Mapas reclassificados de déficit hídrico (esquerda) e temperatura média (direita) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do milho normal.

Com o cruzamento das informações acima foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura do milho para a bacia do São Francisco, Figura 5.36.

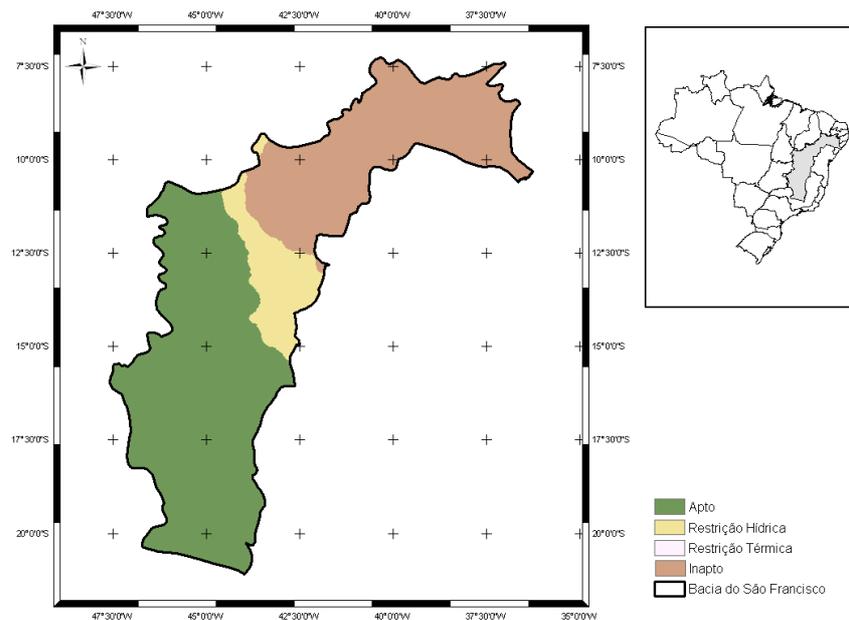


Figura 5.36. Mapa de aptidão da Bacia Rio São Francisco para o cultivo do milho.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas são: norte e noroeste de Minas Gerais; leste de Goiás; extremo oeste da Bahia. As áreas que apresentaram restrição hídrica estão situadas no extremo norte de Minas Gerais; no vale do São Francisco da Bahia e parte do centro sul baiano. As áreas consideradas inaptas ao cultivo do milho na bacia do São Francisco estão situadas no centro norte e em parte no vale do São Francisco baiano; sertão, agreste e vale do São Francisco pernambucano e parte do Estado de Alagoas e Sergipe. O

fator climático que delimitou extensas áreas inaptas ao norte na bacia do São Francisco foi o baixo índice pluviométrico nestas regiões.

### 5.3.2.11.2 - Milho (plantado no mês de fevereiro)

Abaixo estão apresentadas às delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura do milho plantado em fevereiro em relação à precipitação e temperatura média de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.37.

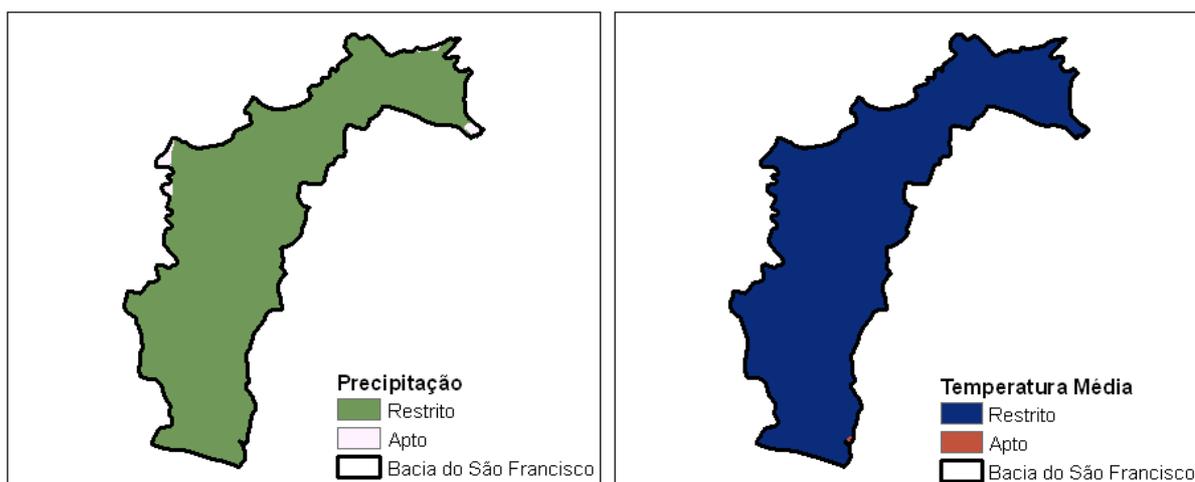


Figura 5.37. Mapas reclassificados de déficit hídrico (esquerda) e temperatura média (direita) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do milho safrinha.

Com o cruzamento das informações acima foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura do milho para a bacia do São Francisco, Figura 5.38.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas estão situadas no extremo oeste baiano; pequenas faixas no extremo norte da bacia, no sertão pernambucano. As áreas que apresentaram restrição hídrica estão situadas no sul da bacia e noroeste do Estado de Minas Gerais; uma pequena faixa no vale do São Francisco e oeste da Bahia; sertão pernambucano e oeste de Sergipe e Alagoas. As áreas que apresentaram restrição hídrica e térmica estão situadas em pequena porção na região metalúrgica do Estado de Minas Gerais. As áreas consideradas inaptas ao cultivo do milho na bacia do São Francisco estão situadas no norte de Minas Gerais e parte da região metalúrgica; centro norte e em parte no vale do São Francisco baiano; sertão, agreste e vale do São Francisco pernambucano.

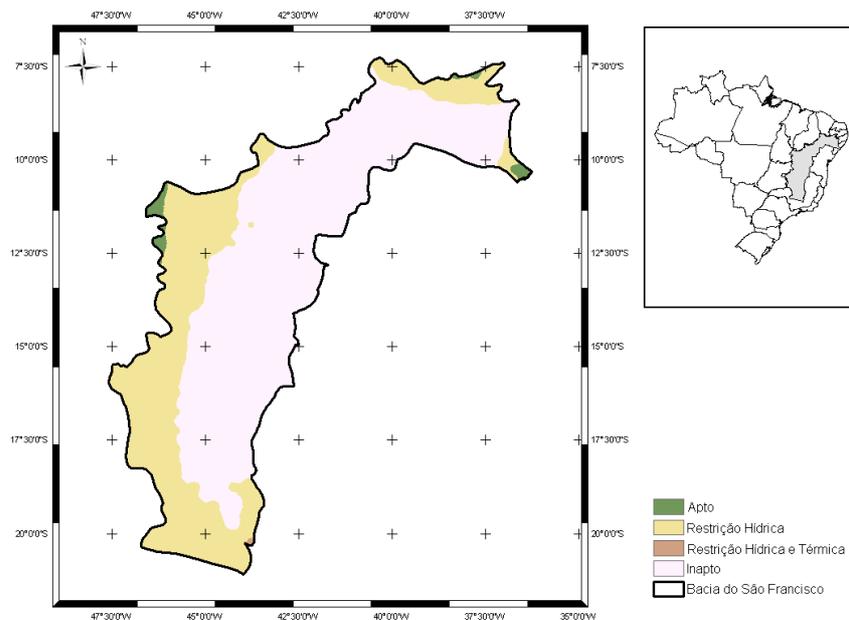


Figura 5.38. Mapa de aptidão da Bacia Rio São Francisco para o cultivo do milho.

### 5.3.2.11.3 - Milho (plantado no mês de agosto)

Abaixo estão apresentadas às delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura do milho plantado em agosto em relação à precipitação e temperatura média de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.39.

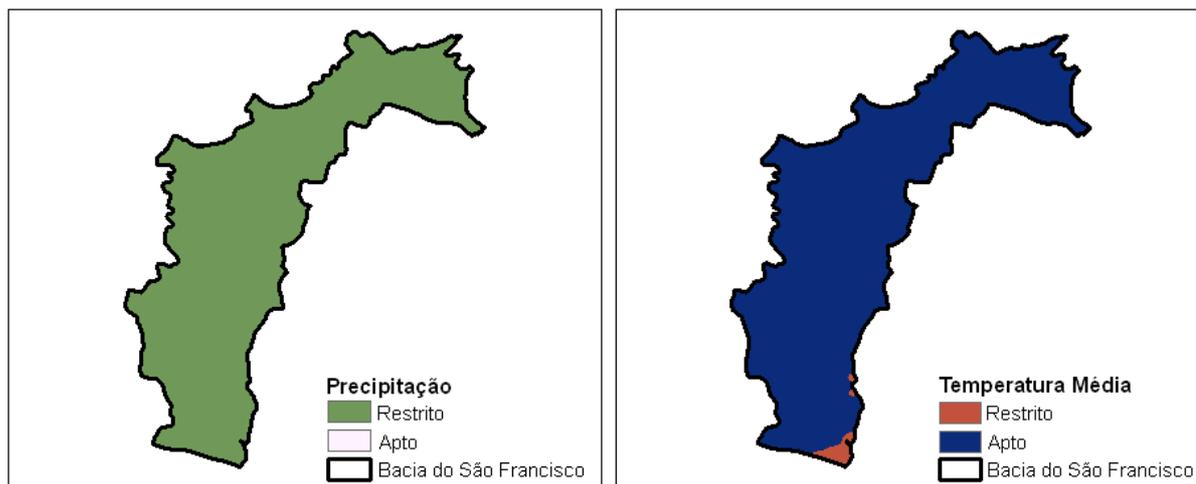


Figura 5.39. Mapas reclassificados de déficit hídrico (esquerda) e temperatura média (direita) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do milho precoce.

Com o cruzamento das informações acima foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura do milho para a bacia do São Francisco, Figura 5.40.

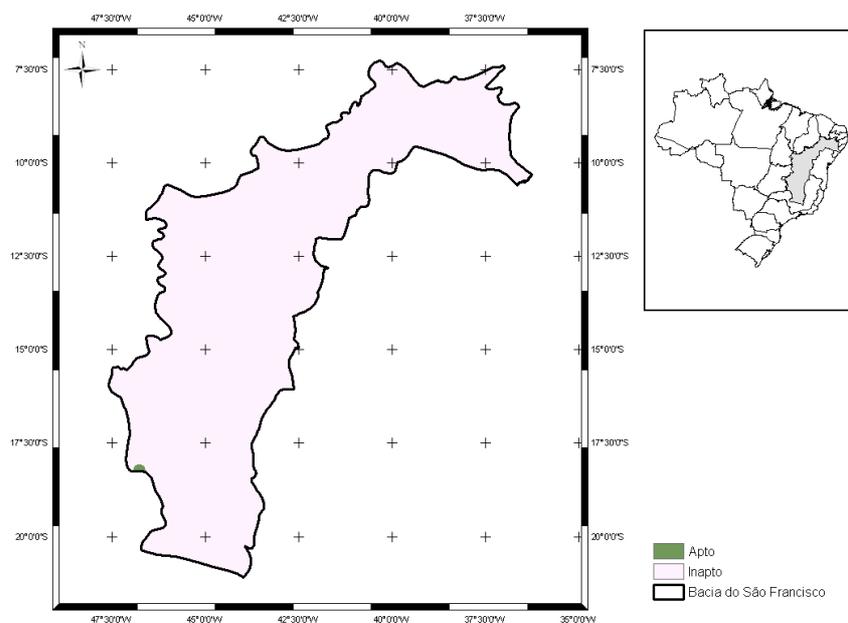


Figura 5.40. Mapa de aptidão da Bacia Rio São Francisco para o cultivo do milho.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas estão situadas somente numa pequena porção no noroeste de Minas Gerais. As demais regiões da bacia do São Francisco são consideradas inaptas ao cultivo do milho quando este for plantado no mês de agosto. O fator climático que delimitou extensas áreas inaptas ao norte na bacia do São Francisco foi o baixo índice pluviométrico nestas regiões.

#### 5.3.2.11.4 - Milho (plantado no mês de dezembro)

Abaixo estão apresentadas às delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura do milho plantado em dezembro em relação à precipitação e temperatura média de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.41.

Com o cruzamento das informações da Figura 5.41 foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura do milho para a bacia do São Francisco, Figura 5.42.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas são: norte e noroeste de Minas Gerais; leste de Goiás; extremo oeste e uma pequena faixa do vale do São Francisco da Bahia. As áreas que apresentaram restrição hídrica estão situadas no extremo norte de Minas Gerais; parte do oeste, centro sul, centro norte e vale do São Francisco da Bahia e sertão do Pernambuco. As áreas consideradas inaptas ao cultivo do milho na bacia do São Francisco estão situadas no centro sul e em parte no vale do São Francisco baiano; sertão, agreste e parte vale do São Francisco pernambucano e além de parte do Estado de Alagoas e Sergipe. O fator

climático que delimitou extensas áreas restritas e inaptas na bacia do São Francisco foi o baixo índice pluviométrico nestas regiões.

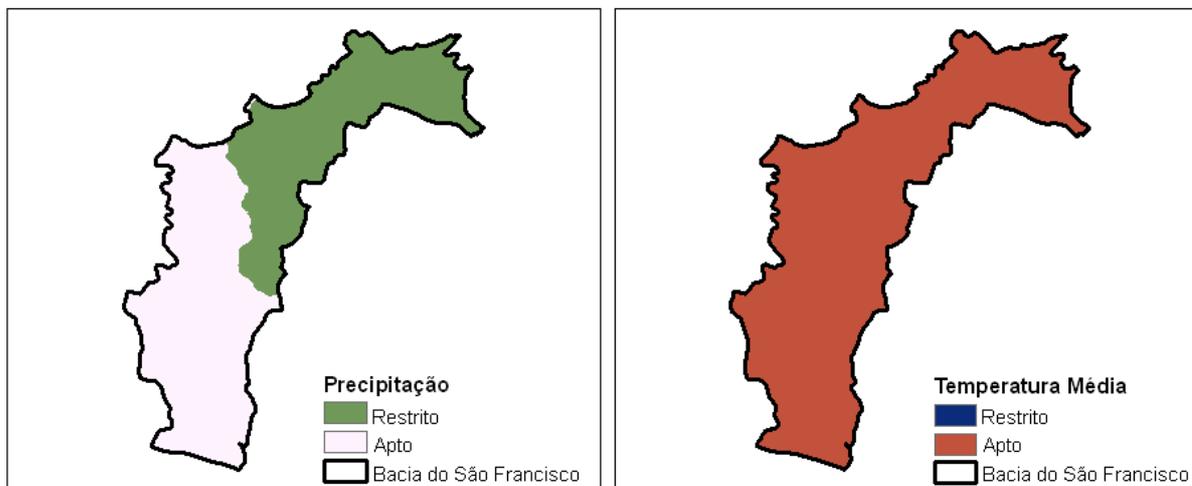


Figura 5.41. Mapas reclassificados de déficit hídrico (esquerda) e temperatura média (direita) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do milho tardio.

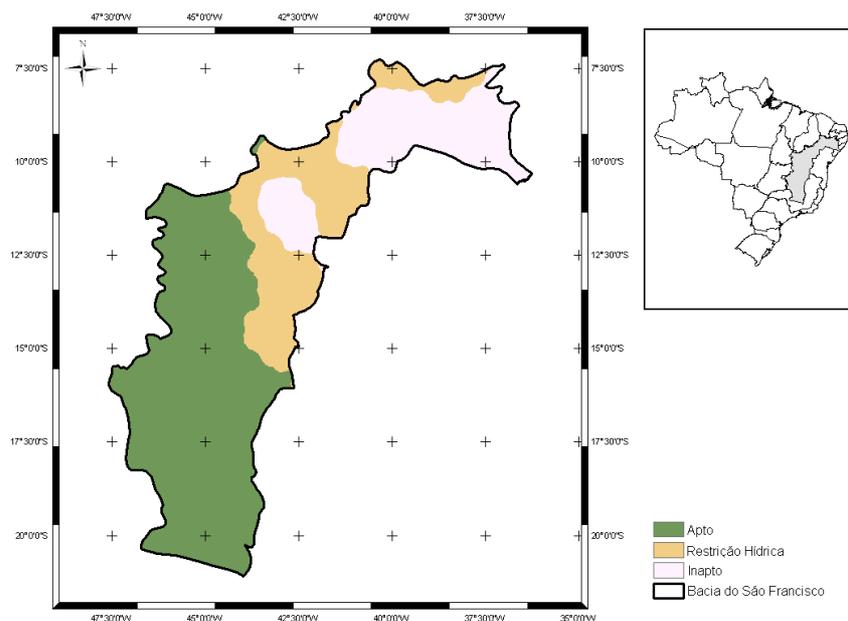


Figura 5.42. Mapa de aptidão da Bacia Rio São Francisco para o cultivo do milho.

### 5.3.2.12 - Soja

#### 5.3.2.12.1 - Soja (plantada no mês de novembro)

Abaixo estão apresentadas às delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura da soja plantada em novembro em relação à precipitação e temperatura média de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.43.

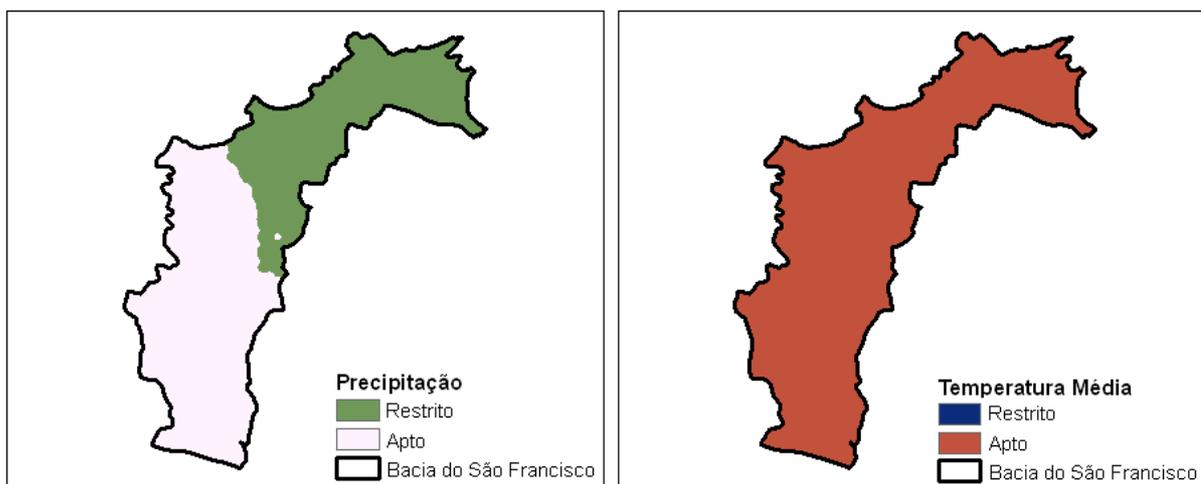


Figura 5.43. Mapas reclassificados de déficit hídrico (esquerda) e temperatura média (direita) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da soja normal.

Com o cruzamento das informações acima foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura da soja para a bacia do São Francisco, Figura 5.44.

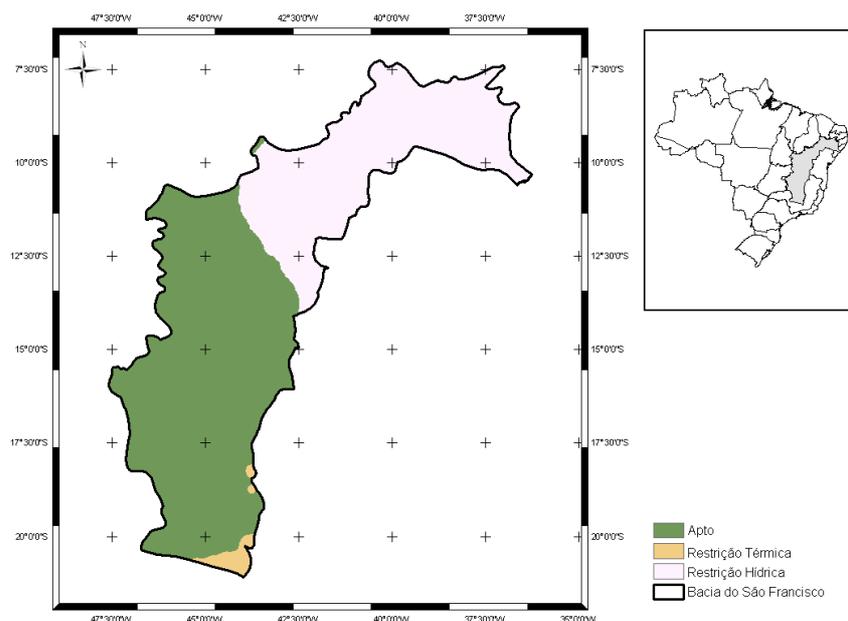


Figura 5.44. Mapa de aptidão da Bacia Rio São Francisco para o cultivo da soja.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas são: região norte e noroeste de Minas Gerais; leste do Estado de Goiás; oeste e uma pequena faixa no vale do São Francisco da Bahia. As áreas com restrição hídrica estão situadas em parte do norte e região metalúrgica de Minas Gerais; norte e centro do Estado da Bahia; sertão, agreste e vale do São Francisco de Pernambuco e além de parte do Estado de Alagoas e Sergipe. As áreas que apresentaram restrição térmica estão situadas no sul da bacia. O fator que determinou a

restrição do cultivo desta cultura em algumas áreas da bacia do São Francisco foi o baixo índice pluviométrico nestas regiões.

### 5.3.2.12.2 - Soja (plantada no mês de fevereiro)

Abaixo estão apresentadas às delimitações das áreas consideradas aptas, restritas e inaptas para a cultura da soja plantada em fevereiro em relação à precipitação e temperatura média de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura, ou seja, suas necessidades edafoclimáticas, Figura 5.45.

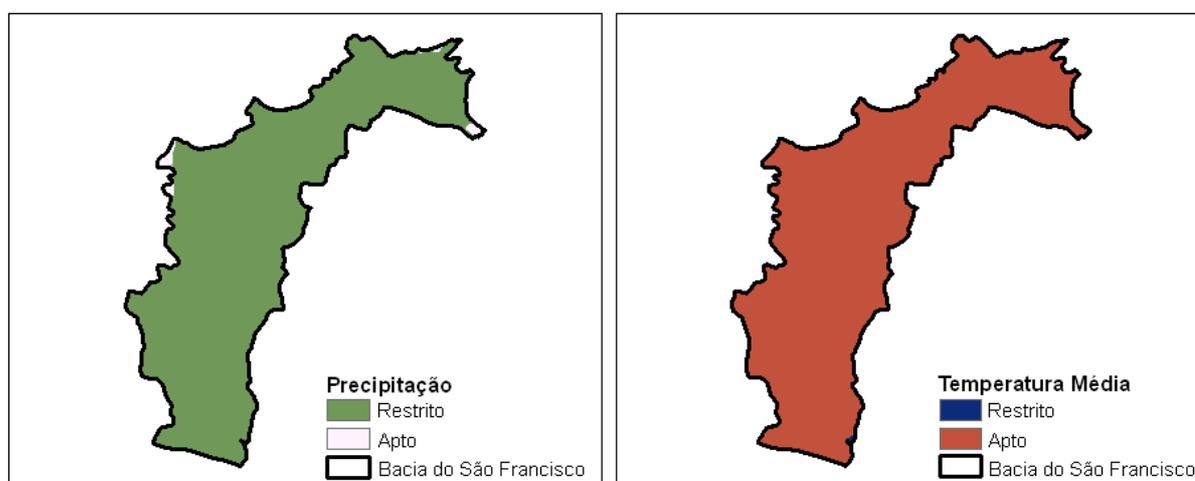


Figura 5.45. Mapas reclassificados de déficit hídrico (esquerda) e temperatura média (direita) segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da soja safrinha.

Com o cruzamento das informações acima foi obtido o mapa de zoneamento agroclimático da cultura da soja para a bacia do São Francisco, Figura 5.46.

De acordo com o mapa gerado, as áreas consideradas aptas estão situadas no extremo oeste baiano; leste de Goiás e pequenas faixas no extremo norte da bacia, no sertão pernambucano leste de Sergipe e Alagoas. As áreas que apresentaram restrição térmica estão situadas na região metalúrgica, norte e noroeste do Estado de Minas Gerais; vale do São Francisco e oeste da Bahia; sertão, agreste e vale do São Francisco pernambucano. As áreas que apresentaram restrição hídrica e térmica estão situadas em pequena porção na região metalúrgica do Estado de Minas Gerais. O fator que determinou a restrição do cultivo desta cultura em algumas áreas da bacia do São Francisco foi o baixo índice pluviométrico nestas regiões.

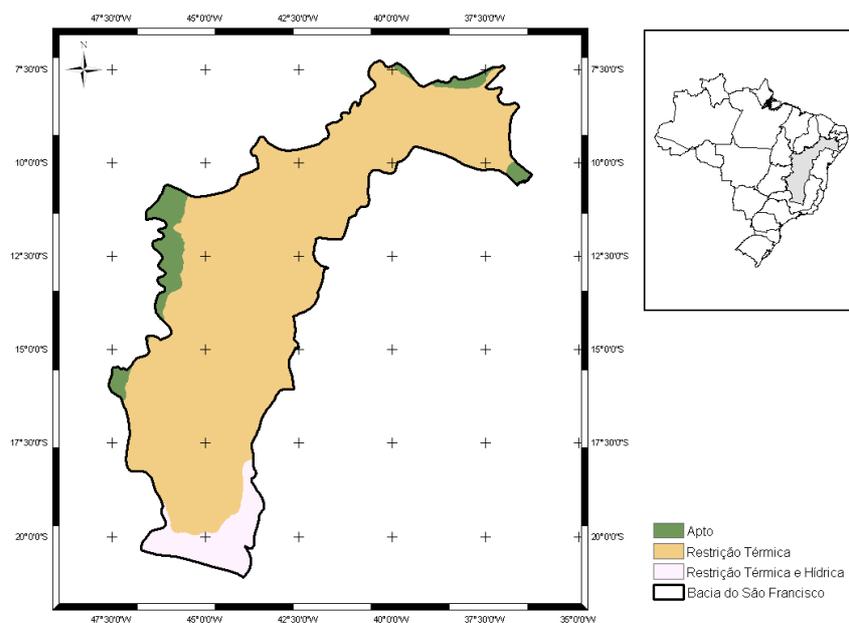


Figura 5.46. Mapa de aptidão da Bacia Rio São Francisco para o cultivo da soja.

## 5.4 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos foram satisfatórios e observou-se a necessidade de realizar novos zoneamentos a partir dos cenários de mudanças climáticas.

Portanto, o capítulo que segue apresenta zoneamentos agroclimáticos considerando-se alterações no clima, de acordo com diversos cenários.

## 5.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, E. J.; OLIVEIRA, M. A.; DANTAS, J. L. L.; OLIVEIRA, S.L. Exigências climáticas. In: ALVES, E. J. (ed). A cultura da banana: Aspectos técnicos, socioeconômicos e agroindustriais. 2. ed., ver. - Brasília: Embrapa - SP7/Cruz das almas: Embrapa - CNPMF, p.35-46, 1999.
- AMARAL, E.F.; BARDALES, N.G.; AMARAL, E.F.; ARAÚJO, E.A.; PINHEIRO, C.L.S.; SOUZA, A. Aptidões dos solos do Acre para o cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum* L.). Embrapa Acre, dez./2001. 7p. (Comunicado Técnico, nº 143).
- AMORIM NETO, M.S.; ARAÚJO, E.A.; CARAMORI, P.H.; GONÇALVES, S.L.; WREGGE, M.S.; LAZZAROTTO, C.; LAMAS F.M.; SANS, L.M.A. Zoneamento agroecológico do algodoeiro e definição da época de semeadura do algodoeiro no Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Passo Fundo, v.9, n.3, p.422-428, 2001. (Nº. Especial: Zoneamento Agrícola).
- ANDRADE, M. J.B.; CARVALHO, A. J. e; VIEIRA, N. M. B. Exigências edafoclimáticas.

- In: VIEIRA, C.; JÚNIOR, T. J. de .P.; BORÉM, A. (ed). Feijão. 2 ed. Atual. - Viçosa: Ed. UFV, p.67-86, 2006.
- CARVALHO JUNIOR, W.; CHAGAS, C.S.; PEREIRA, N.R.; ZARONI, M.J.; BHERING, S.B. Zoneamento pedoclimático do Paraná para a cultura do Algodão Herbáceo. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2001. (Embrapa Solos. Documentos: nº 38).
- CHAGAS, C.S.; CARVALHO JUNIOR, W.; PEREIRA, N.R.; ZARONI, M.J.; BHERING, S.B. Zoneamento pedoclimático do Rio Grande do Sul para a cultura da maçã. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2000. (Embrapa Solos. Documentos: nº 27).
- COSTA, A. C. S. da. Balanço hídrico em culturas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e de milho (*Zea may* L.) sob condições de campo. Piracicaba, SP: ESALQ, 1986. 166p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 1986.
- COSTA, J. M. N.; ANTUNES, F. Z.; SANTANA, D. P. 1986. Zoneamento agroclimático e planejamento agrícola. Belo Horizonte. Informe Agropecuário, n.138, 1986, p. 14-17.
- CUNHA, G. R., BARNI, N.A., HAAS, J.C. et. al. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Passo Fundo, v.9, n.3, p. 446-459, 2001. Número Especial - Zoneamento Agrícola.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Banana. Sistema de produção, 2003. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Banana/>. Acesso em: 13 de Outubro de 2006.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Mamona. Zoneamento para o Nordeste, 2006. Disponível em: <http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/mamona/zoneamento.html>. Acesso em: 13 de Outubro de 2006.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Mandioca. Mandioca no semi-árido, 2003. Disponível em: [http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mandioca/mandioca\\_semiarido/](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mandioca/mandioca_semiarido/). Acesso em: 13 de Outubro de 2006.
- FANCELI, A. L.; DOURADO NETO, D. Estresses de água e temperatura na cultura do feijão. In: FANCELI, A. L.; DOURADO NETO, D. (ed.) Feijão irrigado: estratégias básicas de manejo. Piracicaba: Publique, p155-169, 1999.
- IBGE - SIDRA (Produção Agrícola Municipal - PAM). <http://www.sidra.ibge.gov>
- KASSAB, A. L. Algodão: do artesanado indígena ao processamento industrial. São paulo, SP: Editora Ícone, 1986, 92.
- KOLLER, O. C. Citricultura: laranja, limão e tangerina. Porto Alegre: Editora Rígel, p.65-98, 1994.
- MIRISIOLA FILHO, L. A. Cultivo do coco anão. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2002. 322p.
- OMMETO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo, Editora Ceres, 440p., 1981.

- PEREIRA, C. R. Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais. Viçosa, MG: UFV, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- ROSSETI, L.A. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e securidade rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Passo Fundo, RS, v.9, n.3, p.386-399, 2001. (Nº. Especial: Zoneamento Agrícola).
- SEDIYAMA, G.C.; MELO JUNIOR, J.C.F.; SANTOS, A.R.; RIBEIRO, A.; COSTA, M.H.; HAMAKAWA, P.J.; COSTA, J.M.N.; COSTA, L.C. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arábica* L.) de Minas Gerais. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Passo Fundo, RS, v.9, n.3, p.501-509, 2001. (Nº. Especial: Zoneamento Agrícola).
- SILVA, T. C. A. da. Relações entre alguns fatores climáticos com crescimento e rendimento da cana de açúcar. Turrialba, Costa Rica: IICA, 1969. 63p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrícolas). Instituto Interamericano de Ciências agrícolas da OEA, 1969.
- SILVA, T. G. F. da. Zoneamento agroclimático do Estado da Bahia para a cultura da atemóia (*Annona cherimola* Mill. X *Annona squamosa* L.). Viçosa, MG: UFV, 2006. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2006.
- VIEIRA, C. O feijoeiro - comum: cultura, doenças e melhoramento. Viçosa, UFV, Impr. Univ. , 220p., 1967.

## **CAPÍTULO 6**

### **REALIZAÇÃO DE ZONEAMENTO CLIMÁTICO CONSIDERANDO AS CONDIÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS ADVINDAS DO EFEITO ESTUFA**

Aristides Ribeiro

Robson Alves de Oliveira

Jonathas Batista G. Silva

## **6.1 - INTRODUÇÃO**

Atualmente o tema mudanças climáticas tem ganhado relevância entre os pesquisadores, que vem focando seus trabalhos em analisar os impactos dessas mudanças nos mais diferentes setores em todo o mundo. A agricultura devido ao fato de ser fortemente dependente da variabilidade climática, certamente sofrerá influência direta dessas mudanças do clima no manejo e na produção agrícola e, conseqüentemente, na vida humana sob muitos aspectos.

Grande parte das perdas agrícolas brasileiras ocorre em função do clima e de acordo com estudos da Confederação Nacional da Agricultura (CNA), o setor agrícola brasileiro perdeu 26,5 milhões de toneladas da produção por causa de fatores climáticos, nos últimos dois anos (Secretaria de Agricultura - MG, 2007). Logo, para aumentar a seguridade e sustentabilidade da agricultura é necessário que se façam estudos agroclimáticos que permitam, não só, estabelecer indicadores do potencial da região, assim como a introdução de certa cultura.

O presente trabalho teve como objetivo elaborar uma projeção de aptidão agroclimática para diversas culturas na bacia do São Francisco para os cenários de mudanças climáticas considerando as principais culturas cultivadas na bacia e aquelas que possuem alto potencial para a implantação do cultivo

## **6.2 - MATERIAL E MÉTODOS.**

O trabalho ora proposto foi realizado no Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

Dentre as culturas selecionadas para elaboração deste trabalho estão as principais espécies cultivadas no país e na bacia do São Francisco. Além deste critério adotado para seleção das culturas, foram selecionadas espécies que apresentam alto potencial para a implantação do cultivo na bacia, levando em consideração as características climáticas da região e necessidades da cultura, fatores econômicos e tecnológicos exigido por estas. As culturas selecionadas foram: algodão, banana, café-arábica, café-robusta, cana-de-açúcar, coco-anão, feijão, laranja, mamona, mandioca, milho e soja

Para desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados climáticos da Bacia do São Francisco e de suas regiões limítrofes, obtidos do Climatic Research Unit, (CRU), com resolução espacial de meio grau, ou seja, 55,5 quilômetros.

O modelo digital de elevação do terreno utilizado foi o Gtopo 30, com resolução espacial de 30". Foram utilizados dados do modelo acoplado oceano-atmosfera do Center for Climate Studies and Research CCSR/National Institute for Environmental Studies NIES, do Japão (CCSR/NIES), para os cenários A2 e B2.

Para torna possível este estudo foi necessário realizar uma redução de escala (downscaling) do modelo CCSR/NIES por meio de uma técnica simplificada, com o intuito de reproduzir melhor os detalhes climáticos regionais.

Foram utilizados neste estudo três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para cada cenário, A2 e B2, do downscaling do CCSR/NIES, entretanto, foi necessário fazer uma correção dos dados modelados para o futuro em relação aos dados observados, como se vê nas equações abaixo:

$$\text{erro} = \text{CRUBase} - \text{CCSR/NIESBase}$$

$$\text{Correção} = \text{CCSR/NIESFuturo} + \text{erro}$$

CCSR/ NIESBase - Dados do downscaling do CCSR/NIES no período 1961-1990;

CRUBase - Dados do CRU no período 1961-1990;

CCSR / NIES futuro - Dados do downscaling do CCSR/NIES GCM nos períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100.

O método de interpolação utilizado foi o Inverso da Distância Ponderada (IDW), o qual é comumente usado em SIGs para gerar mapas temáticos no formato matricial de elementos climáticos a partir de dados pontuais. O algoritmo IDW calcula estimativas de valores desconhecidos dependendo dos valores vizinhos. A distância atua como o peso e o expoente usado permite ajustamentos a esse peso: maiores expoentes, maior a influência do valor vizinho conhecido. Utilizou-se neste trabalho um expoente com valor igual a 2 (dois).

Uma vez realizada a interpolação dos dados climáticos, os mapas gerados foram reclassificados segundo os parâmetros técnicos estabelecidos para a cada cultura em estudo. Abaixo estão apresentados os parâmetros técnicos adotados para cada cultura, Quadros 6.1 a 6.12.

Quadro 6.1. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do algodão (KASSAB, 1986).

Parâmetros Técnicos	Algodão		
	Faixas de Aptidão		
	Apto	Restrito	Inapto
Temperatura (°C)	> 20	< 20	-
Precipitação (mm)	500 - 1500	> 1500	-

Quadro 6.2. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da banana (EMBRAPA, 2003).

<b>Banana</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	18 - 34	15 - 18; 34 - 35	< 15; > 35
Precipitação (mm)	> 1200	< 1200	-

Quadro 6.3. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do cafeeiro (café arábica) (SEDIYAMA et. al., 2001).

<b>Café Arábica</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	18 - 22	18 - 19; 22 - 23	< 18; > 23
Déficit Hídrico (mm)	< 150	150 - 200	> 200

Quadro 6.4. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do cafeeiro (café robusta) (SEDIYAMA et. al., 2001).

<b>Café Robusta</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	22 - 26	21 - 22	< 21
Déficit Hídrico (mm)	< 200	200 - 400	> 400

Quadro 6.5. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da cana de açúcar (SILVA, 1969).

<b>Cana-de-açúcar</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	19 - 35	15 - 18	< 15; > 47
Precipitação (mm)	1000 - 1500	< 1000	-

Quadro 6.6. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do coco anão (MIRISIOLA FILHO, 2002).

<b>Coco-anão</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	20 - 32	15 - 20	< 15
Precipitação (mm / mês)	500	< 500	-
Umidade Relativa do Ar (%)	> 60	< 60	-
Altitude (m)	< 500	> 500	-

Quadro 6.7. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do feijoeiro comum (VIEIRA, 1967; FANCELI e DOURADO NETO, 1999).

<b>Feijão</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	21 - 29	12 - 21	< 12; > 29
Precipitação (mm / ciclo)	300 - 400	< 300; > 400	-
Radiação (W / m <sup>2</sup> )	150 - 250	< 150	-

Quadro 6.8. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da laranja (KOLLER, 1994)

<b>Laranja</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	20 - 30	< 20	< 12; > 29
Precipitação (mm / ciclo)	1000 - 2000	< 1000	-
Velocidade do vento (m / s)	< 2,78	> 2,78	-

Quadro 6.9. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da mamoneira (EMBRAPA, 2006).

<b>Mamona</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	20 - 30	-	< 20; > 30
Precipitação (mm)	> 500	-	< 500
Altitude (m)	300 - 1500	-	< 300

Quadro 6.10. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da mandioca (EMBRAPA, 2003).

<b>Mandioca</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	20 - 27	15 - 20	< 15
Precipitação (mm)	1000 - 1500	400 - 1000	< 400

Quadro 6.11. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura do milho (COSTA, 1986).

<b>Milho</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	> 20	< 20	-
Precipitação (mm / ciclo)	500 - 800	< 500	-

Quadro 6.12. Parâmetros técnicos estabelecidos para a cultura da soja (PEREIRA, 2002)

<b>Soja</b>			
<b>Parâmetros Técnicos</b>	<b>Faixas de Aptidão</b>		
	<b>Apto</b>	<b>Restrito</b>	<b>Inapto</b>
Temperatura (°C)	> 22	< 22	-
Precipitação (mm / ciclo)	450 - 800	< 450	-

A partir destes resultados e através de uma operação de álgebra de mapas disponível no Spatial Analysis (Map Calculator), um único mapa foi produzido, o qual consta das áreas aptas, restritas e inaptas ao cultivo destas espécies na Bacia do São Francisco.

## 6.3 - RESULTADOS

### 6.3.1 - Caracterização climática da bacia do São Francisco para cenários de mudanças climáticas

#### 6.3.1.1 - Temperatura média anual

Nas Figuras 6.1 a 6.6 estão apresentadas as projeções de temperatura média anual para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100), para os cenários A2 e B2.

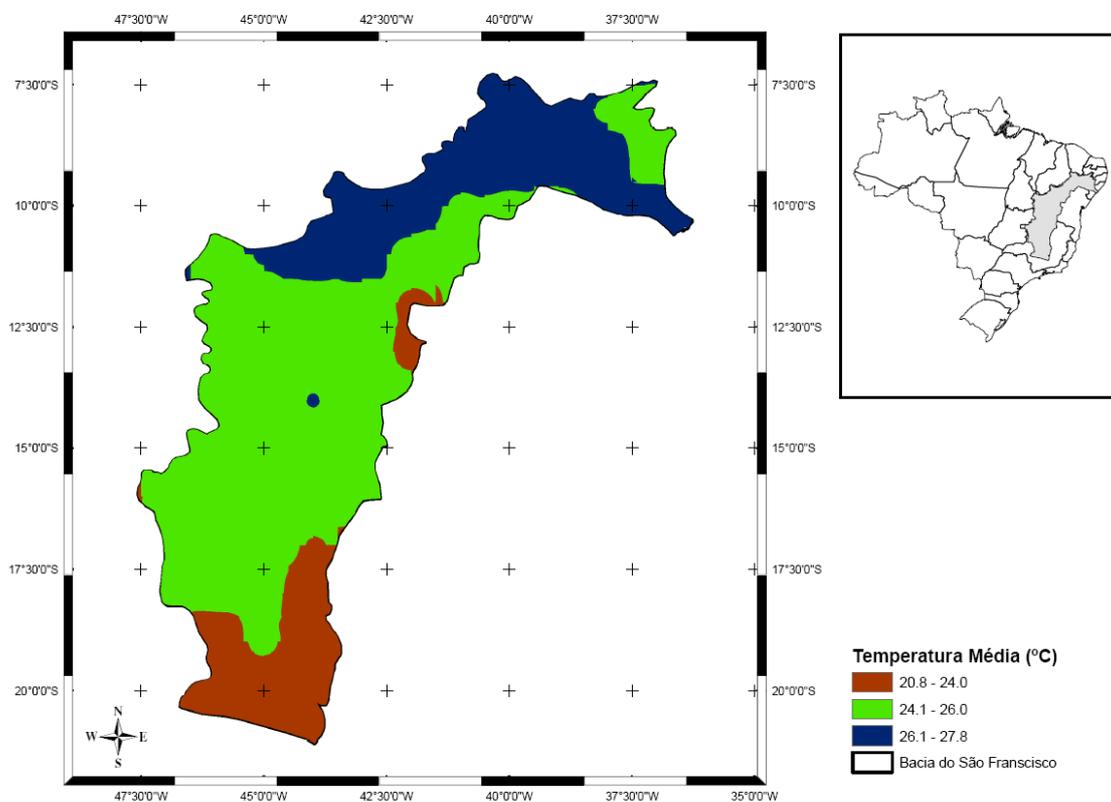


Figura 6.1. Temperatura média anual para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

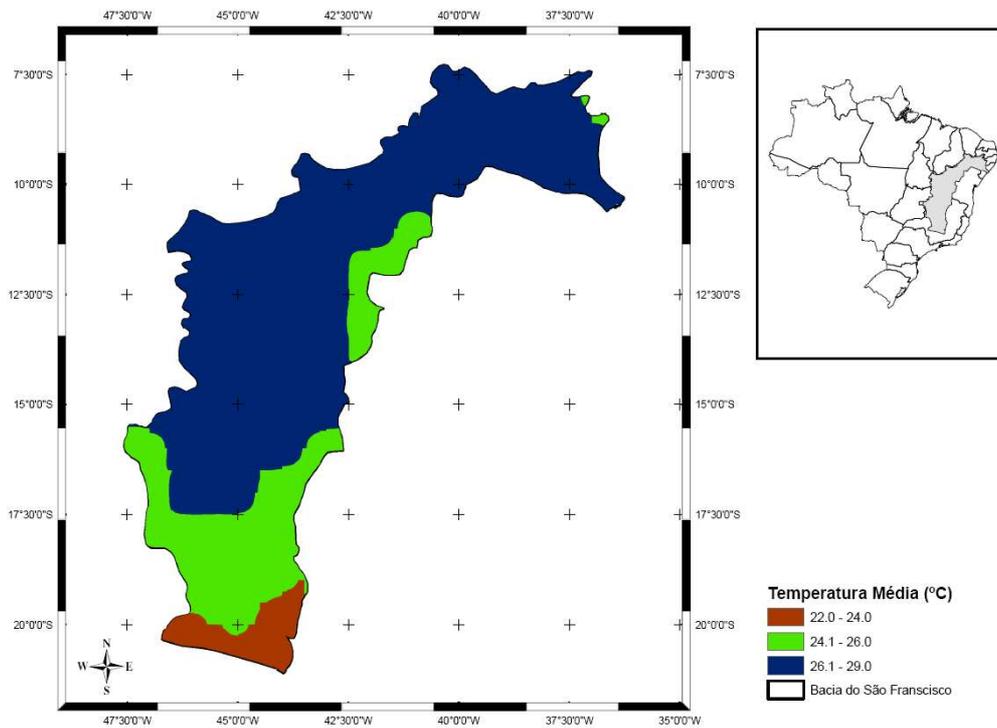


Figura 6.2. Temperatura média anual para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

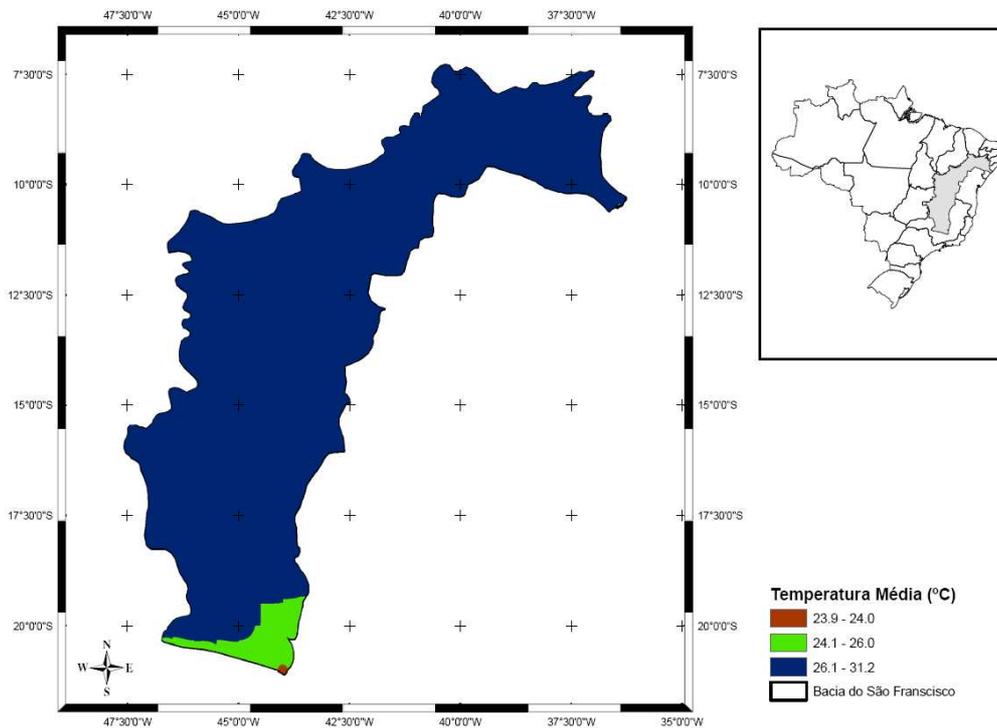


Figura 6.3. Temperatura média anual para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

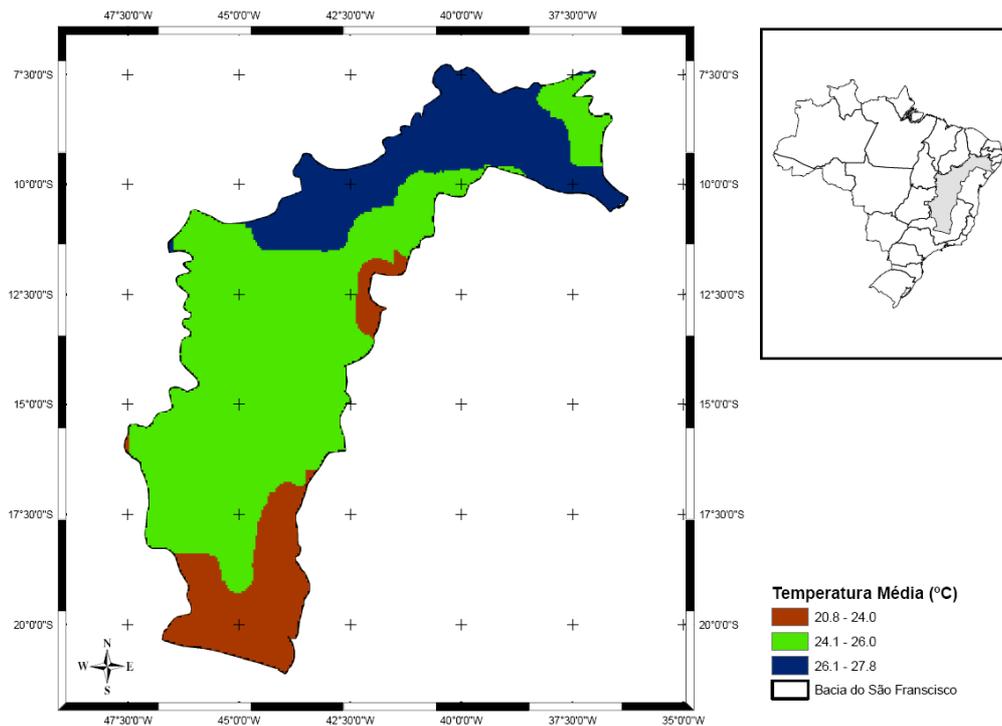


Figura 6.4. Temperatura média anual para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

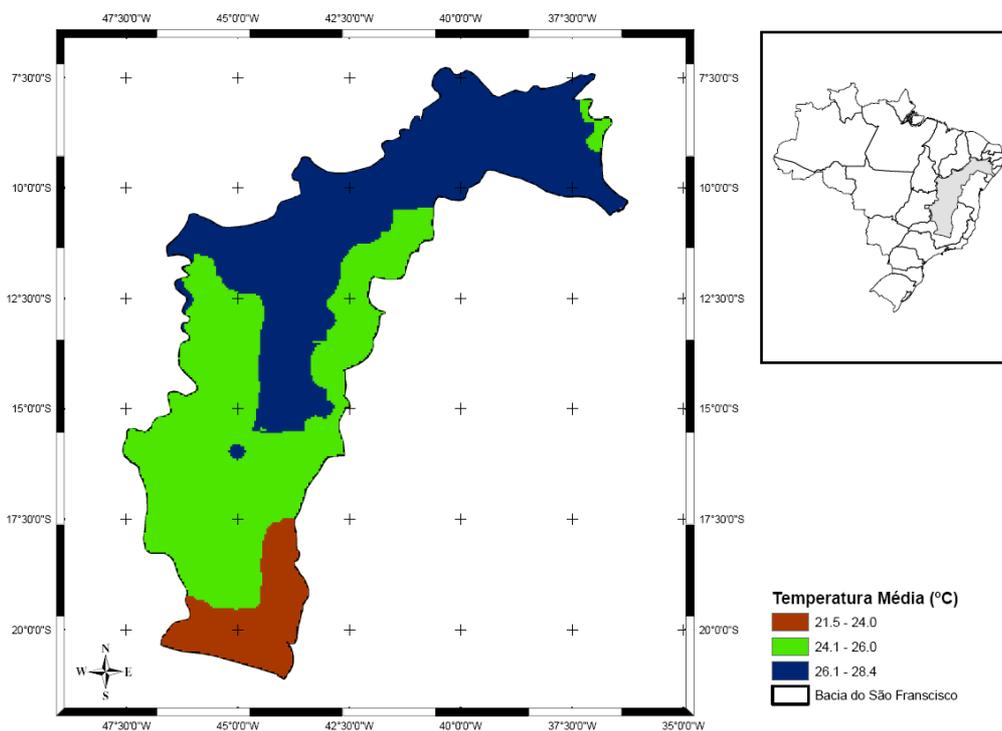


Figura 6.5. Temperatura média anual para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

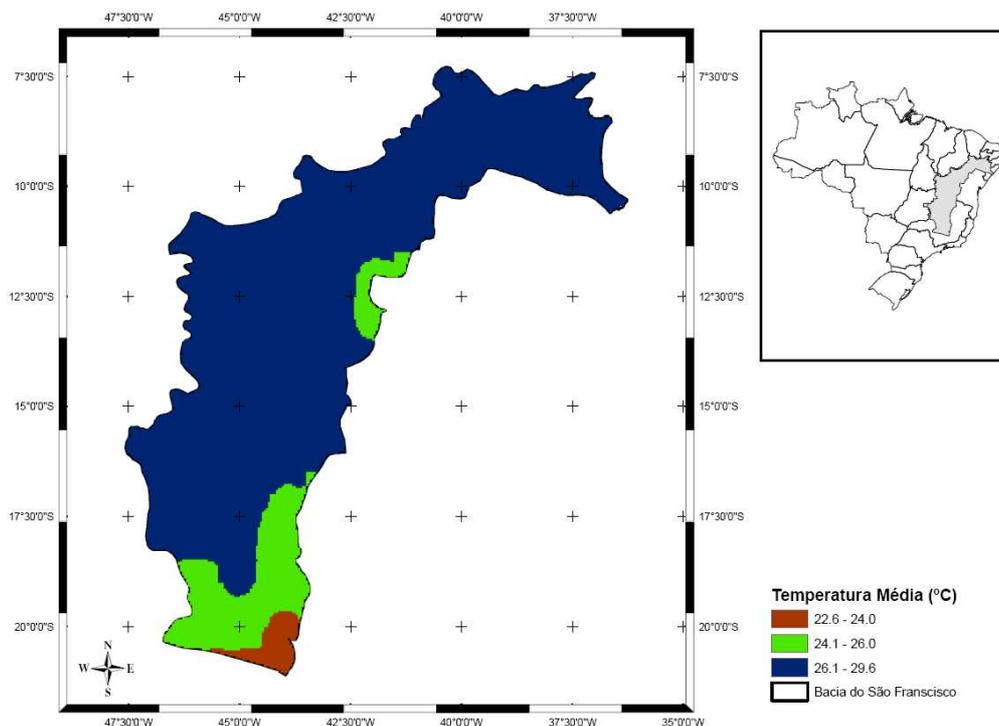


Figura 6.6. Temperatura média anual para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

De acordo com os mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta um aumento significativo na temperatura média anual para ambos os cenários, A2 e B2, no decorrer dos períodos para a bacia do São Francisco.

Para o cenário A2, no período de 2041-2070, é projetado que mais de 50 % da bacia apresentará temperaturas médias anuais superiores a 26°C. No período de 2071-2100 é esperado que quase toda bacia apresente temperaturas médias superiores a 26°C, com exceção de uma área ao sul.

Para o cenário B2 a situação é similar, sendo que as áreas com temperaturas médias superiores a 26°C são um pouco menores que as projetadas para os mesmos períodos no cenário A2.

### 6.3.2 - Precipitação média anual

Nas Figuras 6.7 a 6.12 estão apresentadas as projeções de precipitação média anual para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100), para os cenários A2 e B2.

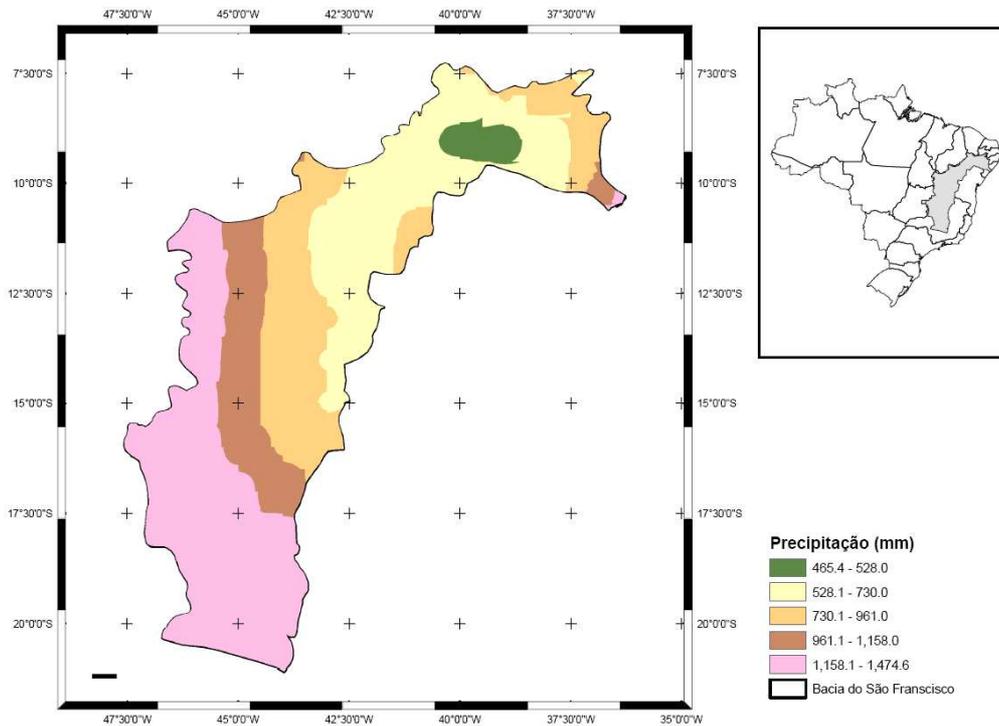


Figura 6.7. Precipitação média anual para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

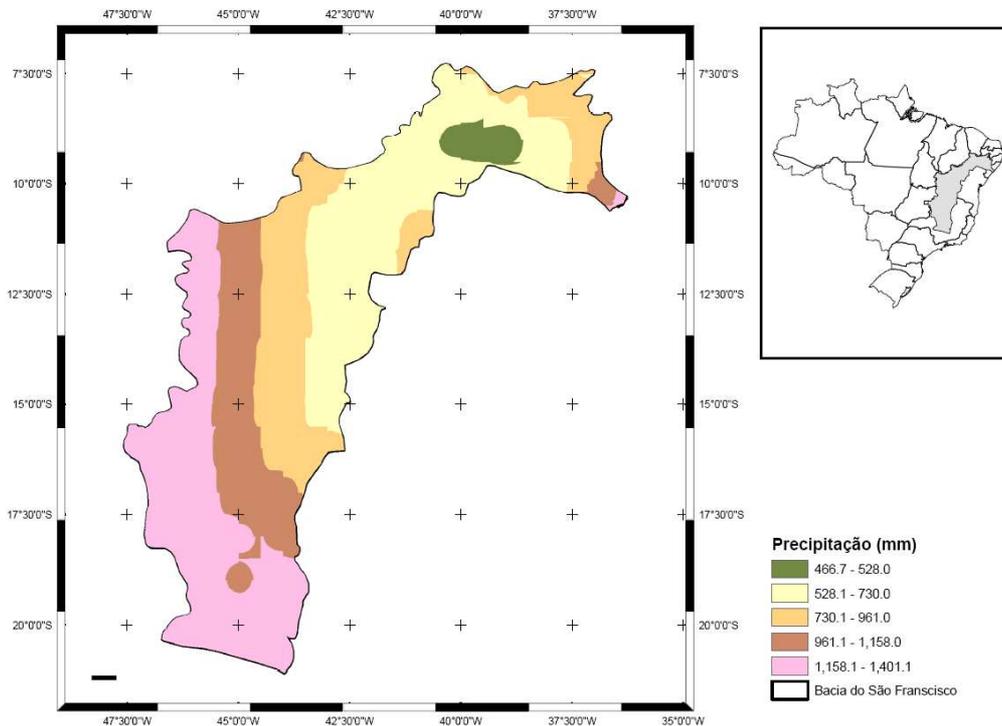


Figura 6.8. Precipitação média anual para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

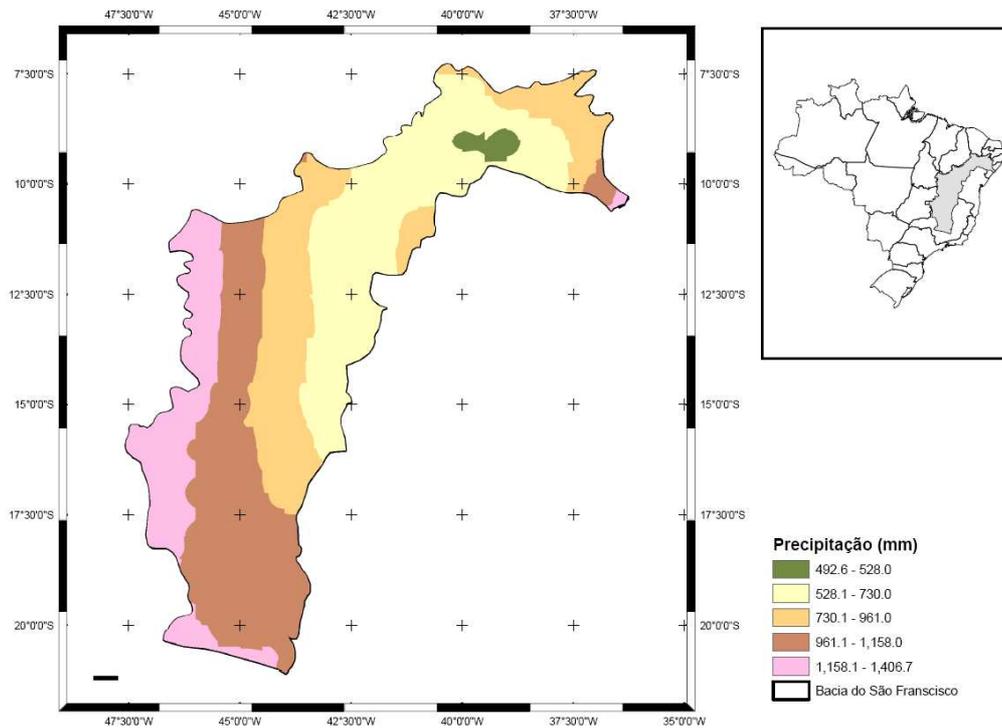


Figura 6.9. Precipitação média anual para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

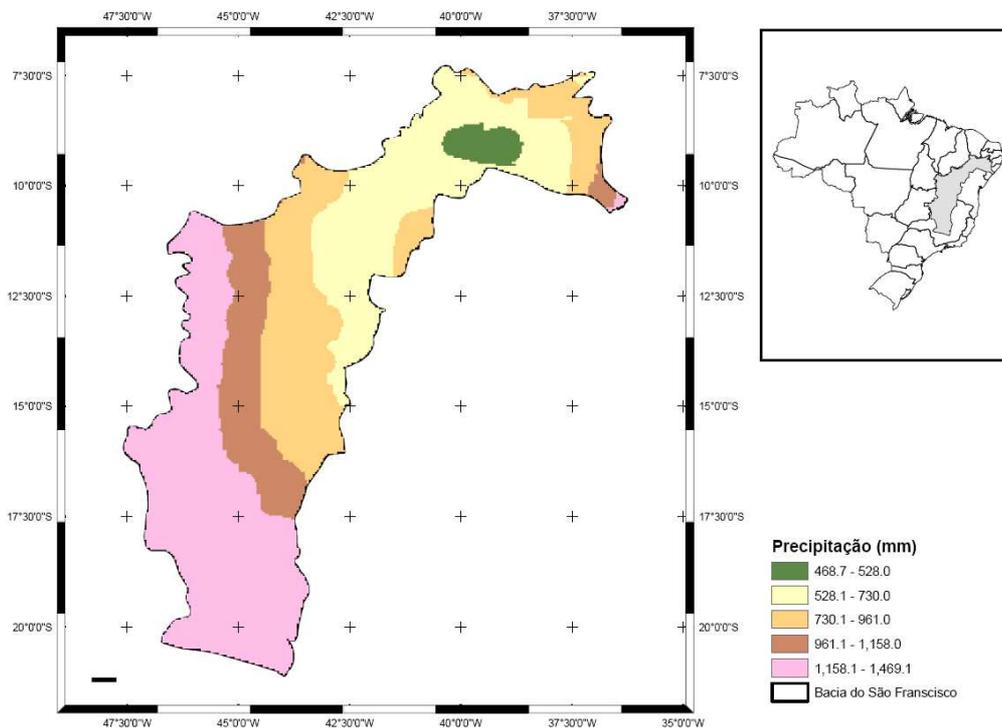


Figura 6.10. Precipitação média anual para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

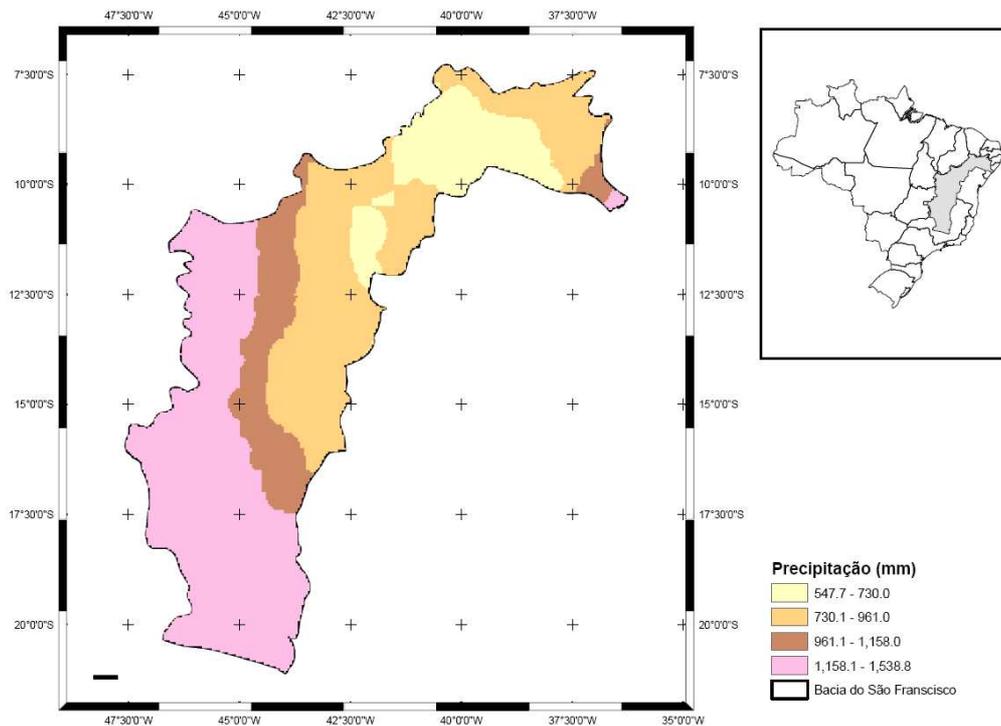


Figura 6.11. Precipitação média anual para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

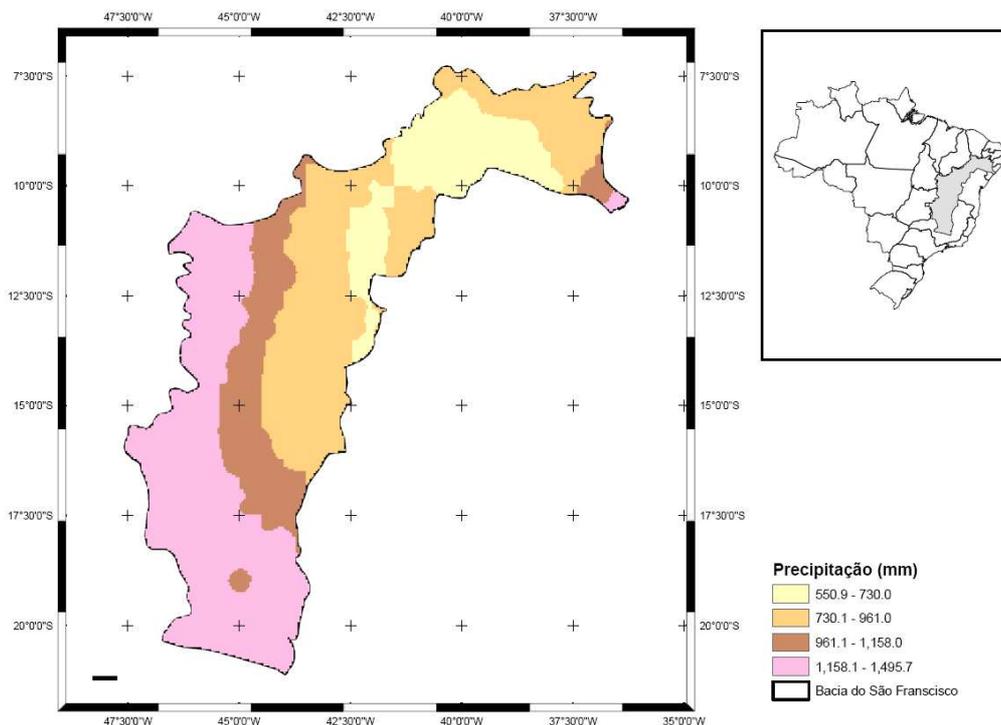


Figura 6.12. Precipitação média anual para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

De acordo com os mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta para os cenários, A2 e B2, poucas alterações na precipitação média anual para a bacia do São Francisco.

Para o cenário A2, ocorre uma exceção para a área ao sul da bacia onde é projetada uma redução do índice pluviométrico para o período de 2071-2100, ressalta-se, contudo, que para essa área são estimados os maiores índices pluviométricos. Para o norte da bacia são projetados os menores índices de precipitação, notando-se uma pequena elevação nos índices pluviométricos para os períodos de 2041-2070 e 2071-2100.

Para o cenário B2 é projetada uma elevação no índice de precipitação para a área ao norte da bacia do São Francisco significativamente maior que a do cenário A2 para os períodos de 2041-2070 e 2071-2100. Na área ao sul os índices pluviométricos permanecem constantes. Entretanto, de maneira geral, com exceção da área ao sul para o cenário A2, a distribuição espacial da precipitação nos três períodos, dos dois cenários, é aproximadamente a mesma.

### 6.3.3 - Radiação média anual

Nas Figuras 6.13 a 6.18 estão apresentadas as projeções de radiação média anual para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100), para os cenários A2 e B2.

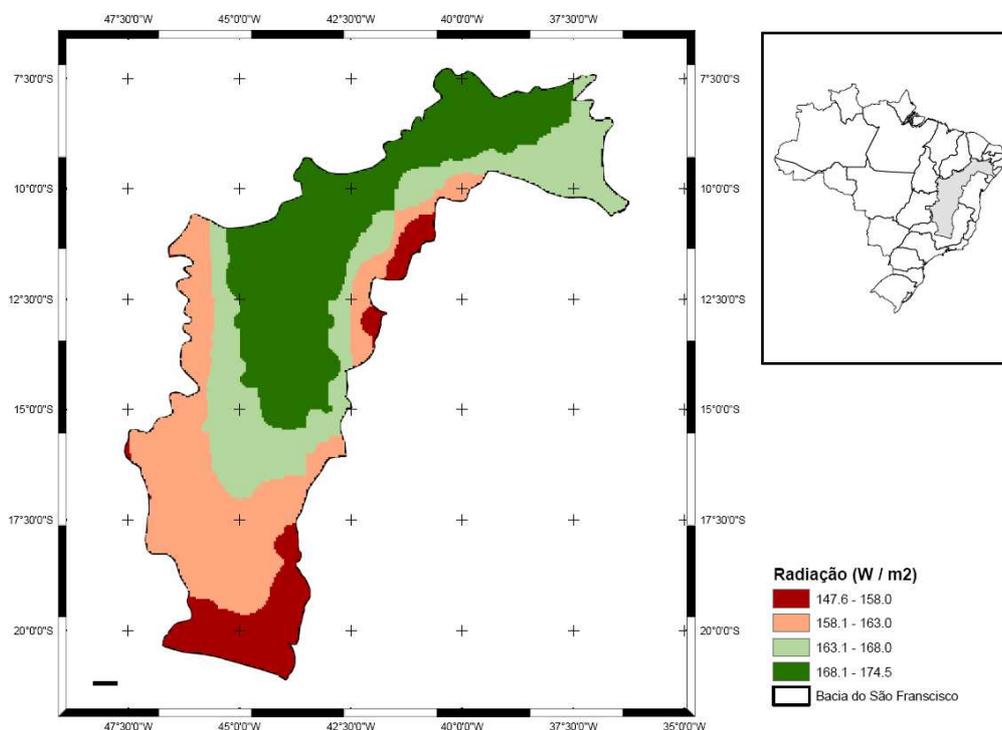


Figura 6.13. Radiação média anual para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

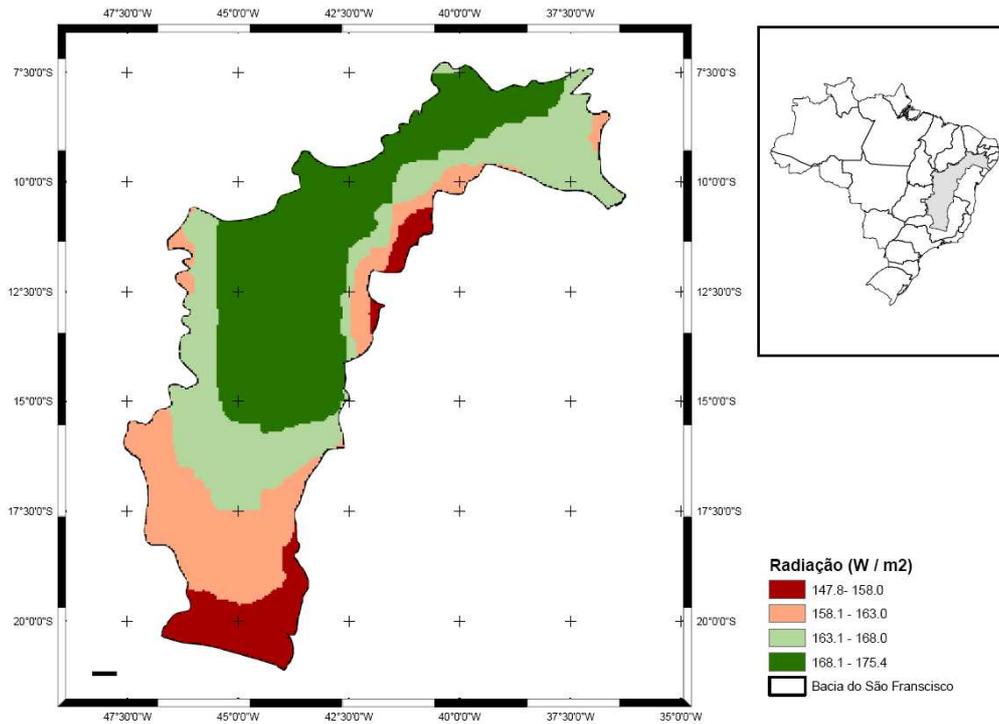


Figura 6.14. Radiação média anual para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

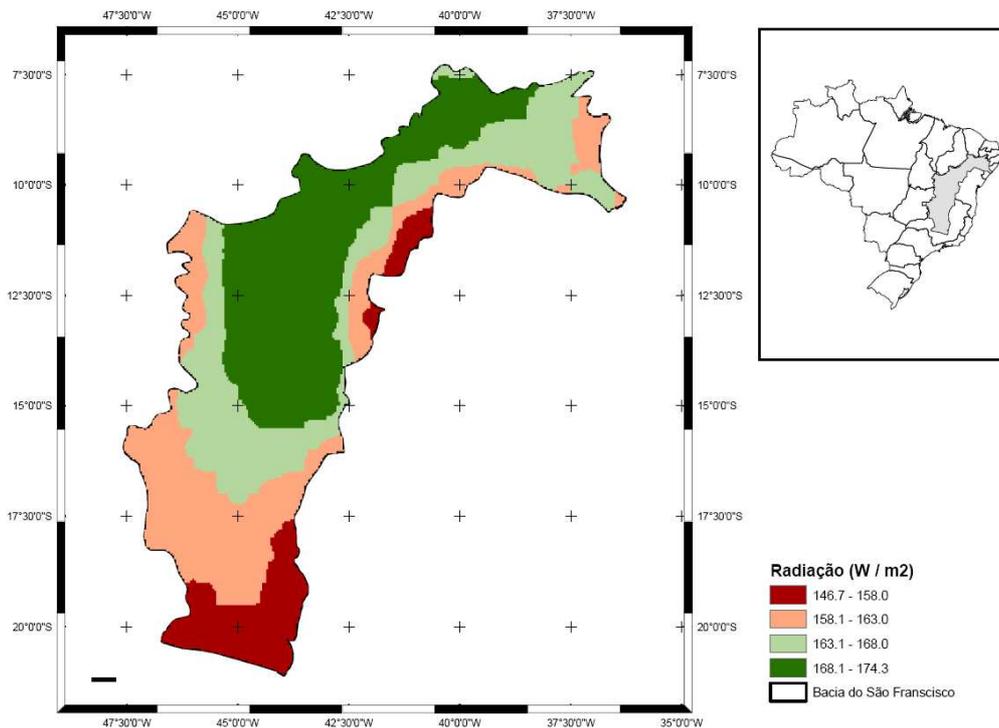


Figura 6.15. Radiação média anual para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

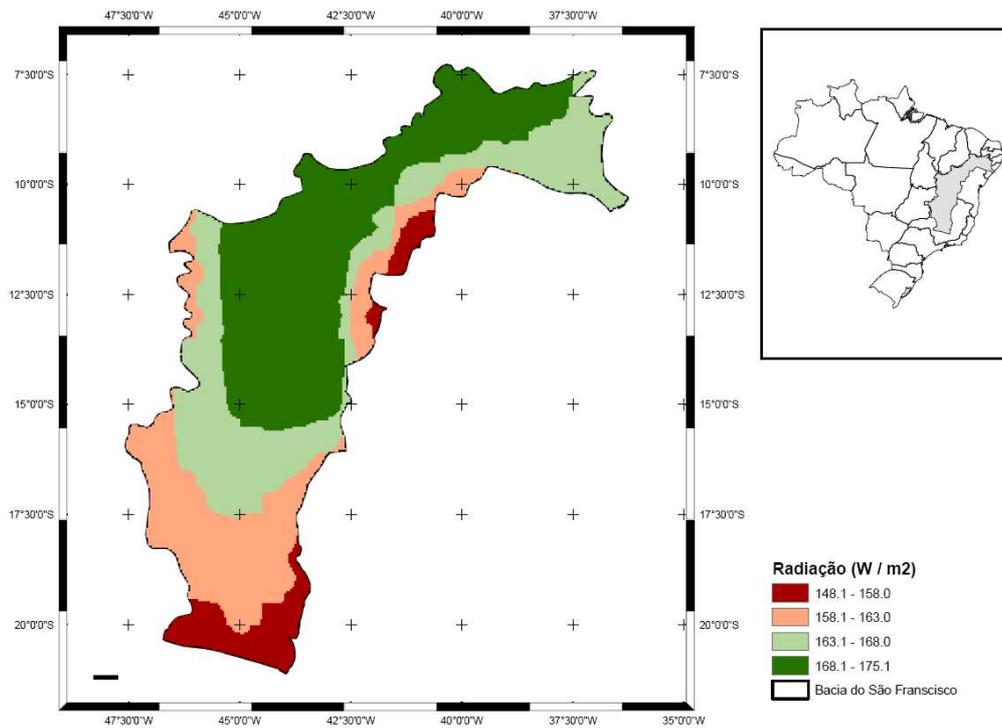


Figura 6.16. Radiação média anual para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

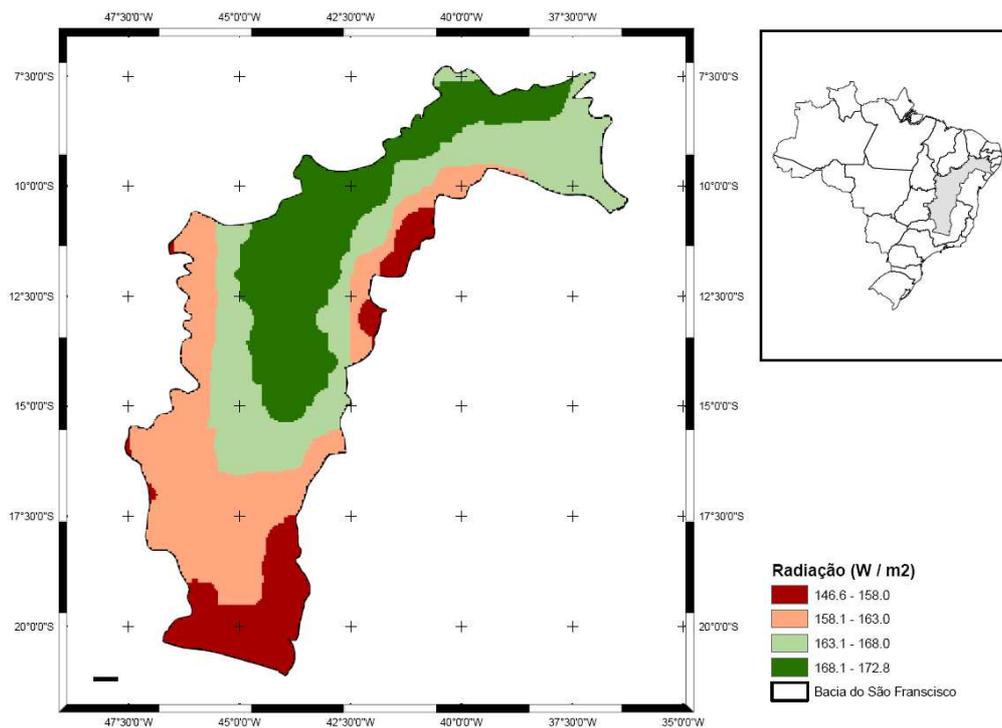


Figura 6.17. Radiação média anual para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

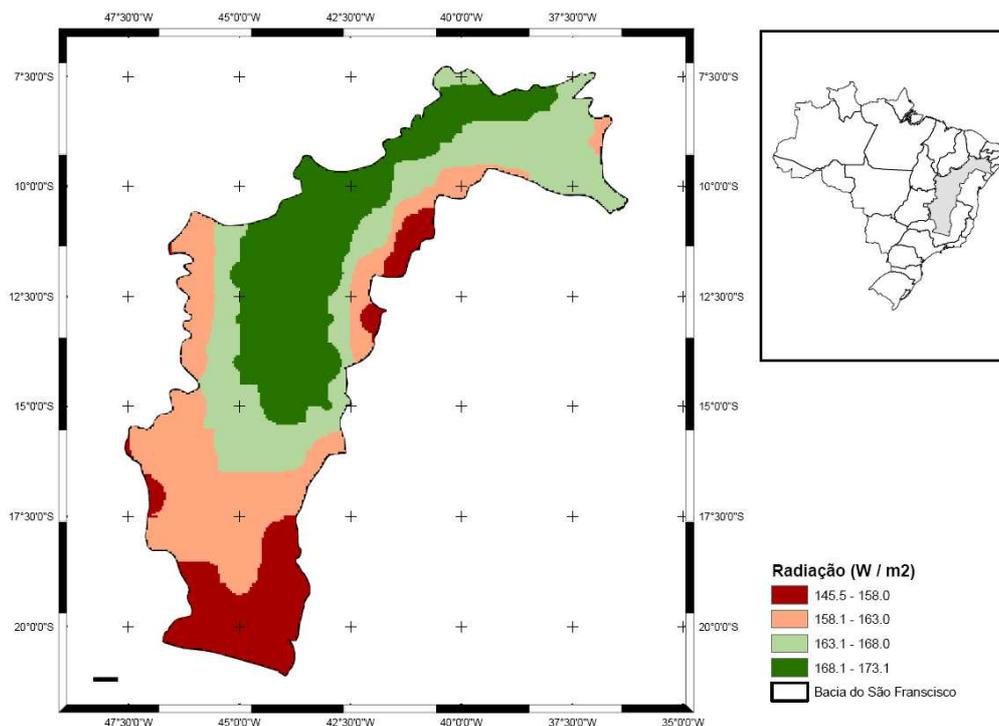


Figura 6.18. Radiação média anual para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

De acordo com os mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta para ambos os cenários, A2 e B2, índices de radiação média anual constante para todos os períodos na bacia do São Francisco, mantendo-se também a mesma distribuição espacial.

### 6.3.4 - Umidade relativa do ar média anual

Nas Figuras 6.19 a 6.24 estão apresentadas as projeções de umidade relativa do ar média anual para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

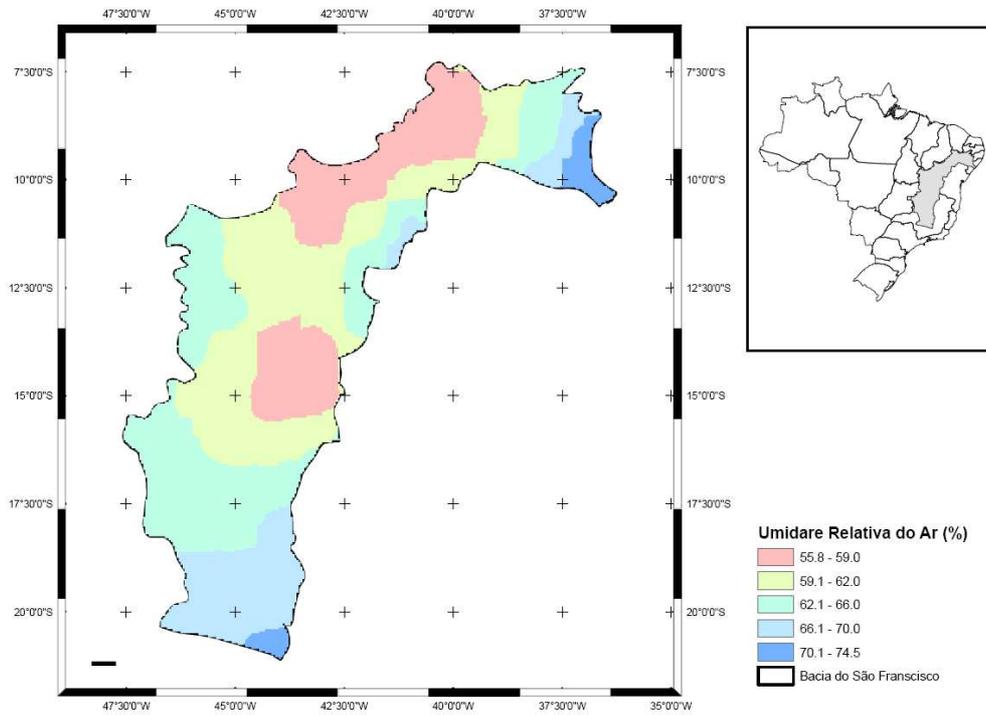


Figura 6.19. Umidade Relativa do ar média anual para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

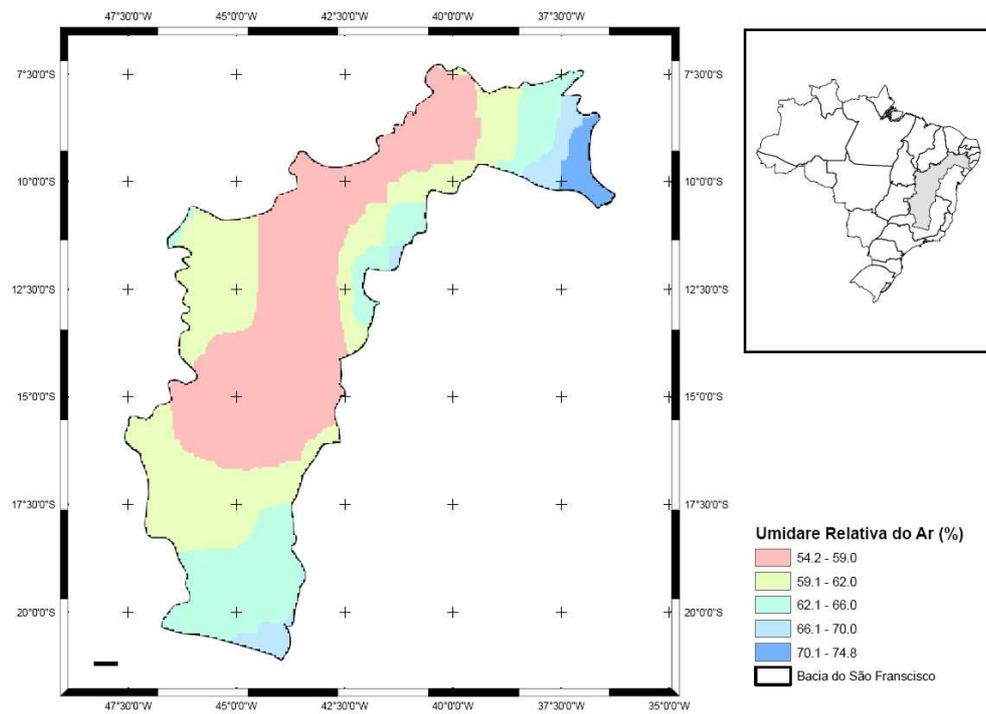


Figura 6.20. Umidade Relativa do ar média anual para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

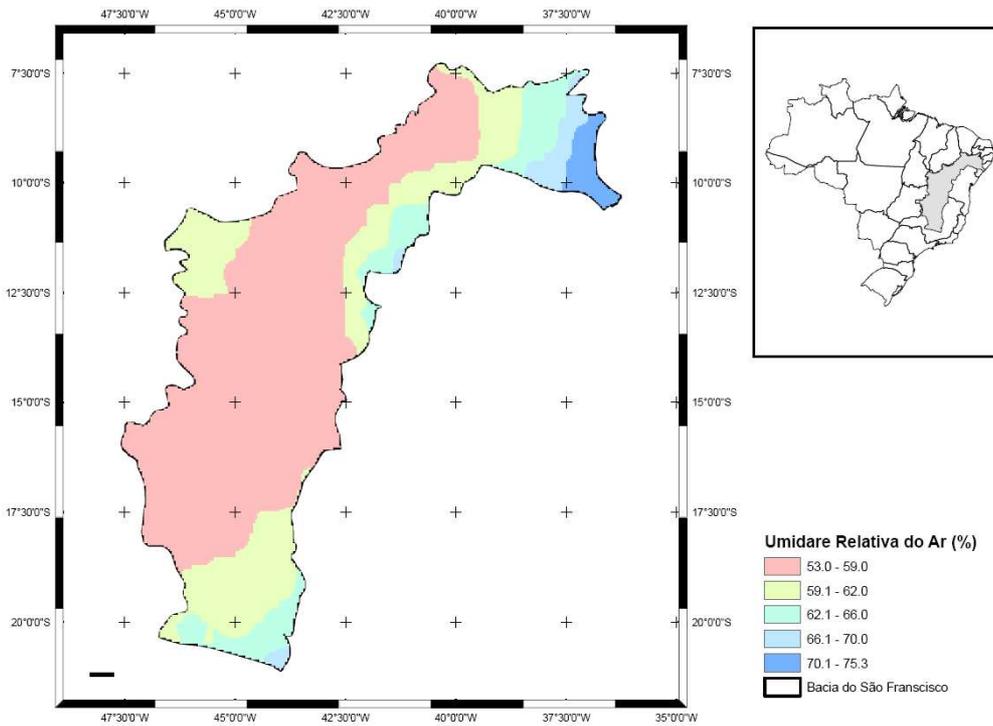


Figura 6.21. Umidade Relativa do ar média anual para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

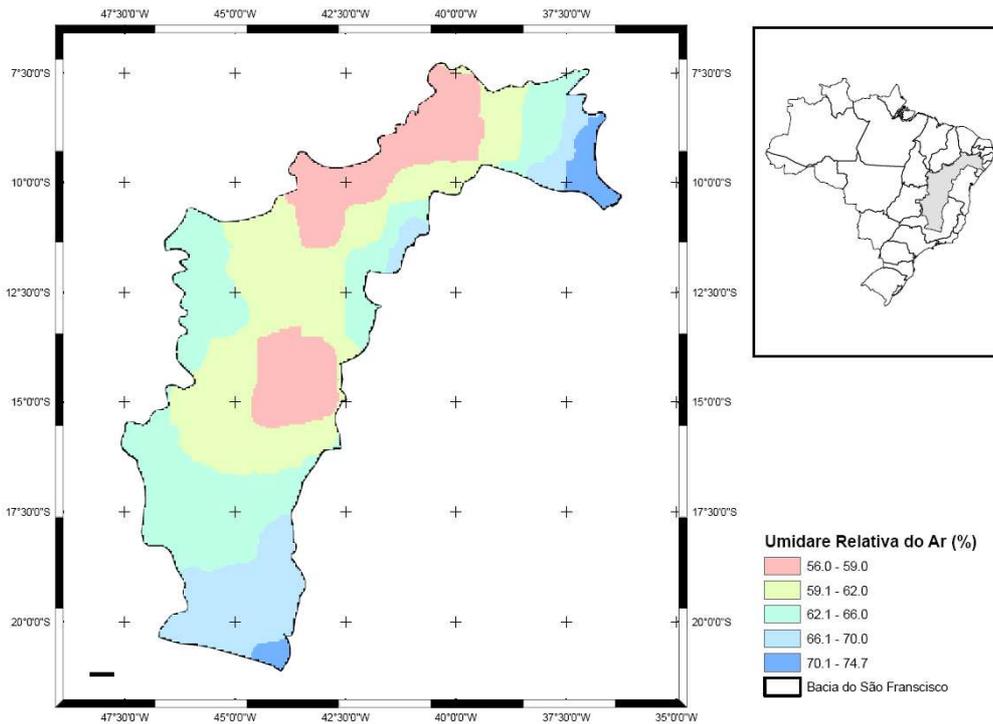


Figura 6.22. Umidade Relativa do ar média anual para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

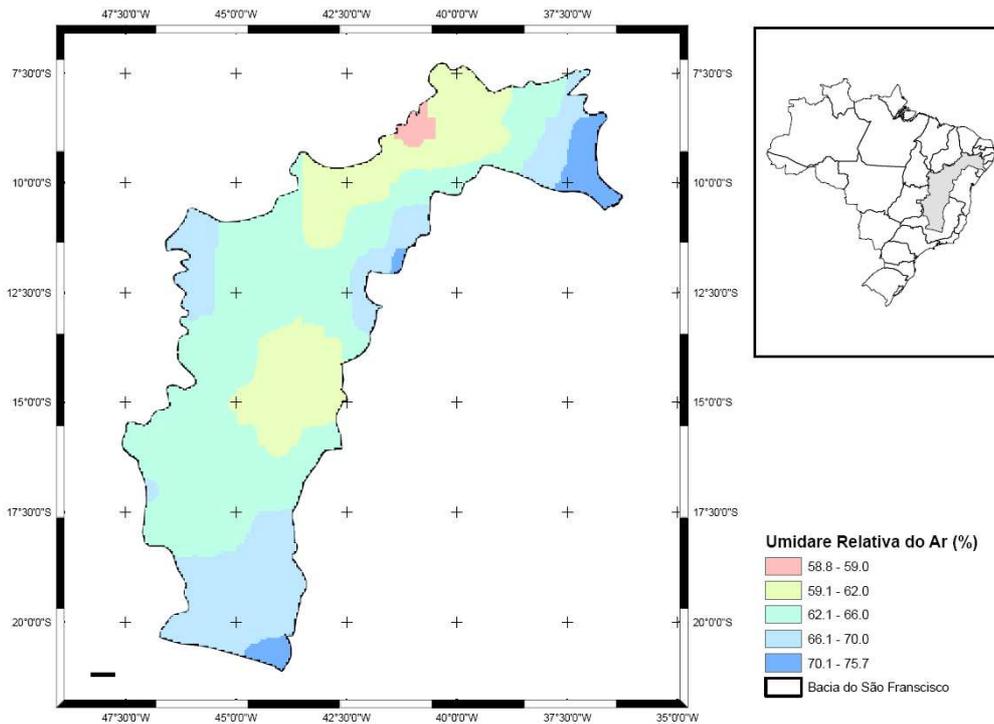


Figura 6.23. Umidade Relativa do ar média anual para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

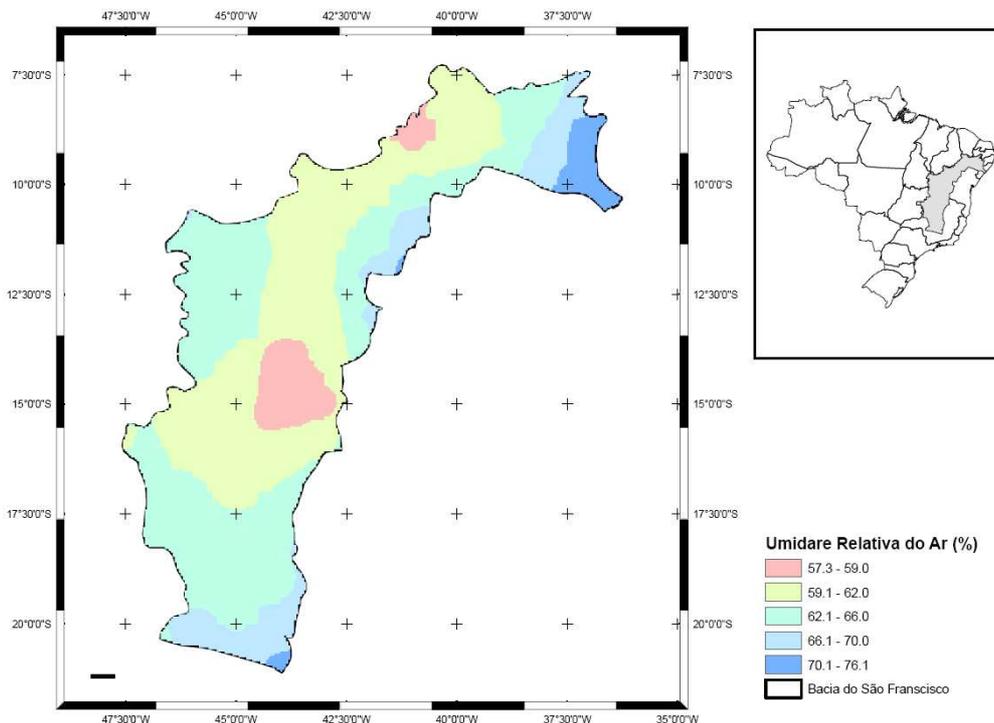


Figura 6.24. Umidade Relativa do ar média anual para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

De acordo com os mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta para o cenário A2 uma redução nos índices de umidade relativa do ar média anual no decorrer dos períodos para a bacia do São Francisco. Para o período de 2071-2100 é projetado que

aproximadamente 70% da bacia apresentara valores de umidade relativa do ar inferiores a 59%.

Para o cenário B2 é projetado que os índices de umidade relativa do ar média anual aumentaram no período de 2041-2070 na as áreas onde foram projetados os menores índices para o período de 2011-2040, tendo uma redução no período de 2071-2100.

