

RAYSSA BALIEIRO RIBEIRO

**APRIMORAMENTO DO PROCESSO DE ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE
HÍDRICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Fernando Falco Pruski

Coorientador: Eber José de Andrade Pinto

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R484a
2020
Ribeiro, Rayssa Balieiro, 1991-
 Aprimoramento do processo de estimativa da
disponibilidade hídrica / Rayssa Balieiro Ribeiro. – Viçosa, MG,
2020.
 158 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Fernando Falco Pruski.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Desenvolvimento de recursos hídricos - Planejamento.
2. Evapotranspiração. 3. Variação sazonal. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22 ed. 627

RAYSSA BALIEIRO RIBEIRO

**APRIMORAMENTO DO PROCESSO DE ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE
HÍDRICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2020.

Assentimento:



Rayssa Balieiro Ribeiro
Autora



Fernando Falco Pruski
Orientador

A Deus.
A minha família.
Aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas bênçãos concedidas e por me iluminar em mais uma conquista.

À minha mãe pelo carinho, dedicação e por não medir esforços para realizar meus sonhos e ao meu pai por todo o amor e compreensão.

A meus tios Nice e Cau minha imensa gratidão por tudo que fizeram e fazem por mim e a Lobão pelo carinho e atenção.

À minha abençoada família que mesmo longe está sempre presente nos meus dias. Amo vocês!

A Roberto por todo amor e companheirismo.

Ao Professor Fernando Falco Pruski, pela exemplar dedicação, pelos ensinamentos transmitidos, pela confiança e por todas as oportunidades concedidas.

Ao Professor Eber José de Andrade Pinto pelo apoio e pelas contribuições ao trabalho.

Às Pruscats Andressa, Cristiane, Fernanda, Jéssica, Josiane, Laisi, Ligia, Nívia, Priscila, Tarcila pela amizade e pelos momentos compartilhados e aos amigos do Centro de Referência em Recursos Hídricos em especial Arnaldo, Arthur Calegario, Arthur Kolling, Cássio, Clívia, Daniel, Felipe, José Rui, Leôncio, Lucas, Marcel, Micael, Rafael Iria, Rafael Petruceli e Robson pelo companheirismo, pelos momentos de descontração e pelos divertidos cafezinhos.

Às meninas da RBO Camila, Laura e Luane e aos agregados Marcelo e Magno pela grande amizade e pela ótima convivência.

Aos estagiários Andresa, Camila, Fernando, Ícaro e Renan pela imensa dedicação na realização das atividades.

À banca examinadora Alisson Carraro Borges, Antônio Calazans Reis Miranda, Edson de Oliveira Vieira e Eber José de Andrade Pinto pela participação na banca e pelas contribuições ao trabalho.

A todos os professores que contribuíram com a minha formação profissional.

À Universidade Federal de Viçosa, principalmente ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade de realização desse trabalho.

À coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo apoio financeiro.

A todos aqueles que fizeram parte da minha vida nesses anos e torceram por essa conquista, o meu sincero agradecimento.

“Entrega o teu caminho ao Senhor; confia Nele, e Ele tudo fará”
Salmos 37:5

RESUMO

RIBEIRO, Rayssa Balieiro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Aprimoramento do processo de estimativa da disponibilidade hídrica.** Orientador: Fernando Falco Pruski. Coorientador: Eber José de Andrade Pinto.

O aumento dos cenários de escassez hídrica, evidencia a importância de um melhor aproveitamento dos recursos hídricos. Para isso, é fundamental o conhecimento da disponibilidade hídrica ao longo da hidrografia, o qual está limitado aos locais com estações fluviométricas que nem sempre estão disponíveis para a região de interesse. Tal fato faz com que seja necessário a aplicação de técnicas para transferência dessas informações. Além disso, a consideração da variação das vazões ao longo do ano é de grande importância para o melhor aproveitamento dos recursos hídricos. Nesse contexto, o presente trabalho foi dividido em dois capítulos, os quais estão relacionados ao aprimoramento da estimativa das vazões. O primeiro capítulo tem como objetivo a busca por variáveis explicativas mais representativas do processo de formação de vazões e o segundo está relacionado à otimização da estimativa das vazões em base mensal. No capítulo 1, foi avaliada a utilização da evapotranspiração real (ETR) como fator de abstração da precipitação como variável explicativa na regionalização de vazões, sendo utilizados dois produtos de sensoriamento remoto, o MOD16 e o GLEAM, para a estimativa da evapotranspiração. Foi possível constatar que a utilização da ETR como fator de abstração da precipitação possibilitou melhoria da representatividade das vazões regionalizadas, sobretudo com a utilização do GLEAM. No capítulo 2, foram propostas duas metodologias para estimativa das vazões mensais, uma correspondente à regionalização de vazões mensais e outra à utilização da regionalização de vazões anual em conjunto com um fator multiplicativo, embasado em análises estatísticas associadas às estações fluviométricas. Foi possível observar que a regionalização de vazões mensais pode apresentar resultados inconsistentes e que a metodologia baseada no uso de um fator multiplicativo associado à regionalização de vazões anual apresenta maior representatividade e segurança para as estimativas. O presente trabalho, no âmbito dos dois capítulos, apresenta ferramentas para estimativa de vazões mais representativas ao longo da hidrografia, constituindo, um importante suporte para tomada de decisões no planejamento e gestão de recursos hídricos.

Palavras-chave: Regionalização de vazões. Planejamento e gestão de recursos hídricos. Evapotranspiração real. Sazonalidade.

ABSTRACT

RIBEIRO, Rayssa Balieiro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Improvement of the process of estimating water availability.** Adviser: Fernando Falco Pruski. Co-adviser: Eber José de Andrade Pinto.

The increase in water scarcity scenarios highlight the importance of better use of water resources. For this, knowledge of water availability along the hydrography, which is limited to places with fluviometric stations that are not always available for the region of interest, is fundamental. This fact makes it necessary to apply techniques to transfer these informations. Moreover, the consideration of the variation of streamflows throughout the year is of great importance for the best use of water resources. In this context, the present work has been divided into two chapters, which are related to the improvement of the streamflow estimation process. The first chapter aims at searching for more representative explanatory variables of the streamflow formation process and the second is related to the optimization of the streamflow estimates on a monthly basis. In chapter 1, the use of actual evapotranspiration (ETR) as a precipitation abstraction factor was evaluated as an explanatory variable in the mean and low flow regionalization, using two remote sensing products, MOD16 and GLEAM. The results showed that the use of ETR as a factor of abstraction from precipitation made it possible to improve the representativeness of the streamflow regionalization models, especially with the use of GLEAM. In Chapter 2, two methodologies for estimating monthly streamflows were proposed, one corresponding to the monthly streamflow regionalization and the other relating to the use of annual streamflow regionalization basis together with a multiplicative factor based on statistical analyses associated with fluviometric stations. In this chapter, it was observed that the regionalization of streamflows on a monthly basis may present inconsistent results and that the methodology based on the use of a multiplicative factor associated with the regionalization of streamflows on an annual basis presents greater representativeness and safety for the estimates. This work, within the two chapters, presents tools for estimating more representative streamflows along hydrography, thus constituting an important support for decision making in the field of planning and management of water resources.

Keywords: Streamflow regionalization. Planning and management of water resources. Actual evapotranspiration. Seasonality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma da metodologia de aprimoramento do estudo de regionalização de vazões.	28
Figura 2 – Localização da bacia do rio Grande.....	42
Figura 3 – Localização das estações fluviométricas e pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do rio Grande.....	44
Figura 4 – Localização da bacia do rio Paracatu.....	45
Figura 5 – Localização das estações fluviométricas e pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do rio Paracatu.....	46
Figura 6 – Regiões hidrologicamente homogêneas da bacia do Paracatu.	47
Figura 7 – Localização da bacia do rio Jequitinhonha.	48
Figura 8 – Localização das estações fluviométricas e pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do rio Jequitinhonha.....	49
Figura 9 – Precipitação anual média na bacia do rio Grande.....	50
Figura 10 – Mapas de ETR obtidos pelos produtos MOD16 (A), GLEAM (B) e ETR _{est} (C) para a bacia do rio Grande.....	51
Figura 11 – Balanço hídrico obtidos usando fatores de abstração: 750mm (A), ETR _{MOD16} (B) e ETR _{GLEAM} (C) e ETR _{est} (D) para a bacia do rio Grande.....	54
Figura 12 – Boxplot do CE (A) e das vazões específicas $q_{7,10}$ e q_{90} (B) para a bacia do Grande.	57
Figura 13 – Representação da variação do CE ao longo da hidrografia, utilizando Peq (A), Peq ₇₅₀ (B), BHeq (C) e BHeq _M (D), BHeq _G (E) e BHeq _{GM} (F).	62
Figura 14 – Representação da variação do q_{90} ao longo da hidrografia, utilizando Peq (A), Peq ₇₅₀ (B), BHeq (C) e BHeq _M (D), BHeq _G (E) e BHeq _{GM} (F).	68
Figura 15 – Representação da variação do q_{710} ao longo da hidrografia, utilizando Peq (A), Peq ₇₅₀ (B), BHeq (C) e BHeq _M (D), BHeq _G (E) e BHeq _{GM} (F).	69
Figura 16 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Grande conforme o risco associado aos valores de CE, considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq ₇₅₀ (B), BHeq (C) e BHeq _M (D), BHeq _G (E) e BHeq _{GM} (F).	72
Figura 17 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Grande conforme o risco associado aos valores de q_{90} , considerando as	

variáveis independentes Peq (A), Peq ₇₅₀ (B), BHeq (C) e BHeq _M (D), BHeq _G (E) e BHeq _{GM} (F).	73
Figura 18 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Grande conforme o risco associado aos valores de q _{7,10} , considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq ₇₅₀ (B), BHeq (C) e BHeq _M (D), BHeq _G (E) e BHeq _{GM} (F).	74
Figura 19 – Precipitação anual média na bacia do rio Paracatu.....	75
Figura 20 – Mapas de ETR obtidos pelos produtos MOD16 (A), GLEAM (B) e ETR _{est} (C) para a bacia do rio Paracatu.....	76
Figura 21 – Balanço hídrico obtidos usando os produtos 750(A), MOD16 (B) e GLEAM (C) e ETR _{est} (D) para a bacia do Paracatu	78
Figura 22 – Boxplot do CE (A) e das vazões específicas q _{7,10} e q ₉₀ (B) para a bacia do Paracatu.	81
Figura 23 – Representação da variação do CE ao longo da hidrografia da bacia do Paracatu, utilizando Peq (A), Peq ₇₅₀ (B), BHeq (C) e BHeq _M (D), BHeq _G (E) e BHeq _{GM} (F).86	
Figura 24 – Representação da variação do q ₉₀ ao longo da hidrografia, utilizando Peq (A), Peq ₇₅₀ (B), BHeq (C) e BHeq _M (D), BHeq _G (E) e BHeq _{GM} (F).	88
Figura 25 – Representação da variação do q ₇₁₀ ao longo da hidrografia, utilizando Peq (A), Peq ₇₅₀ (B), BHeq (C) e BHeq _M (D), BHeq _G (E) e BHeq _{GM} (F).	89
Figura 26 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Paracatu conforme o risco associado aos valores de CE, considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq ₇₅₀ (B), BHeq (C) e BHeq _M (D), BHeq _G (E) e BHeq _{GM} (F).	94
Figura 27 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Grande conforme o risco associado aos valores de q ₉₀ , considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq ₇₅₀ (B), BHeq (C) e BHeq _M (D), BHeq _G (E) e BHeq _{GM} (F).	95
Figura 28 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Grande conforme o risco associado aos valores de q _{7,10} , considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq ₇₅₀ BHeq (C) e BHeq _M (D), BHeq _G (E) e BHeq _{GM} (F). 96	
Figura 29 – Precipitação anual média na bacia do rio Jequitinhonha.....	97
Figura 30 – ETR obtidos pelos produtos MOD16 (A), GLEAM (B) e ETR _{est} (C) para a bacia do rio Jequitinhonha.....	98

Figura 31 – Balanço hídrico obtidos usando os produtos 750(A), MOD16 (B) e GLEAM (C) e ETR_{est} (D) para a bacia do rio Jequitinhonha.	100
Figura 32 – Balanço hídrico obtidos pela utilização do fator de abstração da precipitação igual a 600 mm.	102
Figura 33 – Boxplot do CE (A) e das vazões específicas $q_{7,10}$ e q_{90} (B) para a bacia do Jequitinhonha.	104
Figura 34 – Representação da variação do CE ao longo da hidrografia da bacia do Paracatu, utilizando Peq (A), Peq_{600} (B) e $BHeq_G$ (C).	108
Figura 35 – Representação da variação do q_{90} ao longo da hidrografia da bacia do Jequitinhonha, utilizando Peq (A), Peq_{600} (B) e $BHeq_G$ (C).	109
Figura 36 – Representação da variação do $q_{7,10}$ ao longo da hidrografia da bacia do Jequitinhonha, utilizando Peq (A), Peq_{600} (B) e $BHeq_G$ (C).	110
Figura 37 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha conforme o risco associado aos valores de CE, considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq_{600} (B) e Peq_{ETRG} (C).	112
Figura 38 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha conforme o risco associado aos valores de q_{90} , considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq_{600} e Peq_{ETRG} (G).	113
Figura 39 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha conforme o risco associado aos valores de $q_{7,10}$, considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq_{600} (B) e Peq_{ETRG} (C).	114
Figura 40 - Fluxograma da metodologia da otimização da estimativa da disponibilidade hídrica considerando as vazões sazonais.	126
Figura 41 – Variação da q_{90} e da $q_{7,10}$ mensal ao longo do ano, vazões anuais e a precipitação mensal média correspondente à estação pluviométrica (01746007), para a bacia do Paracatu.	131
Figura 42 – Variação da q_{90} e da $q_{7,10}$ mensal ao longo do ano, vazões anuais e a precipitação mensal média correspondente à estação pluviométrica (01145014), para a bacia do Grande.	131
Figura 43 – Vazões específicas regionalizadas $q_{7,10}$ (A e C) e q_{90} (B e D) para o mês de março e de outubro, respectivamente, na bacia do Paracatu.	136
Figura 44 – Vazões específicas regionalizadas $q_{7,10}$ (A e C) e q_{90} (B e D) para o mês de março e de outubro, respectivamente, na bacia do Grande.	136

Figura 45 – Variação do $R_{S_{Q7,10}}$ (A e C) e $R_{S_{Q90}}$ (B e D) ao longo da hidrografia da bacia do Grande para os meses de março e outubro, respectivamente.	138
Figura 46 – Variação do $R_{S_{Q7,10}}$ (A e C) e $R_{S_{Q90}}$ (B e D) ao longo da hidrografia da bacia do Grande para os meses de março e outubro, respectivamente.	139
Figura 47 – Curva de uniformidade dos valores de $R_{S_{Q90}}$ (A) e de $R_{S_{Q7,10}}$ (B) para a bacia do Paracatu.	140
Figura 48 – Curva de uniformidade dos valores de $R_{S_{Q90}}$ (A) e de $R_{S_{Q7,10}}$ (B) para a bacia do Grande.	143
Figura 49 – Curvas de regionalização da $Q_{7,10}$ anual e da $Q_{7,10}$ do mês de setembro para a bacia do Grande, com zoom na inversão do comportamento.	144
Figura 50 – Classificação dos trechos de acordo com o valor de R_s para o mês de setembro.	145
Figura 51 - Variação da $R_{S_{Q90}}$ e $R_{S_{Q7,10}}$ obtidas para as estações fluviométricas da bacia do Paracatu.	146
Figura 52 - Variação da $R_{S_{Q90}}$ e $R_{S_{Q7,10}}$ obtidas para as estações fluviométricas da bacia do Grande.	146
Figura 53 – R_s associado ao limite inferior do IC para a bacia do Paracatu.	148
Figura 54 – R_s associado ao limite inferior do IC para a bacia do Grande.	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalos utilizados para a análise de risco das vazões regionalizadas	41
Tabela 2 – Índices estatísticos calculados para comparação dos produtos de ETR.....	52
Tabela 3 – Código, área, Q_{mld} , Q_{90} , $Q_{7,10}$, CE, q_{90} e $q_{7,10}$ para as estações fluviométricas consideradas para o estudo da bacia do Grande	56
Tabela 4 – Equações de regionalização de vazões para a bacia do Grande.....	58
Tabela 5 – Indicadores estatísticos dos modelos de regionalização de vazões da bacia do rio Grande.....	59
Tabela 6 – Índices estatísticos calculados para comparação dos produtos de ETR na bacia do Paracatu.	77
Tabela 7 – Código, área, Q_{mld} , Q_{90} , $Q_{7,10}$, CE, q_{90} e $q_{7,10}$ para as estações fluviométricas consideradas para o estudo da bacia do Paracatu	80
Tabela 8 – Equações de regionalização de vazões para a RHH 1 da bacia do Paracatu.	82
Tabela 9 – Equações de regionalização de vazões para a RHH 2 da bacia do Paracatu.	82
Tabela 10 – Equações de regionalização de vazões para a RHH 3 da bacia do Paracatu	82
Tabela 11 – Indicadores estatísticos dos modelos de regionalização de vazões da bacia do rio Paracatu.....	83
Tabela 12 – Índices estatísticos calculados para comparação dos produtos de ETR.....	99
Tabela 13 – Código, área, Q_{mld} , Q_{90} , $Q_{7,10}$, CE, q_{90} e $q_{7,10}$ para as estações fluviométricas consideradas para o estudo da bacia do Jequitinhonha.....	103
Tabela 14 – Equações de regionalização de vazões para a bacia do Jequitinhonha	105
Tabela 15 – Indicadores estatísticos dos modelos de regionalização de vazões da bacia do rio Jequitinhonha	105
Tabela 16 - Equações de regionalização mensal da bacia do Paracatu e seus respectivos indicadores estatísticos	134
Tabela 17 - Equações de regionalização mensal da bacia do Grande e seus respectivos indicadores estatísticos	134
Tabela 18 – Vazões específicas utilizadas como limite para a extrapolação das equações de regionalização.	135

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
BH	Balanço hídrico (mm)
BH ₇₅₀	Balanço hídrico com um fator de abstração da precipitação de 750 mm (mm)
BHeq	Vazão equivalente ao balanço hídrico obtido com a evapotranspiração real em cada trecho da hidrografia (m ³ s ⁻¹)
BHeq _G	Vazão equivalente ao balanço hídrico obtido com a evapotranspiração real do produto GLEAM em cada trecho da hidrografia (m ³ s ⁻¹)
BHeq _{GM}	Vazão equivalente ao balanço hídrico obtido com a evapotranspiração real média do produto GLEAM para a região hidrologicamente homogênea (m ³ s ⁻¹)
BHeq _M	Vazão equivalente ao balanço hídrico obtido com a evapotranspiração real média da região hidrologicamente homogênea (m ³ s ⁻¹)
BH _{GLEAM}	Balanço hídrico obtido com o produto GLEAM
BH _{max}	Balanço Hídrico máximo (mm)
BH _{min}	Balanço Hídrico mínimo (mm)
BH _{MOD16}	Balanço hídrico obtido com o produto MOD16 (mm)
CE	Coefficiente de escoamento
ETR	Evapotranspiração real (mm)
ETR _{est}	Evapotranspiração real anual média estimadas para cada estação fluviométrica (mm)
ETR _{GLEAM}	Evapotranspiração real do produto GLEAM (mm)
ETR _M	Evapotranspiração real média da região hidrologicamente homogênea (mm)
ETR _{max}	Evapotranspiração real máxima (mm)
ETR _{min}	Evapotranspiração real mínima (mm)
ETR _{MOD16}	Evapotranspiração real do produto MOD16 (mm)
ETR _T	Evapotranspiração real anual em cada trecho da hidrografia (mm.ano ⁻¹)
GLEAM	Global Land Surface Evaporation: The Amsterdam Methodology
IC	Intervalo de confiança
ID	Identificação
IDW	Interpolação pela ponderação do inverso do quadrado da distância
MAE	Erro médio absoluto
ME	Erro médio

mNSE	Índice de eficiência de Nash Sutcliffe modificado
NSE	Índice de eficiência de Nash Sutcliffe
P	Precipitação média anual na área de drenagem considerada, (mm.ano ⁻¹)
PALSAR	Phse Array type L-band Synthetic Aperture Radar
PBIAS	Percentual de tendência
Peq	Vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem considerada (m ³ s ⁻¹)
Peq ₇₅₀	Vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem considerada menos um fator de abstração de 750 mm (m ³ s ⁻¹)
Q _{7,10}	Vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos (m ³ s ⁻¹)
Q ₉₀	Vazão mínima associada à permanência de 90% no tempo (m ³ s ⁻¹)
Q _{ajus}	Vazão ajustada com base na restrição física estabelecida
q _{min}	Vazão mínima
Q _{mlt}	Vazão média de longa duração (m ³ s ⁻¹)
R ²	Coefficiente de determinação
R _{ajus} ²	Coefficiente de determinação ajustado
R _{cv} ²	Coefficiente de determinação dos valores preditos na validação cruzada
RHH	Região hidrologicamente homogênea
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
RMSE _{CV}	Raiz do erro quadrático médio dos valores preditos na validação cruzada
R _s	Relação de sazonalidade
RS _{Q7,10}	Relação de sazonalidade da Q _{7,10}
RS _{Q7,10;95}	Relação de sazonalidade da Q _{7,10} associada ao limite inferior do intervalo de confiança
RS _{Q90}	Relação de sazonalidade da Q ₉₀
RS _{Q90;95}	Relação de sazonalidade da Q ₉₀ associada ao limite inferior do intervalo de confiança
RTC	Radiometrically Terrain-Corrected
SAR	Synthetic Aperture Radar
se	Erro padrão

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	17
REFERÊNCIAS	19
1 CAPÍTULO 1 - Regionalização de vazões a partir da consideração das principais variáveis relacionadas ao processo de formação das vazões	23
RESUMO	23
1.1 INTRODUÇÃO	24
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	27
1.2.1 Base de dados	28
1.2.2 Variáveis independentes	29
1.2.3 Variáveis dependentes	34
1.2.4 Obtenção das equações de regionalização e seleção do modelo	37
1.2.5 Estudos de caso	42
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
1.3.1 Bacia do Grande	49
1.3.2 Bacia do Paracatu	75
1.3.3 Bacia do Jequitinhonha	97
1.4 CONCLUSÃO	114
REFERÊNCIAS	115
2 CAPÍTULO 2 - Otimização do processo de estimativa da disponibilidade hídrica mensal	123
RESUMO	123
2.1 INTRODUÇÃO	123
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	125
2.2.1 Vazões regionalizadas em base anual	126
2.2.2 Vazões em base mensal	127

2.2.3	Disponibilidade hídrica mensal a partir de regionalização de vazões em base mensal	128
2.2.4	Disponibilidade hídrica mensal a partir de análise estatística associada às estações fluviométricas.....	129
2.2.5	Estudos de caso.....	130
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	130
2.3.1	Comportamento das vazões mensais e anuais nas estações fluviométricas	130
2.3.2	Disponibilidade hídrica mensal a partir de regionalização de vazões em base mensal	133
2.3.3	Disponibilidade hídrica mensal a partir de análise estatística associada às estações fluviométricas.....	145
2.4	CONCLUSÃO.....	149
	REFERÊNCIAS.....	149
	CONCLUSÃO GERAL.....	152
	APÊNDICE.....	153

INTRODUÇÃO GERAL

A água é um recurso essencial para o desenvolvimento das atividades humanas, como abastecimento de água, saneamento básico, irrigação e geração de energia elétrica. A garantia dessas atividades é dependente da existência de água em quantidade e qualidade suficiente (SCHEWE et al., 2014).

O intenso desenvolvimento econômico e social, o aumento da população, as mudanças no padrão de consumo, as mudanças climáticas (CAO et al., 2018; WANG; QIN; HE, 2019); (ZHUO; MEKONNEN; HOEKSTRA, 2016), associados à desigualdade de distribuição de água no mundo (KUMMU et al., 2010; SEEKELL, 2011) tem provocado o aumento de cenários de escassez hídrica. De acordo com UE (2007), a escassez hídrica é definida como situações em que a disponibilidade de água não é suficiente para atender as demandas existentes ou projetadas. Essa situação prejudica o desenvolvimento econômico em muitos países, aumentando as pressões sobre os recursos hídricos (SCHEWE et al., 2014; WOLF, 2007).

A escassez de água está cada vez mais frequente em diversas regiões do mundo (FALLAH-MEHDIPOUR; BOZORG-HADDAD; LOÁICIGA, 2020; NIASSE; VARIS, 2020). Mais de 2 bilhões de pessoas vivem em países com estresse hídrico e cerca de 4 bilhões sofrem de severa escassez hídrica em pelo menos um mês do ano. Essa situação tende a se agravar com o desenvolvimento econômico, mudanças no padrão de consumo e crescimento da população (UNESCO, 2019). Estima-se que a população global será de 9,73 bilhões de habitantes até 2050 e 11,00 bilhões até 2100 (FAO, 2017) e que o aumento do uso da água seja de 55% nos próximos 50 anos (DAWADI; AHMAD, 2013; PIERCE, 2017). Desse modo, a busca por melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos, para garantir a sustentabilidade do uso desses recursos, é um desafio crescente (FALLAH-MEHDIPOUR; BOZORG-HADDAD; LOÁICIGA, 2020).

Para o planejamento e gestão dos recursos hídricos é imprescindível o conhecimento da disponibilidade hídrica (MASIH et al., 2010). Em uma bacia hidrográfica, a disponibilidade hídrica é expressa pelas vazões mínimas e médias (NOVAES et al., 2009). As vazões mínimas representam a disponibilidade hídrica em condições naturais (SMAKHTIN, 2001) e a vazão média de longa duração representa a máxima vazão que pode ser regularizada, desconsiderando as perdas por evaporação e infiltração (PRUSKI & PRUSKI, 2011).

A disponibilidade hídrica é estimada com base na análise dos dados obtidos em estações fluviométricas. Contudo, esses dados nem sempre estão disponíveis para os locais de interesse (NRUTHYA; SRINIVAS, 2015). Assim, um desafio frequentemente enfrentado pelos hidrólogos é a estimativa das vazões em trechos da hidrografia que não possuem estações fluviométricas (SAMUEL; COULIBALY; METCALFE, 2011). Com o intuito de minimizar esse problema, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos de maneira a possibilitar a estimativa de vazões em áreas de drenagem não monitoradas, sendo comum a aplicação da técnica de regionalização de vazões (BESKOW et al., 2014).

Nos últimos anos, a regionalização de vazões tem sido muito estudada pela comunidade hidrológica (LI et al., 2010). Contudo, na literatura, não existe uma metodologia padrão de regionalização de vazões (GIBBS; MAIER; DANDY, 2012; MERZ; BLÖSCHL; PARAJKA, 2006; RAZAVI; COULIBALY, 2013), sendo os modelos mais amplamente utilizados os baseados em proximidade espacial, em regressão e em semelhança física (ARSENAULT; BRISSETTE, 2014; SAMUEL; COULIBALY; METCALFE, 2011)

A regionalização com base em regressão é a abordagem mais utilizada, sendo alvo de muitos estudos (ENGELAND; HISDAL, 2009; LAAHA; BLÖSCHL, 2006; PRUSKI et al., 2013; VEZZA et al., 2010; PRUSKI et al., 2013). Nesse método, as estimativas para locais sem monitoramento são feitas com base em equações de regressão que relacionam as informações hidrológicas de interesse com características das bacias (ARSENAULT; BRISSETTE, 2014; BAO et al., 2012).

Estudos que abordam técnicas para o aprimoramento da regionalização de vazões são de grande relevância para a comunidade hidrológica e para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. Nesse sentido, Merz, Blöschl e Parajka, (2006) e Pruski et al., (2013) salientam a importância do uso de variáveis físicas mais representativas do processo de formação de vazão para melhorar as estimativas da regionalização.

A estimativa das vazões é feita na maioria das vezes em base anual. Contudo, as vazões podem apresentar uma grande variação em sua magnitude ao longo do ano, devido à alternância entre períodos secos e períodos úmidos (PEDRO-MONZONÍS et al., 2015). Isso ocorre principalmente em países como o Brasil onde se observa em várias regiões a existência de uma sazonalidade característica do clima (ANA, 2013). Trabalhos realizados por Bof et al., 2013; Oliveira; Pruski; Nunes, 2013; Ribeiro et al., 2019; Serrano et al., 2020 para as bacias do Paracatu, Grande e Doce mostram uma grande variação na disponibilidade hídrica quando da obtenção das vazões em base mensal ao invés da anual e relatam que o uso das vazões sazonais

pode possibilitar um melhor aproveitamento dos recursos hídricos e conseqüentemente uma atenuação dos conflitos pelo uso da água.

Considerando a importância da estimativa das vazões, o presente trabalho apresenta duas abordagens relacionadas ao aprimoramento da estimativa dessas variáveis ao longo da bacia hidrográfica. A primeira é focada na busca por modelos de regionalização de vazões que utilizem variáveis explicativas mais representativas do processo de formação de vazões e que possibilitem melhoria das estimativas, e a segunda está relacionada a metodologias para estimativa das vazões em base mensal.

REFERÊNCIAS

- ANA. **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos 2013**. Agência Nacional de Águas -ANA, 2013. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/manual-de-outorga.pdf>>. Acesso: em 10 de setembro de 2020.
- ARSENAULT, R.; BRISSETTE, F. P. Continuous streamflow prediction in ungauged basins: The effects of equifinality and parameter set selection on uncertainty in regionalization approaches. **Water Resources Research**, v. 50, n. 7, p. 6135–6153, jul. 2014.
- BAO, Z.; ZHANG, J.; LIU, J.; FU, G.; WANG, G.; HE, R.; YAN, X.; JIN, J.; LIU, H. Comparison of regionalization approaches based on regression and similarity for predictions in ungauged catchments under multiple hydro-climatic conditions. **Journal of Hydrology**, v. 466–467, p. 37–46, out. 2012.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R. DE; FARIA, L. C.; SIMÕES, M. C.; CALDEIRA, T. L.; NUNES, G. S. Seasonality indices for hydrological regionalization of low stream flows in Rio Grande do Sul State. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 7, p. 748–754, jul. 2014.
- BOF, L. H. N.; PRUSKI, F. F.; DA SILVA, L. M. C.; JUSTINO, F. Analysis of Appropriate Timescales for Water Diversion Permits in Brazil. **Environmental Management**, v. 51, n. 2, p. 492–500, fev. 2013.
- CAO, X.; HUANG, X.; HUANG, H.; LIU, J.; GUO, X.; WANG, W.; SHE, D. Changes and driving mechanism of water footprint scarcity in crop production: A study of Jiangsu Province, China. **Ecological Indicators**, v. 95, p. 444–454, dez. 2018.
- DAWADI, S.; AHMAD, S. Evaluating the impact of demand-side management on water resources under changing climatic conditions and increasing population. **Journal of Environmental Management**, v. 114, p. 261–275, jan. 2013.
- ENGELAND, K.; HISDAL, H. A Comparison of Low Flow Estimates in Ungauged Catchments Using Regional Regression and the HBV-Model. **Water Resources Management**, v. 23, n. 12, p. 2567–2586, set. 2009.

- FALLAH-MEHDIPOUR, E.; BOZORG-HADDAD, O.; LOÁICIGA, H. A. Climate-environment-water: integrated and non-integrated approaches to reservoir operation. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 1, p. 60, jan. 2020.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (ED.). **The future of food and agriculture: trends and challenges**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>>. Acesso em: 18 de janeiro de 2018.
- GIBBS, M. S.; MAIER, H. R.; DANDY, G. C. A generic framework for regression regionalization in ungauged catchments. **Environmental Modelling & Software**, v. 27–28, p. 1–14, jan. 2012.
- KUMMU, M.; WARD, P. J.; DE MOEL, H.; VARIS, O. Is physical water scarcity a new phenomenon? Global assessment of water shortage over the last two millennia. **Environmental Research Letters**, v. 5, n. 3, p. 034006, jul. 2010.
- LAAHA, G.; BLÖSCHL, G. A comparison of low flow regionalisation methods—catchment grouping. **Journal of Hydrology**, v. 323, n. 1–4, p. 193–214, maio 2006.
- LI, M.; SHAO, Q.; ZHANG, L.; CHIEW, F. H. S. A new regionalization approach and its application to predict flow duration curve in ungauged basins. **Journal of Hydrology**, v. 389, n. 1–2, p. 137–145, jul. 2010.
- MASIH, I.; UHLENBROOK, S.; MASKEY, S.; AHMAD, M. D. Regionalization of a conceptual rainfall–runoff model based on similarity of the flow duration curve: A case study from the semi-arid Karkheh basin, Iran. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 1, p. 188–201, 14 set. 2010.
- MERZ, R.; BLÖSCHL, G.; PARAJKA, J. Regionalization methods in rainfall–runoff modelling using large catchment samples. **IAHS publication**, v. 307, p. 117, 2006.
- NIASSE, M.; VARIS, O. Quenching the thirst of rapidly growing and water-insecure cities in sub-Saharan Africa. **International Journal of Water Resources Development**, p. 1–23, 14 jan. 2020.
- NOVAES, L. F.; PRUSKI, F. F.; QUEIROZ, D. O. D.; RODRIGUEZ, R. D. G.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica: PARTE 1 - obtenção da equação de recessão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 1, p. 15–26, 2009.
- NRUTHYA, K.; SRINIVAS, V. V. Evaluating Methods to Predict Streamflow at Ungauged Sites Using Regional Flow Duration Curves: A Case Study. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 641–648, 2015.
- OLIVEIRA, J.; PRUSKI, F.F; NUNES, A. A. Otimização do Aproveitamento da disponibilidade de águas superficiais na bacia do ribeirão Entre Ribeiros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 4, p. 157–172, 2013.

- PEDRO-MONZONÍS, M.; SOLERA, A.; FERRER, J.; ESTRELA, T.; PAREDES-ARQUIOLA, J. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 482–493, ago. 2015.
- PIERCE, M. **Building Resilience to Water Scarcity in Sub-Saharan Africa: The Role of Family Planning**, 2017. Disponível em: < https://stage.prb.org/wp-content/uploads/2017/08/PRB_Brief_water_4P.pdf>. Acesso em: 29 de janeiro de 2020.
- PRUSKI, F. F.; NUNES, A. A.; PRUSKI, P. L.; RODRIGUEZ, R. G. Improved regionalization of streamflow by use of the streamflow equivalent of precipitation as an explanatory variable. **Journal of Hydrology**, v. 476, p. 52–71, jan. 2013.
- PRUSKI, F.F.; PRUSKI, P.L. Tecnologia e inovação frente a gestão de recurso hídricos. In: Medeiros, S. de S., Gheyi, H.R, Galvão, C. de O., Paz, V.P.S. (Eds), **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, p. 27-58. 2011.
- RAZAVI, T.; COULIBALY, P. Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 8, p. 958–975, ago. 2013.
- RIBEIRO, R. B.; SERRANO, L. O.; GENEROSO, N.; RAMOS, M. C. A.; PRUSKI, F. F. **Variabilidade sazonal das vazões mínimas em três bacias hidrográficas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 13, 2019. Foz do Iguaçu. Anais... 2019.
- SAMUEL, J.; COULIBALY, P.; METCALFE, R. A. Estimation of Continuous Streamflow in Ontario Ungauged Basins: Comparison of Regionalization Methods. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, n. 5, p. 447–459, maio 2011.
- SCHEWE, J. et al. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3245–3250, 4 mar. 2014.
- SEEKELL, D. A. Does the Global Trade of Virtual Water Reduce Inequality in Freshwater Resource Allocation? **Society & Natural Resources**, v. 24, n. 11, p. 1205–1215, nov. 2011.
- SERRANO, L. O.; RIBEIRO, R. B.; BORGES, A. C.; PRUSKI, F. F. Low-Flow Seasonality and Effects on Water Availability throughout the River Network. **Water Resources Management**, 31 jan. 2020.
- SMAKHTIN, V. U. Low flow hydrology: a review. **Journal of Hydrology**, v. 240, n. 3, p. 147–186, 10 jan. 2001.
- UNESCO; WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (UNITED NATIONS); UN-WATER. **Leaving no one behind: the United Nations World Water Development Report 2019**. 2019.

- VEZZA, P.; COMOGLIO, C.; ROSSO, M.; VIGLIONE, A. Low Flows Regionalization in North-Western Italy. **Water Resources Management**, v. 24, n. 14, p. 4049–4074, nov. 2010.
- WANG, J.; QIN, L.; HE, H. Assessing Temporal and Spatial Inequality of Water Footprint Based on Socioeconomic and Environmental Factors in Jilin Province, China. **Water**, v. 11, n. 3, p. 521, 13 mar. 2019.
- WOLF, A. T. Shared Waters: Conflict and Cooperation. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 32, n. 1, p. 241–269, 2007.
- ZHUO, L.; MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. **Water footprint and virtual water trade of China: Past and future**. UNESCO-IHE, 2016.

1 CAPÍTULO 1 - Regionalização de vazões a partir da consideração das principais variáveis relacionadas ao processo de formação das vazões

RESUMO

A regionalização de vazões é uma técnica utilizada para suprir a falta de dados hidrológicos nos locais em que esses são escassos ou inexistentes, sendo frequentes os estudos que visam o aperfeiçoamento dessas técnicas. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho foi aprimorar a regionalização de vazões a partir da utilização de variáveis explicativas mais representativas do processo de circulação da água na bacia. Para isso foram utilizadas as características: área, precipitação e evapotranspiração real. A evapotranspiração real (ETR) foi considerada de duas formas: variável em cada trecho da hidrografia e a média da região hidrologicamente homogênea. Para estimativa da ETR, foram utilizados dois produtos do sensoriamento remoto, o MOD16 e o GLEAM. A avaliação desses produtos foi feita comparando ambos à ETR estimada pelo método do balanço hídrico nas estações fluviométricas (ETR_{est}). A regionalização foi desenvolvida considerando as variáveis explicativas: vazão equivalente ao volume precipitado (Peq) e vazão equivalente ao volume precipitado menos os fatores de abstração iguais a 750 mm (Peq_{750}) ou 600 mm (Peq_{600}) e iguais a evapotranspiração real obtida pelos dois produtos, na área de cada trecho da hidrografia ($BHeq$) e em cada região hidrologicamente homogênea ($BHeq_M$). As vazões regionalizadas foram: vazão média de longa duração (Q_{mld}), vazão mínima associadas à permanência de 90% no tempo (Q_{90}) e vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$). Os modelos de regionalização de vazões obtidos foram avaliados por análises estatísticas, física e de risco. Dentre os produtos de ETR, o GLEAM apresentou menores erros em comparação à ETR_{est} e não resultou em balanço hídrico negativo. Nos modelos de regionalização, a utilização do $BHeq$ com a ETR do produto MOD16 só apresentou bom desempenho quando se considerou o valor médio de ETR da região hidrologicamente homogênea em análise. Por outro lado, o GLEAM, permitiu resultados representativos e com bom desempenho nas três análises realizadas.

1.1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da disponibilidade hídrica é imprescindível para a adoção de medidas efetivas de planejamento e gestão de recursos hídricos (ZAMOUM; SOUAG-GAMANE, 2019), auxiliando o desenvolvimento de atividades como gestão de água potável, irrigação, produção de energia elétrica e previsões de eventos de cheias (QAMAR; GANORA; CLAPS, 2015; HAMILTON & CAMPBELL, 2013). Uma grande limitação encontrada nesse sentido é que a disponibilidade hídrica é estimada com base na análise dos dados obtidos em estações fluviométricas, que nem sempre estão disponíveis para os locais de interesse (NRUTHYA; SRINIVAS, 2015). A maior parte das bacias hidrográficas não são monitoradas ou possuem informações limitadas devido à quantidade e/ou à qualidade dos dados (SMITH; MARSHALL; SHARMA, 2014), principalmente nos países em desenvolvimento (ZAMOUM; SOUAG-GAMANE, 2019). Portanto, a estimativa de vazões em locais com ausência de estações fluviométricas é um desafio frequente enfrentado pelos hidrólogos de todo o mundo (SAMUEL; COULIBALY; METCALFE, 2011; SIVAPALAN, 2003) e tem recebido grande atenção nas pesquisas realizadas nas duas últimas décadas (BLÖSCHL et al., 2013).

A regionalização de vazões compreende técnicas utilizadas para suprir a falta de dados hidrológicos nos locais em que esses são escassos ou inexistentes (KULT et al., 2014; LAAHA; BLÖSCHL, 2006; MASIH et al., 2010; PANDEY; NGUYEN, 1999; SAMUEL; COULIBALY; METCALFE, 2011; LIEW; MITTELSTET, 2018; YANG et al., 2020). Dentre os métodos de regionalização de vazões, o mais utilizado é o baseado em regressão (YANG et al., 2020), nele as estimativas para locais sem monitoramento são feitas com base em equações de regressão que relacionam as informações hidrológicas de interesse com características das bacias (ARSENAULT; BRISSETTE, 2014; BAO et al., 2012).

A escolha de variáveis explicativas a serem utilizadas nas equações de regressão possui grande influência no desempenho dos modelos de regionalização de vazões (RAZAVI; COULIBALY, 2013). Geralmente, os atributos usados nesses estudos são os fisiográficos (área de drenagem, densidade de drenagem, comprimento do rio principal) e os climáticos (precipitação, temperatura).

A área de drenagem influencia diretamente na disponibilidade hídrica ao longo da hidrografia e em função disso é considerada como principal variável explicativa em diversos estudos de regionalização de vazões (ENGELAND; HISDAL, 2009; GONÇALVES et al., 2018; LOPES et al., 2018; RIBEIRO; MARQUES; SILVA, 2005).

As características climáticas são informações úteis nos modelos de predição de vazão (YOUNG, 2006), uma vez que o clima possui fundamental importância na descrição dos processos hidrológicos. Por exemplo, a precipitação que ocorre em uma bacia hidrográfica interfere diretamente no comportamento das vazões, sendo assim, o emprego dessa característica como variável explicativa tende a melhorar a representatividade dos modelos de regionalização (PRUSKI et al., 2012). Entretanto, considerando que apenas parte do total precipitado é convertida em vazão nos cursos d'água (NOVAES, 2005; PEREIRA et al., 2007) também é importante considerar valores de abstração da precipitação. Em estudo realizado por Novaes (2005) para a bacia do Paracatu, observou-se que se a precipitação fosse menor que 750 mm durante o período chuvoso, a recarga do lençol freático não seria suficiente para manter a perenidade dos rios, indicando que, uma importante fração da precipitação não contribui para a formação das vazões.

Buscando representar as características físicas e climáticas da bacia em uma só variável, Pruski et al. (2013) propuseram o uso da vazão equivalente ao volume precipitado (Peq), que leva em consideração a área de drenagem e a precipitação a montante da estação em análise; e a vazão equivalente ao volume precipitado menos o valor empírico de 750 mm como fator de abstração da precipitação (Peq_{750}), definido com base no estudo de Novaes (2005).

O uso da Peq_{750} tem proporcionado desempenho bastante satisfatórios em estudos de regionalização de vazões realizados para diferentes bacias hidrográficas brasileiras como: Paracatu (PRUSKI et al., 2013), Pará (PRUSKI et al., 2012), Parnaíba (GONÇALVES et al., 2018), bacias dos estado de Minas Gerais (IGAM; GPRH/UFV, 2012); bacia do Doce (SERRANO et al., 2020) e bacias do oeste da Bahia (SERRANO et al., 2019). Entretanto, de acordo com Pruski et al. (2013), outros valores de abstração devem ser considerados em estudos de regionalização a fim de produzir resultados satisfatórios, uma vez que cada bacia possui um valor representativo da abstração da precipitação para formação das vazões. Esse valor tende a variar com a capacidade de retenção da água no solo, a interceptação da água pela vegetação e principalmente a evapotranspiração.

A evapotranspiração é a principal saída de água do ciclo hidrológico e junto com a precipitação, principal entrada, determinam a disponibilidade de água no planeta (LONG; LONGUEVERGNE; SCANLON, 2014). Desse modo, o uso da precipitação anual média (P) com uma abstração equivalente a evapotranspiração real anual média (ETR) pode trazer melhorias na regionalização de vazões, uma vez que se baseia em uma variável explicativa mais consistente e descritiva do ponto de vista físico.

Nesse contexto, Rego, (2013) propôs a utilização da vazão equivalente ao volume precipitado menos o valor da evapotranspiração real anual média da bacia (Peq_{ETR}). No estudo realizado para uma sub-bacia do rio Paracatu e para a bacia do rio Prata, Rego (2013) concluiu que a consideração dessa variável permitiu melhorias nos índices estatísticos, melhor representação física e a predição de valores mais seguros. Tais melhorias foram bem acentuadas em relação ao desempenho das variáveis área e Peq e menos expressivas em relação à Peq_{750} .

Um dos principais problemas da utilização da ETR em estudo de regionalização de vazões está relacionado principalmente à capacidade preditiva dessa variável, uma vez que varia com diversos fatores como a topografia, clima, propriedade do solo e tipo de vegetação (MU et al., 2007). Além disso, os métodos convencionais de estimativa de ETR fornecem valores pontuais (por exemplo: lisímetros, torres de fluxo, balanço de energia pela razão de Bowen), o que dificulta a sua quantificação em grandes áreas (LONG; LONGUEVERGNE; SCANLON, 2014; RAMOELO et al., 2014).

Devido às dificuldades na estimativa dos valores de ETR, Rego (2013) obteve essa variável a partir do balanço hídrico (precipitação menos vazão, considerando a variação do armazenamento no período de dados igual a zero) para cada estação fluviométrica, utilizando o valor médio obtido das estações inseridas na região considerada como fator de abstração da precipitação. O balanço hídrico nas estações constitui uma importante ferramenta para estimativa da ETR quando não se tem informações suficientes para sua obtenção por outros métodos. Contudo essas estimativas ficam condicionadas à localização das estações e representam o comportamento médio de suas áreas de drenagem. Uma forma de aprimoramento do processo de regionalização de vazões é a consideração da variabilidade espacial da ETR ao longo da bacia, a fim de permitir melhorias nas estimativas de vazão.

Nos últimos tempos um grande número de estudos tem explorado a utilização do sensoriamento remoto para obtenção de dados da superfície terrestre. Os dados de sensoriamento remoto geralmente fornecem informações de grandes áreas, em intervalos de tempo regulares, fornecendo extenso número de dados (KUNNATH-POOVAKKA et al., 2016). Avanços nas tecnologias de sensoriamento remoto têm sido combinados com metodologias convencionais para estimativas globais de ETR (YANG et al., 2020). Essas informações possuem grande potencialidade para o desenvolvimento de estudos hidrológicos e têm sido utilizadas em diversos trabalhos (DEMBÉLÉ et al., 2020; LEE; YEH, 2019; NGUYEN; DIETRICH; UNİYAL, 2020; TOBIN; BENNETT, 2019; VASQUEZ; VARGAS, 2017), oferecendo uma oportunidade sem precedentes para o monitoramento da variabilidade

espaço-temporal dessa variável (BAIK; CHOI, 2015; LONG; LONGUEVERGNE; SCANLON, 2014).

Dentre os produtos de estimativas globais de ETR existentes estão o MOD16 derivado do sensor MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (MU et al., 2007; MU; ZHAO; RUNNING, 2011) e o Global Land Evaporation and Amsterdam Model (GLEAM) (MARTENS et al., 2017; MIRALLES et al., 2010). O primeiro baseia-se na equação de Penman-Monteith e usa dados de sensoriamento remoto e dados meteorológicos de reanálise, possui resolução espacial de 1 km, disponíveis em intervalos de 8 dias, mensais e anuais. O segundo apresenta resolução espacial de 25 km em escala de tempo diária, utiliza a equação de Priestley-Taylor e informações provenientes de sensoriamento remoto.

Nesse sentido, levando-se em conta que as informações de ETR oriundas do sensoriamento remoto podem auxiliar na aquisição de variáveis mais representativas e possibilitar melhoria dos resultados dos estudos de regionalização, o presente trabalho objetivou aprimorar o processo de regionalização de vazões a partir da consideração das principais variáveis relacionadas ao processo de circulação de água na bacia.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo de regionalização foi realizado adotando o método baseado em regressão regionais o qual é amplamente utilizado na literatura (BLÖSCHL et al., 2013; ENGELAND; HISDAL, 2009; MALEKINEZHAD; NACHTNEBEL; KLIK, 2011; PRUSKI et al., 2013; VEZZA et al., 2010). O procedimento para realização desse método e avaliação dos resultados é apresentado na Figura 1.

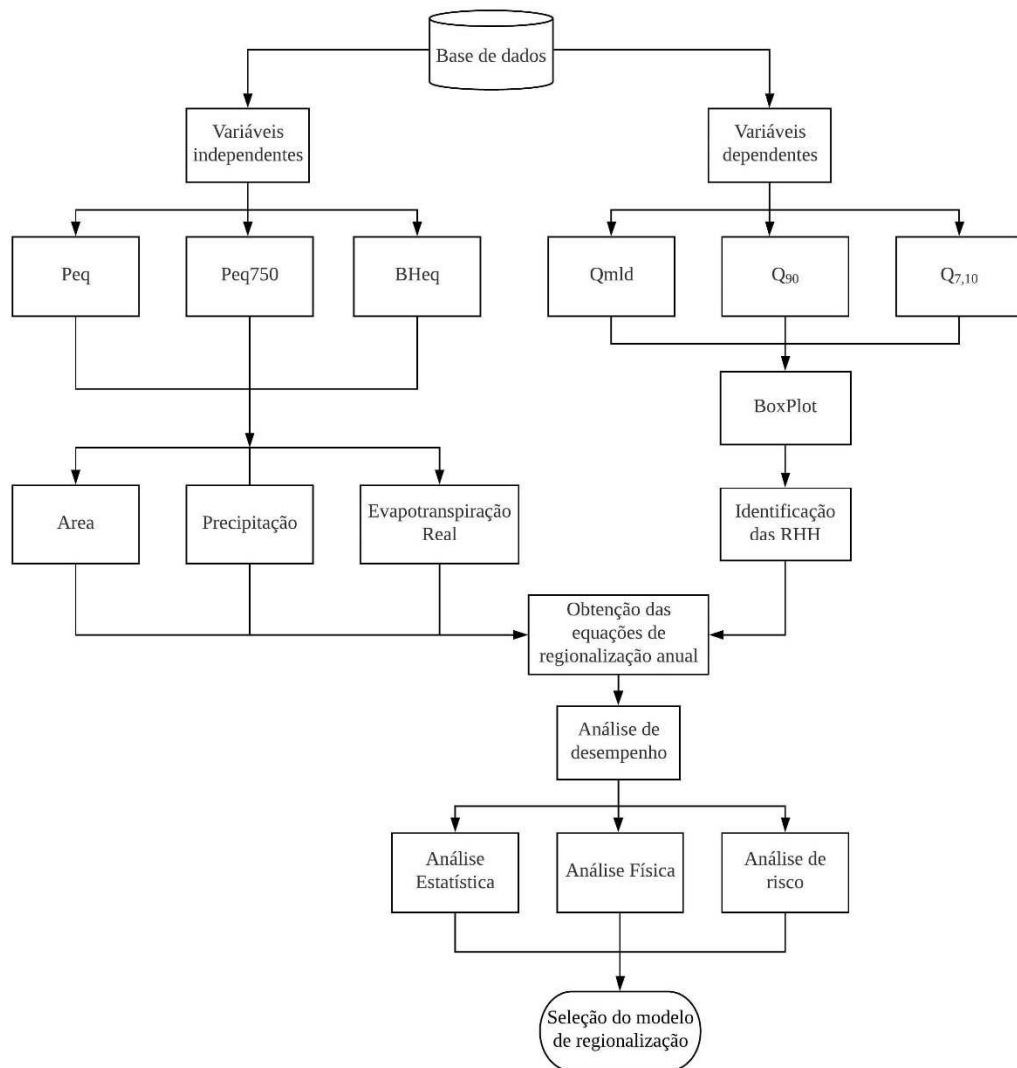


Figura 1 – Fluxograma da metodologia de aprimoramento do estudo de regionalização de vazões.

1.2.1 Base de dados

Foram utilizados dados de séries históricas, consistidos e não consistidos, de estações fluviométricas inseridas nas bacias de estudo e de estações pluviométricas localizadas no seu interior e entorno, de maneira a permitir uma cobertura total das bacias. Esses dados foram obtidos na rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional de Águas (ANA).

A seleção do período de estudo foi feita de maneira a contemplar o maior número de estações com mais de 95% dos dados em cada ano e as estações foram selecionadas adotando o critério de possuir pelo menos 15 anos com mais de 95% dos dados dentro do período base.

1.2.2 Variáveis independentes

Foram utilizadas as variáveis área e precipitação, de forma combinada, por meio da vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem considerada (Equação 1) e de forma combinada considerando diferentes fatores de abstração, sendo eles o valor empírico de 750 mm (Equação 2) e valores correspondentes à evapotranspiração real (Equações 3 e 4). Os valores de evapotranspiração real foram estimados para a área de drenagem de cada trecho da hidrografia (ETR_T) e para cada região hidrologicamente homogênea (ETR_M). Levando-se em conta que a precipitação menos a evapotranspiração corresponde ao balanço hídrico, as variáveis que consideraram a ETR como fator de abstração foram denominadas de vazão equivalente ao balanço hídrico.

$$Peq = \frac{P A}{k} \quad (1)$$

$$Peq_{750} = \frac{(P-750) A}{k} \quad (2)$$

$$BHeq = \frac{(P-ETR_T) A}{k} \quad (3)$$

$$BHeq_M = \frac{(P-ETR_M) A}{k} \quad (4)$$

em que: P = precipitação média anual na área de drenagem considerada, mm.ano^{-1} ; A = área de drenagem, km^2 ; ETR_T = evapotranspiração real anual em cada trecho da hidrografia, mm.ano^{-1} ; ETR_M = evapotranspiração real anual média da bacia, mm.ano^{-1} ; k = fator de conversão de unidades, o qual é igual a 31.536; Peq = vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem considerada, m^3s^{-1} ; Peq_{750} = vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem considerada menos um fator de abstração de 750 mm.ano^{-1} , m^3s^{-1} ; $BHeq$ = vazão

equivalente ao balanço hídrico obtido com a ETR, m^3s^{-1} , $\text{BHeq}_M =$ vazão equivalente ao balanço hídrico obtido com a ETR_M , m^3s^{-1} ;

1.2.2.1 Áreas de drenagem

Foram utilizadas as áreas de drenagem das estações fluviométricas, obtidas com a utilização de ferramentas de geoprocessamento e do Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado gerado a partir do produto RTC (Radiometrically Terrain-Corrected), com resolução de 12,5 m, proveniente da plataforma ALOS (Advanced Land Observing Satellite) sensor PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar). Esse produto é um projeto do Alaska Satellite Facility, que disponibiliza dados SAR (Synthetic Aperture Radar) corrigidos no âmbito geométrico e radiométrico (FILGUEIRAS et al., 2018)

1.2.2.2 Precipitação anual média

A precipitação anual média correspondente ao período base na bacia foi estimada por interpolação das precipitações anuais médias das estações pluviométricas. Foi utilizado o método de krigagem ordinária que se destaca em relação aos demais métodos de espacialização de variáveis hidroclimatológicas (GOOVAERTS, 2000), quando foi possível ajustar o semivariograma, e nas situações em que não houve ajuste utilizou-se a interpolação pela ponderação do inverso do quadrado da distância (IDW) que também é utilizado em diversos estudos (ARSENAULT et al., 2019; CISLAGHI et al., 2020; SAMUEL; COULIBALY; METCALFE, 2011; SWAIN; PATRA, 2017). Na Krigagem ajustaram-se semivariogramas teóricos aos semivariogramas experimentais utilizando o ajuste mínimos quadrados ordinários, sendo testados os modelos esférico, gaussiano e exponencial. A seleção do melhor modelo foi feita com base na menor soma do quadrado dos resíduos, utilizando a função `autofitVariogram` do pacote `automap` do programa R.

1.2.2.3 Evapotranspiração real

Para obtenção da ETR ao longo da bacia e seu valor médio foram utilizados dados dos produtos de sensoriamento remoto MOD16 e GLEAM, os quais foram avaliados a partir da ETR obtida pelo balanço hídrico das estações fluviométricas.

1.2.2.3.1 Imagens do MOD16

O MOD16 é um produto originado a partir das imagens do sensor MODIS, sendo parte do projeto *Earth Observing System* (EOS) criado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) no âmbito do projeto global para estimativa da evapotranspiração da superfície terrestre utilizando dados de sensoriamento remoto. O MOD16 disponibiliza dados de evapotranspiração real, evapotranspiração potencial, fluxo de calor latente real e potencial em uma resolução espacial de 1 km² (Numerical Terradynamic Simulation Group, 2019) para um período que se estende de 2000 a 2014.

A estimativa da evapotranspiração no MOD16 é feita usando o algoritmo desenvolvido por Mu et al. (2007), aprimorado por Mu; Zhao; Running (2011), o qual combina dados de sensoriamento remoto e dados meteorológicos. Esse algoritmo é fundamentado na equação de Penman-Monteith a partir da qual são calculadas a transpiração das plantas e do dossel e a evaporação do solo (RUHOFF et al., 2013).

Para o presente trabalho foram utilizadas imagens em intervalos mensais (MOD16A2) do período de 2000 a 2014, adquiridas na plataforma <https://www.ntsg.umd.edu/project/modis/mod16.php>, as quais foram processadas de forma a obter o mapa de evapotranspiração real média anual para as bacias de estudo. Como os dados do MOD16 só estão disponíveis para o período citado, a mesma imagem de ETR anual média foi utilizada para a avaliação em relação à ETR obtida pelo balanço hídrico das estações e para a regionalização de vazões.

1.2.2.3.2 Imagens do GLEAM

O GLEAM (*Global Land Evaporation and Amsterdam Model*) é um modelo criado com o intuito de estimar o fluxo evaporativo terrestre em escala diária e com resolução espacial de 0,25° utilizando o máximo de informações de sensores remotos. Nesse modelo as fontes de

evaporação são diferenciadas de acordo com três tipos de superfície terrestre: (1) solo descoberto, (2) vegetação curta e (3) vegetação com copa alta, a contribuição de superfícies aquáticas não é contabilizada. A evaporação é modelada para cada célula usando os três tipos de superfície e posteriormente é feita uma ponderação de acordo com a fração ocupada por cada superfície. A equação de Priestley e Taylor é utilizada para calcular a evapotranspiração potencial, a qual posteriormente é convertida em evapotranspiração real a partir de um fator multiplicativo que indica o estresse evaporativo da cobertura terrestre (MIRALLES et al., 2010; MARTENS et al., 2017). O GLEAM foi desenvolvido em 2011 e desde então é revisado regularmente. Martens et al. (2017) apresentam a versão mais atual desse modelo (v3), a qual foi utilizada no presente trabalho.

Foram adquiridas imagens anuais do produto GLEAM v3 do período de 1980 a 2014, na plataforma <https://www.gleam.eu/#downloads>. Essas imagens foram processadas de maneira a obter o mapa de evapotranspiração real anual média. Foram elaborados dois mapas, um para o período de 1980 a 2014, utilizado no estudo de regionalização de vazões, e outro para o período de 2000 a 2014, utilizado para análise comparativa entre os produtos de ETR.

1.2.2.3.3 Balanço hídrico nas estações fluviométricas

Os dados provenientes do sensoriamento remoto geralmente são validados com dados observados em campo (KHAN et al., 2018; ZHAO et al., 2019). Entretanto, em função das dificuldades relacionadas à obtenção desses dados, tem-se que o fechamento do balanço hídrico em seções fluviométricas monitoradas é a melhor possibilidade para avaliar as estimativas de ETR por sensoriamento remoto (RUHOFF, 2015). Nesse sentido, foram estimadas para cada estação fluviométrica a ETR utilizando a equação:

$$ETR_{est} = P - Q_{mld} \frac{31536}{A} \quad (5)$$

em que: ETR_{est} = evapotranspiração real anual média estimadas para cada estação fluviométrica, mm; P = precipitação média da área de drenagem da estação, mm; Q_{mld} = vazão média de longa duração, $m^3 s^{-1}$; A = área de drenagem a montante da estação, km^2 ; 31536 é uma constante que converte P para metros, A para m^2 e divide pelo número de segundos do ano.

1.2.2.3.4 Avaliação dos valores de ETR

Os produtos de ETR do MOD16 (ETR_{MOD16}) e do GLEAM (ETR_{GLEAM}) foram avaliados a partir da comparação dos mapas de evapotranspiração obtidos a partir de ambos e o mapa de interpolação dos valores estimados pelo balanço hídrico das estações fluviométricas (ETR_{est}), o qual foi feito pelo método IDW. Também foram comparados os valores médios relativos aos dois produtos, computados para as áreas de drenagem das estações fluviométricas, e os valores do balanço hídrico nas estações.

Os valores de ETR_{est} foram considerados como condição padrão na avaliação das ETR obtidas pelos produtos GLEAM e MOD16, os quais foram computados para as áreas de drenagem das estações fluviométricas. Para uma análise quantitativa da diferença dos valores de ETR obtidos por cada método, foram calculados os índices estatísticos a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro médio (ME), os quais indicam o erro de estimativa em relação a uma condição padrão na unidade da variável analisada e o percentual de tendência (PBIAS), que mede a tendência dos valores serem menores ou maiores que a condição padrão, sendo expresso em porcentagem, esses índices são expressos pelas equações:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (E_i - O_i)^2} \quad (6)$$

$$ME = \frac{1}{n} (E_i - O_i) \quad (7)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i) 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \quad (8)$$

em que: E_i = ETR estimada pelos produtos MOD16 ou GLEAM; O_i = ETR estimada pelo balanço hídrico das estações; n = número de observações.

1.2.2.4 Balanço Hídrico

O comportamento espacial dos diferentes fatores de abstração utilizados na regionalização de vazões (750 mm, ETR_{MOD16} e ETR_{GLEAM}) foi avaliado por meio da

comparação de mapas de balanço hídrico (BH). Tais mapas foram gerados a partir da sobreposição do mapa de precipitação com o mapa de cada um dos fatores de abstração. Também foi gerado um mapa de interpolação da Q_{mld} (que equivale à interpolação do balanço hídrico nas estações), o qual foi utilizado como condição padrão para fins de comparação.

1.2.3 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes analisadas no estudo foram: vazão média de longo termo (Q_{mld}), vazão mínima associadas à permanência de 90% (Q_{90}) e vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$). Todas as variáveis dependentes foram obtidas, para as estações fluviométricas, utilizando o programa Hydrology Plus - sistema computacional para estudos meteorológicos e hidrológicos (SOUSA, 2017).

1.2.3.1 Identificação de *outliers* através da estatística boxplot

A hidrologia é uma ciência que faz uso de dados altamente suscetíveis a erros, como os relacionados à medição indireta de vazões e à delimitação da área de drenagem de estações fluviométricas (OLIVEIRA, 2008). Nesse sentido, ferramentas como a estatística boxplot podem auxiliar na identificação desses erros. O boxplot foi aplicado aos dados das estações fluviométricas utilizando os valores do coeficiente de escoamento (equação 9), para a Q_{mld} , e das vazões específicas (equação 10), para as vazões mínimas.

$$CE = \frac{Q_{mld}}{P_{eq}} \quad (9)$$

$$q_{min} = \frac{Q_{min}}{A} \quad (10)$$

em que CE = coeficiente de escoamento, q_{min} = vazão mínima específica.

O gráfico boxplot tem formato de caixa, sendo construído com base em cinco números: limite inferior, primeiro quartil, mediana (segundo quartil), terceiro quartil e limite superior. Os limites inferior (L_I) e superior (L_S), especificados nas equações 11 e 12, caracterizam um

intervalo de valores para determinado conjunto de dados, sendo assim, os dados que se localizam fora desse intervalo são denominados *outliers*.

$$L_I = Q_1 - 1,5 (Q_3 - Q_1) \quad (11)$$

$$L_S = Q_3 + 1,5 (Q_3 - Q_1) \quad (12)$$

em que: L_I = limite inferior do Boxplot para identificação de *outliers*; L_S = limite superior do boxplot para identificação de *outliers*; Q_1 = quartil 1; Q_3 = quartil 3; e 1,5 = valor obtido por meio da comparação com uma distribuição normal.

Nas situações em que os dados apresentam maior discrepância, eles são denominados *outliers* extremos, sendo os limites que caracterizam sua ocorrência apresentados nas equações 13 e 14:

$$LE_I = Q_1 - 3 (Q_3 - Q_1) \quad (13)$$

$$LE_S = Q_3 + 3 (Q_3 - Q_1) \quad (14)$$

em que: LE_I = limite inferior do boxplot para identificação de *outliers* extremos; LE_S = limite superior do boxplot para identificação de *outliers* extremos; e 3,0 = valor obtido por meio da comparação com uma distribuição normal.

1.2.3.2 Identificação das regiões homogêneas

A aplicação do método de regionalização de vazões baseada em análise de regressão requer áreas de drenagem com comportamento hidrológico similar. Sendo assim, o primeiro passo desse processo é a divisão da bacia de estudo em regiões hidrologicamente homogêneas (RHH) (RAZAVI; COULIBALY, 2013).

Dentre as técnicas utilizadas para identificação de regiões hidrologicamente homogêneas, a análise de cluster é uma das mais utilizadas (RAMACHANDRA RAO; SRINIVAS, 2006; SASIDHARAN; WU; MENENDEZ, 2015; WANG et al., 2013). As principais dificuldades da análise de cluster estão relacionadas à escolha da medida de dissimilaridade, do método de

aglomeração e das variáveis a serem utilizadas, sendo importante frisar que essas decisões têm bastante influência nos resultados (NATHAN; MCMAHON, 1990).

As medidas ou distâncias de dissimilaridade entre dois indivíduos analisados devem ser representativas da variação mútua das características locais em um espaço p -dimensional. A medida mais comumente utilizada é a distância Euclidiana generalizada, equação 15, que consiste na distância geométrica tomada em um espaço de p dimensões (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (Z_{ik} - Z_{jk})^2} \quad (15)$$

em que: D_{ij} = distância Euclidiana entre dois indivíduos i e j ; Z_i = característica relacionada ao indivíduo i ; Z_j = característica relacionada ao indivíduo j .

No presente estudo, a identificação das regiões hidrologicamente homogêneas foi realizada utilizando as coordenadas geográficas, com o intuito de se obter regiões geograficamente contínuas (RAO; SRINIVAS, 2006) e as vazões médias mensais, a fim de considerar o efeito da variação sazonal das vazões (LAAHA; BLÖSCHL, 2006). Considerando que essas variáveis apresentam diferentes unidades e escalas e que isso pode interferir no resultado da análise de cluster, foi feita a padronização dos dados pela equação:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (16)$$

em que: z_i = o valor padronizado de x_i ; x_i = o valor da variável x a ser padronizada; \bar{x} = a média dos valores da variável x ; s = desvio padrão dos valores da variável x .

Com relação aos métodos, foi utilizado o método hierárquico desenvolvido por Ward (1963) e o método não hierárquico denominado Kmeans. O método de Ward aplica a análise de variância para determinar as distâncias entre clusters e, a cada nova iteração, reaglomerá-los de forma a minimizar a soma dos quadrados de quaisquer pares de dois clusters hipotéticos e o método de Kmeans procura minimizar a variabilidade intra-cluster e maximizar a variabilidade entre os clusters, sendo necessário definir a priori o número de grupos a ser considerado

(NAGHETTINI; PINTO, 2007). Para a realização dos processamentos referentes à análise de cluster, utilizou-se o programa R, com auxílio dos pacotes “DAAG” e “ClusterCrit”.

1.2.3.3 Avaliação dos agrupamentos formados

Posteriormente à realização da análise de cluster, os grupos obtidos foram analisados em relação à continuidade geográfica e, além disso, segundo medidas de discordância e de heterogeneidade, estatisticamente baseadas em momentos-L.

A medida de discordância D_i , definida em termos de momentos-L, foi aplicada com a finalidade identificar, dentro dos clusters analisados, estações com características estatísticas muito discrepantes das demais.

A estatística H avalia o grau de heterogeneidade de uma região pela comparação da variabilidade amostral observada com uma variabilidade esperada para uma região homogênea. Contudo, é importante ressaltar que a homogeneidade de uma região deve ser baseada, sobretudo, em suas características de uniformidade física ou geográfica, não apenas nos valores de H (HOSKING; WALLIS, 1997). A região é considerada “aceitavelmente homogênea” se $H < 1$, “possivelmente heterogênea” se $1 < H < 2$, e, “definitivamente heterogênea”, se $H > 2$.

1.2.4 Obtenção das equações de regionalização e seleção do modelo

De posse das regiões homogêneas, das variáveis dependentes e independentes para cada estação, foram definidas as equações de regionalização de vazões utilizando o modelo potencial (PANDEY; NGUYEN, 1999; RAZAVI; COULIBALY, 2013; SAMUEL; COULIBALY; METCALFE, 2011) para relacionar as vazões às características das bacias:

$$Q = \alpha A^a B^b C^c \dots M^m \quad (17)$$

em que: Q = vazão de interesse ($m^3 \cdot s^{-1}$), A, B, C, \dots, M são as variáveis independentes da bacia; e $\alpha, a, b, c, \dots, m$ são constantes.

1.2.4.1 Análise do desempenho

Após a obtenção das equações que relacionam as vazões às diferentes variáveis independentes, foi feita a seleção daquela que conduz à condição mais representativa das vazões para a bacia em estudo. A avaliação do desempenho da regionalização das vazões foi feita a partir das análises: estatística, física e de risco.

1.2.4.1.1 Análise estatística

Na análise do desempenho estatístico a seleção das equações foi feita com base nos seguintes índices: o coeficiente de determinação ajustado (R^2) (equação 19), o índice de eficiência de Nash Sutcliffe, na sua forma original (NSE) (equação 20) e modificada (mNSE) (equação 21), o erro médio absoluto (MAE) (equação 22), o RMSE (equação 6), o erro padrão (s_e) (equação 23) e o PBIAS (equação 8).

$$R^2 = \left(\frac{\sum_1^n (O_i - \bar{O}) (E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_1^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_1^n (E_i - \bar{E})^2}} \right)^2 \quad (18)$$

$$R_{ajus}^2 = R^2 - \frac{1}{(n-2)}(1 - R^2) \quad (19)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (20)$$

$$mNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^j}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^j}, \text{ com } j \in \mathbb{N} \quad (21)$$

$$MAE = n^{-1} \sum_{i=1}^n |E_i - O_i| \quad (22)$$

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{n-2}} \quad (23)$$

em que: O_i = o valor observado da variável dependente i ; \bar{O} = a média dos valores observados da variável dependente; E_i = o valor estimado da variável dependente i ; \bar{E} = a média dos valores estimados da variável dependente, n = o número de observações; j = é o expoente do NSE modificado, sendo adotado igual a 1.

O coeficiente de determinação indica a proporção de variação da variável dependente que é explicada pela regressão. Os valores de R^2 variam de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de um melhor a qualidade de ajuste do modelo. Uma das principais desvantagens desse índice é o fato de que altos valores de R^2 podem ser encontrados mesmo quando os valores preditos tenham magnitudes muito distintas dos valores observados (LEGATES; MCCABE, 1999). Em razão disso, esse índice deve ser utilizado em conjunto com outras medidas para avaliação de modelos.

O valor de R^2 depende do número de observações (n), tendendo a crescer quando n diminui, portanto é sempre possível aumentar o valor de R^2 retirando termos do modelo (CECON et al., 2012). Para corrigir esse inconveniente, foi proposto o coeficiente de determinação ajustado para graus de liberdade o qual é obtido pela equação 19.

O NSE é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual em comparação a dos dados observados (MORIASI et al., 2007). Os valores desse índice variam entre 1,0 (ajuste perfeito) e $-\infty$, sendo que valores menores que zero indicam que a média dos valores observados é um melhor preditor que o modelo. A principal desvantagem do NSE é que as diferenças entre valores estimados e observados é elevada ao quadrado e, assim, valores de maiores magnitudes são superestimados enquanto os de menores são subestimados. Uma forma de reduzir a sensibilidade desse índice a valores extremos é a utilização de sua fórmula modificada, conforme apresentado na equação 21 (KRAUSE; BOYLE; BÄSE, 2005).

O PBIAS mede a tendência de os dados preditos serem menores ou maiores que os dados observados, isto é, valores positivos indicam que o modelo está superestimando enquanto negativo indica que está subestimando.

As medidas de erro são de grande importância na avaliação de modelos, uma vez que indicam o erro em unidades (ou unidades ao quadrado) da variável analisada. Dentre as mais utilizadas estão o erro médio absoluto, a raiz do erro quadrático médio e o erro padrão. Valores das medidas de erro iguais a zero indicam um ajuste perfeito (MORIASI et al., 2007).

Outra forma de avaliar o desempenho dos modelos de regionalização de vazões é a utilização da validação cruzada (*leave-one-out*) (LAAHA; BLÖSCHL, 2006; QAMAR; GANORA; CLAPS, 2015; VEZZA et al., 2010). Esse método consiste em: (1) remover a estação 'i' do grupo 'j'; (2) regionalizar a vazão no grupo 'j'; (3) utilizar a equação obtida em (2) para estimar a vazão em 'i'; (4) repetir os passos 1 a 3 para todas as estações do grupo 'j'; (5) repetir os passos 1 a 4 para todos os grupos. Posteriormente, foram calculados os índices estatísticos dos valores preditos na validação cruzada: $RMSE_{CV}$ (equação 26) e R_{CV}^2 (equação 27).

$$RMSE_{CV} = \sqrt{V_{cv}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2} \quad (26)$$

$$R_{CV}^2 = \frac{Var_{O_i} - V_{cv}}{Var_{O_i}} \quad (27)$$

em que: V_{cv} é o erro quadrado residual médio; Var_{O_i} variância espacial da vazão observada; i = estação considerada na validação do modelo.

1.2.4.1.2 Análise física

A análise física foi feita com as equações espacializadas ao longo da hidrografia. Levando-se em conta que a utilização das vazões absolutas para essa análise é dificultada por sua escala de variação, utilizou-se o coeficiente de escoamento para representar a Q_{mld} e as vazões específicas para as vazões mínimas. A análise do comportamento físico consistiu em comparar os valores do CE e q_{min} estimados ao longo da hidrografia, para cada variável explicativa, com os valores observados nas estações fluviométricas, assim como a tendência de comportamento desses valores em relação ao mapa de balanço hídrico.

1.2.4.1.3 Análise de risco

A avaliação das variáveis independentes também foi feita em relação ao risco associado às vazões estimadas. Para isso foram utilizadas classes baseadas nos limites físicos

correspondentes aos valores de CE e q_{\min} observados nas estações fluviométricas, conforme proposto por Rego (2013).

Valores estimados inferiores ao mínimo observado são fisicamente possíveis e estão a favor da segurança, isto é, tendem a não criar uma falsa expectativa de disponibilidade hídrica, uma vez que provavelmente está subestimando a vazão em análise. Valores entre os limites máximo e mínimo observados são prováveis de ocorrer e correspondem a um intervalo de valores confiáveis para o planejamento e gestão de recursos hídricos. Por fim, valores estimados superiores ao maior valor observado são aceitáveis por serem fisicamente possíveis, principalmente em áreas de cabeceira, as quais geralmente correspondem a áreas de maiores coeficientes de escoamento e vazões específicas. Entretanto, essa situação consiste em um problema para o planejamento e gestão de recursos hídricos, pois geram um potencial de superestimativa, podendo fornecer valores de disponibilidade hídrica que não ocorrem na hidrografia.

Tendo a precipitação como única entrada de água na bacia, o maior valor de CE fisicamente possível é a unidade. Dessa forma, para o CE a classe de valores maiores que um foi caracterizada como improvável. Para as vazões específicas essa classificação não foi feita uma vez que não existe critério semelhante.

Na Tabela 1 são apresentados os intervalos de classe utilizados, a partir dessas informações foram gerados os mapas da análise de risco.

Tabela 1 - Intervalos utilizados para a análise de risco das vazões regionalizadas

CE	q_{\min}	Classificação
-	$q_{\text{est}} < 0$	Improvável
$CE_{\text{est}} < CE_{\min_obs}$	$q_{\text{est}} < q_{\min_obs}$	Aceitável - Potencial de subestimativa
$CE_{\min_obs} < CE_{\text{est}} < CE_{\max_obs}$	$q_{\min_obs} < q_{\text{est}} < q_{\max_obs}$	Provável - Confiável
$CE_{\max_obs} < CE_{\text{est}} < 1$	$q_{\text{est}} > q_{\max_obs}$	Aceitável - Potencial de superestimativa
$CE_{\text{est}} > 1$	-	Improvável

em que: CE = coeficiente de escoamento; CE_{est} = CE estimado considerando as equações em análise; CE_{\max_obs} = CE máximo observado entre as estações fluviométricas da região em estudo; CE_{\min_obs} = CE mínimo observado entre as estações fluviométricas da região em estudo; q_{\min} = vazão mínima específica; q_{est} = q_{90} ou $q_{7,10}$ estimada considerando as equações em análise;

$q_{\text{máx_obs}} = q_{90}$ ou $q_{7,10}$ máxima observada entre as estações fluviométricas da região em estudo;
e $q_{\text{mín_obs}} = q_{90}$ ou $q_{7,10}$ mínima observada entre as estações fluviométricas da região em estudo.

1.2.5 Estudos de caso

Os procedimentos metodológicos apresentados foram aplicados para as bacias dos rios Grande, Paracatu e Jequitinhonha, devido à importância dessas no contexto nacional, conforme destacado na sequência.

1.2.5.1 Bacia do Grande

A bacia do rio Grande (Figura 2) está localizada no Oeste do estado da Bahia, entre as coordenadas geográficas $10^{\circ}10'$ e $13^{\circ}20'S$ de latitude e $43^{\circ}08'$ e $46^{\circ}37'O$ de longitude e possui uma área de aproximadamente 75.000 km^2 a qual representa 13,2% da área do estado. Esta bacia é a maior em área de drenagem e a segunda de maior em contribuição dentre as sub-bacias do São Francisco (PEREIRA et al., 2007).

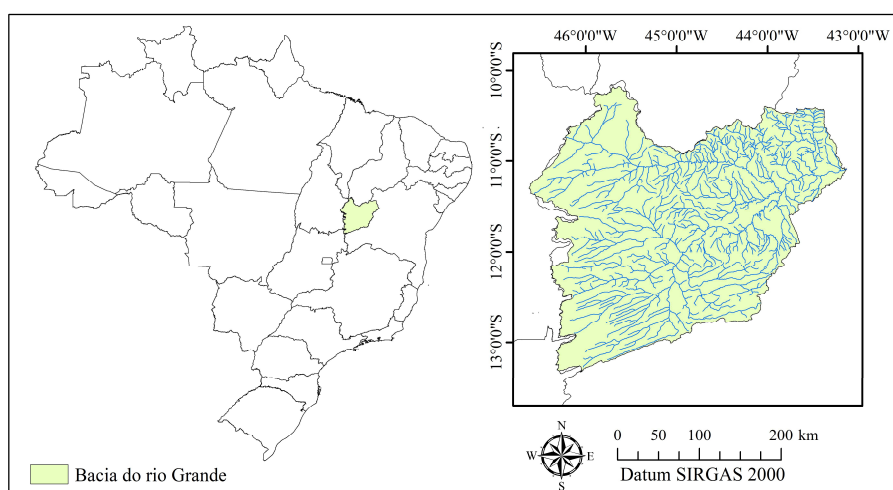


Figura 2 – Localização da bacia do rio Grande.

O relevo da bacia do Grande é dominado pelo Chapadão Central, plataforma aplainada com altitudes de 700 a 900 metros, com declividades muito baixas. Predominam os latossolos com textura arenosa e cores vermelho-amarelas e o bioma cerrado (ANDRADE; LEAL; GUIMARÃES, 2002). O clima possui uma sazonalidade bem característica com uma estação

chuvosa entre os meses de outubro a abril e uma estação seca de maio a setembro, com precipitação média anual variando de aproximadamente 2000 mm no extremo oeste da bacia a 700 mm em sua foz (MOREIRA; SILVA, 2010). Em relação aos recursos hídricos a bacia se destaca pela pequena variação de sua vazão ao longo do ano e pela abundância de água subterrânea (ANDRADE; LEAL; GUIMARÃES, 2002).

A região do Oeste da Bahia é caracterizada pela expansão da agricultura a partir da década de 1970, sendo intensificada na década de 90 com uma ampla mudança no uso da terra (PIMENTEL, 2011). Atualmente a região é destaque no agronegócio brasileiro e mundial, com crescente relevância na produção de grãos e fibra (AIBA, 2018).

Para a bacia do Grande foram selecionadas 15 estações fluviométricas e 59 estações pluviométricas, com o período base de 1977 a 2015. Esses dados foram adquiridos em fevereiro de 2017. As informações de identificação (ID), código, nome e localização para as estações fluviométricas e código, nome e localização para as pluviométricas estão apresentadas, como apêndices, nas Tabelas 1A e 2A, respectivamente. Na Figura 3 é apresentado o mapa com a localização das estações, sendo as fluviométricas identificadas com o ID apresentado na Tabela 1A.

Para espacialização dos modelos de regionalização de vazões, foi utilizada a Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas (BHO), versão 2012, na escala de 1:1.000.000 obtida a partir do Mapeamento Sistemático Brasileiro e disponibilizadas no portal de metadados da ANA.

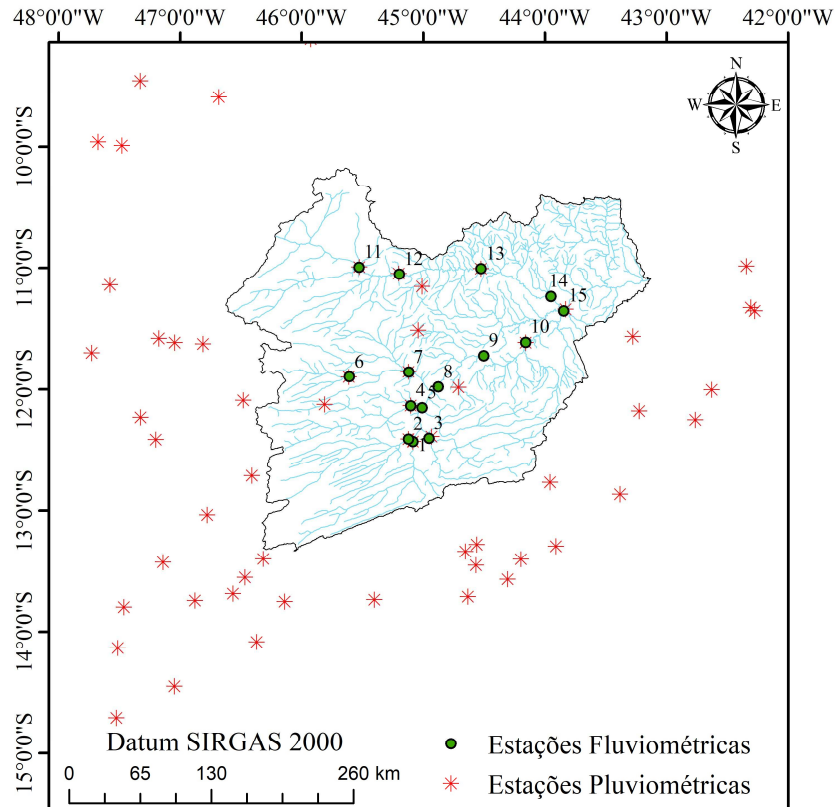


Figura 3 – Localização das estações fluviométricas e pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do rio Grande.

1.2.5.2 Bacia do Paracatu

A bacia do rio Paracatu (Figura 4) está inserida região noroeste do estado Minas Gerais, e apresenta uma área de drenagem de 45.600 km², sendo que 92% dessa área, pertencem a Minas Gerais, e o restante, 5% e 3%, está distribuído entre o estado de Goiás e o Distrito Federal, respectivamente. O rio Paracatu localiza-se na margem esquerda do rio São Francisco, sendo afluente de maior parcela de contribuição (18,2%) para formação das vazões desse rio (PEREIRA et al., 2007).

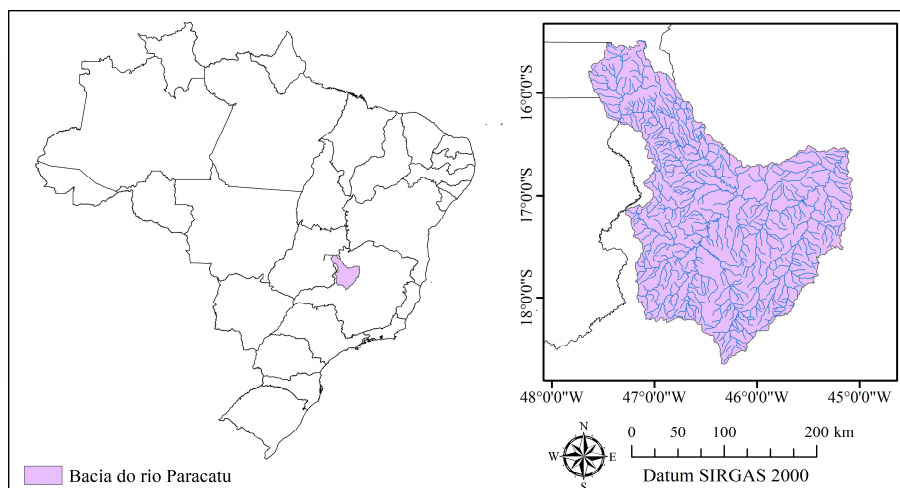


Figura 4 – Localização da bacia do rio Paracatu.

O clima da bacia do Paracatu é caracterizado como tropical chuvoso, com duas estações bastante distintas. Na estação chuvosa, que compreende os meses entre outubro a abril, as temperaturas são mais elevadas e ocorrem cerca de 93% da precipitação total anual. Na estação seca, a precipitação é mínima e as temperaturas são mais amenas. A precipitação média anual nessa região é da ordem de 1340 mm (IGAM, 2006).

O regime de variação das vazões dos rios da bacia do Paracatu caracteriza o início do ano hidrológico no mês de outubro, com aumento da vazão em função das primeiras precipitações, e termina em setembro, quando ocorrem as vazões mínimas (BRASIL, 1998). O bioma dominante na bacia é o Cerrado, apresentando, contudo, variações fitogeográficas como cerradão, mata seca, mata ciliar, veredas e capoeiras (IGAM, 2006).

A bacia do Paracatu é caracterizada por um grande desenvolvimento da atividade agrícola, principalmente na região mais oeste da bacia que apresenta condições climáticas e de fertilidade do solo favoráveis (EUCLYDES et al., 2009). O uso da irrigação é feito em grande parte das áreas cultivadas, o que propicia um desenvolvimento agrícola satisfatório (MELO; ASSUNÇÃO, 2011), contudo acarreta maior pressão sobre os recursos hídricos. Os conflitos pelo uso da água já ocorrem em algumas sub-bacias como as dos rios Preto, São Pedro e ribeirão Entre-Ribeiros (EUCLYDES et al., 2009).

Foram utilizados dados de 23 estações fluviométricas e 70 pluviométricas para a bacia do Paracatu (Figura 5), adotando-se um período base de 1974 a 2014. Esses dados foram adquiridos em fevereiro de 2017. As informações de identificação (ID), código, nome e

localização para as estações fluviométricas e código, nome e localização para as pluviométricas estão apresentadas, como apêndices, nas Tabelas 3A e 4A, respectivamente.

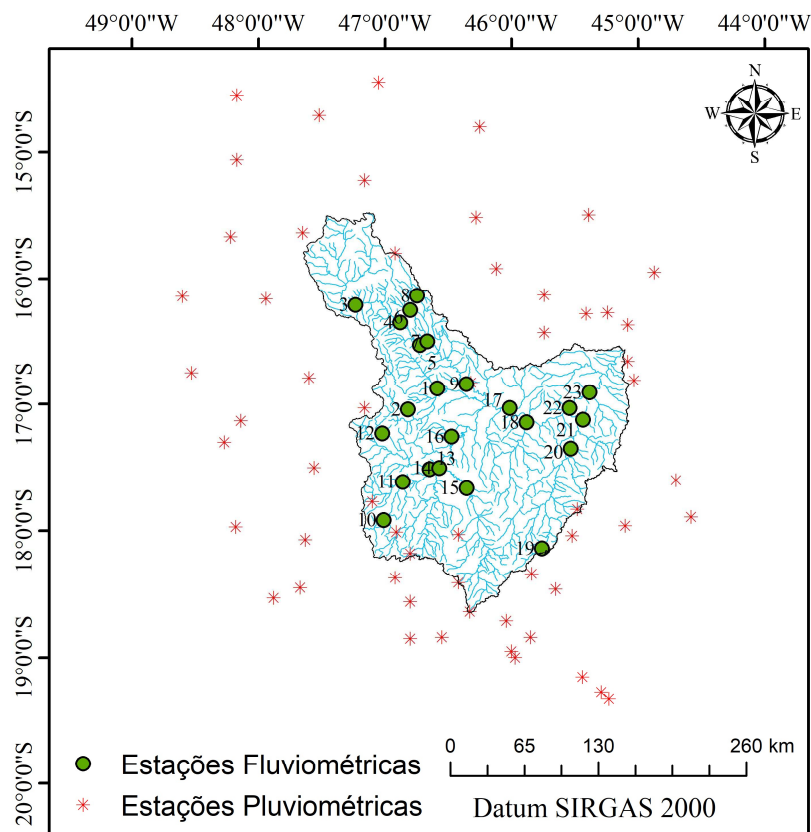


Figura 5 – Localização das estações fluviométricas e pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do rio Paracatu.

Para a espacialização dos modelos de regionalização de vazões da bacia do Paracatu, foi utilizada a Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas (BHO), versão 2017, na escala de 1:100.000, obtida a partir do Mapeamento Sistemático Brasileiro e disponibilizada no portal de metadados da ANA.

A bacia do Paracatu é dividida em três regiões hidrologicamente homogêneas (Figura 6). Essa divisão tem sido utilizada em diversos estudos de regionalização de vazões (IGAM; GPRH/UFV, 2012; LISBOA et al., 2008; NOVAES et al., 2007) e foi confirmada no trabalho desenvolvido por Oliveira (2019) realizado com o intuito de definir as RHH de maneira mais objetiva e inserindo a sazonalidade das vazões. Sendo assim, no presente trabalho essa mesma divisão foi considerada para o estudo de regionalização.

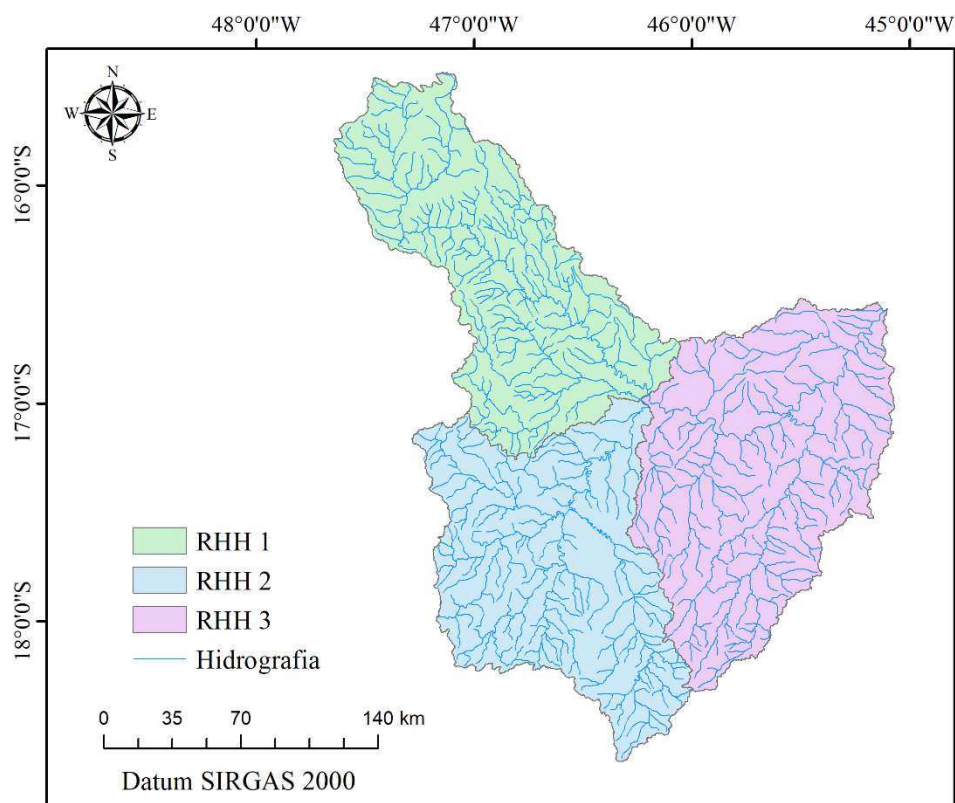


Figura 6 – Regiões hidrologicamente homogêneas da bacia do Paracatu.

1.2.5.3 Bacia do Jequitinhonha

A bacia do rio Jequitinhonha (Figura 7) está localizada entre latitudes 16° e 18°S e longitudes 39° e 44°W, com uma área de 70.315 km², estando 94% dessa área no estado de Minas Gerais e 6% no estado da Bahia. O clima da região varia de semiárido a úmido, com precipitação média anual entre 600 e 1600 mm. O período chuvoso corresponde aos meses de outubro a março, sendo o trimestre de dezembro a fevereiro geralmente responsável por mais de 50 % da precipitação total (GONÇALVES, 1997).

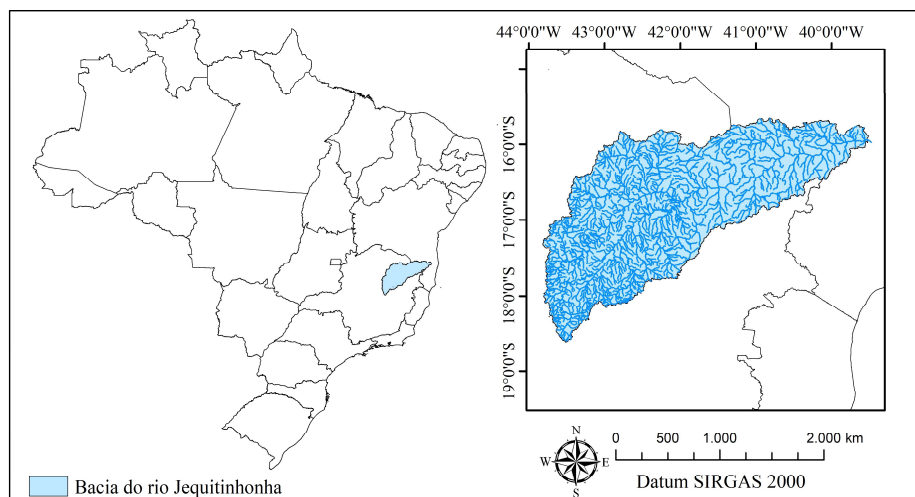


Figura 7 – Localização da bacia do rio Jequitinhonha.

A região em que a bacia do Jequitinhonha está inserida é caracterizada por ter a maior parte de sua população residindo na zona rural e por apresentar um elevado índice de pobreza. Estudos apontam que as restrições hídricas e as secas frequentes são fatores que contribuem para o baixo desempenho agropecuário, que corresponde a 30% do PIB regional. Entretanto tem se observado um aumento de investimentos por parte dos governos estaduais para melhoria da infraestrutura da região (MINAS GERAIS, 2009).

O rio Jequitinhonha é o recurso natural mais importante da região (GONÇALVES, 1997), sendo os principais usos de água na bacia o abastecimento humano (urbano e rural) e a irrigação. Os recursos hídricos vêm sendo bastante degradados devido à falta de esgotamento sanitário nas áreas urbanas e por atividades como mineração, garimpo e agropecuária (EUCLYDES et al., 2011).

Para a bacia do rio Jequitinhonha foram utilizados dados de 25 estações fluviométricas e 64 pluviométricas (Figura 8), com o período base 1987 a 2014. Esses dados foram adquiridos em fevereiro de 2019. As informações de identificação (ID), código, nome e localização para as estações fluviométricas e código, nome e localização para as pluviométricas estão apresentadas, como apêndices, nas Tabelas 5A e 6A, respectivamente.

Para a espacialização dos modelos de regionalização de vazões da bacia do Jequitinhonha, foi utilizada a Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas (BHO), versão 2017, na escala de 1:100.000, obtida a partir do Mapeamento Sistemático Brasileiro e disponibilizada no portal de metadados da ANA.

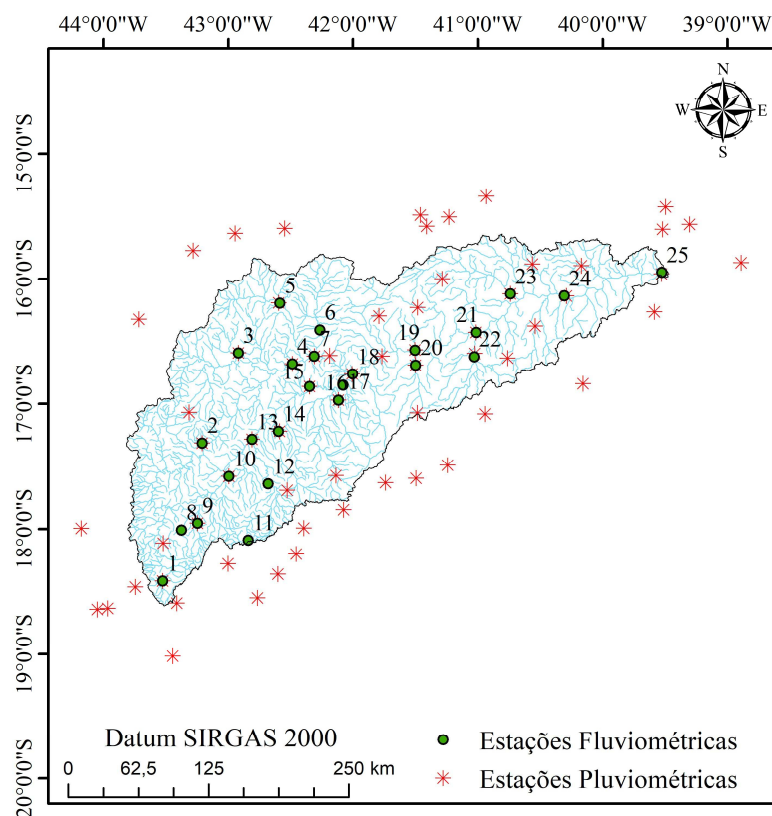


Figura 8 – Localização das estações fluviométricas e pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do rio Jequitinhonha.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor apresentação dos resultados, esses foram individualizados por bacia hidrográfica.

1.3.1 Bacia do Grande

1.3.1.1 Variáveis independentes

1.3.1.1.1 Precipitação

Na Figura 9 está apresentado o mapa de precipitação anual média da bacia do rio Grande. Nessa bacia o método de interpolação utilizado foi o IDW, uma vez que não houve ajuste do semivariograma para a utilização da krigagem.

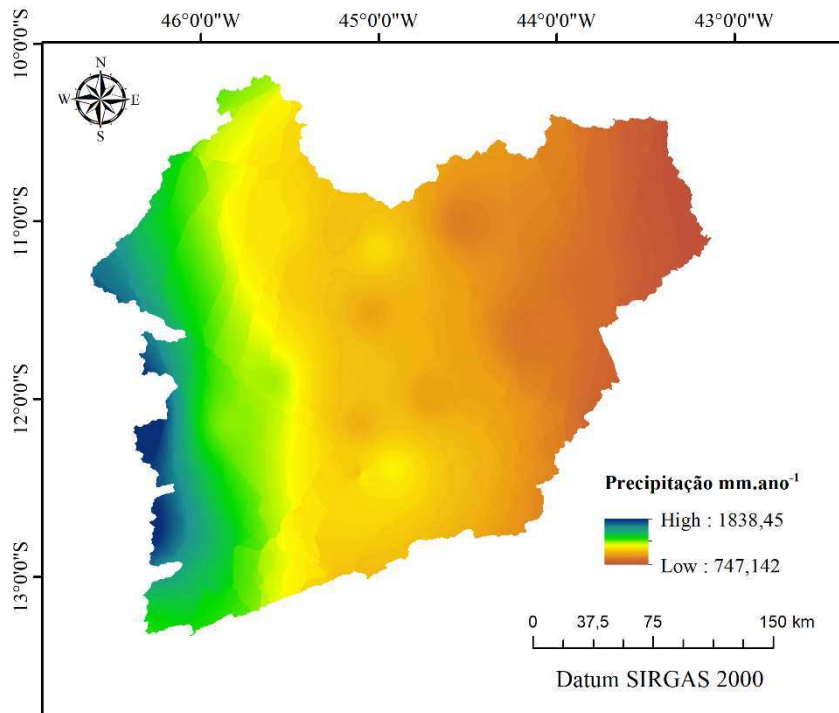


Figura 9 – Precipitação anual média na bacia do rio Grande.

Observa-se que essa bacia é caracterizada por apresentar uma grande amplitude de variação da precipitação anual média (aproximadamente 1100 mm), sendo possível notar maiores magnitudes na região oeste, onde ocorrem precipitações da ordem de 1800 mm, e menores na região leste, em que se observa valores inferiores a 800 mm.

1.3.1.1.2 Evapotranspiração Real

Na Figura 10 estão apresentados os mapas de ETR obtidos, pelos produtos MOD16 e GLEAM e pela interpolação da ETR estimada pelo balanço hídrico das estações fluviométricas na bacia do Grande.

O mapa de evapotranspiração proveniente do produto MOD16 (ETR_{MOD16}) apresenta valores de menor magnitude na porção mais a oeste e a nordeste da bacia e maiores magnitudes na região central. Observa-se uma grande discretização dos valores de ETR pelo produto MOD16 (Figura 10A), apresentando valores de ETR muito distintos em regiões geograficamente muito próximas. Além disso, a ETR_{MOD16} apresenta uma grande amplitude de variação dos valores, variando de 343 a 1334 mm, com um valor médio para a bacia de 724 $mm.ano^{-1}$. Alterações de ETR em regiões vizinhas podem ocorrer em condições específicas

como grande mudança de altitude ou condição de ocupação da terra, entretanto no mapa da ETR_{MOD16} isso é observado com frequência, podendo ser indicativo de inconsistências da ETR estimada pelo produto.

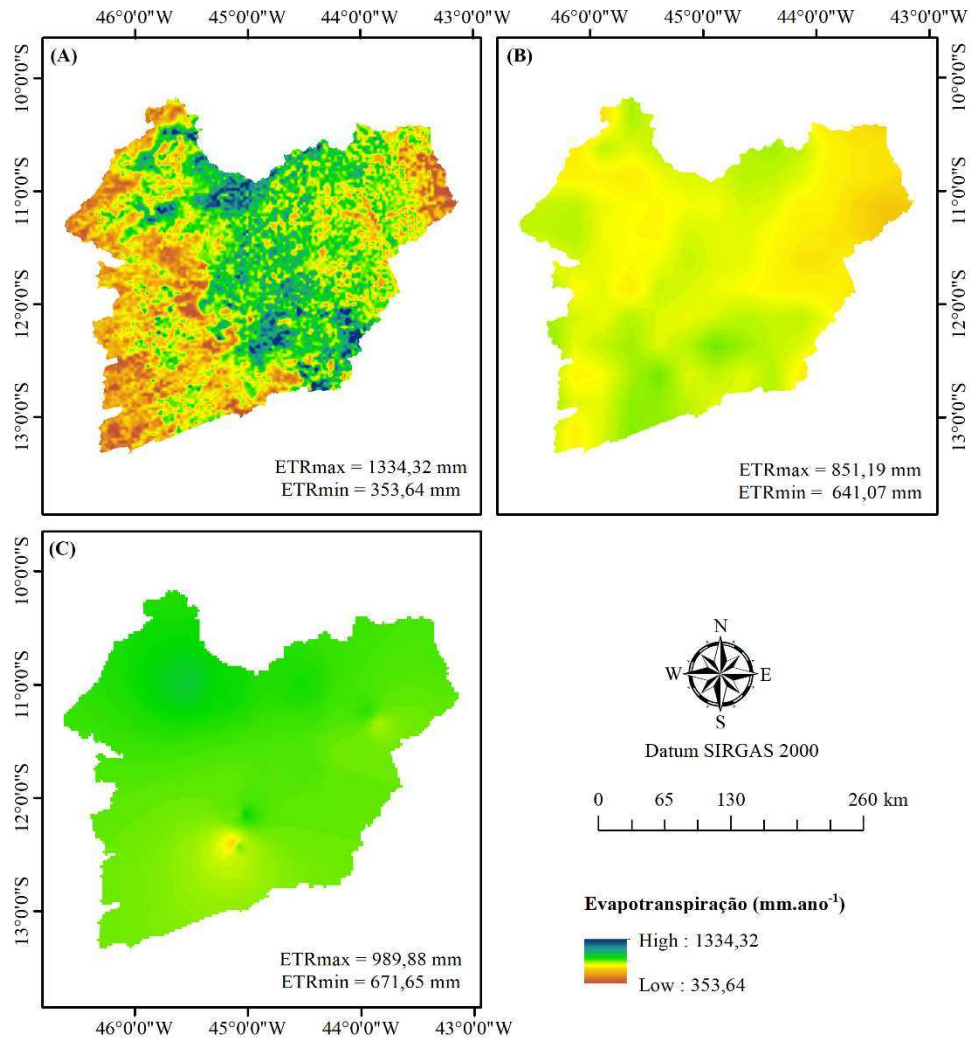


Figura 10 – ETR obtida pelos produtos MOD16 (A), GLEAM (B) e ETR_{est} (C) para a bacia do rio Grande.

O mapa de ETR proveniente do produto GLEAM (ETR_{GLEAM}) (Figura 10B) apresenta um padrão de variação semelhante ao obtido pelo MOD16, com menores valores nas regiões a oeste e a nordeste da bacia e maiores na região central. Contudo, o ETR_{GLEAM} apresenta uma distribuição dos valores mais suavizada, com alterações graduais nos valores de ETR. Além disso, o mapa de ETR do GLEAM apresenta uma amplitude de variação menor, variando de 641 a 851 mm.ano^{-1} , com um valor médio para a bacia de 762 mm.

Uma explicação para a maior discretização dos valores e maior amplitude de variação do produto MOD16 em relação ao GLEAM é a resolução espacial dos produtos. O MOD16 possui um pixel de 1x1 km e o GLEAM de aproximadamente 27x27 km (0,25°), portanto o primeiro tende a fornecer um maior detalhamento da área monitorada, já que pixels menores são mais sensíveis a diferenciação das mudanças do uso da terra, que por sua vez possui relação direta com a resposta da ETR (KHAN et al., 2018; KIM et al., 2012; RUHOFF et al., 2013). Além disso, a forma como são realizados os cálculos da ETR nos diferentes produtos justifica esses resultados, no MOD16 é considerada uma classificação global de uso e ocupação da terra, em que são distintas 17 classes (FRIEDL et al., 2002) e o GLEAM distingue apenas três fontes de evaporação com base no tipo de superfície terrestre: solo descoberto, vegetação curta e vegetação com copa alta (MIRALLES et al., 2010; MARTENS et al., 2017).