### 6.3.5 - Velocidade do vento média anual

Nas Figuras 6.25 a 6.30 estão apresentadas as projeções de velocidade média anual para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

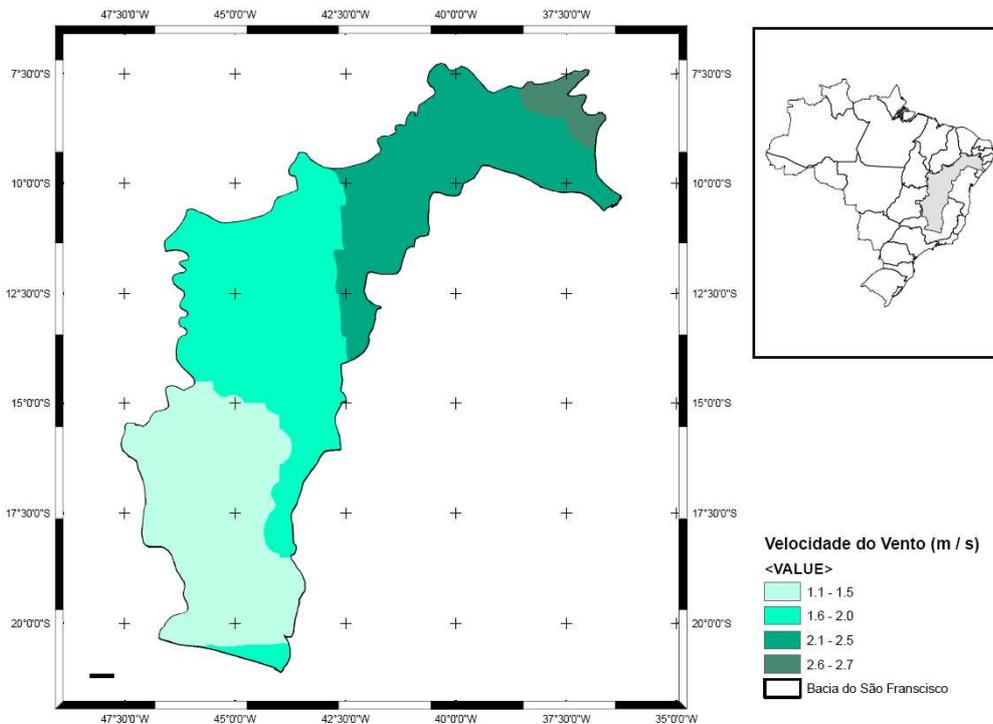


Figura 6.25. Velocidade do vento média anual para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

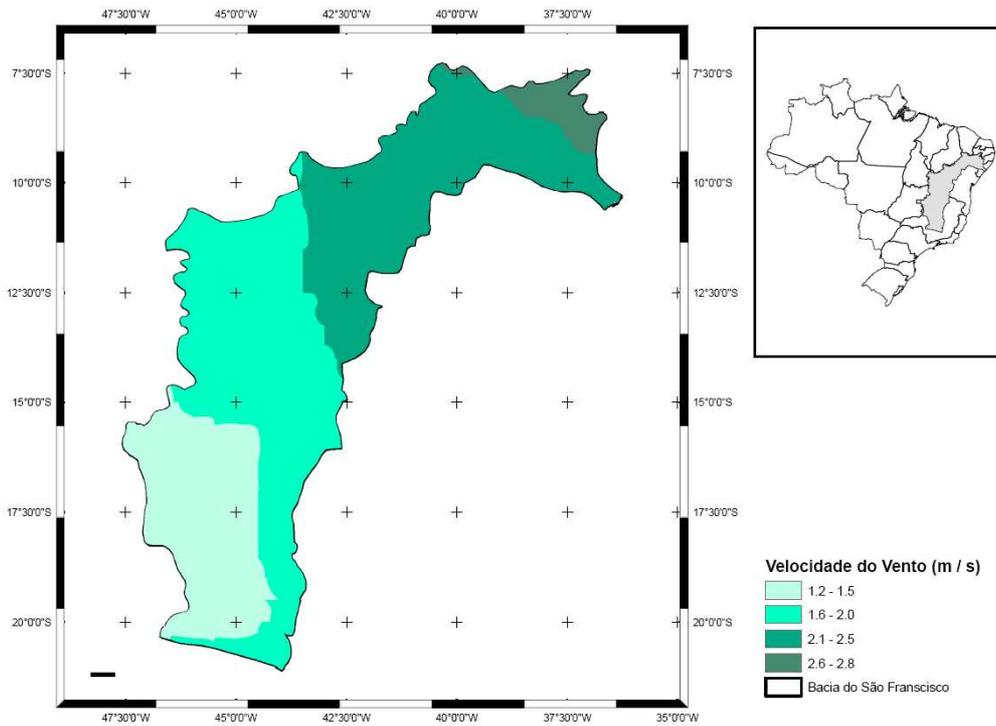


Figura 6.26. Velocidade do vento média anual para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

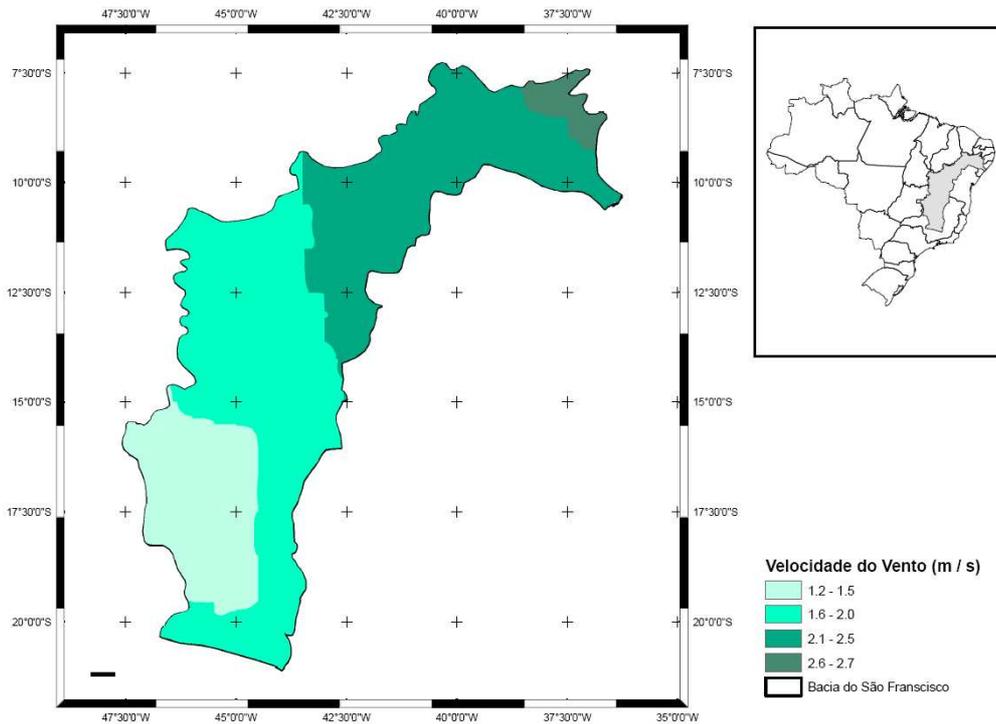


Figura 6.27. Velocidade do vento média anual para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

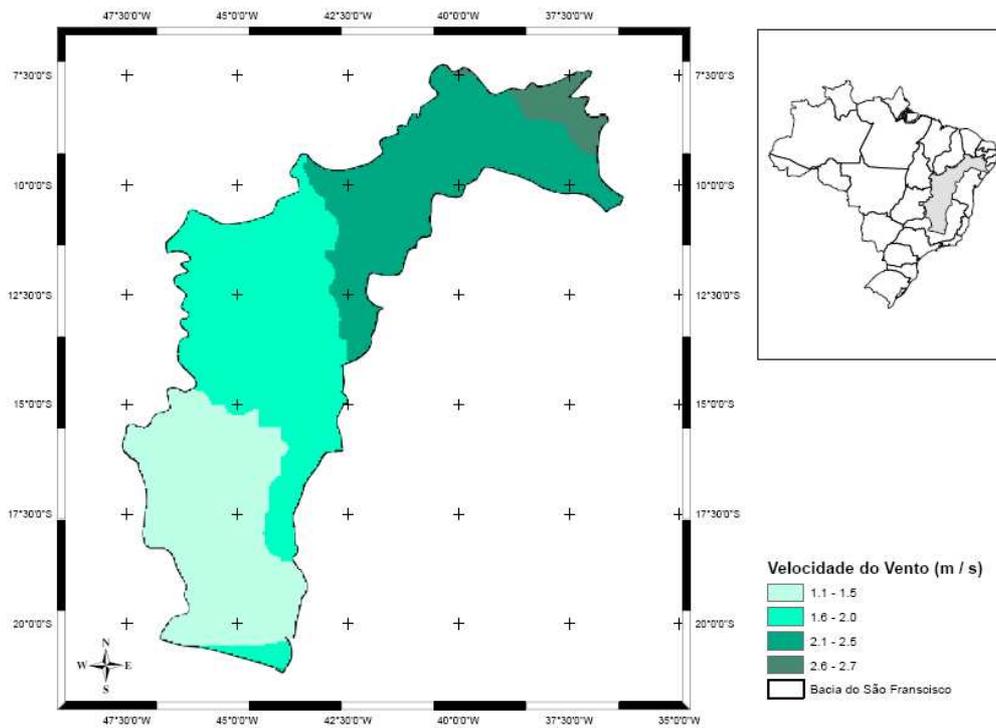


Figura 6.28. Velocidade do vento média anual para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

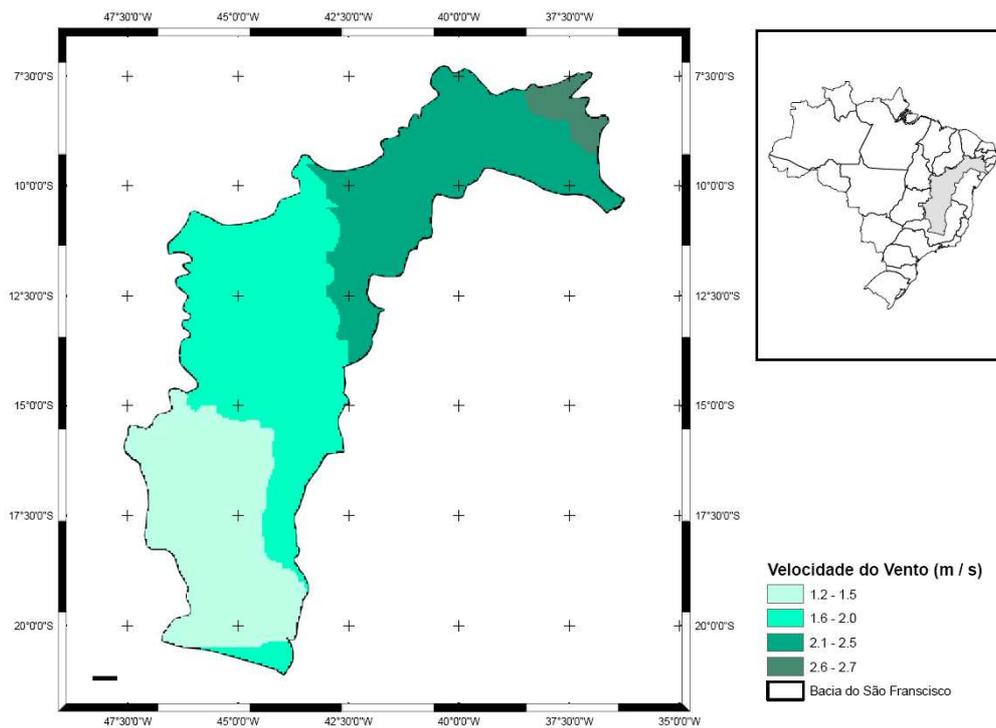


Figura 6.29. Velocidade do vento média anual para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

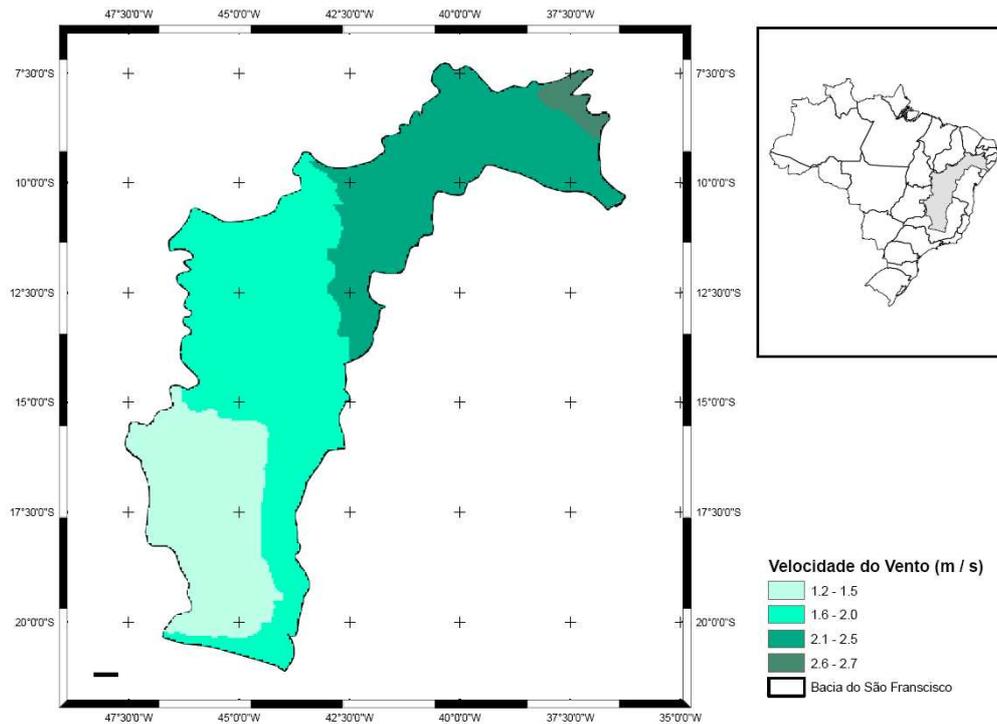


Figura 6.30. Velocidade do vento média anual para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

De acordo com os mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta para ambos os cenários, A2 e B2, índices de velocidade do vento média anual constante para todos os períodos na bacia do São Francisco, mantendo-se também a mesma distribuição espacial.

### 6.3.6 - Déficit hídrico médio anual

Nas Figuras 6.31 a 6.36 estão apresentadas as projeções de déficit hídrico médio anual para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

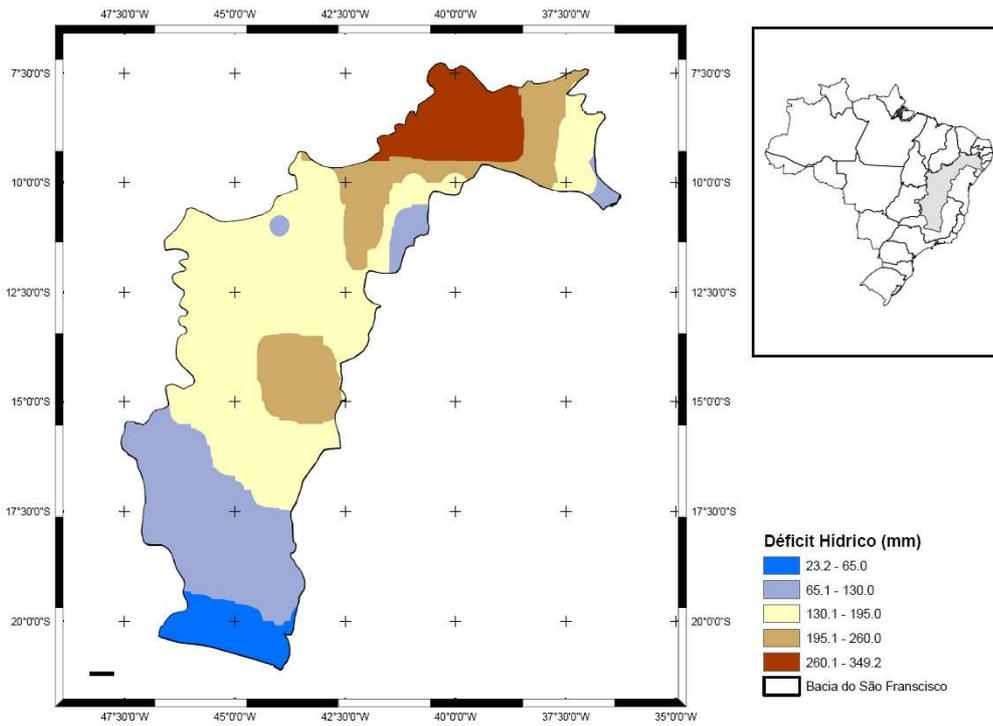


Figura 6.31. Déficit hídrico médio anual para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

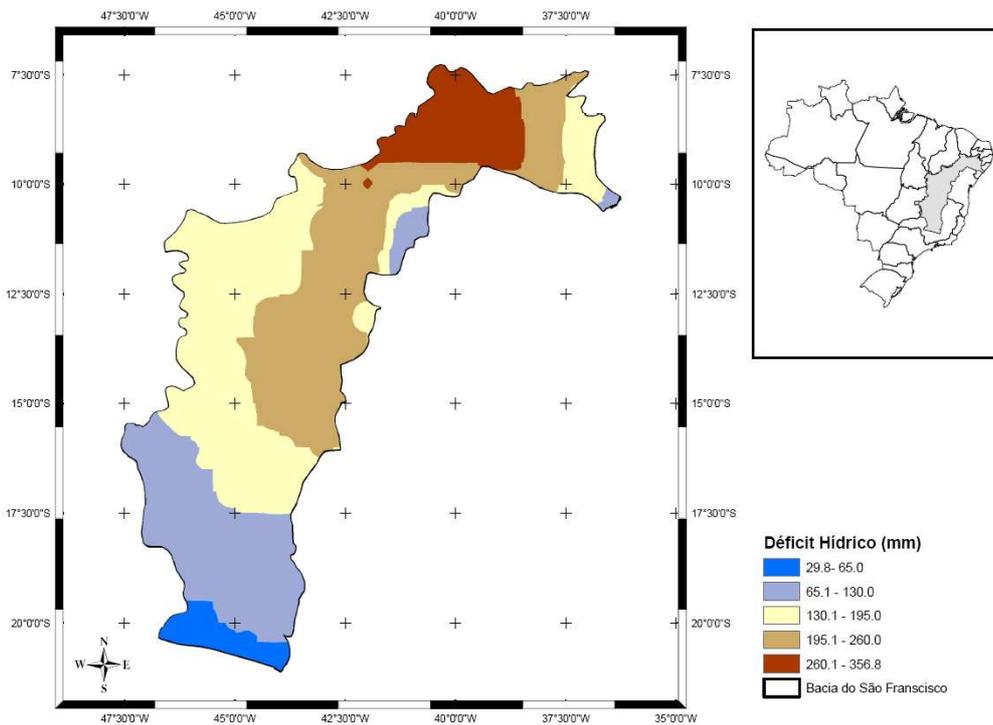


Figura 6.32. Déficit hídrico médio anual para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

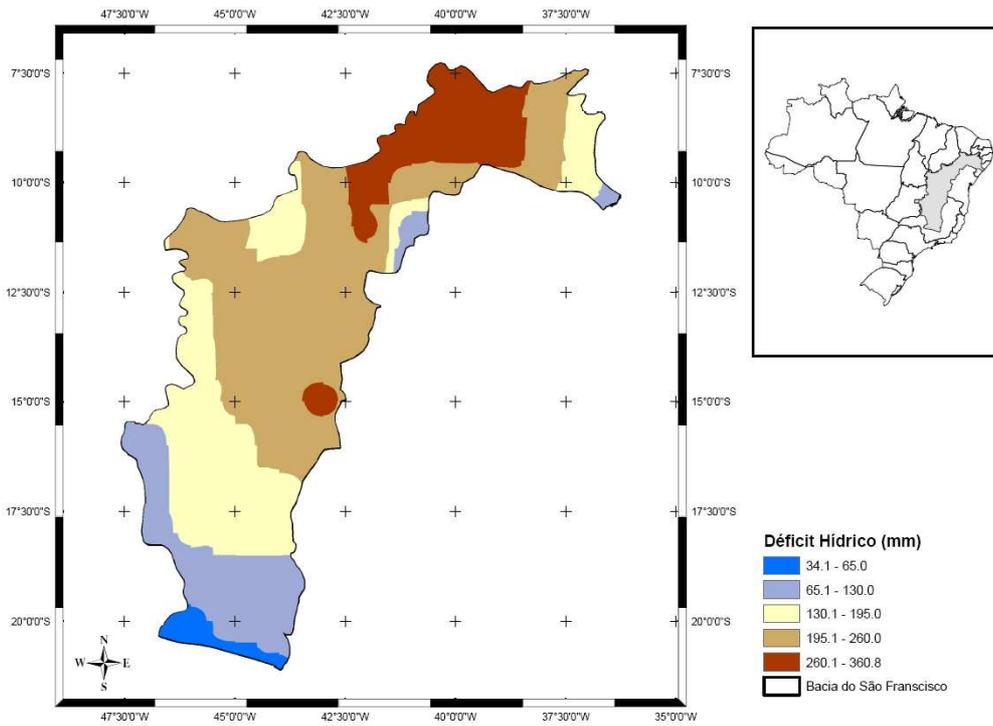


Figura 6.33. Déficit hídrico médio anual para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

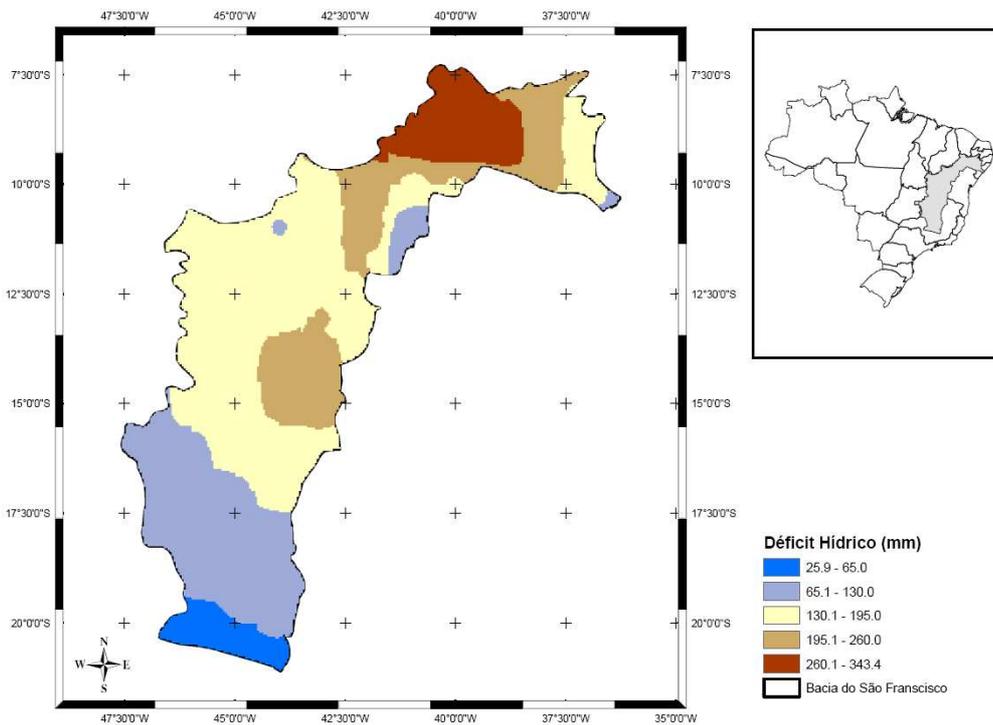


Figura 6.34. Déficit hídrico médio anual para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

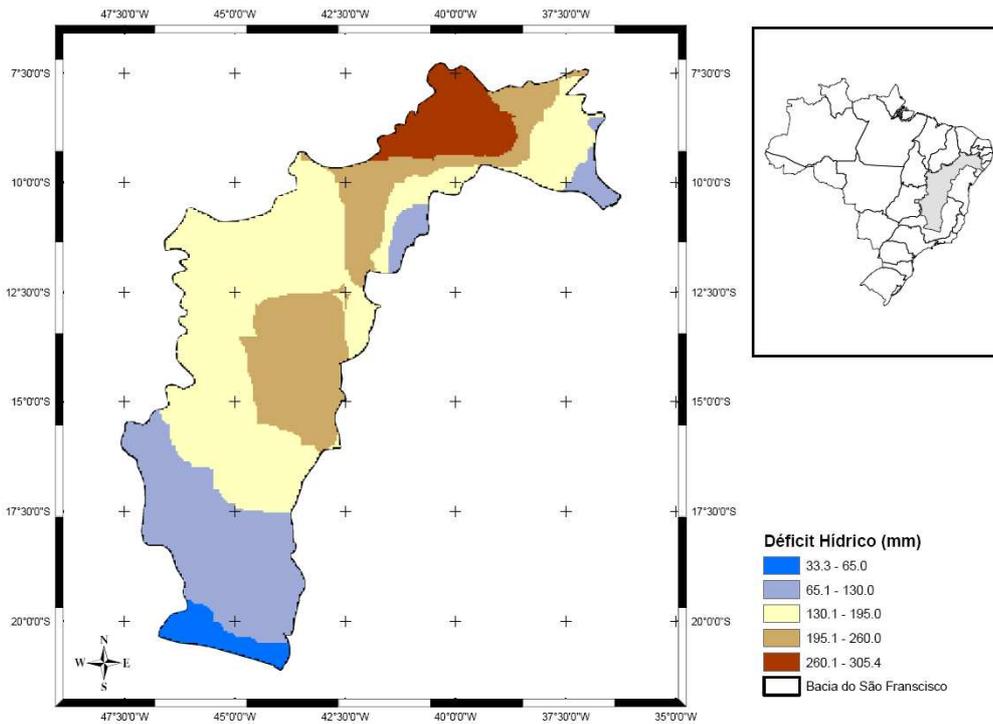


Figura 6.35. Déficit hídrico médio anual para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

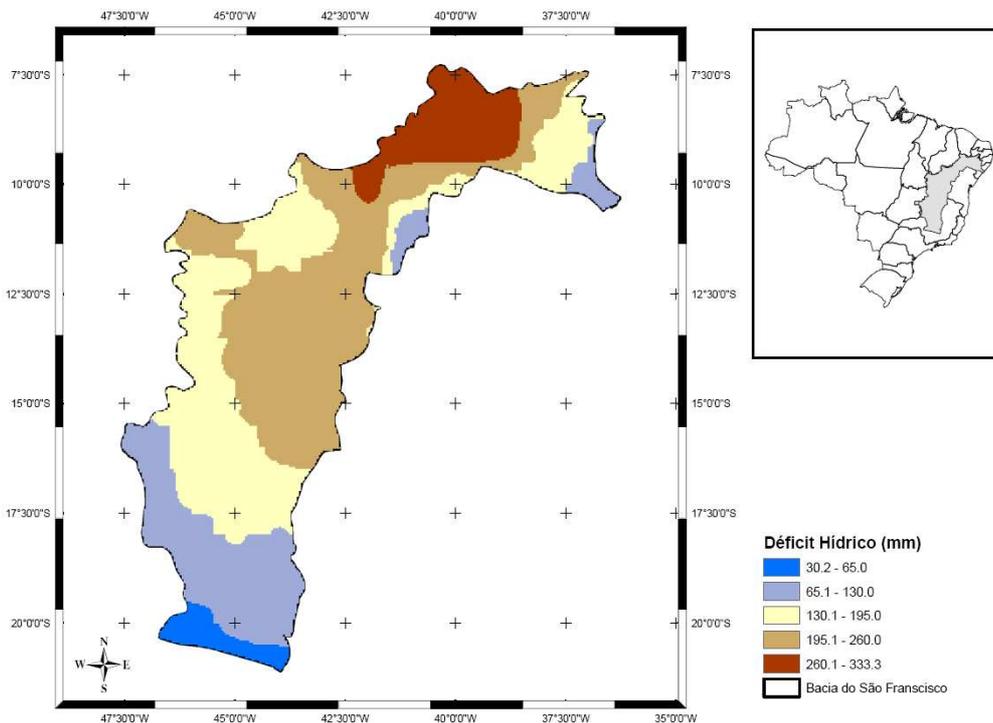


Figura 6.36. Déficit hídrico médio anual para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

De acordo com os mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta um aumento no déficit hídrico na região central da bacia do São Francisco para ambos os cenários, A2 e B2, no decorrer dos períodos. Entretanto este aumento é mais significativo para o cenário A2

## 6.4 - Aptidão agrícola para cenários de alterações climáticas

### 6.4.1 - Algodão

Nas Figuras 6.37 a 6.42 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura do algodão no período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

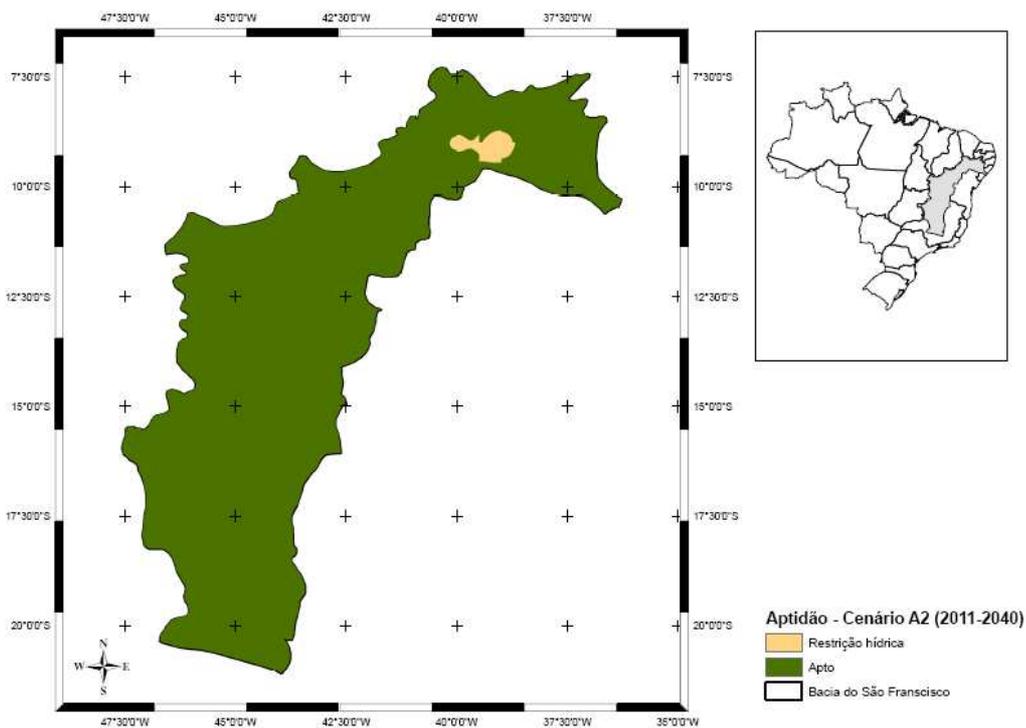


Figura 6.37: Mapa de aptidão para o cultivo do algodão para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

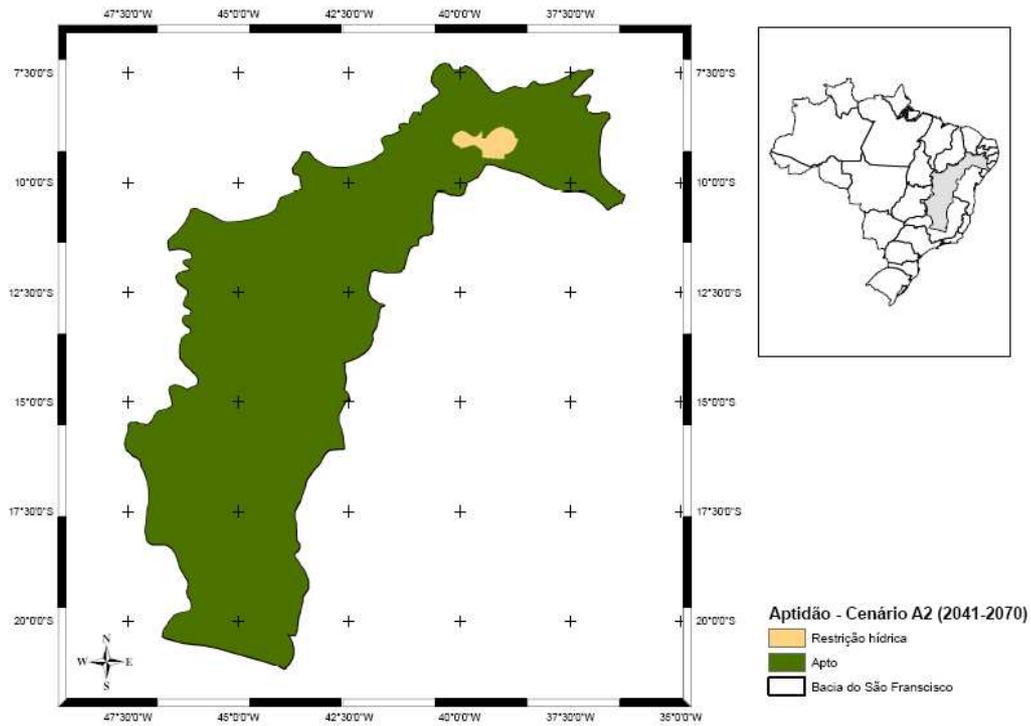


Figura 6.38. Mapa de aptidão para o cultivo do algodão para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

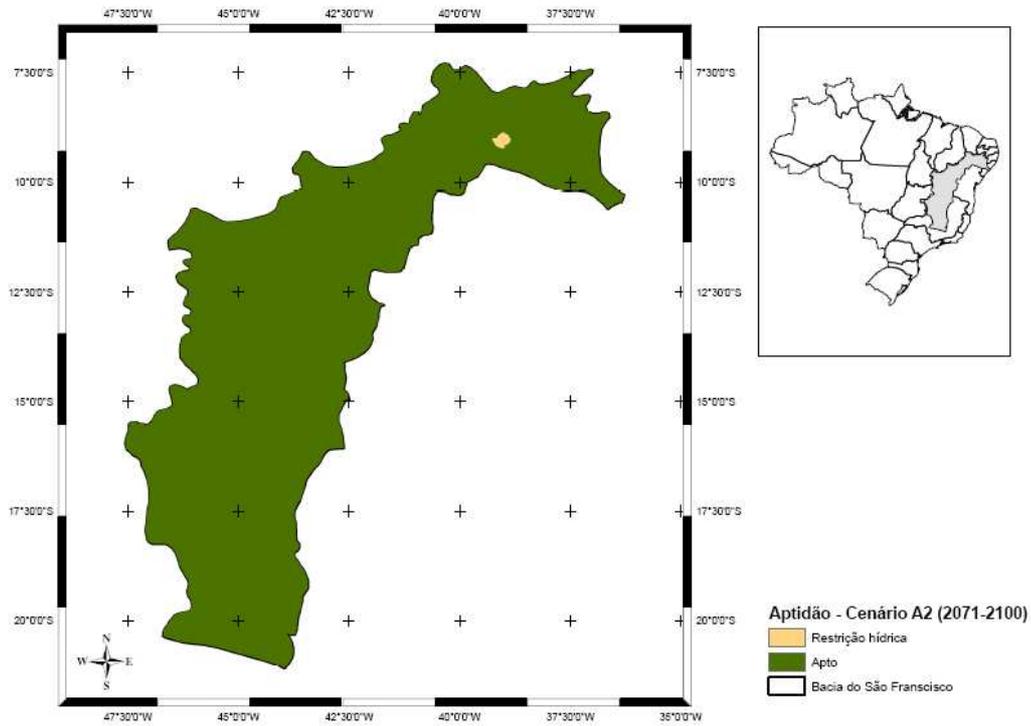


Figura 6.39. Mapa de aptidão para o cultivo do algodão para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

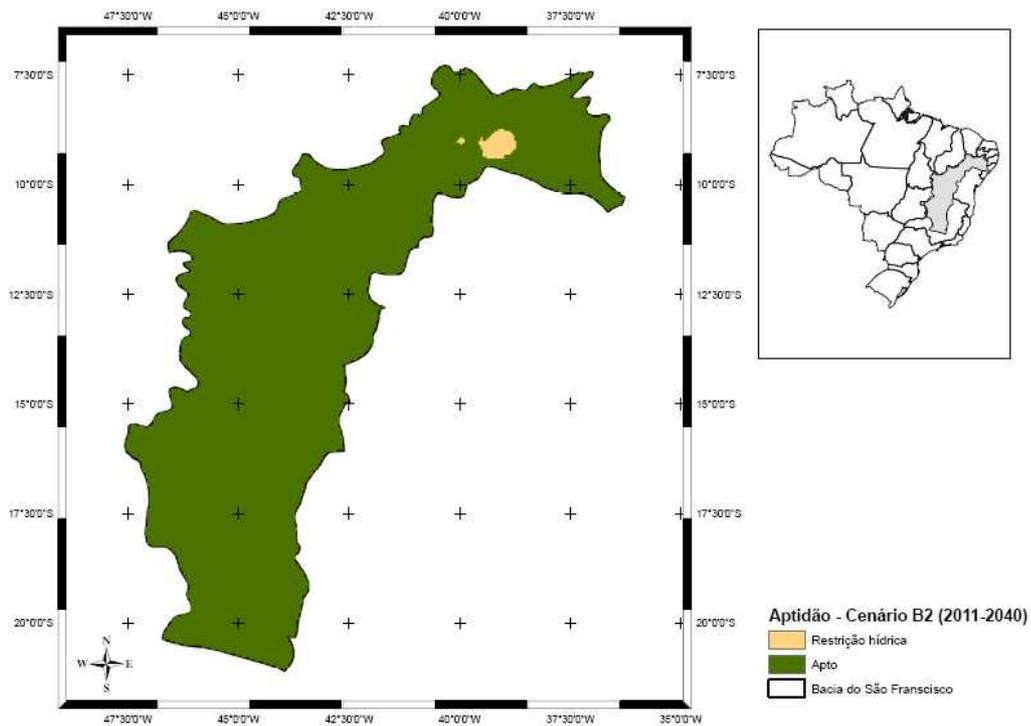


Figura 6.40. Mapa de aptidão para o cultivo do algodão para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

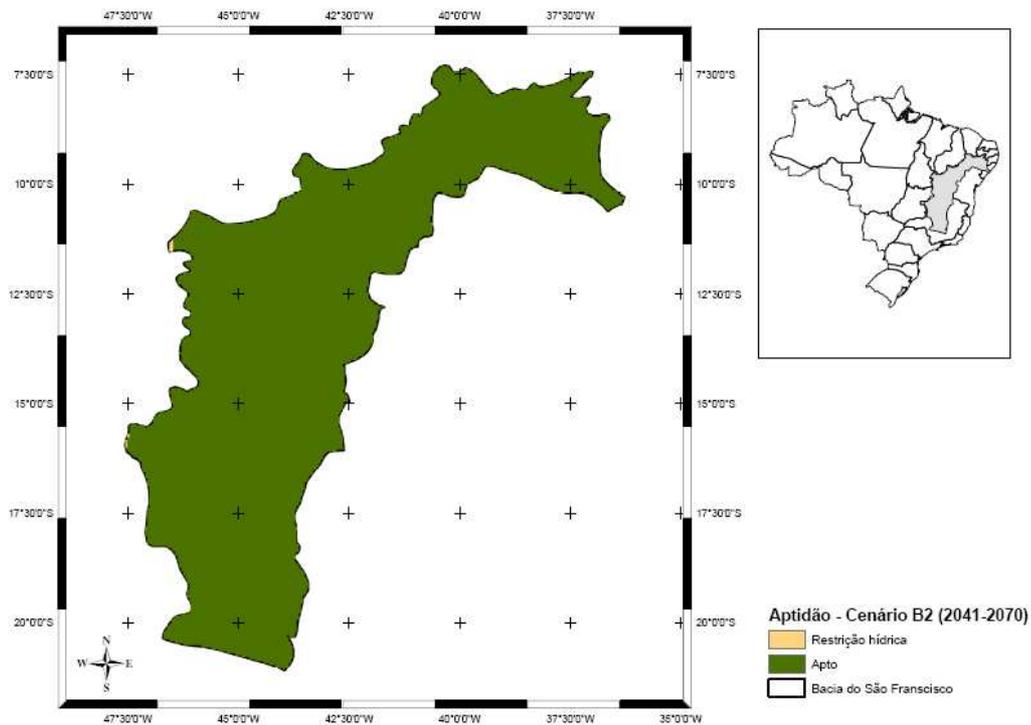


Figura 6.41. Mapa de aptidão para o cultivo do algodão para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

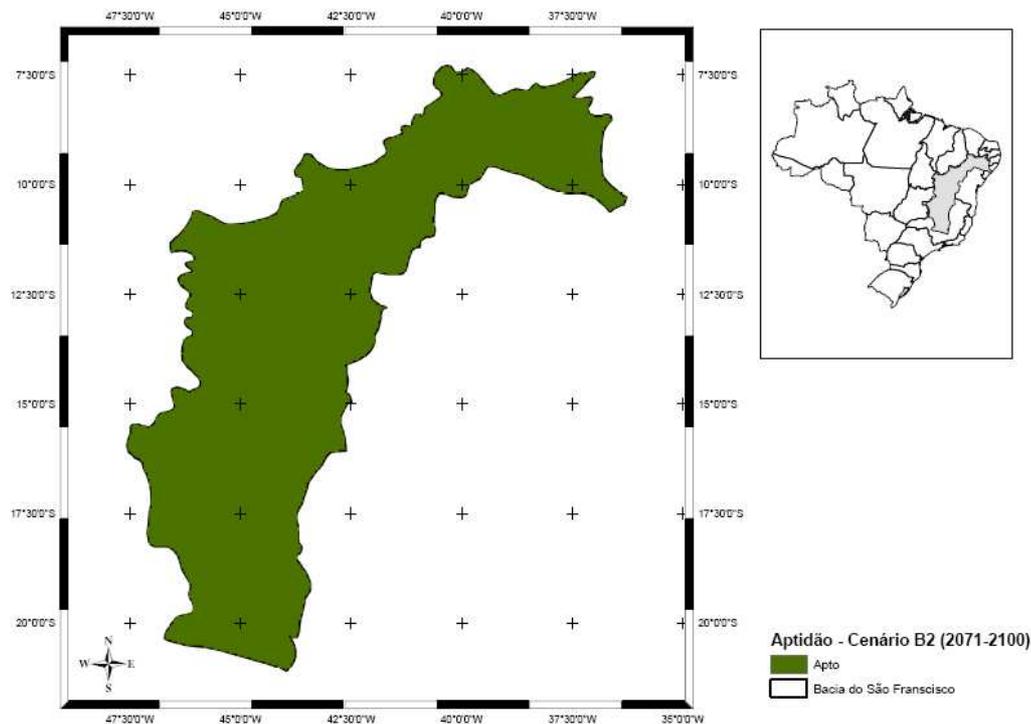


Figura 6.42. Mapa de aptidão para o cultivo do algodão para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os cenários, A2 e B2, aptidão para o cultivo do algodão em praticamente toda bacia do São Francisco.

Para o cenário A2, nos períodos de 2011-2040 e 2041-2070, é projetada uma pequena área ao norte da bacia com restrição hídrica, sendo que esta sofre retração no período de 2071-2100.

Para o cenário B2, no período de 2011-2040, é projetada uma área ao norte da bacia com restrição hídrica, sendo esta menor que a projetada para o mesmo período, para o cenário A2. Para o período de 2041-2070 praticamente não é projetada restrição hídrica ao cultivo do algodão e para 2071-2100 é projetado que toda bacia estará apta para o cultivo do algodão.

## 6.4.2 - Banana

Nas Figuras 6.43 a 6.48 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura da banana no período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

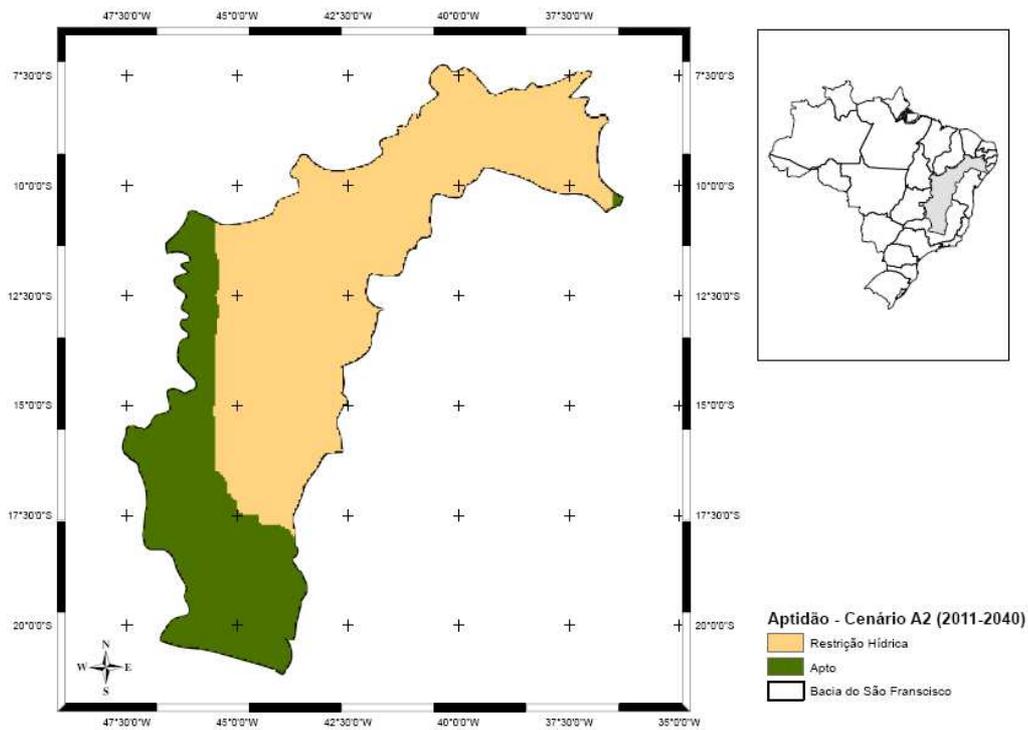


Figura 6.43. Mapa de aptidão para o cultivo da banana para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

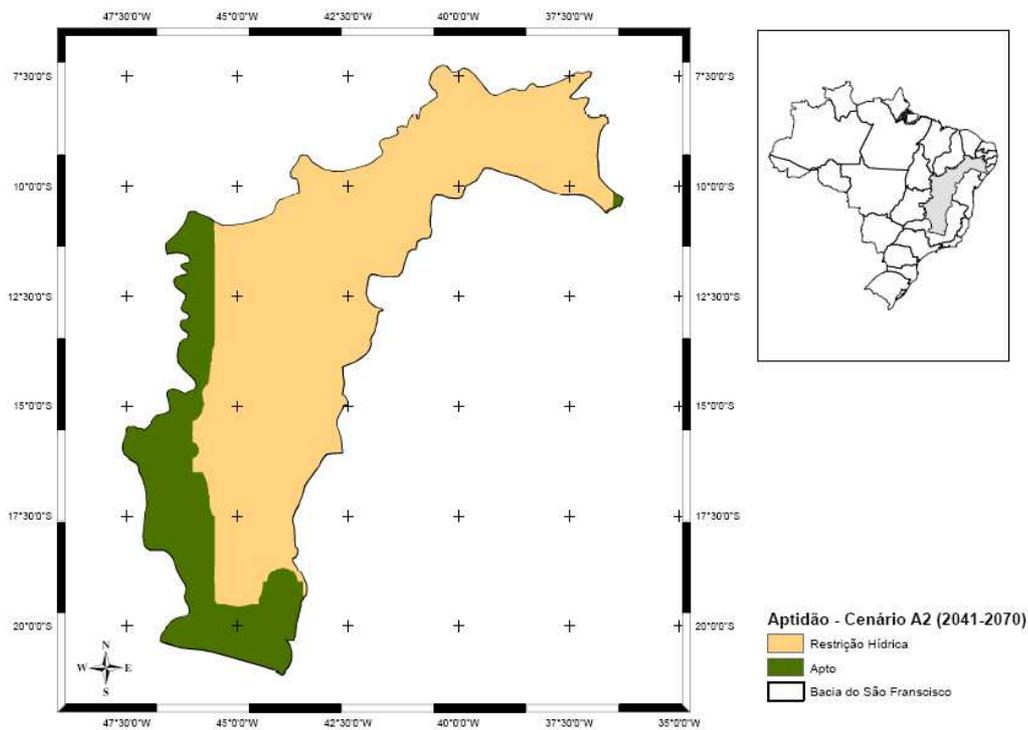


Figura 6.44. Mapa de aptidão para o cultivo da banana para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

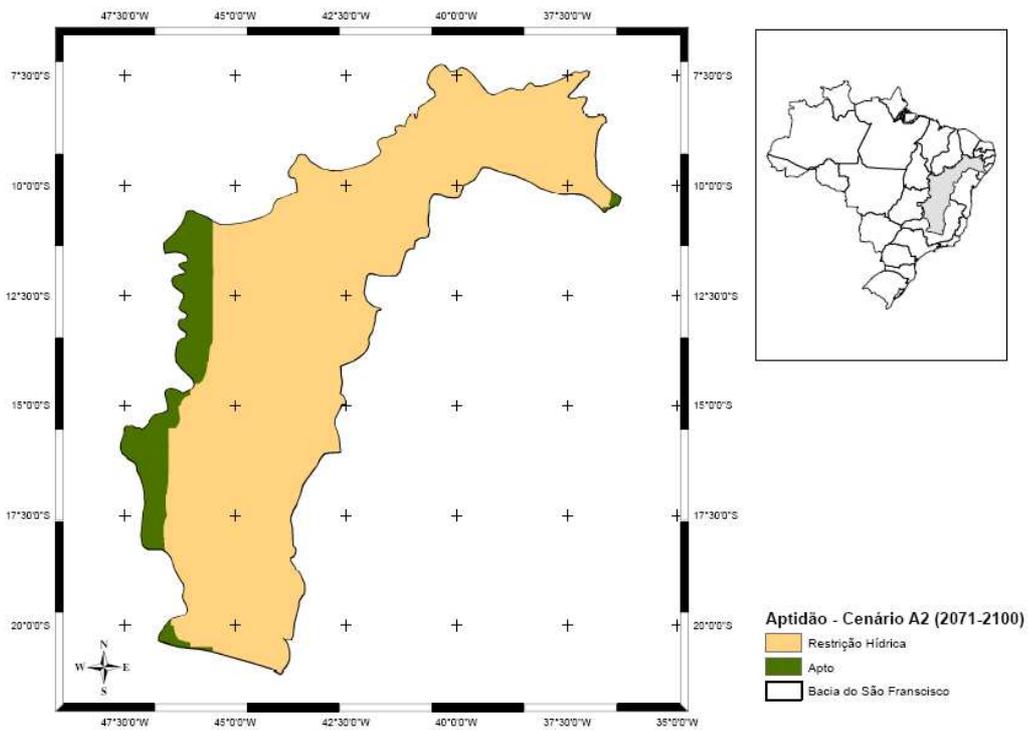


Figura 6.45. Mapa de aptidão para o cultivo da banana para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

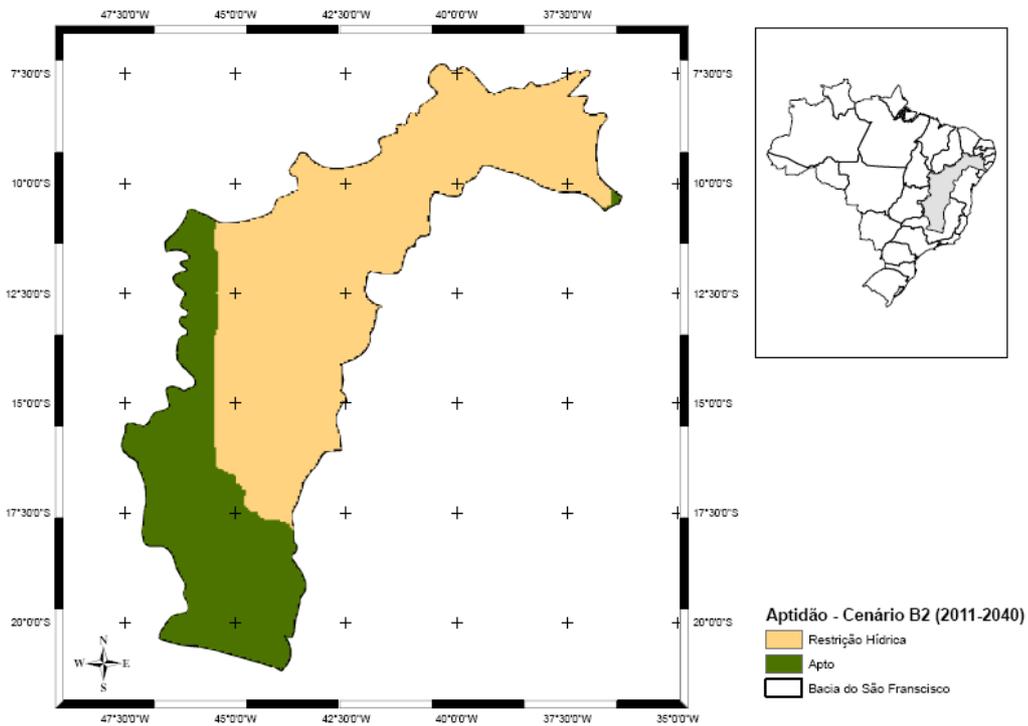


Figura 6.46. Mapa de aptidão para o cultivo da banana para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

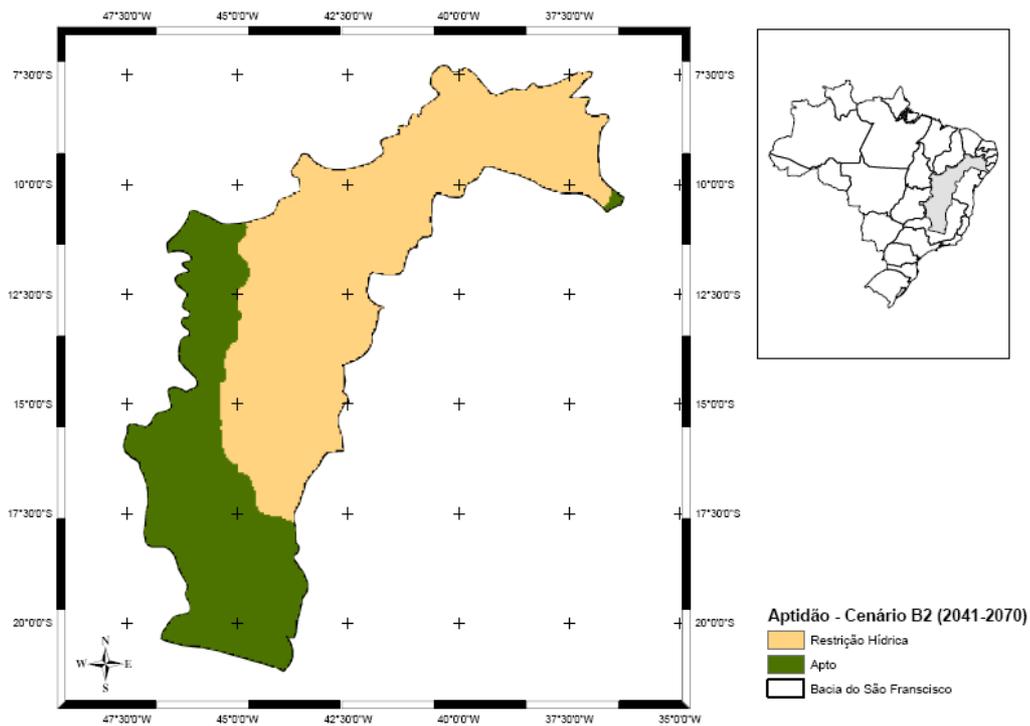


Figura 6.47. Mapa de aptidão para o cultivo da banana para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

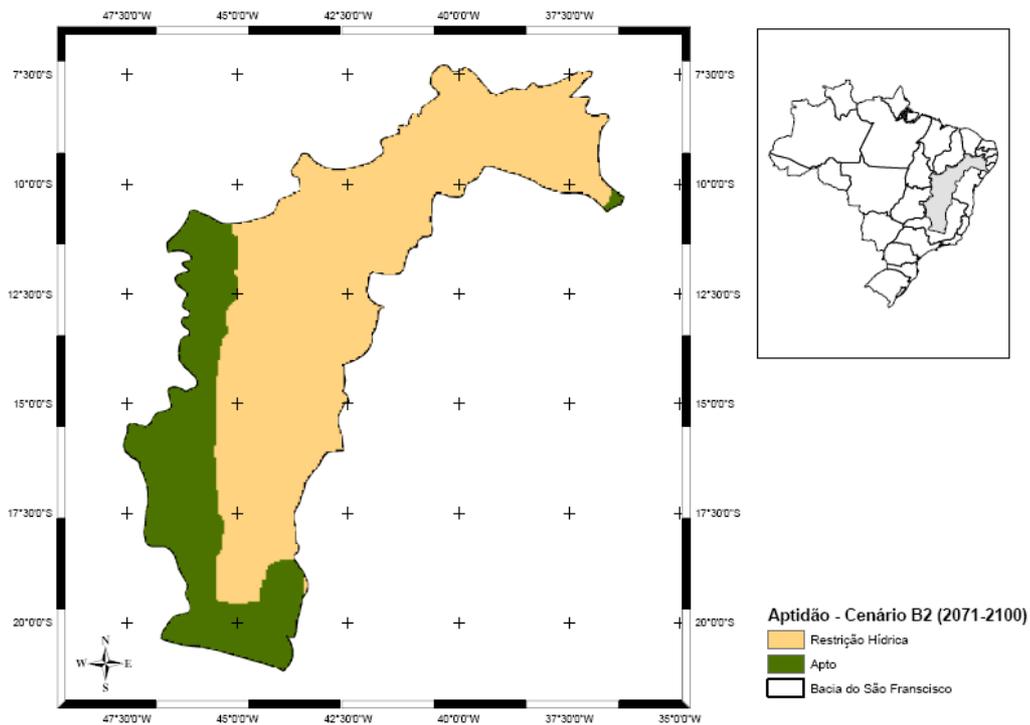


Figura 6.48. Mapa de aptidão para o cultivo da banana para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta para os cenários, A2 e B2, a precipitação como fator limitante ao cultivo da banana na bacia do São Francisco.

Para o cenário A2, no período de 2011-2040, é projetado que aproximadamente 2/3 bacia apresentará restrição hídrica ao cultivo da banana, estando às áreas consideradas aptas localizadas no oeste e sul da bacia. Para o período de 2041-2070 é projetado um aumento da área com restrição hídrica, sendo que para 2071-2100 as áreas aptas restringem-se a uma estreita faixa a oeste e uma pequena área ao sul.

Para o cenário B2, no período de 2011-2040, a projeção é similar a do mesmo período para o cenário A2, permanecendo praticamente constante para o período de 2041-2070. Para 2071-2100 a projeção é também similar a do mesmo período para o cenário A2, contudo, a área projetada como apta é maior.

### 6.4.3 - Café arábica

Nas Figuras 6.49 a 6.54 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura do café arábica no período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

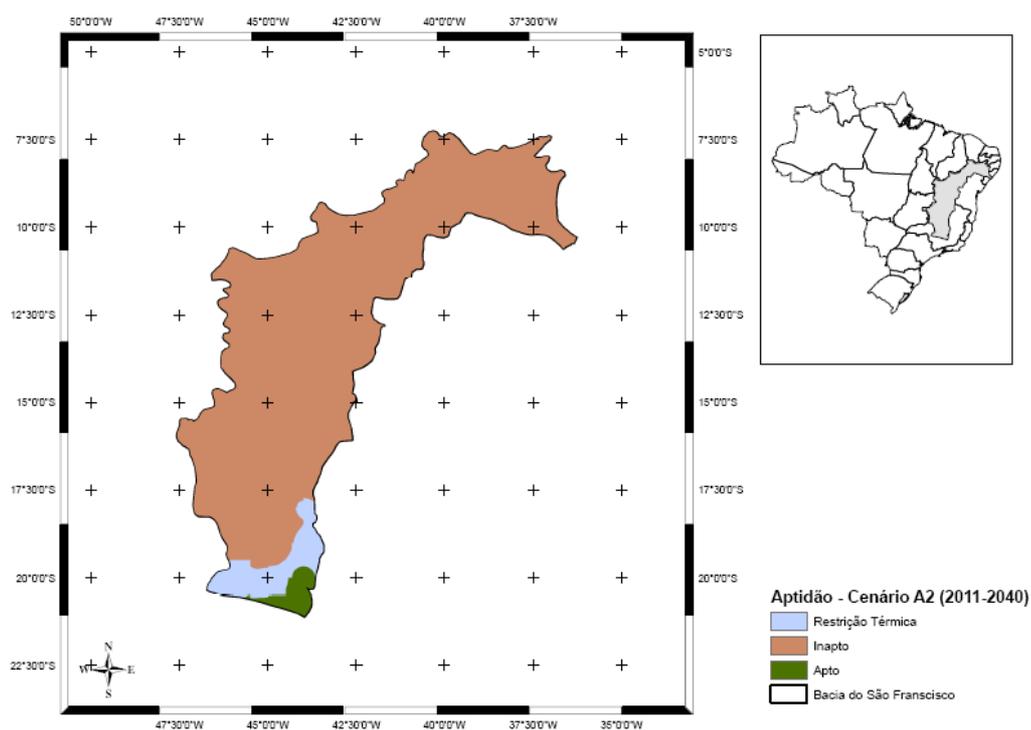


Figura 6.49. Mapa de aptidão para o cultivo do café arábica para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

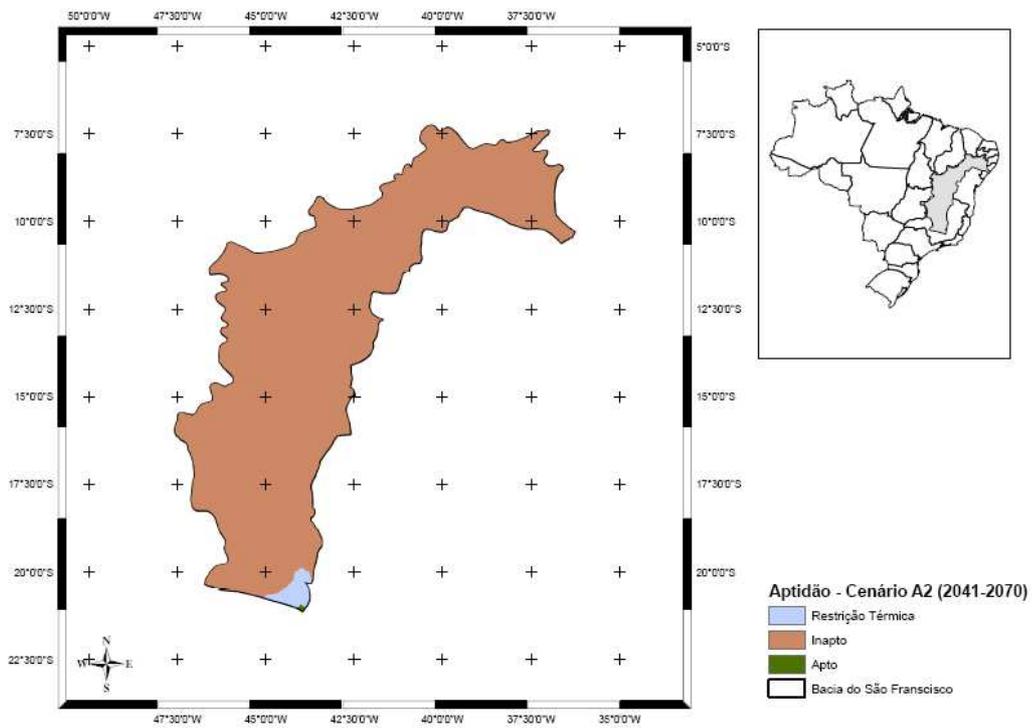


Figura 6.50 Mapa de aptidão para o cultivo do café arábica para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

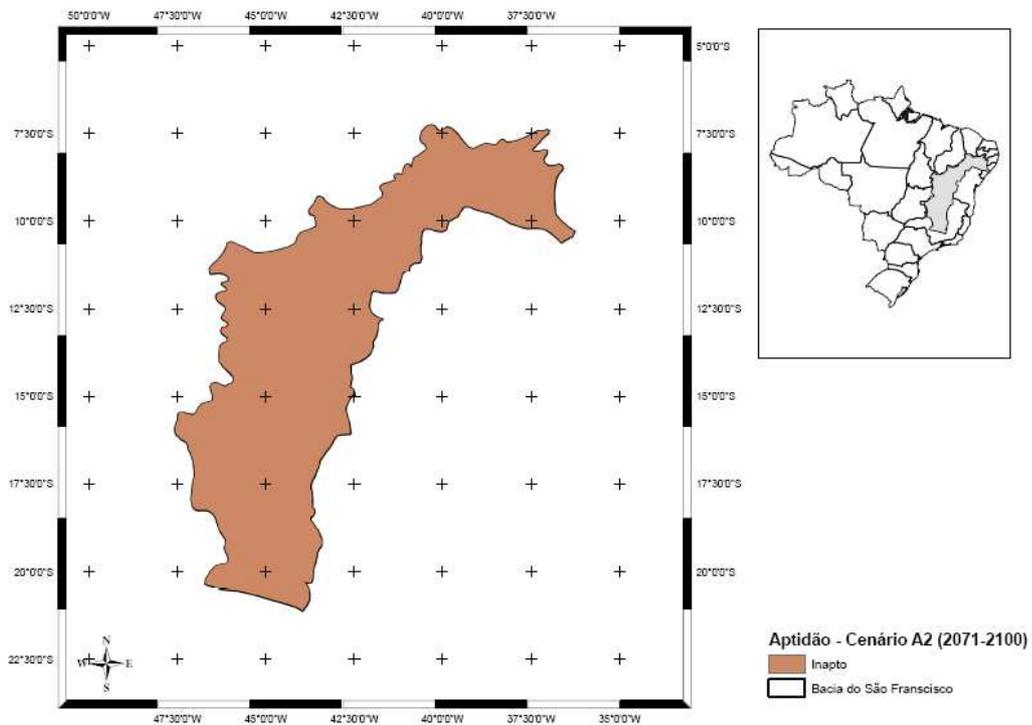


Figura 6.51. Mapa de aptidão para o cultivo do café arábica para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

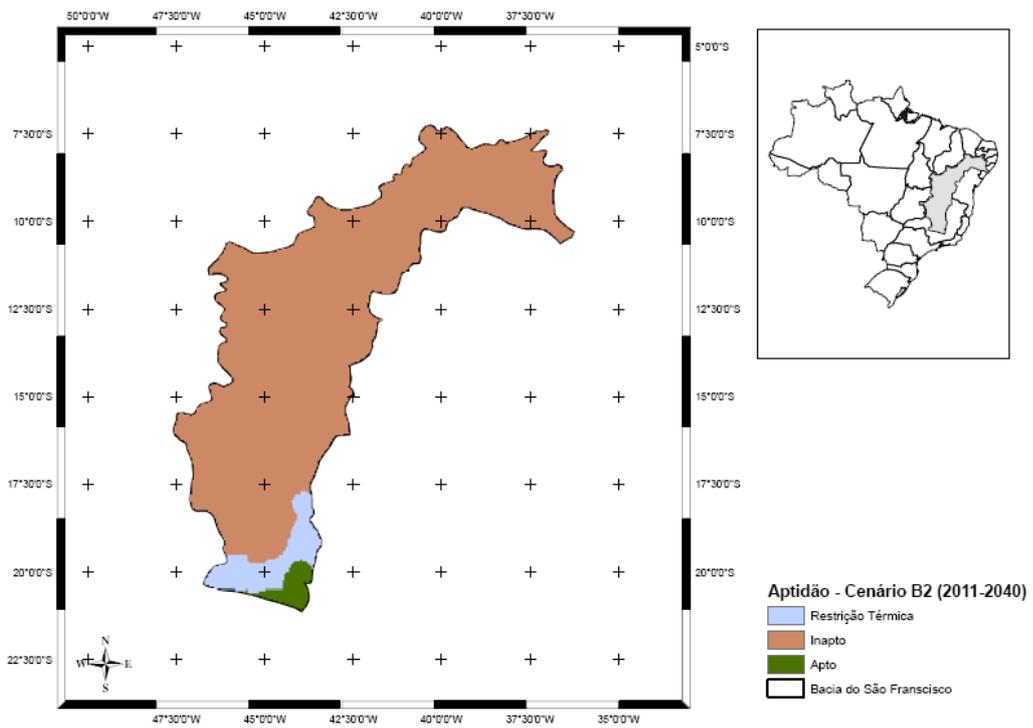


Figura 6.52. Mapa de aptidão para o cultivo do café arábica para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

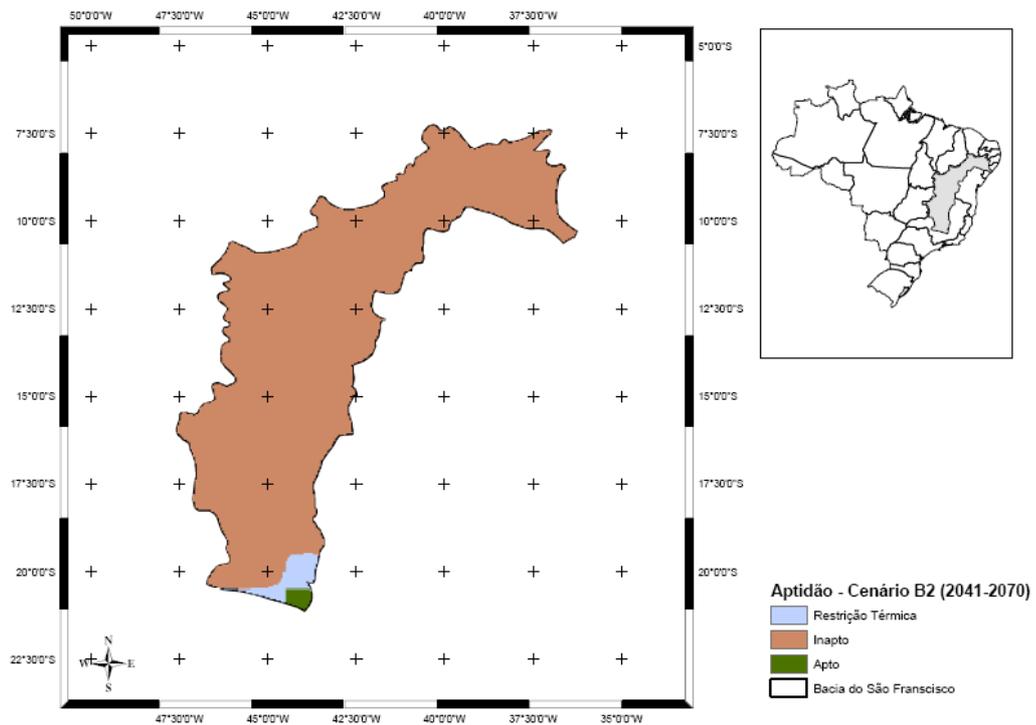


Figura 6.53. Mapa de aptidão para o cultivo do café arábica para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

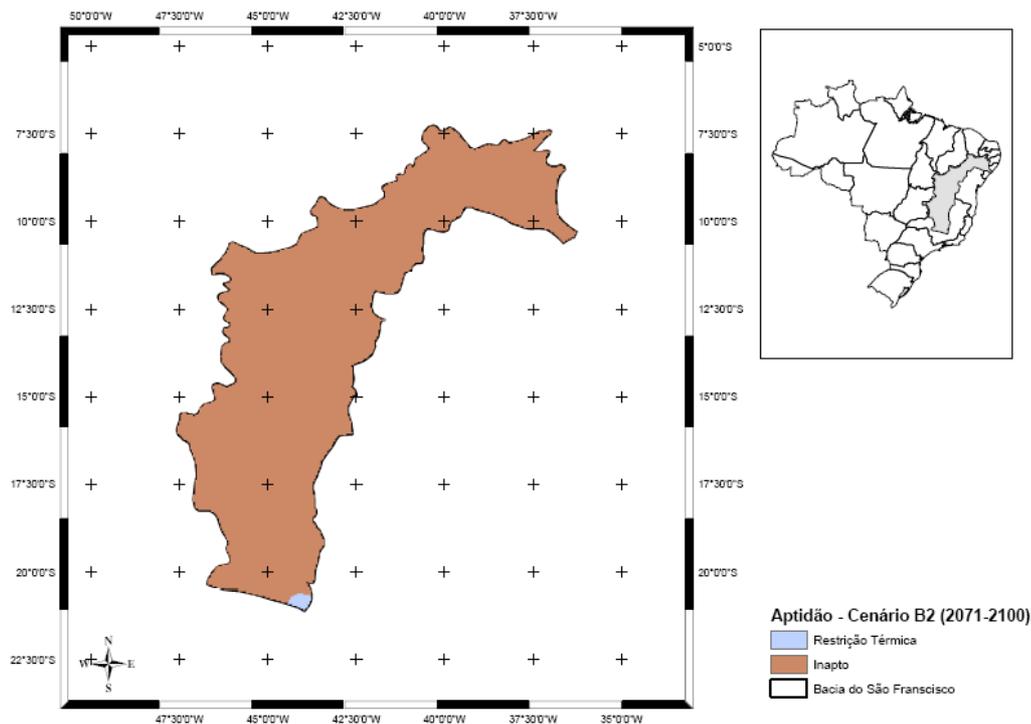


Figura 6.54. Mapa de aptidão para o cultivo do café arábica para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta ambos os cenários, A2 e B2, a temperatura como principal fator limitante ao cultivo do café arábica na bacia do São Francisco. O déficit hídrico mostrou-se, resumidamente, para os três períodos de ambos os cenários, como sendo um fator restritivo na região central da bacia, de inaptidão ao norte e de aptidão ao sul e na foz do Rio São Francisco. Ressalta-se, contudo, que a faixa de inaptidão provocada pelo déficit hídrico estendeu-se para o sul da bacia no decorrer dos períodos.

Para o cenário A2, no período de 2011-2040, é projetada uma pequena área de aptidão ao cultivo do café arábica no extremo sul da bacia, seguida de uma faixa apresentando restrição térmica, com a quase totalidade do território apresentando inaptidão. Para 2041-2070 a pequena faixa de aptidão praticamente desaparece, sendo substituída por uma faixa de restrição térmica. Para 2071-2100 toda bacia do São Francisco é projetada como inapta para o cultivo do café arábica.

Para o cenário B2, a projeção para o período de 2011-2040 é praticamente a mesma do cenário A2 para o mesmo período. Para 2041-2070 a faixa de aptidão reduz-se a menos da metade, sendo substituída por uma faixa de restrição térmica no período de 2071-2100.

#### 6.4.4 - Café robusta

Nas Figuras 6.55 a 6.60 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura do café robusta no período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

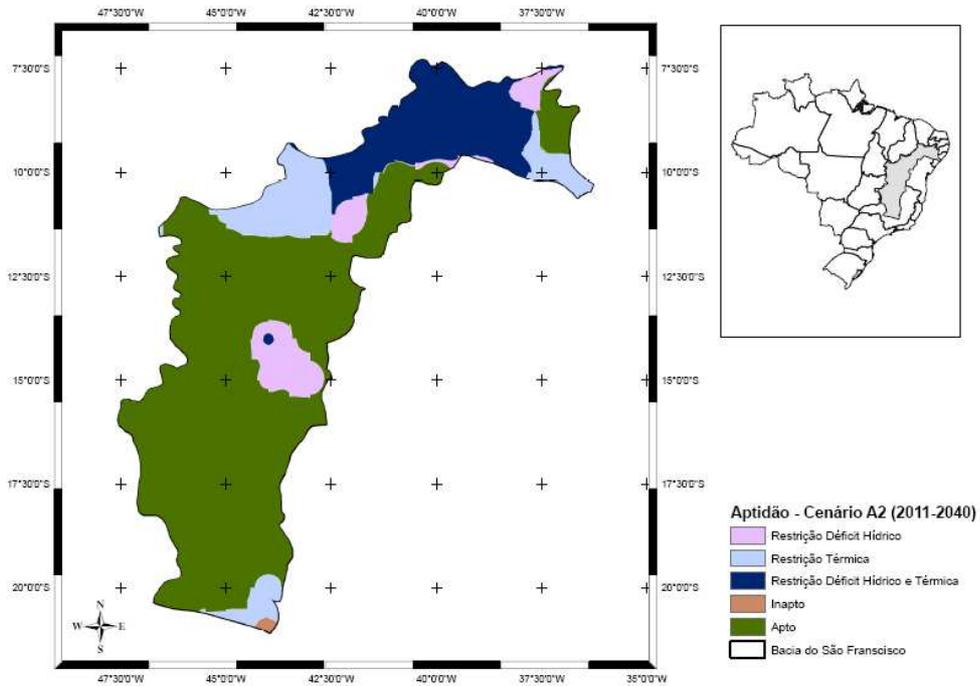


Figura 6.55 Mapa de aptidão para o cultivo do café robusta para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

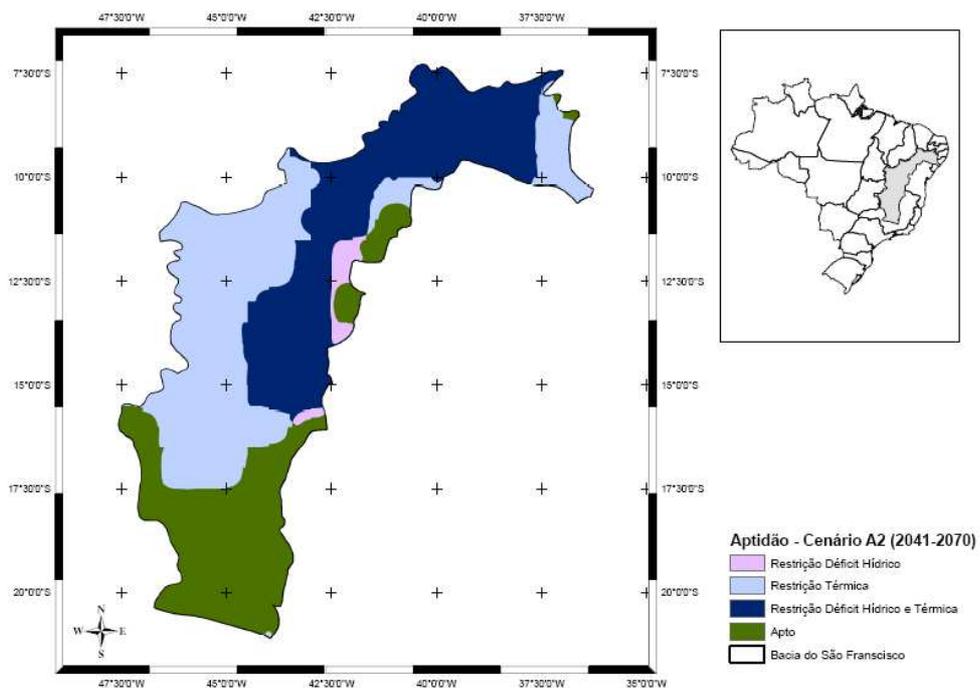


Figura 6.56. Mapa de aptidão para o cultivo do café robusta para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

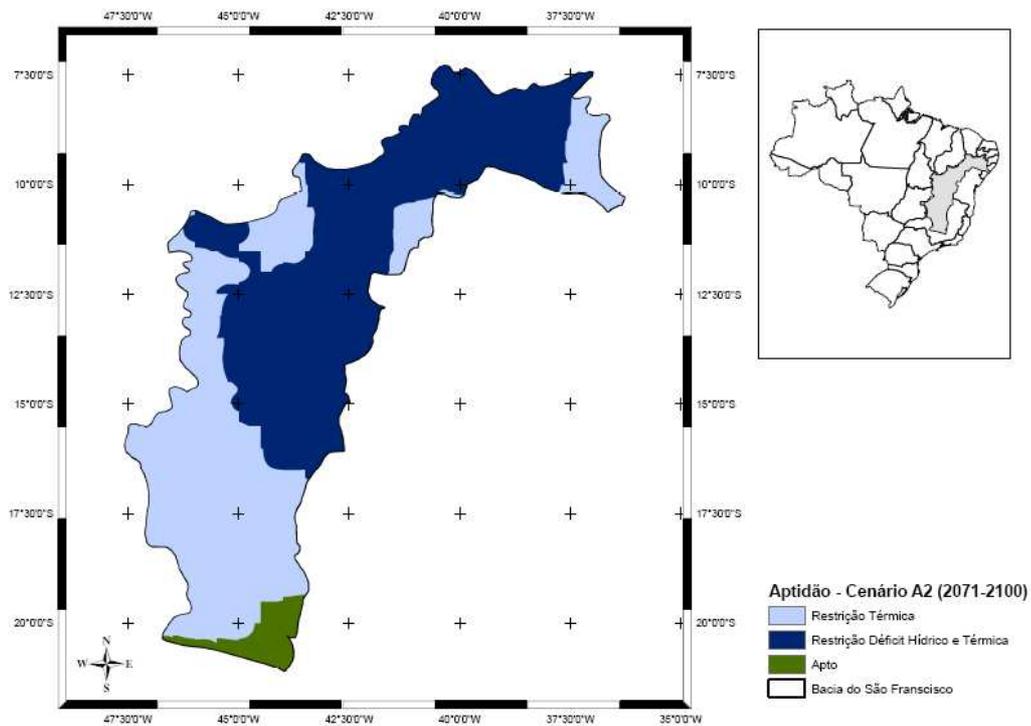


Figura 6.57. Mapa de aptidão para o cultivo do café robusta para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

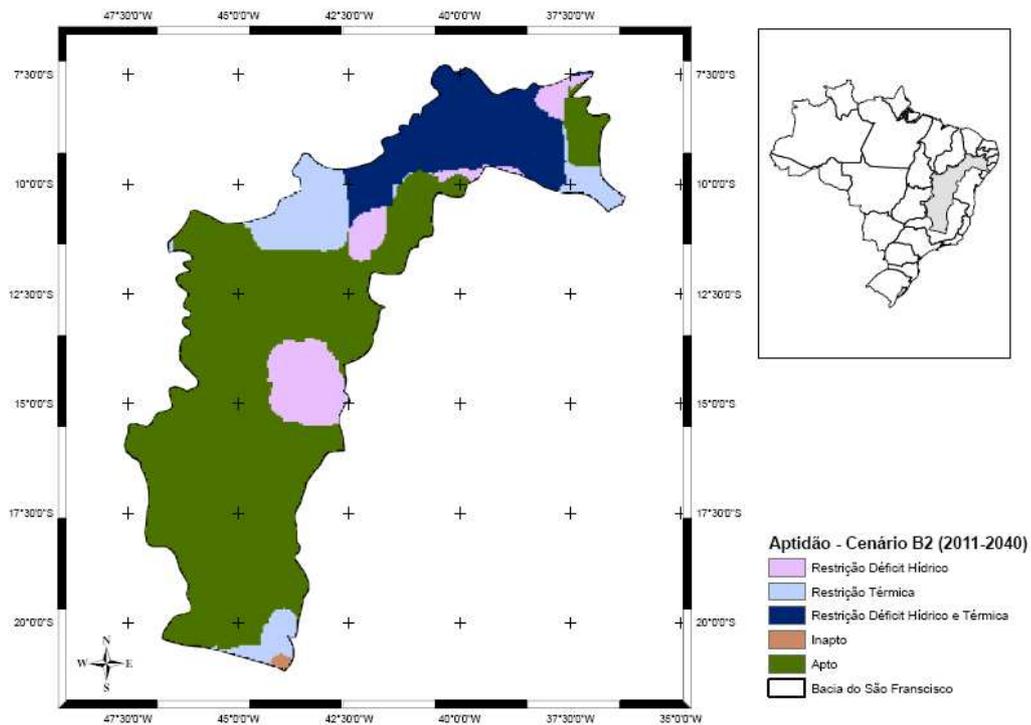


Figura 6.58. Mapa de aptidão para o cultivo do café robusta para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

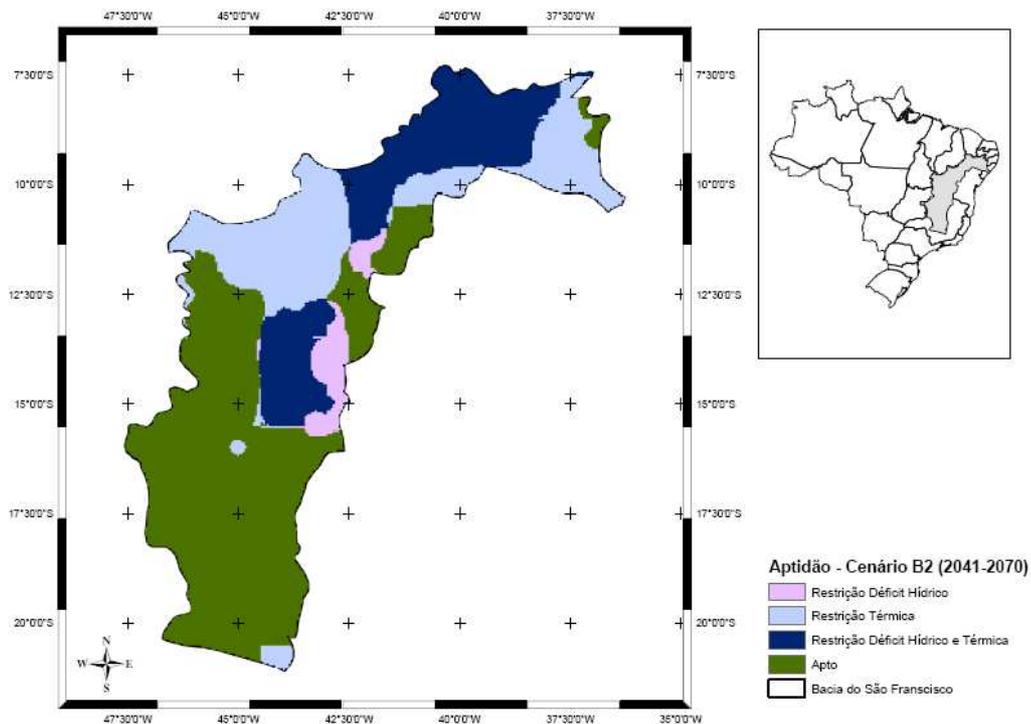


Figura 6.59. Mapa de aptidão para o cultivo do café robusta para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

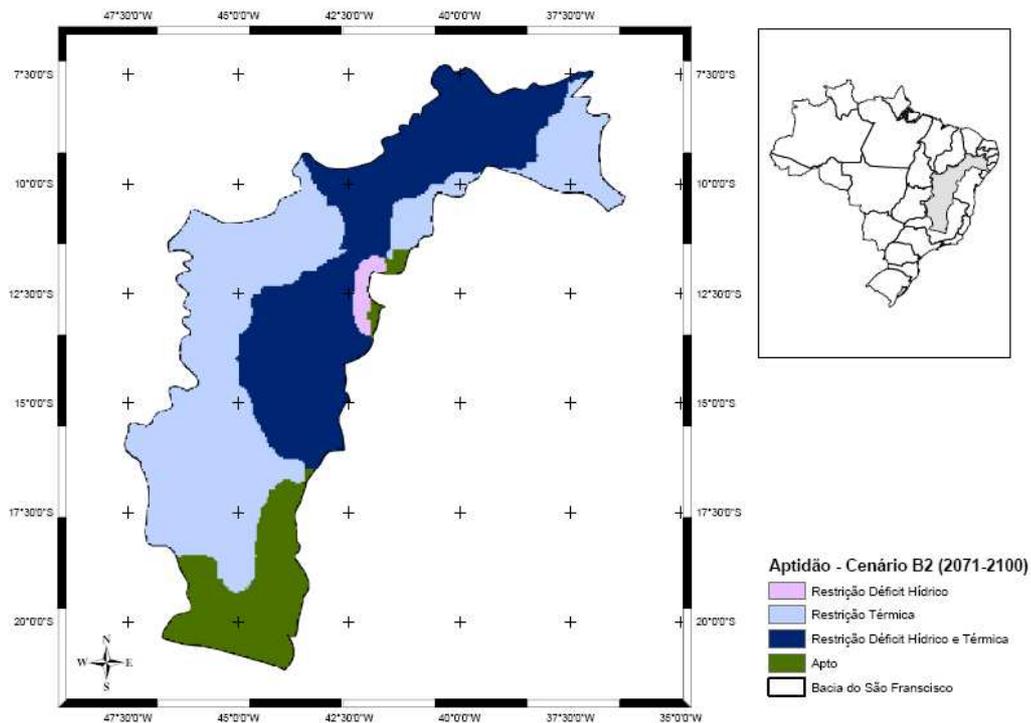


Figura 6.60. Mapa de aptidão para o cultivo do café robusta para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta ambos os cenários, A2 e B2, a temperatura como principal fator limitante ao cultivo do café robusta na bacia do São Francisco

Para o cenário A2, no período de 2011-2040, a temperatura é projetada como principal fator de aptidão na maior parte da bacia, sendo um fator restritivo no sul e no norte, estendendo-se até a foz do Rio São Francisco. Apresenta-se ainda como fator de inaptidão numa pequena área no extremo sul da bacia. Para o mesmo período o déficit hídrico apresenta-se como um fator restritivo no norte e numa faixa no centro da bacia, sendo fator de aptidão no sul e na região da foz Rio São Francisco.

Com o cruzamento das informações projetou-se que aproximadamente 2/3 da bacia apresentará aptidão ao cultivo do café robusta (centro-sul da bacia e pequena área ao norte), com uma faixa de restrição térmica e, ou, ao déficit hídrico, que vai do norte até a foz Rio São Francisco e com uma área de restrição ao déficit hídrico no centro da bacia.

Para 2041-2070 projeta-se significativa redução na área considerada apta, com aumento da restrição térmica e, ou, ao déficit hídrico. Para 2071-2100 a área projetada como apta restringe-se a uma pequena faixa ao sul, com a quase totalidade da área da bacia sendo restringida ao cultivo do café robusta pela temperatura e, ou, pelo déficit hídrico.

Para o cenário B2, no período de 2011-2040, a projeção é similar a do mesmo período para o cenário A2. Para 2041-2070 a redução da área projetada como apta não é tão significativa quando comparada ao mesmo período para o cenário A2, sendo que para 2071-2100 esta localizada ao sul da bacia e numa pequena faixa a leste.

#### **6.4.5 - Cana de açúcar**

Nas Figuras 6.61 a 6.66 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura da cana-de-açúcar no período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

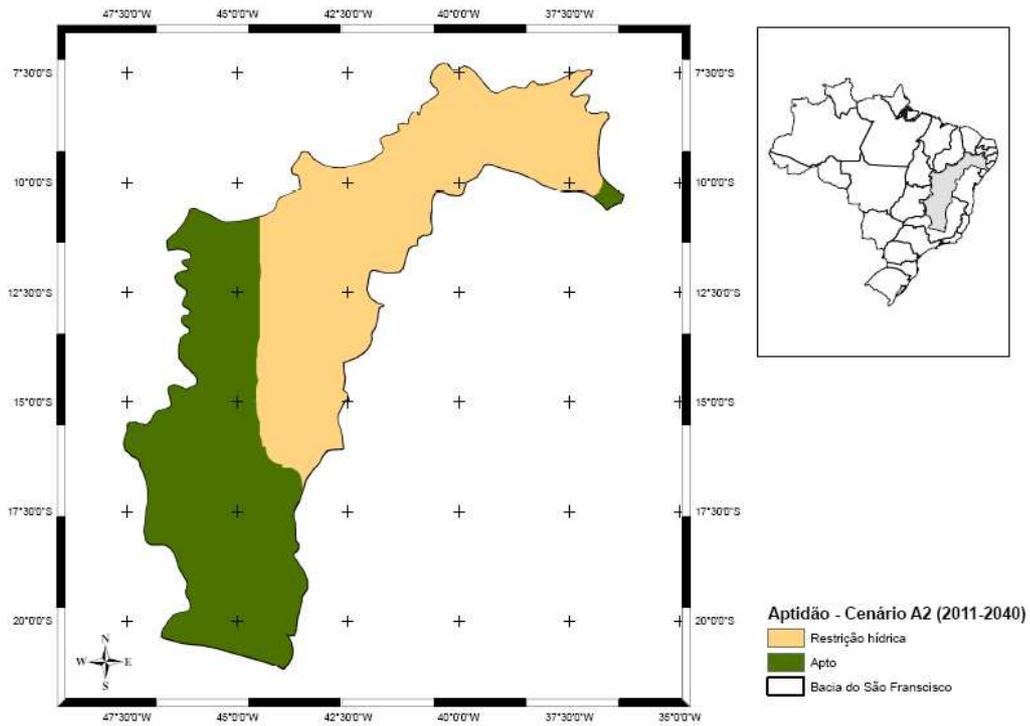


Figura 6.61. Mapa de aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

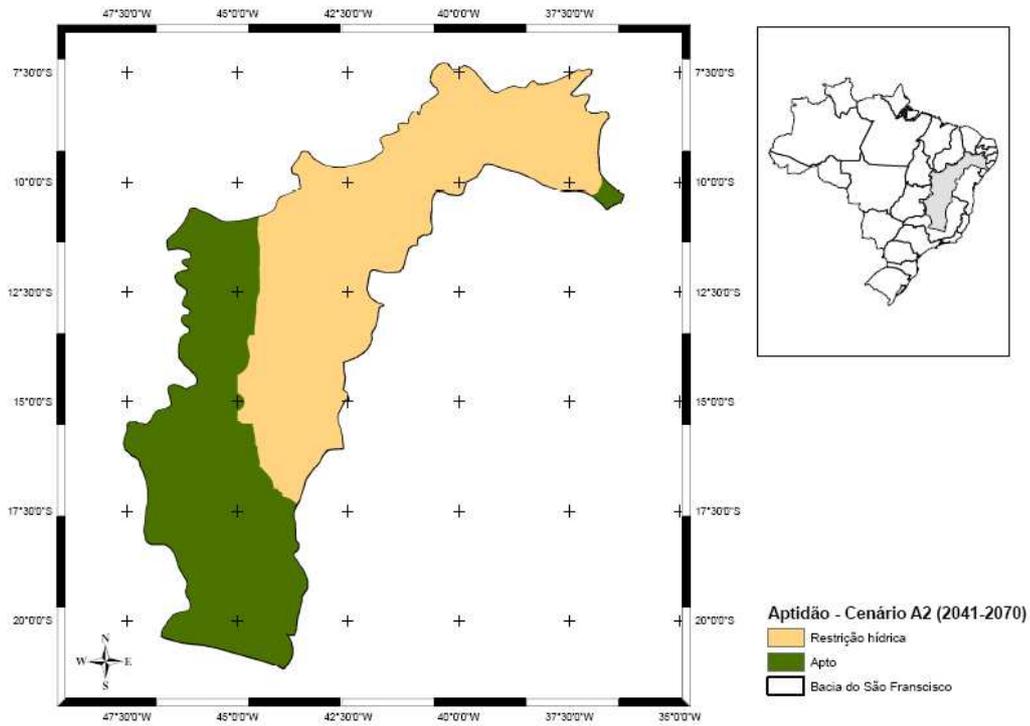


Figura 6.62. Mapa de aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

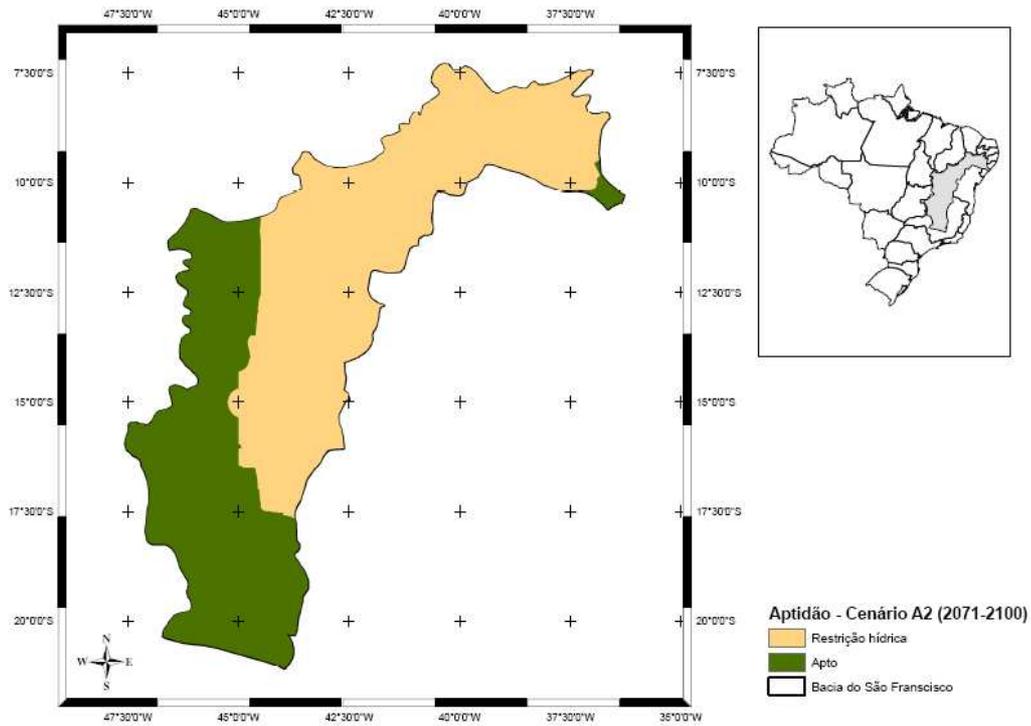


Figura 6.63. Mapa de aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

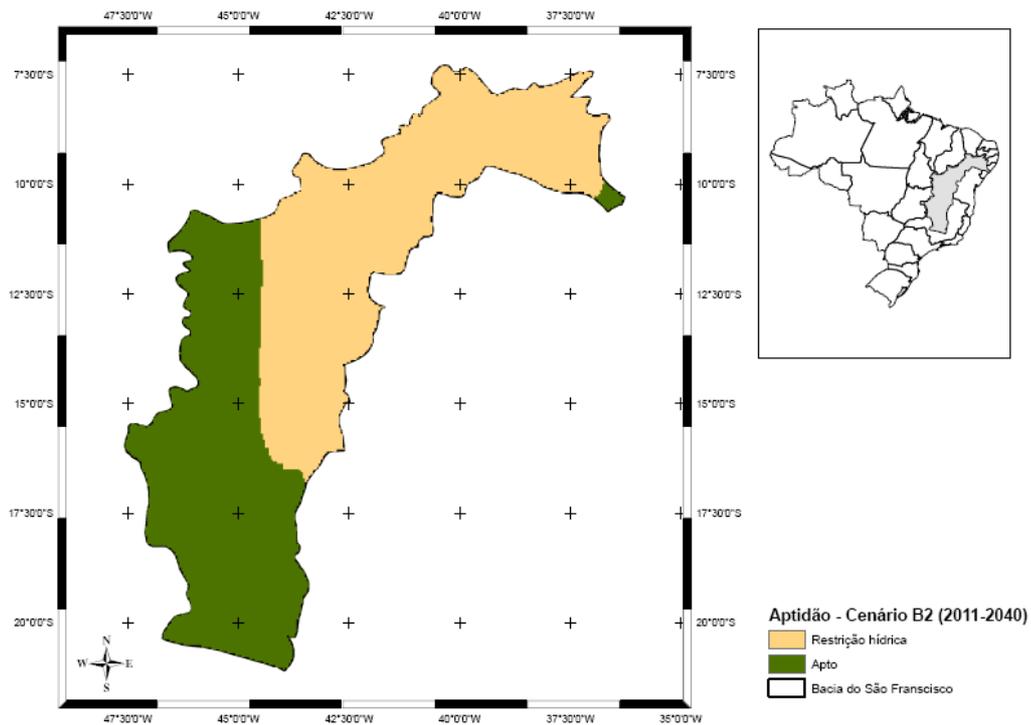


Figura 6.64 Mapa de aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

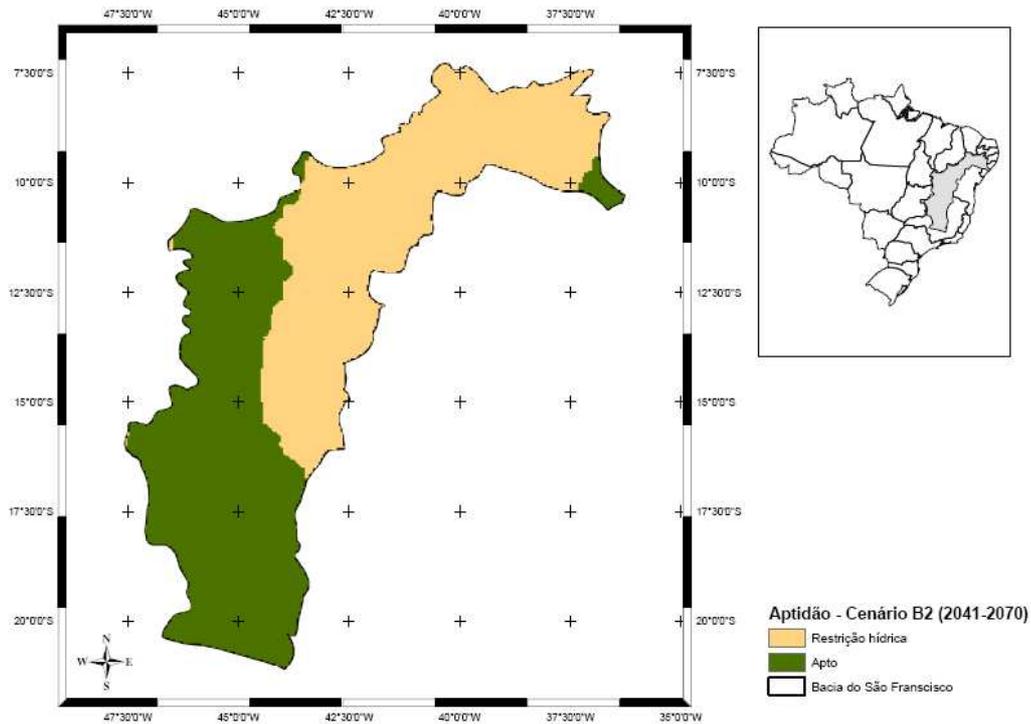


Figura 6.65. Mapa de aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

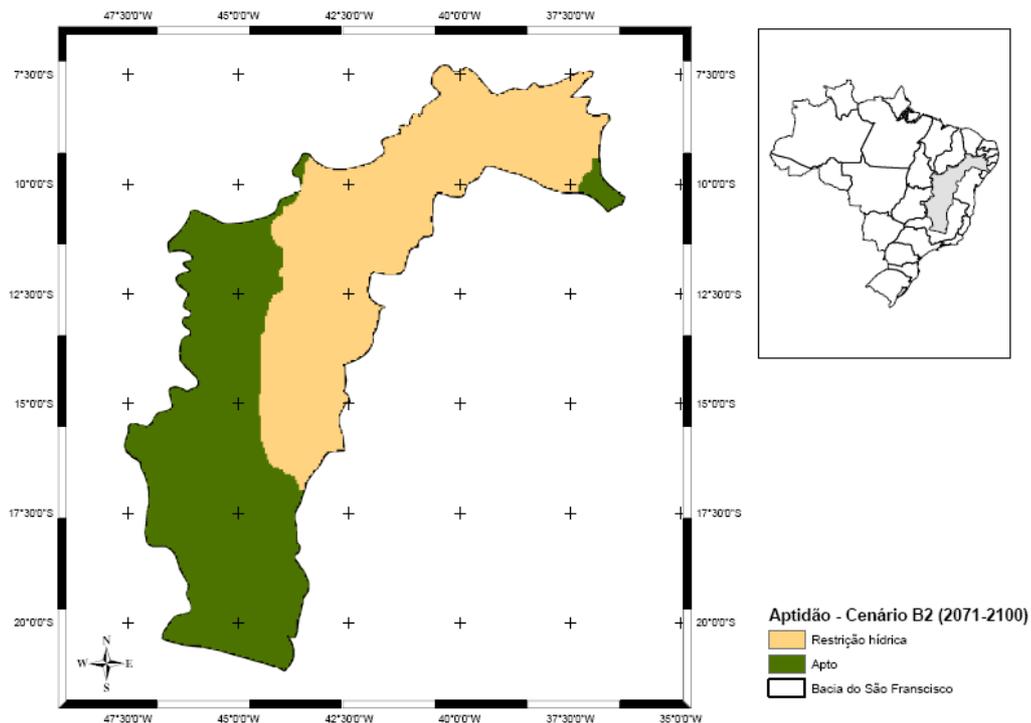


Figura 5.66. Mapa de aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os ambos os cenários, A2 e B2, a precipitação como fator limitante ao cultivo da cana-de-açúcar na bacia do São Francisco. Para os três períodos analisados, de ambos os cenários, a

distribuição espacial da área projetada como apta, e da área projetada como restrita pela precipitação, permanece constante.

O sul e o oeste da bacia, juntamente com a foz do Rio São Francisco são a áreas projetadas como aptas, sendo o norte e o leste projetados como áreas com restrição hídrica.

#### 6.4.6 - Coco-anão

Nas Figuras 6.67 a 6.72 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura do coco-anão no período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

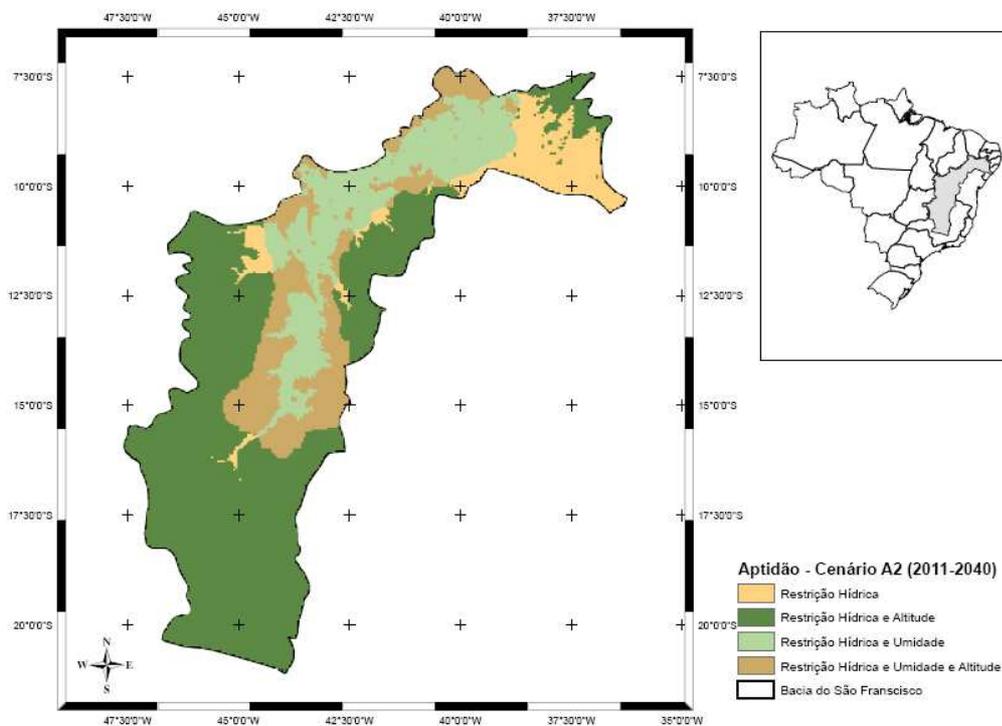


Figura 6.67. Mapa de aptidão para o cultivo do coco-anão para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

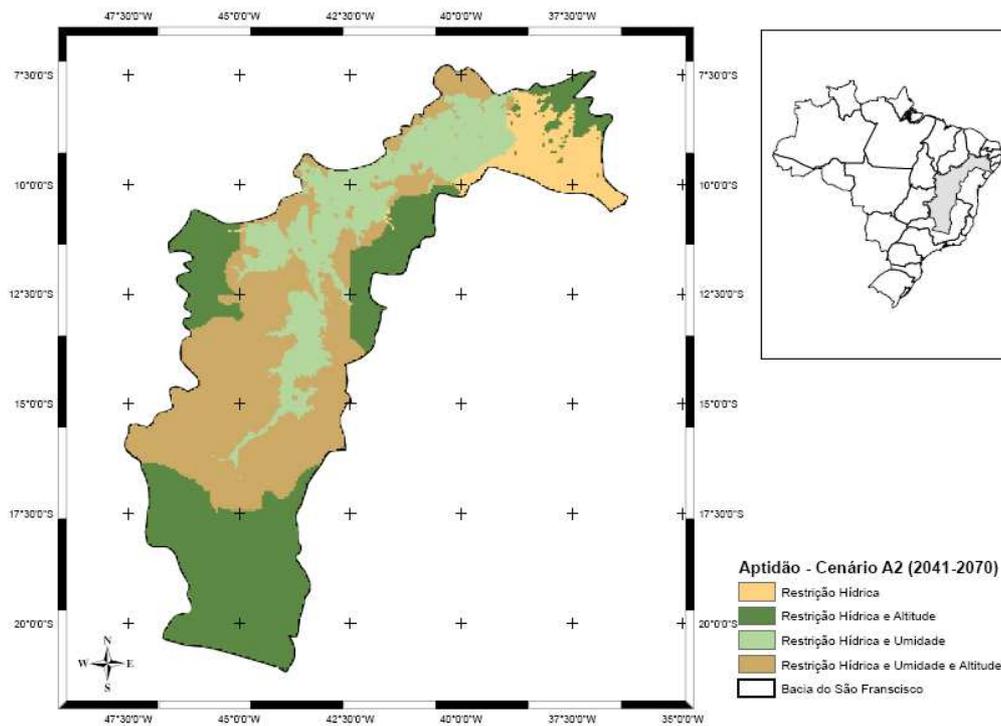


Figura 6.68. Mapa de aptidão para o cultivo do coco-anão para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

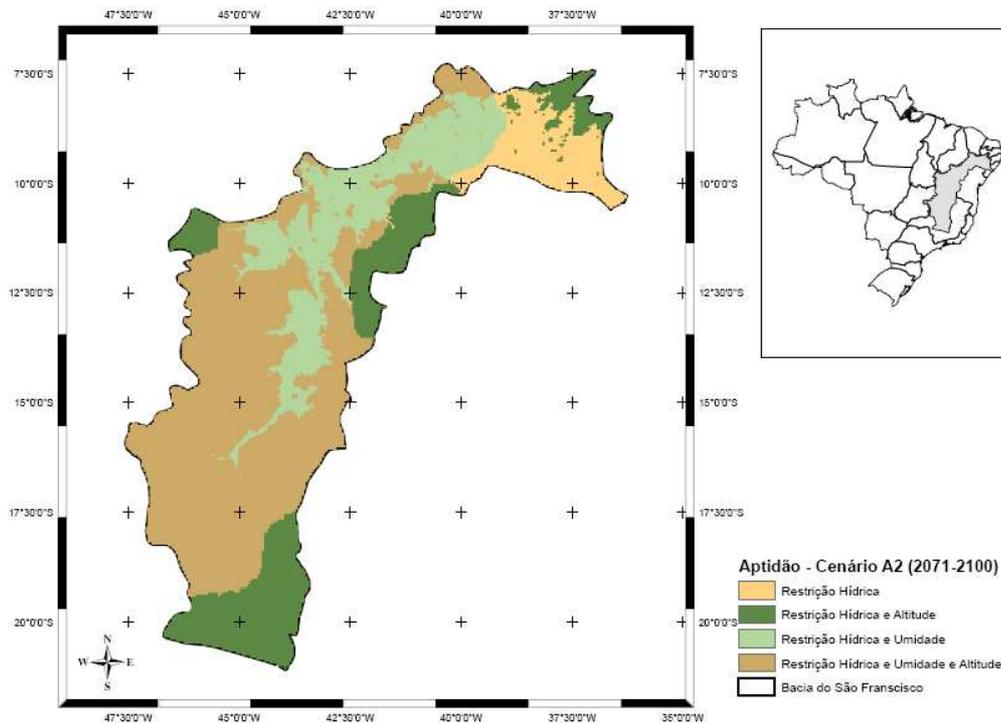


Figura 6.69. Mapa de aptidão para o cultivo do coco-anão para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

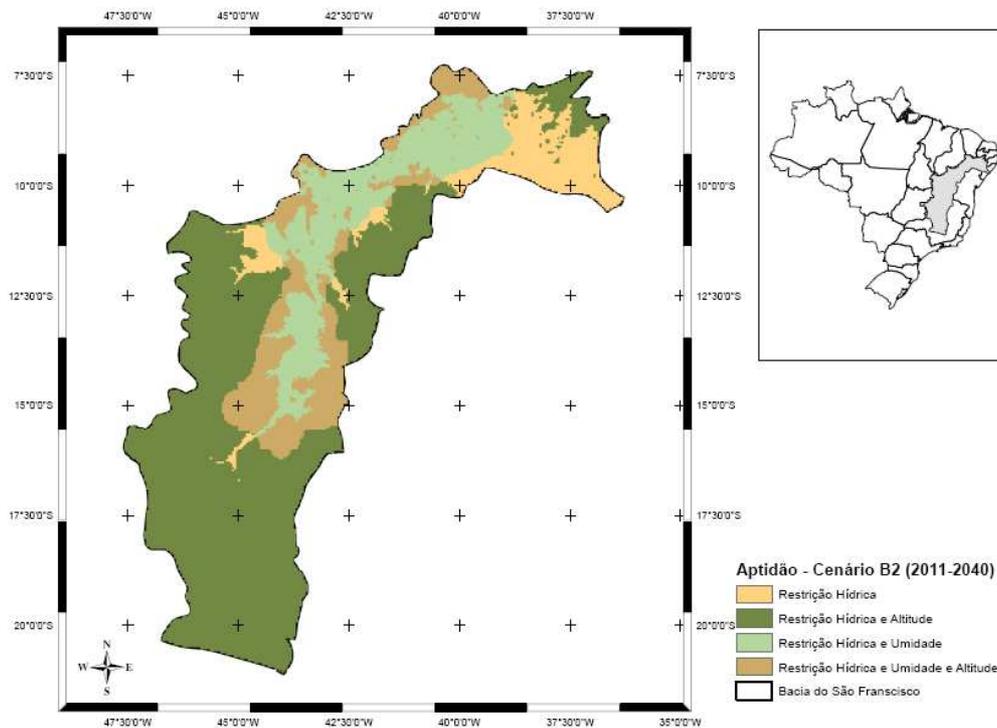


Figura 6.70. Mapa de aptidão para o cultivo do coco-anão para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

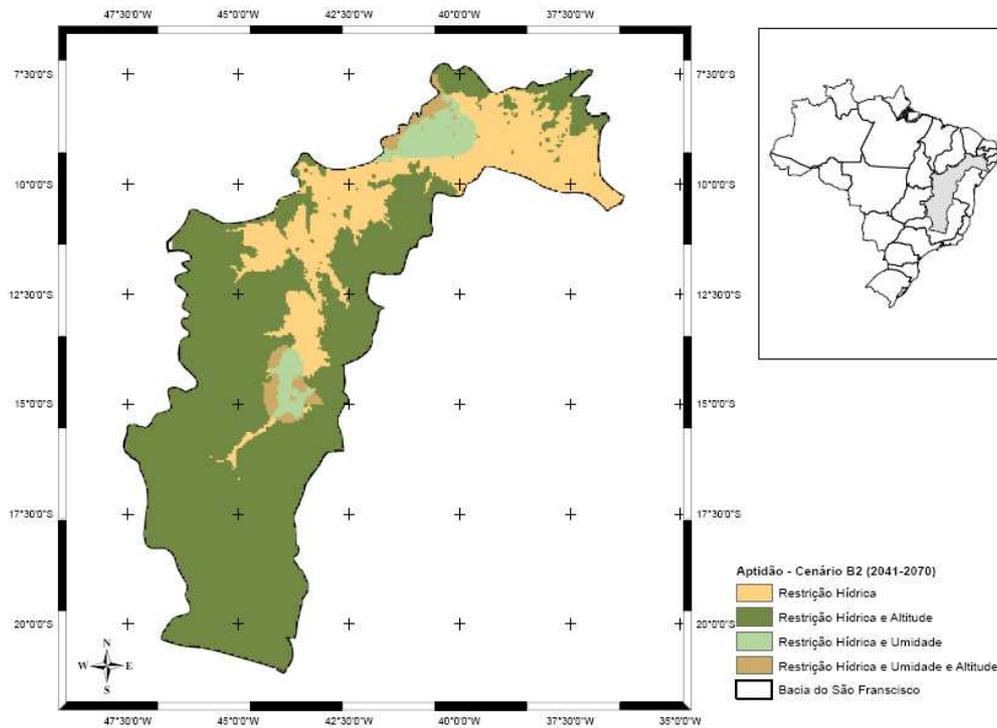


Figura 6.71. Mapa de aptidão para o cultivo do coco-anão para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

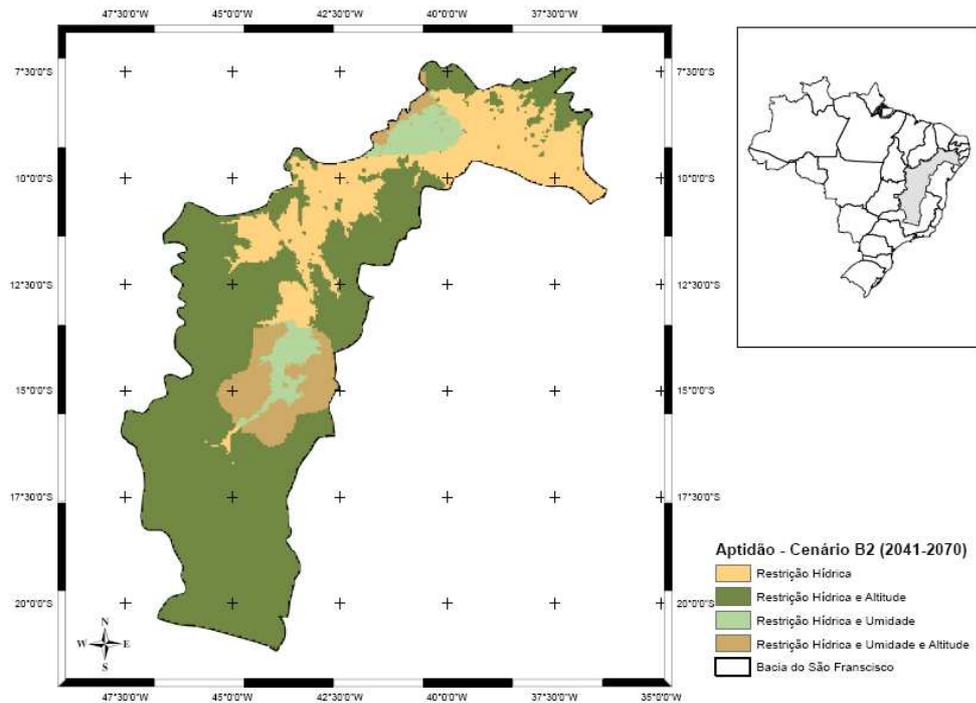


Figura 6.72. Mapa de aptidão para o cultivo do coco-anão para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os ambos os cenários, A2 e B2, a precipitação como principal fator limitante ao cultivo do coco-anão na bacia do São Francisco.

Para o cenário A2 projeta-se que o conjunto das restrições hídrica, da umidade relativa e da altitude tornar-se-á, no decorrer dos períodos, o principal fator restritivo ao cultivo do coco-anão.

Para o cenário B2, no período de 2011-2040, a soma das restrições hídrica e altitude é projetada como o fator restritivo mais importante, com uma considerável área sendo afetada pelo conjunto das três, a saber: restrição hídrica, da umidade relativa e da altitude. Para 2041-2070 a projeção é similar a do período anterior, notando-se a redução da faixa formada pelo conjunto das três restrições. Para 2071-2100 o conjunto das três restrições volta a aumentar, contudo, a soma das restrições hídrica e altitude ainda é projetada como a mais importante.

## 6.4.7 - Feijão comum

### 6.4.7.1 - Feijão (plantado no mês de janeiro)

Nas Figuras 6.73 a 6.78 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura do feijão, plantado no mês de janeiro, para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

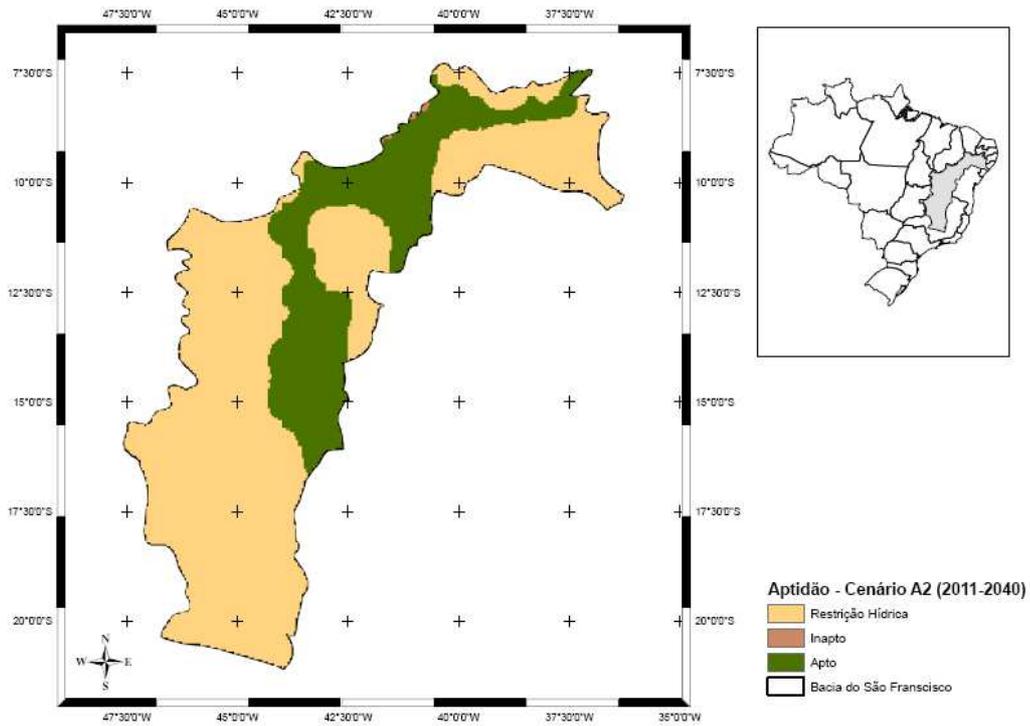


Figura 6.73. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de janeiro para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

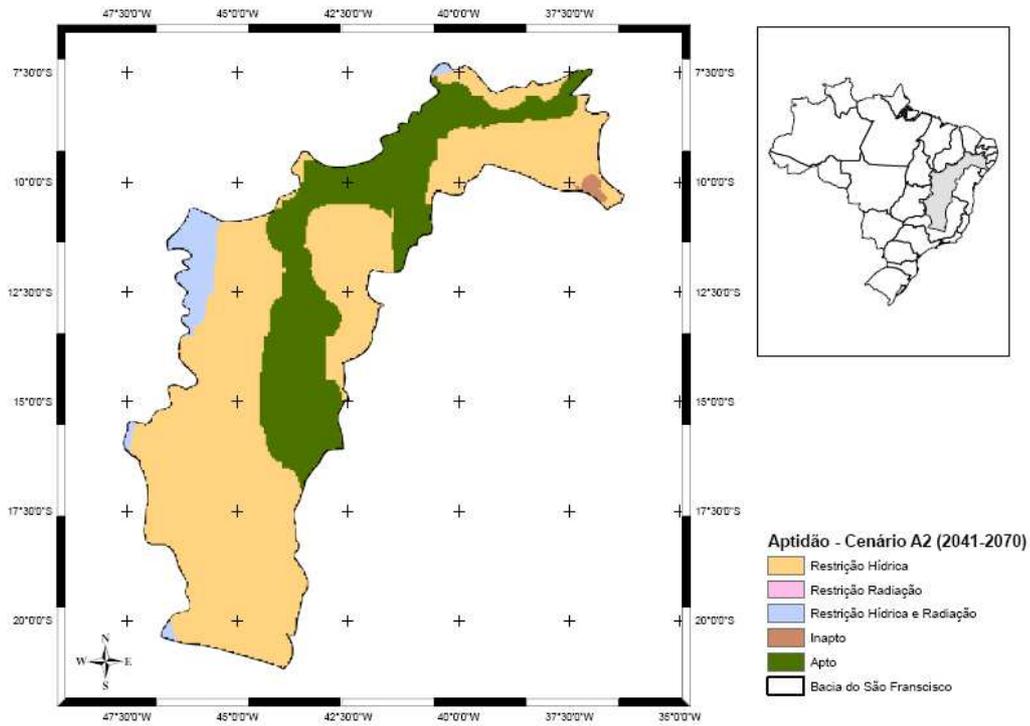


Figura 6.74. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de janeiro para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

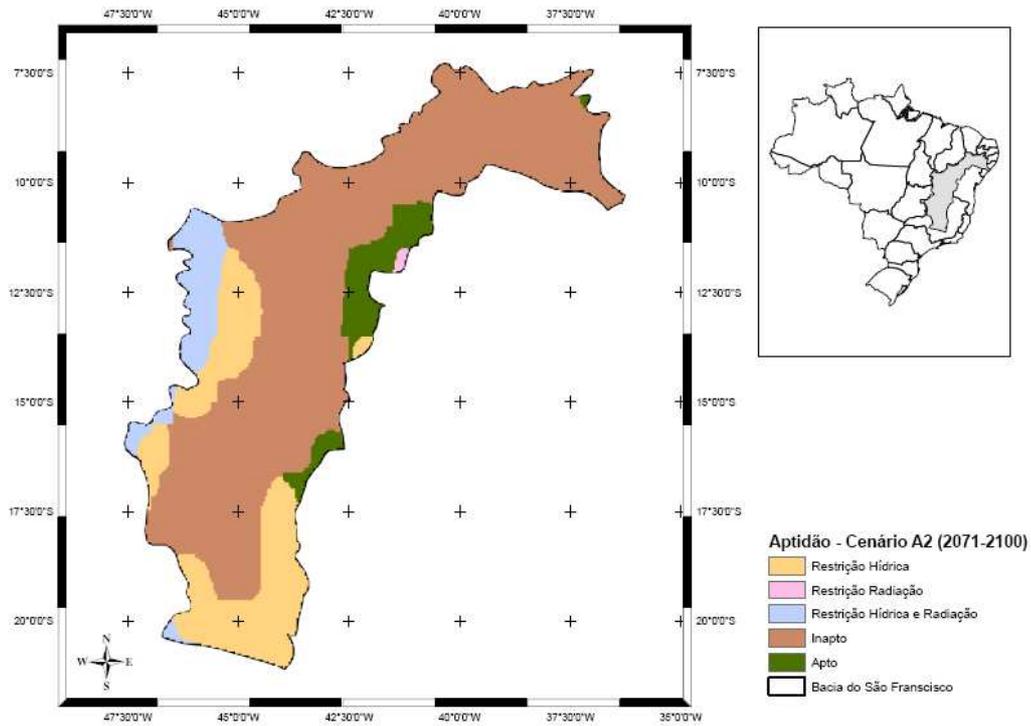


Figura 6.75. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de janeiro para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

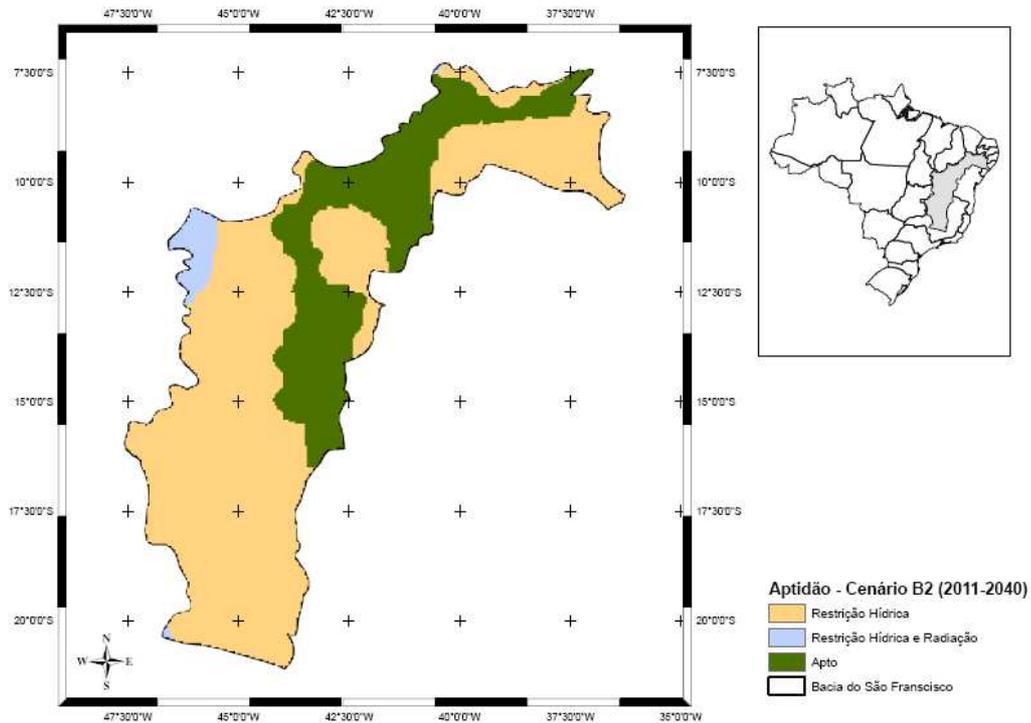


Figura 6.76. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de janeiro para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

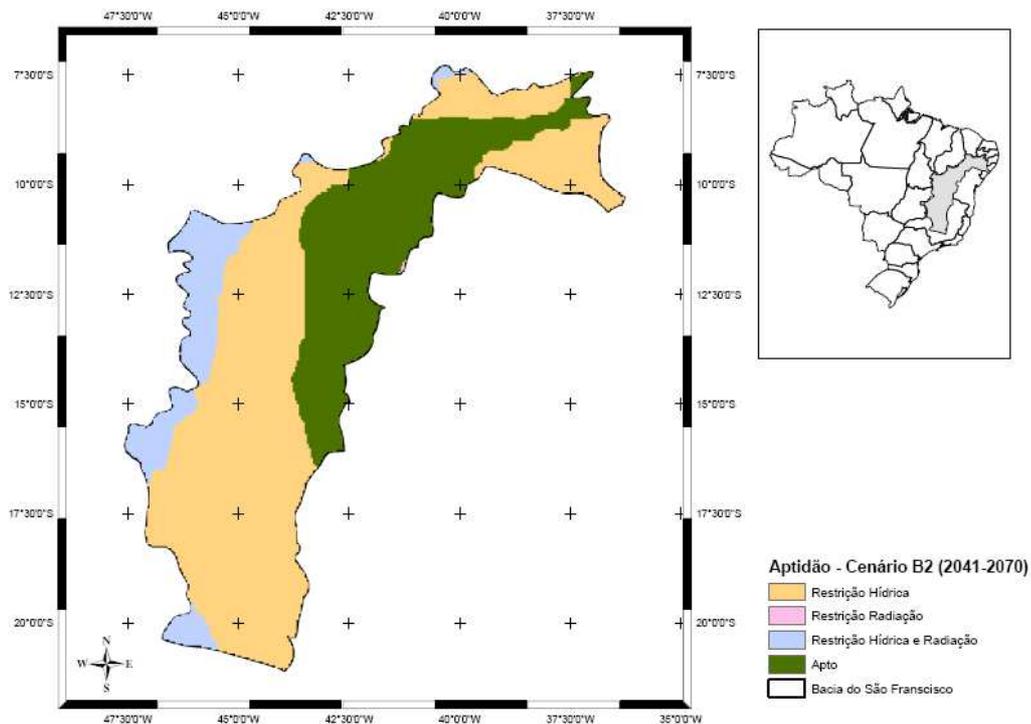


Figura 6.77. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de janeiro para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

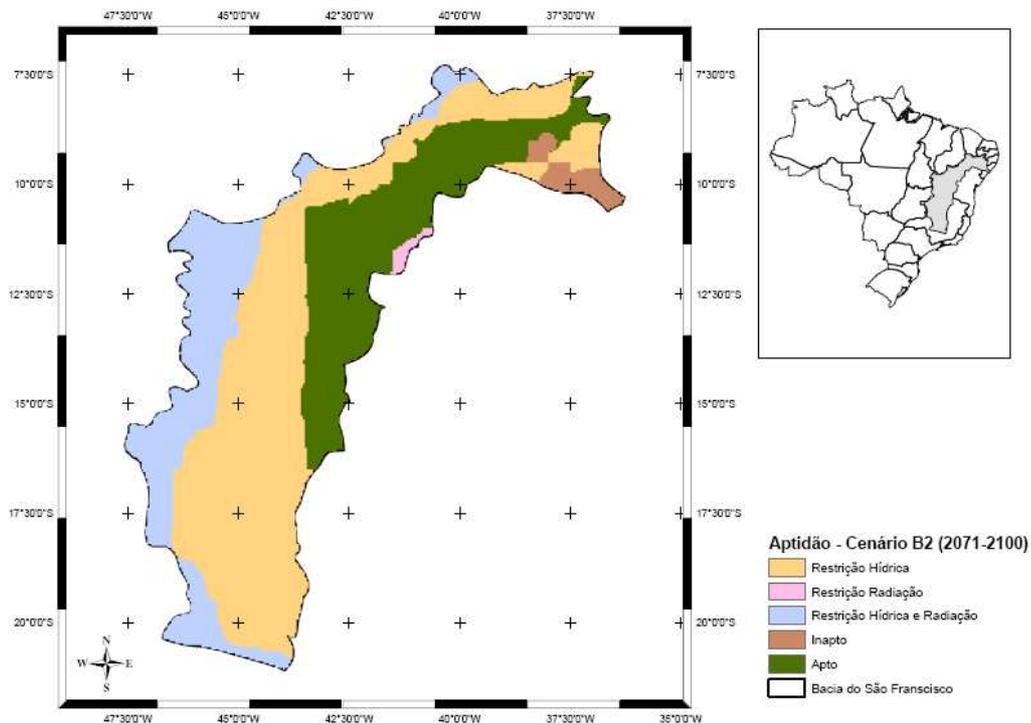


Figura 6.78. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de janeiro para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os ambos os cenários, A2 e B2, a precipitação como principal fator limitante ao cultivo do feijão comum plantado no mês de janeiro na bacia do São Francisco.

Para o cenário A2, no período de 2011-2040, o modelo projeta que aproximadamente 2/3 da bacia apresentará restrição hídrica ao cultivo do feijão comum. Destaca-se ainda a considerável faixa de aptidão localizada no centro e norte da bacia, e uma estreita faixa considerada inapta no extremo norte. Para o período de 2041-2070 a faixa projetada como sendo de aptidão é praticamente a mesma que a do período anterior, nota-se ainda, que é projetada uma faixa com restrição hídrica e de radiação a oeste, e numa pequena área ao norte. Também há a presença de uma área de inaptidão próxima a foz do Rio São Francisco. Para o período de 2071-2100 é projetada uma extensa faixa de inaptidão, compreendendo aproximadamente 2/3 da bacia, estendendo-se desde o norte até o centro sul, e grande redução da área considerada apta com aumento da área com restrição hídrica e de radiação.

Para o cenário B2, no período de 2011-2040 a projeção do modelo é similar a do mesmo período para o cenário A2, destacando-se, contudo, a presença de uma faixa a oeste apresentando restrição hídrica e de radiação. Para o período de 2041-2070, tanto a faixa de aptidão quanto a faixa com restrição hídrica e de radiação, aumentam consideravelmente de tamanho. Para 2071-2100 a projeção do modelo é similar a anterior, destacando-se o aparecimento de uma faixa de inaptidão na área da foz do rio São Francisco.

#### **6.4.7.2 - Feijão (plantado no mês de maio)**

Nas Figuras 6.79 a 6.84 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura do feijão, plantado no mês de maio, para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

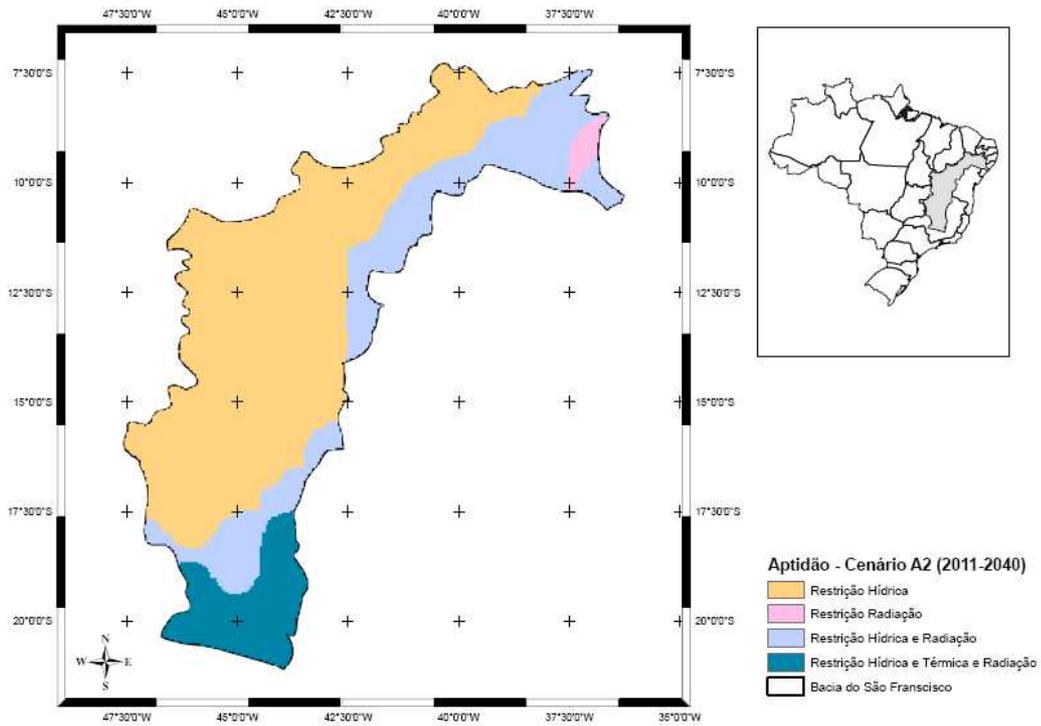


Figura 6.79. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de maio para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

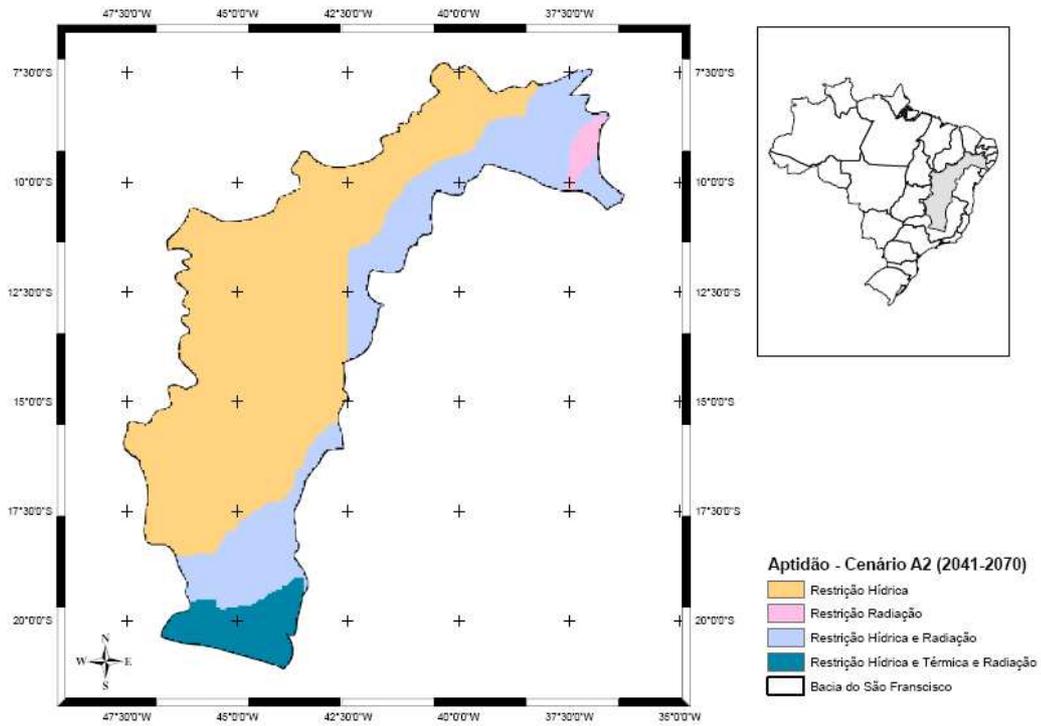


Figura 6.80. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de maio para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

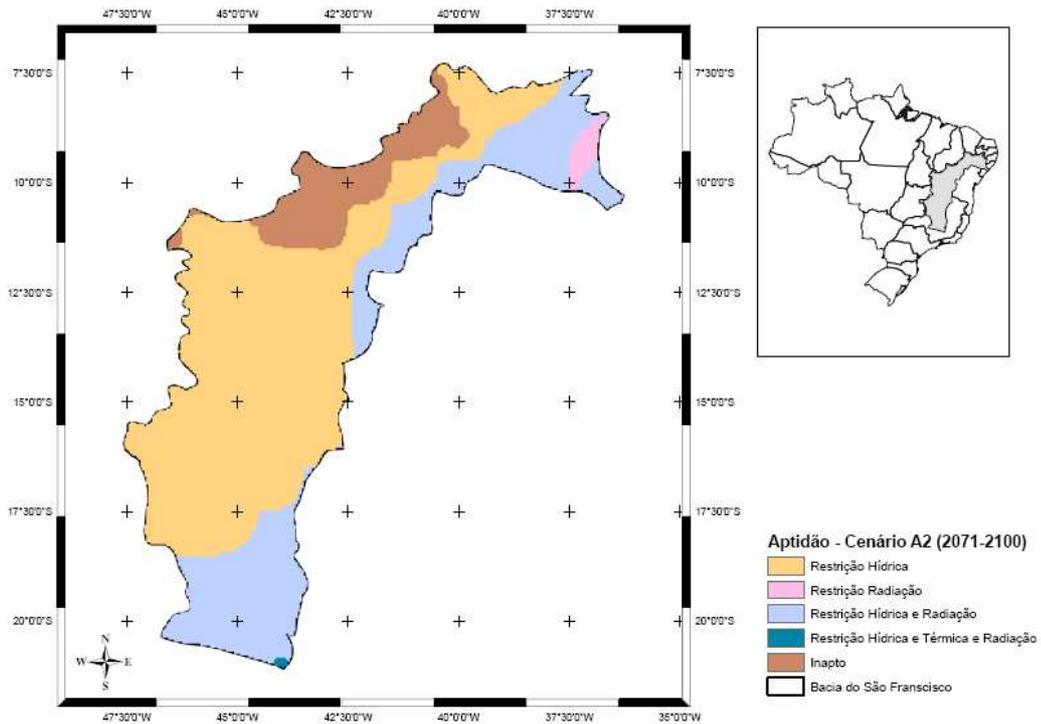


Figura 6.81. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de maio para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

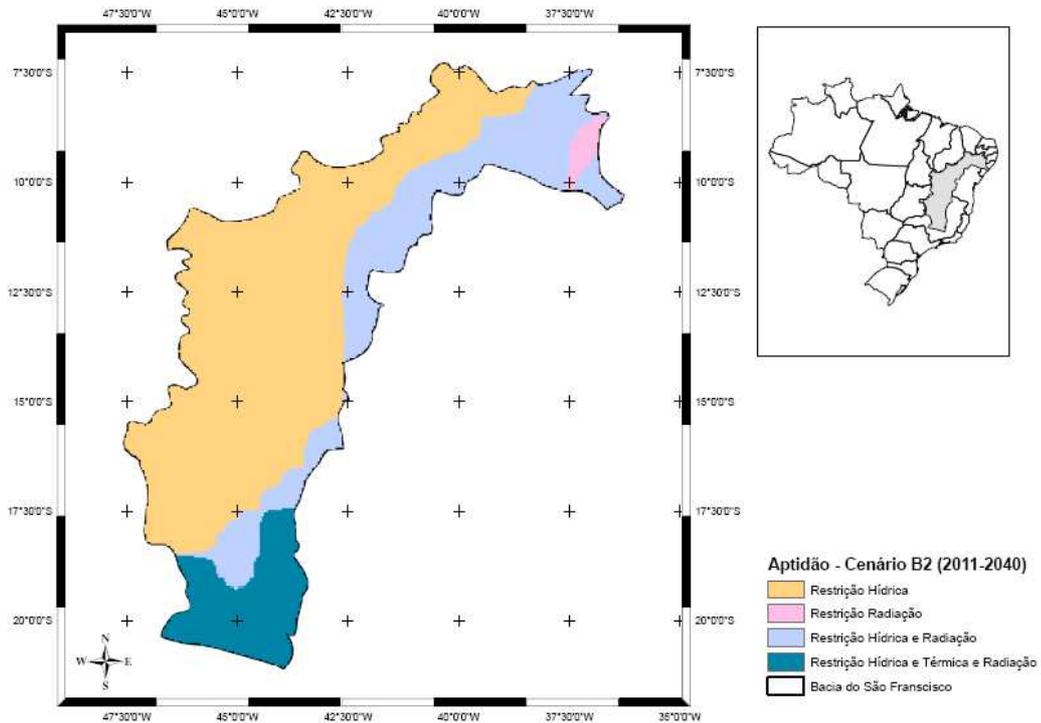


Figura 6.82. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de maio para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

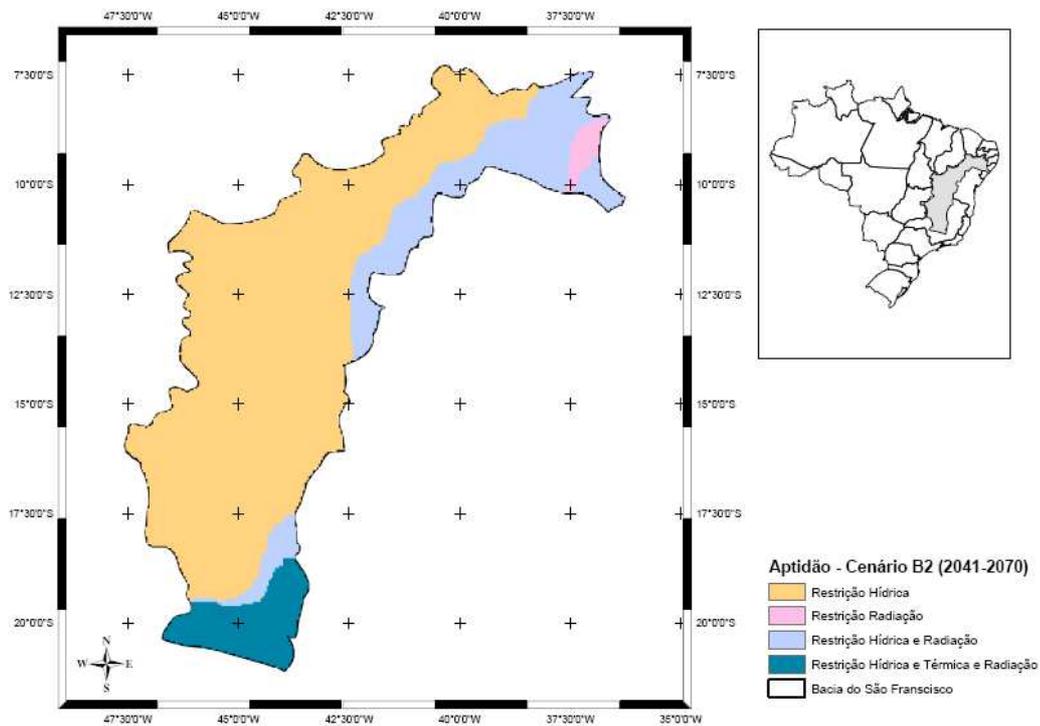


Figura 6.83. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de maio para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

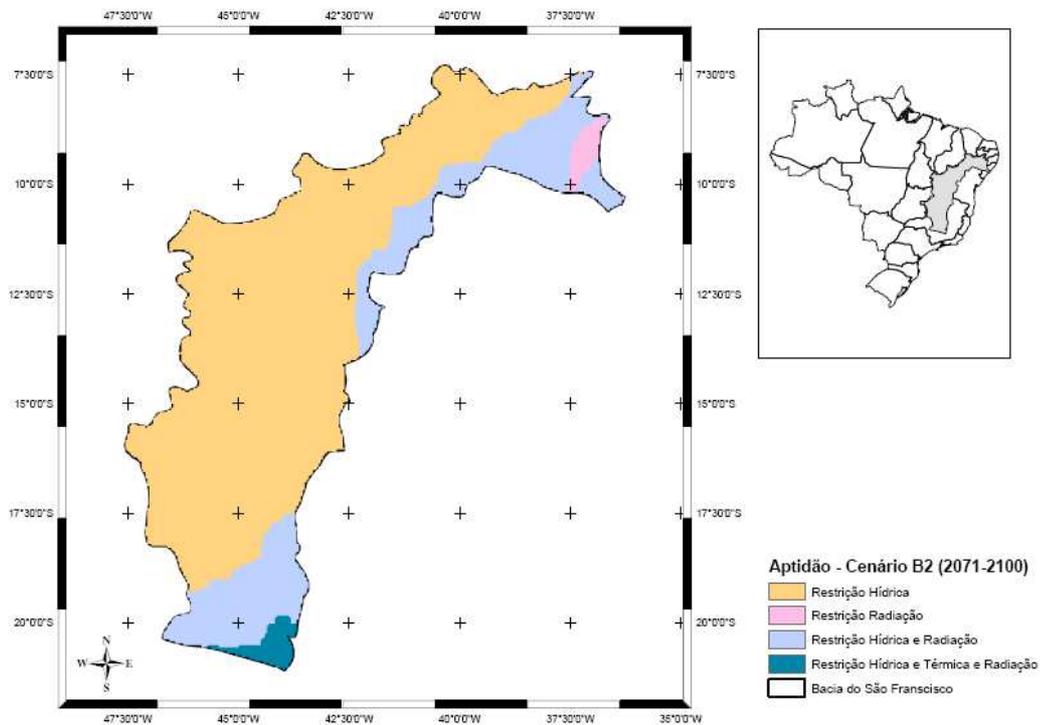


Figura 6.84. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de maio para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os ambos os cenários, A2 e B2, a precipitação como principal fator limitante ao cultivo do feijão comum plantado no mês de maio na bacia do São Francisco.

Para o cenário A2, no período de 2011-2040, o modelo projeta a presença de uma grande faixa apresentando restrição hídrica, que compreende aproximadamente 2/3 da bacia, estendendo-se do norte ao sudoeste. Projeta ainda uma faixa que vai desde o nordeste ao sudeste da bacia apresentando restrição hídrica e de radiação. Para o período de 2041-2070 a projeção do modelo é similar a anterior, notando-se apenas a redução da área com restrição hídrica e térmica e radiação. Para o período de 2071-2100 é projetada uma faixa de inaptidão ao norte da bacia, nota-se ainda que a área com restrição hídrica e térmica e radiação praticamente desaparece.

Para o cenário B2 a projeção do modelo é similar a do cenário A2 para os períodos de 2011-2040 e 2041-2070. Para 2071-2100 destaca-se que não foi projetada nenhuma área de inaptidão, contudo, para nenhum dos dois cenários o modelo projetou aptidão ao cultivo do feijão comum.

#### 6.4.7.3 - Feijão (plantado no mês de setembro)

Nas Figuras 6.85 a 6.90 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura do feijão, plantado no mês de setembro, para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

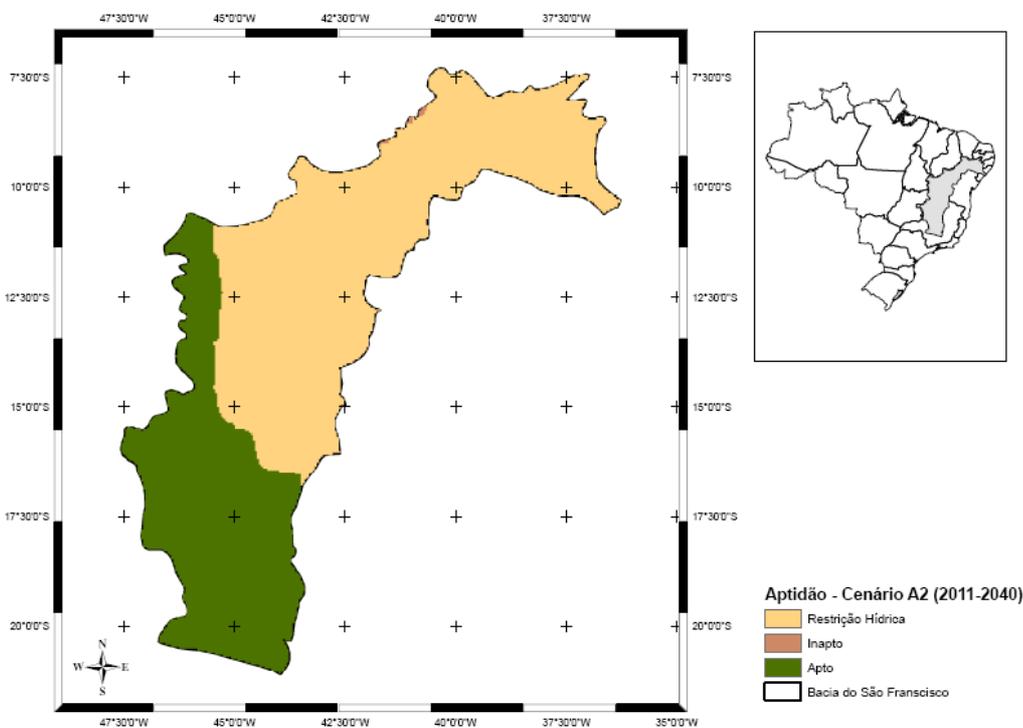


Figura 6.85. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de setembro para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

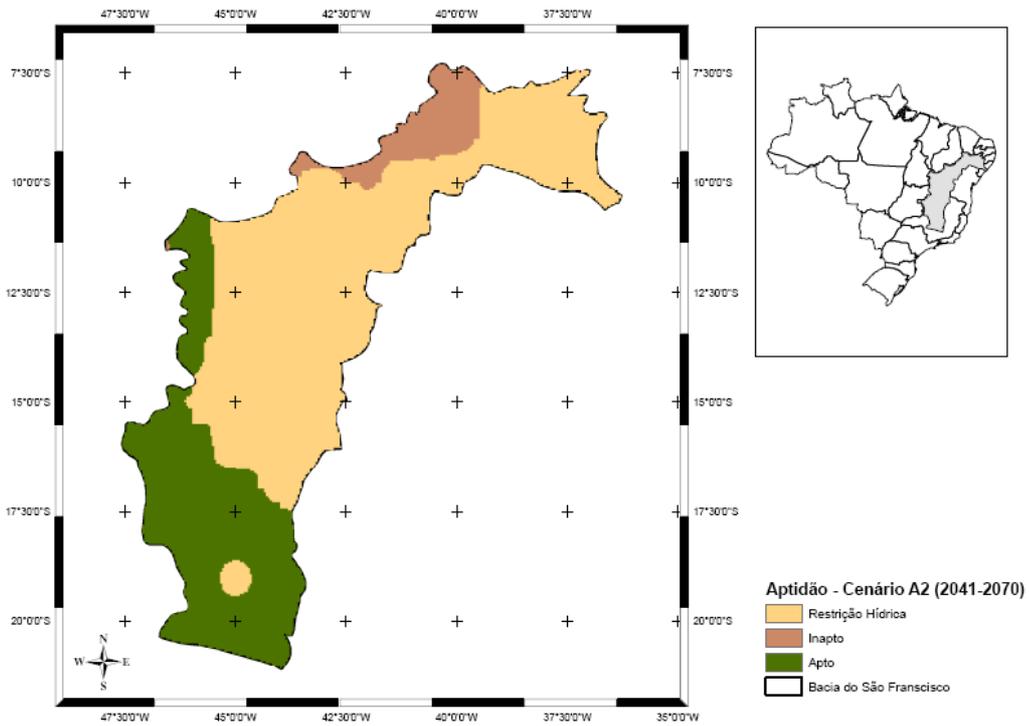


Figura 6.86. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de setembro para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

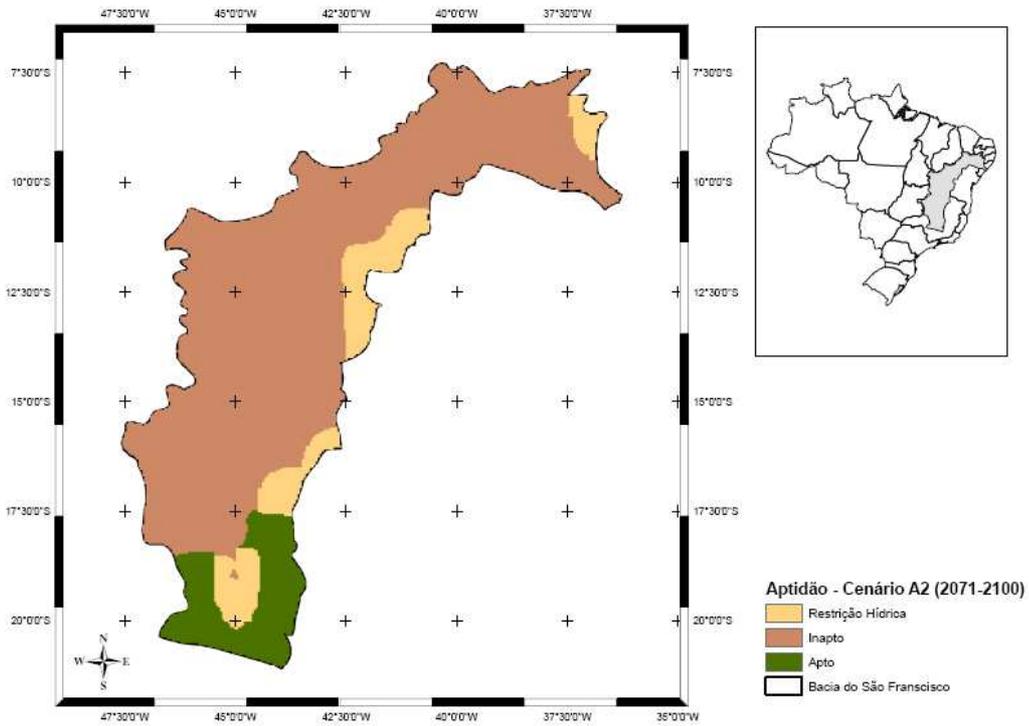


Figura 6.87. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de setembro para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

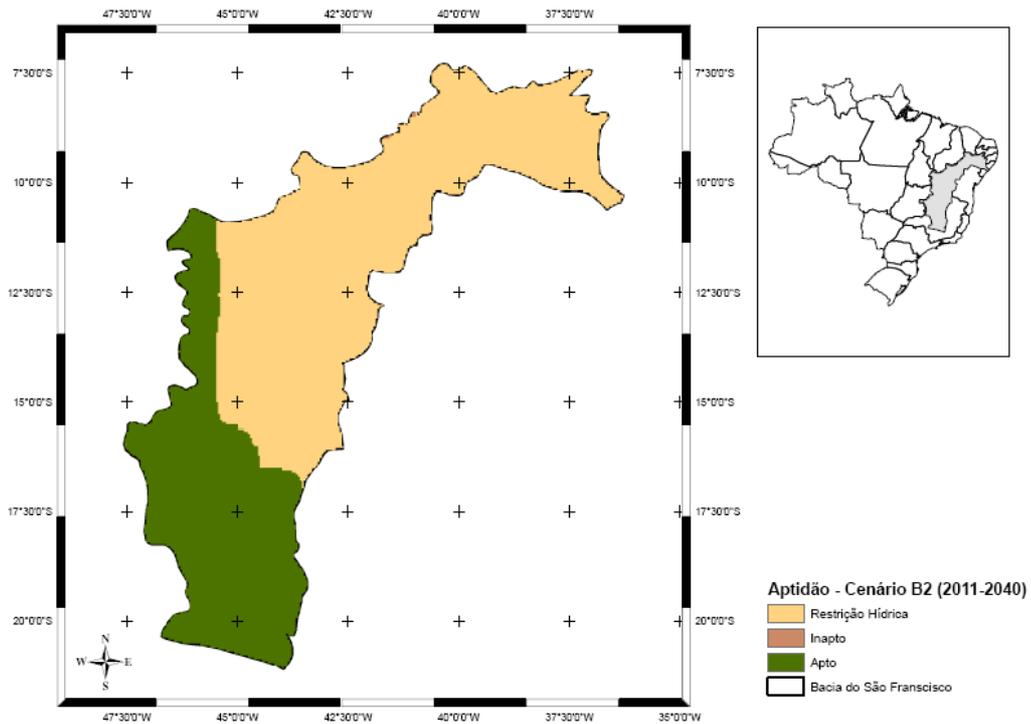


Figura 6.88. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de setembro para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

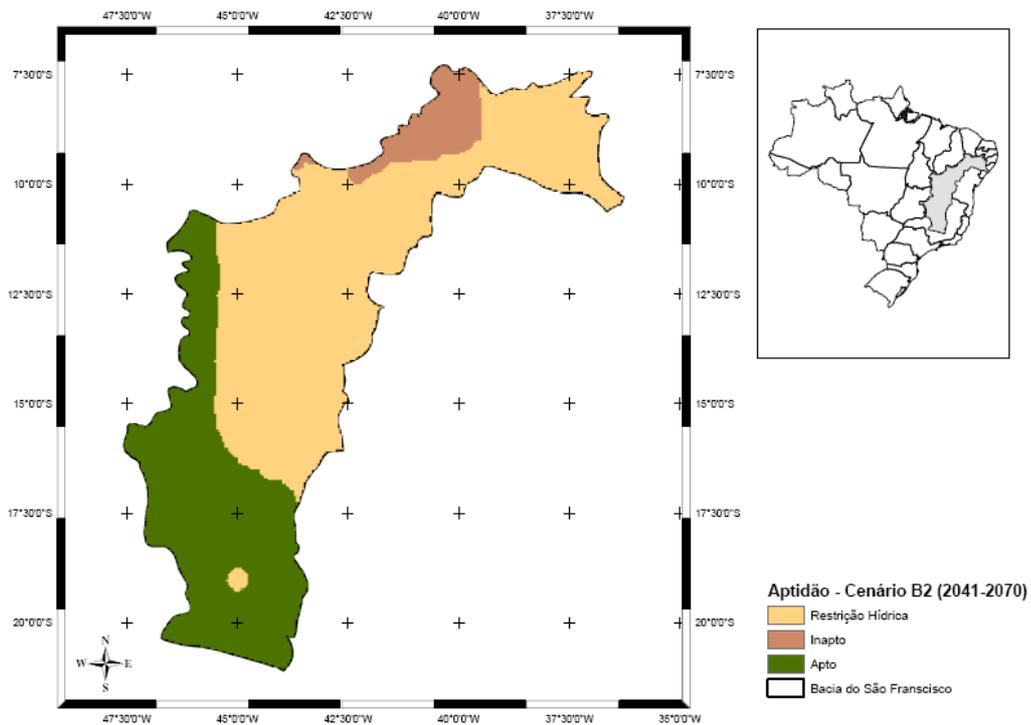


Figura 6.89. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de setembro para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

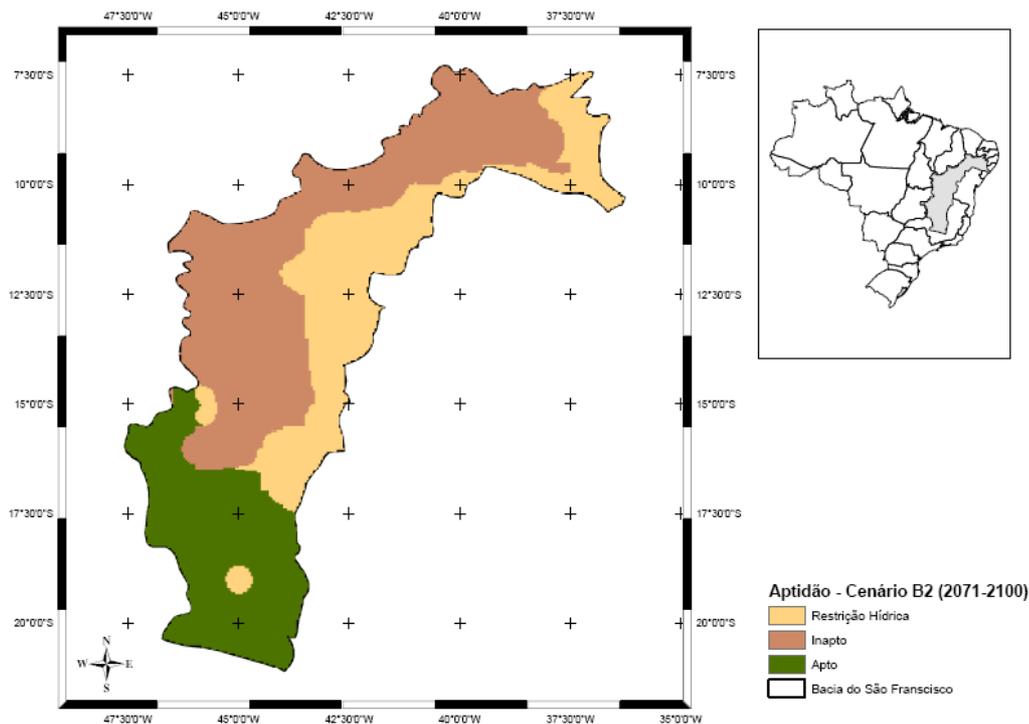


Figura 6.90. Mapa de aptidão para o cultivo do feijão comum plantado no mês de setembro para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os ambos os cenários, A2 e B2, a precipitação como fator limitante ao cultivo do feijão comum plantado no mês de setembro na bacia do São Francisco.

Para o cenário A2, no período de 2011-2040, o modelo projeta o sul e sudoeste da bacia como áreas aptas ao cultivo do feijão comum. É projetada ainda uma extensa área de restrição hídrica estendendo-se desde o noroeste até o nordeste da bacia, incluindo o norte. Para o período de 2041-2070 projeta-se uma sensível redução da área apta e o aparecimento de uma área inapta no norte da bacia. Para 2071-2100 é projetada que quase toda a bacia apresentara inaptidão para o cultivo do feijão comum, sendo que a área apta localizada ao sul da bacia reduz-se consideravelmente de tamanho. Há ainda a presença de faixas de restrição hídrica a leste da bacia.

Para o cenário B2 a projeção do modelo é similar a do cenário A2 para os períodos de 2011-2040 e 2041-2070. Para o período de 2071-2100 a área de inaptidão é consideravelmente menor que do mesmo período para o cenário A2 e a área de aptidão maior.

#### 6.4.8 - Laranja

Nas Figuras 6.91 a 6.96 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura da laranja no período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

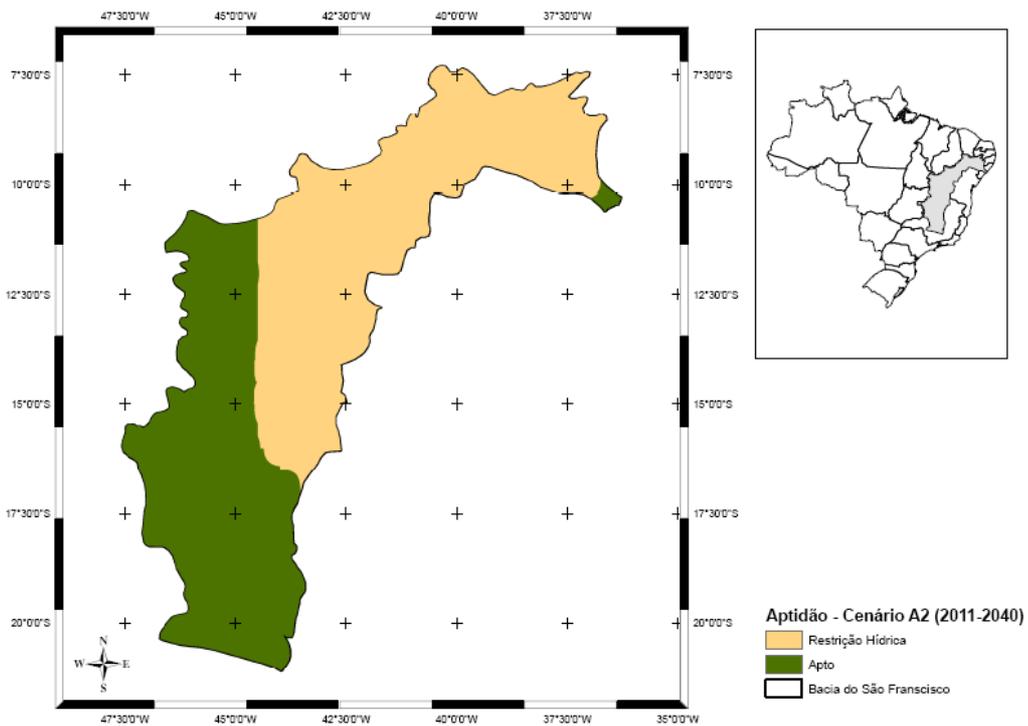


Figura 6.91. Mapa de aptidão para o cultivo da laranja para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

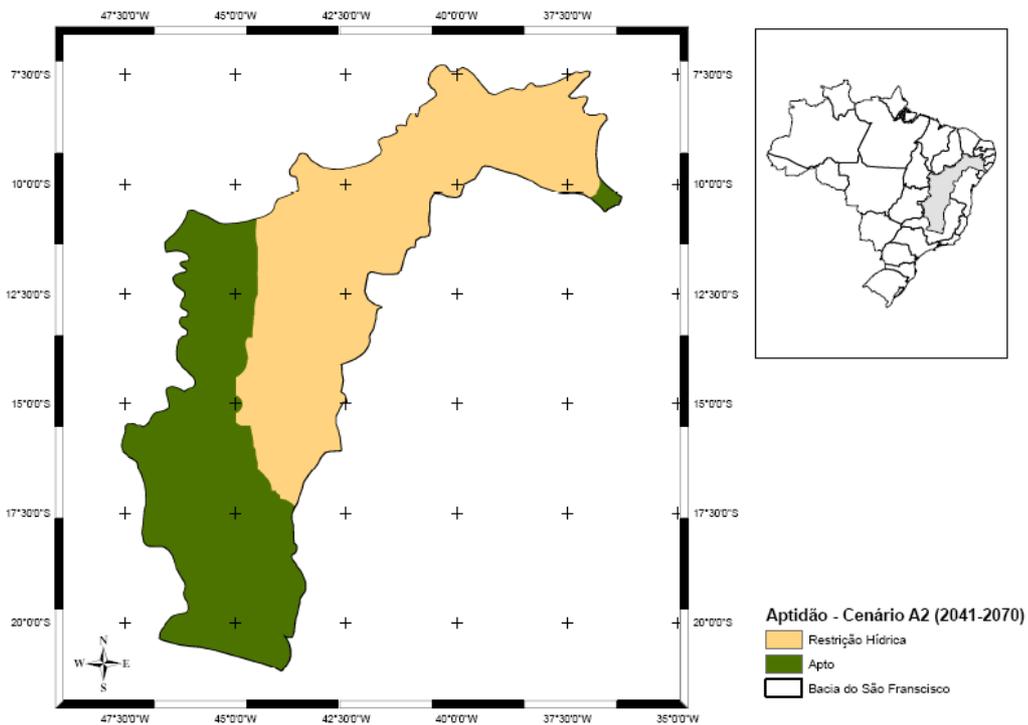


Figura 6.92. Mapa de aptidão para o cultivo da laranja para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

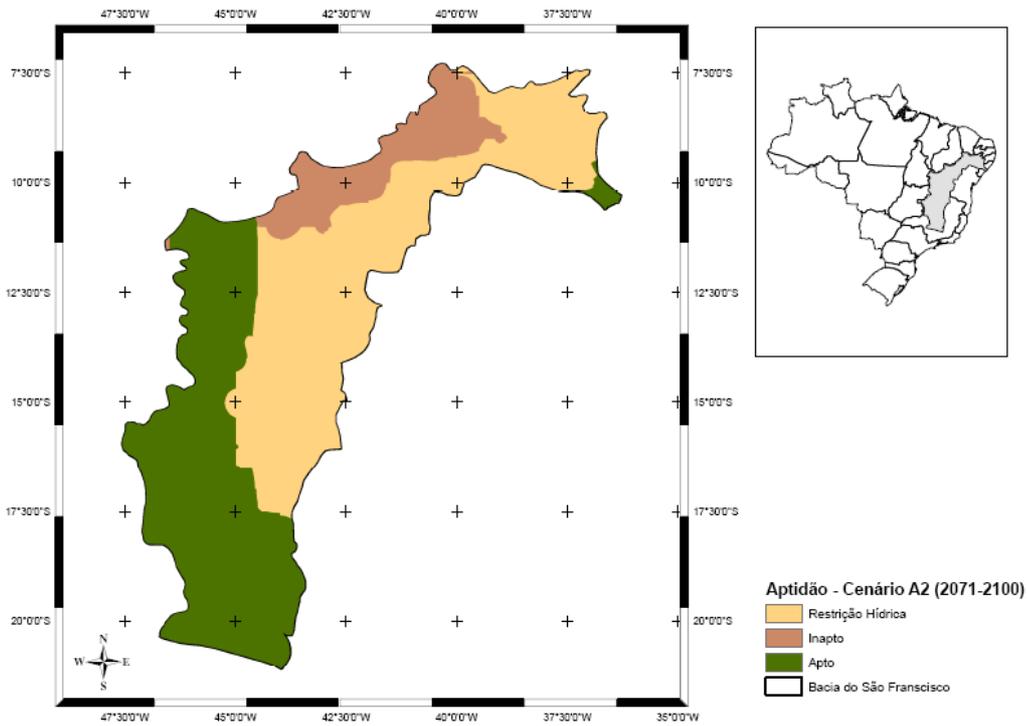


Figura 6.93. Mapa de aptidão para o cultivo da laranja para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

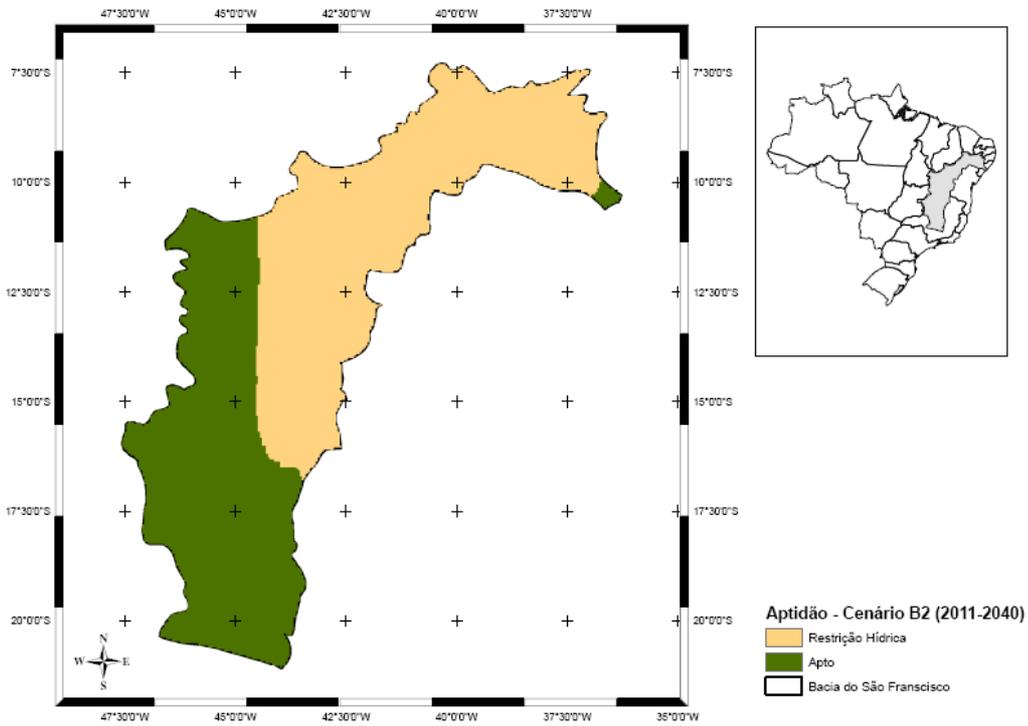


Figura 6.94. Mapa de aptidão para o cultivo da laranja para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

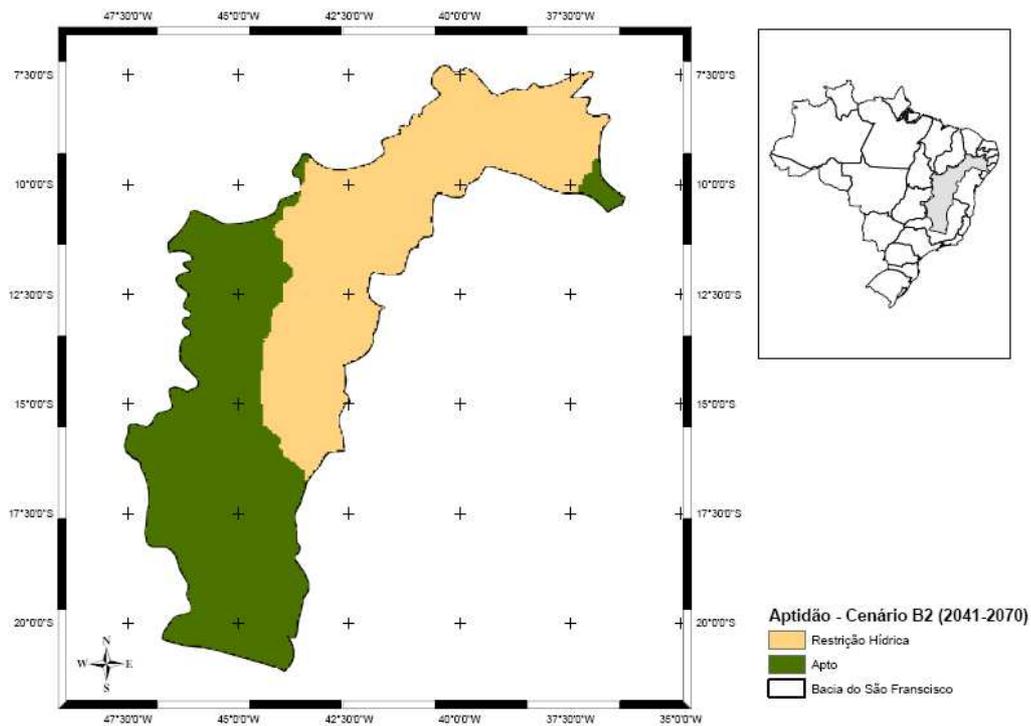


Figura 6.95. Mapa de aptidão para o cultivo da laranja para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

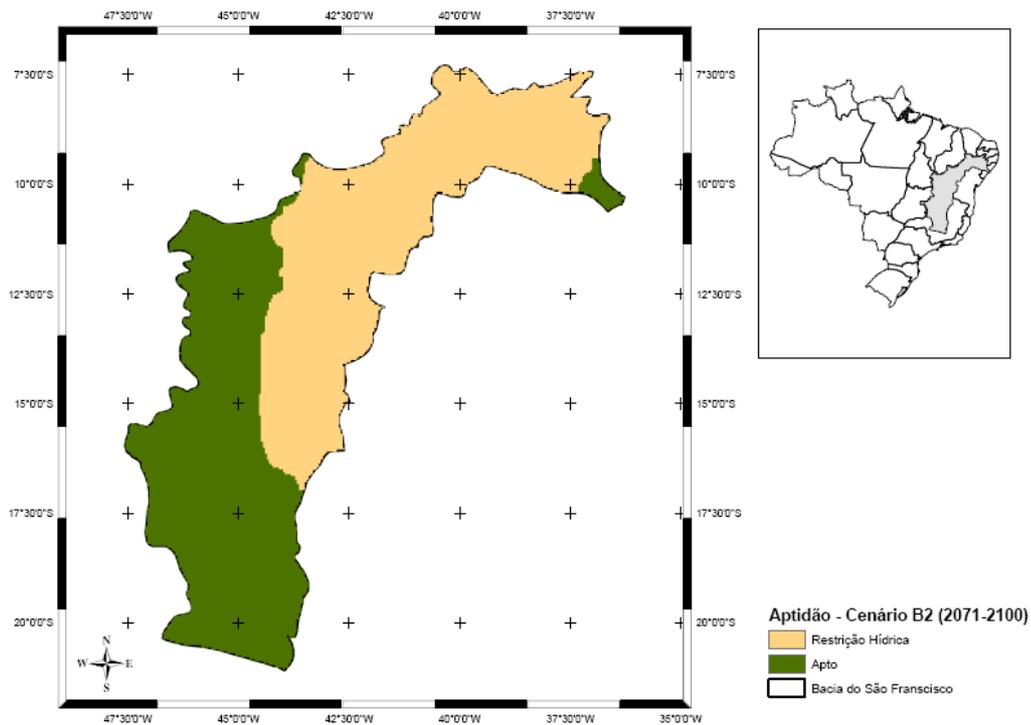


Figura 6.96. Mapa de aptidão para o cultivo da laranja para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os ambos os cenários, A2 e B2, a precipitação como fator limitante ao cultivo da laranja na bacia do São Francisco.

Para os três períodos analisados, dos dois cenários, nota-se que a distribuição espacial da área projetada como apta, e da área projetada como restrita pela precipitação, permanece constante. A única exceção se dá para no período de 2071-2100, para o cenário A2, para o qual é projetada uma faixa de inaptidão no norte da bacia.

O sul e o oeste da bacia, juntamente com a foz do Rio São Francisco são as áreas projetadas como aptas, sendo o norte e o leste projetados como áreas com restrição hídrica.

#### 6.4.9 - Mamona

Nas Figuras 6.97 a 6.102 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura da mamona no período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

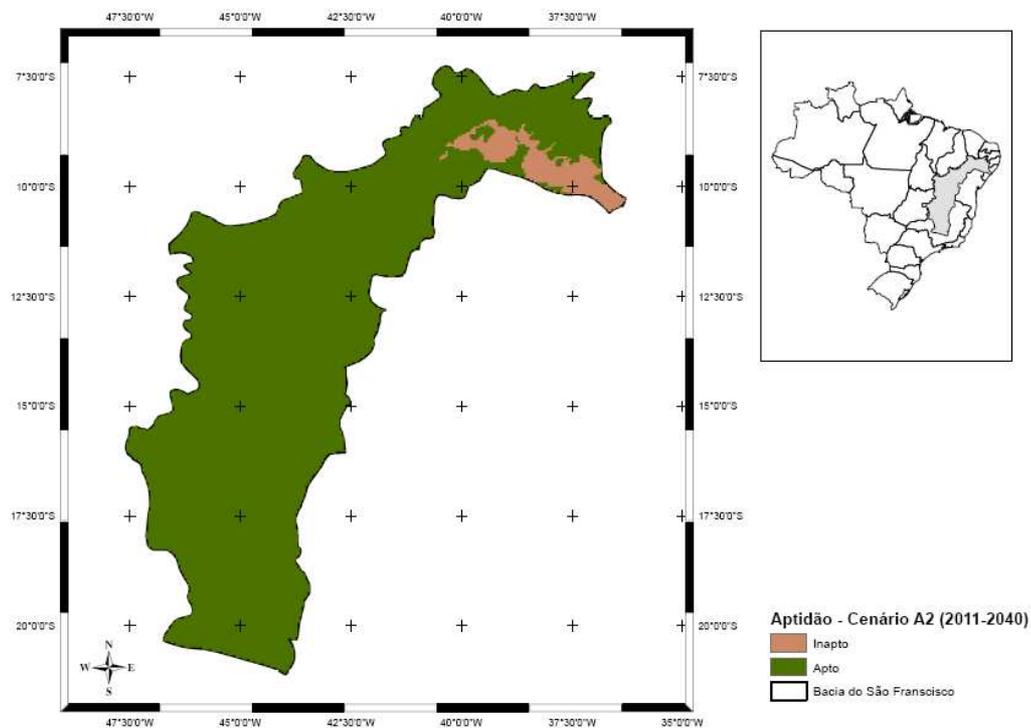


Figura 6.97. Mapa de aptidão para o cultivo da mamona para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

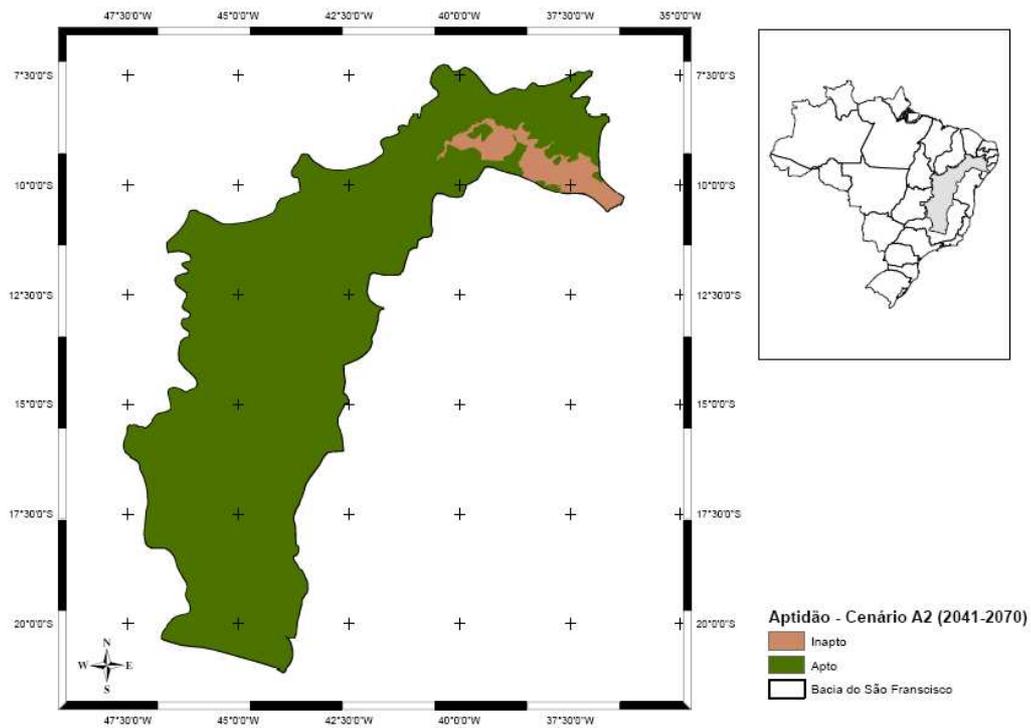


Figura 6.98. Mapa de aptidão para o cultivo da mamona para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

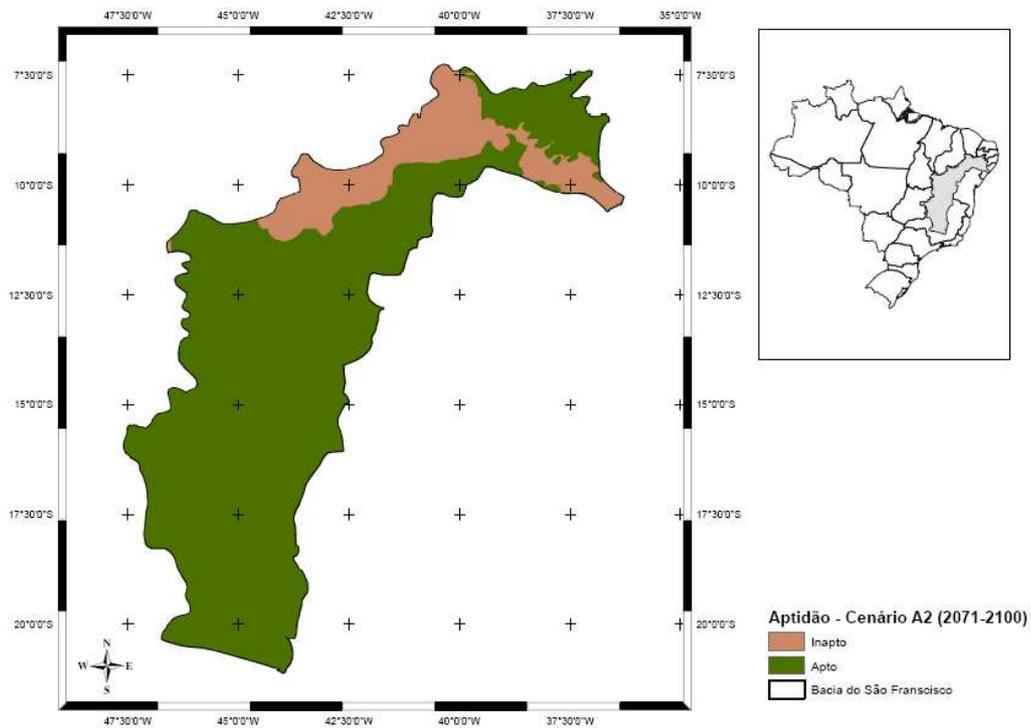


Figura 6.99. Mapa de aptidão para o cultivo da mamona para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

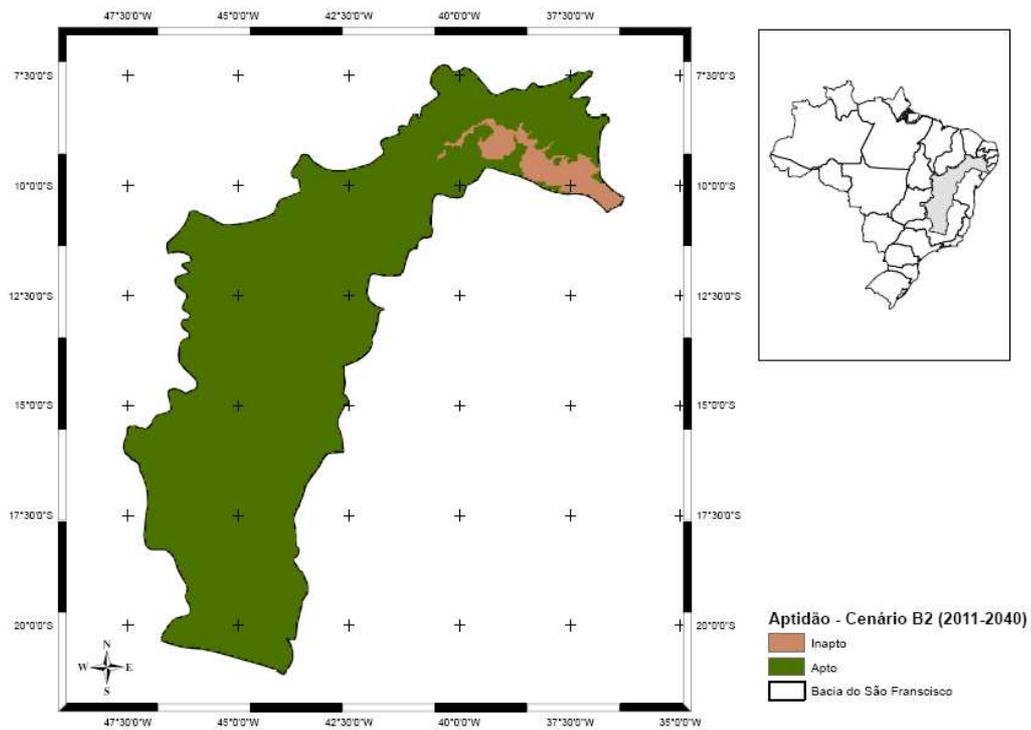


Figura 6.100. Mapa de aptidão para o cultivo da mamona para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

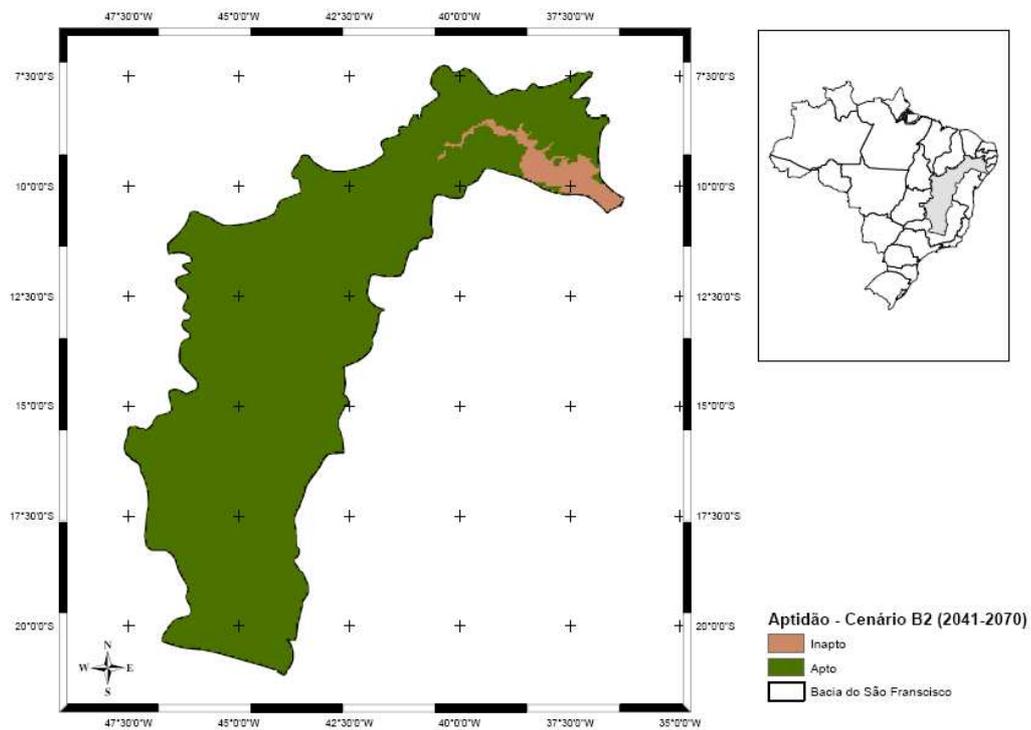


Figura 6.101. Mapa de aptidão para o cultivo da mamona para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

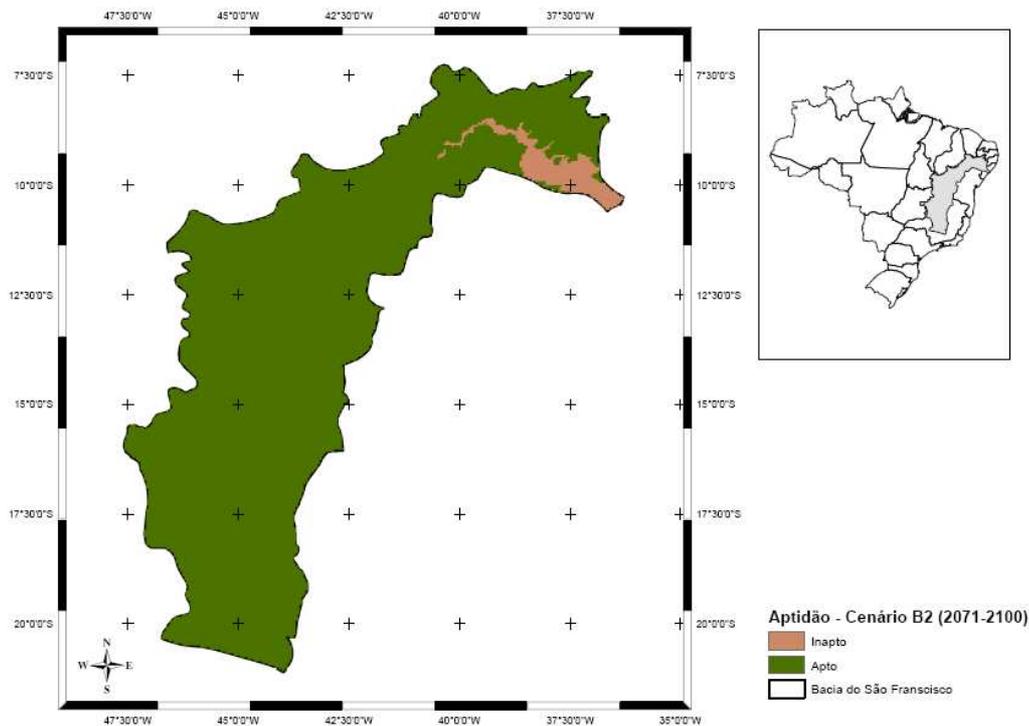


Figura 6.102. Mapa de aptidão para o cultivo da mamona para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os ambos os cenários, A2 e B2, a altitude como fator limitante ao cultivo da mamona na bacia do São Francisco.

Para os três períodos analisados, dos dois cenários, nota-se que a distribuição espacial da área projetada como apta, e da área projetada como inapta, permanece constante. A única exceção se dá para o período de 2071-2100, para o cenário A2, no qual é projetada uma faixa de inaptidão no norte da bacia provocada pelo aumento da temperatura. A área projetada como inapta localiza-se na foz do rio São Francisco, numa região de baixa altitude.

#### 6.4.10 - Mandioca

Nas Figuras 6.103 a 6.108 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura da mandioca no período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

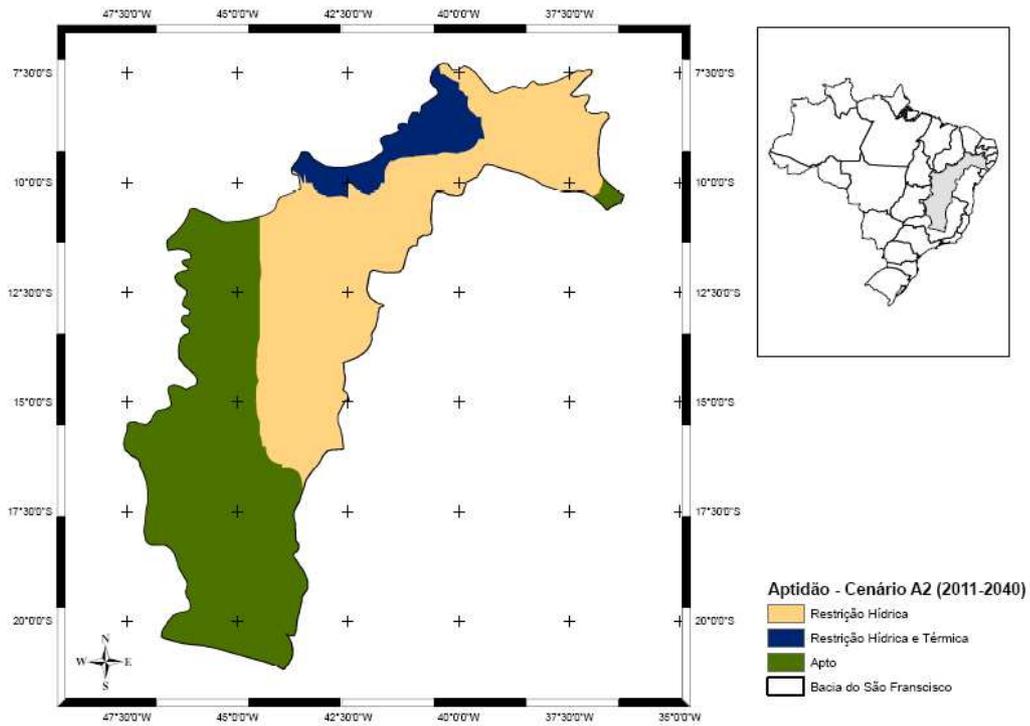


Figura 6.103. Mapa de aptidão para o cultivo da mandioca para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

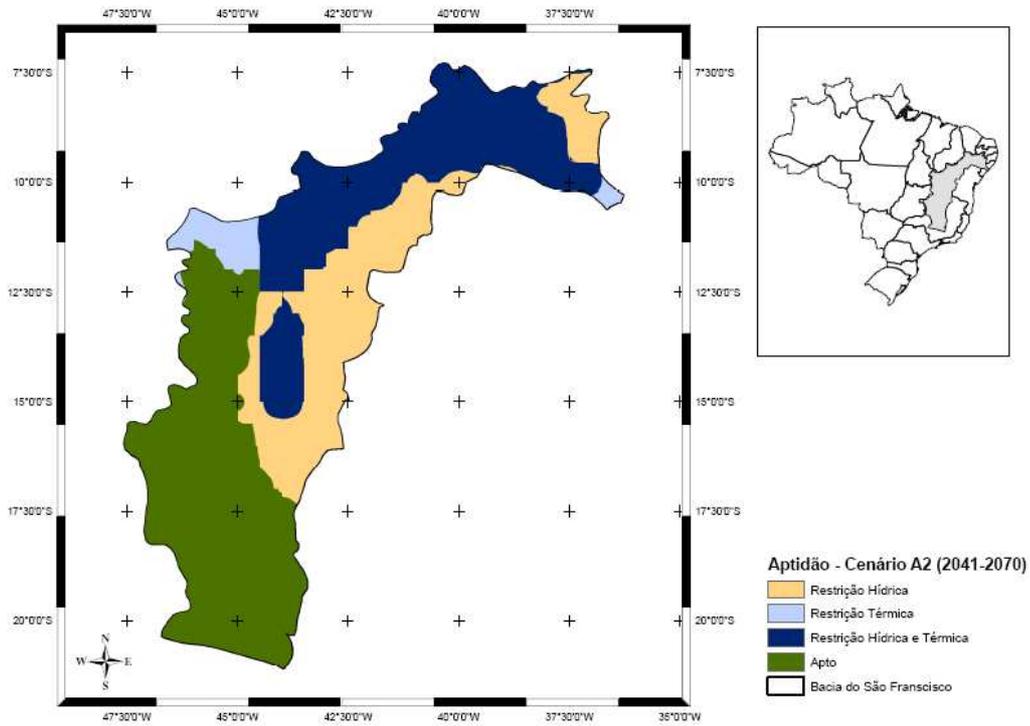


Figura 6.104. Mapa de aptidão para o cultivo da mandioca para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

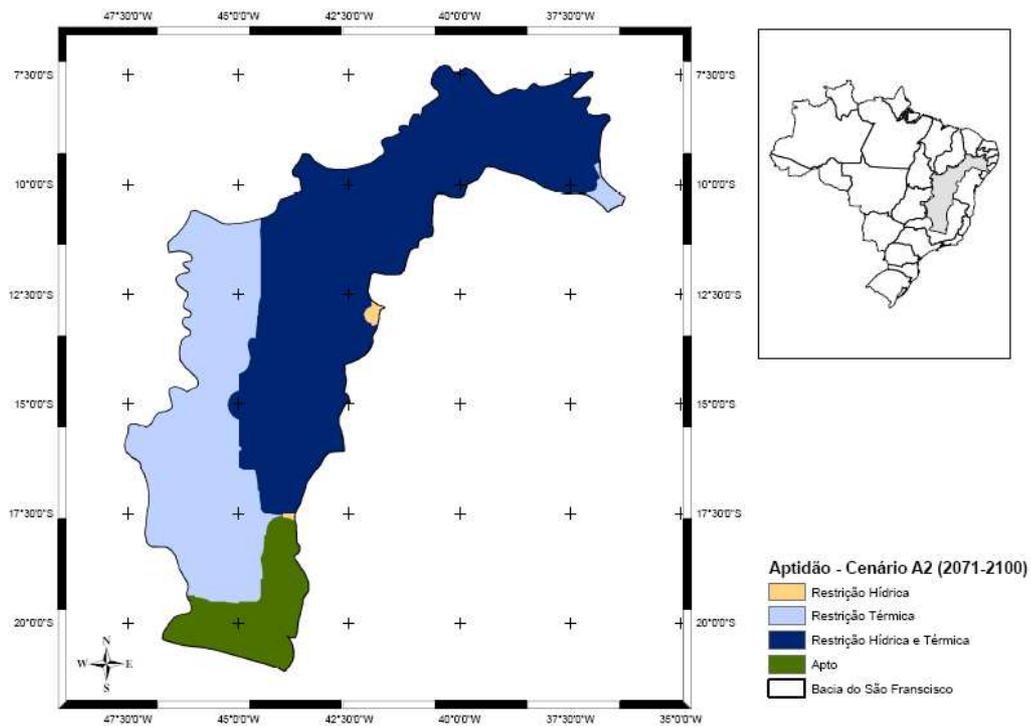


Figura 6.105. Mapa de aptidão para o cultivo da mandioca para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

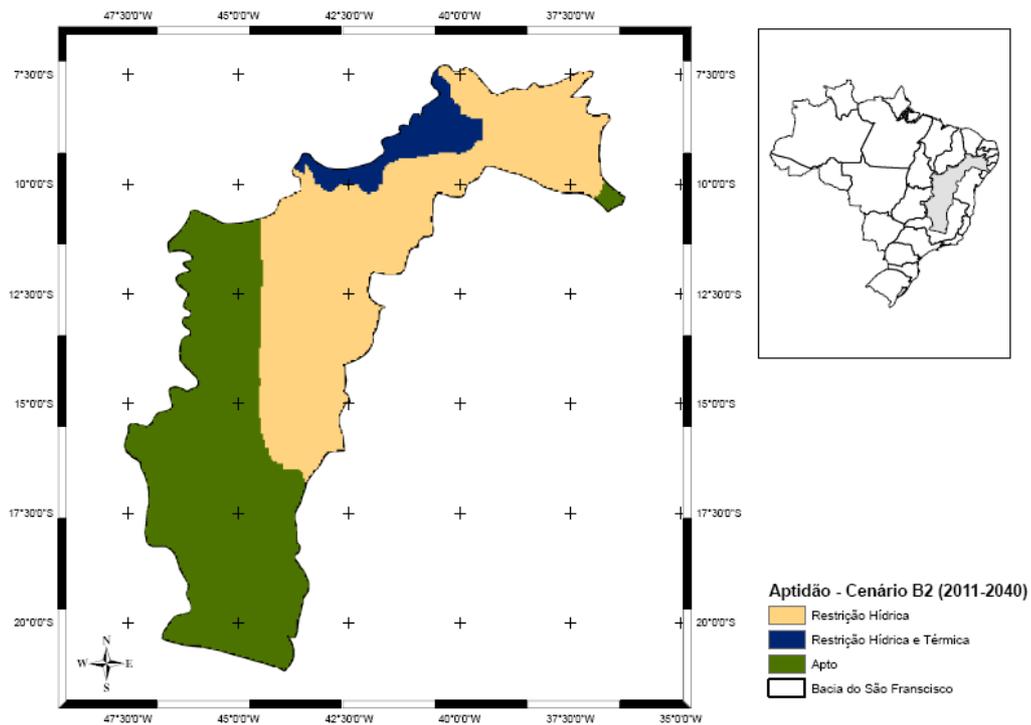


Figura 6.106. Mapa de aptidão para o cultivo da mandioca para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

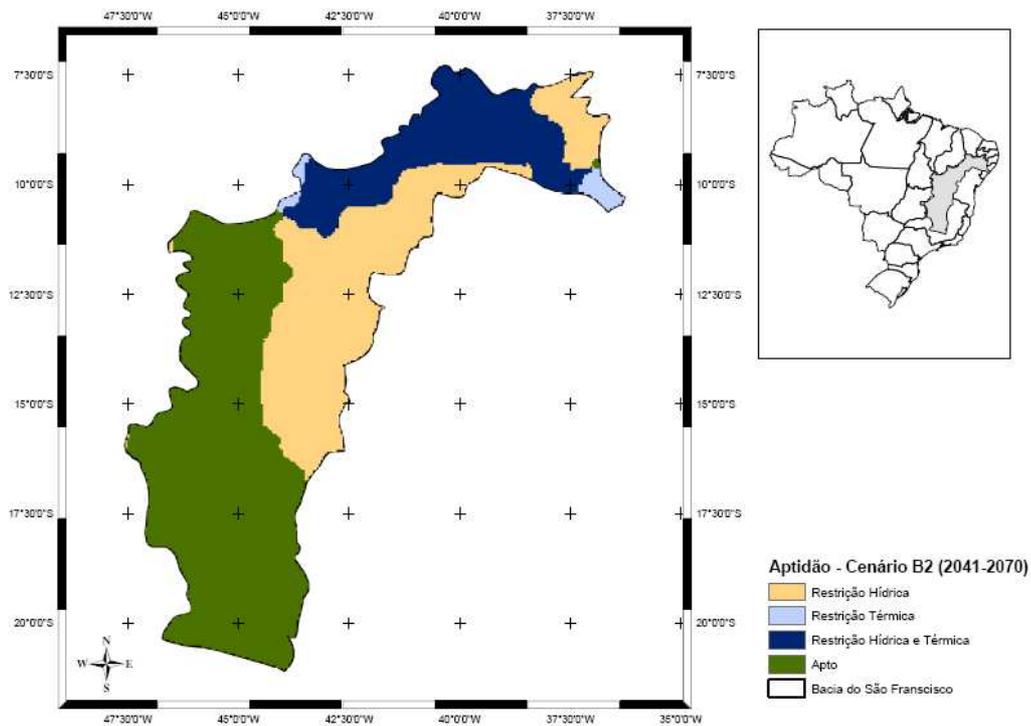


Figura 6.107. Mapa de aptidão para o cultivo da mandioca para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

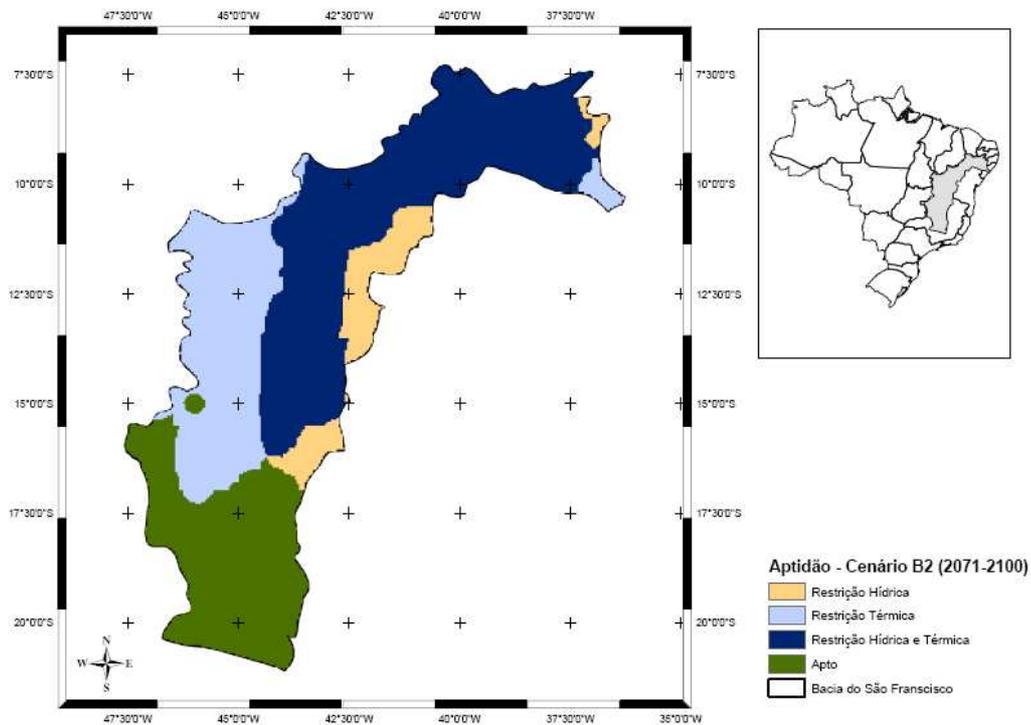


Figura 6.108. Mapa de aptidão para o cultivo da mandioca para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os ambos os cenários, A2 e B2, a temperatura como principal fator limitante ao cultivo da

mandioca na bacia do São Francisco. Entretanto para o período de 2011-2040, de ambos os cenários, a precipitação é projetada como sendo o fator mais importante.