No mapa de evapotranspiração proveniente do balanço hídrico das estações (ETR_{est}) (Figura 10C) não é possível observar um padrão muito bem definido da variação dos valores de ETR, havendo uma predominância de valores próximos a 900 mm. É importante ressaltar que a qualidade da interpolação desse mapa é comprometida pela quantidade de estações fluviométricas utilizadas na sua obtenção (apenas 13 estações).

Com o intuito de avaliar as estimativas dos valores de ETR obtidos pelos diferentes produtos, a evapotranspiração calculada para cada estação fluviométrica pelo método do balanço hídrico foi utilizada como condição padrão e calcularam-se os índices estatísticos (RMSE, ME e PBIAS). Os resultados desses índices são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Índices estatísticos calculados para comparação dos produtos de ETR com a ETR_{est}

Índices	MOD16	GLEAM
RMSE	206,68	112,09
ME	-186,22	-56,21
PBIAS	-21,00	-6,30

Observa-se que os índices ME e PBIAS apresentaram valores negativos, indicando que os produtos tendem a subestimar a ETR em relação à ETR_{est} . Essa tendência de subestimativa dos produtos MOD16 e GLEAM também foi encontrada nos estudos desenvolvidos por Ramoelo et al. (2014) na África do Sul; por Khan et al. (2018) na Ásia, em condições de savana e pastagem, respectivamente.

Embora tenha se observado essa tendência de subestimativa dos produtos GLEAM e MOD16 em relação à ETR_{est} , os valores do ETR_{GLEAM} apresentam uma maior proximidade do

balanço hídrico das estações fluviométricas o que é representado pelos menores valores dos erros calculados. Esse resultado tem relação com o fato da ETR_{est} serem representativas das áreas de drenagem das estações fluviométricas, portanto, representam áreas maiores e o GLEAM por ter uma menor resolução espacial também tende a representar uma condição média de uma maior área. Já o MOD16 tem uma resolução espacial mais detalhada, portanto, tende a errar mais que um valor representativo das condições médias de uma área maior.

É importante ressaltar que apesar da ETR calculada pelo balanço hídrico das estações representar uma das melhores formas de verificar a acurácia dos produtos de sensoriamento remoto, conforme afirmado por Ruhoff (2015), essa é uma forma aproximada que contém erros advindos das simplificações consideradas e também os erros provenientes dos métodos de medição das variáveis utilizadas para sua obtenção (vazão e precipitação). Além disso, tem-se os erros provenientes da interpolação da precipitação usada para obter os valores médios das áreas de drenagem das estações fluviométricas. Todos esses fatores reforçam a dificuldade que se tem na estimativa de valores ETR representativos, mesmo quando se utilizam dados observados das estações de monitoramento.

Conforme discutido, as diferenças das ETR_{MOD16} e ETR_{GLEAM} em relação à ETR_{est} se devem principalmente à forma e ao nível de detalhamento na qual a ETR é obtida. Apesar dessas diferenças, acredita-se que a utilização desses produtos pode contribuir para melhorias nos estudos de regionalização de vazões.

1.3.1.1.3 Balanço hídrico

Na Figura 11 estão apresentados, para a bacia do Grande, os mapas de balanço hídrico considerando os fatores de abstração 750 mm, ERT_{MOD16} e ETR_{GLEAM} e o obtido pelas estações fluviométricas.

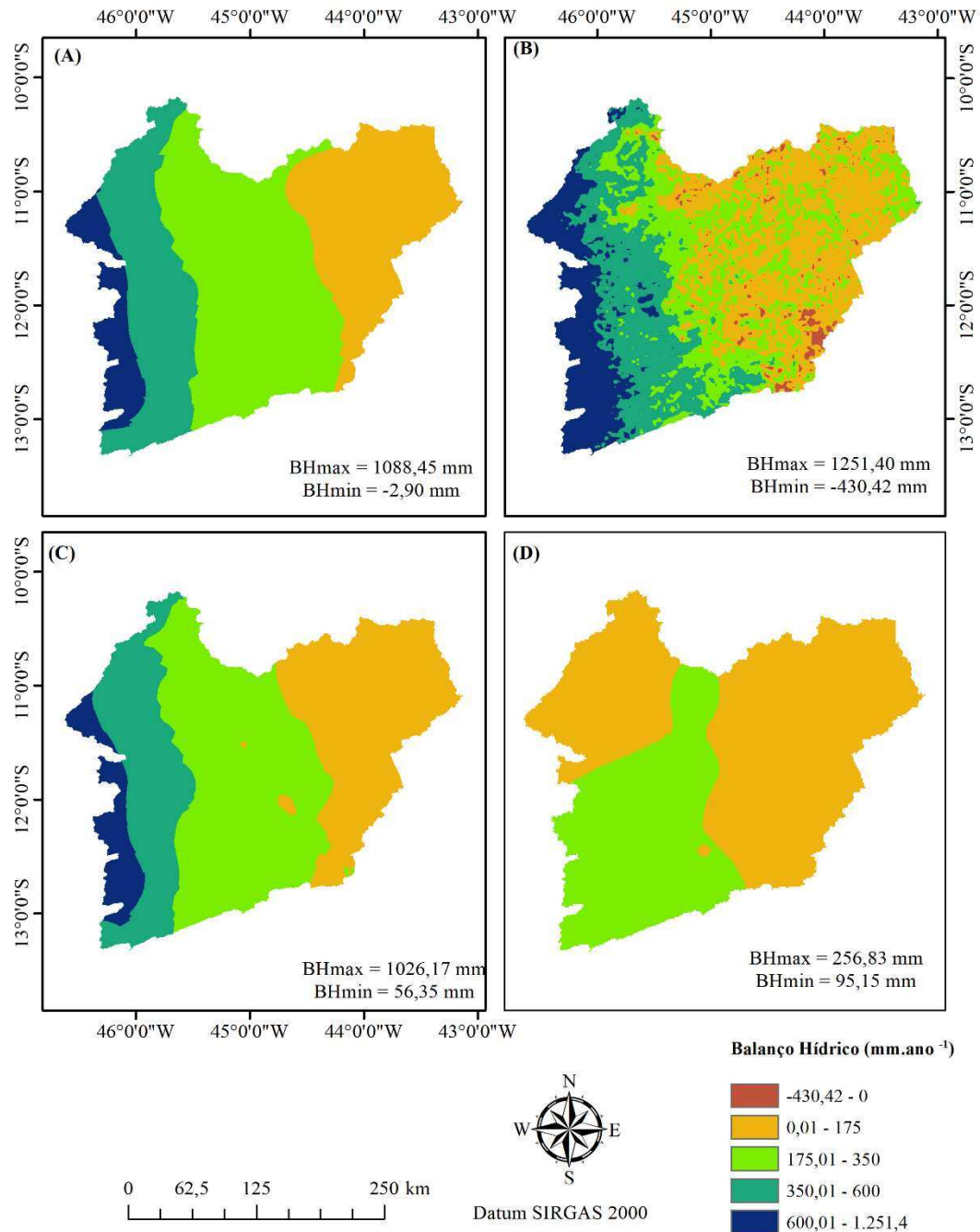


Figura 11 – Balanço hídrico obtido usando fatores de abstração: 750mm (A), ETR_{MOD16} (B), ETR_{GLEAM} (C) e ETR_{est} (D) para a bacia do rio Grande.

Na Figura 11A, observa-se que a utilização de um balanço hídrico que considera um fator de abstração da precipitação de 750 mm ao longo de toda bacia (BH_{750}) produz valores que vão de -2,90 a 1.088 mm, estando as maiores magnitudes localizadas na região mais a oeste da bacia decrescendo no sentido leste. O uso do fator de abstração igual a 750 mm em estudos de regionalização de vazões tem mostrado um desempenho muito bom em relação à utilização de

variáveis como área e precipitação, contudo apresenta limitações a uma generalização para outras bacias, uma vez que o valor de abstração tende a se alterar com a capacidade de retenção da água no solo, a interceptação da água pela vegetação e principalmente a evapotranspiração (PRUSKI et al., 2013). Essa limitação é representada pela ocorrência, mesmo que em uma proporção não expressiva, de valor negativo no balanço, evidenciando que o fator de abstração de 750 mm é alto para algumas regiões da bacia do Grande.

O balanço hídrico obtido com a ETR_{MOD16} (BH_{MOD16}) (Figura 11B) também apresenta maiores magnitudes na região oeste e menores na região leste. O BH_{MOD16} apresenta maior amplitude dos valores dentre os balanços apresentados, variando de -430 a 1.251 mm. Os valores negativos indicam presença de inconsistências no BH. Essas inconsistências podem estar relacionadas a erros nas estimativas da ETR e/ou da precipitação, ou à insuficiência de estações pluviométricas para capturar a variabilidade espacial da precipitação e dar suporte ao nível de detalhamento apresentado no mapa da ETR_{MOD16} .

De acordo com Kim et al., (2012); Moreira; Adamatti; Ruhoff, (2018); Ramoelo et al., (2014) os erros nas estimativas de ETR pelo MOD16 estão fortemente relacionados aos dados de entrada utilizados na geração do produto. Dentre esses, pode-se citar as classificações imprecisas dos tipos de cobertura da terra, o albedo, o índice de área foliar, os dados meteorológicos globais, os quais possuem resolução espacial grosseira e não são validados para todas as condições no qual é aplicado.

Na Figura 11C observa-se que o balanço hídrico obtido a ETR_{GLEAM} (BH_{GLEAM}) apresenta o mesmo padrão de variação do BH_{750} e do BH_{MOD16} , com uma amplitude de variação um pouco inferior, variando de 56 a 1.026 mm. Já o balanço hídrico feito com dados das estações fluviométricas (BH_{est}) (Figura 11D), apresentou uma tendência de maiores valores na região leste da bacia e menores a oeste, contudo com uma magnitude e amplitude de valores bem inferior aos outros BH. Esse resultado está relacionado ao pequeno número de estações utilizadas (apenas 13 estações fluviométricas) assim como ao posicionamento dessas estações ao longo da hidrografia, que prejudica a representatividade da interpolação. Além disso, fatores como a não coincidência dos divisores topográficos e hidrogeológicos, que faz com que a precipitação infiltrada na bacia contribua para a formação de vazões na bacia adjacente, e a diminuição da vazão devido às retiradas de água podem contribuir para as menores magnitudes dos valores obtidos no BH_{est} .

Para fins de utilização do produto MOD16 na regionalização de vazões, os valores de balanço hídrico negativo foram anulados, uma vez que a sua utilização poderia acarretar a obtenção de valores negativos de vazão o que hidrológicamente é improvável de ocorrer.

1.3.1.2 Variáveis dependentes

Na Tabela 3 estão apresentados os códigos, as áreas de drenagem, as vazões observadas, os coeficientes de escoamento e as vazões específicas nas estações fluviométricas da bacia do Grande.

Tabela 3 – Código, área, Q_{mld} , Q_{90} , $Q_{7,10}$, CE, q_{90} e $q_{7,10}$ para as estações fluviométricas consideradas para o estudo da bacia do Grande

Estação	Área (km ²)	Q_{mld} (m ³ s ⁻¹)	Q_{90} (m ³ s ⁻¹)	$Q_{7,10}$ (m ³ s ⁻¹)	CE adm	q_{90} (L s ⁻¹ km ⁻²)	$q_{7,10}$ (L s ⁻¹ km ⁻²)
46415000	4.902,29	31,16	18,90	15,03	0,18	3,86	3,49
46455000	6.359,05	49,73	34,53	29,40	0,20	5,43	5,09
46490000	4.446,04	5,95	2,58	2,02	0,04	0,58	0,47
46543000	5.256,24	47,55	30,73	24,55	0,23	5,85	5,26
46550000	24.376,02	86,00	57,18	47,24	0,10	2,35	2,22
46570000	2.716,68	13,82	6,57	4,17	0,12	2,42	2,06
46590000	7.382,42	50,84	37,31	33,00	0,19	5,05	4,86
46610000	32.907,41	189,22	129,43	108,81	0,16	3,93	3,73
46650000	35.810,67	189,87	123,07	93,58	0,15	3,44	3,18
46675000	39.472,67	192,51	127,09	97,97	0,14	3,22	3,03
46770000	6.993,90	34,20	26,23	23,26	0,13	3,75	3,61
46790000	14.424,31	97,23	72,13	64,60	0,18	5,00	4,73
46830000	18.353,89	98,12	73,74	65,57	0,15	4,02	3,86
46870000	22.175,88	106,29	75,39	67,06	0,14	3,40	3,24
46902000	46.282,88	276,75	191,33	164,41	0,18	4,13	3,92

Observa-se que o menor valor de área de drenagem para essa bacia foi de 2.716,68 km², o que mostra a deficiência de informações hidrológicas em rios de pequenas áreas de drenagem, problema frequente nas bacias hidrográficas brasileiras, principalmente as localizadas nas regiões norte e nordeste. As vazões específicas foram de 0,58 a 5,85 L s⁻¹ km⁻² para q_{90} e 0,46 a 4,64 L s⁻¹ km⁻² para $q_{7,10}$. O coeficiente de escoamento variou entre 0,04 a 0,23.

1.3.1.2.1 Boxplot

Pela análise de boxplot constatou-se que a estação 4649000 (ID = 3) (Figura 12) foi caracterizada como *outlier* inferior para todas as vazões de estudo, apresentando valor de vazão específica e coeficiente de escoamento muito menor ao das outras estações de estudo. Sendo assim, foi retirada das análises posteriores.

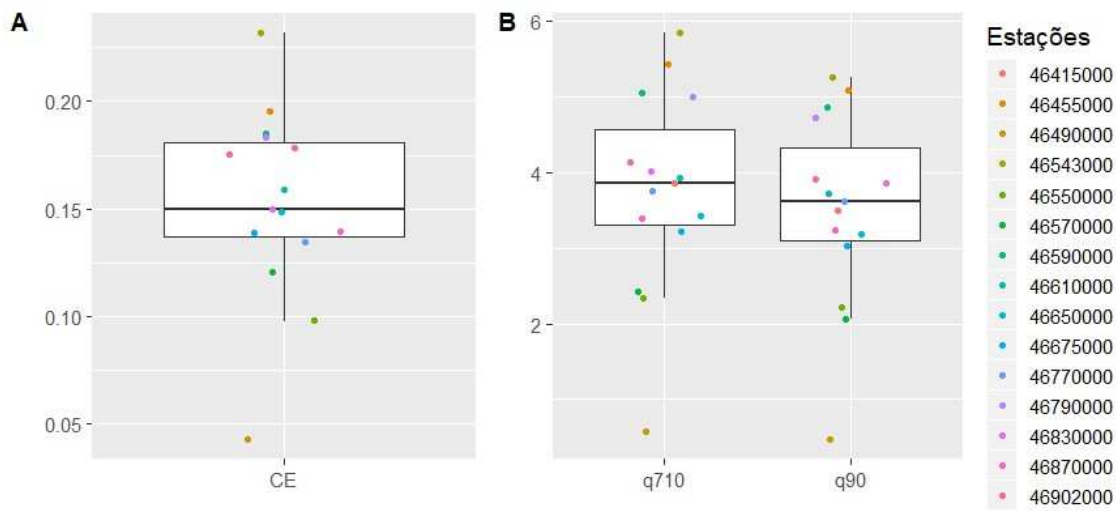


Figura 12 – Boxplot do CE (A) e das vazões específicas $q_{7,10}$ e q_{90} (B) para a bacia do Grande.

1.3.1.2.2 Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas

Na análise de regiões hidrologicamente homogêneas da bacia do Grande, foram avaliadas diferentes possibilidades de divisão da bacia em regiões hidrologicamente homogêneas (RHH). Contudo, uma análise preliminar dos resultados das vazões regionalizadas sugeriu que a adoção de uma única região homogênea é mais adequada. Para essa consideração, as medidas de discordância indicaram a necessidade de exclusão da estação 46570000 (ID=6), para a classificação da bacia como aceitavelmente homogênea.

1.3.1.3 Equações de regionalização

Na Tabela 4 são apresentadas as equações de regionalização obtidas para a bacia do Grande. Levando-se em conta que tanto a ETR_{MOD16} como a ETR_{GLEAM} foram utilizadas para obtenção das variáveis $BHeq$ e $BHeq_M$, elas foram diferenciadas pelo acréscimo da letra G

naquelas que consideram a utilização do produto GLEAM. Portanto, $BHeq_G$ e $BHeq_{GM}$ correspondem ao balanço hídrico equivalente que utiliza a ETR_{GLEAM} em cada trecho da hidrografia e o balanço hídrico que utiliza a ETR_{GLEAM} média da bacia, respectivamente.

Tabela 4 – Equações de regionalização de vazões para a bacia do Grande

Variáveis	Q_{mld}	Q_{90}	$Q_{7,10}$
Peq	$Q_{mld}=0,3695Peq^{0,8670}$	$Q_{90}=0,2555Peq^{0,8667}$	$Q_{7,10}=0,2348Peq^{0,8524}$
Peq ₇₅₀	$Q_{mld}=0,6758Peq_{750}^{0,9287}$	$Q_{90}=0,4673Peq_{750}^{0,9283}$	$Q_{7,10}=0,4270Peq_{750}^{0,9122}$
BHeq	$Q_{mld}=0,4787BHeq^{0,9723}$	$Q_{90}=0,3418BHeq^{0,9662}$	$Q_{7,10}=0,3179BHeq^{0,9470}$
BHeq _M	$Q_{mld}=0,6556BHeq_M^{0,9233}$	$Q_{90}=0,4564BHeq_M^{0,9218}$	$Q_{7,10}=0,4142BHeq_M^{0,9069}$
BHeq _G	$Q_{mld}=0,7030BHeq_G^{0,9326}$	$Q_{90}=0,4805BHeq_G^{0,9347}$	$Q_{7,10}=0,4305BHeq_G^{0,9219}$
BHeq _{GM}	$Q_{mld}=0,6858BHeq_{GM}^{0,9314}$	$Q_{90}=0,4773BHeq_{GM}^{0,9300}$	$Q_{7,10}=0,4333BHeq_{GM}^{0,9149}$

1.3.1.4 Análise de desempenho

O desempenho dos modelos de regionalização de vazões foi avaliado pelas análises estatísticas, físicas e de risco.

1.3.1.4.1 Análise estatística

Na Tabela 5 são apresentados os índices estatísticos referentes às equações de regionalização para as vazões Q_{mld} , Q_{90} e $Q_{7,10}$ da bacia do rio Grande. Os resultados mostram que, em relação ao coeficiente de determinação, os modelos de regionalização da bacia do Grande possuem uma ótima qualidade de ajuste, uma vez que apresentou todos os R_{ajus}^2 maiores ou iguais a 0,90, com exceção do modelo da $Q_{7,10}$ com a variável independente BHeq ($R_{ajus}^2 = 0,89$). De acordo com o NSE, todos os modelos de regionalização de vazões são classificados como muito bom ($\geq 0,75$) segundo classificação proposta por Moriasi et al., 2007. Já com a sua forma modificada (mNSE), os modelos de regionalização do Grande passam a ser classificados como bom ($0,65 < NSE \leq 0,75$) para Q_{90} e $Q_{7,10}$, com exceção da equação da $Q_{7,10}$ utilizando as variáveis independentes BHeq e BHeq_M que apresentaram mNSE de 0,62, sendo, portanto, classificados como satisfatórios. As diferenças nas classificações obtidas pelos índices NSE e mNSE é justificada pelo fato do NSE em sua forma modificada reduzir a sensibilidade a valores

extremos, fazendo com que o mNSE tenda a apresentar valores de magnitudes menores que o NSE (KRAUSE; BOYLE; BÄSE, 2005).

Tabela 5 – Indicadores estatísticos dos modelos de regionalização de vazões da bacia do rio Grande

		R_{ajus}^2	NSE	mNSE	MAE	RMSE	Se	PBIAS	RMSE _{CV}	R^2_{CV}
Q_{mld}	Peq	0,92	0,91	0,77	14,41	22,01	0,20	-2,5	25,59	0,88
	Peq ₇₅₀	0,93	0,90	0,79	12,81	23,85	0,19	-2,5	28,43	0,86
	BHeq	0,93	0,89	0,78	13,47	24,06	0,19	-2,1	29,65	0,84
	BHeq _M	0,93	0,90	0,79	12,87	23,59	0,19	-2,5	28,08	0,86
	BHeq _G	0,93	0,90	0,79	12,96	23,31	0,19	-2,5	26,91	0,87
	BHeq _{GM}	0,93	0,89	0,79	12,78	24,00	0,19	-2,5	26,91	0,87
Q_{90}	Peq	0,92	0,90	0,74	10,61	15,79	0,20	-2,1	19,92	0,85
	Peq ₇₅₀	0,93	0,88	0,75	10,23	17,27	0,19	-2,1	21,76	0,81
	BHeq	0,92	0,87	0,72	11,45	17,94	0,21	-1,9	22,71	0,80
	BHeq _M	0,93	0,88	0,75	10,13	17,08	0,19	-2,1	21,54	0,82
	BHeq _G	0,93	0,89	0,77	9,47	16,56	0,18	-2,1	20,71	0,83
	BHeq _{GM}	0,93	0,88	0,75	10,27	17,38	0,19	-2,1	21,87	0,81
$Q_{7,10}$	Peq	0,90	0,86	0,67	10,98	15,33	0,37	-1,4	20,40	0,77
	Peq ₇₅₀	0,91	0,84	0,65	11,72	16,90	0,40	-1,4	21,93	0,73
	BHeq	0,89	0,84	0,62	12,74	17,78	0,43	-1,4	22,81	0,71
	BHeq _M	0,91	0,84	0,62	12,74	17,78	0,40	-1,4	21,76	0,73
	BHeq _G	0,92	0,85	0,67	10,93	16,22	0,20	-1,4	21,11	0,75
	BHeq _{GM}	0,91	0,83	0,65	11,66	17,03	0,22	-1,4	22,02	0,73

Com relação às medidas de erro, observa-se baixos valores, sendo menores que a metade do desvio padrão dos dados observados (79,76, 54,36 e 45,24 para a Q_{mld} , Q_{90} e $Q_{7,10}$ respectivamente) e, portanto, podem ser considerados baixos e apropriados para avaliação dos modelos, conforme afirmado por Singh et al. (2004). O PBIAS apresentou valores negativos e de baixa magnitude, indicando que os modelos de regionalização subestimam as vazões em aproximadamente 2,5% para a Q_{mld} , 2% para a Q_{90} e 1,4% para a $Q_{7,10}$. Os índices da validação cruzada mostraram desempenho estatístico satisfatório dos modelos, com altos valores de R^2 e baixos RMSE.

Os índices estatísticos mostram o quão bom foi o desempenho das equações, entretanto observa-se que eles não convergem na identificação de qual variável independente permitiu melhor ajuste estatístico das vazões regionalizadas. Além disso, mesmo que houvesse convergência dos índices, não se poderia afirmar que um modelo é melhor que o outro, uma

vez que apresentam valores muito próximos entre si, evidenciando que são modelos concordantes, isto é, não apresentam diferenças estatísticas.

A análise estatística é uma etapa importante para a avaliação da regionalização, entretanto, não é suficiente para garantir o bom desempenho dos modelos nas estimativas das vazões ao longo da hidrografia (LI et al., 2009), sendo importante a utilização de procedimentos que permitam a compreensão do comportamento físico das vazões regionalizadas. Nesse sentido, são apresentadas na sequência as análises física e de risco dos modelos de regionalização obtidos.

1.3.1.4.2 Análise física

A análise física das vazões média e mínimas regionalizadas foi feita a partir da distribuição espacial do CE e das q_{\min} , respectivamente, verificando-se o padrão do comportamento desses em relação ao comportamento do balanço hídrico, assim como, aos valores observados nas estações fluviométricas. Na Figura 13 está apresentada a variação do CE ao longo da hidrografia, obtidas com as variáveis independentes Peq , Peq_{750} , $BHeq$, $BHeq_M$, $BHeq_G$ e $BHeq_{GM}$ na bacia do Grande.

Observa-se na bacia do Grande (Figura 13A) que a utilização da Peq como variável explicativa na regionalização da Q_{mld} , produziu valores estimados de CE que variaram de 0,13 a 0,52, isto é, apresentou uma amplitude de variação maior que a observada nas estações fluviométricas (0,10 e 0,23). Com isso, evidencia-se que o menor valor observado nas estações não foi estimado e o maior valor observado foi superado em mais de duas vezes. Além disso, observa-se regiões onde o comportamento do CE espacializado não é condizente com o padrão balanço hídrico, apresentando altos valores na região leste da bacia onde ocorrem as menores BH.

Apesar da precipitação ser a principal entrada de água na bacia e de sua consideração em estudos hidrológicos melhorar o desempenho estatístico e a representatividade desses (PRUSKI et al., 2013), a evapotranspiração é também uma componente chave na circulação de água na bacia (MIRALLES et al., 2010) e sua incorporação nos estudos hidrológicos pode conferir maior robustez aos resultados. Afinal grande quantidade de água circula na atmosfera e, portanto, essa água não contribui para a formação das vazões nos cursos d'água (PATRA, 2001).

O valor de 750 mm foi incorporado por Pruski et al. (2013) como fator de abstração da precipitação com intuito de melhorar a representação dos processos físicos envolvidos na formação de vazões. Na bacia do Grande, o uso da Peq_{750} (Figura 13B) como variável explicativa resultou em uma amplitude de variação dos valores de CE regionalizados menor, variando de 0,02 a 0,34, a qual se aproxima mais dos valores observados nas estações fluviométricas. Além disso, observa-se que os valores estimados com o uso dessa variável explicativa decrescem em direção a foz da bacia, refletindo o comportamento do balanço hídrico ao longo da hidrografia. Esse comportamento também foi evidenciado nos trabalhos desenvolvidos por Pruski et al. (2013), Pruski et al. (2012), Gonçalves et al. (2018), Serrano et al. (2019) e Serrano et al. (2020), para as bacias dos rios Paracatu, Pará, Grande, Paranaíba e Doce, respectivamente, e por IGAM; GPRH/UFV (2012) para diversas bacias hidrográficas do estado de Minas Gerais.

A utilização da evapotranspiração real do produto MOD16 como fator de abstração da precipitação (BHeq) (Figura 13C) resultou em uma amplitude de variação (0,00 a 0,29) menor que as obtidas pela Peq e Peq_{750} , sendo o valor máximo estimado mais próximo do máximo observado. Observa-se também um aumento dos trechos na classe de CE de menor magnitude. O padrão das estimativas do CE ao longo da hidrografia com o uso dessa variável reflete a tendência de comportamento do balanço hídrico, decrescendo de oeste para leste.

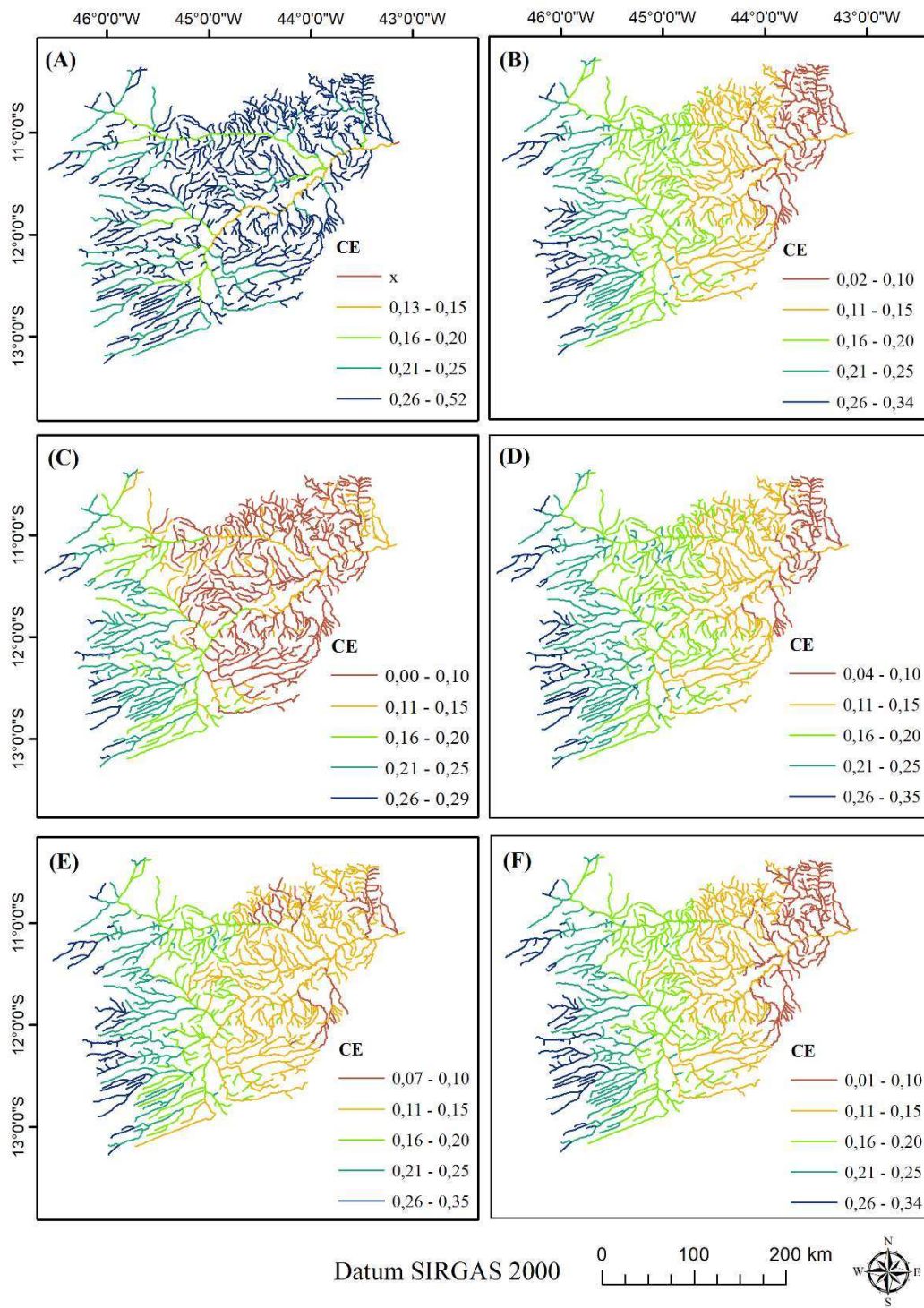


Figura 13 – Representação da variação do CE ao longo da hidrografia, utilizando Peq (A), Peq_{750} (B), $BHeq$ (C), $BHeq_M$ (D), $BHeq_G$ (E) e $BHeq_{GM}$ (F).

Com o uso da ETR proveniente do produto GLEAM ($BHeq_G$) (Figura 13E) a amplitude dos valores estimados é menor que as obtidas pelas outras variáveis (0,07 a 0,34), apresentando valor mínimo estimado mais próximo do mínimo observado. Além disso, o comportamento do CE ao longo da hidrografia é condizente com o mapa do balanço hídrico. Em comparação à $BHeq$, não se evidencia uma concentração dos CE na classe de valores inferiores, sendo o resultado mais próximo ao obtido pela Peq_{750} . A vantagem da utilização dessa variável, em relação à Peq_{750} , é que ela considera a variação das principais variáveis relacionadas ao processo de formação das vazões em cada trecho da hidrografia, sendo, portanto, mais representativa que a adoção de um valor de abstração fixo.

Quando se considera a $BHeq_M$ (Figura 13D), isto é a utilização de um fator de abstração correspondente ao valor de ETR média da bacia proveniente do produto MOD16, os valores de CE regionalizados, assim como o padrão do comportamento ao longo da bacia se aproxima bastante do observado quando da utilização da Peq_{750} . Esse resultado ocorre em função do valor de ETR média da bacia obtido por esse produto ser de 724 mm, valor muito próximo ao de 750. Todavia a utilização do valor de ETR média tem como vantagem: possuir maior significado físico, uma vez que representa uma das principais variáveis relacionadas à circulação de água na bacia, além de sair do empirismo relacionado ao valor de 750 mm, estimado para a bacia do Paracatu no estudo desenvolvido por Novaes (2005).

Por fim, o uso da $BHeq_{GM}$ (Figura 13F), que considera o valor de ETR média da bacia proveniente do produto GLEAM, também apresentou resultados bastante representativos, aproximando muito daquele obtido pela Peq_{750} . Esse resultado era esperado uma vez que o valor da ETR estimada pelo produto GLEAM é de 762 mm, mais próximo dos 750 que o obtido pelo produto MOD16.

Rego (2013) avaliou a incorporação da ETR média da bacia como fator de abstração da precipitação em um estudo de regionalização de vazões médias e mínimas para as bacias do Paracatu e Pará. Para as vazões mínimas o autor observou melhorias no desempenho da regionalização, sendo essa melhoria acentuada em relação à Peq e menos expressiva em relação à Peq_{750} . Já para as vazões médias o autor observou que a incorporação da ETR média da bacia, apesar de ter permitido melhor desempenho estatístico, produziu vazões excessivamente seguras, sendo as estimativas com a Peq_{750} consideradas mais representativas. A melhoria nos índices estatísticos obtida para Q_{mld} é esperada, nesse caso, uma vez que existe uma equivalência entre essa vazão e a Peq_{ETR} obtida pelo balanço hídrico das estações.

Nas Figuras 14 e 15 estão apresentadas as variações, ao longo da hidrografia, das vazões mínimas q_{90} e $q_{7,10}$, respectivamente, obtidas com as variáveis independentes analisadas no presente estudo.

A utilização da Peq como variável explicativa (Figuras 14A e 15A) conduz a uma amplitude de variação de 2,99 a 13,07 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a q_{90} e 2,51 a 9,64 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a $q_{7,10}$, enquanto a amplitude observada nas estações foi de 2,35 a 5,85 $L.s^{-1}.km^{-2}$ e 1,93 e 4,64 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a q_{90} e para a $q_{7,10}$, respectivamente. Esse resultado mostra que a amplitude de valores regionalizados supera a dos valores observados principalmente em relação aos valores de maior magnitude, sendo possível observar que as duas últimas classes correspondem à extrapolação do valor máximo observado nas estações e estão presentes em grande parte da bacia.

Com o uso da Peq_{750} (Figuras 14B e 15B) observa-se um aumento da amplitude dos valores, principalmente relacionado à estimativa de vazões específicas de menor magnitude tanto para a q_{90} como para a $q_{7,10}$. As classes de valores que superam o máximo observado ainda ocorrem e corresponde às duas últimas classes, contudo estão restritas ao extremo oeste da bacia as quais correspondem a regiões de cabeceira onde ocorrem as maiores precipitações. Além disso, há uma melhor distribuição das classes de valores, observando-se um padrão de variação que segue a tendência do balanço hídrico com maiores valores de vazão específica onde o BH é maior e menores onde é menor.

Quando se altera a variável explicativa para a $BHeq$ (Figuras 14C e 15C), observa-se uma diminuição do valor máximo observado para as duas vazões e manutenção do padrão de variação semelhante ao do balanço hídrico. Contudo para a q_{90} observa-se que há um aumento dos trechos na classe de menores valores ($q_{90} < 1 L.s^{-1}.km^{-2}$), que antes se limitava a região extremo leste e agora vai desde a porção central da bacia até a foz.

Com a alteração da variável explicativa para a $BHeq_G$, observa-se que para a regionalização da q_{90} (Figuras 14D) há uma diminuição da amplitude dos valores estimados, aproximando-se mais dos valores observados nas estações fluviométricas. Para a $q_{7,10}$ (Figura 15D), observou-se uma diminuição dos trechos na classe de menores valores e um aumento pouco expressivo do valor máximo estimado e dos trechos inseridos na classe de maiores valores. O padrão de variação dos valores resultantes da utilização da $BHeq_G$ é representativo do mapa de balanço hídrico e é similar ao obtido pela variável Peq_{750} .

A utilização da $BHeq_M$ (Figuras 14E e 15E) e $BHeq_{GM}$ (Figuras 14F e 15F) gera resultados que se aproximam bastante do obtido com o uso da Peq_{750} , com uma pequena

variação na amplitude dos valores estimados. Conforme mencionado anteriormente, esse resultado está relacionado ao fato de $BHeq_M$ e $BHeq_{GM}$ considerarem um valor de abstração fixo correspondente a ETR média da bacia estimada com o uso do produto MOD16 (724 mm) e do produto GLEAM (762 mm), respectivamente, os quais se aproximam muito do valor de 750 mm considerado na Peq_{750} .

Observa-se que o desempenho físico das variáveis na regionalização das vazões mínimas foi similar ao observado para o CE. A Peq apresentou pior desempenho com um comportamento não condizente com o padrão de variação do balanço hídrico e menor amplitude dos valores estimados. Por outro lado, as variáveis Peq_{750} , $BHeq$, $BHeq_M$, $BHeq_G$, $BHeq_{GM}$ apresentaram uma melhor distribuição espacial dos valores regionalizados, com uma tendência de maiores valores estimados em regiões de maior BH e menores valores estimados nas regiões de menor BH, além de se aproximarem mais dos valores observados nas estações fluviométricas. Esse resultado mostra que, embora a precipitação seja a principal entrada de água na bacia, a incorporação de outras variáveis explicativas que representem o processo de circulação de água na bacia é de grande importância.

Com o uso da ETR proveniente do produto GLEAM ($BHeq_G$) (Figura 13E) a amplitude dos valores estimados é menor que as obtidas pelas outras variáveis (0,07 a 0,34), apresentando valor mínimo estimado mais próximo do mínimo observado. Além disso, o comportamento do CE ao longo da hidrografia é condizente com o mapa do balanço hídrico. Em comparação à $BHeq$, não se evidencia uma concentração dos CE na classe de valores inferiores, sendo o resultado mais próximo ao obtido pela Peq_{750} . A vantagem da utilização dessa variável, em relação à Peq_{750} , é que ela considera a variação das principais variáveis relacionadas ao processo de formação das vazões em cada trecho da hidrografia, sendo, portanto, mais representativa que a adoção de um valor de abstração fixo.

Quando se considera a $BHeq_M$ (Figura 13D), isto é a utilização de um fator de abstração correspondente ao valor de ETR média da bacia proveniente do produto MOD16, os valores de CE regionalizados, assim como o padrão do comportamento ao longo da bacia se aproxima bastante do observado quando da utilização da Peq_{750} . Esse resultado ocorre em função do valor de ETR média da bacia obtido por esse produto ser de 724 mm, valor muito próximo ao de 750. Todavia a utilização do valor de ETR média tem como vantagem: possuir maior significado físico, uma vez que representa uma das principais variáveis relacionadas à circulação de água na bacia, além de sair do empirismo relacionado ao valor de 750 mm, estimado para a bacia do Paracatu no estudo desenvolvido por Novaes (2005).

Por fim, o uso da $BHeq_{GM}$ (Figura 13F), que considera o valor de ETR média da bacia proveniente do produto GLEAM, também apresentou resultados bastante representativos, aproximando muito daquele obtido pela Peq_{750} . Esse resultado era esperado uma vez que o valor da ETR estimada pelo produto GLEAM é de 762 mm, mais próximo dos 750 que o obtido pelo produto MOD16.

Rego (2013) avaliou a incorporação da ETR média da bacia como fator de abstração da precipitação em um estudo de regionalização de vazões médias e mínimas para as bacias do Paracatu e Pará. Para as vazões mínimas o autor observou melhorias no desempenho da regionalização, sendo essa melhoria acentuada em relação à Peq e menos expressiva em relação à Peq_{750} . Já para as vazões médias o autor observou que a incorporação da ETR média da bacia, apesar de ter permitido melhor desempenho estatístico, produziu vazões excessivamente seguras, sendo as estimativas com a Peq_{750} consideradas mais representativas. A melhoria nos índices estatísticos obtida para Q_{mld} é esperada, nesse caso, uma vez que existe uma equivalência entre essa vazão e a Peq_{ETR} obtida pelo balanço hídrico das estações.

Nas Figuras 14 e 15 estão apresentadas as variações, ao longo da hidrografia, das vazões mínimas q_{90} e $q_{7,10}$, respectivamente, obtidas com as variáveis independentes analisadas no presente estudo.

A utilização da Peq como variável explicativa (Figuras 14A e 15A) conduz a uma amplitude de variação de 2,99 a 13,07 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a q_{90} e 2,51 a 9,64 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a $q_{7,10}$, enquanto a amplitude observada nas estações foi de 2,35 a 5,85 $L.s^{-1}.km^{-2}$ e 1,93 e 4,64 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a q_{90} e para a $q_{7,10}$, respectivamente. Esse resultado mostra que a amplitude de valores regionalizados supera a dos valores observados principalmente em relação aos valores de maior magnitude, sendo possível observar que as duas últimas classes correspondem à extrapolação do valor máximo observado nas estações e estão presentes em grande parte da bacia.

Com o uso da Peq_{750} (Figuras 14B e 15B) observa-se um aumento da amplitude dos valores, principalmente relacionado à estimativa de vazões específicas de menor magnitude tanto para a q_{90} como para a $q_{7,10}$. As classes de valores que superam o máximo observado ainda ocorrem e corresponde às duas últimas classes, contudo estão restritas ao extremo oeste da bacia as quais correspondem a regiões de cabeceira onde ocorrem as maiores precipitações. Além disso, há uma melhor distribuição das classes de valores, observando-se um padrão de variação que segue a tendência do balanço hídrico com maiores valores de vazão específica onde o BH é maior e menores onde é menor.

Quando se altera a variável explicativa para a BHeq (Figuras 14C e 15C), observa-se uma diminuição do valor máximo observado para as duas vazões e manutenção do padrão de variação semelhante ao do balanço hídrico. Contudo para a q_{90} observa-se que há um aumento dos trechos na classe de menores valores ($q_{90} < 1 \text{ L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$), que antes se limitava a região extremo leste e agora vai desde a porção central da bacia até a foz.

Com a alteração da variável explicativa para a BHeq_G (Figuras 14E e 15E), observa-se que para a q_{90} tem-se uma diminuição da amplitude dos valores estimados, aproximando-se mais dos valores observados nas estações fluviométricas. Para a q_{90} (Figura 14E) o padrão de variação dos valores é similar ao obtido pela variável Peq₇₅₀, contudo a classe de menores valores ocorre de maneira mais aleatória, não estando concentrada na região extremo leste da bacia. Já a variável Peq₇₅₀ considera um valor de abstração fixo, portanto, é mais sensível à variação da precipitação e apresenta menores valores nas regiões onde chove menos. Para a $q_{7,10}$ (Figura 15E) observou-se uma diminuição dos trechos na classe de menores valores e um aumento pouco expressivo do valor máximo estimado e dos trechos inseridos na classe de maiores valores.

A utilização da BHeq_M (Figuras 14D e 15D) e BHeq_{GM} (Figuras 14F e 15F) gera resultados que se aproximam bastante do obtido com o uso da Peq₇₅₀, com uma pequena variação na amplitude dos valores estimados. Conforme mencionado anteriormente, esse resultado está relacionado ao fato de a BHeq_M e da BHeq_{GM} considerarem um valor de abstração fixo correspondente a ETR média da bacia estimada com o uso do produto MOD16 (724 mm) e do produto GLEAM (762 mm), respectivamente, os quais se aproximam muito do valor de 750 mm considerado na Peq₇₅₀.

Observa-se que o desempenho físico das variáveis na regionalização das vazões mínimas foi similar ao observado para o CE. A Peq apresentou pior desempenho com um comportamento não condizente com o padrão de variação do balanço hídrico e menor amplitude dos valores estimados. Por outro lado, as variáveis Peq₇₅₀, BHeq, BHeq_M, BHeq_G, BHeq_{GM} apresentaram uma melhor distribuição espacial dos valores regionalizados, com uma tendência de maiores valores estimados em regiões de maior BH e menores valores estimados nas regiões de menor BH, além de se aproximarem mais dos valores observados nas estações fluviométricas. Esse resultado mostra que, embora a precipitação seja a principal entrada de água na bacia, a incorporação de outras variáveis explicativas que representem o processo de circulação de água na bacia é de grande importância.

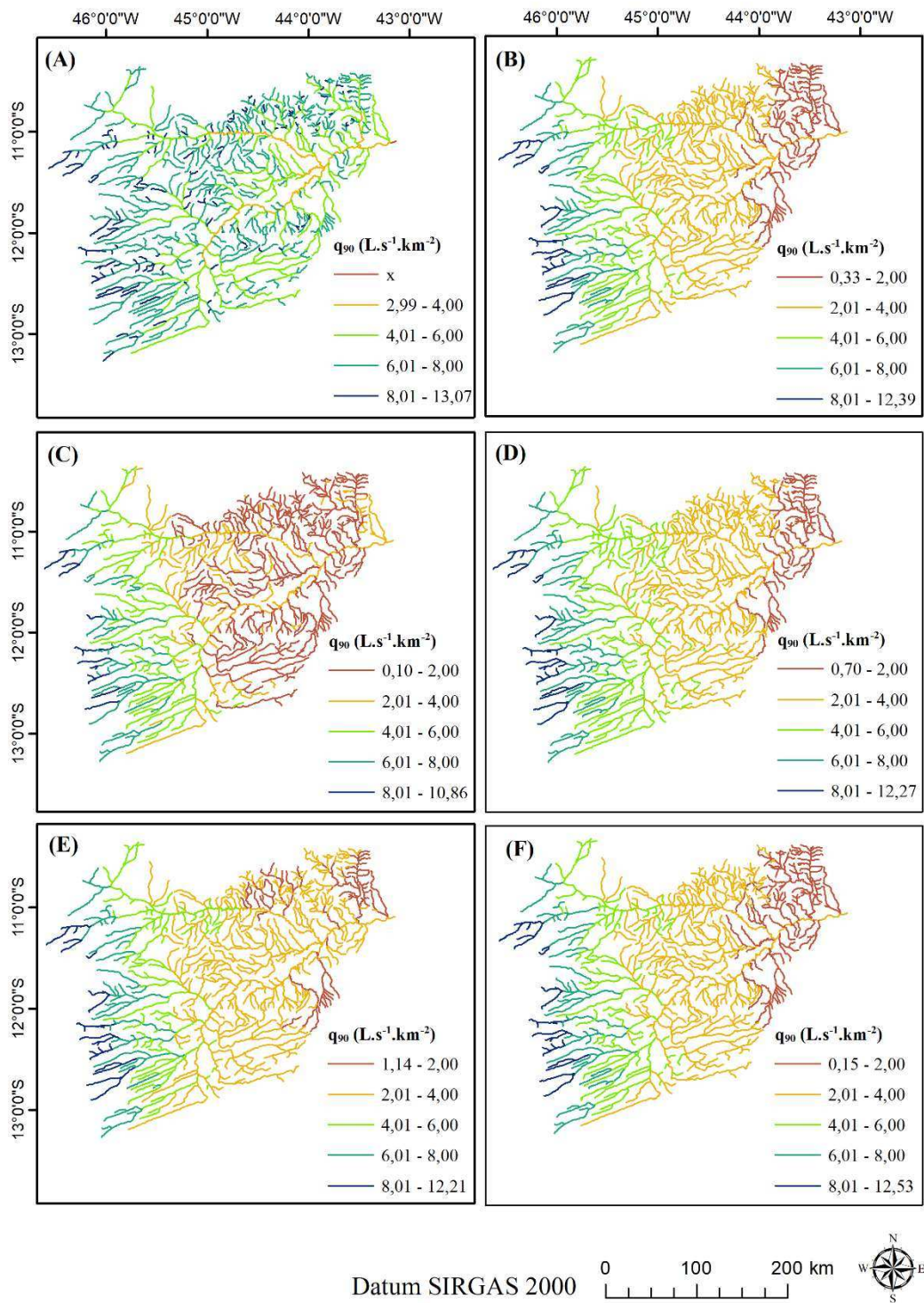


Figura 14 – Representação da variação do q_{90} ao longo da hidrografia, utilizando Peq (A), Peq₇₅₀ (B), BHeq (C), BHeq_M (D), BHeq_G (E) e BHeq_{GM} (F).

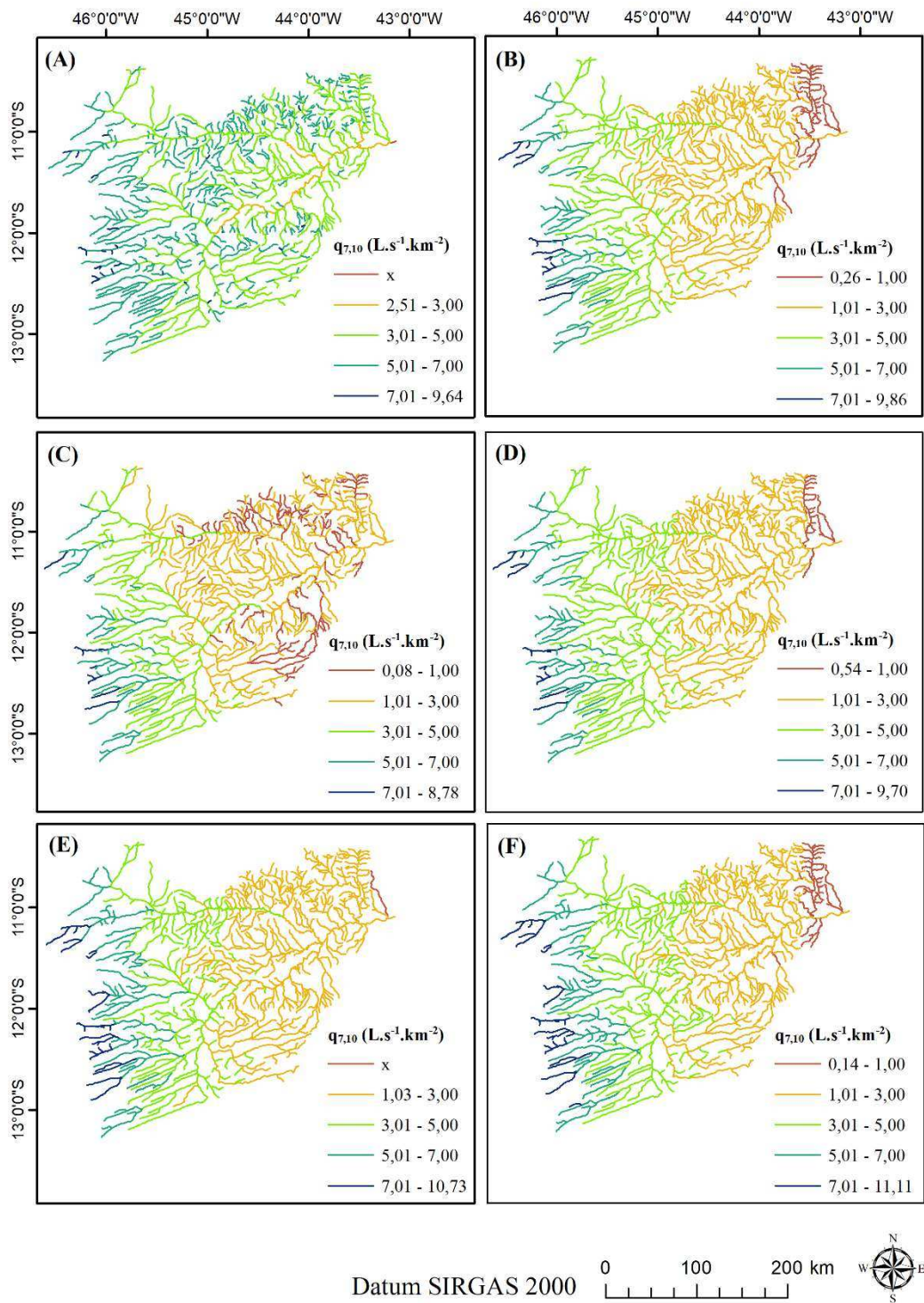


Figura 15 – Representação da variação do $q_{7,10}$ ao longo da hidrografia, utilizando Peq (A), Peq_{750} (B), $BHeq$ (C), $BHeq_M$ (D), $BHeq_G$ (E) e $BHeq_{GM}$ (F).

1.3.1.4.3 Análise de risco

Nas Figura 16, 17 e 18 estão apresentados os mapas, para o CE, a q_{90} e a $q_{7,10}$ nos quais os trechos da hidrografia foram classificados de acordo com a análise de risco. Observa-se que a classificação do CE e das vazões mínimas ao longo da hidrografia com o uso da Peq (Figura 16A) não conduziu a valores na classe de subestimativas, uma vez que não ocorreram valores estimados menores que os observados nas estações fluviométricas. A maior proporção de trechos nessa classificação ocorreu com a utilização da variável explicativa BHeq_{MOD} (53,70%, 58,9% e 59,7% para o CE, q_{90} e $q_{7,10}$, respectivamente) (Figura 16C, 17C e 18C), sendo que a ocorrência desses trechos se estendeu da porção central até a foz da bacia. A ocorrência de valores menores que o menor observado nas estações fluviométricas é provável e está a favor da segurança hídrica. Contudo, uma grande proporção de trechos nessa classe tende a promover uma expressiva redução na estimativa da disponibilidade hídrica, comprometendo a representatividade do modelo de regionalização e dificultando o aproveitamento dos recursos hídricos. As variáveis Peq₇₅₀, BHeq_{MOD}, BHeq_G e BHeq_{M-G} conduziram a menos trechos com potencial subestimativa. Esses trechos estão localizados principalmente na região leste, próxima a foz da bacia, refletindo um comportamento que pode ser justificado pelo menor balanço hídrico dessa região.