Para o cenário A2, no período de 2011-2040, o modelo projeta uma grande área apta ao cultivo da mandioca estendendo-se desde o sul até o oeste da bacia, e uma pequena área na região da foz do Rio São Francisco. Projeta ainda uma faixa de restrição hídrica e térmica ao norte. Para 2041-2070 é projetada uma ampliação da área com restrição hídrica e térmica em detrimento de áreas antes projetadas apenas com restrição hídrica (norte e centro da bacia). Projeta-se ainda o aparecimento de áreas com restrição térmica em locais projetados como aptos no período anterior (uma área a oeste da bacia e uma pequena área na foz do rio São Francisco).

Para 2071-2100 projeta-se a redução da área apta a uma faixa ao sul da bacia, sendo projetada uma grande área com restrição hídrica e térmica que se estende do norte até o leste da bacia e outra, apenas de restrição térmica, um pouco menor que a anterior, localizada a oeste.

Para o cenário B2, a projeção para o período de 2011-2040 é similar a do cenário A2. Para o período de 2041-2070 é projetada uma ampliação da área com restrição hídrica e térmica, todavia esta é menor que a do mesmo período para o cenário A2. Para este período praticamente não ocorrem alterações nas áreas projetadas como aptas no período anterior, com exceção da região da foz do Rio São Francisco, que é projetada como restrita termicamente. Para 2071-2100 a projeção segue a mesma tendência do período correspondente do cenário A2, contudo, as áreas projetadas com restrição hídrica e térmica e com restrição térmica, são menores e a área projetada como apta é maior.

## **6.4.11 - Milho**

### **6.4.11.1 - Milho (plantado no mês de outubro)**

Nas Figuras 6.109 a 6.114 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura do milho, plantado no mês de outubro, para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

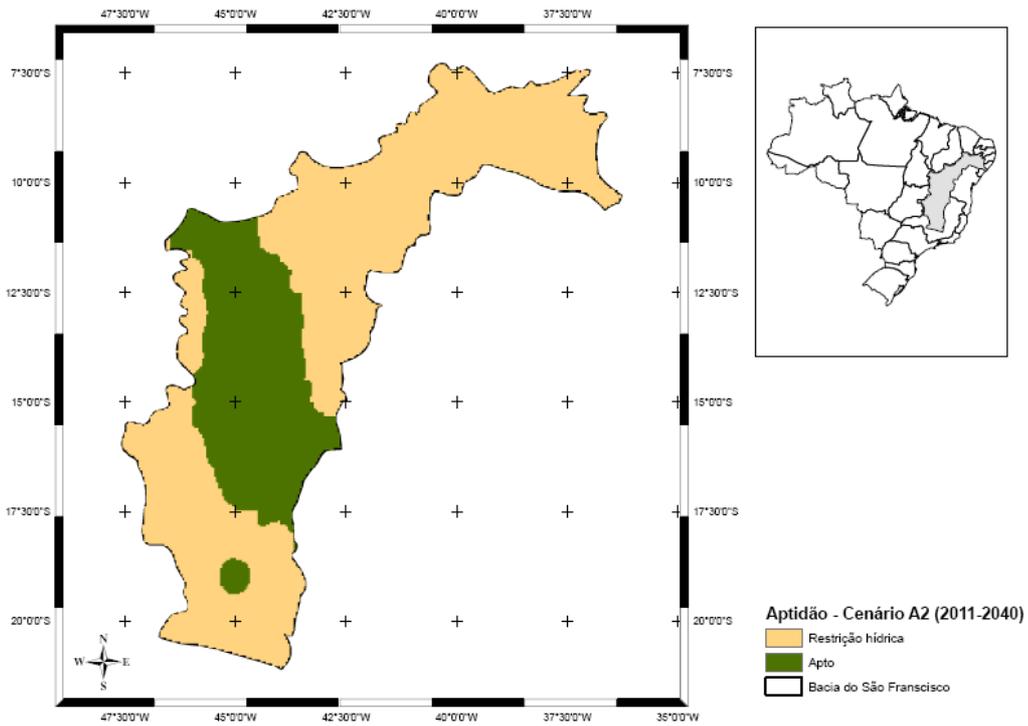


Figura 6.109. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de outubro para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

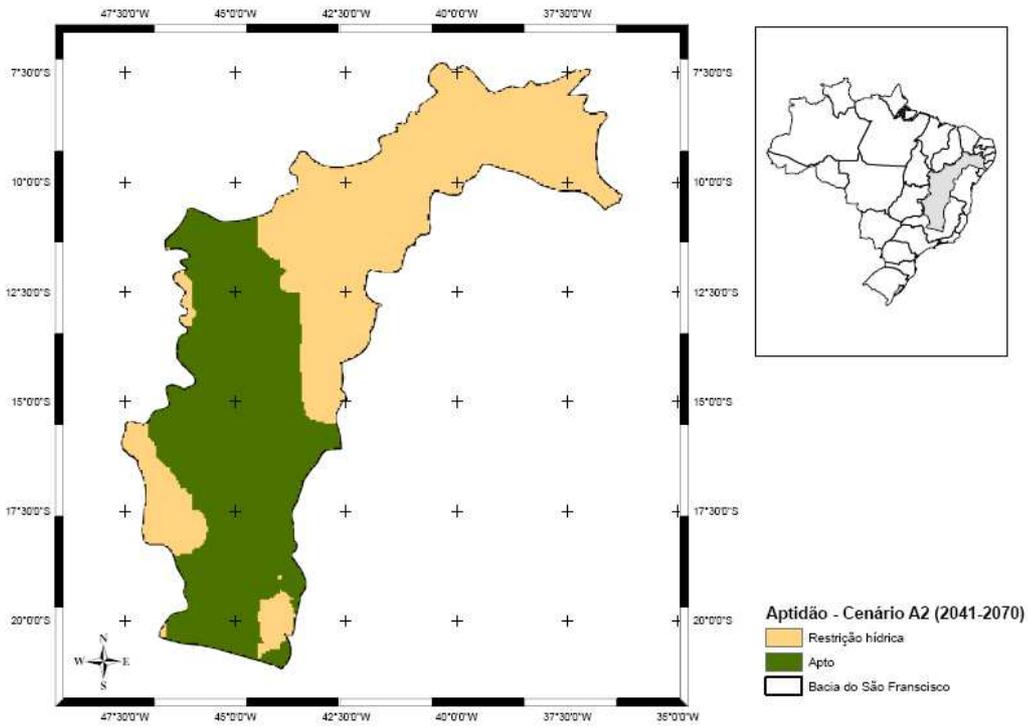


Figura 6.110. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de outubro para o período de 2041-2040 (Cenário A2).

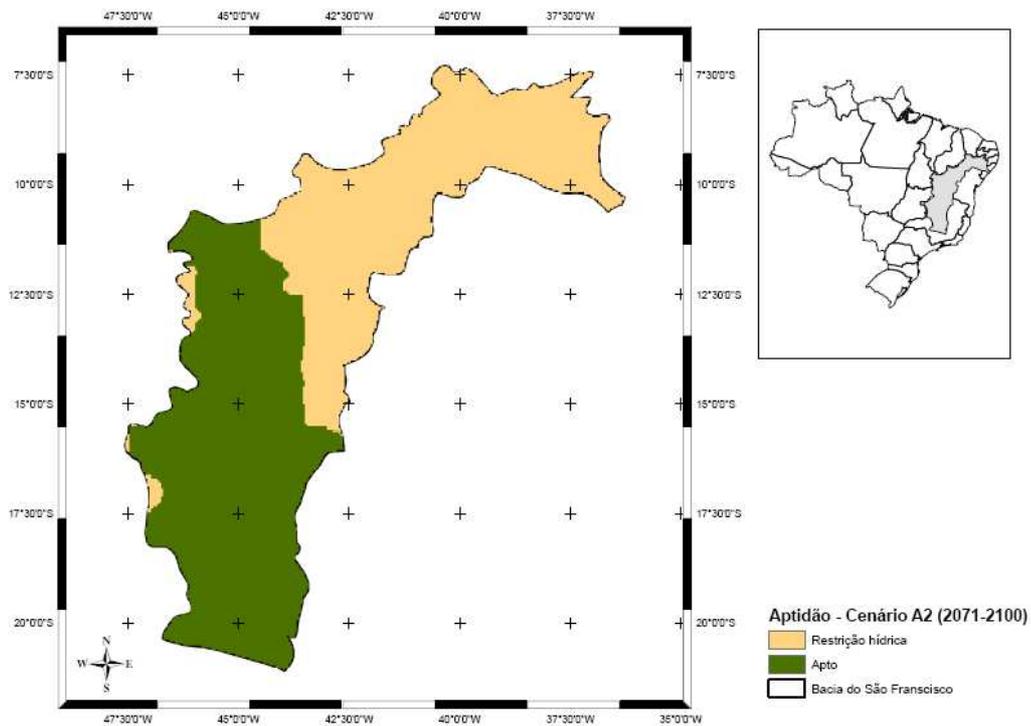


Figura 6.111. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de outubro para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

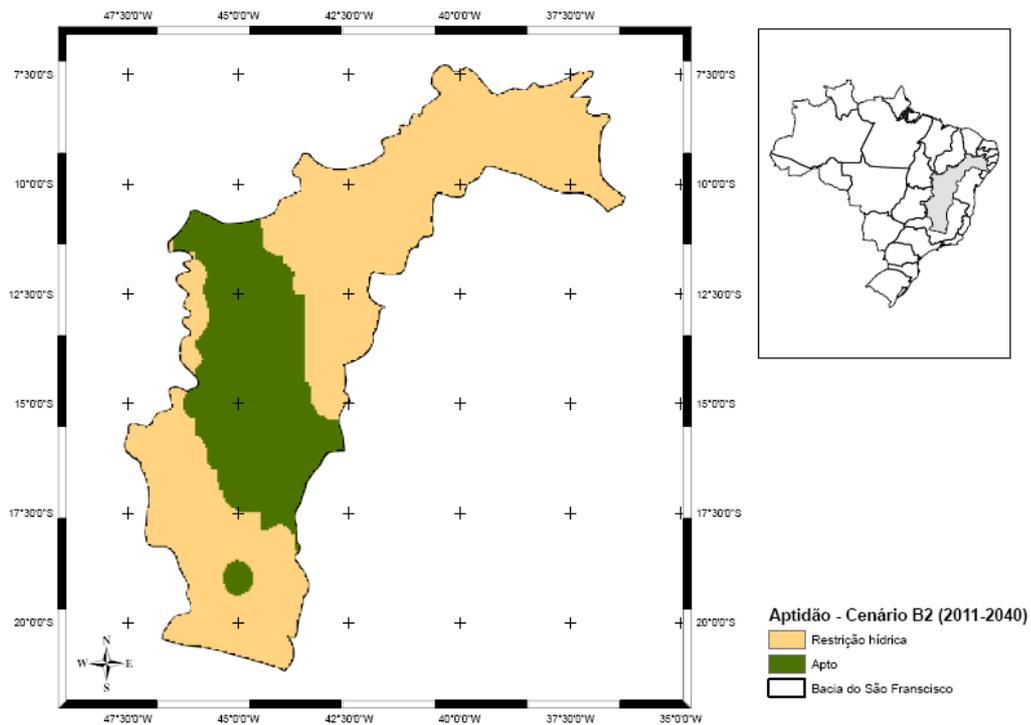


Figura 6.112. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de outubro para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

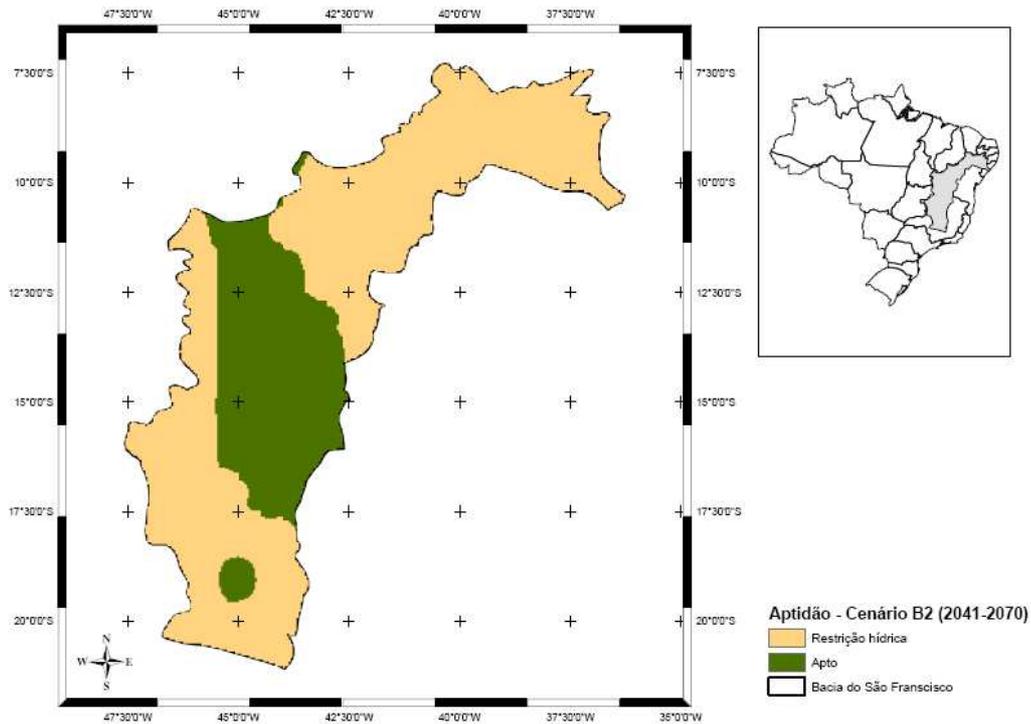


Figura 6.113. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de outubro para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

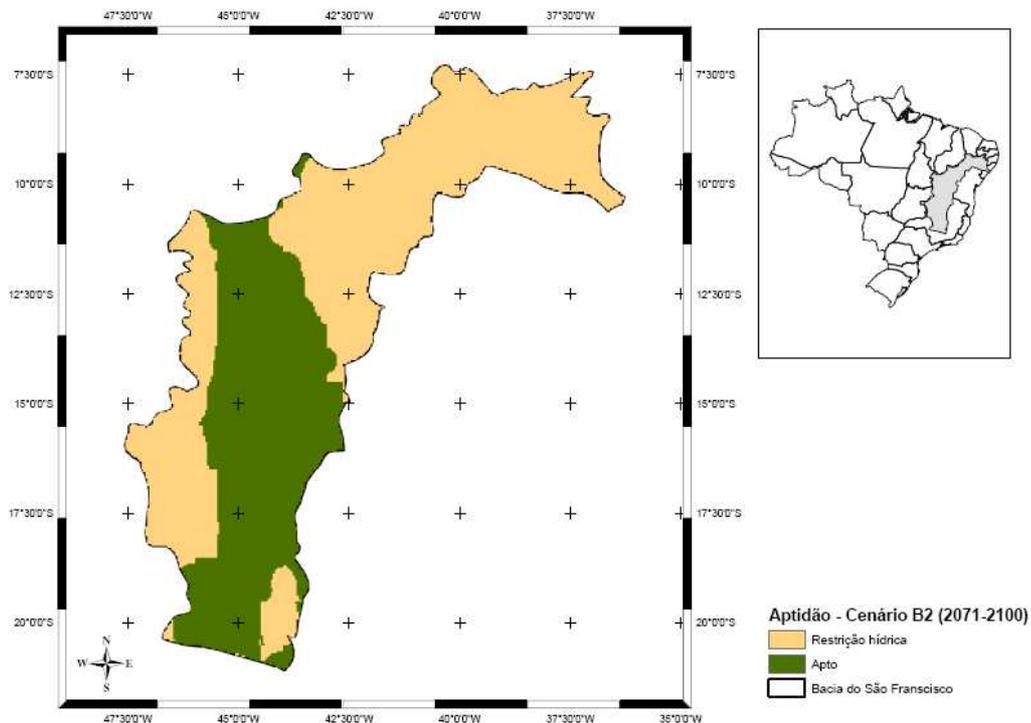


Figura 6.114. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de outubro para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os ambos os cenários, A2 e B2, a precipitação como fator limitante ao cultivo do milho plantado no mês de outubro na bacia do São Francisco.

Para o cenário A2, no período de 2011-2040, o modelo projeta uma faixa considerada apta ao cultivo do milho na região central da bacia, abrangendo-a de uma extremidade a outra, e outra área, menor, localizada no centro da parte sul da bacia. Para o restante da bacia, projeta-se restrição hídrica ao cultivo do milho. Para o período de 2041-2070 é projetada a expansão da faixa apta para o sul da bacia, sendo que para 2071-2100 praticamente toda área do centro ate o limite sul da bacia é projetada como apta ao cultivo do milho.

Para o cenário B2, no período de 2011-2040 a projeção é similar a do mesmo período para o cenário A2, sendo que para 2041-2070 são projetadas poucas alterações, destacando-se uma pequena retração da faixa apta. Para 2071-2100 projeta-se expansão da faixa apta para o sul, entretanto esta é significativamente menor que a projetada para o mesmo período do cenário A2.

#### 6.4.11.2 - Milho (plantado no mês de fevereiro)

Nas Figuras 6.115 a 6.120 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura do milho, plantado no mês de fevereiro, para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

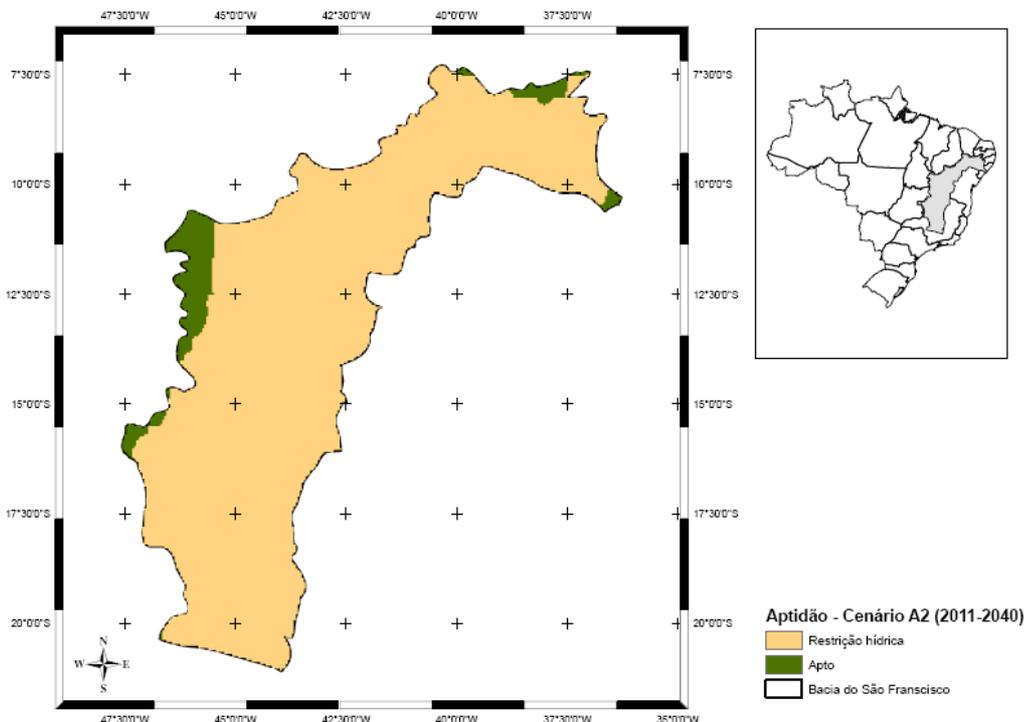


Figura 6.115. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de fevereiro para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

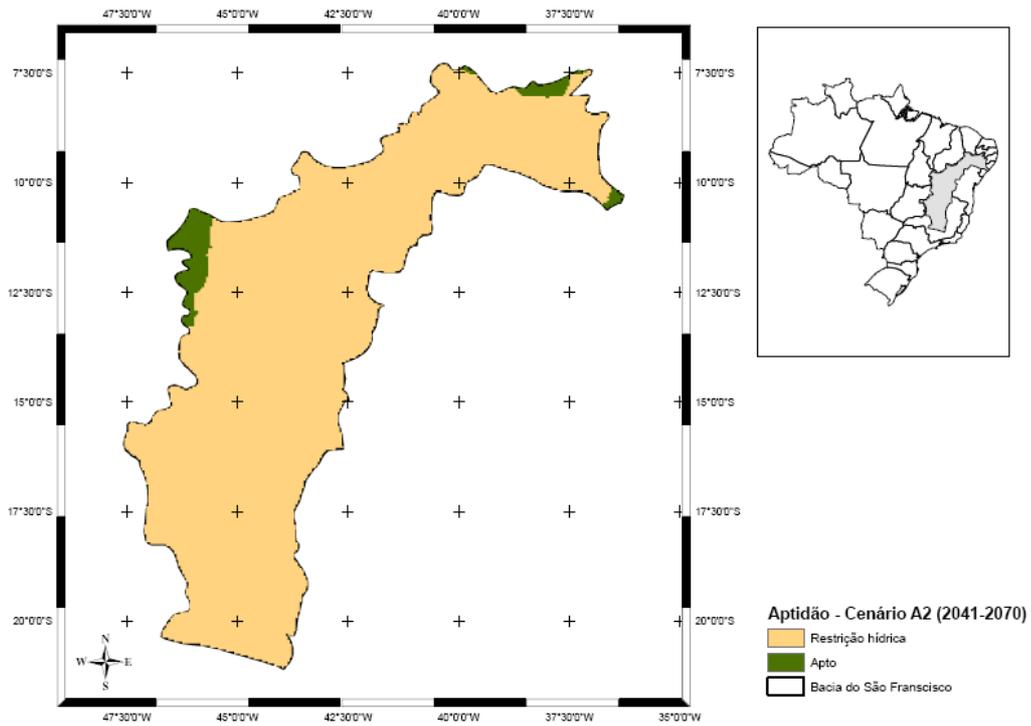


Figura 6.116. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de fevereiro para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

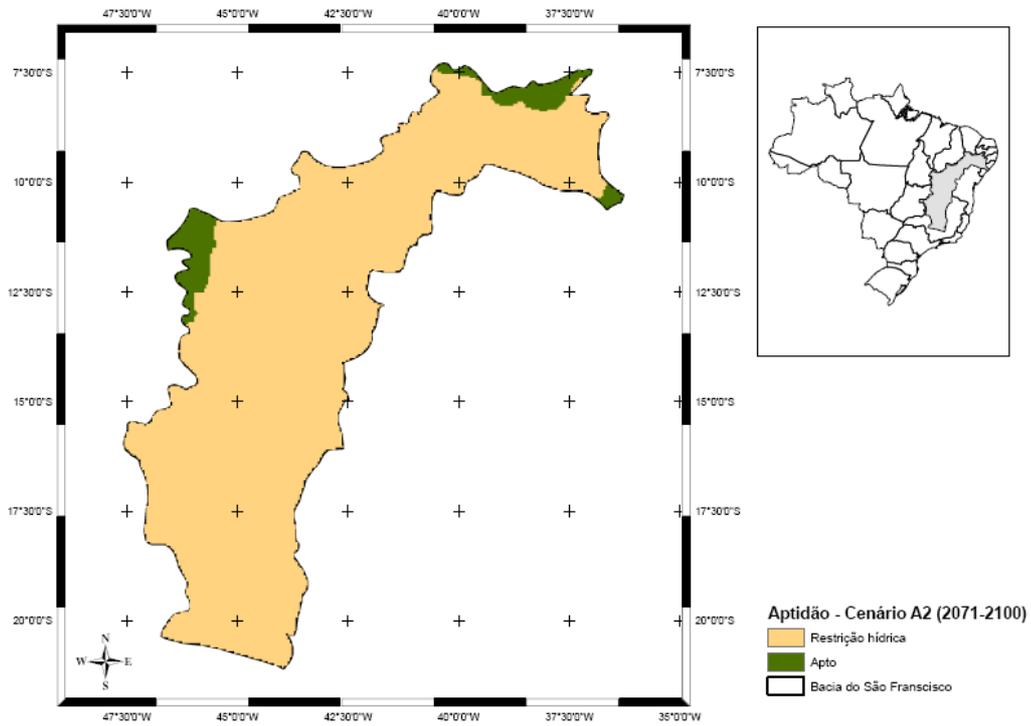


Figura 6.117. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de fevereiro para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

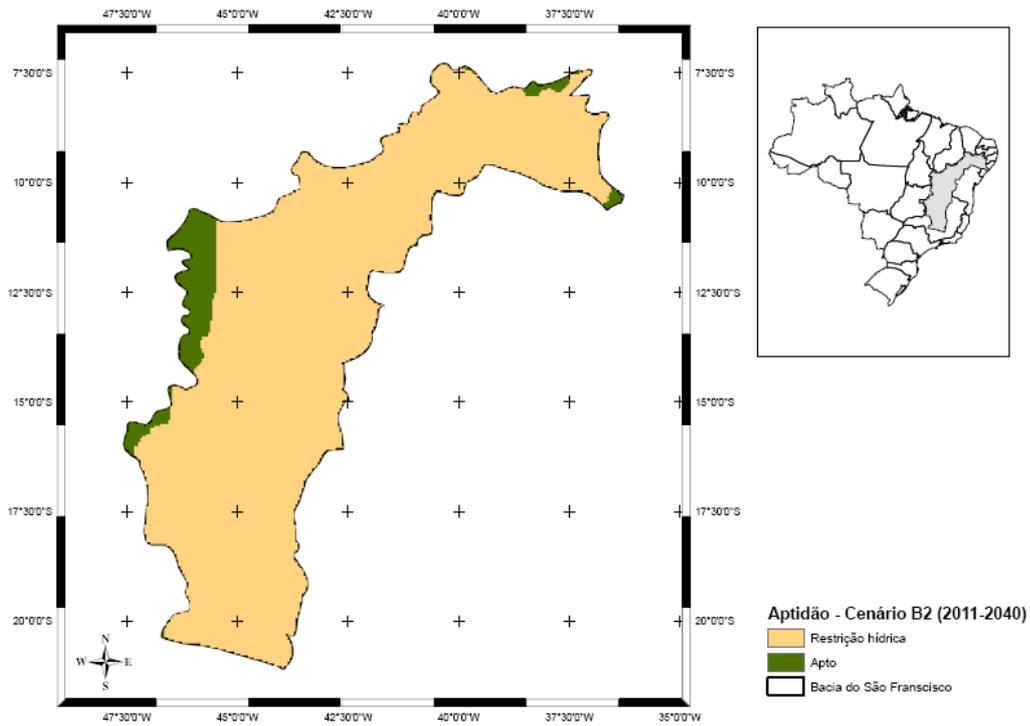


Figura 6.118. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de fevereiro para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

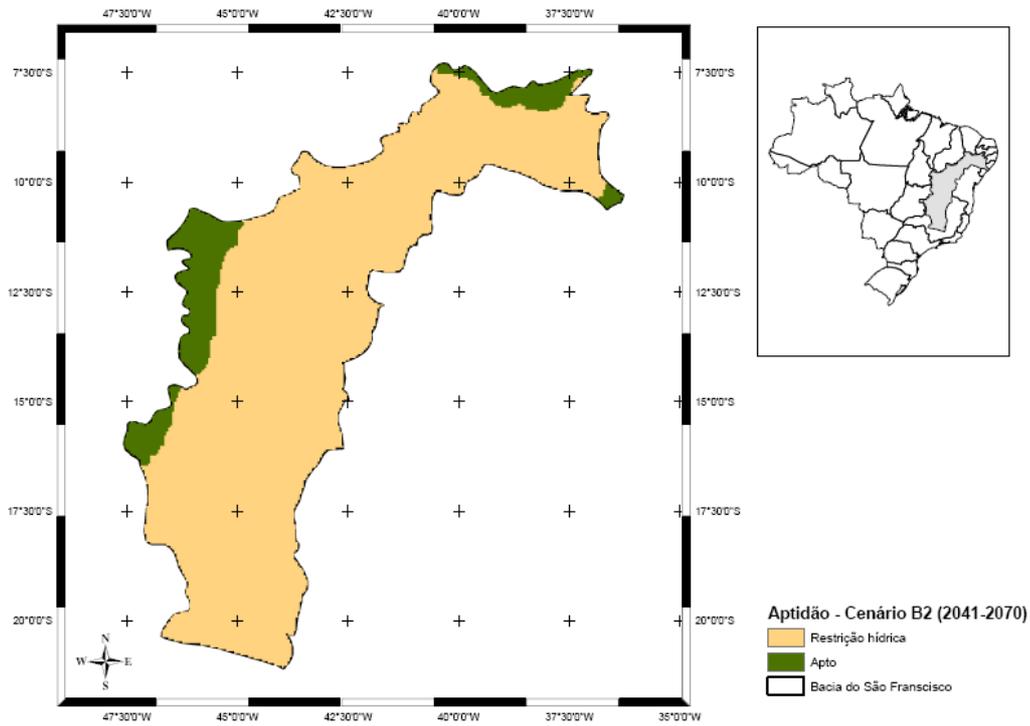


Figura 6.119. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de fevereiro para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

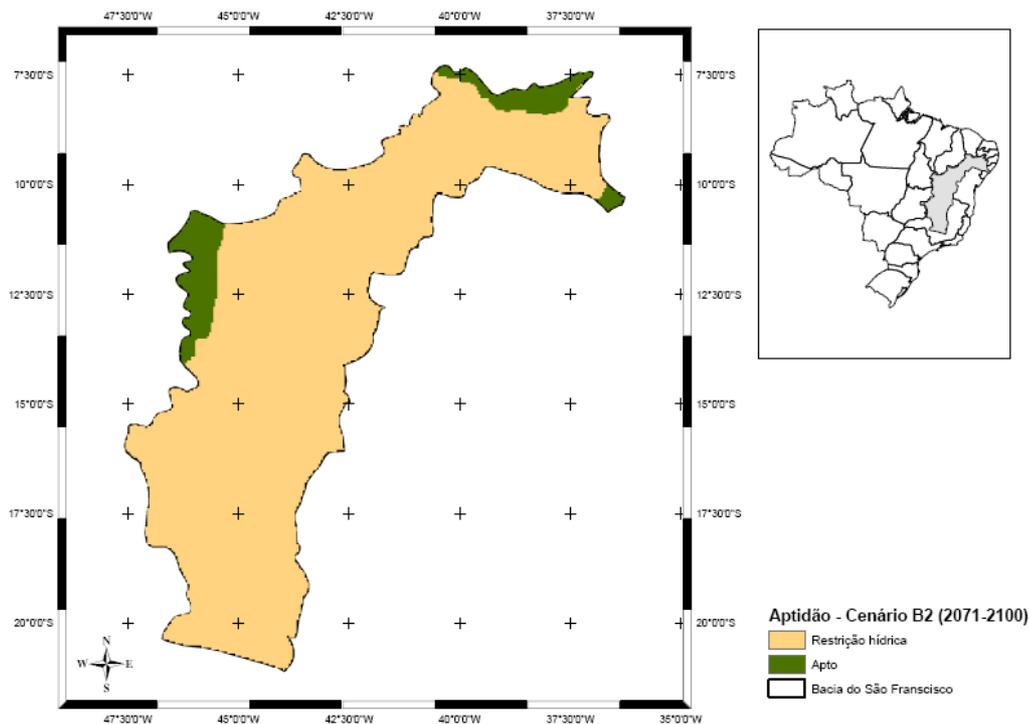


Figura 6.120. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de fevereiro para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os ambos os cenários, A2 e B2, a precipitação como fator limitante ao cultivo do milho plantado no mês de fevereiro na bacia do São Francisco. Projeta-se ainda que a distribuição espacial das áreas de aptidão ou restrição hídrica permanece constante no decorrer dos períodos.

Para o cenário A2, no período de 2011-2040 projeta-se restrição hídrica ao cultivo do milho plantado no mês de fevereiro em quase toda a bacia, com exceção de três pequenas faixas de aptidão, sendo uma a leste, uma no extremo norte da bacia e uma na foz do rio São Francisco. Para 2041-70 a projeção é similar a anterior, com pequena retração das áreas aptas, principalmente a leste. Já para 2071-2100 projeta-se uma pequena expansão das áreas aptas, principalmente a leste.

Para o cenário B2, a projeção para o período de 2011-2040 é similar a do mesmo período para o cenário A2. Para 2041-2070 projeta-se pequena expansão das áreas aptas, com retração da faixa a leste para o período de 2071-100.

### 6.4.11.3 - Milho (plantado no mês de agosto)

Nas Figuras 6.121 a 6.126 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura do milho, plantado no mês de agosto, para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

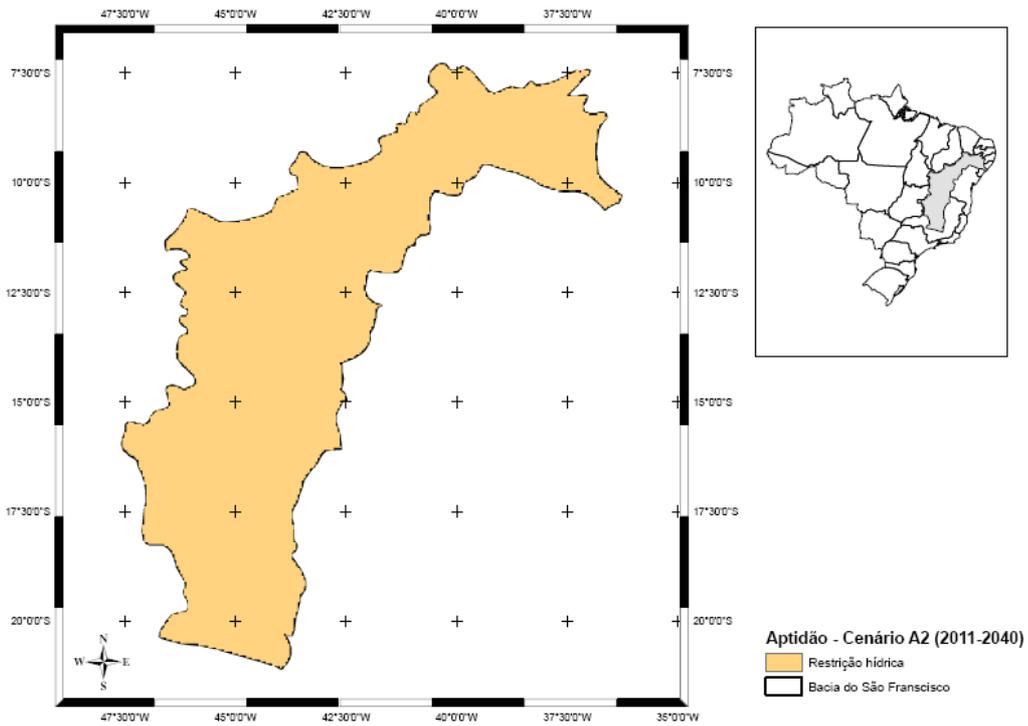


Figura 6.121. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de agosto para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

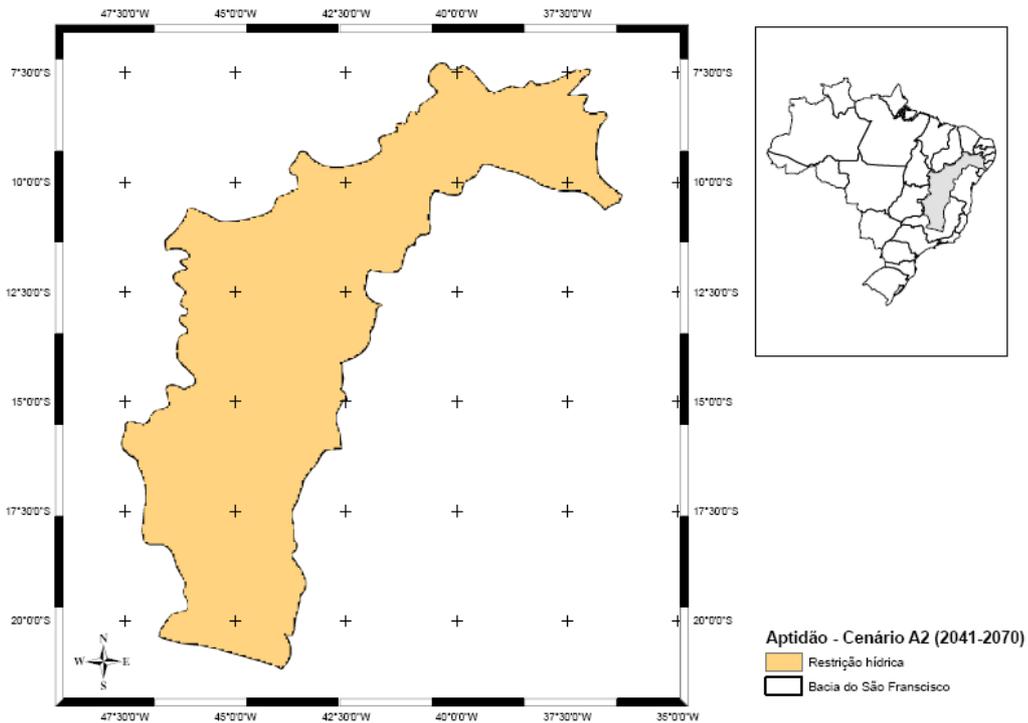


Figura 6.122. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de agosto para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

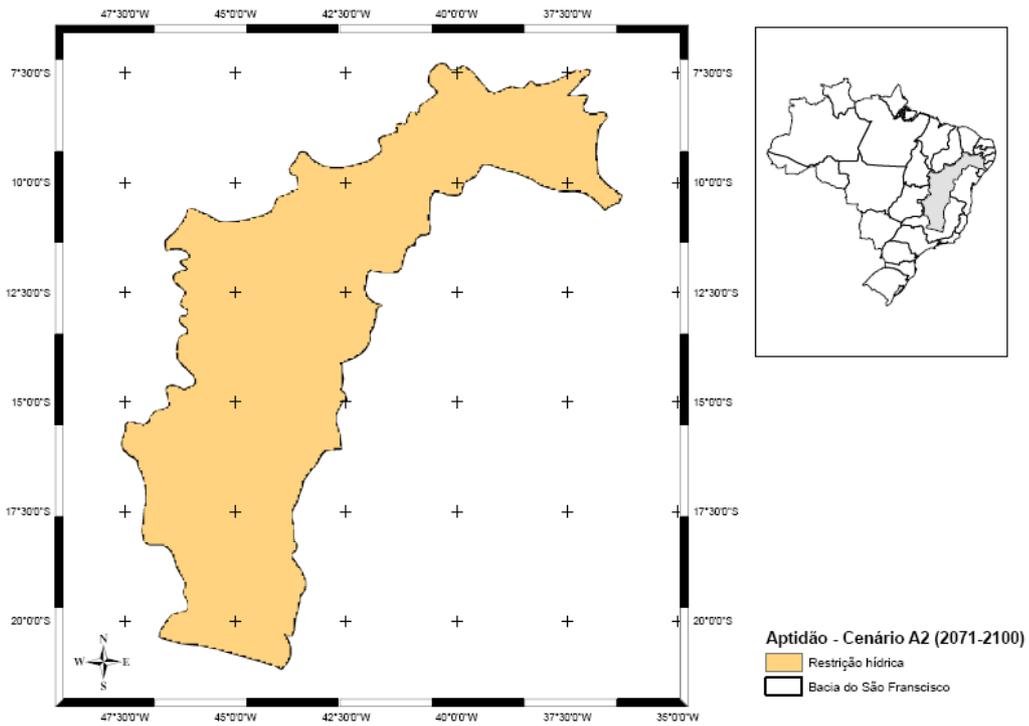


Figura 6.123. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de agosto para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

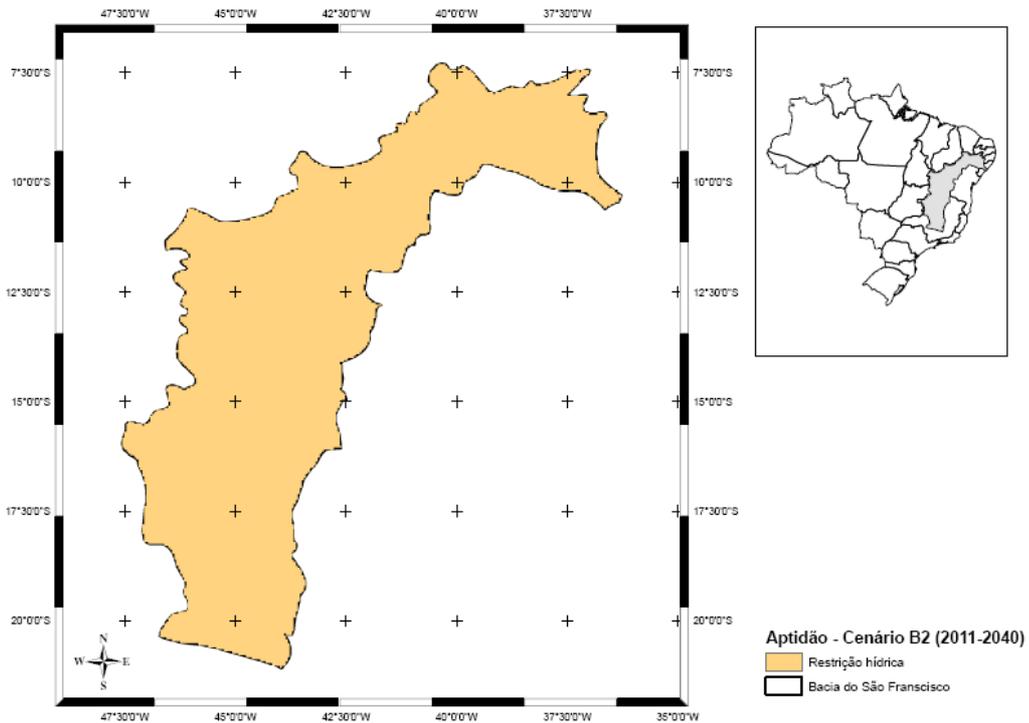


Figura 6.124. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de agosto para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

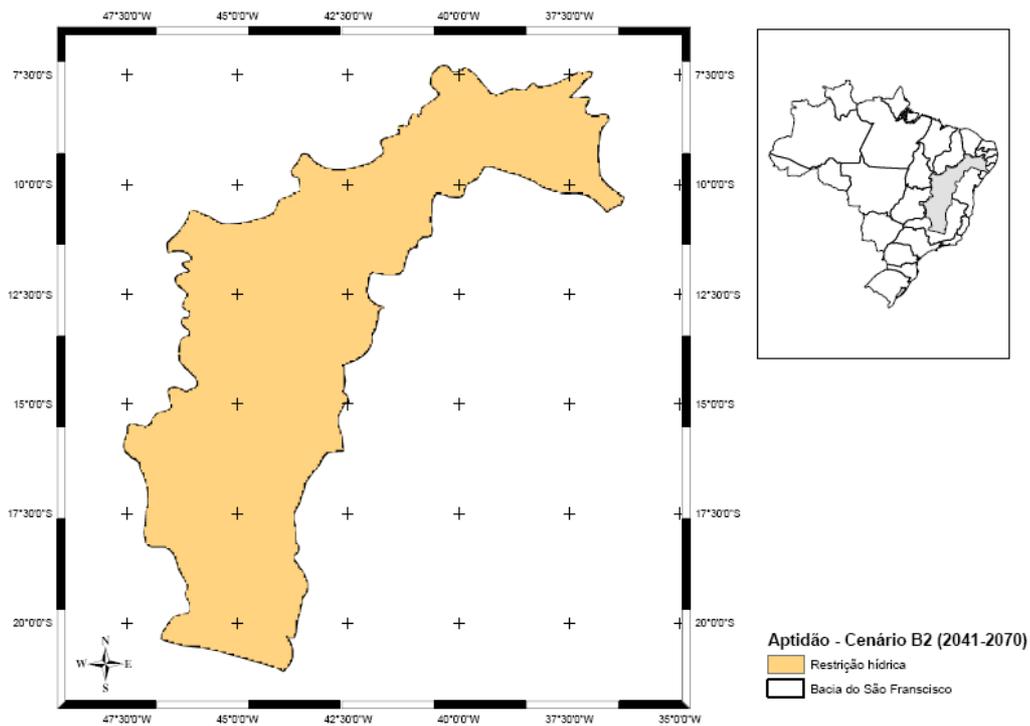


Figura 6.125. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de agosto para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

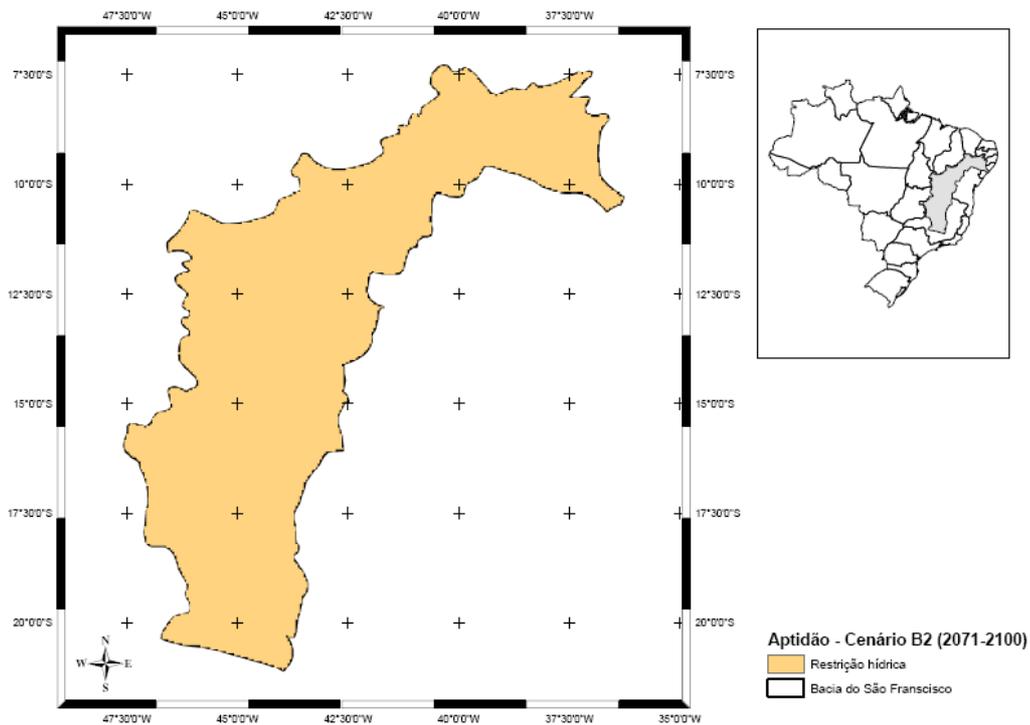


Figura 6.126. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de agosto para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) não projeta aptidão para os ambos os cenários, A2 e B2, para o cultivo do milho plantado no mês de agosto na bacia do São Francisco, sendo projetada restrição hídrica em toda bacia

#### 6.6.11.4 - Milho (plantado no mês de dezembro)

Nas Figuras 6.127 a 6.132 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura do milho, plantado no mês de dezembro, para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

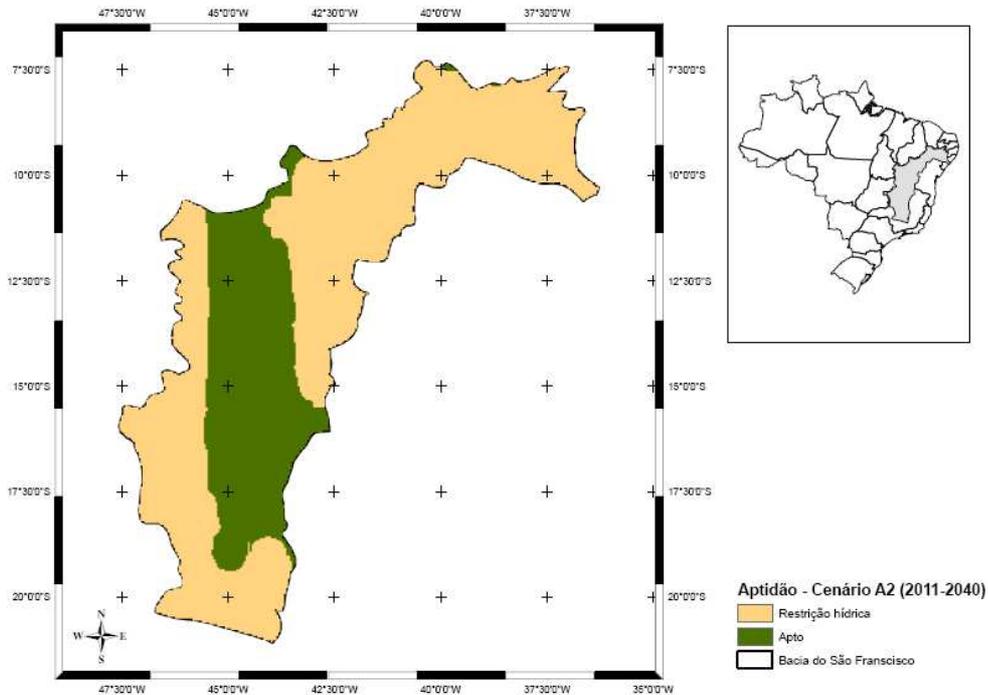


Figura 6.127. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de dezembro para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

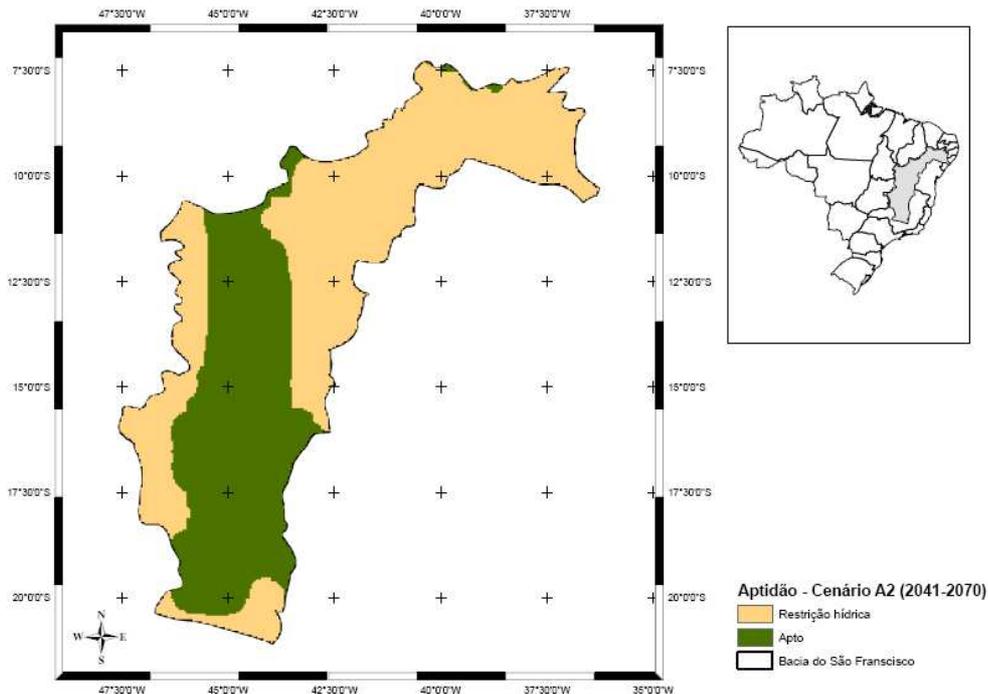


Figura 6.128. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de dezembro para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

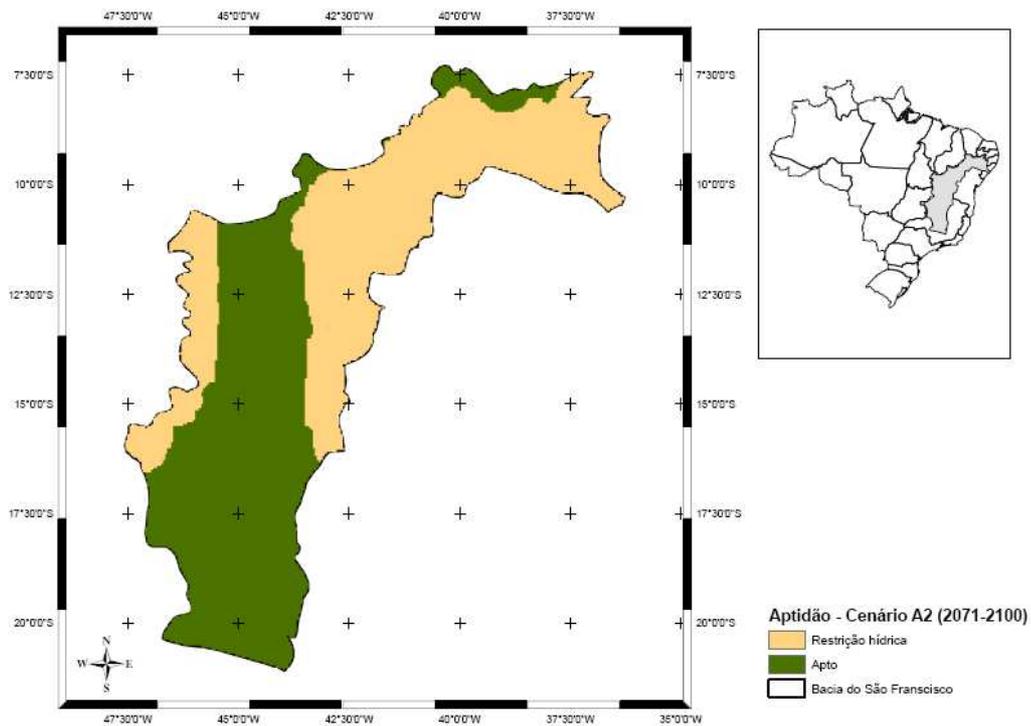


Figura 6.129. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de dezembro para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

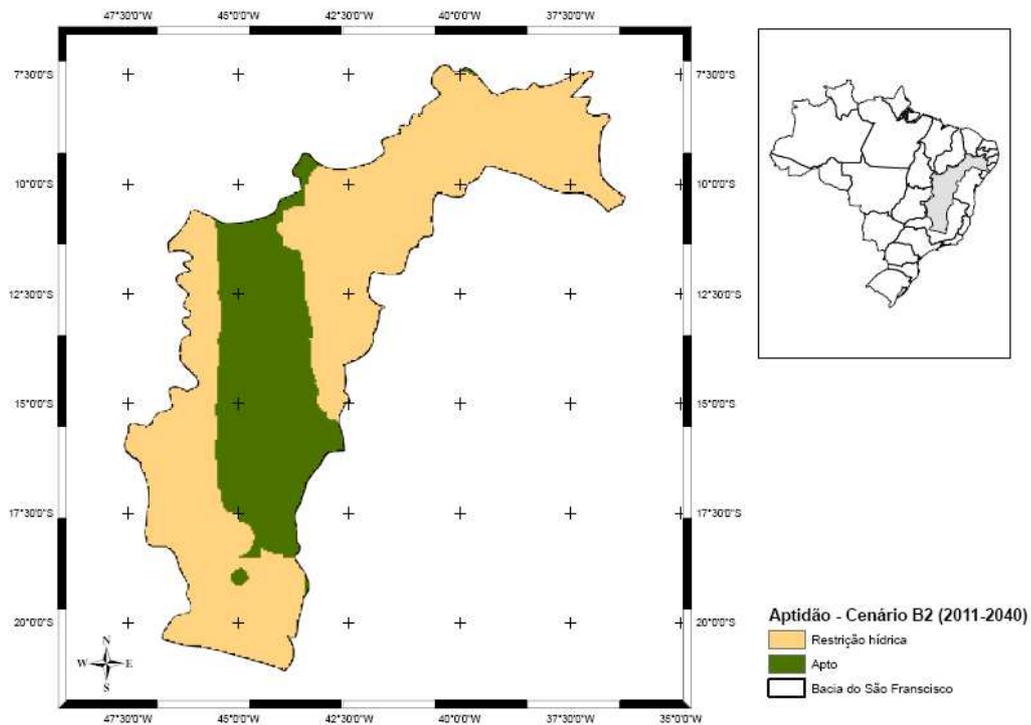


Figura 6.130. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de dezembro para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

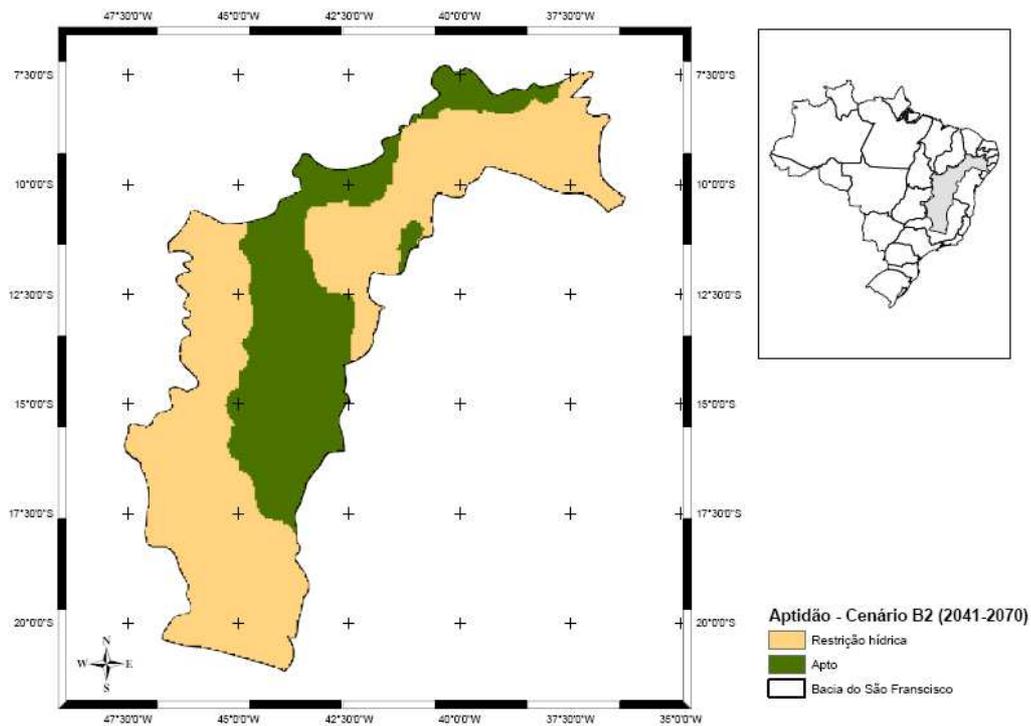


Figura 6.131. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de dezembro para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

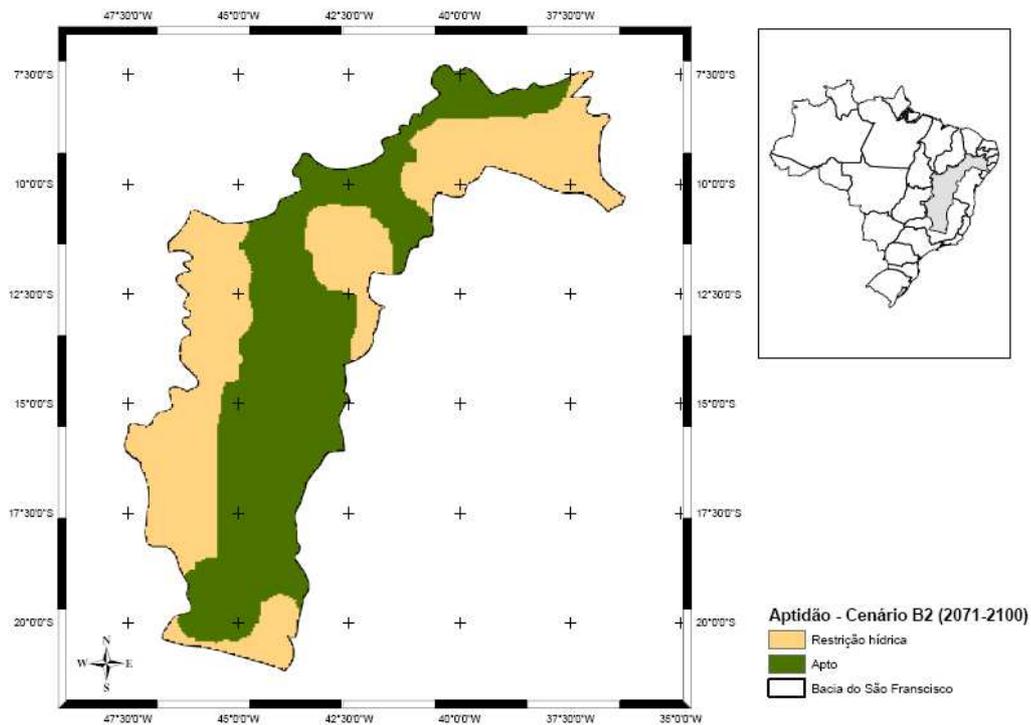


Figura 6.132. Mapa de aptidão para o cultivo do milho plantado no mês de dezembro para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os ambos os cenários, A2 e B2, a precipitação como fator limitante ao cultivo do milho plantado no mês de dezembro na bacia do São Francisco.

Para o cenário A2, no período de 2011-2040, o modelo projeta uma faixa considerada apta ao cultivo do milho na região central da bacia, abrangendo-a de uma extremidade a outra, sendo que para o período de 2041-2070 é projetada a expansão desta faixa para o sul da bacia. Para 2071-2100 a faixa projetada como apta entende-se até o limite sul da bacia, projetando-se também uma faixa de aptidão ao norte.

Para o cenário B2, no período de 2011-2040 a projeção é similar a do mesmo período para o cenário A2. Para 2041-2070 projeta-se que a faixa de aptidão irá expandir-se em direção ao norte da bacia, sendo que para 2071-2100 essa expansão continua, tanto para o norte como em direção ao sul.

## 6.4.12 - Soja

### 6.4.12.1 - Soja (plantada no mês de novembro)

Nas Figuras 6.133 a 6.138 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura da soja, plantada no mês de novembro, para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

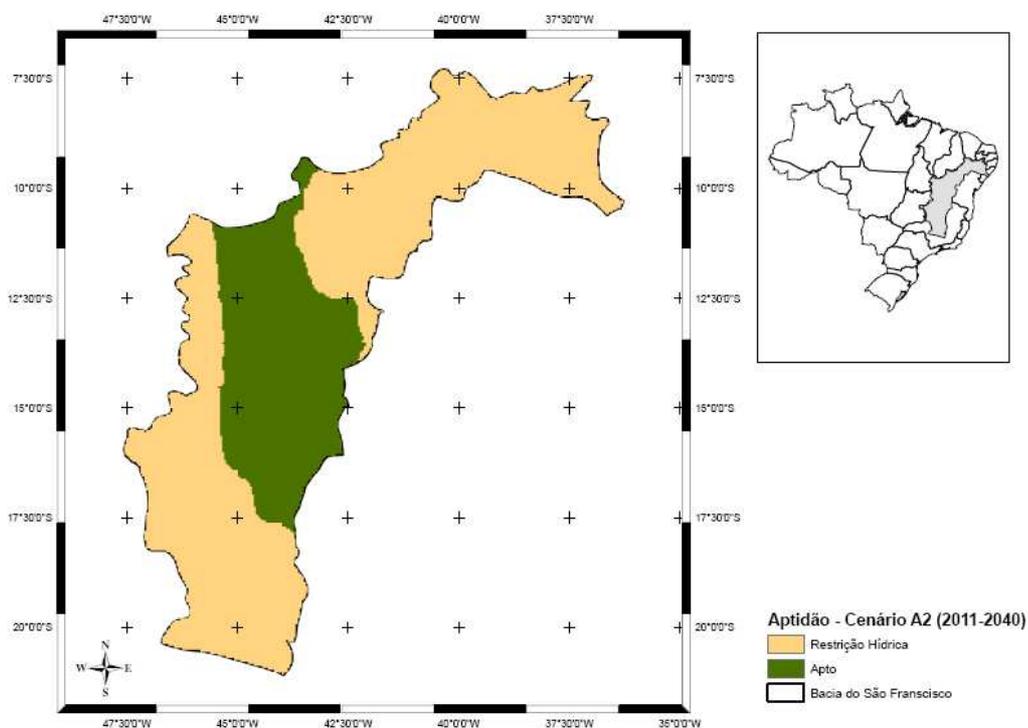


Figura 6.133. Mapa de aptidão para o cultivo da soja plantada no mês de novembro para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

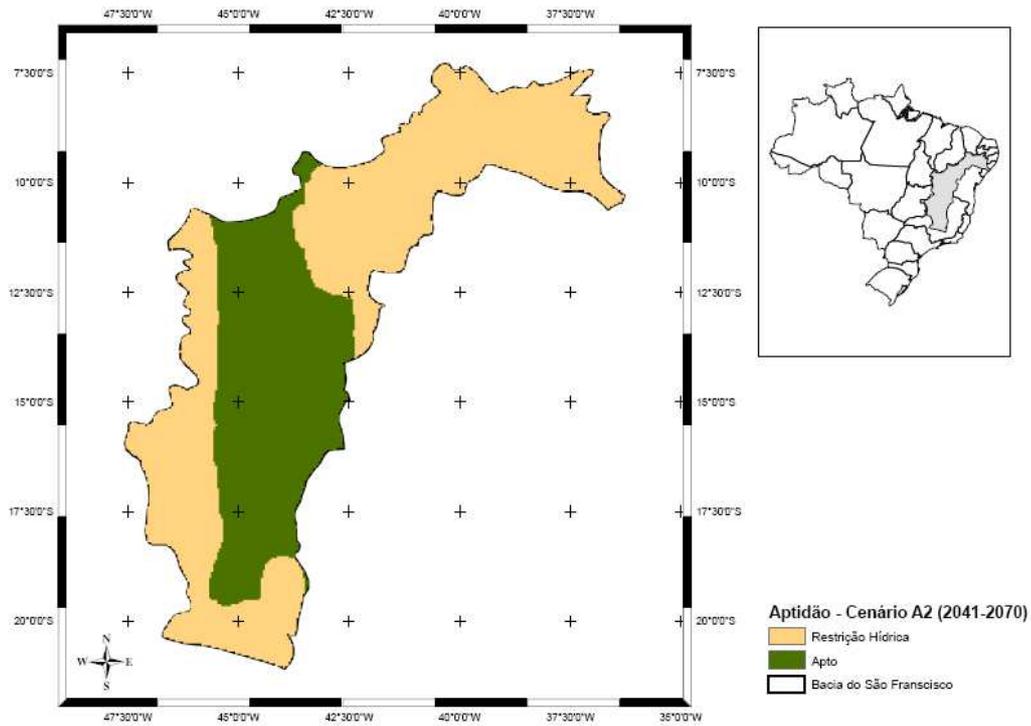


Figura 6.134. Mapa de aptidão para o cultivo da soja plantada no mês de novembro para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

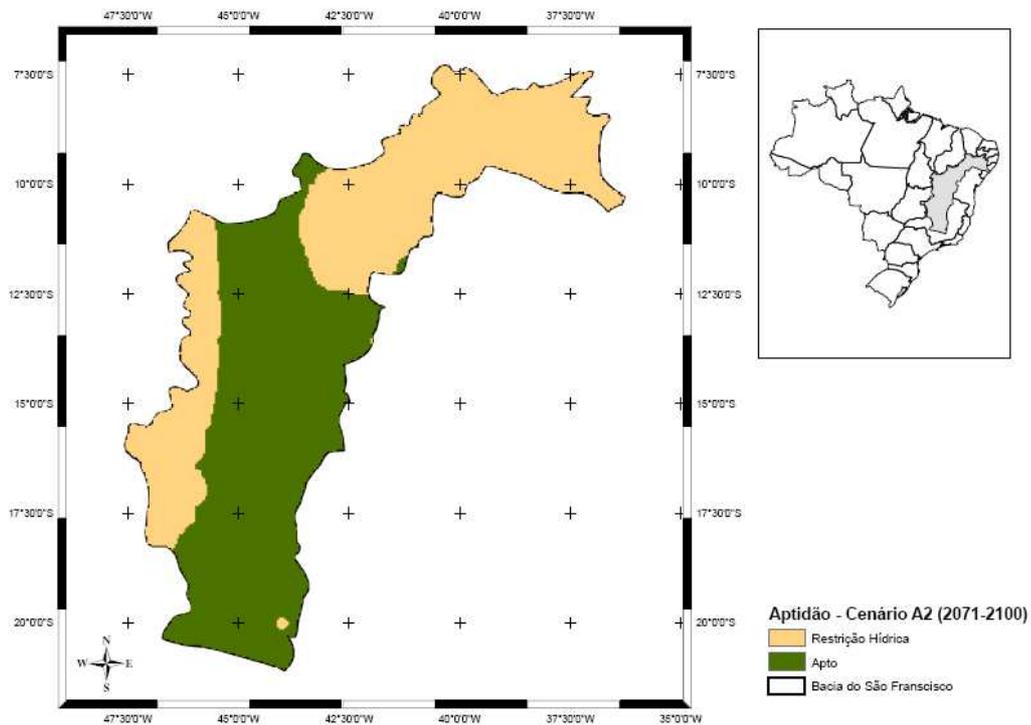


Figura 6.135. Mapa de aptidão para o cultivo da soja plantada no mês de novembro para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

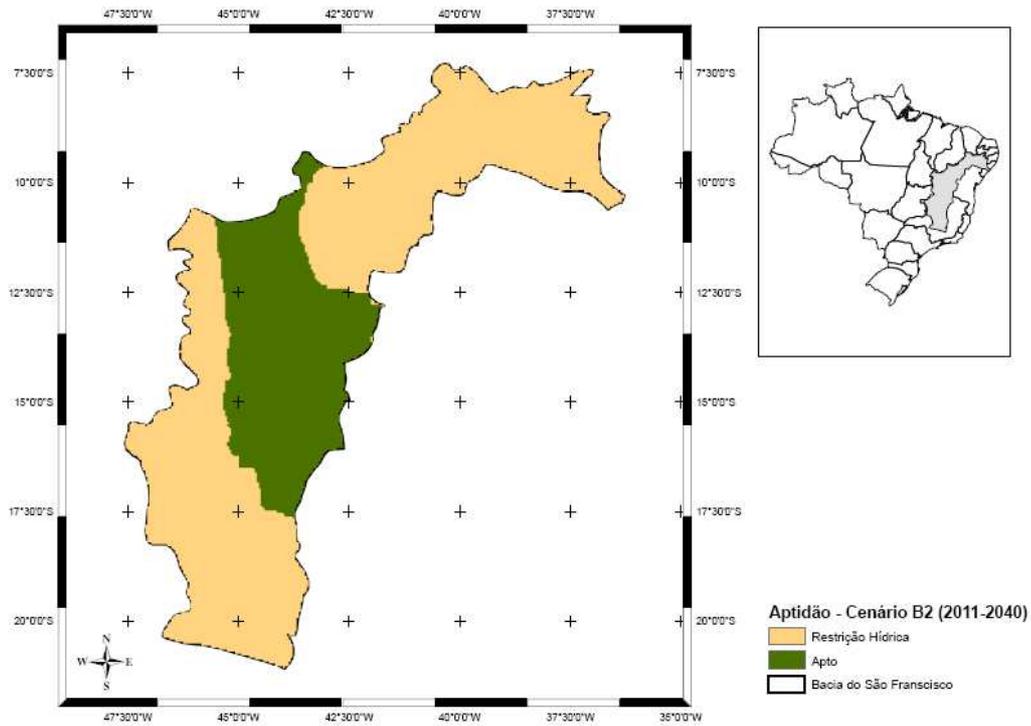


Figura 6.136. Mapa de aptidão para o cultivo da soja plantada no mês de novembro para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

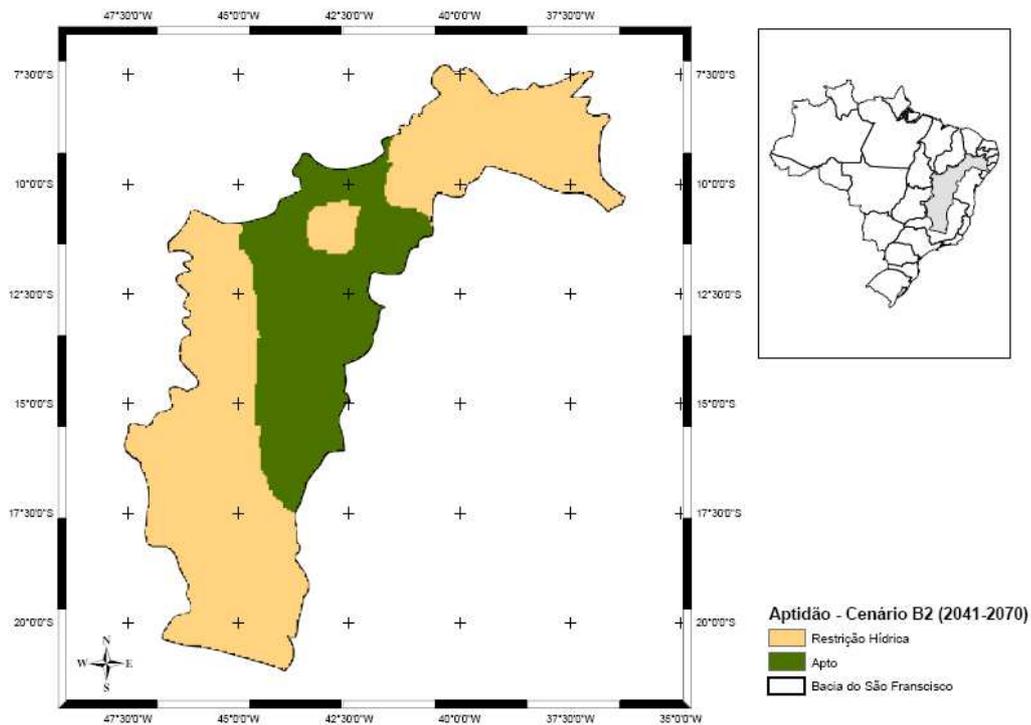


Figura 6.137. Mapa de aptidão para o cultivo da soja plantada no mês de novembro para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

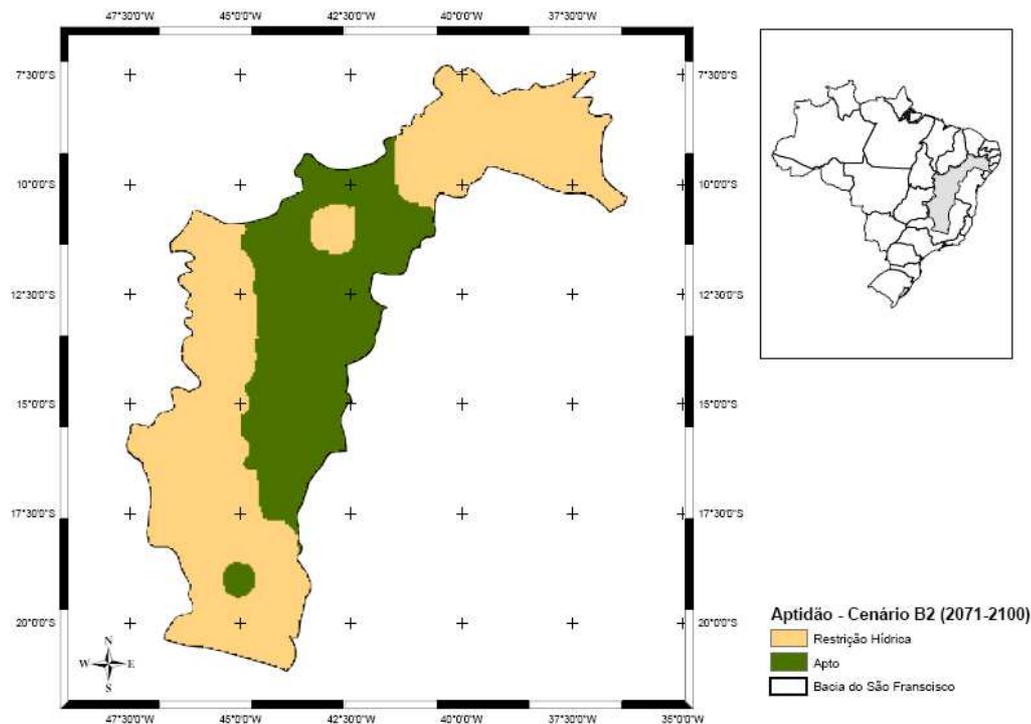


Figura 6.138. Mapa de aptidão para o cultivo da soja plantada no mês de novembro para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os ambos os cenários, A2 e B2, a precipitação como fator limitante ao cultivo da soja plantada no mês de novembro na bacia do São Francisco.

Para o cenário A2, no período de 2011-2040, o modelo projeta uma faixa considerada apta ao cultivo da soja na região central da bacia, abrangendo-a de uma extremidade a outra, sendo que para o período de 2041-2070 é projetada a expansão desta faixa para o sul da bacia. Para 2071-2100 a faixa projetada como apta entende-se até o limite sul da bacia.

Para o cenário B2, no período de 2011-2040 a projeção é similar a do mesmo período para o cenário A2, sendo que para 2041-2070 projeta-se que a faixa de aptidão irá expandir-se em direção ao norte da bacia, apresentando uma área de restrição hídrica em seu interior. Para 2071-2100 a projeção é similar a período anterior, sendo projetada uma pequena área apta no centro da parte sul da bacia.

#### 6.4.12.2 - Soja (plantada no mês de fevereiro)

Nas Figuras 6.139 a 6.144 estão apresentadas as projeções de aptidão agrícola para a cultura da soja, plantada no mês de fevereiro, para o período de 2011 a 2100, dividido em três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para os cenários A2 e B2.

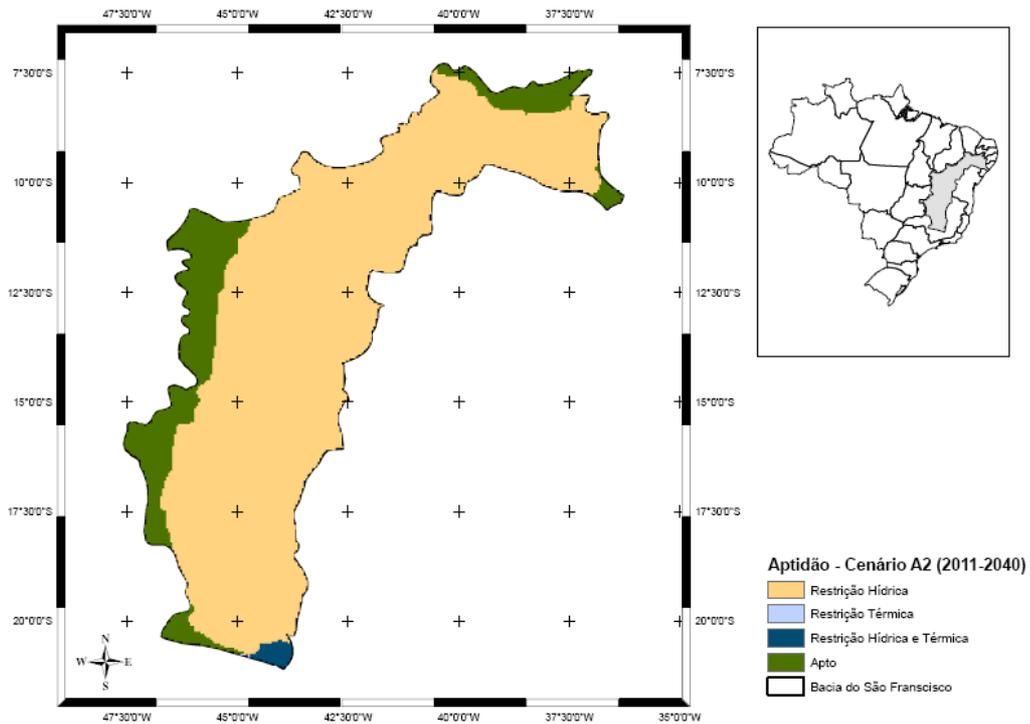


Figura 6.139. Mapa de aptidão para o cultivo da soja plantada no mês de fevereiro para o período de 2011-2040 (Cenário A2).

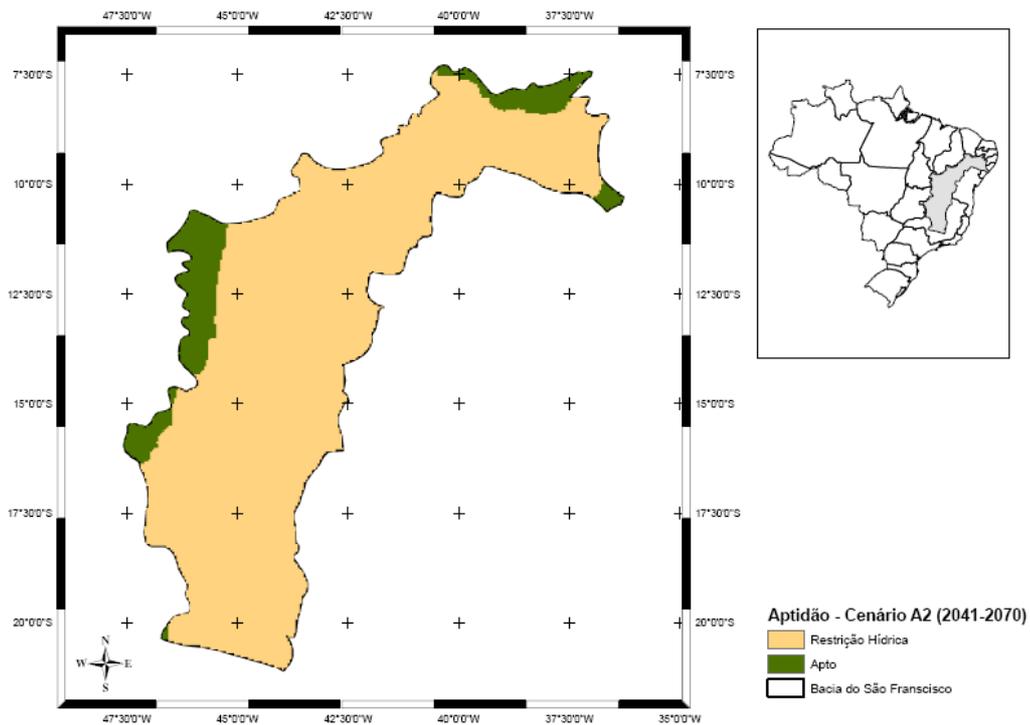


Figura 6.140. Mapa de aptidão para o cultivo da soja plantada no mês de fevereiro para o período de 2041-2070 (Cenário A2).

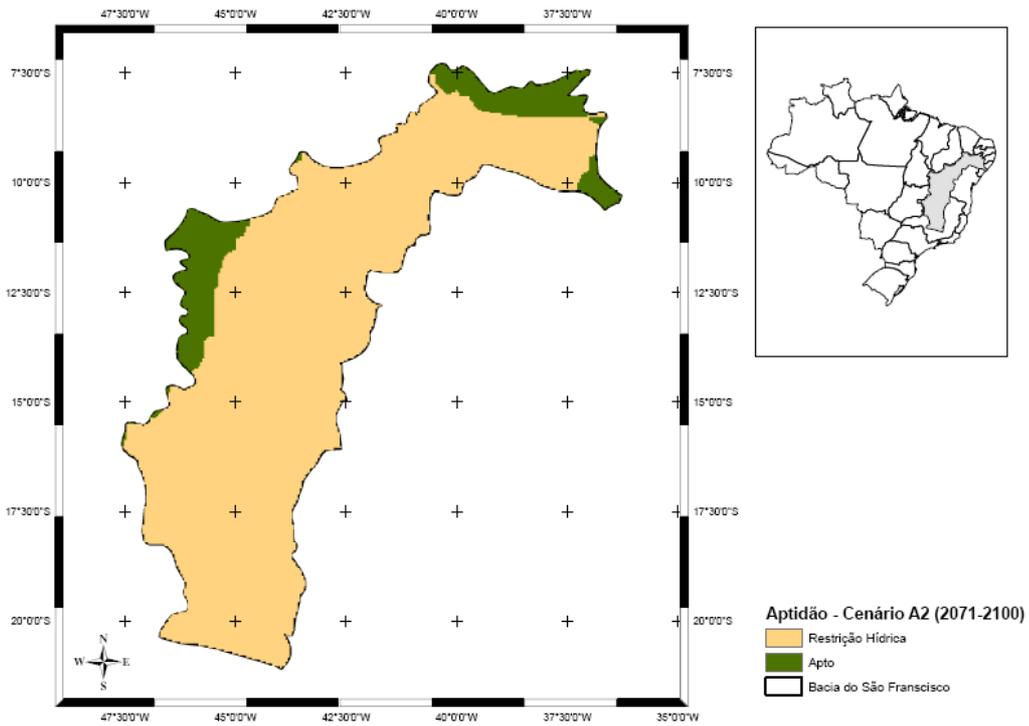


Figura 6.141. Mapa de aptidão para o cultivo da soja plantada no mês de fevereiro para o período de 2071-2100 (Cenário A2).

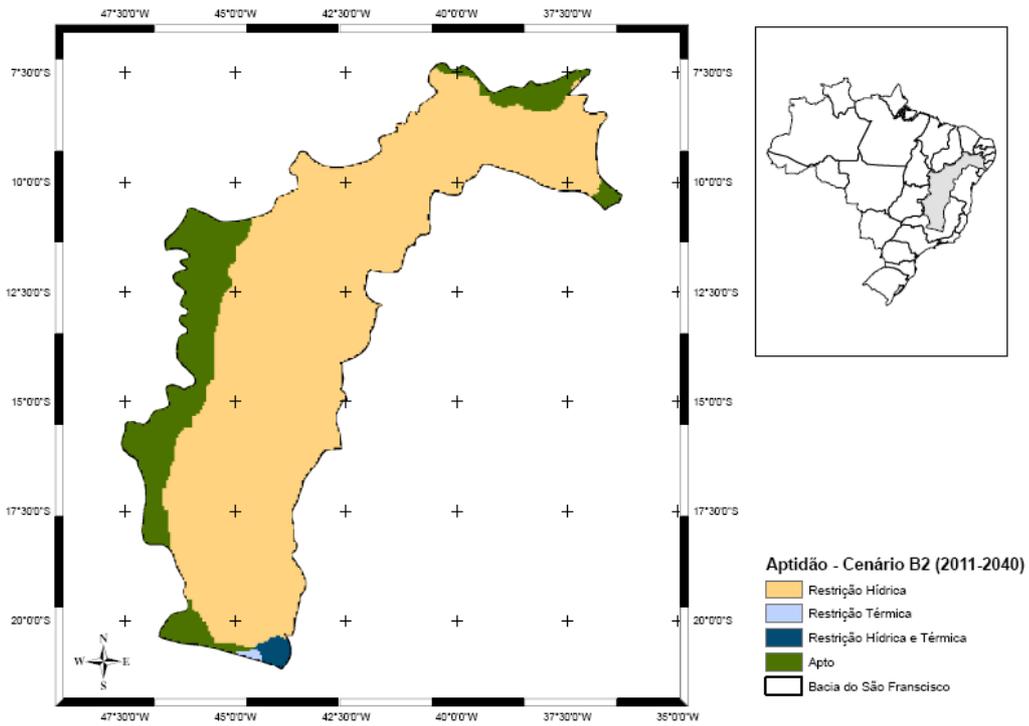


Figura 6.142. Mapa de aptidão para o cultivo da soja plantada no mês de fevereiro para o período de 2011-2040 (Cenário B2).

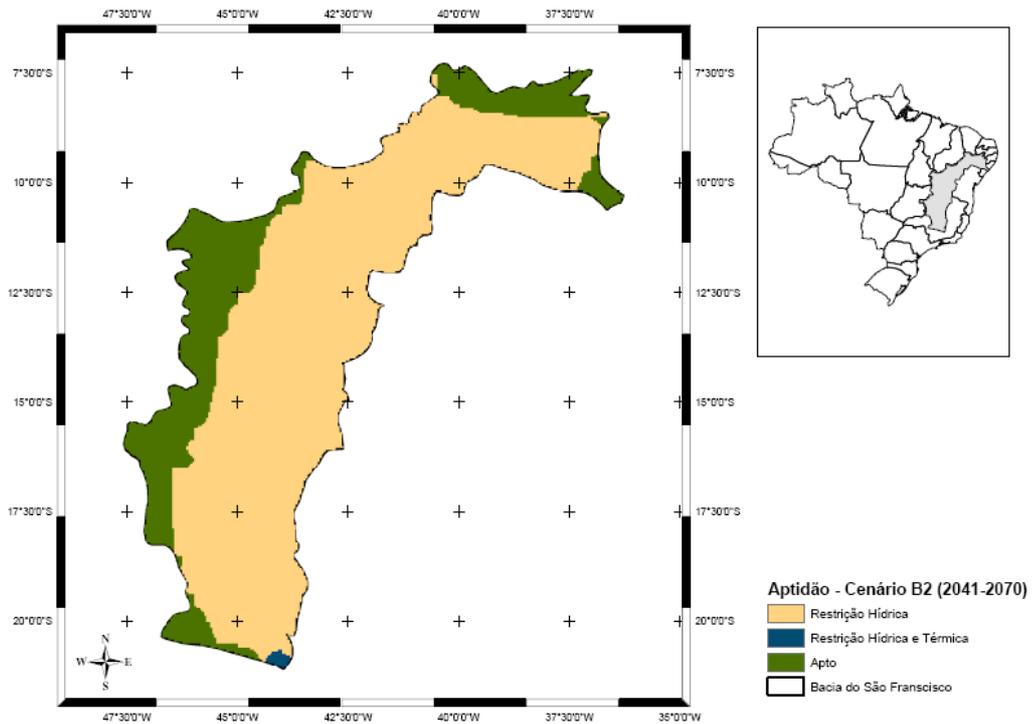


Figura 6.143. Mapa de aptidão para o cultivo da soja plantada no mês de fevereiro para o período de 2041-2070 (Cenário B2).

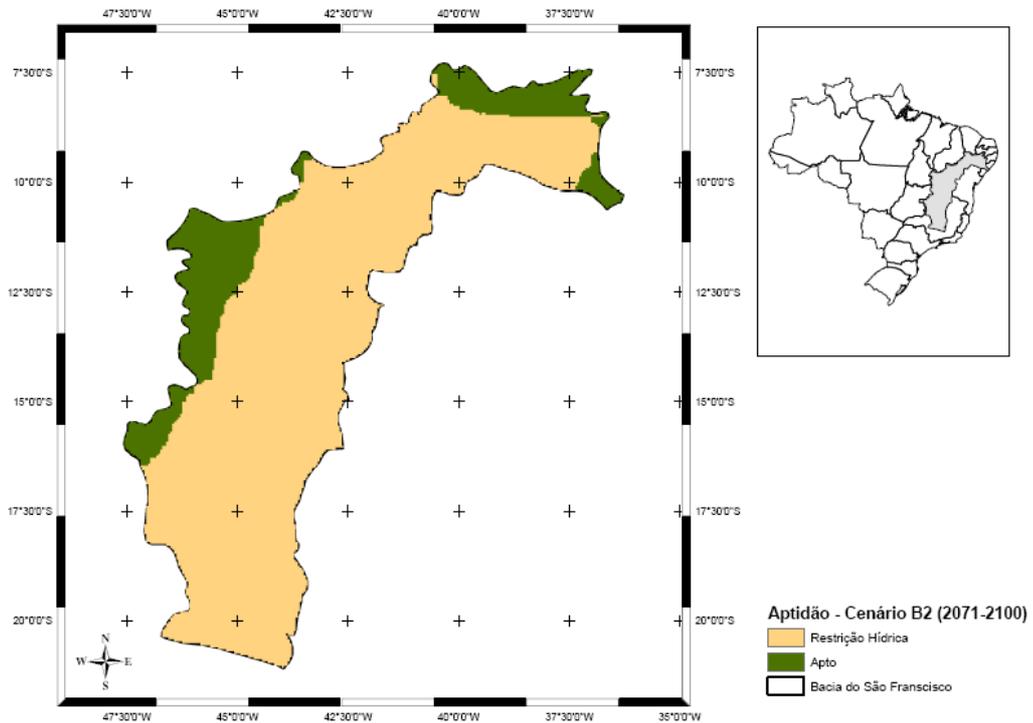


Figura 6.144. Mapa de aptidão para o cultivo da soja plantada no mês de fevereiro para o período de 2071-2100 (Cenário B2).

Pela análise dos mapas gerados constatou-se que o modelo (CCSR/NIES) projeta, para os ambos os cenários, A2 e B2, a precipitação como fator limitante ao cultivo da soja plantada no mês de fevereiro na bacia do São Francisco. Projeta-se ainda que a distribuição espacial

das áreas de aptidão ou restrição hídrica permanece constante no decorrer dos períodos.

Para o cenário A2, no período de 2011-2040 projeta-se restrição hídrica ao cultivo da soja em quase toda a bacia, com exceção de algumas faixas de aptidão, sendo uma a leste, uma ao norte e uma na foz do rio São Francisco, além de uma pequena área no sul. Projeta-se ainda, para o extremo sul, uma área de restrição hídrica e térmica. Para o período de 2041-2070 a projeção é similar a anterior, com retração da área apta localizada a leste e sul, sendo que esta tendência persiste para o período de 2071-2100, no qual a área apta localizada no sul desaparece.

Para o cenário B2, a projeção para o período de 2011-2040 é similar a do mesmo período para o cenário A2, sendo projetada uma expansão das áreas aptas para 2041-2070. Para 2071-2100 a projeção também se assemelha a do mesmo período para o cenário A2.

## **6.7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AMARAL, E.F.; BARDALES, N.G.; AMARAL, E.F.; ARAÚJO, E.A.; PINHEIRO, C.L.S.; SOUZA, A. Aptidões dos solos do Acre para o cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum* L.). Embrapa Acre, dez./2001. 7p. (Comunicado Técnico, nº 143).
- AMORIM NETO, M.S.; ARAÚJO, E.A.; CARAMORI, P.H.; GONÇALVES, S.L.; WREGGE, M.S.; LAZZAROTTO, C.; LAMAS F.M.; SANS, L.M.A. Zoneamento agroecológico do algodoeiro e definição da época de semeadura do algodoeiro no Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia, Passo Fundo*, v.9, n.3, p.422-428, 2001. (Nº. Especial: Zoneamento Agrícola).
- ANDRADE, M. J.B. de; CARVALHO, A. J. de; VIEIRA, N. M.B. Feijão/Clibas Vieira, Trazilbo José de Pula Júnior, Aluizio Borém, editores. 2 ed. Atual. - Viçosa: Ed. UFV, p.67-86, 2006.
- CARVALHO JUNIOR, W.; CHAGAS, C.S.; PEREIRA, N.R.; ZARONI, M.J.; BHERING, S.B. Zoneamento pedoclimático do Paraná para a cultura do Algodão Herbáceo. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2001. (Embrapa Solos. Documentos: nº 38).
- CHAGAS, C.S.; CARVALHO JUNIOR, W.; PEREIRA, N.R.; ZARONI, M.J.; BHERING, S.B. Zoneamento pedoclimático do Rio Grande do Sul para a cultura da maçã. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2000. (Embrapa Solos. Documentos: nº 27).
- COSTA, J. M. N.; ANTUNES, F. Z.; SANTANA, D. P. 1986. Zoneamento agroclimático e planejamento agrícola. Belo Horizonte. *Informe Agropecuário*, n.138, 1986, p. 14-17.
- CUNHA, G. R., BARNI, N.A., HAAS, J.C. et. al. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia, Passo Fundo*, v.9,

- n.3, p. 446-459, 2001. Número Especial - Zoneamento Agrícola.
- EVANGELISTA, A. W. P.; CARVALHO, L. G.; SEDIYAMA, G. C. Zoneamento climático associado ao potencial produtivo da cultura do café no Estado de Minas Gerais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.3, p.4445-452, 2002.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS - Funceme. Disponível em:<<http://www.funceme.br/DEMETS/index.htm>>. Acesso em 18 de janeiro de 2008
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Special Report on Emissions Scenarios. Disponível em: < <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/>> Acesso em 08 de outubro 2007.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Climate Change 2007: The physical science basis. 2007, Paris, 21 p.
- MARENGO, J. A. Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade - Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território Brasileiro ao Longo do Século XXI - Ministério do meio Ambiente (Secretaria de Biodiversidade e Florestas), p.151, Brasília, DF, 2006
- ROSSETI, L.A. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e securidade rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Passo Fundo, RS, v.9, n.3, p.386-399, 2001. (Nº. Especial: Zoneamento Agrícola).
- Secretaria de Estado Agricultura, Pecuária e Abastecimento, MG, julho/2007. Governo de Minas vai subvencionar seguro rural. Disponível em <<http://www.agricultura.mg.gov.br/noticia.asp?id=414>>. Acesso em: 27 de setembro de 2007.
- SEDIYAMA, G.C.; MELO JUNIOR, J.C.F.; SANTOS, A.R.; RIBEIRO, A.; COSTA, M.H.; HAMAKAWA, P.J.; COSTA, J.M.N.; COSTA, L.C. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arábica* L.) de Minas Gerais. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Passo Fundo, RS, v.9, n.3, p.501-509, 2001. (Nº. Especial: Zoneamento Agrícola).
- SILVA, T. G. F. Zoneamento agroclimático do Estado da Bahia para a cultura da atemóia (*Annona cherimola* Mill. X *Annona squamosa* L.). Viçosa, MG: UFV, 2006. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2006.
- SILVA, M.A.V., Meteorologia e Climatologia. Versão digital. Recife, PE, Brasil, julho de 2005.

## **CAPÍTULO 7**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DECORRENTE DE  
DIFERENTES CONDIÇÕES DE OCUPAÇÃO DA BACIA NA  
DISPONIBILIDADE DE ÁGUA E NO SEU  
DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL,  
VISANDO A OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA NA BACIA**

Newton Paulo Bueno

Cíntia Daniele Alves

## 7.1 - INTRODUÇÃO

Neste trabalho propôs a elaboração de uma análise sistêmica das relações entre meio ambiente e variáveis sócio-econômicas na bacia do rio São Francisco. Esse tipo de análise é bastante incomum no Brasil sendo, portanto, necessário iniciar este relatório com um resumo auto-contido dessa metodologia, de modo a possibilitar a compreensão das análises realizadas.

A literatura de fronteira em desenvolvimento sustentável tem se concentrado em duas linhas de pesquisa principais: os assim chamados modelos ecológicos e os modelos institucionais. O problema é que, por mais *insights* que tenham gerado, dependendo da formação básica dos autores, ora se assume, em seus textos mais representativos, o meio-institucional como exógeno, ora se considera o meio-ambiente como uma espécie de “caixa-preta”, como em boa parte, embora não em todos, dos estudos baseados na nova economia institucional.

Um hipótese central deste trabalho é que conflitos na utilização de recursos naturais comuns (*common pool resources*) que podem levar à degradação ambiental têm em geral natureza institucional, a saber, devem-se à existência de dilemas de ação coletiva. Tais dilemas, entretanto, não ocorrem em todas as situações em que as comunidades exploram uma base de recursos comuns, como até há pouco a maioria dos economistas acreditava. Estudos recentes têm mostrado que o meio-ambiente natural tem muito a ver com isso. Em ambientes ecologicamente degradados, por exemplo, é em geral mais difícil se chegar a acordos que permitam superar esses dilemas. A dificuldade para o cientista social (e simétrica para o cientista natural) é como incorporar, com um mínimo de conhecimento de causa, as relações do mundo natural relevantes para os modelos institucionais.

Muitos dos problemas atuais na bacia do rio São Francisco parecem enquadrar-se nessa explicação. O exemplo mais óbvio é a atual polêmica em torno da transposição do rio, que tem envolvido conflitos institucionais das mais variadas ordens, inclusive ao nível de governos estaduais. Mas outros processos menos evidentes ao público em geral vêm se agravando, o que sugere uma atenção maior das autoridades responsáveis para evitar que ultrapassem um limiar em que a resiliência do sistema ecológico-sócio-econômico seja afetada de forma irreversível. Uma das manifestações mais graves dessa progressiva perda de resiliência, identificada por este relatório, é a crescente concentração de renda associada à intensificação de conflitos relacionados ao uso da água em nível local e à redução da qualidade desse recurso, que tem levado entre outras coisas ao aumento de incidência de doenças infecciosas. Mas há outras manifestações apenas um pouco menos sérias.

O objetivo deste relatório é identificar os aspectos mais críticos da dinâmica atual do sistema ecológico-sócio-econômico da bacia do rio São Francisco, com o propósito de gerar informações para delinear políticas capazes de evitar que o sistema ultrapasse um *threesold* a partir do qual as condições atuais já não possam ser restabelecidas.

## 7.2 - REVISÃO DE LITERATURA

Diz-se que existe um dilema de ação coletiva quando uma sociedade encontra-se em uma situação em que cada um de seus membros poderia melhorar suas condições de vida sem que outros tenham de piorar. Em economia, denomina-se essa situação de uma posição Pareto-ineficiente. Isso pode acontecer pela razão evidente de que as pessoas não percebem os potenciais efeitos benéficos da cooperação, mas também pela razão, menos óbvia, de que elas considerem pouco inteligente, de seu ponto de vista, participar efetivamente de ações coletivas. É razoável afirmar que a nova economia institucional em sua versão custos de transação enfatiza o primeiro tipo de situação, denominada de dilema social de primeira ordem, ou seja, as condições necessárias para que os agentes superem os obstáculos macro-institucionais à cooperação (como nos trabalhos de Douglass North), ou a resistência à cooperação ao nível das estruturas de governança (como na obra de Williamson e seguidores).

Mas a segunda situação, cujo exemplo canônico é o dilema do prisioneiro clássico, é bem diferente. A estratégia dominante para os agentes nesses casos é não cooperar e assim a cooperação não deixa de ocorrer simplesmente porque os agentes não consigam coordenar suas ações, em razão, por exemplo, dos elevados custos de transação envolvidos. Mas porque se decidirem cooperar unilateralmente os demais terão incentivos para deixar de cooperar. Isto é, a solução cooperativa não é um equilíbrio de Nash e assim não tem a estabilidade da solução anterior; neste caso, diz-se que ocorre um dilema social de segunda ordem. Em grandes grupos, isto significa que será uma estratégia racional tentar “pegar carona” nos benefícios da cooperação ao invés de contribuir para alcançar esta situação. Nessas condições, em um mundo em que os agentes agem racionalmente (da forma como se define no presente trabalho), a estratégia dominante para cada agente será não cooperar (atuando como *free rider* ou *rent seeker*) e o equilíbrio ineficiente em termos de Pareto da não cooperação prevalecerá. Estudos mais recentes realizados por teóricos de jogos (ver por exemplo Axelrod, 1997, cap. 1) e autores neo-institucionalistas (ver entre outros Putnan, 1993 e Ostrom, 2000) têm indicado que em grupos relativamente pequenos, em que os agentes interagem repetidamente por longos períodos de tempo, esse tipo de obstáculo à cooperação pode ser superado por meio da confiabilidade inter-pessoal acumulada pelo grupo ou comunidade.

Mas nem todas as comunidades em que as pessoas interagem repetidamente conseguem agir coletivamente em empreendimentos como o uso de recursos naturais comuns, que exigem um comprometimento maior dos indivíduos. O motivo é que após solucionar os dois primeiros dilemas, a comunidade precisa ainda desenvolver meios de garantir a aplicação das normas que punem os indivíduos que se esquivam de cumprir os acordos coletivos, isto é, insistem em se comportar como *free-riders* nas comunidades. Ela precisa, em outras palavras, não apenas desenvolver instituições (regras formais e sanções informais) para dar os incentivos para os indivíduos agirem coletivamente, mas também criar mecanismos que possam solucionar dilemas sociais de terceira ordem, isto é determinar quem irá fiscalizar a obediência às normas estabelecidas. O que caracteriza esta situação como um dilema social é o fato de que embora uma monitoração adequada das normas seja do interesse da comunidade, para cada indivíduo isolado interessa que os demais, e não ele próprio realize essa tarefa. A literatura internacional demonstra que este tipo de dilema é difícil de resolver em comunidades onde os agentes não participam da elaboração das normas institucionais e nem da concepção e da implementação das ações, como costuma acontecer, por exemplo, na implantação de projetos de irrigação por governos de países em desenvolvimento (Bardhan, 2000; Becker e Ostrom, 1995; Tang, 1991).

A conclusão é que para que uma comunidade seja capaz de se desenvolver economicamente sem sacrificar irreversivelmente sua base de recursos, ela precisa superar pelo menos os três tipos de dilemas sociais descritos. A acumulação de capital social pode ajudar a superar esses dilemas, mas a literatura internacional indica que para que isso de fato aconteça uma série de outras condições, como pequeno tamanho e condições de participação efetiva dos agentes no processo, têm que estar presentes.

Em 1968, Garret Hardin publicou um texto que se tornaria paradigmático para os estudos em economia ambiental, tornando-se seu título inclusive a síntese do que os economistas teriam essencialmente a dizer sobre o assunto daí em diante: *A tragédia dos comuns*. Esta idéia é bem conhecida de modo que é possível passar rapidamente para o que nos interessa diretamente neste relatório. Em questões ambientais, que envolvem geralmente problemas de provisão e distribuição de recursos comuns, indivíduos agindo racionalmente, isto é, utilizando eficientemente as informações disponíveis visando proteger seus interesses, freqüentemente se vêem aprisionados em situações do tipo *dilema do prisioneiro* ou, mais genericamente, de situações em que existe um dilema de ação coletiva (como mostrado anteriormente), o que leva ao resultado socialmente irracional de esgotamento da base de recursos.

O problema com essa teoria é que ela não tem sido validada por estudos aplicados posteriores. Experimentos recentes realizados por teóricos de jogos (ver por exemplo Axelrod, 1997, cap. 1) e levantamentos de campo por autores neo-institucionalistas (ver entre outros Putnan, 1993 e Ostrom et al., 1999, 2000) têm demonstrado que em grupos relativamente pequenos, em que os agentes interagem repetidamente por longos períodos de tempo, esse tipo de obstáculo à cooperação pode ser superado por meio da confiabilidade inter-pessoal acumulada pelo grupo ou comunidade.

As conclusões relatadas pressupõem, entretanto, que os indivíduos interagem em um meio ambiente que não se altera durante o período de interação. Assim, por exemplo, os *pay-offs* dos “prisioneiros” permanecem fixos durante as interações. Se estes forem capazes de perceber as vantagens da cooperação e forem capazes de desenvolver regras ou instituições informais (assentadas na criação de capital social, por exemplo) que evitem o comportamento oportunístico, os dilemas sociais poderiam em princípio ser superados. Mas as situações de interação social não se resumem a jogos do tipo dilema do prisioneiro e nem, nos casos em que isso acontece, é razoável pressupor que a estrutura dos jogos permaneça invariável durante as interações.

Os avanços recentes nas técnicas de dinâmica de sistemas têm permitido analisar essas situações em contextos mais amplos em que as ações individuais afetam as ações dos demais agentes em situações de interação social por meio de ciclos de *feedback*, muitas vezes contra-intuitivos, capazes de amplificar ou atenuar seus efeitos sobre o sistema, de modo a tornar o resultado final das estratégias individuais muito diferente do inicialmente previsto pelas partes envolvidas. Na próxima sub-seção se esclarece a essência dessa abordagem, bem como o modo como ela pode ajudar a melhor compreender as relações entre economia e meio-ambiente.

## **7.3 - METODOLOGIA**

### **7.3.1 - Noções básicas de dinâmica de sistemas**

A dinâmica de sistemas é uma metodologia desenvolvida para estudar sistemas complexos, como o que se analisa neste trabalho. As técnicas incluídas nessa abordagem, empregadas hoje em estudos aplicados em campos tão distintos do conhecimento como política internacional, ecologia, gestão de recursos naturais e economia, entre outros, começaram a ser desenvolvidas pelo pesquisador do Massachusetts Institute of Technology

Jay Forrester nos anos 60, em uma série de estudos clássicos sobre economia regional.

Mas o que significa exatamente um sistema ser complexo?

Muitos sistemas apresentam complexidade de detalhes ou combinatória, isto é, intrincadas teias de relações entre componentes, o que torna difícil, se não impossível, compreender sua dinâmica sem modelos detalhados construídos com base em conhecimento especializado. Os esquemas que reproduzem os circuitos do sistema elétrico de um avião, por exemplo, são certamente complexos neste último sentido, mas um engenheiro qualificado será sempre capaz de identificar a fonte de um defeito como um relê danificado, que, substituído, sanará o problema.

Não é o este o sentido de complexidade que se está considerando. A complexidade sistêmica decorre basicamente do fato de que a interação entre os componentes de um sistema ocorre em loops de feedback negativos e positivos em que causas e efeitos encontram-se afastados no tempo por delays. Nessas condições, as ações individuais em partes aparentemente isoladas dos sistemas podem dar origem a reações em outras partes em momentos posteriores às quais alterarão as condições sob as quais os primeiros indivíduos tomaram as decisões que deram início ao processo. O resultado é que, em sistemas dinamicamente complexos, essas decisões em geral produzirão conseqüências não intencionais para quem as toma.

Um exemplo de sistema dinamicamente complexo, mas simples em termos de detalhes, é apresentado na Figura 7.1

A primeira relação no topo do diagrama indica que o aumento do volume de água utilizada para irrigação eleva, com uma defasagem de tempo, o nível do lençol freático no subsolo. A polaridade da seta (+) indica a existência de uma relação direta entre as variáveis e a marca com duas retas perpendiculares sobre a seta, a presença de um delay temporal entre causa e efeito. A elevação do lençol freático aumenta, após um tempo, a salinização do solo, elevando os custos unitários de produção principalmente pela necessidade de drenagem. O aumento dos custos de produção força os produtores a tentar aumentar a produção, aumentando a área plantada, de modo a manter sua renda líquida (supõe-se que o capital empregado não pode ser facilmente transferido para outras atividades). Mas para fazê-lo é preciso aumentar o consumo de água, o que agrava o problema inicial. Este ciclo perverso não se deve necessariamente ao fato de que os produtores não percebam a irracionalidade com que exploram a água e o solo, mas a inconsistência entre interesses individuais e o interesse coletivo. Mesmo que um produtor se conscientizasse da gravidade do problema e passasse a economizar água aceitando uma queda na sua renda, se os demais não fizessem a mesma

coisa, o grau de salinização do solo aumentaria de qualquer modo. Isto indica que, nessas condições, a estratégia dominante para cada indivíduo será aumentar a produção e o consumo de água, levando à redução ou mesmo à exaustão do recurso em longo prazo, o que é evidentemente um resultado coletivo irracional de ações racionalmente planejadas.

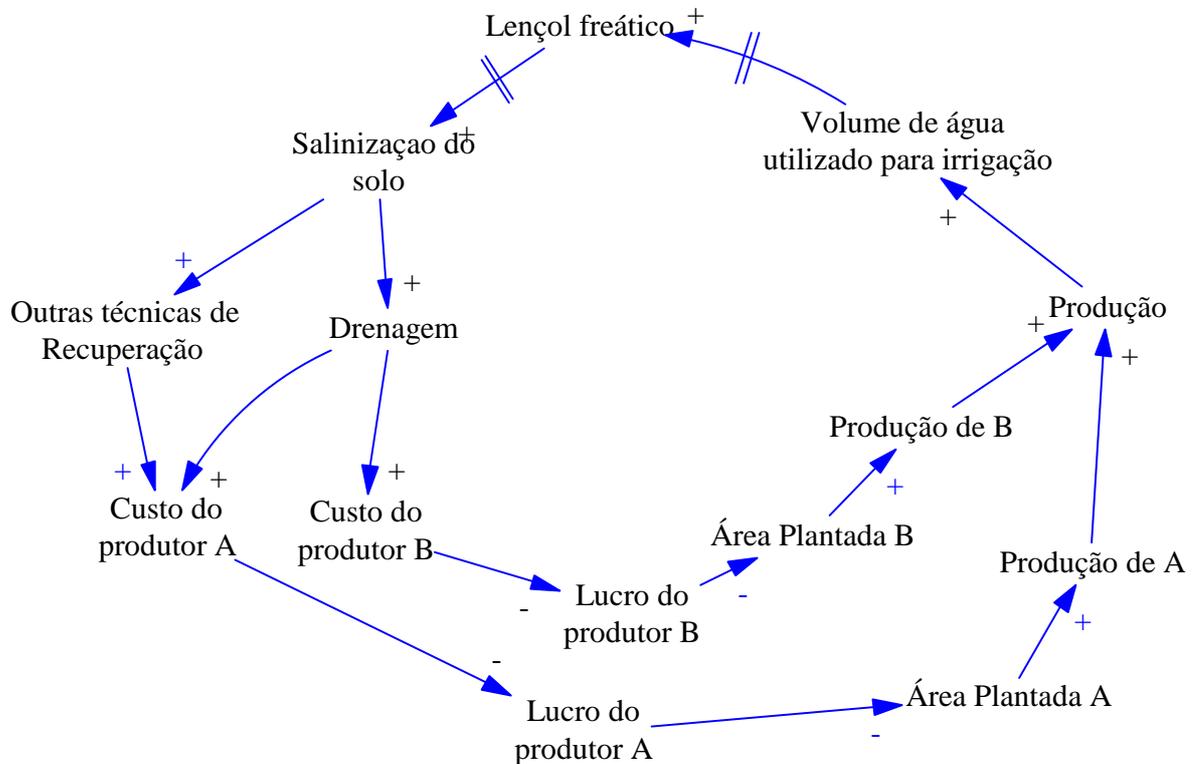


Figura 7.1. Diagrama de influências.

Este modelo foi desenvolvido pelo autor para o perímetro irrigado Nilo Coelho em Petrolina/PE com base no arquétipo sistêmico da “tragédia dos comuns”.

Um outro exemplo que pode ajudar a compreender a essência da metodologia é o dado por Forrester (1969) em um dos estudos pioneiros do campo. Nesse estudo, o autor mostrou que, diferentemente do que poderia sugerir o senso comum, a degradação social e física dos centros das grandes cidades americanas não derivava do declínio econômico desses locais, mas do fato de que a concentração populacional nesses centros comprometia a qualidade de vida, ao, por exemplo, elevar os índices de criminalidade e tornar insuficiente a infra-estrutura de saúde e educação, não importa o quanto crescessem os investimentos públicos nesses itens. A tentativa de recuperar economicamente essas regiões, aliás, parecia agravar o declínio ao invés de contribuir para reverter essa tendência, porque induzia as pessoas a permanecerem nos centros urbanos ao invés de se deslocarem para outras regiões menos populosas.

Em sistemas, os componentes encontram-se conectados em estruturas que apresentam propriedades diferentes das apresentadas individualmente por seus componentes porque estes

estão sujeitos a ciclos de feedbacks positivos e negativos. A consequência disso é que variações em alguns elementos do sistema produzem variações em outras partes, após defasagens de tempo, as quais os agentes relevantes desconhecem ou deixam de levar em conta adequadamente em seus cálculos. Assim, por exemplo, a construção de novas habitações ou reformas das moradias antigas melhoram temporariamente as condições de vida nos centros das grandes cidades, mas, com o passar do tempo, tende a atrair mais moradores dos subúrbios para as regiões centrais, o que acabará por agravar os problemas iniciais. Nesse caso, a ação de construir novas moradias é em geral induzida pelas pressões por parte da população por meio de um elo de feedback negativo no curto prazo: isto é, a piora nas condições de vida gera uma resposta compensatória, ou de equilíbrio, do sistema, a saber, a construção de novas moradias, o que tende a melhorar as condições de vida iniciais.

No longo prazo, entretanto, manifesta-se um ciclo de feedback positivo, que amplifica a variação inicial: a degradação das condições de vida leva a ações que, embora sejam benignas no curto prazo, de fato tendem a agravar os problemas iniciais, atraindo mais moradores para os centros urbanos. Nestas condições, ações intencionais sobre o sistema, que isoladamente são benignas, podem gerar efeitos finais indesejáveis, os quais não podem ser associados às estratégias individuais de qualquer dos agentes relevantes. Na linguagem da teoria dos sistemas complexos, diz-se que, nesses casos, o resultado final emerge. Identificar os principais loops de feedback, bem como as defasagens de tempo envolvidas entre as variáveis inter-relacionadas nesses loops, visando avaliar os efeitos não intuitivos de estratégias concorrentes de intervenção é o objetivo da análise sistêmica.

A primeira etapa de um estudo sistêmico é a construção de diagramas de influências, em que os principais loops de feedback envolvidos no problema estudados são identificados. A título de ilustração, é útil observar como passar de uma apresentação meramente descritiva, como a realizada, para uma análise verdadeiramente sistêmica. O diagrama de influências na Figura 7.2 representa os loops de feedback mencionados anteriormente.

As setas, como já assinalado, indicam que as variáveis movimentam-se na mesma direção (polaridade positiva) ou em direção inversa (polaridade negativa). Assim, por exemplo, a imigração para os grandes centros urbanos aumenta a população desses centros, o que reduz o grau de adequação da infra-estrutura de serviços públicos. As letras no interior dos semi-círculos indicam que as variáveis relacionam-se em um loop de feedback positivo ou de reforço (R) ou de feedback negativo ou de equilíbrio (B). O sinal do loop é obtido multiplicando-se os sinais das relações individuais. Por exemplo, o aumento populacional

tende a aumentar a atividade econômica dos grandes centros e assim a atrair ainda mais população, isto é o produto dos sinais é positivo e o loop é de reforço.

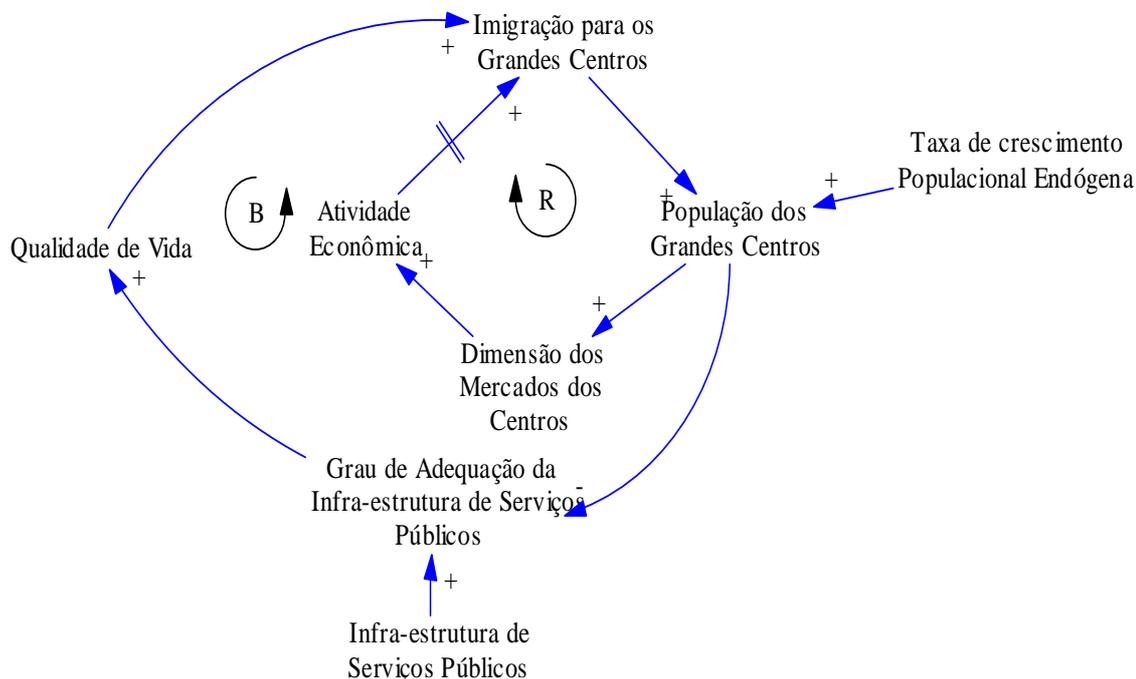


Figura 7.2. Diagrama de influências com loops de feedback.

Observe-se que, no longo prazo, o crescimento populacional dos grandes centros poderia em tese ser detido endogenamente devido à ação do loop de feedback negativo na parte inferior do diagrama, que mostra que a piora da qualidade de vida tenderia, com o tempo, a reduzir os incentivos para a imigração. Mas se o governo responder a esse declínio da qualidade de vida aumentando os investimentos em infra-estrutura, essa ação compensará o efeito estabilizador do loop negativo. É fácil ver então que a estratégia racional para enfrentar o problema seria, contra-intuitivamente, reduzir os incentivos para o crescimento econômico nos grandes centros, por exemplo aumentando os impostos sobre a propriedade de imóveis nessas regiões. O processo de feedback positivo passaria a operar então no sentido virtuoso de reduzir a super-população, sendo além disso potencializado pelo loop negativo, que implica que o declínio populacional levará a melhorias nos indicadores de qualidade de vida.

Note-se finalmente que há um complicador adicional no processo. Como em geral existe uma defasagem de tempo relativamente grande entre causas e efeitos, pode demorar para o fluxo imigratório para as regiões centrais se reduzir em resposta à redução intencional da atividade econômica (a marca de duas linhas paralelas na seta correspondente indica que existe um delay na relação correspondente). Neste caso, pode muito bem acontecer que a qualidade de vida piore muito ainda antes de começar a melhorar em razão da política

adotada. A população continuará a aumentar durante algum tempo devido a imigração, mas a oferta de empregos diminuirá, o que irá deteriorar ainda mais as condições de vida, antes que o ciclo finalmente se reverta. Essa é uma situação comum quando se tenta atuar sobre sistemas complexos e é uma das principais razões que explicam porque é tão difícil para os governos adotar políticas de longo prazo consistentes.

A interação em situações de complexidade, entretanto, ocorre como identificado por pesquisadores do Massachusetts Institute of Technology, em estudos aplicados, obedecendo a padrões denominados de arquétipos sistêmicos

### 7.3.2 - A abordagem de dinâmica de sistemas e os arquétipos sistêmicos

O grupo de dinâmica de sistemas do MIT identificou oito estruturas sistêmicas comuns a uma gama de situações de interação social - os arquétipos sistêmicos - das quais destacam-se quatro que parecem ser especialmente esclarecedores para estudar a dinâmica sócio-econômica na bacias do rio São Francisco

A Figura 7.3 representa um diagrama de influências em que as setas indicam relações diretas (sinal positivo) e inversas (sinal negativo) entre as variáveis incluídas no modelo; as marcas paralelas sobre as setas indicam a presença de um delay temporal na relação.

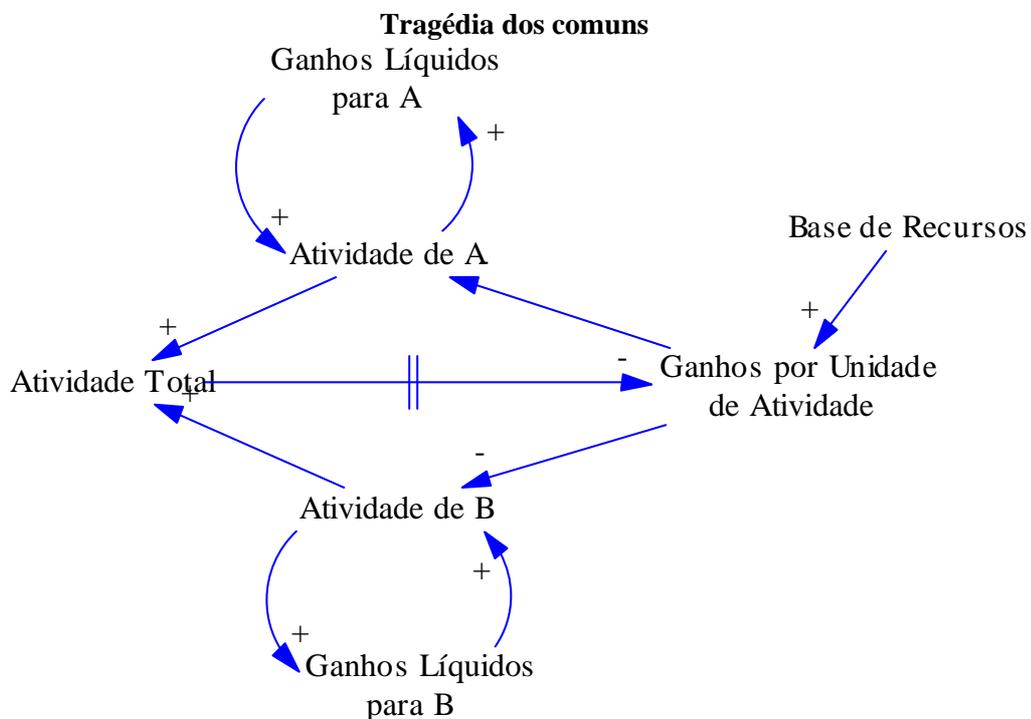


Figura 7.3. Arquétipo Tragédia dos comuns.  
Extraído de Kim (2000)

O aumento do nível de atividade de um agente (ou grupo de agentes) A eleva seus ganhos no curto prazo, mas aumenta o nível total de atividade, digamos de produção agrícola. O aumento da produção, entretanto, pressiona a base de recursos, por exemplo a disponibilidade de água para irrigação, e assim reduz a produtividade e os ganhos de A no longo prazo. Observe-se, além disso, e este ponto é o mais importante, que o fato de A aumentar seu nível de produção reduz os ganhos também de B no longo prazo (visto que a disponibilidade de água reduz para todos os produtores que compartilham a mesma base de recursos). Assim será racional do ponto de vista de B intensificar a produção (e o uso de água) para proteger seus rendimentos em face da ação agressiva de A. A dinâmica desse processo é cumulativa levando ao esgotamento da disponibilidade de água.

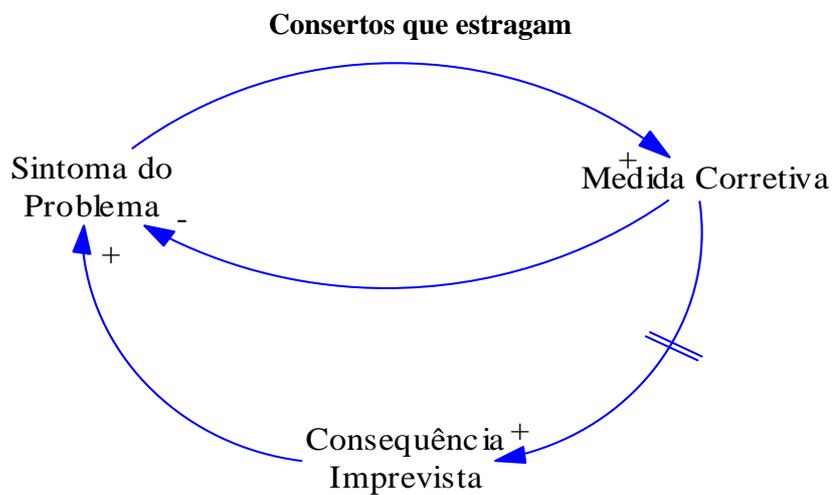


Figura 7.4. Arquétipo consertos que estragam.

A adoção de medidas corretivas atenua os efeitos negativos de um problema no curto prazo, mas gera efeitos imprevistos que agravam o problema no longo prazo.

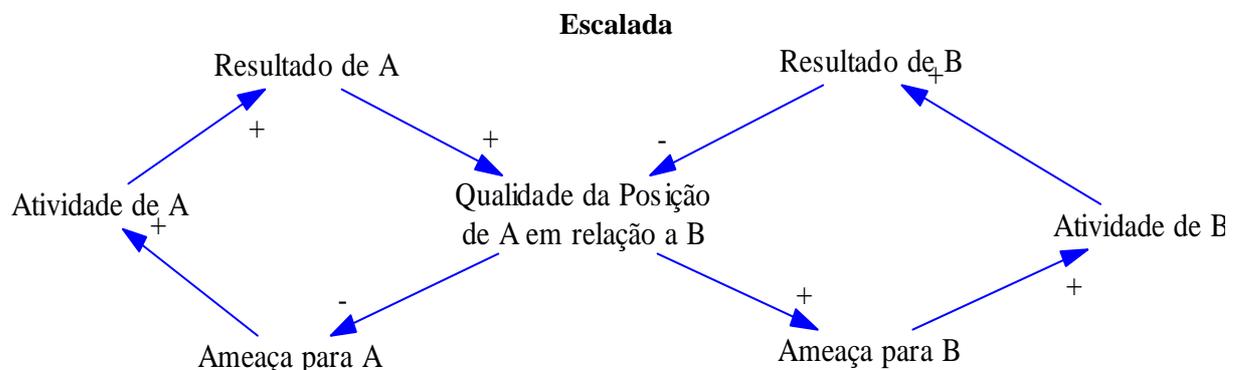


Figura 7.5. Arquétipo escalada.

O fato do agente A obter uma vantagem inicial em um certo setor de atividade representa uma ameaça para B, que reagirá intensificando seu esforço para restabelecer sua posição original. Mas nesse caso, isso representará uma ameaça para A. O resultado é uma escalada do nível de conflitos entre os agentes, sem que nenhum deles obtenha necessariamente uma vantagem no longo prazo.

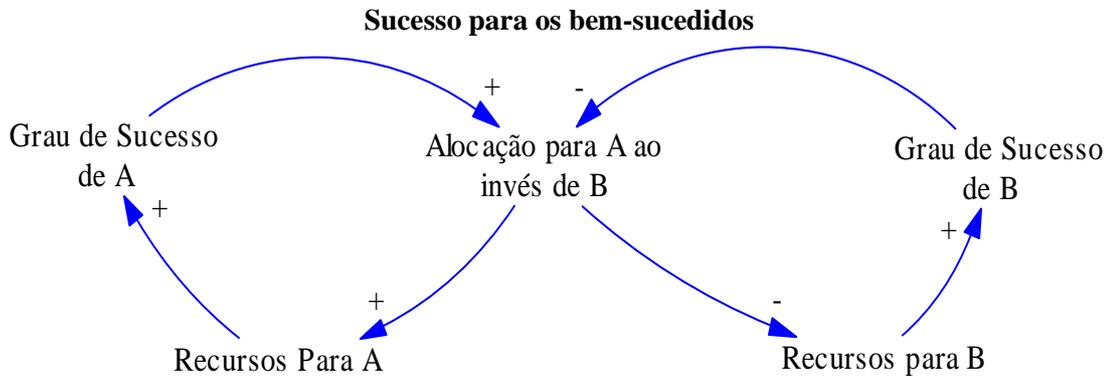


Figura 7.6. Arquétipo sucesso para os bem-sucedidos.

Uma vantagem inicial para A lhe confere acesso privilegiado a recursos produtivos, o que aumenta seus ganhos e assim lhe permite obter ainda mais recursos produtivos. O resultado de processos como esses é que parte dos agentes concentrará os recursos da sociedade e os demais serão reduzidos à pauperização.

### 7.3.3 - Modos fundamentais de comportamentos dinâmicos

O objetivo desta seção é fornecer elementos para a compreensão dos modelos de simulação desenvolvidos para este trabalho.

#### 7.3.3.1 - Crescimento exponencial

Uma dinâmica de crescimento exponencial resulta de processos cumulativos (feedback positivo ou de reforço). Esses processos ocorrem quando a variação líquida do sistema é proporcional ao seu estado atual, reforçando a tendência existente.

Na Figura 7.7, denominada diagrama de influências, os sinais positivos representam relação direta entre as variáveis. A Figura 7.8 retrata a dinâmica temporal de processos representados pela Figura 7.7.

Um exemplo dessa dinâmica é o modelo populacional proposto por Malthus (Figura 7.9).

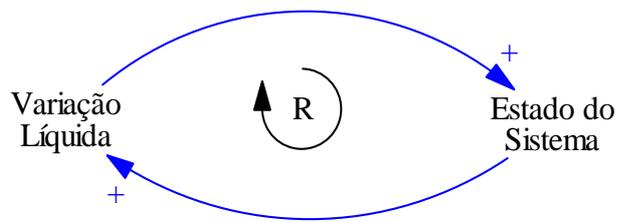


Figura 7.7. Diagrama de influências para um sistema sujeito a crescimento exponencial.

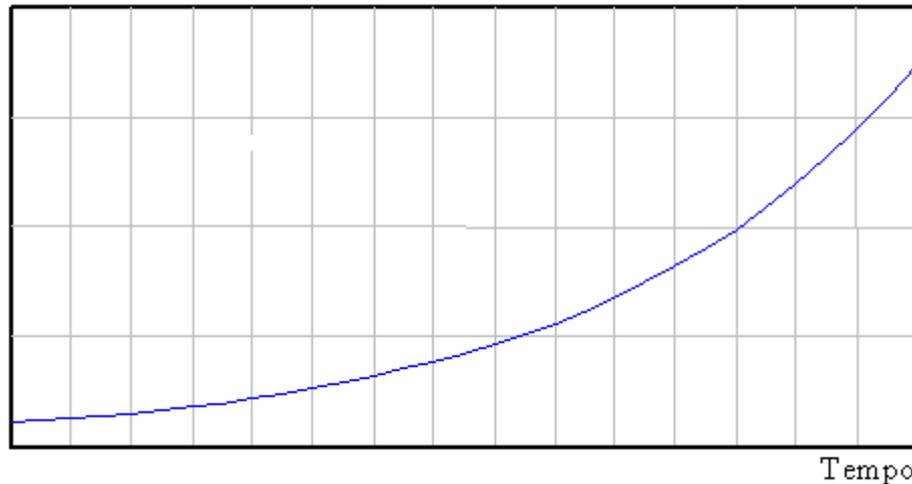


Figura 7.8. Dinâmica de crescimento exponencial.

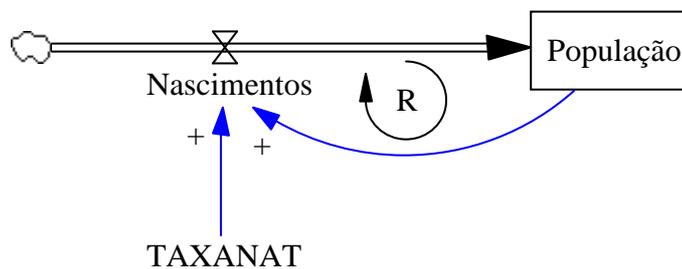


Figura 7.9. O Modelo Malthusiano simples.

Para acompanhar mais detalhadamente a seqüência de raciocínio do diagrama representado na Figura 7.9, assumamos que as variáveis relevantes sejam divididas em dois tipos: variáveis auxiliares, ou de fluxo, e variáveis de nível, ou de estoque. As segundas são representadas por retângulos e acumulam as variações periódicas das demais. Assim, por exemplo, a variável de nível **População** acumula o aumento por período de tempo da variável auxiliar **Nascimentos**. As variáveis auxiliares assumidas como constantes, em cada simulação, são representadas por letras maiúsculas, como **TAXANAT**, que representa a taxa de crescimento da população em questão. Os sinais positivos representam relação direta entre uma variável e outra. Quanto maiores a taxa de natalidade e a população, maior o volume de

nascimentos, o que, por sua vez, aumenta a população, representando um processo de auto-reforço, assinalado pela letra R (*feedback* positivo).

A Figura 7.10 representa a dinâmica temporal de um modelo populacional malthusiano simples com as seguintes hipóteses:  $P_0$  (população inicial) igual a 1000 e TAXANAT igual a 5%.

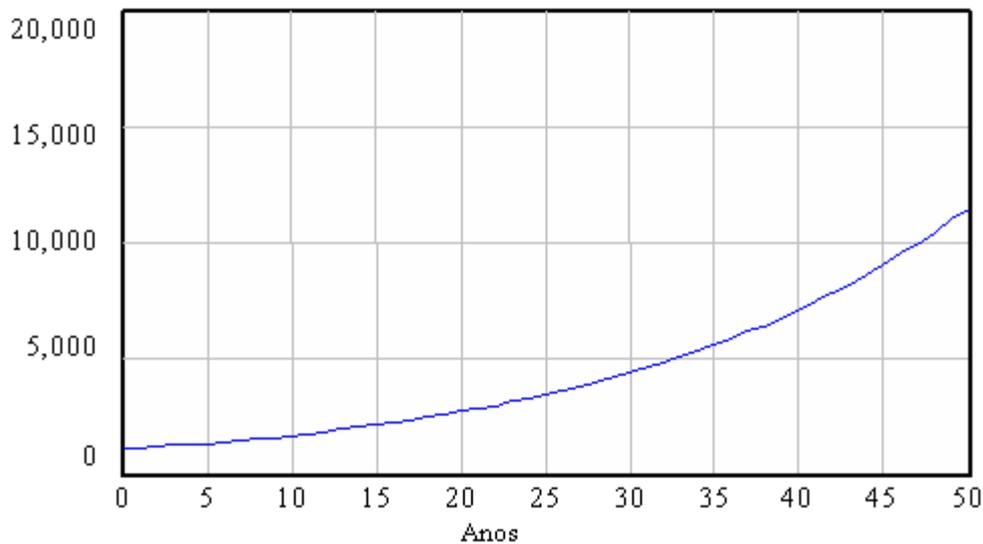


Figura 7.10. Dinâmica populacional no modelo Malthusiano simples.

Um modelo Malthusiano mais realista deve levar em consideração a mortalidade da população. O modelo representado na Figura 7.11 se distingue do anterior pelo acréscimo das variáveis auxiliares **Mortes** e **TVMP**, que representa tempo de vida médio da população.

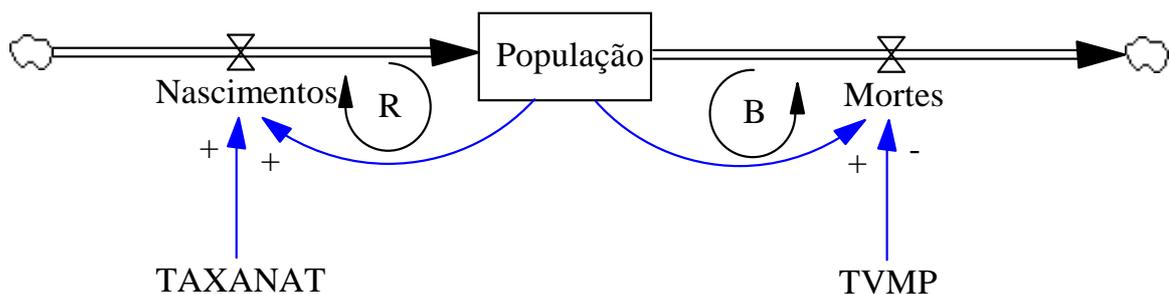


Figura 7.11. Modelo Malthusiano completo.

As variáveis Nascimentos e Mortes são calculadas da seguinte forma:  $\text{Nascimentos} = \text{População} \times \text{TAXANAT}$ ; e  $\text{Mortes} = \text{População} / \text{TVMP}$ .

A Figura 7.12 representa a dinâmica temporal de um modelo populacional malthusiano completo com as seguintes hipóteses:  $P_0$  (população inicial) igual a 1000, TAXANAT igual a 5% e TVMP igual a 50.

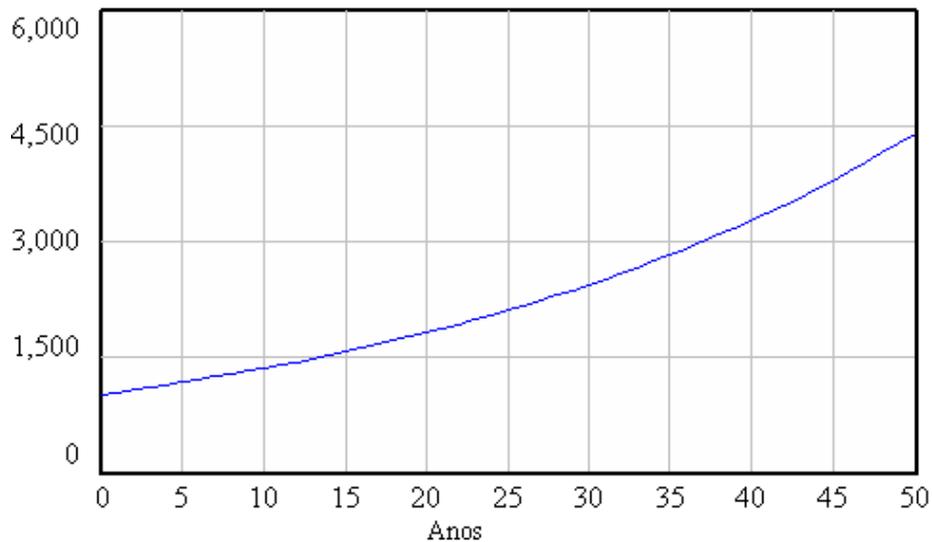


Figura 7.12. Dinâmica populacional do modelo Malthusiano completo.

A diferença entre os dois modelos anteriores está na queda da taxa de crescimento líquida da população, ou seja, a inclusão da mortalidade no modelo reduz a intensidade com que a população cresce. O resultado final é a suavização na trajetória de crescimento da população.

### 7.3.3.2 - Tendência à meta

Tendência à meta é resultado de processos auto-ajustáveis (feedback de balanço ou negativo). Esses processos ocorrem quando o sistema é composto por um estado desejado, explícito ou implicitamente determinado, e por mecanismos corretivos que reduzem a cada período de tempo a discrepância entre o estado atual e o desejado, eliminando o desequilíbrio existente.

A Figura 7.13 retrata o diagrama de influências de processos auto-ajustáveis. O sinal negativo representa relação inversa entre as variáveis. A Figura 7.14 retrata a dinâmica temporal de processos representados pela Figura 7.13.

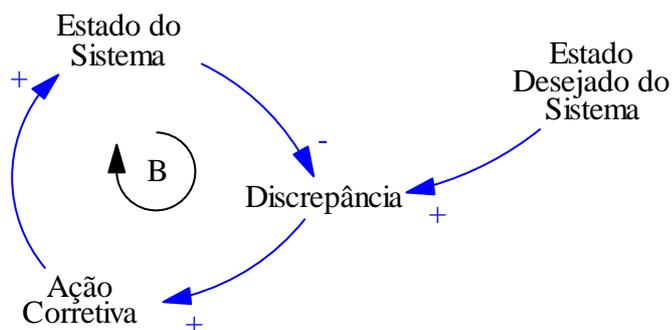


Figura 7.13. Diagrama de influências para processo auto-ajustável.

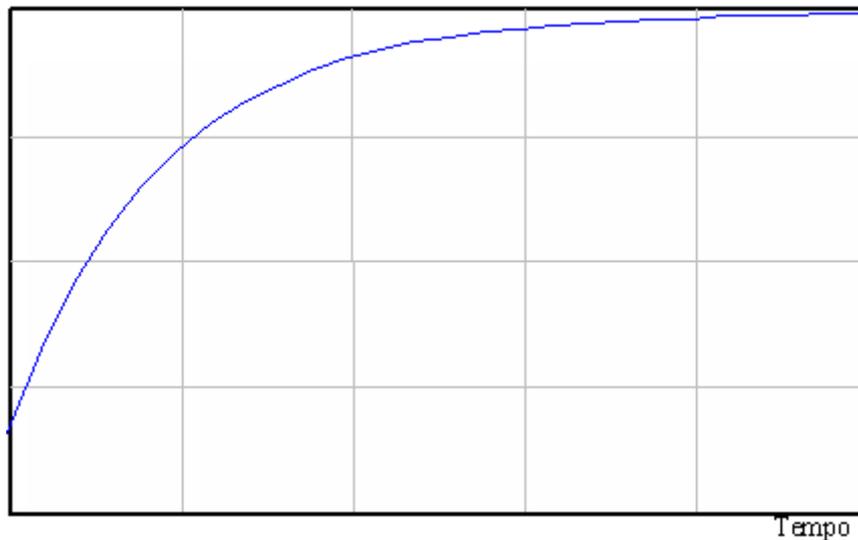


Figura 7.14. Dinâmica de sistema auto-ajustável.

Um exemplo dessa dinâmica é o modelo populacional proposto por Verhust em que a população inicial atinge metade da capacidade de sustentação do sistema (Figura 7.15).

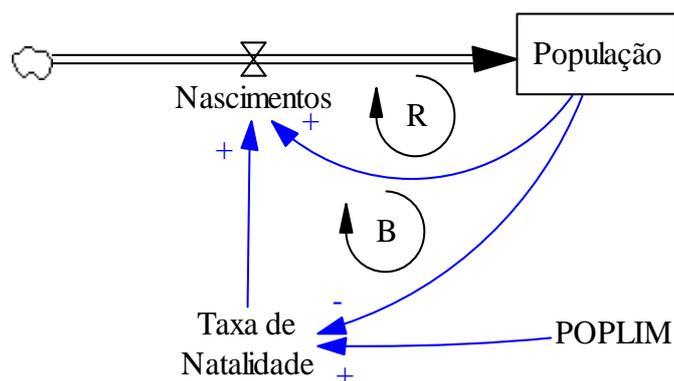


Figura 7.15. Modelo populacional de Verhust.

A taxa de natalidade nesse modelo é negativamente relacionada à população. Quanto mais a população se aproxima da população limite do sistema (**POPLIM**), menor a taxa de natalidade efetiva, isto é o número de pessoas que conseguem sobreviver a o nascimento.

A forma de modelar esta relação é  $\text{Taxa de Natalidade} = \text{Taxa de Natalidade Inicial} - (\text{Taxa de Natalidade Inicial} \times \text{População} / \text{POPLIM})$

A Figura 7.16 representa a dinâmica temporal do modelo populacional de Verhust, quando a população inicial atinge a metade da capacidade de sustentação do sistema, com as seguintes hipóteses:  $P_0$  (população inicial) igual a 1000, taxa de natalidade máxima igual a 5% e **POPLIM** igual 2000.

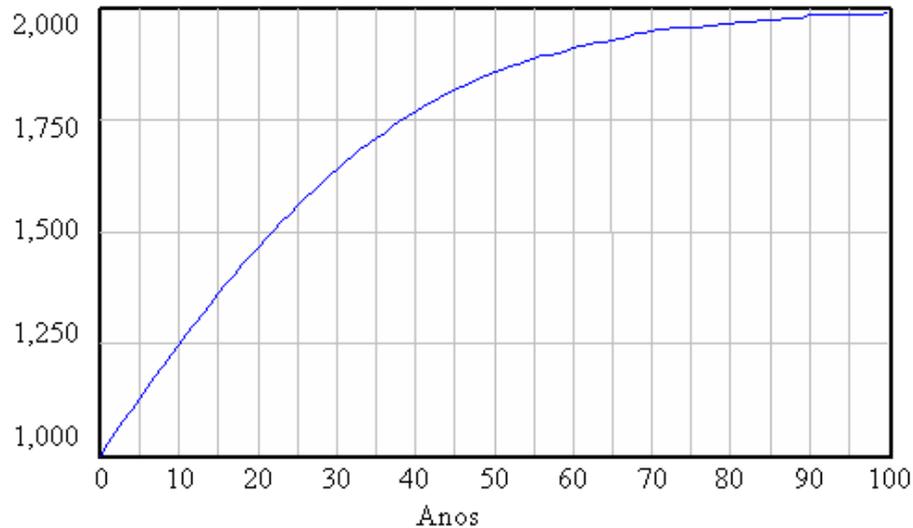


Figura 7.16. População no modelo de Verhust.

### 7.3.4 - Interação dos modos fundamentais de comportamento dinâmicos: crescimento em padrão logístico

Crescimento em padrão logístico ou em forma de S é resultado da combinação dos dois processos fundamentais citados anteriormente: processos cumulativos (feedback de reforço) e processos auto-ajustáveis (feedback de balanço). Primeiramente, quando a população é pequena em relação à sua base de sustentação, as restrições ao crescimento não são significativas e o processo de reforço domina, porém à medida que a população aumenta as restrições ao crescimento tornam-se cada vez mais significativas, tornando predominante o processo de auto-ajuste. Essas restrições podem ser entendidas como a queda de recursos per capita em determinada região à medida que a população cresce.

A Figura 7.17 retrata o diagrama de influências de modelos que apresentam crescimento em formato S. A Figura 7.18 retrata a dinâmica temporal de processos representados pela figura 7.17.

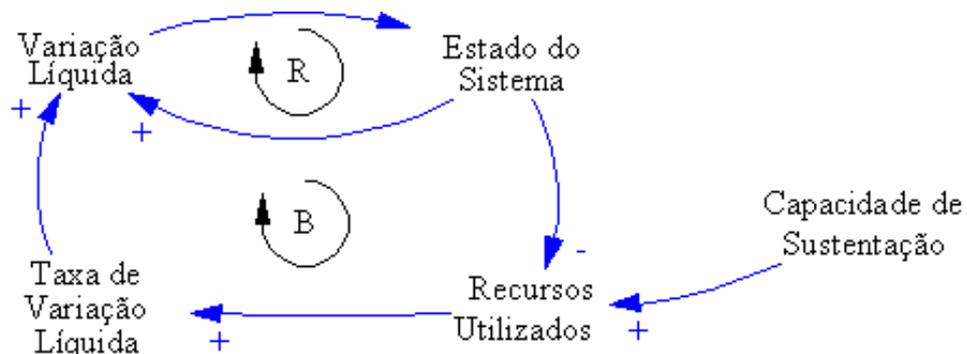


Figura 7.17. Diagrama de influências para dinâmica em forma de S.

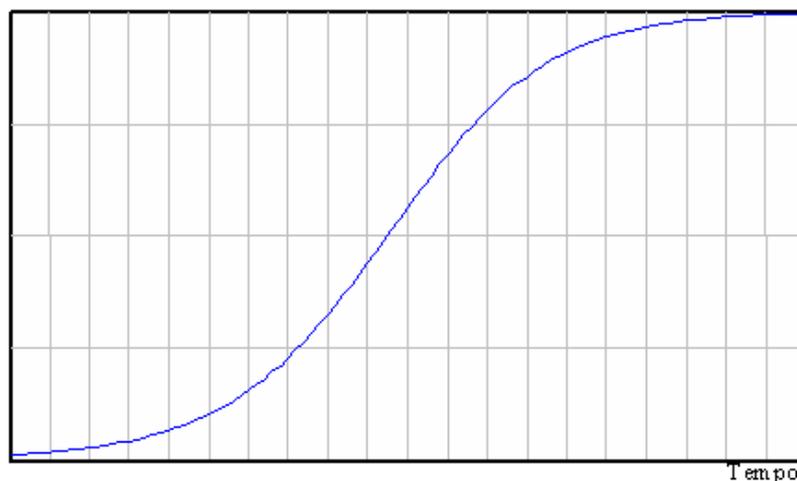


Figura 7.18. Dinâmica em forma de S.

A equação básica para computar a dinâmica deste sistema é Taxa de Crescimento Populacional Líquida = Taxa Máxima de Crescimento Populacional x [ 1 - (População/População Máxima Sustentável)].

## 7.4 - RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os modelos sistêmicos foram aplicados à bacia do rio Paracatu e à bacia do rio Verde Grande, importantes unidades hidrológicas que compõe a bacia do rio São Francisco.

### 7.4.1 - Bacia do rio Paracatu

O texto apresenta um diagnóstico sócio-econômico sintético da bacia do rio Paracatu, identificando tendências demográficas e sócio-econômicas até o ano de 2020. Entre os temas estudados, destacam-se: a) evolução da população, da economia e das condições de vida nas duas micro-regiões que compõem a bacia; e b) identificação de conflitos relativos à utilização da água. As análises realizadas podem ser expandidas para a bacia do São Francisco como um todo, desde que as informações necessárias sobre dados hidrológicos sejam disponibilizadas.

#### 7.4.1.1 - Análise das condições gerais de vida

O indicador chave para avaliar a evolução passada e inferir tendências para a bacia é o IDH-M, mas para detalhar esse índice e atualizá-lo são necessárias informações de outras fontes especificadas a frente. Para a análise dos indicadores de desenvolvimento humano consideraram-se as estatísticas referentes aos municípios sede de cada micro-região: Paracatu e Unaí, o primeiro respondendo por 40% da população total da micro-região e o segundo por

52%. Para a análise do estado da infra-estrutura urbana e da incidência de doenças utilizaram-se dados agregados para toda a micro-região.

#### 7.4.1.2 - Caracterização geral

A bacia do rio Paracatu situa-se na região noroeste do Estado de Minas Gerais, incluindo duas micro-regiões: Paracatu e Unaí. A região responde por cerca de 1,7% do PIB do estado e compõe 1,9% de sua população.

A Figura 7.19 mostra a localização geográfica da bacia em Minas Gerais e a Figura 7.20 a sua localização dentro da bacia do São Francisco.

Em ambas as micro-regiões (Figura 7.21) a agricultura tem uma participação importante no PIB, mas o desempenho tem sido bastante distinto nos últimos anos. Enquanto a micro-região do Paracatu tem crescido a taxas semelhantes à do estado, a micro-região de Unaí cresceu aceleradamente nos últimos anos, a ponto de seu município-sede tornar-se o segundo maior em termos de contribuição ao valor adicionado do setor agro-pecuário do estado. As informações apresentadas no Quadro 7.1 sobre seus municípios-sede são úteis para ajudar a caracterizar as micro-regiões.

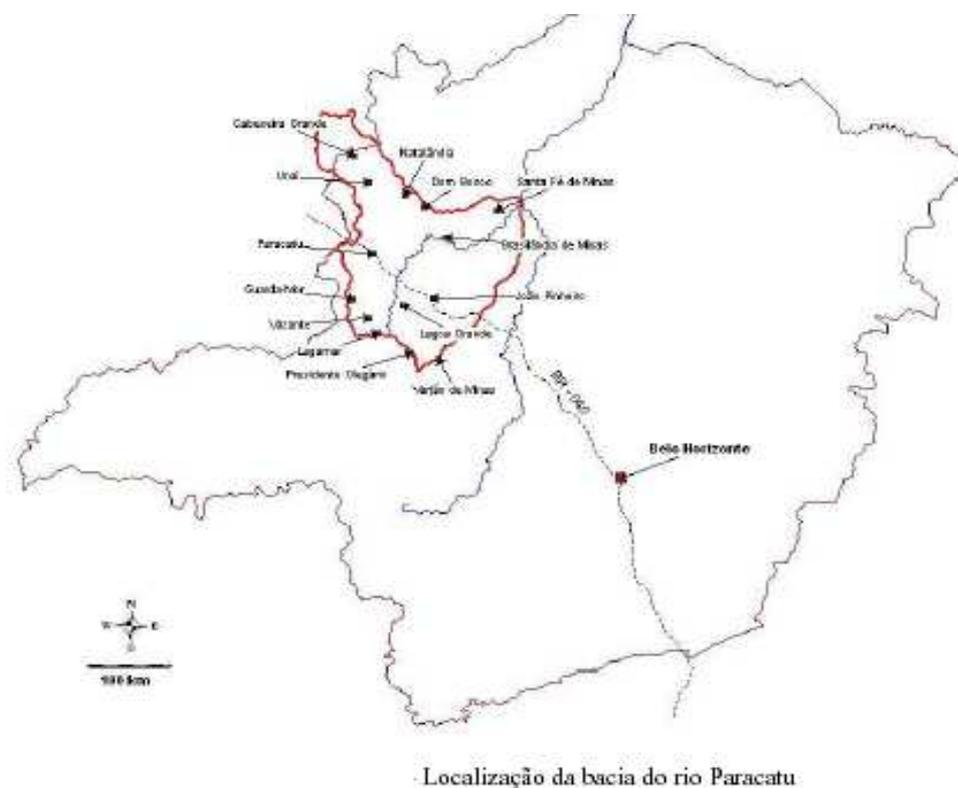


Figura 7.19. Localização da bacia do Paracatu no Estado de Minas Gerais.

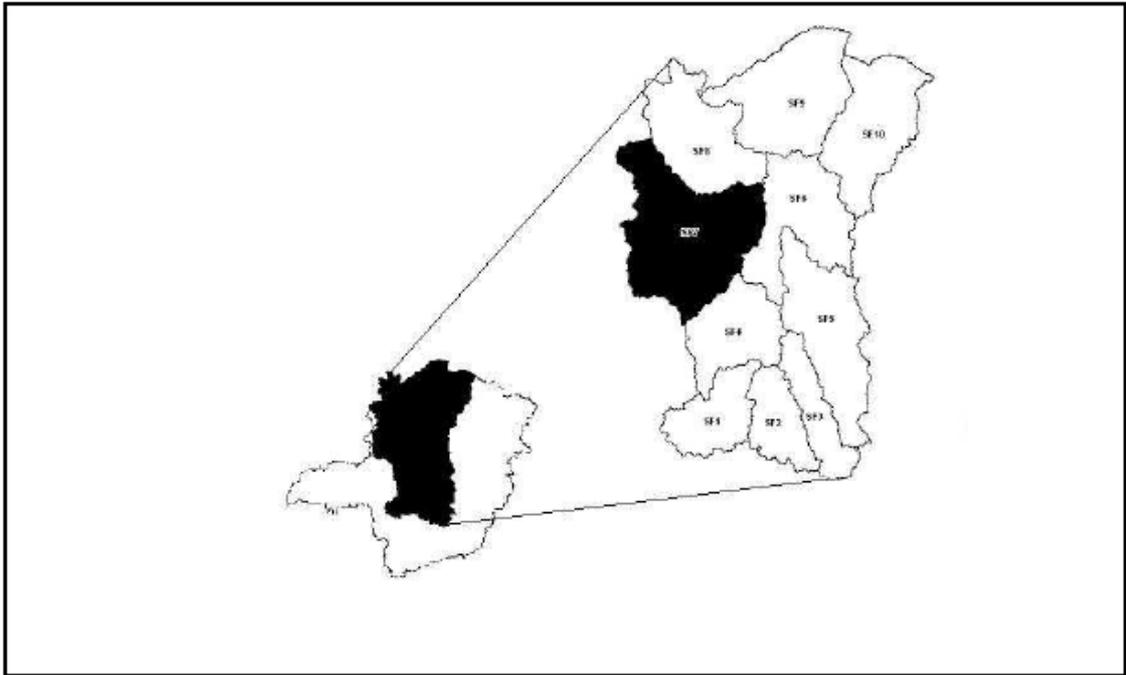


Figura 7.20. Localização da bacia do Paracatu na bacia do rio São Francisco.

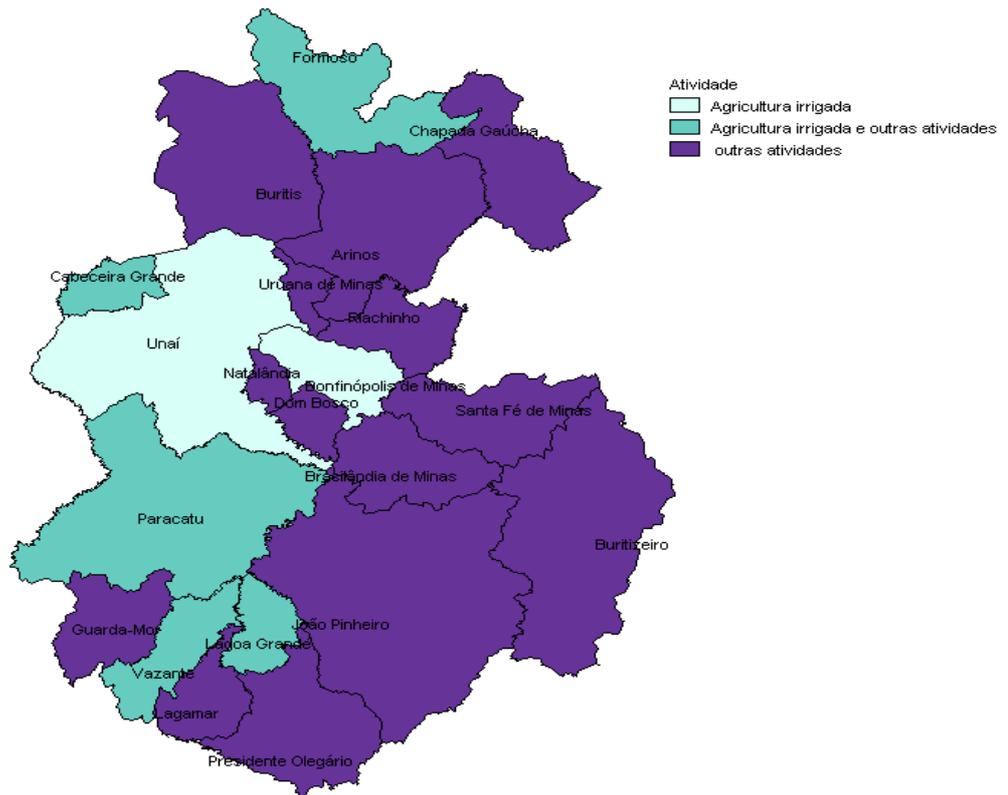


Figura 7.21. Atividades econômicas principais nos municípios da bacia do Paracatu.

Quadro 7.1. Estatísticas econômicas básicas dos municípios-sede em 2005

	<b>Paracatu</b>	<b>Unaí</b>
PIB *	619	697
Valor adicionado na agricultura*	139	290
Valor adicionado na indústria *	196	87
Valor adicionado em serviços *	282	326
População**	82	74
PIB per capita ***	7,6	9,3
Taxa de crescimento do PIB per capita****	3,6	9,8

Milhões de reais, \*\* mil pessoas, \*\*\* mil reais, \*\*\*\* % ; Fonte: IBGE/Cidades

A agricultura de ambos os municípios é especializada na produção de grãos, sendo que em Unaí a produtividade em quase todas as culturas é superior, como mostrado no Quadro 7.2.

Quadro 7.2. Valor da produção e produtividade das principais culturas em 2005

Produto	<b>Paracatu</b>		<b>Unaí</b>	
	Valor da produção*	Rendimento médio / ha**.	Valor da produção*	Rendimento médio/ ha.**
Algodão em caroço	10895	3200	16400	3750
Feijão	33311	2509	112960	2526
Milho	21338	6180	58000	5754
Soja	48842	2820	90000	3000

\* mil reais, \*\*reais;Fonte: IBGE/Cidades

O município é o maior produtor nacional de feijão, com 66,6 mil toneladas em 2004 ou 2,25% da produção brasileira e 14,34% da produção mineira. Além disso, ocupa a oitava posição entre os maiores produtores de sorgo (57,6 mil toneladas) e a 10ª em produção de milho, com 292,8 mil toneladas em 46 mil hectares.

O perfil tecnológico da produção agrícola de Unaí é comparável aos melhores do mundo, dispondo inclusive de alto índice de áreas irrigadas, perfazendo cerca de 35 mil hectares sob pivô central. Esta tecnologia, aliada ao perfil também empreendedor do produtor rural, permitiu que Unaí se destacasse em 2005 como o maior PIB agropecuário de Minas Gerais, segundo estudos realizados pela Fundação João Pinheiro.

A pecuária também representa um dos alicerces da economia municipal. A criação de gado bovino alcança 300 mil cabeças, para a produção de carne (12.000 toneladas/ano) e leite (185.000 litros /dia).

Os dados macroeconômicos sugerem que e a produção agropecuária da micro-região, especialmente em Unaí, tem uma enorme perspectiva de crescimento e geração de emprego e renda. Nesse contexto, o corredor centro-leste é uma perspectiva a ser considerada, sobretudo

com a possibilidade da construção da ferrovia Pirapora-Unai, cujo orçamento está inserido nos planos de desenvolvimento estadual e federal.

Acompanhando o desempenho econômico favorável, principalmente de Unai, os indicadores sociais gerais melhoraram, como mostra o Quadro 7.3, apesar de persistirem vários problemas associados à distribuição de renda e à precariedade da infra-estrutura urbana nas micro-regiões, como indicam os Quadros 7.4 e 7.5.

Graças principalmente ao crescimento econômico intenso na década de 1990, Unai aumentou significativamente o seu IDH, passando a integrar o grupo dos municípios de alto desenvolvimento humano em 2000. Mas o crescimento econômico acelerado de 9,8% ao ano, refletido no aumento de 23,0% no IDH-Renda, contra 9,0% no indicador médio do Estado, foi apropriado desigualmente pela população. O Quadro 7.4 fornece indicadores complementares sobre o tema. Observe-se especialmente o grande aumento da concentração de renda ocorrido em Unai.

Quadro 7.3. Evolução dos indicadores de desenvolvimento humano

	Paracatu		Unai		MG	
	1991	2000	1991	2000	1991	2000
IDH-M	0,680	0,760	0,680	0,812	0,697	0,718
IDH-M Renda	0,622	0,675	0,607	0,748	0,652	0,711
IDH-M Longev.	0,666	0,761	0,697	0,829	0,689	0,759
IDH-M Educação	0,752	0,844	0,740	0,860	0,750	0,850

Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano/PNUD

Quadro 7.4. Indicadores de distribuição de renda: 2000

	Paracatu	Unai	MG
Renda apropriada pelos 40% mais pobres	8,8	6,6	8,0
Razão entre a renda apropriada pelos 10% mais ricos e os 40% mais pobres	23,5	38,9	25,4
Índice de Gini (2000)	0,61	0,71	0,62
Índice de Gini (1991)	0,58	0,59	0,61
Intensidade da pobreza	41,3	40,1	43,8
Porcentagem de pessoas com mais de 50% da renda proveniente de transf. governamentais	9,0	8,0	13,9

Fonte: Atlas do desenvolvimento Humano/PNUD

Quadro 7.5. Infra-estrutura urbana (por valor absoluto e percentagem de domicílios não atendidos em 2000)

	Paracatu	%	Unai	%	MG	%
Total de domicílios	51400	100	35408	100	4765258	100
Domicílios sem água encanada	15927	31,0	12088	34,1	995613	20,9
Domicílios sem instal. sanit.	4743	9,2	4979	14,1	240191	5,0
Domicílios sem coleta de lixo	13997	27,2	12026	34,0	1031593	21,6

Fonte: Ministério da Saúde/Datasus

Note-se, além disso, que apesar de apresentarem IDH's médio e elevado, as populações desses municípios abaixo da linha de pobreza são apenas um pouco menores do que a média do estado, o que obviamente implica um grande contingente de pessoas em condições precárias de vida relativamente desassistidas pelo Estado, como indica o menor número de pessoas cuja renda provém de forma importante desta fonte.

Aos baixos níveis de renda em ambas as micro-regiões, aliam-se precárias condições de infra-estrutura urbana, que afetam evidentemente de forma mais direta a população mais pobre. Não é surpreendente, portanto, como mostra o Quadro 7.6, que o padrão de incidência de doenças reflita a precariedade da infra-estrutura urbana, com alta prevalência relativa de doenças infecciosas e parasitárias.

**Quadro 7.6. Incidência de doenças (internações por tipo de doença em março de 2007)**

	<b>Paracatu</b>	<b>%</b>	<b>Unaí</b>	<b>%</b>	<b>MG</b>	<b>%</b>
Total de Internações	757	100	550	100	92559	100
Doenças infecciosas e parasitárias	53	7,0	41	7,5	4708	5,1
Neoplasias e tumores	23	3,0	4	0,7	5103	5,5
Doenças nutricionais e metabólicas	16	2,1	6	1,1	2897	3,1
Doenças do aparelho circulatório	87	11,5	57	10,4	11902	12,9
Doenças do aparelho respiratório	100	13,2	114	20,7	13016	14,1
Doenças do aparelho digestivo	33	4,4	36	6,5	8474	9,2

Fonte: Ministério da Saúde/Datasus

Observe-se ademais que a maior incidência desse tipo de doenças não implica uma maior taxa de mortalidade seja da população infantil como da adulta, como mostrado pelo Quadro 7.7. A explicação é que tais doenças, embora debilitem cronicamente a população afetada, têm um índice de letalidade inferior por exemplo às doenças cardíacas.

Quanto à educação, os indicadores não são melhores, como mostra o Quadro 7.8.

**Quadro 7.7: Indicadores de saúde e morbidade (2000)**

<b>Indicadores</b>	<b>Paracatu</b>	<b>Unaí</b>	<b>MG</b>
Esperança de vida ao nascer	70,6	74,8	70,5
Mortalidade até 1 ano de idade	26,7	16,0	27,8
Mortalidade até 5 anos de idade	29,2	17,6	55,5
Probabilidade de sobrevivência até 60 anos de idade	80,8	87,7	80,5

Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano/PNUD

**Quadro 7.8: Indicadores selecionados de educação (2000)**

<b>Indicadores</b>	<b>Paracatu</b>	<b>Unaí</b>	<b>MG</b>
Taxa de alfabetização	87,8	87,2	88,0
% pessoas com mais de 15 anos não alfabetizadas	16,4	12,8	11,5
Taxa bruta de frequência à escola	77,5	83,5	78,9

Fonte: IBGE/Cidades

O fato de as crianças estarem freqüentando mais a escola no município de Unaí do que na média do estado, não é suficiente para diminuir o efeito acumulado da ausência de uma preocupação maior com investimentos em capital humano no passado. As elevadas proporções relativas de pessoas analfabetas na população indicam que serão necessários investimentos significativos nesse setor nos próximos anos.

### **7.4.1.3 - Extrapolação de tendências demográficas e identificação de pontos potenciais de conflitos no uso de água**

#### **7.4.1.3.1 - Descrição do modelo de simulação**

Para estudar a dinâmica sócio-econômica da bacia foi construído um modelo que incorpora as características descritas nas seções anteriores. Os principais elementos incluídos são:

- a hipótese fundamental de que a evolução sócio-econômica encontra-se sistemicamente conectada à dinâmica de exploração dos recursos naturais. Por exemplo, a demanda de água depende da taxa de crescimento populacional e esta, da área disponível para a expansão da agricultura irrigada e do potencial de crescimento industrial da região, visto que ambos os fatores influenciam a taxa de imigração regional e, assim, o crescimento populacional presente e futuro (pois os atuais imigrantes e seus filhos aumentam o “estoque” de pessoas em idade reprodutiva em algum momento);

- uma dinâmica populacional que obedece a um padrão logístico, devido ao fato de que o crescimento do tipo malthusiano é contido pela disponibilidade de recursos naturais, como área irrigável e água;

- uma estrutura de cadeia de envelhecimento (aging chain), em que a população é dividida em segmentos etários - ou coortes. Nesta estrutura, a população em um período futuro depende do número de nascimentos atual, visto que mulheres nascidas hoje alcançarão o segmento etário - ou coorte etário - reprodutivo em 15 anos; e

- a bacia é subdividida em Unidades Geo-Ambientais (UGA).

O modelo sistêmico apresentado na Figura 7.22 foi construído para os fins propostos, sendo o modelo de simulação anexado a este relatório, de modo a possibilitar a construção de cenários alternativos. A estrutura básica do modelo é a seguinte:

Na parte superior do diagrama a população é dividida em coortes etários, sendo que a taxa de transferência de um coorte para outro (a taxa de maturação) é dada pela população do

coorte anterior dividida pelo número de anos médio em que um indivíduo representativo permanece em um coorte. Assim, por exemplo, a taxa de maturação do primeiro coorte populacional para o de “população de 5 a 14 anos” é de “População de 0 a 4 anos” \* 0,20. Dadas então as taxas de natalidade (que depende da taxa de fertilidade média das mulheres residentes) e da mortalidade em cada coorte, ter-se-á a evolução no tempo da população residente. A fim de conferir mais realismo ao modelo, acrescentou-se a variável imigração que ocorre por hipótese apenas no terceiro coorte populacional. A taxa de imigração depende do “efeito industrialização” que procura captar o impacto de um crescimento econômico superior (ou inferior) à média do estado sobre a imigração; a hipótese subjacente é obviamente a de que um crescimento econômico superior à média do estado atrai imigrantes para a UGA. Embora altamente simplificado o modelo permite ter uma idéia da evolução endógena da população, na medida em que, por exemplo, o número de nascimentos em um ano qualquer depende da população feminina da UGA em idade reprodutiva e esta, do número de mulheres nascidas há 15 ou mais anos atrás. O número de nascimentos no ano t é então calculado pela fórmula: (População no coorte 15-49 anos em t \* participação da população feminina na população do coorte 15-49 anos \* número médio de filhos por mulher) / período fértil médio da população feminina.

Já a mortalidade é dada pelo somatório do número de mortes em cada coorte que é calculado pelo produto da taxa de mortalidade no coorte i vezes população no coorte i, sendo as taxas de fecundidade e de mortalidade calculadas a partir de dados censitários.

Na parte inferior do modelo apresentado na Figura 7.22 estima-se a demanda de água para fins de abastecimento não comercial, que depende do crescimento da população, e para utilização em irrigação. Este último uso tem sido o de maior crescimento nos últimos anos e configura-se como a maior fonte de conflitos potenciais na utilização do recurso no futuro próximo. O risco de conflitos no uso de água é uma função da diferença entre a disponibilidade hídrica, dada pela vazão mínima dos principais rios da bacia, e a demanda total de água na UGA.

A demanda de água para irrigação depende da quantidade de terra irrigada e da demanda da água por hectare de terra irrigada, um parâmetro cujo valor é computado a partir de estudos de campo em cada UGA. A quantidade de terra irrigada em cada ano, por outro lado, depende da quantidade de solo apto para irrigação disponível e da população existente na UGA em cada ano. Diversos cenários de evolução da agricultura irrigada na bacia podem ser traçados, dependendo da intensidade do efeito da população sobre a transferência entre terra irrigável e terra efetivamente irrigada.

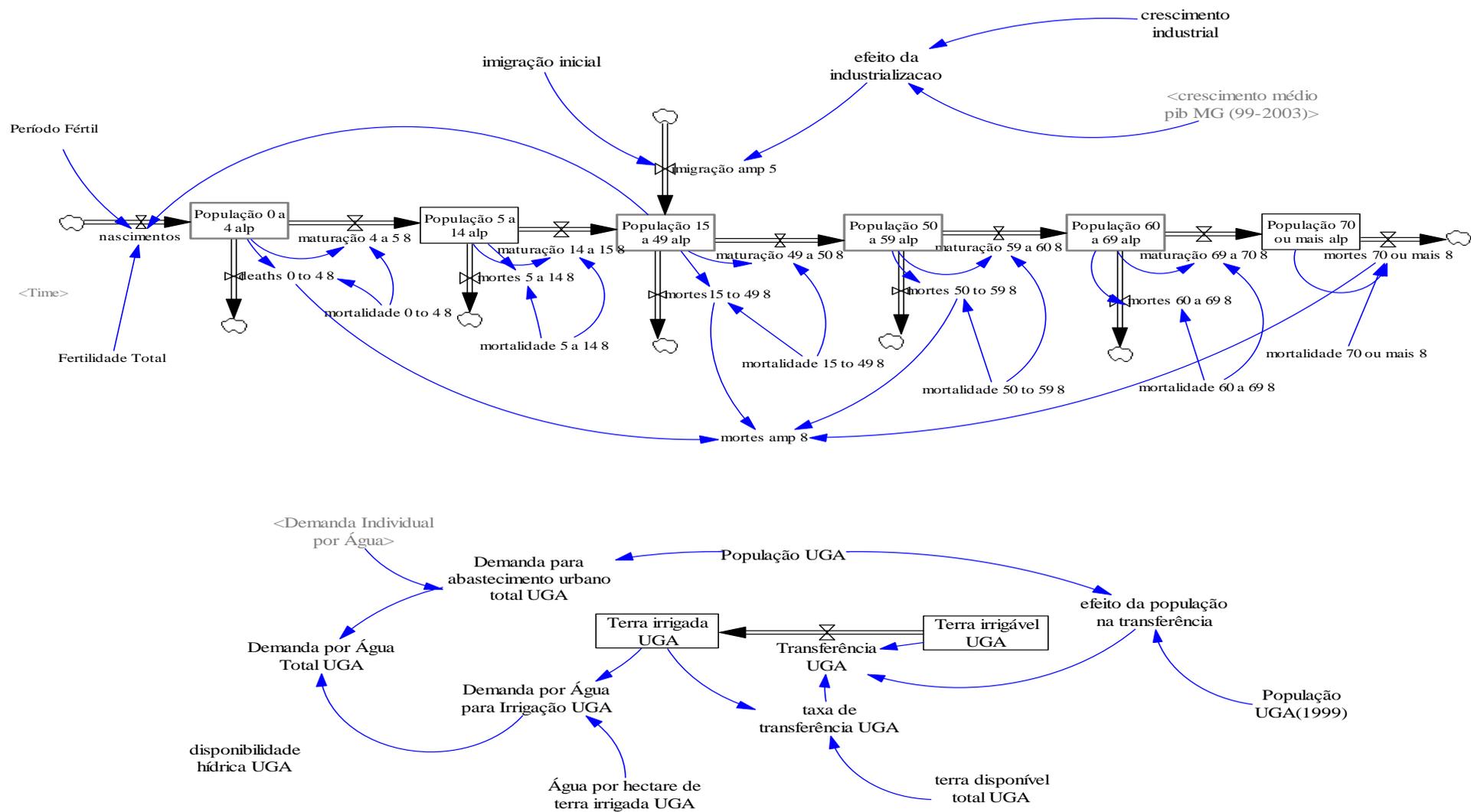


Figura 7.22. O modelo geral de simulação.

A população total da bacia em cada ano então é dada pelo somatório das populações totais das UGAs, como mostrado na Figura 7.23.

A separação dos resultados por cortes etários permite também computar diversos índices demográficos e sócio-econômicos relevantes como a razão de dependência (Figura 7.24) que relaciona as populações em idade de trabalhar ao número de crianças e maiores de 70 anos (população dependente economicamente).e o índice de envelhecimento, que relaciona a população idosa e jovem (Figura 7.25).

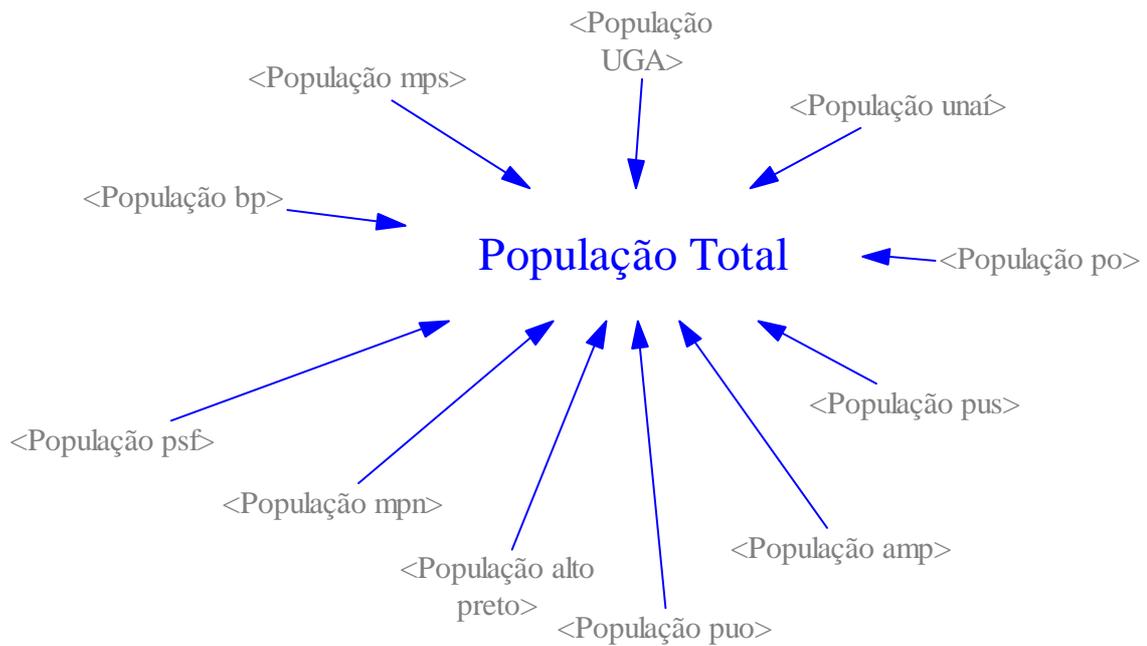


Figura 7.23. População estimada.

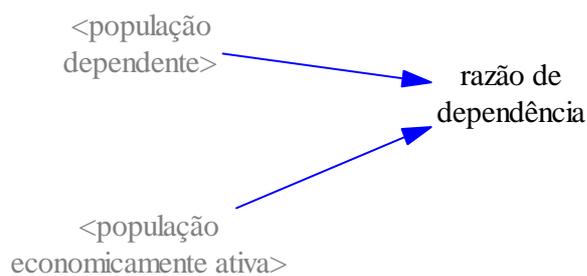


Figura 7.24. Razão de dependência.

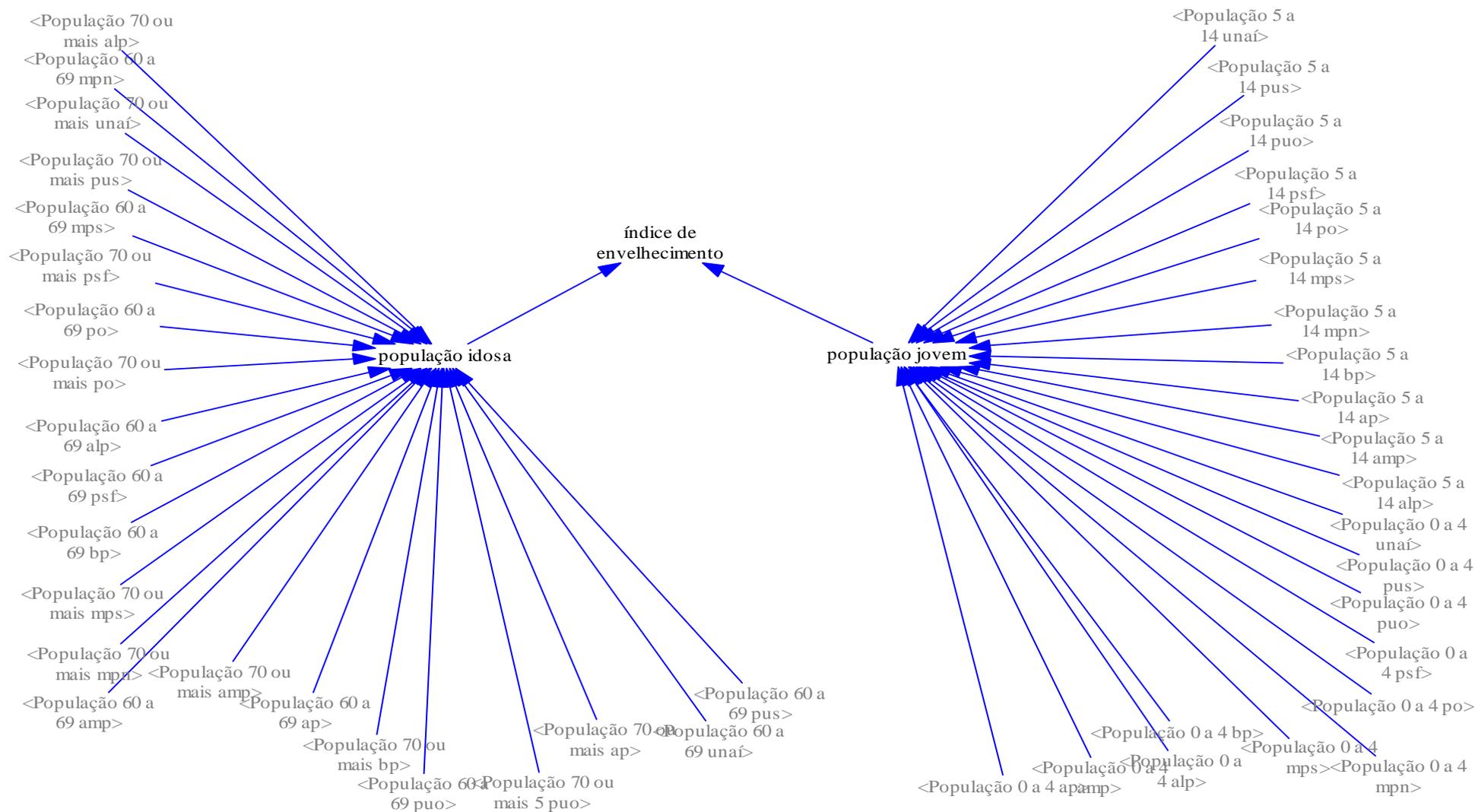


Figura 7.25. Índice de envelhecimento e razão de dependência.

### 7.4.1.3.2 - Resultados das simulações

Nas Figuras 7.26 a 7.28 reportam-se os resultados das simulações para a bacia como um todo e para as UGAs com maior potencial de conflitos associados à utilização de água. Os valores assumidos para os parâmetros básicos do modelo, tais como taxas de fertilidade e mortalidade, efeito da industrialização e efeito populacional sobre a expansão de agricultura irrigada, pressupõem a manutenção da dinâmica recente das principais variáveis.

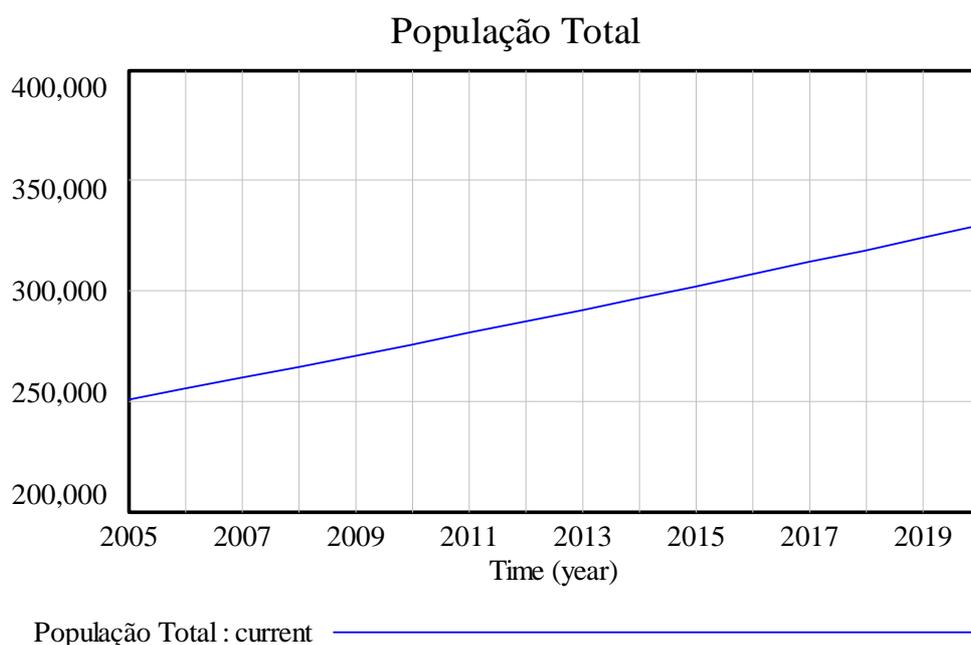
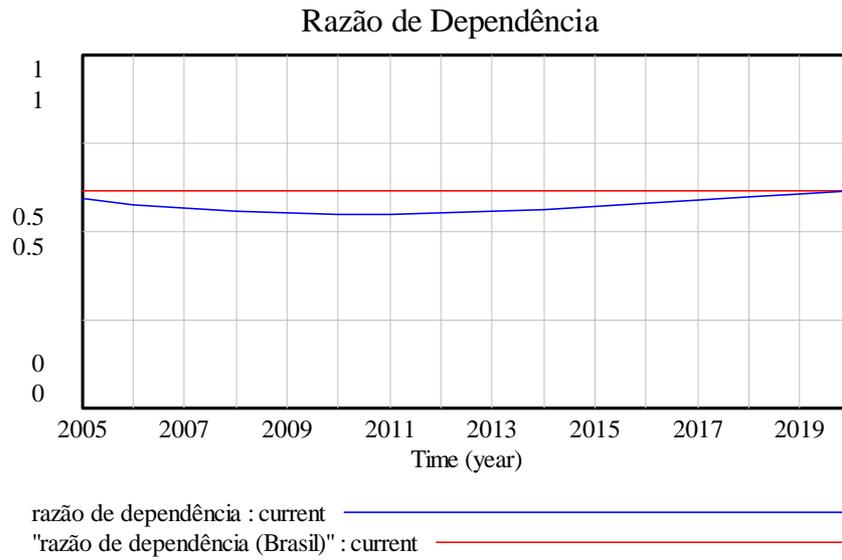
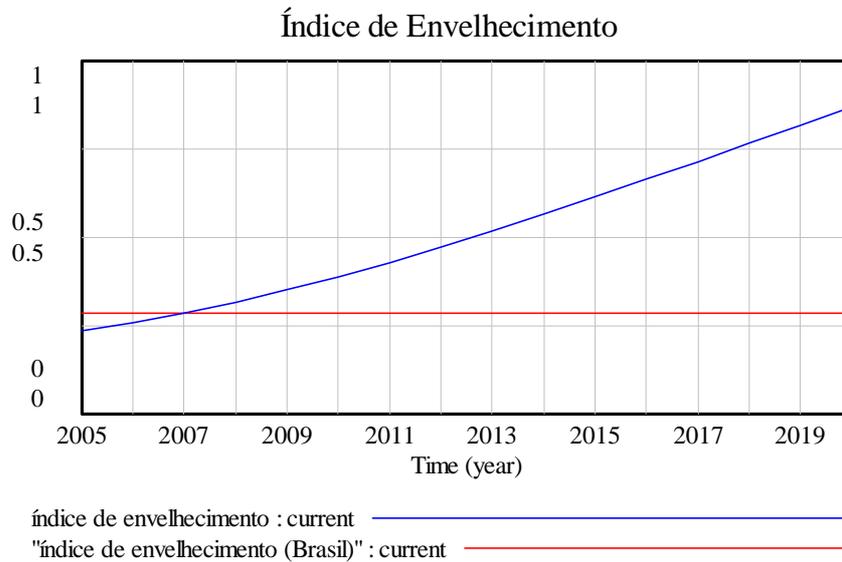


Figura 7.26. Evolução demográfica prevista para a bacia do rio Paracatu

Mantidos os parâmetros atuais, a população da bacia tende a crescer à taxa de 1,8% ao ano até 2020 (Figura 7.26), um número próximo da média nacional. Mas como as Figuras 7.27 e 7.28 indicam, a população tende a “envelhecer”, isto é a participação dos segmentos etários tende a aumentar em relação à população total. Em razão disso, a razão de dependência, que mede a relação entre população economicamente inativa e população economicamente ativa a princípio tende a cair, devido à redução da proporção de crianças, mas depois volta a subir, com o aumento da proporção de idosos na população. Observe-se que, como não se tem as projeções sistêmicas para a população brasileira como um todo, não se pode comparar a evolução desses indicadores com projeções nacionais (por isso os indicadores para o Brasil permanecem constantes). Mas não deixa de ser sugestivo observar o ritmo de crescimento previsto com os valores atuais dos indicadores.

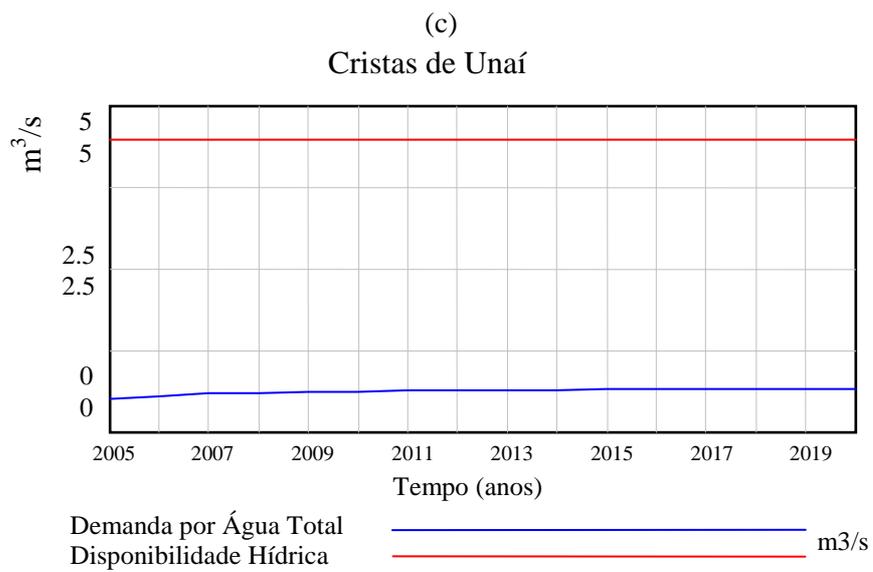
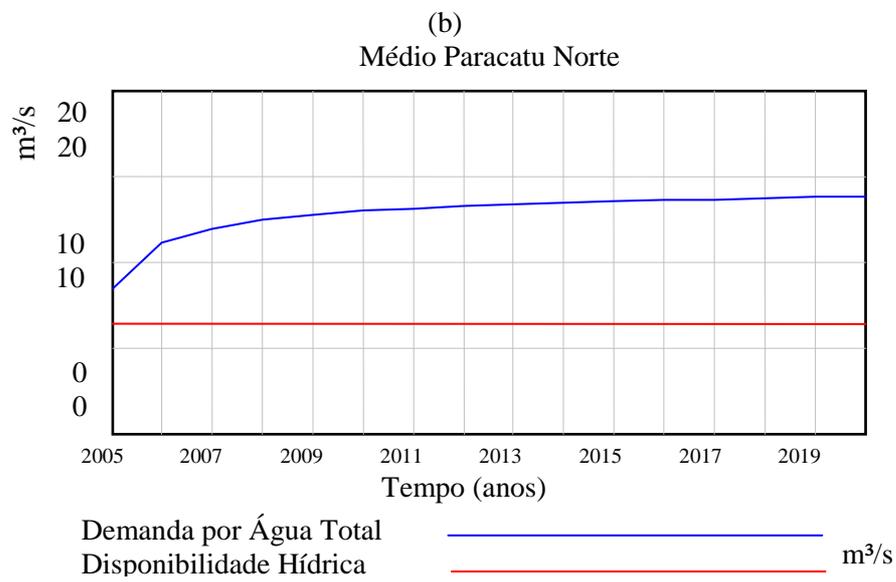
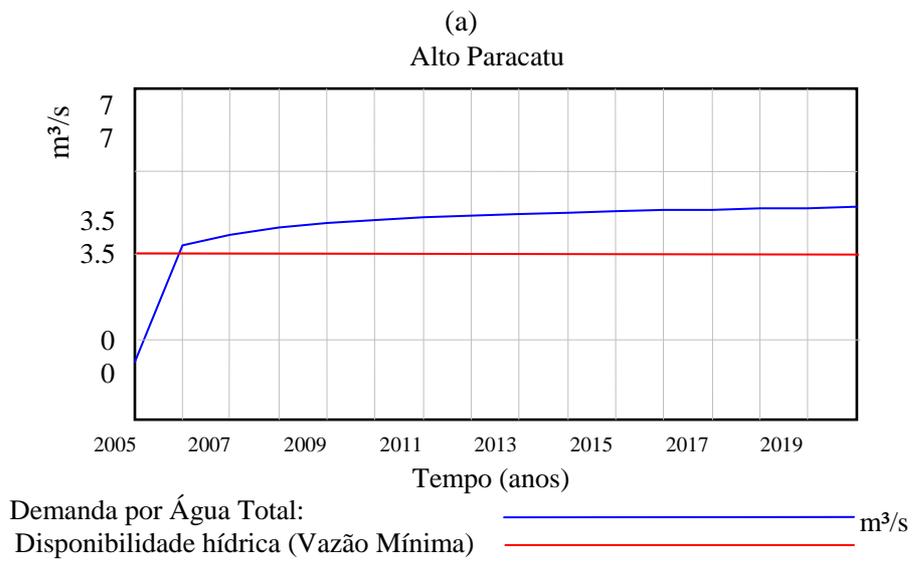


Figuras 7.27. Razões de dependência da bacia do Paracatu.



Figuras 7.28. Índice de envelhecimento da bacia do Paracatu.

Na Figura 7.29 apresenta-se as projeções para o déficit hídrico das duas principais UGAs da bacia do Paracatu. Como é fácil observar, estão dadas as condições para a ocorrência de conflitos no uso da água, principalmente na região de Unaí, em que a agricultura irrigada mais se expandiu nos últimos anos.



Figuras 7.29. Regiões com potencial de conflitos hídricos.

Na Figura 7.30 a possibilidade de conflitos no uso de água nos vários municípios componentes das UGAs e no Quadro 7.9 apresentam-se as projeções de déficits hídricos para todas as UGAs. Observe-se a respeito que, como um mesmo município participa em muitos casos de mais de uma UGA, foi necessário alocar as populações residentes nas UGAs proporcionalmente à área dos municípios contidas em cada UGA, de acordo com os valores apresentados na coluna 2 do Quadro 7.9. A conclusão é que a possibilidade de conflito é maior nas regiões onde a agricultura irrigada é importante.

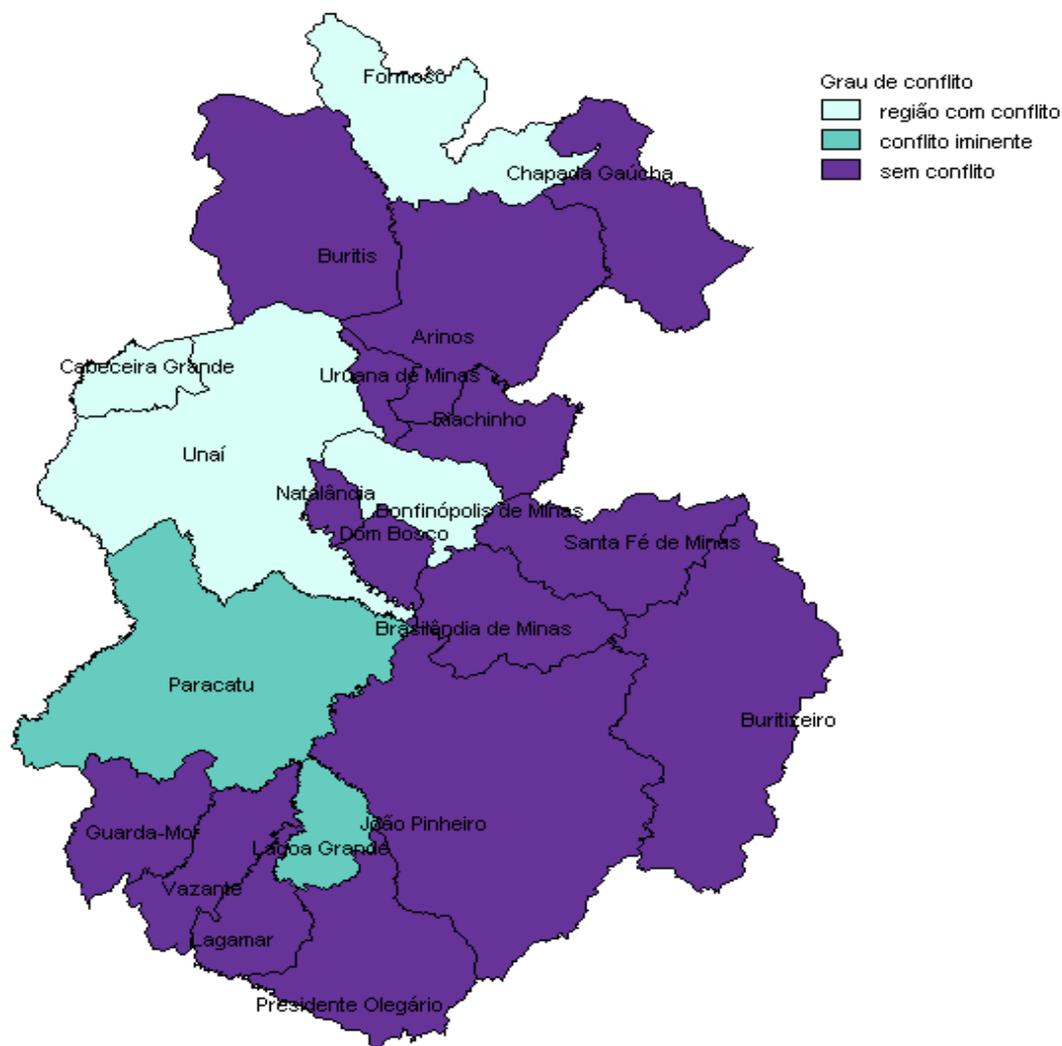


Figura 7.30. Regiões de conflito atual ou iminente no uso de água.

Quadro 7.9: Municípios componentes das unidades geo-ambientais

<b>Unidades Geo-Ambientais</b>		<b>Demanda por Água (m<sup>3</sup>/seg)</b>	<b>Disponibilidade Hídrica (m<sup>3</sup>/seg)</b>
<b>Alto rio Preto</b>	Cabeceira Grande, Formosa, Cabeceira	7,58	6,1
Cristais Unaí	Unaí	0,6	4,48
Planalto Úmido Ocidental	Paracatu (83%), Unaí (14%), Outros (3%)	0,66	3,4
Planalto Úmido Sul	Vazante (48%),Lagamar(25%), Guarda-Mor (10%), Presidente Olegário (10%), Lagoa Grande(7%)	1,1	4,26
Alto médio Prata	Presidente Olegário(68%), João Pinheiro(32%)	1,43	3,27
<b>Alto Paracatu</b>	Paracatu (53%),Lagoa Grande(22%), Vazante (12%),Outros (3%)	3,32	3,4
<b>Médio Paracatu Norte</b>	Paracatu (41%),Unaí(30%),Bonfinópolis de Minas(19%), João Pinheiro (10%)	14,45	6,37
Médio Paracatu Sul	João Pinheiro (92%), Lagoa Grande (8%)	0,71	3,01
Baixo Paracatu	João Pinheiro (44%),Santa Fé de Minas (24%), Buritizeiro(32%)	0,25	5,12
Planalto Oriental	João Pinheiro (82%), Buritizeiro (18%)	3,81	10,01
Planalto Santa Fé	Santa Fé de Minas (53%), Brasilândia de Minas (46%), Outros (1%)	0,006	3,3

#### 7.4.1.4 - Conclusões

Indicou-se neste relatório que a bacia do rio Paracatu tem passado por um processo de transformação econômica significativo, o qual tem conseqüências positivas e negativas para as populações residentes. Se de um lado o crescimento econômico, ainda que desigualmente distribuído em termos pessoais e regionais, permite uma elevação do padrão de vida em termos de acesso a bens e serviços, de outro tem criado crescentes restrições ao prosseguimento dessa trajetória de crescimento no longo prazo. A concentração de renda crescente e a expansão da agricultura irrigada, por exemplo, têm aumentado a probabilidade de ocorrência de conflitos na utilização de água, na medida em que a primeira destrói os vínculos de solidariedade tradicionalmente existente em comunidades que utilizam recursos comuns, enquanto que a segunda implica um aumento no grau de utilização do recurso o que, em muitas sub-regiões da bacia, já caracteriza uma situação de conflito. Assim, há razões para acreditar que os processos de expansão da agricultura irrigada, concentração de renda e degradação ambiental (representado por um esgotamento progressivo da disponibilidade de água para consumo humano) estejam de algum modo interligados e alimentem-se mutuamente. As Figuras 7.31 e 7.32 representam uma primeira aproximação de um modelo sistêmico para essas relações.