A variável explicativa Peq sobressaiu como variável com maior concentração de trechos na classe de superestimativas (78,12% para o CE, 63,0% para a q_{90} e 60,4% para $q_{7,10}$). Os trechos nessa classe ocorreram ao longo de toda a bacia, estando concentrados principalmente em rios de pequena área de drenagem. A superestimativa das vazões pode favorecer a ocorrência de conflitos pelo uso da água devido à concessão de maior quantidade de água do que realmente existem nos rios, devendo-se evitar, portanto, a utilização de modelos de regionalização de vazões com essa característica para fins de planejamento e gestão de recursos hídricos. Por outro lado, a variável com menor concentração de trechos na classe de potencial superestimativa foi a BHeq_{MOD} (6,74 %, 11,9% e 13,0% para o CE, q_{90} e $q_{7,10}$ respectivamente). As variáveis BHeq_{M-MOD}, BHeq_G e BHeq_{M-G} apresentaram uma proporção similar de trechos nessa classe. A ocorrência dos trechos nas classes de superestimativa para essas variáveis estiveram associadas, principalmente, a regiões de cabeceira, situadas na porção oeste da bacia, onde o balanço hídrico é maior.

A variável que conduziu a maior proporção dos trechos na classe de valores confiáveis para o CE foi a BHeq_G (77,7%), seguida das variáveis BHeq_{M-MOD} (75,58%), Peq₇₅₀ (70,28%)

e da $BHeq_{M-G}$ (67,40%) que tiveram valores muito próximos entre si. Para as vazões mínimas, a variável que conduziu a uma maior proporção de trechos nesse intervalo foi a $BHeq_{M-MOD}$, tanto para a q_{90} (63,2%) como para a $q_{7,10}$ (60,9%). As variáveis Peq_{750} , $BHeq_G$, $BHeq_{M-G}$ também apresentaram grande proporção de trechos na classe de valores confiáveis, sendo obtidas, para a q_{90} , porcentagens de 57,5%, 53,2% e 54,0%, respectivamente, e, para a $q_{7,10}$, de 53,7%, 59,2% e 55,4%, respectivamente. Por outro lado, as variáveis Peq e a $BHeq_{MOD}$ conduziram a estimativas confiáveis em uma menor proporção (21,88% para o CE, 37,02 para a q_{90} e 39,56% para a $q_{7,10}$) e (39,56% para o CE, 29,17% para a q_{90} e 27,29% para a $q_{7,10}$), respectivamente.

Conforme pode-se observar e foi mencionado na análise física, o uso das variáveis Peq_{750} , $BHeq_{M-MOD}$, $BHeq_G$, $BHeq_{M-G}$ conduziu a desempenhos similares e satisfatórios para a regionalização de vazões na bacia do rio Grande. Contudo, a consideração da ETR_T possui maior representatividade física, uma vez que considera a variação das condições edafoclimáticas ao longo da bacia. Nesse sentido, o uso da $BHeq_G$ é mais recomendado para a regionalização das vazões nesta bacia.

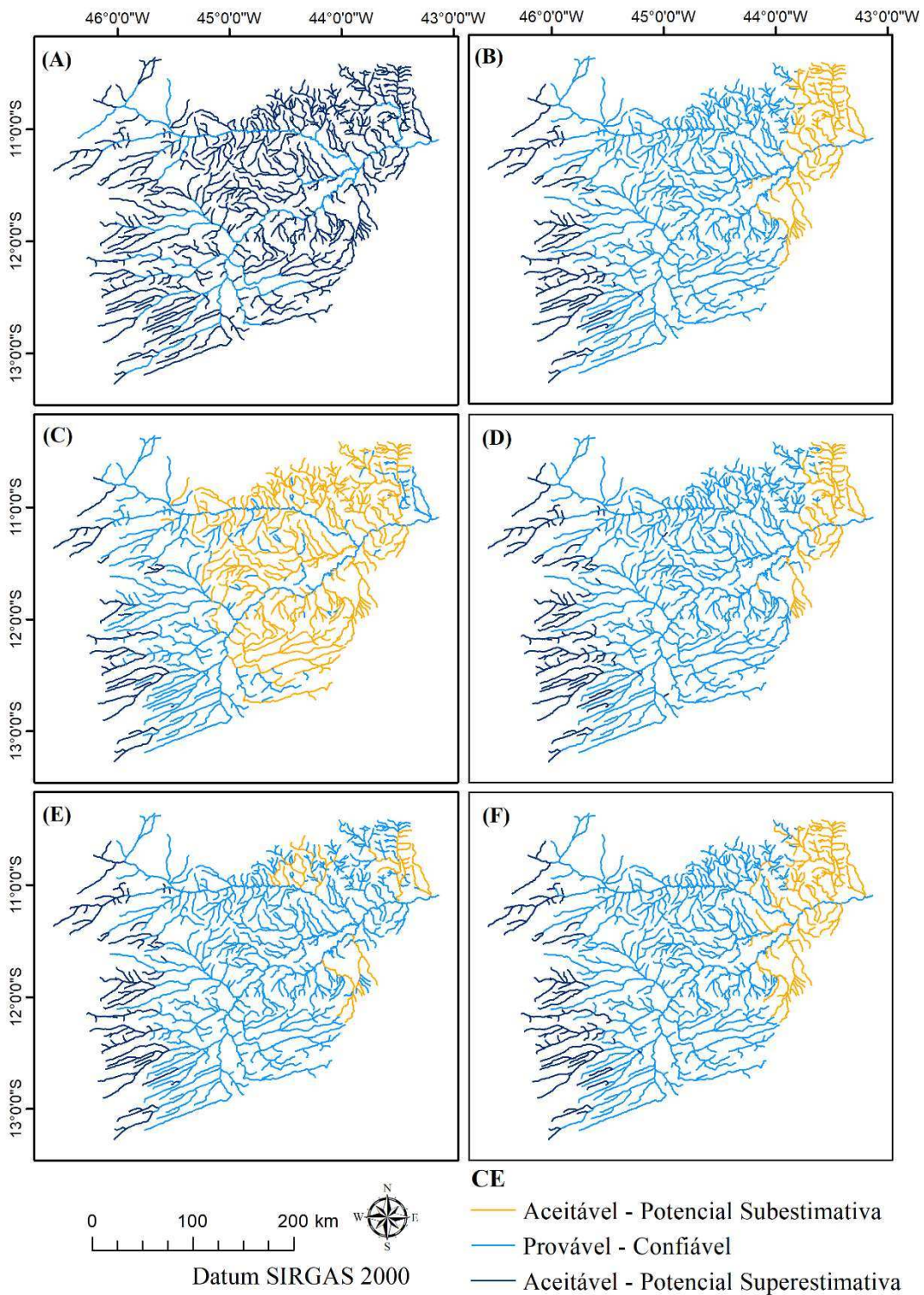


Figura 16 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Grande conforme o risco associado aos valores de CE, considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq_{750} (B), $BHeq$ (C) e $BHeq_M$ (D), $BHeq_G$ (E) e $BHeq_{GM}$ (F).

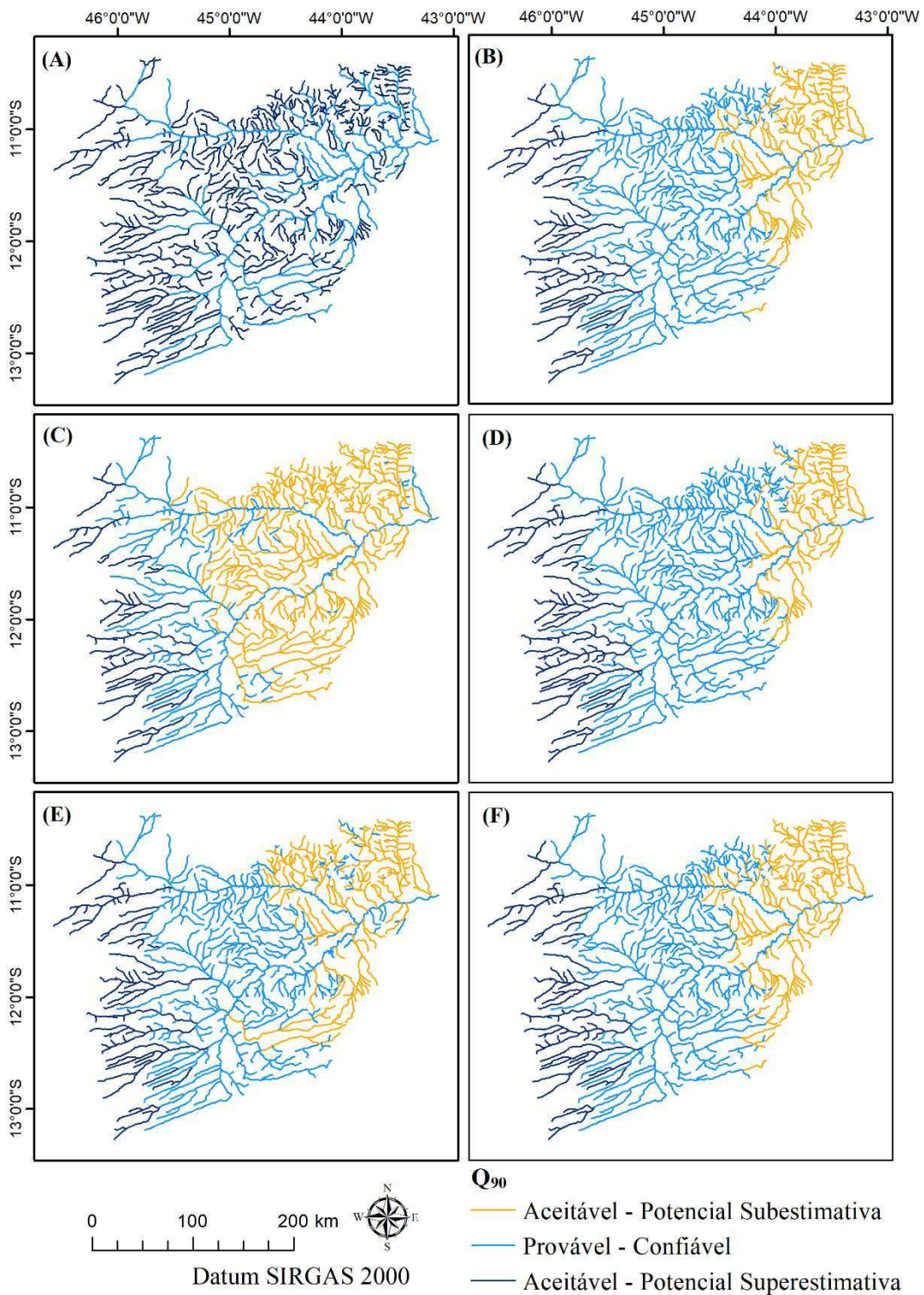


Figura 17 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Grande conforme o risco associado aos valores de q_{90} , considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq_{750} (B), $BHeq$ (C) e $BHeq_M$ (D), $BHeq_G$ (E) e $BHeq_{GM}$ (F).

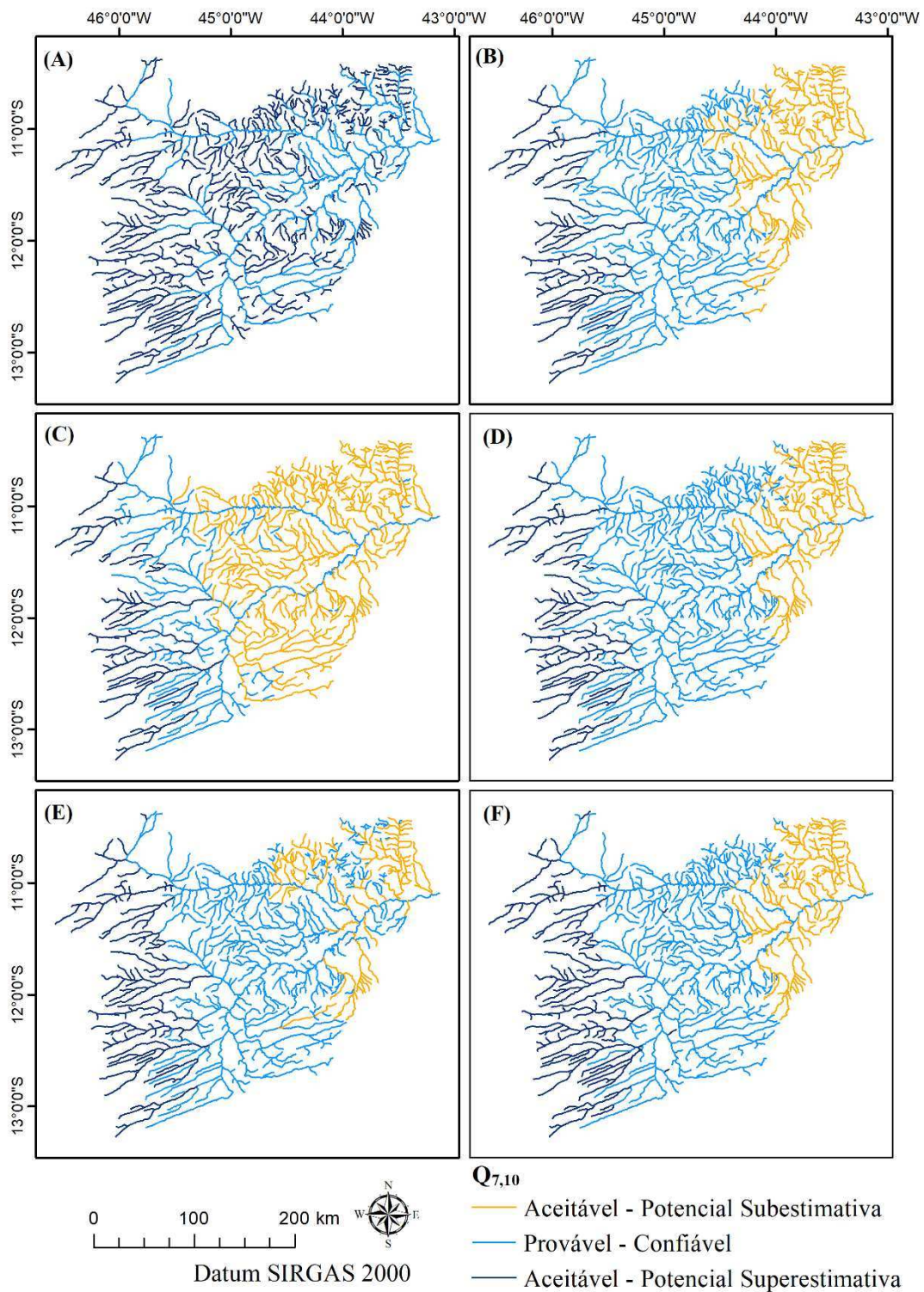


Figura 18 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Grande conforme o risco associado aos valores de $q_{7,10}$, considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq_{750} (B), $BHeq$ (C) e $BHeq_M$ (D), $BHeq_G$ (E) e $BHeq_{GM}$ (F).

1.3.2 Bacia do Paracatu

1.3.2.1 Variáveis independentes

1.3.2.1.1 Precipitação

Na Figura 19 está apresentado o mapa de precipitação anual média da bacia do rio Paracatu, obtida pelo método da krigagem.

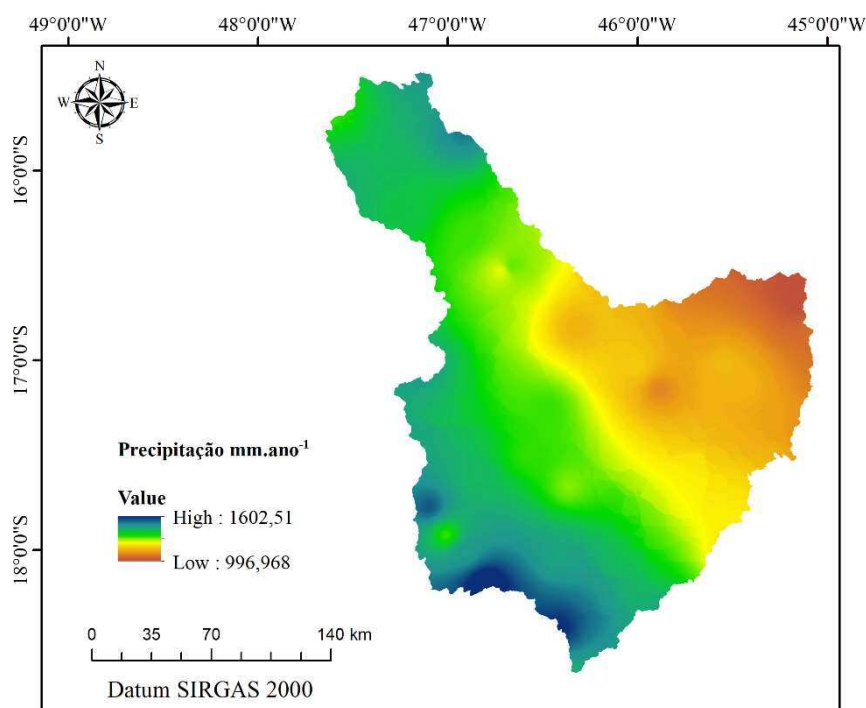


Figura 19 – Precipitação anual média na bacia do rio Paracatu.

Na bacia do Paracatu, observa-se uma amplitude de variação da precipitação em torno de 400 mm, bem menor à observada na bacia do Grande. As maiores precipitações ocorrem nas regiões sul e noroeste, sendo a região nordeste a mais seca.

1.3.2.1.2 Evapotranspiração Real

Na Figura 20 estão apresentados os mapas de ETR obtidos pelos produtos MOD16, GLEAM e pela interpolação da ETR estimada pelo balanço hídrico das estações para a bacia do Paracatu.

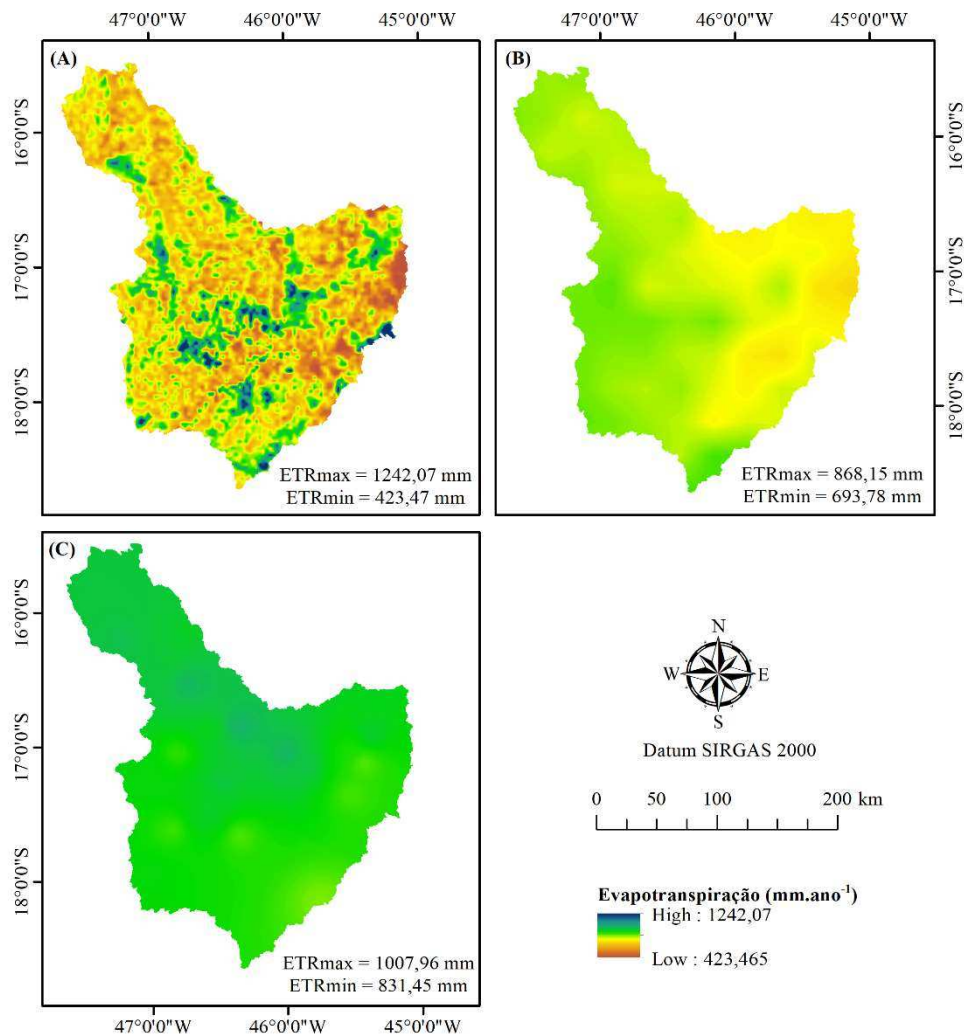


Figura 20 – ETR obtida pelos produtos MOD16 (A), GLEAM (B) e ETR_{est} (C) para a bacia do rio Paracatu.

Observa-se no mapa da ETR_{MOD16} (Figura 20A) que o padrão de variação dos valores de ETR não é muito bem definido, possuindo uma predominância de valores com magnitudes inferiores a 700 mm. Entretanto, assim como observado na bacia do Grande, a ETR_{MOD16} apresentou uma grande amplitude dos valores, variando 423 a 1242 mm. Os valores de ETR_M obtidos por esse produto foram de 676 mm para a bacia como um todo e de 668, 698, 662 mm para a RHH 1, RHH 2 e RHH 3, respectivamente.

O mapa de ETR_{GLEAM} (Figura 20B) mostra uma tendência de maiores valores nas porções ao sul e ao noroeste da bacia e menores valores ao leste, isto é, apresenta o mesmo padrão de variação da precipitação. A amplitude de variação dos valores de evapotranspiração real desse produto é menor em relação ao do MOD16, variando de 693 a 868 mm. Os valores de ETR_M

do GLEAM foram superiores ao do MOD16, sendo de 788 mm para a bacia como um todo e de 798, 816, 756 mm, para a RHH 1, RHH 2 e RHH 3, respectivamente.

A ETR_{est} (Figura 20C) também não apresenta uma tendência muito bem definida, com amplitude de variação de 831 a 1000 mm, estando os valores concentrados na magnitude próxima a 900 mm. Dentre os produtos de ETR utilizados, o GLEAM foi o que se aproximou mais da amplitude observada nas estações. Para uma análise mais quantitativa, na Tabela 6 são apresentados os índices estatísticos utilizados para a comparação dos produtos de ETR.

Tabela 6 – Índices estatísticos calculados para comparação dos produtos de ETR na bacia do Paracatu.

Índices	MOD16	GLEAM
RMSE	261,82	137,29
ME	-253,19	-127,16
PBIAS	-27,10	-13,60

Os índices estatísticos evidenciam que, dentre os produtos de ETR analisados, o MOD16 apresentou maiores erros em relação à ETR_{est} , sendo esses erros ainda maiores que os obtidos para a bacia do Grande. Os valores negativos do ME e do PBIAS mostram que, em relação à ETR_{est} , os produtos apresentam uma tendência de subestimativa.

1.3.2.1.3 Balanço hídrico

Na Figura 21 estão apresentados, para a bacia do Paracatu, os mapas de balanço hídrico considerando os fatores de abstração 750 mm, ERT_{MOD16} e ETR_{GLEAM} e o obtido pelas estações fluviométricas.

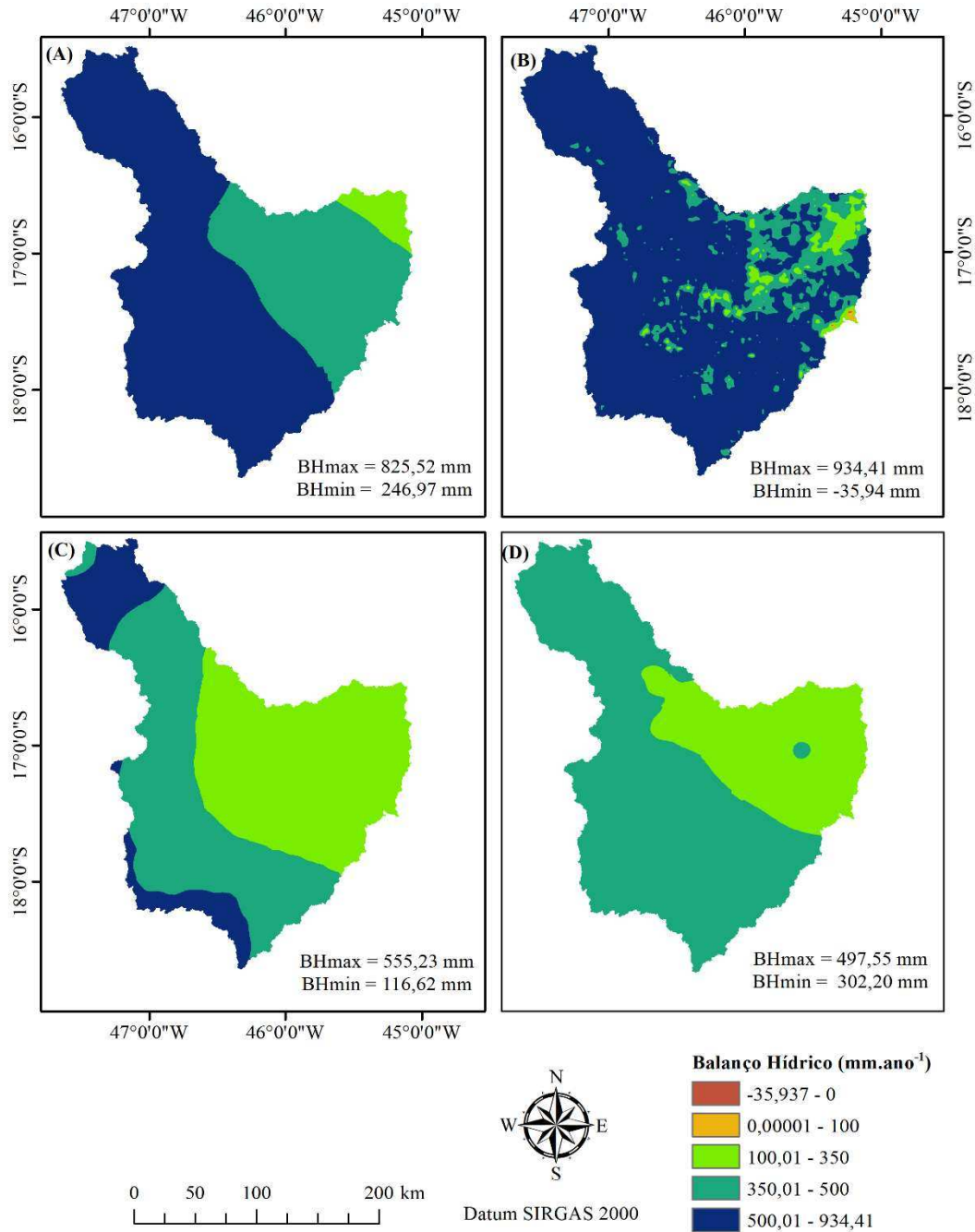


Figura 21 – Balanço hídrico obtido usando os produtos 750(A), MOD16 (B) e GLEAM (C) e ETR_{est} (D) para a bacia do Paracatu.

O BH₇₅₀ (Figura 21A) apresentou valores que variam de 246,97 a 825,52 mm, com maiores magnitudes na região oeste e sul da bacia, onde predominam lâminas maiores que 500 mm, e menores valores na região leste. Observa-se que diferentemente da bacia do Grande, não foram observados valores negativos, uma vez que o fator igual a 750 mm foi desenvolvido para a bacia do Paracatu (NOVAES, 2005).

No BH_{MOD16} (Figura 21B) foi observada uma grande variação dos valores com amplitude que vai de -35,94 a 934,41 mm, havendo uma concentração dos valores com magnitude superiores a 500 mm, os quais estão presentes ao longo de toda a bacia. Também foram observados valores negativos nesse balanço hídrico, contudo em menor proporção à observada na bacia do Grande.

Em relação ao BH_{GLEAM} (Figura 21C), nota-se uma menor amplitude dos valores (116,62 a 555,23 mm) em relação ao MOD16 e um padrão de variação caracterizado por maiores valores nas porções noroeste e sul e menores valores na porção nordeste da bacia. Observa-se um aumento dos valores na classe de 100 a 350 mm em relação aos BH_{750} e BH_{MOD16} , que antes estavam restritos à região próxima à foz da bacia.

No BH_{est} (Figura 21D) os valores variam de 302,20 a 497,55 mm, apresentando maiores valores na região oeste e sul da bacia e menores na região nordeste. Dentre os BH observados esse foi o que apresentou menor amplitude de variação, assim como ocorreu na bacia do Grande. Apesar do maior número de estações utilizadas na bacia do Paracatu, a quantidade e a localização dessas estações ainda não são suficientes para captar a variação do BH que ocorre na bacia.

1.3.2.2 Variáveis dependentes

Na Tabela 7 estão apresentados os códigos, as áreas de drenagem, as vazões observadas, os coeficientes de escoamento e as vazões específicas nas estações fluviométricas da bacia do rio Paracatu. Observa-se que para essa bacia o menor valor de área de drenagem foi de 219,05 km², contemplando, portanto, menores áreas de drenagem em relação à bacia do Grande. As vazões específicas variaram de 1,15 e 5,61 L s⁻¹ km⁻² para q_{90} e de 0,45 a 2,99 L s⁻¹ km⁻² para a $q_{7,10}$. O coeficiente de escoamento variou entre 0,20 e 0,36.

Tabela 7 – Código, área, Q_{mld} , Q_{90} , $Q_{7,10}$, CE, q_{90} e $q_{7,10}$ para as estações fluviométricas consideradas para o estudo da bacia do Paracatu

Região	Estação	A	Q_{mld}	Q_{90}	$Q_{7,10}$	CE	q_{90}	$q_{7,10}$
		(km ²)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	adm	(L.s ⁻¹ .km ⁻²)	(L.s ⁻¹ .km ⁻²)
1	42435000	1.583,98	17,14	2,12	0,71	0,26	1,34	0,45
1	42440000	551,87	8,33	1,92	1,02	0,35	3,48	1,85
1	42460000	3.958,66	61,11	22,22	11,83	0,35	5,61	2,99
1	42490000	5.336,29	73,73	21,24	10,68	0,31	3,98	2,00
1	42540000	5.902,46	84,31	21,91	9,87	0,33	3,71	1,67
1	42545002	418,50	4,98	1,34	0,92	0,28	3,21	2,20
1	42545500	676,64	7,98	1,44	1,00	0,28	2,13	1,47
1	42546000	551,72	7,28	1,52	1,02	0,32	2,75	1,85
1	42600000	9.398,48	108,50	29,18	16,39	0,27	3,11	1,74
2	42250000	465,58	7,68	2,12	1,05	0,36	4,55	2,24
2	42251000	1.828,64	28,65	6,68	2,73	0,34	3,65	1,49
2	42255000	244,25	3,22	0,71	0,30	0,30	2,89	1,23
2	42257000	2.000,98	26,62	6,17	3,15	0,30	3,08	1,57
2	42290000	7.749,34	101,58	21,63	11,21	0,29	2,79	1,45
2	42365000	3.340,27	45,99	10,39	4,71	0,31	3,11	1,41
2	42395000	12.840,79	165,81	37,85	20,89	0,29	2,95	1,63
3	42690001	30.122,25	326,66	69,24	30,77	0,25	2,30	1,02
3	42750000	33.481,29	339,24	79,80	43,49	0,24	2,38	1,30
3	42840000	219,05	3,25	1,13	0,64	0,34	5,18	2,90
3	42850000	4.386,84	49,68	7,31	2,63	0,28	1,67	0,60
3	42860000	5.695,45	59,18	9,78	4,83	0,27	1,72	0,85
3	42930000	40.909,57	465,08	102,77	53,36	0,27	2,51	1,30
3	42980000	41.329,69	451,19	108,52	61,16	0,26	2,63	1,48
3	42645000	900,01	7,14	1,04	0,73	0,20	1,15	0,81

Na Figura 22 é apresentado o gráfico boxplot obtido para a bacia do Paracatu, no qual pode-se observar que as estações 42460000 (ID = 3) e 42840000 (ID = 19) foram caracterizadas como *outliers* superiores para a q_{90} e $q_{7,10}$ e a estação 42435000 (ID = 1) como *outlier* inferior para a $q_{7,10}$, nenhuma estação foi identificada com comportamento discrepante para o CE.

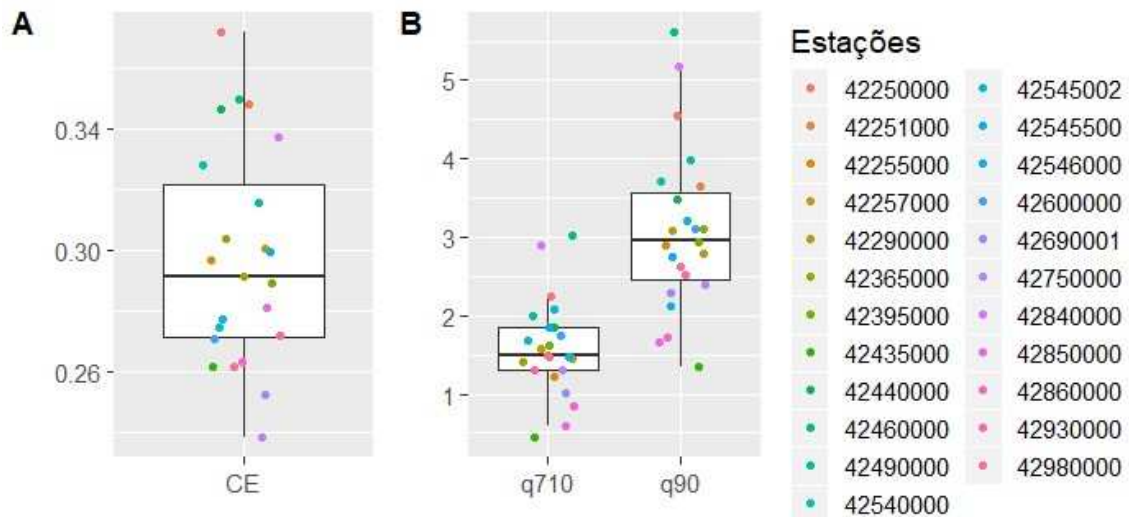


Figura 22 – Boxplot do CE (A) e das vazões específicas $q_{7,10}$ e q_{90} (B) para a bacia do Paracatu.

As altas produções específicas nas estações 42460000 e 42840000 podem ser explicadas pelo fato dessas estações estarem localizadas em regiões de maiores precipitações totais anuais (Figuras 3 e 19) e com predomínio de sistemas aquíferos granulares, os quais apresentam boas condições de circulação das águas (IGAM, 2006). Por outro lado, a estação 42435000 está localizada na bacia do ribeirão Entre Ribeiros a qual é caracterizada por uma região de intensa exploração agrícola e pela existência de conflitos pelo uso da água (RODRIGUEZ, 2004), que pode ser responsável por sua menor produção específica.

Devido ao fato das possíveis causas das altas produções específicas das estações 42460000 e 42840000 serem fatores naturais da bacia, optou-se pela manutenção delas no estudo de regionalização de vazões. Já a estação 42435000 foi excluída das análises posteriores, uma vez que o comportamento anômalo em relação às outras estações ocorre provavelmente devido às excessivas retiradas de água e, portanto, não representa às condições do comportamento natural da estação.

1.3.2.3 Equações de regionalização

Nas Tabelas 8, 9 e 10 são apresentadas as equações de regionalização obtidas para as regiões RHH 1, RHH 2 e RHH 3 da bacia do Paracatu respectivamente.

Tabela 8 – Equações de regionalização de vazões para a RHH 1 da bacia do Paracatu

Variáveis	Q_{mld}	Q_{90}	$Q_{7,10}$
Peq	$Q_{mld}=0,3084Peq^{1,001}$	$Q_{90}=0,0515Peq^{1,0973}$	$Q_{7,10}=0,0417Peq^{1,0158}$
Peq ₇₅₀	$Q_{mld}=0,7292Peq_{750}^{0,9869}$	$Q_{90}=0,1318Peq_{750}^{1,0829}$	$Q_{7,10}=0,0998Peq_{750}^{1,0016}$
BHeq	$Q_{mld}=0,6249BHeq^{0,9912}$	$Q_{90}=0,1112BHeq^{1,0878}$	$Q_{7,10}=0,0848BHeq^{1,0076}$
BHeq _M	$Q_{mld}=0,6359BHeq_M^{0,9900}$	$Q_{90}=0,1135BHeq_M^{1,0861}$	$Q_{7,10}=0,0868BHeq_M^{1,0047}$
BHeq _G	$Q_{mld}=0,8036BHeq_G^{0,9842}$	$Q_{90}=0,1467BHeq_G^{1,0797}$	$Q_{7,10}=0,1135BHeq_G^{0,9919}$
BHeq _{GM}	$Q_{mld}=0,7983BHeq_{GM}^{0,9847}$	$Q_{90}=0,1455BHeq_{GM}^{1,0806}$	$Q_{7,10}=0,1130BHeq_{GM}^{0,9916}$

Tabela 9 – Equações de regionalização de vazões para a RHH 2 da bacia do Paracatu

Variáveis	Q_{mld}	Q_{90}	$Q_{7,10}$
Peq	$Q_{mld}=0,3541Peq^{0,9718}$	$Q_{90}=0,0915Peq^{0,9477}$	$Q_{7,10}=0,0353Peq^{0,9947}$
Peq ₇₅₀	$Q_{mld}=0,7327Peq_{750}^{0,9736}$	$Q_{90}=0,1855Peq_{750}^{0,9501}$	$Q_{7,10}=0,0742Peq_{750}^{0,9971}$
BHeq	$Q_{mld}=0,7090BHeq^{0,9643}$	$Q_{90}=0,1790BHeq^{0,9420}$	$Q_{7,10}=0,0714BHeq^{0,9889}$
BHeq _M	$Q_{mld}=0,6816BHeq_M^{0,9734}$	$Q_{90}=0,1729BHeq_M^{0,9498}$	$Q_{7,10}=0,0689BHeq_M^{0,9968}$
BHeq _G	$Q_{mld}=0,8638BHeq_G^{0,9620}$	$Q_{90}=0,2176BHeq_G^{0,9390}$	$Q_{7,10}=0,0879BHeq_G^{0,9851}$
BHeq _{GM}	$Q_{mld}=0,8107BHeq_{GM}^{0,9739}$	$Q_{90}=0,2046BHeq_{GM}^{0,9506}$	$Q_{7,10}=0,0823BHeq_{GM}^{0,9976}$

Tabela 10 – Equações de regionalização de vazões para a RHH 3 da bacia do Paracatu

Variáveis	Q_{mld}	Q_{90}	$Q_{7,10}$
Peq	$Q_{mld}=0,3777Peq^{0,9456}$	$Q_{90}=0,1087Peq^{0,8985}$	$Q_{7,10}=0,0527Peq^{0,9011}$
Peq ₇₅₀	$Q_{mld}=0,8502Peq_{750}^{0,9442}$	$Q_{90}=0,2313Peq_{750}^{0,9002}$	$Q_{7,10}=0,1119Peq_{750}^{0,9037}$
BHeq	$Q_{mld}=0,8019BHeq^{0,9342}$	$Q_{90}=0,2226BHeq^{0,8874}$	$Q_{7,10}=0,1084BHeq^{0,8896}$
BHeq _M	$Q_{mld}=0,7390BHeq_M^{0,9447}$	$Q_{90}=0,2031BHeq_M^{0,9000}$	$Q_{7,10}=0,0983BHeq_M^{0,9032}$
BHeq _G	$Q_{mld}=0,7322BHeq_G^{0,9782}$	$Q_{90}=0,1552BHeq_G^{0,9723}$	$Q_{7,10}=0,0907BHeq_G^{0,9460}$
BHeq _{GM}	$Q_{mld}=0,6903BHeq_{GM}^{0,9781}$	$Q_{90}=0,1453BHeq_{GM}^{0,9738}$	$Q_{7,10}=0,0846BHeq_{GM}^{0,9487}$

1.3.2.4 Análise de desempenho

1.3.2.4.1 Análise estatística

Na Tabela 11 são apresentados os índices estatísticos referentes às equações de regionalização para as vazões Q_{mld} , Q_{90} e $Q_{7,10}$ da bacia do rio Paracatu.

Tabela 11 – Indicadores estatísticos dos modelos de regionalização de vazões da bacia do rio Paracatu

		R_{ajus}^2	NSE	mNSE	MAE	RMSE	Se	PBIAS	RMSE _{CV}	R ² _{CV}	
RHH1	Q _{mld}	Peq	0,994	0,974	0,900	3,734	6,292	0,106	1,20	8,40	0,96
		Peq ₇₅₀	0,996	0,985	0,923	2,869	4,799	0,087	1,00	6,37	0,98
		BHeq	0,992	0,984	0,917	3,087	4,945	0,121	0,90	6,71	0,98
		BHeq _M	0,995	0,983	0,919	3,022	5,111	0,091	1,00	6,80	0,98
		BHeq _G	0,993	0,985	0,920	2,987	4,897	0,107	1,00	6,55	0,98
		BHeq _{GM}	0,996	0,987	0,926	2,769	4,573	0,084	0,90	6,07	0,98
	Q ₉₀	Peq	0,971	0,886	0,799	2,220	3,800	0,247	1,10	3,86	0,88
		Peq ₇₅₀	0,976	0,910	0,821	1,980	3,385	0,226	0,90	3,46	0,91
		BHeq	0,972	0,908	0,816	2,033	3,419	0,243	0,80	3,51	0,91
		BHeq _M	0,975	0,905	0,816	2,031	3,471	0,230	1,00	3,54	0,91
		BHeq _G	0,973	0,909	0,818	2,013	3,409	0,238	1,00	3,50	0,91
		BHeq _{GM}	0,977	0,913	0,824	1,943	3,323	0,222	0,90	3,40	0,92
	Q _{7,10}	Peq	0,975	0,915	0,816	1,033	1,720	0,214	0,10	1,92	0,89
		Peq ₇₅₀	0,978	0,927	0,828	0,966	1,594	0,202	-0,20	1,89	0,90
		BHeq	0,978	0,926	0,828	0,969	1,605	0,203	-0,10	1,88	0,90
		BHeq _M	0,977	0,925	0,826	0,980	1,619	0,204	-0,10	1,89	0,90
		BHeq _G	0,976	0,928	0,832	0,942	1,587	0,206	-0,10	1,89	0,90
		BHeq _{GM}	0,977	0,930	0,834	0,932	1,560	0,203	-0,50	1,89	0,90
RHH2	Q _{mld}	Peq	0,997	0,965	0,999	1,586	2,027	0,076	1,20	2,26	1,00
		Peq ₇₅₀	0,998	0,970	0,999	1,357	1,799	0,055	1,00	2,77	1,00
		BHeq	0,999	0,972	0,999	1,289	1,851	0,041	0,50	4,10	1,00
		BHeq _M	0,998	0,969	0,999	1,390	1,827	0,058	1,00	2,69	1,00
		BHeq _G	0,999	0,976	0,999	1,077	1,363	0,048	1,00	2,33	1,00
		BHeq _{GM}	0,999	0,971	0,999	1,305	1,759	0,051	1,00	2,90	1,00
	Q ₉₀	Peq	0,988	0,947	0,996	0,531	0,769	0,149	1,10	1,96	0,98
		Peq ₇₅₀	0,991	0,948	0,996	0,522	0,801	0,129	1,10	2,09	0,98
		BHeq	0,994	0,937	0,995	0,626	0,902	0,105	0,70	2,34	0,97
		BHeq _M	0,991	0,948	0,996	1,390	0,796	0,132	1,10	2,08	0,98
		BHeq _G	0,992	0,945	0,996	0,548	0,764	0,122	1,10	2,00	0,98
		BHeq _{GM}	0,991	0,948	0,996	0,520	0,809	0,125	1,10	2,12	0,98
	Q _{7,10}	Peq	0,982	0,920	0,992	0,446	0,617	0,188	-0,80	1,21	0,98
		Peq ₇₅₀	0,985	0,915	0,991	0,475	0,656	0,172	-0,90	1,30	0,97
		BHeq	0,989	0,913	0,989	0,483	0,731	0,148	-1,30	1,45	0,97
		BHeq _M	0,985	0,916	0,991	0,470	0,650	0,174	-0,90	1,29	0,97
		BHeq _G	0,985	0,908	0,989	0,514	0,702	0,172	-0,90	1,26	0,98
		BHeq _{GM}	0,986	0,914	0,990	0,481	0,665	0,169	-0,90	1,32	0,97

Tabela 11 – Indicadores estatísticos dos modelos de regionalização de vazões da bacia do rio Paracatu (Continuação)

		R_{ajus}^2	NSE	mNSE	MAE	RMSE	Se	PBIAS	RMSE _{CV}	R ² _{CV}
Q _{mld}	Peq	0,999	0,994	0,946	9,951	15,076	0,057	-1,20	20,20	0,99
	Peq ₇₅₀	0,999	0,991	0,928	13,221	17,588	0,063	0,00	27,16	0,98
	BHeq	0,999	0,992	0,937	11,602	17,103	0,062	-1,30	23,19	0,99
	BHeq _M	0,999	0,992	0,932	12,449	16,800	0,058	-0,30	25,37	0,98
	BHeq _G	0,995	0,993	0,938	11,284	16,299	0,143	-0,50	21,27	0,99
	BHeq _{GM}	0,993	0,991	0,927	13,287	17,660	0,161	-0,20	25,41	0,98
RHH3 Q ₉₀	Peq	0,967	0,958	0,856	6,135	9,108	0,317	-9,30	3,63	0,99
	Peq ₇₅₀	0,975	0,963	0,876	5,274	8,453	0,277	-8,00	5,19	0,99
	BHeq	0,967	0,955	0,857	6,077	9,342	0,321	-9,40	4,44	0,99
	BHeq _M	0,973	0,962	0,875	5,348	8,586	0,286	-8,30	4,82	0,99
	BHeq _G	0,954	0,958	0,863	5,844	9,011	0,421	-8,70	4,04	0,99
	BHeq _{GM}	0,956	0,964	0,876	5,268	8,443	0,411	-8,30	4,90	0,99
Q _{7,10}	Peq	0,931	0,898	0,769	5,189	7,638	0,470	-14,10	5,42	0,95
	Peq ₇₅₀	0,941	0,905	0,777	5,018	7,369	0,435	-12,60	5,94	0,94
	BHeq	0,929	0,893	0,763	5,341	7,824	0,476	-14,10	5,81	0,94
	BHeq _M	0,939	0,904	0,775	5,058	7,426	0,443	-13,00	5,83	0,94
	BHeq _G	0,942	0,898	0,768	5,211	7,649	0,464	-13,00	5,34	0,95
	BHeq _{GM}	0,947	0,905	0,777	5,015	7,364	0,443	-12,60	5,58	0,95

Conforme observa-se na Tabela 11, os modelos de regionalização apresentaram diferenças pouco expressivas no desempenho estatístico. Com relação ao coeficiente de determinação, todos os valores de R_{ajus}^2 obtidos foram maiores que 0,9, indicando uma ótima qualidade do ajuste das equações. Os valores de NSE e NSEm foram maiores que 0,75 para todos os modelos de regionalização de vazões, sendo, portanto, classificados como muito bons (MORIASI et al. 2007). Com relação às medidas de erro, observa-se baixos valores, sendo menores que a metade do desvio padrão dos dados observados (40,414; 11,80 e 6,20 na RHH 1, 59,09; 13,24 e 7,37 na RHH 2, 202,07; 47,27 e 25,57 na RHH 3 para a Q_{mld}, Q₉₀ e Q_{7,10} respectivamente), podendo ser considerados baixos e apropriados para avaliação dos modelos (SINGH; KNAPP; DEMISSIE, 2004).

O PBIAS apresentou valores positivos nas RHH1 e RHH2 para as vazões Q_{mld} e Q₉₀, indicando tendência de superestimativa, e negativo para a Q_{7,10} na RHH2 e todas as vazões da RHH3, indicando tendência de subestimativa. Os índices da validação cruzada mostraram desempenho estatístico satisfatório dos modelos, com valores altos de R² e baixos de RMSE.

Pela análise estatística todos os modelos de regionalização avaliados para a bacia do Paracatu apresentam desempenho satisfatório, contudo, assim como observado para a bacia do

Grande, os índices estatísticos não convergem na identificação de qual variável independente permitiu melhor ajuste estatístico. Além disso, as diferenças pouco expressivas entre os índices não possibilitam afirmar a superioridade estatística de um modelo em relação ao outro, sendo, portanto, necessárias análises complementares para a identificação do melhor modelo para regionalização de vazões na bacia do Paracatu.

1.3.2.4.2 Análise física

Na Figura 23 está apresentada a variação do CE ao longo da hidrografia, com as variáveis independentes Peq , Peq_{750} , $BHeq$ e $BHeq_M$, $BHeq_G$ e $BHeq_{GM}$ na bacia do Paracatu.

Observa-se na Figura 23A que a utilização da variável Peq na bacia do Paracatu conduziu a valores de CE regionalizados que variam de 0,25 a 0,41, não estimando o valor mínimo (0,20) observado nas estações fluviométricas. Também se observa que a variação dos valores está diretamente relacionada à definição das regiões hidrologicamente homogêneas, havendo uma pequena variabilidade dos valores em uma mesma região e uma maior variação entre as regiões.

Quando se considera a Peq_{750} (Figura 23B) observa-se um aumento na amplitude dos valores estimados (0,20 a 0,45), aproximando-se a classe de valores mínimos dos valores observados nas estações. Além disso, tem-se uma maior distinção das classes e uma maior concordância da ocorrência dos valores de CE regionalizados com o balanço hídrico, com maiores valores na porção noroeste e sul da bacia e menores na porção nordeste. No trabalho realizado por Pruski et al. (2013) para uma sub-bacia do Paracatu, os autores observaram que o uso de variáveis mais representativas como Peq_{750} apresentou uma melhoria na regionalização de vazões em relação ao uso das variáveis área de drenagem e Peq .

A utilização da $BHeq$ (Figura 23C) conduziu a maior amplitude de valores de CE (0,06 a 0,51), havendo uma tendência de maiores valores na região sul e menores na região norte, contudo, observa-se em toda a bacia a frequente ocorrência de mudanças abruptas entre classes de valores de CE. Esse comportamento está diretamente relacionado ao padrão de variação dos valores de evapotranspiração real do produto MOD16 utilizado para obtenção dessa variável, onde se observa grandes alterações dos valores de ETR em áreas geograficamente próximas. Nos resultados apresentados para a bacia do Grande, esse comportamento não foi evidenciado, uma vez que a escala utilizada para a espacialização das vazões regionalizadas foi a do milionésimo, já no Paracatu utilizou-se a de 1:100.000, aumentando a sensibilidade à discretização dos valores de ETR apresentada pelo produto MOD16.

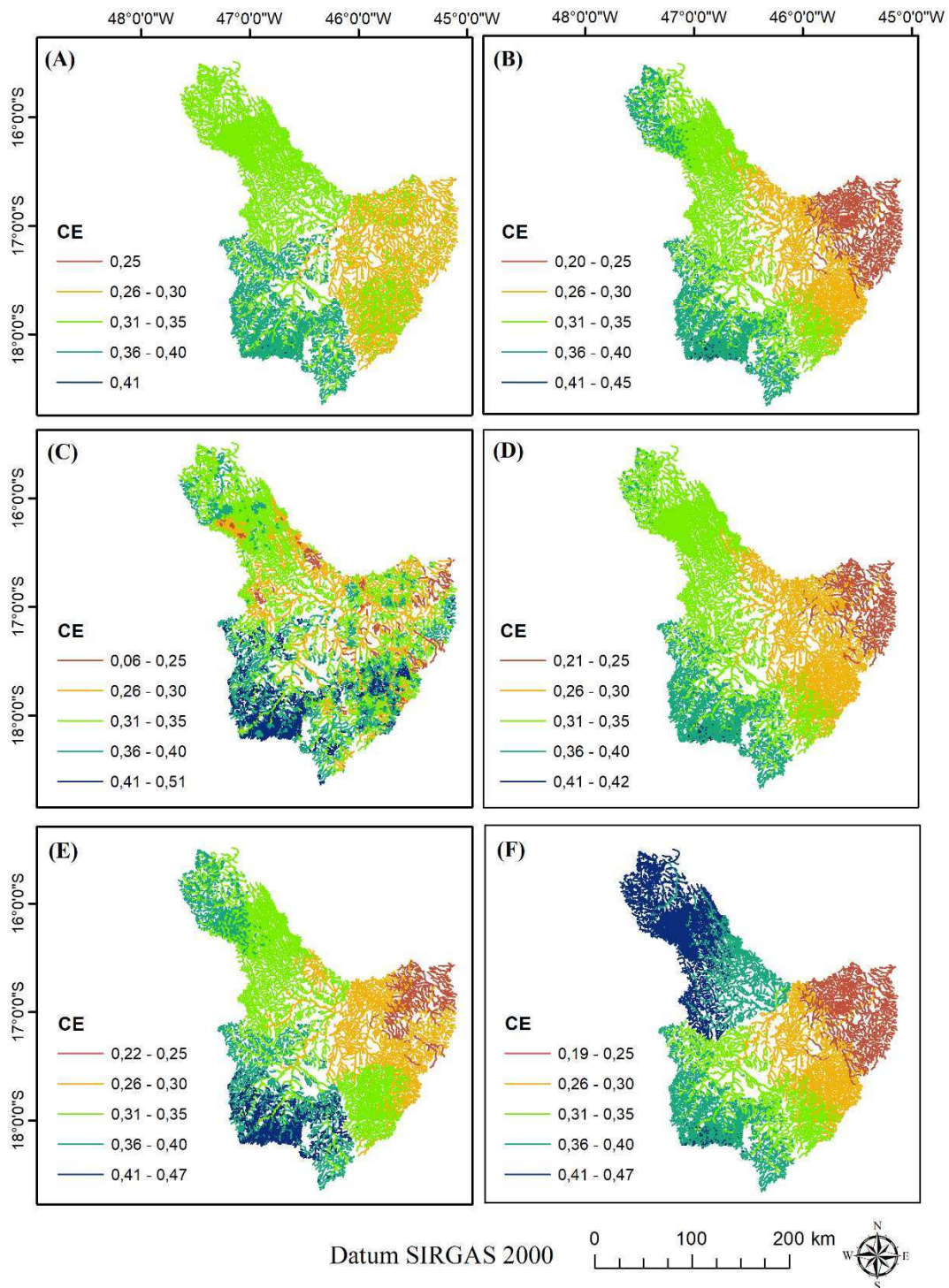


Figura 23 – Representação da variação do CE ao longo da hidrografia da bacia do Paracatu, utilizando Peq (A), Peq₇₅₀ (B), BHeq (C) e BHeq_M (D), BHeq_G (E) e BHeq_{GM} (F).

O uso da variável BHeq_G (Figura 23E) resultou em um padrão de variação mais uniforme com alterações graduais dos valores de CE, a amplitude de variação foi menor e mais próxima

aos valores observados quando comparada à obtida pela utilização da ETR do produto MOD16. Além disso, os valores obtidos com essa variável seguem um padrão de variação que se assemelha à tendência do balanço hídrico.

Assim como observado para a bacias do Grande, as variáveis que consideram o valor de ETR médio da bacia proveniente do produto MOD16 ($BHeq_M$) (Figura 23D) e do GLEAM ($BHeq_{GM}$) (Figura 23F) apresentaram resultados similares ao obtido pela Peq_{750} , o que se deve principalmente ao fato dessas variáveis considerarem um fator de abstração constante ao longo das regiões homogêneas. A maior diferenciação dos resultados na bacia do Paracatu ocorreu para a RHH 1 com a utilização da $BHeq_{GM}$, onde foram obtidos valores de CE de maiores magnitudes ($> 0,36$), os quais superam os observados nessa região (0,26 a 0,35). Em relação a amplitude dos valores estimados, houve uma pequena variação entre os resultados dessas variáveis, a qual está diretamente relacionada às diferenças entre os valores de ETR_M utilizados.

No trabalho desenvolvido por Rego (2013), para a RHH 3 da bacia do Paracatu, o autor constatou que o uso da ETR média da bacia como fator de abstração da precipitação resultou em valores de Q_{mld} regionalizadas excessivamente seguras. A diferença desse resultado para o obtido no presente trabalho está relacionada ao valor de ETR utilizado. No trabalho desenvolvido por Rego foi utilizado um valor médio estimado com base no balanço hídrico das estações sendo igual a 930 mm, valor este superior aos estimados pelo produto MOD16 (662 mm) e GLEAM (756 mm), os quais se aproximaram mais do valor de 750 mm.

Nas Figuras 24 e 25 estão apresentadas as variações das vazões mínimas q_{90} e $q_{7,10}$, respectivamente, ao longo da hidrografia, obtidas com as diferentes variáveis independentes analisadas no presente estudo.

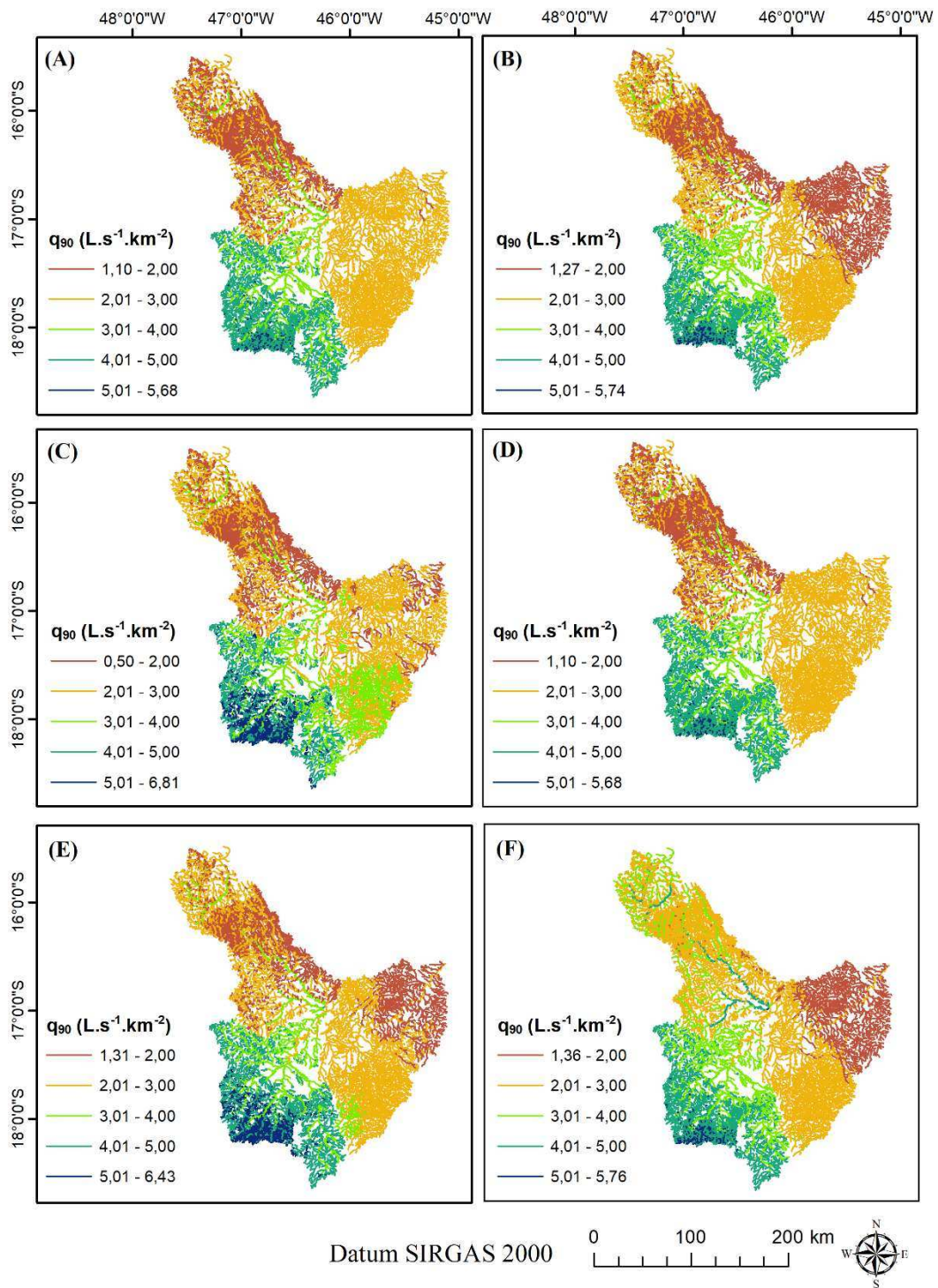


Figura 24 – Representação da variação do q_{90} ao longo da hidrografia, utilizando Peq (A), Peq_{750} (B), $BHeq$ (C) e $BHeq_M$ (D), $BHeq_G$ (E) e $BHeq_{GM}$ (F).

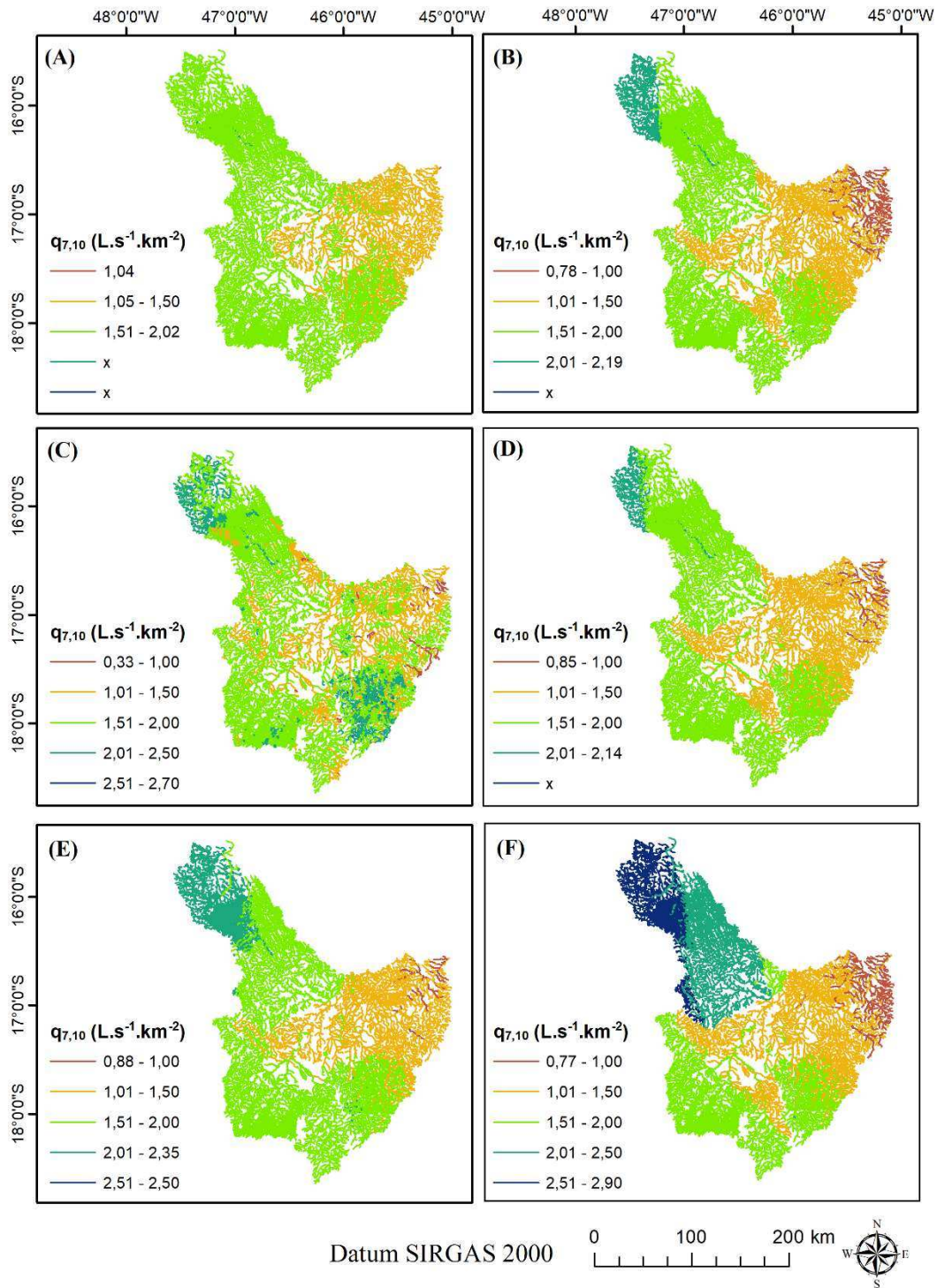


Figura 25 – Representação da variação do $q_{7,10}$ ao longo da hidrografia, utilizando Peq (A), Peq_{750} (B), $BHeq$ (C), $BHeq_M$ (D), $BHeq_G$ (E) e $BHeq_{GM}$ (F).

Com relação à regionalização da Q_{90} , a maior amplitude de variação dos valores estimados é observada para o modelo que utiliza a $BHeq$ como variável explicativa (Figura 24C), com valores entre 0,50 a 6,81 L.s⁻¹.km⁻², sendo maior que a amplitude observada nas

estações fluviométricas (1,67 a 5,61 $L.s^{-1}.km^{-2}$). As variáveis Peq , Peq_{750} , $BHeq_M$, $BHeq_G$ e $BHeq_{GM}$ apresentaram amplitudes de variação muito parecidas, sendo maior que a dos dados observados, porém com diferenças menos expressivas quando comparadas à $BHeq$.

Observa-se que as variáveis explicativas analisadas apresentaram desempenho físico similar para a regionalização da Q_{90} na bacia do Paracatu, com uma tendência de maiores produções específicas na RHH 2 e menores na RHH 3. O padrão de variação obtido pela $BHeq_{GM}$ para a RHH 1 se destacou pelas maiores produções específicas estimadas. Sabendo-se que a variação da q_{90} nas estações fluviométricas da RHH 1 é de 2,2 a 5,6 $L.s^{-1}.km^{-2}$ (Tabela 7), pode-se constatar que o resultado apresentado pela $BHeq_{GM}$ é mais representativo, uma vez que se aproxima mais dos valores observados na região. Além disso, nos resultados apresentados pelas outras variáveis tem-se uma concentração de trechos classificados na faixa de valores menores que 2 $L.s^{-1}.km^{-2}$, sendo esse intervalo inferior ao mínimo observado nas estações fluviométricas, o que é um indicativo de subestimativa.

Na regionalização da $Q_{7,10}$ nenhum dos modelos gerados apresentou uma amplitude de variação dos valores estimados englobando toda a faixa de valores observados nas estações fluviométricas (0,6 a 3,0 $L.s^{-1}.km^{-2}$). O uso da variável explicativa Peq foi o que resultou em uma menor amplitude de variação das vazões específicas estimadas, havendo uma concentração de trechos na faixa que compreende valores de $q_{7,10}$ de 1,5 a 2 $L.s^{-1}.km^{-2}$. Similar ao que ocorreu para a q_{90} , a $BHeq$ (Figura 25C) foi a variável que resultou em uma maior amplitude de variação dos valores estimados, com transições entre classes muito frequentes e de maneira aleatória. Já a Peq_{750} , $BHeq_M$ e $BHeq_G$ apresentaram uma amplitude e um padrão de variação bastante similar com maiores produções específicas nas RHH 1 e RHH 2, onde o balanço hídrico é maior, e menores na RHH 3, onde o BH é menor. O uso da $BHeq_{GM}$ resultou em maiores $q_{7,10}$ na RHH1, assim como ocorreu para a q_{90} , estando esses valores dentro da faixa de variação observada nas estações fluviométricas.

1.3.2.4.3 Análise de risco

Na Figura 26 estão apresentados os mapas nos quais os trechos da hidrografia foram classificados em intervalos definidos conforme o risco associado às estimativas, obtidas a partir do uso de cada variável independente, na bacia hidrográfica do Paracatu.

Observa-se que, assim como ocorreu na bacia do Grande, a variável Peq (Figura 26A) não estimou valores menores que o menor observado nas estações fluviométricas, não apresentando trechos na classe de potencial subestimativa. A variável $BHeq_{GM}$ (Figura 26F) foi

a que mais apresentou trechos nessa classe (5,7%), seguida das variáveis Peq_{750} (5,3%), $BHeq$ (4,10%), $BHeq_M$ (2,20%) e $BHeq_G$ (1,40%). Para todas essas variáveis, com exceção da $BHeq$, os trechos da classe de subestimativa ocorrem principalmente na região nordeste da bacia próximo a foz. Essa região provavelmente é caracterizada pelos menores coeficientes de escoamento da bacia, uma vez que nela ocorrem os menores valores de precipitação anual média. Entretanto, a falta de monitoramento nessa parte da bacia faz com que seja uma região de grande incerteza associada às estimativas.

A regionalização com o uso da variável $BHeq_{GM}$ (Figura 26F) foi a que conduziu a maior proporção de trechos na classe de potencial superestimava (63,6%). Esses segmentos estão localizados principalmente na RHH 1 onde o valor de CE chega a 0,47, enquanto o máximo observado é de 0,35. Para as variáveis Peq , Peq_{750} , $BHeq$, $BHeq_M$, $BHeq_G$ a proporção de trechos nessa classe foi de 15,9%, 28,3%, 35,6%, 17,1% e 39,8%, respectivamente, ocorrendo predominantemente na porção sul da bacia. Esse resultado está relacionado ao fato dessa região ser caracterizada pelas maiores precipitações, tendendo, portanto, a apresentar maiores valores de CE.

Com relação à classe de valores confiáveis, a variável Peq foi a que apresentou maior proporção dos trechos com essa classificação (84,0%). Todavia, conforme visto na análise física, a consideração da Peq como variável explicativa acarretou uma redução da amplitude dos valores estimados em relação aos dados observados, o que resultou na classificação da maioria dos trechos na faixa de valores confiáveis. Esse resultado não necessariamente indica bom desempenho do modelo, uma vez que a amplitude dos valores de CE estimados é bem inferior à dos valores observados.

O modelo de regionalização obtido com o uso $BHeq_M$ também apresentou uma grande proporção de trechos na classe de valores confiáveis (80,6%) estando esses trechos bem distribuídos ao longo da bacia. Seguida dessa, a proporção de trechos nessa classe foi em ordem decrescente de 66,4%, 60,3%, 58,8% e 30,8% para as variáveis Peq_{750} , $BHeq$, $BHeq_G$ e $BHeq_{GM}$, respectivamente.

Na análise de desempenho físico as variáveis Peq_{750} , $BHeq_M$ e $BHeq_G$ apresentaram desempenho satisfatório, com padrão de variação dos valores condizentes com a variação do balanço hídrico e amplitudes similares. Na análise de risco a $BHeq_M$ apresentou maior proporção de trechos na classe de valores confiáveis. A vantagem de utilização dessa variável em relação à Peq_{750} é que considera um valor físico representativo da bacia, já em comparação a $BHeq_G$, a $BHeq$ perde em termos de representatividade física, uma vez que não considera as variações ao longo da bacia. Contudo, levando-se em conta a importância que a estimativa de

valores de vazão classificados como confiáveis representa para o planejamento e gestão de recursos hídricos, considerou-se que a $BHeq_M$ é a variável mais representativa para regionalização das vazões médias na bacia do Paracatu.

Nas Figuras 27 e 28 estão apresentados os mapas da análise de risco realizada para a bacia hidrográfica do Paracatu considerando as q_{min} para a bacia do Paracatu. Para a q_{90} (Figura 27), a classe de potencial subestimativa está presente nas RHH 1 e RHH 3, para todas as variáveis de estudo em uma proporção de 36,0%, 34,0%, 33,6%, 30,3% e 8% para Peq , Peq_{750} , $BHeq$, $BHeq_M$, $BHeq_G$ e $BHeq_{GM}$, respectivamente. A diminuição dos trechos na classe de potencial subestimativa obtida pela $BHeq_{GM}$ ocorreu em função da melhoria do resultado da regionalização da RHH 1, a qual apresentou uma grande proporção dos trechos com valores estimados menores que o mínimo observado nos modelos que utilizaram as outras variáveis de estudo. Para a $q_{7,10}$ (Figura 28) poucos trechos foram classificados na classe de potencial subestimativa, estando presente apenas nos resultados dos modelos de regionalização que utilizam a Peq_{750} , $BHeq$ e $BHeq_M$ na proporção de 0,7%, 4,7% e 0,4%, respectivamente. Os trechos classificados nessa faixa de valores ocorrem principalmente nas RHH 1 e RHH2, uma vez que as produções específicas observadas nessas regiões são maiores.

Valores maiores que o máximo observado foram identificados apenas na RHH 2 para a Q_{90} , sendo $BHeq$ (12,3%) e $BHeq_G$ (13,1%) as variáveis com maior concentração de trechos nessa classe. As demais variáveis apresentaram em torno de 8% de trechos na faixa de valores classificados como potencial superestimativa. Para a $Q_{7,10}$ não foram identificados trechos nessa classe, isto é, os valores máximos estimados não superaram o máximo observado nas estações fluviométricas. Conforme mencionado anteriormente, do ponto de vista do planejamento e gestão de recursos hídricos, é desejável que se tenha uma menor de concentração de trechos na classe de potencial superestimativa, uma vez que evita falsas expectativas de disponibilidade hídrica.

Com relação aos trechos que foram classificados dentro do intervalo de valores observados nas estações fluviométricas, para a Q_{90} a $BHeq_{GM}$ foi a que apresentou maior proporção de trechos nessa classe (84,2%), enquanto as demais variaram entre 53,9% ($BHeq$) e 57,8% (Peq_{750}), evidenciando assim o melhor desempenho da $BHeq_{GM}$. Para a $Q_{7,10}$ a proporção de trechos nessa classe variou de 95,3% ($BHeq$) a 100% (Peq e $BHeq_G$). É importante ressaltar que a totalidade de trechos na classe de valores confiáveis obtidos pela Peq ocorreu em função da estimativa de valores com uma amplitude de variação muito reduzida. Esse resultado não é desejável, pois os modelos de regionalização devem se aproximar o máximo possível dos valores observados nas estações fluviométricas. Sendo assim, apesar do aparente

bom desempenho na análise de risco, a Peq não é recomendada para a regionalização da $Q_{7,10}$ na bacia do Paracatu.

Observa-se que para a Q_{90} a $BHeq_{GM}$ sobressaiu no desempenho da análise física e de risco, principalmente devido às diferenças obtidas para a RHH 1, não havendo muita distinção dos resultados apresentados pelas outras variáveis para as demais regiões homogêneas. Já para a $Q_{7,10}$, as variáveis, com exceção da Peq, apresentaram um desempenho bastante similar, sendo as maiores diferenças observadas também para os resultados da RHH 1 com a variável $BHeq_{GM}$.

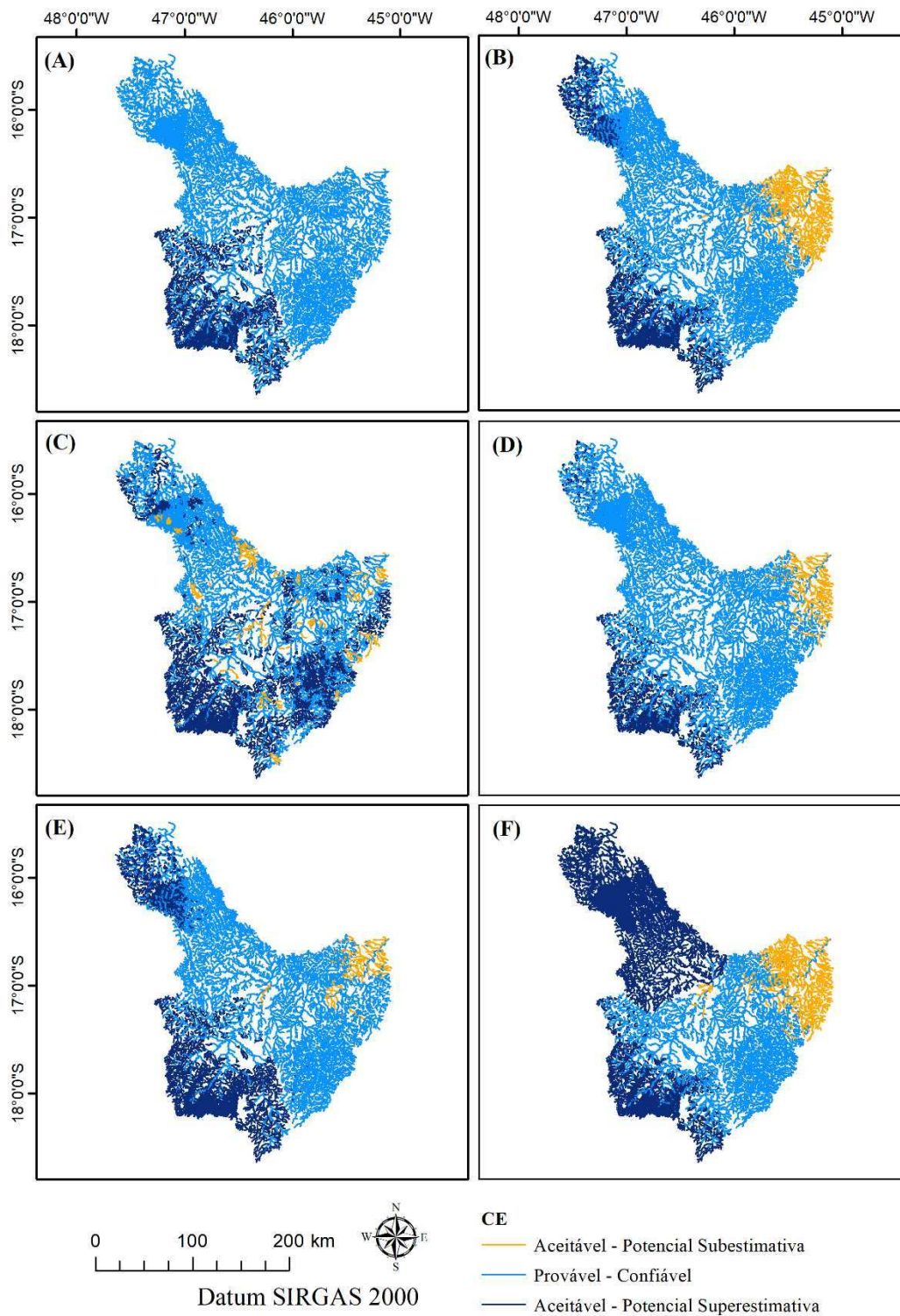


Figura 26 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Paracatu conforme o risco associado aos valores de CE, considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq_{750} (B), $BHeq$ (C), $BHeq_M$ (D), $BHeq_G$ (E) e $BHeq_{GM}$ (F).

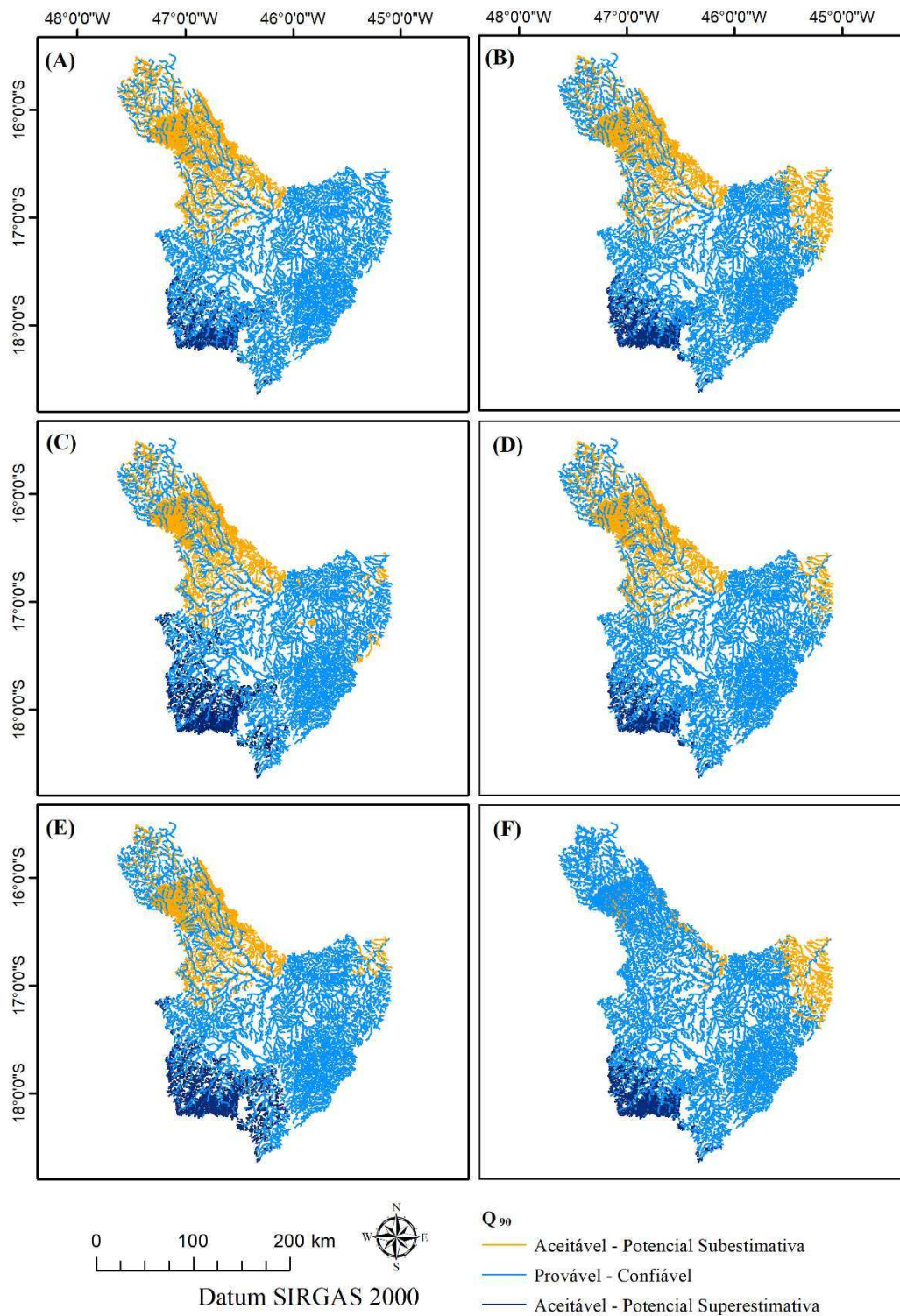


Figura 27 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Paracatu conforme o risco associado aos valores de q_{90} , considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq_{750} (B), $BHeq$ (C) $BHeq_M$ (D), $BHeq_G$ (E) e $BHeq_{GM}$ (F).

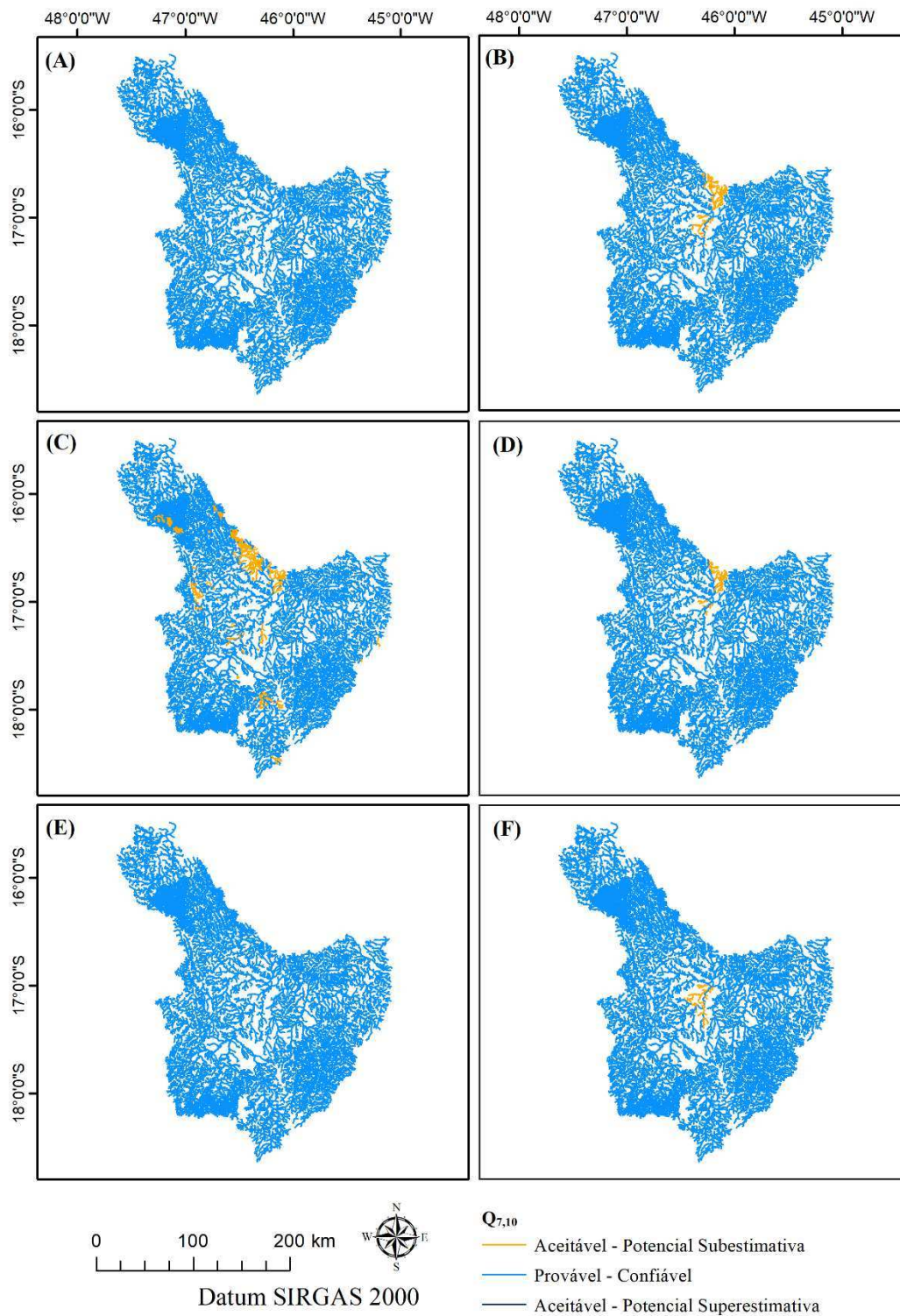


Figura 28 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Paracatu conforme o risco associado aos valores de $q_{7,10}$, considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq_{750} (B), $BHeq$ (C), $BHeq_M$ (D), $BHeq_G$ (E) e $BHeq_{GM}$ (F).

1.3.3 Bacia do Jequitinhonha

1.3.3.1 Variáveis independentes

1.3.3.1.1 Precipitação

Na Figura 29 está apresentado o mapa de precipitação anual média da bacia do rio Jequitinhonha, obtida pelo método IDW.

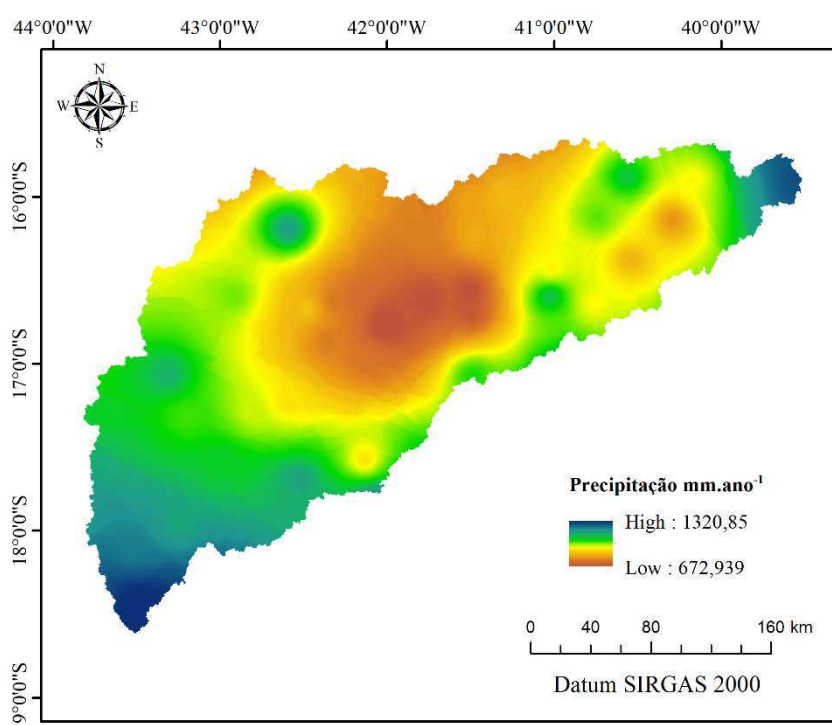


Figura 29 – Precipitação anual média na bacia do rio Jequitinhonha.

As precipitações anuais no Jequitinhonha variam de 672 a 1320 mm, sendo que os menores valores ocorrem em sua porção central. Nas demais bacias de estudo o padrão de variação da precipitação foi caracterizado por uma tendência de diminuição das precipitações no sentido da foz. Já na bacia do Jequitinhonha é possível observar que a precipitação decresce até a porção central da bacia e depois volta a aumentar no sentido da foz, devido à influência do oceano atlântico, onde esse rio deságua. No trabalho desenvolvido por Alvares; Stape; Sentelhas (2013) é possível observar essa característica da bacia do Jequitinhonha, sendo sua cabeceira e foz caracterizadas por climas mais úmidos e sua porção central por um clima mais seco.

1.3.3.1.2 Evapotranspiração Real

Na Figura 30 estão apresentados, para a bacia do Jequitinhonha, os mapas de ETR obtidos pelos produtos MOD16, GLEAM e balanço hídrico das estações para a bacia do Jequitinhonha.

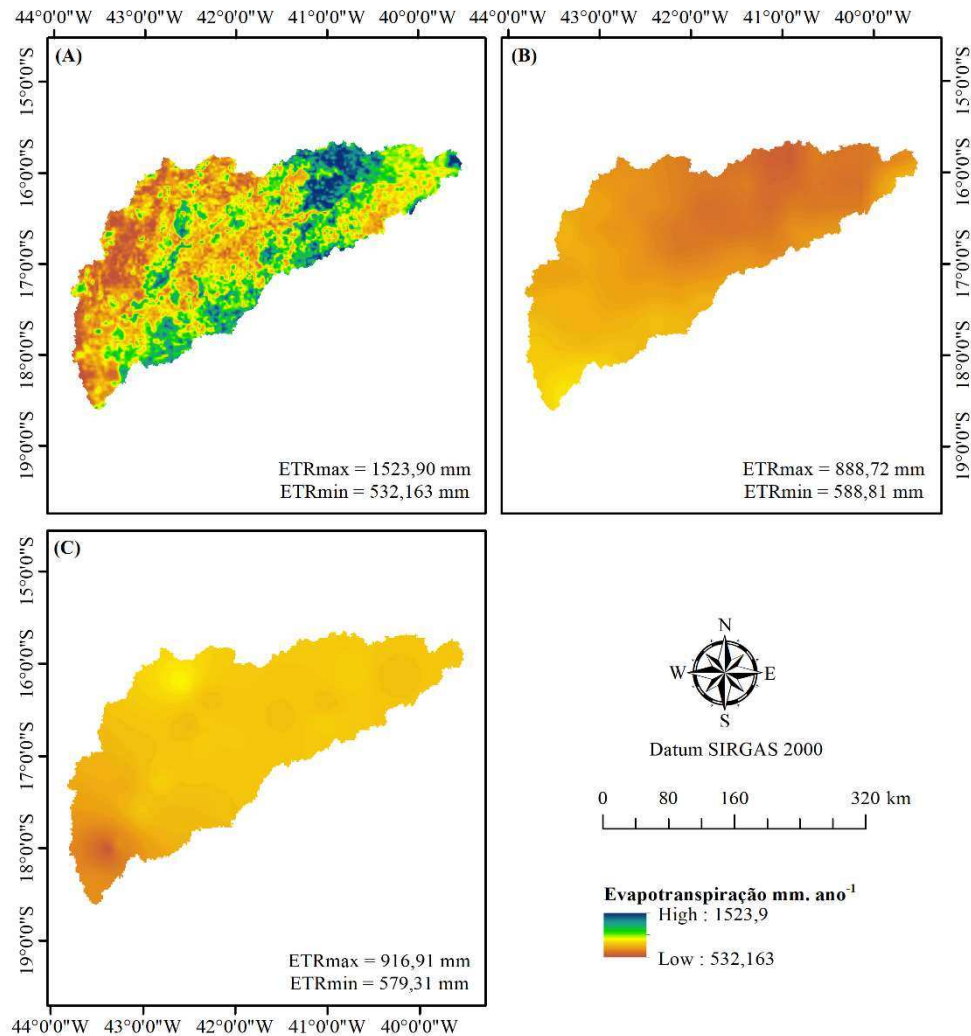


Figura 30 – ETR obtida pelos produtos MOD16 (A), GLEAM (B) e ETR_{est} (C) para a bacia do rio Jequitinhonha.

Observa-se que o mapa da ETR_{MOD16} apresenta menores valores na porção oeste e central da bacia e maiores valores à medida que se aproxima da foz, padrão que se assemelha um pouco ao apresentado pelo mapa de ETR_{est} . Já o GLEAM apresenta valores menores próximos da cabeceira da bacia.

Na bacia do Jequitinhonha, o MOD16 também apresenta uma amplitude de variação muito superior aos demais, apresentando um valor máximo de ETR que supera em 1,66 vezes

o valor estimado pelo balanço hídrico das estações. Já o valor mínimo de ETR apresenta valores bastante próximos para os diferentes produtos. O valor médio estimado pelo ETR_{MOD16} para a bacia é de 959 mm, valor superior aos obtidos para as demais bacias de estudo. O produto GLEAM apresenta uma amplitude de variação mais próxima ao da ETR_{est} , não atingindo, contudo, o valor máximo. O valor médio de ETR obtido para a bacia pelo ETR_{GLEAM} foi de 714 mm.

Os índices estatísticos utilizados para a comparação dos produtos de ETR estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Índices estatísticos calculados para comparação dos produtos de ETR

Índices	MOD16	GLEAM
RMSE	222,19	135,66
ME	164,55	-6,39
PBIAS	20,70	-0,80

Nota-se que assim como observado para as demais bacias de estudo, o MOD16 apresentou maiores erros em relação à ETR estimada pelo balanço hídrico das estações. Para os índices ME e PBIAS observa-se que, enquanto o MOD16 apresentou valores positivos, o GLEAM apresentou valores negativos, isto mostra que o primeiro estima valores de ETR maiores em relação a ETR_{est} e o segundo estima valores menores. A baixa magnitude dos valores de PBIAS e ME observados para o GLEAM indicam uma proximidade dos valores obtidos por esse produto daqueles obtidos pelo balanço hídrico das estações.

1.3.3.1.3 Balanço hídrico

Na Figura 31 estão apresentados, para a bacia do Jequitinhonha, os mapas de balanço hídrico considerando os fatores de abstração 750 mm, ERT_{MOD16} e ETR_{GLEAM} e o obtido pelas estações fluviométricas.

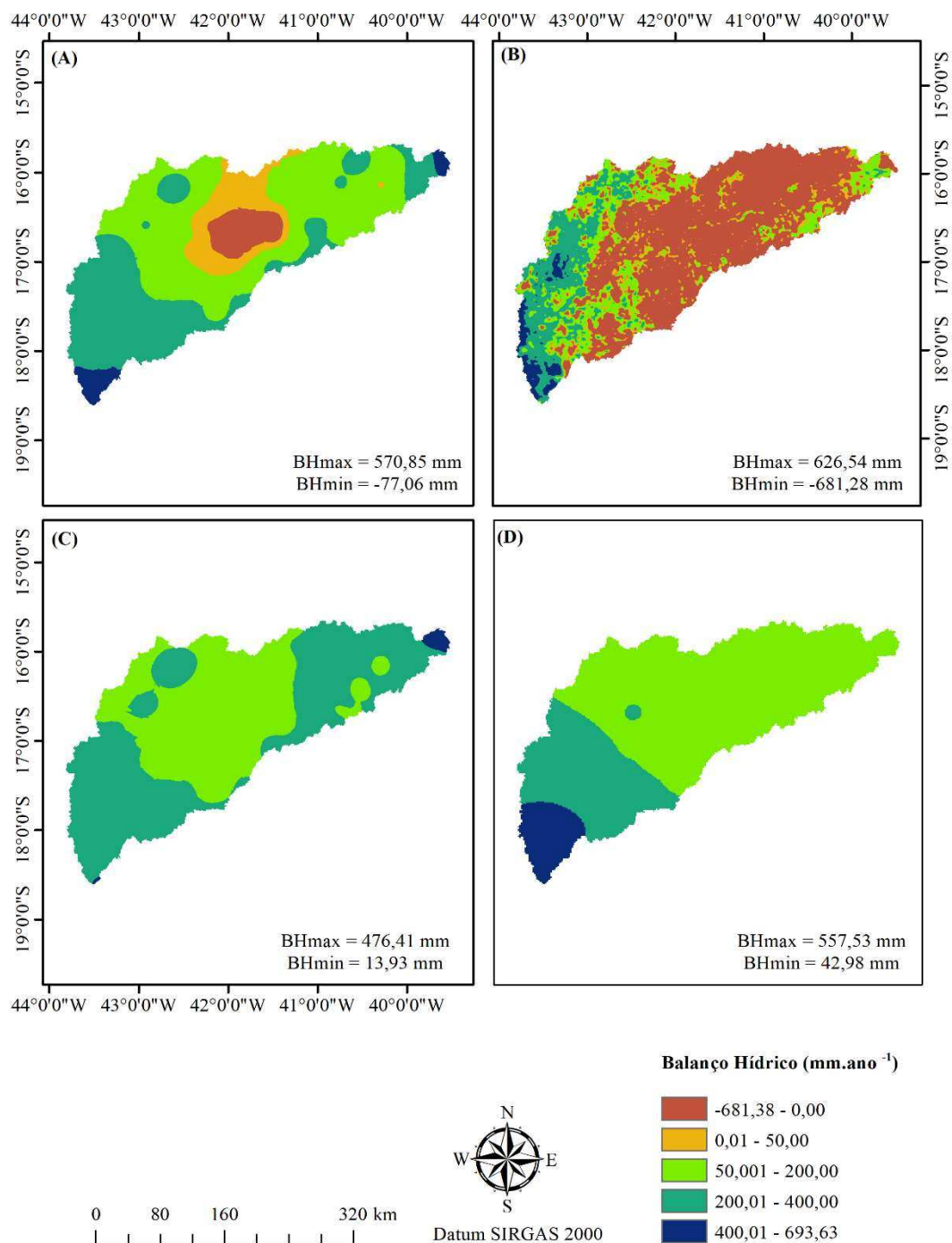


Figura 31 – Balanço hídrico obtido usando os produtos 750(A), MOD16 (B) e GLEAM (C) e ETR_{est} (D) para a bacia do rio Jequitinhonha.

No BH_{750} (Figura 31A) os valores variam de -77,06 a 570,05 mm, com maiores valores nas regiões sudoeste e nordeste da bacia e menores na região central. Observa-se que a utilização do fator de abstração de 750 mm produziu valores de balanço hídrico negativo na bacia (6% da área), evidenciando uma limitação do uso desse fator, em outras bacias, principalmente as de clima semiárido, e a necessidade da procura por outro valor que seja

representativo das bacias de maneira geral. No estudo realizado por IGAM; GPRH/UFV (2012) para a bacia do Jequitinhonha, a limitação do uso do 750 mm foi superada pela utilização de um valor arbitrário de 600 mm o qual conduziu a bons resultados. Nesse sentido, para a bacia do Jequitinhonha, no lugar do 750 mm, foi considerado o fator de abstração de 600 mm o qual resultou no BH apresentado na Figura 32, com amplitude dos valores de 72,94 a 720,85 mm.

Na Figura 31B observa-se que o BH_{MOD16} , assim como nas outras bacias, apresentou maior amplitude de variação (-681,28 a 626,54 mm) em relação aos outros produtos. Além disso, foi evidenciado em grande parte da bacia a ocorrência de valores negativos (aproximadamente 55% da área total). Conforme discutido anteriormente na análise estatística dos valores de evapotranspiração real estimados pelos diferentes produtos, a ETR_{MOD16} tende a superestimar a evapotranspiração real nessa bacia o que contribuiu para o não fechamento do balanço hídrico. Esse resultado reforça a existência de inconsistências nas estimativas de ETR pelo produto MOD16. De acordo com Oliveira et al. (2014), as incertezas presentes nos dados provenientes do sensoriamento remoto tornam o fechamento do balanço hídrico um grande desafio, todavia esse fechamento é uma importante forma de avaliação desses dados em grandes regiões.

No BH_{GLEAM} (Figura 31C) a faixa de variação dos valores foi menor (13,93 a 476,41), com uma tendência de maiores valores na região mais a oeste e próxima a foz e menores na região central da bacia, sendo similar ao padrão da precipitação. No BH_{est} os valores variaram entre 42,98 mm a 557,53 mm, sendo o padrão de variação caracterizado por uma tendência de diminuição dos valores no sentido da foz.

Devido às inconsistências apresentadas no balanço hídrico resultante da utilização do produto de ETR do MOD16, no estudo de regionalização de vazões da bacia do Jequitinhonha foi considerado apenas a ETR proveniente do produto GLEAM.

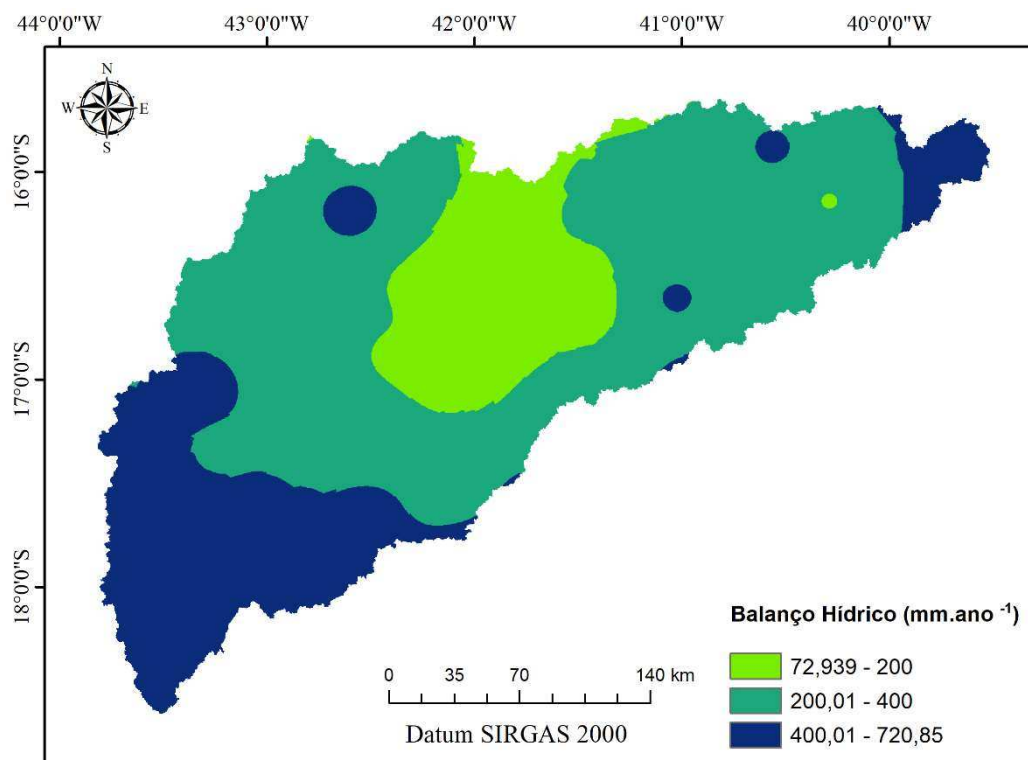


Figura 32 – Balanço hídrico obtidos pela utilização do fator de abstração da precipitação igual a 600 mm.

1.3.3.2 Variáveis dependentes

Na Tabela 13 estão apresentados os códigos, as áreas de drenagem, as vazões observadas, os coeficientes de escoamento e as vazões específicas nas estações fluviométricas da bacia do Jequitinhonha. Observa-se que nessa bacia a menor área de drenagem foi de 157,52 km². A variação da q_{90} foi de 0,11 a 4,27 L s⁻¹ km⁻² e da $q_{7,10}$ de 0,02 a 2,94 L s⁻¹ km⁻². O coeficiente de escoamento variou de 0,06 a 0,51.

Tabela 13 – Código, área, Q_{mld} , Q_{90} , $Q_{7,10}$, CE, q_{90} e $q_{7,10}$ para as estações fluviométricas consideradas para o estudo da bacia do Jequitinhonha.

Estação	Área	Q_{mld}	Q_{90}	$Q_{7,10}$	CE	q_{90}	$q_{7,10}$
	(km ²)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	adm	(L s ⁻¹ km ⁻²)	(L s ⁻¹ km ⁻²)
54001000	378,35	6,63	0,64	0,28	0,45	1,70	0,74
54010005	7713,08	81,15	14,75	9,90	0,31	1,91	1,28
54110002	4053,16	20,65	1,19	0,48	0,17	0,29	0,12
54150000	16071,92	123,63	21,26	7,09	0,24	1,32	0,44
54165000	2294,92	5,67	0,41	0,16	0,08	0,18	0,07
54193000	3020,88	7,45	0,35	0,06	0,09	0,11	0,02
54195000	23440,77	130,77	25,13	8,54	0,18	1,07	0,36
54220000	193,91	3,54	0,64	0,42	0,51	3,29	2,14
54225000	424,79	5,85	1,82	1,25	0,38	4,27	2,94
54230000	2837,58	25,61	6,94	4,22	0,26	2,45	1,49
54234000	157,52	1,85	0,62	0,45	0,33	3,92	2,85
54235000	1527,16	12,83	4,83	2,81	0,25	3,16	1,84
54260000	6753,71	49,42	13,18	7,90	0,22	1,95	1,17
54300000	1066,32	6,12	1,40	0,63	0,18	1,31	0,59
54390000	10625,35	64,63	15,50	8,03	0,19	1,46	0,76
54485000	1179,25	3,06	0,37	0,04	0,09	0,32	0,03
54500000	15834,19	74,61	17,93	7,93	0,16	1,13	0,50
54530000	40374,51	197,52	45,39	20,49	0,16	1,12	0,51
54580000	45395,07	217,38	45,82	21,69	0,16	1,01	0,48
54590000	1348,04	3,95	0,95	0,41	0,11	0,70	0,30
54710000	50352,31	232,90	51,74	27,54	0,16	1,03	0,55
54730005	1900,98	7,50	2,09	0,80	0,13	1,10	0,42
54770000	2819,01	4,73	0,30	0,17	0,06	0,11	0,06
54780000	62453,35	282,08	65,78	38,85	0,16	1,05	0,62
54950000	67901,24	277,80	54,89	26,77	0,14	0,81	0,39

1.3.3.2.1 Boxplot

No boxplot da bacia do Jequitinhonha (Figura 33) as estações 54001000 (ID = 1) e 54220000 (ID = 8) foram caracterizadas como *outliers* superiores para o CE e as estações 54225000 (ID = 9) e 54234000 (ID = 11) para as vazões mínimas. Essas estações estão localizadas na cabeceira do rio Jequitinhonha, região caracterizada pelas maiores lâminas precipitadas da bacia (Figura 29), o que justifica, portanto, a ocorrência de maiores produções de água. Sendo assim, optou-se por não retirar essas estações do estudo.