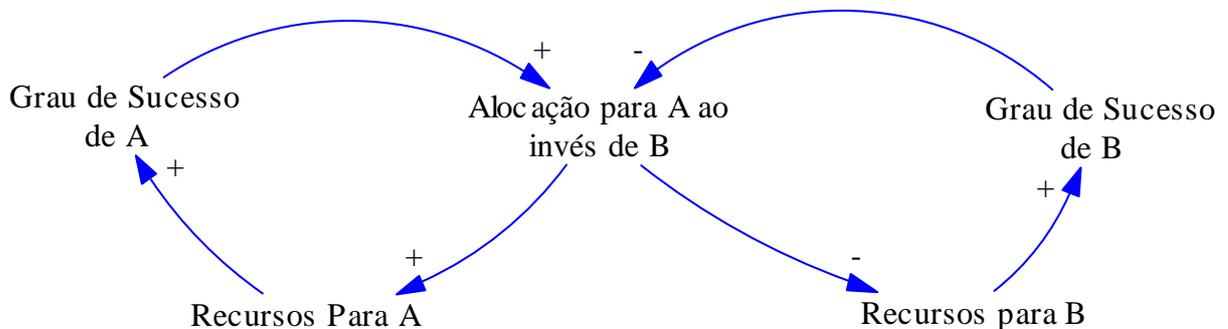


Figura 7.31. Arquétipo sucesso para os bem sucedidos.

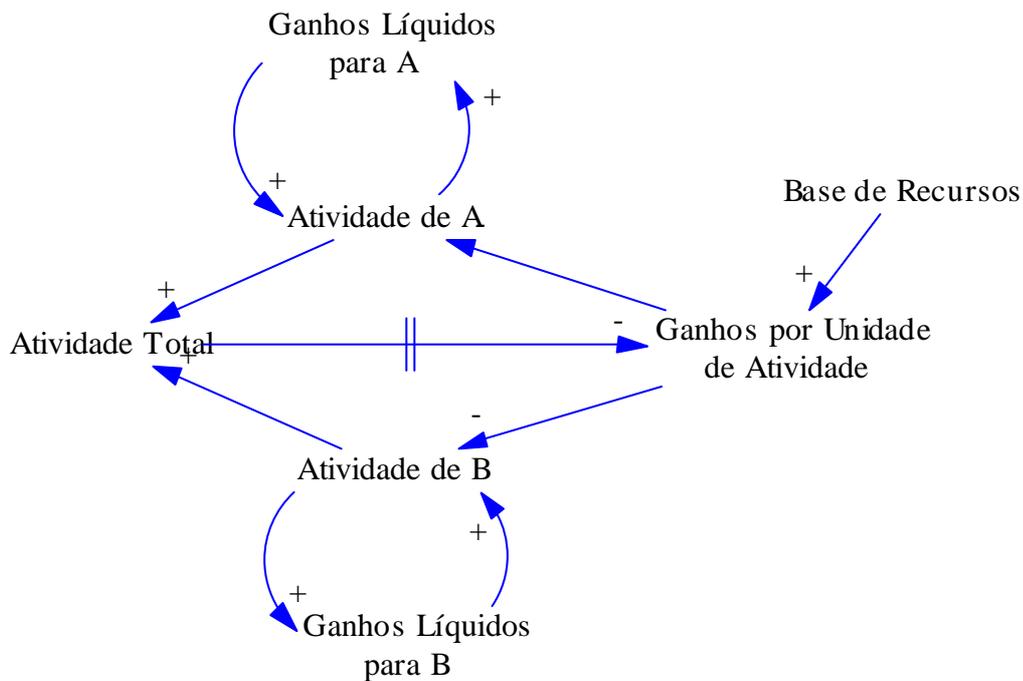


Figura 7.32. Arquétipo tragédia dos comuns.

As setas indicam relações diretas (sinal positivo) e inversas (sinal negativo) entre as variáveis incluídas no modelo. As marcas paralelas sobre as setas indicam a presença de um *delay* temporal na relação.

Uma vantagem inicial para A (os agricultores que adotam a irrigação) lhe confere acesso privilegiado a recursos produtivos, permitindo-lhe, por exemplo, adquirir as melhores terras de B (os agricultores que não adotam irrigação), que são forçados a vender essas terras devido à queda de seus lucros. Isso aumenta os ganhos de A e assim lhe permite obter ainda mais recursos produtivos. O resultado de processos como esses é que parte dos agentes concentrará os recursos da sociedade e os demais serão reduzidos à pauperização. Neste caso, a expansão da agricultura irrigada em Unai propicia um acesso privilegiado a esses produtores à base de recursos, o que contribui para empobrecer os agricultores não irrigantes em Unai e no restante da bacia, visto que estes muitas vezes têm que se desfazer, por exemplo, de suas melhores terras para compensar a queda de seus rendimentos.

O segundo processo é um em que os agricultores que adotam a irrigação aumentarão a demanda por água, provocando diversos impactos ambientais como o assoreamento dos rios e a salinização dos solos. O aumento de custos implicado induz a um aumento do uso dos recursos comuns como a água que são precificados abaixo dos custos sociais do recurso. O arquétipo sistêmico “tragédia dos comuns” ajuda a entender melhor a dinâmica do processo.

O aumento do nível de atividade de um agente (ou grupo de agentes) A eleva seus ganhos no curto prazo, mas aumenta o nível total de atividade, digamos de produção agrícola.

O aumento da produção, entretanto, pressiona a base de recursos, por exemplo, a disponibilidade de água para irrigação, e assim reduz a produtividade e os ganhos de A no longo prazo. Observe-se, além disso, e este ponto é o mais importante, que o fato de A aumentar seu nível de produção reduz os ganhos também de B no longo prazo (visto que a disponibilidade de água reduz para todos os produtores que compartilham a mesma base de recursos). Assim será racional do ponto de vista de B intensificar a produção (e o uso de água) para proteger seus rendimentos em face da ação agressiva de A. A dinâmica desse processo é cumulativa levando à redução e eventualmente ao esgotamento da disponibilidade do recurso.

Os dois modelos genéricos (arquétipos sistêmicos) podem ser combinados em um modelo composto, segundo o qual a concentração progressiva da propriedade da terra e da renda levam a uma progressiva heterogeneidade social que reduz o grau de solidariedade e, portanto, a disposição de trabalho cooperativo entre os agentes. Este fato, combinado às maiores oportunidades de lucro da agricultura irrigada, aumenta os incentivos para uma maior utilização de água, tornando plausível a possibilidade de ocorrência de uma situação próxima ao arquétipo sistêmico de tragédia dos comuns.

Tudo levado em conta, portanto, fica claro que medidas urgentes são necessárias para atenuar essas tendências, seja introduzindo regras mais bem definidas de utilização da água, seja criando incentivos para desconcentrar regionalmente a atividade produtiva. Simultaneamente medidas de assistência às populações mais necessitadas parecem imprescindíveis no médio prazo.

## **7.4.2 - Bacia do rio Verde Grande**

O texto apresenta um diagnóstico sócio-econômico sintético da bacia do rio Verde Grande. Entre os temas estudados estão a evolução da população, da economia e das condições de vida nas três micro-regiões que compõem a bacia.

### **7.4.2.1 - Análise das condições gerais de vida**

O indicador chave para avaliar a evolução passada e inferir tendências para a bacia é o IDH-M, mas para detalhar esse índice e atualizá-lo são necessárias informações de outras fontes especificadas à frente. Para a análise dos indicadores de desenvolvimento humano consideraram-se as estatísticas referentes aos municípios sede de cada micro-região: Bocaiúva, Janaúba e Montes Claros. Para a análise do estado da infra-estrutura urbana e da incidência de doenças utilizaram-se dados agregados para toda a micro-região.

#### **7.4.2.2 - Caracterização geral**

A bacia do rio Verde Grande situa-se numa pequena parte da região sudoeste da Bahia e na região norte do Estado de Minas Gerais, incluindo três micro-regiões: Bocaiúva, Janaúba e Montes Claros, representadas na Figura 7.33.

Em todas as micro-regiões, a agricultura tem uma participação importante no PIB; ela figura como setor principal em Janaúba e secundária em Bocaiúva e Montes Claros. A Figura 7.34 mostra as principais atividades econômicas da bacia. No Quadro 7.10 estão os principais dados econômicos para as micro-regiões da bacia.

Montes Claros é o principal centro urbano de referência da população desta área, sendo seu pólo regional com 336.947 mil habitantes (Estim. IBGE/2004). A transformação de sua economia se deu através dos incentivos fiscais da SUDENE, que propiciaram modificações estruturais na realidade do município, determinando fluxos internos de pessoas, hábitos, capital e tecnologia que diminuíram o distanciamento da cidade com as metrópoles do país. Além disso, houve grande atração da população rural da região, acelerando o processo de migração campo/cidade e provocando inchamento no processo de urbanização e, conseqüentemente, colapso na estrutura urbana. A implantação de projetos de alta tecnologia fomentou o fluxo de migração de mão-de-obra especializada e ao mesmo tempo funcionou como atração para as populações rurais e urbanas da região que, devido ao processo de concentração da propriedade rural e do estrangulamento de pequenas propriedades, foram sendo expulsas do campo demandando a Montes Claros em busca de melhores condições de vida.

Por muito tempo o setor primário foi a principal atividade econômica da cidade, entretanto, nos últimos anos, os setores secundário e terciário passaram a desempenhar esse papel (como pode ser observado no Quadro 7.10). A indústria alcança um impulso maior a partir de 1965, com a chegada da energia elétrica da CEMIG, e com o início da participação efetiva da SUDENE no desenvolvimento industrial da região. O comércio de Montes Claros, por sua vez, mantém o domínio sobre o Norte de Minas e o Sul da Bahia, com o setor de prestação de serviços tendo boa evolução ao longo da década de 90 e início dos anos 2000.

Janaúba é a cidade com o segundo maior PIB da bacia, apesar deste ser cerca de 10% do PIB de Montes Claros. As atividades agropecuárias são sua principal fonte de renda e ocupação de mão de obra, tendo como destaque a fruticultura irrigada, especialmente a bananicultura. Seu setor de comércio e serviços é bastante diversificado, constituindo um pólo de influência na região. O setor industrial é dominado por pequenas empresas. As maiores são

as cerâmicas, beneficiamento de sementes e resfriamento de leite, com baixo índice de oferta de emprego.

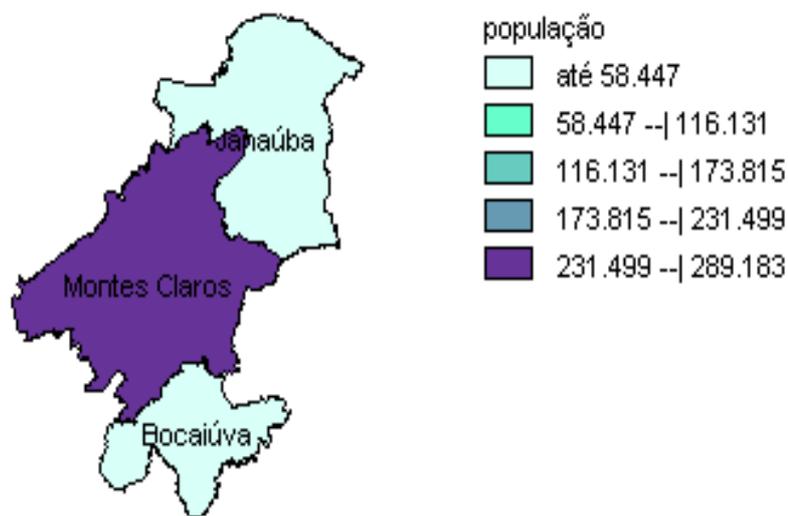


Figura 7.33. Micro-regiões da bacia do rio Verde Grande.

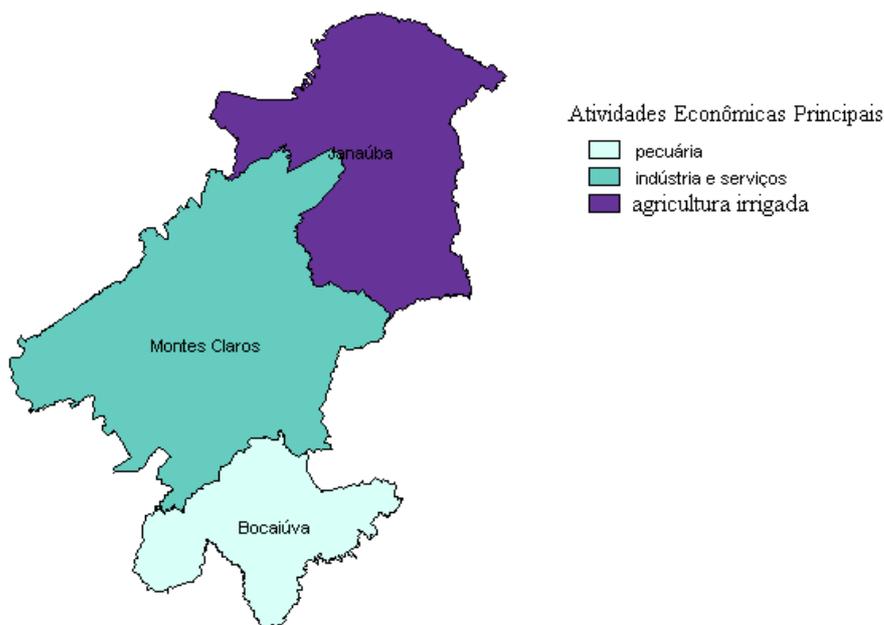


Figura 7.34. Principais atividades econômicas das micro-regiões.

Quadro 7.10. Estatísticas econômicas básicas dos municípios-sede em 2005

	Bocaiúva	Janaúba	Montes Claros
PIB *	210	223	2082
Valor adicionado na agricultura*	19	41	96
Valor adicionado na indústria *	91	33	837
Valor adicionado em serviços *	100	155	1056
População**	44	67	336
PIB per capita ***	4,7	3,3	6,2
Taxa de cresc. do PIB per capita****	10,28	8,73	7,75

\* milhões de reais, \*\* mil pessoas, \*\*\* mil reais, \*\*\*\* (% 1999-2004); Fonte: IBGE/Cidades

A força do município de Bocaiúva é o setor primário, principalmente com a pecuária e a produção de cana-de-açúcar, porém houve crescimento significativo da indústria e do comércio na cidade na última década, setores responsáveis pela maior arrecadação de impostos da prefeitura.

A taxas médias do crescimento do PIB per capita de 1999 a 2004 em todas as três micro-regiões analisadas se situaram abaixo da taxa média de Minas Gerais, que foi de 10,73% ao ano. Assim, o baixo crescimento da região quando comparado às demais micro-regiões do estado agrava as disparidades econômicas no interior de Minas.

A agricultura dos três municípios da bacia constitui-se de culturas temporárias e permanentes. As principais atividades agrícolas da região estão descritas no Quadro 7.11.

Quadro 7.11. Valor da produção e produtividade das principais culturas em 2005

Produto	Bocaiúva		Janaúba		Montes Claros	
	Valor da produção*	Rendimento médio/ha**	Valor da produção*	Rendimento médio/ha**	Valor da produção*	Rendimento médio/ha**
Algodão em caroço	593	1500	20	1500	37	1200
Feijão	1969	678	432	536	5252	1720
Milho	2371	2400	977	1260	3413	2100
Mandioca	1800	12000	152	20000	1620	12000
Cana-de-açúcar	5220	40000	5	20400	1320	80000
Banana	273	12000	13685	18018	680	18000

Mil reais, \*\*kg/haFonte: IBGE/Cidades

Em Montes Claros destaca-se a pecuária de corte e leite seguido pela agricultura cujos principais produtos são: feijão, milho, mandioca, algodão e arroz irrigado, dentre outros, porém, como dito anteriormente, tais atividades perderam seu espaço nos últimos anos em decorrência do crescimento dos setores secundário e terciário na cidade.

No município de Janaúba as atividades econômicas preponderantes estão diretamente vinculadas ao setor primário. A agricultura irrigada é bastante significativa, com 5.500 ha irrigados no “Projeto Gorutuba”. A água captada na barragem “Bico da Pedra”, produz principalmente frutas e grãos. As frutas produzidas nesta cidade têm grande aceitação no mercado nacional e já abrem as portas para o mercado externo. Possuindo como carro-chefe a bananicultura, a agricultura irrigada de Janaúba se diversifica devido ao clima favorável, às terras férteis, à boa localização geográfica, e aos empreendimentos privados, que criam condições para o cultivo das mais variadas frutas tropicais.

As principais atividades da agricultura são: algodão, milho, feijão, sorgo, mandioca, mamona, tomate, horticultura e fruticultura, especialmente a bananicultura. A área cultivada é

de 59.975 ha, sendo 54.826 de pastagens, 2.817 ha de banana e 2.332 ha de outras culturas.

Em Bocaiúva a pecuária de corte tem passado por dificuldades nos últimos anos, principalmente devido às perdas provocadas pela seca.

Os Quadros 7.12 e 7.13 mostram a evolução dos índices de desenvolvimento para as três cidades.

Quadro 7.12. Evolução dos indicadores de desenvolvimento humano

	<b>Bocaiúva</b>		<b>Janaúba</b>		<b>Montes Claros</b>		<b>MG</b>	
	1991	2000	1991	2000	1991	2000	1991	2000
IDH-M	0,651	0,736	0,641	0,716	0,721	0,783	0,697	0,718
IDH-M Renda	0,568	0,602	0,557	0,614	0,629	0,691	0,652	0,711
IDH-M Long.	0,688	0,792	0,684	0,743	0,741	0,787	0,689	0,759
IDH-M Educação	0,697	0,815	0,681	0,790	0,793	0,872	0,750	0,850

Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano/PNUD.

Quadro 7.13: Indicadores de distribuição de renda: 2000

	<b>Bocaiúva</b>	<b>Janaúba</b>	<b>Montes Claros</b>	<b>MG</b>
Renda apropriada pelos 40% mais pobres	9,89	8,82	8,03	8,0
Razão entre a renda apropriada pelos 10% mais ricos e os 40% mais pobres	17,91	22,50	25,14	25,4
Índice de Gini (2000)	0,56	0,60	0,62	0,62
Índice de Gini (1991)	0,63	0,58	0,61	0,61
Intensidade da pobreza	45,59	44,69	42,06	43,8
Porcentagem de pessoas com mais de 50% da renda proveniente de transferências governamentais	15,73	12,27	12,31	13,9

Fonte: Atlas do desenvolvimento Humano/PNUD

Nota-se que somente Montes Claros mantém seus indicadores, no geral, superiores à média do estado. Janaúba e Bocaiúva, por sua vez, obtiveram um IDH-Renda insatisfatório, bem inferior ao indicador médio de Minas Gerais. Somente no IDH-Educação os três municípios obtiveram uma melhora significativa na década de 1990.

Pode-se atribuir o maior índice de renda apropriada pelos 40% mais pobres de Bocaiúva por ser este o município mais pobre dos três estudados, o que pode explicar também a maior proporção da população que vive de transferências do governo nesta cidade.

Observe também que o índice de Gini nas três cidades é próximo da média estadual. Assim, soma-se ao problema da alta intensidade da pobreza a grande concentração da renda na região.

A micro-região de Montes Claros apresenta boas condições de infra-estrutura urbana quando comparadas às demais micro-regiões e à média de Minas Gerais (Quadro 7.14). Esse fato reflete as melhores condições sócio-econômicas que se concentram nessa micro-região.

Já nas micro-regiões de Bocaiúva e Janaúba predominam precárias condições de infraestrutura urbana, que afetam evidentemente de forma mais direta a população mais pobre.

Quadro 7.14. Infra-estrutura urbana (por valor absoluto e percentagem de domicílios não atendidos em 2000)

	Montes Claros	%	Bocaiúva	%	Janaúba	%	MG	%
Total de domicílios	75676	100	10589	100	14205	100	4765258	100
Domicílios sem água encanada	5033	6,6	2242	21,2	3299	23,2	995613	20,9
Domicílios sem inst. sanitárias	2709	3,57	1386	13,1	949	6,7	240191	5,0
Domicílios sem coleta de lixo	6561	8,66	3588	33,9	4922	34,6	1031593	21,6

Fonte: Ministério da Saúde/Datasus

Quanto à incidência de doenças os indicadores acompanham o nível de desenvolvimento das micro-regiões (Quadro 7.15). Assim, Montes Claros apresenta os melhores índices, enquanto as micro-regiões de Bocaiúva e Janaúba apresentam índices comparáveis à média de Minas Gerais, e até mesmo maiores, como no caso de doenças do aparelho digestivo.

Quadro 7.15: Incidência de doenças (internações por tipo de doença em março de 2007)

	Montes Claros	%	Bocaiúva	%	Janaúba	%	MG	%
Total de internações	2977	100	265	100	507	100	92559	100
Doenças infec. e parasitárias	69	2,32	11	4,15	15	2,96	4708	5,1
Neoplasias e tumores	137	4,6	12	4,53	27	5,32	5103	5,5
Doenças nutric. e metabólicas	18	0,6	13	4,9	7	1,38	2897	3,1
Doenças do aparelho circul.	350	11,76	33	12,5	72	14,2	11902	12,9
Doenças do aparelho respir.	111	3,73	24	9,06	20	3,94	13016	14,1
Doenças do aparelho digest.	167	5,62	30	11,3	64	12,6	8474	9,2

Fonte: Ministério da Saúde/Datasus

O Quadro 7.16 mostra que as condições de saúde e morbidade em Montes Claros e Bocaiúva superam a média de Minas Gerais, enquanto Janaúba apresenta indicadores piores que a média do estado.

**Quadro 7.16. Indicadores de saúde e morbidade (2000)**

<b>Indicador</b>	<b>Montes Claros</b>	<b>Bocaiúva</b>	<b>Janaúba</b>	<b>MG</b>
Esperança de Vida ao nascer	72,25	72,54	69,67	70,5
Mortalidade até 1 ano de idade	22,27	21,49	29,98	27,8
Mortalidade até 5 anos de idade	24,39	23,53	32,80	55,5
Probab. de sobrevivência até 60 anos	83,52	84,04	78,91	80,5

Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano/PNUD

Quanto à educação (Quadro 7.17), os indicadores de Montes Claros são os melhores da bacia, mostrando que a alfabetização e a frequência à escola nesta cidade estão acima da média mineira. Contrapondo-se a essa situação, a micro-região de Janaúba apresenta índices de educação piores que a média de Minas Gerais, evidenciando um possível cenário de baixa qualificação futura da mão-de-obra nesta micro-região. Para evitar tal conjuntura são necessários investimentos significativos no setor educacional nos próximos anos.

**Quadro 7.17. Indicadores selecionados de educação (2000)**

<b>Indicadores</b>	<b>Montes Claros</b>	<b>Bocaiúva</b>	<b>Janaúba</b>	<b>MG</b>
Taxa de alfabetização	90,08	82,31	80,24	88,0
% pessoas com mais de 15 anos não alfabetizadas	9,93	17,69	19,76	11,5
Taxa bruta de frequência à escola	81,50	80,04	76,45	78,9

Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano/PNUD

O fato da bacia do rio Verde Grande ser compartilhada entre a União e dois estados da Federação (Minas Gerais e Bahia) imprime uma certa complexidade na administração de seus recursos hídricos, dificultada, ainda, pela atuação, em seu espaço, de diversas instituições com competências muitas vezes superpostas.

De acordo com informações da ANA (Agência Nacional de Águas), graves problemas gerados pela escassez de água na bacia do São Francisco já são evidenciados nos rios Verde Pequeno, Gortuba e Verde Grande, todos componentes da bacia do rio Verde Grande.

Esta bacia, por se inserir na região semi-árida brasileira, está submetida a um regime hidroclimatológico irregular, com ocorrências de estiagens prolongadas e, conseqüentemente, elevada variabilidade anual das disponibilidades hídricas. Esta variabilidade torna a região de alto risco sob o aspecto de confiabilidade da precipitação para a prática da agricultura, o que gera uma grande necessidade de utilização da irrigação.

Na bacia do Verde Grande os primeiros registros de conflito entre usuários da água surgiram em fins de 1988 e se processavam em diversos níveis, principalmente entre agricultores e pecuaristas, entre pequenos e grandes usuários agrícolas e mesmo entre usuários de outras atividades econômicas e os que precisavam da água para suas necessidades básicas.

Os constantes conflitos pelo uso da água e a constatação de que os critérios técnicos e procedimentos utilizados na concessão de outorgas para essa bacia precisavam ser revistos, levaram o MMA a suspender a liberação de outorgas para a irrigação em toda a bacia em dezembro de 1996.

Além da reduzida disponibilidade hídrica, há que considerar, também, a base tecnológica instalada para apropriação e uso da água na agricultura, ainda com predomínio de métodos de irrigação pouco compatíveis com a situação de reduzida disponibilidade hídrica da bacia.

Assim, a bacia do rio Verde Grande apresenta o paradoxo de possuir grande potencial de solo e topografia favoráveis à expansão da agricultura irrigada em contraste com uma baixa disponibilidade hídrica, agravada pelo comprometimento da qualidade nas áreas de maior concentração urbana e de atividade agrícola mais intensiva. Além disso, há uma base tecnológica extremamente diversificada, onde convivem a atividade agrícola altamente tecnificada e empresarial com a agricultura familiar de subsistência.

Atualmente todas as micro-regiões da bacia apresentam taxas de crescimento do PIB per capita abaixo da média do estado, porém prevê-se um quadro agravante no futuro caso estas regiões atinjam um crescimento mais significativo. Isso decorre da tendência de crescimento com grande concentração de renda na região, como se observa em Montes Claros, que apresenta o maior índice de Gini. Soma-se a isso a baixa disponibilidade hídrica da bacia, que pode intensificar os conflitos pelo uso da água causada pela maior demanda decorrente do crescimento, principalmente nas regiões onde a agricultura irrigada é a principal atividade.

Neste contexto a micro-região de Janaúba apresenta a situação mais preocupante, pois é a região onde a agricultura irrigada é mais significativa. Assim o crescimento desta atividade pode elevar significativamente os conflitos pelo uso de água que já ocorrem neste local. Ao mesmo tempo esse crescimento pressionará a infra-estrutura, já precária nessa micro-região, o que tende a aumentar a incidência de doenças, principalmente as infecciosas e parasitárias. Portanto, o crescimento com concentração pode agravar os indicadores como os de infra-estrutura, morbidade e incidência de doenças, que já são os mais insatisfatórios da bacia.

Diante de tal quadro conclui-se que somente a partir de um sistema eficiente de gestão integrada que busque a convergência de interesses dentre os principais usuários da água na bacia, introduzindo regras bem definidas de utilização da água, será encontrado o caminho para o gerenciamento dos conflitos na região, que ressurgem a cada período de estiagem

prolongada. Além disso, medidas de assistência às populações menos favorecidas, principalmente na região de Janaúba e Bocaiúva, são imprescindíveis para a redução dos indicadores de intensidade da pobreza na região.

### **7.4.2.3 - Extrapolação de tendências demográficas e identificação de pontos potenciais de conflitos no uso de água**

A análise da dinâmica da população e suas inter-relações com outras variáveis como disponibilidade de terras e de água foram aplicadas à bacia do rio Verde Grande com a utilização de um modelo sistêmico.

Foi delineado, então, um modelo capaz de possibilitar uma análise sistêmica das principais inter-relações entre o crescimento econômico, populacional e os limites para ampliação da agricultura irrigada para as três micro-regiões que compõem a bacia, estimando a demanda futura de água e um possível risco ambiental decorrente da restrição de disponibilidade hídrica. A demonstração intertemporal do comportamento populacional possibilita uma visualização mais clara de locais que sejam mais prováveis de ocorrer conflitos pela base de recursos naturais, ou um agravamento dos já existentes, e, portanto, onde serão necessários maiores investimentos para mitigar esses conflitos.

Para a construção do modelo foram utilizados os arquétipos sistêmicos descritos anteriormente. Eles estão geralmente presentes em situações de interação social e assim pode-se construir um modelo sistêmico geral que possibilite a realização de análises de causa e efeito entre as diversas variáveis envolvidas e os principais obstáculos ao desenvolvimento da região em questão. Com isso pretende-se mostrar que as causas reais dos problemas podem ser bem maiores do que as aparentes, e através da identificação de arquétipos é possível demonstrar que soluções de curto prazo aplicadas por agentes econômicos ou pelo governo podem não ser o melhor remédio, podendo, inclusive, ser motivo de agravamento da situação indesejada.

Este modelo dinâmico, ao mostrar o comportamento de longo prazo de variáveis selecionadas, pode vir a tornar claro que mesmo as pessoas e agentes econômicos interagindo repetidamente não conseguem agir coletivamente em empreendimentos que exigem maior comprometimento dos indivíduos, e as estratégias individuais podem chegar a um resultado final muito diferente do inicialmente previsto pelas partes envolvidas, que levam a gargalos comprometedores do desenvolvimento de toda a região. O modelo sistêmico objetiva justamente prever esses resultados que provêm de estratégias individuais e que geralmente prejudicam o todo da sociedade e com esse instrumental poder chegar a conclusões que levem

a soluções de cooperação, ou seja, soluções que levem a um bem estar geral da sociedade analisada.

#### **7.4.2.3.1 - Descrição do modelo de simulação**

O modelo visa analisar o impacto da expansão das atividades econômicas, notadamente da agricultura irrigada, e também do crescimento populacional sobre a disponibilidade de água na bacia do Verde Grande, principalmente no longo prazo, utilizando a dinâmica do modelo sistêmico construído para a bacia. Especificamente, deseja-se avaliar a possibilidade de ocorrência de conflitos no uso de água na região, principalmente devido à expansão da irrigação.

Este modelo é constituído de quatro vistas, uma para cada micro-região e uma que mostra a população total da bacia. Essas micro-regiões são sub-divisões da meso-região Norte de Minas. Para composição do modelo são utilizados dados de séries históricas para os municípios da região obtidas nos sites do IPEA e do DATASUS. Na Figura 7.35 é apresentada uma vista do modelo que corresponde à micro-região de Janaúba.

A população foi dividida em cortes de faixa etária onde cada corte possui uma taxa de mortalidade. A dinâmica começa com a variável nascimentos, dados pela fertilidade total, que é o número de filhos que as mulheres têm em média, vezes a população de 15 a 49 anos multiplicada por 0,5, que indica as mulheres em período fértil, tudo isso dividido pelo período fértil (35 anos) da vida da mulher. Os que nascem são transferidos para o primeiro corte (0 a 14 anos), se juntando aos que lá já estão. Neste corte são submetidos à taxa de mortalidade dessa faixa etária e os que passam de 14 para 15 anos, ou seja, passam pelo período de maturação, são transferidos para o segundo corte. O período de maturação é um cálculo feito para se obter quantas pessoas passam de uma idade crítica para o próximo corte, neste caso de 14 para 15 anos, é a população total multiplicada por 1 subtraído da taxa de mortalidade, ou seja, os que sobrevivem, dividido por 15, que é o número de faixas etárias nesse corte.

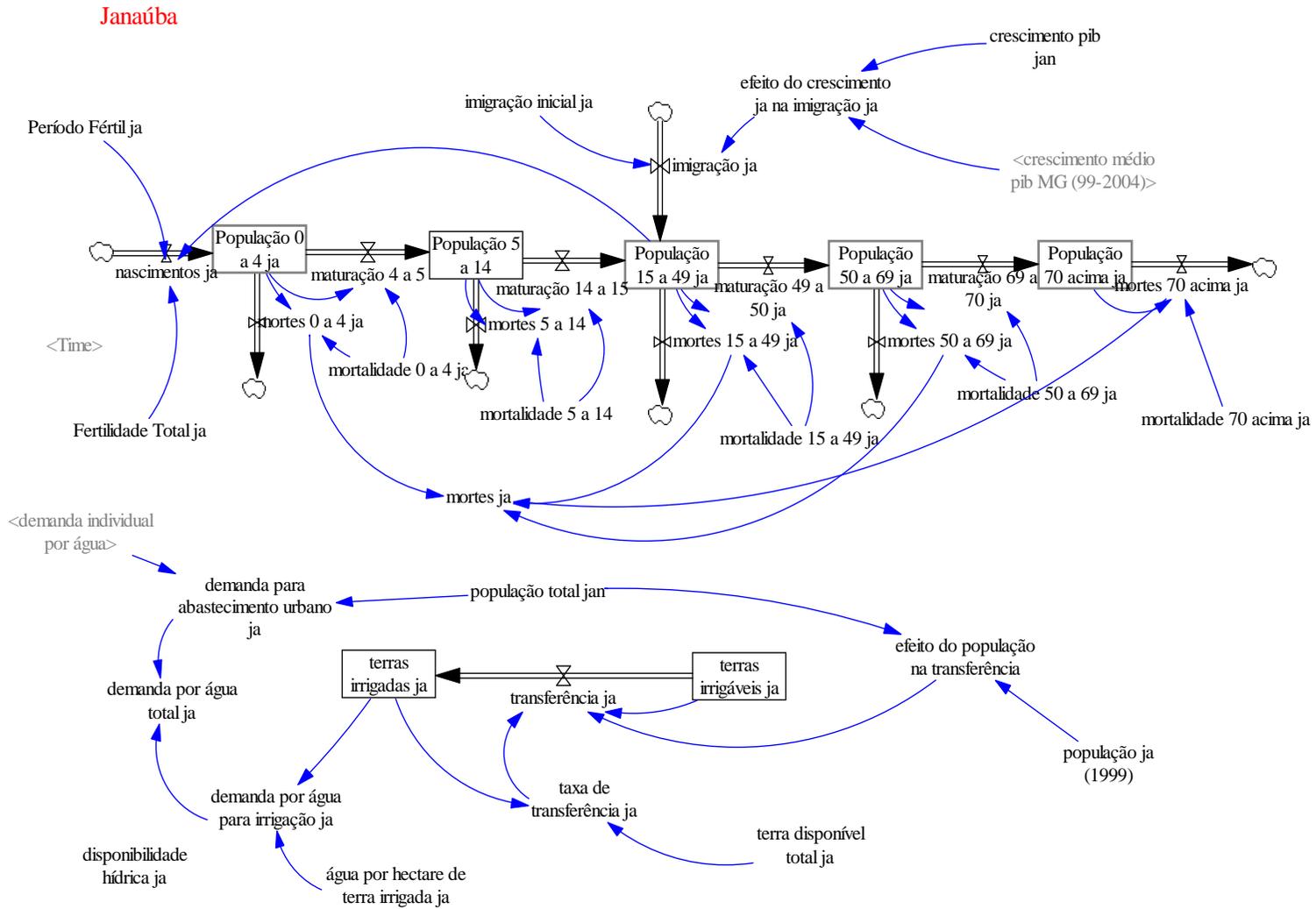


Figura 7.35. Modelo geral construído para a bacia do rio Verde Grande.

Esse mesmo processo ocorre em todos os cortes populacionais, até os idosos de 70 anos e acima. A população total é obtida pelas populações de cada corte em cada período de tempo, e as mortes de cada corte contribuem para as mortes do total da população. Assim, por exemplo, em cada período de um ano, tem-se a dinâmica populacional, com nascimentos e mortes totais obtidos através da especificação de cortes populacionais, e também o comportamento desses cortes. Foi incluída como variável de influência na dinâmica populacional a migração de pessoas para a região analisada em função do crescimento econômico obtido por ela. Foi obtido um índice do efeito do crescimento do Produto Interno Bruto na imigração através de uma variável *lookup*, que compara o crescimento percentual do PIB da região com o crescimento percentual do PIB de Minas Gerais. A partir daí foi considerado que se o PIB da região cresce mais percentualmente que o PIB de Minas Gerais há migração de outras localidades mineiras para essa região.

A variável ‘imigração’ é então influenciada pelo efeito do crescimento do PIB na migração e pela variável imigração base, que é o número de pessoas que a região recebe em média de outras localidades. Através do site do IPEADATA foi obtido o dado de que a taxa imigração naquela região tem sido de 3% do total da população local, logo a variável ‘imigração base’ é 3% da população de todos os municípios da região. Assim, a ‘imigração’ é resultado do efeito econômico atuando sobre a imigração que já ocorre normalmente. Admitiu-se que essa população de imigrantes é em geral composta por pessoas relativamente jovens, em busca de nova vida e de emprego, logo esse valor entra no corte de população de 15 a 49 anos, e a partir daí vão influir a população total. Essa população total é considerada uma variável de influência no consumo dos recursos naturais, que neste modelo são considerados a terra disponível para irrigação e a água.

O segundo ciclo do modelo demonstra a dinâmica da utilização dos recursos naturais, como a disponibilidade de terras utilizada na atividade agrícola irrigada. Através de dados do IPEADATA sobre a quantidade hectares de terras disponíveis para utilização de irrigação foram construídas duas variáveis de nível (variáveis de estoque, que acumulam valores) onde as terras disponíveis, que constituem uma das variáveis, são transferidas para outra variável de nível, ‘terras irrigadas’, onde as terras já estão utilizadas pela atividade de irrigação. Essa transferência é influenciada por duas variáveis: ‘taxa de transferência’ e ‘efeito da população na transferência’.

A evolução da população tem efeito direto sobre a transferência de terras irrigáveis, ou seja, terras com potencial para a irrigação, para terras irrigadas, o que se dá através do efeito causado pela variável *lookup*. Essa variável compara um valor de população base da micro-

região de Janaúba, neste caso foi considerada a população de 1999, com a população dada pelo modelo em cada ano. Assim, quanto maior a população em relação à base, mais terras são utilizadas, sendo assim maior a transferência de terras disponíveis para terras utilizadas para irrigação.

Com os dados do total de terras irrigáveis do local e de terras já irrigadas foi obtido um índice de transferência em que as terras ainda não utilizadas têm seu valor dividido pelo valor de terras já usadas para irrigação, é então subtraído de 1 o valor resultante, obtendo-se daí uma taxa que será multiplicada pelo total de terras ainda irrigáveis para chegar a um valor preliminar de terras que será transferido. Como este é um modelo populacional, tem ainda o efeito da população nesta transferência, já explicado anteriormente, logo àquele valor será multiplicado o efeito populacional, constituindo essa equação a variável ‘transferência’.

Estudos da área de agrárias têm mostrado que hoje, em média, no Brasil são gastos 0,5 L/ha de água. Assim, para se obter a demanda por água que parte da irrigação foi criada uma variável chamada ‘demanda por água para irrigação’ onde o total de hectares de terras irrigadas é multiplicado pelo dado de m<sup>3</sup> de água por ano utilizado para irrigação. Essa variável é constituinte importante da *demanda total hídrica*, que tem como componente ainda a ‘demanda para abastecimento urbano total’ obtido graças a dados do IGAM, que diz que a demanda de um indivíduo por água é em média de 190 litros por dia, logo a demanda para abastecimento da população foi obtida multiplicando a demanda individual pelo total da população. A demanda por água da micro-região de Janaúba não é nada mais do que a soma das demandas para irrigação e para abastecimento urbano, o que constitui um dado muito importante para autoridades, principalmente porque sendo o modelo dinâmico é possível observar a evolução dessa demanda por um recurso cada vez mais escasso. Um dado também importante demonstrado pelo modelo é o saldo hídrico, que é uma comparação entre a disponibilidade hídrica média da bacia do rio Verde Grande (dado retirado do Caderno da Região Hidrográfica do rio São Francisco - Ministério do Meio Ambiente), com a respectiva demanda hídrica proveniente da dinâmica do modelo.

#### **7.4.2.3.2 - Simulações**

O modelo populacional, simulado para o período de 1999, data em que se inicia a série de dados, até o ano de 2020, evidencia que a base de recursos será pressionada pelo aumento da população da região, o que demandará investimentos em infra-estrutura urbana e saneamento básico, além de uma política de gerenciamento dos recursos hídricos eficiente. A Figura 7.36 mostra a evolução da população para a micro-região de Janaúba.

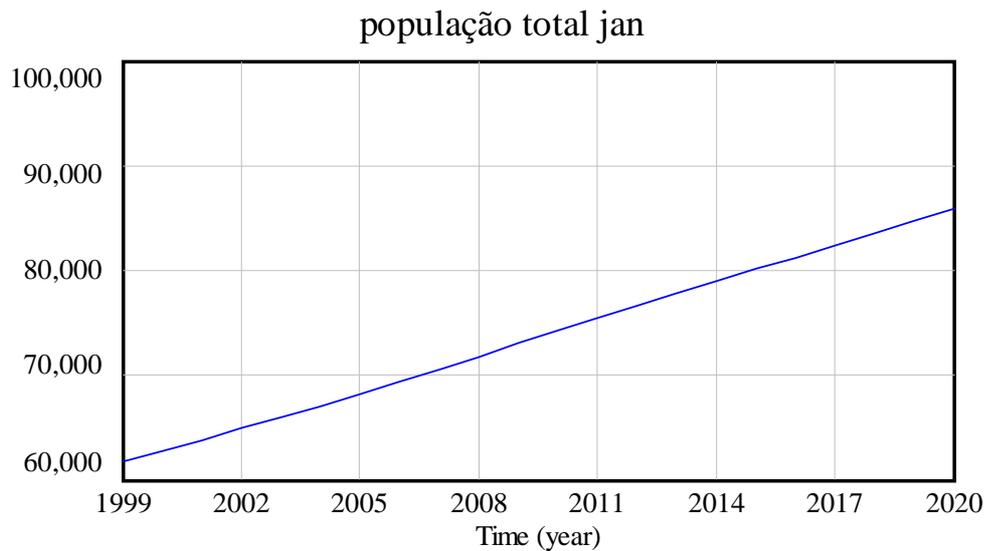


Figura 7.36. Evolução temporal da população na micro-região de Janaúba.

Como a população de todas as micro-regiões está crescendo, mesmo que a ritmo decrescente, como é o caso de Montes Claros, a população total da bacia também está aumentando (Figura 7.37).

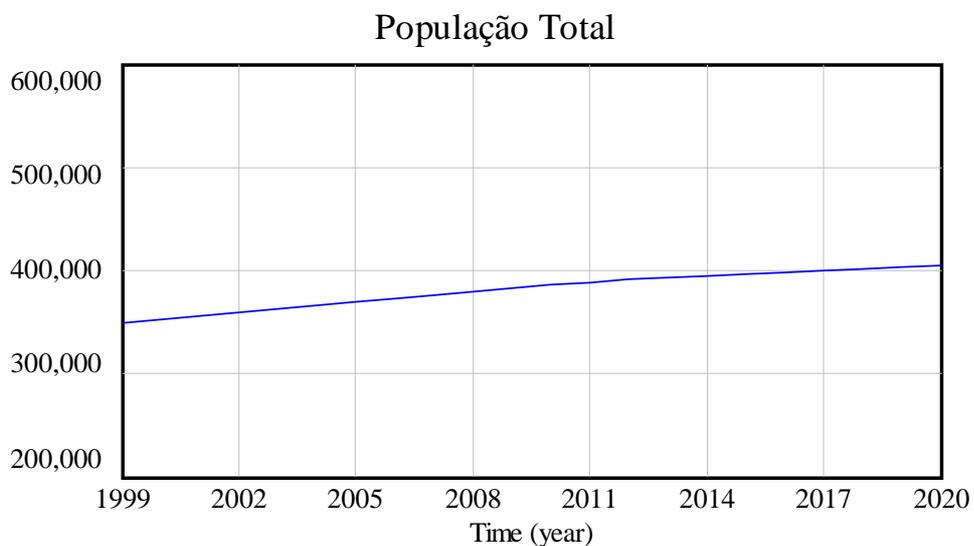


Figura 7.37. Evolução temporal da população total da bacia.

O aumento populacional causa um efeito direto na transferência de terras para a irrigação, isto é evidente, pois quanto mais pessoas maior a necessidade de trabalho, de produção de alimentos, etc. Assim, as terras ainda disponíveis, segundo dados do IpeaData, vão sendo transferidas gradativamente para a produção irrigada. Esse processo geralmente vem acompanhado de uma concentração das terras, na medida em que os pequenos produtores não têm condições de competir com os grandes irrigantes, e acabam por vender suas terras

para aqueles e trocar o campo pela cidade. Esse êxodo rural incha as cidades que recebem esses migrantes sem uma estrutura adequada.

As Figura 7.38 e 7.39 mostram como evolui a ocupação da terra (em ha) para utilização na principal atividade econômica da bacia do rio Verde Grande, a agricultura irrigada, na micro-região de Janaúba:

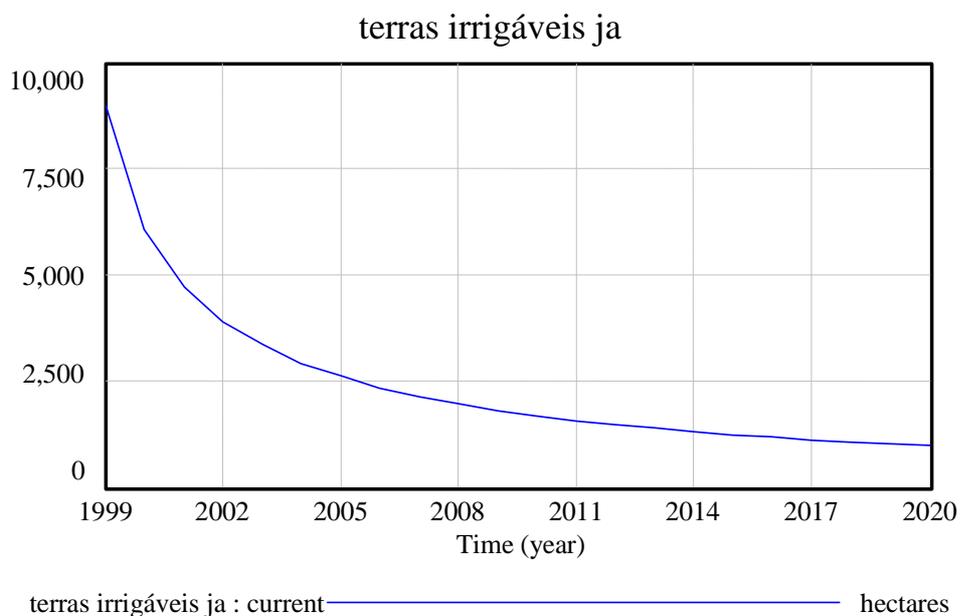


Figura 7.38. Evolução das terras disponíveis para a agricultura irrigada.

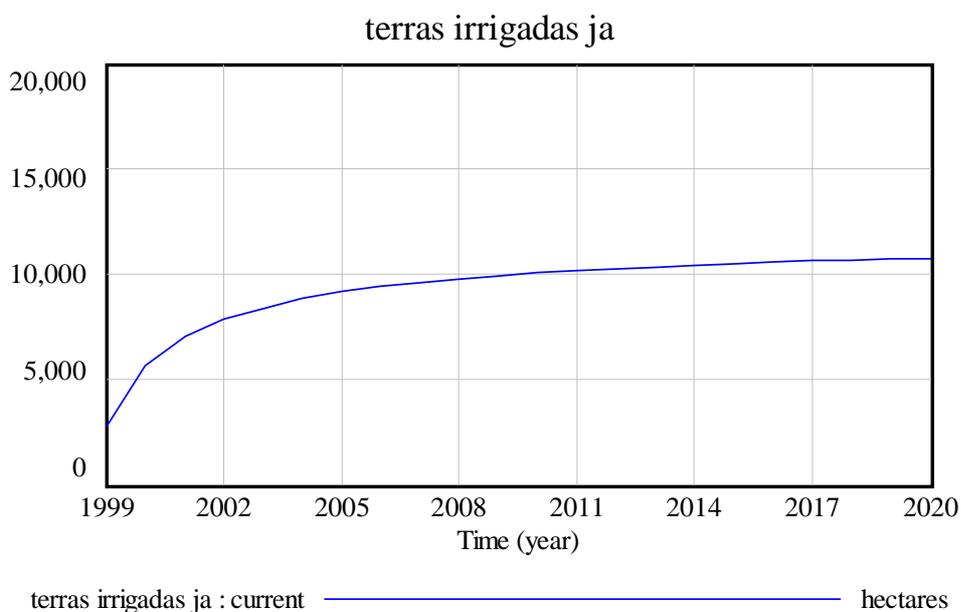


Figura 7.39. Evolução das terras utilizadas para a agricultura irrigada.

É possível observar que a terra ainda disponível diminui continuamente, enquanto a terra irrigada aumenta, mesmo que em ritmo decrescente. Além disso, pode-se perceber pelas unidades do gráfico que as terras disponíveis já estão em menor quantidade que as utilizadas desde 1999. Isto significa que a demanda por água aumentará, pois seu principal componente é a irrigação.

Dessa forma, o crescimento da população, ao afetar positivamente o efeito de transferência de terras disponíveis para terras irrigadas, pode levar, com o tempo, a um esgotamento desse recurso ou a uma ocupação desordenada da terra, que tem como consequência sua má utilização, e também de outros recursos naturais. E esse tipo de ocorrência pode acirrar os conflitos pelo uso da água em algumas regiões da bacia e se tornar mais frequentes no futuro como mostram as simulações. As Figuras 7.40 e 7.41 ilustram a evolução da utilização da terra em contraposição à disponibilidade desse recurso na região, para Montes Claros e Bocaiúva:

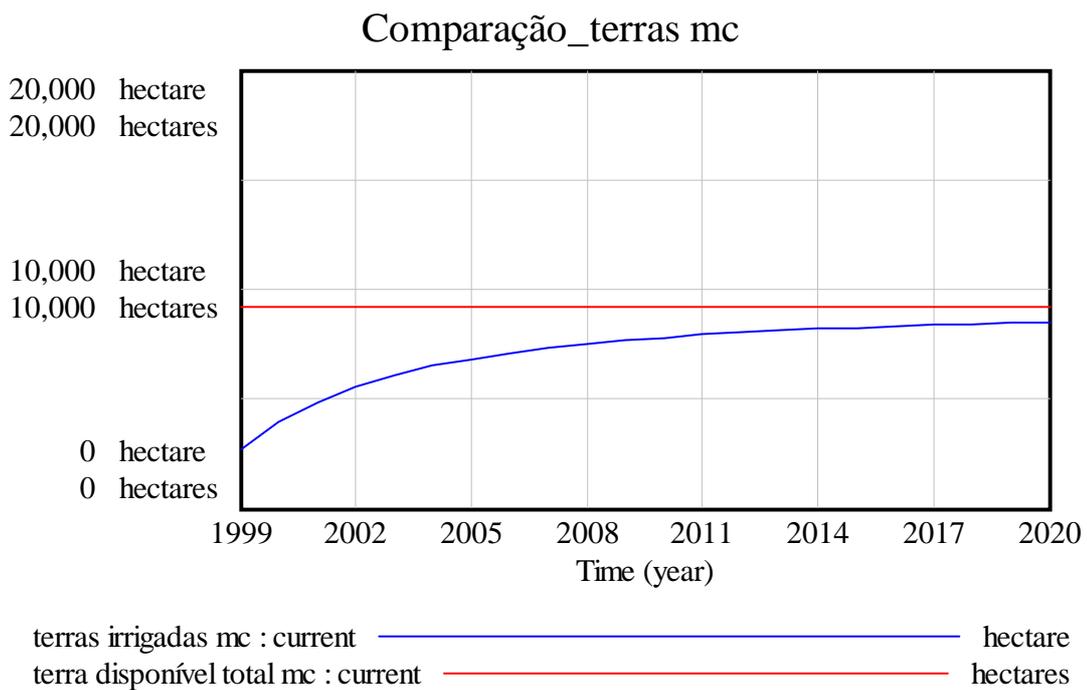


Figura 7.40. Terras utilizadas para irrigação e disponibilidade total de terras na micro-região de Montes Claros.

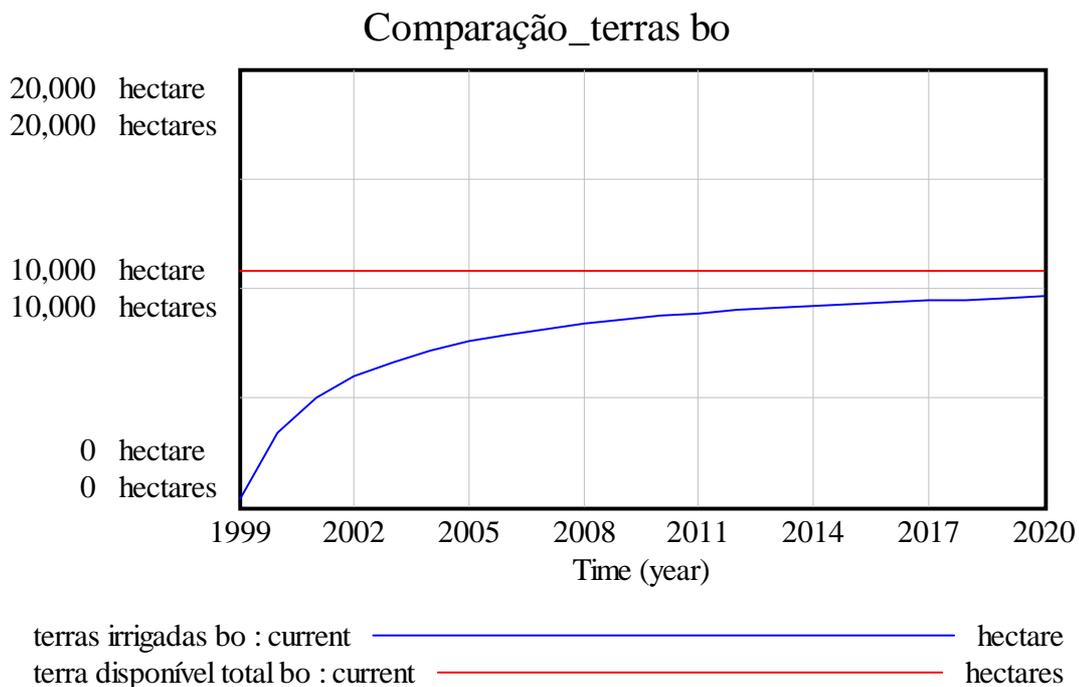


Figura 7.41. Terras utilizadas para irrigação e disponibilidade total de terras na micro-região de Bocaiúva.

Segundo dados do IpeaData sobre as terras disponíveis para agricultura na região pode-se perceber mais claramente que o crescimento da agricultura irrigada poderá levar à escassez do fator produtivo terra, além de grande pressão sobre a base de recursos hídricos.

Isto é um agravante da situação, já que a bacia do rio Verde Grande está sujeita a uma forte restrição hídrica, que obviamente está no centro desses conflitos, e, segundo a simulação tende a se tornar mais preocupante, pois considerando a disponibilidade hídrica constante, se nenhuma política de gerenciamento eficiente do uso da água for aplicada no período simulado, o déficit hídrico já existente na região se agravará, pois a demanda hídrica cresce através de seus componentes urbano e agrícola, estimulados pelo aumento populacional.

Estudos do Ministério do Meio Ambiente publicados no Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco em 2006 mostram que a disponibilidade hídrica da bacia do rio Verde Grande é uma das menores dentre as sub-bacias do São Francisco, situando-se por volta de 1,56 m<sup>3</sup>/s. Como esta bacia já se encontra numa situação em que a demanda por recursos hídricos supera a oferta, a simulação do modelo apenas mostrou o agravamento do déficit hídrico, na ausência de políticas mitigadoras do problema, como mostram as Figuras 7.42 a 7.44 para as micro-regiões de Janaúba, Montes Claros e Bocaiúva.

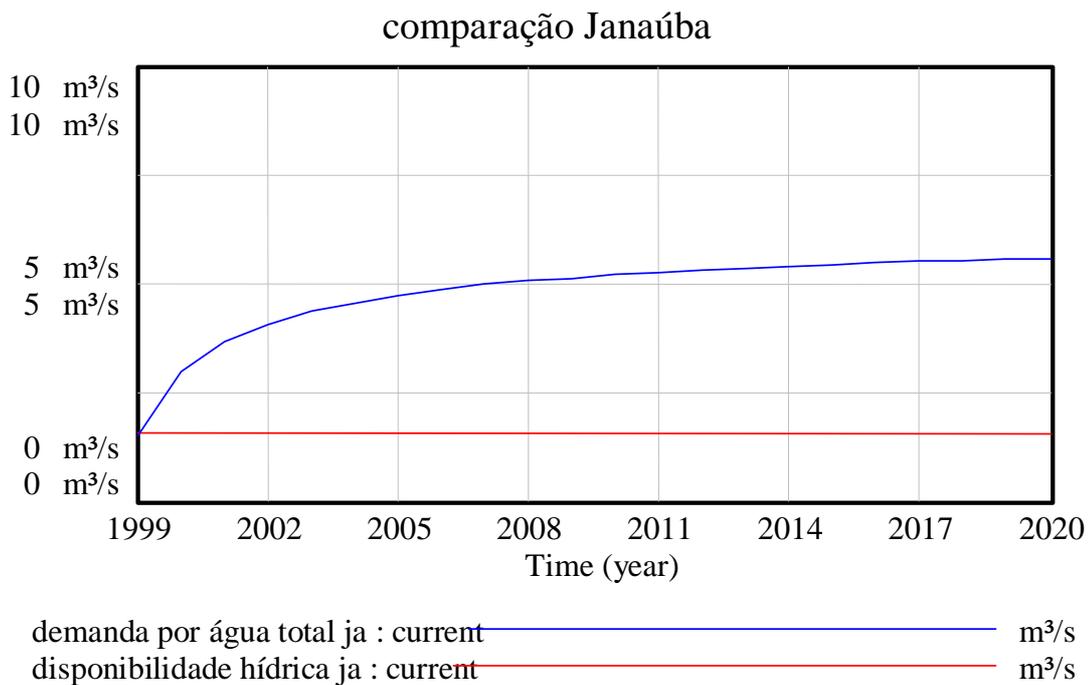


Figura 7.42. Evolução temporal da demanda hídrica da micro-região de Janaúba, dada a disponibilidade hídrica da bacia.

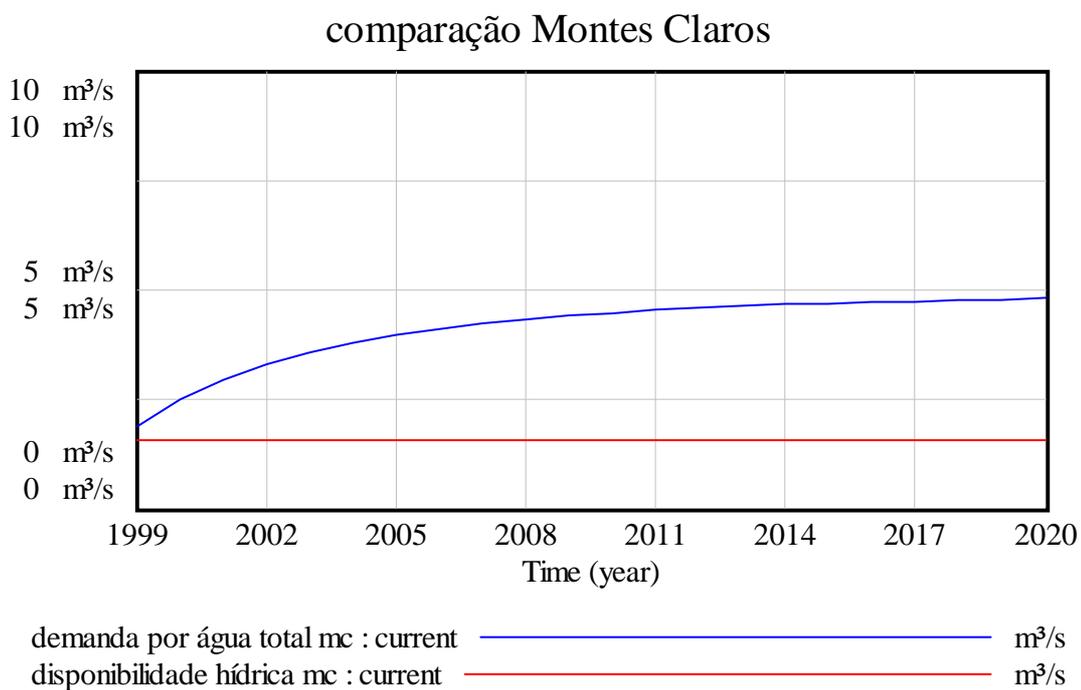


Figura 7.43. Evolução temporal da demanda hídrica da micro-região de Montes Claros, dada a disponibilidade hídrica da bacia.

### comparação Bocaiúva

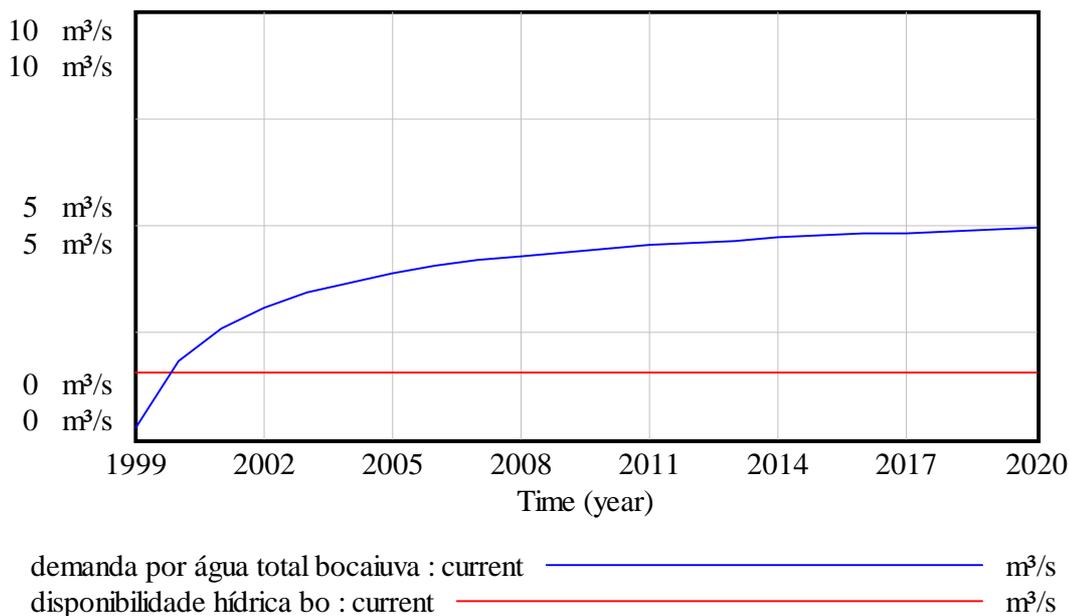


Figura 7.44. Evolução temporal da demanda hídrica da micro-região de Bocaiúva, dada a disponibilidade hídrica da bacia.

O déficit já existente é compensado pela importação de água das outras sub-bacias do São Francisco. O aumento deste déficit na próxima década faz urgente a tomada de medidas corretivas e preventivas para o uso da água pela população e, principalmente, pelos irrigantes. Estes merecem maior atenção, pois, pode-se observar que o déficit hídrico da micro-região de Janaúba apresenta-se como o maior, isso porque nesta micro-região a agricultura irrigada é mais forte, sendo o carro-chefe da economia local, principalmente a fruticultura irrigada. A Figura 7.45 mostra a importância da demanda hídrica da agricultura irrigada na composição da demanda hídrica total para a região de Janaúba.

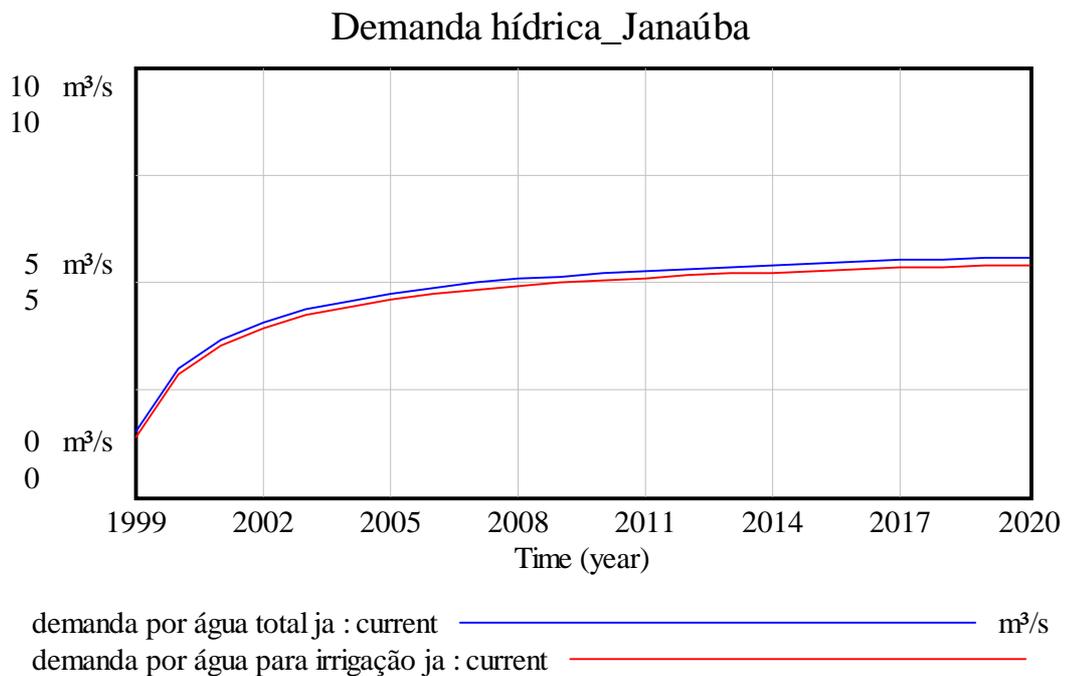


Figura 7.45. Demandas hídrica total e para agricultura irrigada na micro-região de Janaúba.

#### 7.4.2.4 - Conclusões

O fato dos indivíduos terem dificuldade de cooperarem entre si, sendo essa cooperação uma condição freqüentemente necessária para a superação de situações de extrema pobreza, pode ser reflexo da insuficiência de capital social acumulado pela comunidade. Mas essa resistência a cooperar pode ser ainda mais acentuada em períodos de secas, em que, para um dado grau de heterogeneidade social, as disparidades econômicas entre seus habitantes se tornam mais patentes. Neste quadro insere-se a região da bacia hidrográfica do rio Verde Grande, que além de possuir uma disponibilidade hídrica extremamente restrita, possui um histórico de conflitos pelo uso da água que pode se agravar conforme a simulação feita.

Com o modelo dinâmico geral buscou-se mostrar como a dinâmica social na região da bacia depende da dinâmica ambiental - o potencial de conflitos, por exemplo, depende do grau de degradação da bacia, como uso da terra e da água - e como esta última é determinada, em última instância, pela ação de indivíduos buscando atender seus interesses econômicos. É importante observar que a ação individual racional pode gerar resultados coletivos desastrosos em termos de utilização de recursos comuns como a água.

Esta bacia, por se localizar na região semi-árida brasileira, está submetida a um regime pluvial irregular, com elevada variabilidade anual das disponibilidades hídricas. Esta variabilidade torna a região de alto risco sob o aspecto de confiabilidade da precipitação para a agricultura, o que gera grande necessidade de uso da irrigação. Assim sendo, a agricultura

irrigada é muito importante para a região, sendo fonte de trabalho e renda, mas também é a maior demandante dos recursos hídricos. Por isso são necessárias medidas urgentes para adequar a irrigação local à baixa disponibilidade hídrica, com sistemas que permitam um desenvolvimento sustentável da atividade econômica. Além disso, medidas de assistência às populações menos favorecidas, principalmente na região de Janaúba e Bocaiúva, são imprescindíveis para a redução dos indicadores de intensidade da pobreza na região.

Diante de tal quadro, somente a partir de um sistema eficiente de gestão, que busque a convergência de interesses dentre os principais usuários, introduzindo regras bem definidas de utilização da água, será encontrado o caminho para o gerenciamento dos conflitos na região, que podem se agravar com estiagens e o crescimento populacional e da atividade econômica.

### **7.4.3 - Bacia do rio das Velhas**

O texto apresenta um diagnóstico sócio-econômico sintético da bacia do rio das Velhas. Entre os temas estudados estão a evolução da população, da economia e das condições de vida nas três subdivisões que compõem a bacia.

#### **7.4.3.1 - Caracterização geral**

A bacia do rio das Velhas está localizada na região central do Estado de Minas Gerais, orientada no sentido Sudeste para Noroeste. Suas nascentes estão localizadas nos limites da Área de Proteção Ambiental da Cachoeira das Andorinhas, município de Ouro Preto.

É o maior afluente em extensão da bacia do rio São Francisco, com 801 km,. Possui a maior população e é responsável pelo maior PIB entre as sub-bacias do São Francisco, apenas perdendo em vazão d'água para a sub-bacia do Paracatu.

Deságua no São Francisco na localidade de Barra do Guaicuí, município de Várzea da Palma. A bacia tem uma população total de 4.406.190 de habitantes (IBGE, 2000), distribuída em 51 municípios, drenando uma área de 29.173 km<sup>2</sup> (FEAM, 1998).

A região metropolitana de Belo Horizonte, apesar de ocupar apenas 10% da área territorial desta bacia, é a principal responsável pela degradação do rio das Velhas, devido à sua elevada densidade demográfica (mais de 70,8% de toda a população da bacia), processo de urbanização e atividades industriais.

De um total de 51 municípios, 37 têm 100% de sua área territorial inserida dentro da área de drenagem da bacia do rio das Velhas, e os 14 restantes não estão totalmente inseridos nesta bacia, apresentando percentuais variáveis de inserção.

### 7.4.3.2 - Análise das condições gerais de vida

A bacia hidrográfica é dividida em trechos, formando as seguintes subdivisões:

**Alto rio das Velhas:** compreende toda a região denominada Quadrilátero Ferrífero, tendo o município de Ouro Preto como o limite Sul dessa região e os municípios de Belo Horizonte, Contagem e Sabará como limite ao Norte. Uma porção do município de Caeté faz parte do alto rio das Velhas, tendo a Serra da Piedade como limite Leste (Figura 7.46).

**Médio rio das Velhas:** ao Norte traça-se a linha de limite desse trecho da bacia coincidindo com o rio Paraúna, o principal afluente do rio das Velhas e, a partir de sua barra, segue para Oeste, na mesma latitude do divisor de águas ao Norte do córrego Salobinho, continuando pela linha divisória dos municípios de Curvelo e Corinto (Figura 7.47).

**Baixo rio das Velhas:** compreende, ao Sul, a linha divisória entre os municípios de Curvelo (apenas o distrito de Thomaz Gonzaga), Corinto, Monjolos, Gouveia e Presidente Kubitscheck e, ao Norte, os municípios de Buenópolis, Joaquim Felício, Várzea da Palma e Pirapora (Figura 7.48).

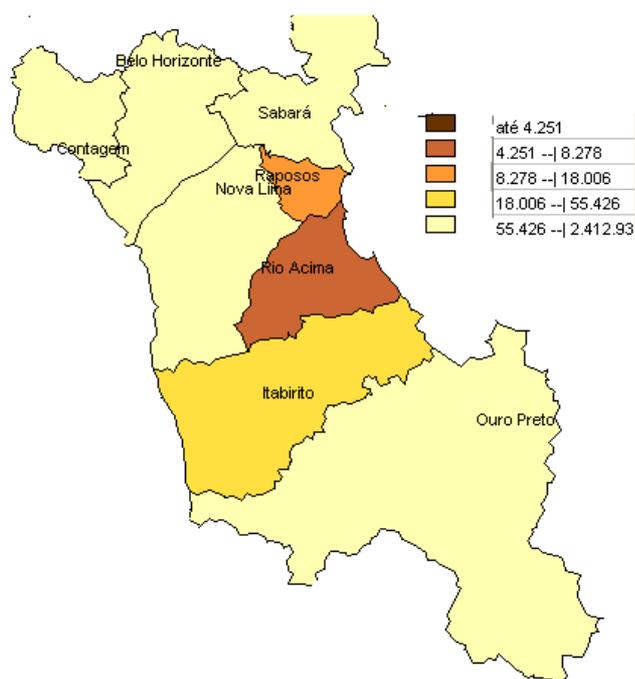


Figura 7.46. Municípios pertencentes ao trecho alto rio das Velhas.



expressiva atividade econômica, concentrada, principalmente, na região metropolitana de Belo Horizonte, onde estão presentes os maiores focos de poluição hídrica de toda a bacia. Os principais agentes poluidores são os esgotos industriais e domésticos não tratados e os efluentes gerados pelas atividades minerárias clandestinas atuantes nesta parte da bacia.

Os trechos médio e baixo rio das Velhas possuem características diferenciadas em relação ao uso e ocupação do solo do trecho alto, apresentando uma menor concentração populacional, com o predomínio das atividades agrícolas e pecuárias. Quanto à área de drenagem, a alta bacia contribui com cerca de 9,8% da área, a média bacia com cerca de 45% e a baixa bacia com 45,2% do total. No Quadro 7.18 estão os principais dados econômicos para as subdivisões da bacia.

Quadro 7.18. Estatísticas econômicas básicas dos municípios-sede em 2005

	<b>Sete Lagoas</b>	<b>Diamantina</b>	<b>Belo Horizonte</b>
PIB *	2.762.436	142.623	24.513.367
Valor adicionado na agricultura*	17.438	5.635	177
Valor adicionado na indústria *	1.720.571	32.068	7.860.574
Valor adicionado em serviços *	868.866	108.749	14.547.631
População**	205.833	44.238	2.350.564
PIB per capita ***	13.420	3.224	10.428
Taxa de cresc. do PIB per capita****	8,73	7,75	10,28

\* mil de reais, \*\*habitantes, \*\*\* mil reais, \*\*\*\* (% 1999-2004) Fonte: IBGE/Cidades

#### **7.4.3.2.1 - Grau de urbanização**

No período de 1970 a 1980 o grau de urbanização cresceu em todos os municípios do alto rio das Velhas, entretanto entre os anos de 1980 e 1991, os municípios de Nova Lima, Raposos, Sabará e Contagem apresentaram taxas decrescentes de urbanização. Belo Horizonte manteve praticamente o mesmo grau elevado de urbanização. O alto rio das Velhas apresentou, em todo o período estudado, taxas de urbanização com uma evolução de 96%, em 1970, para 97%, em 1996.

È possível constatar um aumento significativo na densidade demográfica em todos os municípios situados no alto rio das Velhas nos anos de 1970, 1980, 1991 e 1996, onde se observam as mais elevadas densidades demográficas (Belo Horizonte, com 6.300 hab/km<sup>2</sup> e Contagem, com 2.3519 hab/ km<sup>2</sup>, em 1996).

No médio rio das Velhas observa-se, também, um crescimento da densidade demográfica em todos os municípios, à exceção de Taquaraçu de Minas e Santana de Pirapama, no entanto em 1996 a quase totalidade dos municípios apresentou uma redução da densidade demográfica, à exceção de Pirapora, com 84 hab/ km<sup>2</sup>, Várzea da Palma, com 14

hab/ km<sup>2</sup>, e Datas, com 18 hab/ km<sup>2</sup>.

Com relação às condições sanitárias dos domicílios, observa-se que os municípios pertencentes ao alto rio das Velhas apresentam uma alta porcentagem de domicílios com canalização interna e água, sendo a média equivalente a 92,5%. Alguns municípios, como Raposos, Itabirito e Nova Lima, apresentam índices superiores a 95% dos domicílios com canalização interna.

Nos municípios pertencentes ao médio rio das Velhas essa porcentagem varia em 92%, em São José da Lapa, 91,27%, em Caeté, 90,18%, em Santa Luzia, 25,10% em Congonhas do Norte, 32,22% em Santana de Pirapama, 37,09% em Morro da Garça, 42,32% em Jequitibá, e 42,18% em Presidente Juscelino.

No baixo rio das Velhas a porcentagem de domicílios com canalização interna de água é bem menor se comparada com as demais regiões. À exceção de Pirapora, com 83,62%, Gouveia, com 79,91%, Corinto, com 72,05%, e Diamantina, com 68,79%, os demais apresentam uma porcentagem inferior a 50% de domicílios com água canalizada.

No que toca à instalação sanitária ligada à rede ou à fossa séptica, verifica-se que nos municípios do alto rio das Velhas mais de 60% dos domicílios têm instalação sanitária ligada à rede geral e fossa séptica, ao passo que os municípios do médio e baixo rio das Velhas apresentam uma situação precária, com índices em torno de 0,0% e 1,0%.

Vinte e dois dos trinta municípios localizados no médio rio das Velhas apresentam índices de domicílios com instalação sanitária inferiores a 50%, caracterizando uma situação de precariedade quanto ao saneamento básico.

A situação do baixo rio das Velhas é mais grave. À exceção de Datas, todos os municípios possuem índice de instalações sanitárias ligadas à rede pública ou fossas inferiores a 50%, e grande parte deles são totalmente desprovidos desses sistemas. Sob o ponto de vista de condições sanitárias, esta é a pior região da bacia hidrográfica do rio das Velhas.

No Quadro 7.19 apresenta-se os dados correspondentes à infra-estrutura urbana para alguns municípios da bacia.

Quadro 7.19. Infra-estrutura urbana (por valor absoluto e percentagem de domicílios não atendidos em 2000)

	Belo Horizonte	%	Diamantina	%	Sete Lagoas	%	MG	%
Total de domicílios	628.447	100	10.227	100	47.504	100	4765258	100
Domicílios sem água encanada	6.057	0,96	2.397	23,43	287	0,60	995613	20,9
Domicílios sem instal. sanitárias	2.316	0,36	1.140	11,14	533	1,12	240191	5,0
Domicílios sem coleta de lixo	776	0,12	28	0,27	106	0,22	1031593	21,6

Fonte: Ministério da Saúde/Datasus

#### 7.4.3.2.2 - Educação

A maior taxa da população alfabetizada encontra-se no alto rio das Velhas, variando de 86,66% em Rio Acima a 93,25%, em Belo Horizonte.

No médio rio das Velhas, a taxa de população alfabetizada varia de 65,33% em Congonhas do Norte a 90,92% em Sete Lagoas, ao passo que no baixo rio das Velhas esta taxa varia de 67,11% em Joaquim Felício a 86,39% em Gouveia.

A maior taxa da população atendida no ensino fundamental é encontrada em São José da Lapa (154,17%), seguida de Santana do Riacho (128,94%) e Funilândia (112,59%), sendo que os três municípios localizam-se no médio rio das Velhas. No médio rio das Velhas a referida taxa varia de 72,22% em Presidente Juscelino a 154,17% em São José da Lapa. Observe-se que as taxas de atendimento superiores a 100% refletem um atendimento que supera a população da faixa etária de 7 a 14 anos.

Pode-se afirmar que, de maneira geral, a taxa de atendimento ao ensino médio é bem menor do que a do ensino fundamental em todos os municípios das três sub-bacias.

No Quadro 7.20 apresenta-se os dados correspondentes à educação para alguns municípios da bacia.

Quadro 7.20: Indicadores selecionados de educação (2000)

Indicadores	Belo Horizonte	Diamantina	Sete Lagoas	MG
Taxa de Alfabetização	95,38	86,16	93,67	88,0
% pessoas com mais de 15 anos não alfabetizadas	4,63	13,84	6,33	11,5
Taxa bruta de frequência à escola	87,89	82,18	82,53	78,9

Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano/PNUD

### 7.4.3.2.3 - Saúde

De modo geral, pode-se afirmar que a infra-estrutura de serviços de saúde é bastante precária em toda a bacia do rio das Velhas.

A Organização Mundial de Saúde - OMS estabelece como recomendável a proporção de 5 leitos para cada mil habitantes. No alto rio das Velhas, que apresenta melhores índices quanto ao número de leitos, o município de Rio Acima apresenta 6,95 leitos por mil habitantes. Belo Horizonte conta com 5,34, Nova Lima com 4,23, Sabará com 2,58, Ouro Preto com 2,21, Itabirito com 2,20, Contagem com 1,39 e Raposos não possui leitos. No cômputo geral, a bacia do rio das Velhas dispõe de 3,8 leitos para cada mil habitantes.

No médio rio das Velhas, o município de Vespasiano apresenta o melhor serviço de atendimento considerando-se o número de leitos, pois conta com 17,85 leitos por mil habitantes, Conceição do Mato Dentro dispõe de 5,38 e Curvelo de 5,00. Treze municípios (44% do total) não dispõem de leitos.

No baixo rio das Velhas o atendimento é ainda mais precário, pois do total de 13 municípios mais de 50% não apresentam leitos. Os municípios da região que apresentam oferta de leitos são Diamantina, com 5,00, Datas, com 4,39, Gouveia, com 3,60, Corinto, com 3,33, e Várzea da Palma, com 1,06.

O mesmo padrão é observado no tocante ao número de médicos por habitante. O município melhor servido em número de médicos é Belo Horizonte, com 5,21 por mil habitantes. Nova Lima conta com 4,08, Vespasiano, com 3,49, e Araçá, com 3,07. Os municípios com índices inferiores situam-se no médio e no baixo rio das Velhas. No baixo rio das Velhas, do total de municípios, cerca de 44% possuem menos de 1,0 médico por mil habitantes.

O número de óbitos constatados em virtude de doenças do aparelho digestivo associadas à veiculação hídrica foi de 910 no alto rio das Velhas, 215 no médio rio das Velhas e 32 no baixo rio das Velhas, perfazendo o total de 1.157 óbitos em toda a bacia no ano de 1994. O município de Belo Horizonte apresentou o maior número de óbitos ocasionados por doenças infecciosas e parasitárias redutíveis por saneamento básico, com 242 casos. Contagem apresentou 47 óbitos, Jequitibá, 24, Sabará, 13 e Curvelo, 10.

No alto rio das Velhas foram constatados 320 óbitos, no médio, 107 e, no baixo, 25, perfazendo o total de 452 casos em toda a bacia.

No alto rio das Velhas foram registrados 512 casos de óbitos relacionados a outras doenças infecciosas e parasitárias, no médio, 201 e, no baixo, 50, perfazendo o total de 763 casos para toda a bacia. A soma total dos óbitos em toda a bacia do rio das Velhas resulta em

25.780 casos no ano de 1994. Destes, 3.275 foram provocados por doenças infecciosas e parasitárias e do aparelho digestivo, ou seja, doenças de veiculação hídrica, representando, portanto, 14,44% dos óbitos ocorridos.

Quanto à prevalência de esquistossomose, verifica-se um alto índice em alguns municípios, conforme levantamento recente realizado pela Fundação Nacional de Saúde. Destacam-se os municípios de Jaboticatubas, com índice de 30%, Baldim, com 25%, Nova União, com 10,8%, Conceição do Mato Dentro e Santa Luzia, ambos com 11%, São José da Lapa, com 9%, Jequitibá, com 7,9%, Ribeirão das Neves, com 5,7%, Lagoa Santa, com 4,7%, Santana do Riacho, com 3,8%, Contagem, com 2,5% e Matozinhos, com 2,3%.

Nos Quadros 7.21 e 7.22 apresenta-se os dados correspondentes à saúde e morbidade e incidência de doenças, respectivamente, para alguns municípios da bacia.

Quadro 7.21. Indicadores de saúde e morbidade (2000)

Indicador	Belo Horizonte	Diamantina	Sete Lagoas	MG
Esperança de vida ao nascer	70,52	68,70	70,56	70,5
Mortalidade até 1 ano de idade	27,25	32,75	26,99	27,8
Mortalidade até 5 anos de idade	29,83	35,83	29,55	55,5
Probab. de sobreviv. até 60 anos	80,50	77,35	80,65	80,5

Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano/PNUD

Quadro 7.22. Incidência de doenças (internações por tipo de doença em março de 2007)

	Belo Horizonte	%	Diamantina	%	Sete Lagoas	%	MG	%
Total de Internações	2977	100	265	100	507	100	92559	100
Doenças infec. e parasitárias	69	2,32	11	4,15	15	2,96	4708	5,1
Neopl. e tumores	137	4,6	12	4,53	27	5,32	5103	5,5
Doenças nutric. e metabólicas	18	0,6	13	4,9	7	1,38	2897	3,1
Doenças do aparelho circul.	350	11,76	33	12,45	72	14,2	11902	12,9
Doenças do aparelho respir.	111	3,73	24	9,06	20	3,94	13016	14,1
Doenças do aparelho digest.	167	5,62	30	11,32	64	12,62	8474	9,2

Fonte: Ministério da Saúde/Datasus

#### 7.4.3.2.4 - Atividades econômicas

Na bacia do rio das Velhas, o setor primário da economia não apresenta o mesmo quadro dos setores secundário e terciário (Quadro 7.23), entretanto ele mostra uma significativa evolução no que se refere à área plantada e aos volumes de produção.

Observa-se um aumento significativo no que diz respeito à área colhida, que passou de

78.227 hectares em 1990 para 116.153 ha em 1993, apresentando uma evolução expressiva de 48%, ainda que parte desse resultado possa ser creditada às possíveis melhorias introduzidas no sistema de informações e controle de safras.

As principais culturas encontradas na bacia do rio das Velhas são as de milho, feijão, cana-de-açúcar, arroz, banana, mandioca, café, laranja, soja e tomate. Assim como em todo o Estado de Minas Gerais, o principal produto cultivado na bacia do rio das Velhas é o milho, que respondeu por 49% da área colhida na bacia em 1993. O segundo produto mais importante na bacia, segundo o critério de área colhida, é o feijão, que respondeu por 17% da área colhida no ano de 1993. No período compreendido entre 1990 e 1993, as áreas colhidas de milho e feijão cresceram 29% e 22%, respectivamente. Entre os produtos que tiveram sua área colhida reduzida estão o arroz (-5%), a batata (-12%) e o feijão (-54%).

Apesar de apresentar um desempenho insatisfatório, a pecuária é uma atividade predominante ao longo da bacia do rio das Velhas, sendo a base econômica de pelo menos 12 municípios, localizados, em sua maioria, no médio e no baixo rio das Velhas.

Quanto à criação de animais, os rebanhos suínos e bovinos são os maiores da bacia, sendo que o município de Curvelo dispõe do maior número de cabeças de boi. Sete Lagoas destaca-se na criação de porcos, com cerca de 28.500 cabeças. A bovinocultura, no período de 1985 a 1994, caracterizou-se pelo aumento do efetivo e pela ampliação das áreas de pastagem plantadas. Merece destaque o crescimento significativo da pecuária leiteira que, em 1994, foi 65,13% superior em relação ao ano de 1984. Práticas como o uso de fertilizantes, corretivos, defensivos e mecanização proporcionam melhorias nos níveis de rendimento das pastagens; por outro lado, o uso inadequado pode comprometer todo o ecossistema.

A pecuária é a atividade mais importante do médio rio das Velhas, responsável por cerca de 75,34% da produção de suínos de toda a bacia e 57,90% da produção de bovinos.

O desempenho industrial dos municípios que compõem a bacia do rio das Velhas é de extrema importância no contexto de desenvolvimento econômico do Estado de Minas Gerais. Do total de pessoal ocupado e do número de estabelecimentos industriais de Minas Gerais no ano de 1985, 37% e 24%, respectivamente, concentram-se na região em estudo.

Destaca-se, ainda, que a participação relativa do pessoal ocupado na indústria dentro da sub-bacia do alto rio das Velhas respondia, em 1985, por 77% do total na região, concentrando 82% dos estabelecimentos industriais.

A partir dos dados relativos à distribuição do ICMS arrecadada em 1994, infere-se a posição de destaque dos municípios de Belo Horizonte e Contagem no total da bacia e de

Minas Gerais. Ressalta-se que esses dois municípios concentram quase 60% do total arrecadado na indústria de transformação.

O setor secundário no médio rio das Velhas tem importância relativamente menor, verificada por meio do índice de participação percentual do pessoal ocupado na indústria, que equivale a 20% na bacia. As maiores concentrações de pessoal ocupado na indústria na sub-bacia do médio rio das Velhas encontram-se nos municípios de Sete Lagoas, Santa Luzia, Pedro Leopoldo e Vespasiano.

O setor secundário do baixo rio das Velhas é irrelevante, considerando-se a bacia em sua totalidade. A participação do pessoal ocupado na indústria, em 1985, era de cerca de 4%, e apenas os municípios de Várzea da Palma, Pirapora e Diamantina têm alguma relevância no setor. A indústria que caracteriza Diamantina é a de fabricação de tapetes arraiolos, que são exportados, assim como algumas pequenas indústrias de transformação.

Quadro 7.23. Participação na arrecadação do ICMS por atividade econômica por sub-bacia (em porcentagem - 1994)

<b>Região</b>	<b>Minerária</b>	<b>Indústria</b>	<b>Comércio</b>	<b>Serviços</b>	<b>Primária</b>	<b>Outras</b>	<b>Total</b>
Alto	96,00	62,00	96,00	95,00	64,00	99,94	86,00
Médio	3,70	31,00	3,00	4,80	29,00	0,00	12,00
Baixo	0,20	7,00	1,00	0,20	7,00	0,00	2,00
Total	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: Núcleo de estatísticas municipais

Em decorrência do quadro de desenvolvimento do setor secundário, a arrecadação do ICMS do baixo rio das Velhas apresenta o insignificante percentual de 7% das indústrias de transformação da bacia.

As atividades do setor secundário da bacia, principalmente do alto rio das Velhas e de uma pequena parte do médio rio das Velhas, baseiam-se nas chamadas indústrias básicas, destinadas à exploração de recursos naturais, com grande relevância atribuída à atividade minerária, desenvolvida em grande escala.

Na distribuição da arrecadação do ICMS, em 1994, a atividade extrativa mineral prepondera no alto rio das Velhas, com 96% do total da arrecadação do setor. Há a presença desta atividade em todos os municípios da sub-bacia, com destaque para Nova Lima, Itabirito e Ouro Preto. O setor mineral sempre foi de extrema importância na história da industrialização da bacia. As riquezas minerais, especialmente o ferro e calcário, foram as responsáveis pela localização do parque transformador de bens minerais, principal pilar da economia estadual.

O setor terciário dos municípios que compõem a bacia do rio das Velhas assume

posição de destaque em Minas Gerais. A bacia era responsável por 45% do pessoal ocupado no setor de serviços em todo o Estado e por 34% do pessoal ocupado no comércio no ano de 1985. Esta situação demonstra condições relativamente favoráveis ao desenvolvimento econômico e urbano da região no contexto estadual.

Das três regiões, a do alto rio das Velhas destaca-se com 88% do pessoal ocupado no comércio e 90% do pessoal ocupado nas atividades de serviços. A população ocupada no comércio e no serviço no alto rio das Velhas concentra-se, basicamente, em Belo Horizonte, com índices de participação no total da bacia de 75% e 81%, respectivamente. Contagem ocupa a segunda posição, agregando 10% do pessoal ocupado no comércio e 7% nas atividades de serviço de toda a bacia do rio das Velhas.

No médio rio das Velhas, o setor terciário é bem mais modesto. A participação do pessoal ocupado no comércio e no setor de serviços é de apenas 9% e 8%, respectivamente.

Os municípios de Sete Lagoas, Lagoa Santa e Curvelo destacam-se com um nível de desenvolvimento terciário relativamente melhor que os demais municípios da sub-bacia. O estoque de mão-de-obra no setor de serviços é de 8% e, no comércio, de 10%.

O setor terciário do baixo rio das Velhas é bastante deficiente, com participação do pessoal ocupado no comércio e serviços equivalente a apenas 3% e 2%, respectivamente. O estoque de mão-de-obra no setor de comércio e serviços também é insignificante, e a participação da arrecadação nestes setores, dentro da bacia, é de apenas 1% no comércio e 0,2% em serviços.

#### 7.4.3.2.5 - Infra-estrutura regional

De toda a bacia hidrográfica, o alto rio das Velhas é a região com melhor infra-estrutura, não apenas em razão de sua maior concentração populacional, mas também por sua condição de desenvolvimento econômico, notadamente dos setores secundário e terciário.

Nos Quadros 7.24 e 7.25 são apresentados os indicadores de desenvolvimento humano e distribuição de renda a fim de verificar as condições socioeconômicas das subdivisões da bacia do rio das Velhas.

Quadro 7.24. Evolução dos indicadores de desenvolvimento humano

	Diamantina		Sete Lagoas		Belo Horizonte		MG	
	1991	2000	1991	2000	1991	2000	1991	2000
IDH-M	0,674	0,748	0,739	0,791	0,791	0,839	0,697	0,718
IDH-M Renda	0,594	0,668	0,654	0,714	0,779	0,828	0,652	0,711
IDH-M longev.	0,686	0,728	0,749	0,759	0,727	0,759	0,689	0,759
IDH-M Educação	0,742	0,848	0,815	0,900	0,866	0,929	0,750	0,850

Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano/PNUD

Quadro 7.25. Indicadores de distribuição de renda, 2000

	Diamantina	Sete Lagoas	Belo Horizonte	MG
Renda apropriada pelos 40% mais pobres	7,00	9,76	7,14	8,0
Razão entre a renda apropriada pelos 10% mais ricos e os 40% mais pobres	28,62	19,35	27,22	25,4
Índice de Gini (2000)	0,63	0,58	0,62	0,62
Índice de Gini (1991)	0,58	0,56	0,61	0,61
Intensidade da Pobreza	47,32	35,23	40,64	43,8
Porc. de pessoas com mais de 50% da renda proveniente de transf. govern.	14,25	12,58	13,02	13,9

Fonte: Atlas do desenvolvimento Humano/PNUD

#### 7.4.3.2.6 - Problemas ambientais na bacia

A bacia do rio das Velhas tem em seu histórico de ocupação uma intensa exploração de seus recursos naturais. Desde a chegada dos bandeirantes, à procura de ouro e de pedras preciosas, o rio das Velhas vem passando por um intenso processo de degradação. Além da mineração, outros fatores, como a atividade agropecuária e a urbanização, que se desenvolveram a partir da instalação dos povoados mineradores, principalmente no alto trecho, contribuíram para a alteração das características qualitativas e quantitativas das águas do rio das Velhas.

O uso e a ocupação do solo têm interferências diretas nos recursos hídricos. Na bacia do rio das Velhas, a partir das análises realizadas pelo Projeto Águas de Minas (2003), essas interferências são bastante claras. Algumas estações de amostragem na região do Quadrilátero Ferrífero demonstram uma concentração de metais (cobre, manganês e níquel) e sólidos em suspensão nos cursos d'água. Essas informações levam a crer que a principal atividade econômica naquela região, qual seja, a mineração, influencia diretamente a qualidade das águas.

Ao atravessar a região metropolitana de Belo Horizonte, o rio das Velhas recebe uma grande quantidade de efluentes domésticos e industriais, além de resíduos sólidos. O fator de pressão sobre os recursos hídricos nessa região é a urbanização. No baixo Velhas, além do somatório de todos os efluentes adquiridos a montante, também são adicionados efluentes gerados pela atividade agropecuária, que é mais abrangente nessa região.

Outro problema ambiental na bacia consiste na grande supressão da vegetação, tanto em topos de morros, quanto em encostas, vales dos rios e matas ciliares. Extensas áreas de vegetação nativa estão dando lugar às monoculturas, tanto nas práticas agrícolas como na silvicultura. Outro fator de pressão sobre a vegetação a merecer destaque é a expansão da urbanização por meio da implantação de grandes condomínios, principalmente na região metropolitana, abrangendo áreas de preservação ambiental como a APASUL e as áreas

cársticas no município de Lagoa Santa. A retirada da vegetação deixa o solo exposto, o que facilita sua remoção e transporte para os cursos d'água próximos, assoreando-os. Outro problema advindo do desmatamento é a fragmentação de habitats, que pode vir a prejudicar ou, até mesmo, levar à extinção de espécies endêmicas vegetais e animais.

De todas as bacias hidrográficas do Estado de Minas Gerais, a do rio das Velhas é a que detém o maior número de unidades de conservação, isto é, áreas protegidas e asseguradas por lei ou decreto. Esse maior número de áreas preservadas na bacia decorre, principalmente, da maior utilização e pressão sobre os recursos naturais existentes em comparação com outras bacias do Estado. Cita-se como exemplo a Área de Proteção Ambiental Sul de Belo Horizonte - APASUL, criada com o objetivo de controlar a expansão urbana nessa região, as explorações minerárias e, sobretudo, garantir maior proteção aos mananciais de abastecimento de água para a região metropolitana. As áreas de proteção ambiental, geralmente, são criadas para minimizar os efeitos da pressão externa sofridos por unidades de conservação de uso indireto, que podem localizar-se no interior daquelas áreas.

A ictiofauna existente no rio das Velhas também vem sofrendo impactos ambientais. Um primeiro fator, caracterizado como fator de interferência direto, é a qualidade da água. Muitas espécies desapareceram, pois não conseguem adaptar-se a mudanças bruscas das características químicas e físicas da água. Este fato é registrado, principalmente, na região metropolitana de Belo Horizonte, que detém o pior índice de qualidade das águas da bacia. Os outros dois fatores consistem na construção de barragens no curso dos rios, o que dificulta a migração e reprodução dos peixes, e a inserção de espécies exóticas, fato que desequilibra o ecossistema natural da ictiofauna pré-existente.

As ações antrópicas sobre o meio ambiente podem prejudicar ecossistemas, quando não orientadas adequadamente ou fiscalizadas por instituições que detêm competência para tal. A sociedade também possui papel fundamental na manutenção da qualidade do ambiente, sendo necessária sua colaboração na fiscalização, denúncia de atos que venham a prejudicar o meio ambiente e, também, em ações de respeito para com o ambiente. A educação ambiental é uma ferramenta importante, e deve ser disseminada por toda a bacia, pois sem o respeito ao meio ambiente não há qualidade de vida para a população.

#### **7.4.3.2.7 - Usos múltiplos dos recursos hídricos**

O conhecimento dos usos múltiplos é fundamental para o gerenciamento dos recursos hídricos, tendo em vista a possibilidade de identificação de conflitos potenciais. A bacia hidrográfica do rio das Velhas é caracterizada principalmente pela presença dos seguintes

tipos de uso dos recursos hídricos: abastecimento de água e diluição de efluentes, industrial, mineral e irrigação. Estes usos estão relacionados às atividades econômicas dominantes na bacia.

A geração de energia, a proteção e a preservação das comunidades aquáticas, o turismo e o lazer e a possibilidade de navegação no trecho Sabará-Jaguara Velha também se destacam, constatando-se, assim, a multiplicidade dos usos dos recursos hídricos na bacia do rio das Velhas.

#### **7.4.3.2.8 - Abastecimento de água e diluição de efluentes**

É necessária a intensificação de ações relativas ao saneamento básico na bacia, especialmente na região metropolitana de Belo Horizonte. A implementação da ETEONÇA, a agilização dos Programas Caça Esgotos (COPASA) e DRENURBS e do Plano Municipal de Saneamento de Belo Horizonte são ações imprescindíveis para a melhoria da qualidade de vida da população, o que refletirá em toda a bacia do rio das Velhas.

O abastecimento é o uso de água mais relevante da bacia. Há que se implementar, por parte das concessionárias, uma gestão dos serviços de abastecimento de água em relação ao controle de perdas. O abastecimento de água na bacia deve ter como meta a universalização dos serviços em seis anos, pois apesar do alto índice de cobertura nas sedes municipais, os distritos ainda possuem atendimento precário. O atendimento por rede coletora também necessita ser ampliado.

#### **7.4.3.2.9 - Irrigação**

É a atividade mais expressiva no trecho médio da bacia hidrográfica do rio das Velhas, com maior percentual de área mecanizada, responsável pela utilização de maior volume de insumos agrícolas - fertilizantes e pesticidas - e pela intensificação do potencial de erodibilidade, causando a degradação dos solos e graves problemas aos cursos d'água.

Do ponto de vista da utilização da água, a irrigação é ainda pouco expressiva e não se dispõe de informações mais atuais sobre os volumes e áreas irrigadas.

Os estudos do PROSAM, realizados por meio de projeção tendencial para o setor agrícola, estimaram para o ano de 2018 uma área plantada de 193.567 hectares e uma área irrigada de 6.074 hectares.

A irrigação constitui uma atividade passível de ser ampliada na bacia. Vislumbra-se, por isto, a necessidade de que seja iniciado um processo de controle e adequação das técnicas de produção utilizadas por meio de um Plano de Controle do Setor Agrícola. Nesse sentido

foram identificados investimentos no Plano Plurianual Federal - PPA para fomento ao uso racional da água na irrigação.

#### **7.4.3.2.10 - Industrial**

O setor industrial instalado na bacia do rio das Velhas é bem relevante para o desenvolvimento econômico e social do Estado de Minas Gerais, uma vez que se concentra na região metropolitana de Belo Horizonte e adjacências. A demanda para fins industriais é atendida, em grande parte, por meio de captações subterrâneas ou superficiais realizadas pelo próprio setor. Existem 25.120 empresas na bacia, o que corresponde a 26% das empresas do Estado. O número de empregos na bacia equivale a cerca de 245.596, o que corresponde a 33,4% dos empregos no estado. O PIB industrial na bacia do rio das Velhas representa 29,4% do PIB industrial do Estado (FIEMG/2004). As empresas de grande porte estão continuamente se adequando à legislação ambiental; entretanto as empresas de médio e pequeno porte e micro-empresas ainda necessitam de maiores informações, bem como de assistência técnica para o cumprimento da legislação ambiental.

#### **7.4.5.1.11 - Mineração**

Caso não seja desenvolvida com fundamento nos princípios da sustentabilidade, a atividade de mineração pode revelar-se como uma das fontes mais expressivas de degradação dos corpos d'água, tanto pelas substâncias químicas utilizadas no processo de exploração, quanto pelas altas taxas de carreamento de sólidos em suspensão. A poluição e o assoreamento dos cursos d'água são considerados as formas mais sérias de dano ambiental associado à lavra e ao processamento de minérios. Os parâmetros de qualidade de efluentes podem ser alterados de diversas formas. Substâncias químicas adicionadas durante o processamento de minérios ou produtos químicos resultantes da interação dos minerais com água de processo representam dois exemplos da influência da mineração na qualidade das águas. Problemas de poluição diferentes precisam ser resolvidos empregando métodos e tecnologias apropriadas de controle.

As mineradoras de grande porte, organizadas, já incorporaram em seu sistema de gestão a variável ambiental, o que possibilitou a exploração dos recursos minerais segundo os princípios da sustentabilidade. No Quadrilátero Ferrífero podem ser citadas algumas dessas empresas que são exemplares, tendo sido inclusive reconhecidas pelo ente ambiental do Estado e certificadas na ISO-14000, como a MBR, SAMARCO, ALCAN, dentre outras. As empresas de pequeno porte e os garimpos, pelo custo elevado do controle ambiental ou pela

falta de sensibilidade ecológica, ainda não internalizaram a variável gestão de meio ambiente em suas operações, constituindo um grave e sério problema ambiental, principalmente para os recursos hídricos. Nestes casos, um diagnóstico da situação e o planejamento de ações devem ser implementados pela entidade pública ambiental com vistas à regularização dessas empresas e à revitalização da bacia do rio das Velhas. Um Plano de Controle do Setor Mineral, associado à recuperação ambiental de áreas afetadas pelas atividades de mineração, torna-se atividade significativa para minimizar o passivo ambiental causado pelo segmento.