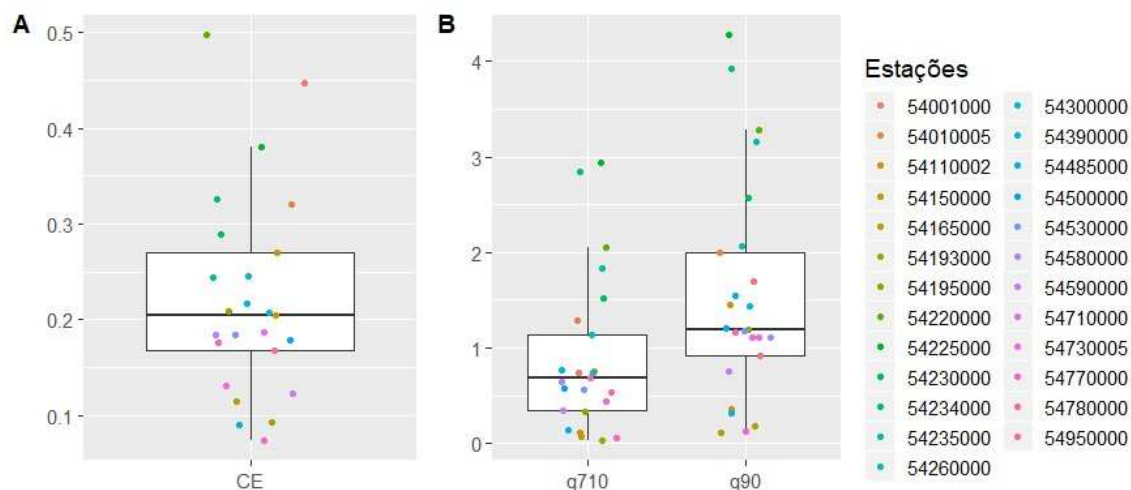


Figura 33 – Boxplot do CE (A) e das vazões específicas $q_{7,10}$ e q_{90} (B) para a bacia do Jequitinhonha.

1.3.3.2 Identificação de regiões hidrológicamente homogêneas

Com relação à bacia do rio Jequitinhonha, foi feita a análise das medidas de heterogeneidade considerando a bacia como única região homogênea, sendo constatado que, de acordo com o valor de H_1 (1,90), a bacia é aceitavelmente homogênea, não sendo necessária a exclusão de estações.

1.3.3.3 Equações de regionalização

Na Tabela 14 são apresentadas as equações de regionalização obtidas para a bacia do Jequitinhonha. Conforme foi mencionado no item 1.3.3.1.3, a ETR estimada pelo MOD16 não foi utilizada na regionalização de vazões dessa bacia, uma vez que o balanço hídrico resultante da utilização desse produto conduziu a uma grande proporção da bacia com BH negativos. Também não foi feita a regionalização de vazões utilizando o valor de ETR médio do GLEAM (714 mm), uma vez que esse valor supera a precipitação anual média observada em parte da bacia. Sendo assim as variáveis explicativas analisadas na bacia do Jequitinhonha foram a Peq , Peq_{600} e $BHeq_G$.

Tabela 14 – Equações de regionalização de vazões para a bacia do Jequitinhonha

Variáveis	Q_{mld}	Q_{90}	$Q_{7,10}$
Peq	$Q_{mld}=0,2836Peq^{0,9084}$	$Q_{90}=0,0439Peq^{0,9371}$	$Q_{7,10}=0,0196Peq^{0,9374}$
Peq ₆₀₀	$Q_{mld}=0,6216Peq_{600}^{0,9457}$	$Q_{90}=0,0891Peq_{600}^{1,002}$	$Q_{7,10}=0,0379Peq_{600}^{1,015}$
BHeq _G	$Q_{mld}=0,9859BHeq_G^{0,9365}$	$Q_{90}=0,1558BHeq_G^{0,9718}$	$Q_{7,10}=0,0668BHeq_G^{0,9846}$

1.3.3.4 Análise de desempenho

1.3.3.4.1 Análise estatística

Na Tabela 15 são apresentados os índices estatísticos referentes às equações de regionalização para as vazões Q_{mld} , Q_{90} e $Q_{7,10}$ da bacia do rio Jequitinhonha.

Tabela 15 – Indicadores estatísticos dos modelos de regionalização de vazões da bacia do rio Jequitinhonha

		R_{ajus}^2	NSE	mNSE	MAE	RMSE	Se	PBIAS	RMSE _{CV}	R ² _{CV}
Q_{mld}	Peq	0,907	0,974	0,865	10,269	14,809	0,511	-9,100	12,360	0,980
	Peq ₆₀₀	0,927	0,970	0,889	8,456	16,134	0,454	-4,200	16,310	0,970
	Peq _{ETRG}	0,925	0,976	0,869	9,990	14,243	0,459	-7,700	13,510	0,980
Q_{90}	Peq	0,749	0,922	0,757	3,927	5,598	0,948	-19,700	4,110	0,960
	Peq ₆₀₀	0,810	0,960	0,824	2,845	4,002	0,825	-10,600	4,130	0,960
	Peq _{ETRG}	0,774	0,930	0,765	3,789	5,306	0,900	-17,500	4,800	0,940
$Q_{7,10}$	Peq	0,623	0,818	0,664	2,659	4,489	1,268	-27,900	3,900	0,870
	Peq ₆₀₀	0,693	0,895	0,740	2,058	3,410	1,144	-17,700	3,900	0,870
	Peq _{ETRG}	0,662	0,867	0,726	2,169	3,833	1,201	-17,400	4,010	0,860

A análise dos índices estatísticos mostra que para a Q_{mld} os valores de R_{ajus}^2 foram todos maiores que 0,9, indicando que as equações apresentaram uma ótima qualidade do ajuste. Para as vazões mínimas observa-se uma redução no desempenho dos modelos em relação ao R_{ajus}^2 , apresentando uma variação de 0,75 (Peq) a 0,81 (Peq₆₀₀) para a Q_{90} e de 0,62 (Peq) a 0,69 (Peq₆₀₀) para a $Q_{7,10}$. Esse resultado está relacionado ao fato da bacia do Jequitinhonha apresentar uma grande variação nos valores de vazão mínima, com ocorrência de valores de magnitude muito baixa, o que dificulta o ajuste do modelo.

De acordo com o NSE, todos os modelos de regionalização de vazões são classificados como muito bons ($\geq 0,75$) segundo classificação proposta por Moriasi et al. (2007). Quando se

considera o mNSE observa-se uma diminuição dos valores, contudo, os modelos continuam classificados como muito bons, havendo alteração da classificação apenas para os modelos da $Q_{7,10}$ que passam a ser classificados como bons.

Com relação às medidas de erro, observa-se baixos valores, sendo menores que a metade do desvio padrão dos dados observados (94,31, 20,51 e 10,73 para a Q_{mld} , Q_{90} e $Q_{7,10}$ respectivamente), portanto, podem ser considerados baixos e apropriados para avaliação dos modelos. O PBIAS apresentou valores negativos, indicando tendência também de subestimativa, com valores de maiores magnitudes para as vazões mínimas, principalmente para a $Q_{7,10}$. Os índices da validação cruzada mostraram desempenho estatístico satisfatório dos modelos, com valores altos valores de R^2 e baixos RMSE.

Em relação às outras bacias de estudo, na do Jequitinhonha observou-se uma maior distinção dos índices estatísticos obtidos para as diferentes variáveis explicativas e, de maneira geral, a Peq apresentou os piores índices estatísticos e a Peq_{600} os melhores para as três vazões de estudo. A superioridade no desempenho estatístico obtida pela Peq_{600} em relação à Peq também foi observada no estudo de regionalização realizado por IGAM; GPRH/UFV (2012).

1.3.3.4.2 Análise física

Na Figura 34 está apresentada a variação do CE ao longo da hidrografia, com as variáveis independentes Peq , Peq_{600} e $BHeq_G$ na bacia do Jequitinhonha.

A utilização da Peq no modelo de regionalização de vazões produziu valores de CE entre 0,14 a 0,59, não estimando o valor mínimo observado nas estações fluviométricas (0,06) e extrapolando o valor máximo (0,51). Assim como observado para as bacias do Grande e do Paracatu, o padrão de variação dos valores de CE estimados com o uso da Peq como variável explicativa ao longo da bacia do Jequitinhonha não foi condizente com o mapa de precipitação, apresentando valores altos em regiões de menores precipitações. Observa-se também uma predominância de valores estimados na classe de 0,36 a 0,45, ocorrendo principalmente nos rios de menor área de drenagem.

Substituindo a Peq pela Peq_{600} a classe inferior dos valores estimados se aproxima do valor mínimo observado e há uma redução do maior valor estimado. Além disso, observa-se que os valores maiores ocorrem nas regiões sudoeste e nordeste da bacia, onde ocorrem os maiores balanços hídricos, e menores na região central, onde o BH é menor.

A consideração da $BHeq_G$ como variável explicativa produziu valores de CE que vão de 0,03 a 0,59, isto é, englobam os valores observados nas estações fluviométricas com uma

pequena extrapolação. Observa-se também que o padrão de variação dos valores segue bem a tendência do mapa do BH, assim como ocorreu para a Peq_{600} , contudo há um aumento dos trechos da hidrografia na classe de valores menores que 0,25. Esse resultado está de acordo com os observados nas estações fluviométricas para as quais se observa uma predominância dos valores de CE inferiores a 0,25 (Tabela 13).

Nas Figuras 35 e 36 estão apresentadas as variações da q_{90} e da $q_{7,10}$, respectivamente, ao longo da hidrografia, com as variáveis independentes Peq , Peq_{600} e $BHeq_G$ na bacia do Jequitinhonha.

A utilização da Peq (Figuras 35A e 36A) como variável explicativa resultou em uma amplitude de variação de 0,79 a 2,68 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a q_{90} e 0,37 a 1,20 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a $q_{7,10}$, sendo inferiores à observada nas estações fluviométricas (0,11 a 4,27 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a q_{90} e 0,02 a 2,94 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a $q_{7,10}$). Além disso, observa-se que os valores são maiores nas regiões de maior BH e menores onde o BH é menor, contudo, assim como ocorreu para o CE, os valores de q_{min} estão concentrados nos intervalos de classes de maiores magnitudes, isto é, a maior parte da bacia apresenta produções específicas superiores a 1,20 $L.s^{-1}.km^{-2}$ e 0,5 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a q_{90} e para a $q_{7,10}$ respectivamente.

Quando se considera a Peq_{600} (Figuras 35B e 36B), há uma redução do valor mínimo estimado (0,21 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a q_{90} e 0,08 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a $q_{7,10}$), aproximando do mínimo observado nas estações fluviométricas, mas também tem uma redução do máximo estimado (2,68 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a q_{90} e 0,84 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a $q_{7,10}$), o qual é menor que a metade do máximo observado nas estações. O padrão de variação dos valores estimados por essa variável segue a tendência do BH, com produções específicas de baixa magnitude na porção central da bacia, a qual, conforme já observado, corresponde a uma região de menor disponibilidade hídrica. Além disso, em relação ao resultado obtido pelo uso da Peq , observa-se uma melhor distribuição dos valores estimados entre os intervalos de classe.

A $BHeq_G$ (Figuras 35C e 36C) resulta em uma amplitude de valores que vai de 0,09 a 2,73 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a q_{90} e a 0,04 a 1,09 $L.s^{-1}.km^{-2}$ para a $q_{7,10}$, isto é, não estima o valor máximo observado nas estações fluviométricas e nem o mínimo no caso da $q_{7,10}$, entretanto se aproxima mais dos valores observados em comparação às variáveis Peq e Peq_{600} . O padrão de variação resultante da utilização da $BHeq_G$ apresenta a mesma tendência do mapa de BH, com diminuição dos valores de q_{90} e $q_{7,10}$ nas regiões onde o BH decresce. Observa-se também a ocorrência de estimativa de produções específicas bastante distintas em trechos de grande proximidade geográfica nos resultados obtidos por essa variável. Analisando o mapa de precipitação (Figura 29) é possível perceber que essas regiões coincidem com os “denominados

olhos de boi” presentes no mapa de precipitação, os quais são consequência do método de interpolação utilizado.

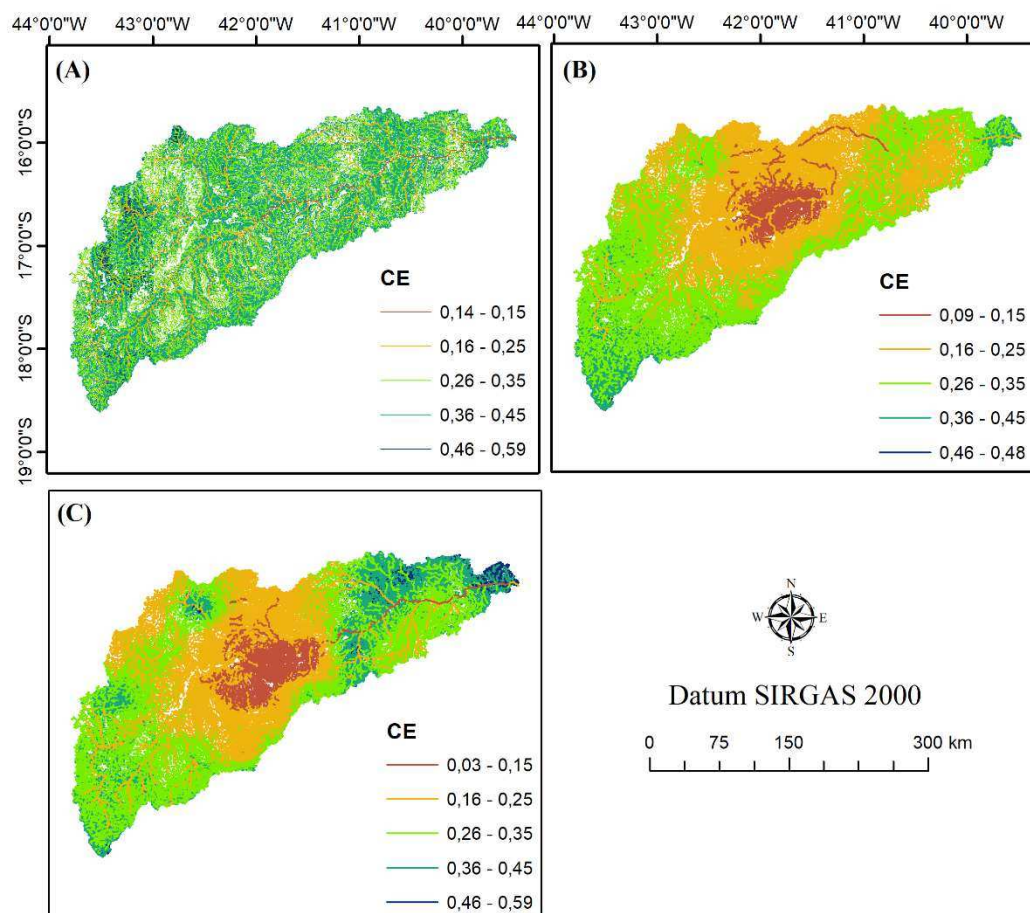


Figura 34 – Representação da variação do CE ao longo da hidrografia da bacia do Jequitinhonha, utilizando Peq (A), Peq600 (B) e BHeqG (C).

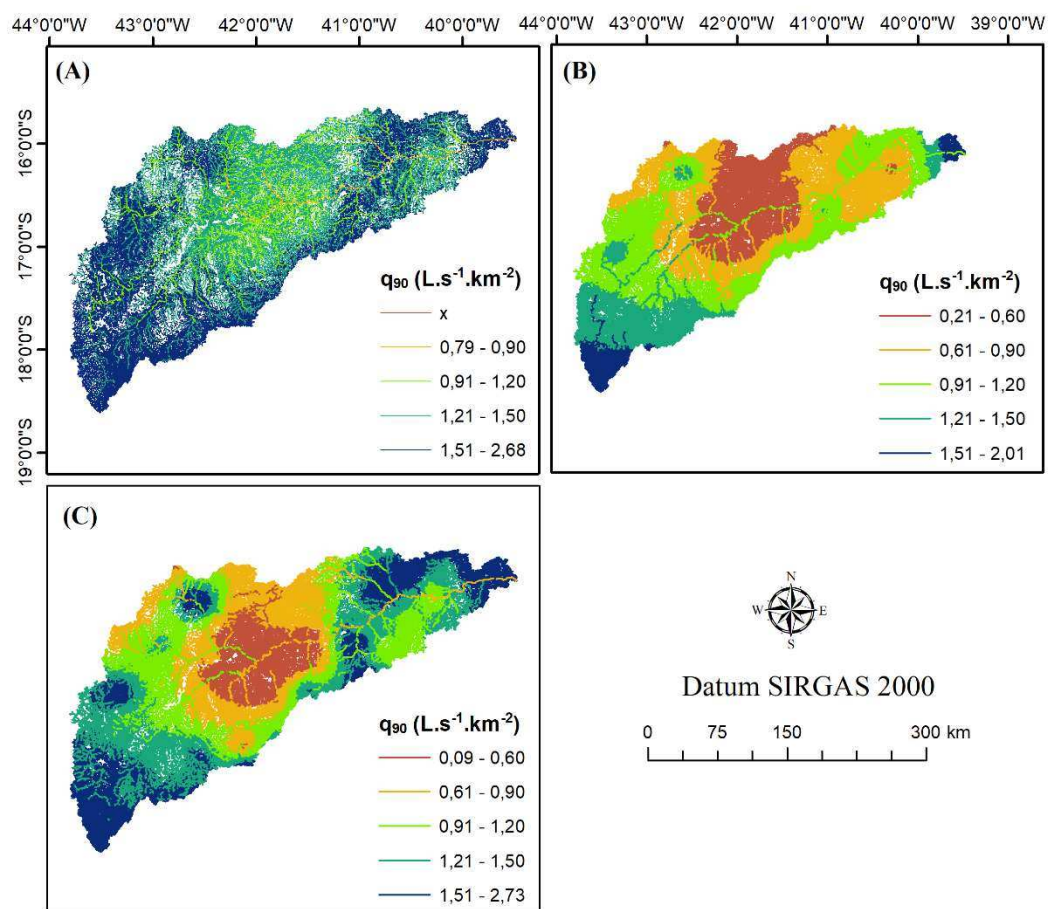


Figura 35 – Representação da variação do q_{90} ao longo da hidrografia da bacia do Jequitinhonha, utilizando Peq (A), Peq₆₀₀ (B) e BHeq_G (C).

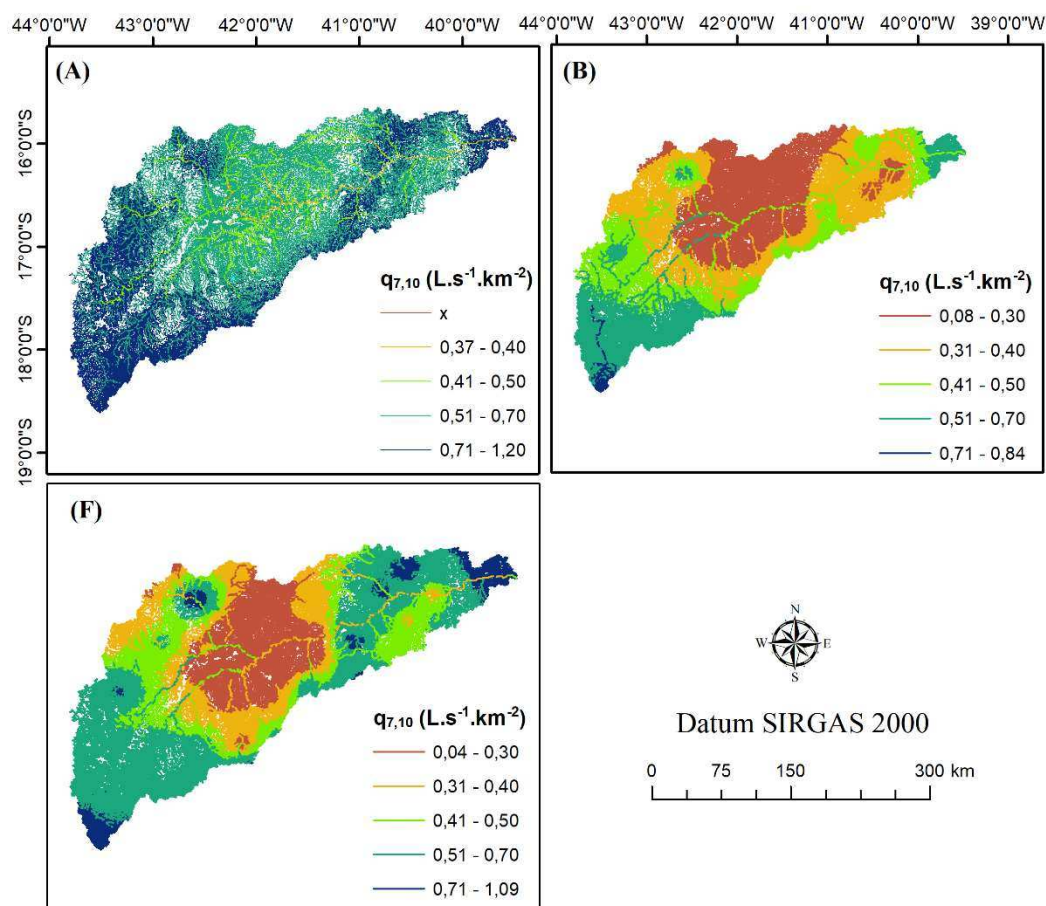


Figura 36 – Representação da variação do $q_{7,10}$ ao longo da hidrografia da bacia do Jequitinhonha, utilizando Peq (A), Peq₆₀₀ (B) e BHeq_G (C).

1.3.3.4.3 Análise de risco

Nas Figuras 37, 38 e 39 estão apresentados para o CE, q_{90} e $q_{7,10}$, respectivamente, os mapas nos quais os trechos da hidrografia foram classificados em intervalos definidos conforme o risco associado às estimativas, obtidas a partir do uso de cada variável independente, na bacia hidrográfica do Jequitinhonha.

Na análise de risco da bacia de Jequitinhonha é possível observar, tanto para o CE como para as q_{min} , que as estimativas obtidas pelas diferentes variáveis explicativas conduziram a valores confiáveis em praticamente todos os trechos da hidrografia, isto é, os valores estimados encontram-se no intervalo compreendido entre o valor máximo e mínimo observado nas estações fluviométricas. Esse resultado está relacionado ao fato dos valores observados na bacia do Jequitinhonha envolverem uma faixa muito ampla de variação, sendo difícil a obtenção de modelos que estimem valores em toda essa amplitude.

Embora seja desejável que os modelos de regionalização de vazões apresentem o máximo possível dos trechos na faixa de valores confiáveis, é importante ressaltar que esse resultado pode ser obtido por modelos que estimam uma amplitude de valores muito pequena e que esteja dentro dos limites observados. Normalmente espera-se que o modelo estime toda a faixa de variação observada englobando os valores mínimos e máximos. Valores superiores e inferiores ao máximo observado são prováveis de ocorrer, todavia estão sujeitos a uma maior incerteza e representam uma faixa de valores de potencial subestimativa e superestimativa, respectivamente, portanto, a sua ocorrência deve ser minimizada.

Nesse sentido, apesar das variáveis Peq , Peq_{600} e $BHeq_G$ terem apresentado a totalidade dos trechos na classe de valores confiáveis, é importante fazer uma análise geral do desempenho (estatístico, físico e de risco) para indicar a mais adequada para regionalização de vazões nessa bacia. Dessa forma, apesar da Peq_{600} ter apresentado melhor desempenho estatístico, a $BHeq_G$ apresentou índices estatísticos satisfatórios, sobressaiu na análise física e possui maior representatividade, visto que considera as principais variáveis relacionadas ao processo de formação de vazões, sendo, portanto, a variável mais representativa para regionalização de vazões na bacia do Jequitinhonha.

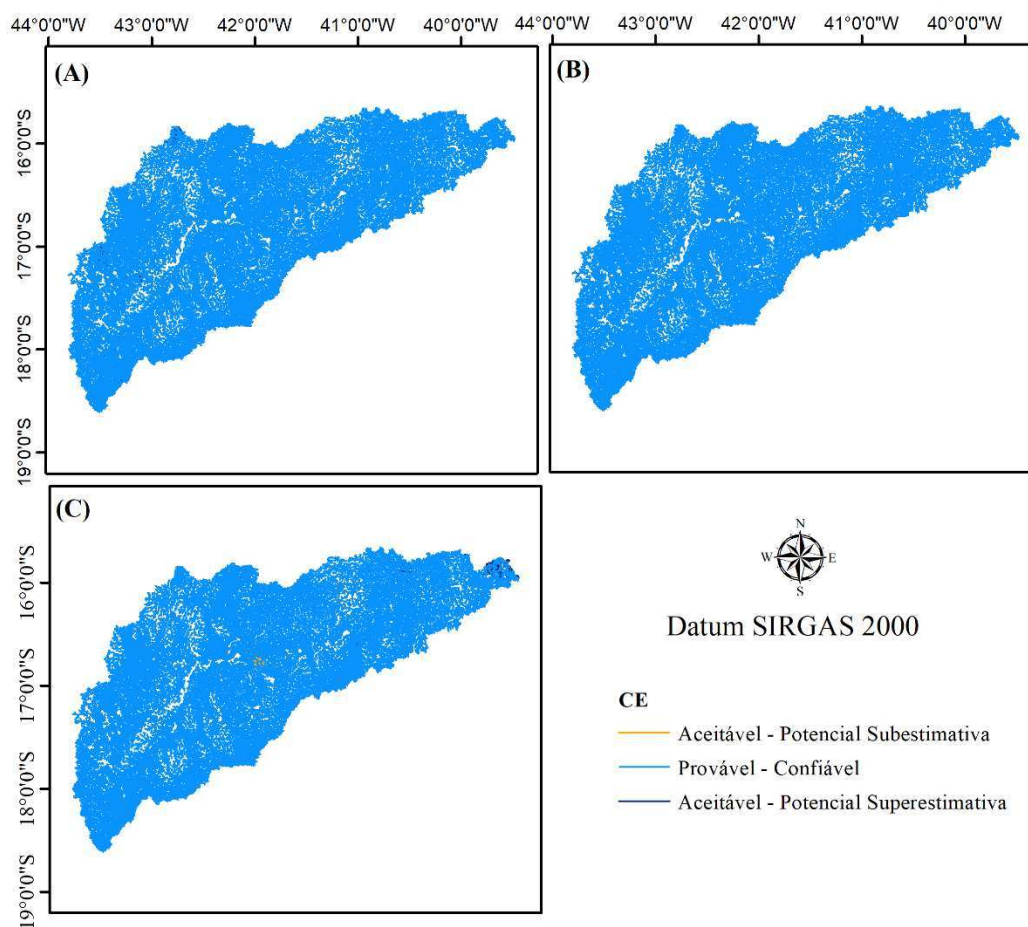


Figura 37 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha conforme o risco associado aos valores de CE, considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq_{600} (B) e Peq_{ETRG} (C).

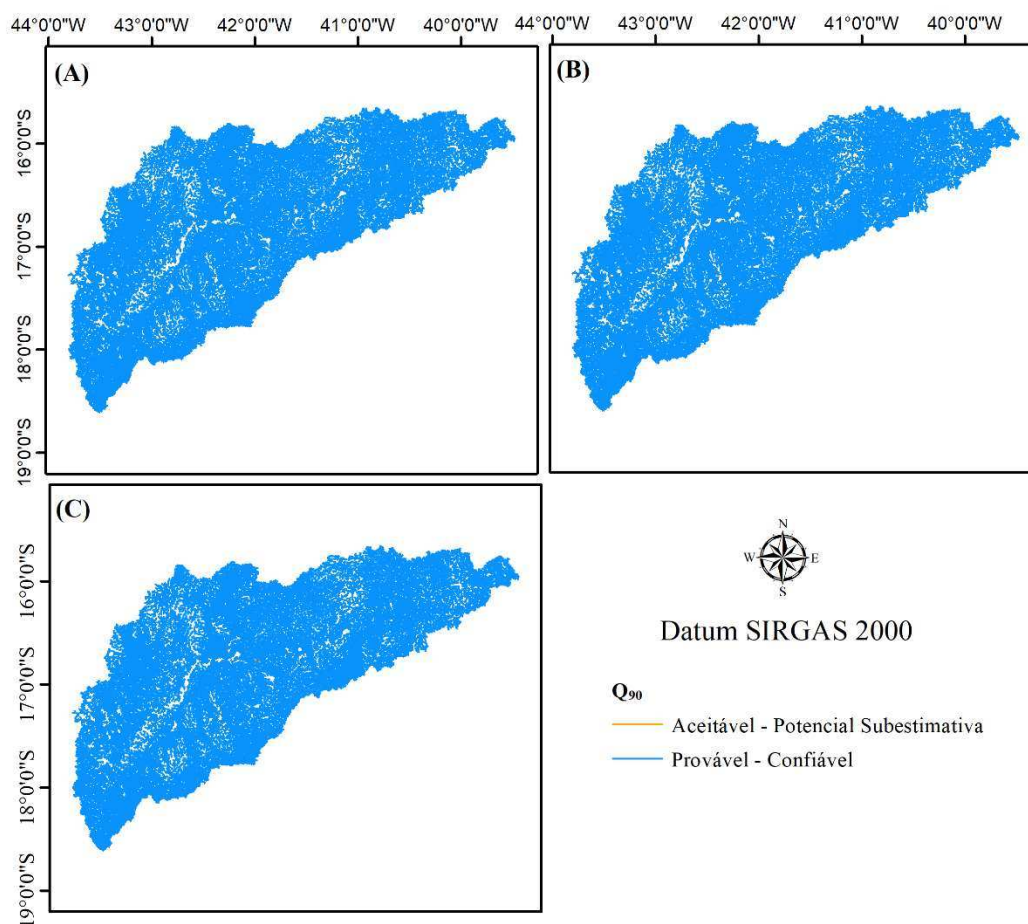


Figura 38 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha conforme o risco associado aos valores de q_{90} , considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq_{600} (B) e Peq_{ETRG} (C).

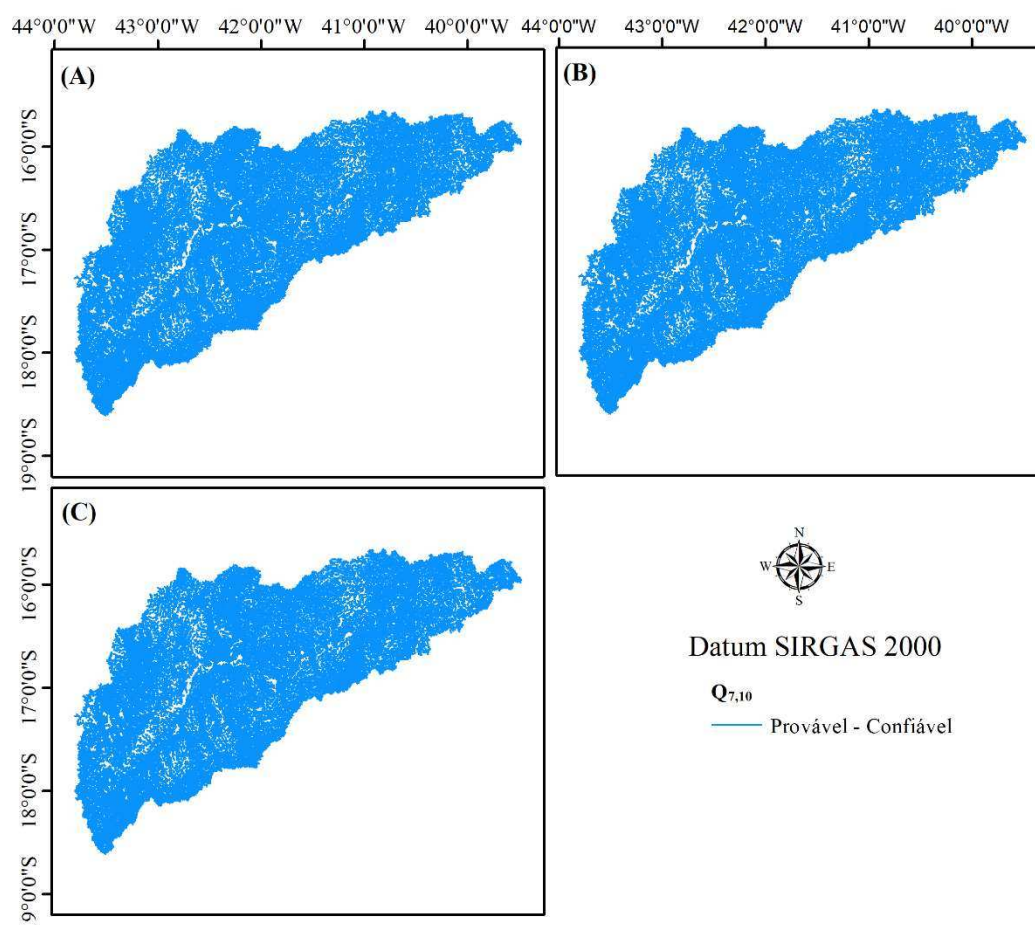


Figura 39 – Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha conforme o risco associado aos valores de $q_{7,10}$, considerando as variáveis independentes Peq (A), Peq_{600} (B) e Peq_{ETRG} (C).

1.4 CONCLUSÃO

Os resultados permitiram as seguintes conclusões:

- O GLEAM apresentou menores erros e uma tendência de subestimativa da ETR, em relação ao balanço hídrico das estações, nas três bacias de estudo. Por outro lado, o MOD16 apresentou maiores erros e uma tendência de subestimar os valores de ETR nas bacias do Grande e Paracatu e de superestimar na bacia do Jequitinhonha.

- Na bacia do Grande, os modelos de regionalização de vazões médias e mínimas utilizando as variáveis Peq_{750} , $BHeq_M$, $BHeq_G$, $BHeq_{GM}$ apresentaram desempenhos similares e

representativos. Contudo, considerando que dentre essas variáveis a única que considera as variações das condições edafoclimáticas e vegetativas ao longo da bacia é a BHeq_G, conclui-se que esta é a variável mais recomendada para a regionalização de vazões nessa bacia.

- Para a bacia do Paracatu, na regionalização da Q_{mld} as variáveis Peq₇₅₀, BHeq_M e BHeq_G apresentaram desempenho estatístico e físico similares e satisfatórios. Dentre essas, a BHeq_M apresentou maior proporção de trechos na classe de valores confiáveis na análise de risco e, portanto, representa estimativas mais seguras no âmbito do planejamento e gestão de recursos hídricos. Essa variável, apesar de não considerar a variação das condições edafoclimáticas ao longo da bacia, possibilita sair do empirismo decorrente do uso de um valor pré-estabelecido como no caso da Peq₇₅₀. Para as vazões mínimas, a BHeq_{GM} apresentou melhor desempenho para a RHH 1. Para as outras RHH não foram observadas diferenças expressivas entre os resultados das variáveis Peq₇₅₀, BHeq_M, BHeq_G, BHeq_{GM}, sendo nesses casos recomendável o uso da BHeq_G por possuir maior representatividade física.

- Para a bacia do Jequitinhonha, os modelos de regionalização de vazões que utilizaram a BHeq_G conduziram a resultados mais representativos, principalmente em relação ao uso da Peq.

- Os modelos de regionalização que consideraram a ETR do MOD16 só apresentaram bons resultados nos casos em que se utilizou o valor de ETR_M. Isto ocorreu devido a inconsistências apresentadas pelo produto em função, principalmente, de seu maior nível de detalhamento. No caso da bacia do Jequitinhonha, não foi possível usar o MOD16, uma vez que resultou em balanço hídrico negativo em grande parte da bacia.

- O produto GLEAM, por representar a ETR de uma forma mais suavizada, possibilitou a obtenção de bom desempenho dos modelos de regionalização de vazões na maioria das condições analisadas.

- A utilização da evapotranspiração real como fator de abstração da precipitação conduziu a um bom desempenho e uma boa representatividade dos modelos de regionalização de vazões.

REFERÊNCIAS

AIBA (Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia). **Anuário Agropecuário Oeste da Bahia—Safrá 2015/2016**. Disponível em: <<http://aiba.org.br/wp-content/uploads/2018/06/anuario-16-17.pdf>>. Acesso em: 15 julho de 2018.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, p. 18, 2013.

- ANDRADE, A. C.; LEAL, L. R.; GUIMARÃES, R. F. Estudo dos Processos Erosivos na Bacia do Rio Grande (BA) como Subsídio ao Planejamento Agroecológico. **Boletim de Pesquisa e desenvolvimento**, v. 63, p. 26, 2002.
- ARSENAULT, R.; BRETON-DUFOUR, M.; POULIN, A.; DALLAIRE, G.; ROMERO-LOPEZ, R. Streamflow prediction in ungauged basins: analysis of regionalization methods in a hydrologically heterogeneous region of Mexico. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 11, p. 1297–1311, 18 ago. 2019.
- ARSENAULT, R.; BRISSETTE, F. P. Continuous streamflow prediction in ungauged basins: The effects of equifinality and parameter set selection on uncertainty in regionalization approaches. **Water Resources Research**, v. 50, n. 7, p. 6135–6153, jul. 2014.
- BAIK, J.; CHOI, M. Evaluation of geostationary satellite (COMS) based Priestley–Taylor evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v. 159, p. 77–91, set. 2015.
- BAO, Z.; ZHANG, J.; LIU, J.; FU, G.; WANG, G.; HE, R.; YAN, X.; JIN, J.; LIU, H. Comparison of regionalization approaches based on regression and similarity for predictions in ungauged catchments under multiple hydro-climatic conditions. **Journal of Hydrology**, v. 466–467, p. 37–46, out. 2012.
- BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M.; WAGENER, T.; SAVENIJE, H.; VIGLIONE, A. **Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis Across Processes, Places and Scales**. Cambridge University Press, 2013.
- BRASIL. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia do Paracatu - PLANPAR**. CONSORCIO MAGNA, DAM, EYSER, 1998.
- CISLAGHI, A.; MASSERONI, D.; MASSARI, C.; CAMICI, S.; BROCCA, L. Combining a rainfall–runoff model and a regionalization approach for flood and water resource assessment in the western Po Valley, Italy. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 3, p. 348–370, 17 fev. 2020.
- MORIASI, J. D. N.; G. ARNOLD; M. W. VAN LIEW; R. L. BINGNER; R. D. HARMEL; T. L. VEITH. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.
- NOVAES, L. F. **Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu**. 2005. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- DEMBÉLÉ, M.; HRACHOWITZ, M.; SAVENIJE, H. H. G.; MARIÉTHOZ, G.; SCHAEFLI, B. Improving the Predictive Skill of a Distributed Hydrological Model by Calibration on Spatial Patterns With Multiple Satellite Data Sets. **Water Resources Research**, v. 56, n. 1, jan. 2020.
- ENGELAND, K.; HISDAL, H. A Comparison of Low Flow Estimates in Ungauged Catchments Using Regional Regression and the HBV-Model. **Water Resources Management**, v. 23, n. 12, p. 2567–2586, set. 2009.

- EUCLYDES. **Atlas digital das águas de Minas**. Disponível em: <http://www.atlasdasaguas.ufv.br/paracatu/impacto_ambiental_relevante_na_bacia_do_rio_paracatu_em_minas_gerais.html>. Acesso em: 10 de novembro de 2019
- EUCLYDES. **Atualização dos estudos hidrológicos na bacia do rio Jequitinhonha**. 2011. Disponível em: <http://www.atlasdasaguas.ufv.br/jequitinhonha/resumo_jequitinhonha.html>. Acesso em: 02 de outubro de 2019.
- FILGUEIRAS, R.; RAMOS, M. C. A.; RIBEIRO, R. B.; GENEROSO, T. N.; DÁVILA, A. E.; GALVÃO, J. D. L. Produtos SRTM 3 RTC Na Caracterização Morfométrica E Topográfica: Uma Abordagem Comparativa. **Nativa**, v. 6, n. 1, p. 47, 2018.
- FRIEDL, M. A.; MCIVER, D. K.; HODGES, J. C. F.; ZHANG, X. Y.; MUCHONEY, D.; STRAHLER, A. H.; WOODCOCK, C. E.; GOPAL, S.; SCHNEIDER, A.; COOPER, A.; BACCINI, A.; GAO, F.; SCHAAF, C. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1–2, p. 287–302, nov. 2002.
- GONÇALVES, C. J.; MARTINS DE OLIVEIRA, A. C.; ROSA SILVA DE OLIVEIRA, J.; BALIEIRO RIBEIRO, R. Estudo de regionalização de vazões para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba. **SUSTENTARE**, v. 2, n. 2, p. 97–114, 2018.
- GONÇALVES, R. D. N. **Diagnóstico ambiental da bacia do rio Jequitinhonha**. IBGE, , 1997. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv95902.pdf>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2020.
- GOOVAERTS, P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. **Journal of Hydrology**, v. 228, n. 1–2, p. 113–129, fev. 2000.
- HAMILTON, P.; CAMPBELL, J. **Measuring the Flow: The Importance of Streamgages**. U.S. Geological Survey (USGS). 2013. Disponível em: <https://archive.usgs.gov/archive/sites/www.usgs.gov/blogs/features/usgs_top_story/measuring-the-flow-part-1-the-importance-of-streamgages/index.html>. Acesso em: 07 de setembro de 2017.
- HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments**. Cambridge University Press, 1997.
- IGAM. **Plano diretor de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu : resumo executivo**. IGAM, 2006.
- IGAM; GPRH/UFV. **Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no Estado de Minas Gerais**. IGAM, 2012.
- KHAN, M. S.; LIAQAT, U. W.; BAIK, J.; CHOI, M. Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 252, p. 256–268, abr. 2018.

- KIM, H. W.; HWANG, K.; MU, Q.; LEE, S. O.; CHOI, M. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 2, p. 229–238, fev. 2012.
- KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, v. 5, p. 89–97, 16 dez. 2005.
- KULT, J. M.; FRY, L. M.; GRONEWOLD, A. D.; CHOI, W. Regionalization of hydrologic response in the Great Lakes basin: Considerations of temporal scales of analysis. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 2224–2237, 27 nov. 2014.
- KUNNATH-POOVAKKA, A.; RYU, D.; RENZULLO, L. J.; GEORGE, B. The efficacy of calibrating hydrologic model using remotely sensed evapotranspiration and soil moisture for streamflow prediction. **Journal of Hydrology**, v. 535, p. 509–524, abr. 2016.
- LAAHA, G.; BLÖSCHL, G. A comparison of low flow regionalisation methods—catchment grouping. **Journal of Hydrology**, v. 323, n. 1–4, p. 193–214, maio 2006.
- LEE, YEH. Impact of Climate Change and Human Activities on Streamflow Variations Based on the Budyko Framework. **Water**, v. 11, n. 10, p. 2001, 26 set. 2019.
- LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233–241, jan. 1999.
- LI, Z.; LIU, W.; ZHANG, X.; ZHENG, F. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, p. 35–42, 2009.
- LIEW, M. W. V.; MITTELSTET, A. R. Comparison of three regionalization techniques for predicting streamflow in ungaged watersheds in Nebraska, USA using SWAT mode. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 11, n. 3, p. 110–119, 1 jun. 2018.
- LISBOA, L.; MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Estimativa e Regionalização das Vazões Mínimas e Média na Bacia do Rio Paracatu. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, v. 16, n. 4, p. 471–479, 31 dez. 2008.
- LONG, D.; LONGUEVERGNE, L.; SCANLON, B. R. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites. **Water Resources Research**, v. 50, n. 2, p. 1131–1151, fev. 2014.
- LOPES, T. R.; DO PRADO, G.; ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; ANTONIEL, L. S. Regionalização de vazões máximas e mínimas para a bacia do rio Ivaí - PR. **IRRIGA**, v. 21, n. 1, p. 188, 18 jun. 2018.
- MALEKINEZHAD, H.; NACHTNEBEL, H. P.; KLIK, A. Comparing the index-flood and multiple-regression methods using L-moments. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 36, n. 1–4, p. 54–60, jan. 2011.

- MARTENS, B.; MIRALLES, D. G.; LIEVENS, H.; VAN DER SCHALIE, R.; DE JEU, R. A. M.; FERNÁNDEZ-PRIETO, D.; BECK, H. E.; DORIGO, W. A.; VERHOEST, N. E. C. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. **Geoscientific Model Development**, v. 10, n. 5, p. 1903–1925, 17 maio 2017.
- MASIH, I.; UHLENBROOK, S.; MASKEY, S.; AHMAD, M. D. Regionalization of a conceptual rainfall–runoff model based on similarity of the flow duration curve: A case study from the semi-arid Karkheh basin, Iran. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 1, p. 188–201, 14 set. 2010.
- MELO, M. C. A. A.; ASSUNÇÃO, W. L. L. BACIA DO RIO PARACATU: Regime Pluviométrico X Consumo de Água por Pivô Central. **Horizonte Científico**, v. 5, n. 2, 2011.
- MINAS GERAIS. **Proposta de instituição do comitê da bacia hidrográfica afluentes mineiros do alto Jequitinhonha (UPGRH-JQ1)**, 2009. Disponível em: <http://www.reunioes.semad.mg.gov.br/down.asp?x_caminho=reunioes/sistema/arquivos/material/&x_nome=9._Dossie_da_proposta_da_CBH_Alto_Jequitinhonha.pdf>. Acesso em: 10 de novembro de 2019
- MIRALLES, D. G.; HOLMES, T. R. H.; DE JEU, R. A. M.; GASH, J. H.; MEESTERS, A. G. C. A.; DOLMAN, A. J. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 7, n. 5, p. 8479–8519, 27 out. 2010.
- MOREIRA, A. A.; ADAMATTI, D. S.; RUHOFF, A. L. Avaliação dos produtos de evapotranspiração baseados em sensoriamento remoto MOD16 e GLEAM em sítios de fluxos turbulentos do Programa LBA. **Ciência e Natura**, v. 40, p. 112, 22 mar. 2018.
- MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D. **Atlas Hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Grande** Universidade Federal da Bahia – UFBA, , 2010. Disponível em: <<http://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/images/abook/pdf/Atlas%20hidrolgico%20da%20bacia%20hidrogrfica%20do%20Rio%20Grande.pdf>>. Acesso em: 12 dezembro de 2018
- MU, Q.; HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 4, p. 519–536, dez. 2007.
- MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781–1800, ago. 2011.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.
- NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A. Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. **Journal of Hydrology**, v. 121, n. 1–4, p. 217–238, dez. 1990.
- NGUYEN, V. T.; DIETRICH, J.; UNİYAL, B. Modeling interbasin groundwater flow in karst areas: Model development, application, and calibration strategy. **Environmental Modelling & Software**, v. 124, p. 104606, fev. 2020.

- NOVAES, L. F. **Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu**. 2005. 104f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- NOVAES, L.F.; PRUSKI, F.; QUEIROZ, D.; RODRIGUEZ, R.; SILVA, D.; RAMOS, M. Avaliação do Desempenho de Cinco Metodologias de Regionalização de Vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, p. 51–61, 2007.
- NRUTHYA, K.; SRINIVAS, V. V. Evaluating Methods to Predict Streamflow at Ungauged Sites Using Regional Flow Duration Curves: A Case Study. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 641–648, 2015.
- Numerical Terradynamic Simulation Group**. Disponível em: <<https://www.ntsg.umt.edu/project/project/modis/mod16.php>>. Acesso em: 25 outubro 2019.
- OLIVEIRA, F. A. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: estudo de caso da bacia do rio Grande**. 2008. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- OLIVEIRA, J.R.S. **Aprimoramento do processo de regionalização de vazões visando o planejamento e a gestão de recursos hídricos**. 2019. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) -Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.
- PATRA, K.C.. **Hydrology and Water Resources Engineering**. Alpha Science International. Distribution in North America by CRC Press LLC, Pangbourne, UK, 561p. 2001.
- PANDEY, G. R.; NGUYEN, V.-T.-V. A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. **Journal of Hydrology**, v. 225, n. 1–2, p. 92–101, nov. 1999.
- PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. DA; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 615–622, dez. 2007.
- PIMENTEL, M. L. **Mudanças de uso da terra e expansão da agricultura no oeste da Bahia**. EMBRAPA, 2011. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/87973/1/BPD-201-Mudanca-uso-Oeste-Bahia.pdf>>. Acesso em: 2 novembro de 2019
- PRUSKI, F. F.; NUNES, A. DE A.; PRUSKI, P. L.; RODRIGUEZ, R. DEL G. Improved regionalization of streamflow by use of the streamflow equivalent of precipitation as an explanatory variable. **Journal of Hydrology**, v. 476, p. 52–71, jan. 2013.
- PRUSKI, F. F.; NUNES, A. DE A.; REGO, F. S.; DE SOUZA, M. F. Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. **Water Resources and Irrigation Management**, p. 10, 2012.
- QAMAR, M. U.; GANORA, D.; CLAPS, P. Monthly Runoff Regime Regionalization Through Dissimilarity-Based Methods. **Water Resources Management**, v. 29, n. 13, p. 4735–4751, 1 out. 2015.

- RAO, A. R. SRINIVAS, V. V. Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. **Journal of Hydrology**, v. 318, n. 1–4, p. 37–56, mar. 2006.
- RAMOELO, A.; MAJOZI, N.; MATHIEU, R.; JOVANOVIĆ, N.; NICKLESS, A.; DZIKITI, S. Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) using Flux Tower Data in the African Savanna, South Africa. **Remote Sensing**, v. 6, n. 8, p. 7406–7423, 11 ago. 2014.
- RAZAVI, T.; COULIBALY, P. Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 8, p. 958–975, ago. 2013.
- REGO, F. S. **Regionalização de vazões considerando a evapotranspiração real em seu processo de formação**. 53f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- RIBEIRO, C. B. DE M.; MARQUES, F. DE A.; SILVA, D. D. Estimativa e regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia do rio Doce. **Engenharia na Agricultura**, v. 13, n. 2, p. 103–117, 2005.
- RODRIGUEZ, R. D. G. **Proposta conceitual para a regionalização de vazões**. 2008. 181f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- RUHOFF, A. **Validação do modelo de estimativa de evapotranspiração mod16 no estado do Rio Grande do sul (BRASIL)**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSO HÍDRICOS, 11, 2015. Brasília. Anais... 2015
- RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; ARAGAO, L. E. O. C.; MU, Q.; MALHI, Y.; COLLISCHONN, W.; ROCHA, H. R.; RUNNING, S. W. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 8, p. 1658–1676, nov. 2013.
- SAMUEL, J.; COULIBALY, P.; METCALFE, R. A. Estimation of Continuous Streamflow in Ontario Ungauged Basins: Comparison of Regionalization Methods. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, n. 5, p. 447–459, maio 2011.
- SASIDHARAN, L.; WU, K.-F.; MENENDEZ, M. Exploring the application of latent class cluster analysis for investigating pedestrian crash injury severities in Switzerland. **Accident Analysis & Prevention**, v. 85, p. 219–228, dez. 2015.
- SERRANO, L. D. O.; RIBEIRO, R. B.; OLIVEIRA, J. R. S. DE; RAMOS, M. C. A.; GENEROSO, T. N.; PRUSKI, F. F. **Quantificação da disponibilidade hídrica superficial na bacia do rio grande (BA)**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13, 2019. Foz do Iguaçu. Anais...2019
- SERRANO, L. DE O.; RIBEIRO, R. B.; BORGES, A. C.; PRUSKI, F. F. Low-Flow Seasonality and Effects on Water Availability throughout the River Network. **Water Resources Management**, 31 jan. 2020.

- SINGH, J.; KNAPP, H. V.; DEMISSIE, M. **Hydrologic Modeling of the Iroquois River Watershed Using HSPF and SWAT**. Illinois State Water Survey Contract Report, 2004. Disponível em: < <https://swat.tamu.edu/media/90101/singh.pdf> >. Acesso em: 02 de fevereiro de 2020.
- SIVAPALAN, M. Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology. **Hydrological Processes**, v. 17, n. 15, p. 3163–3170, 30 out. 2003.
- SMITH, T.; MARSHALL, L.; SHARMA, A. Predicting hydrologic response through a hierarchical catchment knowledgebase: a Bayes empirical Bayes approach. **Water Resources Research**, v. 50, n. 2, p. 1189–1204, 2014.
- SOUSA, J. R. C. **Hydrology Plus: sistema computacional para estudos meteorológicos e hidrológicos**. 2017. 131f. Tese (Doutorado em Meteorologia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017
- SWAIN, J. B.; PATRA, K. C. Streamflow estimation in ungauged catchments using regionalization techniques. **Journal of Hydrology**, v. 554, p. 420–433, nov. 2017.
- TOBIN, K.; BENNETT, M. Improving Alpine Summertime Streamflow Simulations by the Incorporation of Evapotranspiration Data. **Water**, v. 11, n. 1, p. 112, 10 jan. 2019.
- VASQUEZ, N.; VARGAS, X. Streamflow estimation in ungauged basins using remote sensed hydrological data. **EGU General Assembly Conference Abstracts**, v. 19, p. 1, 2017.
- VEZZA, P.; COMOGLIO, C.; ROSSO, M.; VIGLIONE, A. Low Flows Regionalization in North-Western Italy. **Water Resources Management**, v. 24, n. 14, p. 4049–4074, 2010.
- WANG, X.; HUANG, G.; LIN, Q.; NIE, X.; CHENG, G.; FAN, Y.; LI, Z.; YAO, Y.; SUO, M. A stepwise cluster analysis approach for downscaled climate projection – A Canadian case study. **Environmental Modelling & Software**, v. 49, p. 141–151, nov. 2013.
- YANG, X.; MAGNUSSON, J.; HUANG, S.; BELDRING, S.; XU, C.-Y. Dependence of regionalization methods on the complexity of hydrological models in multiple climatic regions. **Journal of Hydrology**, v. 582, p. 124357, 1 mar. 2020.
- YOUNG, A. R. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, v. 320, n. 1–2, p. 155–172, mar. 2006.
- ZAMOUM, S.; SOUAG-GAMANE, D. Monthly streamflow estimation in ungauged catchments of northern Algeria using regionalization of conceptual model parameters. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 11, p. 342, jun. 2019.
- ZHAO, J.; CHEN, X.; ZHANG, J.; ZHAO, H.; SONG, Y. Higher temporal evapotranspiration estimation with improved SEBS model from geostationary meteorological satellite data. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 14981, dez. 2019.

2 CAPÍTULO 2 - Otimização do processo de estimativa da disponibilidade hídrica mensal

RESUMO

A disponibilidade hídrica natural é representada pelas vazões mínimas, as quais geralmente são estimadas considerando uma base anual. Contudo, estudos têm mostrado que a estimativa dessas vazões em base mensal possibilita um melhor aproveitamento dos recursos hídricos. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi otimizar a estimativa da disponibilidade hídrica em base mensal ao longo da hidrografia. O estudo foi realizado para uma sub-bacia do rio Paracatu e para a bacia do rio Grande. As vazões consideradas foram a vazão mínima com permanência em 90% no tempo (Q_{90}) e a vazão mínima com sete dias de duração e dez anos de período de retorno ($Q_{7,10}$). Foram propostas duas metodologias: uma correspondente à regionalização de vazões em base mensal e outra à utilização da regionalização de vazões em base anual em conjunto com um fator multiplicativo baseado em análises estatísticas associadas às estações fluviométricas. O uso da regionalização de vazões mensais apresentou resultados satisfatórios para a bacia do Paracatu, mas não foram representativos para a bacia do Grande. Já o uso da análise estatística associada às estações fluviométricas apresentou melhor representatividade, sendo menos susceptível à ocorrência de incoerências como as observadas na regionalização mensal. Além disso, o nível de segurança associado às estimativas pode ser baseado na aplicação das estatísticas e adotado conforme as necessidades da bacia.

2.1 INTRODUÇÃO

As vazões dos rios consistem na resposta da produção hídrica em uma determinada área de drenagem e representam a principal fonte de água para uso humano e atendimento das necessidades ecológicas (KAM; SHEFFIELD, 2016). Assim, informações sobre o comportamento das vazões na bacia hidrográfica são importantes para um adequado planejamento e gestão de recursos hídricos (HANNAFORD; BUYS, 2012)

A disponibilidade natural dos cursos d'água é representada pelas vazões mínimas (SMAKHTIN, 2001). Estimar essas vazões é essencial para questões como manutenção da qualidade da água, irrigação e planejamento e gestão de recursos hídricos (OUYANG, 2012).

Existem vários métodos para a determinação das vazões mínimas, dentre eles estão as vazões baseadas na curva de permanência e na proporção de anos em que são excedidas

(OUYANG, 2012). A curva de permanência relaciona os valores de vazão com a porcentagem de tempo em que ela é igualada ou excedida, por exemplo, a Q_{90} é a vazão que pode ser encontrada no rio em pelo menos 90% do tempo. O outro método está relacionado ao intervalo de recorrência em que a vazão do rio é inferior a determinado valor (SMAKHTIN, 2001), dentre as vazões baseadas nessa metodologia, a vazão mínima com sete dias de duração e dez anos de período de retorno ($Q_{7,10}$) é a mais utilizada. Essa vazão representa condições mais extremas de vazão mínima correspondendo a uma vazão associada entre 95 a 99,5% de permanência no tempo (SMAKHTIN, 2001).

As vazões mínimas são amplamente utilizadas como referência para concessão de retiradas (BOF et al., 2013; LELIS et al., 2020). No Brasil as vazões mais usadas nesse sentido são a $Q_{7,10}$, a Q_{90} e a vazão mínima com 95% de permanência (Q_{95}) (LELIS et al., 2020), sendo que cada estado estabelece sua vazão de referência (GOMES; FERNANDES, 2017). Por exemplo, Minas Gerais adota a $Q_{7,10}$, sendo por isso conhecido como um estado conservador, uma vez que essa vazão é mais restritiva, por outro lado a Bahia é mais permissível e utiliza a Q_{90} .

A estimativa das vazões mínimas geralmente é feita considerando todos os valores da série de dados, representando a condição anual. Contudo, no Brasil existe uma variedade de regimes hidrológicos, sendo que na maior parte das regiões as vazões são caracterizadas pela existência de uma sazonalidade, isto é, no período mais seco as vazões são menores e no período chuvoso são maiores (ANA, 2013). Nesse contexto, o uso de um valor de referência representativo das condições anuais pode restringir a disponibilidade hídrica a um período específico do ano. Por outro lado, a utilização das vazões em base mensal pode resultar em um melhor aproveitamento do uso da água (BOF et al., 2013; OLIVEIRA; PRUSKI; NUNES, 2013; SERRANO et al., 2020). Em função disso a ANA, responsável pela concessão de outorgas em cursos d'água de dominialidade federal, tem procurado, sempre que possível, adotar as vazões mensais ao invés das anuais.

No estudo realizado por Bof et al. (2013) para a bacia do Paracatu, foi avaliada a utilização das vazões $Q_{7,10}$ e Q_{95} obtidas na base anual e mensal e concluiu-se que o uso das vazões mensais possibilita um melhor plano de utilização da água, permitindo maiores retiradas nos meses de maior disponibilidade e menores nos períodos mais críticos. Oliveira et al. (2013) também realizaram um estudo para essa bacia e observaram que o uso da $Q_{7,10}$ em base mensal em relação a anual possibilita aumentos na disponibilidade hídrica de até 235%. Resultado similar foi constatado por Serrano et al. (2020) para bacia do Piranga, onde os aumentos de disponibilidade aproximaram de 150%.

O estudo das vazões é limitado a locais com estações de medição, contudo em um contexto regional é necessário obter essas informações ao longo da hidrografia (VEZZA et al., 2010) o que é um desafio enfrentado frequentemente pelos hidrólogos (LELIS et al., 2020). Sendo assim, são necessárias técnicas de transferência de informações de locais com monitoramento para locais onde essas informações são inexistentes. Apesar de diversos estudos terem sido desenvolvidos com o intuito de melhorar a estimativa da disponibilidade hídrica ao longo da hidrografia, não existe um método que seja consagrado como única solução (ZAMOUM; SOUAG-GAMANE, 2019), sendo o melhor aquele que mais se ajusta as condições da bacia e à quantidade e à qualidade dos dados disponíveis, fornecendo estimativas confiáveis.

Levando-se em conta que a importância da estimativa da disponibilidade hídrica em base mensal para um melhor aproveitamento da água, principalmente devido ao aumento dos cenários de conflito, no presente trabalho o objetivo foi otimizar a estimativa da disponibilidade hídrica em base mensal ao longo da hidrografia.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A otimização da estimativa das vazões mínimas mensais foi feita considerando duas formas apresentadas aqui como “Regionalização de vazões em base mensal” e “Análises estatísticas associadas às estações fluviométricas”. Na Figura 40 está apresentado o fluxograma dessas metodologias.

As etapas compreendidas desde “Variáveis dependentes e independentes” a “Identificação das regiões hidrologicamente homogêneas (RHH)” correspondem aos mesmos procedimentos descritos previamente no Capítulo 1.

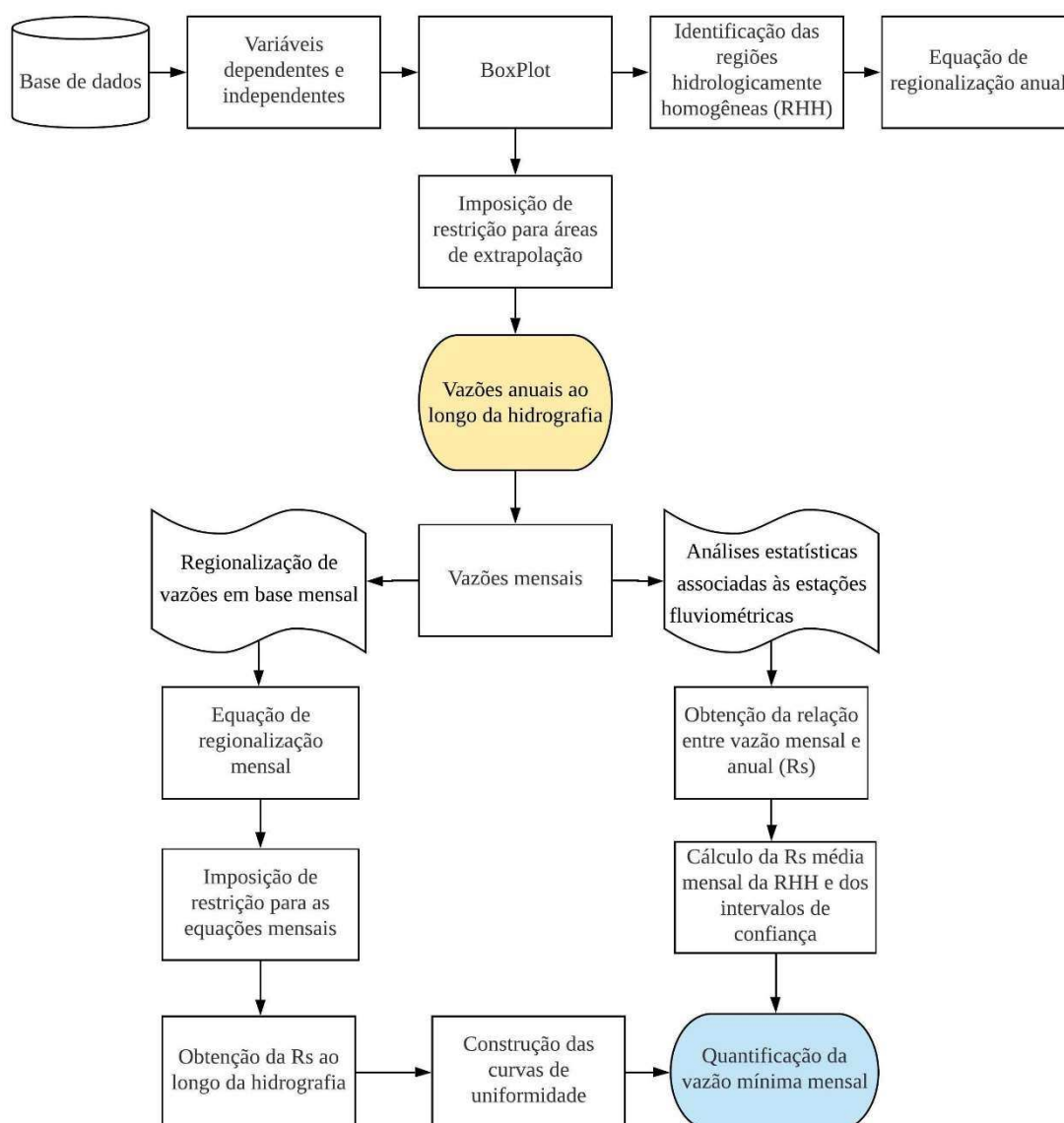


Figura 40 - Fluxograma da metodologia da otimização da estimativa da disponibilidade hídrica considerando as vazões sazonais.

2.2.1 Vazões regionalizadas em base anual

Considerando que no Capítulo 1 foram obtidas as equações de regionalização das vazões mínimas anuais (Q_{90} e $Q_{7,10}$), as quais foram avaliadas tanto estatisticamente como em relação ao comportamento das vazões espacializadas, a equação de melhor desempenho foi utilizada para o desenvolvimento deste capítulo. As equações 28 e 29 são as adotadas para a bacia do Paracatu e as equações 30 e 31 para a bacia do Grande.

$$Q_{90} = 0,2176BHeq^{0,9390} \quad (28)$$

$$Q_{7,10} = 0,0879BHeq^{0,9851} \quad (29)$$

$$Q_{90} = 0,4805BHeq^{0,9347} \quad (30)$$

$$Q_{7,10} = 0,4305BHeq^{0,9219} \quad (31)$$

De acordo com Pruski et al. (2012), as equações de regionalização tendem a apresentar grande amplitude de variação nas regiões de extrapolação, podendo acarretar em superestimativa das vazões e, portanto, criar falsa expectativa de disponibilidade hídrica. Para minimizar esse problema, Pruski et al. (2015) propuseram a imposição de uma restrição física, correspondente ao valor máximo de vazão específica observada, para estimativa das vazões mínimas nas regiões de extrapolação.

Após a espacialização da regionalização, o comportamento das vazões ao longo da hidrografia foi avaliado e, nos casos em que a vazão específica estimada pela equação de regionalização foi maior que o máximo observado nas estações fluviométricas da região homogênea considerada, foi feito o ajuste da vazão pela equação:

$$Q_{ajus} = q_{min_{lim}} A \quad (32)$$

em que: Q_{ajus} = vazão ajustada com base na restrição física estabelecida, m^3s^{-1} ; $q_{min_{lim}}$ = máxima q_{90} ou $q_{7,10}$ observada nas estações fluviométricas da RHH considerada para regionalização, $m^3s^{-1}km^{-2}$; A = área de drenagem do trecho considerado, km^2 .

2.2.2 Vazões em base mensal

As vazões mínimas em base mensal foram obtidas para as estações fluviométricas utilizando o programa HydrologyPlus (SOUSA, 2017). As vazões em base mensal são calculadas de maneira similar às obtidas em base anual, mas considerando um intervalo de tempo correspondente a cada mês.

2.2.3 Disponibilidade hídrica mensal a partir de regionalização de vazões em base mensal

Corresponde à obtenção da disponibilidade hídrica mensal a partir da realização de estudo de regionalização de vazões em base mensal. Essas equações foram obtidas utilizando as vazões Q_{90} e $Q_{7,10}$ em base mensal (variável dependente) e a variável independente vazão equivalente ao balanço hídrico (BHeq), que apresentou melhor desempenho nas análises realizadas e apresentadas no Capítulo 1. As equações geradas foram avaliadas através dos índices estatísticos coeficiente de determinação ajustado (R_{ajus}^2) e erro padrão (s_e).

As equações geradas em base mensal foram espacializadas e, assim como feito para base anual, foi aplicada a imposição de restrição física para estimativa das vazões mínimas nas regiões de extrapolação Pruski et al. (2015), sendo utilizado, nesse caso, o limite de restrição baseado nas vazões específicas observadas em cada mês.

2.2.3.1 Obtenção da relação entre as vazões anual e mensal (R_s) ao longo da hidrografia

A avaliação da regionalização de vazões em base mensal foi feita a partir da análise da relação entre as vazões obtidas em base anual e em base mensal ao longo da hidrografia. Essa relação foi definida aqui como relação de sazonalidade (R_s) e foi obtida para cada trecho (segmento compreendido entre duas confluências ou entre uma nascente e a confluência a jusante ou entre a confluência a montante e a foz da bacia), utilizando a equação:

$$R_{sQ90,i} = \frac{Q_{90_mensal_i}}{Q_{90_anual}} \quad (33)$$

$$R_{sQ7,10,i} = \frac{Q_{7,10_mensal_i}}{Q_{7,10_anual}} \quad (34)$$

em que: $R_{sQ90,i}$ = relação de sazonalidade para a Q_{90} do mês i ; $R_{sQ7,10,i}$ = relação de sazonalidade para a $Q_{7,10}$ do mês i ; Q_{90_anual} = é a Q_{90} em base anual; Q_{90_mensal} = é a Q_{90} em base mensal do mês i ; $Q_{7,10_anual}$ = é a $Q_{7,10}$ em base anual; $Q_{7,10_mensal}$ = é a $Q_{7,10}$ em base mensal do mês i .

Valores de R_s menores que a unidade indicam que a vazão mínima calculada em base mensal é menor que a calculada em base anual, não havendo, portanto, incremento de disponibilidade hídrica quando da consideração das vazões mensais.

2.2.3.2 Construção de curvas de uniformidade com os valores de R_s

Posteriormente, foram construídas as curvas de uniformidade que representam a relação entre os valores de R_s obtidos para cada trecho da hidrografia (ordenadas) e a frequência de ocorrência desses valores ao longo da hidrografia (abscissas), permitindo, portanto, observar a permanência dos valores de R_s na bacia de estudo.

2.2.4 Disponibilidade hídrica mensal a partir de análise estatística associada às estações fluviométricas

Esta metodologia considera a utilização de um estudo de regionalização de vazões em base anual em conjunto com um fator multiplicativo, de incremento ou de diminuição da disponibilidade, correspondente à análise estatística das R_s das estações fluviométricas. Essa análise é composta pelo valor médio obtido para a região hidrologicamente homogênea e os intervalos de confiança associados a ele. Levando-se em conta a variabilidade e as incertezas relacionadas à obtenção das vazões mínimas, a utilização do intervalo de confiança (IC) visa associar uma maior confiabilidade às estimativas, uma vez que um IC de 95% (equação 35) equivale a uma probabilidade de 95% de os intervalos conterem a verdadeira média.

Sendo assim, o nível de segurança associado às estimativas pode ser alterado de acordo com o que é pretendido para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, isto é, caso as condições médias da R_s sejam representativas do comportamento da região de estudo, pode-se optar pela utilização do seu valor médio, ou, se o interessante for obter estimativas mais seguras, pode-se trabalhar com o limite inferior do IC e ainda associar um maior nível de confiança a ele. A utilização do valor inferior associa uma maior segurança à estimativa, uma vez que, por ser menor que a média, conduz a menores incrementos nos meses de maior disponibilidade hídrica e a maiores reduções nos meses mais secos, reduzindo, assim, o risco de superestimativa das vazões mínimas mensais. No presente trabalho, foram utilizados os IC associados a um nível de confiança de 95%, obtidos pela equação:

$$IC_R = \overline{R_{s_m}} \pm 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (35)$$

em que: IC_R = intervalo de confiança das relações entre as vazões mínimas anuais e mensais para cada mês; $\overline{R_{s_m}}$ = média da R_s das estações da RHH; σ = desvio padrão para cada mês; e N = número de estações fluviométricas na região hidrologicamente homogênea considerada.

2.2.5 Estudos de caso

Os procedimentos metodológicos utilizados para otimização da estimativa da disponibilidade hídrica considerando as vazões sazonais foi aplicado para a RHH 2 da bacia do Paracatu e para a bacia do Grande, apresentadas no Capítulo 1, uma vez que essas apresentaram modelos de regionalização de vazões mais representativos.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Comportamento das vazões mensais e anuais nas estações fluviométricas

Nas Figuras 41 e 42 são apresentados, os gráficos com a média da q_{90} e da $q_{7,10}$ correspondentes às estações fluviométricas utilizadas no estudo, em base mensal e anual, e a precipitação mensal média obtida para as estações pluviométricas 01746007 e 01145014, para a sub-bacia do Paracatu e para a bacia Grande, respectivamente.

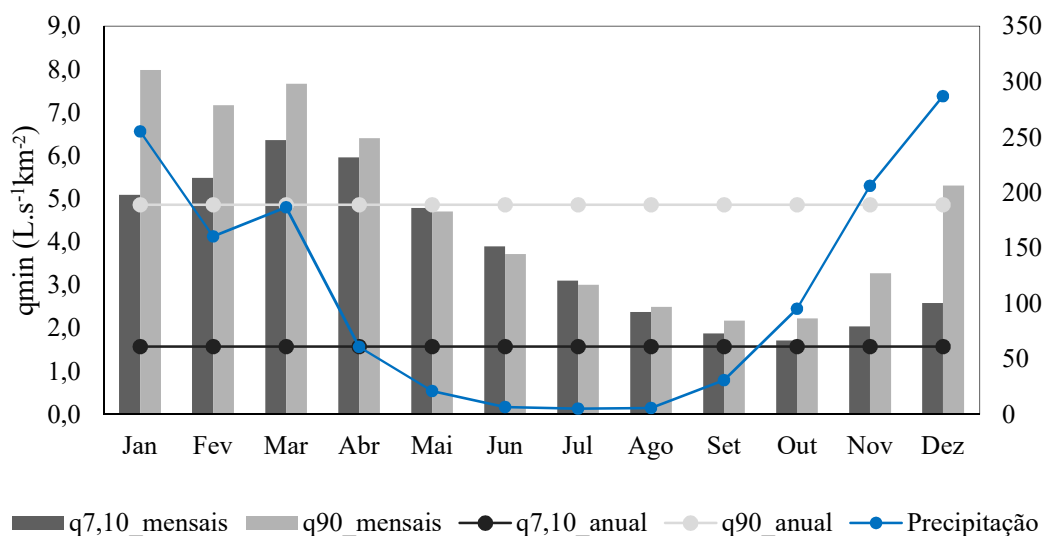


Figura 41 – Variação da q_{90} e da $q_{7,10}$ mensal ao longo do ano, vazões anuais e a precipitação mensal média correspondente à estação pluviométrica (01746007), para a sub-bacia do Paracatu.

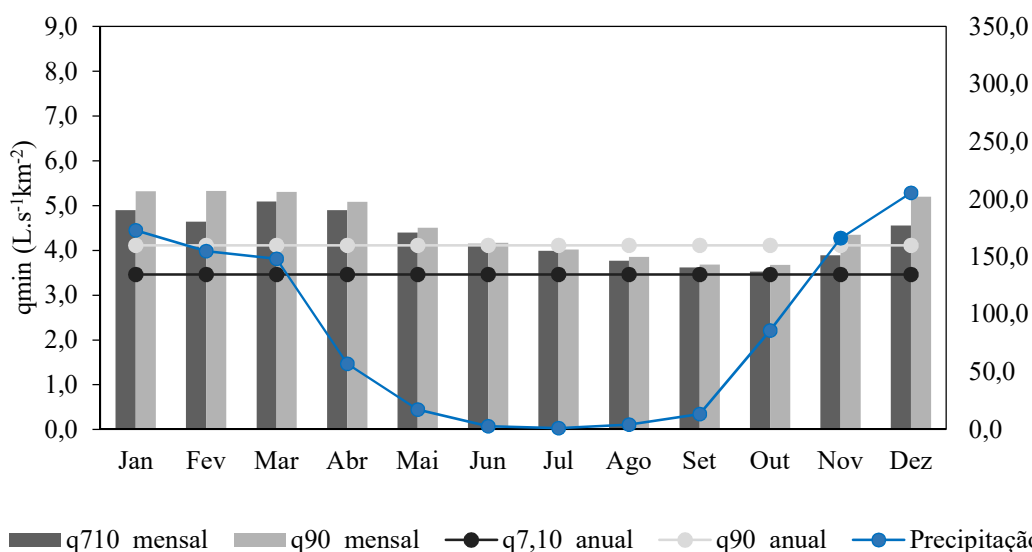


Figura 42 – Variação da q_{90} e da $q_{7,10}$ mensal ao longo do ano, vazões anuais e a precipitação mensal média correspondente à estação pluviométrica (01145014), para a bacia do Grande.

Na a sub-bacia do Paracatu (Figura 41), as vazões específicas em base anual são $3,29 \text{ L.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ para a q_{90} e $1,57 \text{ L.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ para a $q_{7,10}$, enquanto a variação das vazões específicas mensais é de $2,17$ (outubro) a $7,98 \text{ L.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (janeiro) e de $1,71$ (outubro) a $6,36 \text{ L.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (março) para a q_{90} e $q_{7,10}$, respectivamente. Na bacia do Grande (Figura 42), a variação das vazões específicas mensais é de $3,70$ (outubro) a $5,33 \text{ L.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (fevereiro) e de $3,53$ (outubro)

a $5,10 \text{ L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ (março) respectivamente para a q_{90} e $q_{7,10}$, enquanto as vazões específicas em base anual são para a q_{90} $4,11 \text{ L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ e $3,46 \text{ L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ para a $q_{7,10}$. Observa-se que a $q_{7,10}$ é menor que a q_{90} , sendo, em base anual, equivalente a uma vazão com permanência entre 99 e 100% no tempo para a maioria das estações da sub-bacia do Paracatu e da bacia do Grande.

Analisando o comportamento das vazões ao longo do ano, observa-se uma diminuição das vazões específicas mensais nos meses de maio a outubro, havendo uma maior aproximação das vazões em base anual, o que ocorre em função do deplecionamento do lençol freático devido à ocorrência de menores precipitações, nesse período, que não são suficientes para garantir sua recarga. A partir de novembro, as vazões aumentam apresentando maiores magnitudes até o mês de abril. Comparando o comportamento das vazões mínimas com o da precipitação, observa-se que, embora as precipitações se iniciem em setembro, o aumento das vazões mínimas só ocorre no mês de novembro. Essa defasagem ocorre porque as vazões mínimas são formadas principalmente do escoamento subterrâneo e as primeiras precipitações são utilizadas para suprir o déficit de umidade do solo, não sendo suficiente para recarregar o aquífero e aumentar a contribuição subterrânea (OLIVEIRA; PRUSKI; NUNES, 2013; PRUSKI et al., 2014).

Observa-se que a $q_{7,10}$ em base anual é menor que a obtida em base mensal para todos os meses, mostrando o quão restritiva é essa vazão e como a sua utilização em base mensal pode potencializar o aumento do uso da água. Por outro lado, a Q_{90} em base mensal é maior que a anual no período de dezembro a abril na sub-bacia do Paracatu e de novembro a maio na bacia do Grande, sendo menor nos outros meses. Esse resultado indica que o uso da Q_{90} em base anual é muito restritivo em alguns meses e muito permissivo em outros e que o uso da base mensal pode possibilitar uma melhor alocação do uso da água.

As diferenças entre o comportamento da $Q_{7,10}$ e Q_{90} estão relacionadas principalmente aos processos de estimativas dessas vazões. Para obtenção da $Q_{7,10}$ anual primeiramente é feito o cálculo das vazões mínimas com duração de sete dias (Q_7) para cada ano da série e selecionado o menor valor Q_7 de cada ano. Posteriormente é aplicada uma função de distribuição de probabilidade sobre os valores de Q_7 selecionados para estimar o valor representativo da série. No caso das mensais, é feita uma análise similar, mas considerando um intervalo de tempo correspondente a cada mês. Sendo assim, a $Q_{7,10}$ anual tende a ser no máximo igual a $Q_{7,10}$ do mês mais seco. Situações contrárias a essa podem ocorrer, devido à presença de valores extremos de Q_7 na série histórica que acarreta altos desvios padrão e produz valores anômalos de $Q_{7,10}$ (SERRANO et al., 2020).

A Q_{90} é estimada com base em uma distribuição de frequência gerada com base em todos os valores da série de interesse (OUYANG, 2012; SERRANO et al., 2020). Assim, para estimativa da Q_{90} anual são utilizados todos os valores da série, sendo o valor de Q_{90} aquele observado em pelo menos 90% do tempo. No caso da Q_{90} mensal, a série histórica é dividida em meses, diminuindo a variabilidade. A distribuição de frequência dos meses chuvosos é formada por valores mais altos de vazão, portanto as Q_{90} desses meses tendem a ser maiores. Já no período seco, tem-se a situação oposta, e o valor selecionado terá uma permanência de 90% do tempo dentre valores mínimos de vazões.

Na bacia do Grande, os valores das vazões q_{90} e $q_{7,10}$, tanto em base anual como mensal, são mais próximos entre si e, embora seja observada uma sazonalidade das vazões, esta é bem menos expressiva em comparação a da sub-bacia do Paracatu. A diferença dos resultados pode estar relacionada aos sistemas aquíferos predominantes nessas bacias. Na sub-bacia do Paracatu os aquíferos cársticos apresentam uma recessão mais acentuada, esgotando-se mais rapidamente (VASCONCELOS, 2014), o que pode estar relacionado a maior proporção de ascensão das vazões mínimas no período chuvoso e uma proporção acentuada de declínio no período de estiagem (OLIVEIRA, 2017). A bacia do Grande conta com a presença do aquífero Urucuaia, o qual funciona como regulador de vazões dos afluentes da margem esquerda do médio São Francisco (GASPAR; CAMPOS, 2007).

Na bacia do Grande, embora o potencial de aproveitamento da variação sazonal das vazões seja menor, o aumento da disponibilidade hídrica possibilitado pela substituição da vazão mínima de referência obtida em base anual pela mensal pode apresentar um ganho relevante, uma vez que a região é caracterizada por uma expressiva exploração agrícola e apresenta situações em que a vazão máxima outorgável já foi atingida (SILVA et al., 2005, citado por GASPAR; CAMPOS, 2007).

Portanto, o comportamento sazonal das vazões pode ser utilizado a favor do planejamento e gestão de recursos hídricos potencializando o uso da água nos meses de maior disponibilidade hídrica e restringindo o seu uso nos períodos mais secos, favorecendo um melhor plano de utilização da água.

2.3.2 Disponibilidade hídrica mensal a partir de regionalização de vazões em base mensal

Nas Tabelas 16 e 17 estão apresentadas as equações de regionalização e os indicadores estatísticos para a sub-bacia do Paracatu e para a bacia do Grande, respectivamente. Observa-

se que as equações de regionalização obtidas tanto para a sub-bacia do Paracatu, como as da bacia Grande apresentaram bom desempenho estatístico, representado pelos altos valores de R_{ajus}^2 e baixos s_e . Comparando as duas bacias, a do Paracatu apresentou desempenho estatístico superior à do Grande.

Tabela 16 - Equações de regionalização mensal da sub-bacia do Paracatu e seus respectivos indicadores estatísticos

Mês	$Q_{7,10}$	Q_{90}	$Q_{7,10}$		Q_{90}	
			R_{ajus}^2	Se	R_{ajus}^2	Se
Janeiro	$Q_{7,10}=0,4017BHeq^{0,8834}$	$Q_{90}=0,4837BHeq^{0,9651}$	0,95	0,30	0,99	0,11
Fevereiro	$Q_{7,10}=0,4254BHeq^{0,8944}$	$Q_{90}=0,4866BHeq^{0,9327}$	0,98	0,17	0,99	0,14
Março	$Q_{7,10}=0,4595BHeq^{0,9067}$	$Q_{90}=0,5323BHeq^{0,9264}$	0,94	0,33	0,99	0,12
Abril	$Q_{7,10}=0,4691BHeq^{0,8843}$	$Q_{90}=0,4342BHeq^{0,9315}$	0,95	0,29	0,98	0,17
Mai	$Q_{7,10}=0,3658BHeq^{0,8929}$	$Q_{90}=0,3325BHeq^{0,9205}$	0,96	0,27	0,99	0,16
Junho	$Q_{7,10}=0,2773BHeq^{0,9148}$	$Q_{90}=0,2511BHeq^{0,9350}$	0,97	0,23	1,00	0,08
Julho	$Q_{7,10}=0,2177BHeq^{0,9191}$	$Q_{90}=0,2072BHeq^{0,9267}$	0,97	0,22	0,98	0,17
Agosto	$Q_{7,10}=0,1498BHeq^{0,9510}$	$Q_{90}=0,1483BHeq^{0,9699}$	0,98	0,18	1,00	0,09
Setembro	$Q_{7,10}=0,1137BHeq^{0,9635}$	$Q_{90}=0,1302BHeq^{0,9677}$	0,99	0,13	1,00	0,10
Outubro	$Q_{7,10}=0,0924BHeq^{0,9929}$	$Q_{90}=0,1308BHeq^{0,9714}$	0,98	0,18	0,99	0,14
Novembro	$Q_{7,10}=0,1406BHeq^{0,9224}$	$Q_{90}=0,1906BHeq^{0,9741}$	0,97	0,23	0,99	0,13
Dezembro	$Q_{7,10}=0,1289BHeq^{0,9995}$	$Q_{90}=0,2703BHeq^{1,011}$	0,92	0,41	0,99	0,13

Tabela 17 - Equações de regionalização mensal da bacia do Grande e seus respectivos indicadores estatísticos

Mês	$Q_{7,10}$	Q_{90}	$Q_{7,10}$		Q_{90}	
			R_{ajus}^2	Se	R_{ajus}^2	Se
Janeiro	$Q_{7,10}=0,5203BHeq^{0,9529}$	$Q_{90}=0,5828BHeq^{0,9468}$	0,92	0,21	0,92	0,21
Fevereiro	$Q_{7,10}=0,5094BHeq^{0,9461}$	$Q_{90}=0,5512BHeq^{0,9580}$	0,91	0,22	0,92	0,21
Março	$Q_{7,10}=0,5657BHeq^{0,9437}$	$Q_{90}=0,5489BHeq^{0,9576}$	0,91	0,22	0,91	0,22
Abril	$Q_{7,10}=0,4645BHeq^{0,9753}$	$Q_{90}=0,5070BHeq^{0,9655}$	0,93	0,20	0,93	0,20
Mai	$Q_{7,10}=0,4456BHeq^{0,9626}$	$Q_{90}=0,4513BHeq^{0,9644}$	0,93	0,19	0,93	0,19
Junho	$Q_{7,10}=0,4553BHeq^{0,9470}$	$Q_{90}=0,4461BHeq^{0,9518}$	0,93	0,19	0,93	0,19
Julho	$Q_{7,10}=0,4486BHeq^{0,9424}$	$Q_{90}=0,4406BHeq^{0,9471}$	0,93	0,19	0,94	0,18
Agosto	$Q_{7,10}=0,4403BHeq^{0,9343}$	$Q_{90}=0,4135BHeq^{0,9516}$	0,93	0,19	0,94	0,18
Setembro	$Q_{7,10}=0,3901BHeq^{0,9506}$	$Q_{90}=0,3839BHeq^{0,9572}$	0,94	0,18	0,94	0,18
Outubro	$Q_{7,10}=0,3358BHeq^{0,9753}$	$Q_{90}=0,3839BHeq^{0,9555}$	0,94	0,18	0,94	0,17
Novembro	$Q_{7,10}=0,3619BHeq^{0,9803}$	$Q_{90}=0,5513BHeq^{0,9190}$	0,94	0,19	0,93	0,18
Dezembro	$Q_{7,10}=0,4258BHeq^{0,9790}$	$Q_{90}=0,6170BHeq^{0,9315}$	0,92	0,21	0,93	0,19

Na Tabela 18 estão apresentadas as vazões específicas utilizadas como limite para a extrapolação das equações de regionalização.

Tabela 18 – Vazões específicas utilizadas como limite para a extrapolação das equações de regionalização.

Mês	Sub-bacia do Paracatu		Bacia do Grande	
	$q_{7,10}$ ($m^3s^{-1}km^{-2}$)	q_{90} ($m^3s^{-1}km^{-2}$)	$q_{7,10}$ ($m^3s^{-1}km^{-2}$)	q_{90} ($m^3s^{-1}km^{-2}$)
Anual	0,0045	0,0022	0,0006	0,0005
Janeiro	0,0071	0,0080	0,0074	0,0081
Fevereiro	0,0072	0,0100	0,0072	0,0082
Março	0,0087	0,0115	0,0077	0,0079
Abril	0,0084	0,0117	0,0072	0,0075
Mai	0,0066	0,0091	0,0063	0,0066
Junho	0,0055	0,0076	0,0059	0,0060
Julho	0,0044	0,0061	0,0057	0,0056
Agosto	0,0032	0,0050	0,0053	0,0054
Setembro	0,0026	0,0042	0,0049	0,0049
Outubro	0,0025	0,0039	0,0047	0,0050
Novembro	0,0029	0,0046	0,0056	0,0064
Dezembro	0,0042	0,0061	0,0065	0,0079

Os limites para extrapolação das vazões anuais foram 0,0045 e 0,0022 $m^3 s^{-1} km^{-2}$ na sub-bacia do Paracatu e 0,0006 e 0,0005 $m^3 s^{-1} km^{-2}$ na bacia do Grande para a q_{90} e $q_{7,10}$ respectivamente. Já para as vazões mensais esses limites variaram, na sub-bacia do Paracatu, de 0,0087 (outubro) a 0,0117 $m^3 s^{-1} km^{-2}$ (abril) para a q_{90} e de 0,0025 (outubro) a 0,0039 $m^3 s^{-1} km^{-2}$ (março) para a $q_{7,10}$. Na bacia do Grande, essa variação foi de 0,0049 (setembro) a 0,0082 $m^3 s^{-1} km^{-2}$ (fevereiro) para a q_{90} e de 0,0047 (outubro) a 0,0077 $m^3 s^{-1} km^{-2}$ (março) para a $q_{7,10}$.

Nas Figuras 43 e 44 são apresentadas as vazões específicas regionalizadas para o mês de março, que representa o período chuvoso, e para o mês de outubro, que representa o mês mais seco.

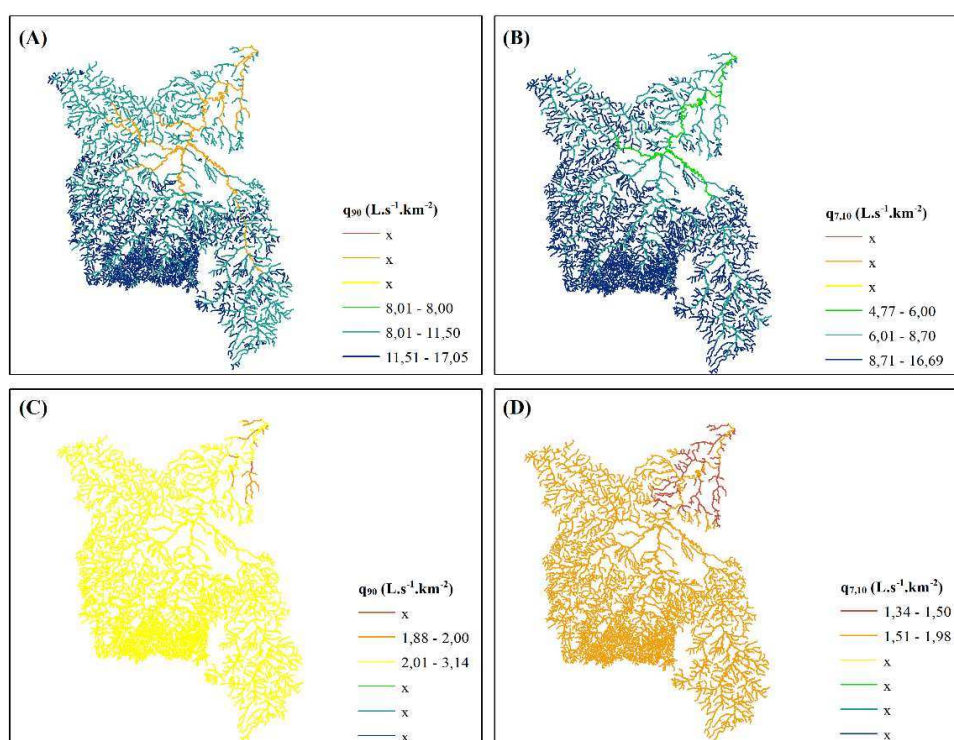


Figura 43 – Vazões específicas regionalizadas $q_{7,10}$ (A e C) e q_{90} (B e D) para o mês de março e de outubro, respectivamente, na sub-bacia do Paracatu.

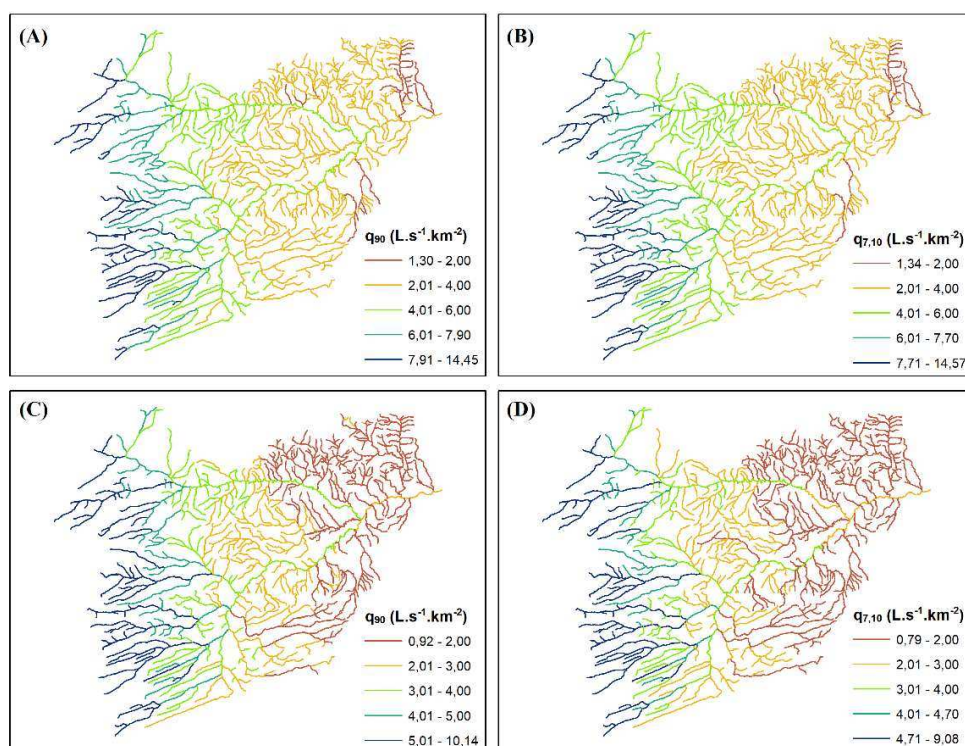


Figura 44 – Vazões específicas regionalizadas $q_{7,10}$ (A e C) e q_{90} (B e D) para o mês de março e de outubro, respectivamente, na bacia do Grande.

Observa-se que as vazões específicas decrescem no sentido da foz das bacias e as q_{90} apresentam maiores magnitudes em relação a $q_{7,10}$, sendo essa diferença mais expressiva na bacia do Paracatu (Figura 43). Além disso, é possível observar que do mês de março para o de outubro tem-se uma diminuição das vazões específicas estimadas, principalmente na bacia do Paracatu, assim como observado na análise dos dados das estações fluviométricas.

Na sub-bacia do Paracatu, para o mês de março, e na bacia do Grande (Figura 44), tanto para o mês de março como de outubro, observa-se estimativas que superam a maior vazão específica observada nas estações fluviométricas, as quais estão representadas pelo intervalo de classe de maior magnitude. Vazões específicas fora do intervalo de valores observados nas estações são possíveis de ocorrer, contudo são estimativas associadas a um maior nível de incerteza e, no caso em que superam as observadas, estão associadas a uma faixa de potencial superestimativa. Nesse sentido, com intuito de permitir uma maior segurança associada às estimativas, as vazões foram ajustadas aplicando o limite de extrapolação para cada mês conforme apresentado na Tabela 18.

2.3.2.1 Relação de sazonalidade ao longo da hidrografia

Nas Figuras 45 e 46 são apresentados os mapas com a distribuição das R_s para o mês de março e outubro, para a sub-bacia do Paracatu e para a bacia do Grande, respectivamente. Para o Paracatu, observa-se que no mês de março todos os valores de R_s são maiores que a unidade, tanto para a q_{90} como para a $q_{7,10}$, sendo esse aumento menos expressivo para a q_{90} , para a qual a vazão mensal atinge valores de até duas vezes maior que a anual, e mais expressivo para a $q_{7,10}$ para a qual o aumento chega a ser de seis vezes. No mês de outubro, os valores da $R_{sQ_{7,10}}$ variam entre 1,00 e 1,10, mostrando que nesse mês a vazão mensal se aproxima ou até iguala a vazão anual. Já para a $R_{sQ_{90}}$ essa variação está entre 0,52 a 0,73. Valores menores que a unidade indicam que essas vazões obtidas em base mensal são menores que a anual e, portanto, o uso da anual pode colocar em risco a segurança hídrica, visto que a sua estimativa pode ser maior do que a vazão que realmente ocorre no curso d'água.

Para a bacia do Grande, observa-se que no mês de março os valores de R_s também são maiores que a unidade tanto para a q_{90} como para a $q_{7,10}$, sendo que a primeira varia de 1,00 a 1,36 e a segunda de 1,18 a 1,67, confirmando a potencialização do uso da água obtida pela alteração da estimativa em base anual pela mensal. No mês de outubro os valores de $R_{sQ_{90}}$ são todos inferiores a unidade, variando de 0,73 a 0,92, e para a $R_{sQ_{7,10}}$ variam de 0,60 a 1,11. Conforme visto na Figura 42, valores menores que a unidade são esperados para a $R_{sQ_{90}}$, uma

vez que na análise dos dados das estações fluviométricas são observadas situações em que a vazão em base anual é maior que a vazão em base mensal. Contudo, como para a $q_{7,10}$ esse comportamento não ocorre, espera-se que os resultados ao longo da hidrografia reflitam o observado nas estações fluviométricas.

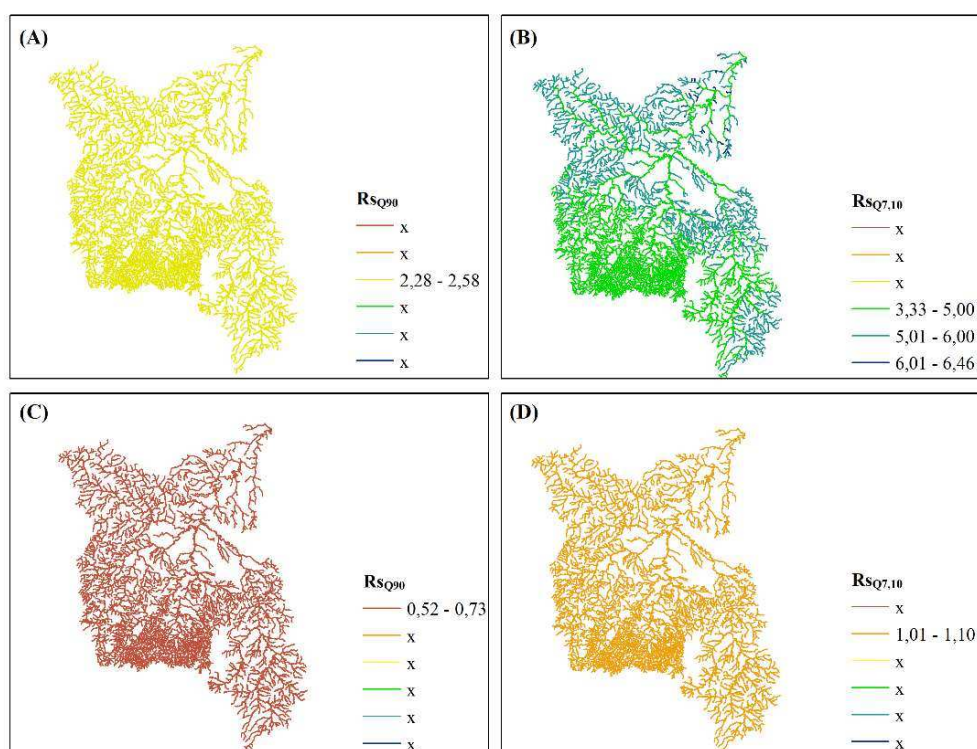


Figura 45 – Variação do $Rs_{Q7,10}$ (A e C) e Rs_{Q90} (B e D) ao longo da hidrografia da bacia do Paracatu para os meses de março e outubro, respectivamente.

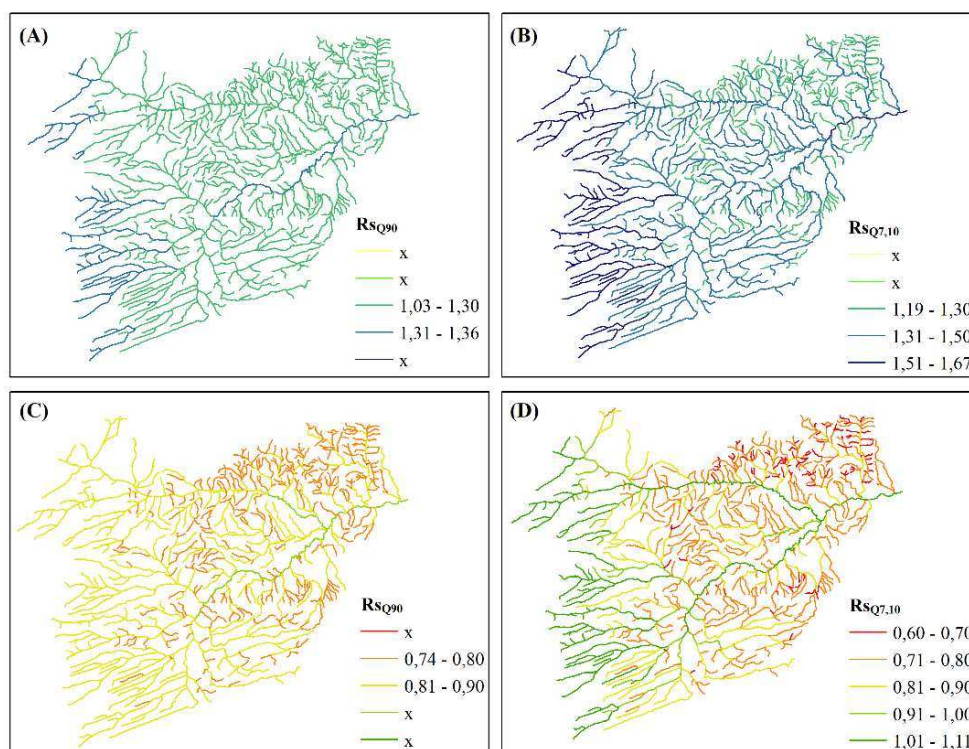


Figura 46 – Variação do $R_{sQ7,10}$ (A e C) e R_{sQ90} (B e D) ao longo da hidrografia da bacia do Grande para os meses de março e outubro, respectivamente.

2.3.2.2 Curvas de uniformidade

As curvas de uniformidade para a sub-bacia do Paracatu estão apresentadas na Figura 47. A partir dessas curvas é possível observar o comportamento das vazões mensais em relação a anual, em toda a bacia hidrográfica e em todos os meses do ano, evitando a necessidade de análise dos mapas correspondentes a cada mês. Por exemplo, na sub-bacia do Paracatu, no mês de janeiro o uso da $Q_{7,10}$ em base mensal possibilita um aumento de disponibilidade hídrica de pelo menos 4,5 vezes em 10% dos trechos. Contudo, para 100% da hidrografia esse aumento é de no mínimo 2,6 vezes. Nesse sentido, a curva de uniformidade pode ser muito útil para planejamento e gestão de recursos hídricos, uma vez que dá suporte para tomada de decisão, a partir da observação do comportamento geral da bacia.

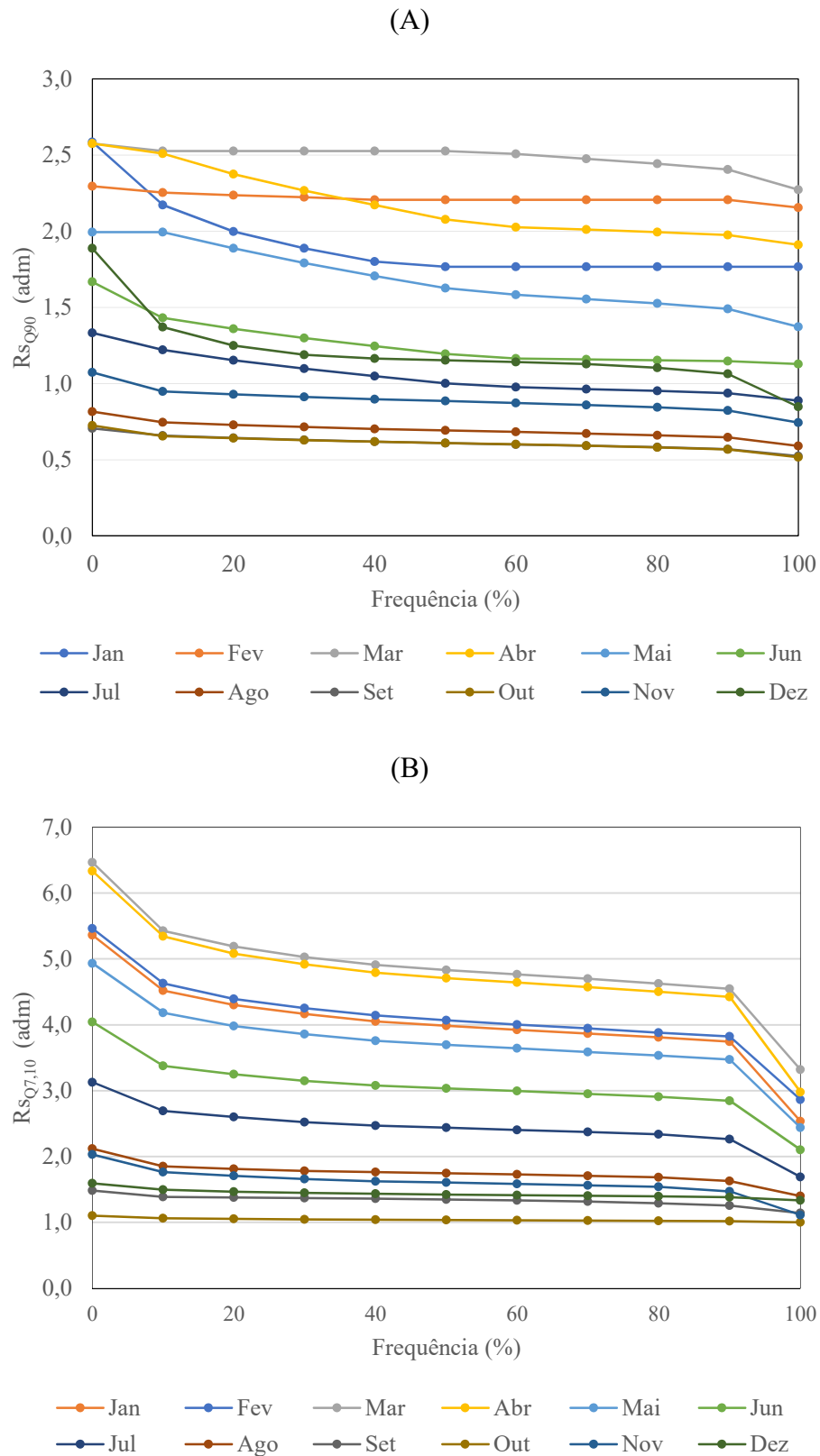


Figura 47 – Curva de uniformidade dos valores de Rs_{Q90} (A) e de $Rs_{Q7,10}$ (B) para a sub-bacia do Paracatu.