A mineração sobressai-se como uma das atividades econômicas mais importantes da bacia do rio das Velhas. É responsável por 22% do PIB do Estado de Minas Gerais, sendo 71% no alto, 21% no médio e 8% no baixo rio das Velhas. Atualmente, só a mineração do ferro nesta bacia é responsável por 13% do pessoal da indústria extrativa mineral do Brasil, o que representa no setor mais de 13.000 empregos, sendo que cada três empregos gerados na mineração proporcionam um emprego indireto e sete empregos na cadeia produtiva.

As reservas de minério de ferro inferidas do Brasil são da ordem de 18,5 bilhões de toneladas, das quais 81% localizam-se em Minas Gerais. A produção anual brasileira deste minério atinge o valor de R\$ 3,6 bilhões "in situ mina", sendo superado apenas pelo petróleo. Contribui com R\$ 50 milhões/ano para o CEFEM (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais) e R\$ 52 milhões para o imposto sobre a circulação de mercadorias e serviços. Dos valores acima, tanto a produção quanto os impostos, 30% são gerados na bacia do rio das Velhas. A exportação anual brasileira de minério de ferro é da ordem de 156 milhões de toneladas, alcançando o valor de U\$ 3 bilhões e 48 milhões (FOB) da pauta de exportações. Nestes valores, a bacia do rio das Velhas tem uma expressiva participação.

#### **7.4.3.2.12 - Identificação de conflitos potenciais**

Os usos múltiplos na bacia do rio das Velhas causam conflitos entre si, e são mais evidentes quando analisados sob o ponto de vista qualitativo. Destaca-se a diluição de efluentes, concorrendo com os usos mais nobres como o abastecimento de água, recreação de contato primário e proteção e preservação da comunidade aquática, o que vem gerando a mortandade de peixes na bacia.

Em relação ao aspecto quantitativo, a demanda de água na bacia do rio das Velhas, resguardado o critério de outorga atualmente aplicado em Minas Gerais, supera fortemente a disponibilidade hídrica. Verifica-se, também, que o critério para o cálculo da disponibilidade hídrica é bastante restritivo para a bacia, no entanto os conflitos gerados pela demanda de

água não surgem apenas do uso de critérios restritivos, pois a distribuição das demandas não é uniforme ao longo da bacia.

Conforme a distribuição das outorgas na bacia e partindo-se da premissa de que as demandas reais seguem o mesmo padrão de distribuição nota-se que na região com menor disponibilidade hídrica concentram-se as maiores demandas de água. Com efeito, entre as latitudes 19° e 21°, região a montante da bacia, a densidade de outorgas é bastante superior ao restante da bacia. Essa região é a que possui menor quantidade de água, uma vez que é uma região de nascentes e de cursos d'água de pequeno porte.

Além disso, a região a montante da bacia é a que concentra a maior densidade populacional e maior capacidade de investimento. Isto impulsiona o consumo de água e, conseqüentemente, o exaurimento dos recursos naturais.

Somado ao quadro apresentado, há predominância de usos diversos em diferentes regiões da bacia. A região metropolitana de Belo Horizonte concentra o uso para abastecimento humano, a região central da bacia concentra usos industriais e a região a jusante concentra usos agropecuários e industriais.

Em relação às águas subterrâneas, são destacadas duas áreas da bacia do rio das Velhas onde já existem grandes conflitos pelo uso, e que requerem prioridade para seu o gerenciamento devido à sua importância regional.

A demanda pelo uso da água para abastecimento da RMBH, o intenso desenvolvimento da atividade minerária, a crescente ocupação urbana e a forte expansão imobiliária por condomínios residenciais de classe alta e de lazer vêm configurando um cenário de aparente incompatibilidade de usos na região, que tende a gerar conflitos de interesse inconciliáveis; e com grande repercussão nas questões socioeconômicas da região.

#### **7.4.3.3 - O modelo básico de simulação**

Para construir e simular o modelo dinâmico da bacia, bem como proceder à sua calibração e análises de possibilidade de conflitos no uso de água foi utilizado o software VENSIM (versão DSS) da Ventana Systems. Utilizando esse software, um modelo de simulação pôde ser construído para verificar a dinâmica da população ao longo dos anos e a evolução da demanda por água em contraposição à disponibilidade hídrica da bacia. Na Figura 7.49 está representada uma vista do modelo que corresponde à subdivisão do alto rio das Velhas.

A população foi dividida em cortes de faixa etária onde cada corte possui uma taxa de mortalidade. A dinâmica começa com os nascimentos que são dados pela fertilidade total, que

é o número de filhos que as mulheres têm em média, vezes a população de 15 a 49 anos multiplicada por 0.5, que indica as mulheres em período fértil, tudo isso dividido pelo período fértil que são 35 anos da vida da mulher. Os que nascem são transferidos para o primeiro corte de 0 a 14 anos, se juntando aos que lá já estão, pois cada corte já possui um valor inicial. Neste corte são submetidos à taxa de mortalidade dessa faixa etária e os que passam de 14 para 15 anos, ou seja passam pelo período de maturação, são transferidos para o segundo corte. O período de maturação é um cálculo feito para se obter quantas pessoas passam de uma determinada idade crítica para o próximo corte, neste caso de 14 para 15 anos, é a população total multiplicada por 1 subtraído da taxa de mortalidade, ou seja, os que sobrevivem, dividido por 15, que é o número de faixas etárias nesse corte.

Esse mesmo processo ocorre em todos os cortes populacionais até os idosos de 70 anos e acima. A população total é obtida pelas populações de cada corte em cada período de tempo, e as mortes de cada corte contribuem para as mortes do total da população. Assim, por exemplo, em cada período de um ano, tem-se a dinâmica populacional, com nascimentos e mortes totais obtidos através da especificação de cortes populacionais, e também o comportamento desses cortes. Foi incluída como variável de influência na dinâmica populacional a migração de pessoas para a região analisada em função do crescimento econômico obtido por ela. Foi obtido um índice de efeito do crescimento do Produto Interno Bruto industrial na imigração através de uma variável lookup que compara o crescimento percentual do PIB industrial da região com o crescimento percentual do PIB de Minas Gerais. Assim, foi considerado que se o PIB industrial da região cresce mais percentualmente que o PIB industrial de Minas Gerais há migração de outras localidades mineiras para essa região.

Devido à preponderância da atividade mineradora na bacia rio das Velhas foi colocada no modelo a variável *demanda por água pela mineração* que somada a *demanda por água para abastecimento urbano* formam a demanda por água total na bacia. Estas variáveis representam os dois principais usos da água e traduzem de forma significativa a maior parte do consumo de água em cada subdivisão da bacia do rio das Velhas. A demanda total por água foi comparada à disponibilidade hídrica de cada subdivisão da bacia a fim de verificar se existe déficit hídrico na região.

Alto rio das Velhas

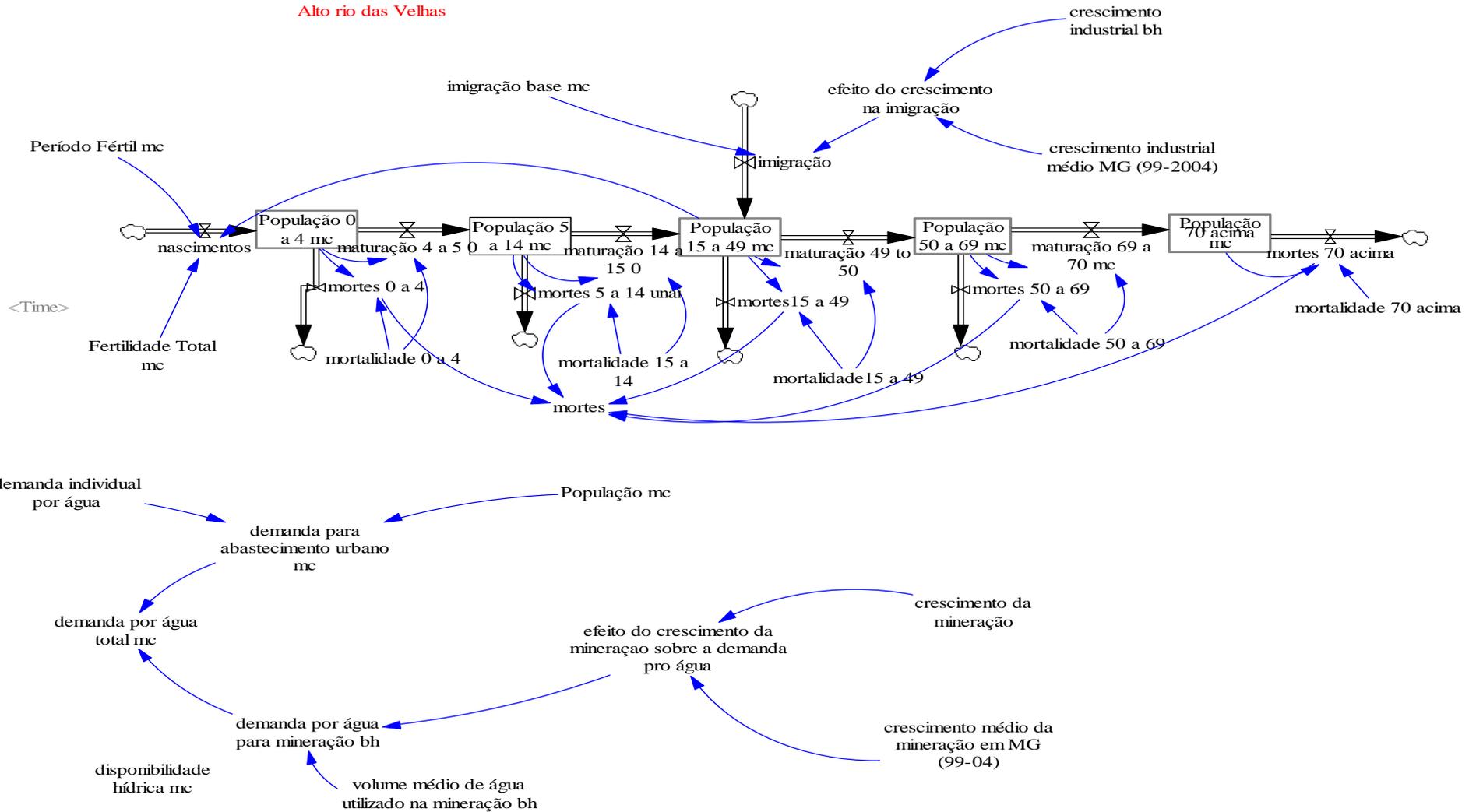


Figura 7.49. Modelo geral construído para a bacia do rio Verde Grande.

#### 7.4.3.4 - Simulações

O modelo populacional, simulado para o período de 1999, data em que se inicia a série de dados, até o ano de 2020, evidencia que a base de recursos será pressionada pelo aumento da população da região, o que demandará investimentos em infra-estrutura urbana e saneamento básico, além de uma política de gerenciamento dos recursos hídricos eficiente.

As Figuras 7.50 a 7.52 ilustram a evolução da demanda total por água em contraposição à disponibilidade desse recurso para todas as subdivisões da bacia. A situação para a região alto rio das Velhas é apresentada na Figura 7.50.

A região do alto rio das Velhas apresenta a maior densidade populacional da bacia, pois concentra municípios de grande porte, como Belo Horizonte, Betim, Montes Claros, dentre outros. Também é a região onde se concentram a maior parte dos estabelecimentos industriais da bacia, com grande destaque para a atividade minerária, pois fazem parte desta sub-bacia municípios como Ouro Preto e Itabirito, onde a mineração é uma das principais atividades econômicas.

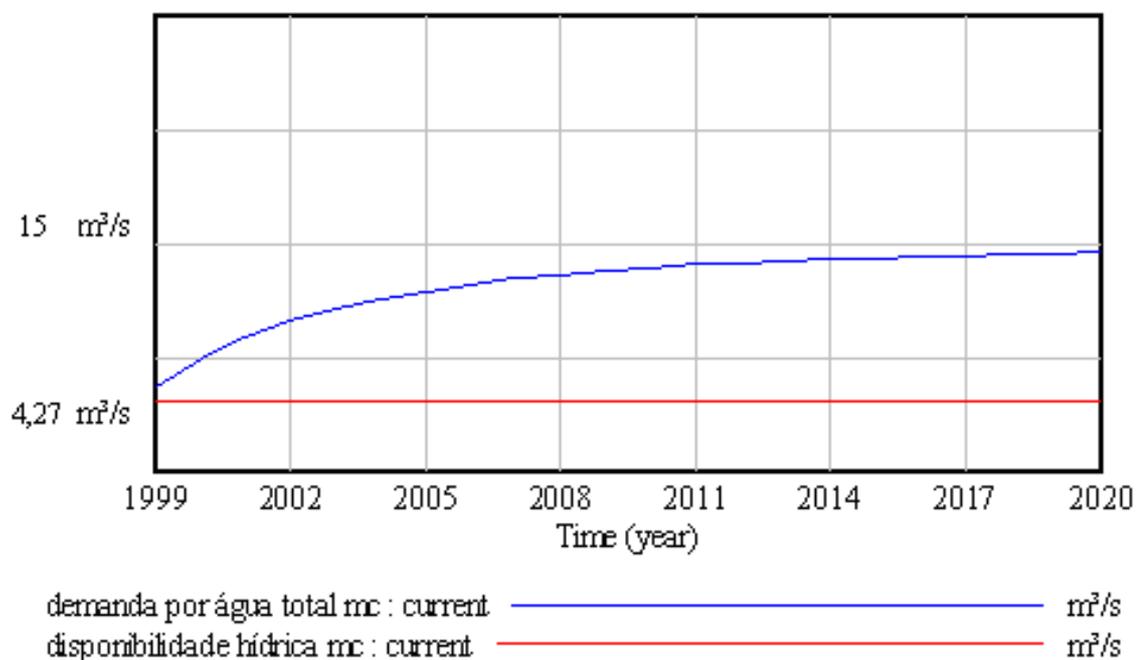


Figura 7.50. Comparação entre demanda total por água e disponibilidade hídrica na região do alto rio das Velhas.

O alto rio das Velhas é a região com melhor infra-estrutura, pois apresenta o maior desenvolvimento econômico, notadamente dos setores secundário e terciário. Por apresentar características como maior concentração populacional e industrial, principalmente do setor

minerário, é a região que apresenta a pior situação quando se compara sua demanda total por água e sua disponibilidade hídrica. Através da simulação pode-se perceber que a demanda por água é bem maior que disponibilidade desse recurso, e esta situação tende a se agravar ao longo do tempo, a demanda por água em 2020 foi estimada em 15 m<sup>3</sup>/s, enquanto que a disponibilidade hídrica outorgável é de apenas 4,27 m<sup>3</sup>/s. Assim, essa região que já apresenta conflitos pelo uso da água, pode ter sua situação agravada caso não ocorram medidas para conter tal demanda por água. Some-se a isso a questão da qualidade da água, já que não se trata apenas de um problema quantitativo, mas também qualitativo, na medida em que a atividade minerária causa grandes danos à qualidade das águas da bacia.

A simulação para a sub-bacia médio rio das Velhas encontra-se na Figura 7.51.

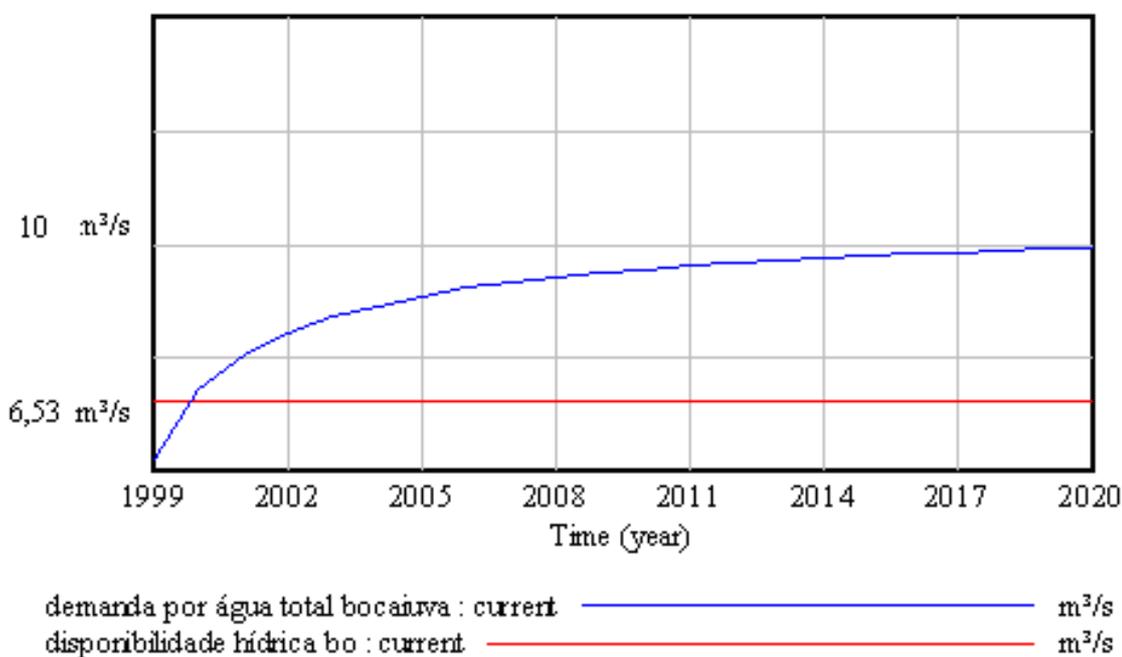


Figura 7.51. Comparação entre demanda total por água e disponibilidade hídrica na região do médio rio das Velhas

Esta sub-bacia também apresenta um crescimento populacional considerável, porém em menor intensidade se comparado ao alto rio das Velhas. Os municípios que compõe essa região são de menor porte, com exceção de Sete Lagoas e Santa Luzia. A pecuária é a principal atividade econômica da região e o setor minerário tem uma pequena participação na economia da região. Contudo, devido à tendência de crescimento, tanto populacional quanto industrial, a região já apresenta uma demanda total por água maior que a disponibilidade hídrica, apresentando possíveis riscos de conflitos pelo uso na água nos próximos anos, como se pode constatar pela simulação. Para esta sub-bacia foi estimada uma demanda total por

água em 2020 de 10 m<sup>3</sup>/s, enquanto que a disponibilidade hídrica outorgável é de 6,53 m<sup>3</sup>/s.

A situação para a sub-bacia baixo rio das Velhas é apresentada na Figura 7.52. Esta região apresenta a menor densidade populacional da bacia, concentrando municípios que apresentam cerca de oito mil a dezoito mil habitantes. Apresenta também os piores índices de infra-estrutura e saneamento, bem como um desenvolvimento econômico bem restrito. O setor secundário é irrelevante na região quando comparado às outras regiões da bacia, o setor terciário também é bastante ineficiente.

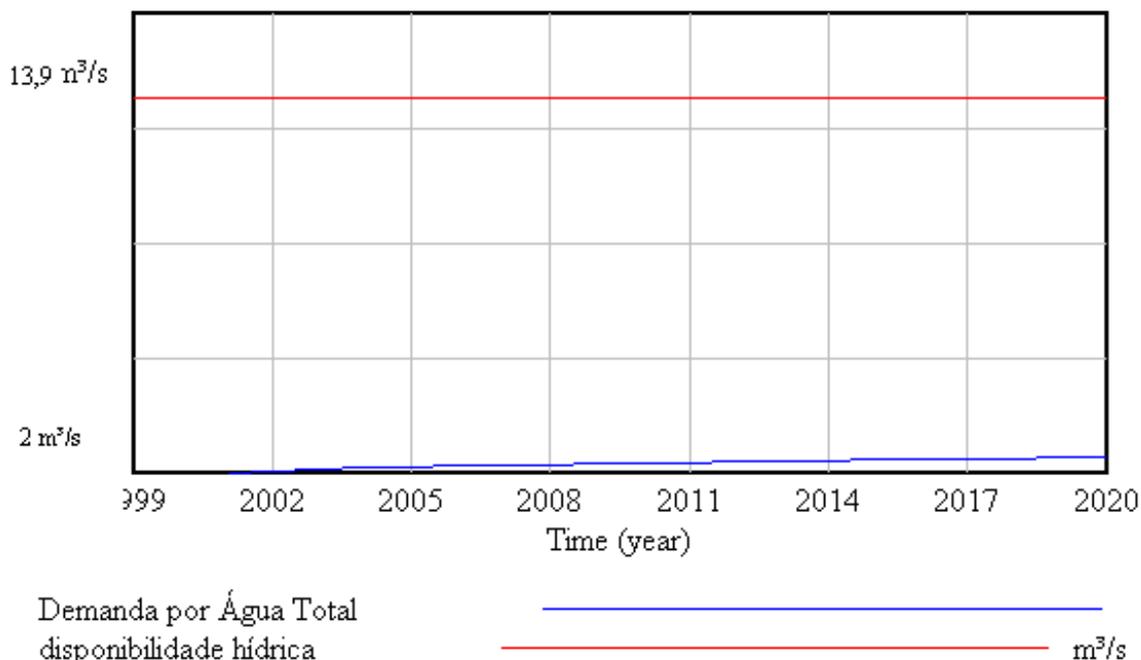


Figura 7.52. Comparação entre demanda total por água e disponibilidade hídrica na região do baixo rio das Velhas.

Assim, com todas essas características, esta sub-bacia é a única em que a disponibilidade hídrica supera em grande quantidade a demanda total por água, pois com uma densidade populacional pequena e um setor industrial irrelevante a demanda por água é pequena nesta região. Enquanto a disponibilidade hídrica na região é de 13,9 m<sup>3</sup>/s, a demanda total por água estimada continuará em 2 m<sup>3</sup>/s.

#### 7.4.3.5 - Conclusões

Com o modelo dinâmico geral buscou-se mostrar como a dinâmica social na região da bacia depende da dinâmica ambiental - o potencial de conflitos, por exemplo, depende do grau de degradação da bacia, como uso da terra e da água - e como esta última é determinada, em última instância, pela ação de indivíduos buscando atender seus interesses econômicos. É

importante observar que a ação individual racional pode gerar resultados coletivos desastrosos em termos de utilização de recursos comuns, como a água.

A bacia do rio das Velhas apresenta um histórico de conflitos pelo uso da água, sendo que a situação se torna mais agravada na medida em que se considera a grande importância econômica da região, em que a atividade minerária é determinante. O problema se concentra justamente nesse ponto, já que esta atividade econômica, além de demandar grande quantidade de água, também causa grandes danos na qualidade da água.

Quanto à população, a evolução desta e o conseqüente aumento na demanda para abastecimento urbano, também é bastante preocupante, pois à medida que a região cresce economicamente, ela acaba atraindo mais pessoas e pressiona ainda mais a demanda por água.

Diante de tal quadro, somente a partir de um sistema eficiente de gestão integrada, que busque a convergência de interesses dentre os principais usuários da água na bacia, introduzindo regras bem definidas de utilização da água, será encontrado o caminho para o gerenciamento dos conflitos na região, que podem se agravar com o crescimento da população e das atividades econômicas.

## **7.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AXELROD, R.(1997) The complexity of cooperation - agent based models of competition and collaboration. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- BARDHAN, P. (2000) Irrigation and cooperation: an empirical analysis of 48 irrigation communities in South India. *Economic Development and Cultural Change*, vol. 48 (4), July.
- BERKES, F; FOLKE,C. (2000) Linking social and ecological systems- management practices and social mechanisms for building resilience. New York: Cambridge University Press.
- BECKER, C. D. e E. OSTROM (1995) Human Ecology and resource sustainability: the importance of institutional diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics.*, vol. 26.
- FORRESTER, J. (1969) *Urban Dynamics*. Waltham, MA: Pegasus Communications.
- HARDIN, G. (1968) The tragedy of the commons. *Science*, 162.
- OSTROM, E. (2000). Collective action and the evolution of social norms. *Journal of Economic Perspectives*, vol. 14 (3), Summer.
- PUTNAM, R.(1993) *Making democracy work - civic traditions in modern Italy*. Princeton: Princeton University Press.
- Senge, P (2002). *A Quinta disciplina*. São Paulo: Abril Cultural.
- STERMAN, J. (2000) *Business Dynamics*. Boston: Irwin McGraw-Hill (1989) *Modeling*

managerial behavior: misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Management Science* 35(3).

TANG, S. Y.(1991) Institutional arrangements and the management of common-pool resources. *Public Administration Review*, vol. 51 (1).

VENTANA SYSTEMS Inc.(2005) Vensim version DSS 5.5.

## **CAPÍTULO 8**

### **AVALIAÇÃO, PARA AS BACIAS DO RIO PRETO E DO RIBEIRÃO ENTRE RIBEIROS, DO IMPACTO DO USO DO SOLO E DAS MUDANÇAS OCORRIDAS NESTE NO REGIME HÍDRICO DAS BACIAS**

Marcelo de Oliveira Latuf  
Mauro Aparecido Martinez  
Demetrius David da Silva  
Fernando Falco Pruski  
Paulo Roberto Cecon

## 8.1 - INTRODUÇÃO

Uma das questões que envolvem a problemática ambiental mundial diz respeito às reservas de água doce, em quantidade e qualidade, capazes de suprir o consumo humano atual e futuro. Deste modo, discutir e propor soluções para os problemas relativos às bacias hidrográficas, visando o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, o desenvolvimento sustentável nos meios urbanos e rurais, a segurança alimentar e a qualidade ambiental, são ações inerentes a toda sociedade.

Neste sentido, o planejamento da ocupação de uma bacia hidrográfica é necessário em uma sociedade com usos crescentes por água, tendo em vista os conflitos sobre a disponibilidade deste recurso para atender ao aumento da demanda em quantidade e qualidade.

Entretanto, a maioria das relações entre o uso do solo e recursos hídricos tem sido marcada pelo insucesso, com prejuízos significativos para o ambiente, o que tem se transformado em perdas para toda coletividade. A degradação dos rios tem sido um dos preços pagos pelo desenvolvimento urbano e rural descomprometido com o ambiente (MACHADO, 1998).

Desta forma, o mau uso do solo têm sido um dos principais fatores agravantes da aceleração de processos erosivos, bem como da perda de fertilidade dos solos agricultáveis, da poluição de corpos hídricos, do assoreamento de barragens, do aumento das freqüências de vazões de enchente e no aumento dos custos de tratamento de água, dentre outros.

Assim, modificações no regime de vazões de uma bacia hidrográfica podem ser decorrentes de mudanças do tipo de uso do solo, da variabilidade climática, de construção de barragens ou de aumento da irrigação, dentre outros fatores. A troca de uma cobertura por outra altera o comportamento hidrológico na bacia hidrográfica, tendendo a alterar o comportamento das vazões (COSTA *et al.*, 2003).

A análise do comportamento hidrológico decorrente de mudanças nas condições de usos do solo ou modificações destes é de grande importância para a gestão de recursos hídricos, sobretudo para a determinação de disponibilidades hídricas atuais e futuras.

Um grande complicador nos estudos relacionados às modificações do uso do solo em bacias hidrográficas é que a maioria dos modelos hidrológicos não possuem condições de simular modificações no uso do solo (TUCCI, 1998). Esta dificuldade está relacionada justamente ao fato de alguns parâmetros hidrológicos não serem estacionários, ou seja, a variabilidade temporal e espacial de seu comportamento é justificada, entre outros, pelas

diferentes formas de uso do solo, que certamente acarretarão alterações na superfície, tendo impactos sobre comportamento hidrológico.

Deste modo, o conhecimento do comportamento espacial e temporal destes parâmetros é de suma importância para subsidiar a tomada de decisão na gestão de recursos hídricos, uma vez que permite quantificar a disponibilidade dos recursos hídricos no tempo e no espaço, ou seja, identificar áreas em que este recurso se encontra ou pode vir a se tornar escasso (RODRIGUEZ, 2004).

Neste contexto, inserem-se as bacias hidrográficas do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros, afluentes do rio Paracatu, que drenam uma área de aproximadamente 14.149km<sup>2</sup>, dos quais 74,87% (10.621km<sup>2</sup>) encontram-se no Estado de Minas Gerais, 15,71% (2.212km<sup>2</sup>) no Estado de Goiás e 9,42% (1.316km<sup>2</sup>) no Distrito Federal.

Mudanças no uso do solo ocorreram com maior amplitude, principalmente quando impulsionadas pelo avanço da fronteira agrícola, que foram incentivados desde a década de 1970, com o Plano de Desenvolvimento Integrado do Noroeste Mineiro, o PLANOROESTE.

De acordo com RODRIGUEZ (2004) o principal segmento consumidor de água na bacia do rio Paracatu foi a irrigação, que teve no ano de 1996, último ano de censo agropecuário, um consumo superior a 85% e 92% do total da vazão consumida na bacia do rio Preto e do ribeirão Entre Ribeiros, respectivamente.

Deste modo, como consequência da grande expansão da agricultura irrigada, sérios conflitos têm surgido em várias partes da bacia do Paracatu, principalmente nas sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto, concentrando 53% de toda a área irrigada da bacia do Paracatu (RODRIGUEZ, 2004).

Tendo em vista o complexo quadro de conflitos pelo uso da água existente nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros, o presente trabalho teve como objetivos: avaliar as mudanças ocorridas no uso do solo no período de 1985 a 2000, analisar o comportamento das variáveis hidrológicas e associar as modificações no uso do solo ao comportamento hidrológico destas bacias.

## **8.2 - MATERIAL E MÉTODOS**

### **8.2.1 - Uso do solo nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros**

O período de monitoramento do uso do solo nas bacias hidrográficas do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros foi de 1985 a 2000, sendo que a escolha do ano de 2000 deveu-se ao fato de que o mesmo representa o último ano em que todas as estações fluviométricas na bacia

do Paracatu possuem dados consistidos de vazão em suas seções, segundo a base de dados da ANA (ANA, 2005). Já o principal fator para a escolha do ano de 1985 decorre das características do tipo de sensor, já que a partir desta data, o sensor Landsat 5 TM com a resolução espacial de 30 m entrou em operação e continua até hoje.

Neste estudo foram utilizadas 27 imagens, em três órbitas/ponto, do sensor Landsat 5 TM abrangendo os anos de 1985 a 2000, sendo as mesmas intercaladas bianualmente. Desta forma, o monitoramento do uso do solo nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros contou com nove anos (1985, 87, 89, 91, 93, 95, 96, 98 e 2000).

Na seleção de quais órbitas/ponto recobriam a área de estudo foi solicitada uma listagem preliminar de imagens junto à DGI/INPE, <http://www.dgi.inpe.br>, conforme coordenadas geográficas limítrofes da área de estudo, para a realização da seleção das melhores datas de passagem do sensor sobre a área, considerando a menor cobertura de nuvens possível.

A partir deste critério pôde ser observado que as melhores datas das imagens eram correspondentes aos meses de estiagem (abril a agosto), devido à menor taxa de cobertura de nuvens na região. Na Figura 8.1 é apresentado o mapa que mostra a região de estudo, assim como o recobrimento das órbitas/ponto sobre a mesma.

A listagem das imagens selecionadas para a elaboração dos mapas de uso do solo, contendo informações sobre ano, órbita/ponto e data da passagem do sensor é apresentada no Quadro 8.1.

As imagens do sensor Landsat 5 TM foram adquiridas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com o máximo de correções possíveis (Nível 1G), para que fosse minimizado o tempo de pré-processamento e/ou ajustes das mesmas.

Nestas correções, a DGI/INPE utiliza-se das efemérides do sensor (características de altitude, velocidade, posicionamento, dentre outras) para a realização das correções radiométricas, assim como, para as correções geométricas, com apoio de pontos de controle terrestres. No Quadro 8.2 visualiza-se as características das imagens selecionadas para este trabalho.

Na Figura 8.2 é apresentado um exemplo das imagens do sensor Landsat 5 TM, na qual observa-se as três bandas selecionadas para o estudo: bandas 3, 4 e 5, assim como a composição escolhida para as imagens (R4, G5 e B3).

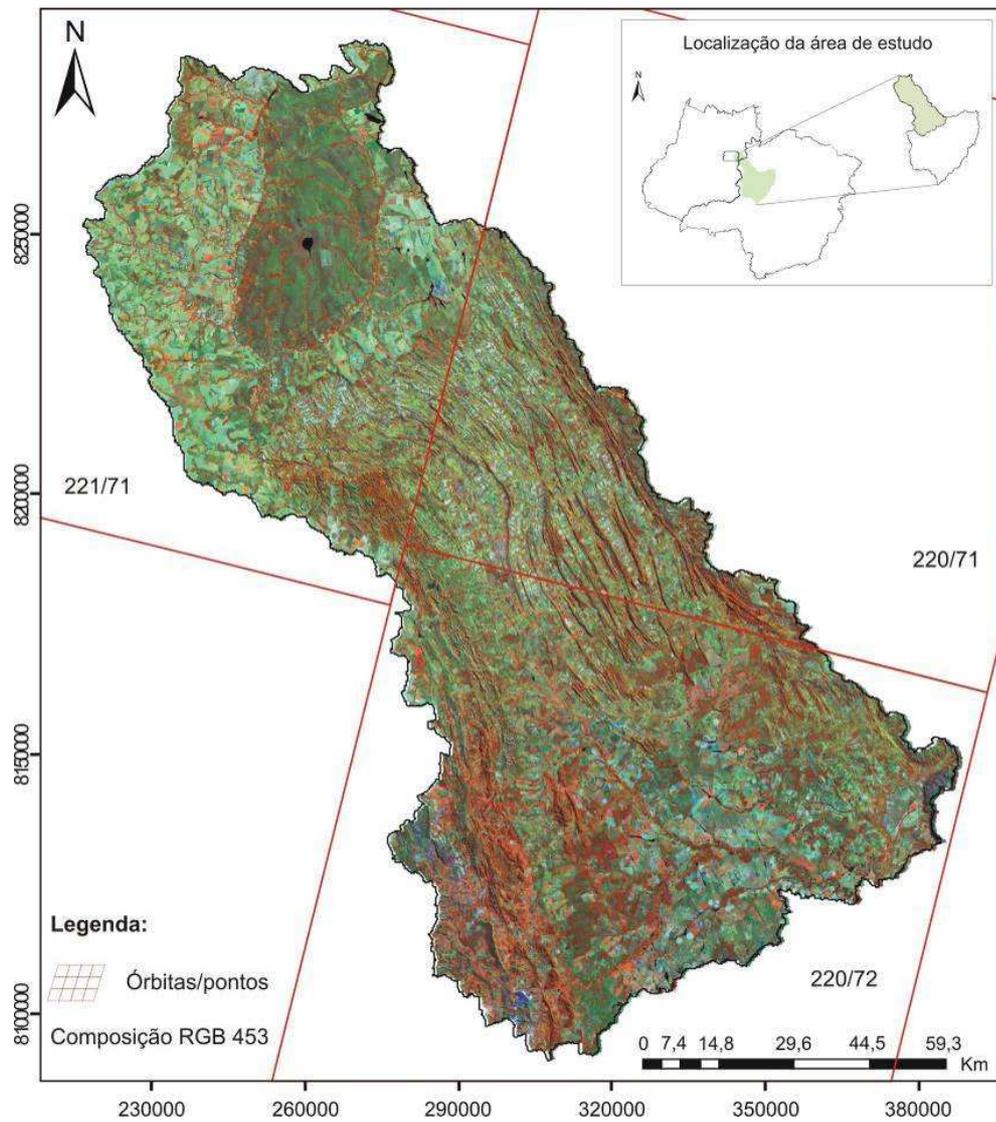


Figura 8.1. Cobertura do sensor Landsat 5 TM na área de estudo.

Quadro 8.1. Listagem das imagens do sensor Landsat TM utilizadas

<b>Ano</b>	<b>Órbita/ponto</b>	<b>Data de passagem</b>
1985	220/71	09/07/1985
	220/72	22/05/1985
	221/71	27/04/1985
1987	220/71	15/07/1987
	220/72	15/07/1987
	221/71	20/06/1987
1989	220/71	20/07/1989
	220/72	17/05/1989
	221/71	08/05/1989
1991	220/71	23/05/1991
	220/72	23/05/1991
	221/71	02/08/1991
1993	220/71	28/05/1993
	220/72	28/05/1993
	221/71	20/06/1993
1995	220/71	03/06/1995
	220/72	03/06/1995
	221/71	10/06/1995
1996	220/71	04/05/1996
	220/72	04/05/1996
	221/71	27/05/1996
1998	220/71	13/07/1998
	220/72	13/07/1998
	221/71	02/06/1998
2000	220/71	26/03/2000
	220/72	30/04/2000
	221/71	05/06/2000

Fonte: Catálogo INPE (2006).

Quadro 8.2. Informações sobre as imagens adquiridas

<b>Característica</b>	<b>Especificação</b>
Resolução espacial	30m
Formato	Geotiff
Bandas	3, 4 e 5
Datum horizontal	Córrego Alegre (zona 23 S)
Projeção	UTM
Nível de correção	1 G (radiométrica e geométrica)

Fonte: Catálogo INPE (2006).

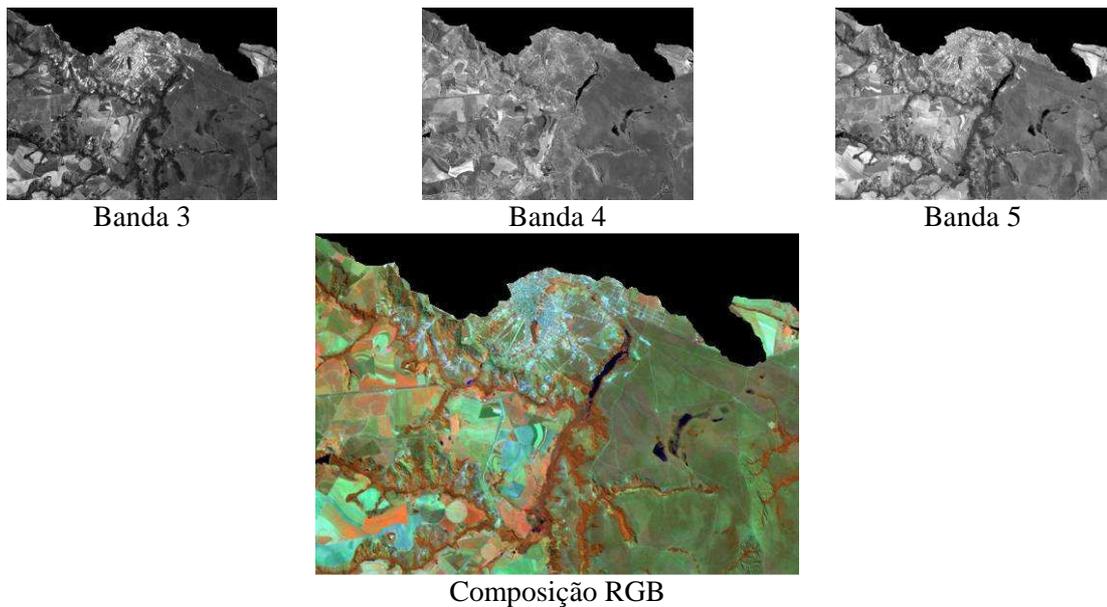


Figura 8.2. Bandas do sensor Landsat TM e sua composição R(4) G(5) B(3).

### 8.2.2 - Processamento digital das imagens

As imagens passaram por procedimentos de processamento digital utilizando o Sistema de Informação Geográfica SPRING 4.2 (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), desenvolvido por INPE (2005), que compreende: realce de histograma, filtragem, verificação da correção geométrica ou registro de imagens, segmentação, definição de amostras, classificação digital e, finalmente, verificação da exatidão do mapa temático elaborado.

A etapa de processamento digital das imagens obtidas pelo sensor Landsat 5 TM para a elaboração dos mapas de uso do solo das diferentes épocas imageadas foi realizada conforme os passos apresentados na Figura 8.3.

As imagens passaram por uma fase de pré-processamento cujo objetivo foi melhorar a qualidade visual e geométrica das mesmas. É válido ressaltar que mesmo após as imagens já terem recebido um tratamento prévio para as correções radiométricas e geométricas foi verificada a qualidade da correção geométrica. Esta etapa foi constituída pelas tarefas de realce de histograma, filtragem, registro de imagens e segmentação.

Após cumpridas todas estas etapas da fase de pré-processamento dos dados, foi dado início à segunda parte com a definição das amostras representativas das classes de uso do solo, classificação digital e verificação da exatidão dos mapas temáticos de uso do solo.

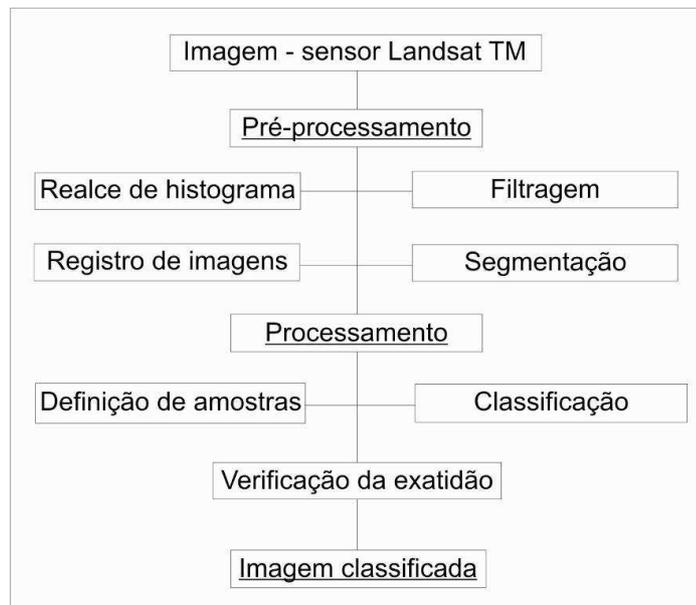


Figura 8.3. Organograma de processamento das imagens.

Tendo sido cumpridas as fases de pré-processamento e processamento dos dados advindos do sensor Landsat 5 TM, finalmente foi confeccionado o mapa temático contendo as seis classes temáticas: mata, cerrado, pastagem, cultivo, reservatórios e urbanização. Neste sentido, foram consideradas as classificações adotadas pelo Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2006), referente à classificação do uso do solo mais recente adotada para o Brasil. De acordo com esta classificação considerou-se para este estudo as seguintes classificações:

**Mata:** compreende um conjunto de estruturas florestal e campestre, abrangendo desde florestas e campos originais (primários) e alterados até formações florestais espontâneas secundárias, arbustivas, herbáceas e/ou gramíneo-lenhosas, em diversos estágios sucessionais de desenvolvimento, distribuídos por diferentes ambientes e situações geográficas. Consideram-se como florestais as formações arbóreas, incluindo-se aí as áreas de Floresta Densa (estrutura florestal com cobertura superior contínua), de Floresta Aberta (estrutura florestal com diferentes graus de descontinuidade da cobertura superior, conforme seu tipo - com cipó, bambu, palmeira ou sororoca), de Floresta Estacional (estrutura florestal com perda das folhas dos estratos superiores durante a estação desfavorável - seca e frio) além da Floresta Ombrófila Mista (estrutura florestal que compreende a área de distribuição natural da Araucária angustifolia, elemento marcante nos estratos superiores, que geralmente forma cobertura contínua).

**Cerrado:** vegetação xeromórfica preferencialmente de clima estacional, com aproximadamente 6 meses secos, não obstante poder ser encontrada também em clima ombrófilo em altitudes elevadas. É dividida em: Savana florestada (cerradão), Savana arborizada (campo-cerrado), Savana parque e Savana gramíneo-lenhosa (cerrado).

**Pastagem:** áreas destinadas ao pastoreio do gado, formadas mediante plantio de forragens perenes. Nessas áreas o solo está coberto por vegetação de gramíneas ou leguminosas.

Reservatórios: são represamentos artificiais d'água utilizados para irrigação, controle de enchentes, fornecimentos municipais de água, geração de energia elétrica, controle de enchentes, etc. Na maioria dos casos, os reservatórios servem para fins múltiplos e podem compreender todas as funções anteriormente citadas.

**Cultivo:** no sentido amplo, a terra agrícola pode ser definida como terra utilizada para a produção de alimentos, fibras e outras *commodities* do agronegócio. Inclui todas as terras cultivadas, caracterizadas pelo delineamento de áreas cultivadas ou em descanso, podendo também compreender áreas alagadas. Podem se constituir em zonas agrícolas heterogêneas ou representar extensas áreas de monoculturas. Encontram-se inseridas nesta categoria as lavouras temporárias, lavouras permanentes, pastagens plantadas e silvicultura.

**Áreas Urbanizadas:** compreendem áreas de uso intensivo, estruturadas por edificações e sistema viário, onde predominam as superfícies artificiais não-agrícolas. Estão incluídas nesta categoria as metrópoles, cidades, vilas, áreas de rodovias, serviços e transporte, energia, comunicações e terrenos associados, áreas ocupadas por indústrias, complexos industriais e comerciais e instituições que podem em alguns casos encontrar-se isolados das áreas urbanas. As áreas urbanizadas podem ser contínuas, onde as áreas não-lineares de vegetação são excepcionais, ou descontínuas, onde as áreas vegetadas ocupam superfícies mais significativas.

Realizadas todas estas etapas, as imagens foram exportadas para o SIG ArcGIS 9.0 (ESRI, 2004), no formato *Shapefile*, para fazer parte do banco de dados georreferenciado da bacia hidrográfica do rio Paracatu.

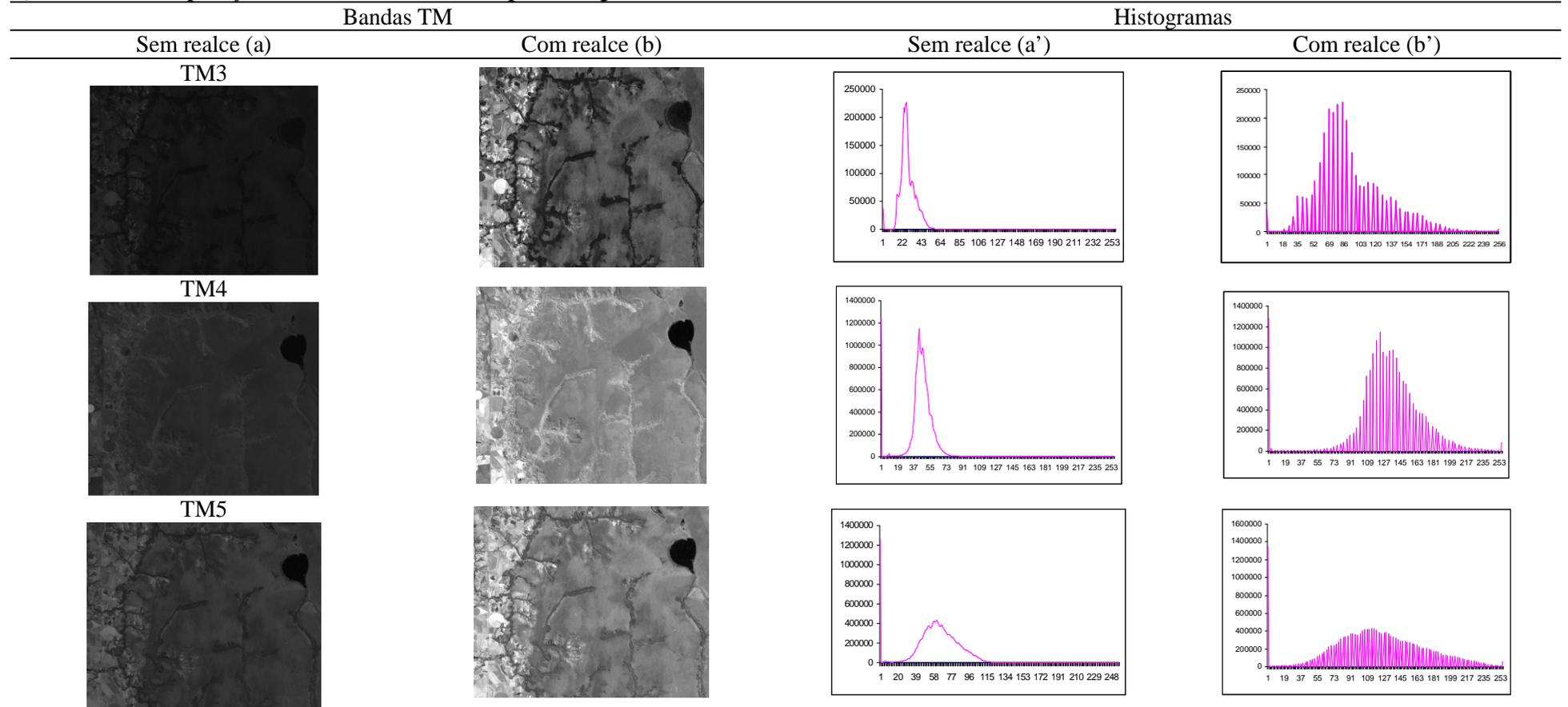
### 8.2.3 - Realce de histograma

De acordo com Moreira (2005), o realce é uma técnica utilizada para melhorar a percepção visual da imagem com o objetivo de ajudar o fotointérprete no momento de extração de informações das mesmas.

Dos vários tipos de realce existentes, foi adotado para este trabalho o realce linear, pois com a adoção deste tipo, foram obtidas melhores condições visuais nas imagens após sua aplicação. Neste sentido, este procedimento foi realizado em todas as imagens utilizadas para este estudo.

No Quadro 8.3 visualiza-se uma comparação realizada em um recorte de uma imagem sem a aplicação de nenhuma técnica de realce com uma imagem realçada.

Quadro 8.3. Comparação da eficiência do realce por histograma



\* (a) Imagens sem realce e (b) imagens realçadas; (a') histograma da imagem sem realce e (b') histograma da imagem realçada

## 8.2.4 - Filtragem

O processo de filtragem consiste na suavização e/ou agudização de determinadas características e/ou feições nas imagens no auxílio à interpretação das mesmas (MOREIRA, 2005). Para este procedimento foi adotado um filtro passa-baixa de dimensão 3 x 3 para a eliminação de ruídos (altas frequências). Este filtro foi passado nas imagens apenas uma única vez, caso contrário ele modificaria muito a imagem, perdendo a sua função.

Na Figura 8.4 é apresentado um recorte de imagem que recebeu um tratamento com o filtro passa-baixa 3 x 3. Nota-se que a imagem (a) possui alguns ruídos espalhados em toda a extensão do recorte, representado pelos pontos brancos, sendo que a imagem (b) já tratada não possui estes ruídos.

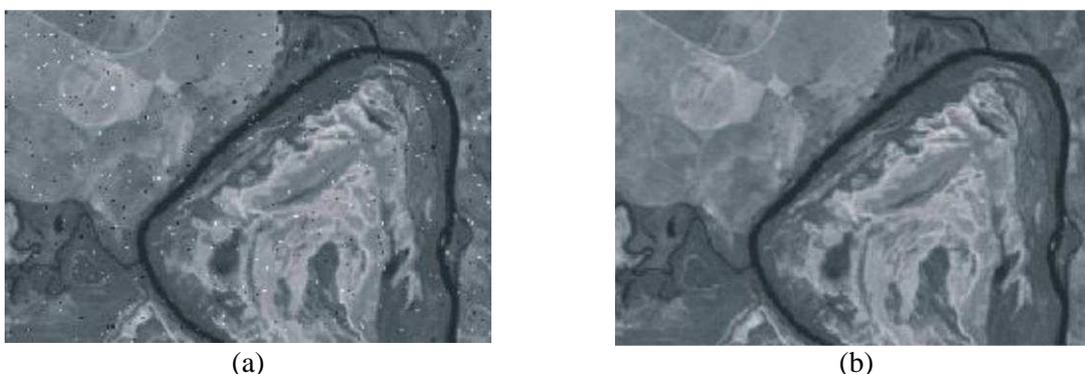


Figura 8.4. Processo de filtragem para eliminação de ruídos.

## 8.2.5 - Registro de imagens

O processo de registro de imagens ou georreferenciamento é um passo fundamental para a análise de dados de sensores remotos. Este procedimento consiste em juntar duas ou mais imagens para formar uma imagem única em um determinado sistema de coordenadas e projeção.

Neste trabalho utilizou-se 3 órbitas/ponto para o total recobrimento da área de interesse, totalizando um conjunto de 27 imagens para a área da bacia ao longo dos 9 anos de monitoramento. O registro das imagens consistiu em associar pontos de uma base cartográfica previamente mapeada (neste caso preferiu-se adotar a base de dados do IBGE através de sua rede de drenagem), a locais de coincidência em localização na imagem, ou seja, a locais que fossem facilmente identificáveis na imagem.

Neste sentido, o sistema de coordenadas adotado para o registro de todas as imagens foi baseado nas informações do IBGE, ou seja, datum horizontal Córrego Alegre e projeção UTM zona 23 Sul.

Este processo foi realizado para cada órbita/ponto do ano de 1985. Neste processo foram selecionados aproximadamente de 40 a 50 pontos de controle para o processo de registro em uma função polinomial de 3°.

Após o primeiro conjunto de 3 órbitas/ponto ter sido registrado com sucesso, foi utilizado o software Regeemy 0.2.42, desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (FEDOROV *et al*, 2005), para o complemento do trabalho de registro das demais 24 imagens.

Este software permite associar, através de textura, forma e orientação, pontos coincidentes entre duas imagens diferentes. Devido a esta especificidade, a utilização do software agilizou o processo de registro das demais imagens, bastando para isso, identificar pontos coincidentes entre imagens ano após ano. É válido ressaltar que para esta tarefa o software Regeemy conseguiu facilmente identificar um número acima de 1000 pontos de controle para cada órbita/ponto.

Na Figura 8.5 visualiza-se um exemplo de seleção de pontos de controle nas órbitas/ponto.

Para cada imagem registrada por este processo transferiu-se tanto o sistema de coordenadas da imagem original, quanto as informações sobre o datum horizontal

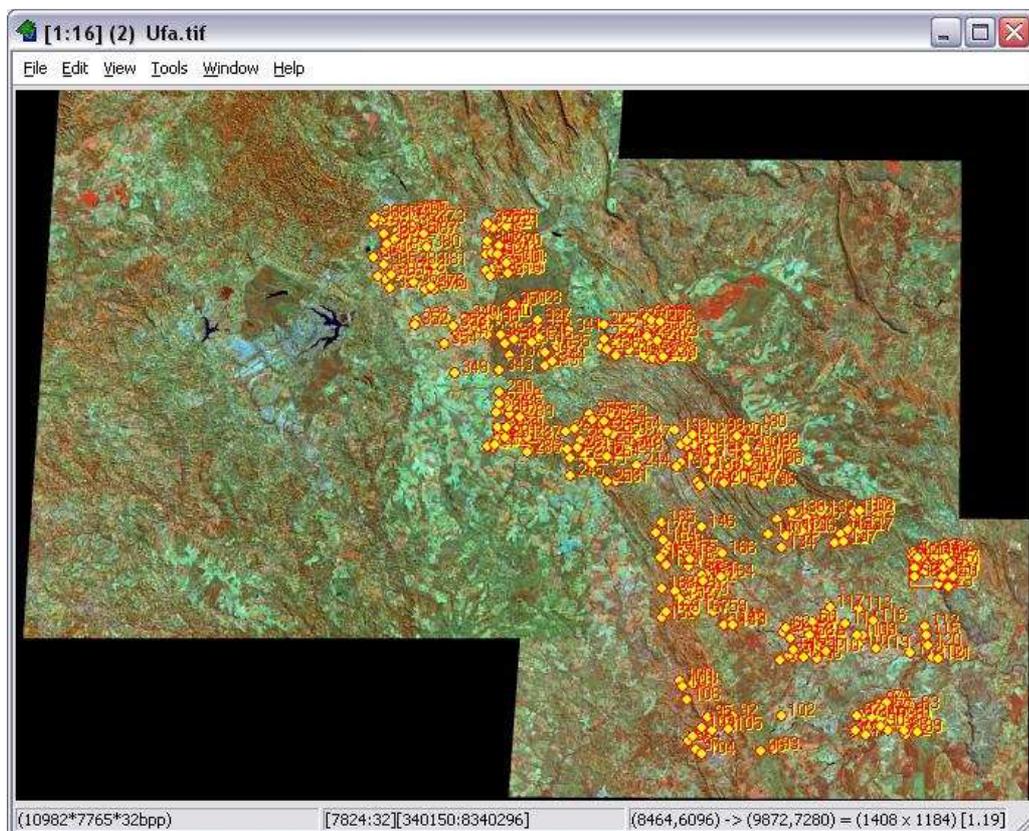


Figura 8.5. Seleção de pontos de controle no software Regeemyx

### 8.2.6 - Segmentação

O processo de segmentação de imagens é um dos mais importantes no que diz respeito à preparação das imagens para a classificação, pois consiste em agrupar regiões de iguais características, principalmente espectrais e texturais (MOREIRA, 2005).

Para este trabalho utilizou-se o segmentador instalado no Sistema de Informação Geográfica SPRING 4.2, capaz de identificar e segmentar áreas de iguais características a partir do método de crescimento de regiões.

Para a utilização deste método o fotointérprete deverá informar ao classificador um limiar de aceitação, assim como o tamanho (em pixels) de regiões mínimas. Foram testados diversos limiares e tamanhos de regiões, chegando a um desempenho satisfatório, tanto computacionalmente, quanto para a qualidade da classificação, com o limiar de 25 e tamanho de polígonos de 100 pixels.

Na Figura 8.6 é possível observar em um recorte de uma imagem como o segmentador dividiu a imagem em várias regiões. Definido os parâmetros para a realização da segmentação foi então aplicado ao restante das imagens.

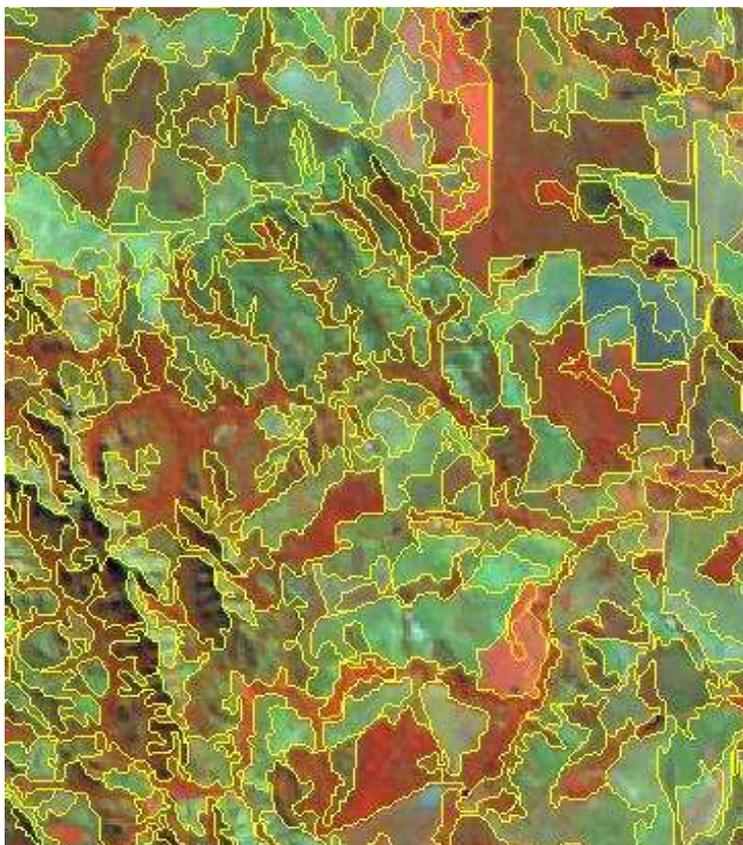


Figura 8.6. Imagem segmentada.

## 8.2.7 - Definição de amostras representativas

O processo de definição de amostras é crucial para o sucesso da classificação de imagens digitais (NOVO, 1999). Isto porque todas as informações sobre as diversas classes do mapa a ser gerado sairão das amostras definidas nesta etapa do trabalho, respeitando os limites de cada área previamente segmentada.

Primeiramente foram coletadas informações sobre documentos cartográficos já elaborados para a área de estudo. Neste sentido, foi utilizado um mapa de uso do solo, datado de 1994, elaborado para o Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia do rio Paracatu (BRASIL, 1996). Este mapa de uso do solo foi utilizado como suporte à decisão no momento de escolha das amostras.

Após a imagem ter sido segmentada, foi feita a seleção das amostras das diversas classes de uso do solo definindo padrões a partir do mapa-base, ou seja, com base no mapa de uso do solo do Plano Diretor da bacia foram selecionados diversos segmentos da imagem que coincidiram com a classificação anterior.

Deste modo, foram selecionadas diversas regiões sobre a imagem segmentada de acordo com as classes temáticas de uso do solo definidas para este estudo, que são: mata, cerrado, pastagem, reservatórios, cultivo e urbanização. Na Figura 8.7 observa-se a definição destas classes na imagem e na Figura 8.8, a checagem em campo das amostras.

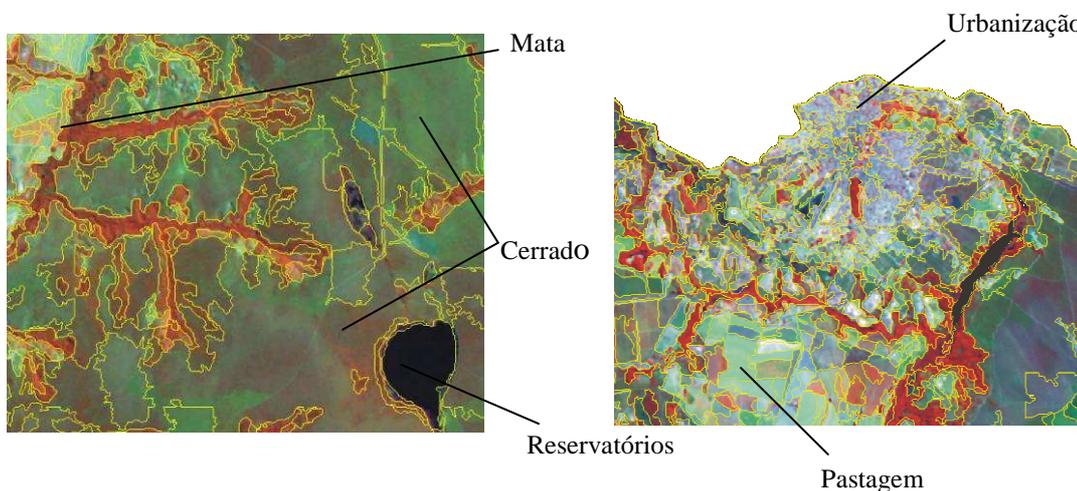


Figura 8.7. Amostras para cada classe temática.

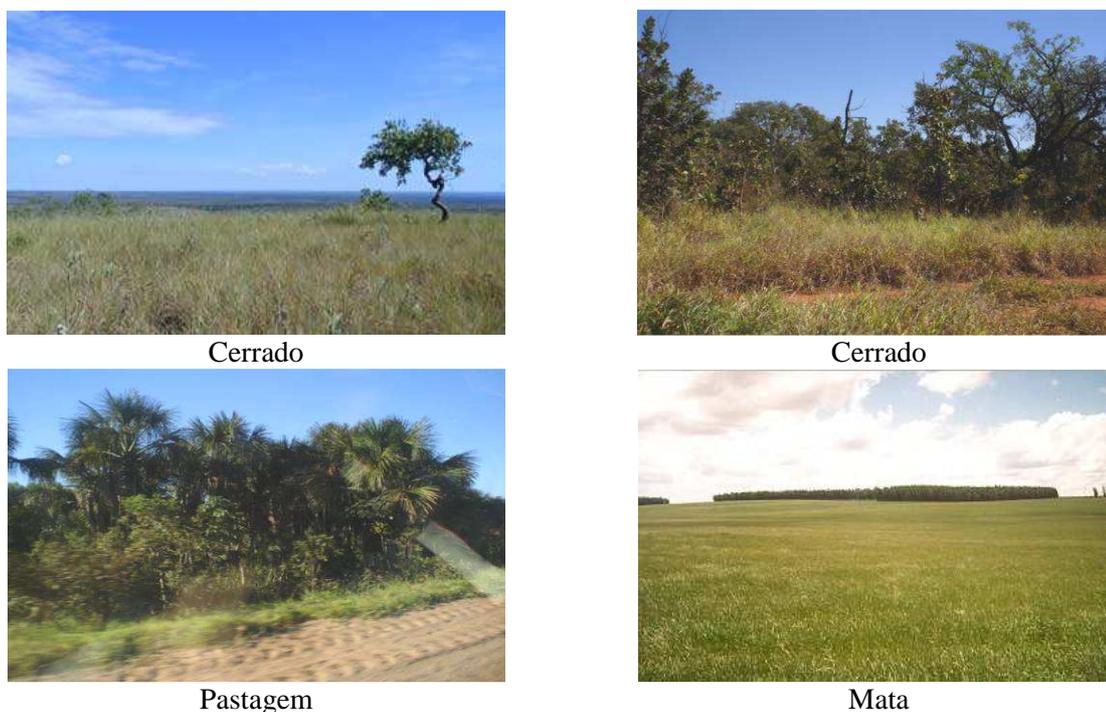


Figura 8.8. Checagem das amostras em campo.

A coleta de amostras se divide em duas etapas: aquisição e teste. A coleta para aquisição é realizada para o treinamento do classificador, ou seja, estas regiões foram utilizadas para a classificação da imagem segmentada. Já a coleta para teste é realizada para testar a eficiência da classificação da imagem. No Quadro 8.4 é apresentado o número de amostras de aquisição e teste realizados neste trabalho.

Quadro 8.4. Número de amostras para aquisição e teste para cada classe temática

Classe temática	Características de amostragem		
	Aquisição	Teste *	Total
Mata	70	14	84
Cerrado	62	13	75
Reservatórios	34	7	41
Pastagem	42	9	51
Cultivos**	-	-	-
Urbanização	20	4	24
Total	228	47	275

\* 20% do número total de amostras de aquisição, segundo INPE (2004).

\*\* Não foi realizado coleta de amostras para esta classe temática

É importante ressaltar que para a classe temática cultivos, não foi realizado o processo de definição de amostras, seja de aquisição ou de teste. A escolha por não amostrar essa classe temática foi devido à grande variabilidade espectral dos diversos tipos de áreas agrícolas, assim como seus diversos estádios de crescimento, para não confundir o classificador.

## 8.2.8 - Classificação automática

Esta etapa da metodologia é altamente dependente dos resultados de todas as outras etapas, ou seja, para uma boa classificação da imagem digital é necessário o cumprimento satisfatório das etapas anteriores. Para o treinamento do classificador, assim como para o teste de sua eficiência, foram utilizadas as amostras coletadas durante a etapa anterior.

Nesta etapa do trabalho, primeiramente testou-se a eficiência de dois tipos de classificadores: MAXVER e Bhattacharya, tendo como características de classificação pixel a pixel e por crescimento de regiões, respectivamente. A eficiência da classificação foi mensurada através da estatística Kappa (LANDIS e KOCH, 1977), sendo adotado para o restante do trabalho o classificador que melhor eficiência apresentasse.

Neste sentido, adotou-se o classificador Bhattacharya para a classificação de imagens neste trabalho. Na Figura 8.9 pode-se observar os mapas temáticos classificados segundo os classificadores anteriormente citados, sendo a imagem (a) classificada por MAXVER e a imagem (b) por Bhattacharya.

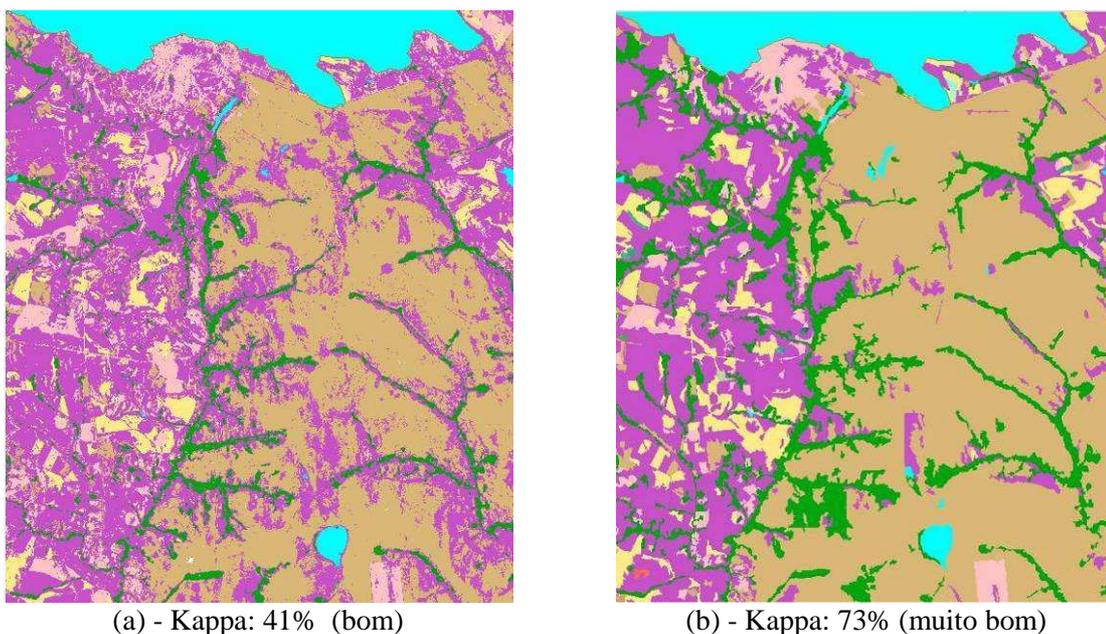


Figura 8.9. Imagens classificadas pixel a pixel (a) e por crescimento de regiões (b).

Para o restante das classificações foi adotado um limiar de 75% de aceitação para o classificador Bhattacharya. Assim, todas as vezes em que o classificador ficar em dúvida quanto à classificação de um determinado polígono, o mesmo realiza um teste de hipótese no qual testa-se a probabilidade de um polígono pertencer ou não a uma determinada classe temática.

Este limiar é o mais restritivo para este tipo de classificador (INPE, 2005), sendo necessária sua utilização principalmente devido à alta heterogeneidade espectral das áreas

agrícolas, devido, sobretudo, a suas diferentes respostas espectrais causadas pelos diferentes cultivares e seus respectivos estádios de crescimento.

Desta maneira, apenas foram amostradas as demais classes temáticas (mata, cerrado, pastagem, reservatórios e urbanização), ficando como áreas não classificadas as áreas de cultivos, ou seja, estas áreas foram obtidas pela diferença entre o somatório dos outros tipos de uso do solo e a área de drenagem de cada estação fluviométrica.

### 8.2.9 - Verificação da exatidão da classificação automática

A verificação da exatidão dos mapas temáticos gerados a partir da classificação das imagens foi realizada através da estatística Kappa (LANDIS e KOCH, 1977), que é um dos métodos mais utilizados para avaliar a concordância entre a verdade terrestre e o mapa temático, sendo que a definição da exatidão dos mapeamentos foi classificada de acordo como visualiza-se por meio do Quadro 8.5.

Quadro 8.5. Qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa

Valor de Kappa	Qualidade do mapa temático
$< 0,00$	Péssimo
$0,00 < k \leq 0,20$	Mau
$0,20 < k \leq 0,40$	Razoável
$0,40 < k \leq 0,60$	Bom
$0,60 < k \leq 0,80$	Muito Bom
$0,80 < k \leq 1,00$	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977).

O SPRING 4.2 ainda não realiza automaticamente o cálculo do índice Kappa para os mapas gerados a partir de classificações automáticas, fornecendo apenas a matriz de erros da classificação, que contém as informações necessárias para o cálculo do índice Kappa.

Obtida a matriz de erros, a mesma foi exportada para o Microsoft Excel onde foi gerado o índice Kappa através da seguinte equação:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}} \quad (8.1)$$

em que  $r$  = número de linhas na tabela de classificação;  $x_{ii}$  = número de combinações ao longo da diagonal;  $x_{i+}$  = número total de observações na linha  $i$ ;  $x_{+i}$  = número total de observações na coluna  $i$ ;  $N$  é número total de células e  $+$  = representa o somatório de cada linha ou coluna.

Logo após verificada a exatidão de cada mapa temático, os mesmos foram exportados para o formato *shapefile* para que pudessem ser anexados à base de dados cartográficas da bacia do rio Paracatu, sendo utilizado o software CorelDraw<sup>®</sup> 12 para a elaboração dos *layouts* de impressão.

### 8.2.10 - Monitoramento do uso do solo nas bacias

Após as classificações das imagens para extração das classes de uso do solo, por meio do sensor Landsat 5 TM, a cada dois anos no período de 1985 a 2000, foi então realizado o monitoramento do uso do solo para as bacias de drenagem das oito estações fluviométricas utilizando-se o software SPRING 4.2, ferramenta tabulação cruzada.

A área de estudo foi subdividida em oito sub-bacias correspondentes às áreas de drenagem de cada estação fluviométrica, com o intuito de analisar as alterações no uso do solo em cada uma delas separadamente. No Quadro 8.6 pode-se observar os dados de área e porcentagem de cada área de drenagem de estação fluviométrica.

Quadro 8.6. Área de drenagem e porcentagem ocupadas por cada estação fluviométrica

<b>Código</b>	<b>Estações fluviométricas</b>	<b>Área total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>% na área da bacia</b>
42435000	Fazenda Barra da Égua*	1591	41,15
42440000	Fazenda Poções*	550	14,22
42460000	Fazenda Limeira	4164	40,49
42490000	Unai	5413	52,64
42540000	Santo Antônio do Boqueirão	5963	57,99
42545500	Fazenda Resfriado	679	6,60
42546000	Fazenda Santa Cruz	550	5,35
42600000	Porto dos Poções	9459	91,99

\* Estações fluviométricas localizadas na bacia do ribeirão Entre Ribeiros, sendo as restantes localizadas na bacia do rio Preto

Além da obtenção das áreas de cobertura de cada classe de uso do solo, estas informações foram utilizadas na confecção de linhas de tendências destas classes de usos, para cada área de drenagem de estação fluviométrica. Assim, ainda foram obtidas significâncias do comportamento destas tendências ao longo do tempo, com o intuito de mostrar o quanto estas variações foram significativas ou não.

### 8.2.11 - Análise do comportamento hidrológico nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros

Para a realização deste estudo foram analisados os dados de oito estações fluviométricas, assim como suas respectivas áreas de drenagem (Figura 8.10) e 11 estações

pluviométricas (Figura 8.11) pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA).

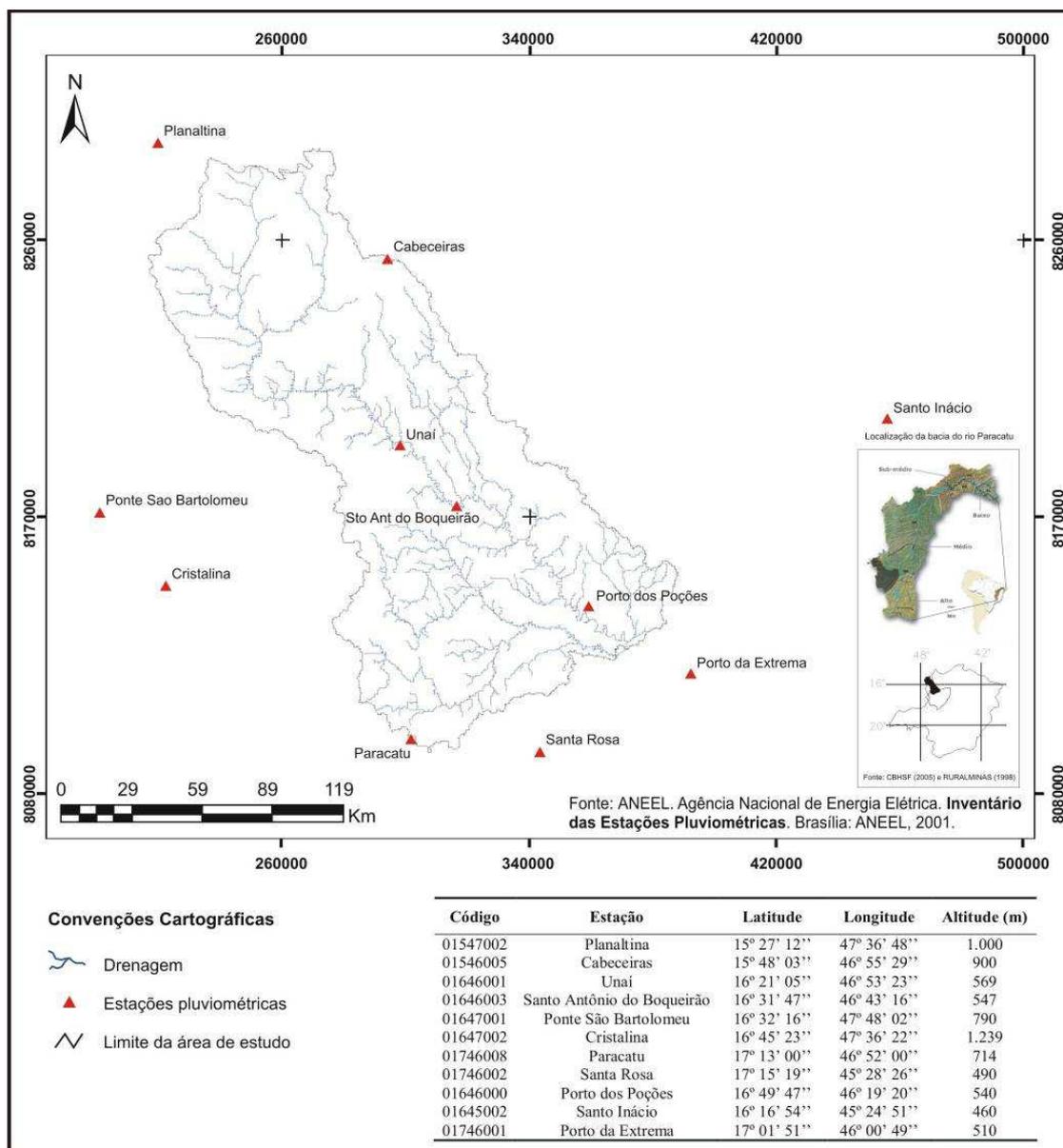


Figura 8.10. Localização das estações pluviométricas.

### 8.2.12 - Seleção do período de análise e preenchimento de falhas

A aquisição dos dados de vazões e precipitações foi realizada pelo site HidroWeb da Agência Nacional de Águas (<http://hidroweb.ana.gov.br>).

O preenchimento de falhas das séries de vazões e de precipitações foi realizado por meio de correlações segundo critérios lineares, tendo nos coeficientes de correlação a base para a tomada de decisão.

Para o preenchimento de falhas nas séries de vazão, utilizou-se a regressão linear simples com base na equação:

$$Q_y = \beta_0 + \beta_1 Q_x \quad (8.2)$$

em que:  $Q_y$ = vazão do posto em análise,  $m^3 s^{-1}$ ;  $Q_x$ = vazão do posto de apoio,  $m^3 s^{-1}$ ; e  $\beta_0, \beta_1$ = parâmetros ajustados na regressão pelo método dos mínimos quadrados, adimensional

Para o preenchimento de falhas em séries pluviométricas, utilizou-se o método da ponderação regional com base em regressões lineares. Esse método consiste, segundo TUCCI (1997), em estabelecer regressões lineares entre o posto com dados a serem preenchidos,  $P_Y$ , e cada um dos postos vizinhos,  $P_{X1}, P_{X2}, \dots, P_{Xn}$ . De cada uma das regressões lineares efetuadas foi obtido o coeficiente de correlação ( $r$ ), sendo o preenchimento realizado com base na equação:

$$P_Y = \frac{r_{YX1} P_{X1} + r_{YX2} P_{X2} + \dots + r_{YXn} P_{Xn}}{(r_{YX1} + r_{YX2} + \dots + r_{YXn})} \quad (8.3)$$

em que:  $P_Y$ = precipitação no posto em análise,  $mm \text{ mês}^{-1}$ ;  $P_{Xn}$ = precipitação no posto de apoio,  $mm \text{ mês}^{-1}$ ;  $r_{YXn}$ = coeficiente de correlação entre postos considerados, adimensional; e  $n$ = número total de postos de apoio considerados

Para a aplicação deste método há a necessidade de que pelo menos três postos sirvam como postos de apoio e que possuam correlação aceitável (acima de 85%) com o posto em análise.

Quando não foi possível a utilização do método da ponderação regional com base em regressões lineares, utilizou-se o método da regressão linear simples.

Para a aplicação dos métodos adotou-se como critério mínimo a obtenção de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superior a 0,70 e a existência de pelo menos oito anos de eventos comuns entre as estações consideradas para o estabelecimento da regressão, conforme Pruski et. al. (2005).

### 8.2.13 - Análise de estacionariedade das séries

A análise de estacionariedade das séries de vazões e precipitações foi realizada para verificar se as mesmas possuíam ou não mudanças significativas ao longo do período base escolhido.

Para isto, foi utilizado o software PSF (Projeto São Francisco), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos (GPRH) da Universidade Federal de Viçosa, em

parceria com a Agência Nacional de Águas (ANA), Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e Organização dos Estados Americanos (OEA).

Este software realiza testes de estacionariedade com base em dados estatísticos de homogeneidade de variâncias e desvio padrão, tanto para toda a série, quanto para partes da série. Neste estudo foi utilizado o nível de significância de 1%, sendo este o nível mais rigoroso, para a realização dos testes, disponibilizado por este software.

#### **8.2.14 - Vazões médias, máximas e mínimas**

Para cada uma das oito estações fluviométricas estudadas, obteve-se, para cada ano da série de 1985 a 2000, a vazão média ( $Q_{med}$ ), a vazão máxima anual ( $Q_{max}$ ), a vazão mínima de sete dias de duração ( $Q_7$ ) e as vazões associadas às permanências de 90% e 95% do tempo.

As vazões associadas à permanência de 90% e 95% foram obtidas pelas curvas de permanência de cada estação fluviométrica com base em dados diários, retratando a parcela de tempo que determinada vazão é igualada ou superada durante o período analisado.

Todas estas vazões foram obtidas por meio dos softwares PSF (Projeto São Francisco) e Hidro 1.0.9 (ANA, 2005).

#### **8.2.15 - Análise de precipitações**

Neste trabalho foram utilizados os seguintes tipos de precipitações: precipitação média anual ( $P_a$ ), precipitação do mês mais chuvoso ( $P_{mc}$ ) e precipitação do mês mais seco ( $P_{ms}$ ), no período de 1985 a 2000, para cada área de drenagem das estações fluviométricas utilizadas neste estudo.

Já para o cálculo das precipitações médias nas áreas de drenagem das estações fluviométricas foi utilizado o método do polígono de Thiessen.

Nesta etapa foi utilizado o software Thiessen para a obtenção destes dados, no qual são necessários, como dados de entrada, o limite da bacia, bem como as coordenadas geográficas das estações pluviométricas, com suas respectivas precipitações.

#### **8.2.16 - Análise de tendências das variáveis hidrológicas**

As análises de tendências das variáveis hidrológicas (vazões e precipitações) foram estimadas por meio da equação de regressão linear simples entre variável hidrológica e tempo, assumindo como variável dependente a variável hidrológica e como variável independente o tempo, tendo sido já utilizados por Pruski *et al.* (2005) e Sharma e Shakya (2006).

Assim, estimou-se o quanto ao longo dos anos, no período de 1985 a 2000, as vazões máximas ( $Q_{\max}$ ), médias ( $Q_{\text{med}}$ ) e mínimas ( $Q_7$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) diminuíram ou aumentaram nestas seções fluviométricas.

Para a realização desta etapa do trabalho utilizou-se a regressão linear simples com base na equação 8.2.

### **8.2.17 - Estudo da associação entre vazões e uso do solo**

O estudo da associação entre vazões e uso do solo foi realizado através de análises qualitativa e quantitativa dos dados das oito estações fluviométricas.

A análise qualitativa visou associar, por meio de análise de tendências de comportamentos das variáveis de vazões, precipitações e uso do solo, a influência existente do uso do solo no comportamento das vazões.

Nesta etapa foram utilizadas séries temporais de vazões, precipitações e uso do solo em cada bacia de drenagem das oito estações fluviométricas. Para tal, foram feitos gráficos das séries temporais no período compreendido entre 1985 a 2000 e adicionadas suas linhas de tendências usando o software Microsoft Excel<sup>®</sup>. Além das tendências observadas através do comportamento das variáveis ao longo do tempo, foram obtidas as significâncias das mesmas para mostrar o quanto estas variações foram expressivas.

Por outro lado, a análise quantitativa visou obter um ajuste por meio de equações de regressão múltipla, entre as variáveis para que se pudesse explicar os comportamentos das vazões, a partir de dados de precipitações e usos do solo.

Nesta etapa, os dados foram tratados utilizando o procedimento estatístico de regressão linear múltipla, adotando como variável dependente as vazões e para as variáveis independentes a precipitação e as classes de uso do solo. Para esta etapa do trabalho foi utilizado o software SAEG 9.0.

Neste sentido, foram ajustadas equações de regressões observando os seguintes critérios: coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,70, significância da equação pela ANOVA da regressão, hipótese dos coeficientes, assim como, os sinais dos coeficientes. Estas análises foram realizadas para as vazões máximas ( $Q_{\max}$ ), médias ( $Q_{\text{med}}$ ) e mínimas ( $Q_7$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$ ) das oito estações fluviométricas.

Apoiando estas análises foram elaborados diagramas que representassem as relações causais entre as modificações entre uso do solo e comportamentos hidrológicos. Nas Figuras 8.11, 8.12 e 8.13 visualizam-se os diagramas de relações causais elaborados como resposta esperada ao comportamento hidrológico das vazões, em função das modificações no uso do solo e precipitação.

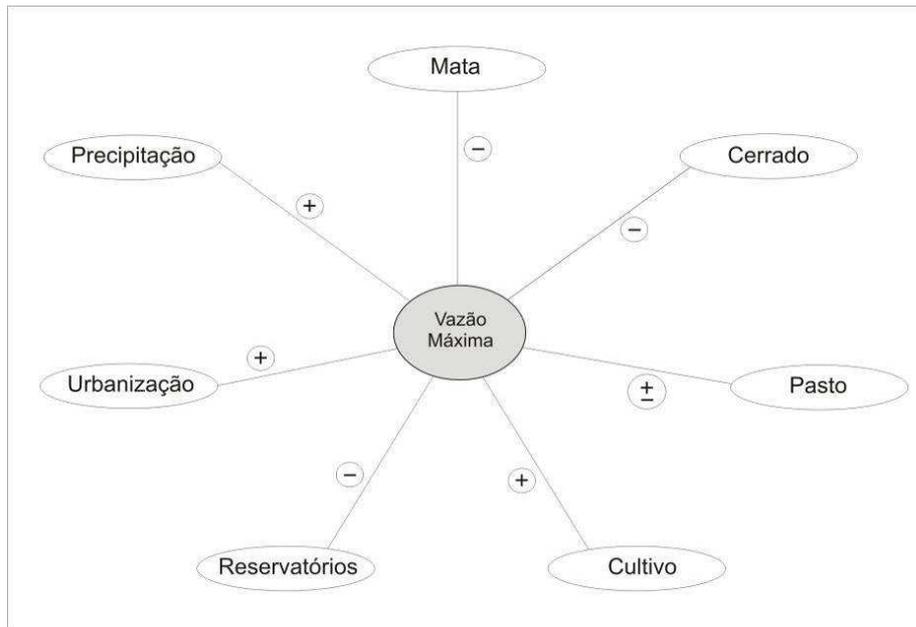


Figura 8.11. Relações causais esperadas para a vazão máxima e classes de usos do solos mapeadas e precipitação.

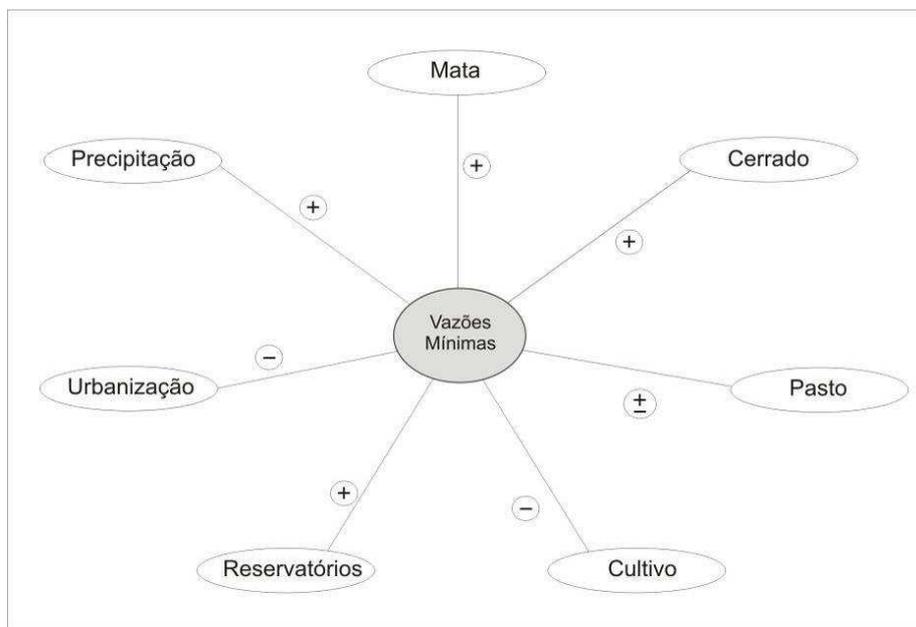


Figura 8.12. Relações causais esperadas para a vazão mínima e classes de usos do solos mapeadas e precipitação.

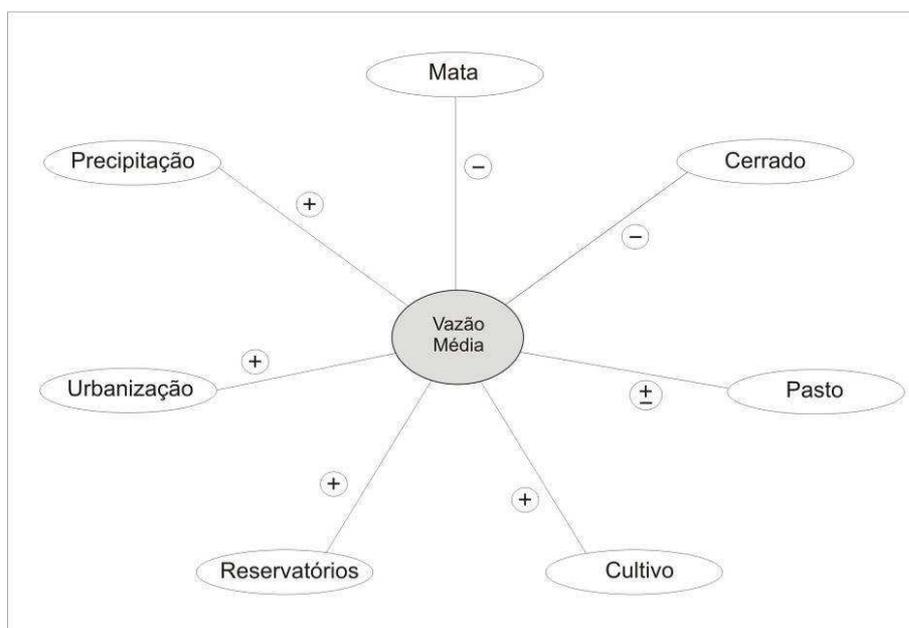


Figura 8.13. Relações causais esperadas para a vazão média e classes de usos do solos mapeadas e precipitação.

Com o aumento das áreas de cobertura de mata nas bacias, é de se esperar uma redução das vazões máximas, devido ao aumento da interceptação pela cobertura vegetal e ao aumento da rugosidade na superfície do solo, dentre outros fatores, causando o aumento na infiltração e redução do escoamento superficial, resultando numa associação negativa entre vazão máxima e mata. No caso da vazão mínima o aumento da infiltração resulta numa associação positiva entre vazão mínima e mata, ou seja, com o aumento de mata espera-se um aumento das vazões mínimas. Finalmente, sinal negativo para a associação entre vazão média e mata, pois com o aumento de mata espera-se um aumento da evapotranspiração com consequente redução no abastecimento das águas subterrâneas e superficiais (TUCCI, 2003).

A resposta esperada para a classe cerrado quando relacionada com vazões máximas é que se tenha uma redução destas vazões com seu aumento, devido à recomposição vegetal natural da área de estudo, adotando assim o sinal negativo. Com o aumento das áreas de cerrado espera-se um aumento nas vazões mínimas, desta forma adotou-se o sinal positivo e, finalmente, sinal negativo para a associação entre vazão média e cerrado, pois com o aumento de cerrado espera-se uma redução nos valores da vazão média, devido ao aumento do consumo de água por evapotranspiração.

Para o uso do solo pastagem, seu aumento e consequente resposta às variações hidrológicas na bacia, depende da forma como o manejo está sendo conduzido. Neste sentido, adotou-se um sinal de mais ou menos para as relações entre pastagem e as diversas vazões.

Com relação ao uso do solo cultivado, espera-se uma resposta com sinal positivo para a associação com a vazão máxima, devido a este aumento estar relacionado com uma menor

proteção da superfície do solo às ações de precipitações, possibilitando o aumento, desta forma, do encrostamento superficial e conseqüente aumento do escoamento. Ao contrário, para as vazões mínimas espera-se uma resposta com sinal negativo. E finalmente, para a vazão média um sinal positivo.

A classe de uso do solo reservatórios possui uma associação esperada com a vazão máxima de sinal negativo, ou seja, com o aumento das áreas de reservatórios espera-se uma tendência de redução das vazões máximas. Sendo o contrário verdadeiro, quando observa-se as associações com as vazões mínimas e médias, onde o aumento de reservatórios tende a aumentar a oferta de água em períodos mais secos e de regularizar sua oferta, respectivamente.

Já a classe de uso do solo urbanização possui uma associação esperada com a vazão máxima de sinal positivo, ou seja, com o aumento das áreas de urbanização espera-se uma tendência de aumento das vazões máximas, devido à alta taxa de impermeabilização do solo (TUCCI, 2003). Para as vazões mínimas a associação esperada é de redução das mesmas, adotando-se desta forma, o sinal negativo, devido à menor infiltração de água no solo e conseqüente deficiência na realimentação dos aquíferos. Já para as vazões médias adotou-se o sinal positivo, devido ao aumento de escoamento superficial e redução da evapotranspiração nestas áreas, onde as precipitações são convertidas em escoamento de forma mais rápida, devido à impermeabilização existente no uso do solo urbano (MOTA, 2003).

Na associação da variável precipitação às vazões máxima, mínimas e média, foi adotado o sinal positivo, pois com o aumento da precipitação há a tendência de aumento das vazões.

## **8.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **8.3.1 - Mudanças ocorridas no uso do solo**

No Quadro 8.7 são apresentadas as exatidões dos mapas temáticos gerados a partir do processamento digital das imagens do sensor Landsat 5 TM. Desta forma, as imagens foram classificadas de bom a muito bom, segundo o método do Índice Kappa, conforme Landis e Koch (1977).

Quadro 8.7. Exatidão dos mapeamentos de uso do solo

Anos	Índice Kappa (%)	Classificação
1985	56,6	Bom
1987	57,0	Bom
1989	58,3	Bom
1991	74,7	Muito Bom
1993	76,5	Muito Bom
1995	56,9	Bom
1996	57,1	Bom
1998	78,6	Muito Bom
2000	77,8	Muito Bom

Tendo em vista as exatidões dos mapeamentos temáticos gerados, foi possível a realização do monitoramento das modificações do uso do solo nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros, que subsidiaram a elaboração de análises de tendências ao longo do período compreendido de 1985 a 2000.

De uma maneira geral, o uso do solo nas áreas de drenagem das oito estações fluviométricas localizadas nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros teve o comportamento conforme é visualizado no Quadro 8.8. Ressalta-se no Quadro 8.8 a presença das cores azuis e vermelhas, ou seja, a cor azul está associada à tendência de crescimento da variável de uso do solo ao longo do período analisado e à cor vermelha associa-se com tendências de redução das mesmas. Os dados referentes às obtenções destas tendências estão listados no Apêndice A.

Quadro 8.8. Significâncias e tendências observadas para o comportamento do uso do solo, no período de 1985 a 2000, para as estações fluviométricas monitoradas.

Estações fluviométricas	Significâncias (%) e Tendências (↑↓) ao longo do tempo para as classes de uso do solo					
	Mata	Cerrado	Pasto	Cultivo	Urbano	Reser.*
Fazenda Barra da Égua	95,0 ↑	99,8 ↓	75,4 ↓	99,9 ↑	--	78,4 ↑
Fazenda Poções	96,2 ↑	99,4 ↓	68,8 ↓	98,8 ↑	--	58,1 ↑
Fazenda Limeira	58,5 ↓	99,3 ↓	58,4 ↓	99,9 ↑	99,9 ↑	61,4 ↑
Unaí	84,1 ↑	99,0 ↓	66,1 ↓	99,9 ↑	99,9 ↑	60,3 ↑
Santo Antônio do Boqueirão	93,5 ↑	98,9 ↓	74,1 ↓	99,9 ↑	99,9 ↑	54,0 ↑
Fazenda Resfriado	99,8 ↑	90,3 ↓	94,7 ↓	97,9 ↑	--	64,3 ↑
Fazenda Santa Cruz	98,7 ↑	90,2 ↓	71,5 ↓	83,9 ↓	--	30,7 ↑
Porto dos Poções	99,9 ↑	99,9 ↓	69,5 ↑	99,9 ↑	99,9 ↑	64,6 ↑
Média	90,7	97,1	72,3	97,5	99,9	59,0

\*Classe de uso do solo reservatório; -- Sem ocorrência; ↑: Crescimento; ↓: Diminuição

Linhas hachuradas representam estações na bacia do Entre Ribeiros, as demais para a bacia do rio Preto

A classe de uso do solo mata apresentou, exceto para a estação fluviométrica Fazenda Limeira, tendência de crescimento em todas as áreas de drenagem das estações fluviométricas monitoradas, com uma significância média de 90,7%, onde registrou-se ocorrência de uma tendência oposta às demais áreas de drenagem.

Nas áreas de drenagem das estações fluviométricas onde houve tendência de aumento da cobertura de mata, pode-se associá-la a áreas que não foram utilizadas para a expansão agrícola na bacia, em função de altas declividades.

O crescimento das áreas de cobertura por mata em áreas ditas abandonadas foi mais expressivo onde anteriormente haviam pastagens, ou seja, em um primeiro momento, a vegetação nativa da região (cerrado) foi retirada para dar lugar a áreas de pastagens. Entretanto, devido a não capacidade de suporte do meio físico a este tipo de uso, essas áreas foram abandonadas, ficando desta forma sujeitas a regeneração natural.

Neste sentido, estas áreas não foram utilizadas para a expansão da agricultura na região, o que levou a ocorrer a regeneração da vegetação em muitas destas, fazendo com que houvesse a expansão deste tipo de cobertura.

A área de drenagem da estação fluviométrica Fazenda Limeira, entretanto, localiza-se em um platô, ou seja, é uma forma de relevo constituída por uma superfície elevada, com cume mais ou menos nivelado e com baixa declividade.

Assim, a expansão da agricultura ocorreu nestas áreas, fazendo com que as mesmas tivessem, ao longo do tempo, sua cobertura modificada para extensas áreas agrícolas, favorecidas pela baixa declividade e pela possibilidade de mecanização.

Este tipo de comportamento evidenciado pela tendência de redução da cobertura de mata nesta área de drenagem, evidencia que, por outro lado, o processo de expansão da agricultura ainda não atingiu seu limite. Entretanto, evidencia-se, por meio de sua significância ao longo do período entre 1985 a 2000, uma tendência de redução desacelerada, pois sua significância é de 58,5%, ou seja, ao longo do período de monitoramento não houve grandes alterações na taxa de desmatamento nesta área de drenagem.

A classe de uso do solo cerrado obteve um comportamento de redução para todas as áreas de drenagem das estações fluviométricas monitoradas por este estudo, com uma significância média de 97,1%, ou seja, o cerrado sofreu uma drástica substituição por um outro tipo de cobertura do solo, evidenciado pela alta significância, sendo na maior parte dos casos pelo uso do solo cultivado.

Este resultado vem comprovar a substituição da vegetação nativa de cerrado por culturas anuais como, por exemplo, soja e milho (EMATER, 2006). Na Figura 8.14 observa-se a expansão da fronteira agrícola, caracterizada pelo uso do solo cultivado sob as áreas de cerrado na área de drenagem da estação fluviométrica Fazenda Limeira.

Rodriguez (2004) evidenciou que na bacia do ribeirão Entre Ribeiros há conflitos de disponibilidade de água para atendimento da demanda de seus agentes consumidores, onde 92% da vazão consumida para a estação fluviométrica Fazenda Barra da Égua e 93% para a

estação Fazenda Poções são para o atendimento da demanda de irrigação nestas áreas de drenagem. Este conflito pode ser comprovado pelo avanço do uso do solo cultivado sobre áreas de cerrado, como pode ser visto por meio da Figura 8.15 para a área de drenagem da estação fluviométrica Fazenda Barra da Égua.

Para a classe de uso do solo pasto foram identificadas tendências de redução de sua área de cobertura nas áreas de drenagem das estações fluviométricas monitoradas, ao longo do período de 1985 a 2000, exceto para a estação fluviométrica Porto dos Poções.

Esta redução da classe de uso do solo pasto foi evidenciada na maioria das vezes, pela substituição para a cobertura de mata, ou seja, há a hipótese dessas áreas de pasto terem sido abandonadas e estarem sujeitas à regeneração natural. Entretanto, para a área de drenagem da estação fluviométrica Fazenda Limeira esta hipótese não é válida, pois para esta área houve também a redução do uso do solo mata.

Neste sentido, a expansão do uso do solo cultivado na área de drenagem da estação Fazenda Limeira, foi o principal agente modificador do uso do solo no período de 1985 a 2000, ocupando áreas de mata e pasto concomitantemente.

Em um comportamento geral a classe de uso do solo pasto obteve uma significância média para todas as áreas de drenagem monitoradas de 72,3%. Entretanto, o valor não pode ser considerado baixo, pois apresenta-se um valor acima de 70% de mudanças.