Para as duas vazões analisadas, são observadas mudanças bruscas nos valores de R_s associados às frequências de 90 a 100% (Figuras 47A e 47B), o que ocorre devido à menor frequência de ocorrência na hidrografia dos trechos que possuem maiores áreas de drenagem e menores razões de sazonalidade.

Nos resultados referentes à Q_{90} (Figura 47A), os maiores valores de R_s ocorrem para os meses de janeiro a maio e os menores de junho a dezembro. A máxima relação obtida é de 2,59 para o mês de janeiro, sendo que 100% dos trechos nesse mês estão associados a uma relação de pelo menos 1,76. De janeiro a junho observa-se que 100% dos trechos apresentam valores de $R_{sQ_{90}}$ maiores que a unidade, mostrando que há um incremento de disponibilidade quando da consideração da vazão mensal em substituição a anual para todos os trechos da hidrografia. Em julho já são observados valores de $R_{sQ_{90}}$ menores que a unidade a partir da frequência de 50%, o que significa que nesse mês, parte da hidrografia já apresenta risco de desabastecimento devido à utilização da Q_{90} estimada em base anual. Os meses de agosto a novembro apresentam valores de R_s menores que a unidade para 100% dos trechos da hidrografia. Esse resultado sugere que bacias onde é adotada a Q_{90} como vazão mínima de referência para outorga devem se atentar para a quantidade de água concedida nesses meses, uma vez que a utilização da vazão anual pode estar gerando uma falsa expectativa da disponibilidade de água, acarretando riscos à segurança hídrica.

Para a $Q_{7,10}$ evidencia-se pela análise da curva de uniformidade que a vazão em base mensal possibilita um aumento na disponibilidade hídrica na maior parte do ano, sendo os valores de R_s maiores que a unidade em praticamente todos os meses para 100% da hidrografia. Apenas no mês de outubro a substituição da base de cálculo não representa grande incremento de disponibilidade.

O aumento da disponibilidade hídrica devido ao uso da $Q_{7,10}$ mensal pode beneficiar muitos usuários, os quais podem adequar a sua demanda aos meses de maior disponibilidade, não se restringindo por um valor que ocorre apenas em períodos críticos. Por exemplo, Silva (2014) constatou em um estudo realizado para a bacia do Ribeirão Entre Ribeiros, sub-bacia do Paracatu, que a demanda de água por irrigação, não necessariamente coincide com o período de menor disponibilidade. Bof et al. (2013) citam que a diluição de efluentes pode utilizar a variação sazonal da disponibilidade hídrica a seu favor, uma vez que sua demanda de água varia de acordo com as características do empreendimento. Pruski et al. (2014) citam que devido ao baixo volume de precipitação nos meses de junho e julho na bacia do Paracatu, a irrigação torna a principal fonte hídrica para agricultura, sendo possível, nesses meses, observar que as vazões mensais possibilitam um maior uso da água.

Na Figura 48 estão apresentadas as curvas de uniformidade para a bacia do Grande. Observa-se que os maiores valores de R_{SQ90} (Figura 48A) ocorrem para os meses de dezembro e janeiro atingindo valores iguais a 1,4. Os menores valores ocorrem para os meses de setembro e outubro, atingindo R_{SQ90} de aproximadamente 0,7. De novembro a março, 100% dos trechos apresentam valores da relação maior que a unidade. A partir de abril já se observa a ocorrência de trechos em que a vazão mensal é menor que a anual, sendo que nos meses de julho a outubro, 100% dos trechos apresentam valores de R_{SQ90} menores que a unidade. O comportamento observado para os meses de julho a outubro está de acordo com a análise feita para as estações fluviométricas, onde se observou que nesses meses a vazão anual é mais permissiva em relação à mensal. Já a ocorrência de valores menores que a unidade nos meses de abril e maio não são esperados, uma vez que o comportamento das vazões nas estações fluviométricas mostra que a vazão anual é maior que a mensal nesses meses.

Na $R_{SQ7,10}$ (Figura 48B), observa-se um comportamento inconsistente, enquanto na sub-bacia do Paracatu foram encontrados apenas valores maiores que a unidade para toda hidrografia, na bacia do Grande isso só foi evidenciado nos meses de janeiro a março. Em todos os outros meses ocorreram trechos em que a $Q_{7,10}$ anual superou a mensal. Conforme já mencionado, devido à forma como a $Q_{7,10}$ é calculada, não se espera que ocorram valores mensais menores que o anual. Além disso, a análise do comportamento médio das estações fluviométricas mostrou que isso não é evidenciado quando se considera os dados observados (Figura 42).

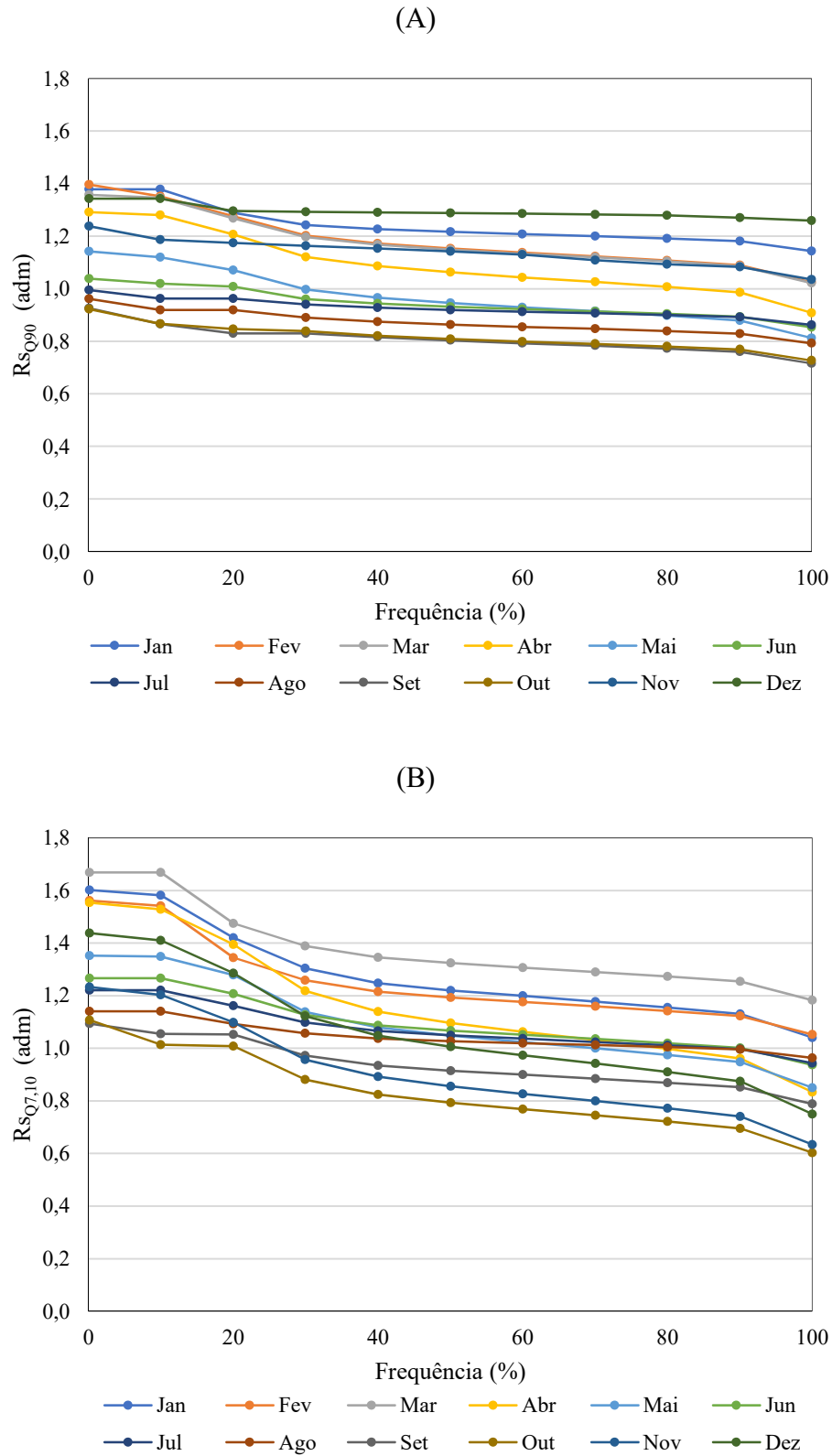


Figura 48 – Curva de uniformidade dos valores de Rs_{Q90} (A) e de $Rs_{Q7,10}$ (B) para a bacia do Grande.

O comportamento encontrado para a $Q_{7,10}$ apresenta inconsistências que estão associadas à combinação dos expoentes nas equações de regionalização. Essa combinação gera uma inversão do comportamento na parte inicial das curvas que representam as equações, havendo uma sobreposição da curva anual à mensal e, conseqüentemente, R_s menores que a unidade. Na Figura 49, estão representadas as curvas de regionalização da $Q_{7,10}$ anual e do mês de setembro, com o zoom para a parte inicial da curva, onde é observada a inversão do comportamento. A parte inicial das curvas corresponde a um alto percentual do total de trechos da hidrografia (Figura 50), os quais englobam, sobretudo, trechos de pequena área de drenagem e associados a regiões de extrapolação. Entretanto, a estimativa das vazões nessas regiões é de grande importância para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, uma vez que nelas ocorrem a maior parte dos conflitos pelo uso da água.

Outra explicação às inconsistências observadas é a quantidade e a qualidade dos dados utilizados na regionalização de vazões, que influenciam no ajuste das equações (OUDIN et al., 2008). De acordo com Gibbs; Maier; Dandy (2012) mudanças nas áreas de drenagem das estações ou ocorrência de períodos atípicos de precipitação são exemplos de fatores que afetam a qualidade dos dados.

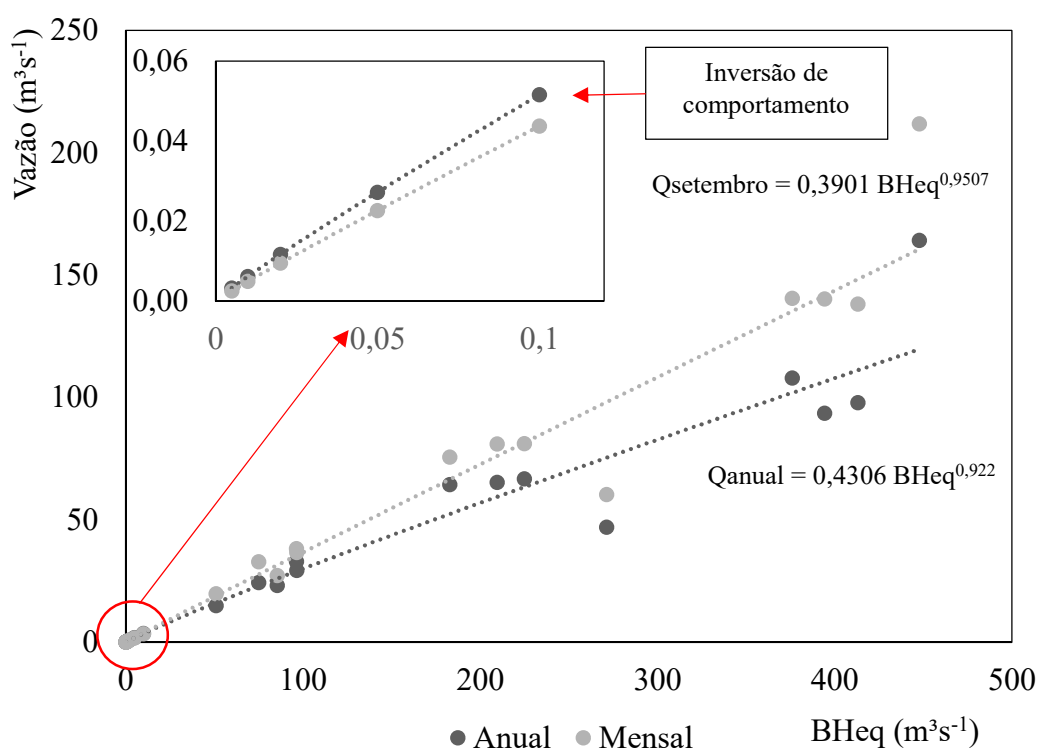


Figura 49 – Curvas de regionalização da $Q_{7,10}$ anual e da $Q_{7,10}$ do mês de setembro para a bacia do Grande, com zoom na inversão do comportamento.

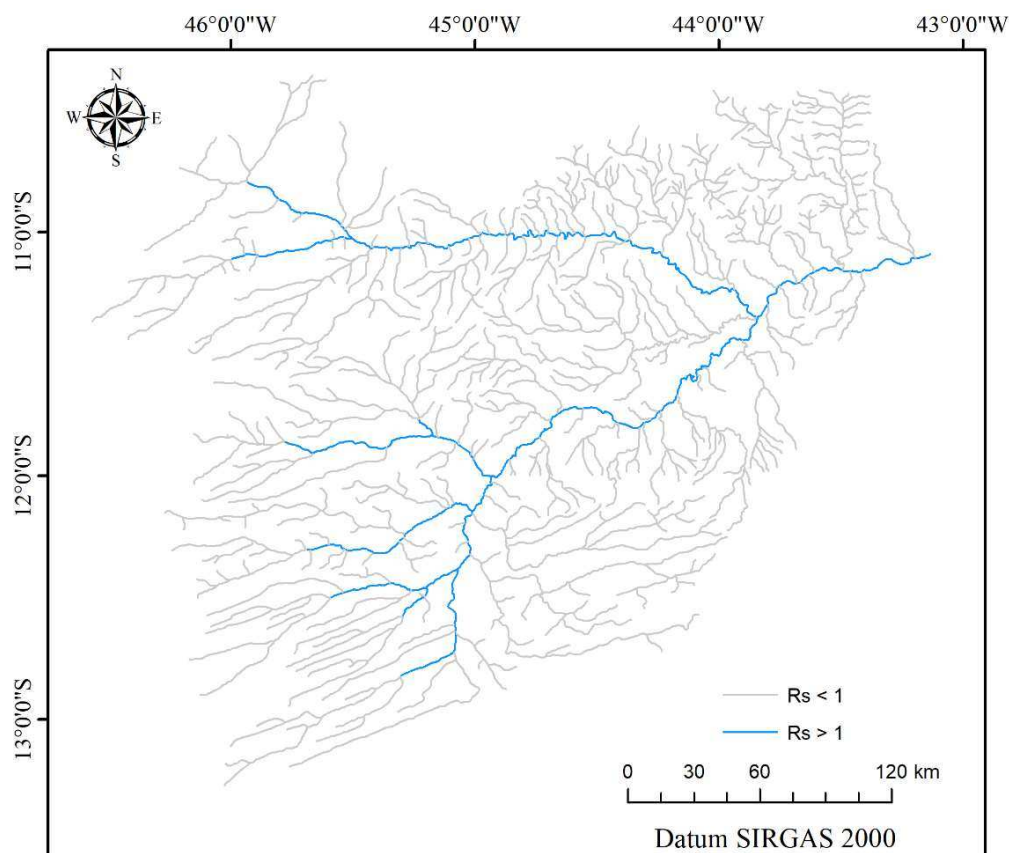


Figura 50 – Classificação dos trechos de acordo com o valor de R_s para o mês de setembro.

2.3.3 Disponibilidade hídrica mensal a partir de análise estatística associada às estações fluviométricas

Devido às inconsistências observadas na regionalização mensal para a bacia do Grande, propôs-se, no presente trabalho, realizar a estimativa da disponibilidade hídrica mensal considerando uma nova abordagem. Assim, foi desenvolvida uma metodologia na qual, a disponibilidade hídrica mensal é estimada utilizando o estudo de regionalização em base anual em conjunto com um fator multiplicativo para incremento ou diminuição da disponibilidade hídrica. O fator considerado é baseado na análise estatística relacionada a razão de sazonalidade das estações fluviométricas.

Nas Figuras 51 e 52 são apresentadas as relações de sazonalidade médias para a Q_{90} e para a $Q_{7,10}$ das estações da sub-bacia do Paracatu e bacia do Grande, respectivamente, e os intervalos de confiança associados.

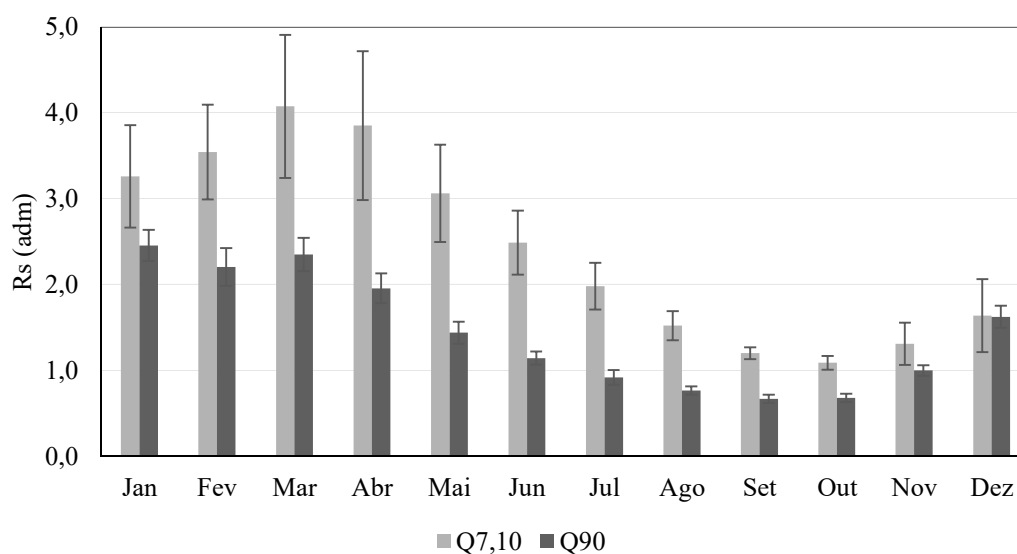


Figura 51 - Variação da R_{sQ90} e $R_{sQ7,10}$ obtidas para as estações fluviométricas da sub-bacia do Paracatu.

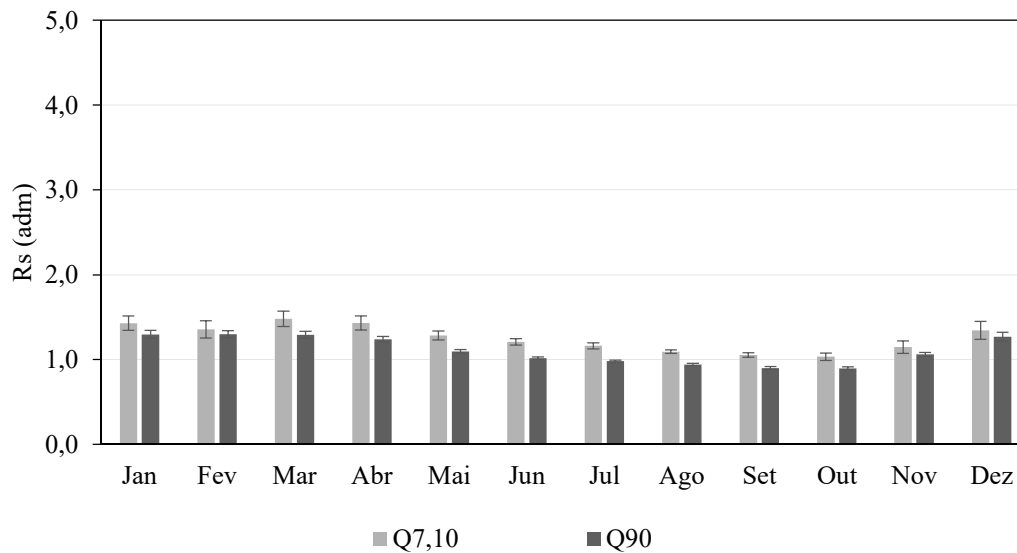


Figura 52 - Variação da R_{sQ90} e $R_{sQ7,10}$ obtidas para as estações fluviométricas da bacia do Grande.

A R_{sQ90} obtida pela análise das estações fluviométricas, foi maior que um nos meses de dezembro a julho e de novembro a junho na sub-bacia do Paracatu e para a bacia do Grande respectivamente. A variação da R_{sQ90} foi de 0,67 (setembro) a 2,45 (janeiro) para a sub-bacia do Paracatu e 0,90 (outubro) a 1,30 (fevereiro) para a bacia do Grande. Já a $R_{sQ7,10}$ foi maior

que a unidade para todos os meses e para as duas bacias de estudo, variando de 1,09 (outubro) a 4,08 (março) para a sub-bacia do Paracatu (Figura 51) e 1,03 (outubro) a 1,48 (março) para a bacia do Grande (Figura 52).

Com relação aos intervalos de confiança, tem-se uma maior amplitude de variação nos meses correspondentes ao período chuvoso (dezembro a maio) em comparação aos meses de menores precipitações (junho a novembro). Esse resultado está relacionado ao fato das vazões mínimas no período chuvoso terem grande influência das precipitações ocorridas nesse período. A variabilidade das precipitações e as diferentes características físicas da bacia geram diferentes produções específicas e, conseqüentemente, uma maior variação das vazões. No período de estiagem, as vazões são formadas predominantemente pela contribuição do lençol freático e se aproxima mais das vazões calculadas em base anual (RIBEIRO et al., 2019; SERRANO et al., 2020).

Comparando os valores de R_s , observa-se que, para a bacia do Paracatu, tem-se uma maior concordância do comportamento e das magnitudes dos resultados obtidos pela regionalização de vazões em base mensal e pelas estações fluviométricas. Já para a bacia do Grande essa concordância é observada apenas para alguns meses.

Nas Figuras 53 e 54 estão apresentadas, para a sub-bacia do Paracatu e para a bacia do Grande respectivamente, as R_{sQ90} e as $R_{sQ7,10}$ associadas ao limite inferior do IC e denominadas de $R_{sQ90;95}$ e $R_{sQ7,10;95}$, por adotar um nível de confiança de 95%. Esses valores devem ser utilizados como fator multiplicativo da disponibilidade obtida em base anual ao longo da hidrografia, indicando a necessidade de aumento ou diminuição da vazão mínima para determinado mês.

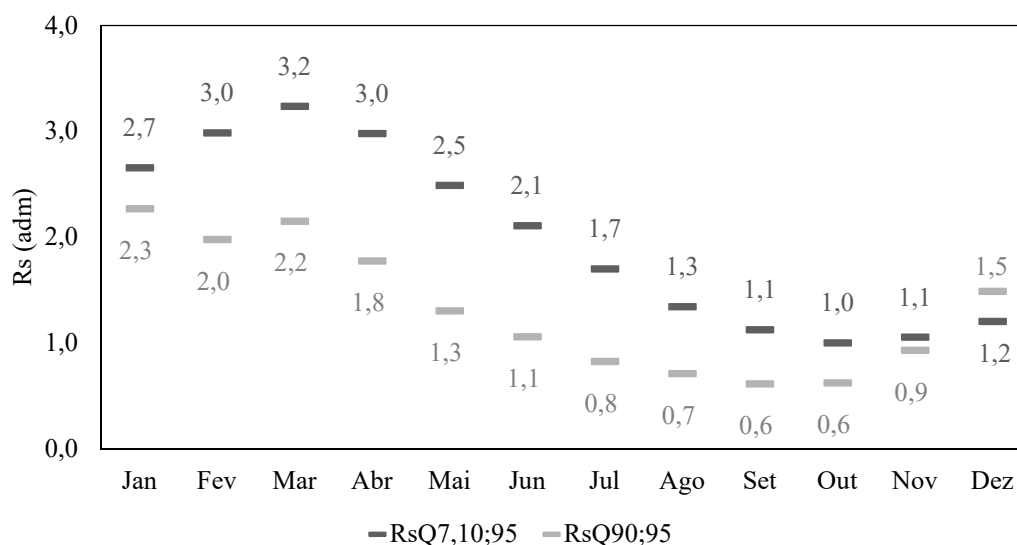


Figura 53 – Rs associada ao limite inferior do IC para a sub-bacia do Paracatu.

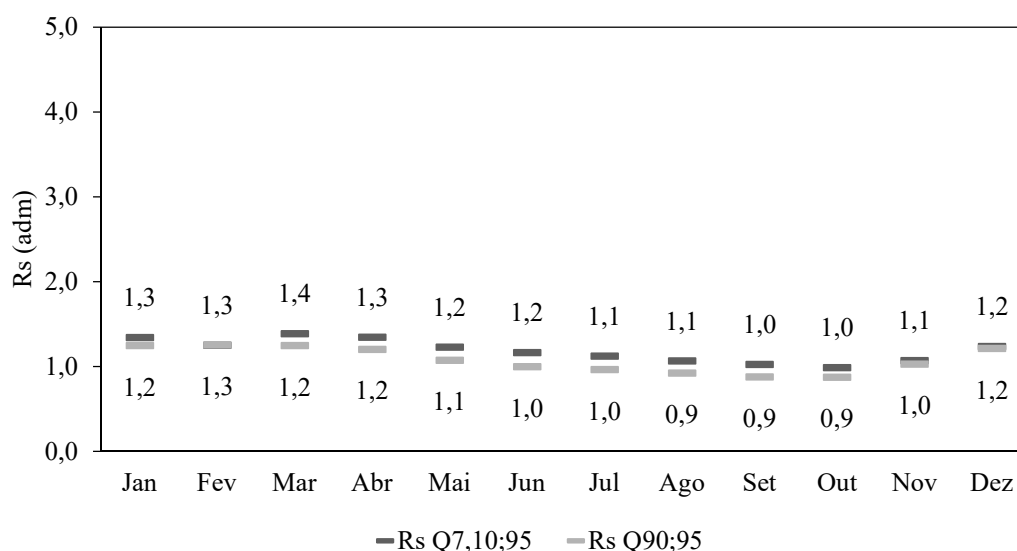


Figura 54 – Rs associada ao limite inferior do IC para a bacia do Grande.

O uso da $Rs_{Q90;95}$ mostra que, em relação a vazão anual, o aumento das vazões mínimas mensais deve ser de até 2,3 vezes (janeiro) e 1,3 vezes (fevereiro) nos meses do período chuvoso e a diminuição de até 0,6 vezes (setembro e outubro) e 0,9 vezes (setembro e outubro) no período mais seco para a sub-bacia do Paracatu e para a bacia Grande, respectivamente. A $Rs_{Q7,10;95}$ associa um aumento de disponibilidade hídrica em todos os meses, atingindo valores de 3,2 vezes na sub-bacia do Paracatu e 1,4 vezes na bacia do Grande.

A utilização da análise estatística das Rs obtidas das estações fluviométricas possibilita a estimativa das vazões mensais ao longo da hidrografia adotando um fator de segurança representado pelo IC e sua utilização está menos susceptível a ocorrência de incoerências, como as observadas na regionalização mensal. Além disso, conforme mencionado anteriormente, o nível de segurança pode ser ajustado pela alteração da significância dos IC calculados.

Assim sendo, para a aplicação dessa metodologia recomenda-se que todos os esforços sejam despendidos na obtenção de um estudo de regionalização de vazões em base anual. Para isso, é importante realizar análises do comportamento das vazões regionalizadas ao longo da hidrografia e utilizar ferramentas para reduzir os riscos associados às superestimativas, principalmente nas regiões de extrapolações, obtendo assim estimativas representativas das condições reais da bacia.

2.4 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu as seguintes conclusões:

- O uso da regionalização de vazão em base mensal apresentou inconsistências que indicam que sua utilização não é aplicável em todas as situações.

- O uso da análise estatística associada às estações fluviométricas possibilita estimativas mais representativas da disponibilidade hídrica em base mensal e está menos susceptível a ocorrência de incoerências como as observadas na regionalização mensal. Além disso, o nível de segurança associado às estimativas pode ser baseado na aplicação das estatísticas e adotado conforme às necessidades da bacia.

REFERÊNCIAS

- ANA. **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos 2013**. Agência Nacional de Águas -ANA, 2013. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/manual-de-outorga.pdf>>. Acesso em: 10 de junho de 2019
- BOF, L. H. N.; PRUSKI, F. F.; DA SILVA, L. M. C.; JUSTINO, F. Analysis of Appropriate Timescales for Water Diversion Permits in Brazil. **Environmental Management**, v. 51, n. 2, p. 492–500, fev. 2013.
- GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G. O Sistema Aquífero Urucuia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. S4, p. 216–226, 1 dez. 2007.

- GIBBS, M. S.; MAIER, H. R.; DANDY, G. C. A generic framework for regression regionalization in ungauged catchments. **Environmental Modelling & Software**, v. 27–28, p. 1–14, jan. 2012.
- GOMES, R. R. K. DE A.; FERNANDES, L. L. Hydrological characterization of the Araguaia River through reference flows. **Applied Water Science**, v. 7, n. 8, p. 4605–4614, dez. 2017.
- HANNAFORD, J.; BUYS, G. Trends in seasonal river flow regimes in the UK. **Journal of Hydrology**, v. 475, p. 158–174, dez. 2012.
- KAM, J.; SHEFFIELD, J. Changes in the low flow regime over the eastern United States (1962–2011): variability, trends, and attributions. **Climatic Change**, v. 135, n. 3–4, p. 639–653, abr. 2016.
- LELIS, L. C. DA S.; NASCIMENTO, J. G.; DUARTE, S. N.; PACHECO, A. B.; BOSQUILIA, R. W. D.; WOLFF, W. Assessment of hydrological regionalization methodologies for the upper Jaguari River basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 97, p. 102402, jan. 2020.
- OLIVEIRA, A. N. G. **Aplicação de metodologias relacionadas à valoração da água para as bacias dos rios Grande e Paranaíba**. 2017. 142f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- OLIVEIRA, J.; PRUSKI, F.; NUNES, A. Otimização do Aproveitamento da Disponibilidade de Águas Superficiais na Bacia do Ribeirão entre Ribeiros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 4, p. 157–172, 2013.
- LOUDIN, L.; ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHEL, C.; LE MOINE, N. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. **Water Resources Research**, v. 44, n. 3, mar. 2008.
- OUYANG, Y. A potential approach for low flow selection in water resource supply and management. **Journal of Hydrology**, v. 454–455, p. 56–63, ago. 2012.
- PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N.; SILVA, L. M. C. DA; SILVA, J. M. A. DA; REGO, F. S.; JUSTINO, F. B. Impact of the substitution of reference annual streamflow by monthly streamflow on the potential use of water resources. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 3, p. 496–509, jun. 2014.
- PRUSKI, F. F.; NUNES, A. DE A.; REGO, F. S.; DE SOUZA, M. F. Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. **Water Resources and Irrigation Management**, p. 10, 2012.
- PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. D. G.; NUNES, A. A.; PRUSKI, P. L.; SINGH, V. P. Low-flow estimates in regions of extrapolation of the regionalization equations: a new concept. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 5, p. 808–816, out. 2015.
- RIBEIRO, R. B.; SERRANO, L. DE O.; GENEROSO, N.; RAMOS, M. C. A.; PRUSKI, F. F. **Variabilidade sazonal das vazões mínimas em três bacias hidrográficas**. In:

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 13, 2019. Foz do Iguaçu. Anais...2019

- SERRANO, L. DE O.; RIBEIRO, R. B.; BORGES, A. C.; PRUSKI, F. F. Low-Flow Seasonality and Effects on Water Availability throughout the River Network. **Water Resources Management**, 31 jan. 2020.
- SILVA, M. V. D. **Adequação da disponibilidade hídrica com a demanda de água na agricultura**. 2014. 104f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- SMAKHTIN, V. U. Low flow hydrology: a review. **Journal of Hydrology**, v. 240, n. 3–4, p. 147–186, jan. 2001.
- SOUSA, J. R. C. **Hydrology Plus: sistema computacional para estudos meteorológicos e hidrológicos**. 2017. 131f. Tese (Doutorado em Meteorologia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- VASCONCELOS, V. V. **Recarga de aquíferos: subsídios à gestão hídrica e ambiental - bacia do rio paracatu (SF7)**. 2014. 276f. Tese (Doutorado em Ciência Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.
- VEZZA, P.; COMOGLIO, C.; ROSSO, M.; VIGLIONE, A. Low Flows Regionalization in North-Western Italy. **Water Resources Management**, v. 24, n. 14, p. 4049–4074, nov. 2010.
- ZAMOUM, S.; SOUAG-GAMANE, D. Monthly streamflow estimation in ungauged catchments of northern Algeria using regionalization of conceptual model parameters. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 11, p. 342, jun. 2019.

CONCLUSÃO GERAL

No presente trabalho apresentaram-se ferramentas para estimativa de vazões representativas do comportamento hidrológico ao longo da hidrografia e constitui-se um importante suporte para tomada de decisões no âmbito do planejamento e da gestão de recursos hídricos, sendo possível concluir que:

- A utilização da evapotranspiração real como fator de abstração da precipitação, avaliada no Capítulo 1, possibilitou melhoria da representatividade dos modelos de regionalização de vazões. Dentre os produtos de ETR avaliados, MOD16 e GLEAM, o segundo se sobressaiu, apresentando resultados mais coerentes e modelos de regionalização de vazões mais representativos.

- Com relação aos resultados obtidos no Capítulo 2, foi possível concluir que, para a estimativa das vazões mensais, a regionalização de vazão em base mensal não é aplicável em todas as situações, uma vez que apresentou resultados inconsistentes em um dos estudos de caso avaliados. Por outro lado, a análise estatística associada às estações fluviométricas, possibilitou estimativas mais representativas, sendo menos susceptível a ocorrência de incoerências

APÊNDICE A

Tabela A1 – ID, Código, nome, latitude e longitude das estações fluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Grande

ID	Estação	Nome	Latitude	Longitude
1	46415000	Sítio Grande	-12,43	-45,09
2	46455000	Derocal	-12,41	-45,12
3	46490000	Fazenda Coqueiro	-12,40	-44,95
4	46543000	Fazenda Redenção	-12,14	-45,10
5	46550000	Barreiras	-12,15	-45,01
6	46570000	Ponte Serafim - Montante	-11,90	-45,61
7	46590000	Nova Vida - Montante	-11,86	-45,12
8	46610000	São Sebastião	-11,98	-44,88
9	46650000	Taguá	-11,72	-44,50
10	46675000	Fazenda Macambira	-11,61	-44,16
11	46770000	Fazenda Bom Jardim	-10,99	-45,53
12	46790000	Formosa do Rio Preto	-11,05	-45,20
13	46830000	Ibipetuba	-11,01	-44,52
14	46870000	Fazenda Porto Limpo	-11,24	-43,95
15	46902000	Boqueirão	-11,36	-43,85

Tabela A2 – Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Grande

Código	Nome	Latitude	Longitude	Precipitação (mm)
945011	Alto Parnaíba	-9,11	-45,93	1327,29
946003	Lizarda	-9,59	-46,68	1497,76
947001	Mansinha	-9,46	-47,33	1709,47
1042012	Rio Verde II (Codevasf)	-10,99	-42,34	564,70
1047000	Jatobá (Fazenda Boa Nova)	-9,99	-47,48	1619,75
1047001	Novo Acordo	-9,96	-47,67	1596,56
1142017	Fazenda Cabaceiras	-11,33	-42,31	659,99
1142020	Fazenda Refrigério - Jusante	-11,36	-42,27	651,90
1143002	Morpará	-11,56	-43,28	801,54
1143010	Boqueirão	-11,34	-43,83	845,52
1144005	Fazenda Macambira	-11,61	-44,16	862,94
1144014	São Sebastião	-11,98	-44,71	940,38
1144027	Ibipetuba	-11,01	-44,53	879,54
1145001	Formosa Do Rio Preto	-11,05	-45,20	996,65
1145004	Fazenda Bom Jardim	-10,99	-45,53	1058,27
1145013	Ponte Serafim - Montante	-11,90	-45,61	1162,97
1145014	Nova Vida - Montante	-11,85	-45,12	1000,66
1145019	Caripare	-11,51	-45,04	952,05
1146000	Dianópolis	-11,63	-46,81	1584,06
1147000	Almas	-11,58	-47,17	1505,98
1147001	Natividade	-11,70	-47,73	1613,09
1147002	Pindorama Do Tocantins	-11,14	-47,58	1610,82
1147003	Porto Alegre	-11,61	-47,05	1538,39
1242015	Brotas De Macaúbas	-12,00	-42,63	742,60

Tabela A2 – Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Grande (Continuação)

Código	Nome	Latitude	Longitude	Precipitação (mm)
1242016	Ponte Br-242	-12,25	-42,76	612,06
1243000	Gameleira	-12,87	-43,38	760,76
1243011	Ibotirama	-12,18	-43,22	752,51
1243019	Serra Dourada (Faz. Muritiba)	-12,77	-43,96	887,26
1244011	Barreiras	-11,15	-45,01	1053,28
1244019	Fazenda Coqueiro	-12,39	-44,93	1094,74
1245004	Fazenda Redenção	-12,13	-45,10	965,52
1245005	Derocal	-12,41	-45,12	1005,45
1245007	Sítio Grande	-12,43	-45,09	1087,76
1245014	Fazenda Joha	-12,13	-45,81	1176,61
1246000	Ponte Alta Do Bom Jesus	-12,09	-46,48	1946,04
1246001	Aurora Do Norte	-12,71	-46,41	1729,85
1247000	Conceição Do Tocantins	-12,23	-47,32	1345,83
1247002	Rio Da Palma (Faz. Chuva Manga)	-12,42	-47,20	1310,58
1343008	Porto Novo	-13,29	-43,91	795,45
1344002	Mocambo	-13,28	-44,56	987,31
1344013	Gatos	-13,71	-44,63	1064,55
1344014	Correntina	-13,34	-44,65	942,16
1344015	Colônia Do Formoso	-13,57	-44,31	939,31
1344016	Arrojado	-13,45	-44,57	965,12
1344017	Santa Maria Da Vitória	-13,40	-44,20	938,87
1345000	Arrojolândia	-13,73	-45,40	897,08
1346000	São Domingos	-13,40	-46,32	1242,61
1346001	Nova Roma (Faz.Sucuri)	-13,74	-46,88	1163,64
1346002	Fazenda Ingazeiro	-13,69	-46,57	1163,53
1346004	Campos Belos	-13,04	-46,78	1494,42
1346005	São Vicente	-13,55	-46,47	1122,78
1346006	Fazenda Planalto	-13,75	-46,14	1297,71
1347000	Cavalcante	-13,80	-47,46	1812,67
1347001	Ponte Paranã	-13,43	-47,14	1258,65
1446002	Posse	-14,08	-46,37	1516,76
1447000	Alto Paraíso De Goiás	-14,13	-47,51	1424,54
1447001	Flores De Goiás	-14,45	-47,05	1147,75
1447002	São João D'aliança	-14,71	-47,52	1366,87

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações fluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Paracatu.

ID	Região	Código	Nome	Latitude	Longitude
1	1	42435000	Fazenda Barra da Égua	-16,87	-46,59
2	1	42440000	Fazenda Poções	-17,04	-46,82
3	1	42460000	Fazenda Limeira	-16,21	-47,23
4	1	42490000	Unai	-16,35	-46,88
5	1	42540000	Santo Antônio do Boqueirão	-16,53	-46,72
6	1	42545002	Fazenda Roncador	-16,25	-46,80
7	1	42545500	Fazenda o Resfriado	-16,50	-46,66
8	1	42546000	Fazenda Santa Cruz	-16,13	-46,75

Tabela A3 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações fluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Paracatu (Continuação)

ID	Região	Código	Nome	Latitude	Longitude
9	1	42600000	Porto dos Poções	-16,84	-46,36
10	2	42250000	Fazenda Limoeiro	-17,92	-47,01
11	2	42251000	Fazenda Córrego do Ouro	-17,61	-46,86
12	2	42255000	Fazenda Nolasco	-17,23	-47,02
13	2	42257000	Barra do Escurinho	-17,51	-46,65
14	2	42290000	Ponte da BR-040 (Paracatu)	-17,50	-46,57
15	2	42365000	Ponte da BR-040 - PRATA	-17,66	-46,36
16	2	42395000	Santa Rosa	-17,26	-46,47
17	3	42690001	Porto da Extrema	-17,03	-46,01
18	3	42750000	Caatinga	-17,14	-45,88
19	3	42840000	Veredas	-18,14	-45,76
20	3	42850000	Cachoeira das Almas	-17,35	-45,53
21	3	42860000	Cachoeira do Paredão	-17,12	-45,44
22	3	42930000	Porto do Cavalo	-17,03	-45,54
23	3	42980000	Porto Alegre	-16,91	-45,38
24	3	42645000	Fazenda Rio Verde	-17,25	-46,20

Tabela A4 - Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Paracatu.

Código	Nome	Latitude	Longitude	Precipitação (mm)
1446004	Sítio Dabadia	-14,8000	-46,2500	1209,98
1447001	Flores de Goiás	-14,4500	-47,0500	1125,35
1447002	São João Daliança	-14,7100	-47,5200	1396,24
1448004	Moquem - Fazenda Vau da Onça	-14,5500	-48,1700	1612,66
1544012	Sao Francisco	-15,9500	-44,8700	1027,65
1545002	Serra das Araras	-15,5000	-45,3900	1168,29
1546000	Arinos - Montante	-15,9200	-46,1200	1201,45
1546005	Cabeceiras	-15,8000	-46,9200	1470,22
1546010	Fazenda Carvalho	-15,5200	-46,2800	1208,73
1547001	Fazenda Santa Sé	-15,2200	-47,1600	1562,11
1547002	Planaltina	-15,6400	-47,6500	1292,73
1548000	Brazlandia (Quadra 18)	-15,6700	-48,2200	1517,03
1548001	Mimoso	-15,0600	-48,1700	1318,60
1645000	São Romão	-16,3700	-45,0800	1034,99
1645002	Santo Inácio	-16,2800	-45,4100	1011,27
1645003	Barra do Escuro	-16,2700	-45,2400	1066,11
1645005	Vila Urucuia	-16,1300	-45,7400	1099,48
1645009	Cachoeira da Manteiga	-16,6600	-45,0800	991,99
1645013	Fazenda Água Branca	-16,8100	-45,0300	1111,00
1645019	Fazenda Conceição	-16,4300	-45,7400	1104,73
1646000	Porto dos Poções	-16,8300	-46,3200	1163,08
1646001	Unai	-16,3500	-46,8900	1316,06
1646003	Santo Antônio do Boqueirão	-16,5300	-46,7200	1250,94
1646004	Fazenda O Resfriado	-16,5000	-46,6600	1300,00
1647002	Mingone	-16,1600	-47,9400	1521,87
1647003	UHE Batalha Cristalina	-16,7900	-47,6000	1432,86

Tabela A4 – Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Paracatu. (Continuação)

Código	Nome	Latitude	Longitude	Precipitação (mm)
1647008	Fazenda Limeira	-16,2100	-47,2300	1377,48
1648001	Ponte Anápolis - Brasília	-16,1400	-48,6000	1467,55
1648002	Vianópolis	-16,7500	-48,5300	1765,69
1744009	Várzea da Palma	-17,6000	-44,7000	993,86
1744010	Lassance	-17,8900	-44,5800	1144,93
1745000	Caatinga	-17,1500	-45,8800	1120,17
1745001	Cachoeira do Paredão	-17,1100	-45,4400	1167,49
1745007	Porto do Cavalo	-17,0300	-45,5400	1175,92
1745014	Fazenda Santana	-17,8300	-45,4800	1229,80
1746001	Porto da Extrema	-17,0300	-46,0100	1194,27
1746002	Santa Rosa	-17,2600	-46,4700	1320,00
1746006	Ponte da Br-040 - Prata	-17,6600	-46,3600	1287,55
1746007	Ponte da Br-040 - Paracatu	-17,5000	-46,5800	1320,84
1746018	Fazenda Limoeiro	-17,9200	-47,0100	1321,55
1746019	Fazenda Córrego Do Ouro	-17,6100	-46,8600	1393,40
1747000	Ponte São Marcos	-17,0300	-47,1600	1439,48
1747001	Campo Alegre de Goiás	-17,5000	-47,5600	1420,34
1747005	Guarda-Mor	-17,7700	-47,1000	1499,04
1748001	Estação Verissimo	-17,9700	-48,1800	1497,91
1748005	UHE Corumbá I Rio Piracanjuba	-17,1300	-48,1400	1464,50
1748014	Pires do Rio I	-17,3000	-48,2700	1554,11
1845002	Fazenda São Felix	-18,4600	-45,6500	1305,16
1845004	Lagoa do Gouveia	-18,8400	-45,8500	1500,71
1845013	São Gonçalo do Abaete	-18,3400	-45,8400	1426,55
1845014	Tiros	-19,0000	-45,9700	1586,25
1845021	Canoeiros	-18,0400	-45,5200	1211,29
1845027	Barra do Rio de Janeiro	-17,9600	-45,1000	1180,99
1846003	Major Porto	-18,7100	-46,0400	1333,50
1846004	Guimaranã	-18,8500	-46,8000	1485,91
1846005	Presidente Olegário	-18,4100	-46,4200	1540,60
1846006	Pântano	-18,5600	-46,8000	1667,74
1846007	Santana de Patos	-18,8400	-46,5500	1454,51
1846015	Vazante	-18,0100	-46,9100	1438,96
1846016	Ponte Firme	-18,0300	-46,4200	1419,96
1846017	Leal de Patos	-18,6400	-46,3300	1406,87
1846019	Rocinha	-18,3700	-46,9200	1501,32
1846023	Lagamar	-18,1800	-46,8000	1602,51
1847003	Abadia dos Dourados	-18,4500	-47,6700	1349,43
1847006	Três Ranchos	-18,5300	-47,8800	1470,99
1847008	Coromandel	-18,0700	-47,6300	1567,51
1847040	Fazenda São Domingos	-18,9500	-46,0000	1492,95
1945035	Abaete	-19,1600	-45,4400	1401,30
1945038	Porto das Andorinhas	-19,2800	-45,2900	1261,99
1945039	Martinho Campos	-19,3300	-45,2300	1177,46

Tabela A5 – ID, Código, nome, latitude e longitude das estações fluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Jequitinhonha.

ID	Código	Nome	Latitude	Longitude
1	54001000	Povoado de Vau	-18,42	-43,53
2	54010005	Vila Terra Branca Jusante	-17,31	-43,21
3	54110002	Fazenda Jambeiro - Grão Mogol	-16,59	-42,92
4	54150000	Porto Mandacaru	-16,68	-42,49
5	54165000	Ponte Vacaria	-16,19	-42,59
6	54193000	Rubelita	-16,41	-42,27
7	54195000	Barra do Salinas	-16,62	-42,31
8	54220000	São Gonçalo do Rio Preto	-18,01	-43,38
9	54225000	Senador Modestino	-17,95	-43,25
10	54230000	Carbonita	-17,58	-43,00
11	54234000	Itamarandiba	-18,09	-42,84
12	54235000	Ponte Mg-214	-17,64	-42,68
13	54260000	Ponte Alta	-17,28	-42,81
14	54300000	Minas Novas	-17,22	-42,60
15	54390000	Pega	-16,86	-42,35
16	54485000	Fazenda Facão	-16,97	-42,12
17	54500000	Araçuaí	-16,85	-42,08
18	54530000	Itira	-16,76	-42,00
19	54580000	Itaobim	-16,57	-41,50
20	54590000	São João Grande	-16,69	-41,50
21	54710000	Jequitinhonha	-16,43	-41,01
22	54730005	Fazenda Boa Sorte Jusante	-16,62	-41,03
23	54770000	Fazenda Cajueiro	-16,12	-40,74
24	54780000	Jacinto	-16,14	-40,31
25	54950000	Itapebi	-15,95	-39,52

Tabela A6 – Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Jequitinhonha

Código	Nome	Latitude	Longitude	Precipitação (mm)
1538001	Belmonte	-15,87	-38,89	1774,06
1539006	Itapebi	-15,96	-39,53	1173,19
1539010	Mascote	-15,56	-39,30	1439,13
1539014	Fazenda Nancy	-15,60	-39,52	1044,01
1539022	Camacan (Vargito)	-15,43	-39,49	1469,26
1540003	Inhobim	-15,34	-40,93	672,38
1540019	Jordania	-15,89	-40,17	898,11
1540020	Bandeira	-15,88	-40,56	1035,19
1541001	Cândido Sales	-15,51	-41,23	745,39
1541010	Itamarati	-15,58	-41,41	737,92
1541013	Vereda Do Paraíso	-15,49	-41,46	734,09
1542015	Rio Pardo De Minas	-15,60	-42,55	821,36
1542016	Serra Branca	-15,64	-42,94	676,45
1543013	Janaúba	-15,78	-43,28	735,80
1639000	Mundo Novo	-16,27	-39,58	1104,00
1640000	Jacinto	-16,14	-40,29	790,92
1640001	Fazenda Cajueiro	-16,12	-40,74	963,09

Tabela A6 – Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia do Jequitinhonha (Continuação)

Código	Nome	Latitude	Longitude	Precipitação (mm)
1640009	Rubim	-16,38	-40,54	827,20
1640010	Felisburgo	-16,63	-40,76	900,99
1640012	Jucuruçu	-16,84	-40,16	1040,41
1641001	Itaobim	-16,57	-41,50	692,70
1641002	Jequitinhonha	-16,43	-41,01	897,19
1641007	São João Grande	-16,69	-41,50	716,87
1641008	Pedra Azul (Fortaleza)	-16,00	-41,28	830,92
1641010	Itinga	-16,62	-41,77	691,97
1641011	Medina	-16,23	-41,48	818,54
1641012	Fazenda Boa Sorte Jusante	-16,60	-41,02	1042,03
1641013	Comercinho	-16,30	-41,79	769,16
1642002	Coronel Murta	-16,61	-42,19	740,07
1642007	Porto Mandacaru	-16,68	-42,49	838,82
1642013	Pega	-16,86	-42,35	764,43
1642014	Fazenda Jambeiro - Grão Mogol	-16,59	-42,92	953,31
1642026	Ponte Vacaria	-16,19	-42,59	1091,21
1642027	Barra do Salinas	-16,62	-42,31	764,09
1642028	Itira	-16,76	-42,01	672,93
1643020	Capitão Enéas	-16,32	-43,72	898,97
1740033	Águas Formosas	-17,08	-40,94	1151,76
1741001	Mucuri	-17,60	-41,49	992,08
1741003	Fazenda Diacui	-17,49	-41,24	1109,01
1741006	Ladainha (Efbm)	-17,63	-41,74	1057,28
1741013	Padre Paraíso	-17,07	-41,48	994,51
1742008	Carbonita	-17,58	-43,00	1020,81
1742014	Capelinha	-17,69	-42,53	1085,20
1742017	Malacacheta	-17,85	-42,08	1154,87
1742019	Água Boa	-17,99	-42,39	1047,94
1742020	Fazenda Facão	-16,97	-42,12	755,25
1742022	Ponte Alta	-17,28	-42,81	920,56
1742023	Minas Novas	-17,22	-42,59	877,13
1742025	Setubinha	-17,57	-42,14	881,25
1743002	Vila Terra Branca - Jusante	-17,31	-43,21	976,18
1743016	Itacambira	-17,07	-43,31	1062,68
1743018	Senador Modestino	-17,95	-43,25	1078,97
1744030	Estação de Curimatai	-18,00	-44,18	973,72
1842004	São Pedro do Suaçuí	-18,36	-42,60	1055,77
1842008	Santa Maria do Suaçuí	-18,20	-42,46	1158,63
1842020	São João Evangelista	-18,55	-42,76	1152,83
1843000	Usina Parauna	-18,64	-43,97	1118,54
1843002	Gouveia	-18,47	-43,74	1172,74
1843003	Mendanha - Montante	-18,11	-43,52	1132,44
1843011	Serro	-18,59	-43,41	1338,05
1843012	Rio Vermelho	-18,28	-43,00	1174,70
1843015	Povoado de Vau	-18,42	-43,53	1201,31
1844009	Presidente Juscelino - Jusante	-18,64	-44,05	1101,02
1943002	Conceição do Mato Dentro	-19,02	-43,44	1418,05