Desta forma, a área de drenagem da estação Santo Antônio do Boqueirão sofreu mudanças expressivas na redução da classe de uso do solo pasto, como pode ser visualizado por meio da Figura 8.16, com uma significância média de 74,1%, conforme Quadro 8.8.

Observa-se ainda, com o auxílio da Figura 8.16, que essas mudanças ocorreram mais espacialmente localizadas, a jusante da estação fluviométrica Fazenda Limeira e nas proximidades no município de Unaí/MG. Estas mudanças de uso do solo localizadas próximas a Unaí/MG, são justificadas pela expansão da área de cobertura do uso do solo cultivado ao sul e norte e à expansão da classe de uso do solo mata nas direções norte e noroeste.

Outra observação que deve ser destacada no monitoramento da classe de uso do solo pasto é que, entre as estações fluviométricas Santo Antônio do Boqueirão e Porto dos Poções, houve um aumento das áreas de pasto, sobrepujando às áreas de cerrado, principalmente.

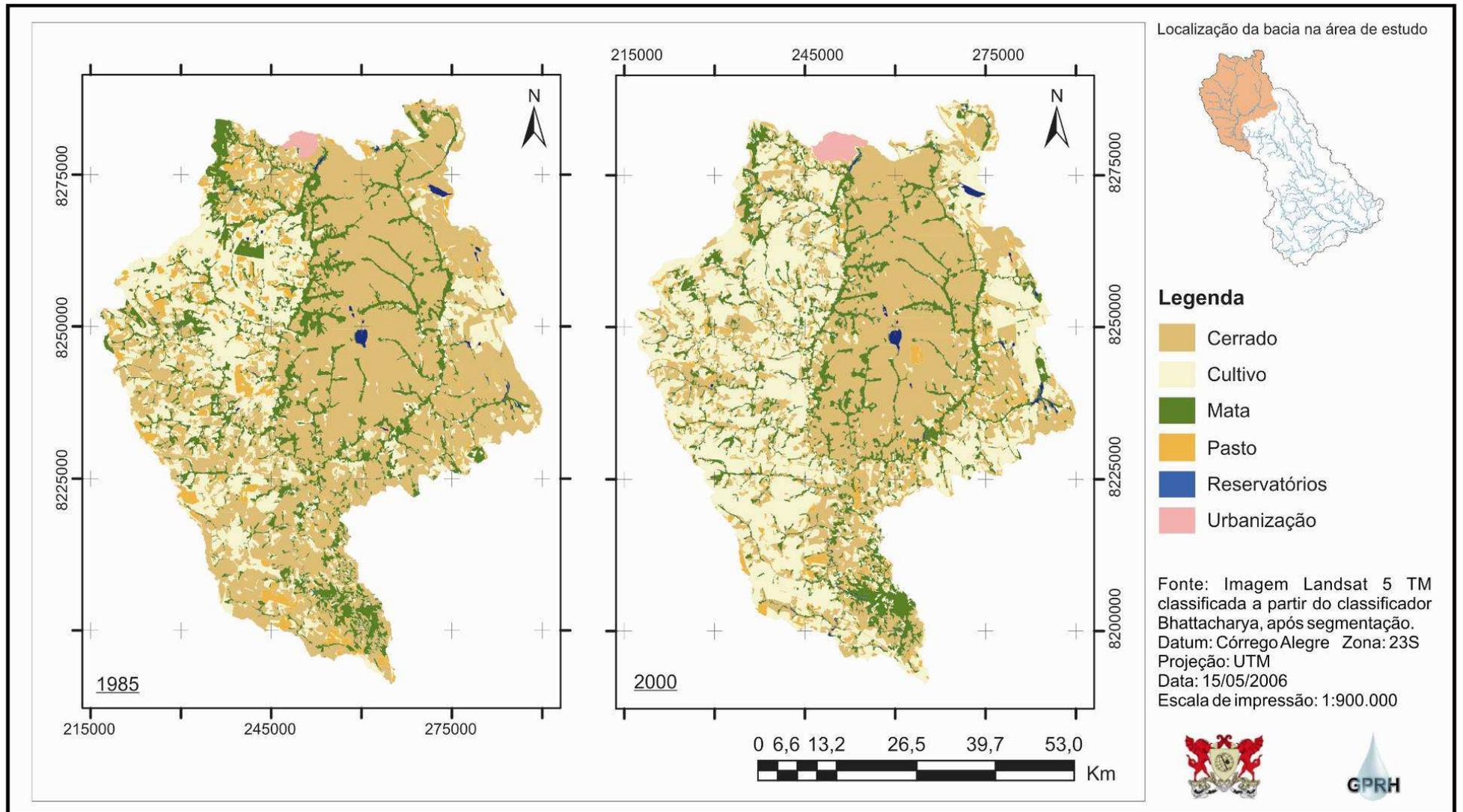


Figura 8.14. Mudanças ocorridas no uso do solo na área de drenagem da estação fluviométrica Fazenda Limeira.

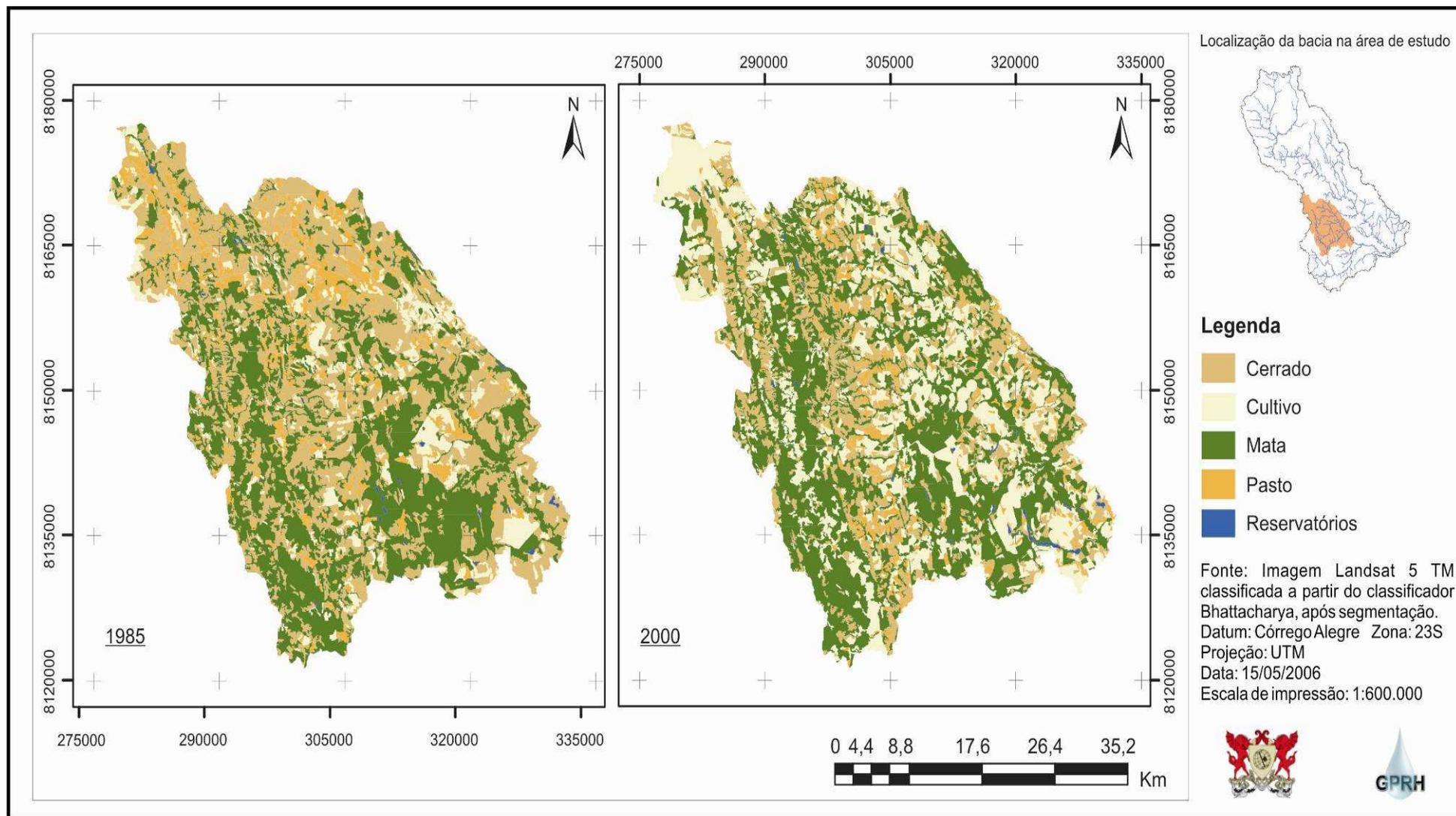


Figura 8.15. Mudanças ocorridas no uso do solo na área de drenagem da estação fluviométrica Fazenda Barra da Égua.

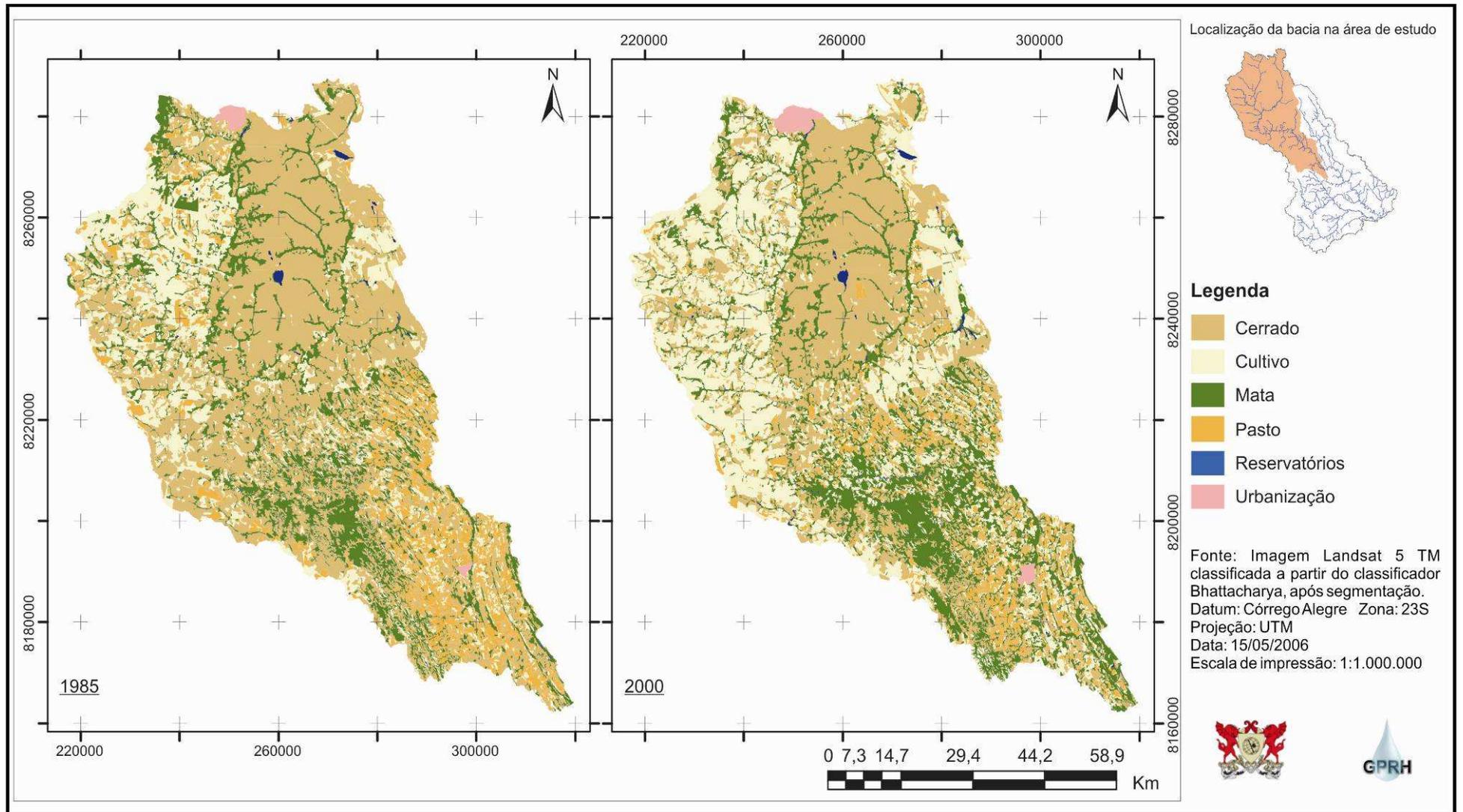


Figura 8.16. Mudanças ocorridas no uso do solo na área de drenagem da estação fluviométrica Santo Antônio do Boqueirão.

No monitoramento realizado para a classe de uso do solo cultivo foram observadas tendências, de uma maneira geral, de aumento em sua área de cobertura para todas as estações fluviométricas, exceto para a área de drenagem da estação Fazenda Santa Cruz.

Com 97,5% de significância média ao longo do período de 1985 a 2000, a classe de uso do solo cultivo obteve um aumento bastante expressivo nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros. Para a bacia do rio Preto, na estação fluviométrica Porto dos Poções a significância obtida pelo avanço das áreas de cultivo, sobretudo em substituição por áreas de cerrado foi de 99,9% neste mesmo período.

Entretanto, para a área de drenagem da estação Fazenda Santa Cruz não houve o mesmo comportamento das tendências de aumento obtidas para as demais estações. Desta forma, foi identificada a tendência de redução para a classe de cultivo com uma significância de 83,9%, sendo que as mudanças ocorridas no uso do solo nesta bacia são visualizadas por meio da Figura 8.17.

São observadas mudanças principalmente devido ao aumento da classe de uso do solo mata sob áreas de pasto, cerrado e cultivo. Estas mudanças levam à elaboração da hipótese de um abandono destas áreas para que houvesse a recomposição da cobertura vegetal por mata nesta bacia. Houve um aumento das áreas com cobertura por mata, devido também às condições do relevo desta bacia, que é formada por pequenas serras e áreas com declive acentuado em suas bordas, no sentido Noroeste - Sudeste (NO-SE).

Rodriguez (2004) apresentou informações sobre o aumento do consumo de água pela irrigação na bacia do Paracatu, sendo identificados conflitos na relação oferta-demanda para a bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

Do mesmo modo, Moreira (2006) evidenciou que para a bacia do rio Paracatu, nos afluentes rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros, não haver disponibilidade de água para atendimento de novas outorgas de concessão de direito de uso da água até 2010.

Estes fatos, aliados ao monitoramento da cobertura da classe de uso do solo cultivo, vêm provar que existe uma influência da expansão da fronteira agrícola, principalmente da agricultura irrigada, com a diminuição da disponibilidade hídrica na bacia, devido ao aumento da área irrigada, conforme já evidenciado pelos Censos Agropecuários do IBGE, Moreira (2006) e Rodriguez (2004).

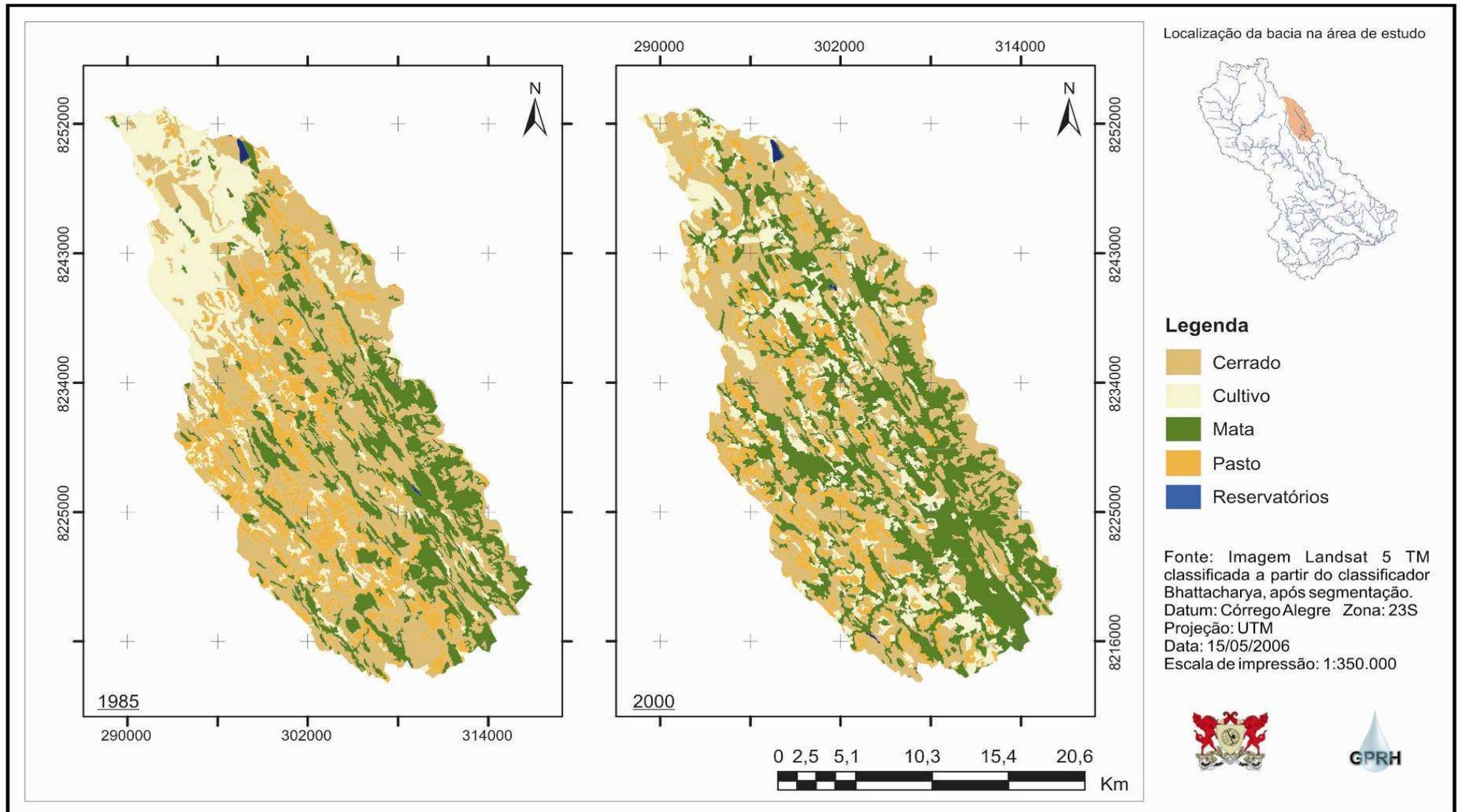


Figura 8.17. Mudanças ocorridas no uso do solo na área de drenagem da estação fluviométrica Santa Cruz.

Para as classes de uso do solo urbanização e reservatórios foram identificadas tendências de aumento em suas áreas de cobertura, para todas as áreas de drenagem das estações fluviométricas que possuíam estes usos, refletindo deste modo, o crescimento urbano na bacia identificado por IBGE (2005) e a expansão da agricultura irrigada na região das sub-bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros.

A classe de uso do solo urbanização possui uma significância média no período analisado de 99,9%, enquanto o uso do solo reservatórios possui uma significância média de 59,0%, para o mesmo período, conforme é visualizado no Quadro 8.8.

Estes elevados valores para estas classes de uso do solo não chegam a corresponder a 1% no aumento em área nas respectivas bacias, o mesmo valendo para a classe de uso do solo reservatórios.

Entretanto, é válido destacar o registro de aumento das áreas de espelho d'água nas bacias monitoradas, tendo possíveis relações com o aumento das áreas irrigadas ao longo das bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros, sendo que não houve a identificação de nenhuma grande barragem para este fim, sendo que há uma barragem de extenso espelho d'água, utilizada para fins de disposição de rejeitos de mineração, localizada dentro dos limites no município de Paracatu/MG.

Neste sentido, o aumento identificado para este uso do solo é caracterizado por pequenas barragens provavelmente utilizadas como reservatórios utilizados para alimentação de sistemas de irrigação, principalmente, pivô-central.

Contudo, as classes de uso do solo que tiveram mudanças mais expressivas em média foram: urbanização, cultivo, cerrado, mata, pasto e reservatórios, respectivamente. Os mapas de mudanças do uso do solo para cada área de drenagem das estações fluviométricas estudadas encontram-se no Apêndice B.

No Quadro 8.9 são apresentados os valores, em km<sup>2</sup>, das mudanças ocorridas no uso do solo para as oito áreas de drenagem das estações fluviométricas utilizadas por este estudo, do período de 1985 a 2000.

A classe de uso do solo mata obteve para a área da Fazenda Limeira uma redução de sua área de cobertura de 6,41%, por outro lado, a área de drenagem da estação Fazenda Resfriado registrou um aumento de 68,99% das áreas deste tipo de cobertura, contabilizando um crescimento de 91,53 km<sup>2</sup> para o período de 1985 a 2000.

Quadro 8.9. Valores de áreas e diferenças (km<sup>2</sup>), assim como variações percentuais para as áreas ocupadas pelos diferentes tipos de usos do solo nas áreas de drenagem das oito estações fluviométricas no período de 1985 e 2000.

Estações fluviom.	Classe de uso do solo											
	Mata				Cerrado				Pasto			
	1985	2000	Difer.	Δ (%)	1985	2000	Difer.	Δ (%)	1985	2000	Difer.	Δ (%)
Faz. B. da Égua	620,55	694,13	+73,58	+11,86	635,23	332,55	-302,68	-47,65	176,21	97,22	-78,99	-44,83
Faz. Poções	242,62	263,11	+20,49	+8,45	238,52	110,91	-127,61	-53,50	34,62	17,77	-16,85	-48,67
Faz. Limeira	646,71	605,27	-41,44	-6,41	2.151,24	1.584,14	-567,1	-26,36	213,10	183,69	-29,41	-13,80
Unai	1.048,79	1.199,02	+150,23	+14,32	2.725,14	1.956,59	-768,55	-28,20	525,69	379,30	-146,39	-27,85
Sto. Ant. do Boq.	1.157,42	1.388,03	+230,61	+19,92	2907,86	2.098,80	-809,06	-27,82	721,01	474,46	-246,55	-34,20
Faz. Resfriado	132,67	224,20	+91,53	+68,99	228,21	198,52	-29,69	-13,01	201,59	84,98	-116,61	-57,85
Faz. Sta. Cruz	115,28	183,18	+67,9	+58,90	231,96	215,43	-16,53	-7,13	96,71	66,27	-30,44	-31,48
Porto dos Poções	2.145,75	2.822,55	+676,80	+31,54	4.345,67	1.122,84	-3.222,83	-74,16	1.351,88	1.798,90	+447,02	+33,07

Estações fluviom.	Classe de uso do solo											
	Cultivo				Urbanização				Reservatório			
	1985	2000	Difer.	Δ (%)	1985	2000	Difer.	Δ (%)	1985	2000	Difer.	Δ (%)
Faz. B. da Égua	154,68	461,09	+306,41	+198,09	-	-	-	-	4,33	6,01	+1,68	+38,80
Faz. Poções	33,55	157,50	+123,95	+369,45	-	-	-	-	0,69	0,71	+0,02	+2,90
Faz. Limeira	1.118,24	1.744,31	+626,07	+55,99	19,76	27,63	+7,87	+39,83	14,95	18,96	+4,01	+26,82
Unai	1.072,11	1.821,54	+749,43	+69,90	25,48	36,34	+10,86	+42,62	15,79	20,21	+4,42	+27,99
Sto. Ant. do Boq.	1.134,83	1.944,08	+809,25	+71,31	25,48	36,34	+10,86	+42,62	16,40	21,29	+4,89	+29,82
Faz. Resfriado	116,24	169,80	+53,56	+46,08	-	-	-	-	0,29	1,50	+1,21	+417,24
Faz. Sta. Cruz	105,12	84,15	-20,97	-19,95	-	-	-	-	0,93	0,97	+0,04	+4,30
Porto dos Poções	1.567,56	3.639,75	+2072,19	+132,19	25,51	36,38	+10,87	+42,61	22,63	38,58	+15,95	+70,48

\* Linhas hachuradas representam estações na bacia do Entre Ribeiros, as demais para a bacia do rio Preto.

O uso do solo cerrado apresentou reduções para todas as áreas de drenagem, com uma menor redução para a área da estação fluviométrica Fazenda Santa Cruz, com 7,13%. Entretanto, para a área da estação Porto dos Poções foi registrado uma redução de 74,16% das áreas de cobertura de cerrado, contabilizando um total de 3.222,83 km<sup>2</sup>. Esta informação retrata como a expansão da fronteira agrícola, aliada a outros tipos de usos do solo vêm alterando significativamente a paisagem da região.

Com relação à classe de uso do solo pasto houve o registro de uma maior redução deste tipo de uso do solo, na área de drenagem da estação Fazenda Resfriado, com 57,85%, com um total de 116,61 km<sup>2</sup>. Entretanto, para a área de drenagem da estação Porto dos Poções houve a identificação de aumento desta cobertura, na taxa 33,07%, para o período de 1985 a 2000, com um total de 447,02 km<sup>2</sup>.

Para a classe de uso do solo cultivo houve a identificação de redução de sua área de cobertura para a área de drenagem da estação Fazenda Santa Cruz, à uma taxa de 19,95%, contabilizando um total de redução de 20,97 km<sup>2</sup>. Entretanto, há que se destacar que para as áreas de drenagem das estações Fazenda Barra da Égua e Fazenda Poções foram registradas as maiores variações percentuais para o aumento das áreas de cultivo, ou seja, para estas áreas de drenagem houve uma maior expansão das áreas de cultivo, com percentuais de 198,09% e 369,45%, respectivamente.

Este resultado comprova mais uma vez o que Rodriguez (2004) havia identificado, ou seja, que a área de drenagem do ribeirão Entre Ribeiros está sofrendo com conflitos de uso da água, devido à expansão da agricultura irrigada.

A classe de uso do solo urbanização obteve aumento para todas as áreas de drenagem, obtendo para a área de drenagem da estação fluviométrica Porto dos Poções um maior aumento registrado para o período monitorado, chegando a 10,87 km<sup>2</sup>.

No mesmo sentido, houve aumento para todas as áreas de drenagem da classe de uso do solo reservatórios, sobretudo acompanhado pelo aumento das áreas irrigadas. Assim, registrou-se como um crescimento pouco expressivo deste uso do solo para a área de drenagem da estação Fazenda Santa Cruz, com a taxa de 4,30%. Este fato pode estar relacionado com a diminuição de áreas de cultivo nesta bacia.

Por outro lado, houve um crescimento relativo de 417,24% para a área de drenagem da estação fluviométrica Fazenda Resfriado. Na área de drenagem da estação Porto dos Poções, que compreende cerca de 92% da área de drenagem do rio Preto, houve um aumento das áreas de reservatórios da ordem de 70,48% para o período, o que refletiu especialmente em um aumento de 15,95 km<sup>2</sup>.

### 8.3.2 - Análise do comportamento das variáveis hidrológicas

Para o período selecionado neste estudo houve a necessidade de preenchimento de falhas apenas para a série de vazões mínimas de sete dias consecutivos ( $Q_7$ ). As equações usadas no preenchimento são apresentadas no Apêndice C.

Os testes de estacionariedade nas séries de vazões e precipitações apresentaram resultados de comportamento de séries estacionárias ao nível de 1% de probabilidade, ou seja, as séries não apresentaram alterações de seu comportamento ao longo do tempo entre 1985 a 2000.

No Quadro 8.10 observam-se as significâncias e tendências obtidas pelas variáveis hidrológicas referentes às vazões e precipitações, ao longo do período de 1985 a 2000, para cada estação fluviométrica utilizada no estudo.

Quadro 8.10. Significância e tendências observadas para vazões e precipitações nas estações fluviométricas utilizadas no período entre 1985 a 2000

Estações fluviométricas	Significâncias (%) e Tendências (↑↓) ao longo do tempo para as variáveis hidrológicas							
	$Q_{max}$	$Q_{med}$	$Q_7$	$Q_{90}$	$Q_{95}$	Pa	Pmc	Pms
Fazenda Barra da Égua	85,2 ↓	81,3 ↓	93,1 ↓	87,3 ↓	88,3 ↓	86,3 ↓	93,9 ↓	66,4 ↑
Fazenda Poções	94,1 ↓	54,5 ↓	86,8 ↓	79,7 ↓	76,3 ↓	94,9 ↓	97,4 ↓	89,0 ↓
Fazenda Limeira	81,7 ↓	94,7 ↓	98,6 ↓	97,7 ↓	98,1 ↓	74,1 ↓	96,3 ↓	83,4 ↑
Unai	91,4 ↓	92,5 ↓	97,9 ↓	97,0 ↓	97,5 ↓	76,8 ↓	95,1 ↓	81,2 ↑
Santo Antônio do Boqueirão	83,6 ↓	93,0 ↓	96,4 ↓	95,6 ↓	96,2 ↓	78,3 ↓	94,8 ↓	93,1 ↑
Fazenda Resfriado	55,7 ↑	78,1 ↓	98,1 ↓	94,9 ↓	95,6 ↓	82,2 ↓	91,4 ↓	52,6 ↑
Fazenda Santa Cruz	61,4 ↓	98,0 ↓	99,0 ↓	99,3 ↓	99,3 ↓	74,3 ↓	88,8 ↓	97,1 ↑
Porto dos Poções	80,8 ↓	89,9 ↓	95,7 ↓	90,5 ↓	92,9 ↓	81,8 ↓	95,2 ↓	77,7 ↑
Média	79,2	85,2	95,7	92,7	93,0	81,1	94,1	80,1

↑: Crescimento; ↓: Diminuição

Linhas hachuradas representam estações na bacia do Entre Ribeiros, as demais para a bacia do rio Preto

Verifica-se que a tendência obtida pela vazão máxima ( $Q_{max}$ ), nas estações fluviométricas monitoradas neste estudo, retrata um comportamento de redução ao longo do período de 1985 a 2000 para todas as estações, exceto para a estação Fazenda Resfriado, onde constatou-se a tendência de crescimento desta variável ao longo do tempo.

Esta tendência de redução para a vazão máxima é justificada pela redução da precipitação do mês mais chuvoso (Pmc), para a área de drenagem das estações fluviométricas.

Entretanto, para a área de drenagem da estação Fazenda Resfriado há uma inversão desta tendência quando comparadas com as demais. Neste caso, a variável precipitação do mês mais chuvoso (Pmc) não é associativa ao comportamento obtido pela vazão máxima, devido às incongruências entre as tendências apresentadas.

As vazões médias obtiveram tendências de redução ao longo do período analisado para todas as áreas de drenagem das estações fluviométricas. Este resultado pode ser associado ao comportamento da tendência da variável hidrológica precipitação anual (Pa), que também apresentou tendências de redução para o mesmo período.

As vazões mínimas ( $Q_7$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) obtiveram tendências de redução para o período analisado para todas as áreas de drenagem das estações fluviométricas. Porém, estas tendências não podem ser atribuídas à precipitação do mês mais seco (Pms), pois esta precipitação obteve tendência de aumento ao longo do mesmo período, exceto para a área de drenagem da estação Fazenda Poções. Vale ressaltar que este tipo de precipitação (Pms) não gera escoamento superficial, pois é de baixo volume e intensidade para este tipo climático.

Assim, a única precipitação que possui condições de associação entre redução das vazões mínimas é a precipitação anual (Pa), que também obteve tendências de redução ao longo do período de analisado, para todas as áreas de drenagem das estações monitoradas.

A variável hidrológica vazão máxima ( $Q_{max}$ ) obteve significância média para todas as estações fluviométricas de 79,2%, conforme é visualizado no Quadro 8.8. Porém, quando analisadas separadamente por estações, observa-se que para as estações localizadas na área de drenagem da bacia do ribeirão Entre Ribeiros, respectivamente, as estações Fazenda Barra da Água e Fazenda Poções, permaneceram entre os maiores índices de significância dentre as analisadas.

Na vazão média ( $Q_{med}$ ) foi identificada a significância média para todas as estações fluviométricas de 85,2%, ou seja, o impacto da redução da precipitação anual (Pa), juntamente com aqueles advindos do uso do solo, reduziu a vazão média nestas estações, demonstrando resultados com elevada expressividade ao longo do período de 1985 a 2000.

Para todas as vazões mínimas monitoradas por este estudo houve elevada taxa de significância com valores acima de 90%. Assim, no período entre 1985 a 2000, as vazões que tiveram modificações mais expressivas ao longo do tempo foram as vazões mínimas, devido ao aumento de área irrigada, o que provavelmente ocasionou uma redução ainda maior na disponibilidade hídrica nestas áreas de drenagem.

Neste contexto, observa-se que para as vazões estudadas neste trabalho as significâncias médias das vazões mínimas foram superiores as das vazões máxima e média, refletindo um maior impacto de redução das vazões mínimas ao longo do período entre 1985 a 2000.

Na Figura 8.18 apresentam-se os resultados do coeficiente  $\beta_1$  para as vazões das oito áreas de drenagem das estações fluviométricas selecionadas.

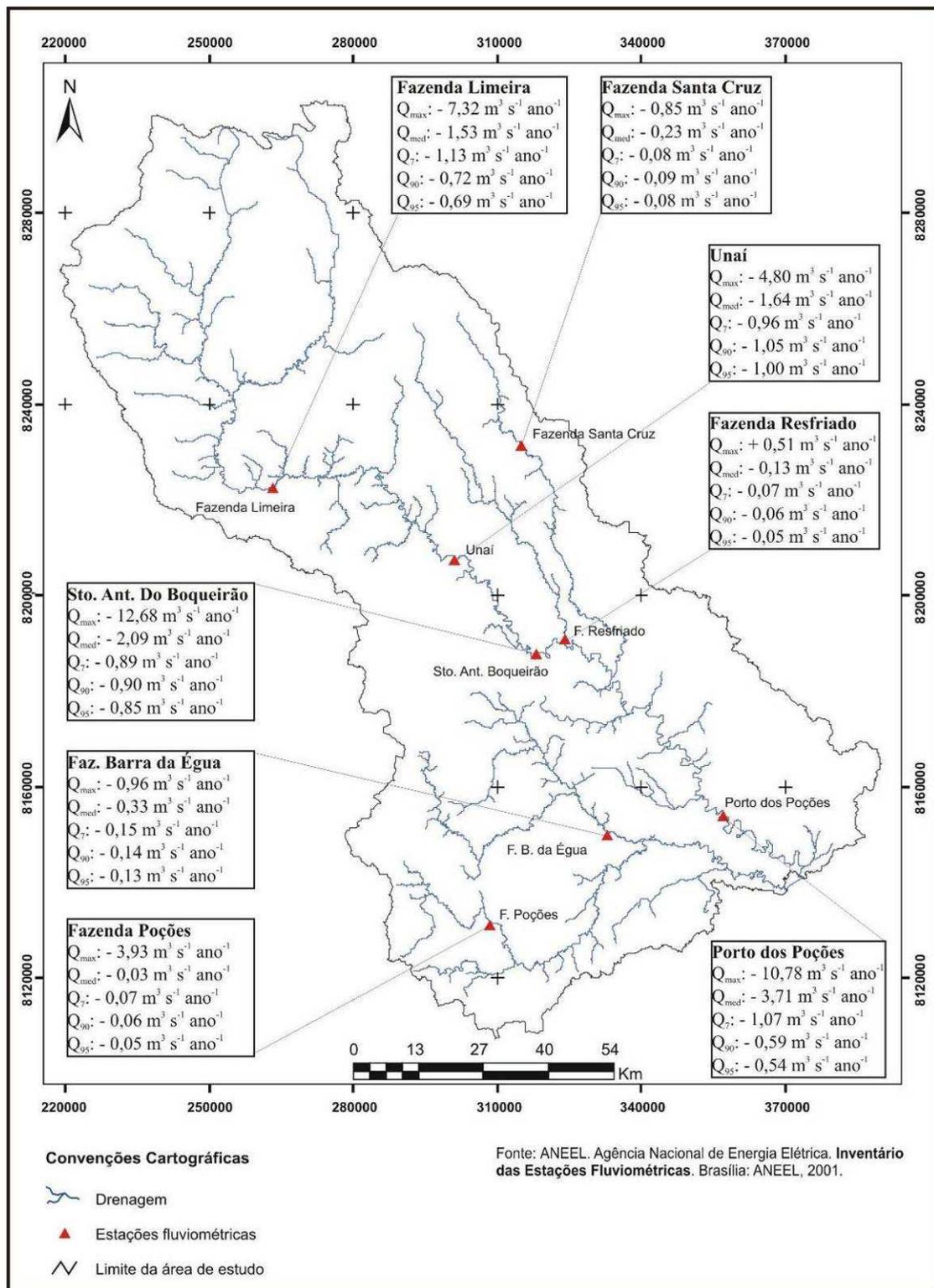


Figura 8.18. Comportamento das vazões das oito estações fluviométricas no período de 1985 a 2000, por meio do  $\beta_1$  das equações de regressões lineares simples estimadas.

Deste modo, observa-se na Figura 8.18 que as maiores reduções ao longo do tempo das vazões máximas, ocorreram na bacia do rio Preto, na estação fluviométrica Santo Antônio do Boqueirão, com  $12,68 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , provavelmente devido ao aumento da classe de uso do solo reservatórios, com a taxa de 29,82% (Quadro 8.9).

Quando analisadas as informações para vazões médias observa-se que para a estação fluviométrica Porto dos Poções, houve a maior redução ao longo do tempo com o valor de  $3,71 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

Os valores de  $\beta_1$  das vazões mínimas  $Q_7$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  foram divididos pela área de drenagem das respectivas estações fluviométricas (Quadro 8.6), sendo obtidos os valores das reduções em vazões específicas, conforme visualiza-se no Quadro 8.11.

Quadro 8.11. Reduções do coeficiente  $\beta_1$  para as vazões específicas mínimas no período entre 1985 a 2000

Estações fluviométricas	Reduções para as vazões específicas ( $\text{L s}^{-1} \text{ ano}^{-1} \text{ km}^2$ )		
	$q_7$	$q_{90}$	$q_{95}$
Fazenda Barra da Égua	0,09	0,09	0,08
Fazenda Poções	0,13	0,11	0,09
Fazenda Limeira	0,27	0,17	0,16
Unai	0,18	0,19	0,18
Santo Antônio do Boqueirão	0,15	0,15	0,14
Fazenda Resfriado	0,10	0,09	0,07
Fazenda Santa Cruz	0,16	0,16	0,15
Porto dos Poções	0,11	0,06	0,05

Linhas hachuradas representam estações na bacia do Entre Ribeiros, as demais para a bacia do rio Preto

Assim, verifica-se que de maneira geral as vazões mínimas específicas  $q_7$  obtiveram maiores reduções quando comparadas com as vazões específicas  $q_{90}$  e  $q_{95}$ . Da mesma maneira, a  $q_{90}$  obteve maiores reduções quando comparadas com a  $q_{95}$  para o período analisado.

A área de drenagem que sofreu maiores reduções para a  $q_7$  foi a estação fluviométrica Fazenda Limeira, bem como estando dentre as maiores reduções para a  $q_{90}$  e  $q_{95}$ .

Desta forma, obtiveram as maiores reduções para as vazões mínimas específicas as estações fluviométricas Fazenda Limeira, Unai, Fazenda Santa Cruz e Santo Antônio do Boqueirão.

Visualizam-se, por meio da Figura 8.19, os resultados do coeficiente  $\beta_1$  para a precipitação média anual (Pa), precipitação do mês mais chuvoso (Pmc) e precipitação do mês mais seco (Pms) observadas nas oito áreas de drenagem das estações fluviométricas selecionadas.

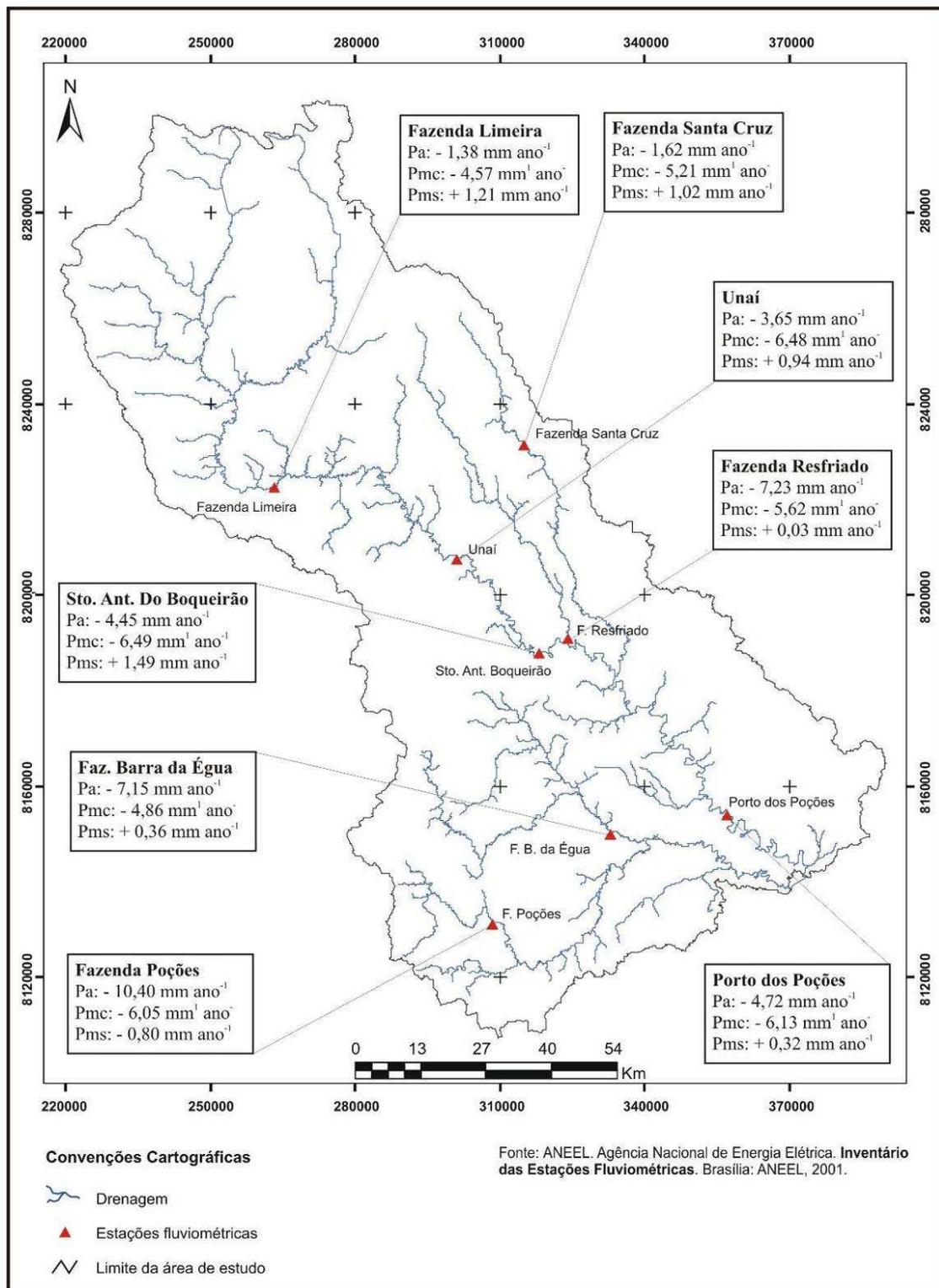


Figura 8.19. Comportamento das precipitações das oito estações fluviométricas no período de 1985 a 2000, por meio do  $\beta_1$  das equações de regressões lineares simples estimadas.

Com relação às precipitações observa-se significância acima de 80% (Quadro 8.10) para todas elas, o que mostra que sua redução ou aumento possui uma elevada expressividade ao longo do período. Neste caso, a precipitação do mês mais chuvoso apresentou resultado

mais expressivo quando comparada aos outros tipos de precipitações monitoradas, chegando a um valor de 94,1% em média.

No Quadro 8.12 apresentam-se os resultados referentes às médias de reduções para a precipitação média anual (Pa) e precipitação do mês mais chuvoso (Pmc), bem como as médias de crescimento da precipitação do mês mais seco, nas áreas de drenagem das seções fluviométricas monitoradas localizadas nas duas bacias.

Quadro 8.12. Médias das variações nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros no período entre 1985 a 2000

Bacias monitoradas	Médias das variações obtidas por bacia (mm ano <sup>-1</sup> )		
	Pa	Pmc	Pms
Rio Preto	-3,84	-5,75	+0,83
Ribeirão Entre Ribeiros	-8,77	-5,45	-0,22

Deste modo, observa-se que para a precipitação média anual (Pa) houve uma maior redução para as áreas de drenagem das estações fluviométricas localizadas na bacia do ribeirão Entre Ribeiros, com valor de 8,77 mm ano<sup>-1</sup> quando comparadas às estações da bacia do rio Preto sendo obtido o valor de 3,84 mm ano<sup>-1</sup>.

Neste mesmo período houve uma maior redução média da precipitação do mês mais chuvoso (Pmc), para as estações localizadas na bacia do rio Preto, com valor de 5,75 mm ano<sup>-1</sup>, registrando-se valores de até 6,49 mm ano<sup>-1</sup> para a área de drenagem da estação Santo Antônio do Boqueirão (Figura 8.19).

Com relação aos resultados obtidos, por meio do monitoramento da precipitação do mês mais seco (Pms), nas áreas de drenagem das oito estações fluviométricas, localizadas nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros, houve uma diferenciação no comportamento para as duas bacias citadas.

A única área de drenagem onde houve redução da Pms ao longo do tempo foi a área da estação fluviométrica Fazenda Poções, com valor de 0,80 mm ano<sup>-1</sup> (Figura 8.18). Neste sentido, no momento de realização da média entre as estações por bacias hidrográficas, a bacia do ribeirão Entre Ribeiros obteve uma redução média 0,22 mm ano<sup>-1</sup>, conforme é apresentado no Quadro 8.12.

Entretanto, para a bacia do rio Preto a média de aumento da Pms foi de 0,83 mm ano<sup>-1</sup>, registrando-se valores de 1,49 mm ano<sup>-1</sup> para a área de drenagem da estação fluviométrica Santo Antônio do Boqueirão (Figura 8.16).

Nota-se que mesmo para a precipitação do mês mais seco (Pms), com tendência de comportamento de elevação, este aumento não foi suficiente para que houvesse alterações para aumento das vazões mínimas Q<sub>7</sub>, Q<sub>90</sub> e Q<sub>95</sub>, o que comprova que o uso consuntivo de

água pelo aumento da agricultura na área de estudo, bem como, para o consumo para abastecimento humano têm influenciado nas reduções destas vazões.

Com relação às precipitações média anual (Pa) e do mês mais chuvoso (Pmc), houve uma coerência quando relacionadas com os dados de vazões média e máxima, ou seja, a redução da precipitação média anual e precipitação do mês mais chuvoso certamente teve influência para que estas vazões acompanhassem esta redução, visto que, a precipitação é o principal meio de entrada de água nas bacias monitoradas.

### **8.3.3 - Associações entre modificações no uso do solo e comportamento hidrológico**

Neste estudo de associação entre modificações no uso do solo e comportamento hidrológico destas bacias, não participaram das análises as classes de uso do solo reservatórios e urbanização, pelo fato de não serem espacialmente representativas em ambas as bacias, não chegando a representar 1% das mesmas.

#### **8.3.3.1 - Vazões máximas**

O comportamento observado ao longo do período de análise deste trabalho, compreendido entre 1985 a 2000, evidencia um decréscimo nas vazões máximas para todas as estações fluviométricas monitoradas neste estudo, exceto para a estação Fazenda Resfriado.

O comportamento de redução da vazão máxima está associado à redução da precipitação do mês mais chuvoso (Pmc), pois o comportamento da Pmc também foi de redução ao longo do tempo. Entretanto, a área de drenagem da estação fluviométrica Fazenda Resfriado não pode ser inclusa nesta associação, pois a Pmc teve uma redução ao longo do tempo, sendo que a vazão máxima teve uma tendência de crescimento neste mesmo período.

Assim, supõe-se como provável causa para este comportamento que com o aumento das áreas de cobertura de cultivo sobre áreas de pasto e cerrado, reduziu-se a cobertura do solo às ações da água da chuva.

Outra hipótese levantada para a explicação deste fenômeno é que se o total precipitado ao longo do mês mais chuvoso tenha sido concentrado em alguns dias, o efeito da substituição da cobertura do solo trará sérias conseqüências ao comportamento hidrológico da bacia, podendo até mesmo a tendência do comportamento da vazão aumentar em função de tendências de precipitações estarem diminuindo.

Para este período a classe de uso do solo mata consegue ser explicativa para a associação do comportamento da vazão máxima para todas as estações, exceto para as estações fluviométricas Fazenda Limeira e Fazenda Resfriado.

Porém, o comportamento esperado só não foi observado para as duas estações anteriormente citadas, onde ocorreram reduções na vazão máxima com diminuição da cobertura de mata para a área de drenagem da estação Fazenda Limeira e aumento das vazões máximas com o aumento da cobertura de mata para a área de drenagem da estação Fazenda Resfriado.

Nesta última, mesmo com a diminuição da precipitação do mês mais chuvoso (Pmc) e aumento das áreas com cobertura de mata a vazão máxima aumentou, sustentando a hipótese de que a Pmc tenha sido concentrada em alguns dias do mês.

Com relação à classe de uso do solo cerrado foi constatado que sua tendência de comportamento foi de redução em todas as áreas de drenagem das oito estações fluviométricas avaliadas neste trabalho.

Deste modo, esperaria-se um aumento das vazões máximas nas estações, devido à substituição desta classe de uso do solo por áreas de cultivo, principalmente. No entanto, para o período analisado apenas a estação Fazenda Resfriado foi associativa ao comportamento da vazão máxima associado ao uso do solo cerrado.

Nas demais áreas de drenagem das estações monitoradas, o comportamento de redução das áreas de cerrado e aumento da vazão máxima não é justificado, mas sim devido à redução da precipitação do mês mais chuvoso nestas áreas de drenagem.

A classe de uso do solo pasto apresentou tendência de redução de sua área de cobertura ao longo do tempo em todas as áreas de drenagem das estações fluviométricas estudadas, exceto para a área da estação Porto dos Poções.

Com a redução das áreas de cobertura de pasto por coberturas de áreas de mata, sobretudo, esperava-se uma redução das vazões máximas observadas nas estações fluviométricas, devido à maior cobertura do solo pela mata, aumentando a interceptação da água da chuva pela cobertura vegetal mais densa e possibilitando, com isto, maiores taxas de infiltração de água no solo.

Entretanto, no período de 1985 a 2000 o comportamento da vazão máxima pode ser explicado por meio da associação com o uso do solo pasto, exceto para as estações Fazenda Limeira e Fazenda Resfriado, pois para a primeira estação foi constatada a redução de pasto e a redução de mata, com redução da vazão máxima. Neste sentido, a redução de pasto não está associada à redução da vazão máxima, sendo a mais provável causa para este comportamento a redução da precipitação do mês mais chuvoso (Pmc).

Já para a área de drenagem da estação Fazenda Resfriado foi constatada a substituição de pasto por áreas de mata, porém o comportamento da tendência observada para a vazão máxima não teve redução ao longo do período de análise e sim de aumento. Este aumento de vazão máxima pode estar relacionado com as formas de precipitação na bacia, devido, sobretudo pela sua intensidade.

Finalmente, para a classe de uso do solo cultivado houve a tendência de aumento em sua área de cobertura ao longo do tempo, para todas as áreas de drenagem das estações fluviométricas estudadas.

Neste período, o comportamento da vazão máxima não pode ser associado ao uso do solo cultivado, pois com o aumento deste tipo de uso em detrimento, principalmente, de cerrado e por vezes por mata, causaria um aumento na vazão máxima observada nas estações avaliadas, sendo que o comportamento das vazões máximas observadas não expressam esse aumento, exceto para a seção Fazenda Resfriado.

Desta forma, existe uma associação qualitativa constatada somente para a estação fluviométrica Fazenda Resfriado, onde a diminuição das áreas de cerrado acarretou um comportamento de aumento na tendência das vazões máximas para esta estação fluviométrica.

Neste contexto, o principal fator atuante para que as vazões máximas observadas neste período diminuíssem foi a redução da Pmc, que teve um comportamento de diminuição ao longo do tempo para todas as áreas de drenagem das estações monitoradas, com significância média de 94,1%.

Com isto, as variáveis que estão associadas qualitativamente com as vazões máximas observadas para as áreas de drenagem das oito estações fluviométricas avaliadas neste trabalho foram: a precipitação do mês mais chuvoso (Pmc), áreas de coberturas de mata e pasto, obtendo as significâncias de 94,1%, 90,7% e 72,3%, respectivamente.

Assim, observa-se a maior influência do fator climático no comportamento do regime hidrológico das vazões máximas observadas para o período de 1985 a 2000, sendo em seguida, mais influenciadas pelas classes de usos do solo mata e pasto.

Com base no diagrama de relações causais do comportamento das vazões máximas, ajustaram-se equações a partir da metodologia de regressão linear múltipla, na tentativa de associar as vazões máximas observadas às diversas classes de usos do solo.

Um fator muito importante a ser ressaltado é com relação aos sinais dos coeficientes das variáveis. Para o ajuste das equações de regressão linear múltipla foram observados, de acordo com os diagramas de relações causais, os sinais positivo ou negativo.

Assim, as variáveis que sempre irão possuir sinais positivos, são: precipitação do mês mais chuvoso (Pmc), cultivo e pasto; sendo que a variável mata sempre receberá sinais negativos, quando associados aos ajustes para as vazões máximas.

Com isto, para o aumento de Pmc mantendo as outras variáveis constantes, o valor da variável dependente vazão terá um comportamento de aumento. Com o aumento da variável cultivo, mantendo as outras constantes, a vazão terá um comportamento de aumento, assim como para a variável pasto.

Esta adoção foi necessária para que o ajuste das equações do Quadro 8.13 pudesse ficar “hidrologicamente consistente”, ou seja, possuindo um comportamento hidrológico condizente com uma determinada situação esperada, conforme é descrito por meio dos diagramas de relações causais.

Porém, para a variável mata sempre haverá o acompanhamento do sinal negativo, pois com o aumento desta variável, há uma tendência de uma maior possibilidade de infiltração das águas da chuva e uma maior rugosidade no terreno, propiciando, desta forma, uma redução do escoamento superficial.

No Quadro 8.13 podem ser observadas as equações ajustadas para cada uma das oito estações fluviométricas monitoradas neste estudo e as significâncias obtidas para cada uma das variáveis explicativas do comportamento da vazão máxima.

Deste modo, observa-se que em apenas quatro estações fluviométricas ajustaram-se equações com  $R^2$  satisfatórios, sendo as estações fluviométricas Fazenda Limeira, Unaí, Santo Antônio do Boqueirão e Fazenda Santa Cruz.

Para as demais estações: Fazenda Barra da Égua, Fazenda Poções, Fazenda Resfriado e Porto dos Poções não foram obtidas equações com coeficientes de determinação satisfatórios, sendo que para esta última nem foi obtido ajuste.

Para se chegar a cada equação apresentada por meio do Quadro 8.13 foram testadas aproximadamente de 12 a 15 combinações entre as variáveis explicativas, sendo a presença da precipitação uma constante em todas estas combinações.

Além deste fato, observa-se que as principais variáveis que conseguiram explicar a variável dependente ( $Q_{max}$ ) nas equações ajustadas foram: a precipitação do mês mais chuvoso (Pmc), mata (M), cultivo (Cul) e pasto (P), sendo que esta última variável foi apenas utilizada para o ajuste para a estação fluviométrica Fazenda Santa Cruz.

Em seis das oito estações fluviométricas monitoradas: Fazenda Barra da Égua, Fazenda Limeira, Unaí, Santo Antônio do Boqueirão, Fazenda Resfriado e Fazenda Santa Cruz foram registradas maiores significâncias para os coeficientes para a variável precipitação

do mês mais chuvoso (Pmc), logo depois pelas variáveis cultivo, mata e pasto, respectivamente.

Deste modo, é notório o controle climático sobre a associação do regime de vazões máximas observadas na área de estudo, pois as maiores significâncias na maioria das estações estão associadas a esta variável, devido à alta significância da variável Pmc ao longo do período analisado.

Desta forma, a tendência de comportamento da vazão máxima acompanhou a tendência obtida pela precipitação do mês mais chuvoso ao longo do período analisado, mesmo tendo sido observadas altas significâncias para variáveis cuja resposta esperada fosse para o sentido ao contrário, ou seja, o aumento das áreas de cultivo não influenciou no aumento das vazões máximas observadas.

A classe de uso do solo mata obteve uma significância média de 77,02% nas equações ajustadas, bem como a presença em todos os ajustes realizados, o que auxiliou na redução do comportamento das vazões máximas observadas para as áreas de drenagem das estações monitoradas, devido ao potencial aumento da evapotranspiração.

Quadro 8.13. Equações ajustadas para a vazão máxima por estação fluviométrica no período de 1985 a 2000

Estação	Equação ajustada	R <sup>2</sup> (%)	Sign(a) (%)	Variáveis *	Sign(b) dos coeficientes (%)			
42435000	$Q_{\max} = 48,87 + 0,1027P_{\text{mc}} - 0,02765M$	44,16	82,59	Pmc, M	73,48	62,26		
42440000	$Q_{\max} = 324,223 - 0,9698M + 0,0151P_{\text{mc}}$	13,40	35,07	M, Pmc	78,10	52,46		
42460000	$Q_{\max} = -774,648 + 1,4101P_{\text{mc}} + 0,3673C_{\text{ul}} - 0,0374M$	75,54	94,53	Pmc, Cul, M	99,29	93,39	53,64	
42490000	$Q_{\max} = 546,137 + 0,4339P_{\text{mc}} - 0,3605M + 0,04623C_{\text{ul}}$	69,89	77,14	Pmc, M, Cul	93,15	91,89	64,63	
42540000	$Q_{\max} = 206,695 + 2,2949P_{\text{mc}} + 0,3983C_{\text{ul}} - 0,6214M$	88,65	99,15	Pmc, Cul, M	99,91	96,07	92,71	
42545500	$Q_{\max} = 13,41 + 0,1198P_{\text{mc}} + 0,5633C_{\text{ul}} - 0,3435M$	53,34	62,21	Pmc, Cul, M	89,32	88,43	73,35	
42546000	$Q_{\max} = 52,85 + 1,3022C_{\text{ul}} + 0,2794P_{\text{mc}} - 0,3759M + 0,1986P$	94,94	99,26	Cul, Pmc, M, P	99,90	99,70	87,21	79,89
42600000	-	-	-	-	-	-	-	-

Sign(a): Significância da equação pelo teste F; Sign(b): Significância dos coeficientes dos parâmetros pelo teste t

\* Pmc - Precipitação do mês mais chuvoso, M - Mata, C - Cerrado, Cul - Cultivo e P - Pasto

- Sem ajuste

42435000 - Fazenda Barra da Égua

42540000 - Santo Antônio do Boqueirão

42440000 - Fazenda Poções

42545500 - Fazenda Resfriado

42460000 - Fazenda Limeira

42546000 - Fazenda Santa Cruz

42490000 - Unai

42600000 - Porto dos Poções

### 8.3.3.2 - Vazões mínimas

No período de 1985 a 2000 o comportamento das tendências para todas as vazões mínimas das estações fluviométricas avaliadas neste trabalho ( $Q_7$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ), foi de redução (Quadros 8.14 a 8.16).

Observa-se ainda que a média das significâncias das tendências para o período analisado foram de 95,7%, 92,7% e 93,0%, respectivamente para a  $Q_7$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , chegando a valores de 99,0%, 99,3% e 99,3% na área de drenagem da estação fluviométrica Fazenda Santa Cruz. Assim, constata-se que a estação Fazenda Santa Cruz foi a seção fluviométrica que obteve as maiores reduções expressivas para as vazões mínimas dentre todas as demais estações monitoradas por este estudo.

O comportamento de redução das vazões mínimas está associado à redução da precipitação média anual ( $P_a$ ), pois foi observado que o comportamento da mesma também foi de redução ao longo do período de análise para as áreas de drenagem de todas as estações fluviométricas, com significância média de 81,1%, atingindo valores de 94,9% para a área de drenagem da estação fluviométrica Fazenda Poções.

Quando analisados os dados de cobertura da classe de uso do solo mata, apenas a área de drenagem da estação fluviométrica Fazenda Limeira obteve comportamento condizente, pois com a diminuição desta classe de uso do solo na área de drenagem desta estação, esperaria-se uma redução também das vazões mínimas  $Q_7$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ . Enquanto para as outras estações monitoradas neste trabalho os valores de cobertura de mata elevaram-se e os valores das vazões mínimas reduziram-se, refletindo um comportamento não condizente apoiado pelas análises de relações causais.

Assim, com o crescimento de áreas de cobertura por mata, algumas vezes por veredas, principalmente sobre áreas de pasto, esperaria-se um aumento das vazões mínimas, devido ao fato da maior possibilidade de infiltração de água no solo e, conseqüente, re-alimentação do aquífero subterrâneo, alimentando desta forma as vazões em tempo de estiagem.

Neste sentido, observa-se que qualitativamente a classe de uso do solo mata não associa-se para a explicação da redução das vazões mínimas, exceto para a estação Fazenda Limeira.

A classe de uso do solo cerrado obteve comportamento ao longo da série histórica de dados, obtendo significância média de 97,1%, chegando a valores de 99,9% para a área de drenagem da estação fluviométrica Porto dos Poções, que representa cerca de 91,99% da área de drenagem da bacia do rio Preto.

Conforme dados analisados anteriormente para as tendências das diversas classes de

usos do solo, houve uma maior substituição desta classe por cobertura de uso agrícola.

Assim, o uso do solo cerrado é explicativo para o comportamento das vazões mínimas estudadas neste trabalho para todas as estações fluviométricas, pois com a substituição das áreas de cobertura desta classe de uso do solo para áreas de cultivo, principalmente, esperaria-se uma redução destas vazões, devido à maior exposição do solo às ações das águas das chuvas, aumentando assim o escoamento superficial e selamento superficial e conseqüente redução da vazão mínima.

Com relação à classe de uso do solo pasto observou-se uma tendência de redução de sua cobertura em todas as estações fluviométricas avaliadas durante o período de 1985 a 2000, exceto para a área de drenagem da estação fluviométrica Porto dos Poções onde apresentou comportamento de elevação ao longo do tempo.

Esta redução deve-se ao fato do avanço das áreas de mata sob áreas de pasto. Porém, este quadro não é válido para as áreas de drenagem das estações Fazenda Limeira e Porto dos Poções, sendo que na primeira ambos os usos do solo pasto e mata tiveram um comportamento de queda, sendo o principal responsável por essa redução o crescimento das áreas de cultivo. Já para a área da estação Porto dos Poções houve a tendência de crescimento da área de cobertura de pasto ao longo do período analisado, divergindo das demais áreas de drenagens de estações fluviométricas.

Neste sentido, a classe de uso do solo pasto não consegue explicar, por meio de uma análise qualitativa a associação entre reduções nas vazões mínimas para as estações monitoradas, exceto para as estações Fazenda Limeira e Porto dos Poções.

Pois, devido à substituição de pasto por mata na maioria dos casos encontrados, esperaria-se um aumento das vazões mínimas, devido ao aumento da interceptação vegetal e conseqüente aumento de taxas de infiltração, alimentando os aquíferos subterrâneos e reduzindo-se o escoamento superficial.

Entretanto, para a área de drenagem da estação Fazenda Limeira houve a diminuição das áreas de pasto e mata, sendo substituídas pelo uso do solo cultivo, o que diminui a eficiência da interceptação das águas da chuva pela cobertura vegetal, devido a menores taxas de cobertura do solo, possibilitando desta forma, a redução das vazões mínimas. Para a área de drenagem da estação Porto dos Poções mesmo tendo sido observado o crescimento de áreas de cobertura de pasto, o que contribui para a redução das vazões mínimas, há uma discordância, pois também há o aumento da cobertura de mata.

O que explica a redução das vazões mínimas para esta área de drenagem é que a única classe de uso do solo que se reduziu ao longo do tempo foi o cerrado, ou seja, como todas as oito bacias de estações fluviométricas estão inseridas no bioma do cerrado, a redução deste

tipo de vegetação que é a natural da região, influenciou significativamente a redução das vazões mínimas, aliado com a redução da precipitação média anual ao longo do período analisado e aumento de áreas de cultivo.

Finalmente, para a classe de uso do solo cultivo observou-se um crescimento das áreas de sua cobertura para todas as áreas de drenagem para as oito estações fluviométricas monitoradas neste trabalho.

Com o crescimento das áreas de cultivo principalmente sob áreas de cerrado é de se esperar um comportamento de redução das vazões mínimas, pois com esta substituição, além da redução da eficiência na interceptação pela cobertura vegetal às ações das águas da chuva, e conseqüente redução da infiltração de água no solo, o uso de água por irrigação para atendimento da nova demanda para suprimento das lavouras, reduz a disponibilidade de água na bacia principalmente em tempos de estiagem.

Desta forma, é associativo o comportamento obtido por esta classe de uso do solo para a redução das vazões mínimas em todas as áreas de drenagem das estações fluviométricas monitoradas.

Este fato trás à tona a realidade da área em estudo, pois devido a este crescimento acelerado das áreas de cultivo nas áreas de drenagem das estações fluviométricas causam conflitos de uso deste recurso, evidenciando problemas de disponibilidade de água para atendimento da demanda dos usuários conforme citado por Rodriguez (2004).

Desta forma, as variáveis que estão associadas qualitativamente com as vazões mínimas observadas  $Q_7$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  para todas as oito estações fluviométricas monitoradas neste trabalho, foram: a precipitação média anual ( $P_a$ ), áreas de coberturas das classes de uso do solo cerrado e cultivo, obtendo as significâncias médias de 81,1%, 97,1% e 97,5%, respectivamente, conforme é observado por meio do Quadro 8.17.

Assim, observa-se que as maiores significâncias obtidas para a associação com a redução das vazões mínimas observadas são das áreas de cultivo e cerrado, respectivamente, sendo em seguida mais influenciadas pela precipitação média anual. Isto reflete que as classes de uso do solo cultivo e cerrado contribuem expressivamente para a redução das vazões mínimas na área de estudo, seguidas pela precipitação média anual.

Com base no diagrama de relações causais para o comportamento das vazões mínimas, ajustaram-se equações a partir da metodologia de regressão linear múltipla, para a tentativa de associação entre as vazões mínimas ( $Q_7$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) observadas e as diversas classes de usos do solo.

No Quadro 8.14 podem ser observadas as equações ajustadas para a  $Q_7$ , para cada uma das oito estações fluviométricas monitoradas neste estudo, bem como as significâncias obtidas

para cada uma das equações e variáveis explicativas para a associação do comportamento desta vazão.

Observa-se no Quadro 8.14 que seis estações fluviométricas: Fazenda Poções, Fazenda Limeira, Unai, Santo Antônio do Boqueirão, Fazenda Resfriado e Fazenda Santa Cruz apresentaram equações com  $R^2$  satisfatórios, ou seja, valores iguais ou superiores a 0,70. Porém, as demais estações fluviométricas (Fazenda Barra da Égua e Porto dos Poções) não apresentaram equações com coeficientes de determinação satisfatórios.

Além deste fato, observa-se que as principais variáveis que conseguiram explicar a variável dependente ( $Q_7$ ) nas equações ajustadas foram: a precipitação do mês mais seco (Pms), precipitação média anual (Pa), mata (M), cerrado (C), cultivo (Cul) e pasto (P), sendo que esta última variável apenas influenciou no ajuste para as estações fluviométricas Fazenda Resfriado e Porto dos Poções.

Nota-se que para as associações quantitativas a variável que possui maior significância média dentre as equações ajustadas foi a mata, com o valor de 89,81% (Quadro 8.14), além do fato de sempre estar em todos os ajustes. Isto demonstra que existe uma significativa associação entre o uso do solo mata e o comportamento da  $Q_7$ .

Neste sentido, comprova-se que, quantitativamente, que o aumento da área de cobertura de mata influenciou, junto com as demais variáveis, para a redução da  $Q_7$  nas bacias das estações fluviométricas estudadas. Além da regeneração deste tipo de uso do solo em vários locais da área de estudo, o que aumentaria as taxas de evapotranspiração, comprova-se por meio de visitas a campo, extensas expansões da cultura de eucalipto, o que compromete a recarga do lençol freático e que retiram água deste ao longo de todo o ano.

Este comportamento é enfatizado pelo fato desta cultura não ser adaptada ao clima do local, ou seja, a maioria das espécies arbóreas da região são dos tipos: caducifólias ou sub-caducifólias, espécies de clima tropical, sendo o eucalipto uma espécie arbórea ombrófila, ou seja, que mantêm-se verde ao longo de todo ano, sem que haja perda de folhas para reduzir a evapotranspiração em períodos de estiagem.

Quadro 8.14. Equações ajustadas para a  $Q_7$  por estação fluviométrica no período de 1985 a 2000

Estação	Equação ajustada	R <sup>2</sup> (%)	Sign(a) (%)	Variáveis *	Sign(b) dos coeficientes (%)			
42435000	$Q_7 = 6,2405 - 0,002587Cul + 0,009439Pms - 0,003841M$	14,65	> 99	Cul, Pms, M	69,44	67,87	52,40	
42440000	$Q_7 = 1,9375 + 0,03570Pms - 0,004590M + 0,0007930C$	69,59	82,10	Pms, M, C	96,92	70,80	60,65	
42460000	$Q_7 = 1,30 + 0,03450C + 0,05775Pms - 0,05008M - 0,007491Cul$	90,91	97,68	C, Pms, M, Cul	99,01	98,74	79,84	77,20
42490000	$Q_7 = 53,77 - 0,03917M + 0,006835Pa - 0,004025Cul + 0,002339C$	93,79	98,89	M, Pa, Cul, C	99,80	93,95	81,82	73,88
42540000	$Q_7 = 59,21 - 0,04072M + 0,004337Pa + 0,002907C$	85,12	98,36	M, Pa, C	99,47	77,25	76,16	
42545500	$Q_7 = 6,3044 - 0,01827M - 0,007777P + 0,03002Pms$	75,53	94,52	M, P, Pms	99,44	96,14	88,76	
42546000	$Q_7 = 3,1284 - 0,006763M - 0,004280Cul + 0,0006596C + 0,001405Pms$	78,52	88,14	M, Cul, C, Pms	86,20	85,50	57,68	53,94
42600000	$Q_7 = 89,45 - 0,02073M - 0,007283P + 0,02654Pms$	54,27	76,43	M, P, Pms	96,18	71,94	55,40	

Sign(a): Significância da equação pelo teste F; Sign(b): Significância dos coeficientes dos parâmetros pelo teste t  
 \* Pms - Precipitação do mês mais seco, Pa - Precipitação anual, M - Mata, C - Cerrado, Cul - Cultivo e P - Pasto

42435000 - Fazenda Barra da Égua	42540000 - Santo Antônio do Boqueirão
42440000 - Fazenda Poções	42545500 - Fazenda Resfriado
42460000 - Fazenda Limeira	42546000 - Fazenda Santa Cruz
42490000 - Unai	42600000 - Porto dos Poções

Assim, a tendência do comportamento de redução da  $Q_7$  foi mais associativa com o comportamento da tendência de crescimento do uso do solo mata e cultivo, pois o registro da redução da  $Q_7$  pode estar associado às taxas de evapotranspiração da mata e maiores exposições do solo às ações das águas das chuvas no uso cultivo.

A quantidade de água evapotranspirada faz com que a bacia perca água para a atmosfera, minimizando desta forma, a principal fonte de alimentação de vazões no período de estiagem, sendo que até por esse motivo, os sinais da variável mata sempre estarão negativos quando associados às vazões mínimas.

Entretanto, as variáveis cultivo e cerrado registraram significâncias médias para as equações ajustadas de 78,49% e 73,48%, respectivamente. A variável cultivo esteve presente em 50% das equações ajustadas, sendo que a variável cerrado, em cinco das oito equações.

A classe de uso do solo cerrado, em associação com a classe de uso cultivo, é uma das grandes responsáveis pelo decréscimo ocorrido em todas as vazões mínimas monitoradas nas oito estações fluviométricas, devido à expansão da agricultura irrigada na bacia. O avanço de áreas de cultivo sob áreas de cerrado proporcionou uma maior exposição do solo às ações das águas das chuvas. Com isto, em épocas de estiagem, quando registra-se as vazões mínimas ( $Q_7$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) espera-se uma tendência de redução para estas vazões.

Um fator de relevância a ser exposto é o fato da presença de dois tipos de precipitações nas equações, sendo a precipitação média anual ( $P_a$ ) e a precipitação do mês mais seco ( $P_{ms}$ ). Das oito equações ajustadas, em apenas duas houve a presença da  $P_a$ , sendo que as demais houve o melhor ajuste para a  $P_{ms}$ .

A maior presença da  $P_{ms}$  (75%) nos ajustes era esperada, pois o mês que registra a  $P_{ms}$  é o mesmo mês que há o registro das vazões mínimas, assim, conclui-se que estes dados possuem uma alta correlação. Mas por força de ajuste, por meio da observação dos sinais deste coeficiente, as estações fluviométricas Unaí e Santo Antônio do Boqueirão receberam a variável  $P_a$ , pois caso contrário a precipitação teria um sinal negativo.

Com relação às vazões  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  as equações ajustadas podem ser visualizadas por meio dos Quadros 8.15 e 8.16, para cada uma das oito estações fluviométricas monitoradas neste estudo, bem como as significâncias obtidas para cada equação e variáveis explicativas para a associação do comportamento destas vazões.

Quadro 8.15. Equações ajustadas para a Q<sub>90</sub> por estação fluviométrica no período de 1985 a 2000

Estação	Equação ajustada	R <sup>2</sup> (%)	Sign(a) (%)	Variáveis *	Sign(b) dos coeficientes (%)			
42435000	Q <sub>90</sub> = 3,0701 + 0,0004814Pa - 0,00001759P	0,41	> 99	Pa, P	55,71	50,00		
42440000	Q <sub>90</sub> = 6,3114 - 0,01729M - 0,01249P + 0,02375Pms	69,61	87,98	M, P, P <sub>ms</sub>	93,14	89,80	89,32	
42460000	Q <sub>90</sub> = 3,7812 - 0,05279M + 0,03244C + 0,02408Pms - 0,003193Cul	90,22	97,32	M, C, Pms, Cul	99,00	98,87	64,42	63,09
42490000	Q <sub>90</sub> = 57,37 - 0,04748M + 0,009710Pa + 0,004003C - 0,002265Cul	93,94	98,94	M, Pa, C, Cul	99,81	96,05	81,46	67,33
42540000	Q <sub>90</sub> = 77,61 - 0,04527M - 0,005662P + 0,004838Pa + 0,0009884C	82,53	91,92	M, P, Pa, C	97,75	77,63	75,04	56,53
42545500	Q <sub>90</sub> = 7,8438 - 0,02041M - 0,01075P + 0,01914Pms	76,72	95,14	M, P, Pms	99,45	98,00	76,82	
42546000	Q <sub>90</sub> = 2,8221 - 0,007522M + 0,002029C + 0,0003044Pa - 0,001885Cul	69,58	71,11	M, C, Pa, Cul	77,47	65,39	64,00	62,97
42600000	Q <sub>90</sub> = 105,442 - 0,02341M - 0,009034P + 0,003805Pms	51,31	72,86	M, P, Pms	95,21	72,13	50,63	

Sign(a): Significância da equação pelo teste F; Sign(b): Significância dos coeficientes dos parâmetros pelo teste t

\* Pms - Precipitação do mês mais seco, Pa - Precipitação anual, M - Mata, C - Cerrado, Cul - Cultivo e P - Pasto

42435000 - Fazenda Barra da Égua      42540000 - Santo Antônio do Boqueirão  
 42440000 - Fazenda Poções          42545500 - Fazenda Resfriado  
 42460000 - Fazenda Limeira        42546000 - Fazenda Santa Cruz  
 42490000 - Unai                        42600000 - Porto dos Poções

Quadro 8.16. Equações ajustadas para a Q<sub>95</sub> por estação fluviométrica no período de 1985 a 2000

Estação	Equação ajustada	R <sup>2</sup> (%)	Sign(a) (%)	Variáveis *	Sign(b) dos coeficientes (%)			
42435000	Q <sub>95</sub> = 2,9024 + 0,0003506Pa - 0,0002039P	0,30	> 99	Pa, P	54,39	51,21		
42440000	Q <sub>95</sub> = 5,2815 - 0,01413M - 0,01127P + 0,01999Pms	69,78	85,08	M, P, Pms	91,21	89,50	87,60	
42460000	Q <sub>95</sub> = 7,6424 - 0,05059M + 0,03014C - 0,005347Cul + 0,02680Pms	90,21	97,31	M, C, Cul, Pms	98,97	98,72	71,57	66,43
42490000	Q <sub>95</sub> = 53,69 - 0,04220M + 0,008433Pa + 0,003248C - 0,003086Cul	93,91	98,93	M, Pa, C, Cul	99,80	95,66	79,20	74,76
42540000	Q <sub>95</sub> = 71,85 - 0,04294M - 0,004740P + 0,003778Pa + 0,001509C	84,65	93,66	M, P, Pa, C	98,11	76,28	72,40	61,03
42545500	Q <sub>95</sub> = 7,2770 - 0,01992M - 0,009737P + 0,02395Pms	77,28	95,42	M, P, Pms	99,52	97,73	82,99	
42546000	Q <sub>95</sub> = 2,7887 - 0,007216M - 0,002516Cul + 0,0002481Pa + 0,001438C	71,75	80,58	M, Cul, Pa, C	81,37	70,74	64,26	63,77
42600000	Q <sub>95</sub> = 95,97 - 0,0284M - 0,009192P + 0,015009Pms	52,91	95,42	M, P, Pms	95,49	75,24	52,87	

Sign(a): Significância da equação pelo teste F; Sign(b): Significância dos coeficientes dos parâmetros pelo teste t

\* Pms - Precipitação do mês mais seco, Pa - Precipitação anual, M - Mata, C - Cerrado, Cul - Cultivo e P - Pasto

42435000 - Fazenda Barra da Égua      42540000 - Santo Antônio do Boqueirão  
 42440000 - Fazenda Poções          42545500 - Fazenda Resfriado  
 42460000 - Fazenda Limeira        42546000 - Fazenda Santa Cruz  
 42490000 - Unai                        42600000 - Porto dos Poções

Deste modo, observa-se por meio dos Quadros 8.15 e 8.16 que seis estações fluviométricas: Fazenda Poções, Fazenda Limeira, Unaí, Santo Antônio do Boqueirão, Fazenda Resfriado e Fazenda Santa Cruz apresentaram equações com  $R^2$  satisfatórios.

Porém, as demais estações fluviométricas (Fazenda Barra da Égua e Porto dos Poções) não apresentaram equações com coeficientes de determinação satisfatórios, registrando 0,41% e 51,31% e 0,30% e 52,91%, respectivamente para  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ .

Observa-se que as principais variáveis que conseguiram explicar as variáveis dependentes  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  nas equações ajustadas foram a precipitação do mês mais seco (Pms), precipitação média anual (Pa), mata (M), cerrado (C), cultivo (Cul) e pasto (P), sendo que para esta última variável, ao contrário da  $Q_7$ , observou-se uma maior presença nas equações, bem como maiores significâncias.

Nota-se que a variável que possui maior significância média dentre as equações ajustadas na análise quantitativa foi a mata, com o valor de 94,55% e 94,92%, respectivamente para a  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , além do fato de sempre estar em todos os ajustes, exceto para a estação Fazenda Barra da Égua. Isto demonstra que existe uma significativa associação entre o uso do solo mata e o comportamento das vazões observadas.

Neste sentido, a tendência do comportamento de redução destas vazões, assim como da  $Q_7$ , é associativa por meio da análise quantitativa, com o comportamento da tendência de crescimento do uso do solo mata.

Os usos do solo cerrado e cultivo são uns dos responsáveis pelo decréscimo ocorrido nas vazões mínimas  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , monitoradas nas oito estações fluviométricas. Esta influência é percebida por meio das significâncias médias obtidas por estes usos do solo, que foram de 75,56% e 75,68%, respectivamente.

Finalmente, a classe de uso do solo pasto foi de maior representatividade para a  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , quando comparadas à  $Q_7$ , pois das oito equações ajustadas em cinco esta variável esteve presente, com uma significância média de 77,51% e 77,99% para  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , respectivamente.

É válido ressaltar que o sinal adotado para o pasto nas vazões mínimas foi negativo, pois com o comportamento desta classe ao longo dos anos de 1985 a 2000 foi de redução, principalmente para áreas de mata. Desta forma, espera-se uma tendência de redução das vazões mínimas  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  devido a um maior potencial de evapotranspiração.

Contudo, há uma associação entre as vazões mínimas monitoradas neste trabalho com as variáveis precipitação do mês mais seco (Pms), precipitação anual (Pa), mata, cerrado, cultivo e pasto, conforme o tipo de vazão e estação fluviométrica. Entretanto, de uma maneira geral as variáveis mata, pasto e Pms obtiveram melhores significâncias do que cerrado e cultivo, na associação com as vazões mínimas nas bacias em estudo. Vale destacar que as

classes de uso do solo cerrado e cultivo também influenciam significativamente os ajustes das equações.

### **8.3.3.3 - Vazões médias**

No período de 1985 a 2000 o comportamento das tendências para todas as vazões médias das estações fluviométricas monitoradas neste trabalho foi de redução. A significância média de redução das vazões médias para as áreas de drenagem das estações fluviométricas monitoradas foi de 85,2%, atingindo valores acima de 90% nas áreas de drenagem das estações Fazenda Limeira, Unaí, Santo Antônio do Boqueirão, Fazenda Santa Cruz e Porto dos Poções.

O comportamento de redução das vazões médias foi acompanhado e está associado à redução da precipitação anual (Pa), pois o comportamento da mesma também foi de redução ao longo do período de análise para as áreas de drenagem de todas as oito estações fluviométricas.

Entretanto, a significância média para a redução da precipitação média anual foi de 81,1%, chegando a valores de 94,9% para a área de drenagem da estação Fazenda Poções.

Quando analisados os dados de cobertura da classe de uso do solo mata, apenas a estação Fazenda Limeira não obteve comportamento condizente quando associados às vazões médias, sendo que para as demais estações fluviométricas registrou-se comportamento condizente com as tendências das vazões médias observadas.

O aumento da área de cobertura da classe de uso do solo mata para as áreas de drenagem das demais estações, esperaria-se uma diminuição para as vazões médias, devido a maiores taxas de evapotranspiração e, conseqüentemente, menores taxas de escoamento superficial.

Assim, com o crescimento de áreas de mata, principalmente sobre áreas de pasto esperaria-se uma diminuição das vazões médias, devido ao fato da maior possibilidade de infiltração de água no solo.

Neste sentido, observa-se que qualitativamente a classe de uso do solo mata associa-se para a explicação das vazões médias, exceto para a estação Fazenda Limeira.

Esta associação também foi encontrada por Bruijnzeel (1990) onde observou-se aumento da vazão média com a retirada da vegetação nativa para bacias com área menor do que 1km<sup>2</sup>. Entretanto, para bacias com maiores extensões houve a observação de uma redução da vazão média com o incremento de vegetação nativa, o que é explicado segundo o aumento de evapotranspiração. Esta mesma associação foi encontrada por Costa e Foley (1997) e Costa (2003).

Já com relação à classe de uso do solo cerrado houve a tendência em seu comportamento de redução de sua área de cobertura em todas as áreas de drenagem das oito estações fluviométricas monitoradas. Com isto, esperava-se um aumento das vazões médias observadas para as estações fluviométricas, pois a classe de uso do solo que o substituiu, na maioria das vezes, foi a classe de uso do solo cultivo configurando-se, neste sentido, em menor eficiência à proteção ao solo, menor rugosidade aerodinâmica e menores taxas de evapotranspiração, aumentando desta forma, as vazões médias Costa e Foley (1997) e Costa (2003).

Aliado a este fato, também contribui para a redução das vazões médias a tendência de redução no comportamento da precipitação média anual.

Entretanto, o que se observou foi que mesmo com a redução do cerrado em detrimento, principalmente para áreas de cultivo, não houve aumento das vazões médias observadas para as estações monitoradas.

Assim, a classe de uso do solo cerrado não é associativa qualitativamente com os dados observados para as vazões médias das estações fluviométricas avaliadas neste trabalho.

A classe de uso do solo pasto possui a tendência de redução de sua área de cobertura para todas as estações fluviométricas monitoradas, exceto para a área de drenagem da estação Porto dos Poções. Entretanto, as significâncias destas reduções quando comparadas com as demais classes de uso do solo, está relativamente baixa, com média de 72,3%, enquanto para as demais obteve-se média acima de 90%.

Com a redução da área de cobertura da classe de uso do solo pasto principalmente por áreas de mata, esperaria-se uma diminuição para as vazões médias, devido à maior cobertura do solo, maiores taxas de infiltração, maiores taxas de evapotranspiração Costa e Foley (1997).

Neste sentido, observa-se que qualitativamente a classe de uso do solo pasto associa-se com os comportamentos observados para as vazões médias das estações Fazenda Barra da Égua, Fazenda Poções, Unaí, Santo Antônio do Boqueirão, Fazenda Resfriado e Fazenda Santa Cruz.

Já para as estações Fazenda Limeira e Porto dos Poções não houve comportamento associativo entre vazões médias e a classe de uso do solo pasto, pois na primeira, houve a redução das áreas de pasto, mata e cerrado com crescimento apenas para a classe cultivo, o que resultaria em um aumento da vazão média na mesma. Já para a estação Porto dos Poções houve apenas a redução da classe cerrado, o que resultaria em um aumento das demais, causando um aumento das vazões médias.

Finalmente, a classe de uso do solo cultivo apresentou tendências de crescimento de sua área de cobertura para todas as estações fluviométricas utilizadas neste trabalho no período de 1985 a 2000.

Com o crescimento das áreas de cultivo principalmente sobre áreas de cerrado, era de se esperar um aumento nas vazões médias para as estações fluviométricas, pois com a substituição de cerrado por cultivo, a interceptação das águas da chuva pela cobertura vegetal tenderia a reduzir-se, haveria a tendência de aumento do escoamento superficial e diminuição da evapotranspiração.

Neste sentido, nenhuma associação entre o uso do solo cultivo e vazões médias foi observada nas oito estações em estudo, pois todas apresentaram comportamentos de redução da vazão média com crescimento das áreas de cultivo. Entretanto, um fator preponderante nesta não associação foi que, neste mesmo período, a precipitação média anual também reduziu, aliado ao crescimento das áreas de mata, o que contribuiu para a redução das vazões médias observadas.

Desta forma, as variáveis que estão associadas, qualitativamente, com as vazões médias observadas para a maioria das estações fluviométricas monitoradas neste trabalho foram: a precipitação média anual, as áreas de coberturas das classes de uso do solo mata e pasto.

Com base no diagrama de relações causais para o comportamento das vazões médias, ajustaram-se equações a partir da metodologia de regressão linear múltipla, para a tentativa de associação entre as vazões médias diárias anuais observadas ( $Q_{med}$ ) e as diversas classes de usos do solo.

Deste modo, por meio do Quadro 8.17 podem ser observadas as equações ajustadas para a  $Q_{med}$ , para cada uma das oito estações fluviométricas monitoradas neste estudo, observando-se também as significâncias obtidas para cada uma das equações e variáveis explicativas para a associação do comportamento desta vazão.

Observa-se no Quadro 8.17 que apenas três estações fluviométricas (Unaí, Santo Antônio do Boqueirão e Fazenda Resfriado) apresentaram equações com  $R^2$  satisfatórios.

Quadro 8.17. Equações ajustadas para a  $Q_{med}$  por estação fluviométrica no período de 1985 a 2000

Estação	Equação ajustada	R <sup>2</sup> (%)	Sign(a) (%)	Variáveis *	Sign(b) dos coeficientes (%)			
42435000	$Q_{med} = 19,02 - 0,01708M + 0,004014Pa$	14,15	36,74	M, Pa	73,48	64,38		
42440000	-	-	-	-	-	-	-	-
42460000	$Q_{med} = 82,71 + 0,03108Pa - 0,06707M - 0,02309Cul$	58,30	80,87	Pa, M, Cul	93,60	91,59	86,26	
42490000	$Q_{med} = 96,79 + 0,04319Pa - 0,08127M$	91,60	99,94	Pa, M	99,94	99,94		
42540000	$Q_{med} = 109,109 + 0,05406Pa - 0,09704M + 0,008275Cul$	77,75	95,64	Pa, M, Cul	98,36	97,86	68,83	
42545500	$Q_{med} = 4,584 - 0,07325M + 0,06339Cul + 0,0050Pa$	80,79	96,94	M, Cul, Pa	99,28	99,38	98,20	
42546000	$Q_{med} = 10,80 + 0,005897Pa - 0,05352M - 0,02197C$	47,07	67,38	Pa, M, C	94,99	90,75	89,20	
42600000	$Q_{med} = 561,236 - 0,1831M - 0,03006C + 0,03896P + 0,009488Pa$	58,16	64,64	M, C, P, Pa	85,74	74,33	71,47	54,35

Sign(a): Significância da equação pelo teste F; Sign(b): Significância dos coeficientes dos parâmetros pelo teste t  
 \* Pa - Precipitação anual, M - Mata, C - Cerrado, Cul - Cultivo e P - Pasto  
 - Sem ajuste

42435000 - Fazenda Barra da Égua	42540000 - Santo Antônio do Boqueirão
42440000 - Fazenda Poções	42545500 - Fazenda Resfriado
42460000 - Fazenda Limeira	42546000 - Fazenda Santa Cruz
42490000 - Unai	42600000 - Porto dos Poções

As demais estações (Fazenda Barra da Égua, Fazenda Poções, Fazenda Limeira, Fazenda Santa Cruz e Porto dos Poções) não apresentaram estações com coeficientes de determinação satisfatórios, sendo que a estação Fazenda Poções não obteve nenhum ajuste devido aos sinais dos coeficientes.

Das três estações com ajustes satisfatórios as variáveis explicativas foram: precipitação anual (Pa), mata (M) e cultivo (Cul), sendo que para todas as equações obtidas a classe de uso do solo mata sempre esteve presente como variável explicativa.

Nota-se que a variável que possui maior significância média dentre as equações ajustadas na análise quantitativa foi a variável mata, com o valor de 91,23%. Isto demonstra que existe uma significativa associação entre o uso do solo mata e o comportamento da  $Q_{med}$ .

Neste sentido, a tendência do comportamento de redução da  $Q_{med}$  é associativa, por meio das equações ajustadas, com o comportamento da tendência de crescimento do uso do solo mata, pois a redução da  $Q_{med}$  pode estar associada conforme já salientado por Costa e Foley (1997) e Bruijnzeel (1990).

As variáveis de precipitação anual, cerrado e cultivo registraram significâncias médias para as equações ajustadas de 86,26%, 81,76% e 84,82%, respectivamente.

Um fator que deve ser ressaltado é que sempre o sinal do coeficiente da precipitação anual (Pa) terá um comportamento positivo, pois caso aumente o valor de precipitação a vazão média tenderá também ter um crescimento. As variáveis mata e cerrado terão os sinais negativos e para cultivo e pasto positivos.

Com isto, ajustam-se equações “hidrologicamente consistentes”, pois com o aumento de mata e cerrado espera-se redução para a vazão média, pois estes usos auxiliam o potencial para evapotranspiração. Porém, os usos cultivo e pasto, possuem menor cobertura do solo quando comparados aos outros usos mapeados, favorecendo, deste modo, o aumento das vazões médias.

Assim, as principais responsáveis pela associação com os dados de vazões médias nas oito estações fluviométricas foram as variáveis precipitação anual (Pa) e mata (M) que tiveram comportamento de redução ao longo do período analisado e aumento da área de cobertura, respectivamente.

## **8.4 - CONCLUSÕES**

Com a base nos resultados obtidos neste trabalho chegou-se às seguintes conclusões:

- As classes de usos do solo que tiveram tendências de crescimento ao longo do período analisado foram: mata, cultivo, urbanização e reservatórios. Por outro lado, as classes

de usos do solo que tiveram tendências de redução neste mesmo período foram cerrado e pasto;

- Ao longo do período analisado o aumento das áreas de cobertura de cultivo ocorreu, principalmente, em substituição ao cerrado;

- Os comportamentos das variáveis hidrológicas vazões máxima, mínimas e média, assim como a precipitação anual e a do mês mais chuvoso tiveram tendências gerais de redução ao longo do período analisado. Apenas a precipitação do mês mais seco obteve tendência geral de aumento neste mesmo período;

- Na análise qualitativa, as reduções nas vazões máximas foram mais sensíveis à redução da precipitação do mês mais chuvoso ao longo da série e ao aumento de áreas de mata. Nas vazões mínimas associaram-se as variáveis precipitação anual, cerrado e cultivo. Sendo que para as vazões médias associaram precipitação anual, mata e pasto;

- Na análise quantitativa houve as seguintes associações: às vazões máximas as variáveis de precipitação do mês mais chuvoso, mata e cultivo; às vazões mínimas as variáveis de precipitação do mês mais seco, precipitação anual, mata, cerrado e cultivo; e às vazões médias as variáveis de precipitação anual, mata e cultivo;

- Em uma visão geral, a análise quantitativa conseguiu identificar associações entre as mudanças do uso do solo e comportamento hidrológico, com um maior número de variáveis do que a análise qualitativa.

## **8.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS**

ANA - Agência Nacional de Águas. A evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil.

Brasília: ANA, 64 p. (Edição comemorativa do Dia Mundial da Água), 2002.

\_\_\_\_\_. Aspectos gerais da região: diagnóstico da bacia. Disponível em:

<<http://www.ana.gov.br/Bacias/Sfrancisco/Planos/Paracatu/introdcao.htm>>.

Acesso em: 08 Set. 2005.

\_\_\_\_\_. Sistema de Informações Hidrológicas - HidroWeb. Disponível em:

<<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 17 Set. 2005.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Inventário das Estações Fluviométricas.

Brasília: ANEEL, 2001.

BLASCHKE, T. e KUX, H. Sensoriamento Remoto e SIG Avançados. Oficina de textos: São Paulo, 2005.

BRASIL - Governo Federal. MINAS GERAIS; Governo do estado. DISTRITO FEDERAL.

Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio Paracatu - PLANPAR. [S. l.]: 1996. Vol.

- 1, T. 1. (CD-ROM).
- BRASIL. Política Nacional de Recursos Hídricos. Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. [S. l.]: MMA/ SRH, 1997.
- BRUIJNZEEL, L. A. Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review. IHP. IAHS, UNESCO, 224p., 1990.
- \_\_\_\_\_. Predicting the hydrological impacts of tropical forest conversion: The need for integrated research. *Journal of Hydrology*, 1996.
- CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco. Plano de recursos hídricos para a bacia do rio São Francisco. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004.
- \_\_\_\_\_. Disponível em: <<http://www.cbhsaofrancisco.org.br>>. Acesso em: 11 Jan. 2006
- CODEVASF - COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DO VALE SÃO FRANCISCO.
- Os vales: vale do São Francisco apresenta características de identificação, solos, vegetação, recursos hídricos, potencial energético e irrigação. Disponível em: <<http://www.codevasf.gov.br>>. Acesso em: 03 abr. 2003.
- COSTA, M. H. & FOLEY, J. A. The water balance of the Amazon basin: dependence on vegetation cover and canopy conductance. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 102, 23973-23989, 1997.
- COSTA, M. H., BOTTA, A. and CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, 2003.
- COSTA, M. H. Large-scale hydrological impacts of tropical forest conversion. In: BONELL, M. and BRUIJNZEEL, L.A. (Eds.). *Forest-Water-People in the Humid Tropics*. Cambridge University Press, Cambridge, (in press), 2003.
- COUTINHO, A. C. Segmentação e classificação de imagens Landsat - TM para o mapeamento dos usos da terra na região de campinas, SP. São Paulo: USP, 1997.
- CUNHA, L.V. da. Perspectivas da gestão da água para o século XXI: desafios e oportunidades. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 4, p. 65-73, 2002.
- EMATER. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais. Levantamento de áreas irrigadas na bacia do rio Paracatu/MG. 2006.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Projeto Brasil em Relevo: Dados SRTM compatíveis com as escalas do IBGE. Campinas, 2005. Disponível em:<<http://www.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em : 29 Set. 2005.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute. ArcGIS v. 9.0. Help on Line. Redlands, Califórnia: ESRI, 2004.
- FEDOROV, D., FONSECA, L. M. G., CASTEJON, E. F., KENNEY, C. e MANJUNATH, B.

- S. Software Regeemy 0.2.42. São José dos Campos: DPI/INPE/Universidade da Califórnia, 2005. Disponível em: <<http://regima.dpi.inpe.br>>.
- FERREIRA, P. A. e EUCLYDES, H. P. Recursos hídricos e tecnologia necessária aos projetos hidroagrícolas: bacia do Paracatu. Viçosa, MG: UFV/DEA, 200 p., 1997.
- FREITAS, A. J. Gestão de Recursos Hídricos. In: SILVA, D. D. e PRUSKI, F. F. Gestão de recursos hídricos: aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos; Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; Porto Alegre, RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2000. 659 p.
- GARRIDO, R.J.S. Subprojeto 4.2B - Avaliação dos mecanismos financeiros para o gerenciamento sustentável da bacia do rio São Francisco. In: \_\_\_\_\_. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003. 335 p. (Relatório Final).
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativa populacional para 01/07/2005: considerações. Brasília: IBGE, 2005. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 16/01/2006.
- \_\_\_\_\_. Manual Técnico de Uso da Terra. Rio de Janeiro: IBGE, 2 ed., n.º 7, 2006.
- \_\_\_\_\_. Censos Agropecuários. Brasília: IBGE, 1970, 1975, 1980, 1985 e 1996.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. SPRING - Apostila teórica do curso de Classificação de Imagens Digitais. São José dos Campos: INPE, 2004.
- \_\_\_\_\_. Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas. SPRING v. 4.2. São José dos Campos: INPE/DPI, 2005.
- \_\_\_\_\_. DGI. Divisão de Geração de Imagens. Características técnicas de imagens dos sensores Landsat 5 TM e 7 ETM +. Cachoeira Paulista: INPE/DGI, 2006. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br>>. Acesso em: 07 Jan. 2006.
- LANDIS, J. R. e KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v.33, n.1, 159-174p. 1977.
- LANNA, A.E.L. Gerenciamento da bacia hidrográfica: aspectos conceituais e metodológicos. Brasília: IBAMA, 1995.
- MACHADO, P. J. O. Uma Proposta de Zoneamento Ambiental Para a Bacia Hidrográfica da Represa de São Pedro - Juiz de Fora/MG. Presidente Prudente: UNESP, 1998 (Dissertação de Mestrado).
- MASCARENHAS, N. D. A. e VELASCO, F. R. D. Processamento Digital de Imagens. São Paulo: Instituto de Matemática e Estatística, USP, 1984. In: MOREIRA, M.A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicações. Viçosa: UFV, 250p., 2005.

- MENDES, C. A. B. Gestão de recursos hídricos: bacias dos rios Mundaú e Paraíba. Revista Sociedade e Natureza. Uberlândia, Ano 3, n.º 5/6, p. 53-58, jan./dez, 1991.
- MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicações. Viçosa: UFV, 250p., 2005.
- MOREIRA, M. C. Gestão de recursos hídricos: sistema integrado para otimização da outorga de uso da água. Viçosa, MG: UFV/DEA, 2006. (Tese de Mestrado)
- MOTA, S. Introdução à Engenharia Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 3ª Ed., 2003.
- NOVO, E.M.L. de M. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. São Paulo: Edgar Blücher, 3ª ed., 308p., 1999.
- PEREIRA, S. B. Evaporação no lago de sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco. Viçosa, MG: UFV/DEA, 2004, 125p. (Tese de Doutorado)
- PRUSKI, F. F., PEREIRA, S. B., NOVAES, L. F., SILVA, D. D. e RAMOS, M. M. Comportamento hidrológico na foz do rio São Francisco durante período de 1950 a 1999. Viçosa: Engenharia na Agricultura, v. 13, n. 2, 118-123, 2005.
- REBOUÇAS, A.C., BRAGA, B., TUNDISI, J.G. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. São Paulo: Ed. Escrituras, 1999. 717 p.
- ROCHA, C. H. B. Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar. Juiz de Fora: Editora do Autor, 2000.
- RODRIGUEZ, R. D. G. Metodologia para a Estimativa das Demandas e Disponibilidades hídricas: Estudo de Caso da Bacia do Paracatu. Viçosa, MG: UFV/DEA, 2004, 111 p. (Tese de Mestrado).
- ROSA, R. Introdução ao Sensoriamento Remoto. Uberlândia: UFU, 1990.
- SAHIN, M. J. & HALL, M. J. The Effects of afforestation and deforestation on water yields. Journal of Hydrology, 1178, 239-309p., 1996.
- SCHIEWE, J. e TUFTE, L. O potencial de procedimentos baseados em regiões para a avaliação integrada de dados de SIG e Sensoriamento Remoto. In: BLASCHKE, T. e KUX, H. Sensoriamento Remoto e SIG avançados. São Paulo Oficina de Textos, cap. 5, 51-60, 2005.
- SETTI, A. A. Legislação para o uso dos recursos hídricos. In: SILVA, D. D. e PRUSKI, F. F. Gestão de recursos hídricos: aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos; Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; Porto Alegre, RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2000. 659 p.
- SHARMA, R. H. e SHAKYA, N. M. Hydrological changes and its impact on water resources of Bagmati watershed, Nepal. Journal of Hydrology, 11.051, 315-322, 2006.
- SILVA, D. D. e RAMOS, M. M. Curso de especialização por tutoria a distância: uso racional

- dos recursos naturais e seus reflexos no meio ambiente - Módulo 10. Planejamento e gestão integrados de recursos hídricos. Brasília: ABEAS; Viçosa, MG: UFV, DEA, 2001. 89 p.
- SOARES, V. P. Apostila teórica sobre Classificação de Imagens Digitais (material didático) - ENF 610 (Sensoriamento Remoto). Viçosa: DEF/UFV, 27p., 2004.
- SWAIN, P. H. e DAVIS, S. M. Remote Sensing: The Quantitative. New York: McGraw-Hill, 1978.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Ed. UFRGS e ABRH, 1997.
- \_\_\_\_\_. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre: Ed. UFRGS e ABRH, 1998.
- \_\_\_\_\_. Processos hidrológicos e os impactos do uso do solo. In: TUCCI, C. E. M. e BRAGA, B. (org.). Clima e Recursos Hídricos no Brasil. Porto Alegre: Ed. UFRGS e ABRH, 2003.
- VALE DO SÃO FRANCISCO. Economia - Potencialidade apresenta informações sobre qualidade e quantidade de águas, solos para irrigação, hidroeletricidade e navegação. Disponível em: <<http://www.valedosaofrancisco.com.br>>. Acesso em: 24 abr. 2003.
- VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2005.